

신재생에너지 발전전력 압축공기 저장 기술 개발 기획보고서

2011. 6.

연구기관 / 한국해양연구원

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

Land & Transport and Maritime R&D Report

신재생에너지 발전전력 압축공기 저장 기술 개발 기획보고서

2011. 6.

국 토
한국건설교통기술평가원 부

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 기획연구용역보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 기획연구용역의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

한국건설교통기술평가원

경기도 안양시 동안구 관양동 1600번지 신창빌딩 3층
<http://www.kictep.re.kr>
TEL. 031-389-6421~7 FAX. 031-389-6436



발 간 등 록 번 호
11-B551976-000016-01

BSPM 56120-2301-2

신재생에너지 발전전력 압축공기 저장 기술 개발 기획보고서

2011. 6.

연구기관 / 한국해양연구원

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

이 보고서를 “신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 개발”
기획연구용역의 최종보고서로 제출합니다.

2011. 6.

주관연구기관명 : 한국해양연구원

■ 연구책임자 이 광 수 한국해양연구원 책임연구원

■ 참여연구원

성 명	소 속	성 명	소 속
장인성	한국해양연구원	정진택	고려대학교
한상훈	한국해양연구원	유승훈	서울과학기술대학교
이진학	한국해양연구원	김진만	부산대학교
오명학	한국해양연구원	권승희	명지대학교
허 철	한국해양연구원	박훈재	한국생산기술연구원
한택희	한국해양연구원	유무성	한전 전력연구원
고진환	한국해양연구원	고광오	현대건설
박세현	한국해양연구원	이세진	현대건설
정정열	한국해양연구원	채광석	GS건설
김우태	한국해양연구원	서상연	GS건설
함영복	한국기계연구원	이육한	건일엔지니어링
박창대	한국기계연구원	윤상준	KT서브마린
박정우	한국전기연구원	김영일	GS파워

목 차

제1장 기획 필요성	1
제1절 기획배경	1
1. 세계 및 국내의 전력에너지 전망	2
2. 전력에너지 저장의 필요성	2
3. CAES의 필요성	5
4. Smart grid와 에너지저장 시스템의 연계	7
5. CAES의 효율적 활용	7
6. 압축공기 저장 방법	10
제2절 기획 목적 및 추진방향	11
1. 기획 목적	11
2. 추진방향	11
제2장 기술개발 동향 및 환경분석	17
제1절 국내외 정책 동향분석	17
1. 국외 정책 동향	17
2. 국내 정책 동향	18
3. 정책동향 분석결과	20
제2절 국내외 시장 동향분석	21
1. 전력에너지 시장 수요	21
2. 신재생에너지 시장	23
3. 압축공기 저장기술(CAES) 시장	26
4. 시장동향 종합분석	31
제3절 국내외 기술 동향분석	33
1. 전력에너지 시스템 기술	33
2. 압축공기 에너지 저장 기술(CAES)	35
3. 압축공기 활용 발전 기술	39
4. CAES 모니터링 및 유지관리 시스템 기술	45

제4절 국내·외 특허기술 동향 분석	47
1. 특허분석대상의 선정	47
2. 특허분석의 방법	49
3. 주요국의 연도별 특허동향 및 기술발전 위치	50
4. 주요국의 세부기술별 특허동향	52
5. 기술분야별 주요국가의 특허활동 및 역점분야	53
6. 주요기업의 역점분야 및 공백기술	55
7. 미국특허를 이용한 지표분석	58
8. 특허분석의 결론 및 시사점	62
제5절 국내외 논문 동향분석	63
1. 논문동향 분석 개요	63
2. CAES 분야의 논문동향 분석 결과	63
제6절 국내외 기술개발 및 국내 기술 인프라·기술인력 현황	66
1. 국내외 기술개발 현황	66
2. CAES 관련 선진국 산업체의 개발 및 생산 현황	71
3. 국내 기술 인프라·기술 인력 현황	74
제7절 기존 과제와의 중복성 검토 및 연계방안	75
제3장 기술개발 전략수립	77
제1절 STEEP 분석 및 이슈도출	77
1. STEEP 분석	77
2. 이슈도출	77
3. 이슈트리(Issue Tree)	80
제2절 SWOT 분석 및 대응전략	81
제4장 연구비전 및 목표	83
제1절 기술발전 시나리오	83
1. 기술발전 시나리오	83
2. 전략적 연구개발 목표 수립	87
제2절 비전 및 목표 수립	91

제3절 핵심과제 도출	93
1. 핵심과제 도출 과정	93
2. 기술기능전개 및 기술트리	94
3. 후보과제 도출 및 우선순위 선정	109
제5장 연구개발과제 구성 및 추진전략	115
제1절 연구개발과제의 구성 체계	115
제2절 연구단 운영전략 및 추진체계	119
1. 추진전략 및 로드맵	119
2. 세부과제간 연계전략	120
3. 산·학·연 연계전략	120
4. 연구단 성과목표 및 지표	121
5. 실용화 추진 전략	123
제3절 1세부과제 구성 및 추진전략	125
1. 연구목표 및 범위	125
2. 연구내용	126
3. 추진전략 및 로드맵	127
4. 예상 연구성과물의 목표성능	131
5. 성과목표 및 성과지표	132
6. 실용화 방안	132
7. 기대성과 및 활용방안	133
제4절 2세부과제 구성 및 추진전략	135
1. 연구목표 및 범위	135
2. 연구내용	136
3. 추진전략 및 로드맵	137
4. 예상 연구성과물의 목표성능	142
5. 성과목표 및 성과지표	143
6. 실용화 방안	143
7. 기대성과 및 활용방안	144
제5절 연구단 소요예산	146
1. 연구단 소요예산 총괄	146
2. 세부과제별 소요예산	148

제6장 연구기획의 자체 사전타당성 검토	151
제1절 정부지원의 타당성	151
1. 정부지원의 타당성	151
2. 국토해양부 연구과제로의 추진 타당성	152
제2절 경제적 타당성 및 파급효과 분석	154
1. R&D사업의 경제성 분석	154
2. 경제적 파급효과 분석	165
3. 인공구조물 저장방식에 대한 개략 경제성 검토	187
제3절 전문가 설문에 의한 타당성 검토	190
1. 종합평가	190
2. 정책적 타당성 검토	192
3. 기술적 타당성 검토	193
4. 경제적 타당성 검토	194
제7장 기획타당성검토위원회 결과를 반영한 수정안	195
제1절 기획타당성검토위원회 개요 및 검토결과	195
1. 기획타당성검토위원회 개요	195
2. 기획타당성검토위원회 결과	195
제2절 연구개발과제 수정안	198
1. 연구개발과제 구성 및 추진체계	198
2. 연구개발과제 주요내용	201
3. 연구개발과제 성과활용방안	202
4. 기대효과	205
5. 연구개발과제 소요 예산	206
참고문헌	209
부록 : 과제카드	215

(별권 1) 해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발 과제 기획보고서

(별권 2) 해상풍력 일체형 Micro-CAES 시스템 개발 과제 기획보고서

표 목 차

표 1.1 국내 신재생에너지원의 침투부하 전력관리 기여도	4
표 1.2 각 전력에너지 저장시설 별 특성 비교	6
표 1.3 기획위원 명단	14
표 2.1 태양광분야 신재생에너지기술개발 기본계획	24
표 2.2 국내 관련 시장 규모의 현황 및 전망	27
표 2.3 각 전력에너지 저장시설 별 특성 비교	35
표 2.4 TES 시스템 개요	43
표 2.5 Micro-CAES 관련 기술 요소별 국내 수준	44
표 2.6 특허자료 검색식과 국제특허분류(IPC) 설정	47
표 2.7 최종 특허분석대상 선정	48
표 2.8 기술분야 분류	48
표 2.9 특허 분석 지표	49
표 2.10 미국특허로 판단한 국가별 기술수준 순위	61
표 2.11 CAES 관련 주제분야 Top 10	64
표 2.12 CAES 관련 주요 저널/프로시딩 Top 10	65
표 2.13 CAES 관련 주요저자 및 최근 10년간 연간 논문 발행 편수	65
표 2.14 일본 CAES 파일럿 플랜트 기본 제원	68
표 2.15 일본 CAES 파일럿 플랜트 성능시험결과	69
표 2.16 CAES 관련 선진국의 산업체 현황	71
표 2.17 CAES 관련 선진국 기술의 경제성 수준	71
표 2.18 CAES 프로젝트 현황	72
표 2.19 CAES 주요 실증 프로젝트	73
표 2.20 유사과제 조사 결과	75
표 2.21 유사과제와의 차별성 및 연계방안	76
표 3.1 STEeP 분석 결과	79
표 3.2 SWOT 분석 및 대응전략 수립	82
표 4.1 신재생에너지 발전 기술과 융합가능한 에너지 저장기술	83
표 4.2 기술발전 시나리오의 비교	86

표 4.3 전기구동방식과 풍력 블레이드 직구동 방식의 특성 비교	88
표 4.4 비전 실현을 위한 핵심요소기술	92
표 4.5 기술트리-기본 기능 #1 : 계획 수립 기능	95
표 4.6 기술트리-기본 기능 #2 : 구조물 설계 및 시공 기능	96
표 4.7 기술트리-기본 기능 #3 : 압축공기 주입 및 활용 기능	97
표 4.8 기술트리-기본 기능 #4 : 모니터링 및 유지관리 기능	98
표 4.9 핵심기술군	100
표 4.10 총괄 후보과제	109
표 4.11 1세부과제 후보과제	110
표 4.12 2세부과제 후보과제	111
표 4.13 가중치 항목과 주안점	112
표 4.14 우선순위 점수산정을 위한 가중치	112
표 4.15 우선순위 설문조사 결과 점수 및 과제별 우선순위	113
표 4.16 선정된 세세부과제	114
표 5.1 연구단 성과목표 및 성과지표 설정	122
표 5.2 세부과제별 연구비 총괄표	146
표 5.3 세부과제별 총괄 예산(안)	146
표 5.4 연차별 재원조달계획	146
표 5.5. 연구내용별 예산 총괄	147
표 5.6 연구내용에 따른 연차별 연구비	147
표 5.7 1세부과제 비목별 연구비	148
표 5.8 2세부과제 비목별 연구비 총괄표	149
표 6.1 CAES 사업의 연도별 소요예산	157
표 6.2 CAES 관련 시장규모 예측 결과	161
표 6.3 중소 제조업의 기술개발 사업화성공률	161
표 6.4 본 사업의 부가가치 창출편익 추정결과	163
표 6.5 CAES 사업의 경제성 분석결과 요약	164
표 6.6 CAES 사업에 대한 비용 및 편익의 흐름	164
표 6.7 우리나라 산업연관표의 간단한 형태	168
표 6.8 산업연관표의 구조	171
표 6.9 통합 전 3부문의 산업연관표	172
표 6.10 통합 후 2부문의 산업연관표	173

표 6.11 403 부문 상에서의 CAES 사업의 정의	180
표 6.12 CAES 사업을 포함한 29부문 산업분류표	181
표 6.13 한국은행 대분류 기준 29개 산업의 감응도 계수와 영향력 계수	184
표 6.14 CAES 사업에서의 투자가 타 산업에 미치는 파급효과	186
표 6.15 자문위원 명단	190
표 6.16 사전타당성 검토 평가 항목 및 주안점	191
표 6.17 사전타당성 평가 결과	191

그림목차

그림 1.1 전력 품질의 신뢰성 요구조건 (미국 EPRI)	4
그림 1.2 에너지 저장의 기술별 경제성 분석 (일본 NEDO)	4
그림 1.3 CAES 개념도	5
그림 1.4 양수발전소와 CAES의 용량 비교	5
그림 1.5 각 전력에너지 저장시설 별 개발단계(DTI Report, 2004)	6
그림 1.6 신재생에너지의 공급과 수요의 불균형 및 풍력발전의 가변적 전력생산	7
그림 1.7 Smart grid의 개념도 및 계통연계	7
그림 1.8 CAES-GT 발전방식 개념	8
그림 1.9 일본 CAES-GT 파일럿 시험	8
그림 1.10 풍력발전 연계 CAES	9
그림 1.11 Micro-CAES 개념도	9
그림 1.12 Tri-Gen CAES 시스템 개략도	10
그림 1.13 연구개발 비전 및 목표	11
그림 1.14 연구추진체계	12
그림 1.15 연구 추진 단계	15
그림 2.1 미래 지능형 신인프라 유형별 세부 ITEM	19
그림 2.2 해상풍력단지 단계별 추진안(해상풍력 추진 로드맵)	19
그림 2.3 세계 에너지별 소비량 전망(International Energy Outlook 2010(EIA))	21
그림 2.4 전체 에너지소비량 vs. 전력에너지의 발생량 전망그림(International Energy Outlook 2010(EIA))	22
그림 2.5 세계 발전원별 전력량 전망(제4차 전력수급기본계획)	22
그림 2.6 국내 발전원별 전력량 전망(제4차 전력수급기본계획)	22
그림 2.7 신재생에너지 분담률 전망	23
그림 2.8 전력부문 이용보급 전망	23
그림 2.9 유럽의 해상풍력 단지 현황	23
그림 2.10 Pelamis(영국) 설치 전경	25
그림 2.11 Wave Dragon(덴마크)	25

그림 2.12 울돌목 시험조류발전소	26
그림 2.13 MCT 조류발전	26
그림 2.14 Duct형 조류발전	26
그림 2.15 CAES Compression Subsystem Market Size (2009~2014) (in million \$)	29
그림 2.16 CAES Storage Subsystem Market Size (2009~2014) (in million \$)	29
그림 2.17 CAES Expansion/Generation Subsystem Market Size (2009~2014) (in million \$)	30
그림 2.18 Total CAES System Market Size (2009~2014) (in million \$)	31
그림 2.19 스마트 그리드 시스템 개념도	33
그림 2.20 독일 Huntorf CAES발전소	36
그림 2.21 미국 McIntosh CAES발전소	36
그림 2.22 전 세계 CAES 운영 및 개발 현황(지식경제부, 2009)	36
그림 2.23 Iowa Stored Energy Plant	37
그림 2.24 ISEP Concept	37
그림 2.25 한국지질자원연구원의 CAES 파일럿 플랜트	38
그림 2.26 지하 압축공기저장 발전시스템의 개념도, SK 건설	39
그림 2.27 기존 가스터빈 발전방식과 CAES 발전 방식과의 비교	40
그림 2.28 다단 압축/팽창 CAES 발전시스템(Alabama Plant)	40
그림 2.29 AA-CAES 발전시스템(Advanced Adiabatic CAES)	42
그림 2.30 풍력발전에서의 모니터링 시스템	45
그림 2.31 각국의 신규공사 대비 유지관리비 비율	45
그림 2.32 비파괴 검사법에 의한 방파제 상치콘크리트의 건전도 평가 사례	45
그림 2.33 국가별 연도별 특허출원건수	51
그림 2.34 CAES 분야의 기술발전 위치분석 결과	51
그림 2.35 각국의 기술 분류별 특허 동향	52
그림 2.36 최근 10년간 각국의 기술 분류별 특허 동향	53
그림 2.37 주요국의 기술분야별 역점기술분야	54
그림 2.38 기술분야별 특허권자 분포(한국)	55
그림 2.39 기술분야별 특허권자 분포(미국)	56
그림 2.40 기술분야별 특허권자 분포(일본)	57

그림 2.41 기술분야별 특허권자 분포(유럽)	57
그림 2.42 CAES 분야의 연구개발방향 및 기술발전속도	59
그림 2.43 국가별 기술영향력(TS)의 구간별 추이 비교	61
그림 2.44 풍력발전을 이용한 압축공기 발전시스템 개념도	67
그림 2.45 독일 Huntorf CAES발전소	68
그림 2.46 무복공식 압축공기 저장 실증실험 개요(일본 전력중앙연구소, 2003)	69
그림 2.47 압축공기 저장공동 설계사양(일본 전력중앙연구소, 2003)	70
그림 2.48 압축공기 저장공동 내부 및 플러그 철근배열(일본 전력중앙연구소, 2003)	70
그림 2.49 대상 광산갱도 구조 및 CAES-G/T 발전시설 개념도(지식경제부, 2009)	70
그림 2.50 복공식 압축공기 지하저장 터널 설계 단면도(지식경제부, 2009)	70
그림 3.1 이슈트리	80
그림 4.1 CAES 기술발전 시나리오 1 - 대규모 압축공기저장	85
그림 4.2 CAES 기술발전 시나리오 2 - 중소규모 압축공기저장	86
그림 4.3 전략적 연구목표에 의한 기술개발 시나리오	88
그림 4.4 전기구동식 압축공기 저장시스템 개념도	89
그림 4.5 풍력블레이드 직구동 압축공기 저장시스템 개념도	89
그림 4.6 전략적 연구목표에 따른 세부과제 구성	90
그림 4.7 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 기획연구 비전	91
그림 4.8 핵심과제 도출과정	93
그림 4.9 기술기능전개(FAST)	94
그림 4.10 핵심기술군 도출과정	99
그림 5.1 과제 연구수행 체계	115
그림 5.2 단계별 목표 설정	119
그림 5.3 연구단 MACRO 로드맵	119
그림 5.4 산·학·연 협동연구체계 활성화 방안	121
그림 5.5 1세부과제 기술 체계도	130
그림 5.6 1세부과제 기술개발 로드맵	130
그림 5.7 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CASE 시스템 개발 기술트리	141
그림 5.8 2세부과제 기술 개발 로드맵	141
그림 6.1 CAES 사업으로 인한 부가가치 창출효과	160
그림 6.2 본 연구에서 CAES 사업을 바라보는 구도	166

그림 6.3 CAES 사업의 경제적 파급효과	182
그림 6.4 CAES 사업의 경제적 파급효과 분석 흐름도	182
그림 6.5 CAES 사업 투자의 경제적 파급효과 종합화 결과	185

제1장 기획 필요성

제1절 기획배경

○ 신재생에너지의 보급에 따른 에너지 저장시설 필요성 증대

- 신재생에너지 (풍력, 태양광, 태양열, 조류, 파력 등)는 원자력, 화력, 수력 등에 의한 발전에 비하여 전력 발전량이 시간별로 불안정한 특징 때문에 전력품질의 안정화를 위해서는 에너지 저장이 반드시 필요함
 - 에너지저장없이 신재생에너지 발전량 비율이 10%를 상회할 경우 전체 전력망의 불안정으로 인해 전력품질에 심각한 피해 우려(지식경제부, 2011)
 - 양수발전은 환경성 및 경제성 때문에 추가 개발이 어려우므로, 대규모 에너지저장 기술로 압축공기 에너지저장(CAES, Compressed Air Energy Storage)이 주목됨
 - 압축공기는 고갈의 염려가 없는 무공해 청정에너지임
 - 에너지 저장을 통한 전력효율 극대화는 공급자와 소비자가 정보를 교환하여 에너지 효율을 최적화하는 Smart grid의 핵심 요소
- *) Smart grid : 정보통신기술을 활용하여 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환, 에너지 효율을 최적화하는 지능형 전력망

○ 압축공기의 인공저장시설에 대한 연구 필요

- 국내 100MW급 이상의 해상풍력단지를 포함한 신재생에너지원의 개발이 구체화되어 추진중이므로 전력 소비지의 계통 연계성을 고려하면 에너지저장시설의 위치선정에서의 유연성이 매우 중요
- 압축공기를 인공적으로 저장할 수 있는 시스템의 개발을 통해 에너지원에 따른 저장용량 및 저장장소를 고려하여 에너지원별로 최적화하여 적용 가능
- 신재생에너지와 Smart grid의 효율적 연계차원에서도 인공저장시설이 필요

○ CAES를 이용한 압축공기의 효율적 활용 요구

- 압축공기 인공저장시설을 병렬 분산형으로 적용할 경우, 대용량 인공저장시설 구축이 가능하며 효율적으로 활용할 수 있음
- 전력, 냉방, 난방을 동시에 공급할 수 있는 Tri-Gen CAES 시스템 구축
- 풍력발전 뿐만 아니라 파력, 조류 등의 해양에너지를 포함한 다양한 신재생에너지에 압축공기를 활용한 효율적 개발 가능

○ 신재생에너지와 건설기술의 융복합 기술 개발 및 확대

- 압축공기를 활용한 전력생산 시스템 구축 기술
- 프리캐스트 콘크리트 구조물의 제작, 시공 및 내구성 확보 기술
- 압축-팽창시의 발생 열원의 활용 기술

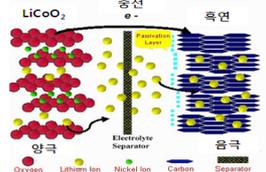
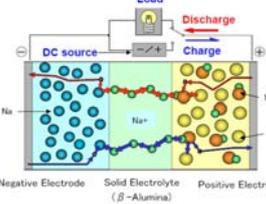
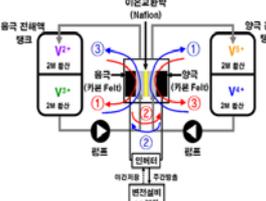
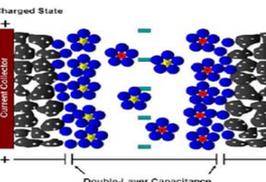
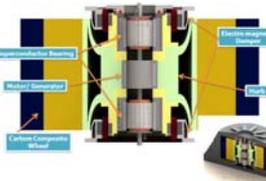
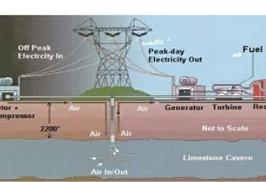
1. 세계 및 국내의 전력에너지 전망

- International Energy Outlook 2010(EIA)에서는 전 세계의 에너지별 소비량 전망에서 화석연료의 사용량 및 의존도는 향후 지속적으로 유지될 것으로 판단. 또한 전체 에너지 소비추이에 비해 전력에너지 수요의 지속적인 증가 예상.
- 세계 및 국내 발전원별 전력량 전망을 비교하면, 세계 전력량 중에서 원자력이 차지하는 비율이 소폭 감소가 예상되지만, 국내의 경우에는 석탄 및 LNG가 차지하는 비중은 다소 축소되며 원자력이 차지하는 비중 증가 전망.
- 4차 전력수급기본계획에 의해 기저전력부분은 원자력 중심, 첨두부하부분은 LNG 발전 중심으로, 첨두부하에 대응하기 위한 LNG발전의 확충 규모가 두 번째로 크다는 점으로, 첨두부하에 대응하기 위한 대응량 전력에너지 저장시스템은 상당부분 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.
- 또한, 국내 에너지경제연구원에서 발표한 “제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본계획(2008)”에서 전체 에너지에서 신재생에너지가 분담하는 비중이 2020년 6.6%, 2030년 11%를 목표로 하고 있으며, 신재생에너지의 전력보급은 2020년까지 총 5.5G TOE, 이중 해양에너지 16.5%, 풍력 36.9% 전망.
- 특히, 풍력발전은 2019년까지 세계 3대 해상풍력 강국으로 도약하기 위해 민·관 합동으로 총 9.2조원을 투자하여 서남해안에 2,500MW 규모의 대규모 해상풍력단지의 단계적 개발을 목표로 함. 또한, 세계 풍력산업의 성장세는 5년간 연평균 27.3%로 세계 시장규모는 2009년에 635억 달러 (159GW)에서 2019년에는 1,145억 달러 (1,900GW)의 성장 예상.

2. 전력에너지 저장의 필요성

- 소비자가 원하는 전기는 필요할 때, 필요한 만큼, 쓸 수 있는 품질과 안정적인 공급이 필수임.
- 현대 사회의 많은 전기소비는 PC 및 인터넷 사용과 연관성이 높으며, 특히 안정적인 전자상거래 등을 위해서는 상당한 수준의 전력품질 및 연간 3/1000초 정도 정전 발생의 신뢰성 확보 필요.

- 100MW 이상의 대규모 에너지 저장이 가능한 장치로는 압축공기에너지 저장 (CAES), 양수발전(PHS), 수소저장(Hydrogen) 등이 있으며, 소규모 저장장치로는 축전지, Flywheel 등이 있음(일본 NEDO).

에너지저장방법	작동 원리 및 특징
	<ul style="list-style-type: none"> ○ (원리) 리튬이온이 양극과 음극을 오가며 전위차 발생 ○ (장점) 高 에너지밀도, 高 에너지 효율 ○ (단점) 안전성·수명 未 검증, 高 비용
<p>LiB(리튬이온전지)</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ (원리) 300~350℃의 온도에서 용융상태의 나트륨 이온이 전해질을 이동하면서 전위차 발생 ○ (장점) 高 에너지밀도, 低 비용, 大용량화 용이 ○ (단점) 고온 시스템 필요, 低 에너지 효율
<p>NaS(나트륨 황 전지)</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ (원리) 전해액 내 이온들의 산화·환원 전위차를 이용하여 전기에너지를 충·방전 ○ (장점) 低 비용, 大용량화 용이, 장시간 사용 가능 ○ (단점) 低 에너지밀도, 低 에너지 효율
<p>RFB(레독스 흐름 전지)</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ (원리) 소재의 결정 구조 내에 저장되는 전지와는 달리, 소재의 표면에 대전되는 형태로 전력을 저장 ○ (장점) 高 출력밀도, 長 수명, 안정성 ○ (단점) 低 에너지밀도, 高 비용
<p>Super Capacitor (수퍼 커패시터)</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ (원리) 전기에너지를 회전하는 운동에너지로 저장했다가 다시 전기에너지로 변환 ○ (장점) 高 에너지 효율, 長 수명 ○ (단점) 초기 구축 비용 과다, 低 에너지밀도
<p>Flywheel(플라이휠)</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ (원리) 잉여 전력으로 공기를 동굴이나 지하에 압축, 압축된 공기를 가열하여 터빈을 돌리는 방식 ○ (장점) 대규모 저장 가능, 低 발전단가 ○ (단점) 초기 구축 비용 과다, 지리적 제약(∵지하 굴착)
<p>CAES(압축공기저장시스템)</p>	

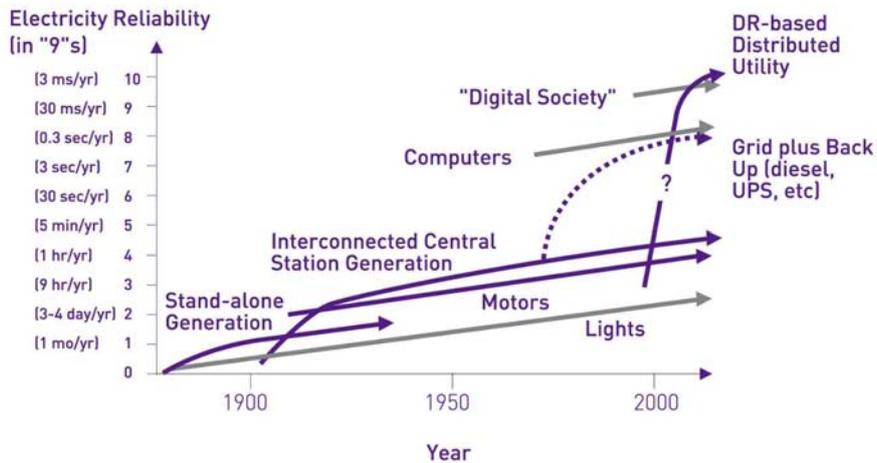


그림 1.1 전력 품질의 신뢰성 요구조건 (미국 EPRI)

CAPITAL COST ESTIMATES FOR ENERGY STORAGE OPTIONS					
Technology		\$/kW	\$/kWh	Hours	Total capital cost (\$/kW)
CAES	Large: 100-300 MW	390	1	10	400
	Small: 10-20 MW (goal)	400	33	3	500
PHS	Conventional: 1,000 MW	1,100	10	10	1,200
	Underground: 2,000 MW (goal)	1,200	50	10	1,700
Battery	LA: 10 MW	150	250	2	650
	Advanced: 10 MW (goal)	150	150	2	450
	Flow cell: 10 MW (goal)	150	100	2	350
Flywheel	1MW	200	200	2	800
SMES		150	150	2	750
Ultra-capacitor		150	150	1 min	210
Hydrogen	100 MW (goal)	450	450	10	750

그림 1.2 에너지 저장의 기술별 경제성 분석 (일본 NEDO)

- 첨두부하 전력관리에 대한 신재생에너지원별 기여도를 살펴보면, 수력 및 연료전기가 발전량의 100%를 첨두부하 전력관리에 기여하는 반면, 신재생에너지원인 풍력, 해양, 태양광 등은 공급을 인위적으로 조절할 수 없는 자연에너지원이라는 특징으로 인해 첨두부하 전력관리 기여도가 현저히 낮음.

