보안과제( ), 일반과제(○) / 공개(○), 비공개( )
해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 실용화 기술개발 기획연구 보고서

R&D / 2014-0077

해양 초고온 고세균 이용 바이오 수소 실용화 기술개발 기획연구

2014. 07

주관연구기관 / 한국해양과학기술원

해 양 수 산 부
한국해양과학기술진흥원

제 출 문

해양수산부 장관 귀하

이 보고서를 “해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 실용화 기술개발 기획연구” 과제의 보고서로 제출합니다.

2014. 07

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원
주관연구책임자 : 강 성 균
연 구 원 : 이정현, 박세헌
이현숙, 김태완
권개경, 강길모
진세준, 김민식
김미숙, 윤전희
김해진(엔솔테크), 김양선(엔솔테크)
나정걸(KIER), 이성곤(KIER)
정현태(포스코 건설), 이학로(RIST)
유승훈(서울과학기술대), 김구용(현대제철)

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>20140077</td><td>해당단계
연구기간</td><td>2014. 04. 25.
~07. 24.</td><td>단계구분</td><td>기획</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">해양수산연구기획사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 실용화 기술개발 기획연구</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">강 성 균</td><td>해당단계
참여
연구원수</td><td>총 : 명
내부 : 8 명
외부 : 명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부 : 5천만원
기업 : 천원
계 : 5천만원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참여
연구원수</td><td>총 : 명
내부 : 8 명
외부 : 명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 5천만원
기업 : 천원
계 : 5천만원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">한국해양과학기술원</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명 :</td><td colspan="2">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>236</td></tr>
<tr><td colspan="6">기획연구를 통해 연구비전 및 목표 설정, 핵심추진 연구과제 도출 및 연구개발 추진체계 제시 함.
○ 연구비전: 탈석유 시대 친환경 수소에너지 실용화로 블루오션시장 및 일자리 창출을 통해 창조경제 실현에 기여함.
○ 연구목표: 국내 원천생명자원인 해양 초고온 고세균 Thermococcus onnurineus NA1을 이용한 바이오수소 생산 데모플랜트 규모 실용화 기술 개발을 위한 타당성 검토 및 세부 추진계획 수립
○ 핵심추진 연구과제 도출, 성과목표 및 지표 제시
– 바이오수소생산 산업균주개발
: 수소비생산속도 500 mmol/g/h, 500시간 이상 안정적 수소생산
– 바이오수소 대량생산 프로세스개발
: 수소생산속도 400 mmol/l/h, CO전환율 85%, k_La 950h^{-1}, 150시간 이상 연속수소생산
– 원료물질확보
: 제철소부생가스 이용 150시간 이상 연속수소 생산, 합성가스 이용 수소생산 원천기술 개발
– 바이오수소 대량생산 데모플랜트 구축 및 실증생산
: 10톤 데모플랜트 구축, 일 200kg 수소생산, 연중 운전시간 500시간 이상, 사업성분석
– 논문 (SCI급) 48, 특허출원 28, 특허등록 18 건 이상</td></tr>
</table>

○ 연구개발 추진체계 – 1안: 기업주관 체계 하에 산학연 융합연구 – 2안: 민간기업 및 공공기관 주관의 사업단 체계 하에 산학연 융합연구 – 3안: 공사 등 정부주도 체계하에 산학연 융합연구 ○ 연구개발 추진 타당성 분석 및 예산 – 국가 계획과의 부합성, 유사과제 및 중복성검토를 통해 정책적 타당성 검토 – 현 기술수준 분석, 목표기술수준의 타당성 분석을 통해 기술적 타당성 검토 – 경제성 분석을 통한 경제적 타당성 검토 – 연구개발기간 및 예산: 4년간 총 268억 소요 예상 (정부 200억, 민간 68억)		
색인어 (각 5개 이상)	한글	해양 초고온 고세균, 바이오수소, 데모플랜트, 일산화탄소, 제철소부생가스
	영어	Marine hyperthermophilic Archaea, Bio-hydrogen, demo plant, carbon monoxide, steel mill by-product gas

1.1 기획연구 배경

자원 및 에너지 확보경쟁 심화

- 중국, 인도 등의 급성장에 따른 에너지·자원 수요 급증에 비해 공급은 한정되어 있어 에너지·자원 확보경쟁은 점차 심화될 전망
  - 세계에너지사용량 : 404천조 BTU[i](‘01) → 623천조 BTU(‘25) (미국에너지정보청(EIA))
  - 하루 원유 수요량 : 8,400만 배럴(‘05) → 1억 1,600만 배럴(‘30)
- 우리나라의 에너지수요는 향후 30년간 연 2.3% 증가가 예상되며, 현재 약 97%인 에너지 수입의존도도 지속될 것으로 예상
- 종교·문화적 차이로 인한 지속적인 갈등과 분쟁은 자원 공급 불안을 심화시키고, 자원의 무기화 가능성 증가
- 기후협약 등 친환경적 에너지 정책 의무화, 환경기준 강화 등에 따른 에너지산업의 재편이 불가피하며 이에 따라 신재생에너지, 친환경 관련 기술이 21세기 핵심기술로 부상 전망
- 지구온난화 등 범 지구적 환경문제 해결을 위해 향후 30년 동안 연간 1천억 달러 규모의 청정에너지 발전 플랜트 수요 전망
- 육상자원의 고갈 및 가채년수 감소로 해양자원으로의 관심 이동

환경오염과 기후변화

- 환경변화의 주요인인 지구온난화 현상으로 지구 평균기온 상승, 빙산 감소, 해수면 상승, 기상이변 및 사막화 등의 기후변화 현상이 발생하고, 한국 또한 아열대 기후로 변화 예상
  - 지난 100년간 지구평균기온이 0.74℃상승했으며 온도상승의 주요인으로 화석연료사용으로 인한 이산화탄소 배출량의 증가를 지적함(IPCC, ‘07)
  - 최근 35년(´68~´02년)간 한반도의 해수면 온도는 0.85℃ 상승, 해수면은 5.4mm가 상승하여 세계평균(2.8mm)의 약 2배의 가파른 상승을 보임
  - 또한 수온상승으로 우리나라 주변해역에 대형해파리, 다랑어(참치) 등 열대성 해양생물이 빈번하게 출현
- 우리나라는 온실가스 배출이 세계 10위권이며, 획기적 개선이 없을시 2020년까지 계속

i BTU: 에너지 및 열량 측정 단위인 British Thermal Unit의 약자로 252cal에 해당

증가하여 80%('00년 대비) 정도 늘어날 전망

- 지구온난화현상으로 인한 기후변화 및 물 수요 증가에 따라 이산화탄소 배출권이나 원유처럼 물도 거래되어 수급확보 경쟁이 치열해질 전망
  - 2050년대 2~3℃ 상승 시 10~20억 명 물부족 상태, 2080년대 3℃ 상승 시 11~32억 명 물부족 상태 직면(IPCC 4차 평가보고서, '07)
- 교토의정서 연장(DOHA 2012, COP18 · CMP8) 등 온실가스 저감 정책 지속과 에너지, 회소자원 등 국가간 자원확보 경쟁 심화로 각국의 기술보호 정책 강화
  - '12년 12월 카타르 '도하 기후 게이트웨이'의 통과로 교토 의정서는 '13년 1월부터 예전과 같은 효력을 가지며, 청정개발체계(CDM), 공동이행제도(JI), 배출권거래제도(ETS) 등은 '20년 말까지 교토의정서에 참여하는 선진국의 감축수단으로 인정
- 국가 CCS 종합추진계획에 따라 CO_2의 포집과 수송, 전환 등을 저장기술의 실증 사업화와 연계하는 방안 모색 중
  - '15년까지 CO_2 저장 부지를 선정해 '17년부터 CO_2 저장(주입)을 시작한다는 목표
  - 대규모 CO_2 저장소 확보를 위하여 울릉분지, 제주분지, 군산분지 등 국내 해양 퇴적층을 대상으로 저장소 탐사, 선정 및 특성화 연구를 수행 중임(총 19개 기관이 24개 과제를 담당하여 수행 중)

기술 융복합에 따른 신기술·신산업의 등장

- IT, NT, BT, MT 등 분야의 학제간 기술융합현상에 따른 신산업 창출 및 형태 변화 등 경제 · 사회에 혁신적 변화 유도 전망
- 기술수명주기의 단축과 투자 대형화에 따라 관련 연구개발서비스업의 성장 전망
- 다양한 분야의 기술 융복합으로 능동적 연계를 통한 시너지 창출

개방형 협력 및 융합기술혁신 활성화

- 국제 R&D 협력과 다자간 초대형 국제공동연구가 증가
- 글로벌 R&D 센터 유치를 위한 치열한 경쟁 전개
- 산 · 학 · 연 협력시스템 구축 강화
- 차세대 기술혁명을 주도할 학제간 융합기술혁신 활성화

지식재산권을 통한 기술패권주의 강화

- 신기술 분야에 규모의 경제가 세계시장 단위로 확산되어 국가간, 기업간, 또는 제휴기업 그룹 간 지식재산권을 통한 기술패권주의가 더욱 부각될 전망
- 글로벌화의 가속으로 소수의 세계적 표준(Global Standards)만이 생존하는 시대로 변화
  - 기술의 핵심·원천을 보유한 국가가 자국의 표준을 국제 규격화하려는 승자독식 체제 압박 강화
  - 투자규모의 확대, 다자간 협력 필요성 증대, 새로운 차원의 불확실성 감수 노력 등에 따라 과학기술 글로벌화의 진전은 더욱 가속화될 전망
- 지식재산권의 범위 확대로 인한 보호의 필요성 증대
  - 기존의 특허, 저작권 등에서 생명체, 의약품, 유전자, 사업방법 등으로 확대시키는 추세

1.2 기획연구 필요성

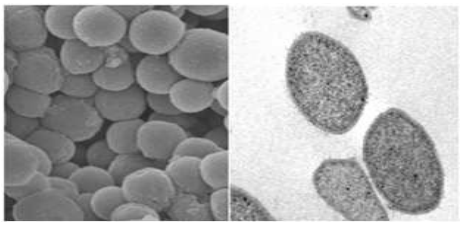
- 새로운 대체 에너지의 보급, 그린 에너지 개발의 시장 니즈에 부응한 새로운 부가가치 산업 창출의 필요성이 대두되고 수소경제는 전세계적 트렌드
  - 전 세계적으로 거래되는 수소는 약 5,000만톤/년으로 매년 10%씩 증가하고, 전력 및 에너지 분야 외에도 화학제품 원료, 식품공업, 전자부품 생산, 제철소, 탈황 및 정유공장의 가솔린 개질 등 산업 분야에 광범위하게 이용될 것으로 전망
  - 에너지 위기와 대체에너지 개발을 위한 지속적인 수소생산기술 개발
- RPS제도 확대 대비 최고 수소생산성 및 원가절감 해소의 핵심원천기술 확보
  - 전 세계적 CO_2 감축노력에 따라 장기적으로 신재생자원을 이용한 친환경 수소생산기술개발에 대한 필요성이 증대되면서 수소의 생산비용을 낮춰 생산할 수 있는 새로운 기술이 절실히 요망
- R&BD 모델제시로 창조경제 실현과 블루오션 시장 창출 노력이 대두
  - 한국 고유의 원천소재/기술이용 바이오수소생산은 신성장동력 및 미래경쟁력

1.3 국내·외 기술개발 동향

기술개발 동향

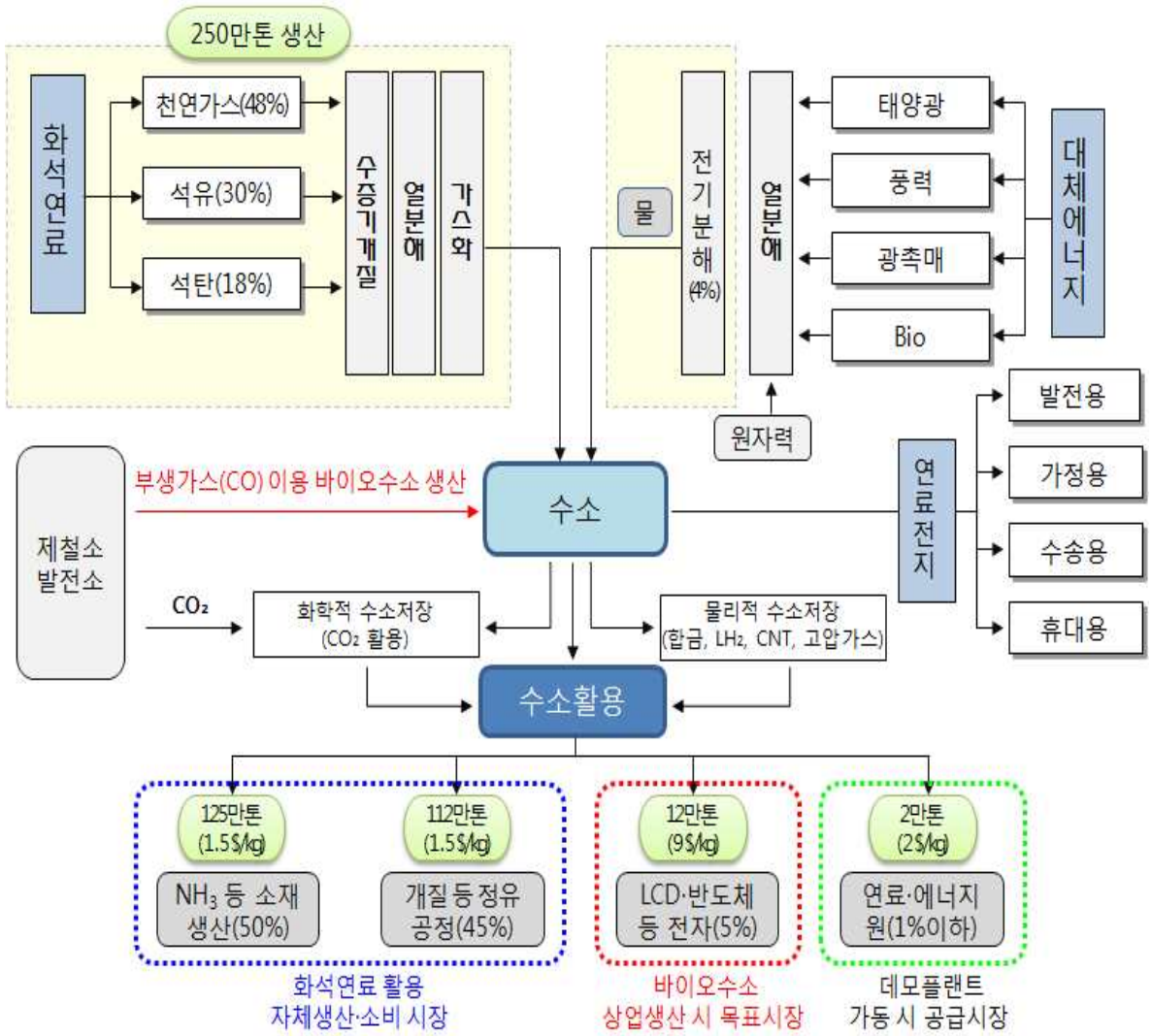
- 해양과기원 심해열수구 유래 초고온 고세균 NA1(특허) 균주 반응기에 제철소로부터 배출되는 부생가스(CO) 이용 바이오수소 대량생산 기술 개발 추진 중
  - 기존 유기물 원료의 수소생산율 보다 15배 향상된 경제적 대량생산기술 확보
  - 국내 순수 원천기술로서 NA1 채취·분리·작용기전 분석, 우수균주 보유 등으로 기술사업화에 따른 로얄티 지불이 불필요

<심해 열수구 서식처(1,650m)>


<고온성 고세균 NA1 전자현미경 사진>

<NA1 우수균주개발>

- 전세계적으로 수소 생산량은 약 1억톤(약 150조원), 국내는 약 250만톤(약 3.8조원) 규모('12)
  - 수소생산방식은 천연가스(48%), 석유(30%), 석탄(18%), 물전기분해(4%)로 생산되고 있으며, 자체 소비는 95%, 시장 거래는 5%(약 12만톤)



- 차세대 청정에너지원에 세계가 주목
  - 아시아태평양경제협력체(APEC)는 바이오에탄올('20년까지)→ 수소('30년까지)의 단계로 기술개발 진행을 전망
  - 수소연료전지의 경우 美, 日, EU 중심으로 연간 10억 달러 규모의 R&D프로그램 진행 중
  - ㈜현대자동차는 세계 최초로 수소연료전지 자동차 양산, '15년까지 1,000대 판매계획 발표

    * '20년 수소연료자동차는 약 280만대 판매로 약 239억 달러 시장 형성 전망

- 석유·석탄·천연가스 대체 수준의 경제성 확보를 위하여 기업과 연계한 상용 데모플랜트 구축·운용을 통한 공정 효율성 제고의 실증연구 필요

  * 화석연료 이용방식: 1.5US$/kg, 해양바이오수소 이용방식: 3US$/kg

구 분	내 용
[미국]	■ '01년부터 수소에너지 연구개발을 포함한 국가 에너지 정책 (National Energy Policy)을 발표하는 등 에너지와 환경 문제 집중 지원 ■ 5년 간 12억$ 규모의"Hydrogen Fuel Initiative"를 시작으로 연구개발 규모를 비약적으로 증가('03)" ■ "Freedom Car and Fuel cell Program"을 통해 5억$ 투자 증액
[EU]	■ 20~30년 이내 신재생 에너지와 수소 연료전지를 통한 에너지 공급체계로의 전환을 목표로 설정 – 교토 의정서에 따른 온실가스 배출 저감 및 에너지 공급 안정성과 기업체의 경쟁력 향상에 지원 ■ 신재생에너지 6개년 프로그램 (Renewable Energy Sixth Famework Programme)을 통해 수소에너지 연구개발에 약 1.2억만$ 지원('02~'07년) ■ 유럽 내 국가의 연구비 투자 규모는 독일이 7.2천만€, 프랑스 6천만€, 영국과 이탈리아는 각각 3천만€('05년 기준)
[일본]	■ 교토 의정서를 통해 협약된 '10까지 6%의 온실감축, 원유 수입 의존 과다, 신에너지 기술 경쟁력 선두 위치 확보 등의 목표실현을 위해 수소 에너지 개발에 많은 투자 ■ 최근 '20년까지 진행될 차기 프로젝트 (Development of Fundamental Technologies in the Safe Utilization of Hydrogen)에 수소 에너지 인프라 확산 등이 포함된 정책지원 방안 발표
[한국]	■ 미래창조과학부에서 '03년 출범시킨 '고효율 수소에너지 제조・저장・이용 기술개발 프론티어 사업단'을 통해 10년간 약 1,000억원의 R&D 투자 지원 – 수소제조, 운반, 저장기술과 실용화, 그리고 개발된 기술의 상용화를 위한 표준화 등의 연구 사업 추진

특허동향

● '96년 이후부터 출원되기 시작하여 '00년대 후반부터 급격히 증가하고, CO의 생물학적 전환 관련 특허는 미국특허가 전체의 47%(46건)를 차지하고 있으며 한국특허 28%(27건), 일본특허 20%(20건)를 점유

– 공정분류별로는, 반응기 42%, 알코올・유기산 27%, 배기가스처리/활성유지 등 12%, 수소 8%, 가스전처리·배지 5%, 종균 1% 점유율 순

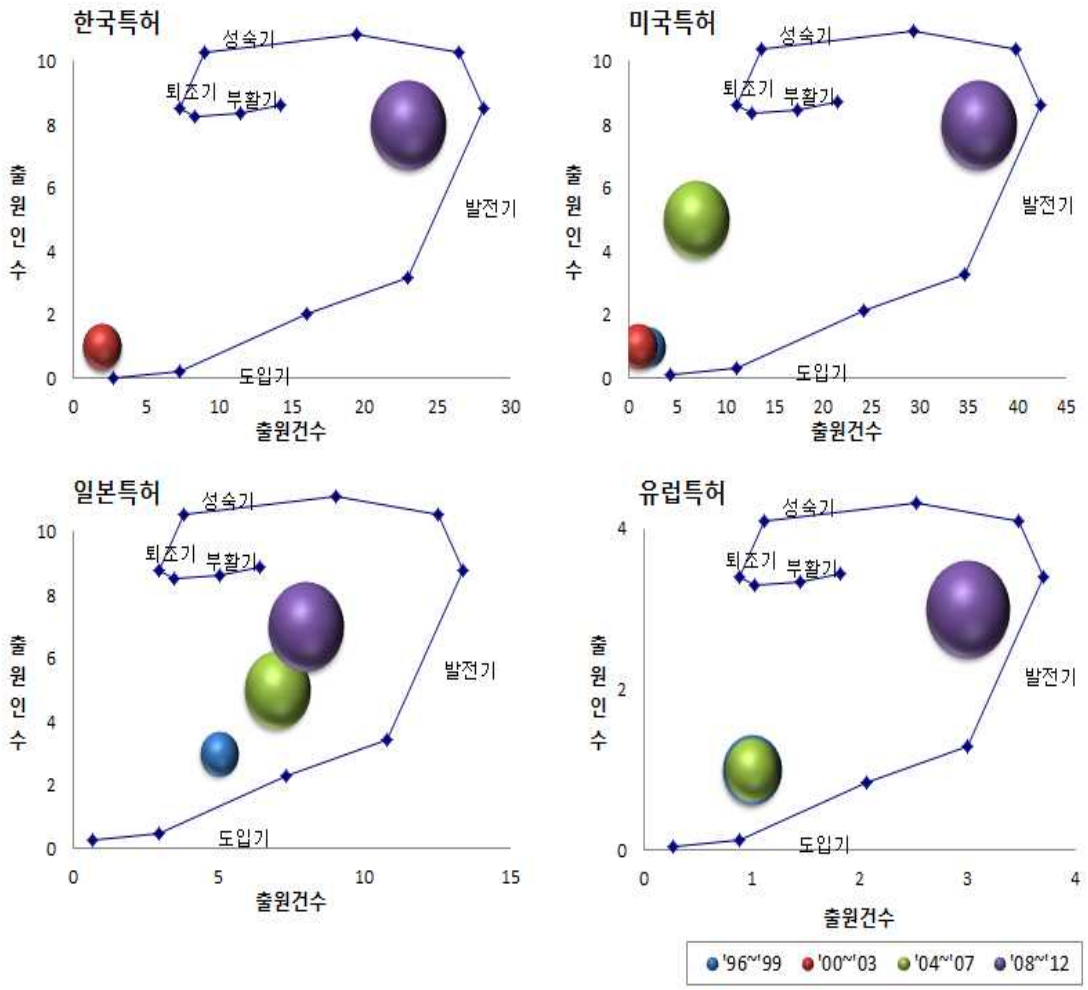
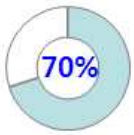
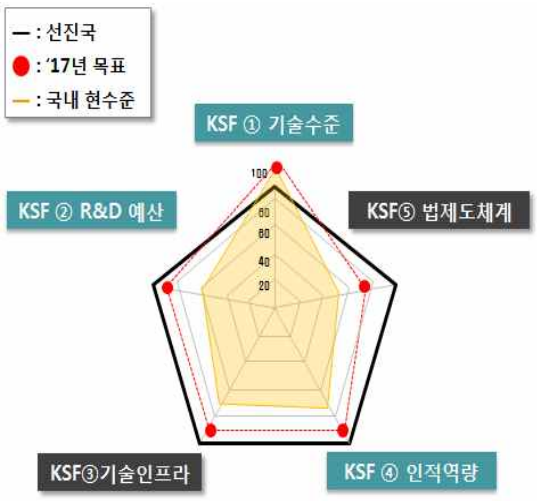


그림 1 국가별 특허의 출원인수/출원건수에 따른 기술발전위치

보유역량 및 전망

- 바이오수소 분야의 핵심성공요인(Key Success Factor, KSF)을 통한 수준은 세계 최고 수준 대비 72%의 역량 보유로 평가
  - 기술수준, R&D예산, 기술인프라, 인적역량, 법제도체계 등 5개 요인으로 평가
- 수소연료전지 등 수소활용 분야의 시장 확대가 이어진다면 해양바이오수소 시장 잠재력은 약 1,300억원 수준으로 전망

핵심성공요인	선진국과의 역량비교	역량평가
KSF #1 기술수준	○ 수소 생산성은 세계 1위 독보적인 경쟁력 보유 ○ 기존 화석연료 대비 가격 경쟁력은 열세 ○ 향후 생산성 제고를 통한 가격 경쟁력은 밝은 전망	
KSF #2 R&D 예산	○ 정부차원의 적극적인 투자 확대 계획 ○ 민간기업의 적극적인 투자 및 참여 미흡	
KSF #3 기술 인프라	○ 실증데모플랜트 구축을 위한 인프라 부족 ○ 상업화 개발을 위한 기술·시스템 현장검증 어려움	
KSF #4 인적역량	○ 우수연구 인력의 전문성은 세계적 수준 ○ 교육 및 전문인력양성 시스템은 미비	
KSF #5 법제도 체계	○ RPS, RFS 제도 적용기술로 법개정이 요망 ○ 사업화 금융지원시스템, 기술정보지원 네트워크 구축 필요	



개발속성	개선 여지	매력도/ 중요성 Vector	개선 용이성	적정 목표 수준	'17년 목표
수소 생산성	Hi	Hi	Hi	↑↑↑	1위
경제성	Mid	Hi	Hi	↑↑↑	경쟁력 제고
친환경성	Lo	Lo	Lo	↔	RPS 제도 인증
시장성	Lo	Mid	Lo	↑↑↑	국내 수요 대응
안전성	Hi	Hi	Hi	↑↑↑	1위
기술 수출성	Mid	Hi	Mid	↔	기술 지원

↑↑↑ 대폭강화 ↔ 현순위유지 ↓↓↓ 대폭축소

❙그림 2❙ 선진국 대비 기술 포트폴리오

❙그림 3❙ 개발 속성별 목표수준

1.4 연구목표 및 주요내용

1.4.1 연구목표

- 국내 원천생명자원인 해양 초고온 고세균 Thermococcus onnurineus NA1을 이용한 바이오수소 생산 데모플랜트 규모 실용화 기술 개발을 위한 타당성 검토 및 세부 추진계획 수립

1.4.2 연구의 주요내용

사업비

- 총 소요액 : 268억원(해수부 200, 민간 68)
  - 시설비 : 29억원(해양수산부 20, 민간 9)
  - 연구개발비 : 239억원(해양수산부 180 민간 59)

구분		2015년	2016년	2017년	2018년	계
연차별 연구비 (단위: 억원)	정부	40	40	60	60	200
	민간	7	19	24	18	68
총 계		47	59	84	78	268

● 세부내역(4년간('15~'18))

추진전략	중점 추진과제	'15	'16	'17	'18	계(억원)
바이오 수소생산 산업균주 개발	○ 대사 재설계 수소생산 맞춤형 산업균주 개발	4	4	4	3	15
	○ 개발 균주 장시간 안정성 평가	5	5	5	5	20
대량생산 프로세스 개발	○ 바이오수소 연속생산 공정 개발 및 최적화	7	7	6	5	25
	○ CO 물질전달효율 극대화	3	5	9	8	25
	○ 장기연속 대량생산 기술개발	–	5	7	8	20
원료물질 확보	○ 제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발	3	4	5	8	20
	○ 석탄가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술 개발	3	2	2	4	11
	○ (해양)바이오매스 가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술 개발	2	2	3	4	11
데모플랜트 구축 및 실증생산	○ 10톤 규모 대량생산 데모 플랜트 설계·시공기술	20	15	–	–	35
	○ 대량생산 공정 스케일 업 연구	–	10	35	23	68
	○ 데모 플랜트 실증생산 및 경제성, 사업성 분석	–	–	8	10	18
총 계		47	59	84	78	268

연도별 추진 일정

● 2015~2016년: 10톤 데모플랜트 스케일업 연구, 설계・시공

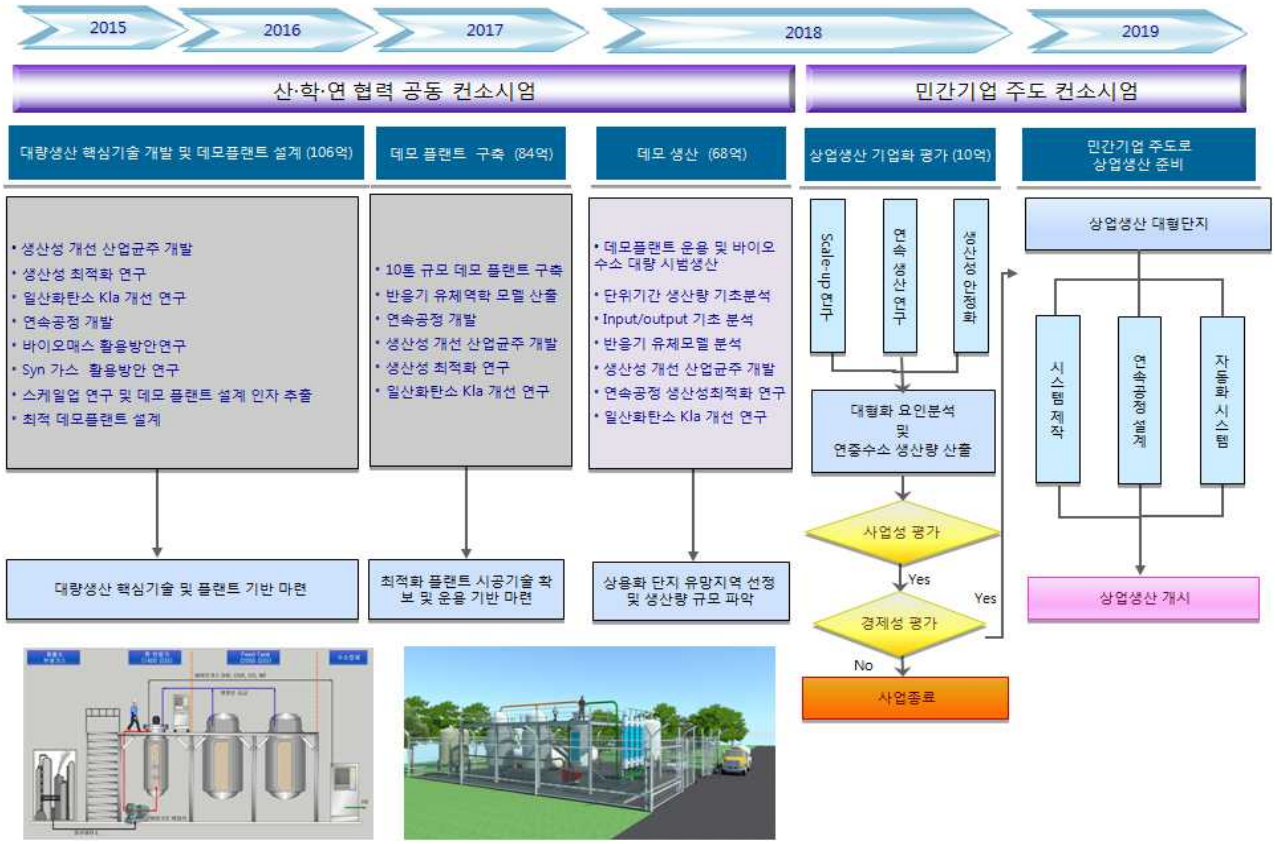
● 2017~2018년: 데모플랜트 구축 및 시범 운전, 바이오수소 대량 실증생산

● 2019년: 바이오수소 대량생산기술 확보 및 사업성, 경제성 분석

– 해양바이오수소 대량생산기술 확보(100톤/년)

* 전기 생산시 400가구의 1년 전력소비량 또는 수소자동차 500대 1년 운행 가능량 (가정: 자동차 1년 2만km 주행, 수소 1kg당 100km 주행)

● 2020년: 민간기업 상업생산



사업단 운영

● 관련 연구 전문기관 및 산업체의 국가역량이 집중된 산·학·연 연구체계로 수행

– 다년간의 해양바이오수소 기술개발 연구 역량을 감안하여 한국해양과학기술원, 민간 대표기업, 공사 등이 주관연구기관을 담당하고 세부 추진전략별로 전문성을 보유한 출연(연), 대학, 민간기업이 협업하여 수행하는 산・학・연 융합연구체계로 구성

* (주관연구기관) R&D 단계별 목표 및 계획, 예산, 조직(사무국, 운영위원회, 심의위원회) 등 전담 주요 인력 운영 등 총괄

– 명칭은 (가칭) '해양바이오수소개발사업단'으로 추진하고, 주관연구기관은 1안) 정부주도(공사 등), 2안) 공공기관+민간기업(법인), 3안) 민간주도 등의 3개 방안으로 검토

* (민간기업) 해양바이오수소개발을 통하여 상용화 비즈니스 역량을 보유한 산업체 중심으로 수행

* 포스코건설(주), 포스코엔지니어링(주), 포스코(주), 현대제철(주), 엔솔테크(주) 등과의 기술이전 후 기업의 자체사업화, 기술 실용화 및 정부사업화 지원 수행

* 민간기업 참여시 incentive 제공으로 민간유치 적극 유도. 타부처 실용화사업 (예시. 데모플랜트 구축사업) 벤치마킹필요

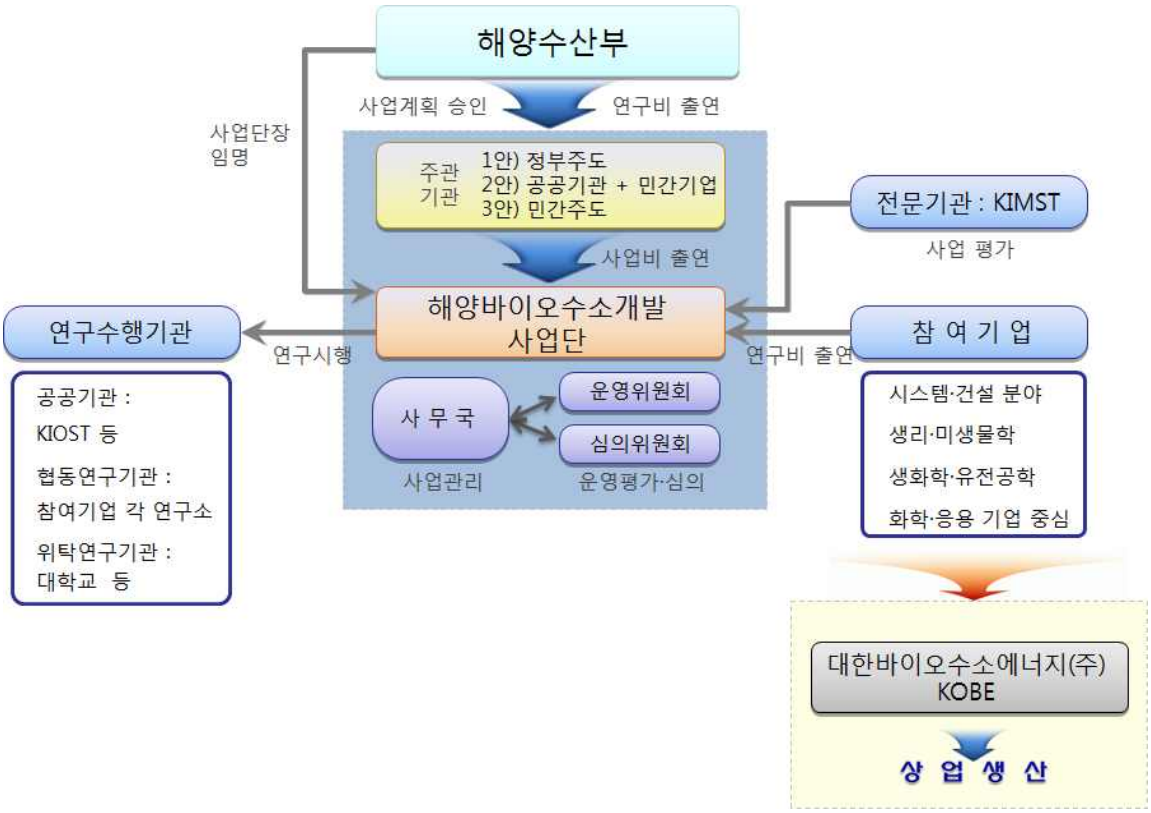
– 관리감독은 해양수산부의 R&D사업을 평가하는 한국해양과학기술진흥원(KIMST)로 추진

– 산업균주개발, 반응기 개발 및 공정 최적화, 원료물질 확보, 스케일업 등의 핵심기술 개발을 위하여 연구개발 경험 및 역량을 보유한 한국에너지기술연구원, 한국기초과학지원연구원, 포항산업과학연구원(RIST), 고등기술연구원 등의 전문연구기관을 참여시켜 유기적인 기술정보 교류협력 관계를 구축

● 연구분야는 시스템·건설, 생리·미생물, 생화학·유전공학, 응용화학 등으로 구성

– 4대 분야, 12개 세부기술(8개 중점연구, 4개 위탁)

※ 데모플랜트 사업 완료(2019년) 후 ⇒ (가칭)대한바이오수소에너지(주)



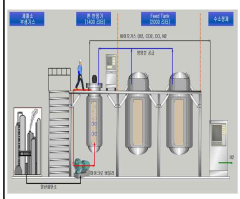
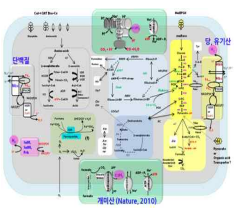
운영전략

● 국내 수소 생산규모인 약 250만톤(2012기준, 약 3.8조원)에 선제적으로 대응하면서 수소활용 분야의 시장 확대에 발맞추어 탄력적으로 생산규모 확대 추진

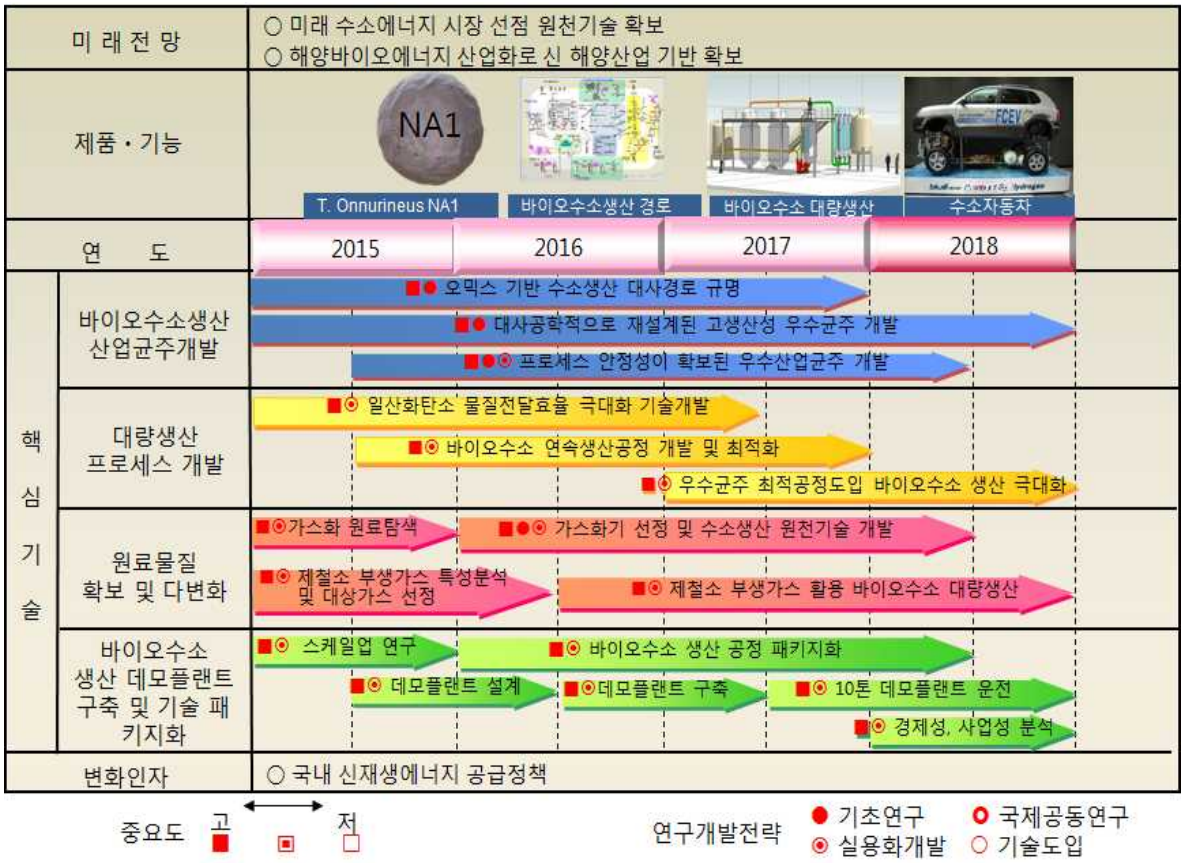
– 수소활용 분야는 암모니아 등 소재생산에 약 50%, 탈황, 개질 등 정유공정에 45%, LCD·반도체 등 전자·석유화학에 5%, 그리고 연료·에너지원에 1% 이하가 활용되고 있음

- 이에, 본 해양바이오수소개발 사업은 반응기 10톤 규모의 데모 플랜트 시범생산을 통하여 연간 100톤 규모의 수소를 생산하여 kg당 2US$에 거래되고 있는 연료·에너지원 분야(시장 규모 2만톤, 시장 점유율 1% 이하) 시장에 공급
- 이후, 기술이전을 통한 민간기업 중심의 상업화 단계에서는 kg당 9US$(100% 순수 수소)에 거래되고 있는 LCD·반도체 등 전자·석유화학 분야(시장 규모 25만톤, 시장 점유율 5%) 시장에 '25년까지 수소시장 점유율 3%를 목표로 공급
  - 수소시장 점유율: ('20) 25,000톤(수요 1%) → ('25) 75,000톤 (수요 3%) → ('30) 250,000톤 (수요 10%)

성과목표 및 지표

연번	핵심타깃기술명	핵심 기술명	핵심성능지표	현재기술 수준비교			기술개발 목표		연구수행 기관
				국내	세계 수준	최종 요구	1단계 ('15~'17)	2단계 ('18~'19)	
1	데모플랜트 구축 및 운용 	시스템 설계 기술	반응기 규모 (m^3)	–	–	10	–	10	기업+KIOST +위탁
		시스템 운용기술	연중 운전시간 (시간)	–	–	500	–	500	기업
			연속 수소생산 (시간)	–	–	150	–	150	기업
		대량 생산 기술	일일 수소생산량 (kg)	–	–	200	–	200	기업
2	프로세스 최적화	공정 최적화	수소생산성 (mmol/L/h)	240	118	400	350	400	KIOST +위탁
		공정 최적화	CO 전환율 (%)	60	80	85	75	85	KIOST +위탁
		공정 최적화	CO 물질전달효율 (h^{-1})	580	945	950	950	950	KIOST +위탁
3	산업균주개발 	우수균주 개발	수소생산성 (mmol/g/h)	330	48	500	430	500	KIOST
		산업균주 개발	수소선택도	0.9~1.0	0.95	>0.95	>0.95	>0.95	KIOST

실행로드맵



경제적 타당성 분석

경제성 분석의 주요 전제

- 총 투자기간: 3년(플랜트 건설 2년, 테스트 가동 0.5년, 시범생산(50%) 0.5년)
  - 총 개발계획: 2년의 플랜트 건설기간, 테스트 가동 0.5년, 시범생산(50%) 0.5년, – 인플레율: 최근 5년('08년~'12년)의 평균치인 3% 적용
- 기술 파라미터의 가정
  - 제철소로부터 배출된 배기가스를 이용해 일산화탄소(CO) 투입 유량과 균주농도를 활용하여 수소 생산성을 향상시켜 상업적 생산에 따른 경제성을 확보 가능성 평가
    - 개발 시스템은 반응시스템, 분리시스템, 압축시스템, 파이프라인 수송, 환경수처리 설비 등으로 구성

● 경제 파라미터의 가정

– 기준년도: 2012년

– 사회적 할인율: 기획재정부 지침에 따라 5.5% 적용

– 원가요소 설정: 변동비(수도광열비), 감가상각비(잔존가치율 5% 적용), 수선비(제조설비 투자액 5%), 인건비(필요 노무량 산정), 손해보험비(제조설비 투자액 1%), 재산·종합토지세(과세표준액 0.3%), 금리(연 4%, 차입금은 12년내 변재), 일반관리비(운전비용 5.5%), 공장관리비·잡비(제조설비 투자액 0.5%), 원천징수세(총판매액 10%), 법인세(25%), 지방세(법인세의 10%)

– 수소가격: '12년 평균치 US$4/kg 적용

경제성 분석 결과

● 상업적 개발 가능성(수소 가격 US $4/kg, 10,000톤 처리용량(수소함량 28.4%))

– 수소 생산성 4.9 H2 L/L/h 규모로 연간 26,250톤

● NA1 균주를 활용하여 수소 생산성 4.9H2 L/L/h 규모로 연간 26,250톤의 수소가스를 생산한다면, 자본회수기간(Payback Periods) 6.4년, 순 현재가치(NPV) 812억원, 내부수익률(IRR) 26.2%로 나타나서 해양바이오수소개발 사업은 높은 경제적 이익이 기대될 수 있는 것으로 분석

* 신규개발사업인 경우는 위험요소를 감안하여 민간기업의 측면에서는 내부수익률(IRR) 20%를 일반적으로 요구

● 총 투자비 1,706억원을 통하여 연간 26,250톤의 수소(H_2)생산으로 매년 1,200억원씩 20년간 총 2조 4,000억원의 매출수익 달성 기대

Sensitivity factor	바이오수소개발		
수소 생산성	Payback periods (year)	NPV (억원)	IRR (%)
4.9 H_2 L/L/h	6.4	812	26.2

경제적 파급효과 분석

- '13년에 한국은행에서 발표된 2011년도 산업연관표를 이용하여 해양바이오에너지개발사업 부문을 별도로 추계한 다음 경제적 파급효과를 추정하였으며, 2012년부터 2039년까지 28년 동안 공사비용 및 운영비용 부문에 투입될 총 투자비 2,234억원에 대한 총 효과를 추정하여 [그림 4]에 종합화하여 제시
- 본 사업의 총 사업비 1,706억원의 투자로 인해 발생되는 생산유발효과는 총 2,364.4억원, 부가가치 유발효과는 총 691.1억원, 취업유발효과는 총 765명에 달하는 것으로 분석되었음

	자기 산업 효과	타 산업 효과	총 효과
생산 유발효과	1.0000원 1,706억원	0.3859원 658.4억원	1.3859원 2,364.4억원
부가가치 유발효과	0.2388원 407.4억원	0.1358원 231.7억원	0.3746원 691.1억원
고용 유발효과	10억원당 2.4256명 413.8명	10억원당 2.0614명 351.7명	10억원당 4.4870명 765.5명

그림 4 해양바이오수소개발 사업의 경제적 파급효과 종합 분석

기대효과

경제·산업적 측면

- 매년 1,200억원씩 20년간 총 2조 4,000억원의 매출 달성
- 바이오수소의 1%(약 2.6만톤) 국내 생산으로 수입대체 효과
- 생산유발효과 2,360억원, 부가가치 창출 640억원, 일자리창출효과 770명
- 지역경제 활성화를 위한 신 해양산업 기반 확보 및 지역균형발전

기술·사회적 측면

- 선제적 기술개발을 통한 글로벌 기후변화 대응 및 에너지자원 다양화
- 차세대 바이오연료 기술 강국 진입
- 세계 최초 폐자원(CO) 플러스 바이오수소의 융합형 생산 모델 제시
- 부생가스 이용 친환경 청정에너지 상용화 생산 기술 확보

CONTENTS 목차

※ 요약문 ····· I

1. 사업개요 ····· 1

1.1 연구배경 ····· 1

1.2 연구의 필요성 ····· 23

1.3 연구개요 ····· 34

1.4 기획연구의 추진방법 및 체계 ····· 36

2. 환경 및 역량분석 ····· 41

2.1 환경 분석 및 이슈 도출 ····· 41

2.1.1 환경변화 분석 ····· 41

2.1.2 이슈분석 ····· 42

2.1.3 핵심기술군 도출 ····· 45

2.2 국내·외 동향 분석 ····· 49

2.2.1 수소개발 및 활용 현황 ····· 49

2.2.2 기술개발 동향 ····· 75

2.2.3 특허동향 ····· 106

2.2.4 정책동향 ····· 109

2.3 기술수준 및 역량분석 ····· 119

2.3.1 기술수준 분석 ····· 119

2.3.2 미래시장 대응 역량분석 ····· 120

2.3.3 보유역량 및 전망 ····· 126

3. 발전계획 ····· 128
3.1 비전 및 목표 ····· 128
3.2 연구성과 분석 ····· 129
3.3 추진전략과 과제 ····· 132
3.3.1 바이오수소 생산 산업균주 개발 ····· 132
3.3.2 바이오수소 대량생산 프로세스 개발 ····· 137
3.3.3 원료물질 확보 ····· 159
3.3.4 바이오수소 생산 데모플랜트 구축 및 실증생산 ····· 163
3.3.5 연차별 성과지표 ····· 165
3.4 데모 플랜트 실시계획 ····· 168
3.4.1 사양 도출 ····· 168
3.4.2 기술트리(Technology Tree) ····· 174
3.5 실행 로드맵 및 포트폴리오 ····· 175
3.5.1 실행 로드맵 ····· 175
3.5.2 핵심목표별 포트폴리오 ····· 176
3.6 2020 청사진 ····· 177

4. 추진계획 및 전략 ····· 178
4.1 추진계획 ····· 178
4.1.1 추진방향 ····· 178
4.1.2 추진체계 ····· 179
4.2 운영주체 및 방식 ····· 182
4.2.1 고려요소 ····· 182
4.2.2 운영주체별 운영체계와 운영근거 ····· 182
4.2.3 운영방법 ····· 186
4.2.4 운영방식 ····· 187

4.3 개발사업 구조(안) ····· 191
4.3.1 주요기능 ····· 198
4.3.2 조직 ····· 198
4.3.3 주요업무 및 인원 구성 ····· 199
4.4 단계별 운영전략 ····· 201
4.4.1 1단계: 기반조성건설 단계(2015년) ····· 201
4.4.2 2단계: 발전 단계(2016~2018년) ····· 201
4.4.3 3단계: 산업화 단계(2019년~) ····· 202
4.5 투자 총괄표 ····· 203

5. 사업 타당성 분석 ····· 205
5.1 정책적 타당성 검토 ····· 205
5.2 기술적 타당성 검토 ····· 208
5.2.1 기존 연구사업과의 중복 및 연계성 ····· 208
5.2.2 기술개발의 성공 가능성 ····· 211
5.2.3 기술개발 위협요인 검토 ····· 213
5.3 경제적 타당성 검토 ····· 214
5.3.1 경제성 분석의 주요 전제 ····· 214
5.3.2 경제성 분석 방법 ····· 216
5.3.3 경제성 분석 결과 ····· 221

6. 활용방안 및 기대효과 ····· 226
6.1 연구개발결과의 활용방안 ····· 226
6.2 연구개발의 기대효과 ····· 230

7. 정책제언 ····· 232
7.1 사업화/실용화 방안 ····· 232
7.2 건의사항 ····· 235

8. 참고문헌 ····· 237

9. 과제제안요구서 (RFP) (안) ····· 240

부록. 수소시장 전망 분석 ····· 247

그림목차

<그림 1-1> 에너지소비 상승 시나리오 ····· 1
<그림 1-2> 1970년도 이후 국제유가 추이 ····· 2
<그림 1-3> 우리나라의 에너지 생산 및 공급 흐름도(2009) ····· 2
<그림 1-4> 우리나라의 일차 에너지 계획의 목표 ····· 3
<그림 1-5> 지구온난화에 영향을 미치는 가스들의 양적추이 ····· 4
<그림 1-6> 세계 이산화탄소 증가와 평균온도 상승 추이 ····· 4
<그림 1-7> 부생가스활용 바이오수소 생산기술 개요 ····· 34
<그림 1-8> 부생가스활용 바이오수소 생산기술 목표 및 비젼 ····· 35
<그림 1-9> 장단기 미래이슈 및 미래니즈와의 연계 ····· 45
<그림 1-10> 해양바이오수소개발 연구 주요 분야의 미래니즈와의 연계 ··· 46
<그림 1-11> 해양바이오수소개발 연구의 주요적용 분야 및 핵심기술 ····· 47
<그림 2-1> 수소 저장 방법 ····· 57
<그림 2-2> 수소 수송 방법 ····· 58
<그림 2-3> 국내 수소스테이션 운영 ····· 59
<그림 2-4> 연료전지 구성 및 가치사슬 ····· 63
<그림 2-5> 전 세계 지역별 연료전지 보급현황 ····· 64
<그림 2-6> 종류별 세계 연료전지 선적 현황 ····· 65
<그림 2-7> 발전용 연료전지 ····· 66
<그림 2-8> 글로벌 연료전지 생산량 ····· 66
<그림 2-9> 세계 연료전지 Supply Chain ····· 67
<그림 2-10> 연료전지 산업 투자 ····· 70
<그림 2-11> 국내 연료전지 Supply Chain ····· 71
<그림 2-12> 국내 연료전지 ····· 72
<그림 2-13> 후지경제의 연료전지 시장 전망 ····· 73
<그림 2-14> 국내 바이오수소 발효생산기술 R&D 투자 현황(2002-2013년) ····· 78
<그림 2-15> 미래부 바이오생산 상용화 로드맵 ····· 80
<그림 2-16> 캐나다 NRCC 35 L 규모 일산화탄소 이용 바이오수소 생산 87
<그림 2-17> 중국 HBR 수소생산 시스템 ····· 88
<그림 2-18> 대만 FCU팀 파일롯 규모 바이오수소 생산시스템 ····· 89

<그림 2-19> 혐기성 암발효를 통한 바이오수소 생산성 비교 ····· 96
<그림 2-20> 혐기성 광발효를 통한 바이오수소 생산성 비교····· 97
<그림 2-21> 대장균을 이용 대사경로 재설계를 통한 우수균주 개발 현황····· 102
<그림 2-22> 대장균을 이용한 바이오수소 생산성····· 103
<그림 2-23> GOLD (Bioinformatics 15, 1999) DB의 유전체 현황 분석 105
<그림 2-24> 연도별/국가별 특허출원동향····· 107
<그림 2-25> 국가별 특허의 출원인수/출원건수에 따른 기술발전위치····· 108
<그림 2-26> 생물학적 CO 전환 기술의 분류별 점유율····· 109
<그림 2-27> 제3차 과학기술기본계획 ····· 112
<그림 2-28> 제2차 해양수산발전기본계획····· 113
<그림 2-29> 2020 해양과학기술(MT) 로드맵····· 113
<그림 2-30> 2020 해양수산 중장기 계획····· 114
<그림 2-31> TRL 수준과 기술 개발 단계 상관관계····· 121
<그림 2-32> 선진국 대비 기술 포트폴리오····· 127
<그림 2-33> 개발 속성별 목표수준····· 127
<그림 3-1> 바이오수소 실증생산 플랜트 구축 준공식 및 시설····· 130
<그림 3-2> 산업균주개발 모식도 ····· 135
<그림 3-3> 여러 가지 세라믹 필터 ····· 141
<그림 3-4> 세라믹 내부필터를 이용한 고농도배양시스템 개념도 및 필터 장착 사진····· 142
<그림 3-5> 외부필터를 이용한 고농도배양시스템 개념도 ····· 143
<그림 3-6> Micro-bubbler 반응기를 이용한 NA1의 수소 생산 다단 시스템····· 144
<그림 3-7> 단 키모스탯 시스템····· 144
<그림 3-8> Micro-bubbler 장착 사진····· 147
<그림 3-9> Micro-bubbler 발생 원리 ····· 147
<그림 3-10> Regular bubbles and micro-nano bubbles과의 부유흡착 특징 비교····· 148
<그림 3-11> Micro-bubbler system과 Multi-nozzle Micro-bubbler system 비교····· 153
<그림 3-12> Schematic representation of an airlift bioreactor with external recirculation····· 153
<그림 3-13> 용해-확산 메커니즘에 따른 고분자 분리막의 기체 투과 원리 개략도·· 154
<그림 3-14> Prism separator module과 실제 공정 적용 사진····· 155
<그림 3-15> H2 및 CO2 회수 공정을 이용한 CO의 recycle 공정 개념도···· 158

<그림 3-16> 국내 민간연구소 설치 가스화기 용량 ····· 161
<그림 3-17> 부생가스/합성가스를 활용한 바이오수소 생산 모식도 ····· 162
<그림 3-18> 바이오수소 반응시스템 설계 ····· 168
<그림 3-19> 해양바이오수소개발 사업 조감도 ····· 170
<그림 3-20> 균주배양 및 바이오수소 분석 연구장비 ····· 172
<그림 3-21> 바이오수소 생산, 활용장비 ····· 173
<그림 3-22> 해양바이오수소 실용화기술개발 실행 로드맵 ····· 174
<그림 3-23> 해양바이오수소생산 기술 트리 ····· 175
<그림 4-1> 부생가스이용 바이오수소생산 및 활용계획 ····· 179
<그림 4-2> 기업주관 추진체계 ····· 180
<그림 4-3> 사업단 추진체계 ····· 181
<그림 4-4> 사업추진 체계도 ····· 193
<그림 4-5> 해양바이오수소개발 사업단의 조직도 ····· 199
<그림 5-1> 박근혜 정부 국정 비전 및 국정 목표 ····· 205
<그림 5-2> NTIS 유사과제 검색결과 ····· 210
<그림 5-3> 반응시스템 공정도 ····· 217
<그림 5-4> 압축시스템 공정도 ····· 218
<그림 5-5> 배수처리설비 공정도 및 배치도 ····· 219
<그림 5-6> 해양바이오에너지개발 사업의 경제적 파급효과 분석 흐름도 ····· 223
<그림 5-7> 해양바이오수소 개발사업의 경제적 파급효과 종합화 ····· 225
<그림 6-1> 포항 수소연료전지타운 조성 설치 예정지 ····· 229

표목차

<표 1-1> 주요국가의 기후변화 방지대책 ····· 5
<표 1-2> 에너지부문 녹색성장을 위한 5대 비전 수립 ····· 7
<표 1-3> 4대 전략 및 10대 이행과제 수립 ····· 8
<표 1-4> 미국의 RFS 정책 ····· 11
<표 1-5> 주요국가의 신재생에너지 투자 현황 ····· 16
<표 1-6> 주요국의 신재생에너지 규제 및 정책시행 ····· 17
<표 1-7> 주요국의 신재생에너지 규제 및 정책시행 ····· 18
<표 1-8> 국가별 바이오연료 생산량(2007) ····· 19
<표 1-9> 연구비 100만원 당 기술이전 계약건수 ('07~'11) ····· 22
<표 1-10> Comparison of energy per unit mass ····· 24
<표 1-11> 다양한 미생물을 활용한 수소생산 비교 – 초고온성고세균의 고효율 예시 ····· 25
<표 1-12> 바이오연료생산을 위해 가스기질 발효에 이용되는 다양한 미생물들 ····· 28
<표 1-13> 다양한 수소 생성균을 이용한 수소생산 ····· 28
<표 1-14> 해양산업 주요 지표 ····· 29
<표 1-15> Unit cost of energy obtained by different process ····· 31
<표 1-16> 기획연구 방법기법 ····· 37
<표 1-17> 기획연구 세부추진방법 ····· 38
<표 1-18> 기획연구 추진위원 구성 ····· 40
<표 1-19> 해양바이오수소개발 세부기술 분석 ····· 48
<표 2-1> 수소생산 현황과 과제 ····· 49
<표 2-2> 국내 공업용 수소 업체별 생산량 ····· 51
<표 2-3> 국내 카트리지 공급용 수소 총 생산능력 ····· 53
<표 2-4> 국내 카트리지 공급용 가용생산 능력 ····· 53
<표 2-5> 판매현황 ····· 54
<표 2-6> 수소생산 기술별 가격 ····· 56
<표 2-7> 국내 수소연료전지 자동차 산업화 Road Map ····· 58
<표 2-8> 국내 수소스테이션 운영현황 ····· 59
<표 2-9> 세계 수소스테이션 운영현황 ····· 60
<표 2-10> 주택·건물용 연료전지 ····· 65

<표 2-11> 상용화된 발전용(주 전력 및 m-CHP) 연료전지(2012)····· 67
<표 2-12> 상용화된 휴대용 연료전지(2012)····· 68
<표 2-13> 상용화된 수송용 연료전지(2012)····· 68
<표 2-14> 상용화된 하역기계 연료전지(2012)····· 68
<표 2-15> 연료전지 승용차 개발 및 전개 상황····· 69
<표 2-16> 국가 및 회사별 연료 전지 벤처캐피탈 및 사모펀드 투자 Top 10(2012)····· 70
<표 2-17> J-economy Center의 시장 전망····· 72
<표 2-18> 연료전지 산업 발전 전략의 한국 주택·건물용 보급 전망····· 74
<표 2-19> The Freedonia Group Inc.의 한국 시장 전망($백만)····· 74
<표 2-20> 부처별 바이오수소 발효생산기술 R&D 투자 현황(2002-2013년)··· 77
<표 2-21> 프론티어사업 3단계 바이오수소 생산 연구내용(2009-2013)·· 79
<표 2-22> 21C프런티어연구개발사업 결과 및 개선사항····· 80
<표 2-23> 연속배양 공정 국내 바이오수소 생산성 비교····· 90
<표 2-24> 최근 국내 바이오수소 발효생산 연구과제 주요 내용····· 91
<표 2-25> 바이오수소 발효기술 관련 정부 R&D 과제목록(2002-2013)·· 92
<표 2-26> 다양한 미생물을 활용한 수소생산 비교 - 초고온성고세균의 고효율 예시···· 98
<표 2-27> 다양한 수소생성균을 이용한 수소생산····· 100
<표 2-28> 바이오연료생산을 위해 가스기질 발효에 이용되는 다양한 미생물들··· 102
<표 2-29> 정부 유관부처별 기술이전 및 실용화 기구 ····· 117
<표 2-30> 국가전략기술 중 관련 기술 수준 분석····· 119
<표 2-31> 핵심기술군에 대한 기술수준 및 TRL 분석표····· 121
<표 2-32> 단기 이슈에 대한 SWOT 분석표····· 124
<표 2-33> 장기 이슈에 대한 SWOT 분석표····· 124
<표 2-34> 단기 이슈에 대한 대응전략····· 125
<표 2-35> 장기 이슈에 대한 대응전략····· 125
<표 2-36> 바이오수소생산기술 핵심성공요인 및 역량 평가····· 126
<표 3-1> 개미산을 이용한 수소생산성 비교····· 132
<표 3-2> 일산화탄소 이용 수소생산성 비교 ····· 133
<표 3-3> 일산화탄소 이용 다양한 수소생산기술 ····· 137
<표 3-4> 세라믹 필터의 특징 ····· 141

<표 3-5> 내부 필터 system과 외비 필터 system의 비교 ····· 142
<표 3-6> 버블의 사이즈 특징 ····· 149
<표 3-7> 버블 사이즈와 접촉면과의 비교 ····· 150
<표 3-8> Size comparison of conventional Bubbles and Micro-nano Bubbles ···· 150
<표 3-9> 수소 회수 방법의 비교 ····· 156
<표 3-10> 기체 분리막 회사의 비교 ····· 156
<표 3-11> 각종 기체의 막투과 속도(O2가 PS막을 투과하는 속도를 1.0기준의 상대치) ····· 157
<표 3-12> 제철소 부생 가스 특징 ····· 160
<표 3-13>가스화기 종류에 따른 합성가스 조성 ····· 160
<표 4-1> 사업단과 연구단의 특징 비교 ····· 188
<표 4-2> 공공기관 및 지분참여에 대한 장단점 ····· 197
<표 4-3> 해양바이오수소 개발사업 투자 총괄표 ····· 203
<표 5-1> 바이오수소 발효기술 관련 정부 R&D 과제목록(2002-2013) ·· 209
<표 5-2> 일산화탄소 이용 수소생산성 비교 ····· 211
<표 5-3> 연속공정에서 일산화탄소이용 바이오수소생산성 비교 ····· 211
<표 5-4> 개발시스템 소요비용 ····· 219
<표 5-5> 해양바이오수소개발 총 소요비용 내역 ····· 220
<표 5-6> 해양바이오수소 개발사업으로 인한 타 산업에 미치는 유발효과 ····· 224
<표 6-1> 포항 수소연료전지타운 조성 세부사업 내용 ····· 228
<표 6-2> 포항 수소연료전지타운 조성 사업비 산출 내역서 ····· 228

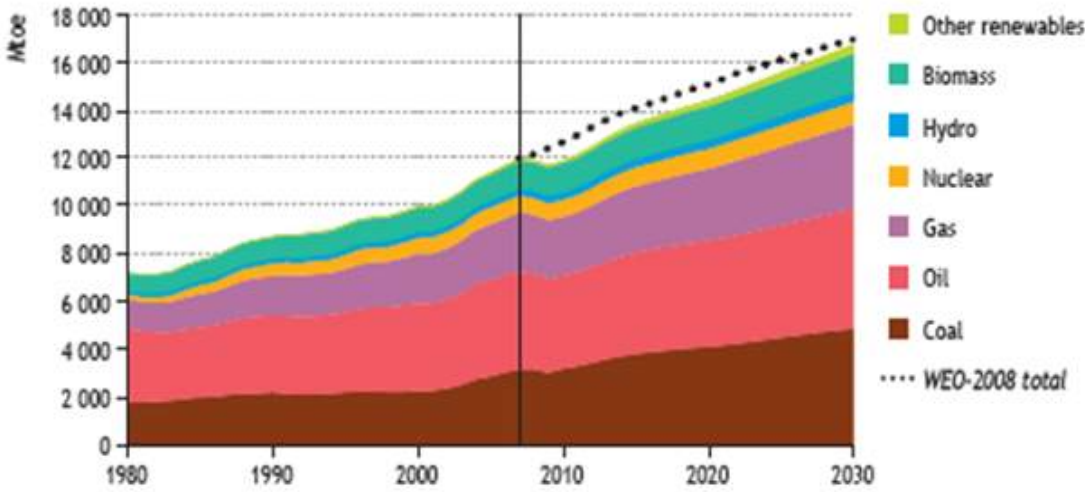
1. 사업개요

1.1 연구배경

❑ 에너지수요 지속적 증가 및 화석연료 의존성

○ 세계 에너지수요의 지속적 증가

- 국제에너지기구(IEA)에서 일차에너지 시나리오를 통해, 2008년 약 12,300(백만 TOE)에서 2035년 16,700 (백만TOE)으로 전체적으로 36%, 연평균 1.2% 증가할 것으로 예측하고 있으며, 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료가 여전히 2035년에도 80%의 비중을 차지하여 주요에너지원으로 남을 것으로 전망 <그림 1-1>

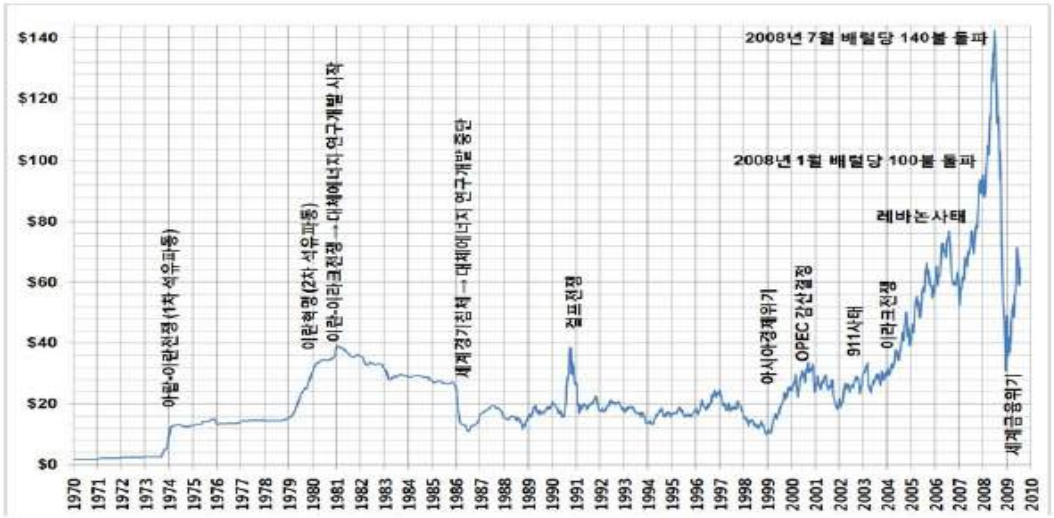


※ 출처: IEA 2010 연보

<그림 1-1> 에너지소비 상승 시나리오

○ 국제유가 변동에 따른 경제 불안 가중

- 국제정치, 경제적 상황 변화와 이라크전쟁, 레바논사태 등을 거쳐 2008년 1월 배럴당 100달러를 돌파하였고 세계 금융위기로 잠시 주춤한 후, 다시 상승기류를 타고 있으며 향후 석유자원 고갈 등의 원인으로 2035년에는 배럴당 120달러까지 상승할 것으로 예측 <그림 1-2>

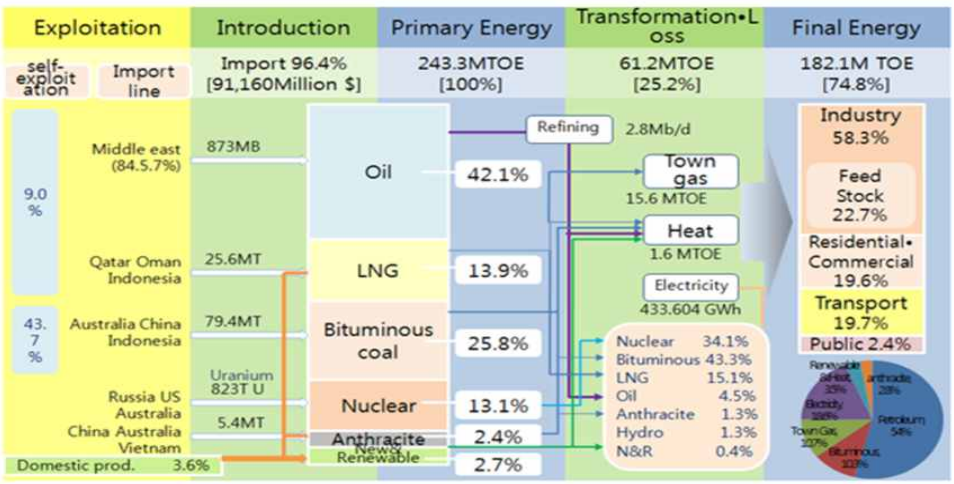


<그림 1-2> 1970년도 이후 국제유가 추이

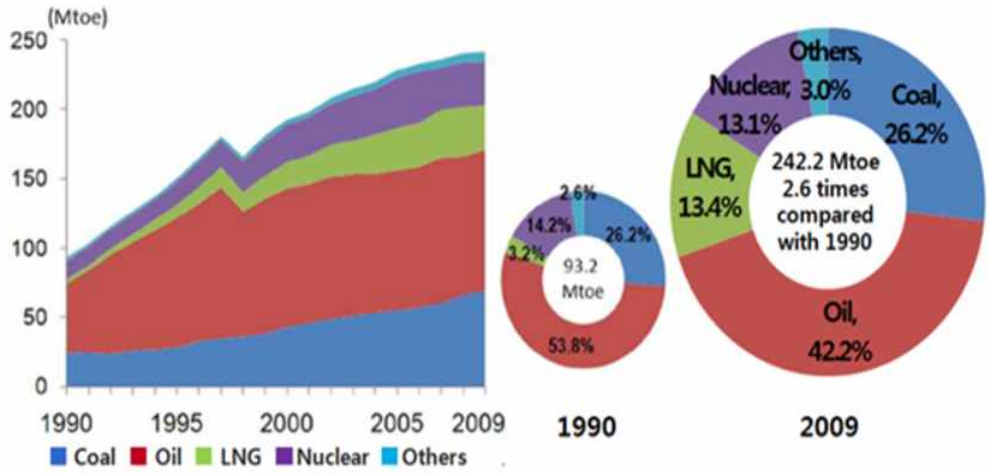
- 우리나라는 에너지 소비량 세계 9위, 석유 소비량 8위로 2009년 243.3 백만 TOE를 사용하며, 이중에서 96.4%(금액기준 91,160 백만달러)를 수입에 의존하고 있으며, 석유가 42.1%, 액화천연가스 13.9%, 유연탄 25.8%, 원자력 13.15%, 무연탄 2.4%, 신재생에너지가 2.7%를 차지 <그림 1-3>

- 천연가스는 1990년 3.2%에서 2009년까지 13.4%로 급격히 증가하였으며 같은 기간에 석유는 53.8%에서 42.2%로 감소 추세<그림 1-4>

- 국가에너지기본계획에 따르면 에너지 사용량이 현 증가율을 고려 시, 2020년 311.6 백만TOE, 2030년 342.8 백만TOE로 예측



<그림 1-3> 우리나라의 에너지 생산 및 공급 흐름도(2009)



<그림 1-4> 우리나라의 일차 에너지 계획의 목표

❑ 온실가스 배출에 따른 기후변화의 우려

○ 화석연료에 의한 온실가스 배출

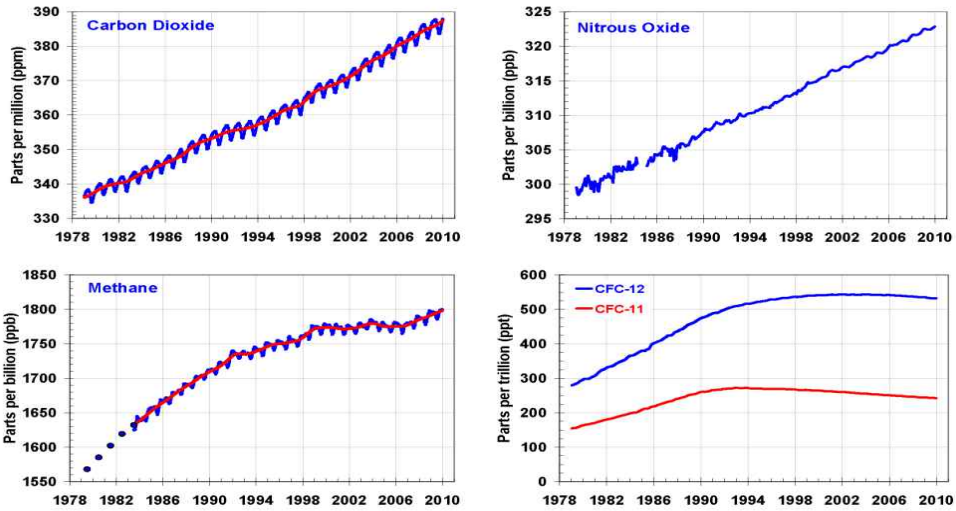
- 대부분의 산업 원료와 에너지원을 화석 연료에 의존하고 있어 이산화탄소, 질산화가스, 메탄, CFC와 같은 냉매 등의 온실가스 배출로 지구온난화에 따른 전 지구적 환경 문제가 대두 <그림 1-5>

- 2010년 이산화탄소 배출량은 전년대비 5.3% 증가로 사상 최고 수준을 기록하였으며, 2035년 배출량은 36.4Gt(2010년 30.4Gt)의 큰 증가율이 예상되며, 현재 속도로 진행시, 21세기 말의 극지 온도는 7-8℃ 상승할 것으로 예측 <그림 1-6>

- 세계에너지전망기구(WEO)에서는 2008년 지구의 기온상승을 제어하기 위해 대기 온실가스 농도를 이산화탄소 기준 450ppm 수준으로 제한하는 것이 필요하다는 내용을 골자로 하는 450 시나리오를 발표

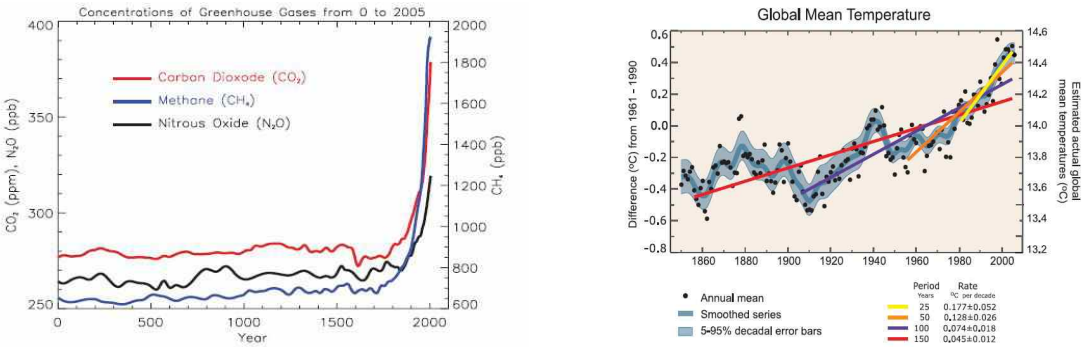
- 지난 수십년간 우리나라의 평균 온도 상승률은 1.5℃로 세계 평균인 0.7℃의 두배이며, 특히 서울은 2.5℃ 상승한 것으로 나타남

- 국내 에너지 소비에 따른 이산화탄소 배출은 2005년 기준으로 594백만톤(CO2)로 세계에서 9번째이고, 증가율은 최고 수준으로 2020년에는 813백만톤(CO2)을 배출할 것으로 예측



※ 출처: The National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S.A.

<그림 1-5> 지구온난화에 영향을 미치는 가스들의 양적추이



※ 출처: IPCC 2007 annual report

<그림 1-6> 세계 이산화탄소 증가와 평균온도 상승 추이

○ 기후변화 대응을 위한 국제협약 및 방지대책

- 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol) 체결, 2009년 7월 G8 정상회의를 거쳐 전 세계 총 온실가스 배출규모 감축 노력이 다각적으로 협의되고 있으며, 같은 해 9월 미국 피츠버그 G20 정상회의에서는 비효율적 화석에너지 보조금의 중기적인 합리화 또는 단계적 폐지를 위한 공약들이 천명

- 2009년 12월 코펜하겐에서는 온실가스 주요 배출국들과 개발도상국들의 대표들이 모여 전 지구 기온상승을 산업화 이전 대비 2°C 내 제한 목표를 설정하고, 선진국은 개발도상국에게 매년 100억 달러의 기금을 조성하여 제공할 것

을 제안하였으나, 국제에너지기구 (IEA)는 기존 에너지 소비 시스템이 이산화탄소 배출 구조로 고착화되어 2017년 까지 추가적인 조치가 없다면 코펜하겐에서 합의한 지구온도 2°C 이내 상승 목표가 어렵다고 경고

<표 1-1> 주요국가의 기후변화 방지대책

국 가	대 책
E U	○ 교토의정서에 의한 1차 공약기간 이전부터 온실가스 감축을 위한 노력 지속: 2005~2007년까지EU내에서 배출권거래제도 시행 후 2단계 배출권 거래제 시행중 ○ EU "Energy and climate package" 발표(2008) - 2020년 까지 1990년 기준 배출량 20% 감축, 신재생에너지 비율 20% 확대 및 에너지 효율 개선 촉진 - EU집행위는2020년 까지 EU의 온실가스 배출량을 1990년 대비 최소 20%, 여타 선진국 동참 시 30%까지 감축하겠다는 정책기조 설정 - 2050년 까지는 60~80% 감축(전 지구적으로는 50% 감축)
영 국	○ 2050년 까지 1990년 대비 온실가스 배출량 80% 감축 설정(2007.11) - UK Climate Change Bill 상원통과(2008.3)
일 본	○ 지구 온난화 대책의 추진에 관한 법률 제정 (1998) 및 개정 (2006) : 내각총리를 본부장으로 하는「지구 온난화 대책 추진본부」운영 중 ○ 2050년 까지 현재수준에서 60~80%의 온실가스 배출량 감축을 설정, 2008년 말까지 국내 배출권 거래제 시범사업 도입을 공표 (2008.6)
미 국	○ 2012년 까지 온실가스 배출집약도 (온실가스 배출량 GDP)를 18%까지 낮춘다는 자체 목표 수립, 시행 ○ 동북부(RGGI)와 서부(WCI)의 주를 중심으로 배출권 거래제 시행 준비 중 ○ 2025년 까지 배출량 증가 억제를 목표로 설정 - Lieberman~Warner's Act 상원 환경위 통과 (2007.12) - 2050년 까지 2005년 대비 70% 감축, Cap & Trade 도입 등 ○ 2017년 까지 휘발유 소비량 20% 감축 위한 대체에너지 비중확대 (3%→15%) 등 대책발표 (2007.1) - 켈리포니아주는 온실가스 배출을 2020년 까지 25% 감축하는 법안 제정 (2006년), 그밖에 버몬트, 뉴욕 등29개 주에서 온실가스 감축 목표 수립

※ 출처: www.bioin.or.kr, BT기술동향 보고서, 바이오에너지 연구 및 기술개발동향, 2010

- 현재, 우리나라는 세계 10위의 이산화탄소 배출국가로 전세계 배출량의 1.7%를 차지하여 1차 의무부담국에 제외되었으나 조만간 의무 부담국에 포함될 것으로 전망

❑ 신재생·바이오에너지개발의 필요성

○ 신재생에너지개발의 필요성 증대

- 신재생에너지는 안전하고 신뢰 가능하며 지속 가능한 에너지로 인식되어 선진 주요국에서는 실용화 사업이 진행되고 있으며, 현 석유위기와 일본 후쿠시마 원자력 발전소 사고는 신재생에너지의 개발을 더욱 촉진시키는 계기

- 2030년 일차에너지 중에서 차지하는 바이오 및 폐기물 에너지의 양은 1,604백만TOE(전체 에너지의 9.6%를 차지)로 연평균 증가율은 1.4%에 이르러 석탄, 석유, 가스를 제외하면 가장 많은 부분을 차지할 것으로 예측

- 국제에너지기구는 2008년부터 2035년까지 세계 에너지수요가 36% 증가하며, 이 중 바이오에너지가 차지하는 비중이 10%에서 12%로 증가할 것으로 전망

- 이러한 바이오에너지산업의 급격한 성장은 정부의 적극적인 지원 정책(각종 보조금, 세제혜택, 의무규정도입 등)이 가장 큰 요인으로 작용

○ 국내외 신재생에너지 정책 현황

(1) 우리나라

- 2010년 기준으로 볼 때 한국은 아직 신재생에너지 투자에서 G-20 국가 중 하위권 (세계 19위)에 있으며 세계 18위를 차지한 아르헨티나 투자액의 1/4에 불과

- 우리 정부는 2012년까지 신재생에너지 공급비중 5% 확대 목표를 설정

- 2009년 모든 신재생에너지 관련 기술들은 5%의 세금혜택과 부품 및 설비 등에 대한 50% 수입관세 삭감 정책 추진 중

- 신재생에너지 발전설비비의 60%까지 지방정부에 보조금 지원과 신재생에너지 개발 프로젝트에 저리(5.5%~7.5%)의 대출프로그램 운영 중

- 정부는 2012년부터 신재생에너지 의무할당제 (RPS: Renewable Portfolio Standard)를 도입하였고, 수송용 바이오연료 의무사용제(RFS)와 2030년까지 국내 수송용 바이오연료 500만TOE를 보급한다는 목표 설정

- 독일, 영국, 스페인, 덴마크, 스웨덴 등 선진국에서 이미 도입, 실효를 거두고

있는 신재생 열에너지 공급 의무화제도(RHO, Renewable Heat Obligation)를 2015년 경 도입 예정

- 에너지 분야 최상위 계획이자, 20년 단위 장기 에너지계획인 제1차 국가에너지 기본계획('08-'30)을 추진 중

  • 신재생에너지 기본계획, 해외자원개발 기본계획, 에너지이용 합리화계획 등 에너지 관련 계획의 원칙과 방향 제시

  • '저탄소 녹생성장 기본법'에 근거하며, '석유 이후의 시대'에 대비한 장기 에너지 정책의 비전을 제시

  • 주요 비전 및 목표[ii]

    √ 에너지원단위[iii]를 0.341에서 '30년 0.185 수준으로 46% 개선함으로써 에너지 저소비사회 구현

    √ 화석에너지의 비중은 현재 83% 수준에서 '30년에 61% 수준까지 축소하고, 신·재생(2.4%→11%), 원자력(14.9%→28%) 등 저탄소 에너지 비중을 확대

    √ '녹색기술' 등 에너지기술 수준을 현재 60%에서 '30년 세계 최고수준으로 끌어올려 청정에너지산업을 신성장동력 육성

    √ 석유·가스 자주개발률은 현재 4.2%에서 '30년에 40% 수준으로 확대하고, 현재 7.8% 수준인 에너지 빈곤층을 모두 해소

<표 1-2> 에너지부문 녹색성장을 위한 5대 비전 수립

5대 비전	지표	2006년	2030년
에너지자립사회 구현	자주개발율	3.2%	40%
	신재생에너지보급율	2.2%	11%
에너지 저소비사회로 전환	에너지원단위	0.347	0.185
탈석유사회로 전환	석유의존도	43.6%	33%
더불어 사는 열린 에너지사회 구현	에너지빈곤층 비율	7.8%	0%
녹색기술과 그린에너지로 신성장동력과 일자리 창출	에너지기술 수준	60%*	세계최고 수준

※ 에너지기술 수준은 선진국=100 기준

ii 자료출처 : 에너지관리공단, 2013 대한민국 에너지 편람
iii 실질 GDP 1천$를 생산하기 위해 사용된 원유로 환산한 에너지량

<표 1-3> 4대 전략 및 10대 이행과제 수립

전략	이행과제
에너지 저소비· 저탄소사회 구현	**(에너지원단위: 0.341 → 0.185)** ㅇ에너지 사용 효율의 개선 ㅇ에너지 시장의 효율화 및 합리적 가격체계 구축 ㅇ기후변화 대응능력 향상
탈화석에너지화	**(석유의존도 : 43.4% → 33% , 신재생에너지 비중 : 2.4% → 11%)** ㅇ신재생에너지 개발·보급 확대 ㅇ원전의 공급능력 및 국민 이해기반 확충
그린에너지산업의 성장동력화	**(에너지기술수준 : 60% → 세계 최고수준)** ㅇ그린에너지산업 기반 구축 ㅇ에너지산업 해외 진출 확대
에너지 자립· 에너지복지 실현	**(자주개발률 : 4.2% → 40% , 에너지빈곤층 비율 : 7.8% → 0%)** ㅇ해외자원개발 역량 확충 ㅇ에너지의 안정적 공급 ㅇ에너지복지 강화

- 제2차 국가에너지기본계획('13~'35)을 수립 추진
  - 1차 계획 이후 정전사고, 원전고장 등 최근의 에너지수급 환경을 반영하여 2013년 10월 17일 초안 발표
  - 신·재생에너지 비중은 '30년에 11%로 현안 유지
- '신에너지 및 재생에너지개발·이용·보급촉진법'에 근거한 제3차 신재생에너지 기본계획 수립
  - 국가에너지기본계획과의 정합성을 고려, 중·장기 신·재생에너지 산업육성 및 보급확대를 위하여 계획시평(planning horizon)을 장기화(10년 이상)하여 신·재생에너지의 중장기 목표 및 비전을 5년 주기로 수립
    - √ 단계별 목표의 설정과 이의 달성을 위한 기본전략 및 실행계획 수립
    - √ 기본계획의 효율적 추진을 위한 기초인프라 법·제도 정비방안 마련
    - √ 온실가스 배출 감소 목표에 기여
  - 전문가 및 범부처의 협력 계획
    - √ 매년 초 관계 부처간 "신재생에너지 보급정책 및 예산 연계 MOU" 체결을

통하여 부처간 시너지 효과 제고 필요

- '30년 신재생에너지 보급률 11% 달성
  - √ 1차 에너지 대비 신재생에너지 비중 '15년 4.3%, '20년 6.1%, '30년 11.0%
  - √ 최종에너지 대비 신재생에너지 비중 '15년 4.3%, '20년 5.9%, '30년 11.3%
  - √ '30년 신.재생에너지 발전량은 39,517GWh로 총 발전량 대비 7.7% 차지
- '20년 이전에 신·재생에너지의 그리드패리티(Grid Parity)[iv] 달성을 위해 보급 달성에 집중해야할 분야(풍력, 바이오, 폐기물, 지열 등)와 R&D에 집중해야 할 분야(태양광, 수소·연료전지 등)를 구분하여 신재생에너지 녹색성장동력 산업화 추진

- 신·재생에너지 공급의무화 제도(RPS)

추진 목적	○ 신·재생에너지 보급확대 및 관련산업 육성, 재정부담 완화를 위해 발전차액지원제도[v]를 종료하고, 2012년부터 RPS제도 도입
제도 내용	○ 일정규모 이상(50만kW)의 발전사업자(공급의무자)에게 총발전량의 일정비율('12년 2%→'22년 10%) 이상을 신·재생에너지로 공급하도록 의무화 ○ 태양광 산업의 집중육성 측면에서 시행초기 4년간 할당물량 집중 배분 ○ 신·재생에너지원별 공급인증서(REC) 가중치 부여
추진 현황 및 성과	○ '10년 9월 관련 법 개정 → '12년 1월 시행 ○ RPS제도 시행 1년만에 발전차액지원제도의 의해 10년간 건설된 발전설비 용량의 80% 수준의 신규 발전설비를 증설(842MW, 1,165개소) ○ 태양광 내수시장 창출 및 소규모 발전사업자에 대한 정책적 지원 마련을 통해 투자활성화 유도
향후 계획	○ RPS대상설비 현장조사를 통한 사후관리 강화 ○ RPS제도의 안정적 정착에 필요한 제도개선 및 정책적 지원방안 마련

(2) 미국

- 클린에너지기준법(Clean Energy Standard Act of 2012)

iv 그리드패리티 : 신·재생에너지 발전단가가 화석연료 발전단가와 같아지는 시점
v 발전차액지원제도 : 소수력, 풍력, 태양광, 매립가스 등 청정에너지원을 사용하여 생산하는 전력을 우선구매 및 기준가격과 계통한계가격의 차액을 지원함으로써 신·재생에너지 발전설비 보급을 촉진하는 제도

- 미국 내 전력 소매판매업자가 '15년부터 판매전력 중 일정비율을 클린에너지로 생산한 전력 판매, 최소 판매비율을 '15년 24%에서 '35년 84%까지 증가 예정

- 미국 에너지부(DOE) : SunShot 프로그램 발표 ('11년 2월)
  - 태양광 제조 및 공급망 개선, 생산단가 감소, PV 사업 기술 발전 프로젝트에 최대 2,030만 달러 지원
  - 태양광발전 인큐베이터 프로젝트(1, 2단계)에 최대 700만 달러 지원
- 미국 환경보호청(EPA) : 신종 차량에 대해 에탄올 혼합비율 기존 10%(E10)에서 15%(E15)로 상향조정 ('11년 시행)
  - 셀룰로오스 에탄올과 같은 첨단기술 투자 확대 전망
- 미래 클린에너지 경쟁력 확보 위한 6대 전략분야(청정전력생산, 전력망 현대화, 빌딩.산업 에너지효율 향상, 대체연료 생산, 수송수단 효율 향상, 수송용 배터리) 설정
  - 온실가스 배출량 '08년 대비 '20년까지 28% 감축 목표
- 재생연료기준(RFS: Renewable Fuel Standard) 시행
  - 연방정부 차원에서 RFS (Renewable Fuel Standard, 신재생연료 의무사용제 또는 바이오연료 혼합의무제도)를 실시하고 있으며 48개 주의 모든 수송용 화석연료 공급업자인 정제사업자, 수입사업자 및 혼합업자 (blender)에게 적용되어 시행
  - 미국 RFS1 프로그램은 자동차용 연료를 포함하는 재생가능 연료 의무 도입량을 2006년 40억 갤런 (약 1,516만 kL)을 시작으로 매해 단계적으로 끌어올려 2012년에는 75억 갤런 (약 2,843만 kL)에 이르도록 설정한 제도
  - RFS2 프로그램에서는 재생 가능 의무 도입량이 지속적으로 증가되어 바이오연료, 셀룰로스계 바이오연료 등에 대한 기술로 개발, 확장 되며 매년 의무도입량이 증가되어 2022년에는 연 360억 갤런(13,644만 kL)의 바이오연료의 도입이 예상
  - RFS 프로그램 관리감독기관인 미국 환경보호청(EPA)은 RFS2 프로그램 발효에 따라 전분질계 에탄올 플랜트는 감소되는 반면 온실가스 감축 효과가 우수한 셀룰로스계 에탄올 플랜트는 2010년 이후 지속적으로 증가

- 세제지원제도 시행

  • 생산세액공제(PCT) 제도 : 재생에너지로 발전된 단위전력 생산량 당 일정 금액 법인세 공제

  • 재생에너지 생산 인센티브(REPI) : 재생에너지 생산설비로 생산되어 판매되는 전력에 대해 일정금액을 생산 시작시점부터 10년간 인센티브로 지급

  • 사업용 에너지 세액공제제도 : 태양광, 태양열, 지열사용 및 지열발전, 연료전지, 태양광 하이브리드 조명 등의 설비를 설치.가동하는 기업에 대해 최대 30%까지 세액 공제

<표 1-4> 미국의 RFS 정책

구 분	내용
시행시기	○ RFS 1 program: '07. 9. 1~'10. 11. 30 종료 ○ RFS 2 program: '10. 12. 1 시행중
목표	○ 목표연도('20): 수송용 연료의 20% 바이오연료 혼합의무
의무대상자	○ 수송용 화석연료 공급업자 - 정제사업자, 수입사업자, 혼합업자(blender)
대상연료	○ 에탄올, 바이오디젤 등의 바이오연료
의무기간	○ 1년 단위
감독기관	○ 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)

※ 출처: 한국석유관리원 녹색기술연구소, 김재곤, 2011

(3) 중국

- 국가에너지국(National Energy Administration)의 신재생에너지 발전 12차 5개년(2011~2015년) 계획 발표('12. 8)

  • '15년까지 신재생에너지의 연간 이용량 4.78억 toe(약 3.346억 toe), 신재생에너지 소비 비중 9.5% 이상으로 확대 예정

  • '15년 신재생에너지의 신규 발전설비용량을 1.6억㎾(수력발전 61GW, 풍력발전 701GW, 태양에너지발전 20GW 및 바이오에너지발전 7.5GW)로 계획

• '15년 총 발전량에서 신재생에너지 비중 20% 이상으로 상향 계획

- 100개 신재생에너지 시범도시와 200개 녹색에너지시범현(县) 조성 및 30개 신재생에너지 마이크로그리드 시범사업 추진 계획

- 수력 발전 설비목표 '15년 290GW와 2020년 420GW로 설정

- 계통연계형 풍력발전은 '15년까지 100GW(연간 발전량 19만GWh 이상), '20년까지 200GW(연간 발전량 39만GWh)로 확대 계획

• 해상풍력발전 설비용량 '15년의 5GW에서 '20년 6배 규모인 30GW확대 계획

- 중국 국가에너지국 "태양에너지발전 개발 12.5계획" 발표('12. 9)

• 총 2,500억 위안 투자

• 태양에너지발전 설비용량 '15년 21GW(태양광발전 10GW), '20년 50GW로 설정

(4) 일본

- 일본 각료회의에서 '혁신적 에너지.환경전략' 의결('12.9.19) : 2030년대에 원전에 의존하지 않는 사회 최대한 빠른 시일 내에 실현한다는 장기에너지 정책

• 탈원전 사회의 조속한 실현 : 원전 40년 운전제한의 엄격한 적용, 원자력규제위원회의 안전 확인을 얻은 원전에 한해 재가동, 원전의 신설.증설 불허

• 신재생에너지의 사용 촉진 : 스마트 그리드 기반기술 추진, 차세대 자동차 보급 확대, 고정가격매입제도 시행

• 에너지의 안정 공급 확보 : 석탄화력발전 기본전원(電源)으로 추진, LNG 화력발전 적극 활용, 환경영향평가 절차 간소화・신속화 추진, 열병합 발전소 보급 촉진, 메탄 하이드레이트 등 新에너지분야의 관련 기술 실용화 추진

• 전력시스템 개혁 : 발전부문과 송.배전 부문 기능적 분리, 신재생에너지 사업자가 송.배전망의 중립적 공평한 사용 가능토록 개방 추진

• 지구온난화 대책 : 양국간 탄소상쇄권(offset-credit) 제도 활용 계획, '2013년 이후의 지구온난화 대책 계획' 책정 예정

- 의무할당제도(RPS)폐지 및 재생가능에너지 고정가격구매제도(FIT) 도입('12년 7월 1일)

(5) 유럽연합

- 유럽연합 (EU)의 신·재생에너지 지령 (2009/28/EC)은 바이오연료의 합리적 생산과 사용에 대한 지속가능성 기준 (sustainability criteria)을 제시
- EU 회원국에게 2020년까지 EU 에너지 중 신·재생에너지 최소 20%(1990년 수준) 사용을 위해 2010년 12월부터 각국의 혼합의무 사용을 정식으로 설정
- EU는 바이오연료가 기존 화석연료 대비 35% 이상 온실가스 저감하도록 규정하고 있으며, 2017년에는 50%, 2018년에는 60%까지 증가시킬 계획

(5-1) 독일

- 재생에너지투자 지원 프로그램(MAP: Market Incentive Program, 1999년) 시행
  - 태양열 집열기, 바이오매스 보일러, 지열 등을 활용한 난방 및 발전 설비에 투자하는 경우 보조 또는 융자 지원
  - 14만 6천 건에 3.5억 유로 지원하여 21.5억 유로 투자 유도
- 재생에너지 이용한 전력생산 비중 확대를 위해 기존 "재생에너지 매입법" 대체하는 "재생에너지법"(EEG) 제정('00년)
  - 전력생산에서 재생에너지 비율 '20년 35% 목표 설정 및 재생에너지 종류별 지원액 규정
  - 전력회사는 재생에너지 통해 생산된 전기를 재생에너지법에 규정된 금액으로 의무적으로 구입, 전력망에 우선 송전하여야 함
  - 매입 금액은 일반 시장가격보다 높게 책정되나, 구체적인 금액은 재생에너지원별 및 시설규모에 따라 차등 책정
- 재생에너지에 의한 난방을 촉진하기 위해 "재생에너지난방법" 제정('08년 6월)
  - 재생에너지 난방 '20년 14%로 증가 목표
  - 재생에너지 이용한 난방 촉진위해 '09년부터 신축 건물은 일정부분 재생에너지에 의한 난방시설 갖추도록 의무화
  - 기존 주택에 재생에너지에 의한 난방시설 설치 경우 보조금 또는 저리융자 지원

- 바이오연료의 보급 촉진 위한 "바이오연료혼합법" 시행
  - 바이오연료 혼합비율 지정 및 특정 바이오연료에 대한 세제 지원

(5-2) 영국

- 수송연료의 일정비율을 바이오에탄올, 바이오디젤 등 바이오연료 공급하는 바이오연료 의무사용 제도(RTFO: Renewable Transport Fuel Obligation) '08년 도입
  - '30년까지 저탄소차량이 신차 판매에서 차지하는 비중 60% 목표
  - 운행중인 모든 차량의 평균탄소배출 수준 '09년 169g/km에서 '30년 81g/km로 감축 계획
- 신재생열 인센티브(RHI: Renewable Heat Incentive) 도입('11.3)
  - 지열히트펌프, 바이오매스, 태양열 온수패널 등 저탄소냉난방시스템 도입하는 가구나 건물에 대해 보조금 지급
  - 가정 부문 '11년 7월부터 그린난방시스템(Green Heating System) 도입 가구에 대해 보조금(RHI Premium Payment) 지급
  - '12년 10월부터 산업.상업.공공분야 RHI 보조제도와 통합 운영, '09년 7월 이후 설치된 신재생에너지 난방설비에 대해 향후 20년간 지원
- 녹색투자은행(Green Investment Bank) 설립 예정
  - '15년까지 30억 파운드 조성하여 녹색경제 이행을 위한 주요 녹색성장 프로젝트 지원(투자/융자)
  - 해상풍력발전, 폐기물처리 및 재활용, 폐기물 활용 에너지 등 우선 지원 계획
- 발전차액 보조방식의 장기 계약제도(FiT CfD: Long-term Contracts of Feed-in Tariffs ith Contracts for difference) '14년 4월 1일부터 시행
  - 전력공급자와 저탄소발전 사업자간 행사 가격과 기준가격에 관한 장기계약을 체결하는 제도
  - '17년 3월 31일까지 발전사업자 선택에 따라 신재생에너지의무공급(RO: Renewable Obligation) 과 FiT CfD 병행 운영
  - '17년 4월1일부터 신규계약의 경우 RO 폐지, FiT CfD만 운영 계획

- 태양광 발전차액보조제도(FIT: Feed In Tariff) 도입.시행('10. 4)
  - 5㎿급 이하 가정부문의 비상업용 소규모 태양광 보급 촉진을 위한 고정가격 매입제도

(5-3) 덴마크

- 우리의 미래에너지(Our Future Energy) 및 에너지전략 2050 (Energy Strategy 2050) 시행
  - 화석연료 소비 '09년 대비 '20년 18% 감축 목표(에너지부문 33%)
  - 에너지 절약 규모를 '06년 수준대비 6% 확대, 재생에너지 비중을 전체 소비의 33%까지 확대 목표(자동차 연료는 10%까지 확대)
  - 전체 전력소비량의 50% 풍력에너지로 조달, '50년까지 전체 에너지수요량을 재생에너지로 공급 목표

(5-4) 프랑스

- '08년 11월에 발표한 "국가 재생에너지 개발 계획"에 의거 바이오에너지, 풍력, 지열, 수력, 태양열 및 해양에너지 등 신재생에너지 개발 50개 정책 시행
  - '20년까지 최종에너지소비 대비 신재생에너지 비중 23% 목표
  - 발전 분야에서 신재생에너지 비율 15.5%(10년)에서 27%('20년) 목표
  - 열분야에서 17%('10년)에서 33%('20년) 목표
  - '20년까지 풍력 발전 25GW(해상 풍력 발전 6GW 포함)목표
  - 태양광 발전은 5.4GW의 도입 목표 ('09. 8공표)
- 재생가능 난방열 자금(Fond chaleur renouvelable) 설치.운영
  - 목재, 지열, 태양열 등 신재생에너지원 이용한 난방열 생산을 위해 '09~ '11년 10억 유로 투입
- '05년 1월 도입된 태양광집적기판, 태양열온수기 등 신재생에너지 생산.이용위해 투자된 장비 비용에 세금공제제도를 '12년까지 연장(공제율: 50%)

<표 1-5> 주요국가의 신재생에너지 투자 현황

순위[6]	국가명	투 자			수용량		
		금 액	증가율[7]	G-20 비중	수용량	증가율[8]	G-20비중
1	중 국	34,600	147.5	30.5	52.5	78.9	16.5
2	미 국	18,600	102.7	16.4	53.4	24.3	18.5
3	영 국	11,200	127.4	9.9	7.5	29.8	2.8
4	EU(27개국)	10,800	87.0	9.5	12.3	17.2	6.7
5	스페인	10,400	79.7	9.2	22.4	9.1	N/A
6	브라질	7,400	147.8	6.5	9.1	13.9	3.2
7	독 일	4,300	75.3	3.7	36.2	14.4	14.6
8	캐나다	3,300	70.2	2.9	7.6	18.1	2.7
9	이탈리아	2,600	110.6	2.3	9.8	12.4	4.0
10	인 도	2,300	72.0	2.0	16.5	31.0	6.6
11	멕시코	2,100	91.9	1.9	3.2	10.1	1.0
12	프랑스	1,800	97.9	1.6	9.4	31.3	3.5
13	터 키	1,600	178.3	1.4	0.6	29.6	0.1
14	호 주	1,000	62.5	0.9	3.3	40.0	1.2
15	일 본	800	51.1	0.7	12.9	4.2	5.2
16	인도네시아	354	94.5	0.3	1.1	7.9	0.4
17	남아프리카공화국	125	N/A	0.1	N/A	N/A	N/A
18	아르헨티나	80	N/A	0.1	0.5	0.1	0.2
19	한 국	20	N/A	0.02	0.7	249.4	0.3

※ 출처: 2010 신재생에너지백서

<표 1-6> 주요국의 신재생에너지 규제 및 정책시행

국 가	정 책 명	세부 정책수단
호주	– 재생에너지 공급목표 설정	목표설정
	– 에너지효율 법안	효율향상 목표설정
	– 국가 온실가스 배출 및 에너지 보고체계	배출량 등록 및 보고
브라질	– 바이오디젤 의무사용 방안	BD 의무사용 규제
캐나다	– 차량 온실가스 배출규정	차량 효율 및 배출기준
	– 조기 감축활동 프로그램에 대한 크레딧 부여	조기 감축활동 인정
중국	– 건물에너지표준	효율기준
덴마크	– 에너지정책(2008–2011)	통합 에너지정책
EU	– 2020년까지 20 20 목표	재생에너지 목표
프랑스	– 수력발전 부활계획	재생에너지 목표
	– 국가 에너지효율향상계획(NEEAP)	에너지절약 목표
독일	– 기후규정 법제화	기후변화 및 에너지계획 통합
	– 재생에너지난방법	재생에너지 공급목표
그리스	– 대기오염방지계획	과제 및 차량접근 통제
헝가리	– 전력법안 – 녹색인증시책	발전차액지원제도 등
	– 에너지효율 법안	효율향상 목표설정
	– 기후변화 국가전략	감축목표 설정
인도	– 기후변화 대응 국가법안	국가 대응계획
아일랜드	– 건물규정관련 보완책	건물효율규정

※ 출처: 2010 신재생에너지백서

<표 1-7> 주요국의 신재생에너지 규제 및 정책시행

국 가	정 책 명	세부 정책수단
일본	– 에너지수요 및 공급전망(2010~2030) – 교토의정서 달성계획(2008) – 재생에너지목표(2010년)	장기 신국가에너지전략 효율향상 및 자발적계획 신·재생에너지 공급목표
룩셈부르크	– 주택에너지 성능	에너지성능 규정
네덜란드	– 출발 항공편에 대한 환경세 부과	환경세
노르웨이	– 바이오에너지전략 – 2030년까지 탄소중립	재생에너지 목표 감축목표
폴란드	– 바이오연료와 기타 재생에너지 보급촉진 장기계획	재생에너지 목표
포르투갈	– 에너지다소비관리시스템 – 소규모발전법 – 국가 에너지효율 행동계획 2015	모니터링 및 진단 인허가제도 에너지효율향상 목표
슬로바키아	– 에너지효율법	에너지효율 향상
남아프리카 공화국	– 기후정책에 관한 비전, 전략적방향 및 기본토대	기후변화대응 종합전략
스페인	– 에너지절약 및 효율계획 2008~2011 – 신국가 에너지계획 2008~2016	절약 및 효율향상 목표 에너지계획
스위스	– 에너지효율 행동계획	에너지효율 향상
영국	– 탄소배출 감축목표(에너지효율 공약 3) – 기후변화법 – 에너지법 2008 – 재생에너지 수송연료 의무	배출감축의무 국가 감축목표 설정 등 통합 에너지법 연료규제
미국	– 지역의 에너지효율 및 절약지원프로그램 – 에너지독립 및 안보법 2007 – 2009년도 국가 국방법 – 온실가스 배출 보고의무 – 새로운 연방 건물규정	에너지효율 향상 통합 에너지법 에너지효율 향상 배출량 보고의무 에너지효율 의무
한국	– 국가 에너지기본계획(2008~2030) – 신규 자동차 배출기준 – 녹색성장 국가전략 및 5개년 계획	통합 에너지계획 자동차 배출규제 통합 국가전략

※ 출처: 2010 신재생에너지백서

○ 세계 주요국 정부의 바이오에너지 생산계획 수립

- 유럽, 미국 등의 선진국들은 수송용 화석연료를 대체할 수 있는 에너지를 확보하기 위해 연구개발을 지원하면서 의무사용의 규정 등을 정해 바이오연료의 사용 확대를 추진하고 있음

- 해외 수송용 바이오연료 시장은 기후변화에 대한 규제 강화로 2000년대 중반 이후 연평균 15% 이상 가파르게 성장

- 2007년도 기준 각 국가별 바이오연료 생산량을 살펴보면 바이오에탄올과 바이오디젤의 생산량이 가장 많은 국가는 미국, 브라질, EU 순으로 기록됨. 전체적인 합계를 보면 바이오에탄올의 생산량이 디젤 생산량보다 약 5배정도 많음 <표 1-8>

- 특히, 미국은 2017년까지 전체 석유소비의 15%, 2030년까지 30%를 바이오연료로 대체할 계획

- 국내에서도 바이오디젤의 경우 시범사업 후 전국 보급이 되고 있으며, 수송부문에서 CO2 배출에 대한 규제가 강화되면 본격적인 시장 형성 전망

<표 1-8> 국가별 바이오연료 생산량(2007)

(단위 : 백만 리터)

국 가	바이오에탄올	바이오디젤	합 계
미 국	26,500	1,688	28,188
캐나다	1,000	97	1,097
E U	2,253	6,109	8,361
브라질	19,000	227	19,227
중 국	1,840	114	1,954
인 도	400	45	445
인도네시아	0	409	409
말레이시아	0	330	330
기 타	1,017	1,186	2,203
전세계 합계	52,009	10,204	62,213

※ 출처 : 미래창조과학부, 주요 국가별 바이오연료 정책현황, 2008

- (단기) 수송용 바이오연료 생산에 활용가능한 비식용원료로는 유기성 폐기물 또는 폐유지 등이 있으며, 이들을 수송용 연료생산에 활용하는 기술개발이 진

행되어 현재 상용화 초기단계임

- (중장기) 바이오연료 생산 원료의 수급 불안정성과 가격 상승 문제 해결을 위해 비식용 원료인 목질계와 해양 바이오매스를 원료로 활용하는 기술을 개발 중이며, 2020년경 대부분이 OECD 국가에서 상용화될 것으로 예상

❑ R&D 기반 산업육성 필요성 대두

○ 최근 정부에서는 제1차 산업융합 발전 기본계획(2013~2017), 제4차 기술이전·사업화 촉진계획(2012~2014)을 수립하여 산업육성이 국가경제발전의 핵심이 되도록 비전으로 제시

- 특히, 기술산업진흥 정책의 문제점의 한 일환으로 R&D 성과의 실용화가 저조한 주요 원인은 현재 획일적으로 이루어지고 있는 기술이전방식과 관계된 것으로 보임

  • 라이센싱 위주의 획일적인 기술상용화 방식 등의 연구개발기관의 상용화 메커니즘의 비효율성에 기인

  • 개발된 기술의 특성과 사업화 주체의 역량 등을 종합적으로 고려하여 기술출자, 연구합작회사, 스핀오프 등 다양한 기술상용화 방식 도입 필요

- R&D 성과의 이전 및 사업화를 촉진하기 위해서는 공공기관이 보유한 신기술을 발굴하여 기업으로 이전하고, 사업화 단계 이전에서 신기술의 성능실험을 통해 신뢰성을 높이고 사업화의 위험을 줄일 수 있는 제도 및 조직이 필요

- 현재 정부의 R&D시스템은 부처별, 기술분야별, 연구개발 단계별, 수행주체별로 단절되어 있어 R&D 전주기에 걸쳐 지식재산을 체계적으로 확보하고 사업화를 추진할 수 있는 R&BD 시스템이 필요

  • 기초연구 → 응용연구 → 개발연구 → 사업화까지 연구성과를 지속적으로 모니터링하고, 후속연구를 발전시키며 기술이전 및 사업화를 연계하는 프로그램의 부재가 국가 R&D의 생산성과 효율성 향상에 큰 장애

  • 부처별로 지원되는 R&D 성과의 이전 및 사업화 대상사업은 사업화가 가능한 응용연구 성과에만 집중되어 있고, 실험실기술에서 시장기술로 전환하는 단계에 필요한 지원사업은 마련되어 있지 않음

  • 해양바이오에너지 산업은 신의약, 신소재산업 등 전후방 관련 산업과의 연

계를 통해 거시경제 및 녹색성장을 견인하고 국가경쟁력 제고와 해외시장 진출 및 선점 가능

- 기초·원천기술 개발성과의 산업화 기술로의 전환을 위해서는 실용화 및 산업화가 용이한 기술을 인증 및 선정하고, 선정된 기술 중 국가에서 개발이 필요한 중점기술에 대해 시제품 제작, 나아가 산업화기술을 연구·개발하는 등의 시스템 구축이 필요

○ 해양산업은 새로운 영역으로, 산업의 정착과 활성화를 지원할 기술개발수요를 파악하고, 개발된 기술에 대한 실용화·상용화 효율을 극대화 할 수 있는 비즈니스 모델의 개발이 중요함

- 국내 해양 R&D 결과의 사업화 성과는 기술이전 체결건수나 계약액 실적은 증가하고 있으나, 해양 R&D 특성상 성과창출 소요기간, 기획단계에서부터 성과확산까지의 전주기 연계성 부족 등으로 다양한 성과 창출이 어려운 문제점 내재

- 해양수산부의 해양 R&D는 개발연구 비중이 약 36%를 차지하고 있으나 R&D 성과의 사업화 실적은 매우 미미하고 민간·지자체 참여 및 투자 비율 저조

  * 정부 R&D 사업화 성공률은 47%('06.9월), IT R&D의 기술이전률('07~'09년)은 54%인데 비해, 해양 R&D는 이보다 저조한 것으로 평가되고 있음(자료: KIMST(2010))

○ 해양산업 활성화를 위한 핵심기술개발

- 해양 R&D 사업화의 효율적인 추진방안 도출을 통해 해양산업 활성화 촉진 및 부가가치 기술개발의 경쟁력 제고

  - 미국, 일본 등 선진국의 R&D 단계는 실용가능성 검토-상업적 도입 단계에 있는데 비해, 우리나라는 대부분 개념검증-모형설계-실용가능성 검토 단계로 평가

  - 우리나라의 해양 R&D 기술수준은 선진국의 52.7%(2010년 기준)에 이르며, 기술이전 계약건수는 연구비 100만원 당 0.55건(2011년)으로 기술 실용화 수준이 상대적으로 낮음

    * '07~'11년까지 연구비 100만원 당 기술이전 계약건수는 건설교통부문 1.30건에 비해 해양부문 0.55건으로 비중이 42.2% 수준에 불과 (표 1-9)

  - 저조한 상용화·사업화 실적의 요인으로 제도적 기반의 취약을 꼽을 수 있음

<표 1-9> 연구비 100만원 당 기술이전 계약건수 ('07~'11)

구 분		2007년	2008년	2009년	2010년	2011년	합계 /평균
건설 교통	연구비(억 원)	3,277	3,459	3,924	4,092	4,310	19,062
	기술이전 계약건수(건)	14	34	57	58	85	248
	연구비 100만원당 기술이전 계약건수(건)	0.43	0.98	1.45	1.42	1.97	1.30
해양	연구비(억 원)	997	1,271	1,689	1,658	1,851	7,466
	기술이전 계약건수(건)	4	1	7	6	23	41
	연구비 100만원당 기술이전 계약건수(건)	0.40	0.08	0.41	0.36	1.24	0.55
건설교통부문 대비 해양부문의 연구비 100만 원당 기술이전 계약건수 비중(%)		93.9	8.0	28.5	25.5	63.0	42.2

※ 출처: 2012 국토해양기술 연구개발사업 시행계획(2012.1)을 참조하여 작성

- 해양산업 활성화를 위한 최우선 해결과제 및 지원 프로그램 도출을 통한 핵심역량 및 기술 발굴

  • 해양플랜트, 해양에너지, 해양생명공학, 해양환경, 연구장비 개발, 첨단 항만 및 물류 등의 기술은 국가 산업경제 및 부가가치를 대폭적으로 증가 시킬 핵심사업

  • 해양초고온 고세균을 이용한 해양바이오수소 생산기술은 순수 국내연구자들에 의해 개발된 대표적인 국내원천기술로서 해양생명공학기술개발 사업을 통해 발굴됨

- 해양산업정책 및 기술상용화 매트리스 도출을 통하여 기술개발 투자의 효율성을 높이고, 기술상용화 활성화를 통한 해양산업발전에 대한 기여도 제고

  • 기초연구와 산업화연구의 차별화된 투자 관리 전략 추진

  • 기술사업화 지원 및 상용화를 위한 Test-bed 구현

1.2 연구의 필요성

❑ 기술적 측면

○ 새로운 대체 에너지의 보급, 그린 에너지 개발의 시장 니즈에 부응한 새로운 부가가치 산업 창출의 필요성이 대두되고 수소경제는 전세계적 트렌드로 각광

- 전 세계적으로 화석연료의 자원고갈 및 환경오염에 대한 우려 증가와 최근 유가의 변동과 기후변화협약 발효 등으로 에너지 문제가 커다란 사회적 이슈로 부각되어 석유 고갈에 따른 에너지 문제는 국가 안보 및 생존에 위협요인

- 우리나라는 현재 에너지 소비량 세계 10위, 석유 소비량 6위권의 에너지 다소비 국가이며 에너지 소비의 대부분을 수입에 의존하고 있어 에너지원의 확보가 시급한 상황

- 이에 지속적이고 친환경적인 에너지에 대한 관심이 증대되어 세계적으로 태양광 발전, 풍력 발전, 바이오 디젤 등이 선진국에서는 주요 산업으로 등장하는 가운데 특히 차세대의 이상적인 대체 에너지로써 수소에너지를 가장 주목

  • 수소는 연료로 사용할 경우에 연소시 극소량의 NOx 발생을 제외하고는 CO2, SOx, 분진 등의 대기오염물질의 방출이 없고 에너지 밀도가 높아 에너지원으로써의 가치가 매우 높은 장점 보유

  • 수소는 산업용의 기초 소재로부터 일반연료, 수소자동차, 수소비행기, 연료전지 등 에너지 시스템에서 사용되는 거의 모든 분야에서 이용 가능

- 현재의 수소 생산기술은 열화학적방식, 전기분해방식, 생물학적 방식으로 크게 분류되며 현재는 95%정도가 천연가스를 steam reforming 방식에 의한 수소 생산이 주류

- 이러한 기술은 반응 온도 1,200℃가 넘는 고온의 에너지 집약적인 공정으로서 액체 및 고체 탄소를 함유한 폐기물을 사용하여 수소 생산이 가능. 이들은 저렴한 폐기물이 원료가 되는 장점이 있지만 수소생산과정에서 이산화탄소가 발생되고 고온의 반응이 요구되므로 에너지 고갈 및 환경적인 면에서 근본적인 대안이 되지 못함

- 그러므로 궁극적으로 대체에너지로서의 수소제조는 현재의 기술을 보완하여

태양광, 수력, 풍력, 미생물 등 청정기술을 이용하여 이루어져야 대체에너지로서의 의미가 있기 때문에 이들을 이용한 수소에너지 생산기술 개발이 절실히 필요한 실정임

<표 1-10> Comparison of energy per unit mass

Fuel type	Energy per unit mass (MJ/kg)	Energy per volume (MJ/L) (approx.)	Carbon release per fuel used (kg/kg)
Hydrogen gas	120	2	0
Hydrogen liquid	120	8.5	0
Coal (anthracite)	15-19	-	0.5
Coal (sub-bituminous)	27-30	-	0.7
Natural gas	33-50	9	0.46
Petrol	40-43	31.5	0.86
Oil	42-45	38	0.84
Diesel	42.8	35	0.9
Bio-diesel	37	33	0.5
Ethanol	21	23	0.5
Charcoal	30	-	0.5
Agricultural residue	10-17	-	0.5
Wood	15	-	0.5

※ 출처 : Adapted from Vijayaraghavan & Soom (2004)

○ 해양 고세균을 이용한 수소생산 가능성 및 필요성

- 해양 고세균은 광합성 미생물, 통성 또는 절대혐기성 균주에 비해 수소생산 수율이 높은 것으로 보고됨 (Metabolic engineering, 2008). NADH 보다 FAD를 사용하여 높은 효율로 수소를 생산 및 상대적으로 산소에 대해 둔감하며 중온성 발효과정에서 발생하는 다양한 gas 생성균들 (예, methanogen)에 의한 성장 저해 현상이 일어나지 않는 장점 보유

- 이러한 새로운 가능성 때문에 2000년대 초기부터 다양한 고세균을 활용한 바이오수소 연구가 진행 중임 <표 1-11>

- 특히 최근에는 CO를 포함한 합성가스를 미생물 촉매로 전환하여 수소나 다양한 화학원료를 생산하는 연구가 전세계적으로 활발히 진행 중

- 제철소, 폐기물 소각로 등에서 다량으로 발생하는 부생가스나 탄화수소 연료의 가스화로부터 생성된 합성가스는 고농도의 CO를 포함. 이렇게 발생된 CO는 고온 상태이기 때문에 중온성 미생물을 이용할 경우 CO 가스를 냉각시켜야 하므로 이 또한 많은 비용 소요

- 하지만 해양 고온성 고세균을 촉매로 하여 수소로 전환할 경우, 폐기물 소각 시 발생되는 잔열을 고온 발효조를 운전하는데 이용가능하며, 고온의 CO 가스를 냉각 시킬 필요 없이 바로 사용 가능하기 때문에 냉각 비용을 대폭 절감할 수 있을 것으로 기대

- 그러나 배양 시 얻을 수 있는 균체량이 제한되어 부피당 생산량이 적기 때문에 부피당 균체량을 증가시켜야하는 과제를 가지고 있으며 최근에 일부 시도되고 있는 초고온 고세균의 다양한 대사공학 연구를 통해 수소의 친환경적이고, 경제적인 생산기술 개발 필요

- 해양 고세균을 이용한 수소생산 연구는 전 세계적으로 미미한 상태이기 때문에 바이오 수소에너지 생산 관련분야에서 선진기술/지식확보 및 원천기술을 확보하는 데 있어서 본 연구의 중요성 및 필요성은 매우 높다고 판단됨

<표 1-11> 다양한 미생물을 활용한 수소생산 비교 - 초고온성고세균의 고효율 예시

Comparison of fermentative H_2 production by mesophilic and hyperthermophilic microorganisms

Organisms	Substrate	Cultivation method	Biomass concentration (gcdw/L)	Specific H_2 production rate (mmol/gcdw/h)	Volumetric H_2 productivity (mmol/L/h)	H_2 yield[a]	Reference
Enteric bacteria							
Enterobacter aerogenes	Glucose	Batch	0.68–1.82	11–17	11–21	1.1	Tanisho et al. (1987)
Enterobacter cloacae IITBT08	Starch	Fixed bed	44 g/L	1.6	71	1.4	Kumar and Das (2001)
Escherichia coli K12 W3110 and SR15	Glucose	Fed batch (high cell density)	94 g/L	5 (WT), 8 (SR15)	500 (WT), 793 (SR15)	1.08 (WT), 1.82 (SR15)	Yoshida et al. (2006)
Clostridium							
Clostridium butyricum	Glucose	Continuous culture: $D = 0.125\ h^{-1}$	2–2.5 g/L	5.5–6.2	11–15.4	1.4–2.0	Kataoka et al. (1997)
C. acetobutylicum	Glucose	Fed batch	N/A	N/A	27.8	2	Chin et al. (2003)
C. thermolacticum	Lactose	Continuous: $D = 0.013–0.19\ h^{-1}$	N/A	N/A	2.5–0.9	0.7–0.9	Collet et al. (2006)
C. tyrobutyricum	Glucose	Batch	7 g/L	1.9 (estimated)	13 (estimated)	1.4	Liu et al. (2006)
C. tyrobutyricum	Xylose	Fixed bed	2 g/L	13.5 (estimated)	27 (estimated)	N/A	Liu et al. (2006)
Thermococcales							
T. kodakaraensis	Starch	Continuous: $D = 0.2\ h^{-1}$	0.48	14	6.7	3.3	Kanai et al. (2005)
T. kodakaraensis	Pyruvate	Continuous: $D = 0.2–0.8\ h^{-1}$	0.38–0.1	24.9–59.6	9.5–6	1.1	Kanai et al. (2005)
Pyrococcus furiosus	Maltose	Continuous: $D = 0.1–0.75\ h^{-1}$	0.22	25–100	5.5–22	2.9	Schicho et al. (1993)
Thermotogales							
T. maritima	Glucose	Batch	0.072	96	6.9	4	Schroder et al. (1994)
T. neapolitana	Glucose	Batch	N/A	N/A	0.597	N/A	Van Ooteghem et al. (2002)
T. elfi		Batch	N/A	N/A	0.38	1.35	Kadar et al. (2003)
Caldicellulosiruptor							
Caldicellulosiruptor saccharolyticus	Glucose	Batch	1.7	12.6 (estimated)	10.7	2.5	Kadar et al. (2004)
C. saccharolyticus	Xylose	Batch	1.6	14.1 (estimated)	11.3	2.7	Kadar et al. (2004)
C. saccharolyticus	Xylose+glucose	Batch	1.0	18.4 (estimated)	9.2	2.4	Kadar et al. (2004)
C. saccharolyticus	Paper sludge	Batch	N/A	N/A	5.3	2	Kadar et al. (2004)
C. saccharolyticus	Glucose	Continuous: $D = 0.05–0.35\ h^{-1}$	0.3–0.5	13–26	4–11	4–3.1	de Vrije et al. (2007)

WT, wild type; gcdw, grams cell dry weigh; SR15, mutant strain SR15.
(Estimated): these values were calculated from original plots published in corresponding references.
[a] H_2 yield was calculated based on molecules of H_2 produced per mole of glucose (hexose) consumed.

○ 바이오수소 생산 대내외 환경변화

- 우리나라는 에너지 자급률 3%로서 에너지원의 97%를 외국에서 수입하고 있으며, 에너지원의 대부분은 석유자원임

- 녹색기술 및 에너지에 대한 전 세계적 관심 및 수요 증대로 신 성장 동력으로서의 녹색성장에 대한 필요성 증대

- 특히, 수소 에너지의 경우 연료전지 응용과 함께 chemical로의 수요가 계속 증대되고 있고, 이용 시 공해물질을 내뿜지 않아 차세대 에너지원으로 중시되고 있음

- 이에 따라, 효과적인 수소 대량 생산 기술에 대한 요구가 증대되고 있고, 바이오수소 생산 기술 실용화에 필수적인 고효율 생물 반응기 개발에 대한 필요성이 높아지고 있음

- 2010년 IEA/HIA Annex 21에서 바이오수소 연구 개발 task를 제안하는 등 바이오수소 연구가 국제공동으로 진행되고 있음

- 최근, 기후변화대응과 관련하여 종래 발전소에만 적용되던 RPS(신재생에너지 의무할당제)를 제철소 등 에너지 대량 소비 시설에도 적용하려 하고 있으며, 이에 따라 제철소 부생가스 내 CO 이용 방안에 대한 관련 업계의 검토가 이루어지고 있어, 부생가스나 바이오매스 가스화로부터 발생하는 CO를 전환하여 수소를 생산하는 수성가스전환 반응이 더욱 주목받고 있음

○ CO 이용 바이오수소 생산

- 수소생성균주에 의한 생물학적 수성가스전환: Carbon monoxide dehydrogenase(CODH)가 CO에 대한 전자 화학적 반쪽 반응을 통해 전자와 proton을 CO에 전달하고 수소화효소(hydrogenase enzyme)가 hydrogen 반쪽 반응을 촉매 함으로써 세포생장을 위한 에너지를 공급한다. 생물학적 수성반응은 혐기적 조건에서는 4.56 kcal/molCO 생성하고 (반응3), 호기적 전환에서는 61.1 kal/molCO 생성되지만 (반응4), 수소는 발생되지 않는다. CO 산화를 통해 수소를 생성하는 다양한 수소생성균들과 CO 발효를 위한 여러 가지 발효조건들이 존재

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + 2e^- + 2H^+ \quad (1)$$
$$H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad (2)$$
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad \triangle G = -20.1\,kJ/mol \quad (3)$$
$$CO + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (4)$$

- 광합성 균들중에 purple non-sulfur bacteria, Rhodospirillum rubrum과 Rubrivivax gelatinosus가 높은 CO uptake rate와 이론적 값 1.0에 가까운 CO 전환(conversion)율 때문에 주목 받고 있음

- 본 연구과제의 주요 연구대상인 초고온 고세균 Thermococcus onnurineus NA1은 표 1-13에 나오는 대부분의 미생물에 비해 CO uptake rate와 이론적 값 1.0에 가까운 CO전환(conversion)율은 유사하지만, 생산성은 400mmol/g/l, 50mmol/l//h에 달해 기존의 생산성을 월등히 앞서는 실험결과에 세계가 주목

○ CO 이용 바이오연료 상업화 연구

- 현재 합성가스 발효가 bench top scale CSTR에 광범위하게 생산되고 있지만 100L 규모이상의 반응기에 대한 결과는 없음. 이 기술에 대한 큰 규모의 에탄올생산에 성공적 운전을 한 메이저개발 회사로는 IneosBio, Coskata 그리고 LanzaTech이 있으며, Coskata는 고정된 셀(immobilized cell)에 가스를 섬유(fiber)에 통과시키는 새로운 hollow fiber membrane 반응기 사용에 대한 수많은 특허들을 갖고 있음

- IneosBio: Arkansas 대학의 James Gaddy 교수 실험실에서 출원한 특허를 기반으로 미국 노스캐롤라이나 주 페이어트빌에 최초의 가스발효회사, Bioengineering Resource Inc (BRI)를 설립. 2003년에 통합된 pilot unit를 가동하였고, 2008년에 BRI에서 개발된 기술의 권리를 다국적 화학회사 Ineos에 넘기고, IneosbBio라는 이름으로 가스발효 기술을 개발해오고 있음. 2011년에는 미국 플로리다 주 인디언리버에 합성가스로부터 매년 8백만 갤런의 에탄올을 생산할 시설계획을 밝힘

- Coskata: IneosBio처럼, 밴처캐피탈 자금으로 오클라호마 주립대학과 오클라호마 대학으로부터 전문적 지식과 기술을 이용하여 설립되었으며, 2009년에 'semi-commercial' 시설을 미국 펜실베니아 주 메디슨에 설립함

- LanzaTech: 2005년에 뉴질랜드의 오크랜드에 설립됨. 풍부한 CO(CO-rich)를

함유한 산업적 오프가스와 합성가스(syngas)를 이용하여 에탄올과 2,3-butanediol 플랫폼 생산 개발에 주력. 최근 철강 및 정유화학회사들과 활발한 파트너십 체결로 사업영역 확장 중

<표 1-12> 바이오연료생산을 위해 가스기질 발효에 이용되는 다양한 미생물들

	Fermentation product	Ref.
Rhodospirillum rubrum *Rhodobacter sphaeroides* *Methanobacterium thermoautotrophicum* *Methanosarcina barkeri* *Clostridium thermoaceticum* *Rhodopseudomonas gelatinosa* *Rhodopseudomonas capsulate* *Rhodopseudomonas palustris* *Rubrivivax gelatinosus* *Bacillus simithii* ERIH2 *Rhodopseudomonas palustris* P4 *Citrobacter amalonaticus Y19* *Rhodocyclus gelatinosus* *Carboxydothermus hydrogenoformans*	Hydrogen $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	[14,21,23–33]
Clostridium autoethanogenum *Clostridium ljungdahlii* *Moorella* sp. HUC22-1 *Acetobacterium kivui* *Peotostreotococcus productus* *Alkalibaculum bacchi*	Mixture of acetic acid and ethanol $6CO + 3H_2O \rightarrow CH_3CH_2OH + 4CO_2$ $2CO_2 + 6H_2 \rightarrow CH_3CH_2OH + 3H_2O$ $6CO + 6H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$ $4CO + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2CO_2$ $2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$	[14,22,34–38]
Eubacterium limosum *Clostridium carboxidivorans* *Butyribacterium methylotrophicum*	Mixture of ethanol, butanol, acetic acid and butyric acid $6CO + 3H_2O \rightarrow CH_3CH_2OH + 4CO_2$ $4CO + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2CO_2$ $12CO + 5H_2O \rightarrow C_4H_9OH + 8CO_2$ $10CO + 4H_2O \rightarrow C_4H_9OH + CO_2$ $12H_2 + 4CO_2 \rightarrow C_4H_9OH + 7H_2O$	[14,39–46]
Peptostreptococcus productus *Eubacterium limosum* *Acetobacterium woodii* *Acetobacterium wieringae* *Clostridium thermoaceticum*	Acetic acid $2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$ $4CO_2 + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2CO_2$	[14,21,47–49]
Methanospirillum hungatii *Methanobacterium formicicum* *Methanobrevibacter smithu* *Methanosarcina barkeri* *Methanobacterium thermoautotrophicum*	Methane $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ $4CO + 2H_2O \rightarrow CH_4 + 3CO_2$	[21,35]

<표 1-13> 다양한 수소 생성균을 이용한 수소생산

Production of hydrogen using various hydrogenogenic bacteria.

Organism	Substrate (v/v, %)	Culture mode	Time	Temp. (°C)	pH	Cell density (g/l)	Conversion efficiency	Product	Ref.
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/Ar$ (55:20:10:15)	Batch	120 h	30	7.5	0.27	X_{CO}: 88%	0.86 mmol H_2/mmol CO 0.063 mmol H_2/g h	[61]
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/Ar$ (55:20:10:15)	Batch	120 h	30	6.9	na	X_{CO}: 86%	16.9 mmol H_2/l	[62]
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/Ar$ (55:20:10:15)	CSTR	600 h	30	6.3	3.4	X_{CO}: 80%	0.82 mmol H_2/mmol CO 16 mmol/g h	[24]
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/Ar$ (55:20:10:15)	CSTR	7 days	na	6.3	na	X_{CO}: 60%	9.6 mmol H_2/h	[63]
Bacillus simithii ERIH2	$CO/H_2/CO_2/CH_4$ (64.34:20.8:10.8:4.06)	CSTR	na	50	6.4–6.9	0.68	X_{CO}: 80%	H_2 yield 95%	[23]
Rhodopseudomonas palustris P4	N_2/CO (90:10)	Aerobic–chemoheterotrophic cell growth/anaerobic CSTR	400 h	30	7.0	10	X_{CO} > 60	41 mmol/g h	[64]
Citrobacter sp. Y19	N_2/CO (92:8)	Aerobic–chemoheterotrophic cell growth/anaerobic CSTR	68 h	30	7.0	~1.5	na	20 mmol H_2/g h	[59]
Rubrivivax gelatinosus CBS	$CO/CH_4/N_2$ (20:5:75)	Trickle-bed rector	na	30	7.0	na	Specific CO uptake rate 0.73 mmol/min/g	0.8 mmol H_2/g min	[65]
Rubrivivax gelatinosus CBS	CO/N_2 (10:90)	Hollow fiber immobilized cell	8 months	25–26	6.8	0.65	na	125 ml H_2/g h	[66,67]
Rubrivivax gelatinosus CBS	CO/N_2 (20:80)	Bubble train bioreactor	10 days	25–26	na	na	na	140 ml H_2/g h	[66,67]
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/N_2$ (55:20:10:15)	CSTR	120 h	30	7.0	na	X_{CO}: 58%	0.88 mol H_2/mol CO 0.01 mol H_2/g h	[68]

na: not available.

❑ 경제산업적 측면

○ 해양산업의 총 산출액 및 부가가치의 지속적인 증가를 통하여 국가경제 및 산업발전에서 차지하는 비중 증대 필요

- 해양산업의 총산출액('08년도 기준)은 전 산업 산출액의 4.9%를 차지하고, 선박 및 해양플랜트 제조업과 해운산업이 약 70%를 차지하는 추세

- 해양산업의 부가가치액은 약 37조 8,597억으로 '08년 전체 산업 부가가치액의 3.75% 차지

- 부가가치 측면에서 2020년까지 연평균 7.0%의 고성장 전망

○ 해양산업 국가 GDP의 7.6%('20년) 기여를 위한 신개발 투자비중 강화

- 해양산업의 시장규모, 예산, 산업체, 법적·제도적 지원 정책에 대한 정확한 이해와 분석을 통해 미래 해양산업 발전을 위한 체계적인 정책방안 수립 요구

<표 1-14> 해양산업 주요 지표

(단위: 억 원)

		산출	부가가치	부가가치율(%)	무역수지	취업자수(명)
해양산업 전체		1,343,541	378,597	28.18	275,256	919,314
산업전체		27,401,172	10,087,725	36.81	-120,872	19,207,325
해양산업 비중(%)		4.90	3.75	-	5	4.15
해양산업	어업	64,522	22,880	35.46	-6,569	58,702
	해양광업	4,247	2,846	67.00	-283,827	1,945
	수산물가공·유통	73,339	19,930	27.18	-12,643	67,930
	해양식품·의학·바이오	57	26	45.88	1	10
	해양기기·장비제조	80,922	19,952	24.66	4,752	31,579
	선박 및 해양플랜트제조	513,336	146,873	28.61	368,654	131,828
	해양토목·건축	30,558	14,000	45.82	0	22,947
	해운산업	417,237	59,087	14.16	218,891	413,175
	항만산업	31,441	16,755	53.29	-17,864	14,180
	해양 연구개발	4,930	3,525	71.50	-128	5,331
	해양기술서비스	13,187	8,916	67.61	-722	12,520
	해양 행정 및 교육	41,400	29,818	72.02	6	35,837
	해양관광·여가산업	68,365	33,989	49.72	4,705	123,330

※ 출처: 해양산업 분류체계 수립 및 해양산업의 역할과 성장전망 분석을 위한 기획연구(KIMST, 2012.05)

○ 해양바이오산업은 지식기반 신기술로서의 new paradigm

- 인간 게놈 프로젝트 이후, 생명현상과 생명공학기술에 이해가 급속도로 발달하였고. 또한 최근에는 생명공학기술과 정보기술 나노기술과 같은 다른 첨단기술과 융합되면서 생명공학산업의 시장규모가 확대되고 있음 (세계시장 연평균 성장률 11%)

- 미국, 일본, EU 등은 해양생명현상 및 기능에 대한 신지식을 바탕으로 대체에너지, 친환경오손처리, 이산화탄소고정 등 에너지, 환경 문제 해결 연구가 진행 중

- 미래의 바이오산업은 신규바이오자원의 확보와 첨단 생명공학적 omics분석을 통해 이루어질 것으로 예측됨

- 미국, 일본, 유럽연합, 캐나다 등의 선진국과 브라질, 중국 등 제 3세계 국가들도 우수한 바이오자원 확보와 유전체 연구를 국가적으로 지원하고 있으며 기반/핵심기술로 인식

- 인간 게놈 프로젝트 이후, 생명현상이해 와 생명공학기술은 급속도로 발전하고 있고, 해양바이오분야도 시장규모가 확대 기대

○ 수소경제는 전세계적 트렌드

- 아시아태평양경제협력체 (APEC, 2006)에서 전망한 에너지 기술개발 로드맵에 따르면, "바이오디젤(2010년까지) ⇨ 바이오에탄올(2020년까지) ⇨ 수소 (2030년까지)" 의 단계로 기술개발이 이루어질 것으로 전망

- 전 세계적으로 거래되는 수소는 약 5,000만톤/년으로 매년 10%씩 증가. 미국 DOE는 2040년까지 수소가 전력 및 에너지 분야 외에도 화학제품 원료, 식품공업, 전자부품 생산, 제철소, 탈황 및 정유공장의 가솔린 개질 등 산업 분야에 광범위하게 이용될 것으로 전망

- 그러나 현재 수소가스 이용의 주요 문제점은 수소를 자연계에서 얻을 수 없고, 수소 생산에 많은 비용이 소요되기 때문에 상용화에 어려움을 겪고 있음 <표 1-15>. 최근 수소의 필요성이 증대되면서 수소의 생산비용을 낮춰 생산할 수 있는 새로운 기술이 절실히 요망

○ 한국고유의 원천소재/기술이용 바이오수소생산은 신성장동력 및 미래경쟁력

- 세계 바이오산업 시장 규모는 2000년 기준으로 540억 달러, (미생물관련 제품 시장은 105억불 정도) 2013년 2100억 달러로 전망됨. 특히 기존 바이오수소 생산 관련기술은 선진국에서 선점하고 있으며 여기서 유래된 원천기술 및 원천소재 확보도 선진국에 뒤진 실정

- 해양 고세균을 이용한 바이오수소 에너지 생산기술 연구는 국제적으로도 초기 단계이므로 본 연구진에서 분리, 동정한 고효율 수소생산 고세균을 이용한 바이오수소 에너지 생산기술 연구에 적극적 투자가 이루어진다면 국제적 경쟁력 확보를 통한 신산업 창출 가능

- 우리의 세계적인 수준의 omics 분석기술, IT 기반기술, 대사공학기술을 활용하여 바이오수소 생산 원천기술 확보시 대체에너지분야에서 선진대열로 도약할 수 있을 것으로 기대

<표 1-15> Unit cost of energy obtained by different process

Type of energy	Conversion efficiency (%)	Unit cost of energy content of fuel (US $/MBTU)	References
Photobiological hydrogen	~ 10	~ 10	[11]
Fermentative hydrogen	~ 10	~ 40	[85]
H_2 from coal, biomass	—	4	[2]
H_2 from advanced electrolysis	—	10	[2]
H_2 from thermal decomposition steam cyclical	—	13	[2]
H_2 from photochemical	—	21	[2]
Fermentative ethanol	15–30	~ 31.5	[85]
Gasoline	—	6	[2]

❑ 사회문화적 측면

○ 인류생존, 삶의 질, 미래 국가경쟁력에 영향을 미치는 글로벌 이슈 부각

- 기후변화, 자원고갈, CO2 배출규제 강화 등 글로벌 이슈 부각에 따라 전세계적으로 다양한 친환경 신재생에너지개발에 대한 요구 증가

- 수소에너지는 환경오염물질이 거의 배출되지 않는 청정에너지로서 차세대에너지원으로 각광받고 있음

  * 전 세계 수소생산량은 1억톤 이상으로 추정되고 생산되는 수소의 96% 이상이 천연가스 개질화 등의 화석연료를 기반으로 제조('12년 기준)

○ 전 세계적 CO2 감축노력에 따라 장기적으로 신재생자원을 이용한 친환경 수소생산기술개발에 대한 필요성 대두

- 바이오수소는 대표적인 친환경 수소로서 주요 대안의 하나로 주목되면서 미국, 독일, 일본 등을 중심으로 정부차원의 지원이 집중

- 수소연료전지 자동차 보급에 따른 수소 사용량 급증 예상

  * 현대자동차에서는 세계 최초로 수소연료전지 자동차를 양산하고 2015년까지 전세계 시장에서 1,000대 판매계획 발표

○ 글로벌 CO2 방출 절감을 위한 수소에너지 개발 정책

- 정책적으로 여러 나라에서 CO2 방출 절감 계획을 발표하고 추진하고 있음

- 미국 :

  • 오바마 정부는 CO2 방출절감 정책을 최우선 국가 해결과제로 발표하였음

  • 2020년까지 CO2 방출을 20% 절감하며 대체에너지 개발에 약 1조원에 달하는 예산을 연구 및 인프라 구축에 투자하기로 함

  • 캘리포니아 주는 2011년까지 운송에너지로써 수소를 사용하기 위해 11개의 수소 충전소를 설치하고 그에 따른 인프라 구축을 우선적으로 추진

- 유럽연합 :

  • 유럽은 대체에너지 개발 기술을 선도적으로 주도하고 있음

  • 2020년까지 3대 20 정책으로 CO2 방출을 20% 절감하며, 기존의 화석연료 사용을 20% 절감, 대체에너지 사용을 20%증가하는 계획을 발표하여 적극적으로 추진하고 있음

  • 수소에너지 개발에 2000억원에 달하는 예산을 투자하고 있음

  • 독일의 경우 200여개의 기업이 수소에너지 개발에 정부와 함께 투자하여 많은 성과를 이루고 있음

- 일본 :

  • 96%에 달하는 에너지 의존 국가로서 대체 에너지 개발에 적극적으로 투자하여, Fuel Cell 기술은 전 세계적으로 최선두에 있음

• 하이브리드 카를 이미 운송수단으로 널리 보급, 사용하고 있음

• 혼다 및 민간기업에서 적극적으로 수소에너지 개발 및 인프라 구축에 투자하여 결실을 맺고 있음

- 중국 :

• 2008년 베이징 올림픽때 수소 자동차를 선보임

• 2010년 상하이 엑스포때 운송 수단으로써 수소 버스 및 자동차를 사용함

• 점차적으로 수소 및 하이브리드 카 사용을 추진하고 있음

- 한국은 수소 에너지 개발 후발 주자로 시작하였으나, 현재는 리딩 그룹에 속하고 있음

- 전 세계적으로 수소 에너지 개발과 인프라 구축에 막대한 자금을 투자하여 2020년에는 수소 에너지를 화석연료의 대체 에너지로서 사용할 계획

○ 선진사회 진입의 조건으로서의 세계적 원천소재 및 IP의 확보

- 21세기에 들어 세계적으로 생물자원 확보 및 특허 경쟁이 치열해지고 있으며, 자국의 생물다양성 및 보전의 중요성에 대한 인식이 높아짐에 따라 선진국들은 생물 관련 유전자은행을 통해 생물 및 유전자원 보존시스템을 구축

- 생물다양성협약과 ABS (Access and Benefit Sharing) 협약에 따라 비싼 기술료와 자원이용 부담료를 치룰 수밖에 없으며 국가 간 분쟁의 소지도 있을 것으로 예상

- 바이오수소생산 분야에서도 각국의 원천미생물을 활용한 연구가 주류를 이루고 있으며, 경제적 효과가 기대되는 미생물 및 관련기술의 경우 연구용 이외 산업용으로는 엄격히 규제가 되고 있는 실정이며 이를 위반할 경우, 많은 경제적 사회적 책임이 뒤따름

- 본 연구진은 2002년 심해열수구로부터 수소 생산 고온성 고세균 (NA1)을 분리하여 유전체 분석을 완료하고, 국내특허출원 및 국외우선권을 확보한 상태

- 전분, 개미산, 일산화탄소를 이용하여 수소를 다양한 대사경로를 보여 실험결과 기존의 고세균의 특징인 높은 수소생산효율을 보여주고 있어 상용화기술개발이 성공할 경우 원천소재 및 원천기술을 이용하여 세계시장에 진출 및

기술수출이 가능할 것으로 기대

○ 정부의 융복합기술 우선 정책 및 녹색성장 기조를 대변하는 신성장동력 산업 육성 정책에 부응하고 지역경제 활성화로의 발전 가능성

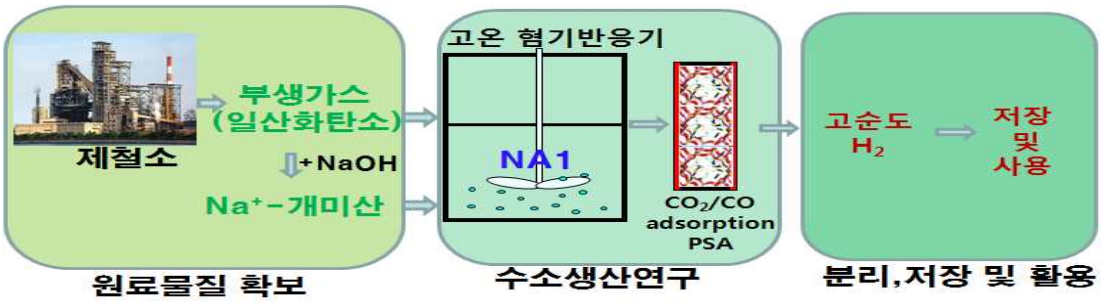
- 민간기업의 해양분야 투자 및 사업화를 통해 정부와 기업이 협력하는 R&DB 모델 창출 및 해양산업 활성화를 위한 국가차원의 지원 노력이 필요

1.3 연구개요

❑ (개요) 해양극한미생물 이용 바이오수소 대량생산 기술개발

○ (사업 정의) 심해열수구 유래 현존하는 미생물중 최다의 수소화 효소를 보유하고, 수소생산성 (g-cell당) 최대인 국내 원천자원 NA1(특허)을 이용하여 해양생명공학기술을 활용한 수소생산성 증대 산업균주를 개발하고자 함

○ (사업 정의) 또한 바이오수소 원료 물질로 전처리 없는 부생가스 혹은 부생가스유래 개미산 나트륨을 사용하여 부생가스이용 바이오수소생산 및 활용을 위한 프로세스를 개발하고자 함



<그림 1-7> 부생가스활용 바이오수소 생산기술 개요

❑ 추진경과

○ '02년: 국내최초 심해열수구 극한미생물 NA1 분리

○ '04~07년 해양극한분자유전체연구단사업 : 해양심해열수구 초고온 고세균 생명현상 및 유전체 연구

○ '08년 07: 보고 미생물중 수소화 효소 (총 8종) 최다 보유 확인

○ '08년 09: 국내특허출원완료, 12월 매일경제, 한국경제 등 다수 일간지 소개

○ '09년 07: 해양고세균 이용 바이오수소 개발 사업 시작

○ '10년 09: NA1의 바이오수소연관 새로운 생명현상(Nature 게재)

○ '12년 06: 100L 규모 고온혐기 바이오수소생산 실증시설 구축

○ '12년 06: 세계 최초 부생가스이용 바이오수소 생산 시연회

○ '15년 06: 톤규모 실증계획

❑ 연구목표

○ 국내 원천생명자원인 해양극한미생물 Thermococcus onnurineus NA1의 오믹스기반 산업균주의 개발, 공정개발 및 최적화, 파일롯규모 (10톤) 플랜트 구축 및 실증생산을 통해 해양바이오수소 대량생산기술 개발

○ '18년 해양 초고온 고세균을 이용한 바이오수소 대량생산 원천기술 확보

<그림 1-8> 부생가스활용 바이오수소 생산기술 목표 및 비젼

❑ 주요 연구내용

○ 바이오수소 생산 해양유래 산업균주 개발 (~'18)

○ 해양바이오수소 대량생산 공정개발 및 최적화 (~'18)

○ 해양바이오수소 파일럿 플랜트구축, 실증생산 (10kg/일) 및 경제성분석 ('15)

○ 해양바이오수소 대량생산 플랜트 구축 및 공정 스케일업 (10톤) ('15~'18)

- 10톤 최적 반응기 개발 및 바이오수소 생산성 최적화

○ 해양바이오수소 대량생산 기술개발 (1만톤/년) ('18)

1.4 기획연구의 추진방법 및 체계

❑ 기획연구의 추진 방법

○ 환경분석을 통한 미래기술 예측 및 역량분석

- 정책·시장·기술·특허 동향 및 전망 분석
- 기술개발 역량분석 및 수요분석

○ 바이오수소 연구개발 추진계획(안) 수립

- 연구 추진계획 및 사업화 전략 수립

○ 연구개발 타당성 분석 및 활용방안 연구

- 정책적·기술적·경제적 타당성 분석
- 연구개발 활용방안

○ 관련 전문가 그룹 구성 및 자문

- 연구방향, 수립 목표의 적절성 검토, 도출된 중점 지원기술 및 세부 사업의 적정성 검토를 위한 전문가 자문회의 개최

- 참여 전문가로부터 도출된 내용들은 연구기획 회의를 거쳐, 자문 위원회에서 검토

- 전문기관과 정기적인 검토회의를 통해 연구추진의 방향성 유지

- 기획위원회 및 자문위원회 이외의 전문가 의견 청취 및 기획연구의 보완

<표 1-16> 기획연구 방법기법

단 계	주 요 테 마	주 요 방 법
전략적 목표 설정 단계	국내외 기술분석	벤치마킹
	전략의 수립	SWOT분석, 장기전략계획
환경 및 역량 분석, 여건파악 단계	환경여건분석	STEeP분석, 미래이슈·니즈분석
	기술 연관관계 및 체계 분석	기술체계도(Technology Tree)
	기술수준분석	TRL분석(Tech. Readiness Level)
	기술영향 평가	상호영향분석(Cross Impact Analysis)
핵심기술과제 선정 단계	선정평가	후보기술 전문가 Pool 운영
	자원배분	AHP(Analytic Hierarchy Process)
세부실행계획 작성 단계	일정계획	Gant Chart
	소요연구비	활동중심 비용관리(Activity based Costing)
	소요연구인력	Engineering Man/Month

<표 1-17> 기획연구 세부추진방법

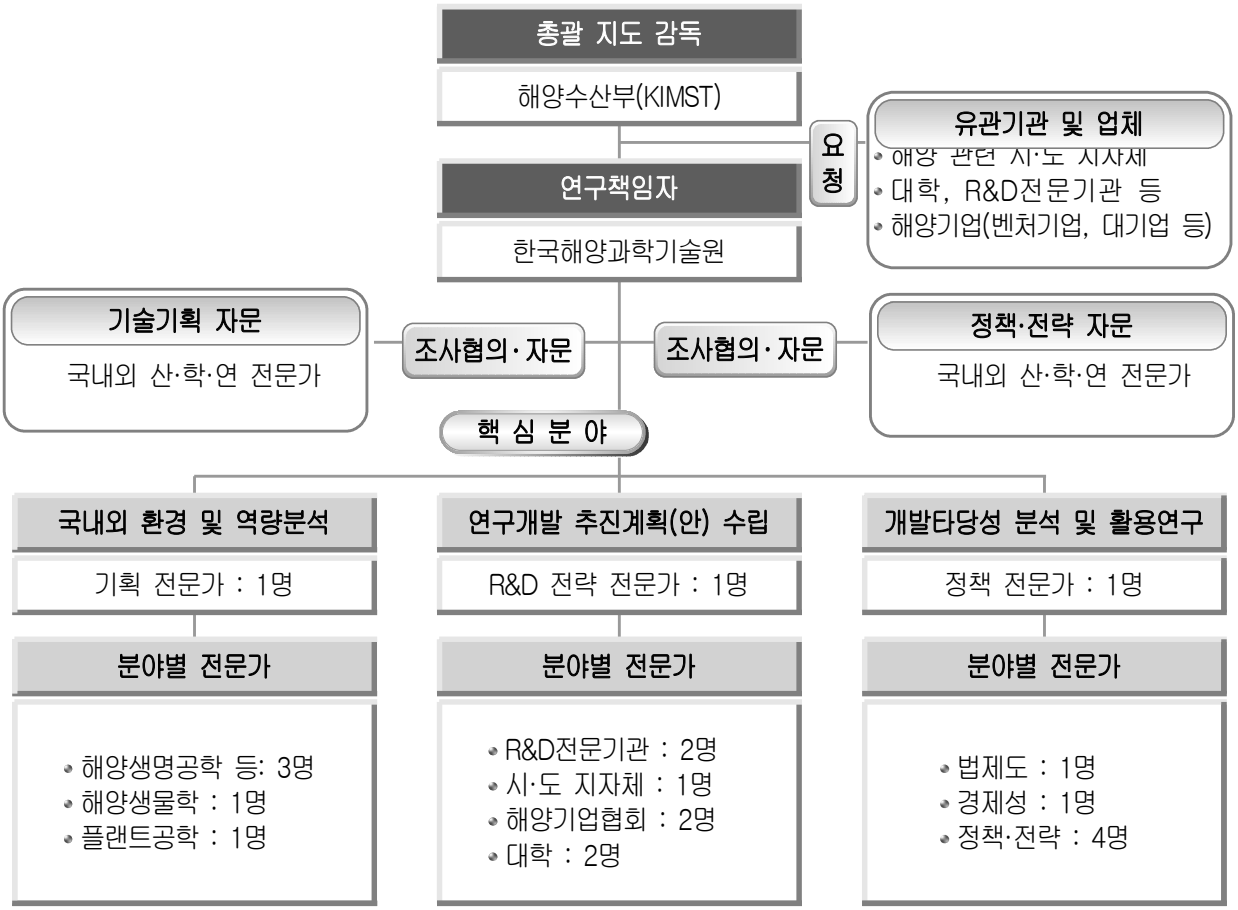
연구내용	세부추진방법
국내·외 환경분석	◦ 국가주도 기술기획 사례 조사 ◦ 해외연구 및 기획 사례조사로 국내외 기술수준 분석 ◦ 기술자료수집 및 전문가 그룹 설문조사로 선행기술조사 ◦ 문헌조사 등을 통한 대상기술의 미래수요 예측
비전 및 최종목표 수립	◦ 국내·외 환경 및 역량분석 결과를 토대로 STEeP분석, SWOT 분석 및 비전 제시 ◦ 연구개발 기대성과의 사회·경제적 파급효과에 대한 분석 및 타당성 제시 ◦ 전문가로 구성된 팀 주도로 비전실현을 위한 부문별 목표수립 및 범위 설정
핵심과제 도출	◦ 관련 기술 전문가 대상의 광범위한 설문조사를 통해 기술수요 파악 ◦ 학계, 엔지니어링 및 관련 산업계 등 전문가들을 대상으로 전문가 집단을 구성하고 의견 수렴 ◦ 계층분석기법(AHP)으로 기술개발 우선 과제를 도출하고, 기술개발 필요 항목을 그룹화 ◦ 핵심기술의 목표, 사업화 가능성, 시장전망 등을 근거로 핵심과제 도출 ◦ 국가 정책방향 분석과 전문가 설문을 통하여 핵심기술별 연구수행 예산 추정 ◦ 도출된 핵심과제별 우선순위 분석에 의한 로드맵 작성 ◦ 전문기관과 검토회의를 통한 연구추진의 방향성 확보
추진전략 수립	◦ 성공적인 사업수행을 위한 추진체계와 운영방안 제시 ◦ 전문가의 자문 활용
최종보고서 작성	◦ 최종 도출된 결과들에 대한 최종 자문회의 개최 ◦ 위에서 도출된 결과들을 토대로 최종 기획보고서 작성

❑ 기획연구의 추진체계

○ 연구목표에 따라 전략적 목표 설정, 환경분석 및 여건파악, 대상기술 검토 및 핵심기술 과제 선정, 세부실행계획 작성 등 크게 4단계로 구분할 수 있으며, 단계별로 기획기법을 적용

조직구성 체계

- 정책수립·사업기획 분야에서 경험이 풍부한 전문가를 중심으로 효율적 인력투입 및 배치
- 중점지원기술기획, 사업화 전략, 해양산업진흥 정책지원 등 3개 핵심분야로 워킹그룹 구성
- 지자체, 대학, R&D전문기관, 해양기업 등의 자문은 KIMST와 협의하여 객관성·전문성 확보



○ 기획위원회 및 자문위원회 구성은 다음과 같음

<표 1-18> 기획연구 추진위원 구성

구분	이름	소속	전공
내부기획위원	강성균	KIOST	생물공학
	이정현	KIOST	미생물학
	이현숙	KIOST	생명공학
	김태완	KIOST	생물화공학
	박세헌	KIOST	자원경제학
	강길모	KIOST	과학기술정책학
	김민식	KIOST	생명과학
	김미숙	KIOST	물리학
	윤전희	KIOST	특허법 변리사
외부 기획위원	이학로	포항산업연구원(RIST)	생물정보학
	이성재	경희대학교	미생물학
	조병관	KAIST	생물화학공학
	장인섭	GIST	화학생물공학
	박성훈	부산대학교	화학공학
	김해진	㈜엔솔테크	단백질공학
	김양선	㈜엔솔테크	식물병리학
	나정걸	KIER	화학공학
	이성곤	KIER	기술경영학
	유승훈	서울과학기술대학교	자원경제학
	신승균	미국로드아일랜드대학	경영학
	권오경	㈜포스코엔지니리엉	환경공학
	정현태	(주)포스코건설	환경공학
	김구용	(주)현대제철	환경공학
	오영삼	㈜한국가스공사	에너지공학
	신정섭	KB 인베스트먼트	경영학/생명공학
	유영돈	고등기술연구원	화학공학

2. 환경 및 역량분석

2.1 환경 분석 및 이슈 도출

2.1.1 환경변화 분석

☐ 정책환경변화

○ 세계 각국은 해양 분야에서 자국의 이익 실현을 위하여 장기적인 관점의 통합 해양정책 추진

- 미국: 범부처 해양정책 테스크포스 설치('09)
- 일본: 총리가 본부장인 '총합해양정책본부' 설립('07)
- 중국: '국가해양위원회' 신설 및 '국가해양국' 확대('13)

○ 미래창조과학부는 창조적 과학기술을 통한 창조경제 육성을 위해 제3차 과학기술 기본계획 수립 추진('13.7)

- 창의적 아이디어와 과학기술 · ICT의 융합을 통해 신산업, 신시장 창출로 연결하는 국가 '창조경제 생태계' 조성방안 마련('13.6)

○ 해양수산부는 '생명-생산-생활이 넘치는 바다, 바다를 통해 국민의 꿈과 행복 실현'을 목표로 하는 국정과제 및 실행계획 수립('13.4)

- 5대양 6대주 글로벌 해양 경제영토 확대
- 전통 해양산업의 미래 산업화 구현
- MT(Marine Technology) 기반의 미래성장동력창출

☐ 경제환경변화

○ 미국발 금융위기('08), 유럽 재정위기('11)로 인해 해양과학기술 및 해양산업 침체 장기화 우려

- '11년 해양산업의 GDP 기여도 감소 : 7.1%('08) → 6.3%('11, 약 75조 9000억원)

○ 미래 창조경제를 이끌어 갈 핵심 신성장동력 창출을 위해서는 해양 R&D에 대한 국가차원의 지원 확대 필요

❑ 사회환경변화

○ 기후변화, 환경오염 등 글로벌 이슈에 대응하는 규제 관련 신기술의 선점을 통하여 다국적 선도기업의 시장독점력 강화

○ 에너지·자원부족 심화, 기후변화 기인 자연재해 증가, 해양영토경쟁 심화 등으로 해양에 대한 사회적 관심 고조

❑ 기술환경변화

○ 선진국들은 국가 주도로 타 분야 기술과의 융복합을 통해 미래 첨단 신산업 창출 도모하여 미래성장 잠재력이 높은 해양자원, 해양바이오, 해양플랜트 분야에 대한 국가주도의 기술개발 강화

2.1.2 이슈분석

○ 사회경제적 이슈와 분석은 STEeP 분석 툴을 활용하여, 각 분야별 주요 이슈를 체계적으로 해당 프로그램과 연관시키도록 함

○ 해당 프로그램과 관련된 제품의 시장 니즈, 즉 어떠한 도전과제, 개념 또는 성능의 기술개발을 요구하고 있는지를 파악

- 앞으로 해당 프로그램과 관련된 제품의 국내외 시장 혹은 산업의 규모는 어느 정도로 성장할 것이며, 시장특성과 경쟁 환경은 어떠한가?

- STEeP : 국내·외적으로 현재사회와 '20년까지의 미래사회를 지배할 결정인자(혹은 이슈)들을 사회(Social), 과학기술(Technological), 경제(Economic), 생태(ecological), 정치(Political) 및 기타로 구분하여 선정하고 그 영향을 분석.기술

○ 해수자원화 활용 연구의 경우 각 항목을 아래와 같이 정리함

- 사회적 이슈 : 환경안전성, 신 부가가치 창조, 해수 자원 개발 확대

- 기술적 이슈 : 해양환경 개선 기술, 녹색성장기술 융합, 신기술 개발
- 경제적 이슈 : 수입대체효과, 고용 창출, 미래자원.에너지 확보
- 환경적 이슈 : 해양환경 영향 최소화, 녹색기술개발 필요성, 국제환경 규제화
- 정치적 이슈 : 정부기관의 입장, 기업을 통한 상용화, 국민 여론 개선

❑ 사회경제적 이슈 분석

○ STEeP 분석표

주요이슈			해당 프로그램이 미치는 영향요인	영향요인의 가중치		
				단기	중기	장기
S	S1	에너지·자원의 고갈	에너지비용의 증가와 자원고갈 심화로 에너지 수요 증가	**2.6**	2.3	2.3
	S2	글로벌 시장 선점 경쟁 격화	세계시장의 통합으로 글로벌 경쟁 심화 불가피	2.1	**2.5**	**2.6**
	S3	인구구조의 변화	저출산, 노령화로 인한 새로운 도시 구조 및 거주양식의 변화 증가	1.7	2.3	2.5
T	T1	에너지환경 개선기술	Green Race 대응을 위한 환경관리 및 개선 기술의 필요성 대두	2.0	**2.7**	**2.7**
	T2	과학기술의 융복합화	IT, BT, NT와의 융합으로 해양 하이브리드 기술개발 가능성 증가	**2.5**	**2.6**	2.0
	T3	에너지 확보를 위한 미래 신기술 개발	신재생에너지원 발굴과 에너지 이용 효율성 제고를 위한 핵심 원천기술 확보 및 국산화	**2.3**	2.3	2.0
E	E1	수입대체효과	해양자원·에너지 개발을 통한 경제적 비용 절감	1.9	2.3	2.4
	E2	고용 창출	해양바이오에너지 사업화에 따른 고용 확대	1.6	2.1	2.2
	E3	신 부가가치 창출	신 부가가치 산업 창출을 위한 사업영역 확대 및 시장 개척	1.7	2.4	**2.8**
e	e1	환경오염의 증가	산업화와 도시화에 따른 환경오염의 증가	2.2	2.3	2.2
	e2	청색기술개발 필요성	환경보호와 경제성장의 선순환을 위한 전략적 구심점 역할	2.3	2.6	**2.7**
	e3	국제환경규제 심화	기후변화 협약 등과 같은 국제적인 규제의 강화	1.8	2.2	2.4
P	P1	국가정책방향의 전환	창조경제 및 복지정책으로 국가정책 방향의 전환	2.0	2.3	1.9
	P2	기업을 통한 상용화	민간기업의 해양분야 투자 및 사업화를 통한 정부기업이 협력하는 R&D 모델 창출	**2.4**	**2.8**	2.3
	P3	시민, 환경단체 분쟁의 증가	지자체, 정부, 민간, 환경단체 간의 분쟁 심화로 정책추진 어려움	**2.4**	2.3	1.8

○ 주요 장단기 이슈 도출 및 대응 전략표

구분	내 용	대응전략
주요 단기이슈	○ 에너지·자원의 고갈 ○ 과학기술의 융복합화 ○ 미래 신기술 개발 ○ 기업을 통한 상용화 ◦ 시민·환경단체 분쟁 증가	• 신재생에너지원 발굴과 에너지 이용 효율성 제고를 위한 핵심 원천기술 개발 • 첨단 기술과 융.복합하여 기능 및 목적에 부합되는 에너지기술 개발 • 해양바이오를 통한 지역경제성장과 일자리 창출의 핵심 수단으로서의 국민여론 개선 효과 증대 • 에너지기술혁신의 선제적 기술개발을 통한 신청색기술 개발 • 미래원천기술 및 기술경쟁력 강화를 위해 기술 실증 및 산업화 촉진에 기업의 참여 유도 • 단기적 관점에서 보았을 때, 바이오에너지 활용에 따른 환경 개선 및 효율성.경제성 증진 등에 대해 이슈가 집중되고 있으며, 이에 따른 핵심원천기술 확보가 필요함
주요 장기이슈	○ 글로벌 시장선점 경쟁 격화 ○ 청색기술개발 필요성 ○ 에너지환경 개선 기술 ○ 신 부가가치 창출	• 그린에너지산업 육성으로 인한 미래 지향적인 신 부가가치 상승 • 국가 온실가스 감축목표 달성 등 기후변화에 대응한 신사업 개발 • 바이오에너지개발에 따른 환경영향 피해 최소화, 환경 관리 및 개선을 도모 • 국내 현장 적용을 포함 해외의 자원.에너지 시장 개척 • 장기적 관점에서 보았을 때, 미래 지향적인 신 부가가치로서 글로벌 'Green Race'에 대응한 자원.에너지기술 및 산업의 국제 경쟁력 확보가 필요

2.1.3 핵심기술군 도출

❑ 핵심기술군 도출 배경

○ 단기 및 장기 관점에서 미래 이슈 분석, 미래시장 분석, 정책동향 분석 등을 통해 미래 이슈와 미래 니즈를 결정하고, 이를 바탕으로 해양바이오수소개발의 주요 적용분야를 선정함

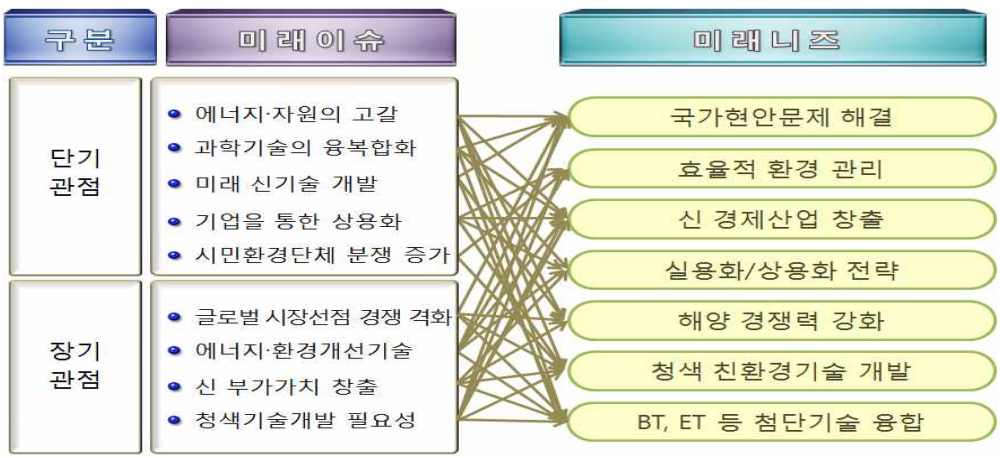
○ 해양바이오수소개발 사업의 주요 적용 분야에 근거하여 4개의 핵심기술군으로 통합·정리하고, 이를 바탕으로 기술동향 분석, 전략개발기술 도출 등을 수행함

❑ 미래 이슈 vs. 미래 니즈

○ 미래 이슈의 경우, 단기 관점에서는 에너지·자원의 고갈, 과학기술의 융복합화, 에너지 확보를 위한 미래 신기술 개발, 기업을 통한 상용화, 시민·환경단체 분쟁의 증가 등 5개 항목으로 정리되고, 장기 관점에서는 글로벌 시장 선점 경쟁 격화, 에너지·환경 개선기술, 신 부가가치 창출, 청색기술개발 필요성 등 4가지 항목으로 정리됨

○ 이에 따른 미래 니즈로는 국가현안문제 해결, 효율적 환경 관리, 신 경제 산업 창출, 실용화/상용화 전략, 해양경쟁력 강화, 청색 친환경기술 개발, BT, ET 등 첨단기술 융합 등으로 구분할 수 있음

○ 미래 이슈와 미래 니즈를 서로 연계한 것이 아래의 그림임

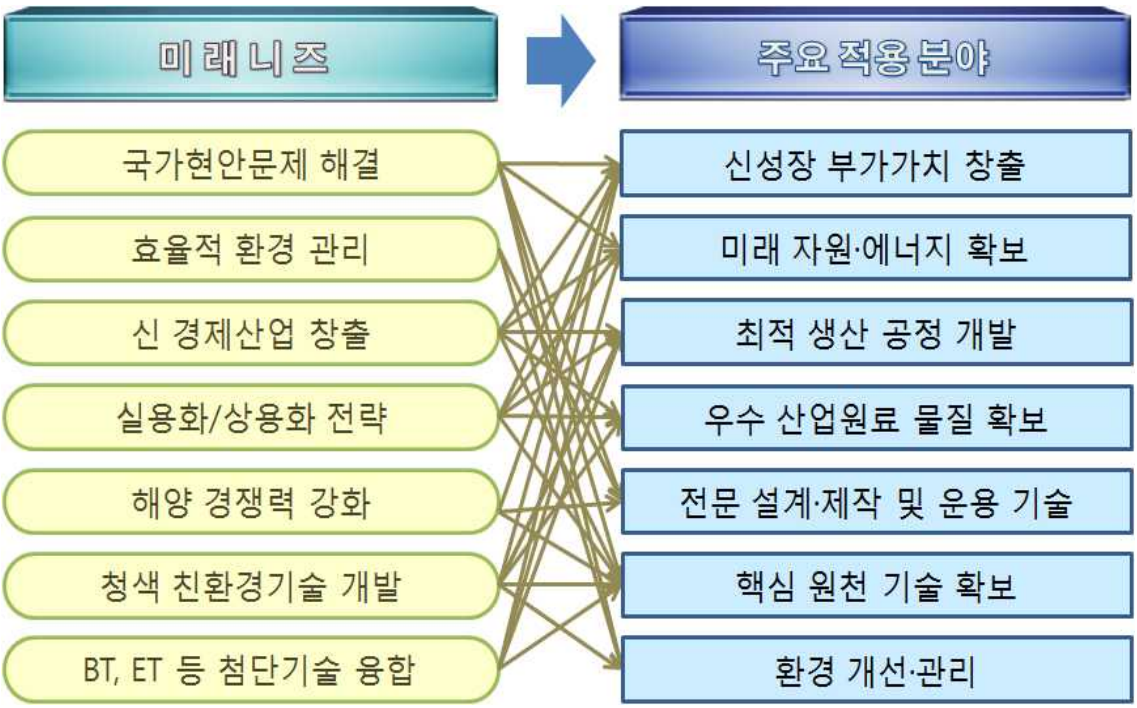


<그림 1-9> 장단기 미래이슈 및 미래니즈와의 연계

❑ 미래 니즈 vs. 해양바이오수소개발 연구의 주요 적용 분야

○ 미래 니즈에 맞춰서 해양바이오수소개발 연구가 적용될 수 있는 주요 적용분야는 신성장 부가가치 창출, 우수 산업원료 물질 확보, 최적 생산공정 개발, 핵심원천기술 확보 등으로 요약 정리 가능

○ 미래 니즈와 해양바이오수소개발 연구의 주요 적용 분야를 서로 연계한 것이 아래의 그림임



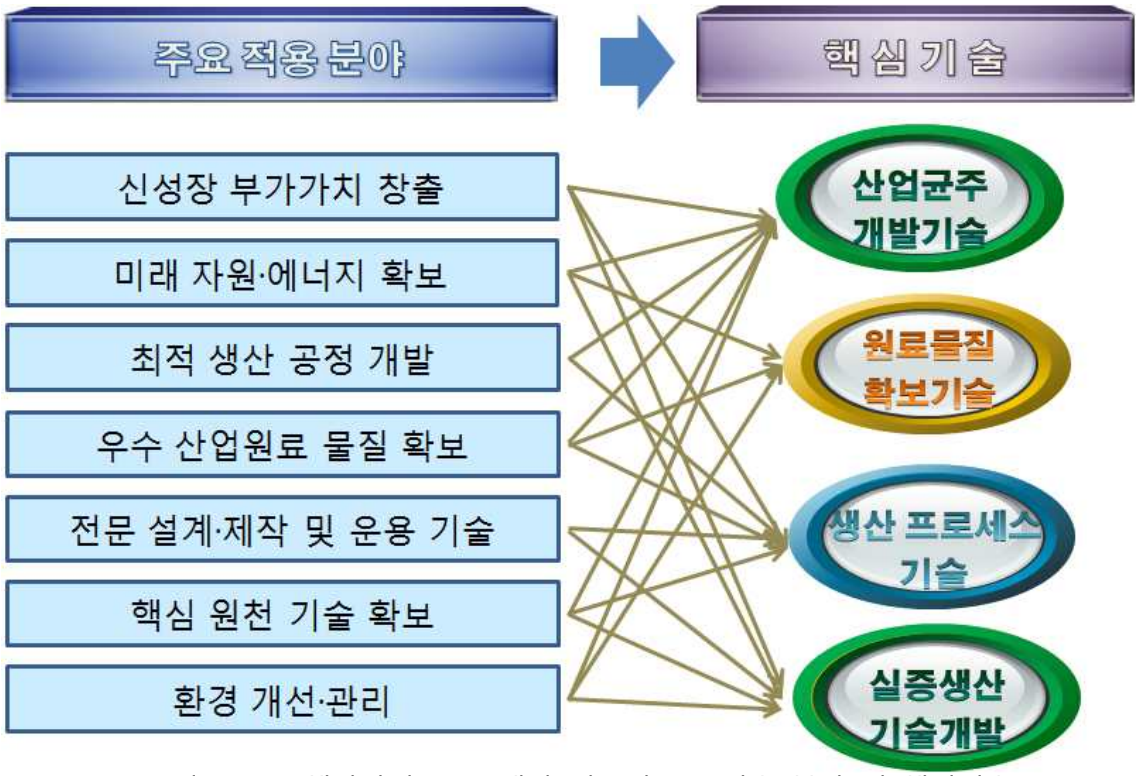
<그림 1-10> 해양바이오수소개발 연구 주요 분야의 미래니즈와의 연계

❑ 핵심기술군 도출

○ 주요 분야를 크게 4가지로 요약·정리

- 산업균주개발기술, 대량생산 프로세스개발 기술, 원료물질확보 기술, 데모플랜트 구축 및 실증생산 기술 등

○ 핵심기술군과 해양바이오수소개발 사업이 적용될 수 있는 분야를 크게 연계하면 아래의 그림과 같이 나타낼 수 있음



<그림 1-11> 해양바이오수소개발 연구의 주요적용 분야 및 핵심기술

❑ 세부기술 분석

○ 각 세부기술에 대해 현기술 활용(현재의 국내 기술 적용), 기술 보완(해외기술 도입 또는 연구개발)으로 구분함

○ 기술보완 항목 중 연구개발이 필요한 기술에 대해서는 중요도(0~5점)와 시급성(0~5점)을 매김

<표 1-19> 해양바이오수소개발 세부기술 분석

핵심 기술군	세부 기술	현기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	연구 개발	중요도 (0~5점)	시급성 (0~5점)
해양 바이오 수소 개발	오믹스연구 수소생산 대사경로 규명기술	O		O	5	5
	대사재설계 수소생산 우수균주 개발기술	O		O	5	5
	개발 균주 장시간 안정성 평가 기술	O		O	4	4
	이산화탄소 저감 연계 방안 기술			O	4	4
	바이오수소 연속생산 공정 개발기술			O	5	4
	바이오수소 연속생산공정 최적화 기술			O	5	4
	CO 물질전달효율 극대화 기술	O		O	5	4
	장기연속 대량생산 기술	O		O	4	3
	제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발 기술	O		O	4	4
	석탄가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술			O	3	3
	(해양)바이오매스 가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술			O	3	3
	20톤 규모 대량생산 데모 플랜트 설계·시공기술			O	5	3
	대량생산 공정 스케일 업 기술	O		O	4	4
	데모 플랜트 실증생산 및 경제성, 사업성 분석 기술	O		O	3	3

2.2 국내 · 외 동향 분석

2.2.1 수소개발 및 활용 현황

❑ 수소생산 현황

○ 국내 산업용 수소 총생산량은 22만 6,900㎥/h

○ 수소는 생산방법에 따라 화석연료 및 재생에너지로부터 생산이 가능하며, 현재는 석유, 나프타 등의 화석연료를 이용하고 있어, 상용화를 추진하고 있으나 궁극적인 신·재생에너지로의 대체를 위해서는 바이오매스, 수전해 및 생물학적인 수단을 이용한 수소 생산으로의 기술개발이 필요

<표 2-1> 수소생산 현황과 과제

생산방법	원료	현황	과제
화석연료로부터 생산	석유, 나프타, 천연가스	상용화된 기술 단기적인 방안으로 우선적용 궁극적으로 재생에너지로 대체	효율 저가화 단기간 수소스테이션용으로 공정 및 장치 최적화
재생에너지로부터 생산	바이오매스	상용화된 기술 단기적 이용 가능	-
	수전해	소규모로 상용화	고압의 수전해장치개발 재생저원에 적합한 소재개발 용량증대 높은 효율
	생물학적	시험단계	생산효율 및 속도증대
재생에너지로부터 화합물 생산으로 생산	메탄올	개질을 위한 촉매연구 진행	CO발생 최소화 저온에서의 반응

※ 출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04

○ 산업용 수소는 반도체, 자동차, 철강, 석유화학, 태양전지 및 LED 등 우리나라 주력 산업의 기초소재로 쓰이고 있으며, 산업의 성장세와 함께 시장이 점차 확대되고 있는 추세임

○ 이와 같은 추세에 따라 공급시장도 성장하고 있어, 국내 최대 수소 전문 공급기업인 덕양은 2013년 9월 군산과 여수에 생산설비를 연이어 준공하며 투자를 추진하고 있으며, 창신화학은 2013년 4월 충남 서산에 수소 생산시설을 완공하고 5월부터 본격 생산을 시작하는 등, 수소 생산 기업의 생산 확대 투자로 국내의 수소 생산량이 큰 폭으로 늘면서 현재는 수소 판매 경쟁이 심화되고 있는 양상을 보임

○ 수소는 공업적으로 보통 천연가스를 비롯한 탄화수소의 열분해에 의해 제조되지만 국내 수소가스 원료는 석유화학사의 정제과정에서 나프타분해 방식으로 얻고 있음. 또한 소량이 천연가스로부터의 프로판탈수소와 소금물분해, 철강사의 제철공정 상의 부산물로 생산됨. 따라서 원료공급처의 확보가 생산능력과 직결됨

- 원료공급처의 생산능력을 통해 분석하면 덕양이 10만9,000㎥/h로 1위를 기록했으며, 이어서 SPG케미칼이 5만㎥/h로 2위를 기록했으며, 3위는 에어리퀴드로 4만5,000㎥/h를 생산, 4위는 린데로 1만2,100㎥/h를 생산함

- 또, SDG는 5위로 6,000㎥/h를 생산하며, 6위는 2013년 수소시장에 새롭게 등장한 창신화학이 2,800㎥/h를 생산하였으며, 7위는 대성산업가스로 2,000㎥/h를 생산함

○ 국내 7개 기업의 수소 생산능력을 모두 합하면 총 22만6,900㎥/h에 달하며, 이는 지난 2012년 18만2,100㎥/h와 비교하면 19.7%, 4만4,800㎥/h가 증가한 수치

○ 각 회사별로 살펴보면 1위 업체인 덕양은 2012년 6만7,000㎥/h에서 2013년 10만9,000㎥/h로 38.5%, 4만2,000㎥/h가 상승했으며, 2위 업체인 SPG 케미칼, 3위 업체인 에어리퀴드, 4위 업체인 린데, 5위 업체인 SDG와 7위 업체인 대성산업가스는 2012년과 2013년이 변동 없이 동일했음

○ 여기에 올해 신규로 시장에 진입한 창신화학의 2,800㎥/h를 덕양의 증가분인 4만2,000㎥/h와 합하면 올해의 증가분인 4만4,800㎥/h가 되며, 이중 덕양의 증가분이 93.75%를 차지함

<표 2-2> 국내 공업용 수소 업체별 생산량

업체명	원료공급처	지역	제조방식	생산능력(2013)	생산능력(2012)
덕양	한화석유화학	여수	소금물분해	35,000㎥/h	20,000㎥/h
	SK	울산	나프타분해	10,000㎥/h	10,000㎥/h
	삼성정밀화학	울산	소금물분해	15,0000㎥/h	9,000㎥/h
	삼성토탈	서산	나프타분해	9,0000㎥/h	9,000㎥/h
	태광산업	울산	프로판탈수소	14,000㎥/h	7,000㎥/h
	LG화학	여수	소금물분해	11,000㎥/h	-
	백광산업	군산	소금물분해	5,0000㎥/h	5,000㎥/h
		여수	소금물분해	1,500㎥/h	1,500㎥/h
	롯데케미칼	서산	나프타분해	3,000㎥/h	3000㎥/h
		여수	나프타분해	3,000㎥/h	-
	삼성BP화학	울산	나프타분해	2,500㎥/h	2,500㎥/h
	덕양(2014.07)	울산	NG분해	(50,000)㎥/h	-
	소 계			109,000(159,000)㎥/h	67,000㎥/h
SPG 케미칼	롯데케미칼 · LG화학	여수	나프타분해	40,000㎥/h	40,000㎥/h
		대산	나프타분해	4,000㎥/h	4,000㎥/h
	삼성토탈	대산	나프타분해	2,000㎥/h	2,000㎥/h
	삼성BP화학	울산	나프타분해	2,000㎥/h	2,000㎥/h
	이수화학	울산	프로판탈수소	1,000㎥/h	1,000㎥/h
	효성	울산	나프타분해	1,000㎥/h	1,000㎥/h
	소 계			50,000㎥/h	50,000㎥/h
에어리퀴드	에어리퀴드1	여수	나프타분해	7,000㎥/h	7,000㎥/h
	에어리퀴드2	여수	나프타분해	38,000㎥/h	38,000㎥/h
	소계			45,000㎥/h	45,000㎥/h
린데	LG화학	대산	나프타분해	9,000㎥/h	9,000㎥/h
	삼성	기흥	CNG개질(SMR)	1,600㎥/h	1,600㎥/h
	린데	포항	나프타분해	1,200㎥/h	1,200㎥/h
	포스코	포항	코크스	300㎥/h	300㎥/h
	소 계			12,100㎥/h	12,100㎥/h
SDG	대한유화	울산	나프타분해	6,000㎥/h	6,000㎥/h
대성산업가스	대성산업가스	파주	메탄올	2,000㎥/h	2,000㎥/h
창신화학	롯데케미칼·LG화학	서산	나프타분해	2,800㎥/h	-
총 계				226,900(276,900)㎥/h	182,100㎥/h

○ 국내 카트리지 공급용 수소 총생산량

- 국내 수소시장은 대규모 수요처 공급을 위한 파이프라인 방식과 중·소규모 수요처를 대상으로 한 카트리지 공급방식으로 체계가 나눠져 있음. 국내 카트리지 공급용 수소 총생산 능력을 살펴보면 덕양이 9,600㎥/h(덕양의 총 수소 생산 능력의 8.8%에 해당하는 수치)로 가장 많이 생산하고 있음

- 또, SPG케미칼은 6,200㎥/h로 총 생산능력의 12.4%의 카트리지 공급용 수소를 생산하고 있으며, 이어 창신화학은 2,800㎥/h로 총 생산능력의 100%를 카트리지 공급용으로 수소를 생산하고 있음

- SDG는 2,500㎥/h로 41.7%를 차지하며, 린데는 1,600㎥/h로 13.2%를 차지함. 마지막으로 에어리퀴드는 800㎥/h로 카트리지 생산은 1.8%에 불과함

- 대성산업가스는 카트리지 생산을 하지 않으며 2,000㎥/h급 플랜트를 통해 LED 제조사인 LG이노텍에 수소를 파이프라인 방식으로 공급함

- 이에 국내 카트리지 공급용 수소 총생산을 계산하면 2만3,500㎥/h에 달하며 이는 국내 수소 총 생산능력의 21.6%에 해당함

- 2012년의 카트리지 수소 점유율인 28.5%와 비교하면 6.9% 감소한 것으로 카트리지 생산능력에 비해 총 생산능력이 더 많이 늘어났음을 알 수 있으며, 카트리지 수소 생산량만으로 단순 비교하면 2012년 2만 700㎥/h에 비해 2,800㎥/h가 상승하였음

- 각 제조사의 공장별로 압축기 1대식을 백업용으로 계산한 카트리지 가용생산량은 1만7,860㎥/h로 추정되고 있으며, 이는 2012년 1만5,760㎥/h에 비해 2,100㎥/h, 11.7% 상승한 수치임

- 각 제조사의 백업용량을 감안한 카트리지 가용생산능력을 살펴보면 △덕양 8,160㎥/h, △SPG 4,200㎥/h, △창신화학 2,100㎥/h, △SDG 2,000㎥/h, △린데 1,000㎥/h, △에어리퀴드 400㎥/h로 파악되고 있음

○ 국내 수소 카트리지 판매량

- 2013년 국내 카트리지 판매량을 살펴보면 총 1만2,100㎥/h로 파악되고 있음

- 이는 2012년 1만2,600㎥/h보다 4.13%, 500㎥/h가 줄어든 수치로, 특히 카트리

지 생산량이 12.7% 상승한 것과 비교하면 차이는 더욱 커지며, 이에 2013년 수소 카트리지 판매가 다소 부진했음을 보여주고 있음

- 덕양은 높은 생산량 증가에 비해 카트리지 판매량은 감소했는데, 2013년 수소 카트리지 판매량이 6,000㎥/h로 2012년 6,200㎥/h에 비해 200㎥/h가 감소했음. 더불어 SPG도 2013년 3,800㎥/h로 2012년 4,000㎥/h에 비해 200㎥/h가 감소했으며, 린데는 2013년 900㎥/h로 2012년 1,000㎥/h에 비해 100㎥/h가 감소했음. 한편 신규 진입한 창신화학의 경우는 영업기간이 짧은 관계로 정확한 수치가 알려지지 않고 있음

<표 2-3> 국내 카트리지 공급용 수소 총 생산능력

업체명	2013년	2012년
덕양	9,600㎥/h(6,912,000㎥//월)	9,600㎥/h(6,912,000㎥/월)
SPG	6,200㎥/h(4,464,000㎥/월)	6,200㎥/h(4,464,000㎥/월)
린데	1,600㎥/h(1,152,000㎥/월)	1,600㎥/h(1,152,000㎥/월
ALK	800㎥/h(576,000㎥월)	800㎥/h(576,000㎥/월)
SDG	2,500㎥/h(1,800,000㎥/월)	2,500㎥/h(1,800,000㎥/월)
창신화학	2,800㎥/h(2,016,000㎥/월)	-
합계	23,500㎥/h(16,920,000㎥/월)	20,700㎥/h(14,904,000㎥/월)

<표 2-4> 국내 카트리지 공급용 가용생산 능력

업체명	2013년	2012년
덕양	8,160㎥/h(5,875,200㎥//월)	8,160㎥/h(5,875,200㎥//월)
SPG	4,200㎥/h(3,024,000㎥/월)	4,200㎥/h(3,024,000㎥/월)
린데	1,000㎥/h(720,000㎥/월)	1,000㎥/h(720,000㎥/월)
ALK	400㎥/h(288,000㎥월)	400㎥/h(288,000㎥월)
SDG	2,000㎥/h(1,440,000㎥/월)	2,000㎥/h(1,440,000㎥/월)
창신화학	2,100㎥/h(1,512,000㎥/월)	-
합계	17,860㎥/h(12,859,200㎥/월)	15,760㎥/h(11,347,200㎥/월)

<표 2-5> 판매현황

업체명	2013년	2012년
덕양	6,000㎥/h(4,320,000㎥/월)	6,200㎥/h(4,464,000㎥//월)
SPG	3,800㎥/h(2,736,000㎥/월)	4,000㎥/h(2,880,000㎥/월)
린데	900㎥/h(648,000㎥/월)	1,000㎥/h(720,000㎥/월)
ALK	400㎥/h(288,000㎥월)	400㎥/h(288,000㎥월)
SDG	1,000㎥/h(720,000㎥/월)	1,000㎥/h(720,000㎥/월)
창신화학	-	-
합계	12,100㎥/h(8,712,000㎥/월)	12,600㎥/h(9,072,000㎥/월)

○ 업계에 따르면 수소가격은 2010년 이후 2011년, 2012년 수소 공급 부족과 수요 증가로 인해 가격이 계속적으로 상승해왔으나, 2013년에는 보합세를 보이고 있는데, 이는 관련 산업의 침체와 무관하지 않은 것으로 분석됨

○ 산업용 수소는 반도체, LCD, 광통신, 석유화학, 철강분야 등과 함께 태양전지, LED 등 첨단산업에도 사용되고 있으며, 최근에는 고유가 및 친환경 시대를 맞아 수소화 정제과정을 거치는 석유화학탈황공정에도 사용되고 있음

○ 이러한 수요처들은 2012년 후반기와 2013년 상반기에 걸쳐 많은 어려움을 겪었는데, 반도체 시장은 유럽경기의 침체로 많은 어려움을 겪었으며, LCD 역시 침체를 겪었음

○ 철강과 조선업계도 불황을 겪으며 수소 수요는 점점 감소했음. 이는 2013년 카트리지 판매현황이 2012년에 비해 감소한 것에서 유추할 수 있으며, 수소 시장은 2014년부터 점차 개선될 것으로 업계에서는 전망하고 있음

○ 반도체, 전자 분야에 공급되는 수소 가격은 2013년 2, 3월에 예전 가격을 완전히 회복했고, 신규수요의 경우도 증가할 것으로 예상되며, 수요 전망이 좋지 못할 경우에도 보합세를 유지할 것으로 전망하고 있음

○ 관련 산업으로 철강, 조선의 경우는 경기 회복과 더불어 서서히 수요가 증가하고 있는 추세이며, 자동차는 환율 강세로 인해 수출 부진을 겪을 것으로 예상돼 수요가 감소할 가능성도 존재하고 있음. 또, 폴리실리콘의 경우는 예측이 어려울 정도로 현재 시장 침체를 보이고 있지만, 태양전지 셀·모듈기업들의 가

동률이 높아지고 있고 2013년 1분기를 최저점으로 가격이 소폭 상승하는 등 회복의 조짐이 보이고 있음

○ 이와 같은 상황을 종합하면 2013년 4분기 이후의 수요산업들의 업황은 수소 생산·유통업계에는 긍정적일 것으로 분석되고 있음

❑ 시장동향

○ 수소 시장은 앞서 살펴본 산업용 수소와 더불어 수소의 주요 활용처인 (수송 및 발전용)연료전지 시장을 살펴봄으로써 알 수 있음

○ 수소 생산 가격

- 수소의 시장동향을 살펴보기 전, 시장에서의 수소 가격은 어떻게 형성되어 있는지 살펴보도록 함. 수소의 가격은 그 생산방식 및 순도, 유통과정 등에 따라 가격 형성의 폭이 매우 크며, 하기의 <표 2-6>는 PV-H2, Electrolysis, PEC 등의 기술별 수소의 가격을 나타낸 것임

<표 2-6> 수소생산 기술별 가격

Technology	Cost	Remark
SMR	3.38$/kgH2	54㎥/hr[1]
	14.23$/kgH2	70㎥/hr[2]
	18,472$/kgH2	30㎥/hr[3]
	7,785$/kgH2	300㎥/hr[3]
	21,412$/kgH2	30㎥/hr[6]
PV-H2	37,838KRW/kgH2	15㎥/hr[4]
Electrolysis	19.1$/kgH2	1-10Ton/yr[5]
	18,403KRW/kgH2	30㎥/hr, alkaline[6]
	22,945KRW/kgH2	30㎥/hr, PEME[6]
PEC	8,264,324KRW/kgH2	[7]
	26,961KRW/kgH2	(STH = 14%, 20Khrs)
2 stage fementation process for H2(glucose)	2.91$/kgH2	[8]
	5,347KRW/kgH2	100㎥/h[11]
Fermentation photobiological	4,255KRW/kgH2	100㎥/h[11]
	13.53$/kgH2	300kgH2/d[10]
	11.96$/kgH2	600kgH2/d
	12,099KRW/kgH2	[9]

※ 출처: 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 한국에너지기술연구원, 2014.04

주: 1) D.Meyers set al,"Cost and Performance Comparison of Stationary Hydrogen Fueling Appliances", DOE Hydrogen Program Review, 2002

2) C.Adams et al.,"Bid in response to the DOE/NHA proposal to Design a Public Hydrogen Fueling Station", UC Davis, 2004

3) Gim,B., J.W.Kim,J. of Energy Engineering, 16(4), 2007,pp170-180.