표 1.1 국내 신재생에너지원의 첨두부하 전력관리 기여도 (지식경제부)

구분	연료전지 (IGCC)	수력 (조력)	소수력	태양광	바이오 가스	풍력
Peak 기여도 (%)	100	100	62.2	42.8	40.9	21.9

3. CAES의 필요성

- 1GW급의 대용량 및 지속가능 저장시스템은 CAES(Compressed Air Energy Storage)로 불리는 압축공기 저장 시설과 양수발전뿐임.

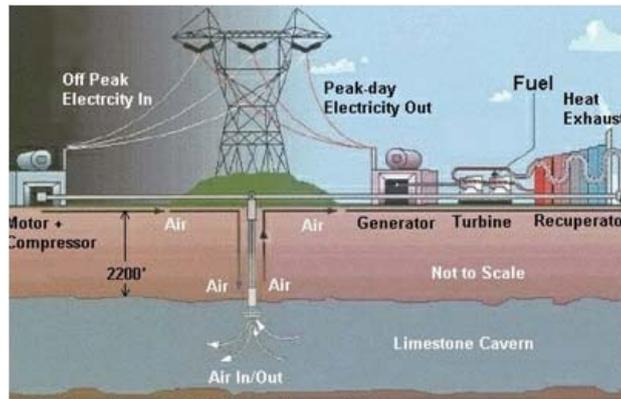


그림 1.3 CAES 개념도

- 양수발전소(PHS, Pumped Hydro Storage power plant)는 심야의 값싼 전력을 이용하여 하부댐의 물을 상부댐에 양수시켜 침두부하 시에 발전함으로써, 전체적인 전력계통의 발전효율 향상과 경제적인 전력계통의 운용 가능. 국내에서는 1980년 청평 양수발전소를 시작으로 무주, 삼랑진, 산청, 양양, 청송, 예천에 운영, 시공 중에 있으며 발전용량 400~1,000 MW의 대규모 전력에너지 저장 능력을 갖추었으나, 수량이 풍부하고 큰 자연 낙차를 줄 수 있는 조건이 형성되어야 하는 입지 제한조건 및 환경문제와 더불어 과거에 비해 심야전력의 사용 급증 등의 문제로 인해 매력도 감소.
- 또한, CAES는 저장시설 지하화 및 시설규모의 대폭 축소 가능.

Required Storage Volume to Generate 300 MW (12 Hours Pumping, 12 Hours Generation)

0.28 million m³ of Compressed Air



7 million m³ of Water

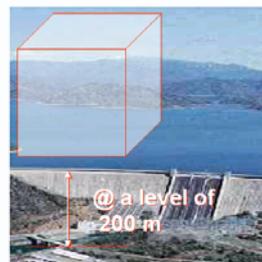


그림 1.4 양수발전소와 CAES의 용량 비교

- kW당 저장단가가 기존 에너지 저장 기술인 축전지나 Fly Wheels보다 낮으며, 에너지 관리 및 적용이 수월함.
- 전력에너지 저장의 저장용량 및 경제성 분석(일본 NEDO 및 ICREPQ, 2008)에 의하면 100MW 이상의 대규모 에너지 저장이 가능한 장치로서 압축공기에너지 저장(CAES), 양수발전(PHS), 수소저장(Hydrogen)이 있으며, 경제성분석 결과에서 압축공기에너지저장이 양수발전이나 수소저장에 비해 경제성이 있는 것으로 조사됨.

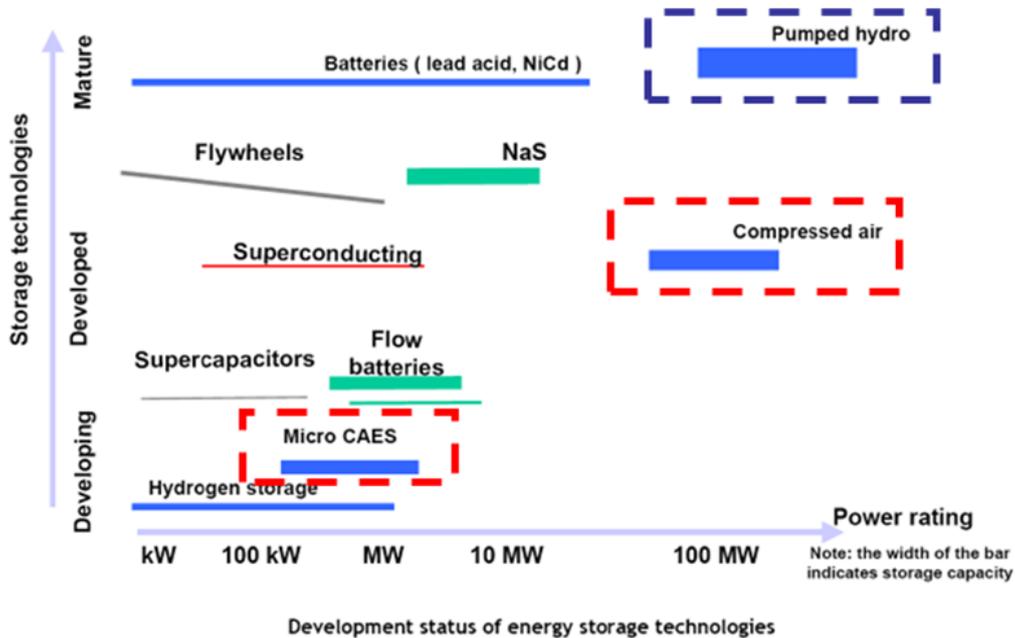


그림 1.5 각 전력에너지 저장시설 별 개발단계 (DTI Report, 2004)

표 1.2 각 전력에너지 저장시설 별 특성 비교

Characteristics	Technology			
	Pumping Hydro	Batteries	CAES	Hyd. fuel cells
Power (MW)	100~3,000	<100	100~3,000	<50
Energy(MWh)	<10,000	<500	50~5,000	-
Charge-disch. Effic.	80%	50~90%	75%	20~36%
Life-time(Cycle)	40 years	10 ³ ~10 ⁴	30 years	10 ⁴ hours
Price(€ /kWh)	35~70	70~4,000	10~70	-

* Ref : "An Overview on Short and Long-term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications" presented in ICREPQ 2008

4. Smart grid와 에너지저장 시스템의 연계

- 자연의 에너지원을 이용하는 신재생에너지 발전은 에너지공급이 불안정함. 화력, 원자력 발전의 경우에는 전력 수급의 조절이 가능하지만 신재생에너지는 에너지 수급에 있어 어려움이 발생하므로, 소비자들의 수요에 맞춰 전력을 공급하는데 문제가 발생할 가능성이 높음.

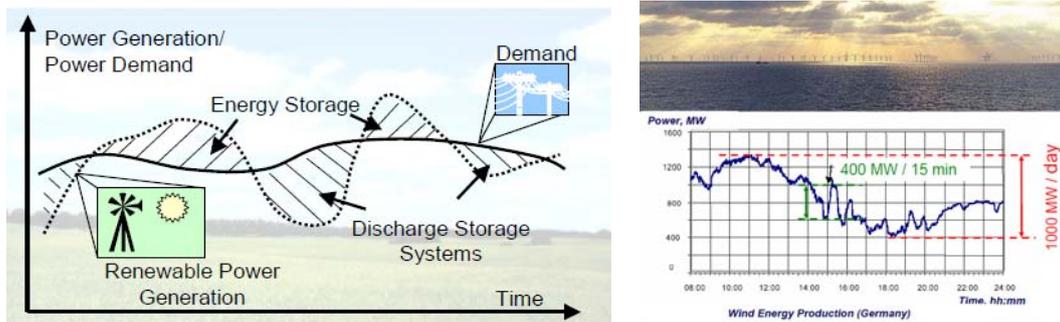


그림 1.6 신재생에너지의 공급과 수요의 불균형 및 풍력발전의 가변적 전력생산

- 스마트그리드는 여러 에너지원이 융·복합되었을 때 이를 효율적으로 관리하여 전력수급을 달성하는 데 큰 기여가 가능하며, 이러한 발전원간의 융·복합, 소비 및 공급 수급 달성에 필수적인 요소 중 하나가 에너지저장 설비임.

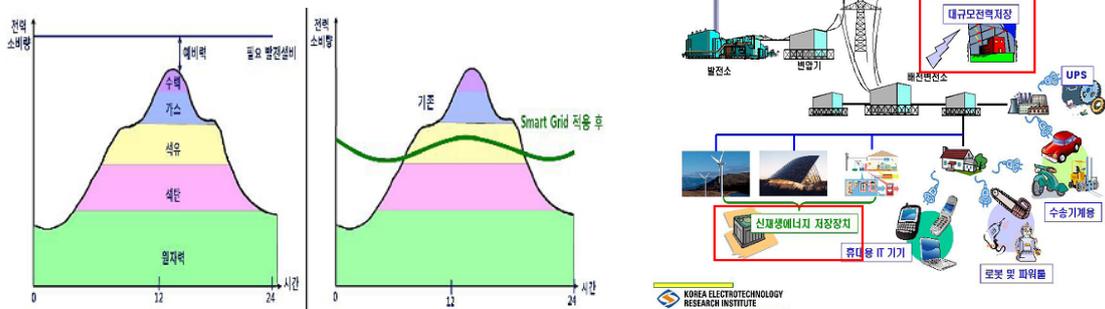
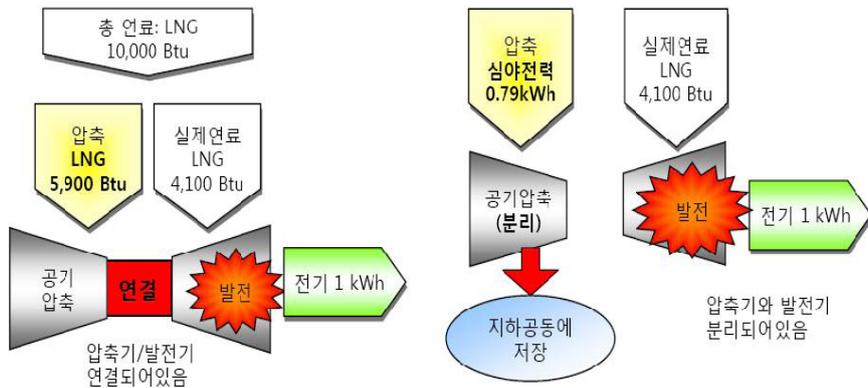


그림 1.7 Smart grid의 개념도 및 계통연계

5. CAES의 효율적 활용

- 압축공기에너지 저장에 의한 가스터빈 발전시스템 (CAES-GT, Compressed Air Energy Storage - Gas/Turbine)은 심야의 off peak 시의 전기를 이용하여 고압의 압축공기를 저장한 후 주간 peak 부하 시에 압축된 공기로 가스터빈을 발전하는 전력에너지 저장과 발전의 하이브리드 방식임.

- 일반적인 가스터빈 발전은 공기압축기를 동시에 가동하여 고압 공기를 발생시키면서 발전하기 때문에 터빈 발생동력의 60~70%가 공기 압축기의 가동에 소비되어 발전기 동력에 이용되는 동력은 불과 30~40% 임. 이에 비하여 CAES-GT는 현재의 소비연료의 55%를 절감할 수 있으므로 경제성 확보만이 아닌 CO₂ 저감의 효과도 클 것으로 판단됨.



일반 가스터빈

압축공기에너지저장 (CAES) 발전

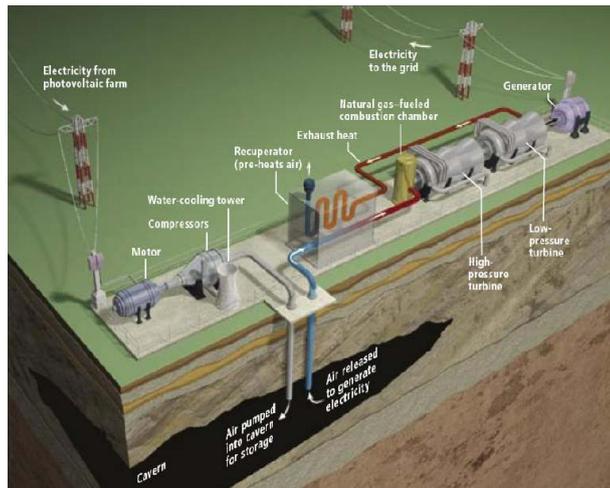


그림 1.8 CAES-GT 발전방식 개념

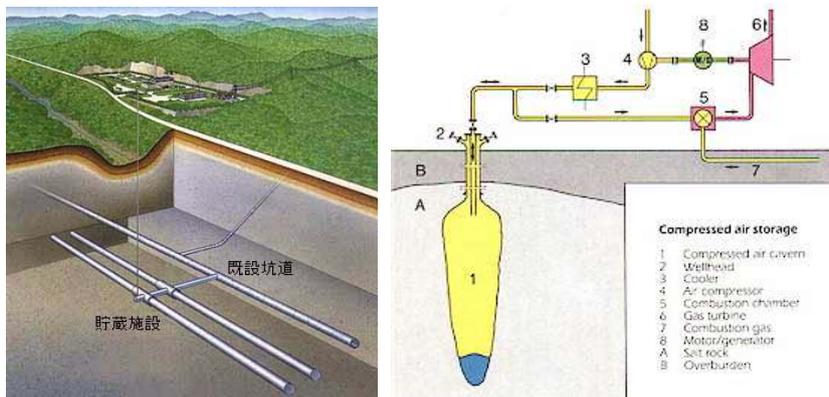


그림 1.9 일본 CAES-GT 파일럿 시험

- 심야전력을 이용하는 방식에서 풍력발전과 연계된 CAES, 압축 및 팽창 시 발생하는 열원을 이용하는 AA(Advanced Adiabatic)-CAES 및 소규모 공기압축 저장시설을 이용해 AA-CAES의 기능을 수행하는 Micro-CAES 기법이 현재 연구 및 실증단계에 있음.
- 다양한 신재생에너지원을 활용하고, 규모에 상관없이 저장시설의 분산배치가 가능하며, 압축 및 팽창 시 발생하는 열원을 이용하여 발전과 냉방 및 난방을 동시에 활용할 수 있는 Tri-Gen CAES 제안이 요구됨.

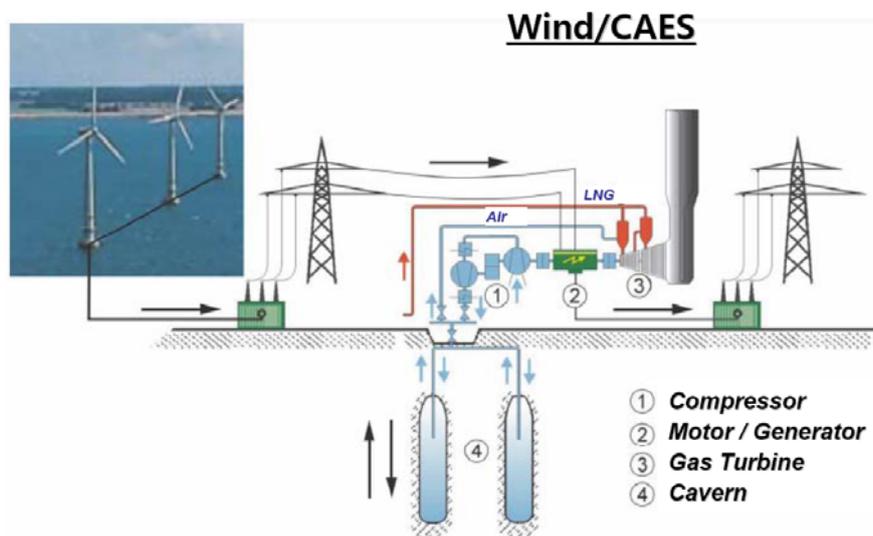


그림 1.10 풍력발전 연계 CAES

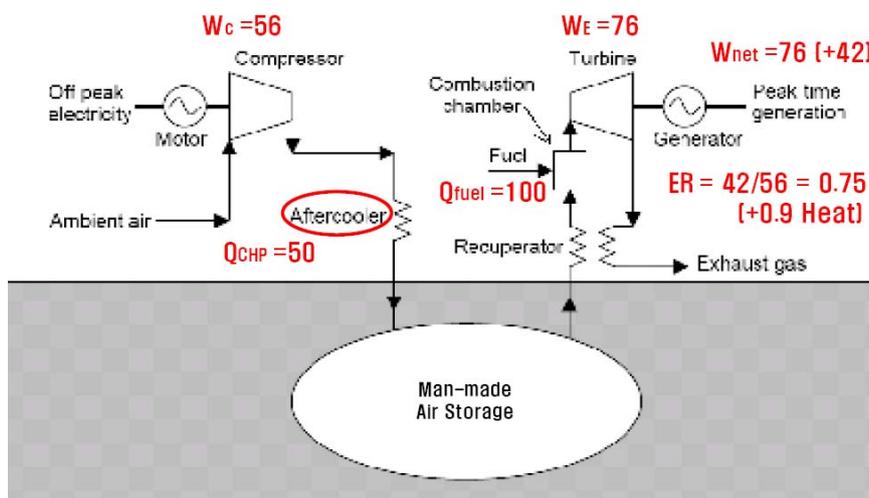


그림 1.11 Micro-CAES 개념도

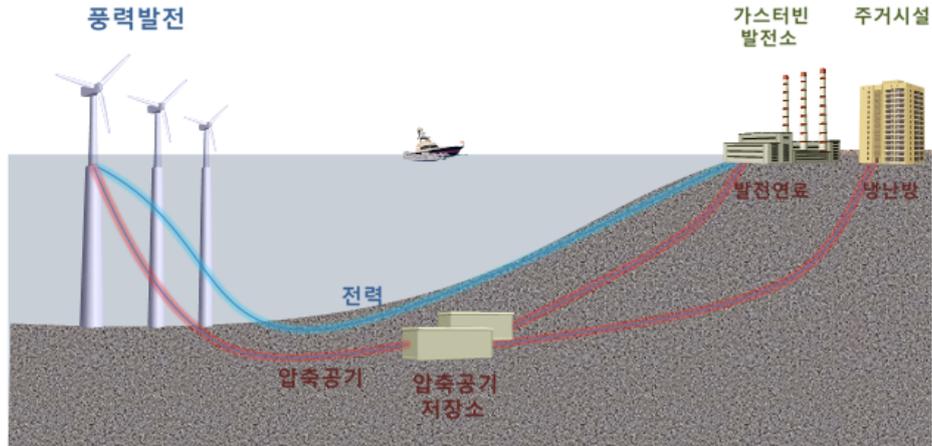


그림 1.12 Tri-Gen CAES 시스템 개략도

6. 압축공기 저장 방법

- 압축공기 저장시설의 구축방법으로는 다음과 같은 방법을 고려할 수 있다.
 - (1) 암염층을 용해하여 인공적으로 공동을 건설하는 방법
 - (2) 천연가스나 석유채취 후의 배사구조 대수층을 이용하는 방법
 - (3) 광산의 폐갱도, 천연공동을 이용하여 암반공동을 건설하는 방법
 - (4) 인공 구조물을 건설하는 방법

- 외국에서 운영 중인 독일 Huntorf 발전소와 미국 McIntosh 발전소는 암염층에 물을 넣어 용해시켜 공동을 압축공기를 저장하는 방식이나, 국내에는 암염층이 발달되어 있지 않아 적용 어려움.

- CCS의 CO₂ 저장 시 활용되는 배사구조 대수층도 국내에서 찾아보기 어려움.

- 암반공동을 이용하는 방법과 인공구조물을 건설하는 방법을 고려하여야 함.

제2절 기획 목적 및 추진방향

1. 기획 목적

『신재생에너지 발전전력의 불균질성으로 인하여 기저전력으로의 활용이 어려운 점을 해결하고, 발전 입지에 구애받지 않으며, 현재 기술로 적용 가능한 최적의 에너지 저장 시설로 평가받는 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 개발』을 위한 기획연구

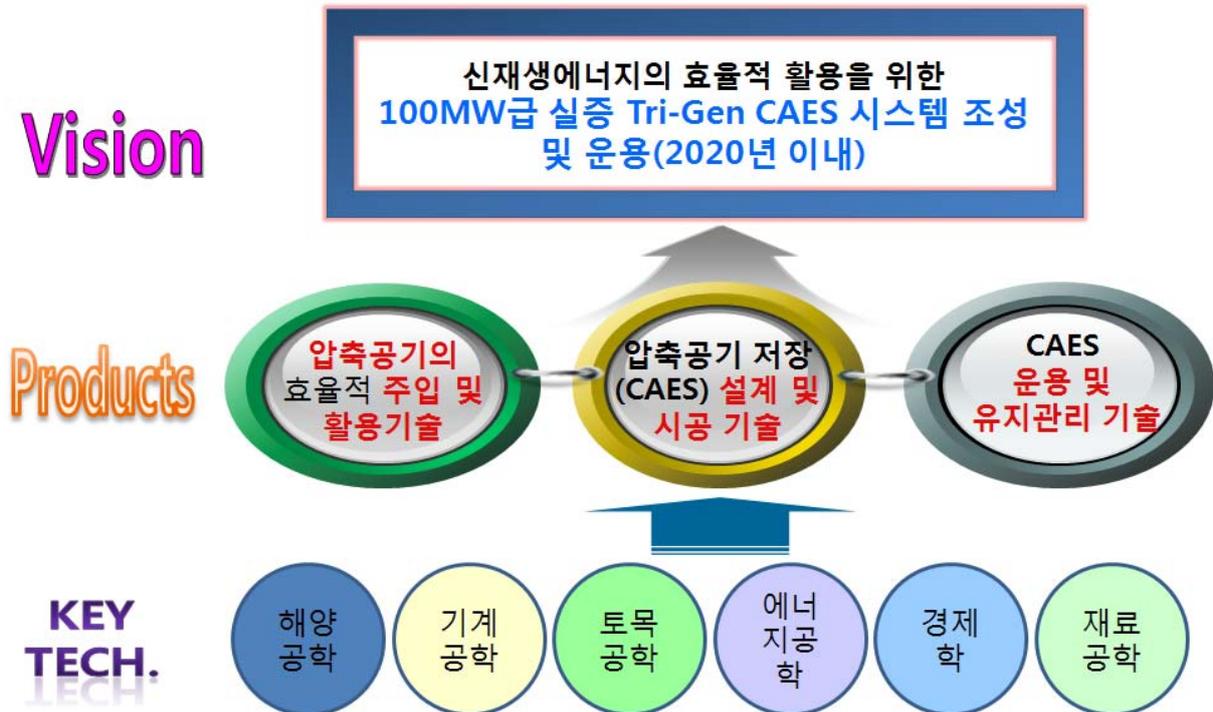


그림 1.13 연구개발 비전 및 목표

2. 추진방향

가. 기본추진전략

- 글로벌 마켓에서 경쟁력을 가질 수 있도록 기획연구의 개발 목표를 명확성과 구체성을 바탕으로 수립
- 실용화·산업화 가능 기술로서 연구개발 완료 후 국내뿐만 아니라 해외 시장수요에 선도적으로 대응할 수 있는 중점기술 개발 분야를 선정함
- 산·학·연·관 관련전문가로 구성된 국내·외 인적자원을 최대한 활용하여, 개발 기술의 산업화와 실용화를 적극 유도할 수 있는 방안 마련

- 기수행 연구개발 과제 및 실용화 기술과 연계하여 기획연구를 추진함으로써 연구개발사업의 연속성이 확보되도록 함
- 수요자 입장의 시장성 분석을 통해 연구개발 필요성 및 실용화/산업화 방안 등에 대한 세부 검토 수행

나. 추진체계

- 연구조직



그림 1.14 연구추진체계

- 연구기획위원회 및 전문자문위원회로 연구개발 추진체계를 수립하고, 산·학·연 각 분야별 외부 전문가를 최대한 활용할 수 있도록 연구조직을 구성함.
- 연구기획위원회 내 외부 기획위원 및 전문자문위원을 각 분야별로 토목/에너지/기계/전기/제어/재료/환경/경제학 등 다양한 전공자로 배치하며, 특히 산업계 비중을 높여서 실용적인 성과물 중심의 기획연구가 수행될 수 있도록 유도함.
- 연구기획위원회와 전문자문위원회의 통합적이고 유기적인 인적구성으로 최대의 성과를 얻도록 함.
- 한국해양연구원의 연구선 건조사업과 관련한 예비타당성 분석 시 활동한 전문가 및 다양한 기획사업을 수행한 전문가들을 활용하여 CAES에 대한 정책적·경제적 측면에서의 평가요소를 파악할 계획임.

○ 연구기획위원회

- 기획위원 요구조건 : 적극적 활동 가능, 전문적 지식 보유, 유기적 관계 유지
- 구성 조건
 - 연구개발 최종목표 달성을 위해 추진하고자 하는 기획연구 내용에 대한 기술적 측면과 국가정책 및 산업과의 연계성을 고려하여 연구기획위원회를 구성.
 - 연구기획위원회는 주관연구기관인 한국해양연구원 소속 참여 연구위원 그룹(11인) 및 산·학·연의 각 분야별 외부전문 연구위원 그룹(16인)으로 구성(산업계 6인, 학계 6인, 연구소 5인 등, 외부전문가 기준).
 - 내부기획위원은 연구의 전반적인 기획 및 진행, 실무 간사, 국내외 자료 조사, 핵심기술 도출 등을 담당하고 외부 기획위원은 국내·외 기술동향 파악, 세부추진과제 도출 및 기술로드맵 작성, 경제성 분석 등에 활발하게 참여할 수 있도록 함.
 - 해양에너지 연계 및 압축공기의 활용(Upstream) 분야를 비롯하여 CAES 모듈 설계/제작/시공/유지관리 등에 대한 분야까지 다양한 전공의 전문가들을 대상으로 세부 담당 역할을 구분함.

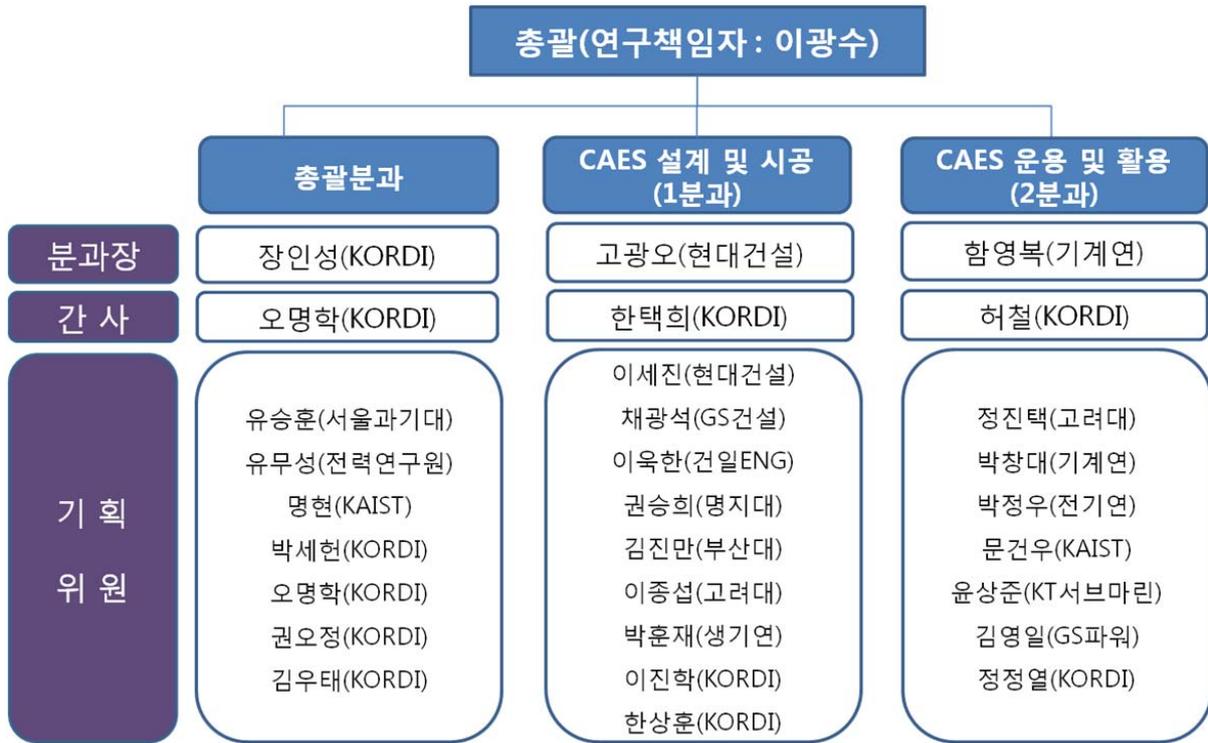
○ 전문자문위원회

- 전문자문위원 요구조건 : 기획연구 내용 전반적 검토 가능, 기획 경험 확보, 전문 분야 입지 확보, 경제성 분석에 대한 검토
- 구성 조건
 - 주관연구기관의 연구계획에 따른 연구 진행 및 연구기획위원회에서 도출된 결과에 대한 세밀한 검토를 수행.
 - 각 전공 분야별로 풍부한 경험과 지식을 가진 국내·외 산·학·연·관의 전문가 10여명 정도로 구성하고 기획연구기간 중 자문회의(1~2회)를 개최함.

표 1.3 기획위원 명단

직업군	소속	이름	전공
산업계 (6인)	현대건설	고광오	해양공학
	현대건설	이세진	지질공학
	KT서브마린	윤상준	해양공학
	건일Eng.	이육한	연안공학
	GS건설	채광석	지반공학
	GS파워	김영일	기계공학
학계 (7인)	명지대학교	권승희	콘크리트공학
	부산대학교	김진만	지반공학
	KAIST	명현	전자공학
	KAIST	문건우	전자공학
	서울과학기술대학교	유승훈	자원환경경제
	고려대학교	정진택	기계공학
	고려대학교	이종섭	지반공학
연구원 (5인)	한국전기연구원	박정우	전기공학
	한국기계연구원	박창대	기계공학
	전력연구원	유무성	토목공학
	한국기계연구원	함영복	기계공학
	한국생산기술연구원	박훈재	기계공학
내부 (11인)	한국해양연구원	이광수	해양에너지
		오명학	지반환경공학
		장인성	지반공학
		허철	기계공학
		정정열	기계공학
		이진학	구조공학
		한상훈	콘크리트공학
		한택희	구조재료
		박세헌	자원경제
		고진환	기계공학
		김우태	지반공학

다. 분과구성



라. 단계별 연구 추진 방법

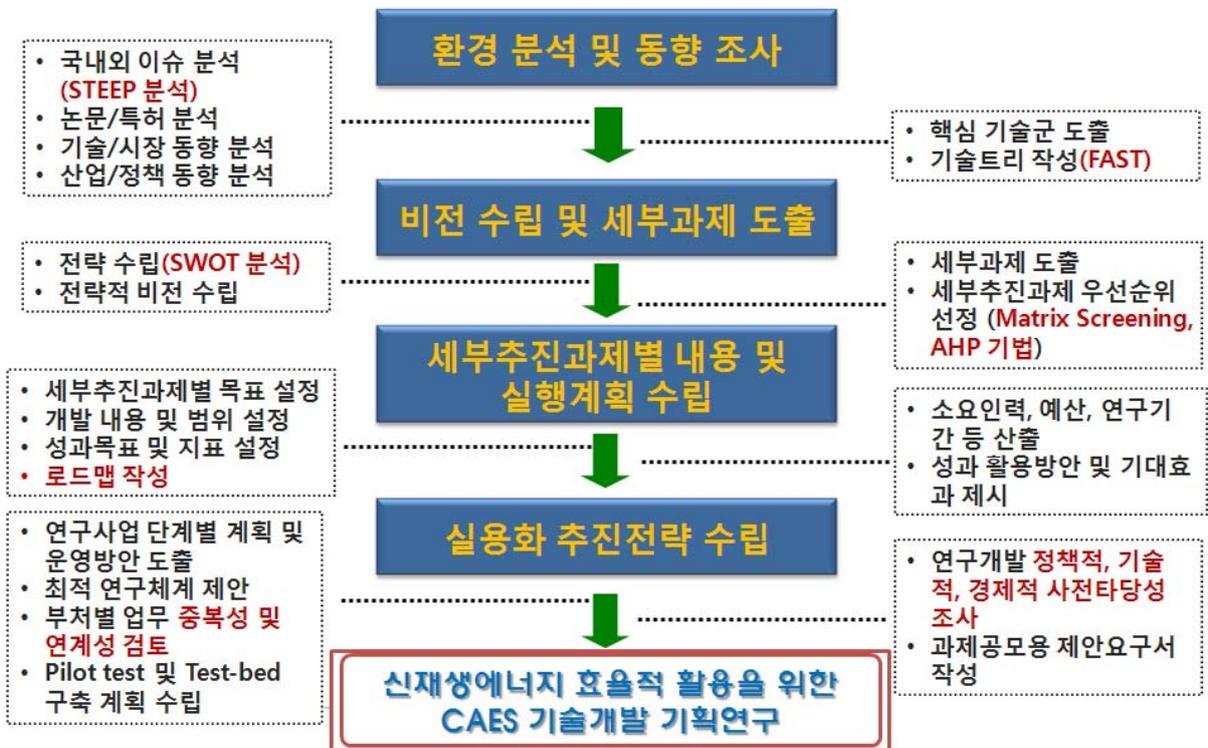


그림 1.15 연구 추진 단계

마. 기획연구의 범위

일련 번호	연구개발내용	세부추진 계획 및 방법
1	<ul style="list-style-type: none"> ■ 국내외 환경 분석 및 기술동향 조사 	<ul style="list-style-type: none"> ○ STEEP 분석을 통한 이슈 분석 및 대책 방안 검토 ○ 국가주도 기획연구 및 정책 동향 조사 ○ 국내·외 기술개발 동향 관련 기술자료 수집 ○ 문헌조사 및 특허·논문 동향 분석을 통한 국내외 기술수준 비교 분석 ○ 조사자료 분석 결과를 토대로 시장조사, 전문가 의견을 반영하여 기술개발 환경 분석(델파이 기법 활용)
2	<ul style="list-style-type: none"> ■ CAES 관련 핵심기술군 도출 및 기술분류체계 구성 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내외 환경 분석을 통한 CAES 관련 핵심 기술군 도출 ○ CAES 시스템에 대한 기술분류체계 수립 및 핵심 기술군 연계
3	<ul style="list-style-type: none"> ■ 비전 설정 및 세부추진과제 도출 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기술동향 조사 및 환경분석 결과를 토대로 SWOT 분석 수행 ○ 전문가 회의를 통한 비전 수립 ○ 비전 실현을 위한 부문별 세부과제 도출 ○ 계층분석기법(Matrix Screening, AHP) 등 객관적 평가기법을 바탕으로 기술개발 우선순위 결정 및 세부추진과제 확정
4	<ul style="list-style-type: none"> ■ 세부추진과제별 목표 및 내용/범위 설정 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비전 실현을 세부추진과제별 추진목표 설정 ○ 목표에 따른 연구범위 및 내용 설정 ○ 기존 과제와 중복성·연계성 검토 ○ 도출된 핵심과제별 기술로드맵 작성
5	<ul style="list-style-type: none"> ■ 세부추진과제별 실행계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국가 정책방향 및 전문가 의견 수렴을 통하여 핵심과제별 연구수행 예산 추정 ○ 기존 기술 및 인프라 연계방안 제시 ○ 국내·외 전문가 그룹과 협력체계 구축을 통한 연구역량 확보 방안 제시
6	<ul style="list-style-type: none"> ■ 실용화 추진전략 및 추진체계 수립 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 세부추진과제를 효율적으로 진행하기 위한 단계별 계획 및 운영방안 수립 ○ 연구사업의 성공적 추진을 위한 컨소시엄 형태의 최적 추진체계 제안 ○ 부처별 업무 중복성 및 연계성 검토 ○ 연구개발 타당성 조사
7	<ul style="list-style-type: none"> ■ 제안요구서 및 최종보고서 작성 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과제별 제안요구서 작성 ○ 기획보고서 초안 작성 및 최종 자문회의 개최 ○ 자문회의 의견을 수렴하여 최종 기획보고서 작성

제2장 기술개발 동향 및 환경분석

제1절 국내외 정책 동향분석

1. 국외 정책 동향

가. 미국

- 미국 에너지부(DOE)는 최근 스마트그리드 예산지원 프로젝트(16억달러 규모)에서 에너지저장장치에 대한 본격적인 지원을 시작한다고 발표하였으며, CAES가 이에 포함되었음.
 - 2010년 3월 미국 캘리포니아 주는 전력회사들이 2014년까지 피크 수요의 2.25%, 2020년에는 5%에 해당하는 전력 저장장치를 의무적으로 갖춰야 한다는 내용의 법안 'AB 2514'제안.
 - 첨단 중소기업들이 청정에너지 기술을 개발하고 신규고용을 창출할 수 있도록 1,800만 달러를 투자함.
 - 이 중 보조금이 지급되는 10대 기술 분야 중 하나로 첨단 가스터빈 및 물질개발(11개 프로젝트, 총 163만 달러)이 포함되어 있음.
 - New York State Electric & Gas : Watkins Glen에서 기존의 암염공동을 활용하여 150MW급 CAES 발전소 실증(2,956만\$ 지원).
 - 16개의 에너지부 전력저장 보조금은 풍력을 저장하는 데 초점을 맞추고 있으며, 캘리포니아에서 전력사업자 PG&E는 밤에 풍력터빈에서 생산된 전력을 저장할 계획을 갖고 있음(2,500만\$ 지원).

나. EU

- EU에서는 에너지 효율성을 높이고 온실가스 배출을 줄일 수 있는 규제를 지속, 확대하고 있음.
 - 에코디자인 지침대상품목을 에너지 관련제품으로 확대하는 추세임.
 - NOX 배출규제를 25ppm에서 15ppm이하로 강화하는 곳이 증가하고 있으며 CO₂배출량을 2020년까지 현재수준보다 20% 이상 감소시킬 예정임.

다. 중국

- 나노마켓 보고서에 따르면 중국 정부는 향후 10년간 자국 내의 풍력발전규모를 10배로 증가시킬 예정이며 송전망 개선계획의 일환으로 에너지저장시설의 정비에도 투자할 예정임.

2. 국내 정책 동향

- 정부의 스마트그리드 및 에너지그리드 정책에 따른 전력 및 열에너지의 효율적인 활용이 가능한 시스템을 만들기 위한 정책을 추진 중임.
 - 2030년까지 국가 단위의 스마트그리드 구축을 위해 기술개발, 사업화 및 제도 개선 등 「스마트그리드 국가로드맵」 수립(2010년 1월).
 - 전력·IT 융합 인프라의 안정적인 구축 및 융합산업의 체계적 육성·촉진을 위한 「지능형전력망법」 제정 추진(2010년 10월 국회제출).
 - 전력·통신·가전 등 168개 기업이 참여한 가운데 총 2,395억 원을 투입하여 「제주 실증단지 구축」 추진(2009년 12월 ~ 2013년 5월).
 - 스마트미터(600대), 전기차 충전기(급·완속·홈 73기), 실증운영센터 등 제주 스마트그리드 실증을 위한 인프라를 차질 없이 구축(2010년말 기준).
 - K-MEG(Korea Micro Energy Grid) 기술개발 : 총 사업비 750억원, 사업기간 3년(2011년 6월 ~ 2014년 5월)

- 한국전력에서 미래유망기술로 ‘압축공기 대용량 전력저장장치 개발’ 등 6개 (▲압축공기 대용량 전력저장장치 개발 ▲DC 전력선기반 고속 PLC 기술개발 ▲석회석을 이용한 CO₂ 포집/농축 및 심해저장기술 ▲중거리 무선전력전송 기술 ▲지상 300m 정도의 공중풍력 발전기 개발 ▲고체산화물형 고온증기전해에 의한 CO₂ 재활용 기술)의 기술 선정. 이 기술들이 앞으로 개발되면 미래 시장을 선도할 수 있을 뿐 아니라 3~5년 내 개발이 가능하고 기대수익도 1,000억 원 이상 창출할 것으로 기대.

- 심야전력제도가 있어 잉여전력을 이용한 CAES 발전은 어느 정도 경쟁력이 있었음. 그러나 최근 들어 심야전력비를 폐지하자는 주장이 설득력을 얻고 있어 이러한 추세가 바뀔 것으로 예상. IMF이후 경기회복세에 접어들고, 야간 생활패턴이 바뀌면서 심야전력이 잉여로 남는다고 보기 어려워짐. 이로 인해 연간 5,000억 원에 달하는 손실이 발생하였고, 심야전력비를 인상하였으나 적자를 메우기엔 부족한 수준. 따라서 기존 심야전력을 이용한 CAES 발전의 경쟁력을 위해서는 새로운 돌파구가 필요할 수 있음.

유형	녹색인프라	신 산업인프라	생활/안전인프라
특성			
지능와 (Portfolio #1)		가상계조 플랫폼 공동활용 인프라	지능형 산업시설 관리시스템
복합와 (Portfolio #2)		지능형 응급의료 신 산업 인프라	
		융합장소 R&D센터	
강조와 (Portfolio #3)		전기자동차기반 친환경 대중교통 연계시스템	
	100MW급 압축공기 저장 발전시스템		

그림 2.1 미래 지능형 신인프라 유형별 세부 ITEM

- 국내 신재생에너지는 대부분 시장 준비단계에 놓여있으며, 신재생에너지 산업화 촉진방안(삼성경제연구원, 2008)에서 풍력, 태양열, 지열을 시장 확대 정책을 통해 시장개화단계로 발전 가능성이 있음을 보고하고 하였음.
 - 2010년 지경부는 해상풍력을 촉진하기 위하여 해상풍력 로드맵을 발표하고 기술개발을 진행하고 있음.
 - 특히, 풍력발전은 2019년까지 세계 3대 해상풍력 강국으로 도약하기 위해 민·관 합동으로 총 9.2조원을 투자하여 서남해안에 2,500MW 규모의 대규모 해상 풍력단지의 단계적 개발을 목표로 함.
 - “해상풍력 추진 로드맵”에 의하면 우선적으로 2013년까지 부안·영광지역 해상에 100MW(5MW급 20기) 국산 해상풍력발전 실증단지를 조성한 후, 2016년까지 900MW(180기) 시범단지로 확대, 2019년까지 1,500MW(300기) 해상풍력 발전단지를 추가 건설 목표.
 - 2020년까지 국내 신재생에너지 5.9%, 2030년까지 12% 보급계획.
 - 신재생에너지 산업이 활성화될 경우, 잉여 에너지(전기)를 효과적으로 저장하기 위한 CAES, AA-CAES의 시장이 확대될 것으로 기대됨.



그림 2.2 해상풍력단지 단계별 추진안 (해상풍력 추진 로드맵)

- 2011년 5월 31일, 지식경제부에서는 “에너지저장 기술개발 및 산업화 전략(K-ESS 2020)”을 발표하여 2020년까지 에너지 저장산업 세계 3대 강국 도약, 세계시장 점유율 30%를 목표로 4대 전략과제 추진을 제시하였음
 - 에너지저장 R&D 투자확대 및 전략성 강화
 - '20년까지 6.4조원 규모의 기술 개발 및 설비 투자 추진
 - *기술개발 투자 2조원(정부 0.5조, 민간 1.5조), 설비투자 4.4조원(민간)
 - 원천기술 확보 및 글로벌 시장선도가 가능한 기술에 중점 투자하는 등 R&D의 전략성을 강화하기 위하여 시장주도형 기술 개발, 미래 신기술 개발, 국제 공동 기술개발 등 추진
 - 에너지저장 실증을 통한 산업화 촉진
 - 리튬이온전지 등 바로 상용화 가능한 기술에 대한 파일럿 실증 추진
 - 중장기적으로 변전소 확대 보급, 신재생에너지 연계 실증, 대규모 발전원 연계 실증, 주택·건물용 실증 등 추진
 - 에너지저장 산업 인프라 구축
 - 에너지저장시스템의 안전성 검증을 지원하기 위한 체계 마련
 - 기업의 수요를 기반으로 수요자 지향적 인력 양성을 지원하고, 국제 표준화 및 특허 창출도 지원
 - 국내시장 활성화를 위한 제도적 기반 조성
 - 인센티브 제공, 전력요금 개편, ESS 설치 의무화 방안 등 국내 보급 활성화를 위한 촉진 방안 마련

3. 정책동향 분석결과

- 신재생에너지 개발 분야에 정책적 지원
 - 풍력, 태양력, 지열 등 신재생에너지 이용 촉진.
 - 신재생에너지 자원 중 풍력발전의 상업성에 대한 기대가 큰 것으로 나타났으며, 대규모 단지개발에 대한 구체적인 계획이 수립되어 추진되고 있음
 - 신재생에너지 저장을 위한 CAES 기술 개발 지원 정책이 이어지고 있음.
- 기존 발전 설비의 효율적 이용 기술 분야에 정책적 지원
 - CAES 기술을 활용한 발전 효율성 향상 기술에 대한 지원이 이어지고 있음.
 - 잉여 전력의 저장을 위한 CAES 기술 개발 지원 정책이 이어지고 있음.
 - 실증적 연구를 위한 CAES Pilot test 지원
 - 안정적 전력 공급 시스템 구축 기술 지원
- 지속 가능한 발전을 위한 법률적 입법 추진
 - 전력 저장장치 의무화
 - 에코디자인 지침대상품목 확대
 - 온실가스배출 규제 강화

제2절 국내외 시장 동향분석

1. 전력에너지 시장 수요

- International Energy Outlook 2010(EIA)에서는 전 세계의 에너지별 소비량 전망에서 화석연료의 사용량 및 의존도는 향후 지속적으로 유지될 것으로 예상하였으며, 개발도상국가(중국, 러시아, 브라질 등)의 지속적인 성장에 필수적인 화석연료 사용이 전체 에너지 소비량 증가의 원인으로 분석.
 - 세계 및 국내 발전원별 전력량 전망을 비교하면, 세계 전력량 중에서 원자력이 차지하는 비율이 소폭 감소가 예상되지만, 국내의 경우에는 석탄 및 LNG가 차지하는 비중은 다소 축소되며 원자력이 차지하는 비중 증가 전망.
- 세계적으로 지구온난화에 따른 신재생에너지 확대가 뚜렷한 경향으로 나타남
- 전체 에너지소비량 대비하여 전력에너지 발생량의 증가경향 뚜렷함.
 - IT산업의 발달, 냉난방 시스템의 보급 및 개발 상용화가 예상되는 전기차로의 전환 등으로 인한 전력에너지 소비 증가 반영한 것으로 전체 에너지 소비추이에 비해 전력에너지 수요의 지속적인 증가 예상.

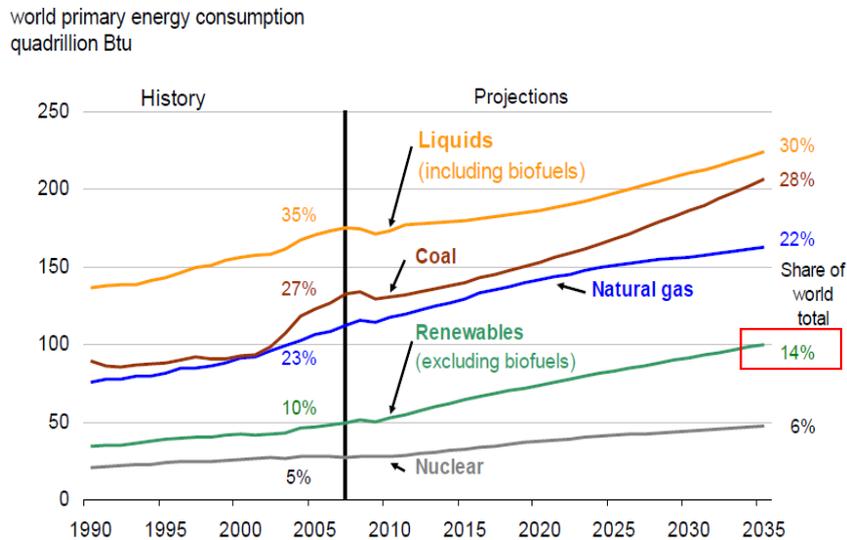


그림 2.3 세계 에너지별 소비량 전망
(International Energy Outlook 2010(EIA))

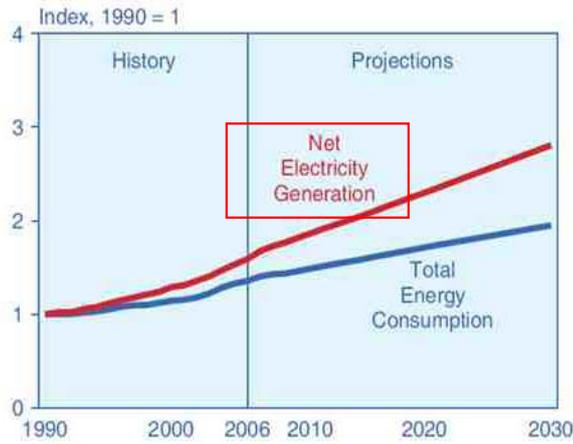


그림 2.4 전체 에너지소비량 vs. 전력에너지의 발생량 전망그림
(International Energy Outlook 2010(EIA))

- 4차 전력수급기본계획의 핵심은 기저전력부분은 원자력 중심, 첨두부하부분은 LNG 발전 중심임.
 - 발전원별 발전소의 추가 건설계획에서는 원자력 12기(1,520만kW), LNG 11기(663만kW)기, 석탄 7기(624만kW)의 건설을 계획함.
 - 첨두부하에 대응하기 위한 LNG발전의 확충 규모가 두 번째로 크다는 점으로, 첨두부하에 대응하기 위한 대응량 전력에너지 저장시스템은 상당부분 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.

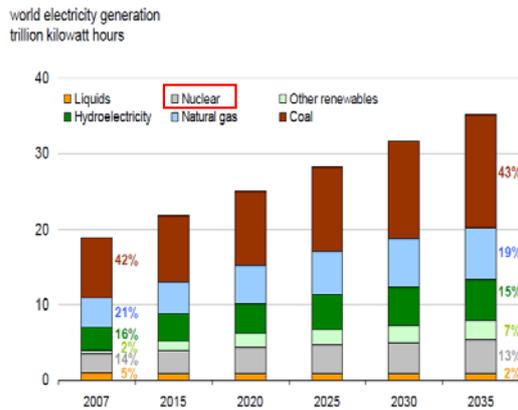


그림2.5 세계 발전원별 전력량 전망
(제4차 전력수급기본계획)

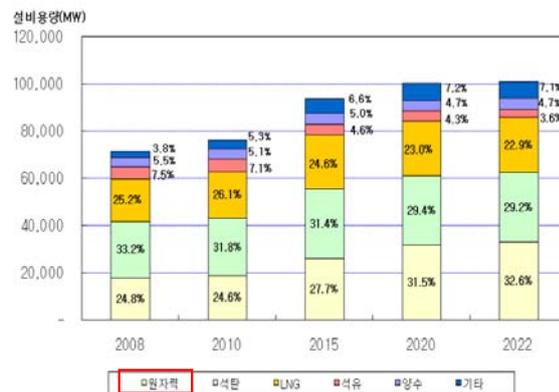


그림 2.6 국내 발전원별 전력량 전망
(제4차 전력수급기본계획)

2. 신재생에너지 시장

- 국내 에너지경제연구원에서 발표한 “제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본계획(2008)”에서 전체 에너지에서 신재생에너지가 분담하는 비중이 2020년 6.6%, 2030년 11%를 목표로 하고 있음.
 - 신재생에너지의 전력보급은 2020년까지 총 5.5G TOE, 이중 해양에너지 16.5%, 풍력 36.9% 전망.