4) Gim,B., J.W.Kim, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society , 21(6) 2010,pp595-603.

5) NREL, Summary of Electrolytic Hydrogen Production, NREL/MP-560-36374, 2004,USA

6) Gim,B., J.W.kim, H.Ko, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society ,22,4 (2011),pp559-567.

7) Gim,B., J.W.Kim, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society , 21(1) (2010), 64-71.

8) Oh, Y., Y.Kim. M.Kim,S.Park, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society 17(1) (2006) 98-108

9) Gim B.,J.W.Kim, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society 19(4) (2008) 322-330

10) T. Eggeman, 2004, Boundary Analysis for H2 Production by Fermentation, Neoterics International Inc., U.S.A..

11) Gim,B., J.W.Kim, S.Y.Park, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society 19(2) 145-155 (2008)

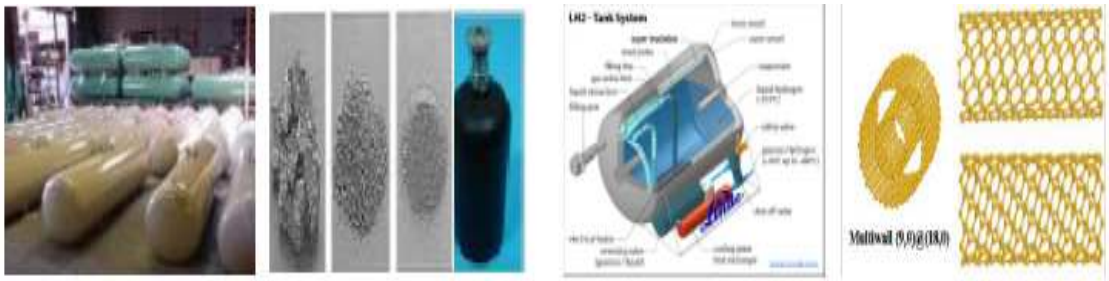
○ 다양한 방식으로 제조된 수소는 저장 및 수송을 거쳐 산업에서 활용되고 있는데, 수소 저장은 주로 고압수소로 저장하거나 액체수소로 저장하여 활용되고 있으며, 수소의 수송은 파이프라인 및 탱크로리 등을 이용하고 있음

- 고압수소로 저장 : 국내에서 사용되는 수소의 대부분은 고압으로 저장되고 수송, 유통되고 있음. 주로 내용적 46.7ℓ인 망간강 또는 합금강 용기에 150Kg/cm2 수소 충전

- 수소 저장합금에 저장 : 단위 체적당 약 1,000배의 수소를 저장할 수 있으므로 고압 봄베나 액체수소 보다 높은 밀도로 수소를 저장

- 액체수소 저장 : 성능이 우수한 단열재 요구(진공단열, Perlite로 충진한 후 진공), 액체수소 저장용 초단열재의 개발, 안전성 확보 등에 대한 기술 필요

- 기타 저장기술(물리 화학적 흡착) : 암모니아, 메탄올, 헥산 등의 화합물에 의한 저장기술, 제올라이트에 저장, 카본나노튜브에 저장, Slush수소에 의한 저장, 지하 저장



<그림 2-1> 수소 저장 방법

- 파이프라인에 의한 수송 : 가장 보편화된 수소의 수송기술로 액체수소의 경우 공장부지 내 정도의 가까운 거리에서 사용함. 미국(Houston), 독일(Rhein-Ruhr), 프랑스, 벨기에에서 100 ~ 330Km의 직경, 100기압의 압력으로 수송

- 일반 용기를 이용한 수송 : 고압 기체수소저장 실린더, 12 - 15MPa의 압력으로, 40ℓ와 47ℓ인 용기를 사용함. 소형의 액화수소 저장용기

- 탱크로리에 의한 수송

- 일반고압용기: 압력 15MPa 이내, 용적 50 ℓ 미만, 5 - 7㎥의 수소 운반
- 집결용기 : 길이 6m, 무게 500Kg, 20MPa 압력, 60 - 140㎥ 수소 저장
- 탱크로리 : 집결용기 20개 수송, 1회에 최대 2,800㎥까지 수소 수송

<그림 2-2> 수소 수송 방법

○ 수송용 수소 시장

- 현재 수송용 에너지는 전체 에너지원의 30%를 차지하고 있으며, 운송수단의 수소연료전지는 수소 경제시대의 핵심

- 연료전지 자동차를 시작으로 가정용, 산업용, 발전 등으로 보다 광범위한 연료전지의 활용이 시작되는 시기가 점차 도래하고 있음

- 수소경제의 조건으로는 대량의 수소 소비처(연료전지 및 연료전지 자동차), 수소의 인프라 구축, 수소 가격의 경쟁력 등을 들 수 있으며, 각국 및 연료전지 소비처 등에 대하여 살펴봄

<표 2-7> 국내 수소연료전지 자동차 산업화 Road Map

연도		'07 - '09	'10 - '12	'13 - '15	'16 - '20
구분		모니터링 1 단계	모니터링 2 단계	시범운행 1 단계	시범운행 2 단계
차량대수	승용(대)	30	500	10,000	50,000
	버스(대)	4	20	200	1,000
승용차 가격		6.3 - 5억	3억	1.2억	0.5억
정부 지원		50%	50%	30%	10%
수소 스테이션 수		9	10	20	500
대상		-	공공기관	일반	일반

※ 출처: 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04 (신재생에너지 R&D 자료 인용)

○ 수소스테이션 운영 현황

- 국내 수소스테이션은 기존의 주유소나 가스충전소에서 휘발유 · 경유 · LPG 등의 석유연료를 차량에 주입하는 것과 마찬가지로 연료전지가 탑재된 차량에 수소를 연료로 충전할 수 있는 장소를 말하며, 수송용 연료전지 및 수소의 소비를 증대시키기 위하여 수소의 저장 및 운송과 더불어 수소스테이션에 대한 인프라 확장이 필요함

- 국내는 현재까지 15개소를 건설하고, 13개소를 운영하고 있으며, 다음은 국내의 수소스테이션 운영 현황에 대하여 나타낸 것임

<그림 2-3> 국내 수소스테이션 운영

<표 2-8> 국내 수소스테이션 운영현황

운영기관	지 역	준공시기	수소생산방식	이용수	비 고
현대자동차	경기 마북	2005.09	부생수소	6-7대	
	서울 홍릉	2008.07	부생수소		
	경기 남양	2008.12	부생수소	13-14대	700BAR
	서울 양재	2010.05	부생수소	5-6대	
제주도	제주도	2011.08	물 전기분해	2대	
에너지기술연구원	대전 유성	2006.08	NG개질		
GS칼텍스	서울 신촌	2007.09	납사 및 NG개질	10대	
가스공사	인천 동춘	2007.10	LPG 및 NG개질		

운영기관	지 역	준공시기	수소생산방식	이용수	비 고
SK	대전 유성	2007.12	부생수소		
동덕산업가스	울산 매암	2009.07	부생수소	20대	
동덕산업가스	울산 남구	2012.08	부생수소	20대	700BAR
SPG케미칼	전남 여수	2009.08	LFG개질		철거
성루시	서울 상암	2011.05	LFG개질	13-15대	
에너지기술연구원	전북 부안	2011.10	물 전기분해		
이엠코리아	대구광역시	2013.10	물 전기분해	20대	700BAR

※ 출처: 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04 (신재생에너지 R&D 자료 인용)

- 전 세계적으로 수소스테이션 구축을 위한 프로그램들이 운영되고 있으며, 현재 222개소가 운영되고 있고, 89개소는 폐기, 118개소는 건축 중에 있는 것으로 조사되었음

- 미국, 유럽, 일본 및 캐나다의 수소스테이션 운영은 아래의 <표 2-9>와 같음

<표 2-9> 세계 수소스테이션 운영현황

구분	주요 프로그램	스테이션 수 운영/폐기/건설	특징
미국	HFCIT(Hydrogen Fuel Cell & infrastructures Technologies) CaFCP(California Fuel Cell Partnership) 등	69 / 33 / 54	- 수소생산 : 수 전해방식/외부 생산 - Fuel to Vehicle : Compressed H2 & LH2 - 주요업체 : Air Product, Chevron Texaco - California H2 Highway : 매년 10개소
유럽	CUTE(Clean Urban Transportation for Europe) CEP, H2 Mobility	90 / 36 / 52	- 수소생산 : 수 전해방식/외부 생산 - Fuel to Vehicle : Compresses H2 & LH2 - 주요업체 : Linde, BP 등
일본	WE-NET(World Energy Network) JHFC(Japan Hydrogen & Fuel Cell)	23 / 9 / 2	- 수소생산 : 다양한 연료 개질 방식 - Fuel Vehicle : Compressed H2 - 주요업체 : Oil & gas Company 주도
캐나다	NRCAN(Natural Resources Canada) H2 Highway, City of Toronto	13 / 7 / 2	- 수소생산 : 수 전해방식/외부생산 - Fuel Vehicle : Compressed H2 - 주요업체 : Hydrogenics
기타	-	28 / 3 / 8	-
총계	-	**222 / 89 / 118**	-

※ 출처: 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04

○ 세계 수소 인프라 구축 현황

- 수소 저장용기 현황

일본	• 설계기준, 사용가능 강재의 제약 등 규제대응, 안전성 검증과 기술개발 추진
미국	• 혁신적인 소재개발 • 용기의 가격저감(현재보다 1/3 정도 저하예상) • 액체를 사용한 수소저장기술 연구 • 높은 흡착력을 가지는 물질 합성 접근 • 신소재개발과 평가
한국	• TYPE, 용기 국내 NK TECH에서 40MPa 개발, 생산 • 차량탑재용은 일진, NK등에서 TYPE IV개발 • GROUND TORAGE 용도로서 TYPE Ⅲ사업

- 일본, 미국의 수소이용 현황

일본	• 실용화된 가정연료전지 시장 확대 도모 • 국제표준화를 포함한 적극적인 해외진출(각국의 연료성분 구성대응) • 가격저감 도입 지원(백금사용량저감 및 수소제조 수송 저장을 위한 기초적인 개발) • 연료전지 자동차에 대한 신뢰성, 내구성 연구개발(사회실증 대규모 생산실증) • 공급인프라를 포함한 실증적 대응책 강화
미국	• 2017년 최대효율 60%, 30$/kW, 내구성 5,000시간 목표 • 300건 이상의 특허등록 • 30건 이상의 생산품 시장 진입 • 연료전지 수명 2배, 백금사용량 1/5 수준 • 자동차 연료전지 스택 파워밀도 2.25kW/ℓ(2017년), 2.5kW/ℓ(2020년) 목표

- 수소 인프라 현황

미국	• 캘리포니아 주는 2025년 초 청정 차량 수 140만대 전망 • 2013년까지 수소스테이션 표준화 개발 목표(건설비용 절감) • 2017년까지 100여개 수소스테이션 건설 • H2USA 추진 • 미 에너지부는 천연가스를 원료로 한 수소충전소 분석, 건축양식 데이터수집, 안전, 신뢰성, 운영분석, 기존 충전소에 고압 수전해 설비 적용 등 지원

일본	• 2015년 FCV의 양산개시 예상하여 4개 대도시에 100개 충전소 확보 준비 • 2013년 충전소건설비용 550백만 엔, 2015년 목표 360백만엔 • 토요타 에코타운; 일본최대규모의 직접충전방식 적용 - 급속 충진 실증 • 신쿠라 스테이션; LPG개질 및 ON-site방식-LPG 유통망 활용 실증 • 수소스테이션 보조지원 2013년 46억 엔 • 현재 일본 NEDO에서 인프라와 관련된 연구진행 중
한국	• 그린카 로드맵에 따르면 2020년 168기 수소스테이션 설치 목표 • LPG충전소와 그린벨트 내에 수소스테이션 가능토록 법령개정 고려 • 현재 16개 수소스테이션 건설 중 14개소 운영 중
독일	• 2015년까지 40백만 유로 이상 투자 50기로 인프라 확대 • H2 Mobility 파트너쉽 2023년 400개 충전소 건설계획
영국	• 230년까지 160만대 연료전지자동차 보급 로드맵 • 신차구입 10%, 수소충전소 65개 건설 • 2020년 수소와 디젤의 가격경쟁력 확보 • 2030년 재생가능에너지원으로 75%, 2050년 100감축(이산화탄소 배출량) • 2030년 수소충전소 1,150개 예상 • 수소의 51% 재생전원을 이용한 수전해로 생산, 연료전지 자동차 시장점유 50%
덴마크	• '덴마크의 에너지 계획 2020' • 수소생산용 전기 kWh 당 0.08유로 세금감면/연료전지자동차 세제감면 180% • 2050년 탈 석유 목표, 2020년 열과 동력의 50%, 2035년 100%, 수소사용계획 • 수소연료전지 투자 2011년 30백만 유로
중국	• 2011년 전기구동차량 세금면제 발표 • 현재 4개의 수소충전소 보유

- 기타

• 연료전지자동차 현황과 과제

√ 상용화를 위한 국제적 움직임 : 다임러, 포드, 닛산의 협력

√ 우리나라 : 2015년까지 1,000대 RBAG 양산체재

√ 일본 : 주행거리, 충전시간, 전기공급용(위기상황대비)의 장점언급

√ 부품의 저감, 대량생산부품사용, 재료비절감, 자동차/고속 생산 등 다양한 시도

√ FCX-Clarity 리스프로그램운용 : 각 자동차의 리스프로그램운용

• 배관 비용과 분산형 수소 인프라

√ 수소 대량생산 및 중앙집중식을 고려

√ 배관비용의 경제성 불확실성

√ 분산형 수소충전소를 건설하는 것이 바람직한 방안으로 제안

• 신재생에너지와 수소

√ 풍력이나 태양광 등 재생에너지로 수소 전환 시 경제성 제고

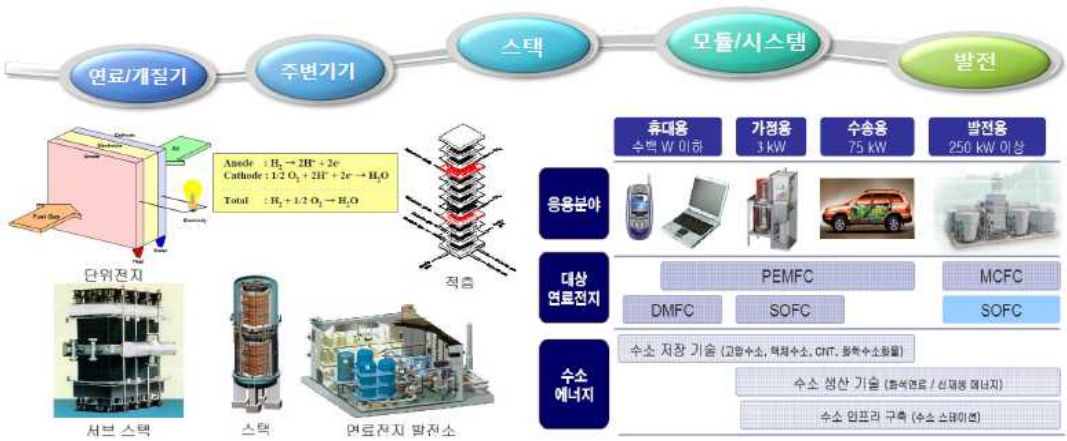
√ 각국의 재생에너지 비중 목표 설정

√ 재생에너지를 에너지 저장기술과 조합

√ 프랑스; 재생에너지로 수 전해방식을 이용하여 수소를 제조한 후 마그네슘과 반응하여 수소를 저장함, 일본; 전기 화학셀에 의한 층방 기술과 물 분해 수소제조 및 저장기술 검토, 영국; 수소 연료전지연구 허브-수소생산, 저장, PEMFC, SOFC/고온 수전해, 집적화/연계 연구, 독일; 2050년 까지 전기 80%를 재생에너지로 전환, 캐나다; P2G(Power to Gas)개발 진행 - 재생에너지의 잠재량을 충분히 활용 예상

○ 연료전지 시장 전망

- 산업용 수소는 반도체, 자동차, 철강, LED 등의 산업에서의 기초소재로 활용될 뿐만 아니라 연료전기 등의 원료로 활용됨. 이와 같은 연료전지는 그 용도에 따라 휴대용, 가정용, 수송용 및 발전용으로 활용됨



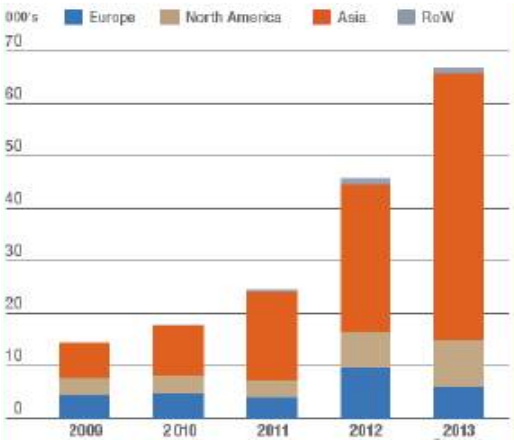
<그림 2-4> 연료전지 구성 및 가치사슬

- 연료전지 보급 현황

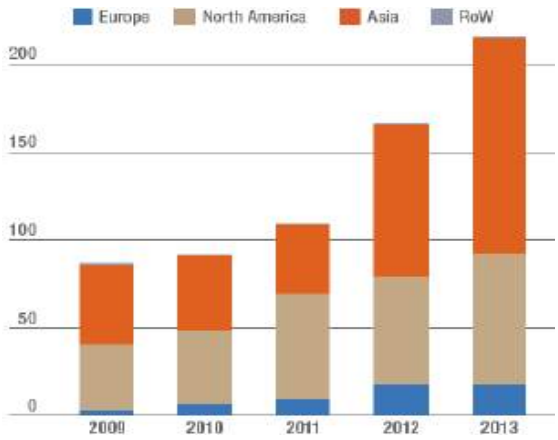
  • 현재까지 연료전지 총 선적량의 61%(28,000개)는 아시아에 설치되어, 아시아의 연료전지 기술 도입이 두드러지고 있음. 특히, 우리나라와 일본 등의 국가에서 백업전원, m-CHP, FCEV 등 적극적으로 도입을 추진하고 있음

  • 우리나라의 경우, 대규모 발전용 연료전지 시스템 도입의 확대로 아시아의 설비용량 증가에 기여한 것으로 나타남

  • 한편, 북미지역은 국내 제작 대규모 발전용 및 하역기계용의 연료전지 보급이 증가하고 있음



(a) 지역별 연료전지 선적 현황(개수)



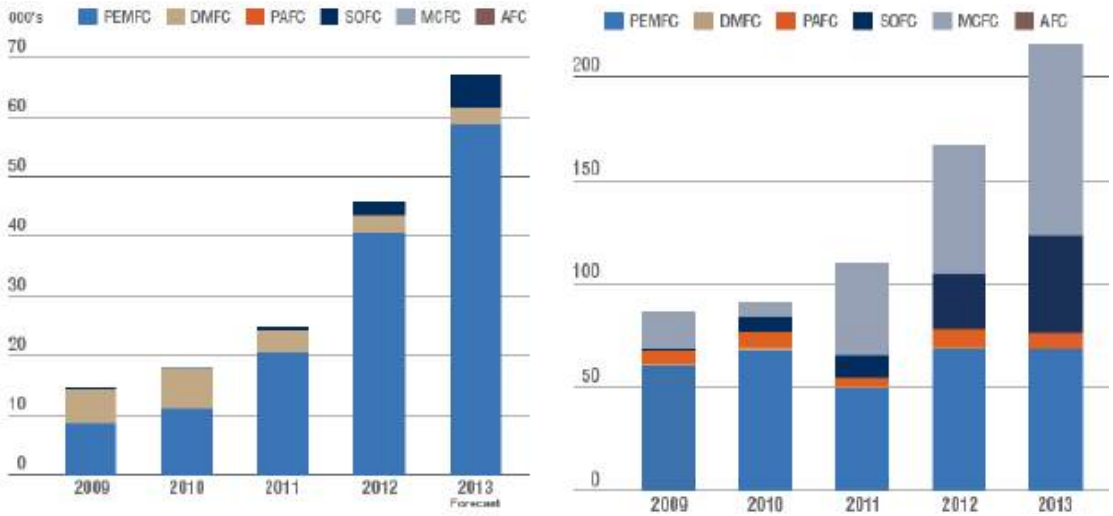
(b) 지역별 연료전지 선적 현황(MW)

※ 출처: Fuel Cell Today, 2013

<그림 2-5> 전 세계 지역별 연료전지 보급현황

  • 종류별로 연료전지 선적 현황을 살펴보면, 다양한 규모와 연료의 적용이 가능한 FEMCF 기술의 도입이 주를 이루고 있음

  • 국내를 비롯하여 미국은 대규모 발전용 연료전지 준공 증가로 MCFC(설비용량 기준)의 증가가 두르러지고 있으며, 일본의 경우 가정용 m-CHP의 수요가 미국의 경우 Bloom Energy의 MW급 준공의 수요 확대로 SOFC 기술도 견고하게 시장이 확대되고 있음



(a) 종류별 연료전지 선적 현황(개수)　　(b) 종류 연료전지 선적 현황(MW)

※ 출처: Fuel Cell Today, 2013

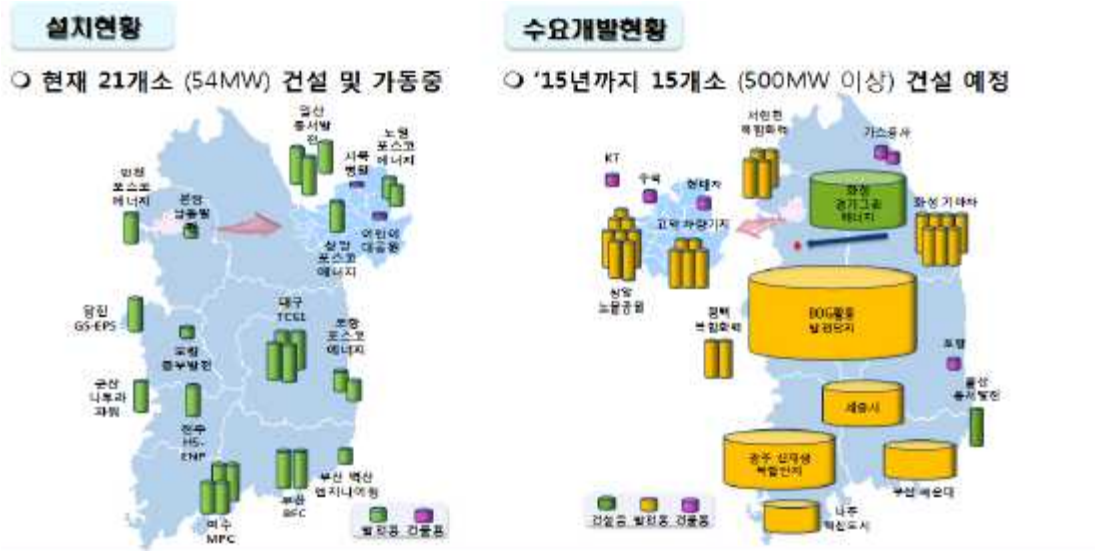
<그림 2-6> 종류별 세계 연료전지 선적 현황

- 국내의 현황을 살펴보면, 주택·건물용 연료전지는 2006년 모니터링 사업을 시작으로 2010년 그린 홈 보급사업 및 의무화 시장보급으로 2013년 현재 누적 약 2천여 세대가 보급되었으며, 발전용 연료전지는 2004년 240kW 2기 실증을 시작으로, 현재 총 24개소 62MW가 보급되었음. 이와 같은 연료전지의 보급은 포스코, LG 등 대기업을 중심으로 한 R&D 및 투자 확대로 가능하였음

<표 2-10> 주택·건물용 연료전지

구분	1kW(세대수)	5/10kW(기)
'06 - '09	250	-
'10	960	-
'11	270	1
'12	230	10
'13	260	40
누적	1,970	51

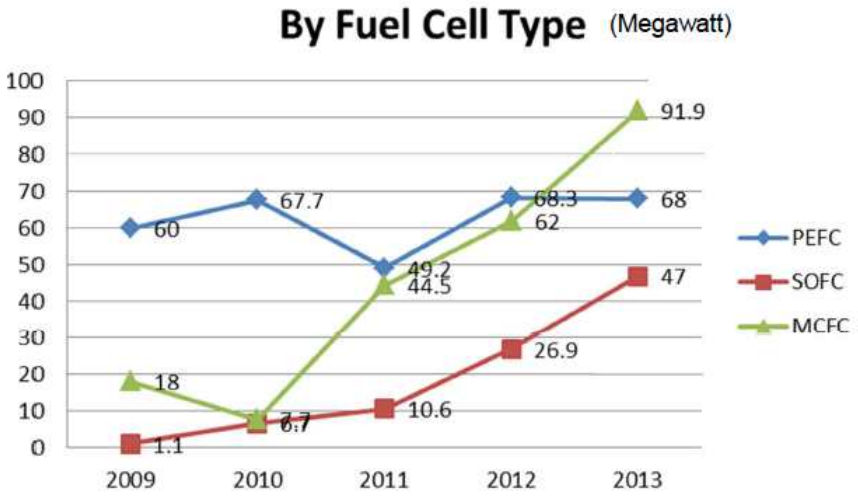
※ 출처: 연료전지산업 발전 전략, 2013



※ 출처: 연료전지산업 발전 전략, 2013

<그림 2-7> 발전용 연료전지

• 세계의 연료전지 생산량은 각 연료전지 종류별로 아래의 <그림2-12>와 같으며, 한국의 RPS제도, 일본의 ENE-FARM제도, 미국의 SGIP/ITC제도를 통하여 연료전지 시장의 성장에 많은 영향을 주고 있음. PEFC, SOFC, MCFC 중, PEFC는 2011년에 연료전지 자동차 시범사업이 종료되어, 다소 생산량이 감소하는 경향을 보였으나, 일본 가정용 보급 사업으로 유지하고 있는 현황임



※ 출처: Fuel Cell Today, Industry Review, 2013

<그림 2-8> 글로벌 연료전지 생산량

❑ 향후 시장전망

○ 수소 및 연료전지 산업 현황을 통하여, 향후 수소 시장의 전망을 살펴봄

○ 연료전지의 세계 산업 현황을 살펴보면, 미국을 포함한 선진국은 Value Chain 상 산업군의 구성이 비교적 잘 형성되고 있는 것을 알 수 있음

○ 연료전지 산업은 기술 집적도가 높고, 초기투자비가 높은 산업으로 기술력이 높은 전문기업을 중심으로 연구개발에 많은 노력과 자금의 투입이 필요한 시장 지배력이 높은 산업임

※ 출처: 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 에너지경제연구원, 2014.04

<그림 2-9> 세계 연료전지 Supply Chain

○ 세계 연료전지 기업 현황, 발전용(Stationary Power) 연료전지, 휴대용, 수송용, 하역기계용(Material Handling Equipment) 상용화 현황은 다음과 같음

<표 2-11> 상용화된 발전용(주 전력 및 m-CHP) 연료전지(2012)

제조사	유형	출력
Ballard Power System, 캐나다	PEM	2-11 kW, Multiples of 500 kW
Bloom Energy, 미국	SOFC	100, 200, 160 kW
Ceranic Fuel Cell, 호주	SOFC	2, 1.5 kW
ClearEdge Power, 미국	PEM, PAFC	5, 400 kW
ENEOS CellTech, 일본	PEM	250 - 700 W
FuelCell Energy, 미국	MCFC	300, 1,400, 2,800 kW, Multi-MW

제조사	유형	출력
Heliocentris Fuel Cells AG, 독일	PEM	1.2 kW
Horizon Fuel Cell Technologies, 싱가포르	PEM	500 W - 2 kW
Hydrogenics, 캐나다	PEM	2 - 200, 2 - 16 kW
Panasonic, 일본	PEM	250 - 700 W
Toshiba, 일본	PEM	250 - 700 w

※ 출처: DOE, 2013

<표 2-12> 상용화된 휴대용 연료전지(2012)

제조사	유형	출력
Horizon Fuel Cell Technologies, 싱가포르	PEM	Up to 2, 50, 150 - 200, 180 W
Lilliputian System, 미국	SOFC	2.5 W
myFC, 스웨덴	PEM	2.5 - 5 W
SFC Energy, 독일	DMFC	40, 72, 105 W

※ 출처: DOE, 2013

<표 2-13> 상용화된 수송용 연료전지(2012)

제조사	유형	출력
Ballard Power System, 캐나다	PEM	75, 150 kW
Hydrogenics, 캐나다	PEM	198 kW
Nuvera Fuel Cells, 미국	PEM	30, 110 kW

※ 출처: DOE, 2013

<표 2-14> 상용화된 하역기계 연료전지(2012)

제조사	유형	출력
H2Logic, 덴마크	PEM	~ 10 kW
Hydrogenics, 캐나다	PEM/hybrid	N/a
Nuvera Fuel Cells, 미국	PEM	10 - 30 kW
Oorja Protonics, 미국	DMFC	20 kWh/day
Plug Power, 미국	PEM	8 - 10 kW, 1.8 - 3.2 kW

※ 출처: DOE, 2013

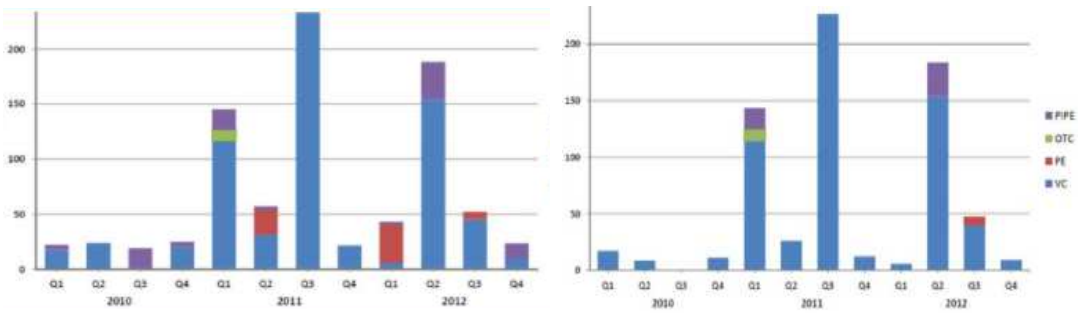
<표 2-15> 연료전지 승용차 개발 및 전개 상황

자동차 제조사	상용화 목표	FCEV R&D 파트너	현재 상태
Daimler	빠르면 2017	Ford, Nissan	- 첫 번째 FCEV 시리즈 생산 - 독일 및 미국에 200대 리스
Ford	빠르면 2017	Daimler, Nissan	- R&D
General Motors	발표되지 않음	-	- 약 100대의 FCEV가 미국에 위치
Honda	~ 2015	-	- 약 200대의 FCEV가 주로 미국에 리스
Hyundai	2014 - 2015, 2015년까지 1,000대 판매 목표, 2015년 다음 세대 모델 소개 예정, 10,000대 판매 확대	-	- FCEV 15대를 코펜하겐 수출 - 상업용 FCEV 조립라인 운영
Nissan	빠르면 2017	Daimler, Ford	- 2011년 신규 연료전지 스택 도입 - 2013년 연료전지 컨셉차 시현
Toyoda	2015	BMW	- 미국 및 일본에서 FCEV 데모 시행

※ 출처: DOE, 2013

- 연료전지의 총 투자 현황은 2010 ~ 2012년 세계 연료전지 산업의 누적 투자액은 $853.6백만(2009 ~ 2011년 $671.4백만 대비 상당한 증가)이며, 2008년 발발한 글로벌 금융위기의 회복에 따른 경제상황의 개선이 주요 요인임

- 2012년 연료전지 산업의 총 투자액은 $307.1백만으로 2011년 $457.2백만 대비 감소하였는데, 이는 2011년 3/4분기에 높았던 벤쳐캐피탈 투자의 영향이며, 전 세계 투자액 중 81%를 미국 기업이 투자하였음



(a) 종류별 연료전지 선적 현황(개수) (b) 종류 연료전지 선적 현황(MW)

※ 출처: DOE, 2013

<그림 2-10> 연료전지 산업 투자

- 2012년 국가/회사별 투자(VC & PE)현황을 살펴보면, 2012년 상위 10개 기업의 투자는 $190.5백만으로 2011년 $113.2백만 대비 상당히 증가하였으며, 상위 10개 기업의 투자가 전체 VC & PE 투자액의 98%를 점유, 총 투자액의 62% 점유하고 있음

- 이는 상위 10개 기업 중 다수가 2012년 처음 진입하여 신규 투자가 활성화되고 있음을 시사

<표 2-16> 국가 및 회사별 연료 전지 벤쳐캐피탈 및 사모펀드 투자 Top 10(2012)

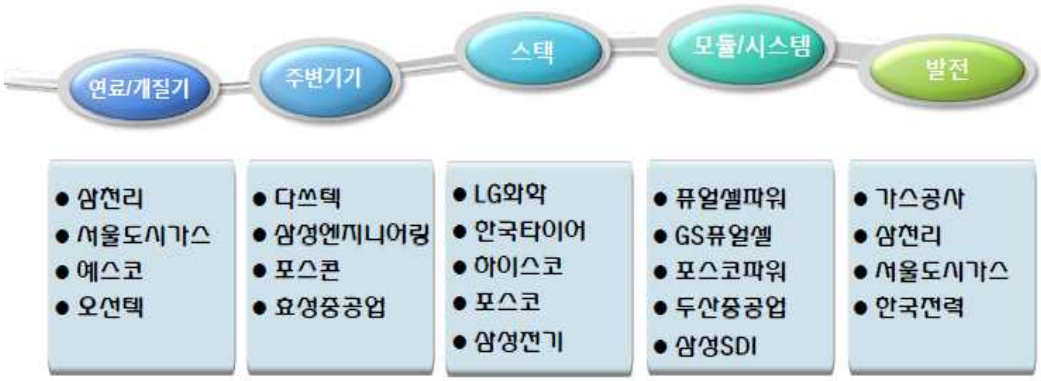
회 사	금 액(백만 $)
DAG Ventures LLC(미국)	37.5
Kleiner Perkins Caufield & Byers(미국)	37.5
New Enterprise Association Inc.(미국)	37.5
GSV Capital Corp.(미국)	37.5
Altima Partners LLP(영국)	11.7
F&C Asset Management PLC(영국)	11.7
Artemis Investment Management LLP(영국)	11.7
12BF Capital Advisors(영국)	1.8
Carbon Trust(영국)	1.8
SC Green Tech Ventures(미국)	1.8
총계(top 10)	$190.5
총계(총 투자)	$193.8

※ 출처: DOE, 2013

○ 한편, 국내는 해외의 선진국과 비교하여 비교적 Supply Chain의 구성이 미흡하며, 대기업 중심의 시스템 분야를 제외하면 현재까지는 산업구조 형성이 미숙한 단계임

○ 수송용 및 건물용의 일부 부품은 국산화가 이루어졌으나, 스택 핵심소재 및 부품 분야는 아직까지 대부분 수입에 의존하고 있음. 연료전지 시장은 기술적 집적도가 높고, 초기투자비가 높아 기술 장벽 등의 진입장벽이 존재하고 있음

○ 하지만, 고용효과, 세계시장전망, 경쟁여건 측면에서 육성이 필요하며, 창조경제 이행의 주요 수단으로서의 가능성이 높은 분야임



※ 출처: 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 에너지경제연구원, 2014.04

<그림 2-11> 국내 연료전지 Supply Chain

- 국내는 현재까지는 Value Chain별 산업구성이 미약한 부분이 있지만, 최근 급격한 성장을 경험하고 있음. 최근 2 ~ 5년 동안 주요 업체(6.3배), 고용창출(8.9배), 생산(3.8배), 투자(4.2배) 등 모든 분야에서 급격한 성장이 이루어지고 있으며 단기간 내 가시적인 성장으로 현재 상생업체는 1,046개사에 달함

- 1993년부터 진행된 국책 연구과제 성과를 스택 및 BOP 구성요소에 대한 기반기술을 개발하였으며, 80% 이상의 국산화율을 달성하였음(2006년 대비 2012년 설치단가 50% 하락). 반면, LNG 가격 상승(동기 128%)에 따른 경제성 문제와 글로벌 경쟁력 확보 등 현안 문제는 상존하며, 미래시장 잠재력이 큰 연료전지가 신성장동력 산업으로 부각되고 있음

※ 출처: 연료전지산업 발전 전략, 2013

<그림 2-12> 국내 연료전지

○ 연료전지 산업 전망

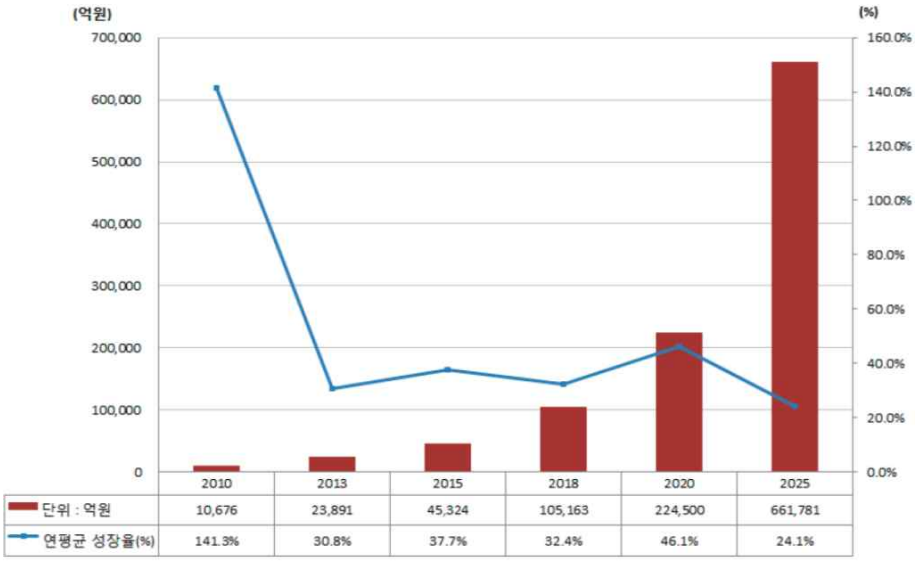
- 연료전지의 산업은 후지경제(2011년 연료전지 기술·시장 전망)에서 세계 연료전지 시장 규모가 급격히 성장할 것으로 전망하고 있으며, 2020년 13조원, 2025년 66조원 규모로 예상하고 있음

- J-economy center는 세계 연료전지 시장 규모가 2020년 1조 3,582억 엔 규모로 성장을 전망하고 있으며, 가정용 5,200억 엔, 휴대용 280억 엔, 업무·산업용 2,422억 엔으로 전망하고 있음

<표 2-17> J-economy Center의 시장 전망

구분 \ 연도		2008	2009	2010	2015	2020	2025	2030
PEFC	천 대	7	15	27	309	841	1.07	1.99
	억 엔	370	1,036	2,413	9,357	12,556	15,225	16,855
DMFC	천 대	0.6	1.0	4.5	93	272	450	585
	억 엔	8	14	25	200	360	440	530
SOFC	천 대	225	315	650	3,100	7,200	10,800	15,000
	억 엔	20	30	90	270	550	740	900
MCFC	천 대	12	16	24	32	36	46	60
	억 엔	32	40	54	70	72	82	100
PAFC	천 대	35	50	110	125	170	220	320
	억 엔	10	14	30	33	44	55	75

※ 출처: J-economy Center, 2009



	2010	2013	2015	2018	2020	2025
단위 : 억원	10,676	23,891	45,324	105,163	224,500	661,781
연평균 성장율(%)	141.3%	30.8%	37.7%	32.4%	46.1%	24.1%

※ 출처: 후지경제, 2011

<그림 2-13> 후지경제의 연료전지 시장 전망

- 국내 주택·건물용 연료전지 시장 규모는 2025년 20만대 보급으로 2조 3천억 원에 이를 것으로 예상함. 2020년 누적 10만대 보급으로 1조 6천억 원 예상되며, 2020년까지 수량 기준 연평균(CAGR) 41.4% 증가, 금액 기준 연평균 22.5% 증가가 예상됨

- 또, Freedonia는 우리나라 2018년 전체 연료전지 시장 규모가 2018년 $252 백만이 될 것으로 전망되며, 용도별로는 발전용 시장 $174백만, 유형별로는 MCFC $110백만 및 PEMFC $74백만 시장 위주로 성장이 전망되고 있음. 6차 전력수급계획(~2017) 연료전지 보급계획은 5차 대비 약 150% 증가된 1,693MW 임

<표 2-18> 연료전지 산업 발전 전략의 한국 주택·건물용 보급 전망

구 분	2015년	2018년	2020년
수량(대)	10,000	50,000	100,000
CAGR	216.2%	71.0%	41.4%
금액(억 원)	2,470	10,400	15,600
CAGR	151.7%	61.5%	22.5%

※ 출처: 연료전지산업 발전 전략, 2013

<표 2-19> The Freedonia Group Inc.의 한국 시장 전망($백만)

구 분		2008년	2013년	2018년
용도별	발전용	51	95	175
	수송용	13	26	10
	기타	2	12	52
유형별	PEMFC	17	36	74
	MCFC	47	70	110
	PAFC	2	8	9
	SOFC	-	11	18

※ 출처: 신재생에너지백서, 2012

○ 대부분의 연료전지 산업은 현재 공공정책에 시장을 의존하고 있으며, 앞으로도 상당기간 정책 의존성을 탈피하는 것은 어려울 것으로 보이며, 정책적 지원이 없다면 대부분 연료전지 업체의 판매량은 급격히 감소하여 업체의 생존을 위협할 것으로 예상됨

○ 백업파워, 지게차, 소형 열병합 시장의 PEMFC과 그리드 독립 분산전원 시장의 PAFC, MCFC, SOFC 모두 기존의 경쟁기술에 비하여 가격경쟁력이 부족한 상태이며, 지금까지 약 50%의 가격저감에 더하여 앞으로도 약 40 ~ 50% 가격저감이 이루어져야 정책지원 없는 자유경쟁 시장에서의 생존이 가능할 것으로 예상됨

○ 정책지원 하에서 연료전지 업체들은 지속적인 시장 확대와 가격저감 노력을 경주하여 2020년경에는 정책 지원 없이 생존이 가능해질 것으로 기대하고 있

음. 가격저감은 주로 규모의 경제와 공급사슬에서의 가격저감에 의하여 이루어지고, 기술개발에 의한 가격저감 효과는 점차적으로 감소할 것으로 예상하고 있음. PEMFC와 MCFC의 학습율은 20%대를 꾸준히 유지하고 있는 반면, SOFC는 초기 상용화 단계에서 극히 낮은 5%대에 머물고 있음

○ DOE는 수송용 PEMFC의 기술개발 목표를 시스템 가격에서 비촉매 출력으로 전환하여 8kW/gPGM로 설정하였고 새로운 하부 프로그램으로 수송용 연료전지 상용화에 대응할 수 있도록 혁신공정기술과 인라인 공정제어기술 개발 지원하고 있음. SOFC의 스택 신뢰성 향상을 위하여 품질관리기술과 결함억제 소성기술개발이 필요함. MCFC의 경우 스택 수명을 10년까지 연장하고, 출력밀도를 20%시키고, 시스템 대형화를 통해 그리드 패리티 달성 추진이 필요함

2.2.2 기술개발 동향

○ 바이오수소는 광합성미생물과 혐기발효미생물에 의한 연구가 그동안 주를 이루었으며, 최근 한국, 일본, 미국, 유럽을 중심으로 초고온성고세균에 의한 바이오수소생산 연구가 활발히 진행 중

○ 아시아태평양경제협력체 (APEC, 2006) 전망의 에너지 기술개발 로드맵에 따르면, "바이오디젤('10년까지) → 바이오에탄올('20년까지) → 수소('30년까지)"의 단계로 기술개발이 이루어질 것으로 전망

- 대부분의 OECD 국가들은 수소 연료전지에 대한 연간 10억 달러 규모의 연구개발 프로그램을 진행 중

○ (국내) 바닷속 세균 이용 바이오수소 대량생산 기술 개발

- 한국해양과학기술원에서 자체 확보한 해양 초고온성 고세균 Thermococcus onnurineus NA1 균주는 기존에 알려지지 않은 개미산 이용의 독특한 수소생산 메커니즘을 보여 전세계의 이목을 집중(Nature 게재, 2010)

- 2002년 한국해양과학기술원에서 자체 확보한 해양초고온성 고세균 Thermococcus onnurineus NA1 균주는 개미산 이용 기존 알려지지 않은 독특한 수소생산 메커니즘을 보여 전세계의 이목을 집중시켰고 (Nature, 2010), 바이오수소 생산성 또한 세계최고수준인 것으로 나타남 (미국응용미생물학회지, 2012). 또한

NA1을 이용하여 세계 최초로 산업폐가스인 제철소 부생가스로부터 수소생산을 성공하여 경제적 수소생산에 대한 가능성을 제시함 (미국응용미생물학회지, 2013)

* 태평양 심해의 해양 고세균을 추출·배양하여 일산화탄소와 유기물 등으로 양질의 수소를 얻을 수 있는 생물반응기 개발

○ 1980년대 후반까지 대체 에너지로서 수소에너지에 대한 인식이 부족했던 우리나라의 경우, 1987년 "대체 에너지 기술개발 이용보급 촉진법"의 제정과 함께 수소 및 연료전지에 대한 관심이 부각되었고, 이후 2003년 '차세대 성장 동력 산업'으로 선정

○ (해양수산부) 바닷속 세균 이용 바이오수소 대량생산 기술 개발

- 한국해양과학기술원에서 자체 확보한 해양 초고온성 고세균 Thermococcus onnurineus NA1 균주는 기존에 알려지지 않은 개미산 이용의 독특한 수소생산 메커니즘을 보여 전세계의 이목을 집중(Nature 게재, 2010)

- 기존 유기물을 원료로 하는 바이오수소 생산율의 15배에 이르는 바이오수소 생산 수단으로 신재생에너지와 플랜트 산업에 접목

* 태평양 심해의 해양 고세균을 추출·배양하여 일산화탄소와 유기물 등으로 양질의 수소를 얻을 수 있는 생물반응기 개발

○ (미래창조과학부) '03년 출범시킨 '고효율 수소에너지 제조・저장・이용 기술개발 프론티어 사업단'을 통해 10년간 약 1,000억원의 R&D 투자 지원

- 수소제조, 운반, 저장기술과 실용화, 그리고 개발된 기술의 상용화를 위한 표준화 등의 연구 사업 추진

○ 해양신산업의 성장 동력이 되는 해양 R&D의 경우, 2000년대 이후로 조성된 정부의 R&D 성과 및 사업화 강화 정책분위기가 전반적으로 확산되었음

- 기술이전 및 기술계약 실적이 증가하였으며, 특히 연구장비 및 인프라 분야에서 많은 기술료를 확보하고 있음

- 그러나, 선진국과 비교해 볼 때, 우리나라의 해양 R&D 기술의 실용화 수준은 낮은 편으로 평가됨

(1) 수소에너지연구

○ 1980년대 후반까지 대체 에너지로서 수소에너지에 대한 인식이 부족했던 우리나라의 경우, 1987년 "대체 에너지 기술개발 이용보급 촉진법"의 제정과 함께 수소 및 연료전지에 대한 관심이 부각되었고, 이후 2003년 '차세대 성장 동력 산업'으로 선정하여 산업통상자원부, 미래부, 환경부 등에서 수소 에너지 관련 분야에 대한 연구를 주요 정책사업으로 선정하여 추진하였으며, 2009년 해양수산부 '해양생명공학기술개발사업'을 통해 일산화탄소를 이용한 바이오수소 생산 실증생산 연구를 주도하고 있음

- 국내 바이오수소 발효생산기술 관련 R&D 투자(연료전지분야 제외)는 2002년 선행연구를 시작으로 프론티어사업 등을 통해 매년 10억원 안팎의 투자가 이루어진 후 2009년 해양수산부 해양생명공학기술개발사업의 시작으로 투자가 급증하여 2013년까지 총 274억원이 투자됨

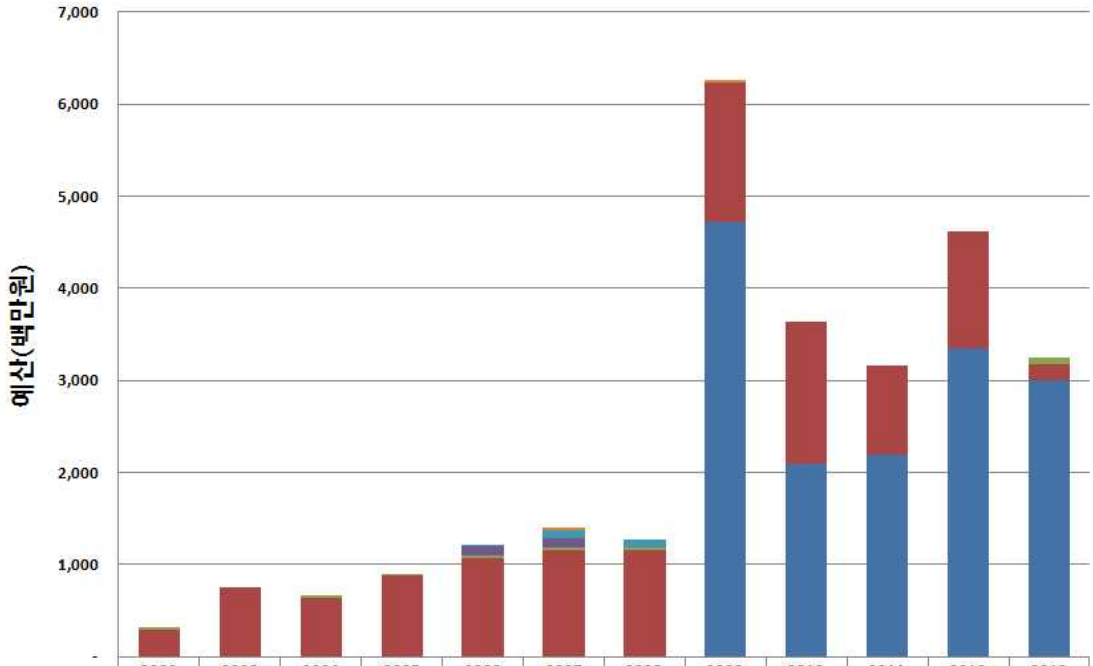
- 2002년 이후 지금까지 해수부가 총 154억원(55.9%, 13개 과제)을 한국해양과학기술원을 중심으로 가장 많았으며, 다음으로 미래부가 한국에너지기술연구원을 중심으로 114억원(41.5%, 48개 관제)을 투자함. 기타 부처로는 산자부(2개 과제), 교육부(8개 과제), 환경부(3개 과제), 중소기업청(2개 과제)이 있음

<표 2-20> 부처별 바이오수소 발효생산기술 R&D 투자 현황(2002-2013년)

(단위: 백만원)

부처	과제수	예산
교육부	8	251(0.9%)
미래부	48	11,405(41.5%)
산자부	2	200(0.7%)
중소기업청	2	55(0.2%)
해양수산부	13	15,362(55.9%)
환경부	3	190(0.7%)
총합계	76	27,463(100%)

※ 출처: NTIS 자료 취합 분석((주)엔솔테크)



	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
중소기업청						35		20				
환경부					20	80	90					
산자부					100	100						
교육부	20		33	7	36	36	36					83
미래부	300	749	635	882	1,066	1,156	1,152	1,520	1,543	965	1,276	161
해양수산부								4,718	2,090	2,195	3,349	3,010

※ 출처: NTIS 자료 취합 분석((주)엔솔테크)

<그림 2-14> 국내 바이오수소 발효생산기술 R&D 투자 현황(2002-2013년)

○ (미래부) '03년 출범시킨 '고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술개발 프론티어 사업단'을 통해 10년간 약 1,000억원의 R&D 투자 지원

- 수소제조, 운반, 저장기술과 실용화, 그리고 개발된 기술의 상용화를 위한 표준화 등의 연구 사업 추진되었으며, 수소에너지 제조 분야에서 바이오수소 제조는 프런티어 1, 2단계에서 선행연구가 진행되어 혐기 및 광발효를 통해 유기물질로부터 수소생산 기반기술인 미생물 선별, 배양 최적화, 배양기 관련 연구(건조농축 하수슬러지 등 유기성폐기물을 이용한 수소생산 혐기발효)가 진행되었으며, 3단계에서 2단 발효공정(혐기+광합성)에 의한 생물학적 수소생산 실증연구를 수행하였으나, 수소생산성이 낮아 경제성 확보가 어려운 상태로 아직까지 수소생산 대형화 기술확보 및 실증생산 규모 통합시스템을 구축하지 못한 단계임

- 3단계에서 2단(혐기발효+광합성발효) 수소생산 통합공정을 통해 7 mol H2/mol glucose, 유기물로부터 수소생산 전환율 60% 이상을 연구목표로 하였으나, 2010년까지 유기성 폐기물을 이용 혐기발효를 통해 100리터 규모의 반응기에서 최대 수소생산속도는 17 L/L/day를 생산하며, 수소전환율은 2단계 (혐기 + 광합성) 발효를 통해 5리터 반응기에서 최대 5.8 mol H2/mol hexose에 도달함. 그러나 2013년 batch 결과에서 R. sphaeroides KD 131를 이용하여 수소전환율 8.35 H2/mol hexose 보고함

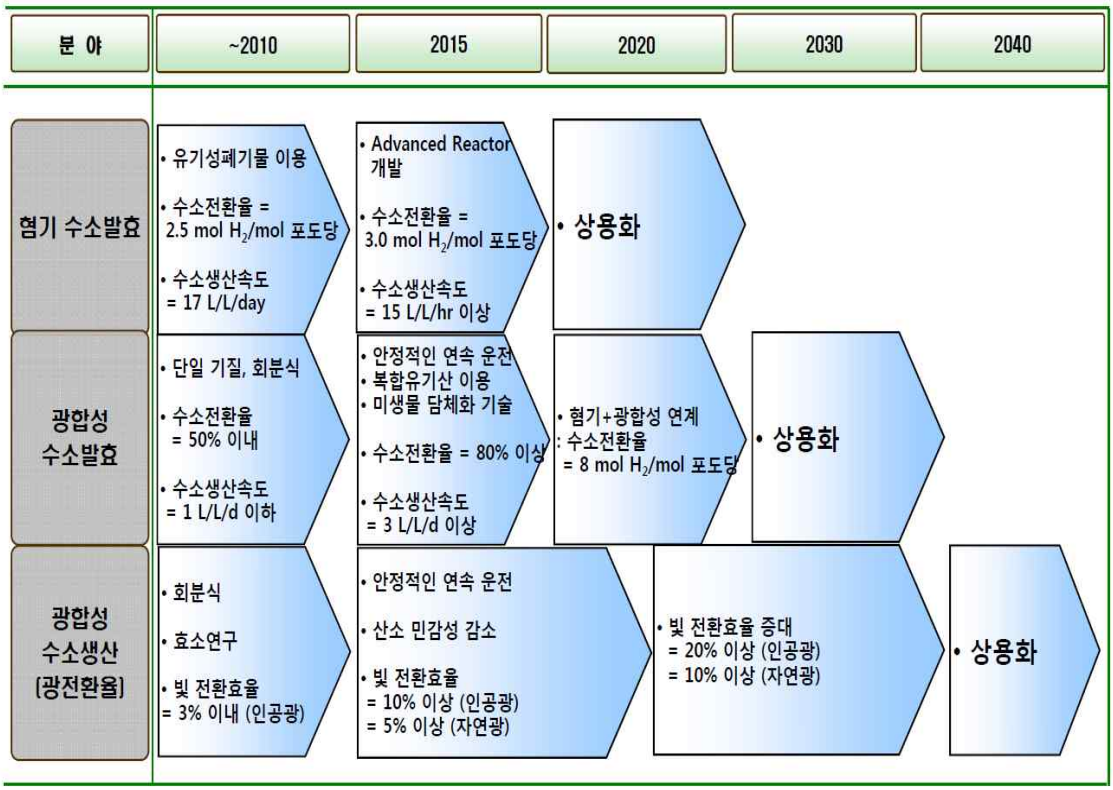
- 최종적으로는 2020년까지 바이오수소 생산 상용화를 위해 상용화가 2단(혐기 + 광합성) 수소발효를 연계하여 고효율 수소 생산 반응기 개발을 통해 높은 수소전환율(8 mol 수소/mol 포도당)과 수소생산성(15 L/L/hr)을 최종목표로 하고 있음

<표 2-21> 프론티어사업 3단계 바이오수소 생산 연구내용(2009-2013)

연차	연구내용
1차년도 (2009-2010)	• 유기성 폐수/폐기물 다양화 타당성 검토 • 연속 혐기 발효 최적화(포도당, 유기물, 글리세롤을 이용한 고온 수소생산) • 광합성 세균 *R. sphaeroides* KD 131(야생종, 변이주) 배양 최적화 (Ⅰ) • 질소고정효소와 철함유 수소효소 발현증진 및 NH4 + 저해극복 • 각종 바이오매스 전처리 및 가용화 연구
2차년도 (2010-2011)	• 순환형 2단 발효공정 및 광합성 발효장치(photo-bioreactor)개발 • 광합성 세균 R. sphaeroides KD 131(야생종, 변이주) 배양 최적화 (Ⅱ) • 수소생산효소 다량 발현 및 R. sphaeroides KD131의 염내성 유전체 규명 • 목질계, 미세조류, 글리세롤 이용 수소생산 연구
3차년도 (2011-2012)	• 2단 발효공정 통합화/순환화 설계 • 통합형 발효기 설계 및 시험 운전 • R. sphaeroides KD 131(HP-, glu+, gln BK 동시개선 변이주) 배양/수소생산 최적화 • 광 이용효율 개선 및 혐기발효기 내 수소생산 균주 DGGE 분석 • 목질계 및 미세조류 이용 고온성/초고온성 세균 통합 수소생산
4차년도 (2012-2013)	• 2단 혐기-광합성 발효 통합공정 실증 연구 • 최적화된 R. sphaeroides KD 131 유래 복합 변이균주 제조 • 복합 변이주를 이용한 수소생산성 극대화 조건 확립 • 고온성/초고온성 미생물에 의한 복합 수소 생산 공정 최적화

<표 2-22> 21C프런티어연구개발사업 결과 및 개선사항

	개발기술		생산성	효율	규모	개선사항
두부제조 폐기물/ 하수슬러지	혐기발효		15-17 (L H2/L/일)	2.0-2.3 (mol H2/mol hexose)	100ℓ	- Reactor 개선
음식폐기물	혐기+광합성 (2단계 발효)			5.8 (mol H2/mol hexose)	5ℓ	- 광합성배양기 빛전환 효율 - 맞춤형 미생물(유기산 분해효율 증가)
혐기발효액(유기산)	생체모방시스템	MFC	0.16 (umol H2/min/mg protein)		20㎖	- 전극 효율 - 효소 산소저항성 - 효소 정제
물		PEC	26 mw/m2		20㎖	- 맞춤형 미생물
		생물-광촉매 보합	420(umol H2/cm2/hr)	5% (solar to H2)		- 효소 산소저항성 - 가시광 영역
수소생산 효소	광합성 배양 분리정제 (Thiocapsa roseopersicina)		215 ml H2/g 단백질/hr	7.63%	20ℓ	- 정제효율 개선 - 산소 민감성 제거



<그림 2-15> 미래부 바이오생산 상용화 로드맵

○ (해양수산부) 바닷속 세균 이용 바이오수소 대량생산 기술 개발

- 2004년부터 해양수산부 R&D사업으로 추진 중인 해양생명공학기술개발사업의 일환으로 한국해양과학기술원에서 남태평양 심해 열수구에서 분리해 낸 초고온성 해양 고세균 Thermococcus onnurineus NA1 균주는 지금까지 알려진 다른 미생물의 최소 2배인 8개의 수소화효소군(hydrogenase cluster)을 보유, 단위당 수소추출량이 훨씬 클 뿐만이 아니라 일산화탄소, 전분, 개미산 등 다양한 기질(먹이)을 이용하여 바이오수소를 생산을 하는 기술을 순수 국내 기술로 개발함

  * 특히, NA1은 기존에 알려지지 않은 개미산 이용의 독특한 수소생산 메커니즘(Nature 게재, 2010)을 보여 전 세계의 이목이 집중됨(Nature 게재, 2010)을 보여 전 세계의 이목이 집중됨

- 기존 유기물을 원료로 하는 바이오수소 생산율의 15배에 이르는 바이오수소 생산 수단으로 신재생에너지와 플랜트 산업에 접목이 가능함

- NA1 생촉매를 이용하여 국내 제철소 등에서 배출되고 있는 부생가스(전로가스 , LDG 가스, CO 60% 함유)의 주성분인 일산화탄소(CO)를 수소로 전환시키는 기술개발을 향상시키기 위해 연구용 플랜트 시설(5L, 30L, 300L 고온 혐기 바이오수소 생물반응기)을 2012년 구축함

○ 수소에너지는 고효율 청정에너지원으로써, 미국, 일본, 독일 등 선진국에서는 지난 70년대 말부터 수소의 제조, 저장, 이용 등 분야별 연구개발을 통해 실용화 기반기술을 확보 중이며, 직접 연소를 위한 연료 또는 연료전지 등의 원료로 사용 증가 추세에 있다.

○ 아시아태평양경제협력체 (APEC, 2006)에서 전망한 에너지 기술개발 로드맵에 따르면, "바이오디젤(2010년까지) ⇨ 바이오에탄올(2020년까지) ⇨ 수소(2030년까지)" 의 단계로 기술개발이 이루어질 것으로 전망된다.

○ 대부분의 OECD 국가들은 수소 연료전지에 대한 연구개발 프로그램을 활발히 진행 중으로, 전 세계 연구개발 프로그램을 활발히 진행 중으로, 전 세계 연구개발비 총액은 연간 10억 달러에 이름

○ 연구개발 비용의 절반 이상은 연료전지 관련 분야가 차지하며 나머지는 수소 제조, 수송, 저장 그리고 이용기술 등이 차지

○ 미국 정부는 매년 약 400백만 달러를 수소, 연료전지 연구개발프로그램에 투자하고 있고, 일본 정부는 METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) 예산을 통하여 R&D 예산을 2001년 107백만 달러에서 2005년 324백만 달러까지 증액하였다. 이 외 캐나다, 유럽, 아시아 국가들 역시 수소에너지 연구개발에 대한 투자를 크게 증가시키는 추세

○ 미국 : 미국은 수소에너지 연구개발의 중요성을 인지. 2001년부터 국가 에너지 정책 (National Energy Policy)을 발표하는 등 에너지와 환경 문제를 집중적으로 다루기 시작

- 수소경제 구축을 위한 정부의 역할을 고위험, 비경쟁특성을 지니는 초기 연구개발을 집중적으로 지원하는 것으로 규정 2002년 연구개발 부서 조직

- 2003년 5년 간 12억$ 규모의 "Hydrogen Fuel Initiative"를 시작으로 연구개발 규모를 비약적으로 증가시켰고,"Freedom Car and Fuel cell Program"을 통해 투자비용을 5억$ 증액

- EC 보고서에 따르면 미 정부는 수소 연료전지 분야 연구개발비를 2004년 195.5백만€, 2005년 239.2백만€, 2006년 242.1백만€로 증액

- 연구비 비중은 수소에너지 분야에서는 제조와 수송, 연료전지 분야는 스택 기술이 가장 높음

○ 일본 : 일본은 교토 의정서를 통해 협약된 2010까지 6%의 온실감축, 원유 수입 의존 과다, 신에너지 기술 경쟁력 선두 위치 확보 등의 사항 때문에 수소에너지 개발에 많은 투자

- 연구개발 진척도가 가장 큰 분야는 연료전지 자동차 및 이와 관련한 인프라 분야. 일본은 세계 최초로 2002년까지 10년 동안 165백만$ 규모의 수소연료전지 연구개발 프로그램을 수행하였다. 2003년부터 상용화 연구개발을 위해 "New Hydrogen Project (NEP)"를 시작하였고 규모를 해마다 증액

- 일본 정부의 수소연료전지 기술에 대한 연구개발 의지는 매우 확고하여 연구개발비를 적극적으로 지원, 20년 이내에 기술 경쟁력을 확보할 것으로 예상

- 일본 수소연료전지 연구개발비 규모는 2005년 기준 미국보다 높은 254.9백만€

- 최근 2020년 까지 진행될 차기 프로젝트 (Development of Fundamental

Technologies in the Safe Utilization of Hydrogen)가 구상되었고 이 프로젝트는 수소 에너지 인프라의 확산에 주 초점을 둠

○ EU : EU는 협동 연구 및 공동 출자 등을 통한 노력을 진행 중이며 그 목표는 교토 의정서에 따른 온실가스 배출 저감 및 에너지 공급 안정성과 기업체의 경쟁력 향상. EU는 20~30년 이내에 신재생 에너지와 수소 연료전지를 통한 에너지 공급체계로의 전환을 목표로 설정.

- EU는 1988~1999년간 약 336개의 프로젝트를 수행하였고 연구비는 해당 약 5~6천만€에 이른다. 연구개발 수준은 독일이 가장 앞서고 있으나 가장 중요한 정책 발의는 EU (European Union) 및 EC (European Commission)에 의해 이루어짐

- HLG (High-Level Group)는 EC 보고서를 통해 2020년 까지는 전체 차량의 2~5%만이 수소연료를 사용하고 2030~2040년 이후에 시장 점유율이 증가할 것으로 발표. 대부분의 수소를 신재생에너지와 원자력을 사용하여 생산할 수 있는 시기는 2020~2050년부터 이루어질 것으로 전망

- EU는 2002~2006년 동안 수소에너지 연구개발을 위한 투자비용을 신재생에너지 6개년 프로그램 (Renewable Energy Sixth Famework Programme)을 통해 지원하였고, 투자 금액은 약 1.2억만$. 2005년 기준 유럽 내 국가의 연구비 투자 규모는 독일이 7.2천만€로 가장 높고, 프랑스 6천만€, 영국과 이탈리아는 각각 3천만€

- 연구개발의 궁극적 목표는 수소에너지기술의 상용화를 앞당기는 것이며, 제조분야의 경우 산업체 규모의 전력과 수소를 생산하는 실증플랜트 건설

- 유럽에서는 제조 및 저장 분야에 가장 큰 관심을 지니며 CUTE (Clean Urban Transport for Europe)와 ECTOS (Ecological City Transport System) 등의 수소연료전지 자동차 실증프로젝트 등을 수행(2001~2006년)

(2) 바이오수소생산연구

○ 바이오수소는 광합성미생물과 혐기발효미생물에 의한 연구가 그동안 주를 이루었으며, 최근 일본, 미국, 유럽을 중심으로 초고온성고세균에 의한 바이오수소생산 연구가 활발히 진행 중

○ EU

- 2000년대 초반 EU의 바이오수소 생산연구는 주로 연료전지 사용을 목적으로 호열균 및 광합성 미생물을 이용하여 에너지작물 및 페기물의 생산/가공과 발효공정을 통해 최종적으로 깨끗한 바이오수소를 생산하는데 목적을 두고 있음. 이를 위해 1단계에서는 (초)고온균을 이용하여 수소생산에 적합한 에너지 작물 및 페기물의 선택, 전처리 등의 생산/가공 단계에 대한 연구에 집중하였고, 2차적으로는 광합성미생물을 이용하여 2몰의 acetate(1몰 포도당) 당 최대 8몰의 수소를 생산하는 것을 목표로 균주개량과 함께 2단 혼합공정을 개발하고 최종적으로 생성된 수소를 회수하는 단계에서 CO2를 포집하고 제거하는 공정을 개발하는 전략을 수행하고 있음. 이러한 생물학적 수소 생산을 위하여 EU 국가들은 EU Bio-hydrogen 및 COST Action 841에 의해서 혐기 및 광합성 발효에 의한 수소 생산과 시아노 박테리아(cyanobacteria)의 수소 생산성을 증가하는 genetic 연구를 지원함.

- 네덜란드는 2001년부터 유기물로부터 혐기 발효 및 광합성 발효에 의한 생물학적 수소 생산프로젝트인 EET-BWP을 지원하여, 11개 연구기관이 공동으로 추진. 또한 식품계/당질계/섬유질계 폐기물 이용 고온 발효(2상) 미생물 수소전환 효율, 생산속도, 원료 적응 연구, 발효기 최적화, 공정제어를 연구하고 있음

- 바이오가스 산업이 가장 발달한 독일은 1990년부터 생물학적 수소 생산기술 연구를 과제화하여 수소생산 미생물의 생화학적, 생리적, 유전공학적인 연구를 지원

- EU(터키, 독일, 스웨덴, 폴란드)는 광합성 발효 최적화 panel, tubular 광발효기 개발, 공정평가 및 최적화, 공정시뮬레이션, 경제성 평가를 연구

- 프랑스(CEA, CNRS, INRA 외)는 태양광 이용 리액터, 균주 개선(광합성 세균, 조류, 혐기세 균), 혐기발효 수소생산 세균 경로 개선, 미세조류 연관 혐기/광합성 2단 발효 공정을 연구 수행 중

- 영국(Univ. Glamorgan(H2 research center), SERC Birmingham Univ. Cambridge Univ)은 태양광 변환효율 증가(Route to Solar H2), 대장균 up-regulation 연구, 설탕제조 폐수 이용, 값싼 다양한 바이오매스 적용(rey-grass, 하수 슬러지, wheat starch) 혐기 발효에 의한 수소생산을 연구 수행. 영국 공학자연과학연구회(EPSRC, Engineering and Physical Sciences Research

Council)가 지원하고 있는 프로젝트에 참여한 과학자들은 미생물을 이용하여 하수(Seawage)에서 청정 에너지원인 수소를 생산하기 위한 연구를 수행 중. 2008년 영국의 버밍엄 대학의 연구자들은 수소생성 혐기 및 광합성 미생물을 이용하여 2단 바이오 반응 시스템(혐기 + 광합성)을 결합시켜 당분을 함유한 원료물질들로부터 수소를 생산하는 연구를 진행해 모던 웨이스트 주식회사(Modern Waste Ltd), 이케이비 테크놀로지 주식회사(EKB Technology Ltd)와 공동으로 바이오웨이스투에너지 주식회사(Biowaste2energy Ltd)를 만들어 폐기물로부터 에너지를 생산하는 공정을 개발중에 있음

○ 일본

- 일본 통산성과 민간기업이 후원하고 신에너지 및 산업기술종합기구(NEDO)와 Research Institute of Innovative Technology for the Earth(RITE)가 주관하여 생물학적 기술에 의한 수소 생산기술 개발연구가 지난 10여 년 간 수행하여 일본의 대학, 연구소 및 해외와 공동협력으로 기술을 개발(기술개발에 참여한 연구기관: National Inst. of Bioscience & Human-Technology가 주최가 되어 Tokyo Univ. of Agriculture & Technology, Ibaraki University, King's college London, Hawaii Natural Energy Inst. 등)

- 이 연구는 유기폐기물로부터 혐기 박테리아와 광합성 박테리아를 이용하여 수소를 생산하는 실질적인 공정에 초점을 두고 있으며, Ishikawajima-Harima 중공업, Kubota Corp, Harima 중공업 등은 IEA Annex 15에 의한 기업체와 국가 간의 공동 참여로 박테리아 및 조류를 이용하여 수소를 생산하는 장단기적인 생물학적 기술 개발에 참여

- 또한 일본은 1991년부터 환경조화형 수소제조기술개발을 진행하여 유기성 폐기물로부터 혐기성 박테리아와 광합성 박테리아를 복합적으로 이용하여 수소를 생산하는 공정을 개발하기 위하여 1,100리터 규모의 수소생산 공정을 개발 시도

- (JBEC 하수 슬러지를 원료로하는 바이오 수소 생산 실증에 착수) 2012년 9월 10일 주식회사 재팬 블루 에너지, 야마토리스(주), 도요타 통상(주), 미쓰이 화학(주) 4개사는 HIT 연구 사업을 발족하여 하수 슬러지에서 수소 가스를 제조하는 실증 시험에 착수. HIT 사업 연구회는 JBEC 소유 바이오 매스 가스화 기술 "BLUE 타워기술"을 이용함으로써 현재 화석 연료로부터의 수소 제조가 아니라 그 대부분이 소각되는 하수 슬러지 로부터의 수소 제조를 목표로 함. 각

지의 하수 처리장에 BLUE 타워 ® 기술을 도입함으로써 향후 보급이 전망되는 연료 전지 자동차 (FCV)와 고정식 연료 전지 등에 수소를 공급하고 저탄소 순환형 타운실현을 계획. HIT 사업 연구회는 참여 각사의 전문적인 지식, 인력, 네트워크 등을 결합하여 바이오수소 "BLUE 수소"에 관한 기술 라이센스, 플랜트 건설, 제조 수소의 유통 · 판매 등을 공동 사업으로 추진. HIT 사업 연구회는 JBEC 소유 시마네 현 이즈모시의 BLUE 타워의 실증 플랜트에서 하수 슬러지를 원료로 바이오 수소를 생산하는 실증 시험에 착수했다. 지금까지의 시험에서 BLUE 타워 기술을 이용하여 하수 슬러지를 가열 가스화하여 수소를 주성분으로 하는 바이오 수소의 원료로서 "하수 오니"가 가진 잠재력을 확인할 수 있으며 향후 실증 플랜트의 연속 운전 시험은 바이오 수소 생산 기술을 확립하고, 상용 규모의 바이오 수소 제조 플랜트 모델 사업의 구축을 목표로 함

- 일본 아이덱스 에코에너지(Idex Eco Energy Co.)는 2012년 4월 목질계 바이오매스 우드칩을 이용하여 세계 최초로 상업적 수소를 실증생산 (총 21억엔의 사업비중 15억엔을 정부로부터 지원받음). 하루 15톤의 우드칩을 이용하여 7,200m^3의 수소를 생산해 수소스테이션 및 가정용 연료전지용으로 사용 계획

- Kubota Corp.은 하수 슬러지(sewage sludge)를 150℃ 10기압에서 열전처리로 하수 슬러지 중의 유기산 함량을 약 2~3배로 증가시킨 후, 태양광을 optic fiber로 집광한 후 배양시설 내부로 끌어들여, 수소 생산과 아울러 광합성 박테리아가 축적하는 고부가가치 물질을 상품화 할 목적으로 약 20L 규모의 광생물 반응기를 개발

- Harima 중공업에서는 유기성 폐수를 혐기 박테리아로 수소와 유기산을 생산하고, 생성된 유기산으로부터 800L 규모 floating type 광합성 생물반응기를 호수 위에 띄워 purple bacteria에 의한 수소 생산시설을 개발

○ 미국

- 미국은 수소연구개발 프로그램의 일부로써 생물학적 수소생산 연구개발 지원을 위하여 광합성 미생물을 이용한 230리터 규모의 'Internal Gas Exchange 광생물 반응기'를 호놀루루 지역에 설치하는 등 다양한 생물학적 원천기술 개발이 진행 중. 현재 생물학적 수소생산 연구는 산소에 의한 수소화 효소 저해 현상, 생산 수율 등의 문제로 대단위 생산공정에 적용하기에는 현재까지는 여러 문제점들을 가지고 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위한 새로운 대사경로

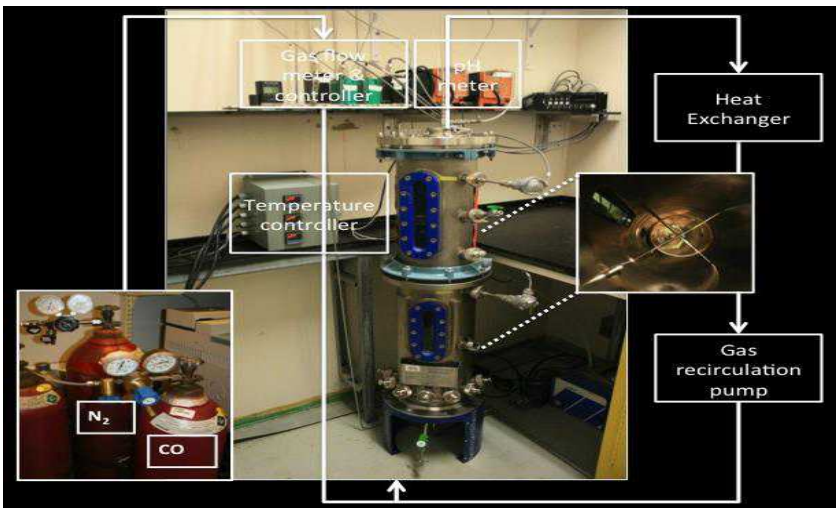
를 가진 미생물의 탐색, 산소에 덜 민감한 수소화효소 개발, 생산효율 및 생산성 개선을 다양한 대사공학 및 발효공학 연구 등이 진행.

- NREL은 원료비용을 낮추기 위한 리그닌 함유 바이오매스를 셀룰로즈 분해 세균으로 분해/수소생산 효율을 높이기 위해서 관련 세균의 대사 경로 연구와 빛 전환 효율이 높은 녹조류 개선과 혐기/광합성 발효 통합화 주요 인자 연구. 팬실베니아대학/네바다대학은 PEC용 광감응 전극(나노튜브)소재의 고효율화, 안정성을 연구. 위스콘신대학/와이오밍대학은 광합성 세균의 PHB 합성 파괴 및 RUBISCO 파괴 시 빛에너지의 수소에너지로의 전환 효율에 대해 연구 등 기초/응용 연구단계에 있음

○ 캐나다

- 2014년 캐나다 NRCC(National Research Council Canada)와 몬트리올대학교의 공동연구로 NA1과 유사한 호열성 혐기미생물인 Carboxydothermus hydrogenoformans(5 CODH 보유, 100% CO에 내성)를 이용하여 탄소원 및 에너지원으로 CO를 이용하여 약 3개월의 연속발효 바이오수소 생산연구를 수행함(International Journal of Hydrogen Energy, 201439(6), 2543–2548)

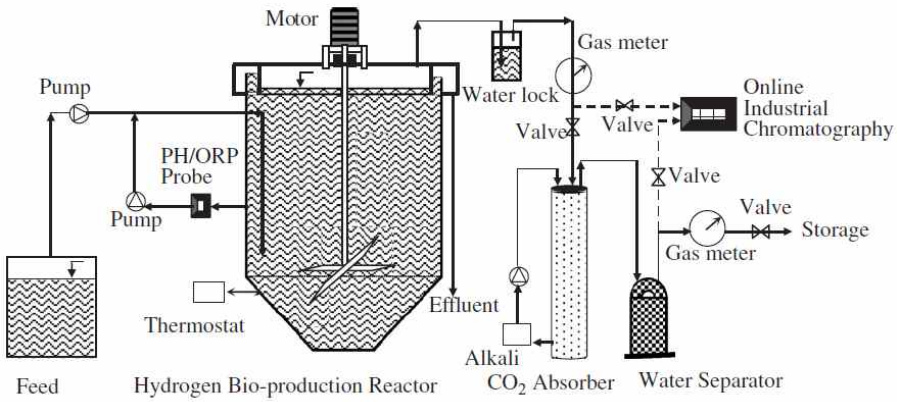
- 35 L gas-lift 반응기를 제작하여 70°C의 고온에서 bacto-peptone을 함유한 배지를 이용하여 최대 50 mmol/L/day 바이오수소를 생산하였으며 낮은 공급속도에서 최대 CO 전환율은 약 90%를 나타냄. 그러나 CO를 460 mmol/l/day로 공급시 활성이 떨어지며 수성가스전이반응이 정지해 수소생산성 향상을 위한 고효율의 균주 개발이 요구됨



<그림 2-16> 캐나다 NRCC 35 L 규모 일산화탄소 이용 바이오수소 생산

○ 중국

- 중국 Harbin Institute of Technology는 1.48톤 NNSFC(National Natural Science Foundation of China)와 NHTRDPC(National High Technology Research and Development Program of China)의 자금지원을 받아 2톤(배지 1.48톤) 규모의 CSTR 반응기를 이용하여 제작한 hydrogen bio-producing reactor (HBR)에서 당밀을 기질로 이용하여 Clostridium 혼합균주를 200일간 연속발효 연구를 실시함. 그러나 수소생산은 최대 5.57 L H2/L/d으로 매우 낮음(International Journal of Hydrogen Energy 2006, 31: 2147 –2157.)