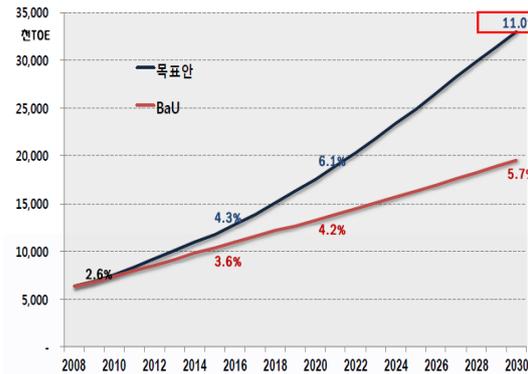


그림 2.7 신재생에너지 분담률 전망

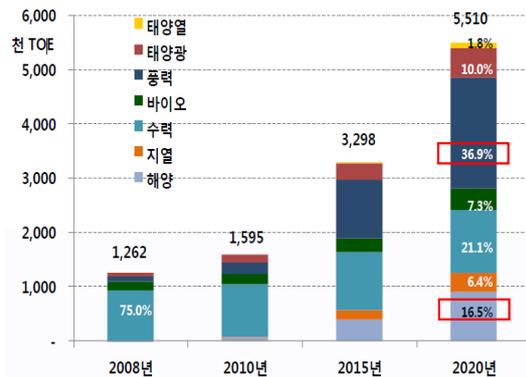


그림 2.8 전력부문 이용보급 전망

가. 해상풍력 발전

- 세계 풍력산업의 성장세는 5년간 연평균 27.3%로 세계 시장규모는 2009년에 635억 달러에서 2019년에는 1,145억 달러의 성장 예상.
 - 유럽의 경우 2008년 3월 현재 덴마크, 영국, 스웨덴, 네덜란드 등 해상에 약 600기 1,277MW 용량 발전 중이며, 2010년까지 유럽 전역에 4천MW, 2012년까지 7천MW 정도 설치 예정.



그림 2.9 유럽의 해상풍력 단지 현황

- 미국의 경우 2009년 해상풍력발전 시장진입을 위한 연구가 진행 중이며, 2006년부터 미국 국가대체에너지 연구소(NREL)에서 기술 확보 및 해상용 풍력발전기의 장기적인 원가절감 방안에 대한 평가 수행 중임.
- 국내의 경우 2013년까지 부안·영광지역 해상에 100MW(5MW급 20기) 국산 해상풍력발전 실증단지를 조성한 후, 2016년까지 900MW 시범단지로 확대, 2019년까지 1,500MW 해상풍력 발전단지를 추가 건설 목표.

나. 태양광 발전

- 세계시장은 1995년 이후 연평균 33% 이상의 급성장추세. 태양전지 생산은 2003년 730MW, 2004년 1.1GW, 2010년 15GW예상.
 - 미국은 첨단기술의 전략적 개발과 시장개척 및 상업화 목적으로 DOE 주도의 다양한 태양전지소재 및 공정에 대한 광범위한 연구를 진행.
 - 일본은 정부주도의 상용화 기술개발과 보급촉진 및 수출시장 확대 추진.
 - 유럽은 분야별 컨소시엄을 통한 기술개발 및 실증시험 등을 공동수행하고 있으며, 태양전지 모듈과 시스템의 실증시험 및 규격화 등 국가별, 공동체별 사업 수행 중, 2006년까지 독일은 2,863MW, 스페인 118MW 등 보급.
 - 국내는 1970년대 초부터 대학과 연구소를 중심으로 연구를 시작하여 1988년부터 대체에너지개발 촉진법에 따라 정부차원으로 기술개발 중임.

표 2.1 태양광분야 신재생에너지기술개발 기본계획

제 1단계(2003~2006) 보급촉진형 기술개발	제 2단계(2006~2009) 다량보급형 기술개발	제 3단계(2009~2012) 저가상품화 기술개발
<ul style="list-style-type: none"> ● 주택보급형 3kW급 시스템 개발 ● 건물, 상업용 10kW급 시스템 개발 ● 태양전지 저가화, 고신뢰성 제품 및 양산체제 확립 	<ul style="list-style-type: none"> ● 결정질 초박형 태양전지 기술개발 ● 차세대 박막 태양전지 기술개발 ● 태양전지 발전시스템 보급형 유니트화 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ● 결정질 초박형 태양전지 상용화 기술개발 ● 차세대 박막 태양전지 상품화 기술개발 ● 태양광발전시스템 보급형 패키징 상품화 기술개발

다. 파력 발전

- 2000년대 후반에 이르러 유럽 및 미국, 캐나다, 한국, 호주 등을 중심으로 대규모 파력발전 관련 연구 및 기술개발이 활발하게 진행되고 있으며, 연구개발 단계에서 사업화 단계로 발전되고 있음.

- 유럽에서는 1991년 해양에너지 분야를 신재생에너지 R&D 사업에 추가하면서 30여개 이상의 활발한 파력에너지 연구가 수행되었음.

○ 주요 파력에너지 기술개발 현황

- 2000년에 설치된 영국 WaveGen사의 LIMPET은 500kW급 고정식 진동수주형 파력발전장치로 육전에 연결된 최초의 상용발전소임.
- 영국 Ocean Power Delivery사의 Pelamis, Ocean Energy사의 AWS 등은 750kW~2MW급의 부유식 가동물체형 파력발전장치로 실험실 실험을 완료하였고, 현재 상용화를 위한 최적화 연구 수행 중임.
- 덴마크 SPOK ApS사의 Wave Dragon은 20kW급 부유 월파형 파력발전장치로 향후 4MW 규모의 상용플랜트를 설치할 계획임.
- 국내는 한국해양연구원에서 국토해양부 R&D를 통해 진동수주형(OWC) 파력에너지 개발을 위한 실증플랜트 제작, 설치 및 운용 연구 수행 중임.



그림 2.10 Pelamis(영국) 설치 전경



그림 2.11 Wave Dragon(덴마크)

라. 조류 발전

- 조류발전의 상용화는 아직 본격 실현되지 않고 있으나 조류발전용 터빈 개발을 중심으로 영국, 미국, 캐나다, 노르웨이 등에서 개발 진행 중임.
 - 영국의 Marine Current Turbines(MCT)사는 SeaGen 프로젝트를 통해 1.2MW급(2nd generation)의 조류발전설비 설치에 성공하였으며, 2012년 까지 7기의 1.5MW급(3rd gen.) 터빈을 Anglesey 해역에 설치 계획. 또한, Lunar Energy사는 1MW급 duct형 조류발전장치를 개발하여, 한국 횡간 수도에 300MW급 조류발전단지 조성에 관한 MOU를 체결함.
 - 국내의 경우, 한국해양연구원에서 2009년 전남 진도군 울돌목에 1MW급 시험 조류발전소를 준공하여, 현재 최적효율 확보를 위한 시험이 다각도로 진행 중이며, 향후 상용화 추진 중

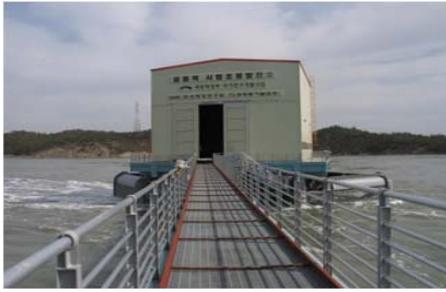


그림 2.12 울돌목 시험조류발전소

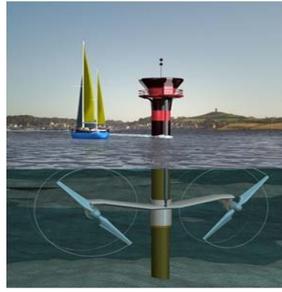


그림 2.13 MCT
조류발전

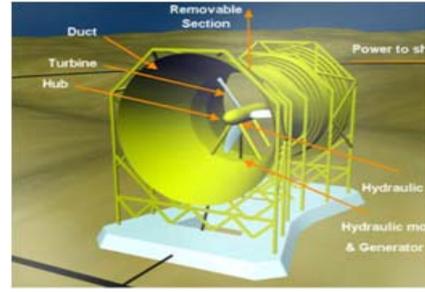


그림 2.14 Duct형 조류발전

3. 압축공기 저장기술(CAES) 시장

가. 에너지 저장기술 시장

○ 에너지 저장 기술 시장의 확대 전망

- 톰슨 로이터(Thomson Reuters)가 실시한 설문조사 결과, 2010년 벤처 캐피탈 리스트들이 꼽은 가장 매력적인 투자 아이템 중 하나로 에너지 관리 시스템과 전력 저장장치가 선정됨.
- 시장조사기관인 GTM 리서치는 현재 약 3억6,500만 달러에 불과한 전력 저장장치 시장이 2015년에는 25억 달러에 이를 것으로 전망.
- 미국 파이크리서치 조사에 의하면 에너지저장 기술의 세계 시장 규모가 2008년의 3억 2,900만 달러에서 2018년에는 41억 달러에 이를 것이라는 전망 (향후 시장규모는 풍력 발전 설비 확대에 달려 있고, 2015년 전세계 풍력발전 설비가 약 20만MW로 확장될 때 이런 전망이 현실적임)
- 나노마켓은 에너지저장시스템이 불러오는 매출의 1/3은 중국이 차지하게 될 것으로 예측.
- IEA는 오는 2050년까지 신재생에너지 비중이 46%까지 증가할 경우, 전력 생산의 변동성이 적지 않은 규모에 이를 것으로 예상.
- 2020년에는 38조원대의 CAES 관련 시장이 형성될 것으로 전망(한국지질 자원 연구원)

나. 신재생 에너지 저장기술 시장

○ 풍력발전 시장의 발달 및 압축공기저장 기술의 수요증가 예상.

- 풍력발전업계용 에너지저장기술은 2015년에 11억달러 규모의 시장으로 성장할 것으로 예측 (Energy Storage Opportunities in the Wind Power Industry, NanoMarkets, 2010)

- 서부 유럽의 경우는 풍력발전의 변동성이 5% 미만이면 현재의 시스템이 수용할 수 있지만, 5~30%에 이를 경우 필요한 전력 저장장치의 규모가 90GW에 이를 것으로 추정하고 있음.
 - 전 세계적으로는 189GW에서 305GW 수준의 전력저장장치가 요구됨.
- 국내 신재생에너지는 대부분 시장 준비단계임.
 - 신재생에너지 산업화 촉진방안(삼성경제연구원, 2008)에서 풍력, 태양열, 지열을 시장확대 정책을 통해 시장개화단계로 발전 가능성이 있음을 보고함.
 - 신재생에너지 산업이 활성화될 경우, 잉여 에너지(전기)를 효과적으로 저장하기 위한 CAES, AA-CAES의 시장이 확대될 것으로 기대됨.
 - Micro-CAES 관련 국내 시장규모는 아래와 같음.

표 2.2 국내 관련 시장 규모의 현황 및 전망

(단위: 억원)

구 분		2005년	2010년	2015년	2020년	2030년
수요	내 수	1200	1560	1920	2280	2640
	수 출	24,000	32,000	40,000	48,000	56,000
공급	국내생산	1000	-	-	-	-
	수 입	200	-	-	-	-
합 계						

*주1: 전력저장 수요는 선행적으로 증가할 것으로 예측

*주2: 2005 Business Communicatios Co. 의 2005년, 2010년 전력저장 시장 예측 인용

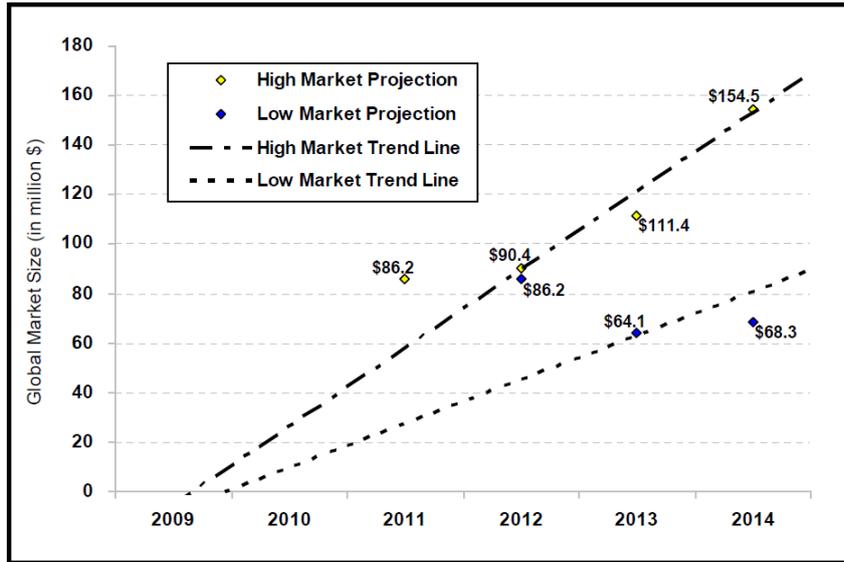
다. 압축공기 활용기술 시장

- 가스터빈, 발전기 등의 효율을 높이기 위한 압축공기 활용기술 시장 확대 예상.
 - 가스터빈은 열병합 발전용, 연료 전지용, LNG 플랜트용 등 발전 산업에 중요한 부분 중 하나로서 고효율, 소형화를 위한 연구개발 진행 중임.
 - 전 세계 터빈 시장 및 터빈 관련 제품 시장은 향후 연간 5.6%의 속도로 성장하며 2014년에는 1,350억 달러 규모에 달할 것으로 전망
 - 2010년 가스터빈의 총 생산량은 전 세계적으로 약 405억 달러이며, 이는 전년 대비 약 13%가 증가한 양임. FI(Forecast International)사에서는 전반적으로 가스터빈 산업이 2014년까지 519억 달러 규모로 성장 예상.

- 가스터빈에 내재된 힘과 효율성이 커다란 장점이기 때문에 경기가 아무리 불황이더라도 가스터빈의 생산량을 감소시키지는 못할 것이라는 전망이 지배적임.

라. 압축공기 에너지저장 시장 규모 예측

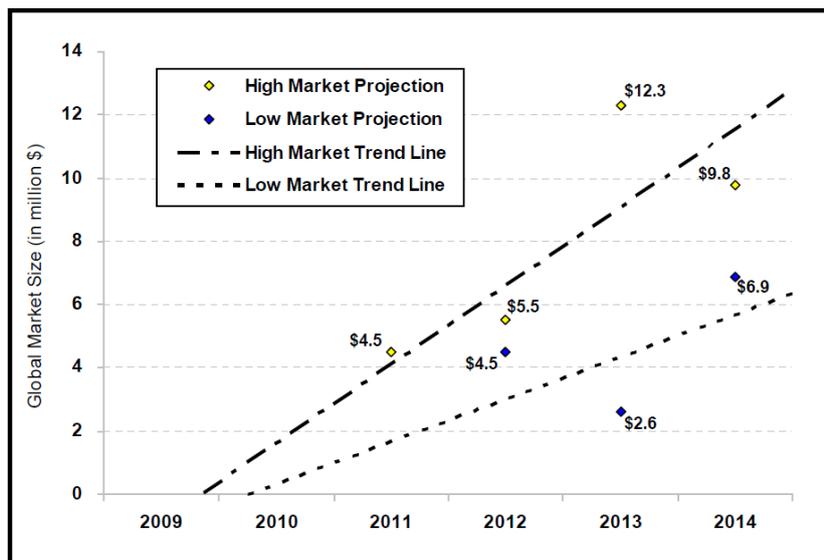
- 시장조사 기관인 SBI Energy(Specialists in Business Information)에서 실시한 조사에서 단기적 관점에서(2014년까지) 글로벌 CAES 시장은 미국과 독일에 한정될 것으로 예상하였으나, 장기적 관점에서(2015년 이후) 유럽과 아시아 지역으로 CAES 시장이 확대될 가능성이 상당히 크다고 보고하고 있다(SBI, 2010).
 - 유럽에서 기획중인 중장기 풍력 및 태양에너지 개발과 더불어 CAES는 미래시장에서 현실화될 것이다.
 - 중국의 풍력 및 태양에너지 개발은 미래의 그리드 에너지저장 기능을 가속화할 것이다.
 - CAES 자본비용의 감소와 CAES 터보기계 제조업체의 시장참여 증가는 CAES 시장을 개발도상국까지 확대시킬 것이다.
- SBI에서 실시한 시장조사는 CAES 프로젝트를 기준으로 실시되었으며, CAES 시장을 압축기술시장, 저장기술시장, 팽창/발전기술시장으로 분류하여 고전망(High Projection)과 저전망(Low Projection) 사이의 시장규모를 예측하였다.
 - 고전망 예측은 전세계적으로 계획중인 11개의 CAES 프로젝트가 2014년까지는 건설이 시작되는 것을 가정으로 하고 있으며, 전력소비량이 세계 경제 침체 이전인 2007년 수준으로 회복되는 것을 가정하고 있다.
 - 그리고, 저전망 예측은 세계경제 침체 이전(2007년) 수준의 전력소비량이 2013년 이후에도 회복되지 않는 최저한계를 가정하고 있으며, 사기업 주도의 CAES 프로젝트가 지연 또는 연기되는 것을 가정하고 있다.
- SBI는 아래 그림과 같이 2014년까지의 압축기술시장 규모를 예측하였으며, 고전망 예측이 가능할 경우 2014년 압축기술시장은 약 1억5천만 달러를 초과할 것이며, 저전망 예측의 경우 약 6천8백만 달러의 최저한계 시장규모를 형성할 것으로 예측하였다.



Source: Calculated and estimated by SBI.

그림 2.15 CAES Compression Subsystem Market Size (2009-2014) (in million \$)

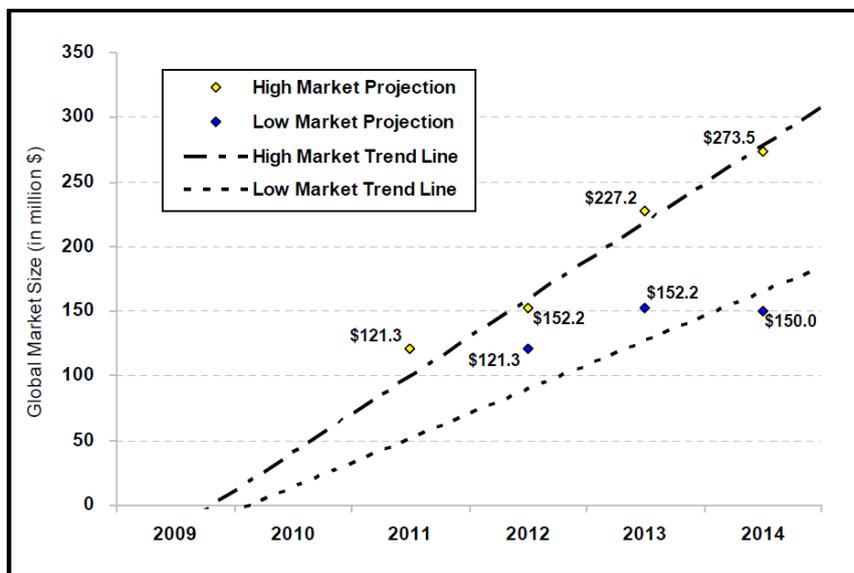
- SBI는 아래 그림과 같이 2014년까지의 저장기술시장 규모를 예측하였으며, 저장기술시장은 압축기술시장 규모 및 팽창/발전시장 규모와 비교하여 낮은 수준이지만 요구되는 에너지 저장량이 증가될수록 저장기술시장 규모는 증가될 것으로 예측하고 있다.
 - 또한, 계획중인 CAES 프로젝트는 기존의 지중저장기술을 기반으로 하고 있으나 SBI는 저장기술시장을 예상 밖의 개발 비용이 발생하는 참신한 압축공기저장 시스템이 요구되는 시장으로 분류하고 있다.



Source: Calculated and estimated by SBI.

그림 2.16 CAES Storage Subsystem Market Size (2009-2014) (in million \$)

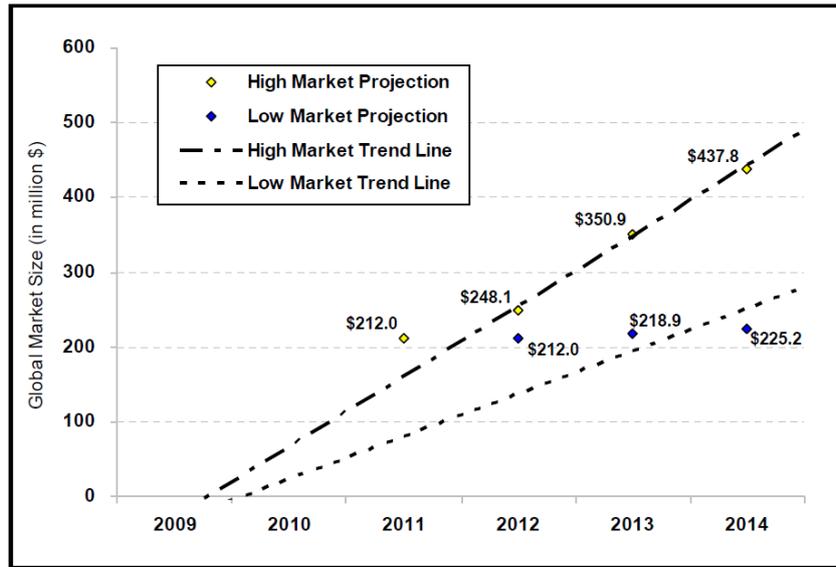
- SBI는 아래 그림과 같이 2014년까지의 팽창/발전기술시장 규모를 예측하였으며, 팽창기 및 발전터빈등 주요 요소제품을 포함하는 팽창/발전기술시장은 전체 CAES 시장에서 60% 이상의 점유율을 차지할 것으로 예측하였다.
 - 고전망 예측이 가능한 경우 300MW이상의 대용량 CAES 프로젝트의 영향으로 팽창/발전기술시장의 규모는 안정적인 성장을 보일 것으로 예측하고 있으며, 대용량 CAES 프로젝트는 전력시장의 잠재력에 투자를 하는 민자전력사업자와 안정적인 전력 생산을 추구하는 풍력개발자에 의해 추진될 것으로 예상하였다..
 - 저전망 예측의 경우 CAES 프로젝트의 지연과 취소 가능성의 영향으로 예상되는 팽창/발전기술시장 규모의 편차가 증가되지만 CAES 시장에서 차지하는 비중은 클 것으로 예측하였다.



Source: Calculated and estimated by SBI.

그림 2.17 CAES Expansion/Generation Subsystem Market Size (2009-2014)
(in million \$)

- CAES 프로젝트의 변동성에도 불구하고 SBI는 아래 그림과 같이 CAES 시장은 장기적 성장가능성이 크며, 민자전력사업자의 추가적 투자와 CAES 응용시장을 통해 장기적으로 지속가능한 성장이 가능할 것으로 예측하였다.
 - CAES 시장에 대한 고전망 총누적 값은 약 10억2천5백만 달러이며, 저전망 총누적 값은 약 6억5천만6백만 달러로 같은 기간동안 고전망 치의 반을 조금 넘는다.
 - 전체적으로 2014년까지 CAES 단기 시장은 초기 개발단계에 있을 것이며, 정부 투자를 받는 프로젝트를 통해 형성될 것으로 SBI는 예상하고 있으며, CAES 시장과 다른 시장에 대한 더 많은 민자 발전 개발자의 참여가 2014년 이후 장기 CAES 시장의 변화를 가져올 것으로 예상하였다.



Source: Calculated and estimated by SBI.

그림 2.18 Total CAES System Market Size (2009-2014) (in million \$)

- 향후 고전망이 가능한 시장조건이 형성될 경우, 미국, 유럽, 중국에서 CAES관련 기술의 급속한 성장과 시장의 확대가 예상되며, 우리나라는 기술도입을 통한 국내기술의 선진화와 응용기술 개발을 통한 시장개척으로 활로를 찾아야 될 것으로 판단된다.
- 반면에, 저전망이 가능한 시장조건이 형성되는 경우, CAES 관련기술은 미국과 독일의 시장에 한정되어 CAES 시장의 성장이 둔화될 수 있다. 그러나, 신재생에너지 시장이 국가의 정책을 기반으로 성장하고 있으며, 신재생발전 전력의 생산 가변성으로 에너지저장기술은 여전히 정책적 기술개발 요소로 평가될 수 있으므로 정부주도의 연구개발 시장이 전개될 것으로 판단된다. 따라서, 우리나라는 적극적인 R&D 사업으로 신재생발전전력의 안정화와 CAES 기술시장 선점을 목표로 시장을 개척해야될 것으로 판단된다.

4. 시장동향 종합분석

- ‘신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술’시장은 전체적인 에너지 시장의 추이와 신재생 에너지 개발 시장과 연관되어 있으며, 에너지 시장의 확대와 신재생에너지 개발의 발달은 압축공기 저장기술의 시장 수요의 증가를 수반할 것으로 예상된다.
 - 에너지 수요 중 전력에너지의 수요의 지속적 증가
 - 지구온난화 및 에너지 수급 정책에 의한 신재생에너지 수요의 뚜렷한 증가
 - 전력수급의 안정성과, 효율성의 향상을 위한 에너지 저장시설 수요의 증가

- 해상풍력 개발의 가속화 예상
 - 유럽의 경우 2008년 3월 현재 덴마크, 영국, 스웨덴, 네덜란드 등 해상에 약 600기 1,277MW 용량 발전 중이며, 2010년까지 유럽 전역에 4천MW, 2012년까지 7천MW 정도 설치 예정.
 - 미국의 경우 2009년 해상풍력발전 시장진입을 위한 연구가 진행 중이며, 2006년부터 미국 국가대체에너지 연구소(NREL)에서 기술 확보 및 해상용 풍력발전기의 장기적인 원가절감 방안에 대한 평가 수행 중임.
 - 국내의 경우 2013년까지 부안·영광지역 해상에 100MW(5MW급 20기) 국산 해상풍력발전 실증단지를 조성한 후, 2016년까지 900MW 시범단지로 확대, 2019년까지 1,500MW 해상풍력 발전단지를 추가 건설 목표.

- 에너지 저장시설의 수요 증가에 따른 관계기술 연구개발의 필요성 증가
 - 압축공기 저장시설 설계 및 시공 기술
 - 공기 압축 및 팽창 기술
 - 압축열 에너지 이용 기술
 - 압축공기를 활용한 발전기술
 - 전력 시스템 연계 기술
 - 저장 시설 유지관리 기술

제3절 국내외 기술 동향분석

1. 전력에너지 시스템 기술

- 현재 Smart Grid가 세계적인 이슈로서 미국의 경우 에너지안보, 노후 전력망 현대화를 통한 경기부양을 목표로 에너지부(DOE, 2009)에서 Smart Grid 및 CAES를 포함한 에너지저장장치 분야에 16억 달러를 투자할 계획이며, 일본의 경우도 태양광 발전의 계통연계 및 마이크로그리드에 초점을 맞추어 일본 및 해외실증사업에 참여중인 상황임.
- Tri-Gen 시스템과 Thermal Grid 시스템
 - Tri-Gen 시스템은 전기, 냉방, 난방을 동시에 공급하는 종합 하이브리드 에너지 시스템임
 - 최근 스마트그리드의 뛰어난 에너지 이동성과 써멀그리드의 뛰어난 에너지저장성을 Tri-Gen 시스템에 적용해 에너지 효율향상을 실현하고 신재생에너지의 생산-수송-변환-통합제어에 활용하는 하이브리드 에너지그리드(Hybrid Energy Grid)시스템'제안
 - 저장성이 뛰어난 열에너지의 써멀그리드(Thermal Grid) 기본 개념은 신재생에너지 하베스팅/수송 및 IT기반 에너지 관리원천기술 적용, 고효율 신재생에너지 클라우드 원천기술 적용, 고효율 에너지 멀티미디어 통신기술 활용 등임

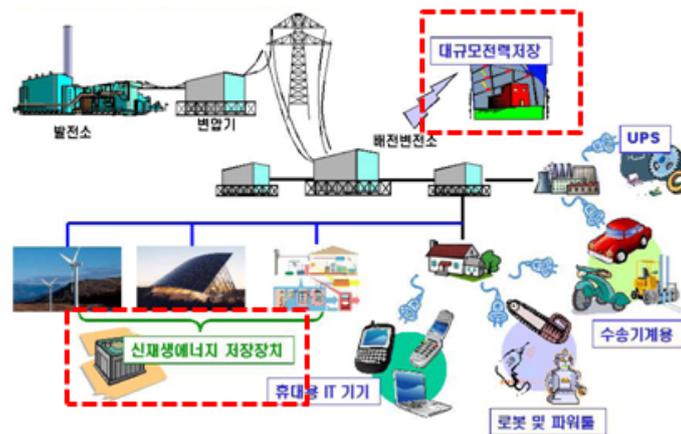


그림 2.19 스마트 그리드 시스템 개념도

- 2000년대 초반부터 유럽, 미국을 중심으로 기존 에너지원(화력, 원자력 등) 및 풍력 등 신재생에너지를 저장하는 하기 위한 방법으로 연구 시작

- ALSTOM Power Technology Centre(영국)은 EU의 지원(EU contract: ENK6 CT-2002-00611)을 받아 풍력에너지를 저장하는 방법으로 CAES, AA-CAES의 경제성 및 사이클 분석, 압축기, 열저장소, 터빈 등에 대한 사항 및 개발 가능분야를 분석하였음. CAES를 이용하여 기존 전력시스템을 아래와 같이 개선할 수 있을 것으로 보고.
 - 전력사용량의 변동 : 잉여 전력을 압축공기로 저장하여 전력사용량이 많은 시간에 전력공급 가능
 - 연료가격 변화에 따른 전력공급가의 변동 : 기존의 화력발전보다 1/3-1/2의 연료만 필요로 함으로써 전력단가의 변동이 적음.
 - 전력생산량이 일정하지 않은 재생에너지 : 필요한 전력만 사용하고 잉여 전력은 압축공기로 저장 후, 전력사용량이 많은 시간에 전력공급 가능
 - 전력수송의 복잡성 : 에너지 그리드 형태의 전력공급시스템을 구축할 수 있음으로써 전력수송을 최소화할 수 있음.
 - Pearl Street Inc.(미국)은 미국 내 전기의 대량생산 및 효과적인 분배와 저장에 대한 분석을 내 놓았으며, 시대의 변화에 따른 전기의 생산, 배분 및 저장의 필요성을 경제적인 측면에서 분석하였음.
 - 다양한 에너지방법 중, CAES, AA-CAES가 경제적이며 시대적 요구를 반영할 수 있을 것으로 분석되며 에너지시장에서 큰 효과를 거둘 것으로 예상됨.
- 기존 에너지 저장 기술 중 양수발전은 현재 입지제한, 비경제성 및 환경문제 등의 영향으로 추가건설이 어려운 상황에서, kW당 저장단가가 축전지 등에 비해 낮으며 에너지 관리 및 적용이 수월한 CAES 기술에 초점
- 대용량 전력저장시스템으로서 CAES는 여타 전력저장기술과 비교 시 충분한 경쟁력을 갖춘 것으로 평가되었으며 신재생에너지 및 스마트그리드와 연계시 단순한 에너지저장, 공급의 역할 뿐만이 아니라 에너지원간 수급을 조절하는 핵심적인 허브의 역할 기대
- 정부 및 지자체 중심으로 추진 중에 있는 풍력단지과 연계한 신재생 그린 에너지 파크 시범 사업을 제안할 수 있으며, 동시에 신·재생에너지 및 스마트그리드 사업과 융합한 압축공기에너지저장 기술은 국가 전력 기반 시설확충 및 저탄소 녹색성장 구현에 기여할 것으로 기대

2. 압축공기 에너지 저장 기술(CAES)

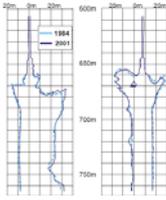
- 대형 전력 저장장치로 CAES(Compressed air energy storage)는 폐광, 대수층(aquifer), 암염 채굴이 끝난 지하에 공기를 압축했다가 필요할 때 전기를 만드는 방식임. 최근 압축 공기를 땅속이 아닌 해양에 저장하는 방법도 등장. 영국 노팅엄 대학의 가비(Garvey) 교수는 풍선처럼 생긴 에너지 백에 공기를 담아 해양에 넣어 두는 방법 제시. 깊은 바다에 설치하는 부유식 해상풍력단지 등에서 사용할 수 있을 전망이다.
- 전력에너지 저장의 저장용량 및 경제성 분석(일본 NEDO 및 ICREPQ, 2008)에 의하면 100MW 이상의 대규모 에너지 저장이 가능한 장치로서 압축공기에너지 저장(CAES), 양수발전(PHS), 수소저장(Hydrogen)이 있으며, 경제성분석 결과에서 압축공기에너지저장이 양수발전이나 수소저장에 비해 경제성이 있는 것으로 조사됨.

표 2.3 각 전력에너지 저장시설 별 특성 비교

Characteristics	Technology			
	Pumping Hydro	Batteries	CAES	Hyd. fuel cells
Power(MW)	100~3,000	<100	100~3,000	<50
Energy(MWh)	<10,000	<500	50~5,000	-
Charge-disch. Effic.	80%	50~90%	75%	20~36%
Life-time(Cycle)	40 years	103~104	30 years	104 hours
Price(€ /kWh)	35~70	70~4,000	10~70	-

* Ref : "An Overview on Short and Long-term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications" presented in ICREPQ 2008

- 대용량 전력저장용 압축공기에너지 저장시스템의 상용화는 1978년에 건설된 독일 Huntorf의 290MW급 발전소와 1991년에 건설된 미국 Alabama의 McIntosh에 있는 AEC(Alabama Electric Corporation)의 110MW급 발전소가 있으며, 두 곳 모두 20년 이상 안정적인 전력공급이 이루어지고 있음.
- 대용량 전력저장의 필요성 제고와 함께 저탄소 녹색성장의 중심이 신재생에너지와 스마트그리드의 등장으로 압축공기에너지저장 시스템에 대한 관심이 증대되고 있으며, 이에 해외 선진국에서는 다양한 CAES 관련 연구가 수행되고 있음.



- 최대출력 : 290,000 kW
- 운전 개시년도 : 1978년
- 운영 Cycle : 일간(Daily)
- 일일 발전시간 : 2 hr/day
- 일일 저장시간 : 8 hr/day
- 압축공기 저장방식 : 암염공동형 **변압식**
- 압축공기 저장공용 : 300,000 m³
- Heat Rate : 5,500 Btu/kWh
- Energy Ratio (kWh_{in}/kWh_{out}) : 0.83
- 특징 : 주 2~3회 무인 자동운전



그림 2.20 독일 Huntorf CAES발전소

미국 McIntosh plant

- 최대출력 : 110,000 kW
- 운전 개시년도 : 1991년
- 운영 Cycle : 주간(Weekly)
- 저장능력 : 2,600,000 kWh
- 압축공기 저장방식 : 암염공동형 **변압식**
- 압축공기 저장공용 : 538,000 m³
- 연료 : 천연가스(Primary), 연료유(Back-Up)
- Heat Rate : 4,100~4,500 Btu/kWh
- Energy Ratio (kWh_{in}/kWh_{out}) : 0.69
- 건설단가 : \$595/kW
- 발전단가 : 2.7~3.0 cents/kWh
- 특징 : 열회수기(Recuperator) 설치로 효율 향상

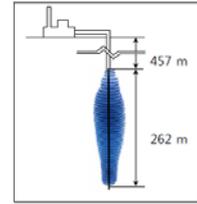


그림 2.21 미국 McIntosh CAES발전소

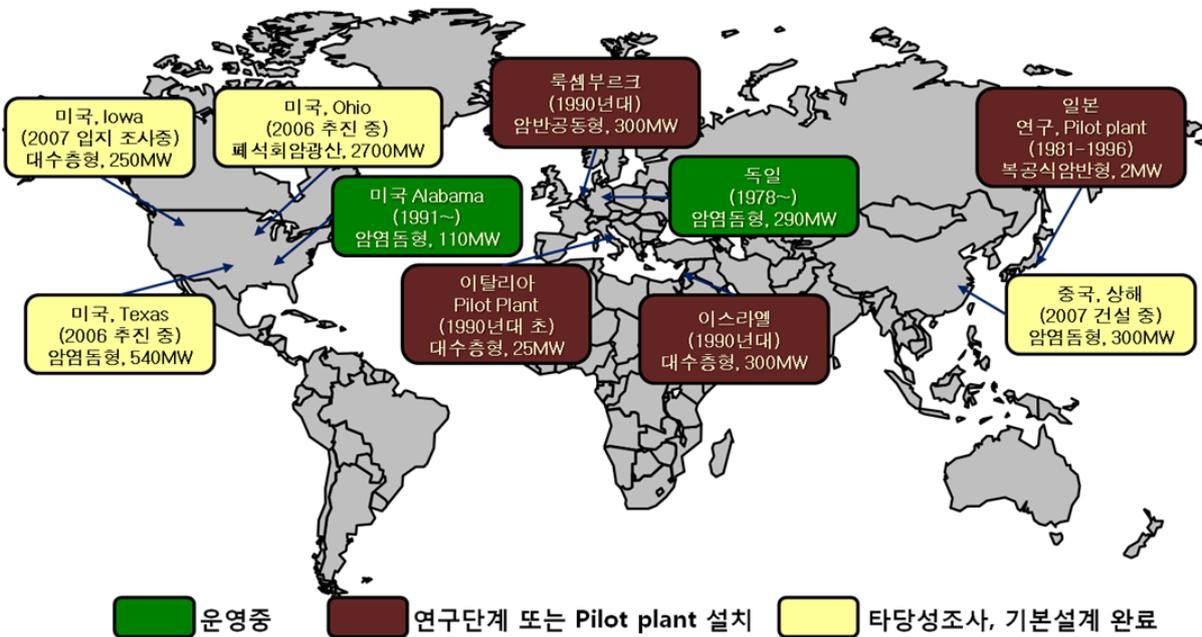


그림 2.22 전 세계 CAES 운영 및 개발 현황 (지식경제부, 2009)

- 미국 DOE산하의 Smart Grid 프로젝트에서 CAES 지원
 - New York State Electric & Gas : Watkins Glen에서 기존의 암염공동을 활용하여 150MW급 CAES 발전소 실증(2,956만\$ 지원)
 - PG&E사 : 캘리포니아 Bakersfield의 saline porous rock formation을 활용하여 300MW급 CAES 지하발전소 건설의 설계, 신뢰성 검증(2,500만\$)
- 미국 Iowa 전력협회(IAMU, Iowa Association of Municipal Utilities)는 풍력 발전과 압축공기에너지저장(CAES)을 결합시키는 ISEP(Iowa Stored Energy Plant) 프로젝트 착수. Iowa에 흩어져 있는 75MW의 풍력 발전설비를 이용하며, 풍력에서 발생한 전기로 공기를 압축시켜 지하 1KM 깊이의 대수층에 집어넣는 계획임.

- 미국 시리우스 익스플로레이션사는 최근 풍력에 의한 전기로 동굴에 압축공기를 저장한 다음, 바람이 불지 않을 때 이를 방출하여 풍력발전터빈을 돌려 전기를 생산하는 프로젝트를 진행 중임.
- 일본의 경우, 북해도에서 기존 광산의 사갱과 갱도를 이용하여 저장시설을 건설하였으며, 복공식 암반공동 방식을 활용하였음. 압축공기 저장 공동의 면적은 1,600m³이며, 발전 용량은 2MW급으로 2001년도에 시험운전.



그림 2.23 Iowa Stored Energy Plant



그림 2.24 ISEP Concept

- DNV에서는 해상풍력시설에서 생산되는 전기를 활용하여 공기를 압축하는 해상플랫폼 시스템을 구상하고 미래의 혁신기술로 예상하고 있으며, 풍력터빈 낫셀에서 기존 발전기나 전기장치 대신 압축기를 설치하여 공기를 압축하는 방식도 가능할 것으로 구상한 바 있음.
- 영국의 Nottingham 대학에서는 해상풍력이나 조류, 파력에너지를 압축공기 형태로 수중에 저장하는 기법에 대해 구상하고, 기초연구를 수행하고 있으며, 캐나다의 Hydrostor 에서는 수심 80m이상의 조건에서 활용할 수 있는 Balloon 형태의 수중 저장장치에 대해 계획을 수립하는 등 수중저장기법은 현재 기획단계에 있음.
- 국내의 경우 현재까지 지하 암반 내 압축공기 저장 기술을 사용한 사례는 없으나, 2009년 지식경제부의 지원으로 한국지질자원연구원에서 지하 암반 내 복공식 에너지저장시스템 개발 연구를 수행함.
 - 암석의 물리적, 역학적 특성은 지하공동의 굴착이나 설계 및 안정성 평가에 있어서 가장 기본적이면서 중요한 요소임. 한국자원연구소에서는 대상 부지를 선정하여 지하공동 설계를 위한 변수에 대한 연구를 진행함.
 - 암반의 투수성, 초기지압, 절리 특성 및 절리 구조도 분석, 암반평가 실시

- 공동간격결정을 위한 2차원 해석, 수갱 주위 안정성 분석을 위한 3차원 해석 등이 이루어짐.
- 지하 500m 심도, 폭 14m, 높이 22m, 길이 180m인 4개의 공동이 병렬로 배치되며 각 공동간의 간격은 46m, 압축공기의 저장압력은 50bar를 적용한 CAES 지하저장 공동을 대상으로 FLAC-2D code를 이용하여 동역학적 수치해석을 수행
- 압축공기를 2개의 저장수를 내포하는 저장소에 보관함하고 수압펌프를 이용하여 저장수를 강제 이송함으로써 압축기와 터빈의 효율을 극대화할 수 있음.
- 에너지 및 엑서지를 해석을 통하여, 준등온 압축, 팽창공정이 단열공정 보다 더 효과적인 것으로 평가.
- 에너지 및 엑서지 효율을 높이기 위해서는 압축과 팽창 공정 시 중간냉각 (압축시)와 재가열(팽창) 공정 필요함..
- 강원도 정선 지역에 실증 실험을 위한 파일럿 플랜트 건설에 착수했으며 오는 2011년 4월 완공 예정
- CAES의 경제성과 효율성을 입증하는 기준인 100MW급 지하 저장소를 건설, 시범테스트를 거쳐 향후 5년 내 각 가정에 전력 공급을 목표로 함.



그림 2.25 한국지질자원연구원의 CAES 파일럿 플랜트

- SK 건설에서는 서울화력발전소를 CAES 부지로 선정하고, 이 부지를 대상으로 350MW급 암반공동형 정압식 CAES의 개념설계 실시
 - 석유 비축기지 시설 경험을 바탕으로 SK건설이 1998년 CAES 예비타당성 조사연구를 수행한 바 있음.
 - 정압식 고압기체 저장용 지하저장구조(2000)에 관한 특허 등록

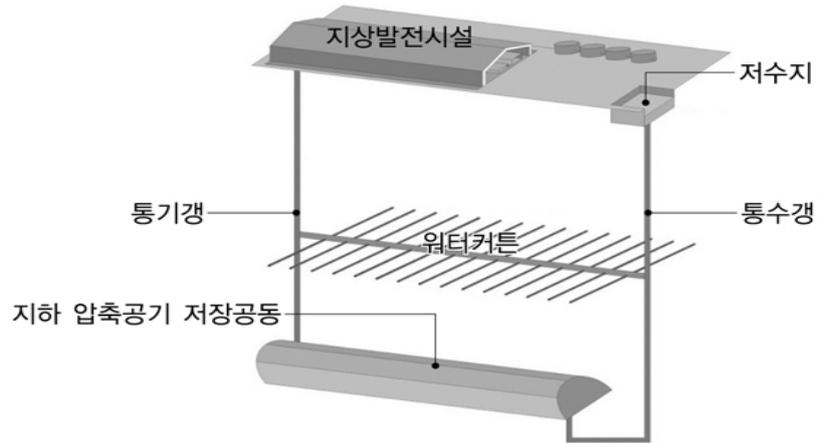


그림 2.26 지하 압축공기저장 발전시스템의 개념도, SK 건설

- 한국해양연구원에서는 이산화탄소 해양지중저장 연구를 수행하고 있으며 이와 관련한 제반 공정설계 및 안전설비 시스템 연구 중
 - 해양 퇴적층을 대상으로 한 연간 100만톤급 이상의 이산화탄소 지중저장 후보지 탐색 및 평가
 - 이산화탄소의 수송, 주입 및 저장 시스템 공정설계 연구
 - 대용량 다단 압축, 냉각, 정제 및 액화 시스템 설계 연구
 - 이산화탄소 열사이클 시뮬레이션 및 열에너지 활용방안 연구
 - 대용량 이산화탄소 파이프라인 수송시스템 및 액화 수송선박 연구
 - 수송 및 저장지로부터의 이산화탄소 유출방지 연구
 - 이산화탄소 지중저장과 관련한 해양환경관리체계 구축 및 법/제도 기반 연구
- 2009년 11월 기계연구원에서 압축공기에너지저장(CAES) 기술설명회가 개최되었으며, “CAES 기술연구회의 취지 및 향후 사업 추진 계획”이 논의되었음.

3. 압축공기 활용 발전 기술

가. CAES 발전

- CAES 발전은 압축과 팽창을 시간적으로 분리함으로써 보통 가스터빈과 비교하여 2~3배의 발전전력을 얻음으로서 설비 건설단가를 대폭적으로 절감할 수 있지만, 압축공기의 저장과 관련한 추가비용이 큰 비중을 차지함.
 - CAES 발전은 보통 가스터빈과는 달리 압력비가 높아 일단으로 단일압축 시에는 압축공기의 온도가 매우 높아지므로 (압력비가 50일 경우 600℃ 이상이 됨)

압축 후 저장과정에서 에너지 손실이 크게 발생하게 됨. 따라서 압축 시에는 중간냉각을 위해 다단으로 압축하고 팽창 시에는 재열을 위해 다단으로 팽창하는 것이 일반적임.

- 압축과정 중 압축공기 공간내로 물을 직접 분사하여 냉각하는 다단 왕복동 형 및 스크롤형 압축기/팽창기 등의 용적형이나 다단 터보형 압축기/ 팽창기를 통하여 등온 압축 및 팽창을 함.
- 고압 다단 압축기 및 팽창기의 설계 및 해석기술이 필요함.
- 압력비가 매우 높으므로 현재의 압축과 팽창이 분리된 마이크로 가스터빈 을 그대로 사용할 수는 없고 운전특성에 맞게 새롭게 설계 제작되어야 함.
- 최근 개발되고 있는 마이크로 가스터빈의 저공해 연소기술이 적용될 수 있으며, 바이오 연료 등 다양한 연료를 사용하기 위해서는 외연방식의 연소기도 동시에 개발될 필요성이 있음.
- 고온용 재생열교환기는 CAES 발전 시스템 효율에 매우 중요한 영향을 미치는 부품이지만 재료 내열성 및 내구성 등의 문제로 아직 국산화가 되지 않음.

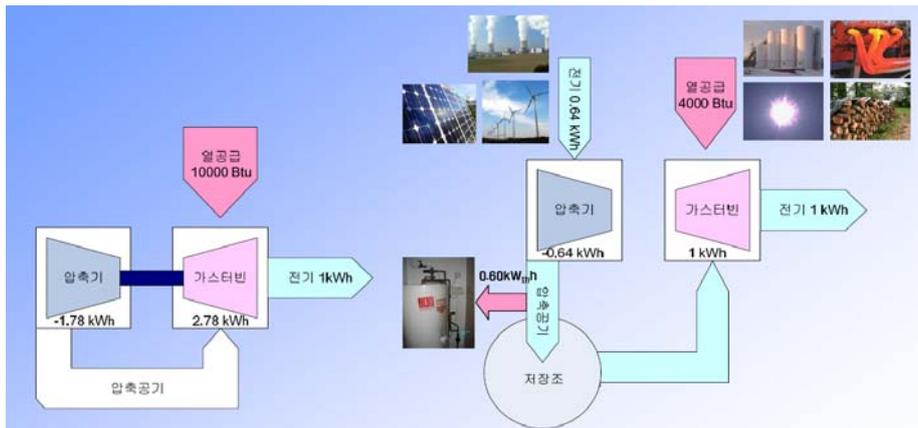


그림 2.27 기존 가스터빈 발전방식과 CAES 발전 방식과의 비교

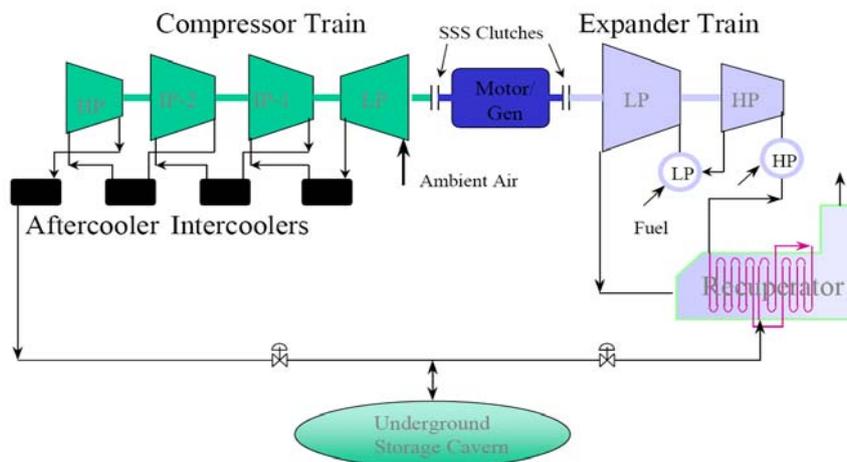


그림 2.28 다단 압축/팽창 CAES 발전시스템(Alabama Plant)

- 팽창기를 설계하기 위해 사용하는 상용프로그램으로는 Concept NREC사의 RITAL(원심형 터빈 설계), AXIAL(축류형 터빈 설계)등이 있음.
 - 수소 액화용으로서 유량 0.04kg/s, 출력 8kW의 2단 원심형 터빈에 관한 연구 사례가 있음.
 - DLE(Dry Low Emission)연소기는 유입되는 압축공기와 상대적으로 적은 연료를 사용하여 희박연소를 구현하므로 연소기 내부의 연소 최고온도를 낮춰 NOX 배출량을 큰 폭으로 줄일 수 있음.
 - 미국 등 세계적으로 풍력터빈으로부터의 발전된 전기를 공기 압축에 필요한 압축기의 모터 구동 전력으로 사용하여 peak 전력부하 시 발전 전력의 양질화를 도모하는 연구가 활발히 수행되고 있음.
 - 압축공기 전력저장을 이용한 무정전 전원장치 (UPS) 시스템은 최근 미국 Active Power사에서 상용화되어 판매되고 있음.
- 국내에서는 두산중공업이 GE, MHI 등과 제휴하여 가스터빈에 대하여 일부 국산화 제작에 성공하였으나 연구개발은 항공우주연구원, 전력연구원 등 일부 국책연구소와 일부 대학에 한정되어 있음.
 - 압축기의 경우 프로세스 가스의 경우 국내 기술 수준은 소용량 왕복동식 압축기 개발에 머무르고 있으며, 공기 압축기는 삼성테크윈, 뉴로스 등에서 대용량 원심식에 대한 일부 기초 기술 확보

나. AA-CAES

- 화석연료가 전혀 필요 없이 압축팽창과정에서 발생하는 열을 회수하여 발전할 수 있는 AA-CAES(Advanced Adiabatic-CAES) 관련 프로젝트도 현실화되고 있음.
 - 기존 가스터빈 발전이 LNG 연료와 압축공기를 혼합하여 발전하는 개념인 반면, AA-CAES는 LNG와 같은 화석연료를 전혀 사용하지 않고 스팀터빈으로 발전하는 혁신적인 개념
 - 공기압축시 발생하는 열은 600℃ 이상의 고온으로 압축공기와 더불어 이 열을 임시로 저장하였다가, 발전 시 압축공기를 이용한 스팀터빈 발전을 진행함.
 - 이러한 단열공정은 기존의 관련 기술에 비해 높은 전환효율과 화석연료의 도움 없이도 지속적인 가동이 가능하다는 장점이 있음(AA-CAES의 효율: 70%).
 - 관련 핵심기술로는 급격히 증가하는 공기의 온도를 제어하는 것과 공기 압축 과정에서 발생하는 열에너지의 손실을 최소화하기 위해 따로 마련된 열저장장치의 개발이 중요함.