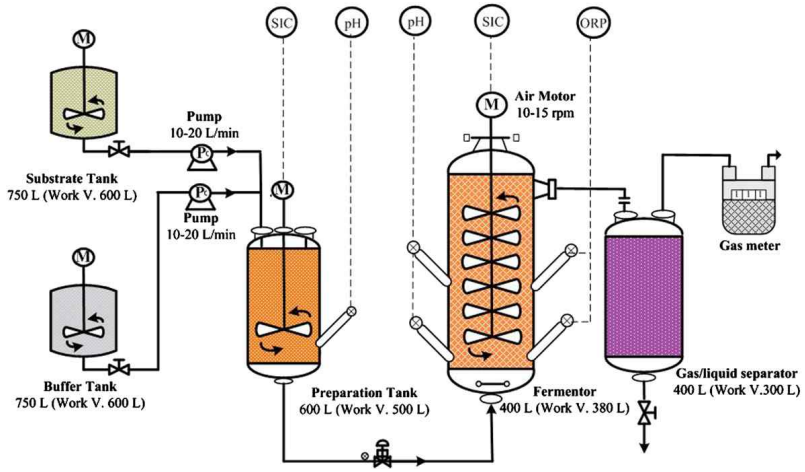
<그림 2-17> 중국 HBR 수소생산 시스템

○ 대만

- 2006년 대만 Feng Chia University(FCU)팀은 여러 고정화 담체를 제작하여 바이오수소 생산성 증대 연구를 수행하였으며, granule and gel-entrapped bead에서 고정화된 균체는 실험실 규모의 CSTR반응기에서 몇 달간의 연속배양 과정에서 고정화되며 세계 최대인 15 L/L/h의 수소생산성을 보임. 그러나 공정이 매우 불안정하며 고정화와 최대수소생산성에 이르는데 몇 달이 소요되는 단점을 나타냄(Biotechnol. Bioeng. 2006, 93: 934–946.)

- 이후 이를 극복하기 위한 여러 고정화 연구가 수행되었으며, 대만의 FCU팀을 중심으로 2010년과 2012년 수소생성 Clostridium pasteurianum 혼합균주를 이용하여 400L 파일롯 규모에서 'agitated granular sludge bed fermentor'를 통해 약 2달간 바이오수소 생산공정 시스템을 연구함. 그러나 실험실 규모에

서의 수소생산성과 비교해 수십배 낮은 결과(15.6 L/L/day)를 도출함에 따라 이를 해결하기 위한 과제들을 수행중임(International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 36: 8758-8764.). 그러나 이는 파일롯 규모에서 세계 최고 수준임



<그림 2-18> 대만 FCU팀 파일롯 규모 바이오수소 생산시스템

○ 한국

- 국내에서 파일롯 규모 전단계인 바이오수소 발효생산기술은 해수부 주도(해양연 주관)의 CO 발효기술과 미래부 주도(에기연 주관)의 2단 발효기술이 있음

- 초기 국내 바이오수소 연구는 2003년 미래부의 21C프런티어사업을 통해 한국에너지기술연구원을 중심으로 2단계(혐기+광합성)발효를 통한 바이오수소 생산기술에 투자가 이루어져 일부 가시적인 성과를 도출하였으나, 2009년 해수부의 집중적인 바이오수소 R&D 투자로 한국해양과학기술원을 중심으로 해양초고온 고세균 NA1을 이용한 바이오수소 생산 기술이 크게 발전되고 있음

- 실험실 규모의 반응기에서 현재까지 바이오수소 생산성을 비교하면, 프런티어사업의 유기성 폐기물을 이용한 혐기발효는 17 L H2/L/day (에기연 자료)이며 NA1을 이용한 CO 발효는 170 L/L/day ((주)엔솔테크 자료)로 10배 정도의 생산성 차이를 보이고 있음. 그러나 에기연에서 고온 혼합균주를 이용 연속배양 공정에서 ERSB반응기를 통해 기질을 sucrose로 할 경우 3.4 L/L/h의 수소생산성을 보임

- 그 밖에 바이오수소 발효생산기술을 연구하는 기관으로는 부산대학교, 경희대

학교, 포항공과대학교가 있으며, 주로, 바이오수소 생산균주 발굴, 효소촉매 개선기술, 수소생성능이 우수한 재조합 균주개발과 공정개선 연구 등을 수행

<표 2-23> 연속배양 공정 국내 바이오수소 생산성 비교

균주	*Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* 혼합균주	*Thermococcus onnurineus* NA1
연구기관	한국에너지기술연구원	(주)엔솔테크
반응기	팽창상 입상 슬러지층 반응기 (ERSB)	CSTR
온도(℃)	50-65	85
기질	2-4% sucrose	CO
수소생산속도(L/L/h)	3.4	7.1
수소생산성(배수)	1	2.1
자료	특허출원번호 1020130029728	(주)엔솔테크 자료

<표 2-24> 최근 국내 바이오수소 발효생산 연구과제 주요 내용

주요 과제수행기관	주요 핵심기술
한국해양과학기술원 ㈜엔솔테크 한국에너지기술연구원 등	해수부 해양생명공학기술개발사업을 통해 해양 초고온 고세균 *Thermococcus onnurinues* NA1을 이용해 CO로부터 바이오수소 생산 증진을 위해 오믹스 기반 산업균주 개발, 고농도 균주 배양기술, 수소생산공정 최적화 기술, pilot 규모의 최적 반응기를 현재 개발중임
한국에너지기술연구원 서강대 성균관대 (주)우리텍 등	미래부 21C프런티어연구개발사업의 선행연구를 통해 혐기발효에 의한 수소생산 기반기술을 확보한 후, 미생물 선별, 배양 최적화 (분압, 미생물 고정화, 유기산/알코올 등의 대사산물 비율 조정 등), 배양기 관련연구, 건조/농축 하수슬러지 등 유기성 폐기물을 이용한 수소생산, 혐기발효 수소생산 대형화 기술 확보 및 Pilot 규모 통합시스템을 구축하는 단계임
부산대학교	*Citrobacter amalonaticus* Y19를 이용 일산화탄소로부터 수소생산 공정의 운전 조건의 최적화 및 생물학적 전환을 위한 고효율 미생물촉매 및 반응시스템 개발. 또한, 고세균 및 중온성 박테이라의 유전자 재조합 미생물을 이용해 대장균내 합성생물학 기법을 이용한 새로운 전자전달시스템의 구축 및 바이오수소의 생산기술을 개발중임
경희대학교	호염성 수소생성균(HHPB)과 유기산 산화균(FAOB)의 syntrophic co-culturing 에 의한 바이오수소 yield 향상 및 포괄고정 담체가 적용된 암발효 기술을 기반으로 수소 생성 박테리아(Hydrogen Producing Bacteria)와 양쪽 대사성 미세조류(Mixotrophic Microalgae)가 최적 융합된 음폐수 고도처리 및 바이오 에너지 회수 시스템을 개발중임
포항공과대학교	산소에 강한 내성을 지닌 *Hydrogenovibrio marinus*라는 해양미생물 유래의 NiFe hydrogenase를 이용하여 미호기성 환경에서도 혐기조건과 동일한 수준의 수소 생산 능력을 지니는 대장균 개발을 진행중임. 유기성 폐기물을 기질로, 하수처리장의 혐기성 소화 슬러지를 접종원으로 하여, 최대의 수소와 메탄생산을 위한 최적조건을 수립하는 단계임

<표 2-25> 바이오수소 발효기술 관련 정부 R&D 과제목록(2002-2013)

부처	연구기관	과제제목
교육부	가톨릭대학교	광유기영양성 세균의 세포에너지 증진 전략 및 바이오 수소생산의 적용
	부산대학교	대사흐름분석을 이용한 Rhodopseudomonas palustris P4의 수소생산능 향상 연구
	부산대학교	수성가스 개질에 의한 생물학적 수소생산 연구
	가톨릭대학교	시스템 생물학에 기반한 고에너지 세포 모듈의 구축 및 대사공학적 재설계를 통한 바이오 수소 생산 균주 개발
	한국해양대학교	유기성 폐기물을 이용한 연속 바이오수소 생산 기술 개발
	한국과학기술원	혼합혐기성미생물에서의수소생산미생물의거동및침적형막을이용한혐기성수소반응조개발
미래부	한국에너지기술연구원	2단 발효공정(혐기+광합성)에 의한 생물학적 수소생산 실증연구
	포항공과대학교	Clostridium thermocellum을 이용한 수소화효소의 과다발현 및 공정최적화를 통한 생물학적 수소생산 수율증대에 관한 연구
	한국에너지기술연구원	purple non-sulfur 세균에 의한 태양광 이용 생물학적 수소생산 및 통합 실증연구개발
	한국원자력연구원	감마선이용 남세균의 hox오페론 조절을 통한 수소생산효소 활성증진 연구
	포항공과대학교	다목적 고성능 수소 생산 공정 최적화
	포항공과대학교	대사공학적 방법에 의한 고수율 수소 생산능을 가진 재조합 대장균 개발
	부산대학교	대장균내 합성생물학 기법을 이용한 새로운 전자전달시스템의 구축 및 바이오수소의 생산
	포항공과대학교	바이오수소에너지의 효율적 생산을 위한 산소내성균주 개발
	한국에너지기술연구원	생물학적 변환기술에 의한 수소생산
	포항공과대학교	생물학적 수소생산 수율증대 및 최적화 연구
	포항공과대학교	생물학적 수소생산 기작 및 최적화 연구
	연세대학교	생물회로설계 및 프로그래밍을 통한 고효율 바이오매스 전환균주 개발
	경희대학교	수소 생성 박테리아 (Hydrogen Producing Bacteria) 와 양쪽 대사성 미세조류(Mixotrophic Microalgae) 가 최적 융합된 음폐수 고도처리 및 바이오 에너지 회수 시스템
	포항공과대학교	수소생산효소 및 생합성에 관련된 단백질의 입체구조 분석을 통한 바이오 수소 생산의 원천기술개발
	포항공과대학교	유기성 폐기물을 이용한 생물학적 수소/메탄 생산을 위한 이단공정의 개발 및 최적화
	부산대학교	일산화탄소로부터수소로의생물학적전환을위한고효율미생물촉매개발및반응시스템개발
	포항공과대학교	차세대 바이오 환경기술 연구센터
	부산대학교	첨단바이오연료생산을위한탈카보닐효소및탈수효소의개발
	서울대학교	특수환경유래고효율수소생산균주확보및탐색
	포항공과대학교	합성생물공학을이용한고수율의대사경로합성
	포항공과대학교	합성생물공학기술을이용한고수율수소생산균개발
	한국에너지기술연구원	혐기발효에 의한 수소생산 대형화 시설 개발 및 생체모방 수소발생시스템 연구
	한국에너지기술연구원	혐기성/광합성 수소생산 미생물과 관련효소를 이용한 물/유기성폐기물로부터 수소생산 기술개발
	경희대학교	호염성 수소생성균(HHPB)과 유기산 산화균(FAOB)의 syntrophic co-culturing 에 의한 Bio-H2 yield 향상 및 포괄고정 담체가 적용된 dark-fermentation system 개발
	대구대학교	홍조류를 기질로 이용하는 고율 바이오수소 생산 공정 개발
산자부	부산대학교	유전자 재조합 미생물 촉매를 이용한 이동형 바이오 수소장치의 개발
중소기업청	경희대학교	Biomass로부터 Bio-H2 회수를 위한 Dark-fermentation 연속 시스템 개발
	경희대학교	호염성수소생성미생물(HHPB)포괄고정담체(EBM)를적용한음식물탈리액처리및수소(Bio-H2)생성을위한DarkFermentation시스템개발
해양수산부	한국에너지기술연구원	CO 용해도 향상 및 수소 생산을 위한 고효율 생물반응기 개발
	㈜엔솔테크	해양 고세균 이용 바이오수소 실증생산 기술개발
	한국해양과학기술원	해양 바이오수소 생산기술 개발
	한국해양과학기술원	해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발
	한국해양과학기술원	해양.극한생물분자유전체연구
	포항공과대학교	해양에너지학술진흥사업포항대
	포항공과대학교	해양에너지 학술진흥사업(포항공대)
환경부	경희대학교	CDM을 대비한 서울시의 하수슬러지 저감 및 청정에너지로서의 Bio-H2회수를 위한 고효율 혐기성 소화시스템 개발
	한국과학기술연구원	막분리-조합형수소배출및분리시스템이결합된신개념바이오수소가스생산공정개발

○ 광합성 미생물에 의한 수소 생산

- 직접적인 방법 (direct photolysis) : Green algae의 광합성 메커니즘 (photosystem Ⅰ,Ⅱ)에 의해 물로부터 양성자와 전자를 공급받아 수소를 생산하는 직접 물분해 (direct photolysis) 방법. 수소발생시 중요한 효소인 hydrogenase는 산소에 매우 민감하기 때문에 광합성 과정에서 필수적으로 발생하는 산소가 hydrogenase의 활성에 영향을 주어 광에너지를 사용하는 장점에도 불구하고, 수소생산성이 낮아 상용화에는 어려움. 이러한 문제를 극복하기 위해, 광합성미생물의 배양조건이나, 광흡수 수율증대를 위한 reactor 개발, 산소에 덜 민감한 hydrogenase 개발 등의 연구가 진행 중.

- 간접적인 방법(indirect photolysis) - Cyanobacteria (blue green algae) : 광합성에 의해 물을 분해하여 산소를 발생하고, 동시에 공기 중의 이산화탄소를 고정하여 고분자 저장물질 (cell material)로 균체 내에 합성한 후 혐기발효 또는 광합성 발효에 의해 수소를 생산하는 방법. 이러한 공정의 핵심효소인 nitrogenase는 수소를 생산하는데 ATP를 이용하기 때문에 hydrogenase에 비해 덜 효율적. 수소를 소비하는 효소인 uptake hydrogenase가 존재하기 때문에 수소생산량이 낮아지는 문제점이 있음

○ Photosynthetic bacteria : purple non-sulfur bacteria는 유기물로부터 광합성 발효 (Photosynthetic fermentation)에 의해 수소를 생산. PS Ⅰ(bacterial photosystem) 만을 이용하여 ATP를 생성하고, organic acid로부터 환원력을 이용하여 nitrogenase가 질소원이 없는 조건에서 분자 상의 수소를 발생

- 이러한 광합성 발효 공정의 최적화를 위해 Rhodobacter sphaeroides O.U. 001을 사용하여, 접종 균주의 나이에 관한 연구, 조사하는 빛에 관한 연구, 배양배지를 최적화 하는 연구 등이 수행 중. 또한 Dark fermentation과 조합으로 수소생산이 많이 시도

○ Strict anaerobe - Dark fermentation : 빛이 없는 혐기적 조건에서 유기물을 분해하여 수소를 생산하는 혐기발효에 의한 공정. 따라서 빛없이 수소 생산이 가능하며 높은 수소생산 속도 및 미생물 성장 속도를 나타냄. 또한 폐수 자원도 이용이 가능. 단, 낮은 수소생산 수율과 발생 가스 중에 CO2를 함유한다는 단점. 혐기 발효 연구의 주된 목표는 생산성 증대 및 수율 (yield)의 향상에 있음

- 이론적인 수율인 glucose 1mol당 12 mol의 수소를 생산하는 것을 목표로 연

구가 진행되고 있으나 열역학적인 관점에서 glucose 발효를 통해 acetate가 주된 metabolite라 가정 할 때 이론적인 수소 생산량은 glucose 1mol당 4mol 생산

- 이론적인 4mol의 수소도 metabolite (lactic acid, succinic acid, butyric acid, ethanol, butanediol, etc)가 생산되는 방향으로 진행되는 metabolic flux에 의해 더 낮은 수율을 나타냄. 따라서 수소의 생산수율을 높이기 위해 각 미생물의 metabolic pattern에 대한 연구 및 생산성 연구진행중

- 혐기 발효에 관여하는 미생물은 fermentative bacteria이며, 산소 노출에 매우 민감한 절대 혐기성 군주 (strict anaerobe)와 산소에 덜 민감한 혐기성 군주 (facultative anaerobe)로 나뉨

- 절대 혐기성 균주에 의한 수소생산 연구는 주로 Clostridium sp.를 이용하고 있음. 산소와의 접촉이 없는 절대 혐기적 조건에서만 수소를 생산하기 때문에 더 높고 지속적인 수소생산을 위해 연속배양이나 세포 고정화를 통해 수소생산량 향상을 도모 중

○ Facultative anaerobe - Dark fermentation : 통성 혐기성 균주에 의한 수소생산 연구는 주로 Enterobacter sp.를 이용하여 수행

- 통성 혐기성 균주의 장점은 산소에 덜 민감하여 배지 내에 고가의 환원제를 넣어 줄 필요가 없는 등 공정이 비교적 단순하여 scale-up이 손쉽다는 점을 들 수 있음

- 단점으로는 절대 혐기성 균주에 비해 수소 생산 수율이 낮다는 점. 그러나 수율은 낮지만 높은 수소생산속도와 공정의 단순함으로 인해 수소생산을 위해 널리 사용

- 연속배양과 세포고정화 연속배양에 의해 지속적인 수소생산을 얻는 연구들이 수행중. 또한 수소생산효율의 단점을 극복하기 위해 수소분압을 감소시키기 위한 다양한 process개발이나 lactase, succinate 등 부산물로 가는 pathway를 knockout시켜 효율을 증가시키기 위한 다양한 metabolic engineering을 통한 연구가 진행

○ Thermophilic bacteria - Dark fermentation : 고온성 미생물을 이용한 수소 생산에 대한 연구는, 수소가 원하지 않는 발효부산물로 여겨졌기 때문에 지금까지 많이 진행되지 않음. 하지만 Pyrococcus furious, Pyrococcus abyssi ST549,

Thermotoga maritime, Acetothermus paucivorans, Acetomicrobium flavidum 등이 수소를 생성할 수 있는 균주로 알려지고, 수소생산 효율에 대한 연구는 최근 들어서 활발히 진행

- 흥미롭게도 고온성 미생물은 중온성 통성 혐기성 균주나 절대 혐기성 균주에 비해 수소생산 수율이 월등히 높음

- 이론적으로 발효를 통해 1mol hexose당 4mol H2을 얻을 수 있는데, Thermotoga maritima의 경우 최대 이론값인 4mol H2/mol glucose를 얻을 수 있다고 보고됨

- Caldicellulosiruptor saccharolyticus와 Thermotoga elfii의 경우에, 이 균주들은 양론적으로 1mol hexose당 3.3mol H2의 수율을 나타내어 이론적인 수소 생산 수율의 83%의 값을 달성. 또한, maximal hydrogen production rate이 각각 8.4 mmol H2/l/h와 4.5 mmol H2/l/h의 우수한 값을 나타냄

- 또한, 일본의 Tamotsu는 Thermococcus kodakaraensis KOD1로부터 연속배양을 통해 59.6 mmol H2/g/h의 수소 생산성을 달성

- P. furiosus와 T. kodakarensis는 높은 비특이적 수소생산비율과 효율을 보이는 이유로 고세균이 가지는 독특한 분해 경로에 기인하는데, 전형적인 EMP 경로가 아닌 변형된 EMP경로를 가지고 있기 때문인 것으로 사료됨 (Sakurabe, Goda et al. 2004)

- 이러한 독특한 대사경로를 통해 최대 4mol H2/glucose가 생성되는 것으로 보고되고 있다. 하지만 이러한 효율상의 장점에도 불구하고, 배양 시 얻을 수 있는 균체량이 제한되어 부피당 생산량이 적어 이 부분에 대한 해결이 요구됨

- 이러한 문제에도 불구하고, electron donor로 NADH보다 FAD를 사용하는 초고온성 고세균의 고효율 높은 수소생산효율, 높은 온도에서 고분자 처리의 용이함, 상대적인 산소에 대한 둔감성, 그리고 중온성 발효과정에서 발생하는 다양한 gas 생성균들 (예, methanogen)의 성장저해등과 또한 최근에 가능해진 고세균의 metabolic engineering은 초고온성 고세균을 통한 수소생산의 가능성 때문에 많은 연구진행중

Reactors	Bacterial strains	Substrate	HRT (h)	pH	Temp (°C)	Maximum H_2 yield	Refs.
CSTR	*Clostridium butyricum* GS2	Starch	12	6.5	37	0.52 L/h/L and 13.2 mmol H_2/g total sugar	[113]
Batch	Municipal wastes, methanogene bacteria	Glycerol	–	6	37	0.41 mol H_2/mol glycerol	[114]
FBR	Sewage sludge	Sucrose	6	–	–	4.26 mol H_2/mol sucrose	[115]
Batch	POME sludge	Food waste	–	7	55	593 mL H_2/g carbohydrate	[116]
Fed-batch	Clostridium sp.	Swine manure	16	5	35	18.7×10^{-3} g H_2 per g TVS	[117]
Batch	Compost	Sucrose	–	–	22	4.3 mol H_2/mol sucrose	[118]
Batch	*Escherichia coli*, DJT135	Fructose, sorbitol, glucose	–	6.5	35	1.27, 1.46 and 1.51 mol H_2/substrate	[119]
Fed-batch	Ground wheat	Starch, glucose				465 mL H_2/g starch, 3.1 mol H_2/mol glucose	[120]
Batch	Cow dung	Glucose	8.34	5.0	33.5	2.15 mol H_2/mol glucose	[121]
Continuous	Microbial consortium	Glucose	4	5.5	110	2.30 mol H_2/mol glucose	[122]
IBRCS-CSTR	Inocula – digested sludge	Glucose	8	5.5–6.5	37	2.8 mol H_2/mol glucose	[123]
AnSBR	Seed sludge	Food waste	36	5.3 ± 1	35 ± 1	0.5 mol H_2/mol hexoseadded	[124]
Batch	Clostridium sp. R1	Carbohydrate	–	6	30	3.5 mol H_2/mol cellobiose	[125]
ACSTR	*Clostridium butyricum*	Glucose	5–10	4.9	37	1.3 mol H_2/mol glucose	[126]
Batch	Clostridium sp. DMHC-1	Sludge of distillery waste	–	5.0	37	3.35 mol H_2/mol glucose	[127]
Batch	*Clostridium butyricum* and *Clostridium bifermentans*	Riverbed sediments	–	6	37	2.3 mol H_2/mol glucose	[128]
Batch	*Bacillus coagulans* IIT-BT S1	Sludge as substrate	12	6	37	37.16 mlH_2/g COD consumed	[129]
Batch	River sludge	Apple pomace	–	4.5	5.0	134.04 ml/g total solid (TS)	[130]
CSTR	Inoculated sludge	Purified terephthalic acid	6	6.0	35 ± 1	0.073 L/g MLVSS d	[131]
AnSBR	Seed sludge from a dairy manure	Liquid swine manure	16	5.0	37 ± 1	1.50 mol H_2/mol glucose	[132]
Batch	Rice rhizosphere microflora	Apple pomace	–	6.0	35	2.3 mol H_2/mol hexose	[133]
AnSBR	Seed sludge from cassava wastewater	Cassava starch		5.5	37	186 ml H_2/g COD	[134]
Batch	Diverse microflora	Activated sludge			1. 37 2. 55	(1). 2.18 mol H_2/mol glucose (2). 1.25 mol H_2/mol glucose	[135]
Batch	River sludge	Apple pomace	–	7.0	37	101.08 ml/g total solid (TS)	[136]
Batch and sequenced-batch	*Clostridium butyricum* CWBI1009	4. Glucose 5. Starch		(1). 5.2 (2). 5.6	30	1. 1.7 mol H_2/mol glucose 2. 2.0 mol H_2/mol hexose	[137]
CSTR	Sorghum bicolor L. Moench	Sweet sorghum extract	12	4.7	35	0.93 ± 0.03 mol H_2/mol glucose	[138]
Batch	Anaerobic sludge	Waste ground wheat	–	7	37	1.46 mol H_2/mol glucose	[139]
Batch	Anaerobic sludge	Acid hydrolyzed wheat starch and sugar	–	5.5	30	200 ml H_2/g sugar	[140]
Batch	Anaerobically-digested sludge	Tri-saccharides		5.5	37	1.84 mol-H_2/mol-hexose	[141]
Continuous	*Clostridium butyricum*-NRRL 1024 and *Clostridium pasteurianum*-NRRL B-598	Ground wheat starch	6–60	5.5	30	109 ml H_2 gT/S	[142]
1. Batch 2. CSTR	*Clostridium acetobutylicum* and *Citrobacter freundii*	Xylose	–	6.8	45	1. 0.71 mol H_2/mol xylose 2. 1.97 mol H_2/mol xylose	[143]
Batch	Anaerobic sludge	Cheese whey powder	–	5.5	55	1.03 mol H_2/mol glucose	[144]
Batch	Bacterial hydrolysis	Grass silage	–	7	37	37.8 ± 5.8 mLH_2/g silage	[145]
Batch	*Clostridium pasteurianum*	Dry Grass	–	7	35	72.21 mLH_2/g-dry grass	[146]
Batch	Sewage sludge	Food waste		6.0 ± 1	35 ± 1	2.26 mol-H_2/mol-hexose	[147]
Batch	Anaerobic digested sludge	Distillery wastewater		5.5	37	1 L H_2/L medium	[148]
Semi-continuous	Seed anaerobic sludge	Glucose		6–8	35	7 mmol H_2/gdwt-h	[149]
Batch	Bacillus sp. and Brevundimonas sp.	Beef extract		5.0–6.8	35	1.94 mol H_2/mol glucose	[150]
CSTR	Anaerobic mixed micrflora	Cellulose	10	5.86 ± 0.1	55 ± 1	12.28 mmol H_2/g cellulose	[151]
AnSBR	Anaerobic sludge blanket reactor	1. Glucose 2. Xylose	1.7	5.5		1. 2.89 ± 0.18 mol H_2/mol glucose 2. 1.94 ± 0.17 mol H_2/mol xylose	[152]
CSTR	*Clostridium pasteurianum*	Glycerol	–	7	35	0.77 ± 0.05 mol H_2/mol glycerol	[153]

※ 출처: Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 31: 158–173.

<그림 2-19> 혐기성 암발효를 통한 바이오수소 생산성 비교

Reactors	Bacterial strains	Substrate	Operating conditions		Maximum H_2 yield	Ref.
			pH	Temp. (°C)		
Batch	*Rhodobacter sphaeroides*	Sodium lactate	8.9	30	2.4 mg/l	[80]
Batch	Mixed photosynthetic culture	Acetate and butyrate	6–7	34	3.51 mol/Kg CODR-day	[81]
Batch	*Rhodopseudomonas faecalis* RLD-53	Acetate	7	35	2.61 mol H_2/mol acetate	[82]
Photobioreactor	*Rhodobacter sphaeroides* O.U. 001	Malate, acetate and butyrate	6.7	30–33	24 ml H_2/l h	[71]
Batch	*Rhodopseudomonas faecalis* strain RLD-53	Acetate	7	35	3.17 mol H_2/mol acetate	[83]
Biofilm-based photobioreactor	*Rhodopseudomonas palustris* CQK 01	Glucose	7	25	0.2 mol H_2/mol glucose	[84]
Tubular photo bioreactor-fed batch	*Rhodobacter capsulatus*	Acetate	≤8	10–35	0.6 mol H_2 per mole of acetic acid fed	[85]
Batch	*Rhodobacter sphaeroides* O.U. 001	Brewery wastewaters	7–7.2	28 ± 2	2.24 l H_2/l medium	[86]
Continuous	*Rhodopseudomonas palustris* WP 3-5	Synthetic wastewater	6.8	28 ± 35	205 mL H_2 L/d	[87]
Sequencing batch reactor	*Rhodopseudomonas faecalis* RLD-53	Acetate	7	35 ± 1	3.12 mol H_2/molacetate	[88]
Cylindrical	*Rhodobacter capsulatus* with cbb3 gene	Acetic and butyric acid	6.8	35	3752.7 mL H_2 L/L	[89]
Semi-continuous	*Rhodobacter sphaeroides* KD131	Succinate	7.5 ± 0.2	30	3.7 mol H_2/mol succinate	[90]
Continuous	*Rhodobacter sphaeroides* KD131	Succinate	7.5 ± 0.2	30	2.3 mol H_2/mol succinate	[91]
Batch and continuous	*Rhodopseudomonas faecalis* RLD-53	Acetate	7	35 ± 1	2.64 mol H_2/mol acetate	[92]
Batch	*Rhodobacter sphaeroides* KD131	Hexose	7	30	8.35 mol H_2/mol hexose	[93]

※ 출처: Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 31: 158–173.

<그림 2-20> 혐기성 광발효를 통한 바이오수소 생산성 비교

(3) 고세균 이용 바이오수소 생산 기술

○ (국외) 초고온 고세균 바이오수소 생산 기술 개발

- 해양 고세균은 광합성 미생물, 통성 또는 절대혐기성 균주에 비해 수소생산 수율이 높은 것으로 보고됨 (Metabolic engineering, 2008). NADH 보다 FAD를 사용하여 높은 효율로 수소를 생산 및 상대적으로 산소에 대해 둔감하며 중온성 발효과정에서 발생하는 다양한 gas 생성균들 (예, methanogen)에 의한 성장 저해 현상이 일어나지 않는 장점 보유

<표 2-26> 다양한 미생물을 활용한 수소생산 비교 - 초고온성고세균의 고효율 예시

Comparison of fermentative H_2 production by mesophilic and hyperthermophilic microorganisms

Organisms	Substrate	Cultivation method	Biomass concentration (gcdw/L)	Specific H_2 production rate (mmol/gcdw/h)	Volumetric H_2 productivity (mmol/L/h)	H_2 yield[a]	Reference
Enteric bacteria							
Enterobacter aerogenes	Glucose	Batch	0.68–1.82	11–17	11–21	1.1	Tanisho et al. (1987)
Enterobacter cloacae IITBT08	Starch	Fixed bed	44 g/L	1.6	71	1.4	Kumar and Das (2001)
Escherichia coli K12 W3110 and SR15	Glucose	Fed batch (high cell density)	94 g/L	5 (WT), 8 (SR15)	500 (WT), 793 (SR15)	1.08 (WT), 1.82 (SR15)	Yoshida et al. (2006)
Clostridium							
Clostridium butyricum	Glucose	Continuous culture: $D = 0.125\ h^{-1}$	2–2.5 g/L	5.5–6.2	11–15.4	1.4–2.0	Kataoka et al. (1997)
C. acetobutylicum	Glucose	Fed batch	N/A	N/A	27.8	2	Chin et al. (2003)
C. thermolacticum	Lactose	Continuous: $D = 0.013–0.19\ h^{-1}$	N/A	N/A	2.5–0.9	0.7–0.9	Collet et al. (2006)
C. tyrobutyricum	Glucose	Batch	7 g/L	1.9 (estimated)	13 (estimated)	1.4	Liu et al. (2006)
C. tyrobutyricum	Xylose	Fixed bed	2 g/L	13.5 (estimated)	27 (estimated)	N/A	Liu et al. (2006)
Thermococcales							
T. kodakaraensis	Starch	Continuous: $D = 0.2\ h^{-1}$	0.48	14	6.7	3.3	Kanai et al. (2005)
T. kodakaraensis	Pyruvate	Continuous: $D = 0.2–0.8\ h^{-1}$	0.38–0.1	24.9–59.6	9.5–6	1.1	Kanai et al. (2005)
Pyrococcus furiosus	Maltose	Continuous: $D = 0.1–0.75\ h^{-1}$	0.22	25–100	5.5–22	2.9	Schicho et al. (1993)
Thermotogales							
T. maritima	Glucose	Batch	0.072	96	6.9	4	Schroder et al. (1994)
T. neapolitana	Glucose	Batch	N/A	N/A	0.597	N/A	Van Ooteghem et al. (2002)
T. elfi		Batch	N/A	N/A	0.38	1.35	Kadar et al. (2003)
Caldicellulosiruptor							
Caldicellulosiruptor saccharolyticus	Glucose	Batch	1.7	12.6 (estimated)	10.7	2.5	Kadar et al. (2004)
C. saccharolyticus	Xylose	Batch	1.6	14.1 (estimated)	11.3	2.7	Kadar et al. (2004)
C. saccharolyticus	Xylose+glucose	Batch	1.0	18.4 (estimated)	9.2	2.4	Kadar et al. (2004)
C. saccharolyticus	Paper sludge	Batch	N/A	N/A	5.3	2	Kadar et al. (2004)
C. saccharolyticus	Glucose	Continuous: $D = 0.05–0.35\ h^{-1}$	0.3–0.5	13–26	4–11	4–3.1	de Vrije et al. (2007)

WT, wild type; gcdw, grams cell dry weigh; SR15, mutant strain SR15.
(Estimated): these values were calculated from original plots published in corresponding references.
[a] H_2 yield was calculated based on molecules of H_2 produced per mole of glucose (hexose) consumed.

○ (국내) 고세균 이용 바이오수소 대량생산 기술 개발

- 한국해양과학기술원에서 자체 확보한 해양 초고온성 고세균 Thermococcus onnurineus NA1 균주는 기존에 알려지지 않은 개미산 이용의 독특한 수소생산 메커니즘을 보여 전세계의 이목을 집중(Nature 게재, 2010)

- 2002년 한국해양과학기술원에서 자체 확보한 해양초고온성 고세균 Thermococcus onnurineus NA1 균주는 개미산 이용 기존 알려지지 않은 독특한 수소생산 메커니즘을 보여 전세계의 이목을 집중시켰고 (Nature, 2010), 바이오수소 생산성 또한 세계최고수준인 것으로 나타남 (미국응용미생물학회지, 2012). 또한 NA1을 이용하여 세계 최초로 산업폐가스인 제철소 부생가스로부터 수소생산을 성공하여 경제적 수소생산에 대한 가능성을 제시함 (미국

응용미생물학회지, 2013).

* 태평양 심해의 해양 고세균을 추출·배양하여 일산화탄소와 유기물 등으로 양질의 수소를 얻을 수 있는 생물반응기 개발

(4) CO 이용 바이오수소 생산

○ CO 이용 바이오수소 기술개발 연구

- 수소생성균주에 의한 생물학적 수성가스전환: Carbon monoxide dehydrogenase(CODH)가 CO에 대한 전자 화학적 반쪽 반응을 통해 전자와 proton을 CO에 전달하고 수소화효소(hydrogenase enzyme)가 hydrogen 반쪽 반응을 촉매 함으로써 세포생장을 위한 에너지를 공급한다. 생물학적 수성반응은 혐기적 조건에서는 4.56 kcal/molCO 생성하고 (반응3), 호기적 전환에서는 61.1 kal/molCO 생성되지만 (반응4), 수소는 발생되지 않는다. CO 산화를 통해 수소를 생성하는 다양한 수소생성균들과 CO 발효를 위한 여러 가지 발효조건들이 존재

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + 2e^- + 2H^+ \quad (1)$$
$$H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad (2)$$
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad \triangle G = -20.1\,kJ/mol \quad (3)$$
$$CO + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (4)$$

- 광합성 균들중에 purple non-sulfur bacteria, Rhodospirillum rubrum과 Rubrivivax gelatinosus가 높은 CO uptake rate와 이론적 값 1.0에 가까운 CO 전환(conversion)율 때문에 주목 받고 있음

- 이러한 새로운 가능성 때문에 2000년대 초기부터 다양한 고세균을 활용한 바이오수소 연구가 진행 중임

- 특히 최근에는 CO를 포함한 합성가스를 미생물 촉매로 전환하여 수소나 다양한 화학원료를 생산하는 연구가 전세계적으로 활발히 진행 중.

- 제철소, 폐기물 소각로 등에서 다량으로 발생하는 부생가스나 탄화수소 연료의 가스화로부터 생성된 합성가스는 고농도의 CO를 포함. 이렇게 발생된 CO는 고온 상태이기 때문에 중온성 미생물을 이용할 경우 CO 가스를 냉각시켜야 하므로 이 또한 많은 비용 소요

- 하지만 해양 고온성 고세균을 촉매로 하여 수소로 전환할 경우, 폐기물 소각 시 발생되는 잔열을 고온 발효조를 운전하는데 이용가능하며, 고온의 CO 가스를 냉각 시킬 필요 없이 바로 사용 가능하기 때문에 냉각 비용을 대폭 절감할 수 있을 것으로 기대

- 그러나 배양 시 얻을 수 있는 균체량이 제한되어 부피당 생산량이 적기 때문에 부피당 균체량을 증가시켜야하는 과제를 가지고 있으며 최근에 일부 시도되고 있는 초고온 고세균의 다양한 대사공학 연구를 통해 수소의 친환경적이고, 경제적인 생산기술 개발 필요

- 해양 고세균을 이용한 수소생산 연구는 전 세계적으로 미미한 상태이기 때문에 바이오 수소에너지 생산 관련분야에서 선진기술/지식확보 및 원천기술을 확보하는 데 있어서 본 연구의 중요성 및 필요성은 매우 높다고 판단됨

- 본 연구과제의 주요 연구대상인 초고온 고세균 Thermococcus onnurineus NA1은 <표 2-7>에 나오는 대부분의 미생물에 비해 CO uptake rate와 이론적 값 1.0에 가까운 CO 전환(conversion)율은 유사하지만, 생산성은 400 mmol/g/l, 50mmol/l//h에 달해 기존의 생산성을 월등히 앞서는 결과가 나오고 있어서 주목됨

<표 2-27> 다양한 수소생성균을 이용한 수소생산

Production of hydrogen using various hydrogenogenic bacteria.

Organism	Substrate (v/v, %)	Culture mode	Time	Temp. (°C)	pH	Cell density (g/l)	Conversion efficiency	Product	Ref.
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/Ar$ (55:20:10:15)	Batch	120 h	30	7.5	0.27	X_{CO}: 88%	0.86 mmol H_2/mmol CO 0.063 mmol H_2/g h	[61]
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/Ar$ (55:20:10:15)	Batch	120 h	30	6.9	na	X_{CO}: 86%	16.9 mmol H_2/l	[62]
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/Ar$ (55:20:10:15)	CSTR	600 h	30	6.3	3.4	X_{CO}: 80%	0.82 mmol H_2/mmol CO 16 mmol/g h	[24]
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/Ar$ (55:20:10:15)	CSTR	7 days	na	6.3	na	X_{CO}: 60%	9.6 mmol H_2/h	[63]
Bacillus strnthtt ERIH2	$CO/H_2/CO_2/CH_4$ (64.34:20.8:10.8:4.06)	CSTR	na	50	6.4–6.9	0.68	X_{CO}: 80%	H_2 yield 95%	[23]
Rhodopseudomonas palustris P4	N_2/CO (90:10)	Aerobic–chemoheterotrophic cell growth/anaerobic CSTR	400 h	30	7.0	10	X_{CO} > 60	41 mmol/g h	[64]
Ctrobacter sp. Y19	N_2/CO (92:8)	Aerobic–chemoheterotrophic cell growth/anaerobic CSTR	68 h	30	7.0	~1.5	na	20 mmol H_2/g h	[59]
Rubrivivax gelatinosus CBS	$CO/CH_4/N_2$ (20:5:75)	Trickle-bed rector	na	30	7.0	na	Specific CO uptake rate 0.73 mmol/min/g	0.8 mmol H_2/g min	[65]
Rubrivivax gelatinosus CBS	CO/N_2 (10:90)	Hollow fiber immobilized cell	8 months	25–26	6.8	0.65	na	125 ml H_2/g h	[66,67]
Rubrivivax gelatinosus CBS	CO/N_2 (20:80)	Bubble train bioreactor	10 days	25–26	na	na	na	140 ml H_2/g h	[66,67]
Rhodospirillum rubrum	$CO/H_2/CO_2/N_2$ (55:20:10:15)	CSTR	120 h	30	7.0	na	X_{CO}: 58%	0.88 mol H_2/mol CO 0.01 mol H_2/g h	[68]

na: not available.

○ CO 이용 바이오연료 상업화 연구

- 현재 합성가스 발효가 bench top scale CSTR에 광범위하게 생산되고 있지만 100L 규모이상의 반응기에 대한 결과는 없음. 이 기술에 대한 큰 규모의 에탄올생산에 성공적 운전을 한 메이저개발 회사로는 IneosBio, Coskata 그리고 LanzaTech이 있으며, Coskata는 고정된 셀(immobilized cell)에 가스를 섬유(fiber)에 통과시키는 새로운 hollow fiber membrane 반응기 사용에 대한 수많은 특허들을 갖고 있음

- IneosBio: Arkansas 대학의 James Gaddy 교수 실험실에서 출원한 특허를 기반으로 미국 노스캐롤라이나 주 페이어트빌에 최초의 가스발효회사, Bioengineering Resource Inc (BRI)를 설립. 2003년에 통합된 pilot unit를 가동하였고, 2008년에 BRI에서 개발된 기술의 권리를 다국적 화학회사 Ineos에 넘기고, IneosbBio라는 이름으로 가스발효 기술을 개발해오고 있음. 2011년에는 미국 플로리다 주 인디언리버에 합성가스로부터 매년 8백만 갤런의 에탄올을 생산할 시설계획을 밝힘

- Coskata: IneosBio처럼, 밴처캐피탈 자금으로 오클라호마 주립대학과 오클라호마 대학으로부터 전문적 지식과 기술을 이용하여 설립되었으며, 2009년에 'semi-commercial' 시설을 미국 펜실베니아 주 메디슨에 설립함

- LanzaTech: 2005년에 뉴질랜드의 오크랜드에 설립됨. 풍부한 CO(CO-rich)를 함유한 산업적 오프가스와 합성가스(syngas)를 이용하여 에탄올과 2,3-butanediol 플랫폼 생산 개발에 주력. 최근 철강 및 정유화학회사들과 활발한 파트너십 체결로 사업영역 확장 중

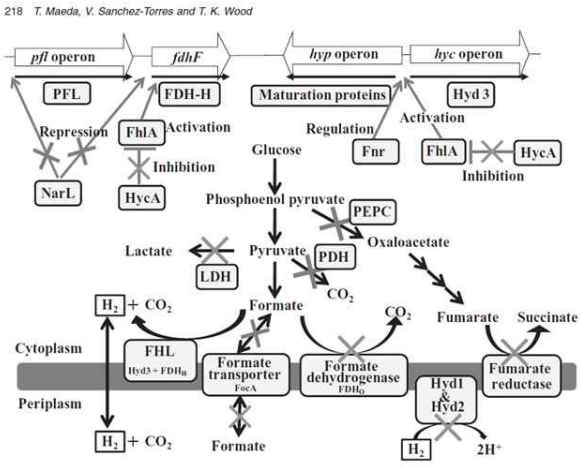
<표 2-28> 바이오연료생산을 위해 가스기질 발효에 이용되는 다양한 미생물들

	Fermentation product	Ref.
Rhodospirillum rubrum *Rhodobacter sphaeroides* *Methanobacterium thermoautotrophicum* *Methanosarcina barkeri* *Clostridium thermoaceticum* *Rhodopseudomonas gelatinosa* *Rhodopseudomonas capsulate* *Rhodopseudomonas palustris* *Rubrivivax gelatinosus* *Bacillus simithii* ERIH2 *Rhodopseudomonas palustris* P4 *Citrobacter amalonaticus Y19* *Rhodocyclus gelatinosus* *Carboxydothermus hydrogenoformans*	Hydrogen $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	[14,21,23–33]
Clostridium autoethanogenum *Clostridium ljungdahlii* *Moorella* sp. HUC22-1 *Acetobacterium kivui* *Peotostreotococcus productus* *Alkalibaculum bacchi*	Mixture of acetic acid and ethanol $6CO + 3H_2O \rightarrow CH_3CH_2OH + 4CO_2$ $2CO_2 + 6H_2 \rightarrow CH_3CH_2OH + 3H_2O$ $6CO + 6H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$ $4CO + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2CO_2$ $2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$	[14,22,34–38]
Eubacterium limosum *Clostridium carboxidivorans* *Butyribacterium methylotrophicum*	Mixture of ethanol, butanol, acetic acid and butyric acid $6CO + 3H_2O \rightarrow CH_3CH_2OH + 4CO_2$ $4CO + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2CO_2$ $12CO + 5H_2O \rightarrow C_4H_9OH + 8CO_2$ $10CO + 4H_2O \rightarrow C_4H_9OH + CO_2$ $12H_2 + 4CO_2 \rightarrow C_4H_9OH + 7H_2O$	[14,39–46]
Peptostreptococcus productus *Eubacterium limosum* *Acetobacterium woodii* *Acetobacterium wieringae* *Clostridium thermoaceticum*	Acetic acid $2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$ $4CO_2 + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2CO_2$	[14,21,47–49]
Methanospirillum hungatii *Methanobacterium formicicum* *Methanobrevibacter smithu* *Methanosarcina barkeri* *Methanobacterium thermoautotrophicum*	Methane $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ $4CO + 2H_2O \rightarrow CH_4 + 3CO_2$	[21,35]

(4) 바이오수소 생산 우수균주 개발

○ 바이오수소 생산성 향상을 위한 metabolic engineering (review 첨가):

- 유전공학적인 방법론이 발달하면서 모델생물인 대장균을 이용한 바이오수소 생산성 향상을 위한 우수균주 개발연구가 활발히 이루어짐 <그림 2-21>.



<그림 2-21> 대장균을 이용 대사경로 재설계를 통한 우수균주 개발 현황

- 하지만 그 생산성은 대장균이 가진 한계로 인해 경제성을 확보하는 수준에 이르지 못함.

Table 1. Comparison of *in vivo* hydrogen production by engineered *Escherichia coli* strains.

System	H_2 production rate (reported units)	H_2 production rate (converted units)	Substrate	Reference
Protein engineering				
Protein engineering of HycE (truncation) of *E. coli*	9 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	9 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Formate	Maeda *et al.* (2008b)
Protein engineering of FhlA of *E. coli*	7 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	7 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Formate	Sanchez-Torres *et al.* (2009)
Site-directed mutagenesis of HydA from *C. reinhardtii*	approximately 10 μmol H_2 ml^{-1}	19 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Agapakis *et al.* (2010)
Metabolic engineering through modifying multiple native genes in *E. coli*				
Inactivation of HycA and overexpression of FhlA	23.6 g H_2 l^{-1} h^{-1}	254 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Formate	Yoshida *et al.* (2005)
Inactivation of HyaB, HybC, HycA, FdoG and overexpression of FhlA	113 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	113 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Formate	Maeda *et al.* (2008a)
Inactivation of HycA, LdhA, FrdBC and overexpression of FhlA	13 mmol (g DCW)$^{-1}$ l^{-1} h^{-1}	26 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Yoshida *et al.* (2006)
Inactivation of HyaB, HybC, HycA, FdoG, FrdC, LdhA and AceE	32 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	32 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Maeda *et al.* (2007b)
Inactivation of Hyd 1, Hyd 2, LdhA and overexpression of truncated FhlA	5.3 mmol H_2 l^{-1} h^{-1}	24 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1} [a]	Glucose	Turcot *et al.* (2008)
Inactivation of HycA, HyaAB, HybBC, LdhA and FrdAB	31.3 mmol H_2 (g DCW)$^{-1}$ h^{-1}	63 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Kim *et al.* (2009)
Inactivation of HyaAB, HybABC, HycA, LdhA and FrdBC	1.9 mmol H_2 (g DCW)$^{-1}$ l^{-1} h^{-1}	1.5 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Mathews *et al.* (2010)
Production of Hyd 1	3 ml H_2 100 ml^{-1}	0.8 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1} [a]	Glucose + formate	Kim *et al.* (2010)
Inactivation of HycA and LacI	5.88 ml H_2 OD^{-1} h^{-1}	11 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Cheese whey	Rosales-Colunga *et al.* (2010)
Adaptive evolution				
Chemical mutagenesis and adaptive evolution	22 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$	4 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glycerol	Hu and Wood (2010)
Heterologous gene expression				
Production of [Fe] hydrogenase from *E. cloacae*	0.96 mmol h^{-1}	14.5 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1} [a]	Glucose	Chittibabu *et al.* (2006)
Production of HoxEFUYH hydrogenase from *Synechocystis sp.* PCC 6803	22 ± 3 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$	4 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Maeda *et al.* (2007c)
Production of HoxEFUYH hydrogenase and the maturation proteins HypABCDEF and HoxW from *Synechocystis sp.* PCC 6803	8.4 μmol H_2 l^{-1}	0.004 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Wells *et al.* (2011)
Production of HydFEGA	429.3 nmol H_2 min^{-1} l^{-1}	0.12 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1} [a]	Glucose	Akhtar and Jones (2008a)
Production of HydFEGA and inactivation of IscR	1257.5 nmol H_2 min^{-1} l^{-1}	0.34 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1} [a]	Glucose	Akhtar and Jones (2008a)
Inactivation of IscR, production of HydFEGA hydrogenase from *C. acetobutylicum*, CpFdX ferredoxin from *C. pasterianum* and YdbK pyruvate–flavodoxin oxidoreductase from *E. coli*	9.6 mmol H_2 (g DCW)$^{-1}$ h^{-1}	19 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Akhtar and Jones (2009)
Production of HupSL hydrogenase from *Rhodobacter sphaeroides*	19.68 μL H_2 (ml culture^{-1}) h^{-1}	1.1 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Lee *et al.* (2010)
Inactivation of HycA and TatC and expression of the genes encoding ScrKYABR invertase from *Bacillus subtilis*	1.38 ml H_2 (mg DCW)$^{-1}$ l^{-1}	3.9 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Sucrose	Penfold and Macaskie (2004)
Inactivation of IscR, production of HydFEGA hydrogenase from *C. acetobutylicum*, CpFdX ferredoxin from *C. pasterianum* and YdbK pyruvate–flavodoxin oxidoreductase from *E. coli*, and *amyE* from *B. subtilis*	30 μmol H_2 culture^{-1}	0.65 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1} [a]	Starch	Akhtar and Jones (2009)
Single gene knockout or expression				
Inactivation of HycA	NA	109 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Formate	Yoshida *et al.* (2005)
Production of FhlA	7 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	7 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Formate	Maeda *et al.* (2008a)
Inactivation of HycA	31 ml H_2 (OD)$^{-1}$ l^{-1}	6.3 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Penfold *et al.* (2003)
Inactivation of FocA	14.9 μmol H_2 (mg DCW)$^{-1}$	1.8 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Fan *et al.* (2009)
Inactivation of HybC	12.1 μmol H_2 (mg DCW)$^{-1}$	1.4 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Fan *et al.* (2009)
Inactivation of NarL	14.4 μmol H_2 (mg DCW)$^{-1}$	1.7 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Fan *et al.* (2009)
Inactivation of Ppc	11.2 μmol H_2 (mg DCW)$^{-1}$	1.3 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Fan *et al.* (2009)
Production of Fnr	6.2 μmol H_2 (mg DCW)$^{-1}$	3.1 μmol H_2 (mg protein)$^{-1}$ h^{-1}	Glucose	Fan *et al.* (2009)

a. Assuming cell turbidity is 1.

© 2011 The Authors
Microbial Biotechnology © 2011 Society for Applied Microbiology and Blackwell Publishing Ltd, *Microbial Biotechnology*, **5**, 214–225

<그림 2-22> 대장균을 이용한 바이오수소 생산성

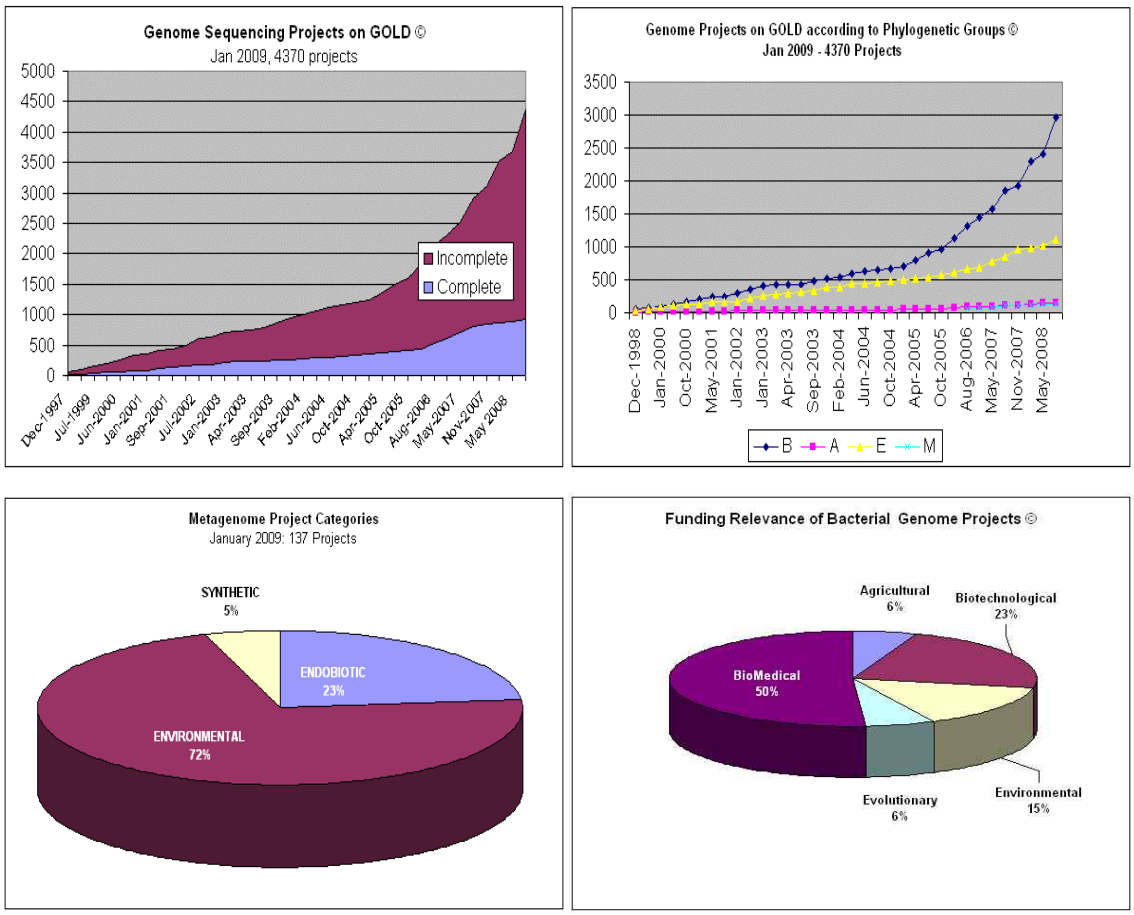
○ 해양.극한생물 유전체 분석 : 해양.극한생물의 유전체 연구는 2000년대 들어 전 세계적인 생물자원의 확보 경쟁이 치열해 지면서 더욱 활발해짐. 유럽연합은 2004년 프랑스, 영국, 독일, 네덜란드, 폴란드, 덴마크, 스웨덴, 노르웨이, 스페

인, 포르투갈, 이탈리아, 그리스 등이 참여하는 "Marine Genomics Europe" 프로그램 시작 (http://www.sb-roscoff.fr). 미국은 많은 대학과 연구기관, 기업에서 해양생물 유전체 연구를 진행 중 (DOE-JGI, SCRIPPS 해양과기원구소, Miami 대학교, MUSC 외 다수 기관).

- 해양.극한 미생물 : 유전체 염기서열 고속분석과 생물정보학 기술이 발달하면서 전체 유전체가 분석되는 생물의 수가 급속히 증가함. 미국 TIGR의 GOLD (Bioinformatics 15, 1999) DB에 따르면 2009년 4월 현재 전체 유전체 분석이 완결되어 공개된 생물은 987종이며, 분석이 진행 중인생물은 3634종에 이름 (그림 2-22). 상대적으로 유전체 크기가 작고 생리작용이 다양한 미생물 유전체가 분석된 종의 80% 이상을 차지하며, 현재 진행되는 종의 65% 이상 (2506종)이 미생물임 (Gold home page URL).

- 미생물 유전체 해독은 초기에 병원성 세균을 대상으로 이루어졌으나, 이 후 극한환경 미생물과 산업적 가치가 있는 미생물로 확대되었으며 해양미생물에 대한 연구도 점차 확대되고 있다. 외국의 주요 미생물 유전체 분석 기관은 미국의 JCVI, DOE-JGI, 영국의 Sanger 센터, 프랑스의 Genoscope, 독일의 Max-Plank 연구소, 일본의 이화학연구소와 해양과학기술센터 등이다. 또한, 생명공학 벤처기업과 제약회사들도 대규모 미생물 유전체 분석을 실시한다. 기업에 의한 유전체 분석이 점차 일반화되면서 유전체 분석 자료가 공개에서 비공개나 유료화 되는 경향으로 바뀌고 있음.

- 최근에는 유전체를 자연계로부터 직접 추출하는 환경유전체 기술의 발달로 이에 대한 연구가 최근 급속히 증가하고 있으며 (Sargosso 바다 연구 등; Science 304, 2004), 새로운 유용자원의 보고로 인식되고 있음.



<그림 2-23> GOLD (Bioinformatics 15, 1999) DB의 유전체 현황 분석

○ 초고온 고세균을 활용한 metabolic engineering : 유전체 등의 활발한 연구에도 불구하고, 극한미생물의 산업적 활용 연구는 위에서 살펴본바와 같이 대부분 극한환경에서 활성을 나타내는 효소나 유전자원 등을 분리하여 이용하는 것이 대다수이고, 극한미생물 자체를 활용하거나 극한미생물을 이해하기 위한 functional study의 경우는 상대적으로 활발하지 못한 편

- Transcription, replication, DNA damage 등 세포의 기능의 근간이 되는 central machinery 경우 진핵세포와의 유사성으로 인해 다양한 structural genomics의 연구대상이 되고 있지만, 극한미생물 자체에 대한 연구는 활발하지 못함

- 그 원인으로는 극한미생물의 배양 및 연구를 위한 실험방법이나 기기장비 면에서 많은 어려움이 있고, 극한미생물에서 functional study를 진행하기 위한 유전학적, 분자생물학적 요소들이 미비

- 하지만 최근에는 초고온 고세균을 중심으로 transformation이나 disruption을

위한 vector system들이 개발되어 유전자의 기능 등에 대한 functional study가 가능해지고, P. abyssi에서는 유전자를 도입하기 위한 shuttle vector가 제작됨.

- 최근에는 T. kodakaraensis KOD1을 대상으로 disruption을 하기 위한 효율적인 방법이 개발되어 유전자의 기능연구가 활발히 진행 중이고, 이를 통해 다양한 disruption 및 transgenic 연구가 가능해짐

○ 육상자원 고갈에 따른 해양에너지·자원개발의 경쟁구도 및 해양가치에 대한 인식 재편 등은 세계 각국의 해양산업개발 정책 강화로 이어지고 있으며, 특히 중국, 일본 등 동아시아 이웃국의 해양산업 투자 및 성장 정책은 더욱 가속화될 전망

- 중, 일은 동북아 경쟁국으로서 개발된 해양자원을 활용한 새로운 해양산업 개발에 집중 투자하여 해양산업의 성장을 국가 경제성장과 연계시키기 위한 국가 차원의 정책전략을 구사하고 있음

○ 미국, 유럽 등 선진국의 경우, R&D의 전주기적 관리를 통해 상용화·실용화 성공률을 높이기 위한 자체의 모델을 개발·운영하고 있어 기술기획-기술개발-산업기반 형성의 기본 체계를 이미 갖추고 있는 것으로 평가됨

○ 또한 국가, 기업, 국민 등 전 방위적 측면을 대상으로 하는 관련 데이터를 공유 및 통계체계 구축을 통해 해양산업의 기초적 정보 인프라를 제공하고 있는 것으로 나타남

2.2.3 특허동향

○ 국가별/연도별 동향

- 전체적으로 해당 특허는'96년 이후부터 출원되기 시작하여'00년대 후반부터 급격히 증가하고 있음. CO의 생물학적 전환 관련 특허는 미국특허가 46건으로 전체의 47%를 차지하고 있으며 한국특허 28%(27건), 일본특허 20%(20건)를 점유하고 있음

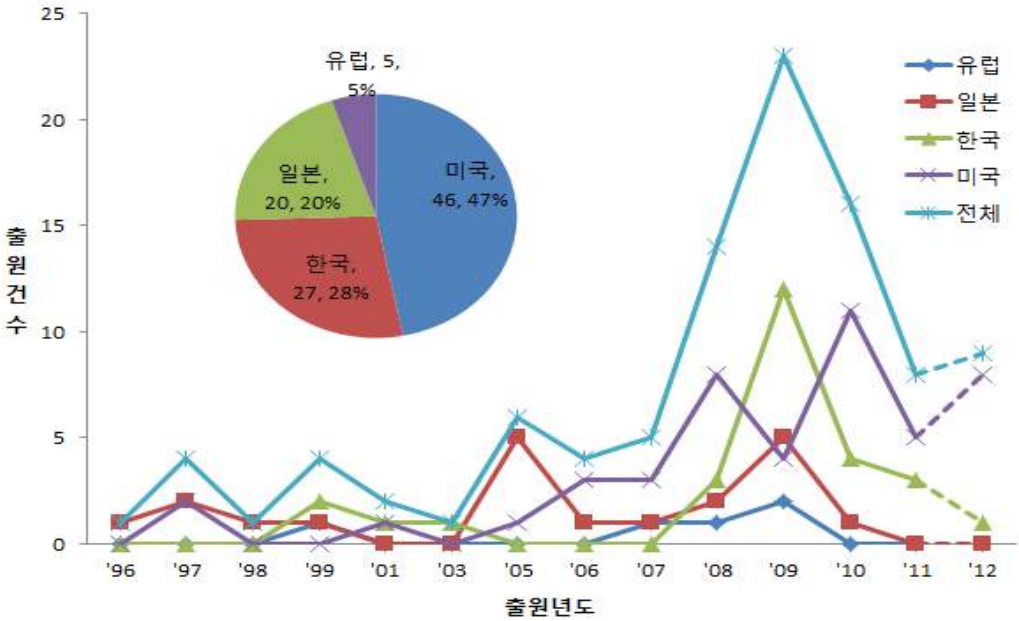
- 가장 많은 특허건수를 나타낸 미국특허의 경우'97년부터'10년까지 꾸준한 증가추세를 보이다가 이후 급격히 감소하는 양상을 보임

- 한국특허의 경우, 미국과 마찬가지로'00년대 후반까지 증가세를 보이다가 최근에 점차 감소하는 추이를 나타냄

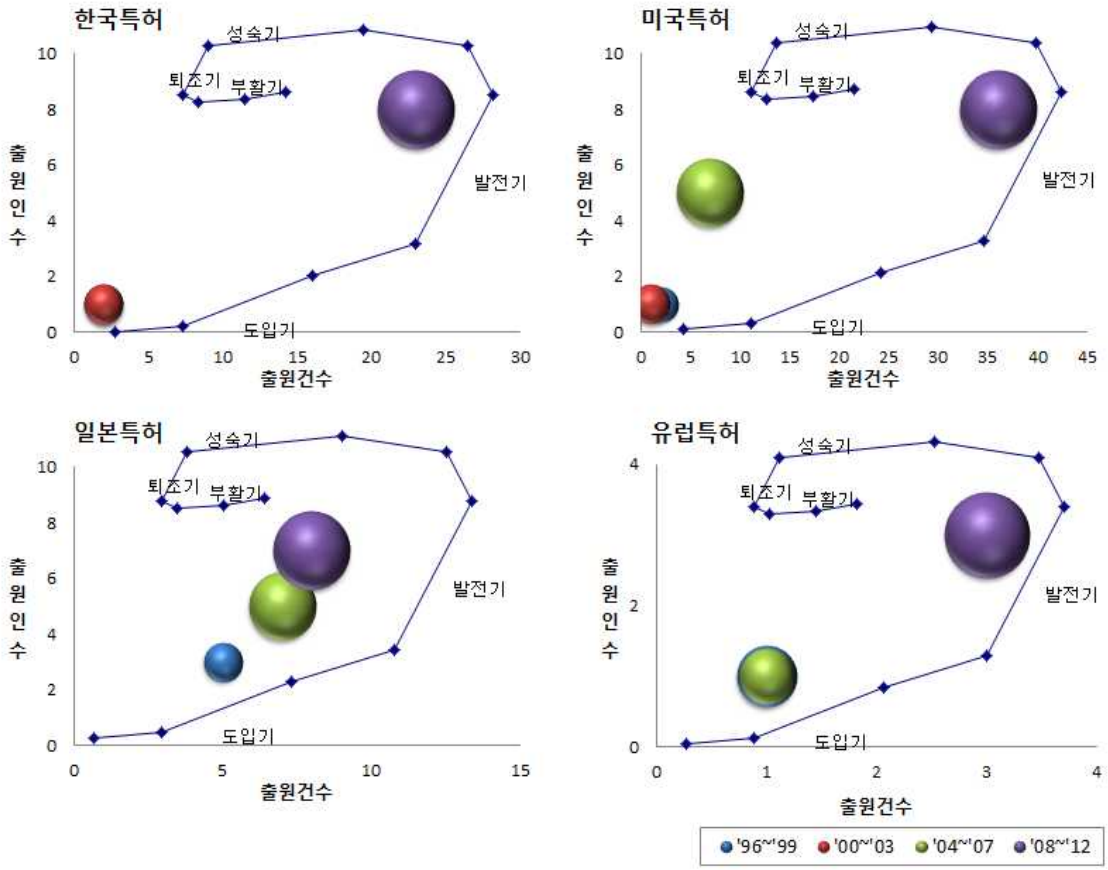
- 한국특허 27건 중 외국기업들의 국내출원 건수가 16건으로 전체 59%를 차지하고 있어, 국내의 기술개발 및 실시의 장벽이 높아졌으며, 분쟁이 발생할 우려가 높아 각별한 주의가 요망될 것으로 사료됨

- 96년부터 본격적인 특허출원이 시작된 일본특허는 큰 폭의 격차 없이 증가, 감소를 반복하다가 최근'11~'12년에는 관련 기술 특허에 대한 연구 활동을 나타내지 않음. 유럽특허의 경우, 다른 국가들에 비해 상대적으로 미미한 특허 건수를 보이고 있음

- 일반적으로 특허출원 후 18개월이 경과된 후에 출원 관련정보가 공개됨으로, 아직 미공개 상태의 데이터가 존재하는 2011~2012년 자료는 유효하지 않을 수 있음



<그림 2-24> 연도별/국가별 특허출원동향



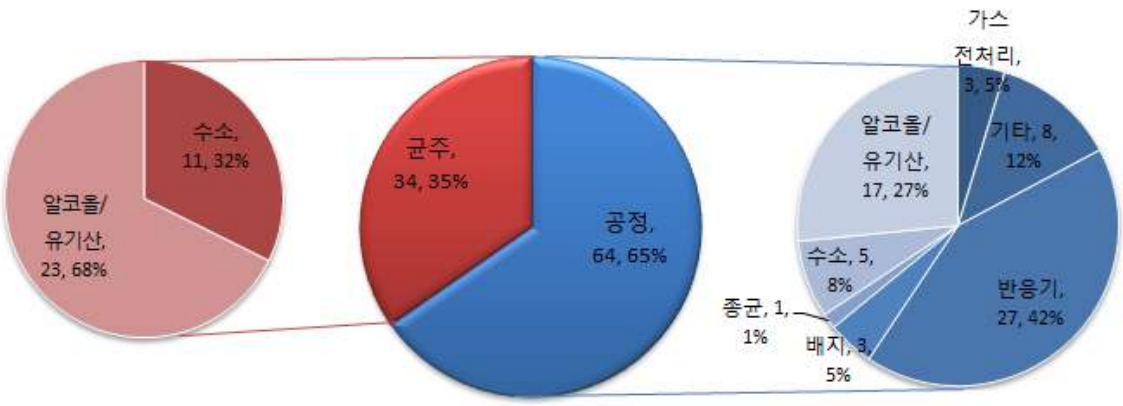
<그림 2-25> 국가별 특허의 출원인수/출원건수에 따른 기술발전위치

○ CO 이용 기술별 점유율 현황

- CO의 생물학적 전환 특허를 공정분류에 따라 살펴보면, 반응기 42%, 알코올/유기산 27%, 기타(배기가스 처리, 활성유지 등) 12%, 수소 8%, 가스전처리 및 배지 5%, 종균 1% 점유율 순으로 나타냄

- 알코올/유기산 세부기술은 청구항에 택일적으로 기재하는 경향이 있기 때문에 둘 중 한가지만 포함되어도 관련 기술분류로 작업함

- 균주분류를 살펴보면, 알코올/유기산이 23건으로 전체 68%의 높은 점유율 나타내고 있으며, 수소는 11건의 32% 비율을 보임



<그림 2-26> 생물학적 CO 전환 기술의 분류별 점유율

2.2.4 정책동향

❑ 주요국 해양과학기술 정책 동향(바이오수소 관련 정책은 볼드로 표시)

○ 미국

- 국제적 역할 증대, 해양 이해의 증진, 연안환경 개선 등을 강조한 새로운 국가해양정책을 수립
  - 연안지역의 경제성장과 보존, 해양 및 연안수질 개선, **해양자원 이용** 및 보호, 해양의 이해 및 국제협력, 해양의 가치와 생명력 증진에 초점
- 오바마 2기 출범에 따라 기후변화, **청정에너지**, 해양환경 분야 역량 집중 강조
- '10년 해역의 보전과 지속가능한 활용에 대한 통합적 국가해양정책 수립
  - 대통령 직속의 국가해양위원회(National Ocean Council, NOC)와 해양공간계획(Marine Spatial Planning, MSP)을 통해 일원화된 국가해양정책을 조화롭게 추진
- '30년 대비 해양연구와 사회적 니즈를 위한 인프라 구축(Critical Infrastructure for Ocean Research and Societal Needs in 2030)' 수립('11)
  - 미국 국가과학기술위원회(NSTC) 설립, '30년까지 해양과학기술 R&D 수요에 대비하기 위한 전략 추진

- 해양방위기술, 심해잠수정 및 첨단 해양연구장비 개발 등 전통적 우위를 보인 연구분야는 국가 전략적 차원에서 지속 추진

○ 유럽연합(EU)

- 학제간 연구 이니셔티브를 통한 연안과 해양의 지속가능한 개발 및 통합관리를 최우선 순위의 해양연구 테마로 설정

  • **신재생에너지** 및 해양광물자원, 해양생물다양성 보전 및 확보, 기후변화(대기순환, 지구온난화), 연안역 및 대륙붕 관리, 심해 등 뉴 프런티어 연구, 연구선, 위성, 해양장비, 네트워크, 자료센터 등 연구 인프라 확충 및 구축

- EU는 5년간('05년~'09년) 해양경제발전과 친환경적 해양잠재력 증대를 구체화하기 위한 전략으로 Green Paper(An European Vision for the Oceans and Seas) 마련

  • 'Blue Book and Action Plan(An Integrated Maritime Policy for the European Union)'을 통해 통합해양정책을 제시('07년), 해양수산산업을 미래 신성장 부문으로 재평가

  • 연안·요트관광, 해상풍력발전, 크루즈관광, 해양생물산업, 해양관측·감시, **해양바이오**, 해양에너지이용, 해양광물자원개발 등을 높은 성장잠재력으로 평가

○ 일본

- 해양안전, 관할권 확보 및 지구적 해양위협 대비분야에 전략적 우선순위 부여

  • '08년 새로운 해양입국 실현을 위해 '07년 7월 발효된 "해양기본법[vi]"의 실행력을 담보할 『일본 해양기본계획』을 수립

  • **해양개발 이용**과 해양환경 보전과의 조화, 해양안전 확보, 해양에 관한 과학적 지식, 해양산업의 건전한 발전, 해양의 종합적 관리, 해양에 관한 국제적 협조

- '제2차 해양기본계획' 발표('13.04)

  • **해양에너지·광물자원 개발**, 해양 재생가능에너지 이용 촉진, 해양수산산업 진흥, 해양안전 확보, EEZ 등 해양영토관리, 해양과학기술개발 및 조사 추진

vi 해양기본법은 총 4개장과 38개 조항 및 부칙 2개조로 구성되었으며, 3대 목표를 ⅰ)경제사회의 건전한 발전, ⅱ)국민생활의 안전 향상, ⅲ)해양과 인류의 공생에 공헌으로 설정하고 있다. 일본은 해양기본법 발효를 기점으로 후유시바 국토교통상이 초대 해양 정책 대신을 겸직하고, 내각관방에 설치된 종합해양정책본부 사무국이 업무를 개시

등 향후 5년간의 해양정책방향 제시

- 국가 에너지기본계획 분야에 **해양에너지**, 해양광물자원개발 강화 등을 포함
  - 화석연료의 자주개발비율을 '30년까지 현재(26%)의 2배 수준 집중 지원

○ 중국

- 시진핑 시대 출범에 따라 심해, 우주 진출을 위한 기술개발 강조 및 국가영토 확보에 역량을 강화하여 중국 과학정책에서 최우선 과제로 추진 중
  - 심해 유인잠수정 'Jiaolong(蛟龍)'호를 개발하여 '12년 6월 7,062m 심해탐사에 성공

- '50년 해양과학기술 개발 3대 목표인 **지속적인 해양자원 이용**, 해양의 건강성과 안전, 해양력 강화를 위해 '해양과학기술 로드맵 2050' 수립('09년)
  - **해양생물자원·해양생명공학**, 해양석유·가스 및 광물자원, 해양수자원 등을 전략적 우선 추진대상으로 설정

- 해양과학기술이 해양경제에 대한 기여도를 50% 이상 향상시키겠다는 '국가해양수산산업발전계획요강' 확정('10)

- '**전략적 해양수산 신산업 육성**을 위한 구상'에 따라 **해양바이오**, 해수이용, 심해장비, 해양플랜트, 해양관측기기, **해양신재생에너지**, 해양서비스 등의 신산업 집중 육성 발표('10)

- 제12차 5개년계획('11~'15)을 통해 해양분야 기초원천핵심개발과 전략적 신흥산업이 집중 육성되도록 비전을 제시하고 해양과학기술개발계획을 발표('11)
  - 칭다오市에 심해연구단지 조성, 저장성에 해양기술 테마섬 개발, 산둥성, 칭다오, 저장, 닝보, 푸젠, 샤먼, 광둥, 선전 8개 지역에 해양경제발전 시범사업 추진
  - 칭다오市는 해양수산산업 클러스터 조성에 16억 달러 규모의 청색경제펀드를 조성하여 **해양바이오**, 해양기기, 해양플랜트 산업 등을 집중 육성 계획

❑ 한국 해양과학기술 정책 동향

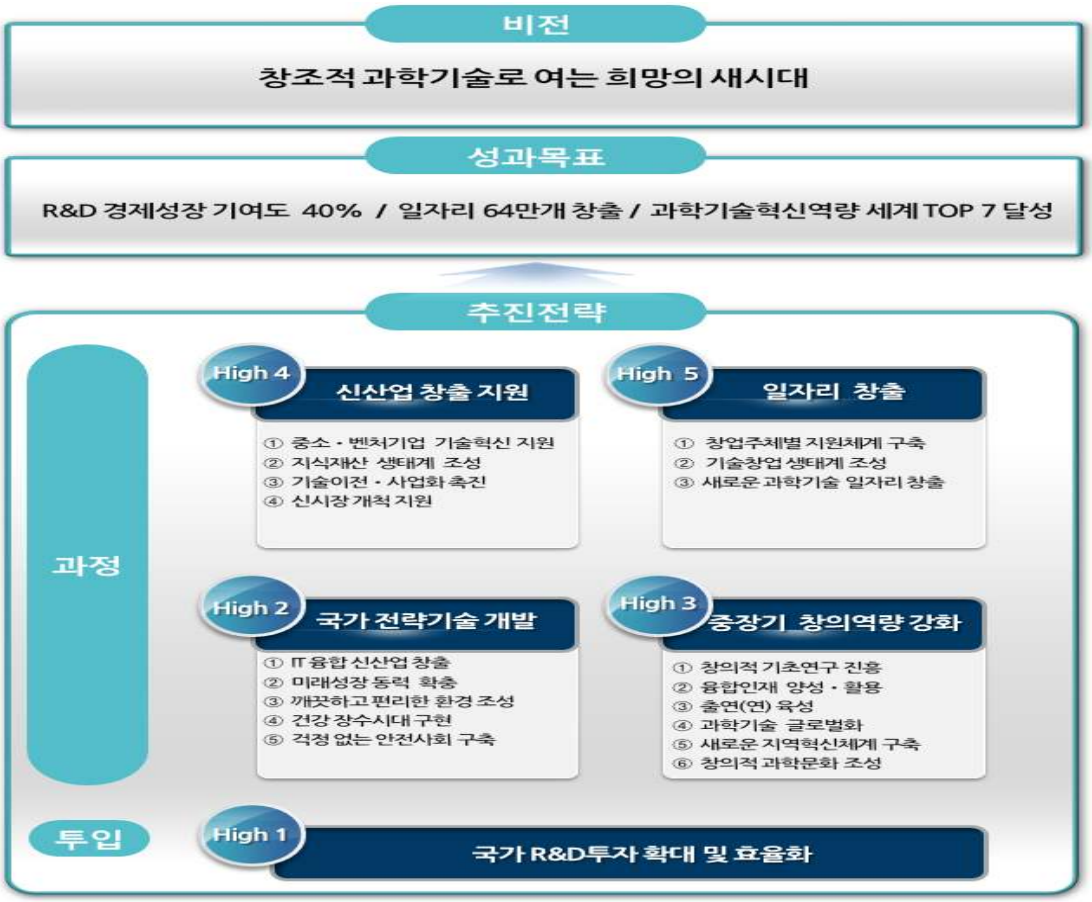
- 박근혜 정부 출범 후 국정운영 비전/기조[vii]에 부합하는 과학기술을 통한 창조

vii 박근혜정부의 국정운영 비전/기조 : 국민행복과 국가발전이 선순환하는 새로운 패러다임의 시대(국정비전) - 국민행복(국정기조) - 국민안전(전략) - 재난재해 예방, 관리(과제) - 93. 항공, 해양 등 교통안전 선진화

산업 육성으로 과학기술정책 패러다임 전환

• 기술·지식 확보가 목표인 현재의 분절형 R&D를 신산업 창출을 위한 일련의 과정을 통섭하는 『생태계 창조형 R&D』로 변경

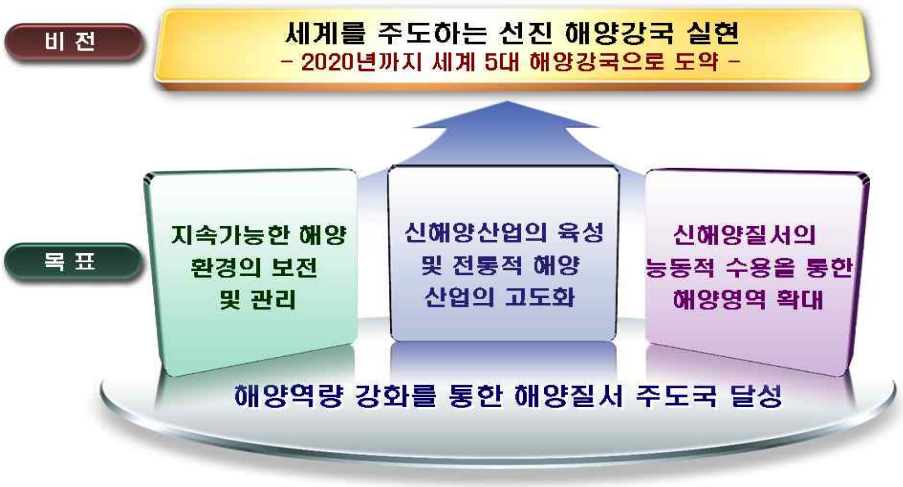
- '13년 7월 박근혜 정부 과학기술정책 청사진 마련을 위한 『제3차 과학기술기본계획』(5대 전략 78개 추진과제) 중 **미래성장동력 확충 분야**에 해당



<그림 2-27> 제3차 과학기술기본계획

- 21세기 환경변화와 새로운 트렌드에 능동적 대응을 위하여 법정계획으로서 국가 해양계획 수립 및 새로운 해양정책 비전 요구에 맞추어 『제2차 해양수산발전기본계획』('10) 수립

• 해양수산발전 5대 추진전략 및 26개 중점과제 중 **신해양산업 육성 기술**로 선정



<그림 2-28> 제2차 해양수산발전기본계획

- 해양수산부 국가 R&D 계획 『2020 해양과학기술(MT) 로드맵』('11) 수립으로 국가 해양과학기술에 대한 R&D 비전과 목표, 투자 전략 등을 제시

  • **첨단 해양산업진흥**을 위한 17개 중점기술 중 **해양바이오수소 생산기술개발**을 선정하여 단기성과 우선지원과제로 추진

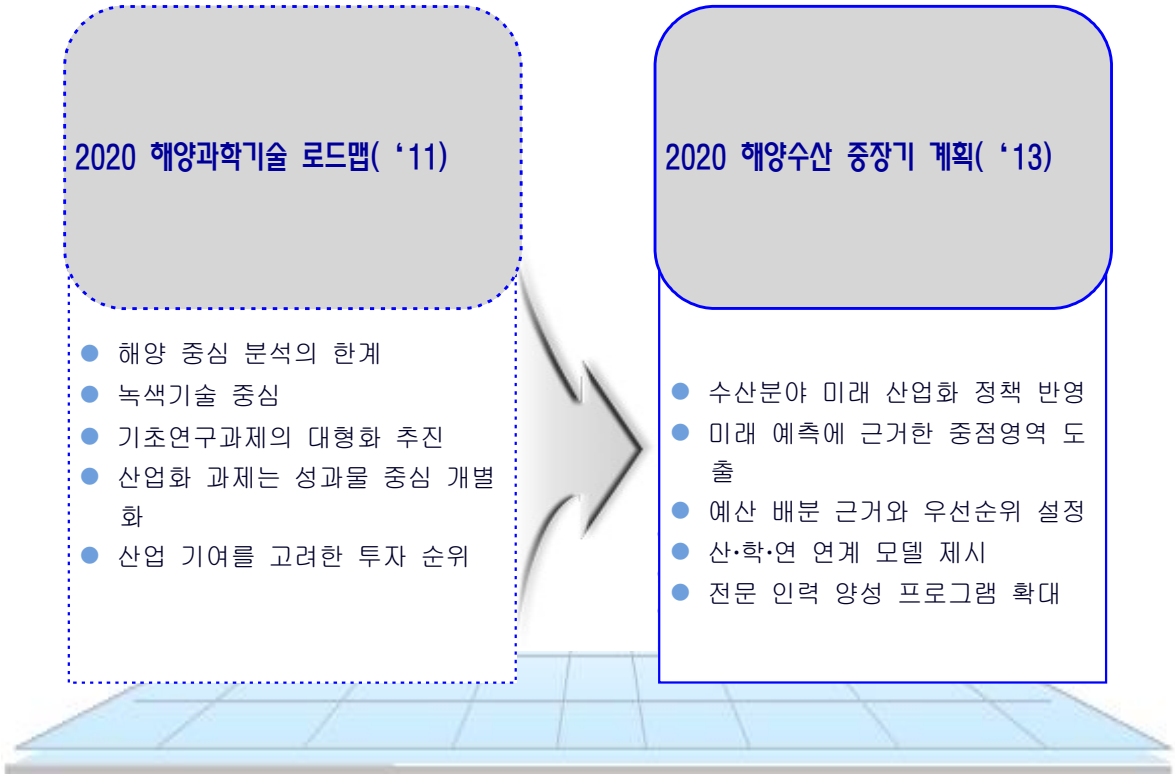
<그림 2-29> 2020 해양과학기술(MT) 로드맵

- 『2020 해양과학기술(MT) 로드맵』을 발전적으로 개선하여, 자원배분의 합리적 근거를 마련하고 효율적 투자 전략을 위한 『2020 해양수산 중장기 계획』('13) 수립

  • 전통적인 해양수산업에서 탈피하여 국가 주도로 타 분야 기술과의 융복합을

통해 **미래 첨단 신산업 창출** 도모

- 선진국들은 미래성장 잠재력이 높은 해양자원, **해양바이오**, 해양플랜트 분야에 대한 국가주도의 기술개발 강화



<그림 2-30> 2020 해양수산 중장기 계획

❑ 정부 지원정책 현황

○ 관련법령

- 국가연구개발사업 등의 성과평가 및 성과관리에 관한 법률(미래창조과학부, 2005. 2)

  - 매년 출연(연)별로 '연구성과 관리 및 활용 기본계획'을 수립하여 실천하도록 관리하는 한편 성과중심으로 출연(연) 평가

- **기술이전 및 사업화촉진**에 관한 법률(산업부, 2006. 7. 개정) 제5조(기술이전. 사업화 촉진계획)

  - 기술이전·사업화의 정책목표와 전략, 촉진계획의 시행을 위한 예산에 관한 사항, 기술이전·사업화를 촉진하기 위한 기술이전·사업화 촉진계획을 수립·

시행토록 함

- 국가연구개발사업 등의 성과평가 및 성과관리에 관한 법률(미래창조과학부, 2005.12.) 제12조(연구성과 관리.활용 기본계획)

  • 5년마다 연구성과 관리·활용의 기본방향, 특허, 논문 등 연구성과 유형별 관리·활용 방법에 관한 사항 등을 포함하는 기본계획을 마련토록 함

- 해양수산발전기본법 제6조(해양수산발전기본계획), 제17조(해양과학조사 및 기술개발 등)

  • **해양자원의 합리적인 개발 및 이용** 등에 관한 사항, **해양산업의 육성**에 관한 사항, 해양수산의 발전기반 및 환경보전의 추진에 관한 사항 등을 담은 해양수산발전 기본계획을 수립 시행토록 함

  • 해양과학기술을 향상과 **실용화·산업화를 촉진**하기 위한 해양과학기술개발계획을 수립하여 시행토록 함

- 과학기술기본법 제7조(과학기술기본계획)

  • **과학기술혁신** 관련 산업정책, 인력정책 및 지역기술혁신정책 추진방향이 포함된 과학기술기본계획을 수립 추진토록 함

- 산업기술혁신촉진법(지식경제부)

  • 국내 신기술(NET)·신제품(NEP) 인증제도로서 국내기업, 연구기관, 대학 등에서 개발한 신기술을 조기에 발굴하여 그 우수성을 인정해 줌으로써 기술개발을 촉진하고 신기술제품의 시장 진출을 지원

○ 정부정책

- 해양수산발전기본계획 (2011~2020) 및 연도별 시행계획

  • 2020년 세계 5대 강국 진입을 위해 **신해양산업의 육성** 및 전통적 해양산업의 고도화 목표 등 제시

- 과학기술기본계획 (2008~2012) 및 연도별 시행계획

  • 과학기술기본법 제7조에 따른 연도별 범부처 시행계획

  • 전략 및 중점 추진과제에 대한 정책 및 사업 중 해양·극지 과학기술 역량강화 계획 포함

- 해양과학기술 중장기계획 (2008.02)
  - 해양수산발절기본법에 근거한 해양과학기술 부문의 주요 R&D 기본 계획
  - 향후 5년간(2009~2013) 집중 투자할 기술 육성전략 방향 제시
- 제 4차 **기술이전·사업화 촉진**계획(2012~2014)
  - 시장과 기술공급의 불일치를 해소하고 "**가치창출형 R&BD**"로의 전환을 위한 기술개발의 사전 기획 확대, 비즈니스모델 공모사업 신설 등
- 2020 MT 로드맵 수립
  - 국가과학기술위원회 본회의 심의·의결된 해양 R&D 분야 국가계획
  - 2차 OK 21추진전략, MTRM(2005) 등 상위 계획과 연계하여 **첨단 해양산업 진흥**, 기후변화·연안재해 대응, 해양경제영토 확보, 국민 삶의 질 향상 등의 4대 이슈에 대응할 13대 전략기술 및 50대 중점과제 도출
- 제 1차 산업융합 발전 기본계획(2013~2017)
  - 「산업융합 촉진법」 제5조에 근거, 매 5년마다 수립되는 정부 차원의 법정 국가계획
  - 산업융합발전 목표 및 정책방향, 산업융합 촉진기반 조성 및 혁신역량 강화, 산업융합 연구개발 및 사업화 촉진, 산업융합 문화 확산 등 포함
  - 기재부, 미래부, 안행부, 문체부, 농식품부, 산업부 등 관계 장관 및 민간위원 등 25명으로 구성된 「산업융합발전위원회」 심의·의결

○ 타 부처 산업정책 전략

- 산업통상자원부는 '산업기술혁신촉진법' 제38조에 의해 산업기술 혁신을 촉진하기 위한 사업을 효율적이고 체계적으로 추진하고 기술혁신 관련 정책의 개발을 지원하기 위해 한국산업기술진흥원을 설립
  - 글로벌 산업기술 생태계의 융합과 발전을 선도하기 위해 산업기술혁신 관련 정책 연구, 중장기 기술기획 및 성과 분석, 산업기술기반 조성, 산업기술 국제협력, 부품소재산업의 육성 및 지원
  - 사업화연계기술개발사업(R&BD) 지원

- Global Commercialization Center(GCC) 및 Europe Enterprise Network(EEN) 컨소시엄 지정·운영을 통해 국내 우수 기술보유자들의 해외 기술시장 진출을 위한 컨설팅 지원
- 지식재산권을 포함한 우수기술자산의 창출 및 활용을 위해 IP인큐베이션 프로그램 및 기술신탁제도 운영
- 정부의 출자금을 Seed Money로 민·관 공동 신성장동력 투자펀드를 조성하여 글로벌 기술기업 지원
- 대학, 연구소 등 공공연구기관내 기술이전 전담조직 지원
- 산학협력단 및 기술지주회사 보유기술을 사업화하기 위해 필요한 사업 지원

<표 2-29> 정부 유관부처별 기술이전 및 실용화 기구

관계부처	위탁기관명	설립연도	근거법
산업통상자원부	한국산업기술진흥원	2009	산업기술혁신촉진법
	한국산업기술평가관리원		
	정보통신산업진흥원	2009	정보통신산업진흥법
	한국전자통신연구원	1976	과학기술분야 정부출연연구기관 등의 설립·운영 및 육성에 관한 법률
	한국화학연구원 신화학실용화센터	2012	
미래창조과학부	한국과학기술기획평가원	1999	과학기술기본법
해양수산부	한국해양과학기술진흥원	2005	법인설립 허가
	한국건설교통기술평가원	2002	법인설립 허가
중소기업청	중소기업기술정보진흥원	2002	중소기업기술혁신촉진법

❑ 정책사업 종류와 현황

○ 미래해양산업기술개발 사업(해양수산부)

- **해양산업 육성 및 발전**에 필요한 관련 기술개발 종사 중소·벤처기업에 대한 연간 연구개발비 지원
- 부가가치 증대 및 수출 산업화가 기대되는 분야에 대한 지원을 통해 **해양 산업 활성화** 도모

○ **기술혁신 중소·벤처기업 육성**을 위한 기술개발 및 사업화 관리(지경부)

- 대·중소기업 상생협력 추진 시행계획 수립('09.6)을 통해 범부처 상생협력 추진
- 대·중소기업 상생협력 촉진에 관한 법률 제5조 및 시행령 제2조에 근거
- 기술혁신형 중소·벤처기업 육성을 위한 기술개발 지원
- 국내외 개발된 **우수·유망기술**에 대한 '사업화 기획→후속개발→시제품제작→투자·융자 연계' 등을 지원하는 **R&BD(Research & Business Development) 프로그램** 추진