- 이에 대한 구체적인 연구는 19개 컨소시엄이 참여한 EU R&D project를 통해 이미 2006년에 개념과 가능성을 확보하였으며, 파일럿을 거쳐 향후 2010년 상용화를 목표로 하고 있으며, 독일 RWE와 미국 GE사도 최근 AA-CAES 관련 연구 협약을 맺고 2012년 이후 상용화를 목표로 하고 있음.

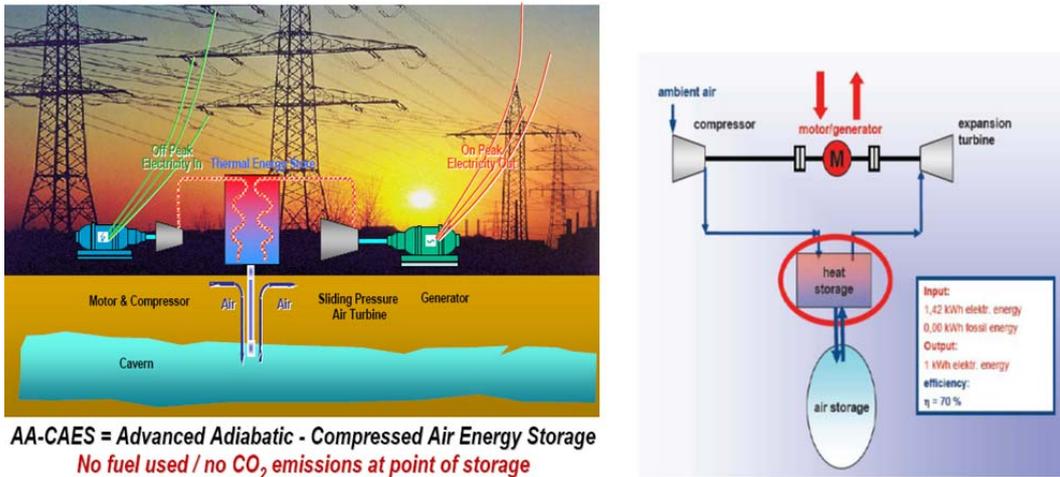


그림 2.29 AA-CAES 발전시스템 (Advanced Adiabatic CAES)

- AA-CAES 구현을 위한 열에너지 저장 기술동향 분석
 - AA-CAES에 적용되는 열저장 시스템은 약 120~2,400MW의 열량을 빠른 시간 내에 저장이 가능하여야 하며, 출력 운전 시에는 온도의 균일성이 유지 되어야 함.
 - 열에너지 저장을 위하여 다양한 물질을 대상으로 관련 연구가 진행 중임.
 - 열에너지 저장은 약 30년 이상의 축열 및 출력 반복운전 가용 시간을 요구 하고 있으므로 대상 물질에 대한 내구성 연구도 병행되고 있음.
- 효율적인 CAES/TES(Thermal Energy Storage)를 위한 열역학적 해석
 - 저장소(용기): 지하 동굴에 압축공기를 저장하는 것은 환경적인 제약이 있기 때문에 저장용기를 사용하는 경우가 많아질 것으로 판단됨. 이때 열역학적 해석을 통하여, 저장용기의 재질 및 무게는 공기의 압축비, 내부압력과 용기의 허용 응력, 저장용기의 허용 탄성 등을 고려하여 예측할 수 있음.
 - 에너지 저장 및 회수: 효율적인 공정 및 버려지는 에너지 회수를 위하여 다단의 압축기, 터빈, 열교환기가 요구되며 열역학적 해석을 통해 그 수를 예측할 수 있음.
 - 2005년 Lieberman Research Associates는 CAES 저장탱크에 대한 열전달 변수 관련 시험과 평가 기술을 연구함.

표 2.4 TES 시스템 개요

Concept	Solid TES					Liquid TES		
	Rock bed	Cowper-Derivative	Concrete Walls	Cast Iron Slabs	Hybrid-PCM	Two Tank	1-Tank Thermocline	Air-Liquid
	direct	direct	direct	direct	direct	indirect	indirect	indirect
Storage Material	Natural stone	Ceramics	Concrete	Cast Iron	Ceramics, Salt	Nitrate salt, Mineral Oil	Nitrate salt, Mineral Oil	Nitrate salt, Mineral Oil

다. Micro CAES

- 국내의 경우, 한국기계연구원은 스위스 로잔연방공대와 공동으로 “소규모 분산형 압축공기저장 발전(Micro-CAES)”의 가능성과 기술개발 방향 검토 중임. 수요처에 가까운 곳에 인공의 압축공기 저장조를 설치하고 공기압축 시 발생하는 압축열을 축열하여 난방열 활용한 에너지효율 향상 목적
 - 생산기술연구원에서는 MICRO CAES 장치 시제품 제작 및 성능평가기술 연구가 2006~2008년까지 수행되었음.
- 한국가스공사에서는 천연가스의 수요처에서 강제감압 공정에 터빈팽창기를 적용, 전력생산의 가능성에 대한 기본적인 분석과 연구를 수행
- 한국기계연구원에서는 액분사식 에릭슨 사이클을 적용한 Micro-CAES 발전 기술 및 정압식 압축공기 저장과 관련한 선행 조사연구를 수행하고 특허를 출원함.
 - 전열면적이 넓고 열전달 특성이 좋은 스크롤기기의 특성을 이용하여 압축시 효과적으로 냉각, 팽창시 효과적으로 가열함으로써 중간냉각과 재열을 위한 다단 압축/팽창을 필요로 하지 않는 에릭슨 사이클을 적용한 기술을 개발함.
- Micro-CAES 관련 기술 요소별 국내 수준은 다음과 같음

표 2.5 Micro-CAES 관련 기술 요소별 국내 수준

구분	파트	주요기술내용	선진대비 기술수준
핵심 부품	사이클	엔진의 설계/비설계점 및 과도 해석	중
	압축기	고효율, 고압 다단 압축기 설계 및 해석	중
	팽창기	고효율, 고펡창비 팽창기 설계/해석	중
	연소기	저공해 연소기의 설계 및 해석	하
	재생 열교환기	재생효율 95% 이상	중
	축열기	대용량 축열시스템 설계 및 해석	중
	열저장 매체	고효율 단상 및 상변화 열저장 매체 개발	하
	정압식 압축공기 저장조	유압식 에너지 저장장치를 이용한 정압식 압축공기 저장조	중
시스템 최적화	시스템 설계	Thermo-economic modeling	중
	시스템 최적화	최적 제어 D/B 구축	중
	통합제어 장치	디지털 통합제어 장치 개발	중
소재 개발	고온내열 합금	히터부, 팽창기, 재생 열교환기 재료기술	중
	윤활	고온 고체 윤활	하
다기능 시스템	압축공기 이용 냉난방 사이클	Air Cycle Heating/Cooling, CAES refrigeration, Ericsson cycle cooler	하
	UPS 시스템	Super capacitor (bridging power 공급)	중

4. CAES 모니터링 및 유지관리 시스템 기술

- 모니터링의 경우 전 세계적으로 환경과 상황의 자동 인지를 통해 사용자에게 최적의 서비스를 가능하게 하며, 커다란 잠재력이 있는 유비쿼터스 센서 네트워크(USN) 기술에 대하여 다양한 분야에서 기술적인 실행 가능성을 연구하고 있지만, 아직까지 USN 응용서비스 시장 및 산업에서 기술 채택과 상업화는 전 세계적으로 지연되고 있는 실정임.
- 유지관리 분야의 경우 선진국 대비 국내 유지관리비의 비율이 현저히 낮은 것으로 파악되고 있음.
 - 미국은 기존 공공 콘크리트 구조물의 보수·보강에 많은 예산(1년 예산의 약 1/3)이 소요되고 있는 실정임.

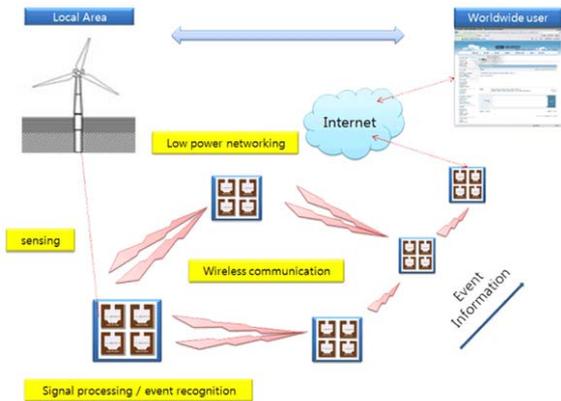


그림 2.30 풍력발전에서의 모니터링 시스템

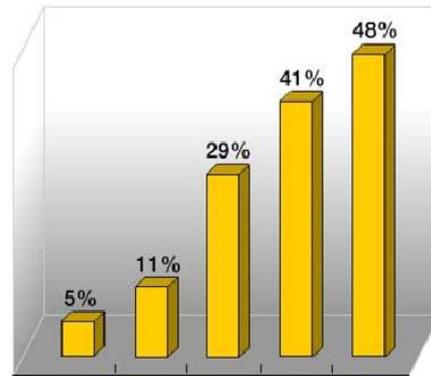


그림 2.31 각국의 신규공사 대비 유지관리비 비율

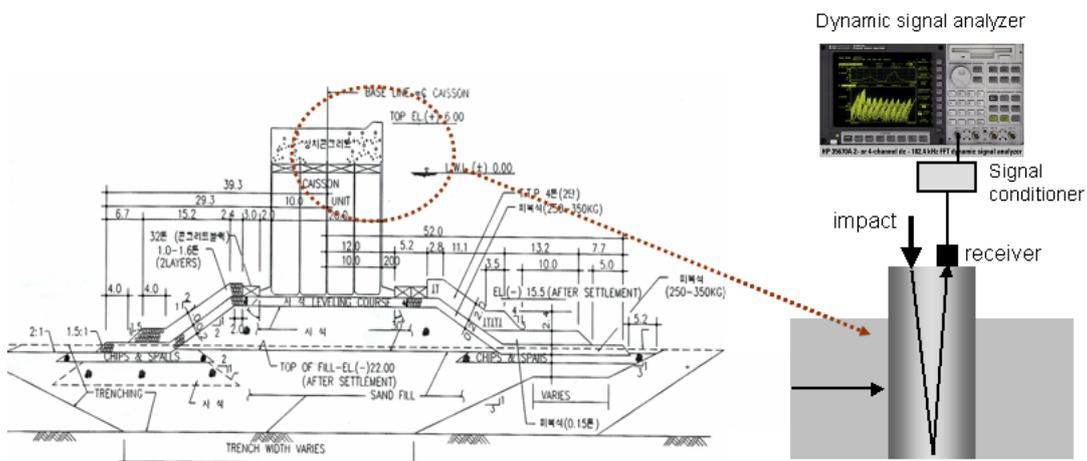


그림 2.32 비파괴 검사법에 의한 방파제 상치콘크리트의 건전도 평가 사례

- 토목구조물의 대다수를 차지하고 있는 콘크리트 구조물의 경우 재료적 원인에 기인한 열화현상 및 공정의 대부분이 현장에서 이루어지는 시공 상의 이유로 인해 내구성을 저해하는 영향인자가 강구조물에 비해 현저히 많음. 일본의 경우 해안에서 500m 이내에 있는 교량의 상부공 258개소 중 24%에 해당하는 62개소에 염해 발생
- 콘크리트 구조물의 내구성 향상 및 건전도 관리를 위해 한국콘크리트학회 등에서 사회기반 콘크리트 구조물의 성능평가 통합 시스템 구축에 관한 연구가 2004년부터 수행되었음.
- 현재 한국해양연구원을 중심으로 해양 콘크리트 구조물의 리모델링 및 건전성평가에 관한 연구가 활발히 수행되고 있음.

제4절 국내·외 특허기술 동향 분석

1. 특허분석대상의 선정

- 본 연구에서는 특허분석을 수행하기 위하여 2011년 4월까지 출원 공개된 한국, 일본, 유럽공개특허와 2011년 4월까지 출원 등록된 미국등록특허를 대상으로 하였다. CAES 기술에 대한 분석대상특허를 선정하기 위해 관련기술을 포괄할 수 있는 키워드를 포함하고 국제특허분류(IPC)를 한정하여, 각 공보별로 적용할 수 있는 국문검색식과 영문검색식을 작성하였다.

표 2.6 특허자료 검색식과 국제특허분류(IPC) 설정

항목	언어	검색식	국가
CAES	국문	(압축+고압)*공기)*(풍력+에너지+전기+발전)*(TL=[(압축+고압+공기)*발전]	한국
	영문	(((air or caes or wind) and storag*) not (cosmetic* or photodetect* or spoon or speaker or confection* or (glass adj bead) or soap or drywall or media or sport* or gun* or (vacuum adj cleaner) or (air adj bag) or paint or animal or bacteri*)) AND ((compressed adj air) and storag*).KEY. AND ((ener* OR powe* OR electr* or gener*)).TL.	미국
			일본
			유럽

관련 IPC	IPC 설명	관련기술
B65G, F25	인공 저장체 설계 및 시공	압축공기 저장을 위한 자연 또는 인공적인 공간
F02C, F04B	압축공기 주입	압축 공기 도입, 기체용 펌프
F03B, F03D, F03G	압축공기 활용	회전, 풍력원동기, 압축공기를 사용한 전력생산기술
F01K, F02G	열에너지 이용	증기기관설비, 열에너지 활용한 냉난방기술
H01M	시스템 통합 및 연계	CAES 시스템 통합 관련
B60T	저장시설 모니터링 및 관리	시설 모니터링

- 상기 표 2.6의 검색어를 모두 포함하나 기술내용과 관련성이 없는 노이즈 중복건을 제거하여 최종분석대상으로 한국 54건, 일본 212건, 미국 290건, 유럽, 32건으로

총 690건을 추출하였다. 이때 검색에는 WIPS를 기본검색도구로 하였고, 국가별로 KIPRIS, 일본특허청(IPDL), 미국특허청(USPTO), 유럽특허청(esp@cenet)을 활용하였다.

표 2.7 최종 특허분석대상 선정

자료 구분	국 가	전체분석구간	정량분석 대상특허	전체분석 대상특허
공개특허 (공개일 기준)	한국	1986. 1 ~ 2011. 4	54	54
	일본	1986. 1 ~ 2011. 4	212	212
	유럽	1986. 1 ~ 2011. 4	32	32
	미국	1986. 1 ~ 2011. 4	290	290
등록특허 (등록일 기준)	미국	1986 ~ 2010. 12	102	102
합계			690	690

* 정량분석구간: 한국, 일본, 유럽, 미국-1986~2011(출원년도), 미국-1986~2010(등록년도)

- 상기 표 2.7의 최종 특허분석대상을 연구 성과의 파급효과 및 연구의 필요성을 고려하여 표 2.8과 같이 6개의 기술 분야로 구분하였다.

표 2.8 기술분야 분류

사업명	세부과제명			기술개요
신재생 에너지 발전전력 압축공기 저장	설계 및 시공	인공저장체 설계/시공	AA	압축공기 저장을 위한 공간, 공간 형성 설계/시공 관련 기술
	압축공기 주입 및 활용	압축공기 주입	BA	압축 공기 도입, 기체용 펌프
		압축공기 활용	BB	압축공기를 사용한 전력생산 관련 기술
		열에너지 이용	BC	열에너지를 활용한 냉난방기술
		시스템 통합 및 연계	BD	CAES 시스템 통합 관련 기술
	모니터링 및 유지관리	저장시설 모니터링 및 유지관리	CA	CAES 시설 모니터링 관련 기술

2. 특허분석의 방법

- 본 연구에서는 특허분석방법으로 양적인 통계를 의미하는 정량분석을 기준으로 하였다. 양적인 통계를 이용하여 세계 기술 환경과 우리의 수준을 살펴보고, 관련기술의 분야별 연구개발 현황과 주요리더를 살펴봄으로써 국가차원의 연구개발의 필요성 및 국제협력의 필요성 등에 대한 기초자료를 제시하고자 하였다.
- 본 연구의 특허분석은 특허를 출원연도별, 국가별, 기술별 및 출원인별로 분류하여 각 부문별 특허건수, 점유율 및 증가율 등으로 구분하여 분석을 수행하였다. 또한 미 상무성 기술정책국, OECD 등에서 발간하는 다수의 기술정책 관련 보고서에서 활용하고 있는 특허활동지수(AI), 인용도 지수(CPP), 영향력 지수(PII), 기술력 지수(TS), 시장확보지수(PFS) 및 연구개발방향(NPR) 등의 지표를 사용하여 특허분석의 양적 측면 뿐만 아니라 질적 측면을 고려하였다.

표 2.9 특허 분석 지표

구분	지표	의미	정의
양적 측면	특허건수	특허활동	-
	특허활동지수 (Activity Index)	상대적 특허활동	$A.I = \frac{\text{특정기술분야의특정출원인건수}}{\frac{\text{특정기술분야전체출원건}}{\text{특정출원인총건수}}}$ 전체총건수
질적 측면	인용도지수 (Cites Per Patent)	인용도지수 \propto 영향력	인용도지수 = $\frac{\text{피인용수}}{\text{특허건수}}$
	영향력지수 (Patent Impact Index)	상대적 영향력	$PII = \frac{\text{해당국가의피인용비}}{\text{전체피인용비}}$
	기술력지수 (Technology strength)	기술력	$TS = \text{특허건수} * \text{영향력지수}$
	시장확보지수 (Patent Family Size)	시장확보지수 \propto Market size	$PFS = \frac{\text{해당출원인 평균 특허Family수}}{\text{전체평균 특허Family수}}$
	과학적 연계성 (Science Linkage)	기초과학과의 연계성	$SL(NPR) = \frac{\text{인용비특허문헌수}}{\text{특허건수}}$

- 특허활동지수(Activity Index)
 - 상대적 집중도를 살펴보기 위한 지표로서, 그 값이 1보다 큰 경우에는 상대적 특허활동이 활발함을 나타내며 구하는 방법은 아래와 같음

$$A.I. = \frac{\frac{\text{특정기술 분야의 특정출원인 건수}}{\text{특정기술분야 전체 건수}}}{\frac{\text{특정 출원인 총건수}}{\text{전체 총건수}}}$$

- 인용도 지수(CPP, Cites Per Patent)
 - 특정 특허권자의 특허들이 이후 등록되는 특허들에 의해 인용되는 회수의 평균값으로, 이 값이 클수록 주요특허 또는 원천특허를 많이 가지고 있다는 것을 의미하며 많이 인용되는 특허를 가진 특허권자는 경쟁에서 유리한 위치를 점할 수 있음
- 영향력지수(Patent Impact Index)
 - 한 시점을 기준으로 삼아 과거의 기술적 활동을 반영하는 지표로서, 특정 출원인(특허권자)이 소유한 기술의 질적수준을 측정하는 지수임. PII가 1이면 평균 인용 빈도임을 나타내고, 2이면 평균보다 2배 많은 빈도로 인용됨을 나타냄

$$PII = \text{특정기술 분야의 특정출원인의 피인용비} / \text{전체 피인용비}$$

- 기술력지수(Technology Strength)
 - 기술력지수가 클수록 해당 국가(또는 연구주체)의 기술력이 높음을 의미함

$$TS = \text{특허건수} \times \text{영향력지수}$$

- 시장확보지수(Patent Family Size)
 - 한 발명에 대해 각 국가마다 출원된 특허를 Family patent라 지칭함. 해당국가에서 상업적인 이익 또는 기술경쟁 관계에 있을 때에만 해외에 특허를 출원하므로 Family Patent 수가 많을 때에는 특허를 통한 시장성이 크다고 판단되어 이를 시장확보력의 지표로 사용함

$$PFS = \frac{\text{해당출원인(소유권자)평균PatentFamily수}}{\text{전체평균PatentFamily수}}$$

3. 주요국의 연도별 특허동향 및 기술발전 위치

- CAES 기술분야 관련 한국에서는 2000년대 초반에 출원량이 증가한 후 지금까지 지속적인 출원량을 보이고 있고, 일본에서는 1980년대 중반부터 출원량이 급증하고 1980년대 후반까지 활발한 출원활동을 보인 후 2000년 이후에 다소 출원량이 감소하였으나 지속적인 출원량을 유지하고 있는 추세이다. 유럽에서는 전체적으로 출원양이 많지 않으며, 2000년대에 와서 지속적으로 출원활동을 유지하고 있다. 미

국에서는 2000년대 초반에 많은 등록량을 보인 후, 현재까지 활발한 등록건수를 유지하고 있다<그림 2.33>.

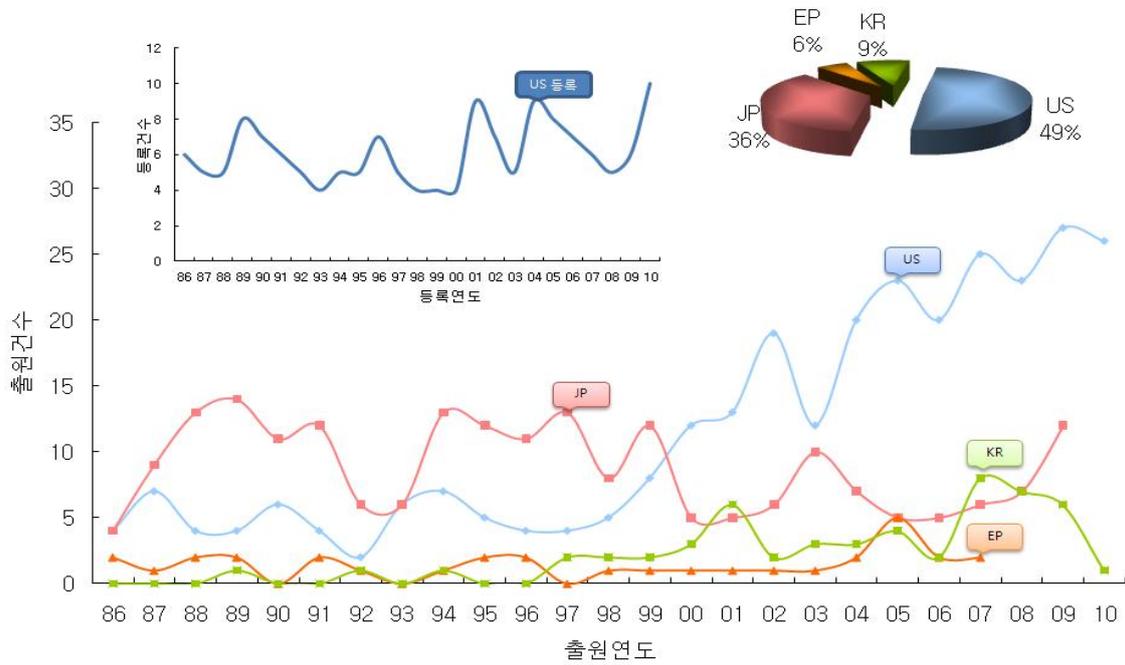


그림 2.33 국가별 연도별 특허출원건수

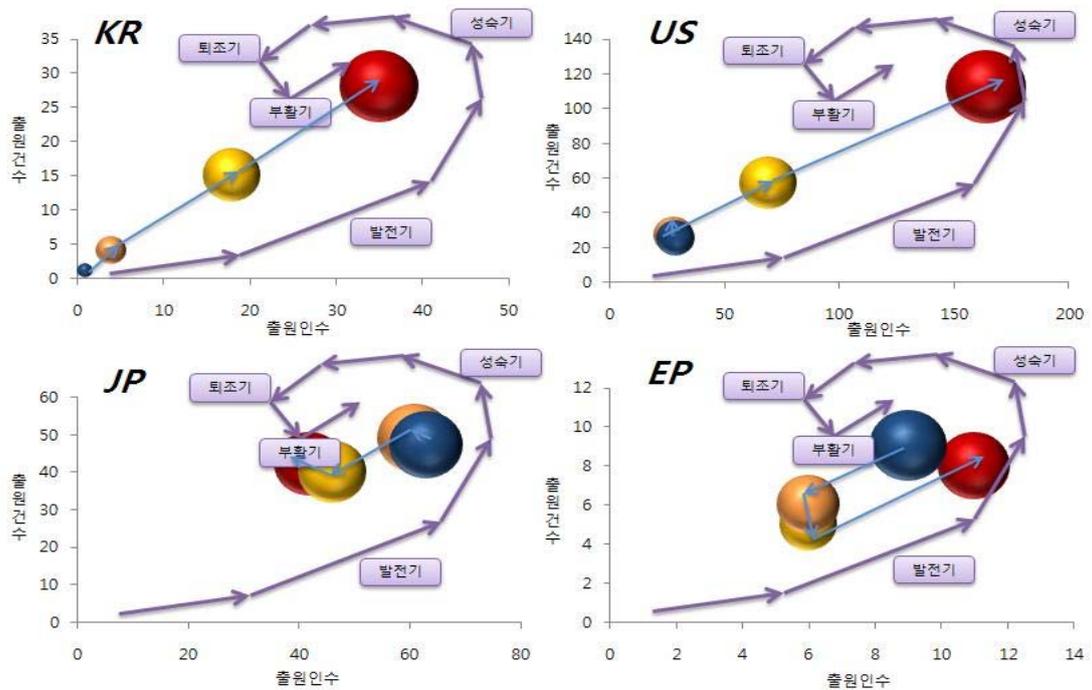


그림 2.34 CAES 분야의 기술발전 위치분석 결과

4. 주요국의 세부기술별 특허동향

- 기술분야 별 특허분류에 따른 검색된 특허 건수를 조사한 결과, 대분류 기준으로 설계 및 시공 분야(A) 9건(4.2%), 압축공기 주입 및 활용 분야(B) 201건(93.5%), 모니터링 및 유지관리 분야 5건(2.3%)으로 조사되었으며, 대부분의 연구가 압축공기 주입 및 활용 분야에 집중된 것으로 나타났다.
- 미국의 경우 압축공기 주입 및 활용 분야 중 시스템 통합 및 연계 분야(BD)에 62건의 특허를 출원하였으며, 이 밖에 압축공기 활용(BB, 16건), 압축공기 이용(BA, 10건), 열에너지 이용(BC, 9건) 분야에 대해 활발한 연구를 수행한 것으로 조사되었다.
- 일본, 유럽의 경우도 시스템 통합 및 연계, 압축공기 주입/활용, 열에너지 이용 등의 분야에 집중적인 연구를 수행하는 것으로 나타났다.

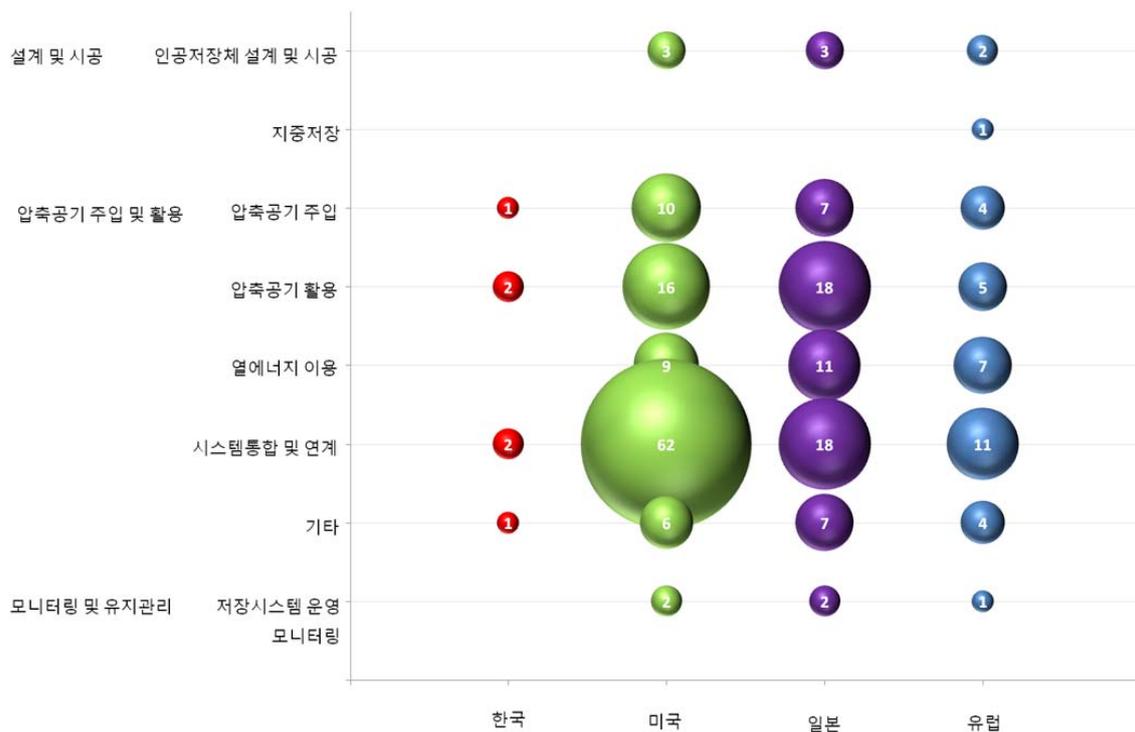


그림 2.35 각국의 기술 분류별 특허 동향

- 최근 10년간의 특허를 살펴보면, 미국과 유럽의 경우 현재까지 연구를 지속적으로 수행하는 반면, 일본의 경우 압축공기 활용 분야를 제외하고는 CAES 관련 연구가 감소한 것으로 판단된다.

- CAES 설계 및 시공 관련 특허는 전체 4.2%로 절대적으로 적은 비중을 차지하고 있음. 이와 관련하여 토목분야의 경우 기존의 설계 및 시공을 응용하여 CAES 관련 시설을 계획하고 조성하는 것으로 판단된다.

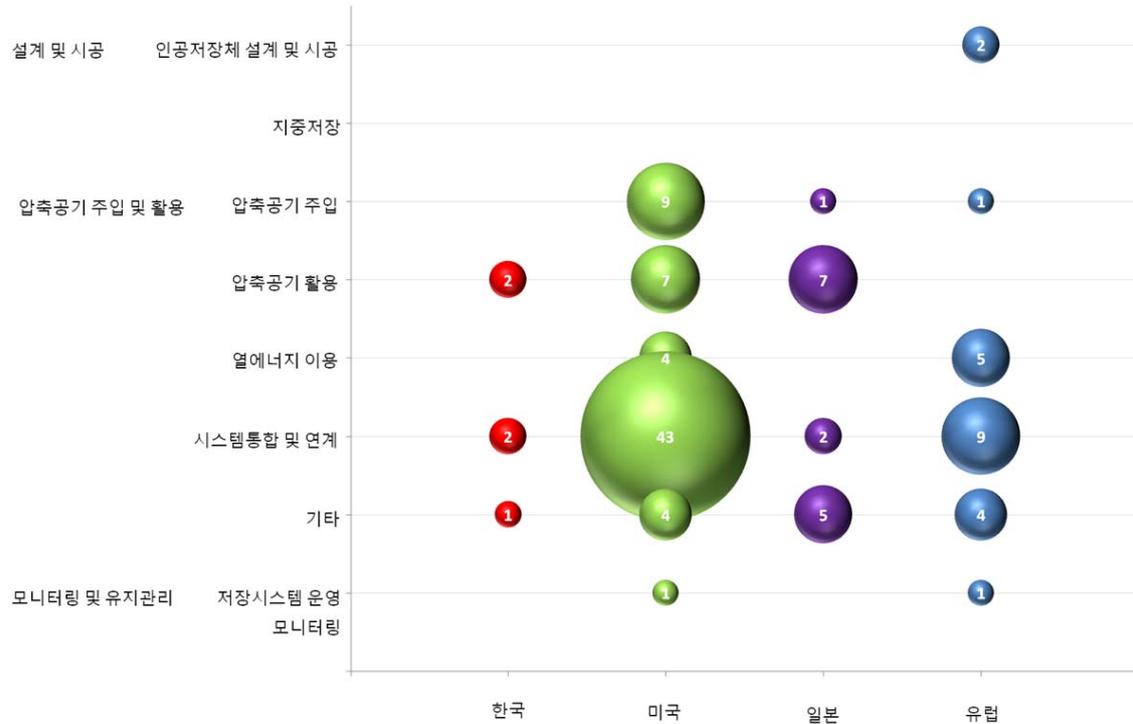


그림 2.36 최근 10년간 각국의 기술 분류별 특허 동향

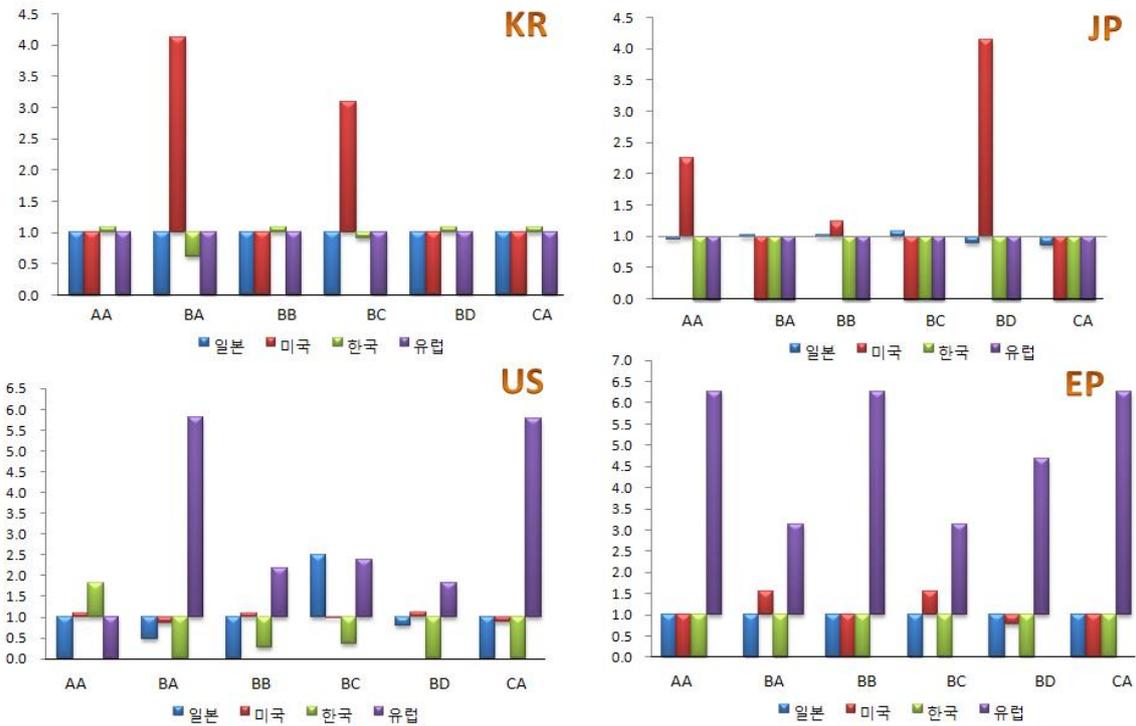
- 현재까지 조사된 대부분의 CAES는 지중저장을 목적으로 대심도에서의 설계 및 시공이 이루어져 왔기 때문에, 압축공기 저장체의 내부 압력에 의한 파괴 가능성은 고려되지 않은 것이 특허조사를 통해 나타남. 대심도 지중저장이 아닌 원하는 지역의 지상 또는 해상에 인공 저장체를 설치하기 위해서는 설계 및 시공 분야에 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 기술분야별 주요국가의 특허활동 및 역점분야

- 특허활동지수(AI; Activity Index)를 통해 중분류를 기준으로 기술별 특허활동도를 살펴보았다<그림 2.37>.
- 한국에서 일본과 유럽은 특허활동이 없는 것으로 나타났고, 미국은 BA(압축공기 주입) 및 BC(열에너지 이용) 분야에서 상대적으로 특허활동이 활발한 반면, 다른 분야에서는 상대적으로 저조한 특허활동을 보이는 것으로 분석되었으며, 한국의

경우, 거의 대부분이 한국 국적의 특허이므로 상대적인 특허활동에 있어서는 AI가 저조한 것으로 나타났다.

- 일본에서 한국과 유럽은 특허활동이 없는 것으로 나타났고, 미국은 AA(인공저장체 설계 및 시공), BB(압축공기 활용), BD(시스템 통합 및 기타) 분야에서 상대적으로 특허활동이 활발한 반면, 다른 분야에서는 특허활동이 없는 것으로 분석되었으며, 일본의 경우, 거의 대부분이 일본 국적의 특허이므로 상대적인 특허활동에 있어서는 AI가 저조한 것으로 나타났다.



* 분석구간: 한국, 일본, 유럽, 미국 ~2010년(출원년도)

그림 2.37 주요국의 기술분야별 역점기술분야

- 미국에서 일본은 BC(열에너지 이용) 분야에서 상대적으로 특허활동이 활발하고, 유럽은 BA(압축공기 주입)과, CA(저장시설 모니터링) 분야에서 상대적으로 특허활동이 활발한 반면, BB(압축공기 활용), BC(열에너지 이용), BD(시스템 통합 및 기타) 분야에서 상대적으로 저조한 특허활동을 보이는 것으로 분석되었고, 한국은 AA(인공저장체 설계 및 시공) 분야에서 특허활동이 활발한 것으로 나타났으며, 미국의 경우, 대부분이 미국 국적의 특허이므로 상대적인 특허활동에 있어서는 AI가 저조한 것으로 나타났다.

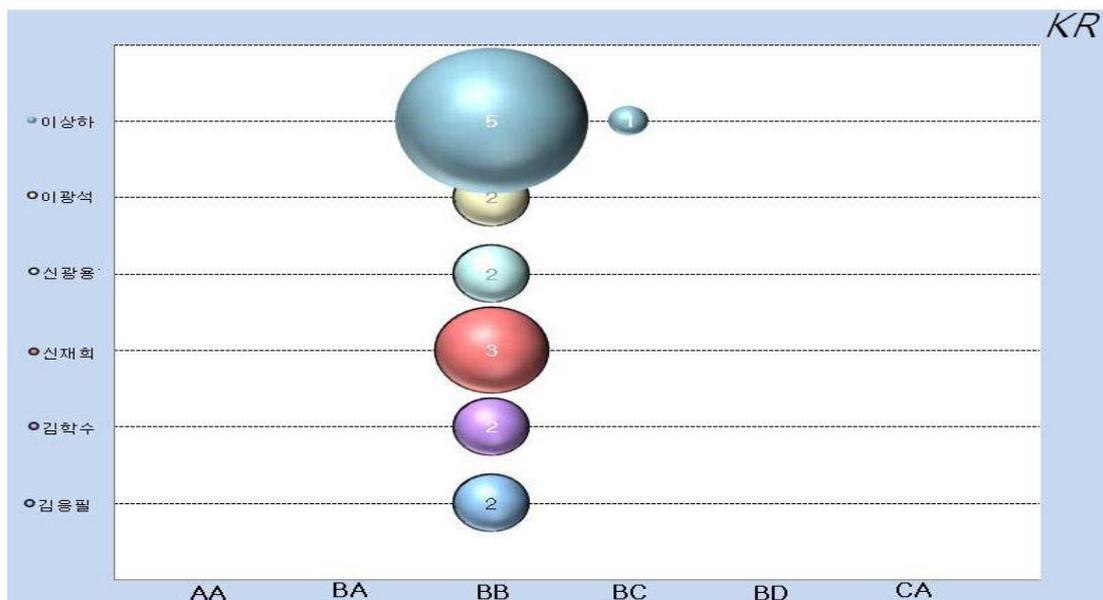
- 유럽에서 미국은 BA(압축공기 주입), BC(열에너지 이용) 분야에서 상대적으로 매우 활발한 특허활동이 이루어지고 있는 것으로 나타났고, 유럽은 AA(인공저장체 설계 및 시공), BB(압축공기 활용), CA(저장시설 모니터링) 분야에서 상대적으로 특허활동이 활발한 것으로 분석되었으며, 일본과 한국은 유럽에서 특허활동이 없는 것으로 나타났다.

6. 주요기업의 역점분야 및 공백기술

- 다출원인을 대상으로 기업별 역점분야 및 공백기술 분석 시, 특허건수의 양적인 부분과 함께 특허출원 활동은 저조하지만 해당업계에서 시공기술력(노하우)이 우수한 기업까지 고려해서 판단하면 더 신뢰성이 있는 공백기술 파악이 될 것이나 본 보고서에서는 단순히 특허건수(버블크기)를 기준으로 판단하였고, 또한 제1출원인을 기준으로 판단하였으므로 복수의 출원인으로 구성된 공동출원의 경우에는 제2출원인의 특허활동이 없어지는 문제점이 있다.

- 한국특허의 기업별 역점분야 및 공백기술

- 한국의 출원인별 출원성향을 보면, BB(압축공기 활용) 분야에서, 주로 개인들이 출원하고 있는 것으로 나타났으며, 다른 분야는 출원이 미비한 것으로 나타났다<그림 2.38>.

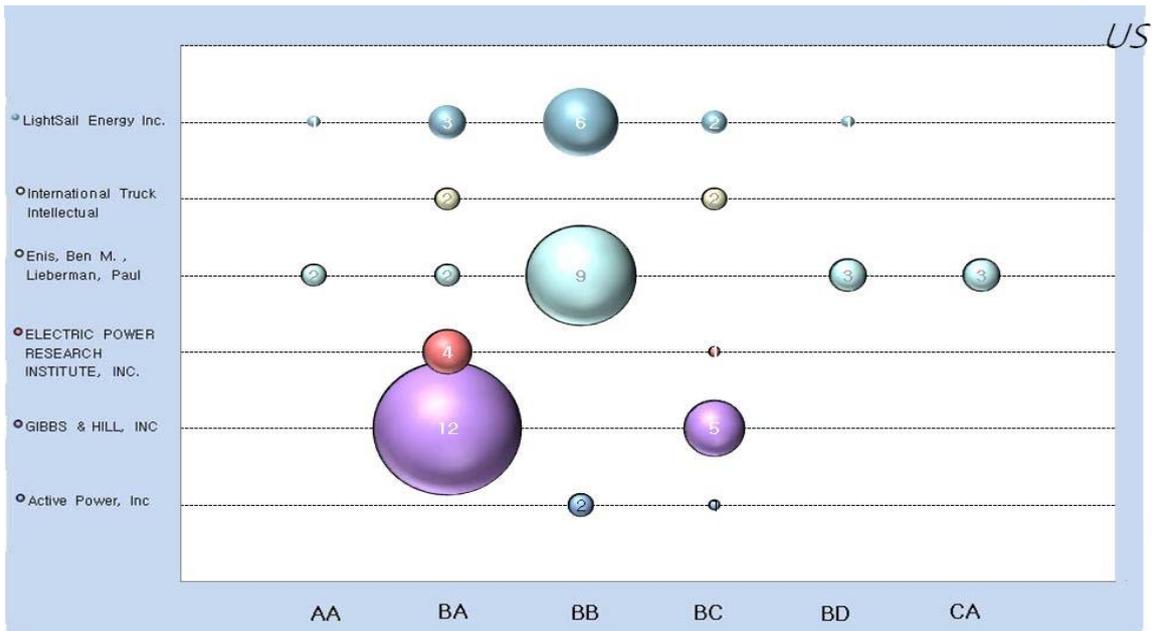


* 1.제1출원인 기준, 2.분석구간: 한국특허 1985~최근 공개건까지(출원년도)

그림 2.38 기술분야별 특허권자 분포(한국)

- 미국특허의 기업별 역점분야 및 공백기술

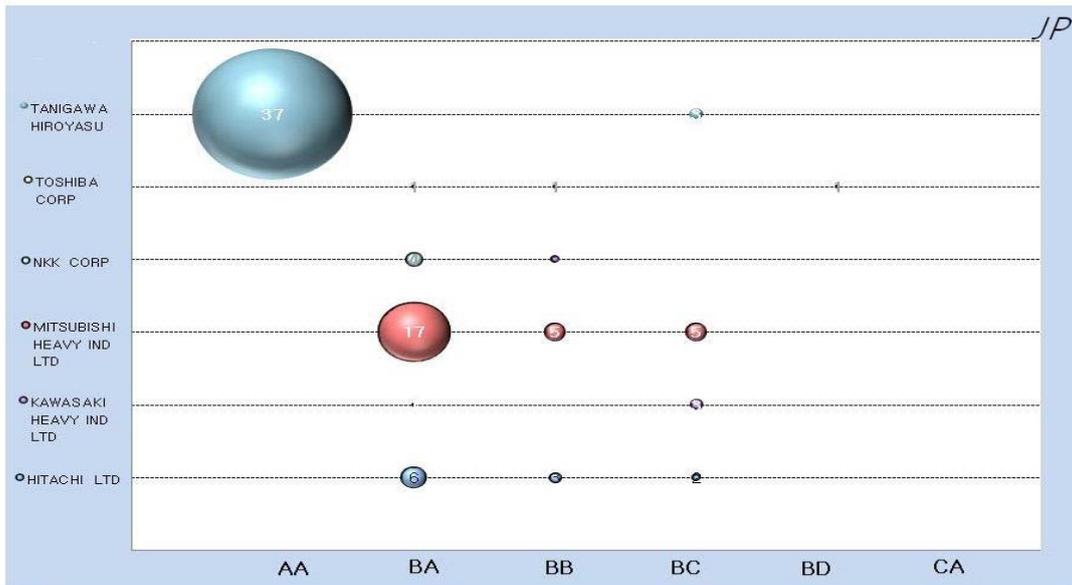
- 미국의 출원인별 출원성향을 보면, AA(인공저장체 설계 및 시공) 및 BB(압축공기 활용) 분야에서는 미국 기업인 Enis, Ben M. , Lieberman, Paul LightSail Energy Inc.가, BA(압축공기 주입) 및 BC(열에너지 이용) 분야에서는 미국 기업인 GIBBS & HILL, INC, ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, INC., International Truck Intellectual가 주도적으로 출원하고 있는 것으로 나타났다<그림 2.39>.



* 1.제1출원인 기준, 2.분석구간: 미국특허 1985~최근 공개건까지(출원년도)
그림 2.39 기술분야별 특허권자 분포(미국)

- 일본특허의 기업별 역점분야 및 공백기술

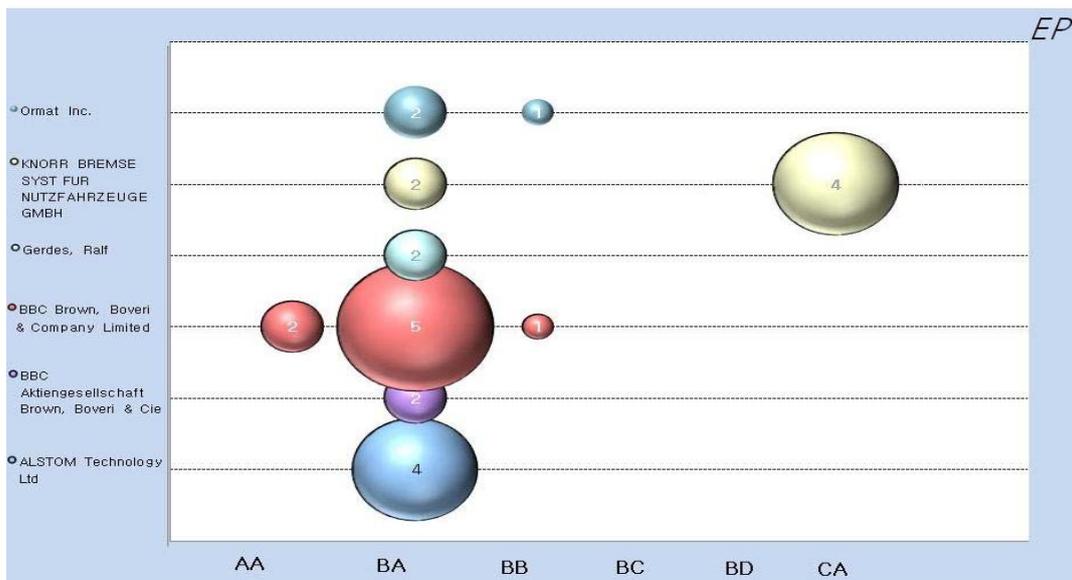
- 일본의 출원인별 출원성향을 보면, AA(인공저장체 설계 및 시공) 분야에서는 일본기업인 TANIGAWA HIROYASU가, BA(압축공기 주입), BB(압축공기 활용), BC(열에너지 이용) 분야에서는 일본기업인 MITSUBISHI HEAVY IND LTD, HITACHI LTD가, BD(시스템 통합 및 기타) 분야에서는 일본기업인 TOSHIBA CORP가 주도적으로 출원하고 있는 것으로 나타났다<그림 2.40>.



* 1. 제 1출원인 기준, 2. 분석구간: 일본특허 1978~최근 공개건까지(출원년도)
 그림 2.40 기술분야별 특허권자 분포(일본)

- 유럽특허의 기업별 역점분야 및 공백기술

· 유럽의 출원인별 출원성향을 보면, AA(인공저장체 설계 및 시공) 분야에서는 영국 기업인 BBC Brown, Boveri & Company Limited가, BA(압축공기 주입) 분야에서는 영국기업인 BBC Brown, Boveri & Company Limited, ALSTOM Technology Ltd가, CA(저장시설 모니터링) 분야에서는 덴마크기업인 KNORR BREMSE SYST FUR NUTZFAHRZEUGE GMBH가 주도적으로 출원하고 있는 것으로 나타났다<그림 2.41>.



* 1. 제 1출원인 기준, 2. 분석구간: 유럽특허 1980~최근 공개건까지(출원년도)
 그림 2.41 기술분야별 특허권자 분포(유럽)

- CAES 분야에 관한 주요국 출원인별 출원성향을 보면, AA(인공저장체 설계 및 시공) 분야에서는 한국, 미국, 유럽에서 상대적으로 출원량이 많은 기업이 발견되지 않았고, 일본의 TANIGAWA HIROYASU가 출원을 주도하고 있는 것으로 나타났다.
- BA(압축공기 주입) 분야에서는 미국에서 GIBBS & HILL, INC가, 일본에서 MITSUBISHI HEAVY IND LTD, HITACHI LTD가, 영국에서는 BBC Brown, Boveri & Company Limited가 출원을 주도하고 있는 것으로 나타났으며, 한국에서는 상대적으로 출원량이 많은 기업이 발견되지 않았다.
- BB(압축공기 활용) 분야에서는 한국에서 개인 출원인인 이상하가, 미국에서 ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE가, 일본에서는 MITSUBISHI HEAVY IND LTD, HITACHI LTD가 출원을 주도하고 있는 것으로 나타났으며, 유럽에서는 상대적으로 출원량이 많은 기업이 발견되지 않았다.
- BC(열에너지 이용) 분야에서는 미국에서 GIBBS & HILL, INC가, 일본에서는 MITSUBISHI HEAVY IND LTD, HITACHI LTD가 출원을 주도하고 있는 것으로 나타났으며, 한국, 유럽에서는 상대적으로 출원량이 많은 기업이 발견되지 않았다.
- CA(저장시설 모니터링) 분야에서는 독일에서 KNORR BREMSE SYST FUR NUTZFAHRZEUGE GMBH가 출원을 주도하고 있는 것으로 나타났고, 한국, 미국, 일본에서는 상대적으로 출원량이 많은 기업이 발견되지 않았다.

7. 미국특허를 이용한 지표분석

가. 미국특허로 본 기술 분야별 연구개발방향 및 기술발전도

- 기업별 기술발전속도(특허공보에서 인용하는 문헌과의 발행년도 차이)와 기초과학과 연계한 연구개발 진행여부(논문인용수)를 통해 연구주체의 기술발전속도 및 기초과학 연계 수준을 평가하고자 하였다<그림 2.42>.
- 기술순환주기(TCT) 지수는 기술발전의 속도, 즉 혁신활동의 속도에 대한 정보를 제공하며, 기술분야에 따라 큰 차이가 나타난다. (즉, 선박기술, 토목 분야와 같은 전통적 산업부문은 15년 정도로 상대적으로 크게 나타나며, 정보통신 중 휴대폰의 경우에는 6~12개월 정도로 상대적으로 작게 나타남).