2.3 기술수준 및 역량분석

2.3.1 기술수준 분석

❑ 국가전략기술에 대한 수준평가(미래창조과학부, 2012) 분석

○ 해양바이오수소 연관 산업 분야 기술 수준을 검토하기 위하여 미래창조과학부(2012)의 국가전략기술 수준평가 결과 분석

○ 미래창조과학부는 제3차 과학기술기본계획상 120개 국가전략기술에 대한 수준평가(2012)를 실시하였으며, 이중 해양바이오수소 분야와 관련이 있는 전략기술 분야는 해양수산의 미래산업화 부분의 바이오에너지기술, 유용유전자원이용기술로 판단

○ 우리나라의 바이오에너지기술, 유용유전자원이용 등 전략기술 분야의 최고 기술국 대비 기술수준 평균은 80%로 조사되었고, 향후 2020년에는 세계 최고국 대비 95%에 이를 것으로 전망

- 현재, 미국 DOE에서 지원하는 NREL, JGI, Craig Ventor Institute 등이 최고 기술을 보유하고 있으며 일본 및 EU는 88~91%의 기술수준을 가지고 있는 것으로 분석

<표 2-30> 국가전략기술 중 관련 기술 수준 분석

전략 기술명	관련 세부 기술명	한국	중국	일본	미국	EU
유용유전자원이용 (해양바이오 수소생산 균주 개발)	◦ 해양 극한 환경 탐사 및 수소생산 미생물 확보 기술	84.0	70.8	93.0	100	92.4
	◦해양미생물 수소 생산 최적화 기술					
	◦ 오믹스연구 수소생산 대사경로 규명 기술					
	◦대사재설계 수소생산 우수균주 개발 기술					
바이오에너지기술 (바이오수소 대량생산 프로세스 개발)	◦ 해양바이오수소 반응기 설계 및 제조기술	76.7	61.6	88.1	100	84.6
	◦ CO 물질전달효율 극대화 기술					
	◦ 바이오수소 연속생산공정 개발 및 최적화 기술					
	◦ 장기연속 대량생산 기술개발					
2개 전략기술수준 평균		80.3	66.2	90.5	100	88.5

2.3.2 미래시장 대응 역량분석

❑ 기술 완성도(Technology Readiness Level, TRL) 분석

○ TRL의 개념

- 기술이 시스템(System) 또는 하위 시스템(Subsystem)으로 적용되기 전 기술(재료, 부품, 소자 등)의 성숙도를 측정하는 기준
- 미국에서는 DoD(the Department of Defense) 및 NASA에서 사용하고 있음
- TRL은 NASA에서 1989년 Sadin 등이 7개 Level로 시작하여 현재는 9개 Level로 확장

○ TRL의 주요 활용 범위

- 현 수준의 기술적 위치 파악
- 위기 관리
- 기술투자 및 기술추이 관련 결정

○ 국내외 TRL 적용 사례 (NASA의 정의, 1995년)

- Level 1 : 관찰된 혹은 보고된 기초원리
- Level 2 : 형성된 기술개념과 응용
- Level 3 : 분석적인 혹은 실험적인 핵심 기능/속성 입증
- Level 4 : 실험실 환경에서 구성요소나 전체 확인
- Level 5 : 적절한 환경에서 구성요소나 전체 확인
- Level 6 : 적절한 환경에서 시스템/하부시스템 모형이나 프로토타입 데모
- Level 7 : 실제환경에서 시스템 프로토 타입 데모
- Level 8 : 실제시스템 완료 및 테스트와 데모를 통한 가능성 인증
- Level 9 : 성공적인 작동을 통한 양산

○ 국내외 TRL 적용 사례 (방위산업청, 2006)

- 방위력개선사업 관련 규정(2006. 5. 1)

- 선행연구, 탐색개발, 체계개발 등 단계에 따라 기술성숙도 고려

- 제안서 접수 및 기술개발 과정에 기술성숙도를 표시

Level	TRL 1	TRL 2	TRL 3	TRL 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9
정 의	태동기 기초원리	실용 목적의 아이디어, 특허 등 개념적 설계	실험실 규모의 기본성능 검증	실험실 규모의 장치/ 시스템 성능평가	확정된 장치/ 시스템의 시작품 제작	시작품 에 대한 성능평가	시작품의 신뢰성 평가	시작품의 인증 및 표준화	사업화
연구개발 단계	기초연구 단계		실험 단계		시작품 단계		제품화 단계		사업화
기술수명 주기	태동기			성장기				성숙/포화기	
기술개발 주체	학계 및 기초 지향적 출연(연)			출연(연) 및 기술 선도적 산업계(연)			산업계		

<그림 2-31> TRL 수준과 기술 개발 단계 상관관계

❑ 핵심기술군에 대한 기술수준 및 TRL 분석표

○ 각 핵심기술군에 대하여 2차 기능 수준하의 세부기술 단위로 기술 완성도 및 최고 수준 보유국 대비 기술수준(%)을 조사함

- 최고 수준 대비 기술수준의 경우, 해양바이오에너지 개발에서는 평균적으로 79% 정도로 선진 기술 수준과 격차 해소가 이뤄지는 것으로 나타남

- 기술 완성도(TRL)의 평균값은 4.83 정도로 실험실 규모의 장치나 시스템에 대한 성능평가 또는 시작품 제작 단계 수준인 것으로 나타남

- 따라서 각 기술에 대한 개발 필요성이나 파급효과 분석 이외에 역량분석을 통해 현재 수준을 고려한 계속적인 연구개발이 이루어져야 할 것으로 판단됨

<표 2-31> 핵심기술군에 대한 기술수준 및 TRL 분석표

기능	세부기술	최고수준 보유국 대비 기술수준 (%)	기술완성도 (Tech. Readiness Level)
바이오 수소생산 산업균주 개발	○ 오믹스연구 수소생산 대사경로 규명 기술	90	6
	○대사재설계 수소생산 우수균주 개발 기술	85	5
	○ 개발 균주 장시간 안정성 평가기술	90	6
대량생산 프로세스 개발	○ 바이오수소 연속생산공정 개발 및 최적화 기술	90	5
	○ CO 물질전달효율 극대화 기술	85	6
	○ 장기연속 대량생산 기술개발	85	6
원료물질 확보	○ 제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산 공정 개발	75	4
	○ 석탄가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술	75	4
	○ (해양)바이오매스 가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술	80	4
대량생산 데모플랜트 구축 및 실증생산	○ 10톤 규모 대량생산 데모 플랜트 설계·시공기술	65	4
	○ 대량생산 공정 스케일 업 기술	65	4
	○ 바이오수소 기술패키지화 및 경제성, 사업성 분석 기술	70	4
평균		79	4.83

❑ 미래시장 대응전략(SWOT 분석)

○ SWOT 분석은 해양바이오수소개발 분야에 대하여 국내에서 보유한 내부 자원 및 능력의 강점과 약점을 가감 없이 분석하고 주변 여건의 위협과 그로부터 오는 도약과 발전의 기회를 정량적으로 파악하기 위하여 실시함

○ 이를 바탕으로 약점을 보완하고 위협에 대처하기 위한 전략 및 강점을 활용하여 기회를 활용하기 위한 전략을 제시함

○ SWOT 요소 도출표

<table>
<tr><th colspan="2">외부환경 요소</th></tr>
<tr><td colspan="2">○ (E1) 에너지·자원의 고갈 - 에너지비용의 증가와 자원고갈 심화로 에너지수요 증가
○ (E2) 글로벌 시장선점 경쟁 격화 - 세계시장의 통합으로 글로벌 경쟁심화 불가피
○ (E3) 인구구조의 변화 - 저출산, 노령화로 인한 새로운 도시 구조 및 거주양식의 변화 증가
○ (E4) 에너지환경 개선 기술 - Green Race 대응을 위한 환경관리·개선기술의 필요성 대두
○ (E5) 과학기술의 융복합화 - IT, BT, NT 융합의 해양 하이브리드 기술개발 가능성 증가
○ (E6) 에너지 확보를 위한 미래 신기술 개발 - 신재생에너지원 발굴과 에너지 이용 효율성 제고를 위한 핵심 원천기술 확보 및 국산화
○ (E7) 신 부가가치 창출 - 신 부가가치 산업 창출을 위한 사업영역 확대 및 시장 개척
○ (E8) 환경오염의 증가 - 산업화와 도시화에 따른 환경오염의 증가
○ (E9) 기업을 통한 상용화 - 민간기업의 해양분야 투자 및 사업화를 통한 정부·기업 협력 R&D모델 창출</td></tr>
<tr><th>내부환경요소 (강점)</th><th>내부환경요소 (약점)</th></tr>
<tr><td>○ (S1) 해양에너지·자원 관련 우수한 인력 및 경험 풍부
○ (S2) 융복합 기술 지원 정책 확대
○ (S3) 생물/환경/에너지 등 다학제적 연구 가능
○ (S4) 대형 사업을 통한 구축된 관.산.학.연 기술 네트워크</td><td>○ (W1) 정부 부처 간 연계성 부족 및 일관성 있는 지원 미흡
○ (W2) 해양바이오에너지 환경 조건에 대한 R&D 실적 미흡
○ (W3) 산업화 연계기능 및 제도적 기반 미약
○ (W4) 해양에너지에 대한 상용화 개발 실적 미흡</td></tr>
</table>

❑ SWOT 분석표 작성

○ 외부환경이 내부의 강점을 크게 강화시킬 경우 2점, 크게 약화시킬 경우, -2점을 부여하고, 1, -1점도 부여가능, 영향이 없을 때 0점 부여함

○ 외부환경이 내부의 약점을 크게 보완시킬 경우 2점, 크게 부각시킬 경우 -2점, 1, -1점도 부여가능, 영향이 없을 때 0점 부여함

<표 2-32> 단기 이슈에 대한 SWOT 분석표

외부환경		단기이슈								합	
내부환경		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8		
강점	S1	0	1	1	1	1	1	1	2	8	
	S2	1	1	0	1	2	1	0	0	6	
	S3	0	0	1	0	1	1	1	0	4	ST
	S4	0	2	1	1	1	2	1	1	9	SO
약점	W1	0	1	1	0	0	0	0	0	2	WT
	W2	1	1	2	1	1	1	0	0	7	
	W3	2	1	1	0	2	2	0	1	9	WO
	W4	0	1	0	0	1	0	1	1	4	
합		4	8	7	4	9	8	4	5		
					T	O	O	T			

<표 2-33> 장기 이슈에 대한 SWOT 분석표

외부환경		장기이슈								합	
내부환경		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8		
강점	S1	0	2	2	1	1	2	2	2	12	SO
	S2	0	1	1	2	2	2	1	1	10	
	S3	0	2	1	1	1	1	1	2	9	ST
	S4	0	2	2	1	1	1	2	2	11	
약점	W1	0	1	1	0	1	1	1	1	6	
	W2	0	1	2	2	1	2	2	2	12	WO
	W3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	WT
	W4	0	1	1	1	1	1	1	2	8	
합		1	10	10	8	8	10	10	12		
		T		O	T				O		

❑ 대응전략 수립

○ 대응전략에서는 SWOT 분석 결과에서 도출된 강점분야 및 약점분야의 이슈에 대응하는 장.단기 전략을 도출함

<표 2-34> 단기 이슈에 대한 대응전략

분야	내용	단기 대응전략
SO	○ 대형 사업을 통한 구축된 관.산.학.연 기술 네트워크	○ 기존에 구축된 관.산.학.연 기술 네트워크를 최대한 활용 ○ 각자의 명확한 역할 분담을 통해 유기적 업무 체계 유지
ST	○ 생물/환경/에너지 등 다학제적 연구 가능	○ 생물, 환경, 에너지 등 다양한 전문가들을 적극적으로 활용하여 해양바이오수소개발 추진
WO	○ 산업화 연계기능 및 제도적 기반 미약	○ 단기 집중 투자의 당위성이 높으면서 연구개발 투자에 대한 파급효과가 높은 기술군 중심의 실용화기술 개발
WT	○ 정부 부처간 연계성 부족 및 일관성 있는 지원 미흡	○ 해양수산부를 비롯하여 미래창조과학부, 산업통상자원부 등 바이오에너지와 관련한 정부부처간 업무 효율화 및 연계 방안 제시

<표 2-35> 장기 이슈에 대한 대응전략

분야	내용	장기 대응전략
SO	○ 해양에너지·자원 및 환경 관련 우수한 인력 및 경험 풍부	○ 국내외 해양에너지·자원 및 환경관리에 대한 연구실적을 바탕으로 새로운 해양과학기술에 대한 적용 확대
ST	○ 융복합기술 지원 정책 확대	○ BT, ET 등 첨단기술 융합연구 능력을 배양할 수 있는 전문가 양성 및 활용 추진
WO	○ 해양바이오에너지 환경 조건에 대한 R&D 실적 미흡	○ 점차적으로 증대할 것으로 예상되는 해양바이오수소에너지 환경 조건에 대해 적용할 수 있는 다양한 R&D 실적 확보 추진
WT	○ 해양에너지에 대한 상용화 개발 실적 미흡	○ 수요자 맞춤형 산업화 프로젝트를 통한 민간 산업체 참여 유도 및 대규모 성과창출을 위한 R&D 체제 운영

2.3.3 보유역량 및 전망

○ 바이오수소 분야의 핵심성공요인(Key Success Factor, KSF)을 통한 수준은 세계 최고 수준 대비 72%의 역량 보유로 평가

- 기술수준, R&D예산, 기술인프라, 인적역량, 법제도체계 등 5개 요인으로 평가

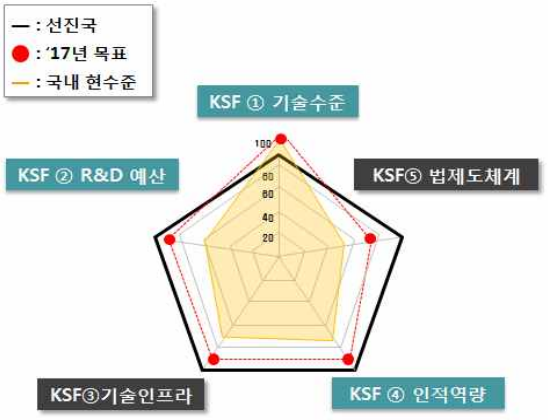
○ 수소연료전지 등 수소활용 분야의 시장 확대가 이어진다면 해양바이오수소 시장 잠재력은 약 1,300억원 수준으로 전망

○ '30년 수소시장 점유율 10% 목표

- 수소시장 점유율: ('20) 25,000톤(수요 1%) → ('25) 75,000톤 (수요 3%) → ('30) 250,000톤 (수요 10%)

<표 2-36> 바이오수소생산기술 핵심성공요인 및 역량 평가

핵심성공요인	선진국과의 역량비교	역량평가
기술수준	◎ 수소 생산성은 세계 1위 독보적인 경쟁력 보유 ◎ 기존 화석연료 대비 가격 경쟁력은 열세 ◎ 향후 생산성 제고를 통한 가격 경쟁력은 밝은 전망	
R&D 예산	◎ 정부차원의 적극적인 투자 확대 계획 ◎ 민간기업의 적극적인 투자 및 참여 미흡	
기술 인프라	◎ 실증데모플랜트 구축을 위한 인프라 부족 ◎ 상업화 개발을 위한 기술·시스템 현장검증 어려움	
인적역량	◎ 우수연구 인력의 전문성은 세계적 수준 ◎ 교육 및 전문인력양성 시스템은 미비	
법제도 체계	◎ RPS, RFS 제도 적용기술로 법개정이 요망 ◎ 사업화 금융지원시스템, 기술정보지원 네트워크 구축 필요	



<그림 2-32> 선진국 대비 기술 포트폴리오

개발속성	개선 여지	매력도/ 중요성 Vector	개선 용이성	적정 목표 수준	'17년 목표
수소 생산성	Hi	Hi	Hi	↑↑↑	1위
경제성	Mid	Hi	Hi	↑↑↑	경쟁력 제고
친환경성	Lo	Lo	Lo	↔	RPS 제도 인증
시장성	Lo	Mid	Lo	↑↑↑	국내 수요 대응
안전성	Hi	Hi	Hi	↑↑↑	1위
기술 수출성	Mid	Hi	Mid	↔	기술 지원

↑↑↑ 대폭강화 ↔ 현순위유지 ↓↓↓ 대폭축소

<그림 2-33> 개발 속성별 목표수준

3. 발전계획

3.1 비전 및 목표

비 전

탈석유 시대에 친환경 수소에너지 변화로
(연간 25,000톤 생산으로 총 매출 2.4조원 수입대체효과)

목 표

1. 세계 최고 생산성기술 확보
◈최고 특허로 기술 우월성 확보('18)

2. R&BD모델 창조경제 실현
◈수소생산 가격경쟁력 달성 3$/kg('14)→2$/kg('18)

3. 블루오션시장 및 일자리 창출
◈新Biz시장 2,400억원, 일자리 770명 창출

추진전략 및 중점추진과제

[1] 바이오수소생산 산업균주 개발

◈ 대사재설계 수소생산 우수균주 개발
◈ 개발 균주 장시간 안정성 평가

[2] 바이오수소 대량생산 프로세스 개발

◈ 바이오수 연속생산 공정 개발 및 최적화
◈ CO 물질전달효율 극대화
◈ 장기연속 대량생산 기술개발

[3] 원료물질 확보

◈ 제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발
◈ 석탄가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술 개발
◈ 해양바이오매스 가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산원천기술 개발

[4] 바이오수소 대량생산 데모플랜트 구축 및 실증생산

◈ 10톤 규모 대량생산 데모플랜트 설계·시공기술
◈ 대량생산 공정 스케일 업 연구
◈ 플랜트 기술패키지화 및 경제성, 사업성 분석

3.2 연구성과 분석

❑ 주요성과

○ (바이오수소 실증생산) 해양 고(古)세균을 촉매로 하여 세계최초로 부생가스유래 일산화탄소(CO)의 전처리 없이 바이오수소 생산기술 개발 ('13년 미국 응용환경미생물학회지 게재 및 특허출원)

* 현재 300L급 바이오수소 생산 성공 및 톤규모 연구계획

○ (상식을 깨는 수소생산 메커니즘 규명) 초고온성 고(古)세균의 바이오수소 생산 기작 세계 최초 규명 ('10년 Nature誌 게재, '주목할 만한 연구 성과'로 선정)

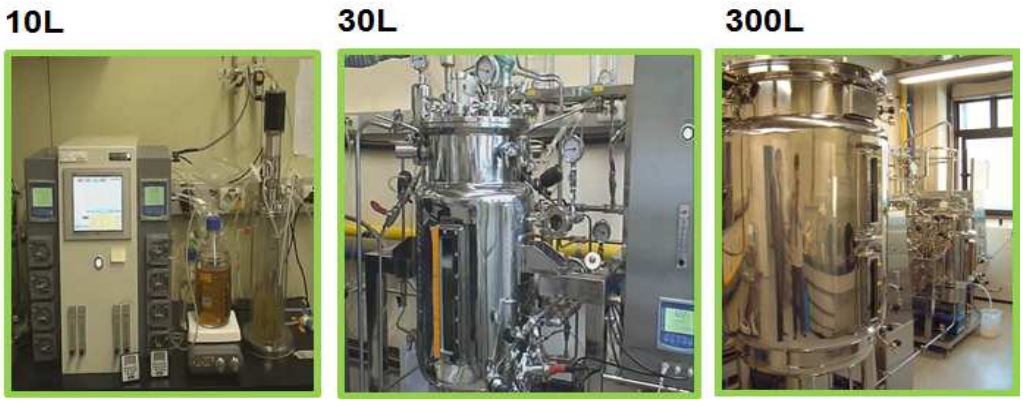
* 특허 획득으로 향후 국제 경쟁력 확보에 절대적 유리할 전망

- 2011 국가연구개발(R&D) 우수성과 100선 중 Top 5선정

○ 바이오수소 실증생산 플랜트 구축 준공식 및 시연회 개최('12)

<바이오수소생산 시연 및 플랜트 준공식>

<바이오수소 대량생산 시설>



<그림 3-1> 바이오수소 실증생산 플랜트 구축 준공식 및 시설

- 일산화탄소 이용 바이오수소 생산 원천기술 개발 ('12년)
  - 해양초고온고세균 NA1을 이용하여, 개미산, 일산화탄소를 이용하여 수소생산하는 방법과 수소화효소 유전자의 원천특허 출원(미국, 러시아 등록)
  - 초고온 고세균 NA1을 이용한 방법과 수소화효소 유전자의 특허확보로 미국,일본, EU, 러시아, 국내 등 세계적인 원천특허를 확보하여 세계시장에 지적재산권 행사가 가능한 바이오수소 개발가능
- 해양 고(古)세균을 촉매로 하여 세계최초로 부생가스 내 일산화탄소(CO)의 바이오수소 전환기술 개발 ('13년 미국 응용환경미생물학회지 게재 및 특허출원)
  * 제철소 부생가스의 새로운 용도 및 부가가치 창출 가능성 제시
  * 일산화탄소를 함유하는 다양한 산업부생가스/폐가스/합성가스 등의 바이오수소 생산에 활용 가능성 제시
- 세계 최고 수준의 바이오수소 생산성 제시 ('13년 미국 응용환경미생물학회지 게재)
  - 화학합성공정에서 부생되는 개미산나트륨을 NA1에 전처리 없이 직접 공급하여 바이오수소 생산 세계최초 성공함
  - 2.8 mol/liter/hour의 세계최고 수준의 바이오수소 생산성을 달성하여 바이오수소 대량생산 가능성 제시함
- 오믹스 기술 적용 바이오수소 생산기작 분석 및 대사 설계도 제시 ('13년)
  - NA1의 독특한 바이오수소 생산현상을 이해하기 위해 단백질체, 전사체, 대사체 등 오믹스 기술을 적용하여 기작을 분석하였음.

• 바이오수소 생산에 적합한 대사경로 확인하여 단백질체 분야 저명논문인 MCP에 게재함

• 고효율 바이오수소생산을 위한 우수균주 제작에 필요한 대사설계도 제시

* 고효율 바이오수소 생산을 위한 우수균주 제작에 활용

- 일산화탄소 이용 바이오수소 생산 우수균주 개발 기술 ('12-'14년)

• 일산화탄소를 기질로 사용하여 수소생산성이 획기적으로 개선된 (야생형 대비 최대 5배 이상) 우수균주 3종 개발

• 세계 최고수준의 수소생산성 (250 mmol/liter/hour 이상) 달성

• 국내 및 국제특허 출원

√ 고세균의 돌연변이제작 기술 국내 최초 확립

√ 수소생산 우수균주의 지속적 개발 가능성 제시

√ 수소생산성 향상에 따른 경제적인 수소대량생산 가능성 제시

- 일산화탄소 이용 바이오수소 생산공정 기술 개발 ('12-'13년)

• 세포농축을 통한 바이오수소 생산 향상을 위한 중공사막 반응기 기술개발

• 효율적 일산화탄소 이용을 위한 마이크로버블-반응기 일체형 시스템 개발

• 공기부상형 고온혐기 가스배양 시스템 구축

√ 고세균의 농축 및 물질전달 개선을 통해 바이오수소 생산성 향상

√ 수소생산성 향상에 따른 경제적인 수소대량생산 가능성 제시

3.3 추진전략과 과제

3.3.1 바이오수소 생산 산업균주 개발

❑ 기술 개요

○ 초고온고세균의 수소생산 대사경로 분석을 바탕으로 바이오수소 생산이 개선되고, 장기연속운전에 적합한 산업균주 개발

❑ 개발 필요성 및 해결과제

○ 본 과제에서 이용하고자 하는 원료물질인 일산화탄소 및 개미산을 이용하여 미생물의 수소 생산성 비교해 보면 2014년까지 진행된 결과 축적된 NA1 균주의 수소생산성은 이미 세계최고 수준임을 확인

<표 3-1> 개미산을 이용한 수소생산성 비교

Strain	Strategy	HER (mmol $L^{-1}h^{-1}$)	Reference
Cupriavidus necator ATCC 17699	Immobilization of cells	5.8	(Klibanov et al., 1982)
Salmonella enterica	Closed batch mode	0.285	(Pakes and Jollyman, 1901)
Escherichia coli SH5	Fed-batch mode with immobilized	73.3	(Seol et al., 2011)
Escherichia coli SR13	cells	11625	(Yoshida et al., 2005)
Clostridium butyricum IFO 3847t1	*hycA* disruption and *fhlA*	0.21	(Heyndrickx et al., 1989)
Desulfovibrio vulgaris	overexpression	0.67	(Martins and Pereira, 2013)
Hildenborough	Addition of co-substrate mannitol	2820	(Lim et al., 2012)
Thermococcus onnurineus NA1	Optimization of reaction conditions		
	Use of high cell density		

<표 3-2> 일산화탄소 이용 수소생산성 비교

Strain	Strategy	HER (mmol $L^{-1}h^{-1}$)	Reference
Rhodospirillum rubrum	Light supply	4.7[a]	(Klasson et al., 1993)
Rhodopseudomonas palustris P4	Use of high cell density	41	(Oh et al., 2005)
Citrobacter sp. Y19	Use of chemoheterotrophically grown cells	5.7[a]	(Jung et al., 2002)
Thermosinus carboxydivorans DSM 14886	Supplementation of yeast extract	15.3	(Sokolova et al., 2004)
Carboxydothermus hydrogenoformans DSM 6008	Biofilm on a hollow fiber membrane	117.7	(Zhao et al., 2013)
Thermococcus onnurineus NA1	Overexpression of the CODH gene cluster	123.5	(Kim et al., 2013)
Thermococcus onnurineus NA1	Overexpression of TON_1016	170	(Lee et al., 2014)
Thermococcus onnurineus NA1	Use of steel-mill waste gas	70	(Kim et al., 2013)

[a] These values were adapted from Oh et al. (2005)

○ 세계최고수준의 생산성이지만 바이오수소의 특성상 경제성을 확보하고 산업부생가스 활용에 적합한 균주개발을 위해 수소화효소 과발현 방법과 CO 조절자 과발현, adaptive evolution으로 CO에 적합한 형질개선 방식 등으로 우수균주 개발을 통해 야생형 NA1 균주보다 생산성이 2배 이상 개선된 250mmol/l/h, 350mmol/g/h의 우수균주를 개발하였지만, 다음 목표인 400mmol/l/h의 생산성 향상을 위해서는 추가로 생산성이 개선된 우수균주 개발이 필요

○ 또한, 장기연속운전을 위해서는 개발된 우수균주의 반응기 조건에서의 장기 안정성 평가를 통해 대량생산 프로세스에 적합한 균주에 대한 정밀한 평가와 문제점 해결이 요구됨

❑ 개발 목표

○ 상용 규모 배양기에서의 최적 일산화탄소 전달을 위한 기체 공급 장치 및 CO 전환 시스템 개발

❑ 주요 내용

○ 오믹스 연구 통한 수소생산 대사 규명

- 1기 사업에서 진행된 비교유전체, 전사체, 단백질체, 대사체를 바탕으로 제작된 대사경로의 결실 돌연변이 제작과 단백질 특성분석을 통한 확인연구

- 단백질 interactome분석, Small RNA분석, 다양한 전처리 방식을 통한 대사체분석을 적용해 수소생산 대사 규명 및 대사경로 update

○ 대사공학적으로 재설계된 수소생산 우수균주 개발

- Systems biology, synthetic biology, evolutionary engineering 등 최신 대사공학기법 이용한 수소생산 대사경로 재설계

- 대사공학방법 적용하여 수소생산 대사경로가 재설계된 다양한 돌연변이체 구축

- 돌연변이체의 수소생산능 확인 및 우수균주 선별 :

  • 일산화탄소이용 수소생산 유전자의 과발현 방법을 통한 우수균주제작

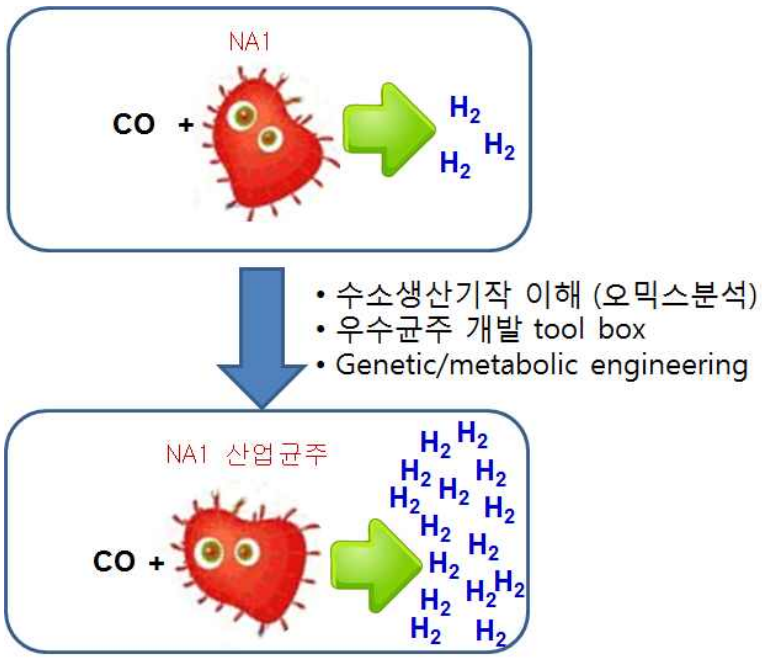
  • 삭제가능한 대사경로 결손 돌연변이, 생산성 향상을 위한 신규 대사경로 삽입 등 대사경로 재설계를 통한 우수균주 제작.

  • CO에 조절 regulator의 과량 발현을 통한 CODH와 수소화 효소의 발현량 및 CO 내성증가를 통한 우수균주 제작

  • 일산화탄소이용 수소생산 필수 유전자들의 성능을 개선하기 위한 돌연변이 연구

- 우수균주의 배양특성 및 수소생산성 분석

- 해당 전략으로 500 mmol/g/h 이상의 수소 생산성을 가지는 우수균주 개발 목표



<그림 3-2> 산업균주개발 모식도

○ 프로세스 안정성이 확보된 우수 산업균주 개발

- 연속적으로 높은 수소생산성을 달성하기 위해서는 균주안정성이 주요한 인자로 판단됨.

- 수소생산 우수균주의 연속배양 통한 세포생장 및 수소생산 특성 분석

- 우수균주의 연속배양 최적조건 도출

  • 영양분 공급 최소화

  • CO 전환율 최대화

  • 수소생산성 최대화

- 우수균주의 프로세스 안정성 확인: 수소생산 최적조건에서 장기연속배양을 수행(Lab 규모)하고, 최소 500시간 이상 프로세스 안정성평가

추 진 분 야	세 부 내 용
○ 대사재설계 수소생산 우수 균주 개발	- 대사경로재설계 돌연변이체 확보 - 돌연변이체 수소생산성 평가 - 우수균주의 배양특성 및 수소생산성 분석 - 500mmol/g/.h
○ 개발 균주 장시간 안정성 평가	- 우수균주의 연속배양 통한 세포생장 및 수소생산 특성 분석 - 우수균주의 수소생산 최적조건 도출 - 연속 수소생산 프로세스 안정한 우수산업균주 확보

기술개발 목표	• 대량생산 맞춤형 우수산업균주 개발 • 개발균주 안정성 평가 및 최적화 조건		
목표성과물	**성과지표**	**가중치**	**성과 목표치**
● 500mmol/g/h 생산성 ● 500시간이상 수소생산 안정성	특허 출원/등록건수	15%	10건
	기술공개 및 기술이전 건수	25%	1건
	우수균주의 수소 생산성 (500mmol/g/h 이상)	35%	달성
	우수균주의 연속수소생산시간 (500시간 이상)	25%	달성
합 계		100%	

3.3.2 바이오수소 대량생산 프로세스 개발

❑ 기술 개요

○ 일산화탄소의 낮은 가스 전달속도 문제 해결을 위한 미세기포 발생 시스템 개발 및 경제적인 바이오수소 생산이 가능한 대형 생물반응기 설계/제작/운전

❑ 개발 필요성 및 해결과제

○ 생물학적 CO 전환 공정은 우수한 생촉매 확보와 함께 기-액 물질 전달이 우선되어야 함. 아래 식에서 알 수 있듯이 CO 소모는 물질전달과 세포이용으로 표현되는 바, 세포 이용 속도가 충분하더라도 물질전달이 원활하지 않을 경우 생산성 향상에는 한계가 존재함.

$$\frac{dCO}{dt} = k_L a(CO^* - CO) - q_{H_2} x$$

○ 1기 사업에서 마이크로버블러, airlift, FBR, TBR의 다양한 KLa증가를 위한 연구와 최적화 연구를 통해 연속생산공정에서 315 mmol/L/h의 세계최고 수준의 생산성을 달성

<표 3-3> 일산화탄소 이용 다양한 수소생산기술

Microorganism	Cell density (g/L)	HPR_{max} (mmol/L/h)	$SHPR_{max}$ (mmol/g cell/h)	Xco(%)	Published
Rhodospirillum rubrum ATCC 25903	< 0.9	4.7	10	38-58	1993
Citrobacter sp. Y19	1.5	5.7	20	< 30	2002
R. Rubrum ATCC 25903	1.3-1.4	-	16	80	2003
R. Rubrum ATCC 10801	0.1-0.4	3.6	-	65	2004
Rhodopseudomonas palustris P4	10	-	41	61-100	2005
R. Rubrum ATCC 25903	0.4-0.55	7.6	-	43-81	2008
R. Rubrum ATCC 10801	1.5-2	3.8	16	87	2008
Carboxydothermus hydrogenoformans	-	2.1	2.7 mmol/g cell/day	90.4	2014
T. onnurineus NA1	1.31	316.5(avg.)	241.8	59.1	This study

○ 하지만 1기 사업 수행을 통하여 다양한 방식의 미세기포 발생 시스템이 적용되어 성능을 나타내었으나 경제적인 생산을 위해서는 동력비를 최소화할 필요가 있음. 톤당 수소 생산 속도가 130 m^3-H2/m^3/d일 때, 생산할 수 있는 전력

은 208 kWh/m^3/d 정도이므로(전력 변환 효율 45%), 가스 전달을 위한 동력은 이의 40%인 70 kWh/m^3/d 이하로 유지해야 함

○ 또한, 대형 반응기에서는 반응기 하부에서 생성된 미세기포가 부상하는 과정에서 뭉침 현상 등이 발생하고, 반응기 길이에 따라 상-하부간의 hydraulic pressure 차이가 커지므로 소형 배양기와는 다른 수력학적 거동을 나타내기 때문에 이에 대한 정밀한 해석과 문제점 해결이 요구됨

❑ 개발 목표

○ 상용 규모 배양기에서의 최적 일산화탄소 전달을 위한 기체 공급 장치 및 CO 전환 시스템 개발

❑ 주요 내용

○ 바이오수소 연속생산 공정 실증 및 최적화

- 저가 배지 개발 및 최적화
  - yeast extract 공급량 최소화를 위한 배지 설계
  - 통계적 실험계획법을 활용한 저가 배지 최적화
  - 미량 원소 조절 및 배지 재활용 방안 개발
- 대규모 반응기에서의 수소생산 kinetic parameter분석을 통한 model 개발 및 생산성 예측
  - 물질전달 항을 포함한 수소생산 모델링
  - 모델 민감도 분석 및 최적 조업 조건 도출
- 고농도 배양기술 개발 및 미생물흡착 소재 개발
  - 세포 부하량 극대화를 위한 친화성 입자 개발
  - membrane 반응기 이용 수소생산 최적화
  - 대규모 반응기에서의 고정화 소재 안정성 및 성능 평가
- 고정화세포 이용 배양공정 개발
  - 고정화세포 이용시 CO 물질전달 변화 해석
  - 고정화세포에 적합한 반응기 형태 선정

• 고정화세포 분리 시스템 스케일업 및 장기 운전 테스트

- 전환율 극대화를 위한 CO 재순환 시스템 적용

• CO 재순환 비율에 따른 수소생산속도 영향 평가

• 반응중 $CO/H_2/CO_2$ 분리 시스템 적용 및 평가

• 다단 CO 전환 시스템 설계 및 타당성 평가

○ 상용 규모 반응기에서의 CO 물질 전달효율 극대화

- 미세기포 이용 생물반응기 최적화

• Microbubbler 구조 개선을 통한 CO 가스 물질전달 효율 극대화

• 가압 CO 용해장치 최적화 및 scale-up

• 배지 내부순환형 외부 마이크로버블 생물반응기 최적화

• 반응기 내 미세기포 안정화 방안 탐색

• 동력 대비 최대 수소생산 버블러 조건 최적화

- 공정 스케일업을 위한 CO 전달 현상 해석

• 수력학적 특성에 따른 CO 뭉침 등 기포 거동 해석

• CO 전달 계수의 무차원화 및 계산식 도출

- Airlift 반응기 활용 CO 물질전달 효율 최적화

• 미세기포 제조 장치와 airlift 반응기 통합

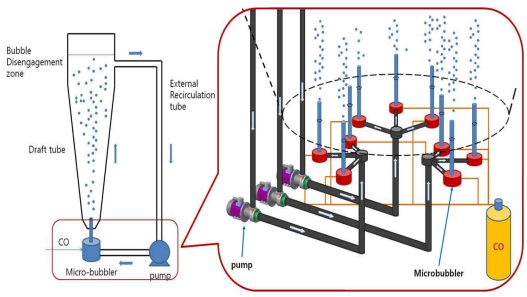
• 교반동력 최소화를 위한 가스 분사장치 위치 선정

• Riser-downcomer 최적 설계를 통한 CO 물질전달 효율 향상

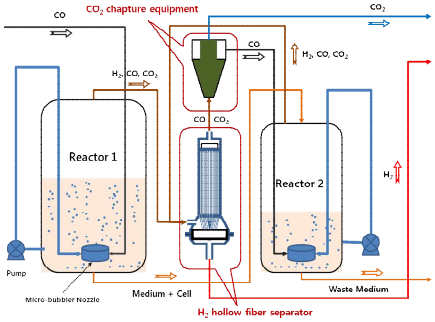
• 대규모 반응기에 적합한 내부 구조 선정

• 동력비용 계산 및 성능 평가

• 경제적인 거품 제거 장치 개발



예시. 바이오수소 생산 마이크로버블러 반응기 개념도



예시. CO 재순환 2단 마이크로버블 반응 수소 생산 통합공정 개념도

❑ 주요 연구개발 추진방법

○ 고농도세포배양 및 수소생산 극대화

1. 수소 생산 최적화를 위한 고농도세포배양시스템 구축

- 필터 연속배양 시 세포의 세출을 막아 세포를 농축하고 고농도 배양을 통하여 수소 생산을 극대화 실현이 가능함.
- 초고온고세균 인 NA1의 농축에 필요한 필터의 재료는 생물 적합성이 우수하고, 열적 안정성, 화학 안정성 및 기계적 안정성이 우수한 재질이 요구
- 세라믹스(ceramics) 또는 세라믹은 인위적으로 열을 가하여 만든 무기 화합의, 비금속 고체로 점토나 고령토 등의 천연원료를 사용하여 만들며, 전통적으로 용기로 사용
- 파인 세라믹스(fine ceramics)는 고순도의 정제된 인공원료를 사용하여 만들며, 전자재료, 정밀기계 재료 등 다양한 용도로 널리 사용되는 재료임.
- 세라믹의 성질은 금속과 반대로 전기 전도성이 낮으며, 유기재료와 달리 고온에 잘 견디고, 전통적인 도자기, 유리, 시멘트 뿐 아니라 최근 전자기분야 및 엔지니어링 등 기능성 재료로도 각광을 받고 있음

<표 3-4> 세라믹 필터의 특징

	세라믹 필터의 특징
장점	- 물리적 내구성 우수 - 화학적 안전성 우수 - 생체 안정성 우수 - 경도가 높음 - 열에 강함
단점	- 취성재료로 기계적 충격이나 열충격에 약함 - 성형이나 가공이 어려움 - 치수 안정성이 떨어짐

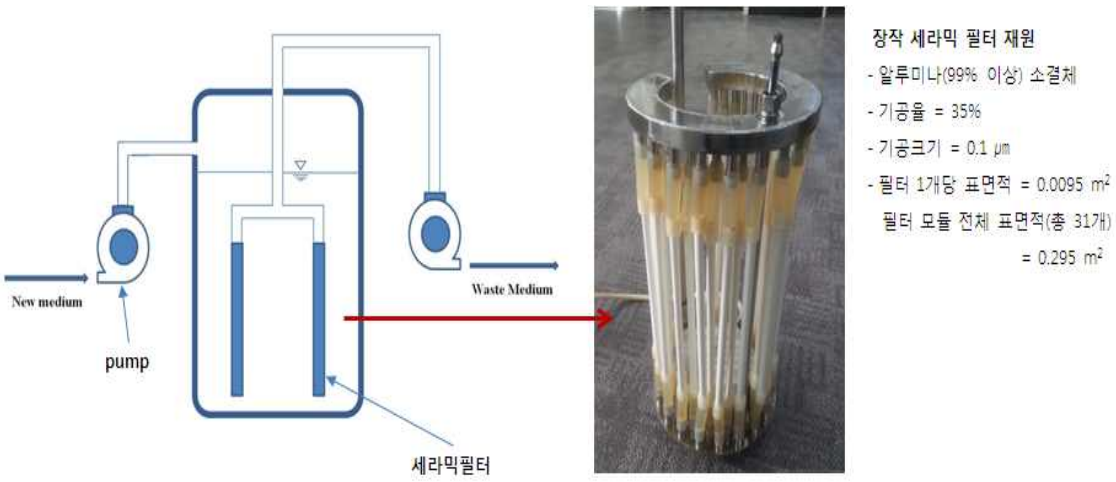
<그림 3-3> 여러 가지 세라믹 필터

- 효율적인 수소생산공정시스템 구축을 위하여 여러 가지 필터의 요구 특성과 세포 및 배양액에 적합성 여부를 평가하기 위한 실험이 요구되고, 필터는 크기에 따라 단백질과 같은 용질 분자들을 분리하는 분자체(molecular sieve)로 사용
- 미세여과(microfiltration) 또는 미세다공 여과(microporous filtration, MF)는 폭이 0.1~10㎛ 되는 박테리아나 효모 같은 종류의 분리에 사용
- 한외 여과(ultrafiltratio, UF)는 2000~500,000 분자량 범위의 거대 분자에 사용되고, 모든 막여과는 같은 구동력 즉 압력에 기초하고 있음
- 톤 단위 반응기로 scale-up 시 필요한 필터의 재질, 용량의 설정 및 공정 따라 내부와 외부 등 설치위치 및 방법의 적합성을 평가하는 실험 등 다양한 연구가 요구됨.

- 내부필터와 외부필터의 비교 : 장시간 안정적인 필터시스템의 운전을 위해서는 세포나 발효 분산물에 의한 필터 막힘 현상이 적어야 함.
- 내부 버블러의 경우 구조가 간단한 장점이 있지만 고농도 배양 시 필터 막힘이 심하고 고장 시 보수가 불가능하고, 외부 버블러의 경우 구조가 복잡하나 운전 중에도 유지 보수가 용이한 장점이 있으며 필터장치를 다중으로 설치 할 경우 필터 막힘이 발생할 때 예비 필터장치를 가동하여 문제를 해결할 수 있는 장점이 있음.

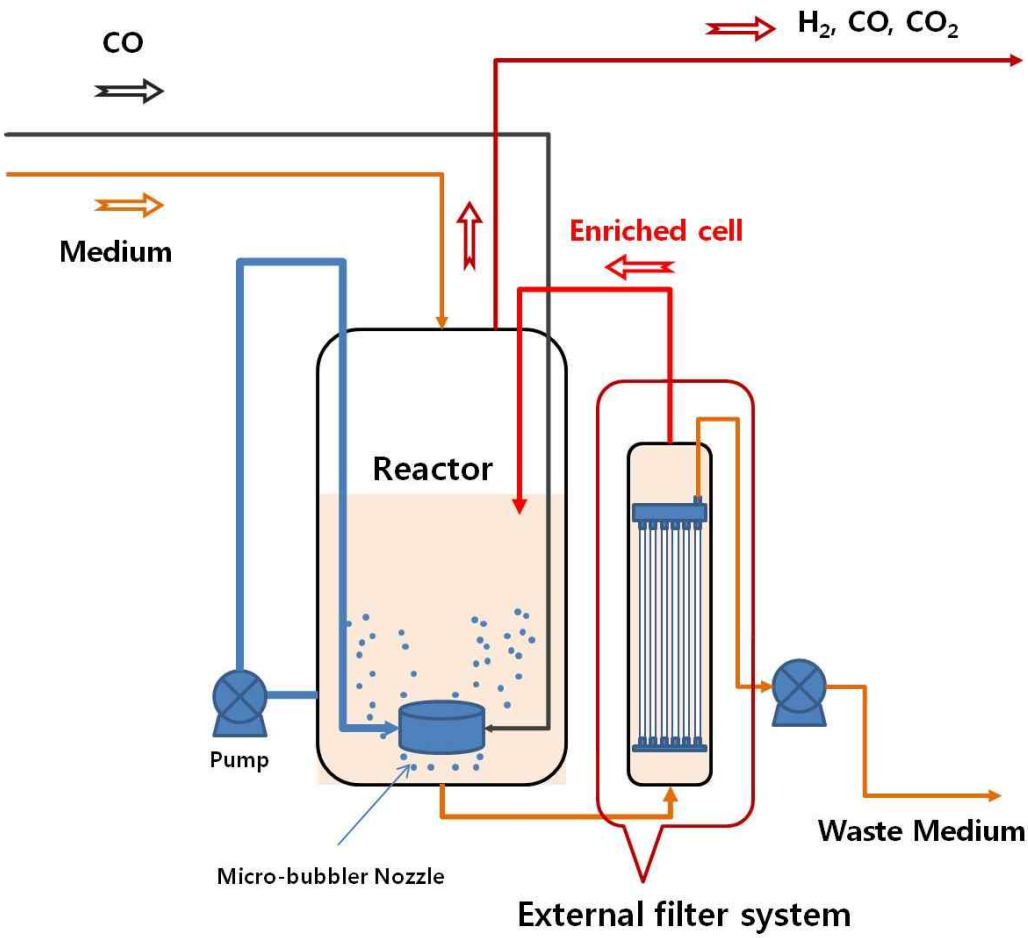
<표 3-5> 내부 필터 system과 외비 필터 system의 비교

	내부필터	외부필터
장점	- 공정이 단순함 - 비용이 적게듬	- 유지보수가 용이 (운전 중 보수 가능)
단점	- 유지보수가 어려움 (운전 중 보수 불가능)	- 공정이 복잡함 - 상대적으로 고비용임.



관형 세라믹 필터를 이용한 세포 농축 개념도　　관형 세라믹 필터 장착

<그림 3-4> 세라믹 내부필터를 이용한 고농도배양시스템 개념도 및 필터 장착 사진



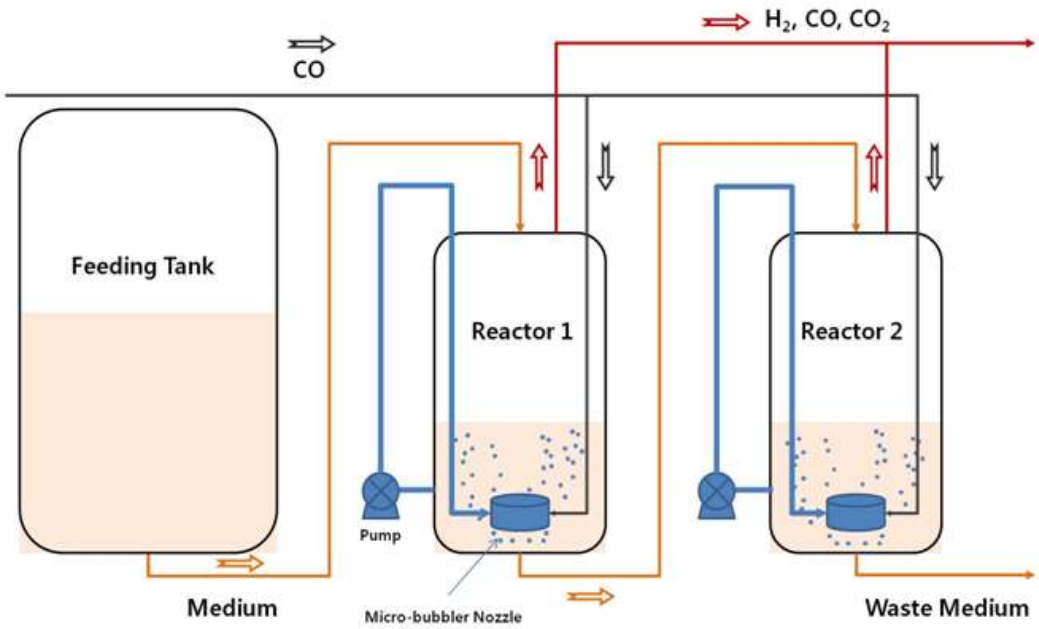
<그림 3-5> 외부필터를 이용한 고농도배양시스템 개념도

2. 다단 시스템 도입을 통한 수소생산 극대화

- 다단시스템 : 2차 대사산물 생산이 목적인 발효에서 세포의 생장과 생성물의 형성 단계의 최적조건이 다를 때 온도, pH, 제한 영양소 등의 조건을 달리 하여 배양함.
- 다단시스템은 유전공학적인 세포의 배양 및 2차 대사산물의 생산 즉 에탄올 생산 등의 바이오산업에서 다양하게 응용되고 있음.
- 다단 시스템의 특징

1) 회분식 생장 곡선을 여러 부분으로 나누어 각 부분을 다단 시스템의 각 단에 고정시킨 것과 유사함.

2) 두 번째와 후속 단에서의 생장은 정상상태에서도 본질적으로 불균일 생장임



<그림 3-6> Micro-bubbler 반응기를 이용한 NA1의 수소 생산 다단 시스템

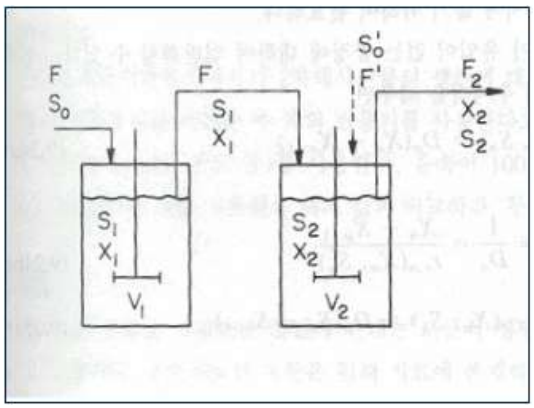
- 비구조(unstructured)모델을 이용한 생장 예측.

1) 1st stage에서 균체와 기질에 대한 물질 수지식 (내인성 대사 무시)

$$S_1 = \frac{K_s D_1}{\mu_m - D_1} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$X_1 = Y_{X/S}^{M}(S_0 - S_1) \quad \cdots\cdots(2)$$

($Y_{X/S} = \Delta X / \Delta S$ 는 제한기질에 대한 균체 수율)



<그림 3-7> 2단 키모스탯 시스템

2) 2nd stage의 균체에 대한 물질 수지식

$$FX_1 - FX_2 + \mu_2 V_2 X_2 = V_2 \frac{dX_2}{dt} \quad \text{.....(3)}$$

정상상태에서

$$\mu_2 = D_2\left(1 - \frac{X_1}{X_2}\right) \text{.....(4)}$$

(X1/X2<1, μ2<D2)

제한 기질 수지식

$$FS_1 - FS_2 - \frac{\mu_2 X_2}{Y_{X/S}^M} V_2 = V_2 \frac{dS_2}{dt} \quad \text{.....(5)}$$

$$S_2 = S_1 - \frac{\mu_2}{D_2}\frac{X_2}{Y_{X/S}^M} \quad \text{.....(6)}$$

(D2=F/V2 , $\mu_2 = \frac{\mu_m S_2}{K_s + S_2}$)

식(4)를 식(6)에 대입하여 정리하면

$$S_2 = S_1 - \frac{1}{Y_{X/S}^M}(X_2 - X_1) \text{.....(7)}$$

기질 농도와 균체 농도의 함수 관계를 알 수 있음.

3) 단이 n개일 경우 일반식은 (8)식과 같음.

$$S_n = S_{n-1} - \frac{1}{D_n}\frac{1}{Y_{X/S}^M}\mu_n X_n \text{.....(8)}$$

- NA1의 경우 제한 기질인 Yeast Extract의 소모량을 측정하기가 어려우므로 다단 시스템을 위와 같은 함수 관계를 통하여 예측하기 어렵고 다양한 실험을 통하여 공정 변수들을 예측하여 공정에 적용하는 방법을 통한 최적화가 필요

- 원료의 효율적인 이용 가능

  1) 배양액의 재투입을 통하여 희석된 세포를 재활용하고 원료 물질 중 고가인 Yeast Extract의 효율적인 사용이 가능하며, 폐수 배출량의 감소 기대 가능

  2) 일산화탄소도 정제 분리를 통해 재투입하여 완전한 처리가 가능함

○ CO 물질 전달 효율 극대화

1. 현재 미생물배양기의 문제점

- 생물반응기의 형태가 대부분 CSTR 반응기이고, 운전방식이 회분식 반응을 하므로 효소 반응기의 경우처럼 연속공정의 고효율화가 필요

- 세포 고정화라든가 혹은 막을 이용한 고농도 연속배양방법 등이 연구되고 있음

- 고정화 세포에서 더욱 큰 문제는 고정화 담체 내까지 산소전달이 용이하지 않고, 산소의 용해도가 8mg/L에 불과해 포도당의 농도가 통상 100g/L인 것에 비하며 호기성발효는 고정화 담체로는 불가능함

- 세포 재순환의 경우도 충분한 산소의 공급 없이는 고농도로 호기성 발효를 하는 것은 불가능함

2. Micro-bubbler 반응기 구축의 필요성

- 호기성 균주의 배양 시 균주의 성장에 따라 O2의 공급이 필요함. 일반적인 CSTR 반응기의 경우 기체 공급을 늘리거나 교반속도를 높이면 KLa 즉 총괄 물질이동 용량계수가 증가하여 필요한 O2를 공급할 수 있음

- 그러나 scale-up 시 반응기 용량이 증가함에 따라 비례하여 교반속도 증가가 불가능 하고 기체 공급 용량을 증가시켜도 기체의 용해도 증가는 한계

- Micro-bubbler 반응기는 일반 기포보다 매우 작은 10~100㎛ 의 미세기포를 발생시켜 일반적인 CSTR 반응기 보다 더 효율적으로 기체 전달이 가능함

- Scale-up 시 Micro-bubbler 숫자를 늘리거나 대용량 Micro-bubbler와 펌프를 장착하여 기체 용해도 문제를 해결할 수 있음

3. 마이크로-나노버블의 생성원리

- 마이크로- 나노버블(Micro-nanobubbles)이란 0.1 ~1 0㎛ 이하의 미세기포로 그 입자가 매우 미세하여 육안으로 확인이 어려운 초미세기포

- Micro-bubbler module에 압축수를 바닥 면에 접선 방향으로 도입하면 바닥 면에서 공급된 가스가 압축수와 원주 방향으로 선회하면서 혼합되고, 가스와 혼합된 압축수가 고속으로 선회하면서 형성된 원심력에 의해 더욱 압축되면서 강력한 난류와 전단력을 발생

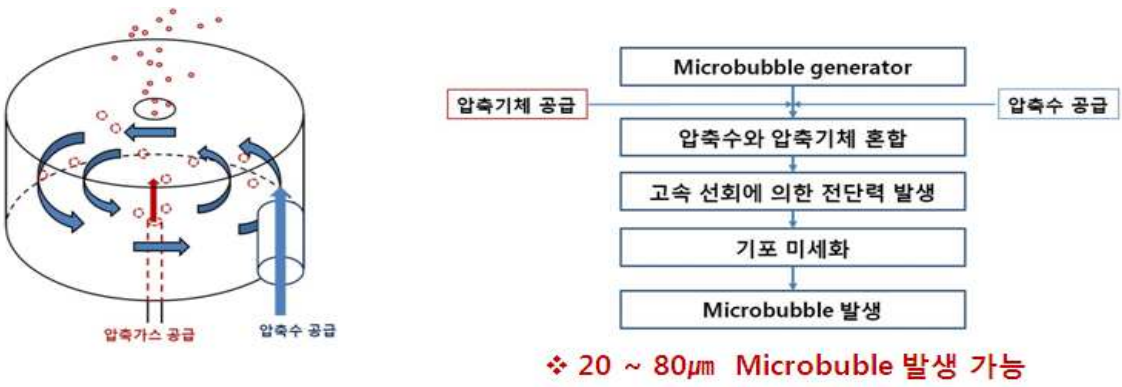
- 이때 발생된 전단력이 기포를 잘게 부수어 1.0 ~ 5㎛로 미세화 된 Micro-bubble을 생성하게 되고, 생성된 Micro-bubble은 전단부 구멍을 통해 압축수와 함께 방출되어 반응기에 전체적으로 혼합됨

- Micro-bubble의 크기는 도입된 액체의 강력한 난류에 의한 전단력에 의존하므로 공급액체의 압력과 기체의 공급량에 따라 조절됨

- Micro-bubbler는 재질은 내열성, 내식성이 강한 재질로 제작되었고, 장치가 소형이기 때문에 반응기 내부에 설치가 가능하여 별도의 설치공간이 필요 없고, 적은 동력으로도 운전이 가능

- 또한 외부 설치 시 발생할 수 있는 일산화탄소 및 배양액 유출로 인한 피해를 감소시킬 수 있는 장점이 있음

<그림 3-8> Micro-bubbler 장착 사진



<그림 3-9> Micro-bubbler 발생 원리

4. Micro-Nano-bubble의 정의

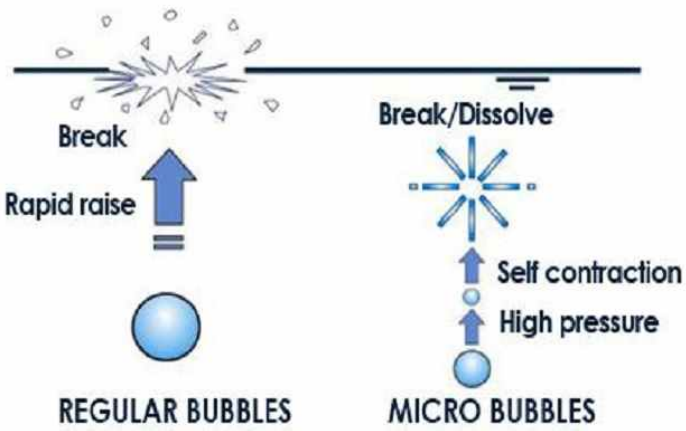
- 기포지름이 몇 100 nm부터 10 ㎛ 전후인 기포를 나노버블이라고 정의하였으며, 나노버블을 수처리에 적용할 경우 통상적인 포기법에 비해 기포의 크기가 작아 공기의 용해효율이 높이는 특징을 가진다고 보고

5. Micro-Nano-bubble의 메커니즘

- 마이크로-나노버블의 기대효과는 기포크기가 작아 수중에서 상승속도가 느리게 됨으로써 체류시간을 길게 할 수 있으며, 비표면적을 크게 만들어 기-액 계면의 흡착 조작이나 물질 전달조작에 유리함

- Stock's법칙에 따르면 직경이 50㎛인 경우, 상온인 수중에서의 상승속도는 84㎜/min임

- 일반 기포는 물속에서 빠른 속도로 상승해 표면에서 파열 하지만, Micro-bubble은 수면으로 0.1㎝/sec의 매우 느린 속도로 상승하며 수중에서 압력에 의해 축소되며, 다양한 에너지를 발산하는데 일반 기포와 대비하면 약 1/100배 이하의 속도로 상승함



<그림 3-10> Regular bubbles and micro-nano bubbles과의 부유흡착 특징 비교

<표 3-6> 버블의 사이즈 특징

Bubble type	Size	Characteristics
Normal bubbles	수십 ㎛ 이상	• 수면위로 빠르게 상승파열 • 질적 변화 및 에너지원 없음
Micro bubbles	10 ㎛~수십 ㎛	• 수면으로의 상승속도 느림 • 수중에서 축소하고 소멸하여 완전용해 (기포상태의 입자를 물속에 공급)
Micro-nano bubbles	0.1 ㎛~10 ㎛	• 수면으로의 상승속도 느림 • 마이크로 버블에 비해 수축속도 빠름 • 마이크로 버블이 수척하여 생성
Nano bubbles	0.1 ㎛ 이하	• 표면장력의 자기가압효과에 의해 Bubble의 수명 짧음 • 표면 대전에 의한 정전반발력이나 계면활성제에 의해 장시간 안정화 가능 • 대전효과에 의해 안정화 된 나노버블은 기포특성이 장시간 유지되어 생명광학 분야 및 의학적인 응용 가능

6. 기포크기에 따른 수증 기체전달효율

- 수중에 필요한 양의 기체를 전달하기위해서는 기-액 계면이 만들어져야하기 때문에 물속에 인위적으로 기포를 주입시켜 기체와 물의 경계면을 더 많이 만들어 줌으로서 기체를 액체에 전달할 수 있음. 기체전달속도는 기-액 계면의 접촉면적과 액체속의 기체포화부족량에 비례하는데 다음 식으로 표현할 수 있음.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{-DA\partial C}{\partial Xf}$$

여기서, $\frac{\partial M}{\partial t}$ = 기체전달속도 (kg/hr)

D = 기체의 확산계수 (m^2/hr)

A = 기체-액체 경계면의 접촉면적 (m^2)

$\frac{\partial C}{\partial Xf}$ = 막거리에 따른 기체농도 구배(kg/m^3/m)

- 기체의 확산계수나 기체농도의 구배가 동일하다고 가정하면 일반적으로 기

체전달속도는 기체- 액체 경계면의 기포크기가 작아 기체접촉 면적이 커야하고, 기-액 접촉면은 적은 기포의 크기에 따라 좌우됨(즉, 기포의 크기가 작음에 따라 반비례하여 기포의 접촉면적은 커지게 됨)

- 일반 산기버블과 Micro-Nano-bubble을 비교하면 일반 산기버블의 크기는 약 2 ㎜(=2,000 ㎛), Micro-Nano-bubble은 0.1~10 ㎛로 마이크로-나노버블의 접촉면적이 20~2,000배, 접촉시간은 80~8,000배 이상의 효과

<표 3-7> 버블 사이즈와 접촉면과의 비교

Bubble size	**Contact areas**
1 mm : 100 ㎛	1 : 10
1 mm : 10 ㎛	1 : 100
1 mm : 1 ㎛	1 : 1,000
1 mm : 0.1 ㎛	1 : 10,000

<표 3-8> Size comparison of conventional Bubbles and Micro-nano Bubbles

Items	Diameter (mm)	Area (mm^2)	Volume (mm^3)	specific surface area (mm^2/mm^3)
Ceramic fine Bubble	2~3	13~30	4.2~14.1	2~3
Medium Bubble	3~4	30~50	14.1~34	1.5~2
Coarse Bubble	10	314	523	0.6
Micro-nano Bubble	0.1~10㎛	3.14×10^{-4} ~ 3.14×10^{-8}	5.2×10^{-7} ~ 5.2×10^{-13}	604 ~ 60385

7. 발생기포의 특성

- 수중에서 기포는 밀도차에 의해 어느 정도의 상승속도를 갖게 됨. 기포의 체류시간은 용해효율에 크게 영향을 미치게 되며, 기포의 입자가 작으면 작을수록 수중에서의 체류시간은 길어지며 그 만큼 용해효율은 증가

- 입자의 운동 방정식은 기포의 경우, 관성력= 부력- 중력- 저항력(마찰력)으로 나타나며 다음 식과 같이 정의됨

$$V_p \cdot \rho_p \cdot \frac{dv}{dt} = V_p \cdot \rho_w \cdot g - V_p \cdot \rho_p \cdot g - \frac{1}{2} C_D \cdot A_p \cdot \rho_p \cdot v^2 \quad \text{.....(1)}$$

위의 식에서 기포의 직경을 d_p 라고 하면,

$$\frac{\pi d_p^3}{6} \cdot \rho_p \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d_p^3}{6} \cdot \rho_w \cdot g - \frac{\pi d_p^3}{6} \cdot \rho_p \cdot g - \frac{1}{2} C_D \cdot \frac{\pi d_p^2}{4} \cdot \rho_p \cdot v^2 \text{...(2)}$$

여기서, v : terminal velocity, m/s
ρ_p : mass density of particle, kg/m^3
ρ_w : mass density of fluid, kg/m^3
g : acceleration due to gravitation, 9.81m/s^2
d_p : diameter of particle, m
V_p : volume of particle, m^3
A_p : sectional area of particle, m^2
C_p : dimensionless drag coefficient

$$buoyancy = (\rho_w - \rho_p) g V_p$$

$$friction = \frac{C_D A_p \rho_p v^2}{4}$$

그리고, drag coefficient C_D는 다음과 같이 정의 됨

$$1 > R_e \qquad : C_D = \frac{24}{R_e} = \frac{24\mu}{v \rho_p d_p}$$

$$1 < R_e < 1{,}000 \qquad : C_D = \frac{24}{R_e} + \frac{3}{R_e^{0.5}} + 0.34 \text{ or } = \frac{18.5}{R_e^{0.5}}$$

$$R_e > 1{,}000 \qquad : C_D = 0.034$$

여기서, 발생된 기포입자가 층류(laminar flow)로 부상한다고 가정하면, 위의 (2)식의 좌변은"0"이 됨. 기포의 체류시간은 용해효율에 크게 영향을 미치게 되며, 기포의 입자가 작으면 작을수록 수중에서의 체류시간은 길어지며 그 만큼 기체의 용해효율도 증가하게 됨

- 직경 10 ㎛의 기포 상승 속도는 약 6mm/min 정도로 매우 낮고, 기포직경이

100 ㎛가 되어도 상승속도는 약 3.3 cm/min 임. 따라서 적당한 수심의 반응조에 기포를 미세화시키면 계외로 벗어나는 일 없이 충분히 용해되는 것을 기대할 수 있음

6. 일산화탄소의 용해속도

- 총괄 기체이동 계수 KLa를 이용하여 용해 속도를 결정할 수 있는데, 기체이동 계수는 다음과 같음

- 기체의 용해 속도는 기체이동 계수, 즉 KLa 값이 클수록 커짐

$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C_S - C_t)$$

여기서, C_t : 시간 t의 용존 기체 농도

$K_l a$: 총괄 물질이동 용량계수

C_s : 포화 기체 용존 농도

- 이때 25℃에서의 수돗물 포화용존 일산화탄소 농도는 27.6mg/L로 계산

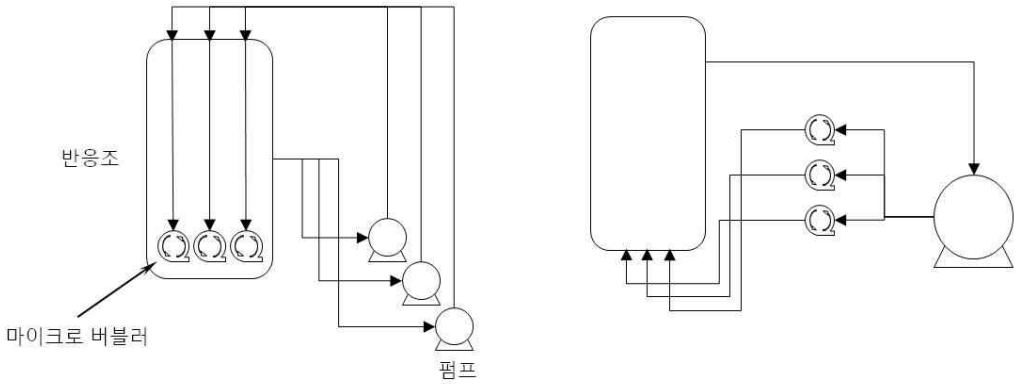
8. Scale-up 시 Microbubbler system의 적용

- 현재 연구되고 있는 Micro-bubbler system은 배양조의 배양액을 펌프를 이용하여 고압으로 이송하고 MFC를 이용하여 일정하게 공급되는 가스가 micro-bubbler nozzle에서 뒤섞여 micron 단위의 미세기포가 형성됨

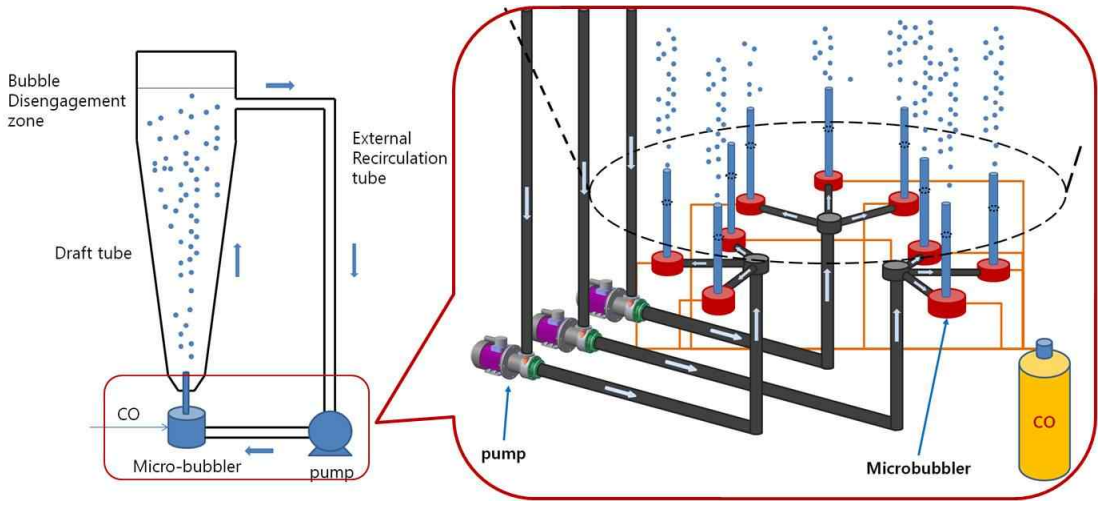
- 구조상 이송 펌프와 micro-bubbler nozzle이 일대일로 장착되는 형태임

- 톤규모 반응기로 Scale-up 할 경우 다수의 micro-bubbler nozzle과 펌프가 사용되어 구조가 복잡해 질 수 있음

- 대용량 고압 펌프에 다수의 micor-bubbler nozzle을 모듈형태로 장착하여 더 미세한 기포 형성이 가능하고 반응기 외부에 창착 가능하도록 설계하여 교체 수리 및 제어가 용이함



<그림 3-11> Micro-bubbler system과 Multi-nozzle Micro-bubbler system 비교



<그림 3-12> Schematic representation of an airlift bioreactor with external recirculation

○ 막 분리를 이용한 수소 분리 방법

- 집진기(scrubber)란 기체를 액체에 접촉시켜, 기체 중 가용성 성분을 액상 중에 용해시키는 일련의 공정을 말함. 세정 집진 장치(wet scrubber)는 유수식, 가압수식, 회전식의 3가지가 있으며, 대상 가스에 따라 필요한 흡수액을 선정하여 제거효율을 높일 수 있음

- 최근 분리막을 이용하여 선택적인 가스투과원리를 이용하여 기체 혼합물을 분리하는 연구가 활발하게 진행 중임. 분리막은 공정은 상변화가 없고 에너

지 소모가 적으며 장치가 간소하여 장치 비용이 저렴한 장점 있으나 상대적으로 낮은 투과도 및 선택도, 열, 화학, 기계적 안정성에 문제가 있어 보환을 위한 연구가 활발히 진행 중임

- 기체분리 원리는 고분자 막에서 기체분자는

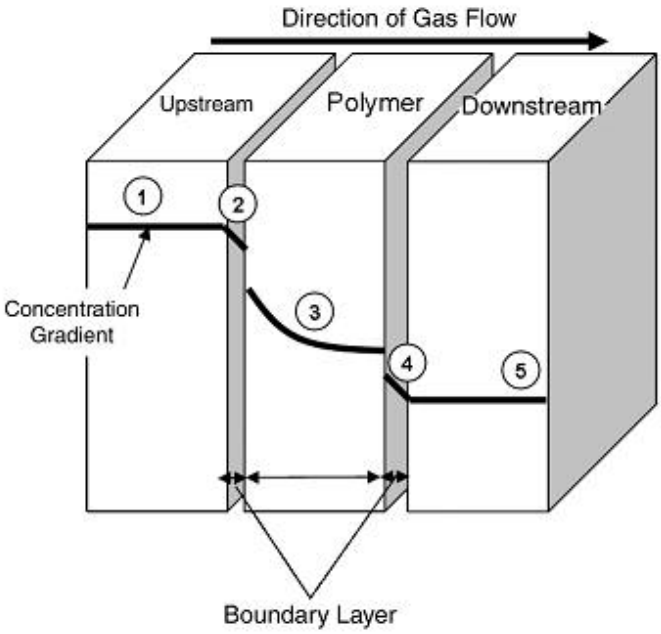
1) 상부(상대적으로 높은 부분압)에서 경계면으로 확산

2) 기체분자의 고분자 분리막에 흡착

3) 고분자 분리막 내로의 기체 확산(속도 결정 단계)

4) 투과부(상대적으로 낮은 부분압)에서 기체 탈착

5) 하부 경계면에서 외부로 확산의 5단계로 구분 할 수 있음



<그림 3-13> 용해-확산 메커니즘에 따른 고분자 분리막의 기체 투과 원리 개략도

- 기체 분자 A의 투과도 상수 $(P_A)[[cm^2(STP/cm^2 \bullet s \bullet cmHg)]$는 $(D_A)(cm^2/s)$와 용해도$(S_A)(cm^3 gas/cm^3 polymer \bullet cmHg)$의 곱으로 나타냄

$$P_A = D_A \bullet S_A$$

- 고분자 분리막의 종류 : 중공사형 기체 분리막(Polysulfone+Polysiloxane) 등 다양한 형태와 고분자로 만들어짐. 대표적 고분자는 Polypropylene, Polyimide, Polyamide, Polyacrylonitrile, Cellulose 등이 사용되며, 최근에는 siloxane계(PDMS), 치환계 Polyacetilene(PTMSP)와 무정형 불소계 고분자 등이 연구되고 있음

- 수소 분리 회수용 기체 분리막 : Monsanto사가 중공사형 Polysulfone에 Polydimethy-siloxane계를 박막 도포한 복합막 개발(Prism separator)

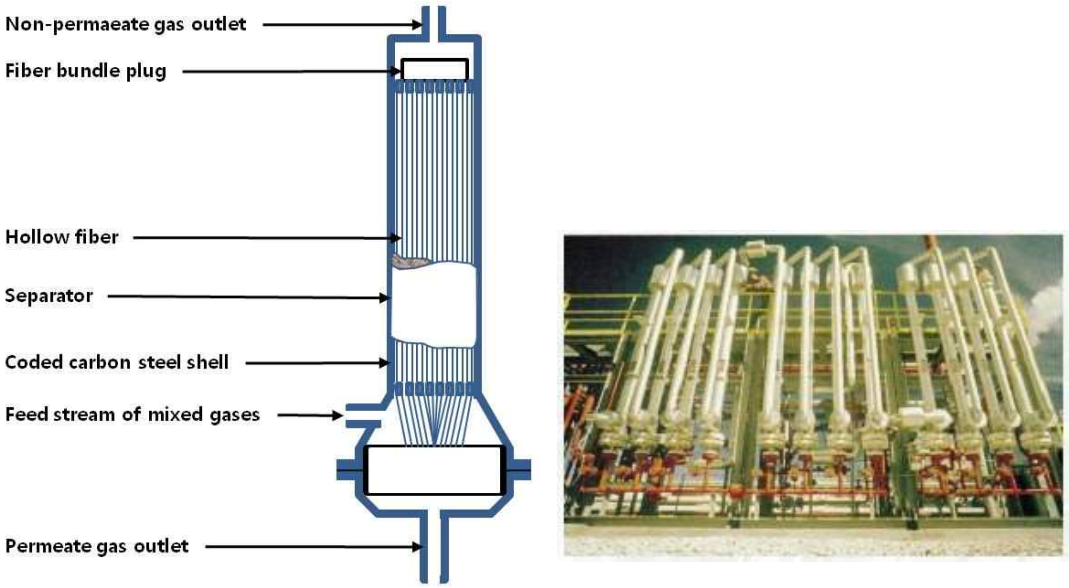
1) 공정 부생가스로부터 수소 회수

2) C1 화학의 합성원료 가스의 조정 : 원료 가스인 H2/CO 비를 조정

3) 석유정제 및 가스공업에서의 수소의 회수 공정

4) 수성가스로부터 수소의 회수 등의 공정에 응용됨

- 이후 지속적으로 기술이 발전하여 현재 최고 수소 농도 99%, 최고 회수율 95%의 기술수준을 보이며, 다른 종류의 많은 상업화된 수소 분리막 공정이 존재함



<그림 3-14> Prism separator module과 실제 공정 적용 사진

<표 3-9> 수소 회수 방법의 비교

방법 / 항목	분리막법	PSA 법	심냉법
설비투자액비	1	1.3	2~3
최고사용압력(kg/cm3G)	150	40	70
최고수소농도(일반)(%)	99	99.9999	98.5
최고수소회수율(일반)(%)	95	85	95
가스압력비(투과/공급)	작다	≈1	≈1
설비용량변경	쉽다	거의 불가	거의 불가
운 전	간단	보통	보통

출처 : Membrane Journal Vol.4, No.1 March 1994, 30~37

<표 3-10> 기체 분리막 회사의 비교

상품명	PRISM	SEPAREX	UBE	MEDAL
제조사	MONSANTO	AIR PRODUCTS	UBE흥산	DUPONT
고분자재료	중공사	Spiral	중공사	중공사
막의 형상	Polysulfone 다공질 및 Cellulose Acetate	Cellulose Acetate	Polyimide	Polyaramide
분리계수 H_2/CH_4	30~60	45~65	200~250	200
제 한 치				
방향족 화합물	포화농도의 10%	포 화	벤젠 700ppm 톨루엔 150ppm	포 화
황화수소	분압 3.5kg/cm^3	분압 3.5kg/cm^3	5%	10%
암모니아	분압 3.5kg/cm^3	분압 3.5kg/cm^3	100ppm	포 화
이산화탄소	-	-	-	25%
수 증 기	포 화	포 화	포 화	포 화

출처 : Membrane Journal Vol.4, No.1 March 1994, 30~37

<표 3-11> 각종 기체의 막투과 속도(O2가 PS막을 투과하는 속도를 1.0기준의 상대치)

Membrane	H_2	N_2	O_2	CH_4	CO_2	H_2O
Polysulfone	13	0.2	1	0.22	6	-
Cellulose acetate	12	0.17	1	0.20	6	120
Poly amide	9	0.05	0.5	0.05	-	-
Dow product	136	8	32	-	93	-
Permea product	22	0.4	2.3	0.4	9	-
PDMS	649	281	604	3,230	1,070	-

출처 : Membrane Journal Vol.4, No.1 March 1994, 30~37

○ NA1 발효공정에서 H2 와 CO2 회수 공정 system을 이용한 CO의 recycle

- CO2 분리 공정 : CO2 분리 및 생산 공정은 산업적 생산방법으로는 PSA, 심냉법 등을 이용한 액화법을 상용되고 있음

- 최근 기후변화대응을 위한 대량 CO2 포집 및 저장을 기술개발 동향은

1) 아민계 흡수제 등을 이용한 습식 흡수 방법 : 알카리성 수용액에 의한 CO2와의 중화반응

2) 암모니아수를 이용한 방법 : 탄산암모늄이 이산화탄소와 물과 반응하여 중탄산암모늄이 되는 반응

3) 탄산칼슘을 이용한 포집 공 등이 활발히 연구되고 있으며,

4) 분리막 공정은 지구 온난화 방지를 위한 기술 뿐만 아니라 석유화학공정, 천연가스 정제, 바이오가스 정제 및 기타 관련 산업에서 급격히 수요가 증가

5) 기타로 미세조류 같은 광합성 생물체를 이용하거나 효소를 이용하여 CO2를 회수하는 즉 생체모방 공학을 이용하는 기술 등도 새로이 연구되고 있음

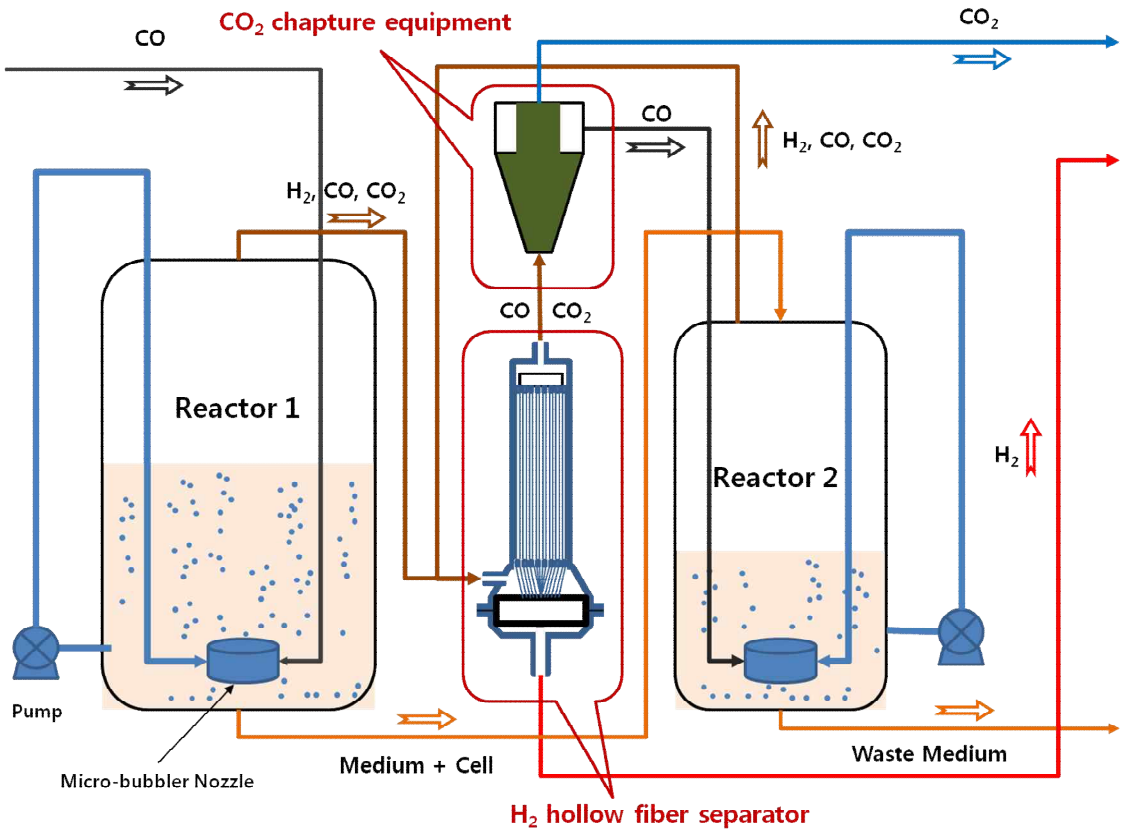
- 분리막 공정은 설비나 운용 측면에서 상대적으로 저렴하고 쉬운 장점이 있지만 다른 포집 방법에 비해서 처리 효율이 낮은 단점이 있음

- 일반적인 고분자는 CO2에 노출될 경우 가소화가 현상이 쉽게 발생하여 고분자의 내구성과 고압에서 소재 자체의 분리 성능을 급격히 감소시키는 경향이 있으며, 현재는 CO2에 내열성 고분자가 개발 되면서 2000년대 이후 CO2

회수용 분리막 기술이 급격히 증가

- NA1 생산한 가스를 막 분리 공정 및 흡착 공정 등을 이용하여 H2와 CO2 분리하고 남은 CO를 재투입하여 원료의 낭비를 막고 CO 처리 효율을 높힐 수 있음

- 1단 반응기에서 생산된 가스는 먼저 H2 분리공정을 거쳐 회수되고 남은 가스는 CO2 포집 공정에서 CO2가 분리 되고 남은 CO는 2단 반응기로 재투입 되고, 이 과정이 반복 되어 CO가스가 유출 없이 재사용됨



<그림 3-15> H2 및 CO2 회수 공정을 이용한 CO의 recycle 공정 개념도

추 진 분 야	세 부 내 용
○ 바이오수소 연속생산 공정 개발 및 최적화	- 기계적 거품제거기 개발 - 고농도세포배양 및 수소생산 극대화 - 고정화담체 개발 - 고정화세포 연속공정 개발
○ CO 물질전달효율 극대화	- CO 물질전달효율 극대화 마이크로버블 생물반응기 최적화 - solver이용 생물반응기 최적화 - membrane 반응기 수소생산 최적화 - CO 공급속도 최적화, 미반응 CO 재순환 프로세스 개발
○ 바이오수소 대량생산 기술개발	- 최적공정 조건에서 톤규모반응기 이용 바이오수소 연속 대량 생산 (150 시간 이상)

기술개발 목표	• 바이오수소 실증 생산 극대화 연속배양 공정 unit 개발 • 바이오수소 실증 생산/분리 통합 공정 최적화 프로세스 개발		
목표성과물	**성과지표**	**가중치**	**성과 목표치**
● 400 mmol/l/h 이상 수소생산 ● 85% 이상 CO 전환율 ● 150시간 수소연속생산 공정 ● CO 물질전달효율: KLa 950h^{-1} 이상	특허 출원/등록건수	30%	10건
	기술공개 및 기술이전 건수	40%	1건
	신기술, 공법, 공정개발 및 개선	30%	5건
합 계		100%	

3.3.3 원료물질 확보

❑ 기술 개요

○ 생물학적 수성가스 전환 시스템의 상용화를 위한 저가 원료물질 확보 및 이의 적용을 위한 가스 전처리, 분리 공정 선정·개발

❑ 개발 필요성 및 해결 과제

○ 생물학적 CO 전환 공정의 원료가 되는 일산화탄소는 제철소, 가스화 시설 등 다양한 발생원을 가지며 각 발생원에 따라 CO 함량을 비롯한 가스 특성이 상이

함. 제철소 부생가스 및 가스화기에 따른 원료 가스 특징을 아래 표에 정리함

<표 3-12> 제철소 부생 가스 특징

구분		BFG	COG	LDG	CFG
성분	CO_2	20.7	3.1	17.8	33.0
	O_2	-	0.3	-	-
	C_mH_n	-	2.0	-	-
	CO	20.0	8.4	64.2	43.0
	CH_4	-	26.6	-	1.0
	H_2	3.2	56.4	2.0	21.0
	N_2	54.1	2.3	15.9	2.0
발열량[kcal/Nm^3]		750	4,400	2,000	1,800
공기중 가연 범위[%]		36-72	5-28	18-75	13-69

<표 3-13>가스화기 종류에 따른 합성가스 조성

	N2	CO	CO2	H2	CH4	H2S	Tars (ppm)	NH3	Dust
Fluidized bed air blown	50	14	20	9	7	n.a	<10	n/a	High
Updraft air blown	53	24	9	11	3	n/a	>10	n/a	Low
Downdraft oxygen blown	3	48	15	32	2	n/a	1	n/a	Low
Fluidized bed (switchgrass)	57	15	17	5	6	n/a	<1	n/a	n/a
Fluidized bed (bark)	42.9	19.6	13.5	20.2	3.8	very low	<1	n/a	n/a
Fluidized bed (coal)	1	67	4	24	0.02	1	0	0.04	n/a

○ 지속적이면서 경제적인 바이오수소 생산을 위해서는 다양한 발생원에 대한 적용 기술 개발이 필요한 바, 가스의 조성 및 특성에 따라 바이오수소 생산 특성이 달라지므로 이에 대한 조업조건 최적화가 요구됨

○ 국내에 현재 1~10T/day의 가스화기가 국내 연구소에서 운용중이며 가스화 합성가스 제조 원천기술을 확보하고 있어 이를 연계한 바이오수소 생산 기술 개발을 개발할 경우 지속적인 원료물질 확보가 가능할 것으로 기대됨

<그림 3-16> 국내 민간연구소 설치 가스화기 용량

○ 또한, 원료 가스에는 생촉매 시스템에 저해가 되는 불순물이 존재하기 때문에 효과적인 불순물 제어 방법 개발이 필수적임

❑ 개발 목표

○ 지속적이고 경제적인 바이오수소 생산이 가능한 원료 물질 확보 및 적용

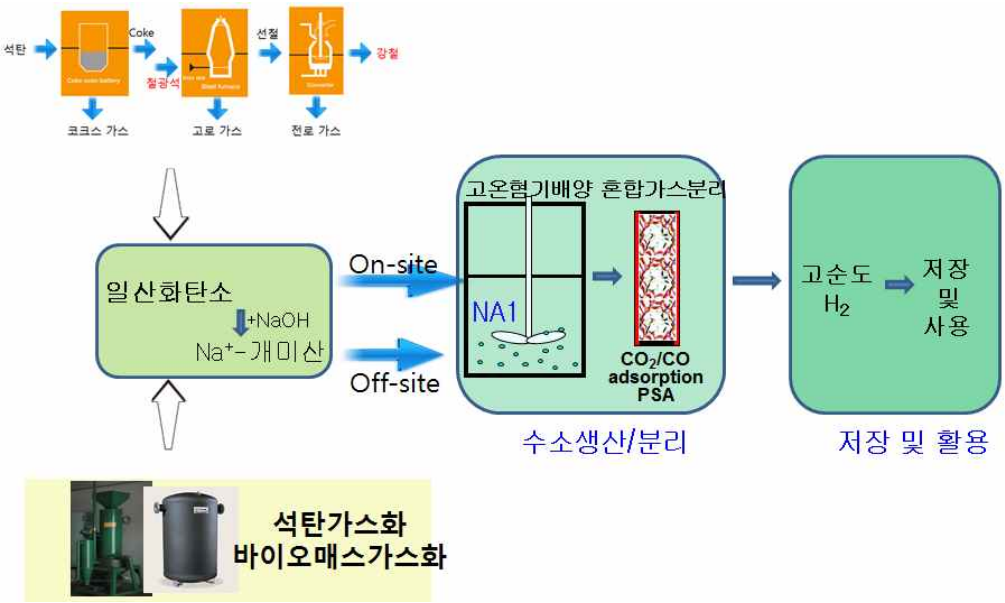
❑ 주요 내용

○ 제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발

- 제철소 부생가스 특성 분석 및 대상 가스 선정
  - BFG, COG, LDG 특성 분석
  - 경제적 생산을 위한 대상 가스 선정
- 제철소 부생가스 활용 수소 생산 실증공정 개발
  - 부생가스 이용 수소생산 최적조건 도출
  - 경제적 운전조건 최적화 및 150시간 연속식 바이오수소 대량생산 가능성 확인 (톤규모)
  - 제철소 부생가스 네트워크에 적합한 수소 생산 이용 방안 도출

○ 가스화 합성가스 활용 바이오수소 생산 원천기술 개발

- 가스화 원료 탐색
  - 해양 바이오매스 가스화 가능성 평가
  - 바이오매스, 석탄 가스화 산물 조사 및 적용성 검토
  - 가스화 부산물 활용 방안 조사
  - 수소 이외 NA1 유래 고부가가치 산물 검색 및 생산 방안 개발
- 바이오수소 생산에 적합한 가스화기 선정 및 수소생산 기술 개발
  - 가스화기에 따른 합성가스 특성 분석
  - 합성가스 종류에 따른 경제적 운전조건 최적화
  - 생촉매 활성 유지를 위한 가스 전처리 방안 개발
  - 가스화기 목적에 따른 CO 전환율 조절 방법 개발



<그림 3-17> 부생가스/합성가스를 활용한 바이오수소 생산 모식도

추 진 분 야	세 부 내 용
○ 제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발	- 제철소 부생가스 특성 분석 및 대상 가스 선정 - 제철소 부생가스 활용 수소 생산 실증공정 개발
○ 가스화 합성가스 활용 바이오수소 생산 원천기술 개발	- 제철소 부생가스 확보 방안 - 부생가스 이용 연속생산 배양특성 고찰 및 수소생산 최적화 - 부생가스 이용 150시간 이상 연속식 바이오수소 대량실증생산 (1톤 반응기 규모) - 가스화 원료 탐색 - 바이오수소 생산에 적합한 가스화기 선정 및 수소생산 기술 개발

기술개발 목표	• 지속적, 경제적 바이오수소 가능한 원료물질 확보 • 원료물질 이용 바이오수소생산 원천기술개발		
목표성과물	**성과지표**	**가중치**	**성과 목표치**
● 합성가스 이용가능성 제시 ● 수소생산 원천기술 개발	특허 출원/등록건수	40%	5건
	기술공개 및 기술이전 건수	25%	1건
	신기술, 공법, 공정개발 및 개선	35%	2건
합 계		100%	

3.3.4 바이오수소 생산 데모플랜트 구축 및 실증생산

❑ 기술 개요

○ 바이오수소 생산 데모플랜트 구축을 위한 대형 발효기 설계/제작/운전 및 가스 전처리/전환/분리/정제의 통합 공정 패키지화 기술 개발

❑ 개발 필요성 및 해결 과제

○ 1기 사업 수행을 통하여 실험실 수준에서 바이오수소 생산 공정의 우수성을 확인한 바 있으나, 공정 상용화를 위해서는 10톤 규모 이상의 대규모 반응 시스템에서 성능이 검증되어야 함

○ 대규모 수소생산 시스템은 단순히 배양기의 구축만으로는 정확한 성능 평가가 이루어질 수 없으므로 부지 확보에서 수소 저장 시설까지 공정 전과정에 대한

설계와 설치가 이루어져야 함

○ 또한, 실제 반응기 구축 전 소규모 운전에서 얻은 데이터를 바탕으로 정밀한 공정모사를 수행하고, 이에 기반하여 통합 공정을 설계해야 시행착오를 최소화 할 수 있음

❑ 개발 목표

○ 10톤 규모 바이오수소 대량생산 실증기술 개발 및 기술 패키지화

❑ 주요 내용

○ 10톤 규모 파일럿플랜트 구축

- 부지확보 및 시설 구축
  - 10톤 규모 반응기 설계 및 구축
  - 수소 저장 시설(9.9 bar) 설계 및 구축
  - 수소 분리시설 설계 및 구축
  - 부생가스 공급시설 설계 및 구축
- 10톤 규모 파일럿 플랜트 운전
  - 일산화탄소 이용 수소생산 연속 공정 운전
  - 공정 매뉴얼 작성 및 troubleshooting

○ 바이오수소 생산 공정 패키지화

- 공정 최적화를 위한 전산모사
  - 공정 내 물질/에너지수지 도출
  - 공정 simulator 운전에 의한 가스 전처리-가스 전환-가스 정제 공정 연결 방법 개발
- 데모플랜트 실증 데이터 활용 경제성, 사업성 평가
  - TEA(Techno-economic analysis)를 통한 경제성, 사업성 평가
  - 공정 전주기 분석에 의한 환경성 평가
  - 경제성 향상을 위한 방안 도출

추 진 분 야	세 부 내 용
○ 10톤 규모 대량생산 데모 플랜트 구축	- 적지선정 및 10톤 규모 데모플랜트 구축 - 10톤 규모 데모플랜트 운전 및 바이오수소 실증생산
○ 바이오수소 생산공정 패키지화	- 공정 최적화를 위한 전산모사 - 생산/분리 통합공정 최적화 프로세스 개발 - 데모플랜트 실증 데이터 활용 경제성, 사업성 평가

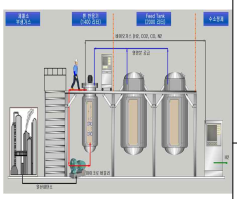
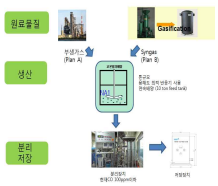
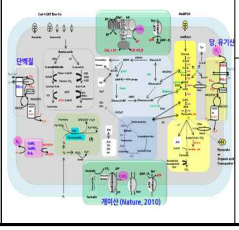
기술개발목표	• 10톤 규모 이용 바이오 수소 대량생산 실증기술 개발		
목표성과물	**성과지표**	**가중치**	**성과 목표치**
● 10톤규모 바이오수소 생산 데모플랜트 ● 바이오수소 대량생산 경제성	특허 출원/등록건수	30%	2건
	기술공개 및 기술이전 건수	40%	1건
	신기술, 공법, 공정개발 및 개선	30%	2건
합 계		100%	

3.3.5 연차별 성과지표

☐ 연차별 연구개발 내용

추진전략	중점 추진과제	'15	'16	'17	'18
바이오 수소 생산 산업균주 개발	○ 대사재설계 수소생산 맞춤형 산업균주 개발				
	○개발 균주 장시간 안정성 평가				
대량생산 프로세스 개발	○ 바이오수소 연속생산 공정 개발 및 최적화				
	○ CO 물질전달효율 극대화				
	○ 장기연속 대량생산 기술개발				
원료물질 확보	○ 제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발				
	○ 석탄가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술 개발				
	○ (해양)바이오매스 가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술 개발				
데모플랜트 구축 및 실증생산	○ 10톤 규모 대량생산 데모 플랜트 설계·시공기술				
	○ 대량생산 공정 스케일 업 연구				
	○ 바이오수소 기술패키지화 및 경제성, 사업성 분석				

❑ 연차별 성과지표

연번	핵심타깃기술명	핵심 기술명	핵심성능지표	현재기술 수준비교			기술개발 목표		연구수행 기관
				국내	세계 수준	최종 요구	1단계 ('15~'16)	2단계 ('17~'18)	
1	데모플랜트 구축 및 운용 	시스템 설계 기술	반응기 규모(m^3)	-	-	10	-	10	기업+KIOST +위탁
		시스템 운용기술	연중 운전시간 (시간)	-	-	500	-	500	기업
			연속 수소생산 (시간)	-	-	150	-	150	기업
		대량 생산 기술	일일 수소생산량 (kg)	-	-	200	-	200	기업
2	프로세스 최적화 	공정 최적화	수소생산성 (mmol/L/h)	240	118	400	350	400	KIOST +위탁
		공정 최적화	CO 전환율 (%)	60	80	85	75	85	KIOST +위탁
		공정 최적화	CO 물질전달효율 (h^{-1})	580	945	950	850	950	KIOST +위탁
3	산업균주개발 	우수균주 개발	수소생산성 (mmol/g/h)	330	48	500	430	500	KIOST
		산업균주 개발	수소선택도	0.9~ 1.0	0.95	>0.95	>0.95	>0.95	KIOST

구분	성과 지표	연구 성과물
1차 년도	- 우수균주개발 • 수소생산능: 380 mmol/g/h • 연속배양: 7일 - 공정 최적화 • 수소생산성: 300 mmol/L/h • CO전환율: 70% • CO물질전달효율: 750 h^{-1} - 데모플랜트 공정모사	- SCI급 게재 논문 : 12 - 특허 출원 : 8 (국내(7), 국외(1)) - 최적 수소생산 공정 모사도
2차 년도	- 우수균주개발 • 수소생산능: 430 mmol/g/h • 연속배양: 15일 - 공정 최적화 • 수소생산성: 350 mmol/L/h • CO전환율: 75% • CO물질전달효율: 850 h^{-1} - 데모플랜트 설계	- SCI급 게재 논문 : 12 - 특허 출원 : 8 (국내(6), 국외(2)) - 특허 등록 : 6 (국내(5), 국외(1)) - 데모플랜트 설계도면
3차 년도	- 우수균주개발 • 수소생산능: 470 mmol/g/h • 연속배양: 20일 - 공정 최적화 • 수소생산성: 400 mmol/L/h • CO전환율: 80% • CO물질전달효율: 900 h^{-1} - 데모플랜트 구축	- SCI급 게재 논문 : 12 - 특허 출원 : 8 (국내(5), 국외(3)) - 특허 등록 : 6 (국내(4), 국외(2)) - 데모플랜트 시범운전 완료보고서
4차 년도	- 우수균주개발 • 수소생산능: 500 mmol/g/h • 연속배양: 30일 - 공정 최적화 • 수소생산성: 400 mmol/L/h • CO전환율: 85% • CO물질전달효율: 950 h^{-1} - 데모플랜트 운전 및 실증생산 • 일일 수소생산량: 200kg • 연속수소생산: 150시간 • 연중 운전시가: 500시간 - 경제성, 사업성 분석	- SCI급 게재 논문 : 12 - 특허 출원 : 4 (국내(4), 국외(0)) - 특허 등록 : 6 (국내(4), 국외(3)) - 기술이전 : 1건 - 데모플랜트 운전 결과보고서 - 경제성, 사업성 분석 결과보고서 - 최종보고서

3.4 데모 플랜트 실시계획

3.4.1 사양 도출

❑ 해양바이오수소개발 데모 플랜트동

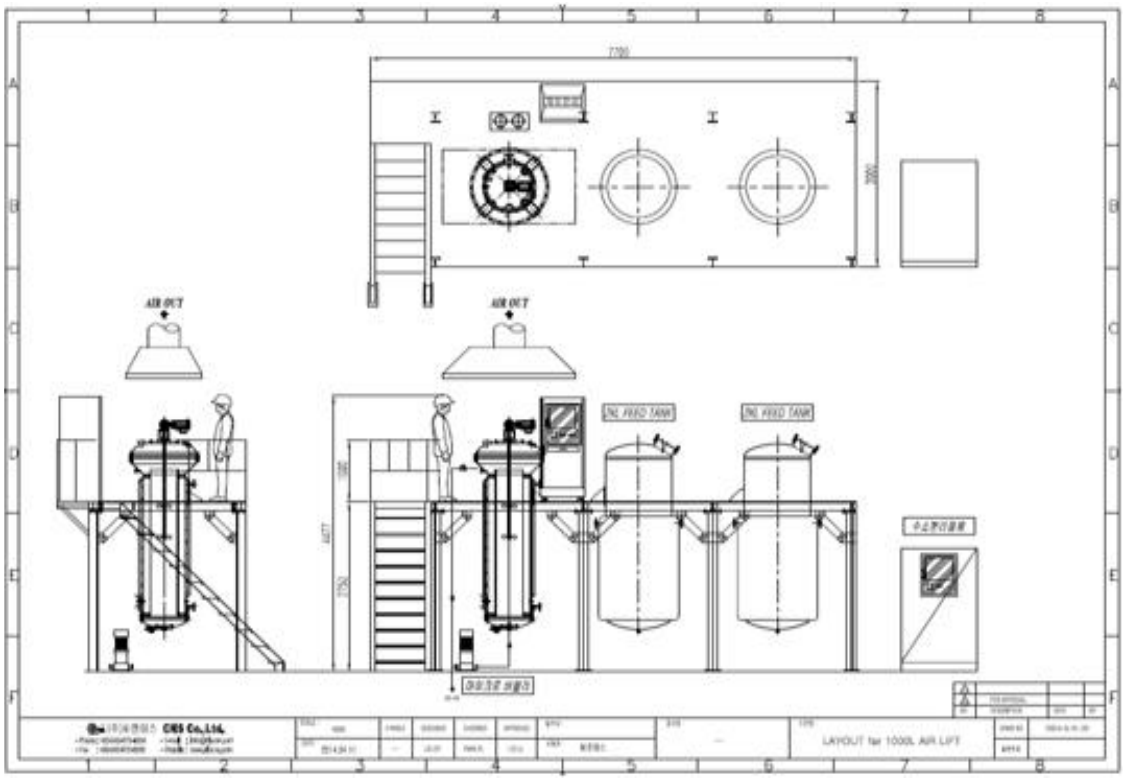
○ 탁월한 바이오수소 데모 생산 기능

○ 10톤 규모의 반응기를 이용한 연간 바이오수소 100톤 생산

- 면적 : 3,300㎡

- 반응장 : 2,340㎡

- 수소저장고 : 330㎡

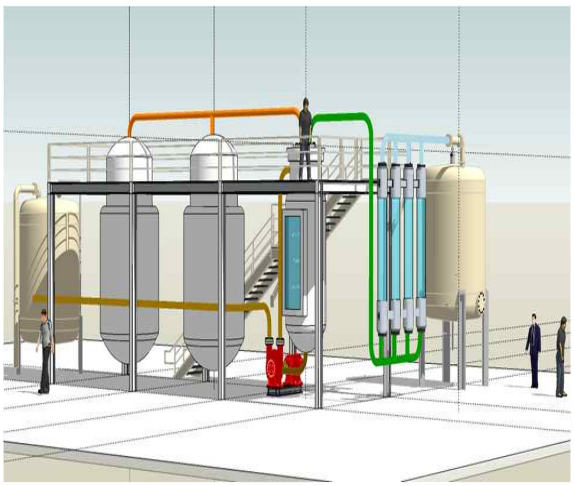


<그림 3-18> 바이오수소 반응시스템 설계

❑ 건물 및 시설 주요사양

○ 반응시스템(철근콘크리트조)

바이오수소 반응시스템 모형



바이오수소 반응시스템 조감도

❑ 데모 플랜트 구축 소요예산

구 분	공사비	공사내용	비 고
데모 반응기 (10,000L Main Fermenter 포함)	900,000,000		
Seed 배양기, 세척장치, Waste 처리장치, 밸브 등 부대장치	580,000,000		
Structure (프레임, 보온, Walkway 등 포함)	150,000,000		
Instruements 및 운전시스템 (Workstation, HMI 등 포함)	450,000,000		
유틸리티 외	370,000,000		
토목 및 건축공사	240,000,000		
기타 인허가비	50,000,000		
설계용역비	110,000,000	공사비의 4.00%	
감리용역비	27,000,000	공사비의 1.05%	비 상주감리
합 계	2,877,000,000		

<그림 3-19> 해양바이오수소개발 사업 조감도

❑ 주요 연구장비

○ 해양바이오수소개발 실용화 사업이 개시함과 동시에 오믹스 연구, 수소생산 대사 재설계 및 돌연변이 제작, 수소생산 프로세스 최적화, 스케일업 등에 대한 데모플랜트 실증생산 기반연구 수행을 위하여 첨단 연구장비 확보가 필수

- 오믹스 및 대사공학 등 수소생산 우수균주 개발 연구에 필요한 연구기자재는 기 수행된 연구사업을 통해 ('09년-'14년) 구축 되어 있고, 또한 국내 타 출연연구기관에도 구비되어 있으므로 추가적인 구입은 필요 없을 것으로 예상됨. 다만, 연구과정에서 생산되는 다양한 돌연변이 및 우수균주들의 관리를 위해 미생물보관용 냉장·냉동고가 필요함.

- 수소생산 프로세스 최적화를 위한 핵심 기술중 하나인 물질전달효율 극대화 위해 마이크로버블 공급장치의 시제품 제작이 필요함.

- 데모플랜트의 최적화된 설계를 위해 공정모사를 통한 스케일업 및 플랜트패키지화가 필요하고, 이에 따라 aspen plus 등 공정모사 소프트웨어가 필요함.

- 데모플랜트 구축을 위해 10톤규모 미생물배양기 및 utility (air compressor, heater, cooler, 밸브, 배관 등), seed 배양기 (500L, 50L, 5L 규모), 자동세척장

치, Waste 처리장치, 가스분석기, 원료가스 저장 또는 완충 탱크, 미생물보관용 대형 냉장·냉동고, 고압멸균기, 탁상형 원심분리기, 액체크로마토그래피, 혐기챔버, 초순수 제조장치 등이 필요함.

- 생산된 바이오가스로부터 수소의 고순도 정제 및 활용을 위해 수소 정제, 저장, 공급 장치의 제작이 필요함.

○ 연구장비 구입 기준

- 고세균 성장확인용 광학현미경 : 공동장비실에 1대
- 생물재료 및 시약 보관용 대형 냉장고 : 연구실 당 1대
- 초저온 냉동고(-80℃) : 공동기기실에 1대
- 바이오수소 생산성 분석 및 유기산 분석 장비 : 연구실 당 1대
- 그 외 미생물 성장 및 분석장비 설치 : 고압멸균기, 원심분리기, 가스분석기, 액체크로마토그래피, 혐기챔버, 초순수 제조장치 등 공동장비실에 1대

<그림 3-20> 균주배양 및 바이오수소 분석 연구장비

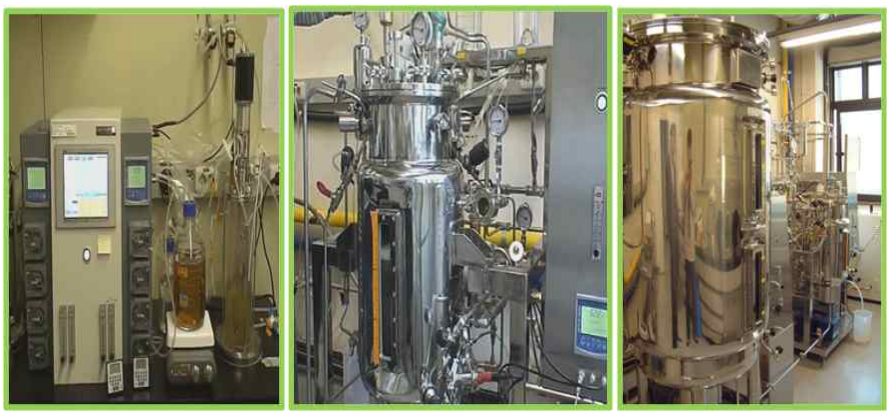
○ 데모플랜트 구축관련 바이오수소생산, 활용 부대장비 구입 기준

- 마이크로버블 공급장치: 소규모 2대, 데모규모 1대 (데모플랜트 설치)
- 10톤 미생물 배양기: 데모플랜트 설치
- Seed 배양기: 데모플랜트 500L, 50L 각 1대, 5L 4대 설치
- 수소정제, 저장, 공급장치: 데모플랜트 각 1대 설치
- 원료가스 저장 또는 완충 탱크: 데모플랜트 1대 설치
- 미생물보관용 냉장·냉동고 : 해당연구기관 당 1대, 데모플랜트 1대 설치

- 공정모사 소프트웨어: 해당연구기관 1 copy

- 자동세척 및 Waste 처리장치: 데모플랜트 각 1대 설치

바이오수소 배양기 5L (좌), 30L(중), 100L규모(우)



바이오수소저장장치 바이오수소정제장치 바이오수소연료전지

<그림 3-21> 바이오수소 생산, 활용장비

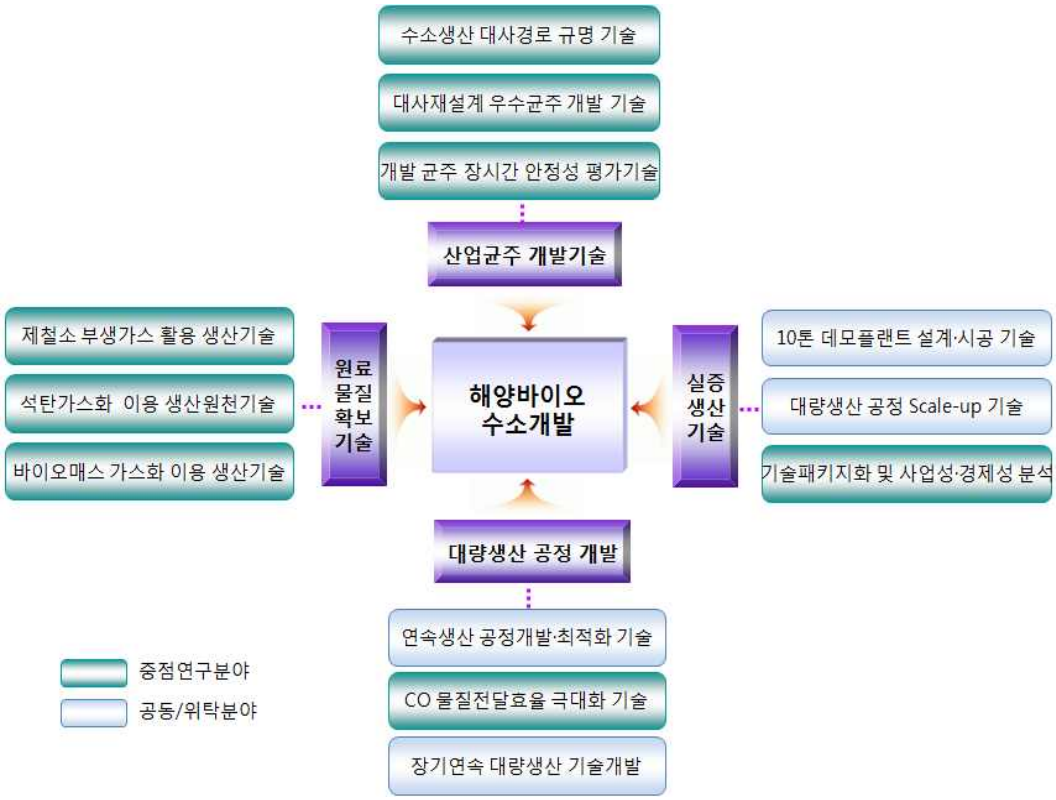
3.4.2 기술트리(Technology Tree)

○ 기술트리는 기본기능의 세부기능들을 구현하고, 최하위 세부기능들의 기술을 도출하기 위해 수행하는 것임

- 기본 기능에 맞추어, 관련 기능을 2차 기능-3차 기능 관계로 구성하였음
- 도출된 최하위 세부 기능별로 세부 기술을 도출하고 트리 형태로 제시함

○ 해양바이오에너지기술 기능 전개는 NA1을 활용한 대량 바이오수소 생산기술로 설정함

- 기본 기능을 산업균주 개발기술, 원료물질 확보기술, 대량생산 프로세스 개발기술, 대량생산기술 등 4단계로 구분
- 4가지 기본 기능에 대해 총 12개의 2차 기능(8개 중점연구, 4개 위탁)으로 구성되어 있음



<그림 3-22> 해양바이오수소 실용화기술개발 실행 로드맵

3.5 실행 로드맵 및 포트폴리오

3.5.1 실행 로드맵

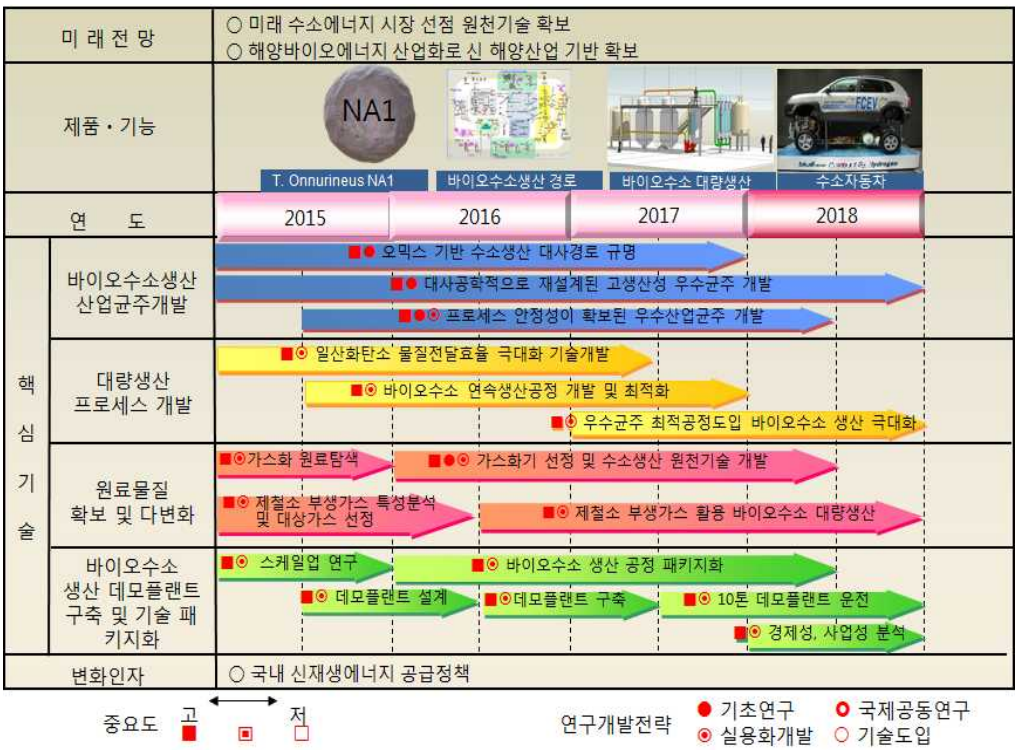
○ 모든 전략개발기술에 대해 R&D 사업으로 진행할 계획이며, 매력도-적합도 분석에서 도출된 우선 순위를 기준으로 기술별 개발 시기를 조정

- 실행 로드맵에 제시된 전략개발기술별 추진 시기와 연계하여 연차별 총 연구비 산정

- 2017년 까지 데모플랜트 운전을 위한 원천기술 (우수산업균주 개발, 연속공정개발 및 최적화) 개발을 완료하고, 데모플랜트를 구축

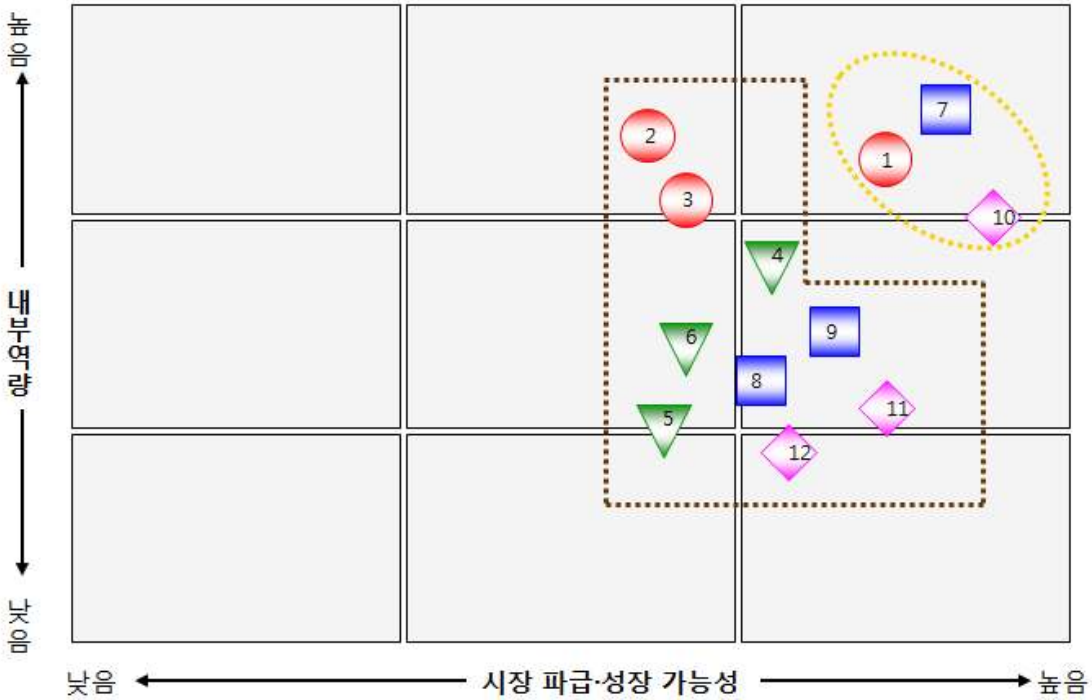
- 2018년, 최적 조건에서 데모플랜트를 1년간 500 시간 이상 운전하고, 일일 바이오수소 생산량 (목표치 200kg)을 기준으로 플랜트의 경제성 및 사업성 분석을 통해 사업화 추진 타당성을 확보

- 2019년 이후 민간자본 위주의 사업화를 추진



<그림 3-23> 해양바이오수소생산 기술 트리

3.5.2 핵심목표별 포트폴리오



핵심기술군 1: 산업균주 개발 기술

1. 수소생산 대사경로 규명기술
2. 대사재설계 우수균주 개발 기술
3. 개발균주 장시간 안정성 평가기술

핵심기술군 2: 원료물질확보 기술

4. 제철소 부생가스 활용 생산기술
5. 석탄가스화 이용 생산원천기술
6. 바이오매스 가스화 이용 생산 기술

핵심기술군 3: 대량생산 공정개발 기술

7. 연속생산 공정개발·최적화 기술
8. CO 물질전달효율 극대화 기술
9. 장기연속 대량생산 기술

핵심기술군 4: 데모플랜트구축·실증생산기술

10. 10톤 데모플랜트 설계·시공 기술
11. 대량생산 공정 Scale-up 기술
12. 기술패키지화 및 사업성·경제성 분석 기술

3.6 2020 청사진

최종활용
상품 및 서비스
연료전지, LCD·반도체 등 전자, NH3 등 소재생산, 개질 등 정유공정
지적자산
논 문
특 허
Know-how
연구결과물
핵심원천기술
보고서
프로세스 최적화
설계 및 시공
산업화 기반구축
핵심요소기술
생산시스템 설계
우수균주 개발기술
원료다변화 기술
최적화 공정 기술
전문인력 양성기술
실증생산 기술
부산물 처리기술
바이오매스 활용기술
연속생산 공정기술
플랜트 구축기술
공정 Scale-up 기술

4. 추진계획 및 전략

4.1 추진계획

4.1.1 추진방향

추진방향

▶ 해양극한미생물을 활용 경제적인 바이오수소 생산 전략 수립

▫ (연구내용) 우수산업균주개발, 수소생산 프로세스 최적화, 원료물질확보, 스케일업 및 대량생산 실증 등의 4대 핵심요소기술 개발

▫ (협력체계 구축) 전문성이 있는 산·학·연 협력체계를 구축하여 연구개발을 추진

- 우수산업균주개발 및 프로세스개발/최적화 요소기술부분은 대학, 출연(연)의 관련 분야 전문가들이 주축 연구개발 진행
- 원료물질 확보를 위해 일산화탄소 함유 부생가스를 제공할 수 있는 기업체, 대표적으로 제철소의 참여 유도
- 실증사업 부문은 바이오수소/바이오가스 엔지니어링 노하우가 축적된 기업체의 참여를 통해 효율적인 생산라인을 구축하여 실증사업을 진행

○ 국내 수소생산 규모인 약 250만톤(2012기준, 약 3.8조원)에 선제적으로 대응하면서 수소활용 분야의 시장 확대에 발맞추어 탄력적으로 생산규모 확대 추진

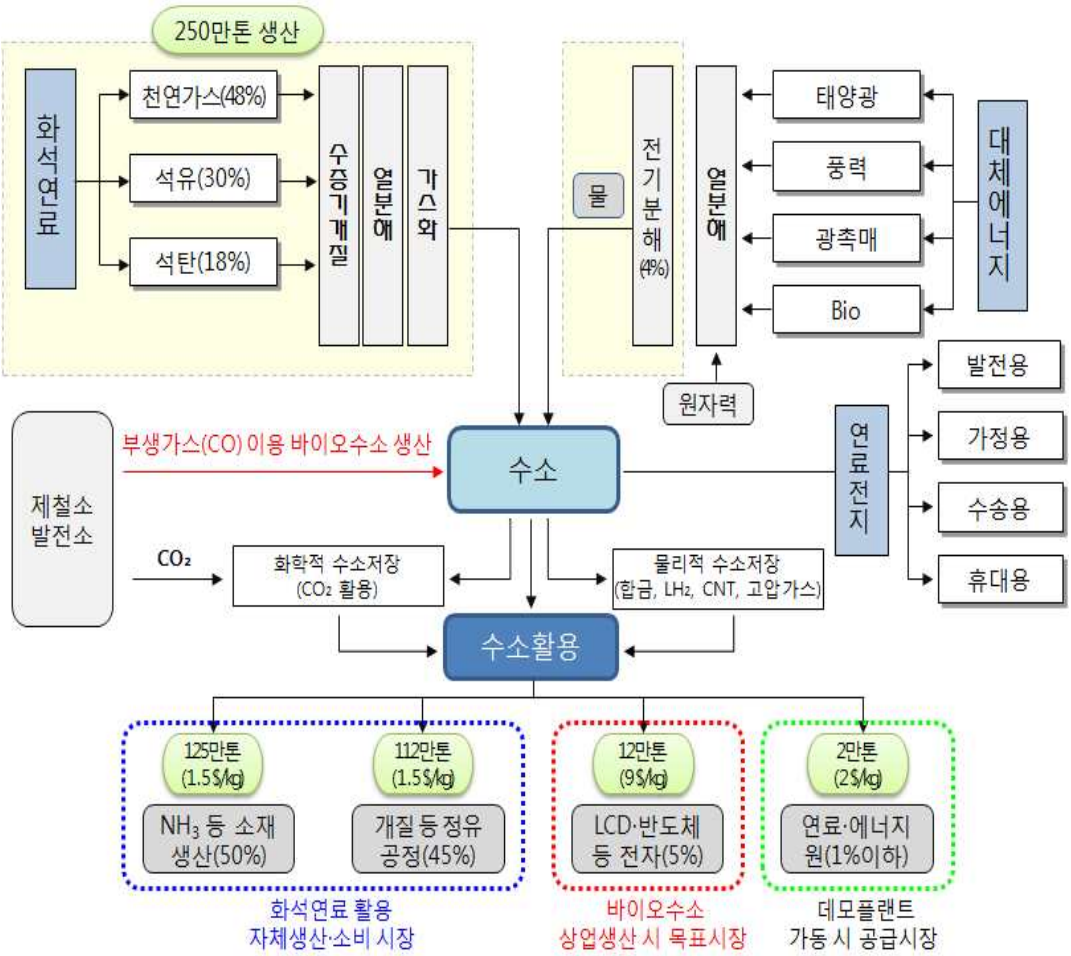
- 현재 수소생산 방식은 천연가스(48%), 석유(30%), 석탄(18%), 물전기분해(4%)로 생산되고 있으며, 자체 소비는 95%, 시장 거래는 5%(약 12만톤)
- 수소활용 분야는 암모니아 등 소재생산에 약 50%, 탈황, 개질 등 정유공정에 45%, LCD·반도체 등 전자·석유화학에 5%, 그리고 연료·에너지원에 1% 이하가 활용되고 있음

○ 이에, 본 해양바이오수소개발 사업은 반응기 10톤 규모의 데모 플랜트 시범생산을 통하여 연간 100톤 규모의 수소를 생산하여 kg당 2US$에 거래되고 있는

연료·에너지원 분야(시장 규모 2만톤, 시장 점유율 1% 이하) 시장에 공급

○ 이후, 기술이전을 통한 민간기업 중심의 상업화 단계에서는 kg당 9US$(100% 순수 수소)에 거래되고 있는 LCD·반도체 등 전자·석유화학 분야(시장 규모 25만톤, 시장 점유율 5%) 시장에 '25년까지 수소시장 점유율 3%를 목표로 공급

- 수소시장 점유율: ('20) 25,000톤(수요 1%) → ('25) 75,000톤 (수요 3%) → ('30) 250,000톤 (수요 10%)



<그림 4-1> 부생가스이용 바이오수소생산 및 활용계획

4.1.2 추진체계

○ 관련 연구 전문기관 및 산업체의 국가역량이 집중된 산·학·연 연구체계로 수행

- 해양극한미생물/바이오수소 연구의 역량을 감안하여 한국해양과학기술원이 전

문기관으로 참여

- 산업균주개발을 위해 한국기초과학지원연구원 등 오믹스연구 전문기관 참여

- 수소에너지 연구개발 경험 및 역량을 감안하여 한국에너지기술연구원 등 전문기관 참여

○ 1안 : (기업주관) 해양바이오수소 대량생산기술의 상용화를 위해 산업분야의 기업이 주관으로 수행하고, 세부 추진전략별로 전문성을 보유한 출연연, 대학, 민간기업이 협업하여 수행하는 산·학·연 융합연구체계로 구성

- (기업) 해양바이오수소 대량생산기술 상용화 기술개발 총괄 업무 수행

  * R&D 단계별 목표 및 계획, 예산, 조직(사무국, 운영위원회, 심의위원회) 등 전담 주요 인력 운영 등 총괄

  * 기술이전후 기업의 자체사업화, 기술 실용화 및 정부사업화 지원 수행

- (KIOST) 해양극한미생물/바이오수소 산업균주 개발

  * (KBSI) 산업균주개발을 위한 오믹스연구 수행

- (KIER) 수소에너지 연구개발 경험 및 역량을 감안하여 한국에너지기술연구원 등 전문기관 참여

- (제철소) 원료물질 확보를 위해 일산화탄소 함유 부생가스 원료공급(현대제철, 포스코 등)

- (민간기업) 바이오수소 생산 및 활용을 통해 상용화 비즈니스 역량을 보유한 산업체중심으로 수행

<그림 4-2> 기업주관 추진체계

○ 2안: (사업단 체계) 관련 연구 전문기관 및 산업체의 국가역량이 집중된 산·학·연 연구체계

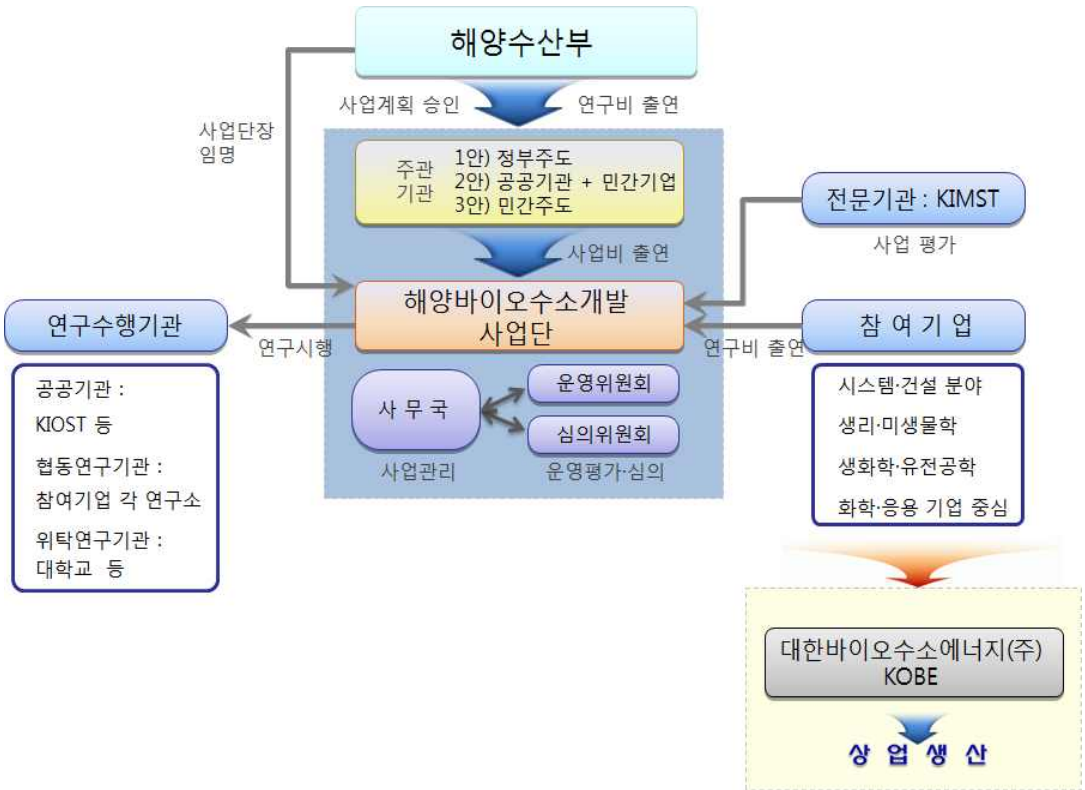
- 해양극한미생물/바이오수소 연구의 역량을 감안하여 민간대표기업, 공사 등이 주관연구기관을 담당하고 세부 추진전략별로 전문성을 보유한 출연(연), 대학, 민간기업이 협업하여 수행하는 산·학·연 융합연구체계로 구성함.

- 산업균주개발을 위해 한국해양과학기술원, 한국기초과학지원연구원 등 오믹스 연구 전문기관 참여

- 수소에너지 연구개발 경험 및 역량을 감안하여 한국에너지기술연구원 등 전문기관 참여

- 원료물질 확보를 위해 일산화탄소 함유 부생가스를 제공할 현대제철 또는 포스코 등의 제철소의 참여가 필요

- 바이오수소 생산 및 활용을 통해 상용화에 관심 및 의지가 있는 산업체의 참여 필요



<그림 4-3> 사업단 추진체계

4.2 운영주체 및 방식

4.2.1 고려요소

○ 해양바이오수소개발 사업의 법적지위로 고려할 수 있는 것은 책임운영기관의 설치·운영에 관한 법률 제4조 및 해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률 제40조의 규정에 따라 소속기관, 지방자치법 제112조의 규정에 따른 지자체 행정기구, 지방공기업법에 따른 지방공기업, 민법 등에 따른 독립 법인체 등을 고려해 볼 수 있음

○ 운영방식은 센터의 법적 지위에 따라 국가 또는 지자체가 직접 운영할 것인지, 위탁을 통해 간접 운영할 것인지 등을 고려해 볼 수 있음

○ 본 보고서에서는 각각의 법적 지위에 따른 운영방식들을 비교해 보고 해수자원화 연구의 정체성 확립 및 기능의 효율화를 위한 최적의 대안을 설정하고자 함

○ 운영 전략

- R&D 사업에 대한 운영 전략을 나타낸 것으로 연구단이나 사업단(KIOST 혹은 민간기업 주관) 형태로 진행되는 것에 대한 특징을 비교하였음

- 사업단이나 연구단 형태로 진행될 경우에 대하여, 사업 추진 체계를 각각 나타내었음

4.2.2 운영주체별 운영체계와 운영근거

❑ 중앙행정기관 소속기관

○ 운영체계

- 책임운영기관의 설치·운영에 관한 법률 제4조 및 해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률 제40조의 규정에 따라 소속기관을 설치.운영하는 체계

- 해수자원화 연구센터의 효율적 운영 및 관리를 위하여 해수자원의 특성.개발 등에 관한 관련 전문가를 두어야 하며, 중앙정부 또는 지자체 예산으로 기관

의 운영 및 연구개발 사업비 지원

○ 설치근거

- 책임운영기관의 설치.운영에 관한 법률 제4조

- 해양생태계의 보전 및 관리에 관할 법률 제40조

○ 사례

- 환경부 국립생물자원관

- 국립현대미술관

- 국립중앙과학관

○ 장단점

장 점	단 점
- 책임 경영 가능 - 운영비의 안정적 확보 - 국가정책하의 일관성 있는 추진 가능	- 공무원 집단으로 전문 연구영역의 점진적 확대 어려움 - 연구사업의 자율적.독립적 운영 불가능 - 설립 준비기간이 많이 소요

❑ 지자체 행정기구

○ 운영체계

- 지방자치법 제112조 규정에 따라 지자체장이 소관사무를 분장하기 위해 직속기관, 사업소 등의 행정기구로 소관 지자체 산하에 두고 관리 운영하는 체계

- 지자체 예산으로 기관의 운영 및 연구개발 사업비 지원

- 별도의 운영조례 제정을 통해 운영

○ 설치근거

- 해당 지자체의 행정기구 설치 조례

○ 사례

- 경상북도 보건환경연구원(직속기관, 경상북도 영천시 소재)

- 전라남도 해양바이오연구원(사업소, 전라남도 신안군 소재)

○ 장단점

장 점	단 점
- 국가차원에서의 지속적.체계적 지원을 통해 기관 설립 후 조기 안정화 가능 - 운영비의 안정적 확보 - 국가정책하의 일관성 있는 추진 가능	- 공무원 집단으로 전문 연구영역의 점진적 확대 어려움 - 연구사업의 자율적, 독립적 운영 불가능

❑ 지방공기업

○ 운영체계

- 지자체가 독립된 법인의 형태로 설립.경영하는 체계로서 지방자치단체의 고유업무를 '공공성과 수익성 및 전문성' 확보를 이유로 설립하여 전담.대행케 하는 일종의 공공기관

- 주로 도시시설, 공원시설, 주차장시설, 체육시설 등 시설관리 분야에서 설립

○ 설치근거

- 지방공기업법 제2조, 제76조

○ 사례

- 울산광역시 남구 장생포고래박물관

○ 장단점

장 점	단 점
- 공공성, 수익성, 전문성 동시 확보 (행정기구보다 전문성 강화) - 운영비의 안정적 확보	- 연구기관으로서 자율적, 독립적 운영 불가능 - 공공기관으로서 전문성, 수익성에 비해 상대적으로 공공성에 비중을 두게 됨 (연구사업의 제한 요소로 작용) - 공사설립을 위한 재정확보 난이 - 공사설립 법안이 필요

❑ 법인체

○ 운영체계

- 민법 제32조에 근거하여 혹은 특별법 제정을 통해 독립 법인체를 설립하여 운영하는 방식(특수목적법인, 비영리법인 등)

- 건립 주체가 법인 출연금을 통해 법인 설립을 지원하고 법인의 이사장이 되어 연구기관을 운영하고 지휘.감독

○ 설치근거

- 민법 혹은 특별법

- 재단법인 설립 및 지원에 관한 지자체 조례

○ 사례

- (재) 경북바이오산업연구원

○ 장단점

장 점	단 점
- 운영의 독립성, 자율성 보장 - 지속적인 조직의 안전성, 자생력 제고 가능 - 관련 전문기관으로 하여금 법인체 운영을 위탁하기 용이	- 초기 출연금을 비롯한 안정적 재원확보의 노력 필요 - 초기 안정화 및 자립 단계까지 시간소요(자립단계 전까지 중앙정부 또는 지자체의 재정, 인력, 행정상 지원 필요) - 관리감독기관과의 연계성 저하 - 중앙정부 또는 지자체 관리감독에 시간과 비용소요

○ 특수목적법인(Special Purpose Company, SPC)화 문제점

- 운영원리가 시장주의(경쟁, 성과, 수익) 원칙 지배

  • 장기적인 투자와 국가의 체계적인 관리가 필요한 R&D 분야에서 선제적 기초원천기술 확보 연구성격이 강한 기술개발 분야에서는 본래의 취지는 사라지고 수익사업 확대로 영리추구기관으로 전환될 소지가 있음

- 기초과학인재 육성과 미래 해양산업 육성에 대한 투자를 해야 하는 정부의 의무와 책임을 스스로 포기하는 모습으로 기초학문의 붕괴와 더불어 해양 관련 기초학문을 연구하려는 고급 우수인재들의 해외유출 초래 우려
- 단기적 성과에 급급한 연구과제 수행을 통해 기초학문을 연구하는 구성원들의 사기 저하 우려

- 비정규직 양산 및 신분 불안 초래

- 재정자립도가 취약한 상황에서 비정규직 인력 활용을 통한 최선의 인력운영 방법을 강구하게 되어 정규직 대비 비정규직 인력 증가 초래 우려
- 비정규직 인력의 증가로 연구효율 저하 및 핵심연구사업 수행 불가

- 신생 연구기관의 기능적.재정적 자립에 어려움 봉착

- 현재 우리나라의 해양자원화에 대한 초기 연구단계에서는 정부의 안정적인 지원을 통해 조직의 안정화가 중요

4.2.3 운영방법

❑ 직접운영

○ 해양수산부 소관 책임운영기관[viii]으로 운영케 하는 방식

○ 직접운영의 장점

- 연구, 행정관리의 일원화를 통해 예산확보 및 실행의 효율화

- 일관된 경영체제하의 기관운영을 통해 기관설립 목적 달성용이

- 국가차원에서의 지속적.체계적 지원을 통해 기관 설립 후 조기 안정화 가능

○ 직접운영의 한계점

- 해양바이오수소에 대한 전문 연구영역 점진적 확대의 어려움

viii 책임운영기관이란 공무원 또는 민간인을 대상으로 공개모집을 통해 채용한 기관장과 임기 및 경영실적 계약을 맺고, 기관장에게 인사예산 등 자율권을 부여하되 운영성과에 책임을 지도록 하는 제도임. 현재 책임운영기관으로는 산림청의 국립산림연구원, 교육부의 국립과천과학관, 농림수산식품부의 국립수산과학원, 환경부의 국립생물자원 등이 있음

- 연구사업의 독자적인 추진 한계에 봉착하여 유연성 및 효율성 결여 초래

❑ 간접운영(전문기관위탁)

○ 전시 및 일반 행정 기능의 경우 국가운영, 연구기능의 경우 해양분야 전문기관에 위탁하는 방식

○ 간접운영의 장점

- 위탁기관의 기존 해양바이오수소 연구 전문인력 및 장비 활용을 통해 운영예산 절감이 가능하고, 우수한 전문인력 확보 용이

- 연구기능의 위탁을 통해 정부기관이 전문연구기관으로의 성장하는 어려움을 극복하고, 세계적 기관으로 발전하기 위한 토대 마련 가능

- 정부기관과 연구기관의 효율적 연계 강화를 통해 연구행정, 연구관리, 성과확산의 시너지 효과 창출 가능

○ 간접운영의 한계점

- 연구기능과 행정관리기능의 분리로 인해 일원화된 연구관리 및 경영시스템의 구축 어려움

4.2.4 운영방식

❑ 연구단/사업단(민.관.연 공동 운영)

○ R&D 사업의 운영 방식은 목적이나 형태 등에 따라 사업단 방식과 연구단 방식으로 구분할 수 있음

- 사업단은 별도의 법인으로 운영되는 반면, 연구단은 중대형 핵심기술 개발을 위해 연구책임자가 별도의 연구단을 구성하여 운영하는 방식임

○ 해양바이오수소개발 사업도 중앙정부.지자체 소관 연구개발사업 운영 규정 및 운영지침 개정(안)에 따라 사업단 또는 연구단의 형태로 추진할 수 있음

- 세부 추진 방식에 대해서는 해양수산부 및 전문기관과 협의를 통해 결정 필요

<표 4-1> 사업단과 연구단의 특징 비교

	사업단	연구단
목 적	대형 연구개발사업 관리의 특수성이 인정되며, 별도의 관리가 필요한 경우 수립	중대형 핵심기술 개발을 위해 유사 세부과제가 유기적으로 연계된 연구개발과제를 수행
운영형태	법인 또는 독립된 형태로 운영 ※ 해양수산부 승인 후 민법상의 법인으로 설립	주관연구기관 하에 연구책임자가 별도의 연구단을 구성하여 운영
장 점	전문기관의 장은 사업단의 독립적인 운영을 보장하고 연구기간 동안 사업단장에게 사업단의 운영·관리에 전념할 수 있도록 최대한의 자율성을 부여 (세부과제 선정권한)	세부과제 선정 시 전문기관과의 협의 후 결정 (사업단 보다 자율성 미약)
단 점	사업단장은 단장으로 선정된 이후에는 당해 사업단 과제 이외에 새로운 과제에 참여할 수 없음	연구단장은 단장으로 선정된 이후에는 당해 연구단 과제 이외에 새로운 과제에 참여할 수 없음

○ 해양수산부 소관 연구개발사업 운영 규정 및 운영지침 개정(안)에 따르면, 사업단과 연구단의 정의뿐만 아니라 구성 및 운영 방안, 단장의 임무 및 역할, 관리조직 등에 대해 구체적으로 명시되어 있음

해양수산부소관 연구개발사업 운영규정

제2조(용어의 정의) 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다. -중략-

9. "사업단"이란 연구개발사업의 특성과 연구개발과제의 성격, 규모 또는 기술발전 단계 등을 고려하여 **법인 또는 독립된 형태로 운영하는 연구조직**을 말하며, "사업단장"이란 사업단의 업무를 총괄하는 책임자를 말한다.
10. "연구단"이란 중대형 핵심기술을 개발하기 위하여 유사 세부과제가 유기적으로 연계된 연구개발과제를 수행하는 연구조직을 말하며, "연구단장"이란 연구단의 업무를 총괄하는 책임자를 말한다.

제15조(사업단) ① 장관은 연구개발사업의 특성 등에 따라 전문기관의 장에게 제2조제9호에 따른 사업단을 구성하여 운영하도록 할 수 있다

② 전문기관의 장은 장관의 승인을 받아 사업단의 구성.운영과 사업단장의 권한.임무 등에 대한 세부사항을 따로 정하여 시행할 수 있다

③ 전문기관의 장은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 일정한 절차를 거쳐 사업단장을 해임하거나, 사업단을 해체 할 수 있으며, 이 경우 그 결과를 장관에게 보고하여야 한다.

1. 사업단 운영 부실
2. 연구성과 불량
3. 그 밖에 중대한 협약 위반 등

제16조(연구단) 전문기관의 장은 주관연구기관의 장에게 제2조제10호에 따른 연구단을 구성하여 운영하도록 할 수 있다. 이 경우 제15조제2항과 제3항을 따라서 쓴다.

연구개발사업 운영지침 개정(안)

Ⅱ. 3. 사업단

가. 사업단의 구성 및 운영

1 전문기관의 장은 사업단장으로 하여금 사업단 내에 연구를 수행하는 연구조직과 사업단의 업무를 지원하는 관리조직을 두도록 하여야 하며, 사업단장이 소속된 주관연구기관의 장은 사업단의 운영을 위한 관리조직에 행정지원 및 연구개발비의 사용·관리 등을 전담하는 주관연구기관 소속의 정규인력을 지원할 수 있으며, 간접비의 일부를 사업단에 지원할 수 있다.

2 전문기관의 장은 사업단의 독립적인 운영을 보장하고 연구기간 동안 사업단장에게 사업단의 운영·관리에 전념할 수 있도록 최대한의 자율성을 부여하여야 한다.

3 사업단 과제 내에서는 1개 기관이 세부과제 주관연구기관으로 2개 과제까지 참여할 수 있다. 다만, 과제의 특성상 전문기관의 장이 불가피하다고 판단하는 경우에는 예외로 한다.

4 사업단장은 사업단 운영 전반에 관한 세부사항에 대하여 <별지 제13호 서식>에 의한 운영계획서를 전문기관에 제출하고, 매년 연구기간 종료 후 2월 이내에 운영비 집행에 관한 사항을 전문기관장에게 보고하여야 한다.

5 전문기관의 장은 사업단의 효율적인 운영 및 관리를 위한 운영경비 산정기준 등 세부사항을 별도로 정하여 시행할 수 있으며, 이 경우 전문기관의 장은 장관의 승인을 얻어야 한다.

나. 사업단장의 임무 등

1 사업단장은 다음 각호의 업무를 수행한다.

① 세부과제의 구성, 연구팀의 편성, 연구개발비의 배정, 세부과제의 자체평가 등 사업단의 제반 경영관리에 관한 사항

② 연구개발, 연구개발 성과의 활용 및 확산, 실용화 및 사업화 등에 관한 사항

③ 국내외 기술 및 산업동향의 분석과 이에 대한 신축적 대응, 연구과제의 진행과정 및 연구결과의 검토에 관한 사항

④ 연구수행에 필요한 연구인력의 양성, 지적재산권 및 정보관리, 연구결과에 대한 국내외 학회 및 전문학술지 발표에 관한 사항

2 사업단장은 사업단의 운영 및 관리업무 등을 성실히 수행하여야 한다.

3 사업단장은 세부과제 연구책임자로서 연구를 수행할 수 있다.

4 사업단장은 자체평가 결과 연구성과가 미흡한 세부과제 등에 대하여 세부과제의 지원을 중단하거나 세부과제 연구책임자를 변경하는 등 중요사항이 발생한 경우, 조치결과를 전문기관의 장에게 보고하여야 한다.

Ⅱ. 4. 연구단

연구단의 구성 및 운영에 관한 사항은 사업단의 구성 및 운영에 관한 사항을 준용한다. 다만, 연구단은 특성상 별도의 관리조직이 필요하지 않을 경우 연구단의 업무를 지원하는 별도의 조직을 구성하지 않을 수 있다.

Ⅱ. 3. 연구책임자 또는 연구기관의 참여제한

2 사업단(연구단)장은 단장으로 선정된 이후에는 당해 사업단(연구단) 과제 이외에 새로운 과제에 참여할 수 없다.

4.3 개발사업 구조(안)

❑ 민간투자기업 참여 사업단 구성·운영

○ 사업단

- 효율적인 사업 운영과 관리를 위하여 사업단 체제로 운영
- 사업단 체제의 장점 활용 가능(예산편성, 사업추진력, 사업집중 전담)
- 국내외 민간기업과의 경쟁에 대비 민.연.관이 함께 참여하는 형태로 사업단 운영경험과 노하우를 최대한 활용(유사업무, 업무중복 배제로 효율 제고)

○ 타 지역과의 경쟁에 대비 민.연.관이 참여하는 해양바이오에너지개발사업단(이하 "사업단") 체계 도입

- 체계적 의사결정, 수월.전문적이고 유연한 사업 수행을 위하여 사업단 체제로 운영
  - 산업통상자원부의 "가스하이드레이트 사업단", 해양수산부의 "해저열수광상 개발사업단"도 사업단 체계로 추진

○ 민간투자기업 선정 후 사업단 구성.운영에 관한 세부사항을 규정한 해양수산부 훈령 제정

- 사업단의 구성 : 사업단장 임명, 임기, 근무, 권한과 임무 등
- 사 업 비 : 조달, 운영, 집행실적 보고 등
- 사업관리 : 사업목표 승인, 예산.회계, 지적재산권의 참여지분에 따른 공유, 연구 기자재의 귀속 등

❑ 참여 주체별 역할

○ 국가(해양수산부)

- 개발사업 계획 검토.승인 등 사업을 종합 조정.관리
- 정부 투자비에 해당하는 사업비 출연

• 신속한 의사결정, 사업관리 비용 절감 등을 위하여 국가가 연구.개발 사업 직접 관리(다만, 사업평가는 전문기관에 의뢰)

○ 주관연구기관

- (공공기관 혹은 기업 주관) 사업단을 공공기관 혹은 주관 기업내에 설치하여 상용화 연구.개발 등 사업단의 전반적인 업무 수행 총괄 및 지원

- (주요기능) 원료물질 확보, 대량생산 프로세스 개발, 데모플랜트 구축 및 실증생산 등 R&D연구개발 업무를 전담하여 수행하고, 사업비 조달 등 상업개발 관련 업무도 병행하여 추진

  • 사업추진계획, 연도별 사업비 집행, 사업단장 임면 등에 관한 심의위원회를 주관연구기관 산하에 설치 (중요사항 장관 승인)

  • (주요임무) 사업추진계획, 연도별 사업비 집행, 사업단장 임명 등에 관한 심의위원회를 해수부 담당부처, 한국해양과학기술진흥원, 공공기관장(예, 한국해양과학기술원장, 한국에너지기술연구원장 등), 주관 기업대표와 협의하여 독립 사업단 형태로 설치(중요사항 장관 승인)

- 전문기관(예 한국해양과학기술진흥원 등) : 사업 평가 수행

※ (사업화 전략1) 기술이전후 기업의 자체 사업화

* (정부역할) 후속기술 과제지원, (KIOST) 기술 수탁(수탁사업)

※ (사업화 전략2) 기술 실용화, 정부사업화 지원

* (정부역할) 실용화 지원사업, (KIOST) 기술지분투자(수탁사업)

* 기술이전 계약금 대신, 회사에서 기술에 대한 가치평가후 사업 추진

(ex 바이올시스템즈-투자 연구비에 대한 최저실시료 납부 의무 설정으로 정부 투자에 대한 회수)

○ 참여기업

- 특허기술, 독점개발권 등 사업성과 활용 목적으로 사업비를 매칭펀드 형태로 일부 부담

- 향후 참여기업 공동으로 개발회사를 설립하고, 독점개발권 양수 및 기술실시계약을 통하여 상업 개발 착수

❑ 해양바이오수소개발 사업의 참여기업 모집 방법

○ 민간 사업자가 참여하는 산업균주개발기술, 원료물질확보 기술, 대량생산 프로세스 개발 기술, 대량생산기술 등 해양바이오수소개발 사업(이하 "개발사업")의 정부와 기업이 협력하는 R&BD 모델의 창출

- R&BD: 연구(Research)와 개발(Development)을 통한 수익(Business) 창출

○ 사업기간 : 2015 ~ 2018년(4년간)

○ 사 업 비 : 약 268억원

- 정부의 연구.개발 출연금과 민간투자 금액

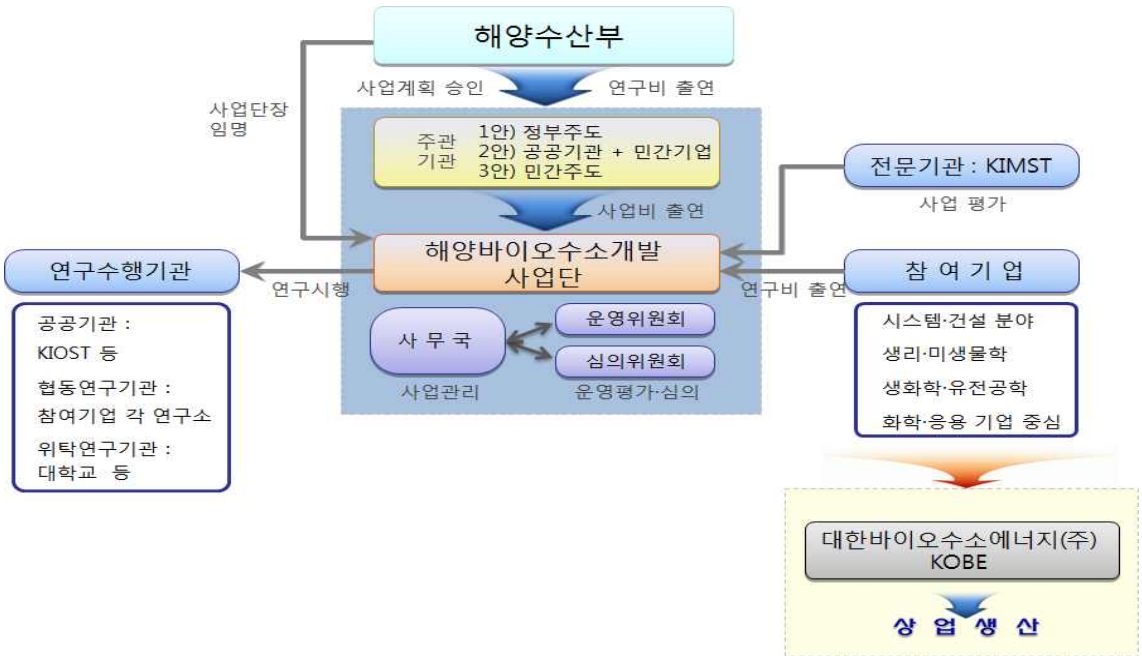
○ 주요 사업 내용

- 산업균주개발기술, 원료물질확보 기술

- 대량생산 프로세스 개발 및 대량생산기술 개발

- 생산 안정성 평가, 대량생산기술 개발 등에 대한 경제성 평가 후 상업생산

○ 사업 추진 체계

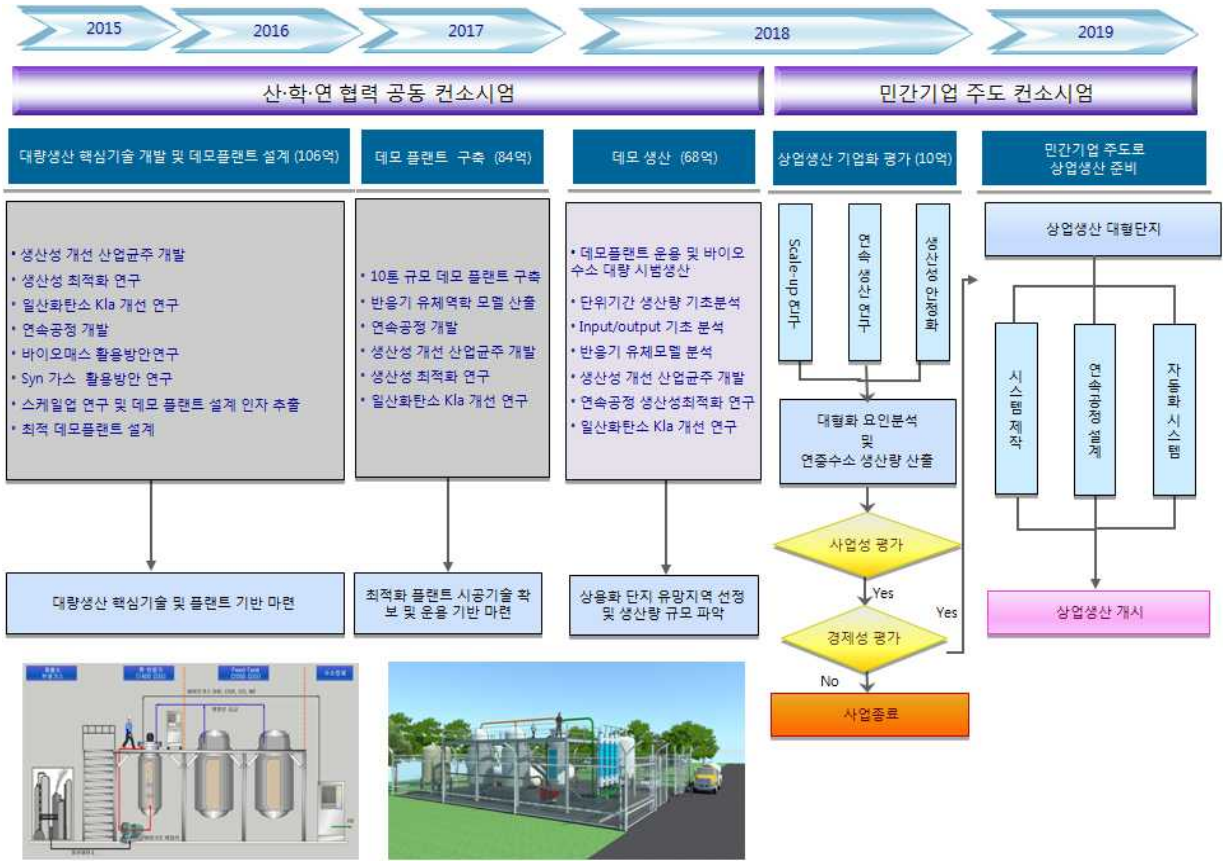


<그림 4-4> 사업추진 체계도

❑ 민자유치 방안

○ 민자유치 규모

- 2015년부터 2018년까지 4년간 총 소요액(268억원)에 대하여 각 연도별 소요액의 25% 이상(68억원)을 민간 투자자본으로 유치
  - 민간투자비율은 주관연구기관에서 참여기업 선정 시 결정하되,
  - 민자 참여 신청금액이 많을 경우 민간투자 비율 확대



○ 참여기업 선정 방안

- 주관연구기관을 주관[ix]으로 하여 공개 모집
- 플랜트.시스템 건설, 생리.미생물학, 생화학·유전공학, 응용화학 등 바이오수소 개발 관련 연구소 및 사업을 하는 실 수요기업 중심

ix 「해양수산부소관 연구개발사업 운영규정」(이하 "규정") 제23조(협약의 체결 등) 제4항 주관연구기관의 장은 참여기업이 있는 경우에는 참여기업의 대표와 참여계약을 맺고 그 참여계약서 및 기업부담금 확약서를 전문기관의 장에게 제출하여야 한다.

○ 참여기업의 재정적.기술적 능력을 심사.평가하여 결정

- 원활한 투자비 조달을 위하여 참여기업은 5개 내외 정도로 선정

  * 참여기업 결정 후 주관연구기관과 참여기업간 사업비 출연, 참여방식, 권리.의무 등에 관한 별도 협약 체결

○ 참여기업 권리보장(인센티브 부여)

- 독점개발권, 기술실시계약권 등을 부여 상업개발 보장

  • 향후 독점개발권 취득 주체인 (가칭) KOBE(대한바이오수소에너지)의 운영을 참여기업이 사업단과 협의하여 주도적으로 결정

  • 개발사업 분담비율에 따라 지분 등 권리 배분

  • KOBE를 "개발회사"로 전환하여 상업개발을 수행하거나, "개발회사"를 별도 설립 시 KOBE의 독점 개발권 양도[x]

  • 개발사업 분담비율에 따라 KOBE 지분을 참여기업에 양도하되, "개발회사"로부터 정부투자액 회수율에 따라 순차적으로 이전

    * 정부는 지분 보유 여부에 관계없이 상업개발에 불참하며, 정당한 사유 없이 사업을 지연하는 경우 외에는 "개발회사"의 운영이나 의사결정 과정에 간여하지 아니함

- 사업 실패 시 투자금액은 투자자가 다른 해양바이오수소개발 사업에 참여하는 경우 1회에 한하여 투자금액으로 인정

  • 성공불 융자 혜택 대신 다른 개발사업에 투자 시 해당 투자비를 인정하는 방식의 투자 위험 완화 혜택 부여

    * 산업통상자원부의 경우: 자원 탐사사업의 경우 성공불 융자제도[xi]를 적용하여 사업실패 시 원리금 상환 감면 혜택

○ 기술료 징수(정부투자비 회수)

- 기술료는 최소 정부투자액 이상으로 하되, 경제성 평가 후 예상수익, 필요비용 등을 고려하여 결정

  • 다른 사업의 예를 참조하여 향후 기술실시계약 단계에서 합리적으로 결정

---

x 향후 기술실시계약 체결시 KOBE가 보유한 정부지분에 해당하는 개발권(소유권)을 양도할 수 있도록 "훈령"에 근거 마련

xi 성공불 융자 : 사업 실패시 원리금 상환 의무를 면제함으로써, 사업실패 위험이 큰 탐사사업에 대한 민간부분의 적극적인 투자를 유도

○ 그 외 조치 및 검토 사항

- 참여기업이 공모로 결정된 이후 연구개발 단계에서 추가 기업의 참여는 제한
- 다만, 참여기업 전부의 동의나 요구가 있는 경우는 예외
- 정부·주관연구기관·참여기업 공동 MOU 체결
- 정부의 적극적인 사업 지원 의지 표명

❑ 개발단계의 정부의 역할

1안 : 민간 100% 주도

○ 정부는 탐사단계에서 투입된 투자비를 기술료로 회수함으로써 민간이 상업개발을 주도

○ 정부 투자비를 기술료로 회수함으로써 민간이 상업개발을 주도하도록 하되, 정부는 회수된 투자비를 새로운 광구확보에 투자

2안 : 주식회사에 정부지분 참여

○ 주식회사에 정부 지분참여

- "개발회사"에 지분을 정부가 확보하여 개발 사업에 참여
- 지분 참여 방안
- 기술료를 회수하지 않고 개발회사의 지분으로 확보
- 기술료로 특정 회사(ex. 연구소기업)의 지분을 확보하고 이 기업이 개발회사에 참여하는 방안
- 별도의 예산으로 개발회사의 지분 확보

○ 정부가 기업을 통해 민간에 투자하는 법률상의 기업의 종류

- 상법상의 회사(영리사단법인): 주식회사, 유한회사, 합명회사, 합자회사, 유한책임회사
- 개별 특별법상의 특수법인: 공사(개별 특별법을 근거로 설립되는 특수법인, 즉 정부투자기관)

○ 민간에 투자하는 방법

- 정부가 직접 개별법을 통해 주식회사 형태의 특수법인을 설립하는 방법: 한국전력공사

- 정부가 직접 개별법을 통해 특수법인을 설립하는 방법: 한국토지주택공사, 한국 수자원공사, 금융감독원(무자본 특수법인) 등

○ 정부가 민간이 설립한 주식회사에 직접 출자하는 방법: 우리은행 등 민간은행 (지분이 낮아도 사업자금을 정부가 지속적인 지원할 경우 통제 가능)

3안 : 공사 설립 후 정부가 개발 주도

○ 공사 설립 후 정부가 개발 주도

- 정부가 준시장형 공기업(자체수입비율 50~85%)을 설립하여 개발 주도

- 공공기관의 신설 심사요소별 논리적 준비 필요

<표 4-2> 공공기관 및 지분참여에 대한 장단점

구 분	장 점	단 점
공사	- 국가정책하의 일관성 있는 추진 가능	- 공사 설립을 위한 재정 확보 난이 (수천억원 필요) - 기존 정책방향과 배치 (정부는 상업개발에 불참하며 개발회사의 운영이나 의사결정 과정에 간여하지 아니함) - 공사 설립 법안 필요 • 국가정책상 공사 설립 난이 • 해양수산부 등 중앙정부의 설립목적에 대한 반대 예상 - 설립 준비 기간 많이 소요 - 해양바이오수소개발에 대한 경험 전무
주식회사 (지분참여)	- 국가의 역할 최소화 형태로서 일정부분 적합 - 상업화에 가장 적절한 형태(이윤 추구목적) - 의사결정 단계 간소화되어 사업 추진의 효율화 기대	- 국가의 의사 반영 어려움 - 투자자 확보 어려움

4.3.1 주요기능

○ 해양바이오수소개발 사업의 주요기능은 기관의 발전 비전 및 미션 목표에 근거하여 다음의 3가지로 설정함

- 해양바이오에너지 상업생산시스템 및 대량생산체제 구축
- 전문연구인력 양성
- 정책·산업 육성 지원 및 협력 네트워크 구축

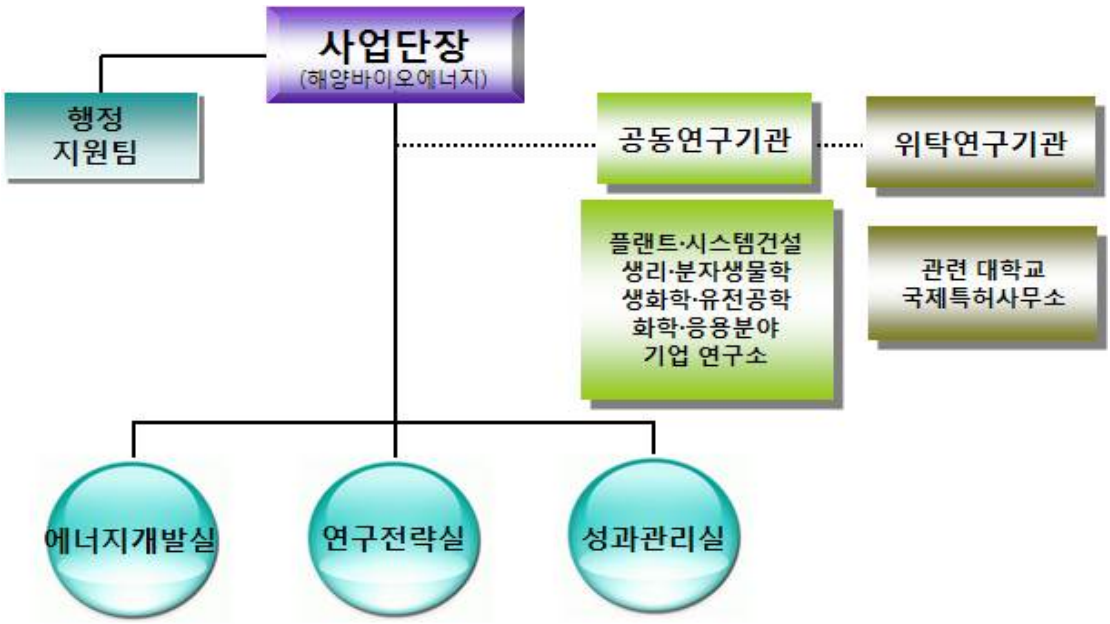
4.3.2 조직

○ 해양바이오수소개발 사업의 조직은 3실, 1팀으로 구성하고, 인원은 사업단장을 포함하여 총 26명이 소속됨

- 해양바이오수소개발 사업단은 R&D 연구개발을 위해 에너지개발실, 연구전략실, 성과관리실 등의 3개실과 행정지원팀으로 구성

4.3.3 주요업무 및 인원 구성

해양바이오수소개발(3실1팀/22명)



<그림 4-5> 해양바이오수소개발 사업단의 조직도

○ 구성 : 에너지개발실(15), 연구전략실(3), 성과관리실(2), 행정지원팀(2)

○ 기능

- 우수산업균주 개발, 대량생산 프로세스 개발, 원료물질 확보 등 연구 업무
- 해양바이오수소 연구개발 동향분석 및 전략수립 업무
- 지적재산권의 출원.등록 등 연구사업 실적관리 업무

☐ 에너지개발실

○ 인원 : 15명

○ 주요업무

- 우수산업균주개발 연구
- 해양바이오수소 원료효율 확보 연구 업무
- 대량생산 프로세스 개발 및 데모플랜트 구축·시범생산 업무
- 해양바이오수소 생산성 향상 방안 연구

❑ 연구전략실

○ 인원 : 3명

○ 주요업무

- 해양바이오수소 연구개발 전략수립
- 해양바이오수소 개발기술 국내외 동향 분석
- 종합연구계획 수립.조정 및 연구과제 홍보.확산계획 수립

❑ 성과관리실

○ 인원 : 2명

○ 주요업무

- 지적재산권의 출원·등록 등 연구사업 실적관리
- 연구결과에 대한 조사·분석·평가 및 연구과제 관리

❑ 행정지원팀

○ 인원 : 2명

○ 주요업무

- 인사, 연금, 급여 및 복리후생, 교육훈련에 관한 사항
- 자금의 운용, 회계 및 결산 업무
- 전기시설 및 통신시설 유지 보수에 관한 사항

4.4 단계별 운영전략

4.4.1 1단계: 기반조성건설 단계(2015년)

❑ 목적

○ 해양바이오수소 10톤 규모의 데모 플랜트를 설계·시공하고, 기본 인프라(인력, 기장비), 재원 확보 등을 통하여 데모 플랜트 구축을 준비

❑ 1단계 주요 사업

○ 건설 행정 제반업무, R&D 아이템 발굴.관리 및 연구계획 수립

○ 해양바이오수소 데모 플랜트 연구센터의 기본계획 및 중장기 발전계획 수립

○ 운영위원회 구성 및 연구 전문, 행정지원 인력 수급계획

4.4.2 2단계: 발전 단계(2016~2018년)

❑ 목적

○ 상용화를 위한 R&D 연구.개발 역량 강화

○ 중장기 기술이전 및 상용화 플랜트 건설을 위한 민간기업 투자 유치 및 우수 전문연구인력 양성

❑ 2단계 주요 사업

○ 해양바이오수소개발 R&D 연구사업 본격화, 시범생산 운용 시스템 가동

- 우수산업균주 개발, 대량생산 프로세스 개발, 원료물질 확보 등 연구

○ R&D 전문인력 확보 및 양성

○ 산업화를 위한 협력 네트워크 구축 및 홍보.교육프로그램 운영방안 수립

4.4.3 3단계: 산업화 단계(2019년~)

❑ 목적

○ 해양바이오수소 전문 연구기관으로서의 위상 제고

❑ 3단계 주요 사업

○ 해양바이오수소 산업화를 위한 대량생산 R&D기술 확립 및 생산체제 구축

○ 해양바이오수소 관리, 연구 및 지원 통합기능 수행

❑ 대량생산 플랜트 구축 및 생산단가 절감을 통한 산업화 목표

○ 2단계(~ '14년): 톤 규모 실증생산을 통한 사업성 평가(해양과기원내 설치된 실증플랜트 시험장)

추진내용	추진시기
해양바이오수소 대량생산 맞춤형 산업균주 개발	'12년 - '14년
해양바이오수소 연속생산 공정개발	'12년 - '14년
바이오수소 생산성 최적화 조건 및 시스템 개발	'12년 - '14년
해양바이오수소 파일럿플랜트 구축, 실증생산(1일 수소생산량 10kg 규모) 및 경제성 분석	'12년 - '14년

○ 3단계('15~'18): 민간기업 매칭을 통한 산업화에 초점을 둔 기술개발

추진내용	추진시기
해양바이오수소 대량생산 플랜트 구축 및 공정 스케일 업(10톤 반응기 규모)	'15년 - '18년
해양바이오수소 대량생산 기술개발(연간 100톤 생산 기술)	'15년 - '18년

4.5 투자 총괄표

○ 해양바이오수소개발 사업은 지역경제 활성화와 신재생에너지 생산을 통한 국가 녹색성장 견인 등 다양한 기능을 수행할 수 있을 것으로 예상

○ 데모 플랜트를 구성할 시설은 지역경제발전의 기반이 되는 시설이므로, 그 재원은 국비와 민간기업이 중심

- 국비 지원에 대해서는 사업성격을 고려하여 해양수산부 등과 사전협의하여 별도의 국비사업만으로도 추진 가능

- 그러나, 해양바이오수소개발사업인 경우는 민간기업의 참여 투자유치가 충분히 가능한 사업 아이템인 점을 고려해 볼 때 많은 민간참여기업을 유치하여 정부와 기업이 협력하는 R&BD 모델의 전략사업으로 추진 필요

- 사업비(268억원)에 대한 국비(200억원) 및 민간투자기업 분담(68억원)비율 사전협의 필요

  • 해양수산부, 민간기업체와 협의 후 조정

- 해양바이오수소개발 사업의 민간투자 참여기업은 다음과 같은 분야의 참여가 바람직함

  • 해양생물반응기 설계기술 : 플랜트·건설 엔지니어링 분야

  • 해양미생물 대량생산기술 : 생리.분자생물학 분야

<표 4-3> 해양바이오수소 개발사업 투자 총괄표

(단위: 억원)

구분		2015년	2016년	2017년	2018년	계
연차별 연구비	정부	40	40	60	60	200
	민간	7	19	24	18	68
총 계		47	59	84	78	268

추진전략	중점 추진과제	'15	'16	'17	'18	계(억원)
산업균주 개발 및 안정성 평가	○대사재설계 수소생산 맞춤형 산업균주 개발	4	4	4	3	15
	○ 개발 균주 장시간 안정성 평가	5	5	5	5	20
대량생산 프로세스 개발	○ 바이오수소 연속생산 공정 개발 및 최적화	7	7	6	5	25
	○ CO 물질전달효율 극대화	3	5	9	8	25
	○ 장기연속 대량생산 기술개발	-	5	7	8	20
원료물질 확보	○ 제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발	3	4	5	8	20
	○ 석탄가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술 개발	3	2	2	4	11
	○ (해양)바이오매스 가스화 합성가스 이용 바이오수소 생산 원천기술 개발	2	2	3	4	11
바이오수소 대량생산 기술개발	○ 10톤 규모 대량생산 데모 플랜트 설계·시공기술	20	15	-	-	35
	○ 대량생산 공정 스케일 업 연구	-	10	35	23	68
	○ 데모 플랜트 실증생산 및 경제성, 사업성 분석	-	-	8	10	18
총 계		47	59	84	78	268

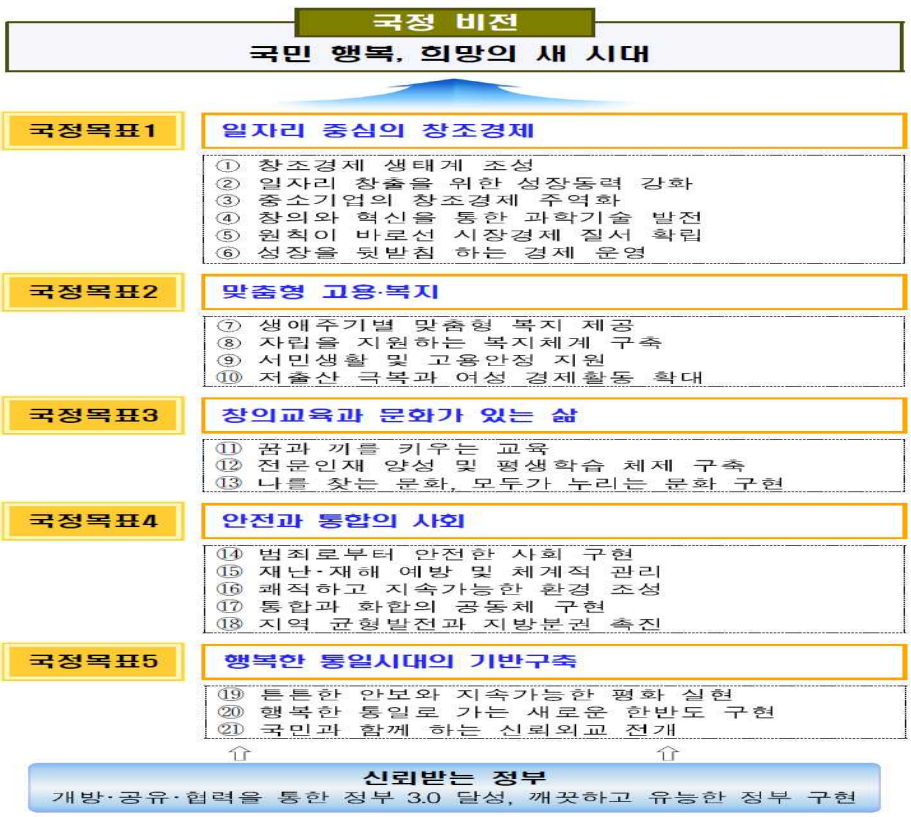
5. 사업 타당성 분석

5.1 정책적 타당성 검토

❑ 국가계획과의 부합성

○ 국정 운영 비전/기조

- 박근혜 정부의 국정운영 비전/기조에서 국민행복과 국가발전이 선순환하는 새로운 패러다임의 시대(국정비전) - 일자리 중심의 창조경제(국정목표_1) - 일자리 창출을 위한 성장동력(전략_2), 창의와 혁신을 통한 과학기술 발전(전략_4) - 해양 신성장 동력 창출 및 체계적 해양관리(국정과제_13), 국가 과학기술 혁신역량 강화(국정과제_24)에 본 연구개발 계획이 해당



<그림 5-1> 박근혜 정부 국정 비전 및 국정 목표

❑ 정부정책

○ 해양수산발전기본계획(2011년~2020년) 및 연도별 시행계획

- 2020년 세계 5대 강국 진입을 위해 신해양산업의 육성 및 전통적 해양산업의 고도화 목표 등 제시

○ 과학기술기본계획(2008년~2012년) 및 연도별 시행계획

- 과학기술본법 제7조에 따른 연도별 범부처 시행계획
- 전략 및 중점 추진과제에 대한 정책 및 사업 중 해양 · 극지 과학기술 역량 강화 계획 포함

○ 해양과학기술 중장기계획(2008년 2월)

- 해양수산발전기본법에 근거한 해양과학기술 부문의 주요 R&D 기본 계획
- 향후 5년간(2009년~2013년) 집중 투자할 기술 육성전략 방향 제시

○ 제4차 기술이전·사업화 촉진계획(2012년~2014년)

- 시장과 기술공급의 불일치를 해소하고 "가치창출형 R&BD로의 전환을 위한 기술개발의 사전 기획비 확대, 비즈니스모델 공모사업 신설 등

○ 2020 MT 로드맵 수립

- 국가과학기술위원회 본회의 심의 · 의결된 해양 R&D 분야 국가계획
- 2차 OK 21추진전략, MTRM(2005년) 등 상위 계획과 연계하여 첨단 해양산업 진흥, 기후변화 · 연안재해 대응, 해양경제영토 확보, 국민 삶의 질 향상 등의 4대 이슈에 대응할 13대 전략기술 및 50대 중점과제 도출

○ 제1차 산업융합 발전 기본계획(2013년~2017년)

- 『산업융합 촉진법』 제5조에 근거, 매 5년마다 수립되는 정부 차원의 법정 국가계획
- 산업융합발전 목표 및 정책방향, 산업융합 촉진기반 조성 및 혁신역량 강화, 산업융합 연구개발 및 사업화 촉진, 산업융합 문화 확산 등 포함

- 기획재정부, 교육부, 안전행정부, 문화체육관광부, 농림축산식품부, 산업통상자원부 등 관계 장관 및 민간위원 등 25명으로 구성된 『산업융합발전위원회』 심의 · 의결

❑ 관련 법령

○ 기술이전 및 사업화 촉진에 관한 법률(지식경제부, 2006년 7월 개정) 제5조(기술이전·사업화 촉진계획)

- 기술이전·사업화의 정책목표와 전략, 촉진계획의 시행을 위한 예산에 관한 사항, 기술이전·사업화를 촉진하기 위한 기술이전·사업화 촉진계획을 수립·시행

○ 국가연구개발사업 등의 성과평가 및 성과관리에 관한 법률(미래창조과학부, 2005년 12월) 제12조(연구성과 관리·활용 기본계획)

- 5년마다 연구성과 관리·활용의 기본방향, 특허, 논문 등 연구성과 유형별 관리·활용 방법에 관한 사항 등을 포함하는 기본계획을 마련

○ 해양수산발전기본법 제6조(해양수산발전기본계획), 제17조(해양과학조사 및 기술개발 등)

- 해양자원의 합리적인 개발 및 이용 등에 관한 사항, 해양산업의 육성에 관한 사항, 해양수산의 발전기반 및 환경보전의 추진에 관한 사항 등을 담은 해양수산발전 기본계획을 수립 시행

- 해양과학기술의 향상과 실용화·산업화를 촉진하기 위한 해양과학기술 개발계획을 수립하여 시행

○ 과학기술기본법 제7조(과학기술기본계획)

- 과학기술혁신 관련 산업정책, 인력정책 및 지역기술혁신정책 추진방향이 포함된 과학기술기본계획을 수립 추진

○ 산업기술혁신촉진법(산업통상자원부)

- 국내 신기술(NET) · 신제품(NEP) 인증제도로서 국내기업, 연구기관, 대학 등에서 개발한 신기술을 조기에 발굴하여 그 우수성을 인정해줌으로써 기술개발을 촉진하고 신기술제품의 시장 진출을 지원

5.2 기술적 타당성 검토

5.2.1 기존 연구사업과의 중복 및 연계성

❑ 유사과제 및 중복성 검토

○ 본 핵심과제의 총 사업기간은 총 4년으로 구성됨. 한국의 순수기술로 확보한 원천미생물자원과 프로세스기술로 부생가스/산업폐가스 원천물질로 바이오수소를 생산하는 세계최초로 시도되는 기술임. 향후 4년 연구기간에 걸쳐 성능확보 및 실증연구를 통한 기술이전을 포함하는 핵심요소 기술간의 통합화/실용화를 진행함

기존 연구과제			중복성 회피방안 (차별 항목)
과제명	세부내용	중복도	
아래 표 참조	• 광이용 바이오수소 생산 • 유기성 폐기물 이용 바이오수소 생산 • 광반응기 구축 수소생산	25	• 본 연구에서 적용하고 있는 미생물은 해양 열수구에서 KIOST가 분리한 한국의 원천생물자원인 Thermococcus onnurineus NA1으로 타 사업에서 시도된 적 없음.
			• 개발하고 있는 부생가스이용 바이오수소 시스템은 국외, 국내 세계 최초 모델이므로 국내에서 개발된다면 국제적인 차별화가 가능할 것으로 보임
			• 부생가스/신가스 이용 바이오수소 데모플랜트는 국내외 최초의 시도. • 핵심미생물과 수소생산 프로세스가 모두 특허등록을 통해 원천기술을 확보하고 있어 세계적인 기술패키지 수출이 가능할 것으로 기대. • 데모플랜트 실증을 통해 기술패키지화에 주력

<표 5-1> 바이오수소 발효기술 관련 정부 R&D 과제목록(2002-2013)

부처	연구기관	과제제목
교육부	가톨릭대학교	광유기영양성 세균의 세포에너지 증진 전략 및 바이오 수소생산의 적용
	부산대학교	대사흐름분석을 이용한 Rhodopseudomonas palustris P4의 수소생산능 향상 연구
	부산대학교	수성가스 개질에 의한 생물학적 수소생산 연구
	가톨릭대학교	시스템 생물학에 기반한 고에너지 세포 모듈의 구축 및 대사공학적 재설계를 통한 바이오 수소 생산 균주 개발
	한국해양대학교	유기성 폐기물을 이용한 연속 바이오수소 생산 기술 개발
	한국과학기술원	혼합혐기성미생물에서의수소생산미생물의거동및침적형막을이용한혐기성수소반응조개발
미래부	한국에너지기술연구원	2단 발효공정(혐기+광합성)에 의한 생물학적 수소생산 실증연구
	포항공과대학교	Clostridiumthermocellum을이용한수소화효소의과다발현및공정최적화를통한생물학적수소생산수율증대에관한연구
	한국에너지기술연구원	purple non-sulfur 세균에 의한 태양광 이용 생물학적 수소생산 및 통합 실증연구개발
	한국원자력연구원	감마선이용남세균의hox오페론조절을통한수소생산효소활성증진연구
	포항공과대학교	다목적 고성능 수소 생산 공정 최적화
	포항공과대학교	대사공학적 방법에 의한 고수율 수소 생산능을 가진 재조합 대장균 개발
	부산대학교	대장균내 합성생물학 기법을 이용한 새로운 전자전달시스템의 구축 및 바이오수소의 생산
	포항공과대학교	바이오수소에너지의 효율적 생산을 위한 산소내성균주 개발
	한국에너지기술연구원	생물학적 변환기술에 의한 수소생산
	포항공과대학교	생물학적수소생산수율증대및최적화연구
	포항공과대학교	생물학적수소생산기작및최적화연구
	연세대학교	생물회로설계 및 프로그래밍을 통한 고효율 바이오매스 전환균주 개발
	경희대학교	수소 생성 박테리아 (Hydrogen Producing Bacteria) 와 양쪽 대사성 미세조류(Mixotrophic Microalgae) 가 최적 융합된 음폐수 고도처리 및 바이오 에너지 회수 시스템
	포항공과대학교	수소생산효소 및 생합성에 관련된 단백질의 입체구조 분석을 통한 바이오 수소 생산의 원천기술개발
	포항공과대학교	유기성 폐기물을 이용한 생물학적 수소/메탄 생산을 위한 이단공정의 개발 및 최적화
	부산대학교	일산화탄소로부터수소로의생물학적전환을위한고효율미생물촉매개발및반응시스템개발
	포항공과대학교	차세대 바이오 환경기술 연구센터
	부산대학교	첨단바이오연료생산을위한탈카보닐효소및탈수효소의개발
	서울대학교	특수환경유래고효율수소생산균주확보및탐색
	포항공과대학교	합성생물공학을이용한고수율의대사경로합성
	포항공과대학교	합성생물공학기술을이용한고수율수소생산균개발
	한국에너지기술연구원	혐기발효에 의한 수소생산 대형화 시설 개발 및 생체모방 수소발생시스템 연구
	한국에너지기술연구원	혐기성/광합성 수소생산 미생물과 관련효소를 이용한 물/유기성폐기물로부터 수소생산 기술개발
	경희대학교	호염성 수소생성균(HHPB)과 유기산 산화균(FAOB)의 syntrophic co-culturing 에 의한 Bio-H2 yield 향상 및 포괄고정 담체가 적용된 dark-fermentation system 개발
	대구대학교	홍조류를 기질로 이용하는 고율 바이오수소 생산 공정 개발
산자부	부산대학교	유전자 재조합 미생물 촉매를 이용한 이동형 바이오 수소장치의 개발
중소기업청	경희대학교	Biomass로부터 Bio-H2 회수를 위한 Dark-fermentation 연속 시스템 개발
	경희대학교	호염성수소생성미생물(HHPB)포괄고정담체(EBM)를적용한음식물탈리액처리및수소(Bio-H2)생성을위한DarkFermentation시스템개발
해양수산부	한국에너지기술연구원	CO 용해도 향상 및 수소 생산을 위한 고효율 생물반응기 개발
	㈜엔솔테크	해양 고세균 이용 바이오수소 실증생산 기술개발
	한국해양과학기술원	해양 바이오수소 생산기술 개발
	한국해양과학기술원	해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발
	한국해양과학기술원	해양.극한생물분자유전체연구
	포항공과대학교	해양에너지학술진흥사업포항대
	포항공과대학교	해양에너지 학술진흥사업(포항공대)
환경부	경희대학교	CDM을 대비한 서울시의 하수슬러지 저감 및 청정에너지로서의 Bio-H2회수를 위한 고효율 혐기성 소화시스템 개발
	한국과학기술연구원	막분리-조합형수소배출및분리시스템이결합된신개념바이오수소가스생산공정개발

○ 본 과제는 2009년부터 2015년까지 진행된 해양초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발의 후속사업임. 총 연구기간은 총 4년으로 구성됨. 4년 연구기간에 걸쳐 10톤 규모 데모플랜트의 성능확보 및 실증연구를 통한 기술이전을 포함하는 핵심요소 기술 간의 통합화/실용화를 진행함

기존 연구과제			중복성 회피방안 (차별 항목)
과제명	세부내용	중복도	
해양초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발	• 톤규모 실증생산 • 우수균주 개발 • 일산화탄소 용해도 개선	60	• 본 연구는 해양초고온 고세균 이용 바이오수소생산 기술개발의 후속사업임 • 400 mmol/l/h, 500 mmol/g/h의 2배 생산성 개선 목표치 제시함. 해당 생산성이 확보될 경우 경제성이 확보될 것으로 기대함. 부생가스이용 바이오수소 시스템은 국외, 국내 세계 최초 모델이므로 국내에서 개발된다면 국제적인 차별화가 가능할 것으로 보임 • 기존의 톤규모를 scale up한 10톤규모 부생가스/신가스 이용 바이오수소 데모플랜트는 국내외 최초의 시도. • 핵심미생물과 수소생산 프로세스가 모두 특허등록을 통해 원천기술을 확보하고 있어 세계적인 기술패키지 수출이 가능할 것으로 기대. • 데모플랜트 실증을 통해 기술패키지화에 주력

유사과제 검색결과

검색조건	■기본조건				
검색일시	2014. 6. 2				
유사도	60				
검색현황	등록과제수	유사과제수			
	1건	0건			
세부 검색 결과					
순번	과제명	연구책임자	유사과제여부		제제여부
			기수행과제	타인등록과제	
1	9 해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발		X	X	-

<그림 5-2> NTIS 유사과제 검색결과

5.2.2 기술개발의 성공 가능성

❑ 현 기술수준 분석

○ 본 연구기술의 현재수준은 바이오수소 생산성이 균주의 일산화탄소 이용 바이오수소생산성 및 연속공정을 적용한 바이오수소생산 모두 세계 최고 수준임.

<표 5-2> 일산화탄소 이용 수소생산성 비교

Strain	Strategy	HER (mmol $L^{-1}h^{-1}$)	Reference
Rhodospirillum rubrum	Light supply	4.7[a]	(Klasson et al., 1993)
Rhodopseudomonas palustris P4	Use of high cell density	41	(Oh et al., 2005)
Citrobacter sp. Y19	Use of chemoheterotrophically grown cells	5.7[a]	(Jung et al., 2002)
Thermosinus carboxydivorans DSM 14886	Supplementation of yeast extract	15.3	(Sokolova et al., 2004a)
Carboxydothermus hydrogenoformans DSM 6008	Biofilm on a hollow fiber membrane	117.7	(Zhao et al., 2013)
Thermococcus onnurineus NA1	Overexpression of the CODH gene cluster	123.5	(Kim et al., 2013)
Thermococcus onnurineus NA1	Overexpression of TON_1016	170	(Lee et al., 2013b)
Thermococcus onnurineus NA1	Use of steel-mill waste gas	70	(Kim et al., 2013)

[a] These values were adapted from Oh et al. (2005)

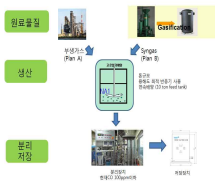
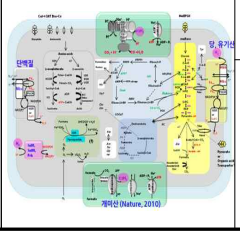
<표 5-3> 연속공정에서 일산화탄소이용 바이오수소생산성 비교

Microorganism	Cell density (g/L)	HPR_{max} (mmol/L/h)	$SHPR_{max}$ (mmol/g cell/h)	Xco(%)	Published
Rhodospirillum rubrum ATCC 25903	< 0.9	4.7	10	38-58	1993
Citrobacter sp. Y19	1.5	5.7	20	< 30	2002
R. Rubrum ATCC 25903	1.3-1.4	-	16	80	2003
R. Rubrum ATCC 10801	0.1-0.4	3.6	-	65	2004
Rhodopseudomonas palustris P4	10	-	41	61-100	2005
R. Rubrum ATCC 25903	0.4-0.55	7.6	-	43-81	2008
R. Rubrum ATCC 10801	1.5-2	3.8	16	87	2008
Carboxydothermus hydrogenoformans	-	2.1	2.7 mmol/g cell/day	90.4	2014
T. onnurineus NA1	1.31	316.5(avg.)	241.8	59.1	This study

❑ 목표 기술수준의 타당성 분석

○ 2018년까지 바이오수소 생산성 목표치인 400 mmol/l/h, 500 mmol/g/h는 세계적인 수준의 바이오수소 생산성으로 경제성이 확보되는 수준으로 판단됨. 또한 이러한 기술적인 목표치를 달성하기 위해 제시한

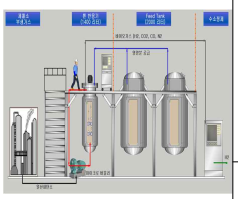
- 오믹스 이용 대사경로분석
- 대사재설계를 이용한 우수균주기술
- 일산화탄소 물질전환 극대화 기술
- 공정 최적화 기술 등은 타당한 전략으로 판단됨

연번	핵심타깃기술명	핵심 기술명	핵심성능지표	현재기술 수준비교			기술개발 목표		연구수행 기관
				국내	세계 수준	최종 요구	1단계 ('15~'17)	2단계 ('18~'19)	
1	프로세스 최적화 	공정 최적화	수소생산성 (mmol/L/h)	240	13	400	350	400	KIOST +위탁
		공정 최적화	CO 전환율 (%)	60	80	85	75	85	KIOST +위탁
		공정 최적화	CO 물질전달효율 (h^{-1})	580	945	950	950	950	KIOST +위탁
2	산업균주개발 	우수균주 개발	수소생산성 (mmol/g/h)	330	48	500	430	500	KIOST
		산업균주 개발	수소선택도	0.9~ 1.0	0.95	>0.95	>0.95	>0.95	KIOST

○ 제시된 생산성을 실증하기 위해 구축하고자 하는 10톤 규모의 데모플랜트는 100톤 가량의 수소생산을 실증하며 이로부터 사업성을 판단하기 충분한 규모로 타당하다 사료됨

○ 제시된 10톤 규모는 데모플랜트로서 바이오수소 생산-분리-저장의 활용 공정까지 제시될 수 있는 규모로서 객관적 사업성 판단이 가능한 규모로 판단됨

○ 또한, 국내의 미생물배양기 기술과 화학공학 기술의 접목을 통해 국내에서 처음 시도되는 연구부분이지만 충분한 가능성이 있는 것으로 판단됨

연번	핵심타깃기술명	핵심 기술명	핵심성능지표	현재기술 수준비교			기술개발 목표		연구수행 기관
				국내	세계 수준	최종 요구	1단계 ('15~'17)	2단계 ('18~'19)	
1	데모플랜트 구축 및 운용 	시스템 설계 기술	반응기 규모(m^3)	-	-	10	-	10	기업+KIOST +위탁
		시스템 운용기술	연중 운전시간 (시간)	-	-	500	-	500	기업
			연속 수소생산 (시간)	-	-	150	-	150	기업
		대량 생산 기술	일일 수소생산량 (kg)	-	-	200	-	200	기업

5.2.3 기술개발 위협요인 검토

☐ 경쟁기술에 대한 기술성, 경제성 우위 확보

○ 일산화탄소는 GTL기술을 활용 에탄올, 부탄올을 생산하기 위해 란자테크, 이너스바이오, 코스카타 등이 기술개발 중임. 경쟁 기술에 비해 기술적, 경제적 우위를 점할 수 있도록 지속적인 연구지원 및 집중연구가 필요함

☐ 국제적 에너지동향 주시 및 바이오수소 정책적 고려 필요

○ 세일가스, 경제침체에 따른 에너지 가격 하락 등은 바이오수소 및 신재생에너지 자원의 중요성 인식 및 투자에 대한 잠재적 위협요인

○ 바이오수소는 객관적인 경제성측면 이외에 환경과 미래 에너지 안보를 준비하는 정책적인 고려를 할 수 있도록 지속적인 홍보와 법제화 노력 지속 필요.

5.3 경제적 타당성 검토

5.3.1 경제성 분석의 주요 전제

❑ 경제성 분석의 주요 전제

○ 총 투자기간: 3년(플랜트 건설 2년, 테스트 가동 0.5년, 시범생산(50%) 0.5년)

- 총 개발계획: 2년의 플랜트 건설기간, 테스트 가동 0.5년, 시범생산(50%) 0.5년
  - 연락사무소 설치, 사원 기술교육 실시, 약간의 R&D비용 등과 차입금의 이자를 전부 합쳐 준비금(Continuing Expenses)으로 설정
  - 테스트 가동기간 중에는 운전자금으로서 0.5년간 분의 운전비를 계산하고, 50% 생산체계에 들어갈 때 운전자금으로서 3개월분을 준비
- 자금조달은 총 투자자금의 30%를 자기자본, 70%는 차입금으로 조달
- 인플레율: 최근 5년('08년~'12년)의 평균치인 3% 적용

○ 기술 파라미터의 가정

- 제철소로부터 배출된 배기가스를 이용해 일산화탄소(CO) 투입 유량과 균주농도를 활용하여 수소 생산성을 향상시켜 상업적 생산에 따른 경제성 확보 가능성을 평가
  - 개발 시스템은 반응시스템, 분리시스템, 압축시스템, 파이프라인 수송, 환경수처리설비 등으로 구성
  - 제철소로부터 배출된 배기가스로부터 10,000톤(1,000톤 반응기×10대) 처리용량의 반응기에 주입하고, NA1 균주를 활용하여 수소 생산성 4.43 H_2 L/L/h 규모로 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2)의 혼합가스(H_2: 28.4%, CO: 40.7%, CO_2: 29.1%)를 생산한다. 이후, 물리흡착법에 의한 분리·회수기술로서 제오라이드를 이용한 PSA(Pressure, Swing Adsorption)법에 의하여 수소(H2)를 분리.회수하여 연간 26,250톤의 수소가스 생산
- 1 batch 당 연간 수소 생산량: 4.43 H2 L/L/h (시간당 수소생산성) × 2,000 (운전시간) × 75톤 (규모) = 66,450,000kL

- 연간 수소생산량: 1 batch 당 연간 수소생산량 × 4 = 265,800,000kL

○ 경제 파라미터의 가정

- 기준년도: 2012년
- 사회적 할인율: 기획재정부 지침에 따라 5.5% 적용
- 원가요소 설정
  - 변동비는 배지(Yeast Extract), 전기·수도 등 유틸리티비, 수처리비 등을 고려
  - 감가상각비는 설비투자에 의해 고정화된 자산은 빠른 시간 내에 감가상각에 의해 유동화 하는 것이 유리하기 때문에 스피드가 빠른 정률법을 적용(기획재정부 고시의 내용년수에 의거하고 잔존가치율은 5% 준용)
  - 개발시스템은 탄산가스·산소 제조설비에 해당하는 것으로 가정하여 반응설비, 압축설비, 가스수송을 위한 파이프라인 설비, 액체가스 저장 설비 등을 내용연수 20년, 감가상각율 0.109로 설정하여 적용
  - 수선비는 수선비에 대해서는 탄산가스·산소 제조설비에 적용되는 내용을 준용하여 H_2 반응·생산, 압축 등의 시스템과 다른 부대설비에 대해서는 제조설비 투자액의 5%를 적용
  - 인건비는 플랜트에 종사하는 인력은 개발시스템 운전에 필요한 노무종류에 맞추어 추정하였다. H_2 반응·생산, 압축시스템에 조업노무, 간접노무(안전), 관리감독, 사무공통 등을 평가하여 필요한 노무량에 급료를 적용하여 산출
  - 손해보험비는 플랜트 제조설비에 대해서는 석유화학 플랜트의 기획설계에 사용되는 제조설비 투자액의 1%를 적용하고 작업원에 대한 보험료를 추가하여 설정
  - 재산.종합토지세는 개발시스템 플랜트, 건축물에 대하여 지방세법 제234조에 의거하여 과세(시가)표준액의 0.3%를 재산세, 종합토지세로서 또한 과세표준액의 0.3%를 적용
  - 금리는 연 4%로 적용하고 차입금은 12년내에 변제하는 것으로 상정
  - 일반관리비는 바이오수소 플랜트의 운전비용의 5.5%를 적용
  - 공장관리비.잡비는 플랜트의 제조설비 투자액의 0.5%를 적용

- 원천징수세는 부가가치세법 14조에 의거하여 세율은 총 판매액의 10%를 과세
- 법인세 및 지방세는 법인세법 55조에 의거하여 25%를 적용하고 지방세는 지방세법령에 의거하여 법인세의 10%를 적용
- 공장부지는 본 사업의 상업적 생산지의 입지장소가 확정되지 않은 점과 NA1이라는 미생물을 활용한 플랜트 시설로 인하여 과도한 부지가 요구되지 않는다는 점 등을 고려하여 본 검토에서는 제외하여 분석
- R&D비용 상정에 대해서는 본 사업이 R&D 결과의 확립된 NA1의 생산성과 공정시스템에 따른 경제적 개발 가능성을 검토하는 목적으로 인하여 추가적인 R&D비용 산정은 고려하지 않음. 그러나, 상업개발 시 생산성 향상을 위한 지속적인 R&D 투자 필요성과 그에 따른 적정 규모의 R&D비용 상정이 요구됨

- 수소가격은 '12년 평균치 US$4/kg 적용

5.3.2 경제성 분석 방법

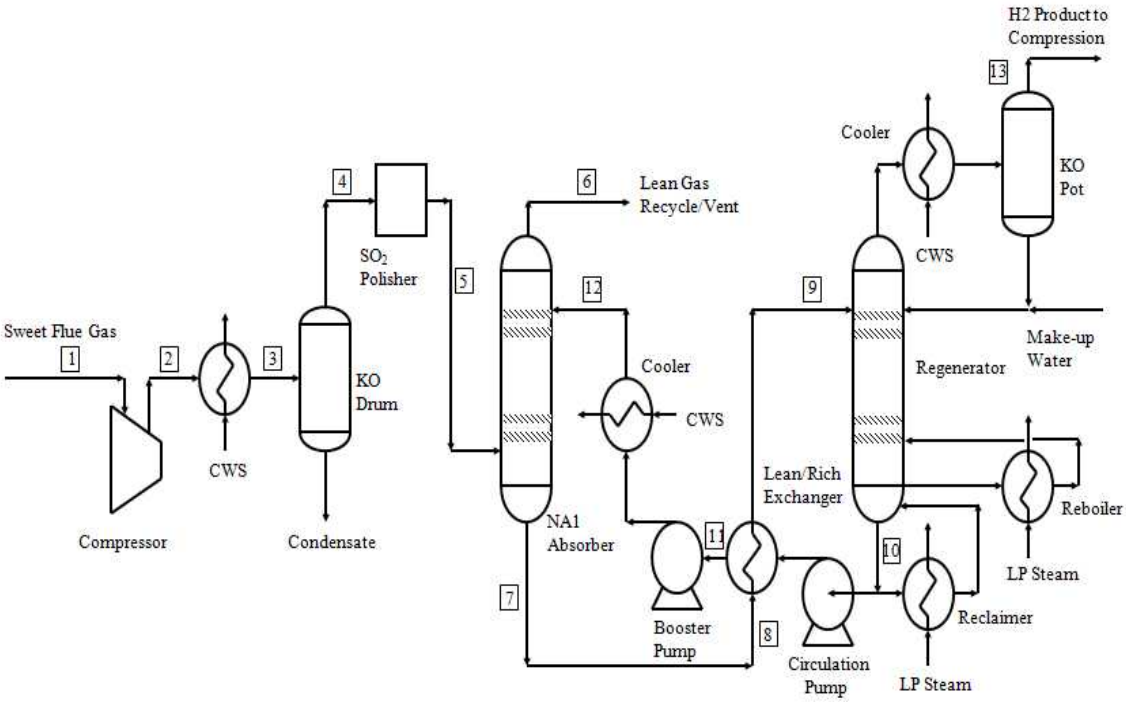
❑ 평가모델의 시스템 구성

○ 반응·분리시스템

- 반응기로부터 생산된 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2)의 혼합가스로부터 수소(H_2)를 분리·회수하는 생산기술로서 물리흡착법 중의 하나인 제올라이트를 이용한 PSA(Pressure Swing Adsorption)법을 적용하여 경제성 분석을 실시

- 분리.회수설비의 건설비는 탑조류, 탱크류, 열교환류, 냉각탑, 회전기기류, 전기, 경장비기기류 등의 플랜트비와 토건, 배관, 가설, 지붕, 보온.도장, 설계 등의 공사비, 그 외의 추가 부대설비비 등이 고려

- 운전비는 배지(Yeast Extract), Feed blower, 펌프 등에 사용하는 전기와 ARU feed blower cooler, Lean cooler, Acid gas cooler 등에 사용하는 냉각수 및 제올라이트, Liquid effluent 등이 고려



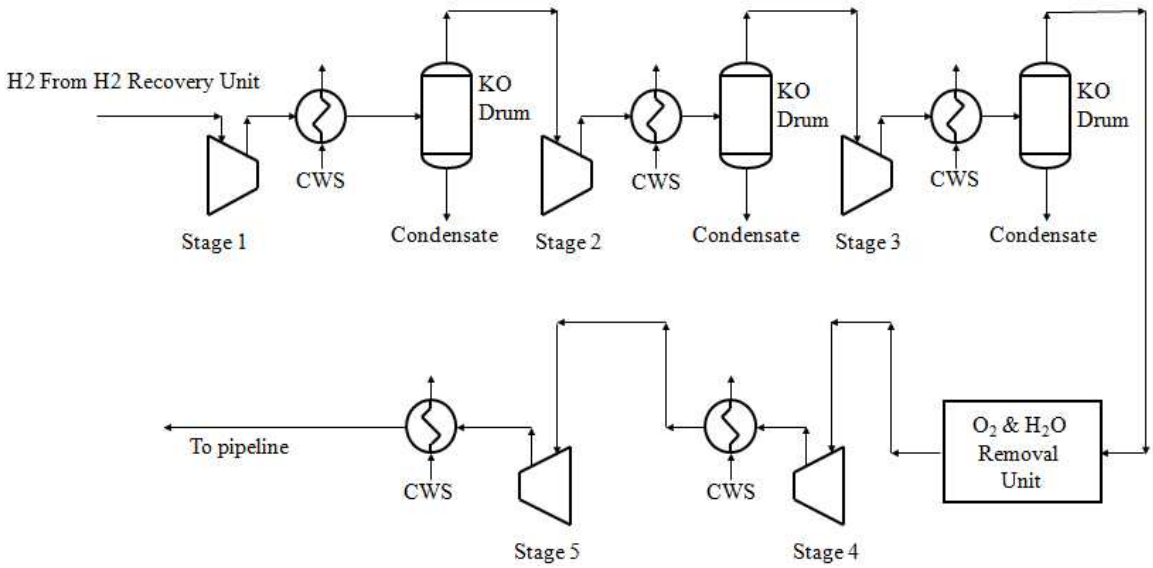
<그림 5-3> 반응시스템 공정도

○ 압축시스템

- 생산된 수소(H_2)를 수요처로 운송하기 위해 액화시키는 공정으로 파이프라인에 의한 수송을 위해 12MPa 이상으로 가압하고, 파이프라인의 부식방지를 위해 수분을 10ppm까지 건조 필요

- 왕복 압축기로 3단계의 압축에 의해 응축수를 분리하고, 습윤기를 통해 충분하게 수분을 제거한 후, 4번째의 압축기를 이용하여 8MPa 액화 수소(H_2)를 제조하고, 5번째의 압축기를 이용하여 15MPa까지 가압 공정을 상정

- 물과 수소(H_2)의 혼합물에 의한 부식을 고려하여 재질은 스테인레스를 사용하고, 흡입압력, 배출압력, 유량 등을 고려하여 압축기 소요동력을 산출



<그림 5-4> 압축시스템 공정도

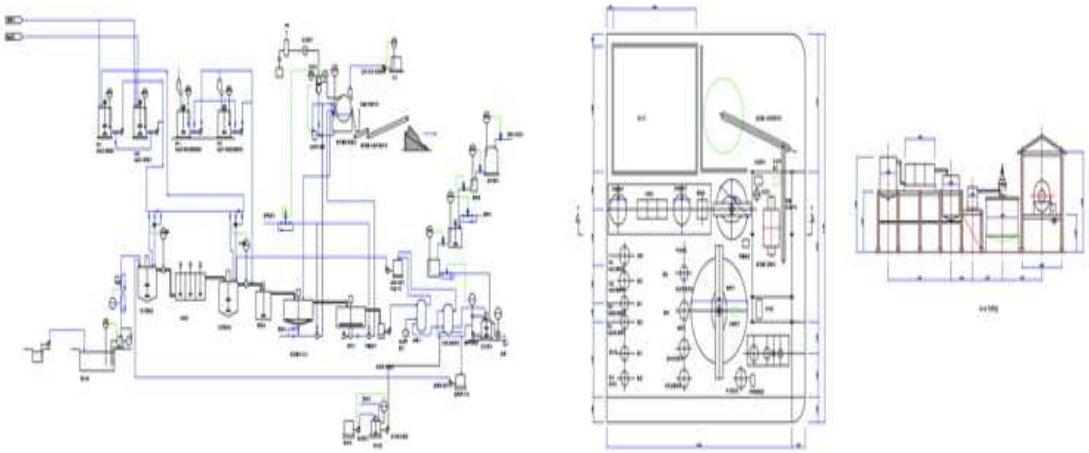
○ 파이프라인에 의한 수송

- 압축한 액화 수소(H_2)를 공급처까지 수송하기 위해 파이프라인에 의한 단거리 육상수송 후, 수소(H_2) 저장 탱크에 저장

- 파이프라인에 의한 육상수송에서는 비중 1.24, 온도 20℃, 압력 15MPa의 액체 수소(H_2)를 1km 수송하는 것으로 가정하여, 직경은 26B(외경 660.4mm, 두께 12.7mm, Roughness 0.0457mm)의 압력배관용 탄소강 강관(SUS) 파이프라인을 이용하여 수송하는 것으로 설계하고, 구형탱크, 재액화장치, 충전펌프 등이 고려

○ 환경처리설비

- 반응시스템으로부터 배출된 폐수를 처리하는 공정으로 배수처리설비는 피트, 중화탑, 산화조, 응집조, 시크너, 드럼 필터, pH 조정조, 소석회 용해조, 응집제 용해조 등으로 구성하고 공정설비 비용은 총 8억으로 상정



<그림 5-5> 배수처리설비 공정도 및 배치도

○ 바이오수소 개발시스템의 시스템별 비용내역과 총 소요비용 내역

<표 5-4> 개발시스템 소요비용

Capital costs	10,000톤 처리(1,000톤 반응기×10대)
반응시스템	1,194
분리시스템	149
압축시스템	50
환경처리설비	8
Pipeline	15
Headquater	30
Total	1,446 억원
Operating Costs	
Yeast extract	230
Utility(전기, 수도)	266
Wages and benefits	24
Maintenance and Repair	72
Insurance	10
Lubrication & Miscellaneous	7
General & administrative	6
Headquater, R&D	7
Total	622 억원

<표 5-5> 해양바이오수소개발 총 소요비용 내역

Item	10,000톤 처리(1,000톤 반응기×10대)	
	Capital costs	Operating costs
반응시스템	1,194	523
분리시스템	149	66
압축시스템	50	22
환경처리설비	8	4
Pipeline	15	0.1
Headquater	30	7
Sub-total	1,446 억원	622 억원
Continuing expenses		104
Working capital		156
Total		1,706 억원

❑ 기본적 수익 판단법

○ 자본회수법(Payback Periods): 세금공제후 이익과 감각상각비의 합계 금액의 연간 누적액이 자산 투자액에 도달하는 년수를 구함

○ 순 현재가치(Net Present Value): 산정된 모든 지출과 수입의 현금흐름(Cash flow)을 현재가치로 환산해 최초의 투자자본과 수익의 차에 의해 구함

$$\mathrm{NPV} = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

B_t: 수익(= 감각상각비+세금공제후 이익-차입금변제), C_t: 투자자본, i: 할인율(5.5%), n: 프로젝트 년수 (23년), t: 년차

○ 내부수익률(Internal Rate of Return): 산정된 모든 지출과 수입의 현금흐름(Cash flow)을 현재가치로 환산해 최초의 투자자본과 수익이 일치하는 할인율을 구함

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t}{(1+i)^t}$$

5.3.3 경제성 분석 결과

❑ 경제성 분석 결과

○ 상업적 개발 가능성(수소 가격 US $4/kg, 10,000톤 처리용량(수소함량 28.4%))
- 수소 생산성 4.9 H2 L/L/h 규모로 연간 26,250톤

○ NA1 균주를 활용하여 수소 생산성 4.9H_2 L/L/h 규모로 연간 26,250톤의 수소 가스를 생산한다면, 자본회수기간(Payback Periods) 6.4년, 순 현재가치(NPV) 812억원, 내부수익률(IRR) 26.2%로 나타나서 해양바이오수소개발 사업은 높은 경제적 이익이 기대될 수 있는 것으로 분석
* 신규개발사업인 경우는 위험요소를 감안하여 민간기업의 측면에서는 내부수익률(IRR) 20%를 일반적으로 요구

○ 총 투자비 1,706억원을 통하여 연간 26,250톤의 수소(H_2)생산으로 매년 1,200억원씩 20년간 총 2조 4,000억원의 매출수익 달성 기대

Sensitivity factor	바이오수소개발		
수소 생산성	Payback periods (year)	NPV (억원)	IRR (%)
4.9 H2 L/L/h	6.4	812	26.2

○ 해양바이오수소개발 추정손익 계산서

(단위: 억원)

항 목	운 영 기 간									
	2020 (50%생산)	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
매 출 액(A=B+C)	592	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183
운영수입(B)	592	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183
기타수입(C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
매출원가(D=E+F+G)	523	889	893	899	906	916	928	941	956	973
변동비·유지보수비(E)	304	627	646	665	685	706	727	749	771	795
감가상각비(F)	158	140	125	112	99	88	79	70	63	56
부가가치세·재산세(G)	61	122	122	122	122	122	122	122	122	122
매출총이익(H=A-D)	69	294	290	284	277	267	255	242	227	210
판매비와 일반관리비(I)	7	13	14	14	15	15	16	16	17	17
영업이익(J=H-I)	62	281	276	270	262	252	239	226	210	193
이자수입(K)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
지급이자(L)	0	48	43	39	35	30	26	22	17	13
경상이익(M=J+K-L)	62	233	233	231	227	222	213	204	193	198
법인세·지방세(N)	0	64	64	63	62	61	59	56	53	50
당기순이익(O=M-N)	62	169	169	168	165	161	154	148	140	148

(계속)

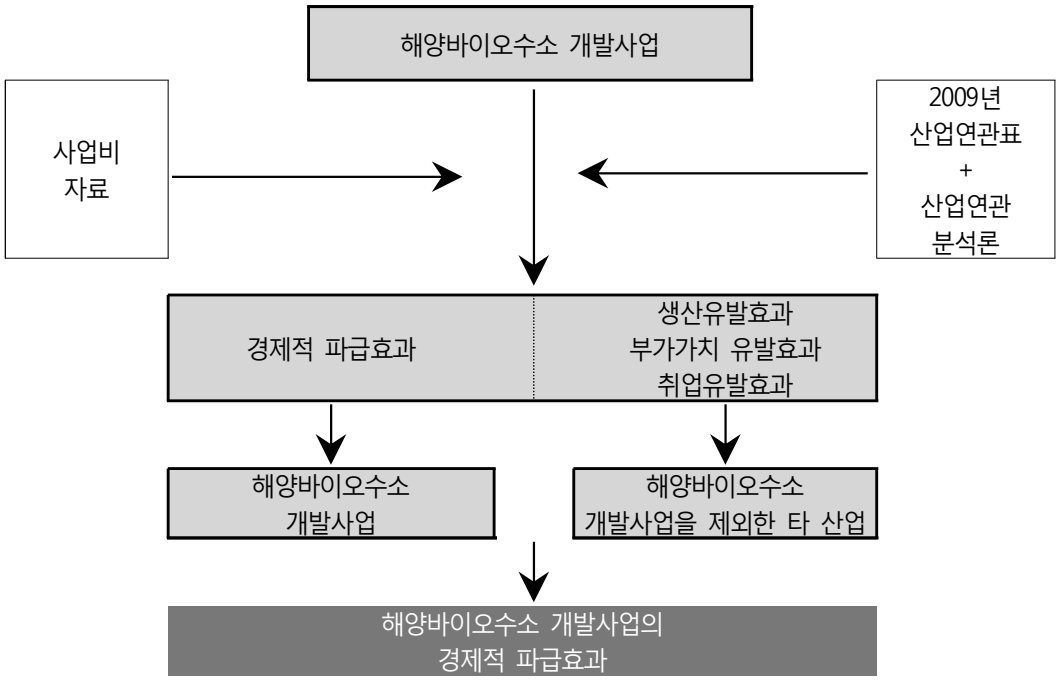
항 목	운 영 기 간									
	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
매 출 액(A=B+C)	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183
운영수입(B)	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183	1,183
기타수입(C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
매출원가(D=E+F+G)	990	1,009	1,029	1,051	1,074	1,099	1,124	1,151	1,179	1,279
변동비·유지보수비(E)	818	843	868	894	921	949	977	1,007	1,037	1,068
감가상각비(F)	50	44	39	35	31	28	25	22	20	89
부가가치세·재산세(G)	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122
매출총이익(H=A-D)	193	174	154	132	109	84	59	32	4	-96
판매비와 일반관리비(I)	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22
영업이익(J=H-I)	175	156	135	113	89	64	38	11	-18	-118
이자수입(K)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
지급이자(L)	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0
경상이익(M=J+K-L)	167	152	135	113	89	64	38	11	-18	-118
법인세·지방세(N)	46	41	37	31	24	17	10	3	0	0
당기순이익(O=M-N)	121	111	98	82	65	47	28	8	-18	-118

❑ 경제적 파급효과 분석

○ 분석의 구도

- 전후방 경제적 파급효과를 계량화하기 위해서는 개발 사업뿐만 아니라 다른 모든 경제부문을 미시적으로 파악하면서도 거시적인 상호 관계도 관찰할 수 있어야 하는데, 이를 위해서는 다양한 접근이 필요함

- 산업연관분석(Inter-industry analysis)은 특정 부문의 변동이 생산, 고용, 소득 등 국민 경제에 미치는 각종 파급효과를 산업 부문별로 나눈 분석을 통하여 특정 부문의 파급효과에 대한 사전적 예측이 가능하여 널리 활용되고 있음



<그림 5-6> 해양바이오에너지개발 사업의 경제적 파급효과 분석 흐름도

❑ 타 산업에 미치는 파급효과

○ 타 산업에 미치는 생산유발효과, 부가가치 유발 효과, 취업유발효과를 보다 엄밀하게 살펴본 분석결과는 [표 5]에 상세히 제시

○ 해양바이오수소 개발사업의 1.0000원 투자는 타 산업의 생산을 0.3859원, 타 산업의 부가가치를 0.1358원 만큼 유발하며, 10억 원 투자는 타 산업의 취업을 2.0614명만큼 유발하는 것으로 분석됨

○ 본 사업의 생산은 부동산 및 사업 서비스, 음식점 및 도소매 등과 같은 서비스 산업의 생산, 부가가치, 취업, 고용을 많이 유발하며 제조업 중에서는 제1차 금속제품 부문에 대한 파급효과가 큰 것으로 판단됨

<표 5-6> 해양바이오수소 개발사업으로 인한 타 산업에 미치는 유발효과

부문 번호	부문명칭	생산유발계수		부가가치 유발계수		취업유발계수	
		값(원)	순위	값(원)	순위	값 (명/10억 원)	순위
1	농림수산품	0.0021	24	0.0012	18	0.0624	9
2	광산품	0.0014	26	0.0009	23	0.0066	24
3	음식료품	0.0042	20	0.0010	20	0.0121	22
4	섬유 및 가죽제품	0.0023	23	0.0007	25	0.0135	21
5	목재 및 종이제품	0.0062	16	0.0016	17	0.0224	16
6	인쇄 및 복제	0.0026	22	0.0010	22	0.0192	18
7	석유 및 석탄제품	0.0219	7	0.0011	19	0.0059	26
8	화학제품	0.0384	4	0.0070	5	0.0601	10
9	비금속광물제품	0.0080	14	0.0023	13	0.0242	15
10	제1차 금속제품	0.0481	1	0.0068	6	0.0416	11
11	금속제품	0.0161	10	0.0053	8	0.1060	6
12	일반기계	0.0076	15	0.0019	16	0.0284	13
13	전기 및 전자기기	0.0102	11	0.0020	15	0.0178	19
14	정밀기기	0.0028	21	0.0022	14	0.0397	12
15	수송장비	0.0043	19	0.0010	21	0.0083	23
16	기타제조업제품	0.0011	27	0.0003	26	0.0064	25
17	전력, 가스 및 수도	0.0282	6	0.0076	4	0.0221	17
18	건설	0.0019	25	0.0008	24	0.0173	20
19	도소매	0.0306	5	0.0171	3	0.5679	1
20	음식점 및 숙박	0.0088	13	0.0033	10	0.1730	4
21	운수	0.0204	8	0.0066	7	0.1762	3
22	통신 및 방송	0.0094	12	0.0040	9	0.0251	14
23	금융 및 보험	0.0404	3	0.0261	2	0.1633	5
24	부동산 및 사업서비스	0.0423	2	0.0282	1	0.2955	2
25	공공행정 및 국방	0.0003	28	0.0002	27	0.0022	27
26	교육 및 보건	0.0044	18	0.0029	11	0.0647	8
27	사회 및 기타서비스	0.0055	17	0.0027	12	0.0799	7
28	기타	0.0164	9	0.0000	28	0.0000	28
타 산업 효과		0.3859		0.1358		2.0614	

○ '13년에 한국은행에서 발표된 2011년도 산업연관표를 이용하여 해양바이오에너지개발 사업 부문을 별도로 추계한 다음 경제적 파급효과를 추정하였으며, 2012년부터 2039년까지 28년 동안 공사비용 및 운영비용 부문에 투입될 총 투자비 2,234억원에 대한 총 효과를 추정하여 <그림 5-6>에 종합화하여 제시

○ 본 사업의 총 사업비 1,706억원의 투자로 인해 발생되는 생산유발효과는 총 2,364.4억원, 부가가치 유발효과는 총 691.1억원, 취업유발효과는 총 765명에 달하는 것으로 분석되었음

	자기 산업 효과	타 산업 효과	총 효과
생산 유발효과	1.0000원 1,706억원	0.3859원 658.4억원	1.3859원 2,364.4억원
부가가치 유발효과	0.2388원 407.4억원	0.1358원 231.7억원	0.3746원 691.1억원
취업 유발효과	10억원당 2.4256명 413.8명	10억원당 2.0614명 351.7명	10억원당 4.4870명 765.5명

<그림 5-7> 해양바이오수소 개발사업의 경제적 파급효과 종합화

6. 활용방안 및 기대효과

6.1 연구개발결과의 활용방안

❑ 기술적 측면

○ 본 사업을 통해 확보한 신규 초고온 고세균 바이오수소생산 관련 원천기술을 활용하여 국내외의 특허 등 지적재산권 확보를 위해 적극적으로 노력함

○ 본 사업을 통해 확보한 고세균 자원, 유전체/단백질체/발현체/대사체 정보를 해양수산부 해양생명공학기술개발 사업을 통해 구축된 해양·극한 생물자원 및 유전체/단백질체 정보 뱅크에 수록하여 통합관리 및 활용코자 함

○ 본 사업을 통해 개발된 초고온 고세균 이용 바이오수소 생산 기술은 일산화탄소를 함유하는 산업부생가스 및 석탄, 바이오매스, 유기성 폐기물 등의 가스화를 통한 다양한 합성가스의 생물학적 CO 전환 기술 개발에 광범위하게 활용 가능함

○ 본 사업을 통해 축적된 고세균의 대사공학적 개량기술은 수소 이외에도 바이오에너지, 바이오화학소재 등 다양한 산업원천 기술개발에 폭넓게 활용 가능함

❑ 경제적·산업적 측면

○ 본 연구사업을 통해 확보될 초고온 고세균 활용 바이오수소 생산기술을 활용하여 참여기업인 엔솔텍과 협의하여 체계적으로 산업화를 지원할 수 있는 방안을 강구

○ 부생가스와 음식물폐자원의 재생자원등 바이오수소화 처리를 위해 제철소, 발전소, 음식물 폐기장 등과 관련 기술 협력개발 타진

○ 관련성과를 홍보하여 국민의 공감대를 형성하고, 국내 마린바이오 산업을 적극 지원.발전시킴

○ 본 과제에서 개발하고자 하는 생물학적 수성가스전환 반응기는 제철소 등에서 발생하는 부생가스 처리 및 처리비용으로 고부가 가치를 올릴 수 있음.

○ 본 과제에서 개발하고자 하는 생물학적 수성가스전환 반응기는 석탄, 바이오매스 및 폐기물 가스화시 발생하는 합성가스 전환에 의해 수소 생산이 가능함.

○ 본 과제에서 개발하고자 하는 해양 미생물을 이용한 바이오수소 생산은 기력발전소의 원료로 공급할 수 있음.

○ 본 과제에서 개발하고자 하는 해양 미생물을 이용한 바이오수소 생산은 고분자 연료전지의 원료로 활용 될 수 있음.

○ 본 과제에서 개발하고자 하는 해양 미생물을 이용한 바이오수소 생산은 석유화학공정에 사용되는 H2를 공급할 수 있음.

○ 본 과제 개발이 기대되는 일산화탄소 (혹은 개미산) 이용 수소생산기술을 일산화탄소 배출이 많은 제철소 등 산업체와 연결하여 기술이전 혹은 추가 상용화 기술개발을 위해 노력

❑ 수소활용을 위한 인프라시설 확보 및 시·도·군의 단지 조성계획과의 연계 추진

○ 수소기반의 연료전지 신시장 모델을 구현함으로써, 그린도시 구현 및 신성장 산업 육성을 목표로 하는 포항 수소연료전지타운 조성사업과의 연계

- (설치장소) 포항시 남구청, 포항바이오파크, 경북시각장애인 복지관 및 실내수영장 등 경상북도 포항시 남구 대도동의 체육시설단지

- 경상북도, 포항시 등 참여기관이 컨소시엄 구성

  • 사업 총괄/운영관리 : 경북테크노파크, 행정지원 : 경상북도, 포항시, 협력(현장대응 등)기관 : 포스텍 연료전지테스트베드, 순수수소 공급업체 : 포스코(린데코리아 배관 이용), 연료전지 제조업체 : 퓨얼셀파워, 현대하이스코

<표 6-1> 포항 수소연료전지타운 조성 세부사업 내용

구 분		호 수 (개소)	용 량	설치대상 (주택, 상업·공공건물)
수소연료전지설비	10kW 2대	1개소	20kW	포항남구청
	10kW 7대	1개소	70kW	실내수영장
	5kW 5대	1개소	25kW	경북시각장애인복지관
	5kW 6대	1개소	30kW	포항바이오파크
	계	4개소	145kW	
	수소배관공사	-	2.5km	기기설치실 입구까지
보조설비	모니터링장치	-	TCP/IP 등	센터운영실 등
	연료비지원	-	5년	-
	사업운영비/ 안전관리비	-	5년	-
설계비		-		-

<표 6-2> 포항 수소연료전지타운 조성 사업비 산출 내역서

(단위: 백만원)

구 분		산출근거	총 사업비
수소연료전지설비 (1년)	5kW_수소연료전지	26,755천원/kW(기준단가) × 5kW × 11대	1,473
	10kW_수소연료전지	21,301천원/kW(기준단가) × 10kW × 9대	1,917
	수소 배관공사	- 정압기(1대) : 15,000천원 - 수소미터(질량형 유량계) : 25,500천원 - 2.5km수소배관(구내포함) : 360천원×2,500m = 900,000천원 - 통신선 : 9,500천원	950
	모니터링장치	- 허브 : 120천원×4ea = 480천원 - Switch giga box : 850천원×4ea = 3,400천원 - 통신분전반(실외형) 등 : 3,600천원×4ea =14,400천원 - 디스플레이 3set 등 4,500천원×3ea = 13,500천원	125

구 분		산출근거	총 사업비
		- 운영프로그램 : 42,220원 - HMI interface : 37,000원 - computer : 1,500천원×3set=4,500천원 - 설치비(setting비용 포함) = 9,500천원	
보조 설비 (5년)	연료비지원	[시장가-100(원/H_2_Nm^3)]×5년간 사용량【[8.45Nm^3×24hr×270day]×[(700-100)원/Nm^3)]+[58.45Nm^3×24hr×95day]×[(700-100원/Nm^3)]】×5년 = 564,066천원 620,473천원(VAT포함) 최종가격은 수소공급사와 협의예정	604
	사업운영비/안전관리비	사업운영비(운영/정산/보고/홍보/행정지원 등) 운영인력, 홍보동영상제작 등 관련비용 안전관리비(지관, 구내배관) 안전관리비용, 수선보안, 안전점검비 등	1,131
합 계			6,200

<그림 6-1> 포항 수소연료전지타운 조성 설치 예정지

6.2 연구개발의 기대효과

❑ 기술적 측면

○ 본 과제를 통해 확립된 생물학적, 공학적 기술은 다양한 초고온 고세균 연구 및 유용산물 산업화에 활용되고 차세대 바이오연료 기술 강국 진입 기대

○ 선제적 기술개발을 통한 글로벌 기후변화 대응 및 에너지자원 다양화

○ 세계 최초 폐자원(CO) 플러스 바이오수소의 융합형 생산 모델 제시

○ 부생가스 이용 친환경 청정에너지 상용화 생산 기술 확보

❑ 경제적·산업적 측면

○ 폐자원(CO)으로 청정에너지인 수소를 생산하여 환경오염 방지에 기여하며, 생물 유래 수소 중 가장 저렴한 원가로 조기 산업화 구현이 가능하고, 이로 인해 매년 1,200억원씩 20년간 총 2조 4,000억원의 매출수익 달성 기대

○ 10톤 규모의 데모 플랜트 시범생산을 통하여 연간 수소 100톤 규모의 산업화 능력을 확인하고, 향후 바이오수소 연간 25,000톤(국내시장 점유율 1%)의 상업생산으로 국내 석유연료시장의 수입대체효과 기대

- 수소 1만톤은 연료전지 활용 전기 생산시 4만 가구의 1년 전력소비량 (가구당 1달 평균 전력소비량 300KWh 기준시) 혹은 수소자동차 5만대의 1년 운행 가능량(자동차 1대당 1년 평균 2만km 주행 및 수소 1kg당 100km 주행 기준)

○ 생산유발효과 2,360억원, 부가가치 창출 640억원, 일자리창출효과 770명

○ 지역경제 활성화를 위한 신 해양산업 기반 확보 및 지역균형발전

❑ 사회적 측면

○ 친환경 바이오에너지 생산, 보급에 따른 글로벌 기후변화 대응 및 CO2 감축에 기여

○ 대형 발전사의 신재생에너지 의무할당제도(RPS) 산업적 대처에 기여하고, 기력발전소, 연료전지, 석유화학공정 등 산업계 다양한 분야에서 주요 원료로 활용

○ 신재생에너지 보급 정부정책 목표달성에 기여

- (환경정책) 온실가스 감축, 대기환경 개선, 환경규제 대응

- (에너지정책) 에너지안보 확보, 에너지원 다양화, 석유위기 대응

- (산업정책) 산업바이오 적용(Bioplastic 등), 신규고용 창출

7. 정책제언

7.1 사업화/실용화 방안

❑ 실용화 기술의 성공적인 개발 수행

○ 해양바이오수소개발 연구는 사업화를 통하여 국가 미래 해양강국 건설의 기반 구축이 목적이므로 개발된 기술이 사업화를 위한 시제품이 되어야 함

- 연구기간 중 매년 핵심 모듈을 제작하고, 이를 현장에서 검증실험을 통해 신뢰성 및 현장성 확보

- 연구개발 기간 동안 매년 산업화 가능성이 높은 기술군으로부터 시험.실증 연구를 통하여 최종 성과물 개발에 활용함

○ 데모 플랜트의 시범생산을 통한 체계적 현장 검증실험 수행

- 바이오수소에 대한 개발이 진행되면, 세부 핵심모듈에 대한 검증실험뿐만 아니라 전체 해양바이오수소시스템에 대한 현장 검증실험을 통하여 효율 및 성능을 분석하고 필요시 수정.보완 작업이 진행되어야 함

❑ 산업화 기업의 참여를 적극적으로 유치

○ 기술개발을 통한 산업화의 핵심은 산학연의 연구인력 활용 및 예산의 분배를 통한 최적의 연구수행 능력을 확보하고 기술 고도화 달성에 있음

- 전략개발기술의 상용화, 사업화의 목적에서 기술의 적용 분야 및 개발 내용에 적합한 참여기업이 요구되고, 기업의 미래전략 수립에 큰 기여

○ 연구의 기획, 추진 및 실용화를 성공적으로 달성하기 위하여 산업계 전문 인력의 적극적인 연구 참여를 유도하기 위한 인센티브 추진

- 특히, 중소기업의 경우 본 사업을 통해서 얻은 기술이 신기술 등을 지정 받도록 적극 지원하여야 하며 권리배분 계획도 협약시 명확히 함

○ 사업단 개발기술의 DB화를 통해서 참여연구자를 포함한 관련 산업분야에 활용할 수 있는 온라인 정보시스템을 구축하고 활용함

○ 개발된 기술은 국내 뿐만 아니라 해외에도 활용이 가능하기 때문에 그 시장 규모는 상당할 것으로 기대됨

- 따라서 일반 기업의 적극적인 참여가 예상되며, 또한 사업 성공 후 참여기업에 대한 기술실시 계약이 활발하게 이루어질 것으로 기대됨

- 특히 해양바이오에너지개발사업의 경우, 에너지 분야의 시장성을 고려하면 기술선점의 파급력이 큰 분야임으로 민간기업의 참여가 가능할 것으로 예상됨

○ 상용화, 사업화의 목적에서 개발기술의 활용 측면, 시스템 설계 및 제작 측면에서 각 목적에 맞는 참여기업이 요구됨

- 위탁연구 중심이 아닌 공동연구로 참여기업을 참가시켜 지적 소유권을 공동 또는 단독 소유가 가능하도록 유도

○ 본 연구의 수행과정에서 배출될 인력은 참여기업에 취업될 확률이 높으므로 참여에 대한 인센티브로 작용할 것으로 판단됨

❑ 기술이전 활성화 방안 마련

○ 개발에 참여한 기업이 기술이전을 받아 사업화의 성과를 도출할 수 있도록 기술 이전 및 시공현장 확보에 있어 지원이 필요함

- 본 과제의 결과물로 나오는 특허 등 지적재산권은 참여기업이 공동의 지분을 가질 것이며, 유형/무형의 노하우 습득을 통해 미래시장을 선점할 수 있는 기회가 부여될 수 있다는 점을 부각

○ 해양바이오수소 데모 플랜트 실증연구를 통한 국제환경규제 대응 기술의 체계적인 확립과 기술력 축적은 연안에 인접한 다른 나라에도 많은 영향을 줄 것으로 예상됨

- 시범 실증연구 센터 운영을 통한 에너지 환경 개선 기술에 필요한 기술력과 국내 플랜트 장비 개발 등은 타국에 기술이전도 가능할 수 있어 미래 해양산업기술을 선점함으로써 해양산업 육성을 극대화 할 수 있음

❑ 국제 협력 추진

○ 연구 수행단계에서는 외국의 선진기술을 적극 수용하기 위해 관련 분야 전문

국외 연구기관과 연계하여 국제공동 연구를 추진하며 이외에도 관련 분야 전문가 위탁 교육, 기술이전 및 교류 그리고 전문가 양성 등의 교환 프로그램도 실시

- 전문가 양성을 위하여 전문 국외 연구기관에 파견하여 공동연구도 수행
- 국외 전문가를 초빙하여 본 사업단에 참여시켜 관련 기술 노하우 전수
- 향후 해외사업 진출을 위한 국외 연구기관과의 인적 네트워크 구축

○ 핵심기술에 대한 국외 전문기술 벤치마킹을 실시한 후 해외 전문기관과의 MOU 체결을 통한 공동연구 수행

- 해양바이오수소 분야의 전문기술 및 사업 영역을 세분하여 핵심 분야는 연구개발을 통해 기술을 국산화하되 비핵심 분야는 아웃소싱
- 선택과 집중을 위해 해양바이오수소개발 분야의 모든 필요기술에 대하여 중요도를 평가하고, 아웃소싱 대상기술은 노우웨어 맵(know-where map)을 구축 활용

○ 본 사업의 성과는 개발된 기술의 국외 수출로 이어져야하는 바 기술의 신뢰도를 높이기 위해 국외 전문기관의 검증 및 인증 과정 필요

- 연구개발의 성과는 사업단 참여 주체가 최대한 실시간 공유할 수 있도록 하며, 특히 국제공동연구를 통해 습득한 기술은 상호 공유가 용이토록 하여 전체 연구개발의 시너지효과를 극대화

❑ R&D 사업에 대한 성과 관리 전략 수립

○ 네트워크형 사업관리 시스템 도입

- 성과중심 및 확산 지향형 관리 시스템 구축
- 관리 종합 계획 및 연도별 시행 계획 수립
- 온라인 연구 모니터링 시스템 구축

○ R&D 사업에 대한 단계(중간) 평가를 통한 인센티브 및 패널티 제도 활용

○ 사업단 단위의 체계적인 진도 관리 수행

- 년차/단계별 Activity에 의거한 목표 관리

- 사전 수요 예측 등을 통한 유연한 목표관리 체계

○ 프로젝트 정보 공유를 통한 시너지 효과 창출

- 정기적 내부 기술교류를 통한 상호 정보 교환 및 보완

- 정기 워크숍 및 세미나 수행을 통한 과제간 기술 교류

7.2 건의사항

❑ 중앙정부의 사업지원 협조의 필요성

○ 에너지 확보를 위한 국가현안문제 해결 및 신경제성장 동력 창출 차원에서 미래 지향적인 해양바이오수소개발 사업을 위해 산업통상자원부, 미래창조과학부 등 중앙정부와의 사업지원 협조 및 협력 방안 구축 필요

- 전략개발기술의 성공적인 실용화 및 국제 경쟁력 확보를 위해서는 범 정부적 역할 강조 및 연계·협력 구조가 필수적

- 바이오수소개발 사업과 관련하여 업무를 담당하고 있는 부처간 중복성 탈피 및 국비지원 요청

○ 결론적으로, 본 사업과 같이 '실용화/상용화 개념의 전략기술 개발' 사업의 경우에는 기술의 활용 및 운용 측면에서 강점을 확보하고 있는 해양수산부의 주도 하에 세부 기술의 경우에는 산업통상자원부, 미래창조과학부 등과 긴밀히 협력하여 사업 지원을 요청하는 것이 바람직함

❑ 해양바이오수소개발 사업의 실행계획 수립

○ "기본계획 마스터플랜 및 상용화 기본설계" 용역 추진 필요

- 민간 참여기업의 투자협정 서명을 위한 상세 투자기업 이익 및 R&D 추진내용(민간참여기업 위탁과제내용 및 역할분담 내역 등) 도출 필요

- 민간기업의 참여 이익 및 역할분담에 따른 시너지효과 내용 정리

• 민간 참여기업이 참여한 최적 R&D 실증플랜트 상세 설계사업 추진 필요

- 선행투자를 통한 사업 지속의 해양수산부 의지표명

• 사업단 구성·운영 세부사항을 규정한 훈령 제정 필요

- 운영규정, 운영위원회 운영지침, 관리규정/지침, 직제규정, 인사규정, 급여규정, 여비규정, 회계규정, 수당 등 지급규정, 직무행동강령, 취업규칙 등

○ 수소 활용을 위한 인프라시설 확보 및 단지 조성에 도/군의 지원·협조

- 지역균형발전 도모, 민간기업 투자 유인책 마련

- 제철소로부터 발생하는 폐부생가스를 이용한 원가절감효과를 도모하기 위하여 포스코 광양제철(주), 현대제철(주) 등의 인프라 기반시설 활용에 대한 적극적인 협조와 참여.지원이 필요

○ 해양바이오수소개발 사업의 산업화 성공을 위한 과제 해결

- 수소 자체 시장 확대로 인해 원료의 안정적인 조달 및 수입부담 경감의 제도적 장치 필요

- 바이오수소 중장기 보급계획과 단절없이 RFS로 전환될 수 있게 조기 시행 필요

8 참고문헌

이영철, "수소스테이션 국내외 현황과 운영 실적 및 시사점", 수소에너지정보 제38호, 고효율수소에너지제조·저장·이용기술개발사업단, 2012.03

국토해양부, "해양미생물로부터 미래대체 에너지 수소를 생산", 보도자료, 2009.09.08

기업경영분석, 한국은행, 각 년도

산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 2014.04

에너지관리공단, "신재생에너지백서", 2012

유진투자증권, "유틸리티 - 연료전지(발전용)", 2013.10.07

지식경제부, "신·재생에너지 공급의무화(RPS) 제도", 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2012.03

포스코에너지(주), 2012년 지속가능경영보고서

한국산업기술진흥원, "기술가치평가 실무가이드", 2011.12

한국수소 및 신에너지학회, "국내 부생수소 현황과 수소 유통 인프라", 논문집 제13권 제4호, 2002.12.한국에너지기술평가원, "2013 에너지기술 로드맵", 2013.12

한국신용평가, Rating Report - 포스코에너지(주), 2013.12.27

한국해양과학기술진흥원, 2011년 해양과학기술연구개발사업 연구성과 자료집

NICE신용평가, "포스코에너지(주)", 2013.12.27

(주)엔솔테크, "20L 반응기 실험 결과 분석 및 NA1 수소생산 성공 조건 분석", 2011.06.02.포스코에너지(주) 사업보고서, 각 년도

H.Kim, Pohang Technopark, Development of supply chain in Fuel Cell Industry, 2014.02

Nicholas Stern, "Stern Review on the Economics of Climate Change", 2006

Fuel Cell Today, Industry Review, 2013

(주)엔솔테크 홈페이지, http://www.ensoltek.co.kr

포스코에너지(주) 홈페이지, http://www.poscoenergy.com

글로벌에너지개발(주) 홈페이지, http://globalenergy.kr

한국에너지기술연구원 수소연구실 블로그, http://blog.naver.com/gir5101

전력통계정보시스템, http://epsis.kpx.or.kr

Klibanov AM, Alberti BN, Zale SE. Enzymatic synthesis of formic acid from H2 and CO2 and production of hydrogen from formic acid. Biotechnol Bioeng 1982;24:25–36.

Pakes WCC, Jollyman WH. The bacterial decomposition of formic acid into carbon dioxide and hydrogen. J Chem Soc Trans 1901;79:386.

Seol E, Manimaran A, Jang Y, Kim S, Oh Y-K, Park S. Sustained hydrogen production from formate using immobilized recombinant Escherichia coli SH5. Int J Hydrogen Energy 2011;36:8681–6.

Yoshida A, Nishimura T, Kawaguchi H, Inui M, Yukawa H. Enhanced hydrogen production from formic acid by formate hydrogen lyase-overexpressing Escherichia coli strains. Appl Environ Microbiol 2005;71:6762–8.

Heyndrickx M, Vos P, Speybrouck A, Ley J. Fermentation of mannitol by Clostridium butyricum: role of acetate as an external hydrogen acceptor. Appl Microbiol Biotechnol 1989;31:323-8.

Martins M, Pereira IAC. Sulfate-reducing bacteria as new microorganisms for biological hydrogen production. Int J Hydrogen Energy 2013;38:12294–301.

Lim JK, Bae SS, Kim TW, Lee J-H, Lee HS, Kang SG. Thermodynamics of formate-oxidizing metabolism and implications for H2 production. Appl Environ Microbiol 2012;78:7393–7.

Klasson KT, Lundbäck KMO, Clausen EC, Gaddy JL. Kinetics of light limited

growth and biological hydrogen production from carbon monoxide and water by Rhodospirillum rubrum. J Biotechnol 1993;29:177–88.

Oh Y-K, Kim Y-J, Park J-Y, Lee TH, Kim M-S, Park S. Biohydrogen production from carbon monoxide and water by Rhodopseudomonas palustris P4. Biotechnol Bioprocess Eng 2005;10:270–4.

Jung GY, Kim JR, Park JY, Park S. Hydrogen production by a new chemoheterotrophic bacterium Citrobacter sp. Y19. Int J Hydrogen Energy 2002;27:601–10.

Sokolova TG, González JM, Kostrikina NA, Chernyh NA, Slepova T V, Bonch-Osmolovskaya EA, et al. Thermosinus carboxydivorans gen. nov., sp. nov., a new anaerobic, thermophilic, carbon-monoxide-oxidizing, hydrogenogenic bacterium from a hot pool of Yellowstone National Park. Int J Syst Evol Microbiol 2004a;54:2353–9.

Zhao Y, Haddad M, Cimpoia R, Liu Z, Guiot SR. Performance of a Carboxydothermus hydrogenoformans-immobilizing membrane reactor for syngas upgrading into hydrogen. Int J Hydrogen Energy 2013;38:2167–75.

Kim M-S, Bae SS, Kim YJ, Kim TW, Lim JK, Lee SH, et al. CO-dependent H2 production by genetically engineered Thermococcus onnurineus NA1. Appl Environ Microbiol 2013;79:2048–53.

Kim YJ, Lee HS, Kim ES, Bae SS, Lim JK, Matsumi R, et al. Formate-driven growth coupled with H2 production. Nature 2010;467:352–5.

Kim M-S, Choi AR, Lee SH, Bae SS, Kim TW, Lim JK, Lee JH, et al. A novel CO regulator and enhanced pendent H2 production by genetically engineered Thermococcus onnurineus NA1. Appl Environ Microbiol 2014. Appl Environ Microbiol submitted.

9 제안요구서 (RFP) (안)

과제번호	해양생명공학기술		기술분야	실용화
과 제 명	해양 고세균 이용 바이오수소 실용화 기술 개발 사업			
연구기간	4년	예상 정부지원액(당해)		4,000백만원 이내

가. 연구개발의 필요성

◦ 화석에너지원은 20세기의 주요 에너지 자원이며 현재에도 총 85% 이상의 에너지 자원으로 사용되고 있어 이로 인한 환경오염, 지구의 온난화 등 다양한 문제 야기

- 바이오에너지의 생산과 이용기술을 개발하려는 추세

◦ 새로운 대체 에너지의 보급, 그린 에너지 개발의 시장 니즈에 부응한 새로운 부가가치 산업 창출의 필요성이 대두되고 있고, 수소경제는 대안 중 하나

- 전 세계적으로 거래되는 수소는 약 1억톤/년 정도로 매년 수요가 증가하고 있고 (2010년 기준), 전력 및 에너지 분야 외에도 화학제품 원료, 식품공업, 전자부품 생산, 제철소, 탈황 및 정유공장의 가솔린 개질 등 산업 분야에 광범위하게 이용될 것으로 전망
- 에너지 위기와 대체에너지 개발을 위한 지속적인 수소생산기술 개발 필요

◦ RPS제도 확대 대비한 수소생산성 및 원가절감 해소의 핵심원천기술 확보

- 현재 소비되는 수소 대부분은 화석연료 유래로 재생자원을 활용한 수소생산방식 필요
- 전 세계적 CO2 감축노력에 따라 장기적으로 지속가능 친환경 수소생산 기술개발에 대한 필요성이 증대됨. 이에 따라, 재생자원을 활용한 경제적 수소생산 기술이 절실히 요망

◦ R&BD 모델제시로 창조경제 실현과 블루오션 시장 창출 노력이 대두

- 한국 고유의 원천소재/기술을 이용한 바이오수소생산은 신성장동력 및 미래경쟁력
- 고효율 수소생산 미생물로 주목 받고 있는 해양 고세균을 이용하여 산업부생가스, 재생자원을 이용한 세계 최고수준의 바이오수소 생산성확보를 통해 신산업 창출이 가능

나. 연구개발 현황 및 수준

◦ 미국, 일본, 독일 등 선진국에서는 지난 70년대 말부터 수소의 제조, 저장, 이용 등 분야별 연구개발을 통해 실용화 기반기술 확보중
- 아시아태평양경제협력체(APEC)는 바이오에탄올('20년까지)→ 수소('30년까지)의 단계로 기술개발 진행을 전망
- 수소연료전지의 경우 美, 日, EU 중심으로 연간 10억 달러 규모의 R&D 프로그램 진행 중
- ㈜현대자동차는 세계 최초로 수소연료전지 자동차 양산, '15년까지 1,000대 판매계획 발표
- * '20년 수소연료자동차는 약 280만대 판매로 약 239억 달러 시장 형성 전망

◦ 우리나라의 경우 80년대부터 수소 활용 연구 수행 중이며, 미래창조과학부의 21C 프론티어 사업으로 한국에너지기술연구원의 '고효율수소에너지 제조, 저장, 이용기술 개발 사업단을 통해 본격화 됨.

◦ 국내 대학 및 연구기관에서 해양 광합성 미생물이나 유기성폐자원을 이용한 수소생산 기초연구 진행중

◦ 해양 고세균을 이용하여 산업폐가스를 원료물질로 한 수소생산 연구는 전 세계적으로 미미한 상태로 기초기술 개발을 통해 우선권 확보 가능.
- '90년대 후반부터 극한 미생물 이용 연구가 본격화 됨.
- 일산화탄소이용 바이오생산기술은 '96년 이후부터 출원되기 시작하여 '00년대 후반부터 급격히 증가하고, CO의 생물학적 전환 관련 특허는 미국특허가 전체의 47%(46건)를 차지하고 있으며 한국특허 28%(27건), 일본특허 20%(20건)를 점유
- 공정분류별로는, 반응기 42%, 알코올·유기산 27%, 배기가스처리/활성유지 등 12%, 수소 8%, 가스전처리·배지 5%, 종균 1% 점유율 순으로 바이오

수소 기술은 한국이 독보적인 부분을 차지함.

다. 연구목표 및 내용

(1) 최종목표 : 해양 고세균을 이용한 바이오수소 대량생산 실용화 기술 개발

◦ 바이오수소 생산 산업균주 최적화 및 안정성 평가

◦ 바이오수소 대량생산 프로세스 개발

◦ 바이오수소 대량생산을 위한 원료물질 확보

◦ 대량생산 데모플랜트 (10톤규모) 고안, 설계, 제작 및 가동

◦ 사업타당성 평가 및 실용화 방안제시

(2) 연차별 목표(예시)

연차	연구내용	예상정부지원액
1년차	▪ 바이오수소 생산 해양 고세균 산업균주 개발 - 바이오수소 생산 돌연변이 최적화 ▪ 일산화탄소 이용 바이오수소 대량생산 공정 최적화 - 연속공정 개발 및 최적화 - 물질전달효율이 개선된 CO 공급장치 개발 및 최적화 ▪ 일산화탄소 함유 경제적 원료물질 확보 및 공정 개발 - 제철소 부생가스, 합성가스이용 공정개발 (확보방안, 세포 저해, 세포 생장 및 수소생산 특성 규명) ▪ 수소 대량생산 데모플랜트 설계 - 최적 미생물배양기 도출 및 데모플랜트 설계	40억원
2년차	▪ 바이오수소 생산 해양 고세균 산업균주 개발 - 수소생산성 최적화 (수소생산성 450 mmol/g/h) - 산업균주 안정성 평가 (10일 이상 유지) ▪ 일산화탄소 이용 바이오수소 대량생산 공정 최적화 - 연속공정 개발 (생산성 350 mmol/L/h, CO전환율 75%) - 물질전달효율이 개선된 CO 공급장치 개발 및 최적화 ▪ 일산화탄소 함유 경제적 원료물질 확보 및 공정 개발 - 제철소 부생가스, 합성가스 이용 물질전달계수, 희석속도 등 수소생산 조업조건 특성 규명 ▪ 수소 대량생산 데모플랜트 설계 - 플랜트 규모 (10톤 이상) 및 부지 선정	40억원

	- 원료물질공급, 미생물배양, 수소정제·저장 및 폐기물처리 등전 공정 상세 설계	
3년차	▪ 바이오수소 생산 해양 고세균 산업균주 개발 - 수소생산성 최적화 (수소생산성 500 mmol/g/h) - 산업균주 안정성 평가 (30일 이상 유지) ▪ 일산화탄소 이용 바이오수소 대량생산 공정 최적화 - 연속공정 개발 (생산성 400 mmol/L/h, CO전환율 80%) - 물질전달효율이 개선된 CO 공급장치 개발 및 최적화 ▪ 일산화탄소 함유 경제적 원료물질 확보 및 공정 개발 - 제철소 부생가스, 합성가스 기존 산업시설 활용방안 도출 ▪ 바이오수소 생산공정 패키지화: 데모플랜트 공정모사 - 공정 simulator 운전 ▪ 데모플랜트 구축 - 데모플랜트 준공 및 시범운전 완료 ▪ 바이오수소 활용 시설 구축: - 바이오수소 활용방안 제시 및 활용시설 구축	60억원
4년차	▪ 바이오수소 생산 해양 고세균 산업균주 개발 - 원료물질 활용 연속수소생산 30일 이상 ▪ 일산화탄소를 원료로 이용한 바이오수소 대량생산 공정 최적화 - 연속공정 개발 (생산성 450 mmol/L/h, CO전환율 85%) - CO 공급장치 개발 및 최적화: CO 물질전달효율 950 h^{-1} - 희석속도, CO 공급속도 등 최적 연속조업 조건 도출 ▪ 경제적 원료물질 확보 및 공정 개발 - 제철소 부생가스, 합성가스 데모플랜트 실증 ▪ 데모플랜트 (10톤 이상) 운용 및 바이오수소 연속 대량생산 - 연중 운전시간: 500 시간 이상 - 연속 수소생산: 150 시간 이상 - 일일 수소생산량: 200 kg 이상 ▪ 바이오수소 생산공정 패키지화 - TEA (Techno-economic analysis)를 통한 경제성, 사업성 평가 - 공정 전주기 분석에 의한 환경성 평가 - 실용화 방안 도출	60억원
합계		200억원

(3) 주요개발내용 (1차년도)

◦ 바이오수소 생산 산업균주 개발

- 수소생산성 우수균주 생산성 최적화 및 안정성 평가

◦ 바이오수소 대량생산 기술개발

- 바이오수소 연속 대량생산 공정 최적화: 배지 희석속도, CO 물질전달계수에 따른 세포농도, CO 전환율 및 바이오수소 생산 특성 규명
- CO 물질전달효율 극대화 기술 개발 : CO 공급속도 최적화, 미반응 CO 재순환 프로세스 개발, 마이크로버블 공급기술 개발, 반응기 구조 최적화 등

◦ 원료물질 확보방안 연구

- 제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발 : 가스의 세포 저해, 세포 생장 및 수소생산 특성 규명
- 가스화 합성가스 활용 바이오수소 생산 원천기술 개발 : 원료의 가스화 산물조사 및 적용성 검토

◦ 10톤규모 바이오수소 생산 데모플랜트 설계 : 대량 생산을 위한 열 및 원료 물질 공급시설 설계 및 개발, 가스발효에 적합한 최적 미생물배양기 도출

라. 주관연구책임자 자격

◦ 대학교 부교수급 이상, 연구기관(국·공립, 민간포함)의 선임급 이상

◦ 참여제한

- 국가연구개발사업의 사업단장으로서 직무를 수행중인 경우는 참여가 제한될 수 있으며, 국가연구개발사업의 제재조치 대상자의 경우 범위 및 기간 등에 따라 참여를 제한함

마. 예상정부지원액

(단위 : 백만원)

중점추진 세부과제(예시)	소요기간	1년차 지원액
- 바이오수소 생산 우수산업균주 개발 ·우수산업균주 수소생산 최적화 ·연속 수소생산 프로세스 안정성 평가 - 바이오수소 대량생산 기술개발 ·연속생산 공정 최적화 (희석속도, 물질전달계수 등 조업조건 최적화) ·CO 물질전달효율 극대화 (CO 공급속도 최적화, 미반응 CO 재순환 프로세스 개발, 마이크로버블 공급기술 개발, 반응기 구조 최적화 등) - 원료물질 확보방안 연구 ·제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발 ·가스화 합성가스 활용 바이오수소 생산 원천기술 개발 - 10톤규모 바이오수소 생산 데모플랜트 설계	1년	4,000
- 바이오수소 생산 우수산업균주 개발 ·우수산업균주 수소생산 최적화 ·연속 수소생산 프로세스 안정성 평가 - 바이오수소 대량생산 기술개발 ·연속생산 공정 최적화 (희석속도, 물질전달계수 등 조업조건 최적화) ·CO 물질전달효율 극대화 (CO 공급속도 최적화, 미반응 CO 재순환 프로세스 개발, 마이크로버블 공급기술 개발, 반응기 구조 최적화 등) - 원료물질 확보방안 연구 ·제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발 ·가스화 합성가스 활용 바이오수소 생산 원천기술 개발 - 10톤규모 바이오수소 생산 데모플랜트 설계, 부지선정 및 구축	1년	4,000
- 바이오수소 생산 우수산업균주 개발 ·우수산업균주 수소생산 최적화 ·연속 수소생산 프로세스 안정성 평가 - 바이오수소 대량생산 기술개발 ·연속생산 공정 최적화 (희석속도, 물질전달계수 등 조업조건 최적화) ·CO 물질전달효율 극대화 (CO 공급속도 최적화, 미반응 CO 재순환 프로세스 개발, 마이크로버블 공급기술 개발, 반응기 구조 최적화 등) - 원료물질 확보방안 연구 ·제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발 ·가스화 합성가스 활용 바이오수소 생산 원천기술 개발 - 10톤규모 바이오수소 생산 데모플랜트 구축 - 바이오수소 활용시설 구축	1년	6,000
- 바이오수소 생산 우수산업균주 개발 ·우수산업균주 수소생산 최적화		6,000

·연속 수소생산 프로세스 안정성 평가 - 바이오수소 대량생산 기술개발 ·연속생산 공정 최적화 (희석속도, 물질전달계수 등 조업조건 최적화) ·CO 물질전달효율 극대화 (CO 공급속도 최적화, 미반응 CO 재순환 프로세스 개발, 마이크로버블 공급기술 개발, 반응기 구조 최적화 등) - 원료물질 확보방안 연구 ·제철소 부생가스 활용 바이오수소 대량생산공정 개발 ·가스화 합성가스 활용 바이오수소 생산 원천기술 개발 - 10톤규모 바이오수소 생산 데모플랜트 운용 - 바이오수소 생산공정 패키지화 및 경제성, 사업성 분석		
합 계	4년	20,000

※ 연구기간, 연구개발비 등은 사정에 따라 변경될 수 있으며, 차년도 연구개발비는 제안자의 계획에 따라 산정

바. 기타(특별요구사항)

◦ 해양생명공학사업 추진 정책 및 전략 관련하여 정부가 요구하는 연구수행을 원칙으로 하며, 정부의 바이오 에너지관련 기관들과의 연계를 통하여 추진

◦ 사업단과제 형식으로 신청함을 원칙으로 함

- 세부과제는 RFP상의 '연구목표와 내용'을 고려하여 자율로 정하며, 총괄연구책임자는 반드시 하나의 세부과제책임자를 겸함

◦ 연차별 정량적 성과목표, 최종년도 연구개발 종료 후의 후속 대책 및 방안을 연구계획서에 제시

◦ 사업에서 발생된 유무형의 지적재산권은 연구기관의 소유로 하며, 해양수산부 해양과학기술 운영 규정 및 지침에 따름

◦ 정부의 정책에 따라 2년차 이후 '바이오수소 실용화'에 관한 2단계 사업을 별도 공모 가능

부록. 수소시장 전망 분석

Appendix

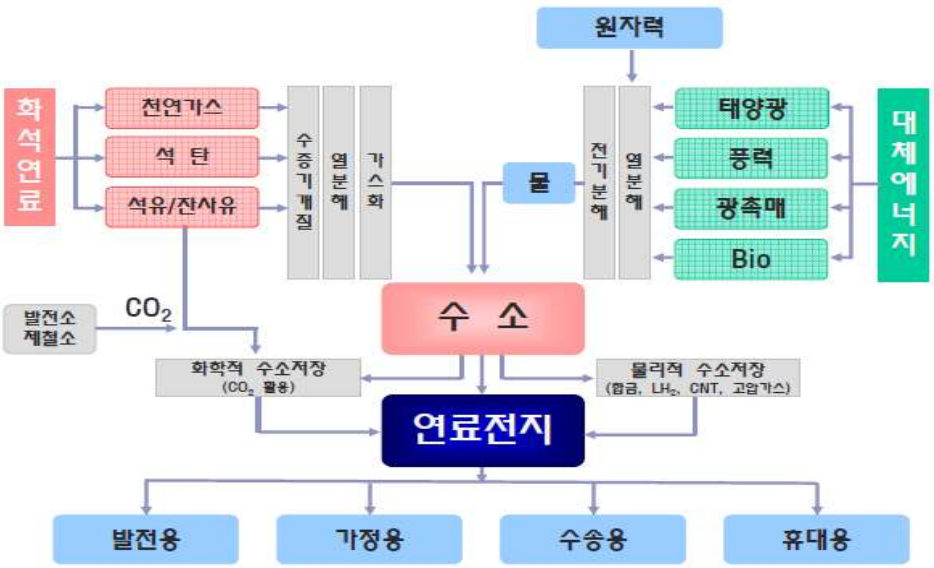
1 산업 및 시장평가

1.1 목표시장 분석

동 기술의 사업화를 통해 양산될 수소생산 시스템의 주요 시장은 수소 연료전지 및 제철소의 부생가스 재활용 시장임

[부록_그림 1] 전후방 산업 구조

동 기술의 최종제품에 대한 수요산업인 수소 연료전지 및 부생가스의 재활용 산업은 새로운 대체 에너지의 보급, 그린 에너지 개발의 시장 니즈에 따라 전 세계적인 관심이 주목되고 있는 실정이며, 특히 본 기술을 이용하여 수소생산의 수율 및 원가절감을 해소할 수 있어, 목표 시장으로의 진출이 용이할 것으로 사료됨



[부록_그림 2] 수소경제와 연료전지

연료전지는 연료의 화학적 에너지를 전기에너지로 변환하는 발전장치로, 태양광, 태양열, 풍력 및 동 기술의 수소에너지를 화석연료의 이용 없이 에너지를 반복적으로 만들어내는 분야로, 1990년 대 후반 이후, 전자기기, 자동차용으로 개발을 시도했으나, 현재는 관련 시장이 부진한 편임. 그러나 동 기술과 같이 고농도 수소제조의 기술을 바탕으로, 수소를 이용한 연료전지의 개발에도 부흥이 가능할 수 있을 것으로 예상되며, 이 외에 안정성, 사업 및 경제적 분석을 통한 타깃 어플케이션의 선정을 통하여 향후 수소이용 시스템의 개발에 집중할 수 있을 것으로 분석됨

1.2 시장규모와 성장성

수소는 공기 중의 산소와 단순한 전기화학 반응으로 열과 전기를 생산할 수 있으며, 부산물도 물(H2O) 밖에 없어 환경오염물질을 거의 배출하지 않는 청정 대체에너지원으로 각광 받고 있고, 또한 단위 중량당 높은 발열량을 가지고 있으며, 산업용 기초소재부터 일반연료, 자동차, 비행기, 연료전지 등 현재의 에너지시스템에서 사용되는 거의 모든 분야에서 이용이 가능함

하지만 현재는 수소의 대부분이 천연가스나 나프타 등 수입에 의존하는 화석연료에서 생산되고 있고, 최근 원유가 상승 및 수소 수요증가로 원료가격이 급등하는 추세에 있어 신재생자원을 활용한 수소 생산기술 개발이 요구되고 있는 상황임. 특히, 반도체 제조 공정 등에서 사용되는 고순도 수소 가격의 경우 1kg당 10,000원 정도로 최근 증가추세에 있음

현재 우리나라 수소의 전체 생산량은 한해 약 250만 톤(2008년 기준, 3 ~ 4조원 가치) 정도로 추정되며, 이 중 95% 이상이 자체 소비되고, 5%이내 만이 시장에서 거래되고 있는 것으로 파악되고 있어, 순수 판매용수소생산량은 약 12만 톤(시장규모 1,800억 원) 가량으로 추산됨

이에 따라 동 기술을 사업화하여 순수 국내기술만으로 수소를 생산한다면, 향후 수소 연료전지 및 수소 자동차 등 수소 에너지 시스템을 이용할 수 있으며, 폭 넓은 응용분야 및 시장에 따라 그 성장성은 매우 클 것으로 예상됨

동 기술의 1차적 사업화 대상으로 제철소의 부생가스 재활용 분야가 있으며, 동 기술을 이용하여 사업화를 추진할 시, 약 1천억 원 규모의 시장을 전망할 수 있음

제철소의 전로가스(LDG 가스)는 60% 정도의 일산화탄소를 함유하고 있는데, 지금까지는 대부분 제철소 자체발전을 위한 열원으로 사용되거나 대기 중으로 방출되

고 있었음. 이 중 한해 200만 톤 이상은 활용이 가능한 것으로 파악되고 있으며, 이를 이용하여 바이오수소를 생산할 경우 환경오염 물질의 저감과 신재생에너지 생산이라는 두 가지 기대효과를 모두 충족할 수 있을 것으로 예상함

2018년까지 동 기술의 대량생산기술의 개발을 완료할 경우, 일산화탄소를 활용한 바이오수소 생산이 가능해져 국내 수소 수요의 약 5%(연간 1만 톤 생산, 고순도 수소의 경우 1천억 원 규모) 정도를 대체할 수 있을 것으로 보임

[수소 1만 톤의 산업화 사용 능력]
1 연료전지 활용 전기 생산 시 4만가구의 1년 전력소비량
*가구당 1달 평균 전력소비량 300kWh 기준시
2 수소자동차 5만대 1년 운행 가능량
* 자동차 1대당 1년 평균 2만Km 주행 및 수소 1Kg당 100km 주행 기준

동 기술은 현재 2015년까지 2단계 수소생산성 향상에 대한 연구를 진행 중에 있으며, 현재 kg 당 7~20 달러의 생산 원가에서 약 2 ~ 3 달러의 생산원가로 낮출 것으로 예측되어 경제성을 확보할 것으로 예상하고 있어, 향후 2년 이내에 수소 연료전지 및 수소 자동차 개발 등의 시장 진입이 가능할 것으로 기대함

1.3 수소에너지기술 사업화 현황

1.3.1. 사업화 현황 개요

세계적인 미래학자 Thomas L. Friedaman은 21세기가 안고 있는 5대 문제로 천연자원 고갈과 에너지 수급, 석유독재, 기후변화, 에너지 빈곤, 생물 다양성의 감소를 꼽고 있음

실생활에 큰 영향을 미치는 유가와 원자재가격이 등락을 거듭하면서 생산비용의 불확실성이 증폭되고 있어 대내외적으로 경제성장의 중장기적 전망을 흐리게 함

천연자원 중 에너지원으로 큰 비중을 차지하고 있는 석유는 40년, 천연가스는 58년 후 고갈될 것으로 예측(World Resource Institute)되고 있으며, 세계 경제의 한 축으로 급부상한 중국의 석유 소비량이 '97년 ~ '98년 사이 두 배 이상 급증하여 에너지 수급에 위기감이 고조되고 있음

산업혁명 이후 화석연료 사용증가와 온실가스 배출 증가로 인하여 1906 ~ 2005년 간 세계적으로 평균기온은 0.74℃ 상승하였고, 한국의 경우 1912 ~ 2008년 간 1.7℃ 상승하였음. Stern Report(2006)[xii]에 따르면 지구의 온도상승으로 인한 경제

xii Nicholas Stern, "Stern Review on the Economics of Climate Change", 2006

적 손실은 GDP의 5 ~ 20%에 이를 것으로 경고하고 있음

이러한 어려움에 직면하여 각 국가들은 대체에너지를 모색하고 있으며, 태양, 풍력, 조력 및 수소연료전지 등의 신·재생에너지의 연구에 집중하고 있음

[부록_그림 3] 수소를 기반으로 한 수소 경제 사회 도래

신·재생에너지의 중요한 가능성으로 전문가들은 수소에너지와 이를 이용한 연료전지를 들고 있으며, 향후 수소에너지 기술 주도권을 잡기 위해 세계가 실제 전쟁보다 더 치열한 전쟁을 치를 것으로 내다보고 있음. 이미 미국, 일본, 유럽 등에서 그 경쟁 열기가 뜨겁게 달아오르고 있음

지난 2003년 1월 미국의 부시 대통령은 석유 고갈에 대비하여 5년 동안 17억 달러를 수소기술 개발에 투입하겠다고 밝혔었으며, 세계 최대 에너지 소비국인 미국은 1992년 美에너지국(DOE) '수소 프로그램'을 바탕으로 수소의 제조·저장·안전·인프라·응용 등의 요소기술 전반의 개발에 나서, 2015년경 실용화 기술개발 완료를 목표로 하고 있음

지구 환경 규제를 주도하고 있는 유럽 역시 1999년부터 2002년까지 수소연료전지 분야에 총 1억 3500만 유로를 투입한 데 이어, 2004년부터 2006년 사이에 총 2조 4000억 원을 집중 투입하는 등의 수소에너지 분야에 역량을 집중하는 전략을 펴고 있음

수소 경제 국가를 선언한 아이슬란드에서는 2003년 지금의 주유소와 같은 개념의 상업용 수소 충전소(수소 스테이션)가 처음 생기고, 이미 수소자동차가 공급되고 있으며, 독일도 수소에너지 시스템 기술 실증 플랜트를 설치하여 운용하는 등 수소에너지 시대에 대비하고 있고, 독일 뮌헨공항 구내에서는 수소자동차가 이용되고 있음

또한, 자원 빈국 일본은 범정부 차원에서 대응하고 있는데, 지난 2005년 수소자

동차와 수소스테이션을 구축한 일본 정부는 2020년까지 수소를 에너지로 한 연료전지차를 500만 대까지 보급시킨다는 목표를 세워놓고 있음

자원의 제약성과 환경문제에서 자유로운 수소에너지가 2020년쯤 본격 실용화되면, 21세기는 새로운 수소 경제시대를 열어갈 것임

[부록_표 1] 수소생산 현황과 과제

생산방법	원료	현황	과제
화석연료로부터 생산	석유, 나프타, 천연가스	상용화된 기술 단기적인 방안으로 우선적용 궁극적으로 재생에너지로 대체	효율 저가화 단기간 수소스테이션용으로 공정 및 장치 최적화
재생에너지로부터 생산	바이오매스	상용화된 기술 단기적 이용 가능	-
	수전해	소규모로 상용화	고압의 수전해장치개발 재생저원에 적합한 소재개발 용량증대 높은 효율
	생물학적	시험단계	생산효율 및 속도증대
재생에너지로부터 화합물 생산으로 생산	메탄올	개질을 위한 촉매연구 진행	CO발생 최소화 저온에서의 반응

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04

[부록_그림 4] 수소경제 시나리오

2030년 수소경제의 실현을 위하여 현재는 친환경적인 수소생산 및 연료전지 제조기술, 수소 저장 기술/대량 생산의 기술개발이 필요한 상황임

1.3.2 산업용 수소시장 현황

수소경제 실현을 위한 산업용 수소생산 및 시장에 대하여 살펴보도록 함. 수소는 생산방법에 따라 화석연료 및 재생에너지로부터 생산이 가능하며, 현재는 석유, 나프타 등의 화석연료를 이용하고 있어, 상용화를 추진하고 있으나 궁극적인 신·재생에너지로의 대체를 위해서는 바이오매스, 수전해 및 생물학적인 수단을 이용한 수소 생산으로의 기술개발이 필요함

산업용 수소는 반도체, 자동차, 철강, 석유화학, 태양전지 및 LED 등 우리나라 주력 산업의 기초소재로 쓰이고 있으며, 산업의 성장세와 함께 시장이 점차 확대되고 있는 추세임. 이와 같은 추세에 따라 공급시장도 성장하고 있어, 국내 최대 수소 전문 공급기업인 덕양은 2013년 9월 군산과 여수에 생산설비를 연이어 준공하며 투자를 추진하고 있으며, 창신화학은 2013년 4월 충남 서산에 수소 생산시설을 완공하고 5월부터 본격 생산을 시작하는 등, 수소 생산 기업의 생산 확대 투자로 국내의 수소 생산량이 큰 폭으로 늘면서 현재는 수소 판매 경쟁이 심화되고 있는 양상을 보임

1.3.2.1 국내 산업용 수소 총 생산량

수소는 공업적으로 보통 천연가스를 비롯한 탄화수소의 열분해에 의해 제조되지만 국내 수소가스 원료는 석유화학사의 정제과정에서 나프타분해 방식으로 얻고 있음. 또한 소량이 천연가스로부터의 프로판탈수소와 소금물분해, 철강사의 제철공정상의 부산물로 생산됨. 따라서 원료공급처의 확보가 생산캐퍼와 직결되고 있음.

원료공급처의 생산능력을 통해 분석하면 덕양이 10만9,000㎥/h로 1위를 기록했으며, 이어서 SPG케미칼이 5만㎥/h로 2위를 기록했으며, 3위는 에어리퀴드로 4만5,000㎥/h를 생산, 4위는 린데로 1만2,100㎥/h를 생산함

또, 5위는 SDG로 6,000㎥/h를 생산하며, 6위는 2013년 수소시장에 새롭게 등장한 창신화학이 2,800㎥/h를 생산하였으며, 7위는 대성산업가스로 2,000㎥/h를 생산함

이에 7사의 생산능력을 모두 합하면 총 22만6,900㎥/h에 달하며, 이는 지난 2012년 18만2,100㎥/h와 비교하면 19.7%, 4만4,800㎥/h가 증가한 수치임

각 회사별로 살펴보면 1위 업체인 덕양은 2012년 6만7,000㎥/h에서 2013년 10만9,000㎥/h로 38.5%, 4만2,000㎥/h가 상승했으며, 2위 업체인 SPG 케미칼, 3위 업체인 에어리퀴드, 4위 업체인 린데, 5위 업체인 SDG와 7위 업체인 대성산업가스는 2012년과 2013년이 변동 없이 동일했음

여기에 올해 신규로 시장에 진입한 창신화학의 2,800㎥/h를 덕양의 증가분인 4만2,000㎥/h와 합하면 올해의 증가분인 4만4,800㎥/h가 되며, 이중 덕양의 증가분이 93.75%를 차지함

[부록_표 2] 국내 공업용 수소 업체별 생산량

업체명	원료공급처	지역	제조방식	생산능력(2013)	생산능력(2012)
덕양	한화석유화학	여수	소금물분해	35,000m^3/h	20,000m^3/h
	SK	울산	나프타분해	10,000m^3/h	10,000m^3/h
	삼성정밀화학	울산	소금물분해	15,0000m^3/h	9,000m^3/h
	삼성토탈	서산	나프타분해	9,0000m^3/h	9,000m^3/h
	태광산업	울산	프로판탈수소	14,000m^3/h	7,000m^3/h
	LG화학	여수	소금물분해	11,000m^3/h	-
	백광산업	군산	소금물분해	5,0000m^3/h	5,000m^3/h
		여수	소금물분해	1,500m^3/h	1,500m^3/h
	롯데케미칼	서산	나프타분해	3,000m^3/h	3000m^3/h
		여수	나프타분해	3,000m^3/h	-
	삼성BP화학	울산	나프타분해	2,500m^3/h	2,500m^3/h
	덕양(2014.07)	울산	NG분해	(50,000)m^3/h	-
	소 계			109,000(159,000)m^3/h	67,000m^3/h
SPG 케미칼	롯데케미칼 · LG화학	여수	나프타분해	40,000m^3/h	40,000m^3/h
		대산	나프타분해	4,000m^3/h	4,000m^3/h
	삼성토탈	대산	나프타분해	2,000m^3/h	2,000m^3/h
	삼성BP화학	울산	나프타분해	2,000m^3/h	2,000m^3/h
	이수화학	울산	프로판탈수소	1,000m^3/h	1,000m^3/h
	효성	울산	나프타분해	1,000m^3/h	1,000m^3/h
	소 계			50,000m^3/h	50,000m^3/h
에어리퀴드	에어리퀴드1	여수	나프타분해	7,000m^3/h	7,000m^3/h
	에어리퀴드2	여수	나프타분해	38,000m^3/h	38,000m^3/h
	소계			45,000m^3/h	45,000m^3/h
린데	LG화학	대산	나프타분해	9,000m^3/h	9,000m^3/h
	삼성	기흥	CNG개질(SMR)	1,600m^3/h	1,600m^3/h
	린데	포항	나프타분해	1,200m^3/h	1,200m^3/h
	포스코	포항	코크스	300m^3/h	300m^3/h
	소 계			12,100m^3/h	12,100m^3/h
SDG	대한유화	울산	나프타분해	6,000m^3/h	6,000m^3/h
대성산업가	대성산업가스	파주	메탄올	2,000m^3/h	2,000m^3/h
창신화학	롯데케미칼·LG화학	서산	나프타분해	2,800m^3/h	-
총 계				226,900(276,900)m^3/h	182,100m^3/h

1.3.2.2 국내 카트리지 공급용 수소 총생산량

국내 수소시장은 대규모 수요처 공급을 위한 파이프라인 방식과 중·소규모 수요처를 대상으로 한 카트리지 공급방식으로 체계가 나눠져 있음. 국내 카트리지 공급용 수소 총생산 능력을 살펴보면 덕양이 9,600㎥/h로 가장 많이 생산하고 있으며 이는 덕양의 총 수소 생산 능력에 8.8%에 해당하는 수치임

또, SPG케미칼은 6,200㎥/h로 총 생산능력의 12.4%의 카트리지 공급용 수소를 생산하고 있으며, 이어 창신화학은 2,800㎥/h로 총 생산능력의 100%를 카트리지 공급용으로 수소를 생산하고 있음.

SDG는 2,500㎥/h로 41.7%를 차지하며, 린데는 1,600㎥/h로 13.2%를 차지함. 마지막으로 에어리퀴드는 800㎥/h로 카트리지 생산은 1.8%에 불과함

대성산업가스는 카트리지 생산을 하지 않으며 2,000㎥/h급 플랜트를 통해 LED 제조사인 LG이노텍에 수소를 파이프라인 방식으로 공급함

이에 국내 카트리지 공급용 수소 총생산을 계산하면 2만3,500㎥/h에 달하며 이는 국내 수소 총 생산능력의 21.6%에 해당함

2012년의 카트리지 수소 점유율인 28.5%와 비교하면 6.9% 감소한 것으로 카트리지 생산능력에 비해 총 생산능력이 더 많이 늘어났음을 알 수 있으며, 카트리지 수소 생산량만으로 단순 비교하면 2012년 2만 700㎥/h에 비해 2,800㎥/h가 상승하였음

각 제조사의 공장별로 압축기 1대식을 백업용으로 계산한 카트리지 가용생산량은 1만7,860㎥/h로 추정되고 있으며, 이는 2012년 1만5,760㎥/h에 비해 2,100㎥/h, 11.7% 상승한 수치임

각 제조사의 백업용량을 감안한 카트리지 가용생산능력을 살펴보면 △덕양 8,160㎥/h, △SPG 4,200㎥/h, △창신화학 2,100㎥/h, △SDG 2,000㎥/h, △린데 1,000㎥/h, △에어리퀴드 400㎥/h로 파악되고 있음

1.3.2.3 국내 카트리지 판매량

2013년 국내 카트리지 판매량을 살펴보면 총 1만2,100㎥/h로 파악되고 있음. 이는 2012년 1만2,600㎥/h보다 4.13%, 500㎥/h가 줄어든 수치임. 특히 카트리지 생산량이 12.7% 상승한 것과 비교하면 차이는 더욱 커지며, 이에 2013년 수소 카트리지 판매가 부진했음을 보여주고 있음.

덕양은 높은 생산량 증가에 비해 카트리지 판매량은 감소했는데, 2013년 수소 카트리지 판매량이 6,000㎥/h로 2012년 6,200㎥/h에 비해 200㎥/h가 감소했음. 더불어 SPG도 2013년 3,800㎥/h로 2012년 4,000㎥/h에 비해 200㎥/h가 감소했으며, 린데는 2013년 900㎥/h로 2012년 1,000㎥/h에 비해 100㎥/h가 감소했음. 한편 신규 진입한 창신화학의 경우는 영업기간이 짧은 관계로 정확한 수치가 알려지지 않고 있음

[부록_표 3] 국내 카트리지 공급용 수소 총 생산능력

업체명	2013년	2012년
덕양	9,600m^3/h(6,912,000m^3//월)	9,600m^3/h(6,912,000m^3/월)
SPG	6,200m^3/h(4,464,000m^3/월)	6,200m^3/h(4,464,000m^3/월)
린데	1,600m^3/h(1,152,000m^3/월)	1,600m^3/h(1,152,000m^3/월
ALK	800m^3/h(576,000m^3월)	800m^3/h(576,000m^3/월)
SDG	2,500m^3/h(1,800,000m^3/월)	2,500m^3/h(1,800,000m^3/월)
창신화학	2,800m^3/h(2,016,000m^3/월)	-
합계	23,500m^3/h(16,920,000m^3/월)	20,700m^3/h(14,904,000m^3/월)

[부록_표 4] 국내 카트리지 공급용 가용생산 능력

업체명	2013년	2012년
덕양	8,160m^3/h(5,875,200m^3//월)	8,160m^3/h(5,875,200m^3//월)
SPG	4,200m^3/h(3,024,000m^3/월)	4,200m^3/h(3,024,000m^3/월)
린데	1,000m^3/h(720,000m^3/월)	1,000m^3/h(720,000m^3/월)
ALK	400m^3/h(288,000m^3월)	400m^3/h(288,000m^3월)
SDG	2,000m^3/h(1,440,000m^3/월)	2,000m^3/h(1,440,000m^3/월)
창신화학	2,100m^3/h(1,512,000m^3/월)	-
합계	17,860m^3/h(12,859,200m^3/월)	15,760m^3/h(11,347,200m^3/월)

[부록_표 5] 판매현황

업체명	2013년	2012년
덕양	6,000m^3/h(4,320,000m^3//월)	6,200m^3/h(4,464,000m^3//월)
SPG	3,800m^3/h(2,736,000m^3/월)	4,000m^3/h(2,880,000m^3/월)
린데	900m^3/h(648,000m^3/월)	1,000m^3/h(720,000m^3/월)
ALK	400m^3/h(288,000m^3월)	400m^3/h(288,000m^3월)
SDG	1,000m^3/h(720,000m^3/월)	1,000m^3/h(720,000m^3/월)
창신화학	-	-
합계	12,100m^3/h(8,712,000m^3/월)	12,600m^3/h(9,072,000m^3/월)

업계에 따르면 수소가격은 2010년 이후 2011년, 2012년 수소 공급 부족과 수요 증가로 인해 가격이 계속적으로 상승해왔으나, 2013년에는 보합세를 보이고 있는데, 이는 관련 산업의 침체와 무관하지 않은 것으로 분석됨

산업용 수소는 반도체, LCD, 광통신, 석유화학, 철강분야 등과 함께 태양전지, LED 등 첨단산업에도 사용되고 있으며, 최근에는 고유가 및 친환경 시대를 맞아 수소화 정제과정을 거치는 석유화학탈황공정에도 사용되고 있음

이러한 수요처들은 2012년 후반기와 2013년 상반기에 걸쳐 많은 어려움을 겪었는데, 반도체 시장은 유럽경기의 침체로 많은 어려움을 겪었으며, LCD 역시 침체를 겪었음

철강과 조선업계도 불황을 겪으며 수소 수요는 점점 감소했음. 이는 2013년 카트리지 판매현황이 2012년에 비해 감소한 것에서 유추할 수 있으며, 수소 시장은 2014년부터 점차 개선될 것으로 업계에서는 전망하고 있음

반도체, 전자 분야에 공급되는 수소 가격은 2013년 2, 3월에 예전 가격을 완전히 회복했고, 신규수요의 경우도 증가할 것으로 예상되며, 수요 전망이 좋지 못할 경우에도 보합세를 유지할 것으로 전망하고 있음

관련 산업으로 철강, 조선의 경우는 경기 회복과 더불어 서서히 수요가 증가하고 있는 추세이며, 자동차는 환율 강세로 인해 수출 부진을 겪을 것으로 예상돼 수요가 감소할 가능성도 존재하고 있음. 또, 폴리실리콘의 경우는 예측이 어려울 정도로 현재 시장 침체를 보이고 있지만, 태양전지 셀·모듈기업들의 가동률이 높아지고 있고 2013년 1분기를 최저점으로 가격이 소폭 상승하는 등 회복의 조짐이 보이고 있음

이와 같은 상황을 종합하면 2013년 4분기 이후의 수요산업들의 업황은 수소 생산·유통업계에는 긍정적일 것으로 분석되고 있음

1.3.2.4 국내 수소생산 기업

가. 대성산업가스

대성산업가스는 1979년 반세기가 넘는 역사를 자랑하는 대성계열사의 모기업인 대성산업과 세계적인 초저온공학의 선도 기업인 프랑스의 에어리퀴드 및 일본의 에어리퀴드 재팬과의 자본합작과 기술제휴로 설립됐음

반월, 양산, 여천, 청주, 대전, 구미, 파주, 울산 등에 최신의 대규모 공기분리장치와 반도체용 초고순도 특수가스 제조시설을 갖췄음

산소, 질소, 아르곤 등 일반 가스는 물론, 반도체용 특수가스, 초고순도 순수가스, 표준가스, 정밀혼합가스, 의료용 가스, 가스장비 등에 이르기까지 다양한 제품을 엄격한 품질관리를 거쳐 생산하고 있으며, 생산된 제품은 전국적인 공급망을 통해서 수요처에 적기에 원활하게 공급하고 있음

대성산업가스는 대량 수요처 또는 전자 및 석유화학 공업단지 등의 가스 사용조건에 가장 적합한 가스 생산 설비를 현지에 설치하는 온사이트 공급방식과 파이프라인 공급방식을 통해 보다 안정적이고 경제적이며 신속하게 공급하는 토니지 사업에도 총력을 기울이고 있음

또한 국내 최초로 초저온연구소를 설립해 최고 품질의 제품생산 및 분석, 가스

응용분야 및 관련 기기류 등의 연구개발에도 끊임없는 노력을 다하고 있으며, 모든 산업발전의 초석이 되는 가스 엔지니어링에도 고도의 기술로써 주도적인 역할을 하고 있음

나. 창신화학

액화탄산가스와 드라이아이스 전문 생산기업인 창신화학은 1974년 5월30일 현대가스공업사로 출발해 40여 년간 국내 조선분야·철구조물·청량음료·식품·전자 등 주요 산업체들의 성장에 지속적으로 기여해 왔음

1989년에 창신화학을 설립된 이래 전남 여수에 제1공장, 충남 대산에 제2공장의 생산시설을 보유한 액화탄산가스 및 드라이아이스 전문법인으로써 조선, 철강, 전자, 식품 등 국내외 산업발전에 지속적으로 기여해 왔으며, 2013년 3월 충남 대산에 신규 플랜트를 준공하고 수소 전문기업으로 제2의 도약을 시작하였음

부지면적은 1만여㎡로 기존 탄산공장의 1만2,000여㎡를 합해 총 2만3,000㎡의 규모에 이르며 1만여㎡ 수소생산부지에는 수소압축실, 충전장, 분석실 등을 갖췄음

회사는 지난해 5월 부지 정지작업 착공을 시작으로 본격적으로 수소사업을 준비해 왔으며, 올해 4월 준공검사 및 시운전을 마치고 5월 본격 생산에 들어갔음

수소 원료는 롯데케미칼(구 호남석유화학) NCC와 SM공장(LG화학 단지)으로부터 약 2㎞의 파이프 라인을 통해 수소원료가스를 공급 받음

회사는 영국의 하우든 버튼 코블린社의 다이아프램 컴프레셔 4대를 통해 시간당 최대 3,200N㎥의 순도 99.999%의 수소를 생산할 수 있는 시설을 갖췄음

또한 최고의 제품을 공급하기 위해 가스 크로마토그래피와 산소분석장비, 노점(dew point) 분석장비 등을 갖췄고 온라인 시스템을 적용한 분석실에서 전문 분석요원들의 꼼꼼한 품질관리를 통해 제품을 생산하고 있음. 이에 국내 수소 생산·충전 시설로는 최고 수준의 안전시설과 운전관리 시스템을 갖춘 것으로 평가되고 있음

[부록_그림 5] 창신화학 수소 카트리지 운반차량

회사는 수소의 안정적이고 빠른 공급을 위해서 점보형 카트리지를 33대 도입해 운행 중에 있으며 더욱 원활한 공급을 위해 일반형 카트리지 10대를 추가로 도입 중에 있음. 또한 2020년까지 약 100대 이상의 장비를 추가로 보유할 예정임

다. 린데 코리아

가스 분야의 글로벌 리더인 린데코리아는 산업용, 특수용, 의료용 가스를 생산하고 유통하는 회사로, 가스 장비 및 파이프라인을 플랜트에 설치하는 관련 서비스를 포함해 다양한 범위의 엔지니어링 서비스 및 연관 서비스들을 제공하고 있음

린데코리아는 한국에 8개 공장을 운용하고 있으며, 1989년 ㈜대한비오씨가스로 회사 설립 이후로 린데코리아는 한국의 대표적인 가스 전문 기업으로 자리매김하고 있음

2008년 ㈜린데코리아로 상호를 변경했으며 2011년 기흥 제2공장을 준공, 2012년에는 PSG 지분 51%를 인수했고, 2013년 충남 아산에 N2O 공장을 준공함

린데코리아는 화학, 석유화학, 철강에서부터 반도체, 식품, 의료 분야에 이르기까지 산업 전반에 걸쳐 고객에게 우수한 제품 및 서비스를 제공하고 있음

라. 덕양

주식회사 덕양은 울산공업단지의 입구에 위치하며, 1961년 창업 이래 약 41년간 산업가스를 제조해 전국적으로 공급하고 있음. 수소는 석유화학단지를 위시해 식품공업에 이르기까지 대량 사용처에는 약 40㎞의 배관망을 이용해 연속공급하고 있으

며, 원거리 대량 사용회사는 튜브 트레일러로 공급하고 있음

서울 경기지역 및 군납 등으로 물류비용의 절감 및 물량처리 등을 감안해 충남 서산의 대산 석유화학단지에 서산공장을 준공해 100%의 가동률과 적기에 대량공급이 가능토록 하고 있으며, 2013년 9월 군산과 여수에 생산설비를 연이어 확대함

전북 군산시 임해로 군산산업단지에 부지면적 3,642㎡에 세워진 군산공장은 중압·고압 압축기 5대, 세정탑, 탈산소 촉매탑 등의 시설을 갖추고 있으며 시간당 4,000N㎥(루베)의 수소를 생산하며, 이곳에서 생산한 수소가스는 백광산업, OCI 군산공장 등 인근 업체에 공급할 예정임

전남 여수시 여수석유화학 단지 내에 있는 여수 제1공장도 시간당 1만5,000N㎥ 규모의 수소정제시설을 증설하였고, 이로써 여수1공장은 기존 생산량 3만5,000N㎥을 합해 시간당 5만N㎥의 수소생산규모를 확보함

제1공장 인근 대지 6,385㎡에 세워진 제2공장은 제1공장에서 생산한 수소를 튜브 트레일러에 충전할 수 있는 시설을 갖췄음. 또한 덕양은 울산 SK에너지 인근에 시간당 5만N㎥규모의 수소공장을 짓는 등 공격적인 투자를 하고 있음. 울산 공장은 2014년 7월 완공될 예정이며, 울산공장이 완공되면 시간당 15만9,000㎥의 생산규모를 확보할 것으로 예상되고 있음

[부록_그림 6] 덕양 울산 본사

마. 에어리퀴드 코리아

1996년 설립 이후 국내 산업 발전과 함께 성장해 온 에어리퀴드 코리아는 석유화학, 전자, 철강 산업을 포함한 국내 주요 산업분야에 산업용 가스 및 관련 서비

스를 공급해 오고 있음

[부록_그림 7] 에어리퀴드의 수소 스테이션

에어리퀴드 코리아는 국내시장에 지속적으로 투자하고 있으며 현재 여수, 부천, 이천, 천안, 당진, 구미, 상주, 익산, 부산사업장에서 산업용 가스를 직접 제조 공급하고 있음

에어리퀴드 코리아는 전 세계 80개국에 걸쳐있는 에어리퀴드 네트워크를 통해 전 세계 주요 산업의 발전을 지속적으로 모니터링하고 있으며, 이를 바탕으로 국내 주요 산업분야에 경쟁력 있고 신뢰할 수 있는 제품 및 서비스를 공급하고 있음. 또한 에어리퀴드의 세계 최고의 기술을 국내에 도입해 국내 산업의 경쟁력 강화에 나서고 있음.

바. SDG

SDG는 수소 및 아세틸렌 전문 제조분야에서 핵심적인 기술력과 최고의 품질을 확보하고 나아가 미래 청정에너지 분야인 수소 에너지 사업의 연구개발을 주도하고 있음

국내 최초의 초고순도 품질 99.9999%를 실현했으며 최적의 생산 사이클을 구현한 최신 수소 생산라인과 관리시스템을 구축함

또한 최신의 튜브트레일러를 통한 전국적인 최적공급체계를 구축했으며 대형 튜브트레일러를 통한 물류비 절감과 공급효율의 극대화를 꾀하고 있으며, 더불어 첨단 안전시스템과 24시간 자동모니터링으로 안정적인 최고 품질의 제품을 공급하고 있음

사. SPG 케미칼

SPG케미칼은 국내 4개 공업단지에 수소 생산시설을 갖추고 약 40년간 수소 한 품목만 생산해 왔으며, 고객사에 99.9999%의 초고순도 수소를 안정적으로 공급하고 있음

[부록_그림 8] SPG케미칼의 수소생산 공장

SPG케미칼은 1975년 설립된 이래 수소가스를 완벽한 품질과 철저한 납기준수로 고객의 신뢰를 구축해 왔으며, 특히 2000년 이후에는 국내 주요 석유화학단지에서 원료 수소공급원을 확보해 울산, 여수, 대산, 안산, 구미 등 전국 5개 주요산업단지의 파이프라인을 통해 초고순도 수소가스를 안정적으로 공급하고 있음

또한 엄격한 품질관리를 통한 초고순도 수소가스를 경제적인 가격에 안정적으로 공급해 고객의 품질향상 및 원가절감에 기여하고 있으며 철강, 광통신, 석유화학, 반도체, 태양광, LED, 식품, 전자산업 등 국가기간산업 및 미래 첨단산업에 기여하고 있음

차세대 산업인 수소차 에너지 실용화를 위해 끊임없는 연구개발과 노력을 통해서 2012년 여수 엑스포에서 현대자동차 및 여수시와 함께 수소연료자동차를 운영하는 등 대체에너지 부분에서도 국가경제에 기여할 수 있는 수소전문기업으로서의 초석을 다져왔음

2013년에는 안산 반월공단 내에 국내 최초로 메탄올을 원료로 사용해 초고순도 수소를 생산하는 신규플랜트를 성공적으로 준공해 미래 수소경제시대를 이끌어나가고 있음

1.3.2.5 수소 생산 가격

수소의 생산은 그 생산방식 및 순도, 유통과정 등에 따라 가격의 폭이 매우 크며 하기는 SMR, PV-H2, Electrolysis, PEC 등의 기술별 수소의 가격을 나타낸 것임

[부록_표 6] 수소생산 기술별 가격

Technology	Cost	Remark
SMR	3.38$/kg$H_2$	54m^3/hr〔1〕
	14.23$/kg$H_2$	70m^3/hr〔2〕
	18,472$/kg$H_2$	30m^3/hr〔3〕
	7,785$/kg$H_2$	300m^3/hr〔3〕
	21,412$/kg$H_2$	30m^3/hr〔6〕
PV-H_2	37,838KRW/kgH_2	15m^3/hr〔4〕
Electrolysis	19.1$/kg$H_2$	1-10Ton/yr〔5〕
	18,403KRW/kgH_2	30m^3/hr, alkaline〔6〕
	22,945KRW/kgH_2	30m^3/hr, PEME〔6〕
PEC	8,264,324KRW/kgH_2	〔7〕
	26,961KRW/kgH_2	(STH = 14%, 20Khrs)
2 stage fementation process for H2(glucose)	2.91$/kg$H_2$	〔8〕
	5,347KRW/kgH_2	100m^3/h〔11〕
Fermentation photobiological	4,255KRW/kgH_2	100m^3/h〔11〕
	13.53$/kg$H_2$	300kgH_2/d〔10〕
	11.96$/kg$H_2$	600kgH_2/d
	12,099KRW/kgH_2	〔9〕

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 한국에너지기술연구원, 2014.04

1) D.Meyers set al,"Cost and Performance Comparison of Stationary Hydrogen Fueling Appliances", DOE Hydrogen Program Review, 2002
2) C.Adams et al.,"Bid in response to the DOE/NHA proposal to Design a Public Hydrogen Fueling Station", UC Davis, 2004
3) Gim,B., J.W.Kim,J. of Energy Engineering, 16(4), 2007,pp170-180.
4) Gim,B., J.W.Kim, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society , 21(6) 2010,pp595-603.
5) NREL, Summary of Electrolytic Hydrogen Production, NREL/MP-560-36374, 2004,USA
6) Gim,B., J.W.kim, H.Ko, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society ,22,4 (2011),pp559-567.
7) Gim,B., J.W.Kim, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society , 21(1) (2010), 64-71.
8) Oh, Y., Y.Kim. M.Kim,S.Park, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society 17(1) (2006) 98-108
9) Gim B.,J.W.Kim, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society 19(4) (2008) 322-330

10) T. Eggeman, 2004, Boundary Analysis for H2 Production by Fermentation, Neoterics International Inc., U.S.A..
11) Gim,B., J.W.Kim, S.Y.Park, Trans.of the Korean Hydrogen and New Energy Society 19(2) 145-155 (2008)

1.3.3. 산업용 수소 저장 및 수송 기술

위와 같이 제조된 수소는 저장 및 수송을 거쳐 산업에서 활용되고 있음, 수소 저장은 주로 고압수소로 저장하거나 액체수소로 저장하여 활용되고 있으며, 수소의 수송은 파이프라인 및 탱크로리 등을 이용하고 있음

- 고압수소로 저장 : 국내에서 사용되는 수소의 대부분은 고압으로 저장되고 수송, 유통되고 있음. 주로 내용적 46.7ℓ인 망간강 또는 합금강 용기에 150Kg/cm^2 수소 충전
- 수소 저장합금에 저장 : 단위 체적당 약 1,000배의 수소를 저장할 수 있으므로 고압 봄베나 액체수소 보다 높은 밀도로 수소를 저장
- 액체수소 저장 : 성능이 우수한 단열재 요구(진공단열, Perlite로 충진한 후 진공), 액체수소 저장용 초단열재의 개발, 안전성 확보 등에 대한 기술 필요
- 기타 저장기술(물리 화학적 흡착) : 암모니아, 메탄올, 헥산 등의 화합물에 의한 저장기술, 제올라이트에 저장, 카본나노튜브에 저장, Slush수소에 의한 저장, 지하 저장

[부록_그림 9] 수소 저장 방법

- 파이프라인에 의한 수송 : 가장 보편화된 수소의 수송기술로 액체수소의 경우 공장부지 내 정도의 가까운 거리에서 사용함. 미국(Houston), 독일(Rhein-Ruhr), 프랑스, 벨기에에서 100 ~ 330Km의 직경, 100기압의 압력으로 수송
- 일반 용기를 이용한 수송 : 고압 기체수소저장 실린더, 12 - 15MPa의 압력으로, 40ℓ와 47ℓ인 용기를 사용함. 소형의 액화수소 저장용기
- 탱크로리에 의한 수송
  · 일반고압용기: 압력 15MPa 이내, 용적 50 ℓ 미만, 5 - 7m^{3}의 수소 운반
  · 집결용기 : 길이 6m, 무게 500Kg, 20MPa 압력, 60 - 140m^3 수소 저장
  · 탱크로리 : 집결용기 20개 수송, 1회에 최대 2,800m^{3}까지 수소 수송

[부록_그림 10] 수소 수송 방법

1.3.4 수송용 수소 시장

1.3.4.1 수소연료전지 자동차 전망

현재 수송용 에너지는 전체 에너지원의 30%를 차지하고 있으며, 운송수단의 수소연료전지는 수소 경제시대의 핵심임. 연료전지 자동차를 시작으로 가정용, 산업용, 발전 등으로 보다 광범위한 연료전지의 활용이 시작되는 시기가 점차 도래하고 있음

수소경제의 조건으로는 대량의 수소 소비처(연료전지 및 연료전지 자동차), 수소의 인프라 구축, 수소 가격의 경쟁력 등을 들 수 있으며, 아래부터는 각국 및 연료전지 소비처 등에 대하여 살펴봄

[부록_표 7] 국내 수소연료전지 자동차 산업화 Road Map

연도		'07 - '09	'10 - '12	'13 - '15	'16 - '20
구분		모니터링 1 단계	모니터링 2 단계	시범운행 1 단계	시범운행 2 단계
차량대수	승용(대)	30	500	10,000	50,000
	버스(대)	4	20	200	1,000
승용차 가격		6.3 - 5억	3억	1.2억	0.5억
정부 지원		50%	50%	30%	10%
수소 스테이션 수		9	10	20	500
대상		-	공공기관	일반	일반

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04 (신재생에너지 R&D 자료 인용)

1.3.4.2 수소스테이션 운영 현황

가. 국내 수소스테이션

수소스테이션은 기존의 주유소나 가스충전소에서 휘발유·경유·LPG 등의 석유연료를 차량에 주입하는 것과 마찬가지로 연료전지가 탑재된 차량에 수소를 연료로 충

전할 수 있는 장소를 말하며, 수송용 연료전지 및 수소의 소비를 증대시키기 위하여 수소의 저장 및 운송과 더불어 수소스테이션에 대한 인프라 확장이 필요함

국내는 현재까지 15개소를 건설하고, 13개소를 운영하고 있으며, 다음은 국내의 수소스테이션 운영 현황에 대하여 나타낸 것임

[부록_그림 11] 국내 수소스테이션 운영

[부록_표 8] 국내 수소스테이션 운영현황

운영기관	지 역	준공시기	수소생산방식	이용수	비 고
현대자동차	경기 마북	2005.09	부생수소	6-7대	
	서울 홍릉	2008.07	부생수소		
	경기 남양	2008.12	부생수소	13-14대	700BAR
	서울 양재	2010.05	부생수소	5-6대	
제주도	제주도	2011.08	물 전기분해	2대	
에너지기술연구원	대전 유성	2006.08	NG개질		
GS칼텍스	서울 신촌	2007.09	납사 및 NG개질	10대	
가스공사	인천 동춘	2007.10	LPG 및 NG개질		
SK	대전 유성	2007.12	부생수소		
동덕산업가스	울산 매암	2009.07	부생수소	20대	
동덕산업가스	울산 남구	2012.08	부생수소	20대	700BAR
SPG케미칼	전남 여수	2009.08	LFG개질		철거
성루시	서울 상암	2011.05	LFG개질	13-15대	
에너지기술연구원	전북 부안	2011.10	물 전기분해		
이엠코리아	대구광역시	2013.10	물 전기분해	20대	700BAR

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04 (신재생에너지 R&D 자료 인용)

나. 세계 수소스테이션

전 세계적으로 수소스테이션 구축을 위한 프로그램들이 운영되고 있으며, 현재 222개소가 운영되고 있고, 89개소는 폐기, 118개소는 건축 중에 있는 것으로 조사되었음

미국, 유럽, 일본 및 캐나다의 수소스테이션 운영은 아래의 표와 같음

[부록_표 9] 세계 수소스테이션 운영현황

구분	주요 프로그램	스테이션 수 운영/폐기/건설	특징
미국	HFCIT(Hydrogen Fuel Cell & infrastructures Technologies) CaFCP(California Fuel Cell Partnership) 등	69 / 33 / 54	- 수소생산 : 수 전해방식/외부 생산 - Fuel to Vehicle : Compressed H2 & LH2 - 주요업체 : Air Product, Chevron Texaco - California H2 Highway : 매년 10개소
유럽	CUTE(Clean Urban Transportation for Europe) CEP, H2 Mobility	90 / 36 / 52	- 수소생산 : 수 전해방식/외부 생산 - Fuel to Vehicle : Compresses H2 & LH2 - 주요업체 : Linde, BP 등
일본	WE-NET(World Energy Network) JHFC(Japan Hydrogen & Fuel Cell)	23 / 9 / 2	- 수소생산 : 다양한 연료 개질 방식 - Fuel Vehicle : Compressed H2 - 주요업체 : Oil & gas Company 주도
캐나다	NRCAN(Natural Resources Canada) H2 Highway, City of Toronto	13 / 7 / 2	- 수소생산 : 수 전해방식/외부생산 - Fuel Vehicle : Compressed H2 - 주요업체 : Hydrogenics
기타	-	28 / 3 / 8	-
총계	-	**222 / 89 / 118**	-

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04

다. 수소스테이션 기술 내용

수소스테이션은 각 아이템별로 수소발생장치, 수소 압축기, 수소 저장용기 등의 구성기술을 필요로 하며, 수소스테이션의 각각의 반식에 따른 운영현황을 살펴보도록 함

[부록_표 10] 구성별 기술 내용

ITEM	기술내용 및 Spec.	Maker
수소발생장치	- 수전해장치, 개질기, 부생수소공급	각사
수소압축기	- TYPE : DIAPHRAGM, DISCHANRGE PRESSURE : 44MPa/85MPa - CAPACITY : 30/50/100/200 Nm^3/H	국내 : 광신기계공업 해외 : PPI/PDC/HOFFER
수소저장기	- TYPE : CYLINDER, DISCHANRGE PRESSURE : 7777PSI/15,000PSI - WATER VOLUME : 765L/721L	국내 : 일진(차량용만 개발), NK(*1) 해외 : FIBER/CPI/다이너텍
디스펜서	- FILLING PRESSURE : 35MPa/70MPa, CASCADE FILLING SYSTEM - CaFCP I/O PROTOCAL, SA더2600 FUEL NOZZLE	국내 : 광신기계공업/덕양 해외 : APCI/FTI/크라우스/TOKICO 등
파이프시스템	- ASME B31.1 for Stainless Steel Tube & fitting(10,000PSI)	HI/PARKER/SWAGELOK
제어시스템	- HMI, EXPLOSION PROOF	-
유틸리티	- COOLING TOWER, N2 PURGE SYSTEM, IA SUPPLY SYSTEM - GAS DETECTOR & FIRE FIGHTING	국내 제작품

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04

[부록_표 11] 수소스테이션 방식 비교

구 분	수전해 스테이션	개질기 방식	튜브트레일러
원료	전기, 물	화석연료(LNG, 납사, LPG, 캐로신 등)	수소
채택국가	유럽지역, 비주지역, 한국	미주지역, 일본, 한국	미주지역, 한국
국내운영	제주도, 전북부안 2개소	서울 연세대 등 4개소	현대자동차연구소 외 5개소
규모	제주도 5Nm^3/H 제조, 전북부안 24Nm^3/H 제조 350BAR 충전	30Nm^3/H 제조 5대 연속충전 CAPACITY 350BAR 충전	20Nm^3/H급 이하 350BAR 충전

구 분	수전해 스테이션	개질기 방식	튜브트레일러
단점	전기소요량이 많음	연료저자 및 공급이 필요함 연소배기물질이 발생함 플랜트 규모로 장치비가 많이 듦	튜브트레일러 설치장소가 필요 연속적 사용을 위해 별도장치 필요 제주도에는 공급이 불가능
장점	공해가 전혀 없는 친환경적 원료인 물 공급이 원활 부가적으로 산소 생산, 활용 가능	안정적인 운전이 가능	원료공급 원활
구축비용	中	大	小
주요 구성품	수전해장치/가스압축기/저장용기 디스펜서/UTILITY	원료저장설비/개질기/가스압축기/저장용기/디스펜서/UTILITY	감압장치/가스압축기/저장용기/디스펜서/UTILITY

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 이엠코리아주식회사, 2014.04

라. 세계 수소 인프라 구축 현황

- 수소 저장용기 현황

· **일본** : 설계기준, 사용가능 강재의 제약 등 규제대응
안전성 검증과 기술개발 추진

· **미국** : 혁신적인 소재개발
용기의 가격저감(현재보다 1/3 정도 저하예상)
액체를 사용한 수소저장기술 연구
높은 흡착력을 가지는 물질 합성 접근
신소재개발과 평가

· **한국** : TYPE, 용기 국내 NK TECH에서 40MPa 개발, 생산
차량탑재용은 일진, NK등에서 TYPE Ⅳ개발
GROUND TORAGE 용도로서 TYPE Ⅲ사업

- 일본, 미국의 수소이용 현황

· **일본** : 실용화된 가정연료전지 시장 확대 도모
국제표준화를 포함한 적극적인 해외진출(각국의 연료성분 구성대응)
가격저감 도입 지원(백금사용량저감 및 수소제조 수송 저장을 위한 기초적인 개발)
연료전지 자동차에 대한 신뢰성, 내구성 연구개발(사회실증 대규모 생산실증)
공급인프라를 포함한 실증적 대응책 강화

· **미국 :** 2017년 최대효율 60%, 30$/kW, 내구성 5,000시간 목표

300건 이상의 특허등록
· 30건 이상의 생산품 시장 진입
연료전지 수명 2배, 백금사용량 1/5 수준
자동차 연료전지 스택 파워밀도 2.25kW/ℓ(2017년), 2.5kW/ℓ(2020년) 목표

– 수소 인프라 현황

· **미국** : 캘리포니아 주는 2025년 초 청정 차량 수 140만대 전망
2013년까지 수소스테이션 표준화 개발 목표(건설비용 절감)
2017년까지 100여개 수소스테이션 건설
H2USA 추진
미 에너지부는 천연가스를 원료로 한 수소충전소 분석, 건축양식 데이터수집, 안전, 신뢰성, 운영분석, 기존 충전소에 고압 수전해 설비 적용 등 지원

· **일본** : 2015년 FCV의 양산개시 예상하여 4개 대도시에 100개 충전소 확보 준비
2013년 충전소건설비용 550백만 엔, 2015년 목표 360백만엔
토요타 에코타운; 일본최대규모의 직접충전방식 적용 – 급속 충진 실증
신쿠라 스테이션; LPG개질 및 ON-site방식-LPG 유통망 활용 실증
수소스테이션 보조지원 2013년 46억 엔
현재 일본 NEDO에서 인프라와 관련된 연구진행 중

· **한국** : 그린카 로드맵에 따르면 2020년 168기 수소스테이션 설치 목표
LPG충전소와 그린벨트 내에 수소스테이션 가능토록 법령개정 고려
현재 16개 수소스테이션 건설 중 14개소 운영 중

· **독일** : 2015년까지 40백만 유로 이상 투자 50기로 인프라 확대
H2 Mobility 파트너쉽 2023년 400개 충전소 건설계획

· **영국** : 230년까지 160만대 연료전지자동차 보급 로드맵
신차구입 10%, 수소충전소 65개 건설
2020년 수소와 디젤의 가격경쟁력 확보
2030년 재생가능에너지원으로 75%, 2050년 100감축(이산화탄소 배출량)
2030년 수소충전소 1,150개 예상
수소의 51% 재생전원을 이용한 수전해로 생산, 연료전지 자동차 시장점유 50%

· **덴마크** : ‘덴마크의 에너지 계획 2020’
수소생산용 전기 kWh 당 0.08유로 세금감면/연료전지자동차 세제감면 180%
2050년 탈 석유 목표, 2020년 열과 동력의 50%, 2035년 100%, 수소 사용계획
수소연료전지 투자 2011년 30백만 유로

· **중국** : 2011년 전기구동차량 세금면제 발표
현재 4개의 수소충전소 보유

– 기타

· 연료전지자동차 현황과 과제

상용화를 위한 국제적 움직임 : 다임러, 포드, 닛산의 협력
우리나라 : 2015년까지 1,000대 RBAG 양산체재
일본 : 주행거리, 충전시간, 전기공급용(위기상황대비)의 장점언급
부품의 저감, 대량생산부품사용, 재료비절감, 자동차/고속 생산 등 다양한 시도
FCX-Clarity 리스프로그램운용 : 각 자동차의 리스프로그램운용

· 배관비용과 분산형 수소인프라

수소 대량생산 및 중앙집중식을 고려
배관비용의 경제성 불확실성
분산형 수소충전소를 건설하는 것이 바람직한 방안으로 제안

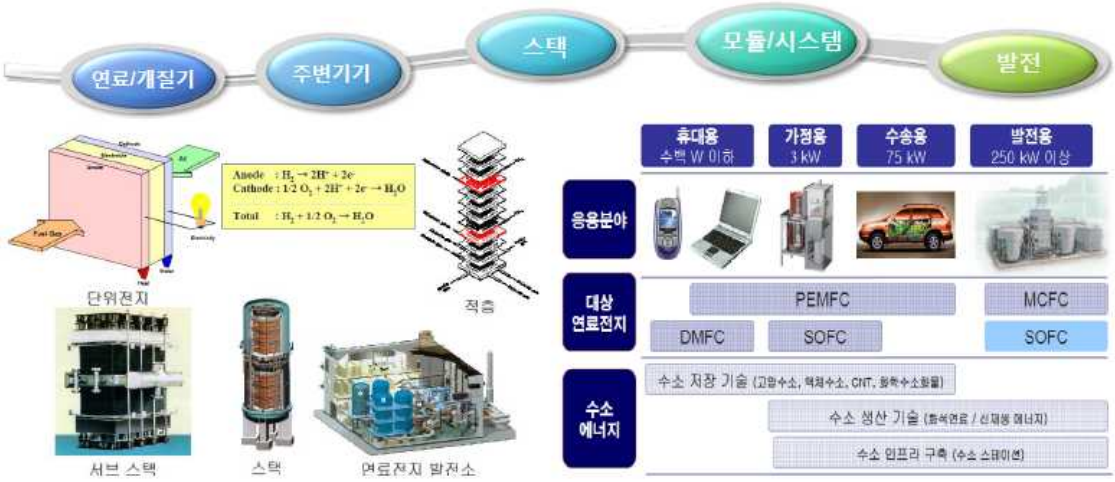
· 신재생에너지와 수소

풍력이나 태양광 등 재생에너지로 수소 전환 시 경제성 제고
각국의 재생에너지 비중 목표 설정
재생에너지를 에너지 저장기술과 조합
프랑스; 재생에너지로 수 전해방식을 이용하여 수소를 제조한 후 마그네슘과 반응하여 수소를 저장함, **일본;** 전기 화학셀에 의한 층방 기술과 물 분해 수소제조 및 저장기술 검토, **영국;** 수소 연료전지연구 허브-수소생산, 저장, PEMFC, SOFC/고온 수전해, 집적화/연계 연구, **독일;** 2050년 까지 전기 80%를 재생에너지로 전환, **캐나다;** P2G(Power to Gas)개발 진행 – 재생에너지의 잠재량을 충분히 활용 예상

1.4. 연료전지 시장 전망

1.4.1 연료전지 용도 및 가치사슬

산업용 수소는 반도체, 자동차, 철강, LED 등의 산업에서의 기초소재로 활용될 뿐만 아니라 연료전기 등의 원료로 활용됨. 이와 같은 연료전지는 그 용도에 따라 휴대용, 가정용, 수송용 및 발전용으로 활용됨

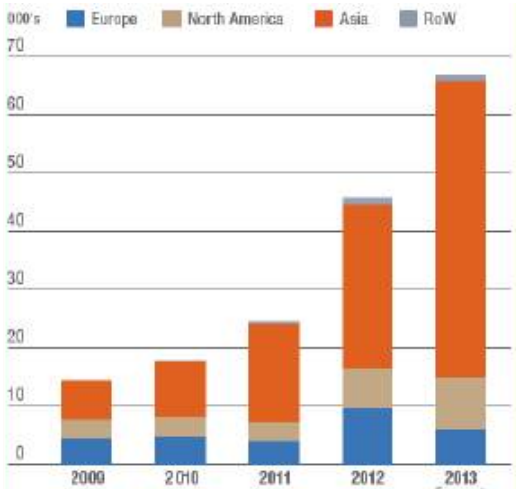


[부록_그림 12] 연료전지 구성 및 가치사슬

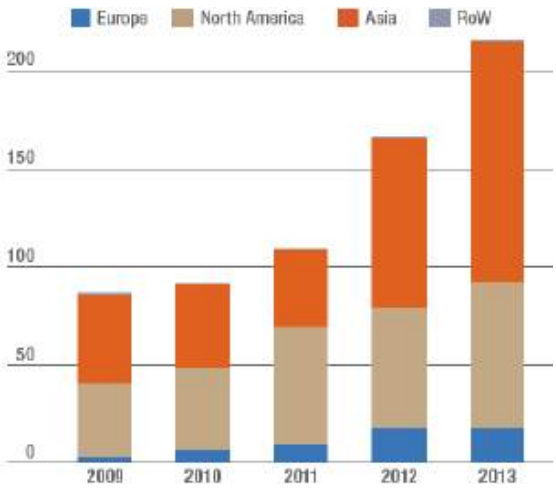
1.4.2 연료전지 보급 현황

현재까지 연료전지 총 선적량의 61%(28,000개)는 아시아에 설치되어, 아시아의 연료전지 기술 도입이 두드러지고 있음. 특히, 우리나라와 일본 등의 국가에서 백업전원, m-CHP, FCEV 등 적극적으로 도입을 추진하고 있음. 우리나라의 경우, 대규모 발전용 연료전지 시스템 도입의 확대로 아시아의 설비용량 증가에 기여한 것으로 나타남

한편, 북미지역은 국내 제작 대규모 발전용 및 하역기계용의 연료전지 보급이 증가하고 있음



(a) 지역별 연료전지 선적 현황(개수)



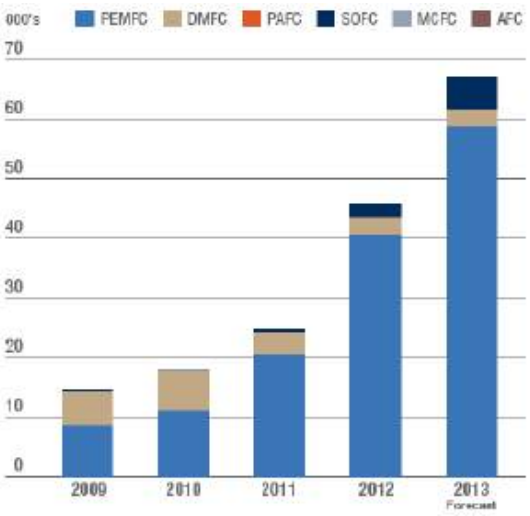
(b) 지역별 연료전지 선적 현황(MW)

출처 : Fuel Cell Today, 2013

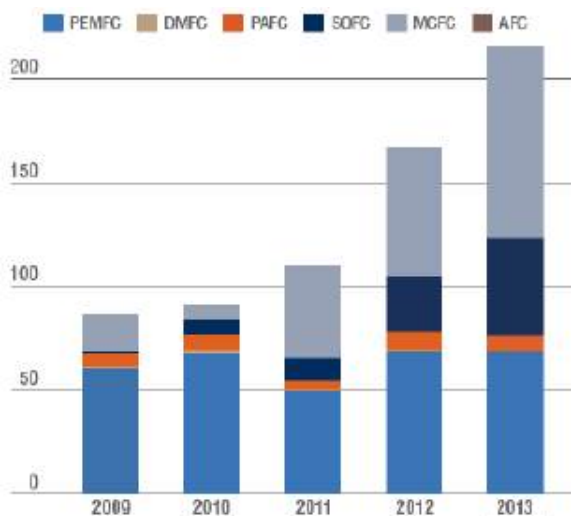
[부록_그림 13] 전 세계 지역별 연료전지 보급현황

종류별로 연료전지 선적 현황을 살펴보면, 다양한 규모와 연료의 적용이 가능한 FEMCF 기술의 도입이 주를 이루고 있음

국내를 비롯하여 미국은 대규모 발전용 연료전지 준공 증가로 MCFC(설비용량 기준)의 증가가 두르러지고 있으며, 일본의 경우 가정용 m-CHP의 수요가 미국의 경우 Bloom Energy의 MW급 준공의 수요 확대로 SOFC 기술도 견고하게 시장이 확대되고 있음



(a) 종류별 연료전지 선적 현황(개수)



(b) 종류 연료전지 선적 현황(MW)

출처 : Fuel Cell Today, 2013

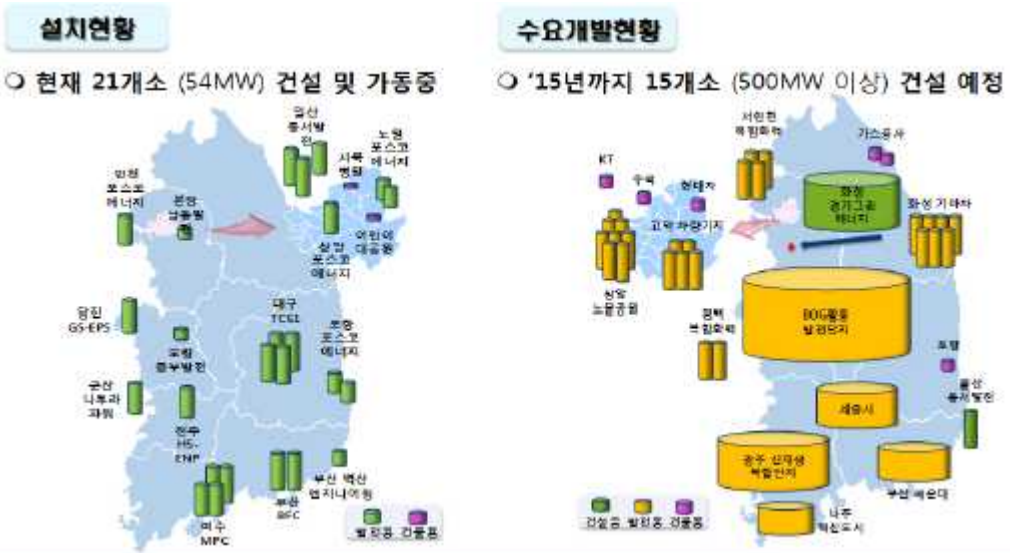
[부록_그림 14] 종류별 세계 연료전지 선적 현황

국내의 현황을 살펴보면, 주택·건물용 연료전지는 2006년 모니터링 사업을 시작으로 2010년 그린 홈 보급사업 및 의무화 시장보급으로 2013년 현재 누적 약 2천여 세대가 보급되었으며, 발전용 연료전지는 2004년 240kW 2기 실증을 시작으로, 현재 총 24개소 62MW가 보급되었음. 이와 같은 연료전지의 보급은 포스코, LG, SK 등 대기업을 중심으로 한 R&D 및 투자 확대로 가능하였음

[부록_표 12] 주택·건물용 연료전지

구분	1kW(세대수)	5/10kW(기)
'06 - '09	250	-
'10	960	-
'11	270	1
'12	230	10
'13	260	40
누적	1,970	51

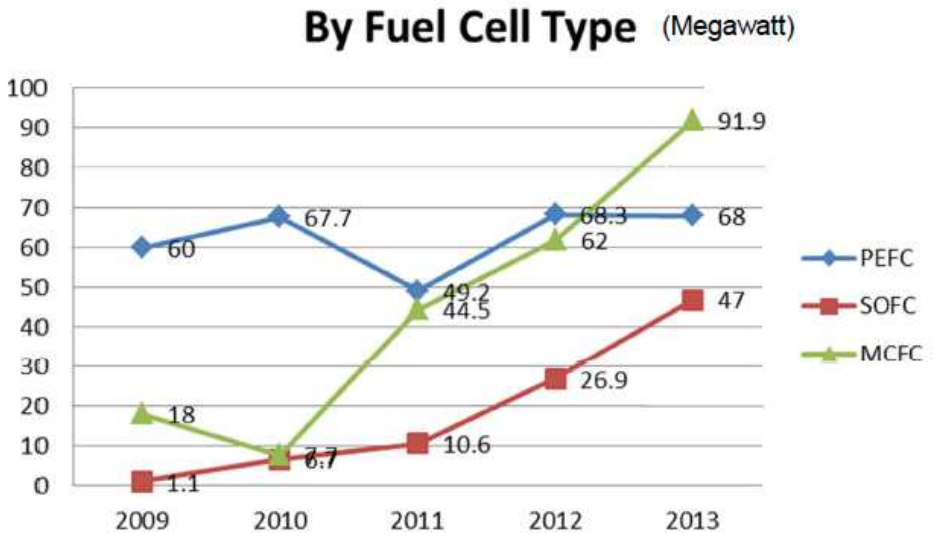
출처 : 연료전지산업 발전 전략, 2013



출처 : 연료전지산업 발전 전략, 2013

[부록_그림 15] 발전용 연료전지

세계의 연료전지 생산량은 각 연료전지 종류별로 아래의 그림과 같으며, 한국의 RPS제도, 일본의 ENE-FARM제도, 미국의 SGIP/ITC제도를 통하여 연료전지 시장의 성장에 많은 영향을 주고 있음. PEFC, SOFC, MCFC 중, PEFC는 2011년에 연료전지 자동차 시범사업이 종료되어, 다소 생산량이 감소하는 경향을 보였으나, 현재까지는 정제된 듯하나, 일본 가정용 보급 사업으로 유지하고 있는 현황임



출처 : Fuel Cell Today, Industry Review, 2013

[부록_그림 16] 글로벌 연료전지 생산량

1.4.3 세계 연료전지 산업 현황

연료전지의 세계 산업 현황을 살펴보면, 미국을 포함한 선진국은 Value Chain상 산업군의 구성이 비교적 잘 형성되고 있는 것을 알 수 있음

연료전지 산업은 기술 집적도가 높고, 초기투자비가 높은 산업으로 기술력이 높은 전문기업을 중심으로 연구개발에 많은 노력과 자금의 투입이 필요한 시장 지배력이 높은 산업임

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 에너지경제연구원, 2014.04

[부록_그림 17] 세계 연료전지 Supply Chain

세계 연료전지 기업 현황, 발전용(Stationary Power) 연료전지, 휴대용, 수송용, 하역기계용(Material Handling Equipment) 상용화 현황은 다음과 같음

[부록_표 13] 상용화된 발전용(주 전력 및 m-CHP) 연료전지(2012)

제조사	유형	출력
Ballard Power System, 캐나다	PEM	2-11 kW, Multiples of 500 kW
Bloom Energy, 미국	SOFC	100, 200, 160 kW
Ceranic Fuel Cell, 호주	SOFC	2, 1.5 kW
ClearEdge Power, 미국	PEM, PAFC	5, 400 kW
ENEOS CellTech, 일본	PEM	250 - 700 W
FuelCell Energy, 미국	MCFC	300, 1,400, 2,800 kW, Multi-MW
Heliocentris Fuel Cells AG, 독일	PEM	1.2 kW
Horizon Fuel Cell Technologies, 싱가포르	PEM	500 W - 2 kW
Hydrogenics, 캐나다	PEM	2 - 200, 2 - 16 kW
Panasonic, 일본	PEM	250 - 700 W
Toshiba, 일본	PEM	250 - 700 w

출처 : DOE, 2013

[부록_표 14] 상용화된 휴대용 연료전지(2012)

제조사	유형	출력
Horizon Fuel Cell Technologies, 싱가포르	PEM	Up to 2, 50, 150 - 200, 180 W
Lilliputian System, 미국	SOFC	2.5 W
myFC, 스웨덴	PEM	2.5 - 5 W
SFC Energy, 독일	DMFC	40, 72, 105 W

출처 : DOE, 2013

[부록_표 15] 상용화된 수송용 연료전지(2012)

제조사	유형	출력
Ballard Power System, 캐나다	PEM	75, 150 kW
Hydrogenics, 캐나다	PEM	198 kW
Nuvera Fuel Cells, 미국	PEM	30, 110 kW

출처 : DOE, 2013

[부록_표 16] 상용화된 하역기계 연료전지(2012)

제조사	유형	출력
H2Logic, 덴마크	PEM	~ 10 kW
Hydrogenics, 캐나다	PEM/hybrid	N/a
Nuvera Fuel Cells, 미국	PEM	10 - 30 kW
Oorja Protonics, 미국	DMFC	20 kWh/day
Plug Power, 미국	PEM	8 - 10 kW, 1.8 - 3.2 kW

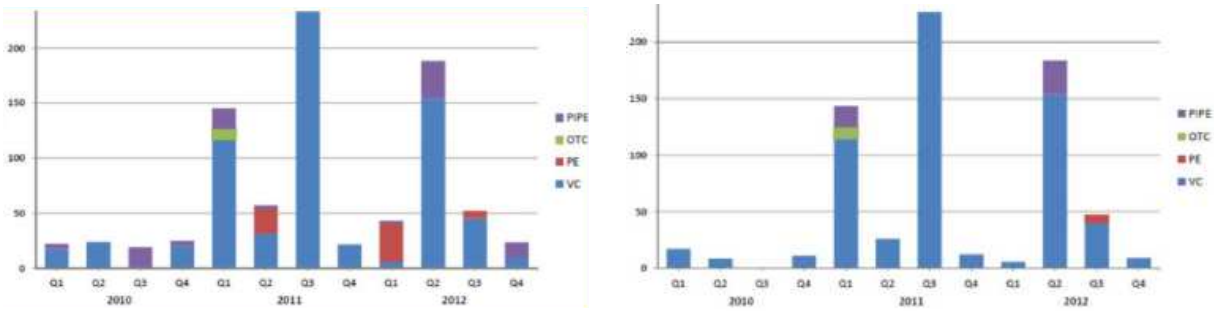
출처 : DOE, 2013

[부록_표 17] 연료전지 승용차 개발 및 전개 상황

자동차 제조사	상용화 목표	FCEV R&D 파트너	현재 상태
Daimler	빠르면 2017	Ford, Nissan	- 첫 번째 FCEV 시리즈 생산 - 독일 및 미국에 200대 리스
Ford	빠르면 2017	Daimler, Nissan	- R&D
General Motors	발표되지 않음	-	- 약 100대의 FCEV가 미국에 위치
Honda	~ 2015	-	- 약 200대의 FCEV가 주로 미국에 리스
Hyundai	2014 - 2015, 2015년까지 1,000대 판매 목표, 2015년 다음 세대 모델 소개 예정, 10,000대 판매 확대	-	- FCEV 15대를 코펜하겐 수출 - 상업용 FCEV 조립라인 운영
Nissan	빠르면 2017	Daimler, Ford	- 2011년 신규 연료전지 스택 도입 - 2013년 연료전지 컨셉 차 시현
Toyoda	2015	BMW	- 미국 및 일본에서 FCEV 데모 시행

출처 : DOE, 2013

연료전지의 총 투자 현황은 2010 ~ 2012년 세계 연료전지 산업의 누적 투자액은 $853.6백만(2009 ~ 2011년 $671.4백만 대비 상당한 증가)이며, 2008년 발발한 글로벌 금융위기의 회복에 따른 경제상황의 개선이 주요 요인임. 2012년 연료전지 산업의 총 투자액은 $307.1백만으로 2011년 $457.2백만 대비 감소하였는데, 이는 2011년 3/4분기에 높았던 벤쳐캐피탈 투자의 영향이며, 전 세계 투자액 중 81%를 미국 기업이 투자하였음



(a) 종류별 연료전지 선적 현황(개수)　　(b) 종류 연료전지 선적 현황(MW)

출처 : DOE, 2013

[부록_그림 18] 연료전지 산업 투자

2012년 국가/회사별 투자(VC & PE)현황을 살펴보면, 2012년 상위 10개 기업의 투자는 $190.5백만으로 2011년 $113.2백만 대비 상당히 증가하였으며, 상위 10개 기업의 투자가 전체 VC & PE 투자액의 98%를 점유, 총 투자액의 62% 점유하고 있음

이는 상위 10개 기업 중 다수가 2012년 처음 진입하여 신규 투자가 활성화되고 있음을 시사함

[부록_표 18] 국가 및 회사별 연료 전지 벤쳐캐피탈 및 사모펀드 투자 Top 10(2012)

회 사	금 액(백만 $)
DAG Ventures LLC(미국)	37.5
Kleiner Perkins Caufield & Byers(미국)	37.5
New Enterprise Association Inc.(미국)	37.5
GSV Capital Corp.(미국)	37.5
Altima Partners LLP(영국)	11.7
F&C Asset Management PLC(영국)	11.7
Artemis Investment Management LLP(영국)	11.7
12BF Capital Advisors(영국)	1.8
Carbon Trust(영국)	1.8
SC Green Tech Ventures(미국)	1.8
총계(top 10)	$190.5
총계(총 투자)	$193.8

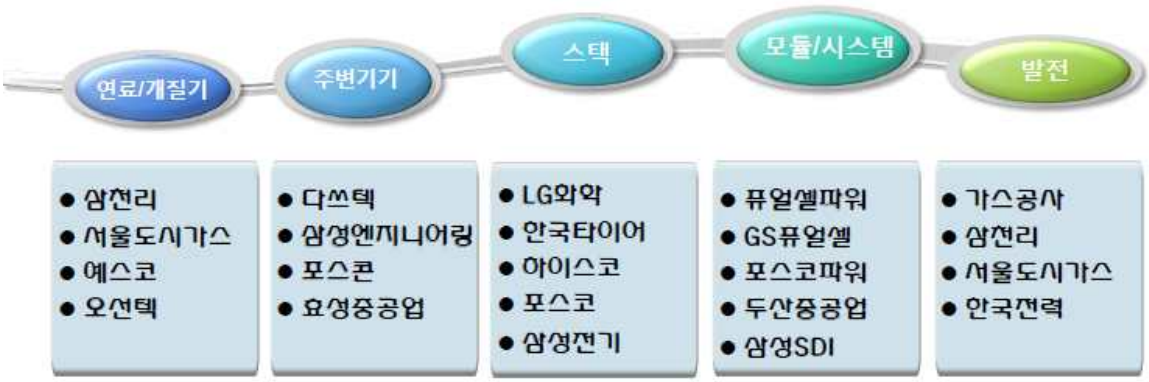
출처 : DOE, 2013

1.4.4 국내 연료전지 산업 현황

국내는 해외의 선진국과 비교하여 비교적 Supply Chain의 구성이 미흡하며, 대기업 중심의 시스템 분야를 제외하면 현재까지는 산업구조 형성이 미숙한 단계임

수송용 및 건물용의 일부 부품은 국산화가 이루어졌으나, 스택 핵심소재 및 부품 분야는 아직까지 대부분 수입에 의존하고 있음. 연료전지 시장은 기술적 집적도가 높고, 초기투자비가 높아 기술 장벽 등의 진입장벽이 존재하고 있음

하지만, 고용효과, 세계시장전망, 경쟁여건 측면에서 육성이 필요하며, 창조경제 이행의 주요 수단으로서의 가능성이 높은 분야임



출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 에너지경제연구원, 2014.04

[부록_그림 19] 국내 연료전지 Supply Chain

국내는 현재까지는 Value Chain별 산업구성이 미약한 부분이 있지만, 최근 급격한 성장을 경험하고 있음. 최근 2 ~ 5년 도안 주요 업체(6.3배), 고용창출(8.9배), 생산(3.8배), 투자(4.2배) 등 모든 분야에서 급격한 성장이 이루어지고 있으며 단기간 내 가시적인 성장으로 현재 상생업체는 1,046개사에 달함

1993년부터 진행된 국책 연구과제 성과를 스택 및 BOP 구성요소에 대한 기반기술을 개발하였으며, 80% 이상의 국산화율을 달성하였음(2006년 대비 2012년 설치단가 50% 하락). 반면, LNG 가격 상승(동기 128%)에 따른 경제성 문제와 글로벌 경쟁력 확보ㅗ 등 현안 문제는 상존하며, 미래시장 잠재력이 큰 연료전지가 신성장 동력 산업으로 부각되고 있음

출처 : 연료전지산업 발전 전략, 2013

[부록_그림 20] 국내 연료전지

1.4.5 연료전지 산업 전망

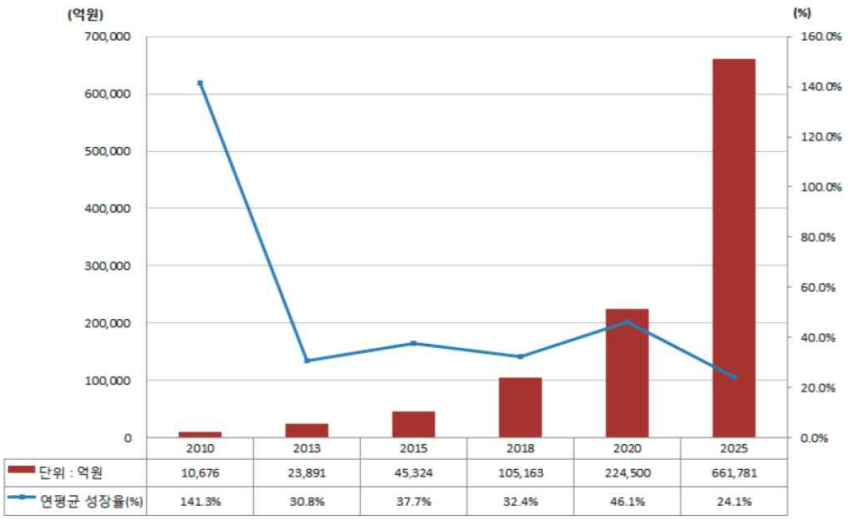
연료전지의 산업은 후지경제(2011년 연료전지 기술·시장 전망)에서 세계 연료전지 시장 규모가 급격히 성장할 것으로 전망하고 있으며, 2020년 13조원, 2025년 66조원 규모로 예상하고 있음

J-economy center는 세계 연료전지 시장 규모가 2020년 1조 3,582억 엔 규모로 성장을 전망하고 있으며, 가정용 5,200억 엔, 휴대용 280억 엔, 업무·산업용 2,422억 엔으로 전망하고 있음

[부록_표 19] J-economy Center의 시장 전망

구분 \ 연도		2008	2009	2010	2015	2020	2025	2030
PEFC	천 대	7	15	27	309	841	1.07	1.99
	억 엔	370	1,036	2,413	9,357	12,556	15,225	16,855
DMFC	천 대	0.6	1.0	4.5	93	272	450	585
	억 엔	8	14	25	200	360	440	530
SOFC	천 대	225	315	650	3,100	7,200	10,800	15,000
	억 엔	20	30	90	270	550	740	900
MCFC	천 대	12	16	24	32	36	46	60
	억 엔	32	40	54	70	72	82	100
PAFC	천 대	35	50	110	125	170	220	320
	억 엔	10	14	30	33	44	55	75

출처 : J-economy Center, 2009



출처 : 후지경제, 2011

[부록_그림 21] 후지경제의 연료전지 시장 전망

국내 주택·건물용 연료전지 시장 규모는 2025년 20만대 보급으로 2조 3천억 원에 이를 것으로 예상함. 2020년 누적 10만대 보급으로 1조 6천억 원 예상되며, 2020년까지 수량 기준 연평균(CAGR) 41.4% 증가, 금액 기준 연평균 22.5% 증가가 예상됨

또, Freedonia는 우리나라 2018년 전체 연료전지 시장 규모가 2018년 $252 백만이 될 것으로 전망되며, 용도별로는 발전용 시장 $174백만, 유형별로는 MCFC $110백만 및 PEMFC $74백만 시장 위주로 성장이 전망되고 있음. 6차 전력수급계획(~2017) 연료전지 보급계획은 5차 대비 약 150% 증가된 1,693MW 임

[부록_표 20] 연료전지 산업 발전 전략의 한국 주택·건물용 보급 전망

구 분	2015년	2018년	2020년
수량(대)	10,000	50,000	100,000
CAGR	216.2%	71.0%	41.4%
금액(억 원)	2,470	10,400	15,600
CAGR	151.7%	61.5%	22.5%

출처 : 연료전지산업 발전 전략, 2013

[부록_표 21] The Freedonia Group Inc.의 한국 시장 전망($백만)

구 분		2008년	2013년	2018년
용도별	발전용	51	95	175
	수송용	13	26	10
	기타	2	12	52
유형별	PEMFC	17	36	74
	MCFC	47	70	110
	PAFC	2	8	9
	SOFC	-	11	18

출처 : 신재생에너지백서, 2012

1.4.6 연료전지 지원 제도

연료전지의 보급 정책은 즉, 시장을 결정짓는 주요 수단으로 작용하고 있으며, 국내의 연료전지 정책 및 제도는 다음과 같음

[부록_표 22] 국내 연료전지 정책 및 제도

정책/제도	주요 내용
신재생 에너지 발전차액 지원제도(FIT)	- 2006년 10월 연료전지를 신규 대상으로 포함(지원한계 설비 용량 500MW, 차액지원금 283원/kWh) - 2008년부터 15년간 매년 10월 11일을 기점으로 전년대비 3%씩 인하하여 차액지원금 지급 - 2012년 RPS제도로 대체
신재생에너지 의무 할당제(RPS)	- 2012년부터 본격시행으로 2020년까지 발전량의 10%를 신재생에너지로 보급 계획 - 정부가 의무 대상자(500MW이상)를 정하면, 의무 대상자는 일정 기간 내에 목표를 완수해야 함. 목표는 20102년 2%에서 2020년 10%까지 점진적으로 확대될 예정 - 의무대상자는 신재생에너지 분야에 투자하거나 REC (Renewable Energy Certificate)를 거래하여 의무이행 가능. 발전 유형별 가중치 부여 검토 중
그린 홈 100만호 보급 사업	- 2020년까지 신재생에너지 설비 설치 시 비용 일부를 지원, 그린 홈 100만호 보급 - 연료전지의 경우 현재 설치비용의 최대 75%를 정부가 지원(다른 에너지원은 최대 50%)
공공건물 신재생에너지 설치의무화 제도	- 2011년 이후 공공기관이 신축, 증축 또는 개축하는 연면적 3천m^2 이상의 건축물에 대해 총 에너지 사용량의 10%이상을 신재생에너지로 충당(이전에는 건축비 기준 5%, '09년부터 증/개축 건물 포함) - 의무비율을 2011년 10%에서 2020년까지 확대, 대상 건축물을 1천m^2 이상으로 조정(2012년)
신재생에너지 활성화 방안(2013.08)	- 신재생 열에너지 공급의무화제도(RHO: Renewable Heat Obligation)를 통한 열에너지산업 성장 및 열생산 전력낭비 감축 그리고 신재생 에너지 보급 촉진. 열에너지의 10%(2016년) ~ 20%(2030년) - 신재생 주민발전소 지원 확대(REC 우대) 가중치 0.7 → 1.2(50~100%) - 전력다소비 사업장(5천 kW 이상) 계약전력 3 ~ 15% 신재생설비 설치 권고(인센티브) - LNG 연료비 연동형 REC 가중치 도입

출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 한국에너지기술평가원, 2014.04

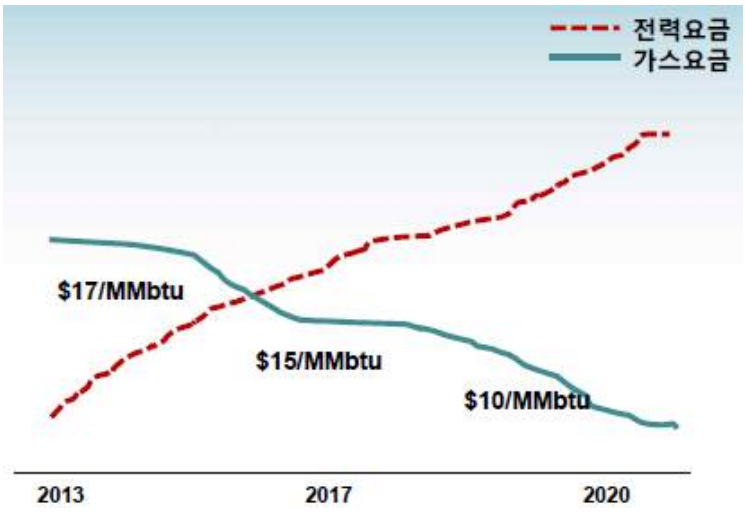
출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 한국에너지기술평가원, 2014.04

[부록_그림 22] 국내 연료전지 지원 제도 - 발전용

1.5 연료전지 사업 환경

1.5.1 천연가스 가격

연료전지는 향후 가스요금의 하락과 전력요금의 상승으로 2020년에는 현재의 가스요금과 전력요금 수준을 역으로 넘는 정도의 사업 환경이 변화가 예상됨. 이와 같은 사업 환경은 가스를 이용한 전력 생산의 연료전지 환경에 어떠한 영향을 미칠지에 대한 대비가 필요한 부분임



출처 : H.Kim, Pohang Technopark, Development of supply chain in Fuel Cell Industry, 2014.02

[부록_그림 23] 가스요금 및 전력요금 변화추이

특히, 셰일가스 상용화에 의한 천연가스 가격 하락으로 연료전지의 설치용량은 지속적인 증가가 예상되며, 천연가스를 개질하여 연료전지를 전기화학적으로 운전함으로써 거의 용량에 관계없이 가스복합발전보다 높은 고효율의 전기와 열에너지를 동시에 공급할 수 있음

한편, 천연가스를 연료로 사용할 경우 MWh당 온실가스 발생량이 28g에 불과함(석탄발전의 경우 11.35kg). 또, 대부분의 천연가스 기반 연료전지 시스템은 완전한 그리드 독립성을 유지할 수 있음

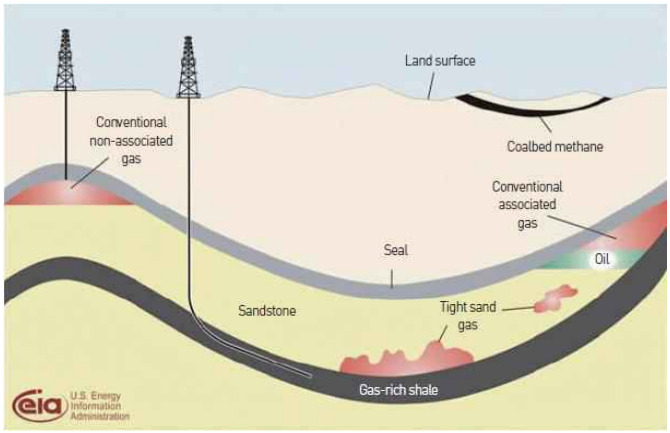
유기물 분해로 생성되는 메탄은 온실가스이기도 하지만, 연료전지의 유용한 에너지원이며, 매립지, 농장, 낙농단지, 하수처리장, 식품가공업체 등은 협기성 소화공정을 통해 바이오 가스를 생산할 수 있는 후보지임

에너지 밀도가 높은 바이오 가스는 대부분 연소열을 이용하여 터빈운전에 사용됨. 최근, 일부에서는 고온 연료전지에 사용하여 온사이트 발전과 열을 생산하고 있음

캘리포니아의 Self Generation Incentive Program(SGIP)은 바이오 가스를 사용하는 연료전지 시스템에 대해 $4,500/kW를 지원하여 천연가스 시스템에 비해 두 배에 가까운 지원을 하고 있으며, 또 캐나다에서는 Directed Biogas 제도를 적용하여 바이오가스를 이용한 연료전지 제조에 지원하고 있음

1.5.2 셰일가스

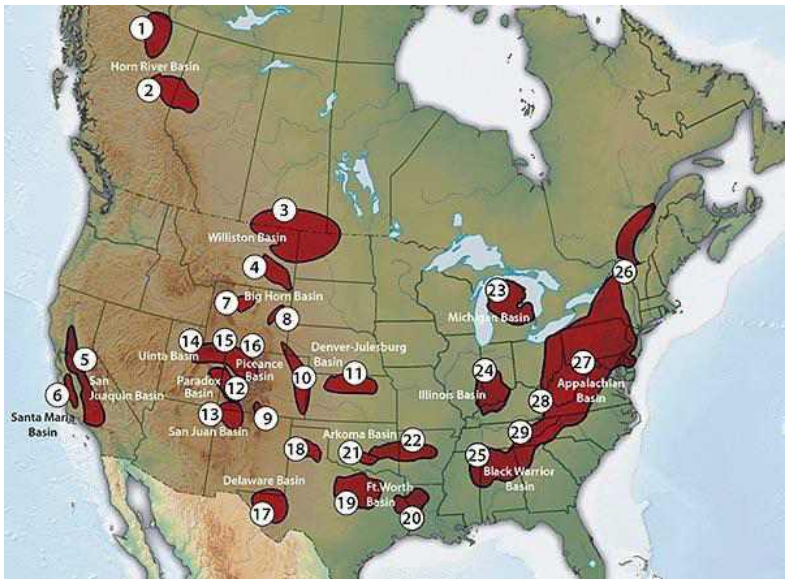
셰일가스(Shale Gas)는 모래와 진흙이 쌓여 굳으면서 지하의 퇴적암층에 함유된 천연가스로, 치밀가스(Tight Gas), 탄층가스(Coalbed Gas) 등과 함께 주요 비전통 가스에 속함



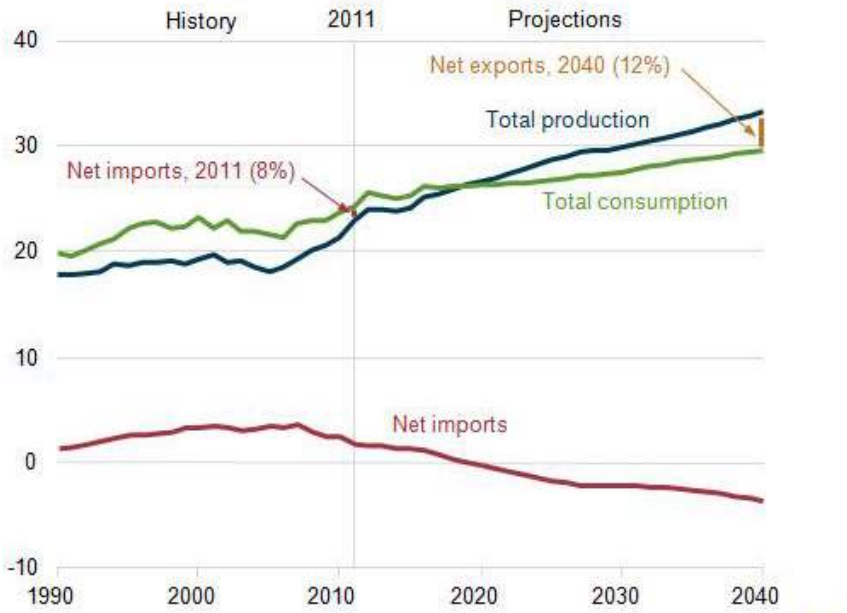
출처 : EIA, 2012, Frost & Sullivan analysis

[부록_그림 24] 셰일가스

셰일가스는 수평정시추법 및 수압파쇄법에 의해 개발이 점차 확대되고 있으며, 미국 내 셰일가스 개발에 따라 향후 미국 LNG 수입이 큰 폭으로 감소될 것으로 전망되며, 2020년경에 미국은 천연가스 순수출국 전환을 전망하고 있음



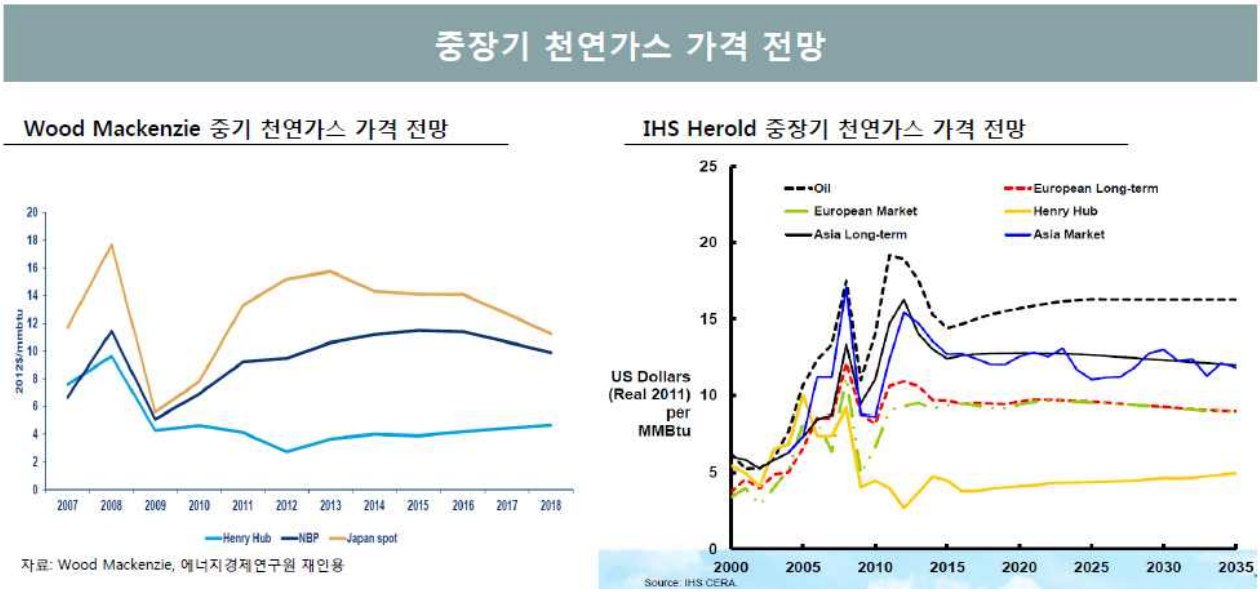
[부록_그림 25] 북미 셰일가스 분지



출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 삼천리연구소, 2014.04

[부록_그림 26] 연간 에너지 관점 2013, Total U.S. natural gas production comsumption, and netimports, 1990 - 2040(trillon cubic feet)

이와 같은 미국의 천연가스 수입 감소 및 천연가스의 수출국으로의 전환은 국제적인 천연가스 공급을 증가시키고, 천연가스의 가격 하향 안정화로 이어질 수 있을 것으로 전망함



출처 : 산업교육연구소, '2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나', 삼천리연구소, 2014.04

[부록_그림 27] 천연가스 가격 전망

미국 셰일가스의 개발로 인해 공급과잉으로 국제 천연가스 가격은 하향 안정세를 보일 것으로 전망하고 있음. 또, 아시아 지역은 일본 원전 폐쇄 등에 따른 LNG 수요 급증과 액화운송비용 등의 영향으로 큰 폭의 가격하락은 없을 것으로 전망함

한편, 셰일가스가 국내에 도입되어 천연가스 가격이 안정세를 보이더라도 기저부하를 담당하고 있는 원자력 및 석탄에 비해 경제성을 확보하기는 어려운 상황으로 국내 발전부문에 미치는 영향을 크지 않을 것으로 전망함

셰일가스 도입으로 인해 전력가격은 크게 영향 받지 않을 것으로 보이나, 가스가격은 다소간 인하효과가 있을 것으로 보여 연료전지 등 분산형전원 산업에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 전망됨. 신(재생)에너지의 경우 전력/가스 가격 뿐 아니라 RPS/의무화 등 정부 지원제도의 영향도 함께 받고 있기 때문에 가스가격이 신(재생)에너지 산업에 미치는 영향은 제한적임. 그럼에도 가스가격이 20% 인하될 때, 가정용 연료전지의 경우 IPR이 1.41%p 증가하며, 시스템 가격이 60만원을 저감하는 효과를 기대할 수 있으며, 발전용 연료전지의 경우 IPR이 3.7%p 증가하며, 향후 RPS 정책의 확대 여부(2단계 RPS)와 RHO 및 신재생에너지원간 경쟁 우위성 등에 따른 영향을 지속적으로 받을 것으로 전망함

또한, 주택/건물용 연료전지 시장 역시 정부정책(공공건물, 대형건물) 등에 따른 영향이 지속될 것으로 전망하고 있음

1.5.3 연료전지 산업의 시사점

대부분의 연료전지 산업은 현재 공공정책에 시장을 의존하고 있으며, 앞으로도 상당기간 정책 의존성을 탈피하는 것은 어려울 것으로 보이며, 정책적 지원이 없다면 대부분 연료전지 업체의 판매량은 급격히 감소하여 업체의 생존을 위협할 것으로 예상됨

백업파워, 지게차, 소형 열병합 시장의 PEMFC과 그리드 독립 분산전원 시장의 PAFC, MCFC, SOFC 모두 기존의 경쟁기술에 비하여 가격경쟁력이 부족한 상태이며, 지금까지 약 50%의 가격저감에 더하여 앞으로도 약 40 ~ 50% 가격저감이 이루어져야 정책지원 없는 자유경쟁 시장에서의 생존이 가능할 것으로 예상됨

정책지원 하에서 연료전지 업체들은 지속적인 시장 확대와 가격저감 노력을 경주하여 2020년 경에는 정책 지원 없이 생존이 가능해질 것으로 기대하고 있음. 가격저감은 주로 규모의 경제와 공급사슬에서의 가격저감에 의하여 이루어지고, 기술개발에 의한 가격저감 효과는 점차적으로 감소할 것으로 예상하고 있음. PEMFC와 MCFC의 학습율은 20%대를 꾸준히 유지하고 있는 반면, SOFC는 초기 상용화 단계에서 극히 낮은 5%대에 머물고 있음

DOE는 수송용 PEMFC의 기술개발 목표를 시스템 가격에서 비촉매 출력으로 전환하여 8kW/gPGM로 설정하였고 새로운 하부 프로그램으로 수송용 연료전지 상용화에 대응할 수 있도록 혁신공정기술과 인라인 공정제어기술 개발 지원하고 있음. SOFC의 스택 신뢰성 향상을 위하여 품질관리기술과 결함억제 소성기술개발이 필요함. MCFC의 경우 스택 수명을 10년까지 연장하고, 출력밀도를 20%시키고, 시스템 대형화를 통해 그리드 패리티 달성 추진이 필요함

1.6 시장분석 및 평가의견

1.6.1 시장진입의 용이성

본 평가대상 기술은 단기적으로는 제철소의 부생가스(특히, 전로가스)를 이용한 바이오 수소 생산기술에 적용될 수 있으며, 장기적으로는 바이오수소를 생산하여 연료전지 시장에 진입할 수 있을 것으로 판단됨

다만, 연료전지 시장의 수소자동차의 개발 및 상용화에 따른 시장 개황 및 규모의 확장에도 불구하고, 해당 시장으로의 본 기술 진입 여부는 경쟁 및 대체 수소생

산 기술 대비 경제성에서 다소 낮게 평가될 수 있어, 검토가 필요함. 본 기술은 단기적으로 제철소 부생가스의 산업 폐기물 활용 측면을 고려할 때, 시장 진입 용이성은 보통 수준으로 평가할 수 있겠음

현재까지의 수소시장은 반도체, 자동차, 철강, 석유화학, 태양전지 및 LED 등 우리나라 주력 산업의 기초소재로 쓰이고, 향후 산업의 성장세와 함께 점차 확대될 것으로 예상되나, 매년 그 성장 폭은 크지 않은 실정임. 이에 따라 연료전지 시장의 개황에 따라 시장의 진입 및 활성을 예상하고, 이에 대한 대응전략 마련이 필요함

1.6.2 시장확보 가능성

본 평가대상기술은 연료전지 시장 및 수소시장에서 화석연료 및 재생에너지로부터 생산되는 기술 등으로 현재 시장 내 위치한 기술을 대체하기에는 기술의 완성도, 경제성 등에서 다소 어려움이 존재할 수 있겠음. 다만, 본 기술의 단기적인 사업화를 계획하고 있는 제철소의 부생가스를 이용한 수소생산 기술에 대하여는 고호열성 세균이라는 특성에 따라 부가적인 처리 비용이 발생하지 않고, 국내 순수기술로 기술의 로열티가 없기 때문에 제철소 등의 산업체와 협업하여 플랜트를 구축하여, 수소를 생산할 경우 산업폐기물 처리 비용 및 생산된 수소의 판매 등으로 관련 시장을 확보할 수 있을 것으로 예상함

또한, 산업체와의 공동연구를 통하여 제철소 부생가스를 이용한 플랜트가 구축된 후에는 다른 고세균을 이용한 미생물 기술 대비 높은 완성도를 바탕으로 주도적인 바이오수소 생산 기술력 및 시장을 확보할 수 있음

이에 따라, 본 기술은 장기적인 수소연료전지의 시장확보 측면에서는 다수의 경쟁 및 대체기술에 따른 보수적인 견해가 존재할 수 있으나, 제철소의 부생가스를 활용한 수소 생산기술 측면에서는 시장확보 가능성을 보통 수준이상일 것으로 판단함

1.6.3 가격/원가 우위성

본 평가대상기술의 수익성 모델을 분석하여, 가격 및 원가 우위성을 살펴본 결과, 제철소 부생가스를 이용하여 수소를 생산하고, 이를 연료전지 사업화 시에 RPS제도를 활용하여 살펴본 결과 모두 경제성이 있는 것으로 확인되었음

그 외 관련 대상기술의 균주, 균주의 유전자 정보, 분리 및 동정기술, 연속 배양 기술 등을 국내 순수기술로 기 확보하고 있어, 원료 수급의 문제 및 기술 로얄티 지불에 대한 지출이 없어, 가격/원가의 우위성은 높은 수준으로 평가할 수 있음

1.6.4 이익구조상 우위성

본 기술을 활용하여 사업을 추진할 경우, 각각 제철소 부생가스를 이용한 수소생산 및 RPS 제도를 이용한 연료전지 사업으로 구상할 수 있으며, 두 가지 사업화의 시나리오에서 모두 경제성이 있는 것으로 분석되었음

제철소의 부생가스를 발전에 이용하는 시나리오와 수소생산에 이용하는 시나리오의 기대수익을 아래에 비교 분석하였음. 1,000톤 규모의 수소생산 플랜트에서는 부생가스 처리량 및 매출액 기대치는 현재의 부생발전에 미치지 못하는 것으로 나타남. 그러나 전력 및 수소의 생산비용을 반영한 수익성을 고려하였을 때는, 수소생산 시의 수익성이 66.5원으로 부생발전보다 6배 이상 높은 것으로 분석되었음

[부록_표 23] 수익성 - NA1 수소생산 vs. 부생발전

구 분	부생가스 복합발전 (광양발전소)	NA1 고세균에 의한 수소생산 (1,000톤 규모 플랜트)
연간 부생가스 처리량 (만 Nm^3)	493,105	12,408
매출액 (억 원)	1,761	357
수익성 (원/Nm^3)	10.04	66.50

또, 연료전지 발전사업의 매출구성으로 생산한 전력을 전력거래소에 공급함으로써 얻게 되는 전력판매 매출과 전력공급 실적을 근거로 발행받게 되는 신·재생에너지공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC)를 시장에서 거래함으로써 매출을 발생시킬 수 있는 구성이 있음

본 기술을 이용하여 수소를 생산한 후 연료전지 발전사업으로 연계하는 경우 NPV가 615억 원으로, 수소를 판매하는 경우의 NPV 337억 원보다 높게 산출되어 경제성이 있는 것으로 분석됨. 또한 초기투자비를 고려하여 분석한 수익성지수(PI)도 2.43으로 산출되어 투자할 가치가 있다고 할 수 있음

1.6.5 시장성 평가 종합의견

본 평가대상 기술은 관련 산업인 연료전지 시장이 개황되지 않았으며, 유사 기술의 사업화 성공사례가 찾기 어려울 만큼 시장으로 진입에서 다소 보수적인 견해가 있을 수 있겠음. 그러나 본 기술은 산업체와의 협업을 통한 고호열성의 미생물을 이용한 바이오수소 생산 기술의 플랜트를 구축함으로써, 향후 이산화탄소 및 환경 오염물질 발생하지 않는 궁극적인 대체에너지의 개발이 가능할 것으로 사료됨

관련 시장인 연료전지 시장의 경우, 상업용 수소자동차의 제품 출시 및 수소스테이션 개발, 수소 저장 및 용기 기술 연구 등의 시장 활성화를 위한 인프라 구축이 점진적으로 추진되고, 또 국가차원의 지원 정책도 다수로 진행되고 있어, 시장의 개황 및 성장 등을 고려하여 시장 진입 및 경쟁력을 갖출 수 있는 노력이 필요함

본 평가대상 기술의 수익성 검토를 위하여 제철소 부생가스를 활용한 바이오수소 생산 기술 및 연료전지 사업화의 두 가지의 시나리오로 살펴본 결과에도 본 기술의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 평가되어, 향후 대상기술의 시장현황에 대한 주기적인 모니터링과 사업화를 위한 플랜트 및 수소생산 시스템의 최적화 기술에 대한 개발에 적극적인 추진이 필요할 것으로 사료됨

참고문헌

박세헌, “바이오수소개발 사업의 상업 생산을 위한 경제성 분석”, 한국해양과학기술원, 2012

박정수, “바이오수소 에너지 개발에 대한 경제성 분석”, 서강대학교, 2012.05.12

이영철, "수소스테이션 국내외 현황과 운영 실적 및 시사점", 수소에너지정보 제 38호, 고효율수소에너지제조·저장·이용기술개발사업단, 2012.03

해양수산부, “해양미생물로부터 미래대체 에너지 수소를 생산”, 보도자료, 2009.09.08

기업경영분석, 한국은행, 각 년도

산업교육연구소, ‘2014 (수소)연료전지 기술, 시장동향과 신사업 모델 및 소재/부품 세미나’, 2014.04

에너지관리공단, “신재생에너지백서”, 2012

유진투자증권, “유틸리티 - 연료전지(발전용)”, 2013.10.07

지식경제부, “신·재생에너지 공급의무화(RPS) 제도”, 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2012.03

포스코에너지(주), 2012년 지속가능경영보고서

한국산업기술진흥원, “기술가치평가 실무가이드”, 2011.12

한국수소 및 신에너지학회, "국내 부생수소 현황과 수소 유통 인프라", 논문집 제13권 제4호, 2002.12.한국에너지기술평가원, “2013 에너지기술 로드맵”, 2013.12

한국신용평가, Rating Report - 포스코에너지(주), 2013.12.27

한국해양과학기술진흥원, 2011년 해양과학기술연구개발사업 연구성과 자료집

NICE신용평가, “포스코에너지(주)”, 2013.12.27

(주)엔솔테크, “20L 반응기 실험 결과 분석 및 NA1 수소생산 성공 조건 분석”, 2011.06.02.포스코에너지(주) 사업보고서, 각 년도

H.Kim, Pohang Technopark, Development of supply chain in Fuel Cell Industry, 2014.02

Nicholas Stern, "Stern Review on the Economics of Climate Change", 2006

Fuel Cell Today, Industry Review, 2013

(주)엔솔테크 홈페이지, http://www.ensoltek.co.kr

포스코에너지(주) 홈페이지, http://www.poscoenergy.com

글로벌에너지개발(주) 홈페이지, http://globalenergy.kr

한국에너지기술연구원 수소연구실 블로그, http://blog.naver.com/gir5101

전력통계정보시스템, http://epsis.kpx.or.kr