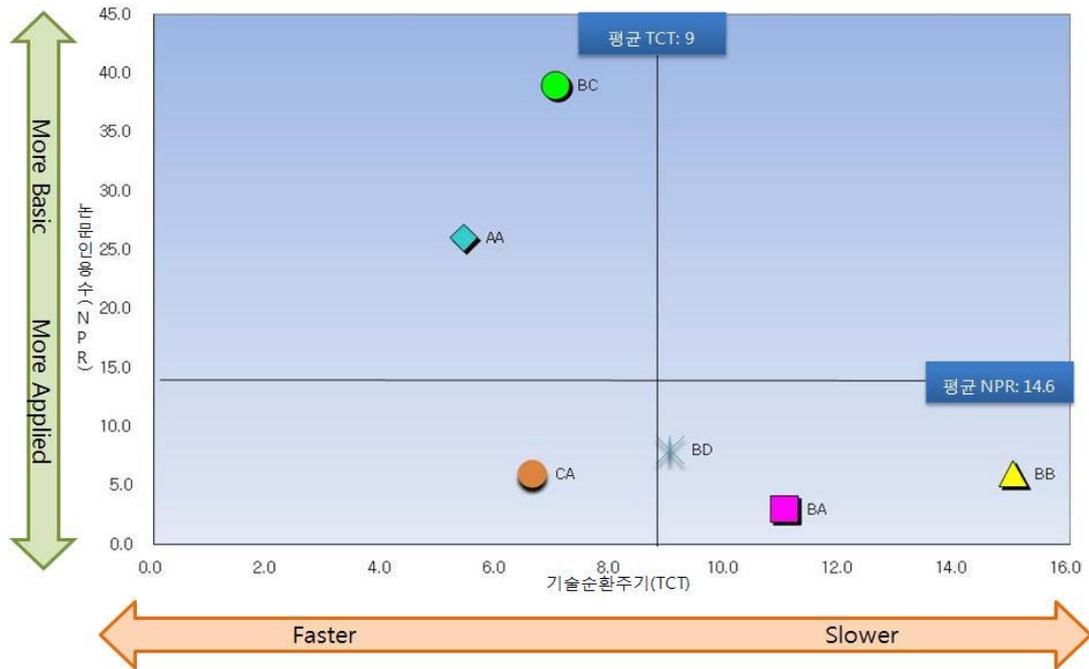


그림 2.42 CAES 분야의 연구개발방향 및 기술발전속도

* 그림 설명

1. 분석구간: 미국특허 1986~2010년(등록년도)
 2. X축: TCT=미국 등록특허의 발행년도와 그 특허공보상에 기재되는 인용문헌 발생년도의 중간값
- Y축: 미국특허의 논문인용수

- AA(인공저장체 설계 및 시공) 분야와 BC(열에너지 이용) 분야에서 논문인용 비율이 높은 것으로 보여지고, 이런 상황으로 볼 때, 기초과학과 관련한 연구개발이 많이 수행되는 것으로 보여지며, BA(압축공기 주입), BB(압축공기 활용) 분야는 기초과학보다는 응용개발에 관한 연구가 활발한 것으로 판단된다.
- BA(압축공기 주입) 분야 및 BB(압축공기 활용) 분야의 기술순환주기(TCT)가 12~16년 정도로 나타났고, BB(압축공기 활용) 분야가 가장 늦은 기술순환주기(TCT)를 보이는 것으로 나타났다. 즉, CA(저장시설 모니터링) 분야의 기술 발전속도가 빠른 것으로 볼 수 있고 상기 기술분야에 한국 등 후발주자들이 단기간 집중적으로 투자한다면, 기술격차를 좁히기가 비교적 용이한 분야로 분석됨.

나. 미국특허로 본 각국의 기술력 비교

- 특허등록국가가 질적으로 우수하고 많은 특허를 출원하였는지에 대한 기술력의 판

단과 등록년도를 구간별로 나누어 기술력의 변화를 분석하여 기술력 변화추이, 그리고 연구기획단계에서 최근 기술력이 급성장한 국가에 대하여 정책적, 기술적 변화요인을 분석하고, 우리나라의 현 수준에서 고려할 수 있는 벤치마킹 요소를 도출하기 위하여 미국에 등록된 특허를 비교하여 기술력을 평가하였다<표 2.10 및 그림 2.43>. 그러나 이 결과 상대적으로 미국에 유리한 결과가 도출되는 단점이 있다.

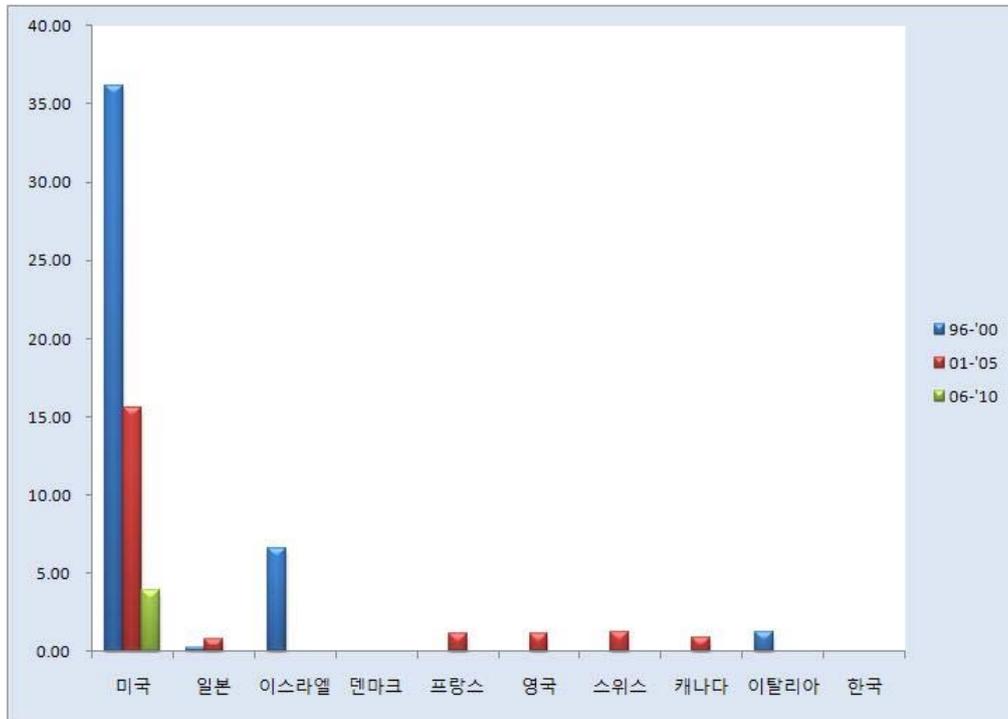
- 미국등록특허에서 기술수준을 측정하는 3가지 지표(특허등록건수, 영향력지수(PII)¹⁾, 기술력 지수(TS)²⁾)를 통해 국가별 분포를 살펴본 결과, 실질적으로 미국이 관련 기술분야에서 양적수준 및 질적 수준 모두 상대적으로 높은 것으로 판단되었다.
- 영향력지수(PII)에서는 1구간('96년~'00년, 이하 1구간)에서는 미국, 이스라엘 순이고, 2구간('01년~'05년, 이하 2구간)에서는 프랑스, 미국, 스위스 순이며, 3구간('06~'10년, 이하 3구간)에서는 미국이 가장 높은 것으로 나타났고, 미국, 이스라엘이 높은 기술영향력을 가지고 있는 것으로 나타났다.
- 기술력지수(TS)에서는 미국이 가장 높은 것으로 나타났고, 그 뒤를 이어 1구간에서는 이스라엘, 이탈리아 순이며, 2구간에서는 스위스, 프랑스, 영국 순이고, 3구간에서는 미국이 기술력 지수가 높은 것으로 나타났다.

1) PII(**영향력 지수**, Patent Impact Index)란 특정특허권자의 특허가 이후 등록된 특허들에 의해 인용되는 회수의 평균값인 **인용도지수(CPP)**를 전체 피인용비로 나눈 상대적 CPP를 나타내므로, 이 값이 클수록 상대적으로 그 이후에 인용이 많이 되었고 이후 특허에 영향을 많이 주었다는 의미, 즉 질적수준이 높다는 것을 의미함 (PII = 해당국가의 CPP/ 전체 CPP)

2) TS(**기술력 지수**, Technology Strength)란 영향력지수에 특허건수를 곱한 값으로 질적수준과 양적수준을 동시에 의미함 (TS = PII X 특허건수)

표 2.10 미국특허로 판단한 국가별 기술수준 순위

특허등록건수						PII(영향력 지수)						TS(기술력 지수)					
'96-'00		'01~'05		'06~'10		'96-'00		'01~'05		'06~'10		'96-'00		'01~'05		'06~'10	
미국	9	미국	16	미국	20	미국	4.02	미국	0.98	미국	0.2	미국	36.15	미국	15.6	미국	.093
일본	1	일본	2	일본	2	일본	0.25	일본	0.38	일본	0	일본	0.25	일본	0.76	일본	0
이스라엘	3	이스라엘	0	이스라엘	0	이스라엘	2.20	이스라엘	0	이스라엘	0	이스라엘	6.60	이스라엘	0	이스라엘	0
덴마크	0	덴마크	1	덴마크	2	덴마크	0	덴마크	0	덴마크	0	덴마크	0	덴마크	0	덴마크	0
프랑스	0	프랑스	0	프랑스	1	프랑스	0	프랑스	1.14	프랑스	0	프랑스	0	프랑스	1.14	프랑스	0
영국	0	영국	1	영국	0	영국	0	영국	0.57	영국	0	영국	0	영국	1.14	영국	0
스위스	0	스위스	2	스위스	1	스위스	0	스위스	0.63	스위스	0	스위스	0	스위스	1.27	스위스	0
캐나다	0	캐나다	2	캐나다	0	캐나다	0	캐나다	0.44	캐나다	0	캐나다	0	캐나다	0.89	캐나다	0
이탈리아	1	이탈리아	2	이탈리아	0	이탈리아	1.27	이탈리아	0	이탈리아	0	이탈리아	1.27	이탈리아	0	이탈리아	0
한국	0	한국	2	한국	1	한국	0	한국	0	한국	0	한국	0	한국	0	한국	0



* 분석구간: 미국특허 1996~2010년(등록년도)

그림 2.43 국가별 기술영향력(TS)의 구간별 추이 비교

8. 특허분석의 결론 및 시사점

- 압축공기 에너지저장시스템(CAES: Compressed Air Energy Storage)은 잉여전력을 이용하여 공기를 압축해서 지하저장시설 등에 저장해놓고, 전력공급이 필요한 시간대에 압축공기를 회수해서 전력을 생산하여 첨두부하를 해결하는 등 안정적인 전력공급을 이루는 시스템이다. 특히 풍력발전의 간헐성과 비급전성을 극복하고자 풍력에너지를 이용하여 공기를 압축해서 저장시설에 저장해놓고, 필요시 저장시설로부터 압축공기를 회수해서 발전함으로써 첨두부하를 해결하고 안정적인 전력공급을 이루기 위한 CAES 기술의 연구개발이 요구되고 있다.
- 이러한 CAES 분야에 대한 특허동향을 분석한 결과, CAES 기술은 한국을 제외한 주요국(미국, 일본)에서 연구개발이 오래전부터 이루어져 최근까지 특허활동이 활발하게 진행되고 있는 추세로 나타났으므로, 원천기술에 대한 특허권을 획득하기는 어려울 것으로 판단되나, '70~'80년대에 공개/등록된 특허 기술은 자유실시의 기술로서 연구개발시 기초 자료로 사용하거나, 해당 특허기술을 응용개발하는 방법으로 세계시장에서 권리를 축적해야 할 것으로 판단되었다.
- 특허 분포도와 기술별 특허동향에서 볼 때, 최근에 선진국가에서 특허활동이 활발한 기술분야는 BD(CAES 시스템통합 및 연계) 분야인 것으로 나타났다. 그리고 CAES 분야 주요 출원인 분석에서 볼 때, 가장 많은 출원점유율을 차지하고 있는 미국기업이 주요 경쟁업체로 분석되며, 전 세계적으로 가장 많은 특허출원량을 보유하고 있는 기업은 일본의 MITSUBISHI HEAVY IND LTD로 조사되었다.
- 특허분석 대상 주요국가 중 미국의 특허활동(49%)이 월등히 활발한 것으로 나타났다. 이에 따라 미국에 CAES 분야의 연구결과가 가장 많이 축적되어 있을 것으로 판단된다. 미국은 일찍이 친환경 에너지 관련 산업이 발달됨에 따라, CAES 관련 산업도 성장하게 된 것으로 사료된다.
- CAES는 소비자들의 수요에 맞춰 전력을 공급할 수 있으므로, 우리나라는 CAES 관련 기술을 적극 활용하여, 점차적으로 증대되고 있는 에너지 소비량에 따라, 그간 문제점으로 지적되어 왔던 전력의 불안정적인 공급을 해결하도록 해야 할 것이며, 이에 따라, 기술분야별로 주요 특허를 면밀히 검토하여 연구개발에 장벽이 되는 특허들을 확인하고 이를 회피할 전략을 수립해야 할 것으로 판단된다.

제5절 국내외 논문 동향분석

1. 논문동향 분석 개요

- 각 요소기술별 연구동향을 파악하여 과제 도출 및 구성을 위하여 관련 분야의 국내외 논문자료(저널 중심)를 분석함.
- 관련논문은 정량적 방법으로 분석되었으며, 국가과학기술전자도서관(NDSL)에서 특허의 검색식과 동일한 식을 사용하여 논문 검색을 실시함.
- 검색식 : (TI: (("compressed air" OR air) AND (ener* OR powe* OR electr*) AND (stor* OR facili* OR preservat*))) not ("air condition*" OR engin* OR rack* OR 풍선 OR "electronic device*") OR ("CAES" OR "compressed air energy storage") AND (!cosmetic* AND !digital* AND !signal* AND !photodetect* AND !spoon AND !biological* AND !speaker AND !confection* AND !"glass bead" AND !soap* AND !taper* AND !drywall AND !media AND !sport* AND !ski* AND !gun* AND !optical* AND !"vacuum cleaner" AND !"air bag" AND !paint AND !exercise AND !animal)

2. CAES 분야의 논문동향 분석 결과

- 총 249건의 논문을 추출하였으며, 이중 국내 논문은 3편(복공식 압축공기 지하저장을 위한 가변성 분할 라이닝 터널기술(2009), 압축공기 저장용 터널에 설치된 콘크리트 라이닝의 안정성 해석(2009), 압축공기저장시설의 국내적용을 위한 지하공동의 기밀성 분석(2010)) 검색됨.
- 주제분야로는 Applied physics(112편), Physics(11편) 등 응용 물리학 분야에서 주로 연구결과들이 발표된 것으로 조사되었으며, 토목공학(17편) 및 광산학(4편) 등의 논문도 다수 발표된 것으로 조사됨. 또한 열에너지 관련(Heat(7편), Technology of explosives, fuels, related products (5편) 등) 논문도 다수 검색되는 것으로 나타나 AA-CAES 및 Micro-CAES 관련 연구도 활발히 진행된 것으로 파악됨.
 - 특허 분석에서는 토목공학 분야의 특허가 거의 검색되지 않았으나, 논문 분석에서 다수 검색된 것으로 미루어 볼 때, 지중저장시설의 시공 자체로 특허를 받기는 어렵지만, 아직 연구를 통해 압축공기 저장 시 발생할 수 있는 해결해야 할 문제가 다수 존재하는 것으로 판단됨.

표 2.11 CAES 관련 주제분야 Top 10

순위	주제분야	편수
1	Applied physics	112
2	Civil engineering	17
3	Physics	11
4	Engineering and allied operations	10
5	Technology of industrial oils, fats, waxes, gases	6
6	Technology of explosives, fuels, related products	5
7	Chemical engineering and related technologies	4
7	Mining and related operations	4
7	Other branches of engineering	4
10	Utilities	3

- 2001년부터 2010년까지 논문은 평균 연간 10.8편이 발표되었으며, 논문발표 건수가 증가 추세인 것으로 조사됨.
- 주요 발표 저널을 살펴보면 Journal of rock mechanics and mining science & geomechanics(10편), Proceedings-intersociety Energy Conversion Engineering Conference(10편), Proceedings of the American Power Conference(7편), Journal of energy(7편), Energy(6편), Renewable energy(6편) 등에서 많은 CAES 관련 논문이 발표된 것으로 조사됨.
 - 토목공학 중 지반공학 분야와 에너지 관련 분야에서 많은 논문이 발표됨.
- 관련 분야에 두각을 나타내는 전문가로는 Giramonti, A.J.(5편), Schainker, R.B.(4편), Nakhamkin, M.(4편) 등으로 대부분 응용물리학 분야의 전문가로 조사되었으나, 이들 모두 1998년 이후의 발표논문은 없는 것으로 나타남.
 - 최근 10년간 관련 분야의 전문가로는 Lund, H.(3편), Salgi, G.(3편), Fu, Qinsheng(3편), Guo, Xinsheng(3편) 등으로 CAES 운영 및 유지관리, AA(Advanced Adiabatic)-CAES 분야에 대한 연구를 수행하는 것으로 조사됨

표 2.12 CAES 관련 주요 저널/프로시딩 Top 10

순위	저널/프로시딩명	편수
1	International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts	10
1	Proceedings - Intersociety Energy Conversion Engineering Conference	10
3	Energy conversion and management (7)	7
3	Proceedings of the American Power Conference (7)	7
3	Journal of energy (7)	7
6	Energy : technologies, resources, reserves, demands, impact, conservation, management, policy (6)	6
6	Renewable energy (6)	6
6	The Brown Boveri review (6)	6
9	Modern power systems (5)	5
9	POWERGEN -CONFERENCE- (5)	5

표 2.13 CAES 관련 주요저자 및 최근 10년간 연간 논문 발행 편수

저자명	최근 10년간 연간 논문 발행 편수
Giramonti, A. J. (5)	2010 (14)
Nakhamkin, M. (4)	2009 (13)
Schainker, R. B. (4)	2008 (10)
Mehta, B. (3)	2007 (9)
Abdel-Khalik, S. I. (3)	2006 (15)
Zaugg, P. (3)	2005 (16)
Lund, H. (3)	2004 (9)
Yoshida, H. (3)	2003 (7)
Guo, Xinsheng (3)	2002 (8)
Salgi, G. (3)	2001 (7)

제6절 국내외 기술개발 및 국내 기술 인프라·기술인력 현황

1. 국내외 기술개발 현황

가. 미국

- PG&E(Pacific Gas & Electric)는 자사의 Kern Country 지역 프로젝트를 통해 10시간 동안 300MW 규모의 전력을 제공할 수 있는 능력을 갖출 수 있다고 보고 있음.
 - PG&E는 DOE에 2,500만 달러를 지원해줄 것을 요청하고 있으며, 설계에서 부터 완공까지 5년 정도 걸릴 것으로 예상되고 있음(이 프로젝트와의 비교를 위해 동일한 전력을 생산하는 화석연료 발전의 경우 플랜트 건설비용은 8천 5백만 달러임, KISTI 글로벌동향브리핑(GTB), 2009).
- 2009년 11월 미국 FirstEnergy Generation사는 Ohio주 Norton의 석회석 광산에 초기 268MW, 최종 2,700MW 규모의 CAES 발전소 건설(Norton Energy Storage Project)을 발표함.
- 미국 Alabama Electric Cooperative 사는 현재 100MW 급의 압축공기 에너지저장 시스템에 대한 20년 이상의 경험을 갖고 있으며, 미국 에너지부의 지원 하에 아이오와 주에 풍력으로부터 전기 생산의 15%를 충족시키기 위한 프로젝트를 진행 중임(KISTI 글로벌동향브리핑(GTB), 2009).
 - 현재 미국은 20만kW급 풍력발전단지에 CAES 실증 중임.
 - 1991년 앨러바마 주에 저장소 건설(매킨토시 110MW급 발전소)
 - 2007년 미국 에너지성은 여러 민간기업체와 더불어 75~150 MW 풍력발전 전기를 사용하는 대수층식 CAES(Iowa Stored Energy Park)를 2011년까지 건설 하겠다고 발표함. 이보다는 작은 규모이나 미국의 Energy Storage and Power 사에서도 CAES 발전소 건설을 계획하고 있음.
 - 2011년까지 완공될 ISEP에는 총 2억 달러가 투자될 예정이며, 완전 가동 됐을 때 7만5,000가구에 충분한 전기를 공급할 수 있는 268MW의 전력을 생산. 저장 효율은 85% 정도가 될 것으로 예상. 전력 생산 단가는 시간당 1kW에 4.5센트로 화력발전 단가와 비슷한 수준임.
 - 발전소에서 사용되는 천연가스의 3분의 2가 공기 압축에 소모되며, 풍력 에너지를 적용 시, 가스터빈의 효율이 38~65% 정도 높아지고 이산화탄소 배출은 60%까지 줄어들 것으로 예측(아이오와주 전력협회).

- 아이오와 에너지 저장 프로젝트(포틀랜드 샌디아 국립연구소)는 밤 시간에 풍력 설비를 이용해 압축공기를 지하 동굴에 저장한 후 낮에 압축공기로 복열장치를 가동해 가스터빈 방식의 전력생산 효율을 높이는 방법을 연구. 현재 상태에서 이 프로젝트의 방식을 이용할 경우 아이오와는 500만 달러를 절약할 것으로 예상.
- 미국의 시리우스 익스플로레이션사는 최근 풍력으로 생산한 전기로 동굴에 압축공기를 저장한 다음, 바람이 불지 않을 때 이를 방출하며 풍력발전터빈을 돌려 전기를 생산하는 프로젝트를 진행 중
 - 미국에서 가장 바람이 많은 노스다코타 주에서 진행되는 이 프로젝트로 생산된 전기는 시카고를 포함한 중서부 도시로 공급될 예정. 현재의 오바마 행정부는 대체에너지 정책의 하나로 이 지역에 풍력발전 단지 건설 계획 발표
- 미국 제너럴 컴프레션(General Compression)사도 비슷한 프로젝트를 시작. 이 회사는 향후 3년 이내에 압축공기를 이용하는 풍력 터빈 시스템을 판매한다는 계획을 수립. 이 시스템은 압축공기를 만드는 풍력발전기와 압축 공기를 수집·저장할 수 있는 파이프라인 네트워크, 소형 가스터빈발전소 등으로 구성되며, 바람이 풍력발전기의 날개를 돌리면 그 힘으로 내장돼 있는 압축기가 가동. 압축공기는 지하 파이프라인 네트워크로 보내지고, 여기에서 6~12 시간가량 머물렀다가 가스터빈 발전소로 이동됨.

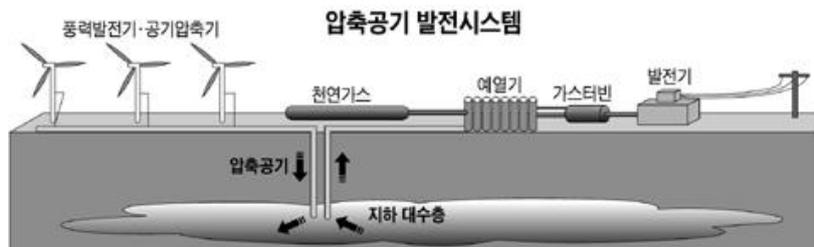


그림 2.44 풍력발전을 이용한 압축공기 발전시스템 개념도

- 미국 SustainX Energy Solutions사(Dartmouth 대학 설립, Polaris Venture Partners사와 Rockport Capital 투자)는 가격이 저렴한 선박용 화물 컨테이너를 이용하여 공기를 압축 저장하는 방법에 대해 연구 개발 진행.
 - SustainX사는 향후 2년 내에 4메가와트-시에 해당하는 에너지를 40 피트 길이의 긴 컨테이너 박스에 저장하는 방법을 개발하여 현재의 공기의 압축과 배출에 소요되는 에너지의 70% 절감 시도. 이 연구의 최종 목표는 에너지 저장 및 이용과 경제성에 있어 이동성 및 확장성을 갖추면서, 동굴 저장 효과의 용량 확대(이동 가능한 동굴의 개발) 목적.

- SustainX사는 이동성을 갖는 압축공기 저장 시스템은 매우 간단한 기술로 대형화도 가능하고, 전 세계에 쌓여있는 사용되지 않는 컨테이너를 이용할 수 있다고 주장.

- CAES 대해 ARPA-E는 많은 지원금을 지원하고 있으며, 기존의 플라이 휠(엔진 등) 제조사로부터 새로운 나노기술의 창업사에 이르기까지 많은 수의 연구원 및 회사에 의해 기술 개발이 이루어지고 있음.

나. 독일

- 세계 최초로 Huntorf에 압축공기 저장소 설치(290MW급 GAES-G/T 발전의 상용 플랜트)

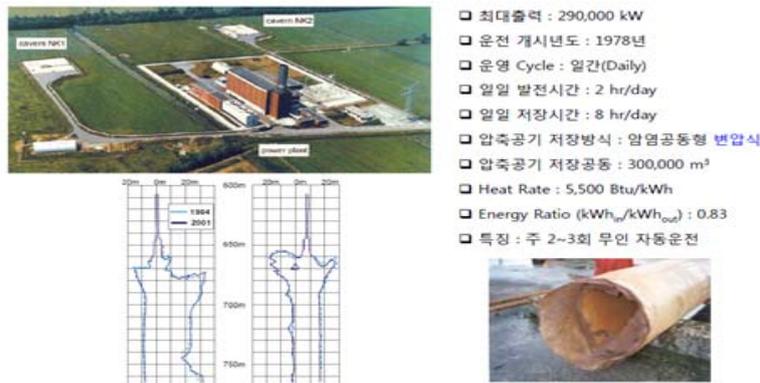


그림 2.45 독일 Huntorf CAES발전소

다. 일본

- 경제산업성 자원에너지청에서 1990년부터 12년간 조사 및 1997년부터 2000년까지 파일럿플랜트 건설과 시운전, 2001년도에 실증운전 실시

표 2.14 일본 CAES 파일럿 플랜트 기본 제원 (지식경제부, 2009)

항 목	제 원
출 력	2,000kW
발전 시간	4시간
압축 공기 충전 시간	10시간
저장 방식	변압방식
저장 압력	4~8MPa.abs
저장 공기 용량	약 1,600M3
저장 공기 온도	50℃ 이하

표 2.15 일본 CAES 파일럿 플랜트 성능시험결과

구분		발전기출력 (KW)	공기유입량 (kg/h)	연소소비량 (kg/h)	발전효율 (%: LHV)	시스템효율 (%: LHV)
정격 부하	계획치(EOR)	2,000	15,660	284.7	58.7	30.8
	실측치(2000.6.15)	1,988	16,148	291.9	57.6	31.8
	실측치(2000.8.10)	1,990	16,192	292.5	57.6	31.2
	실측치(2000.10.23)	1,987	16,173	305.3	55.1	31.0
	평균	1,988	16,171	296.6	56.8	31.3
	계획치와의 차	-12	+54	+11.9	-1.9	+0.5
25% 부하	실측치(2000.10.24)	635	9,749	132.0	41.0	20.1
50% 부하	실측치(2000.10.24)	985	12,040	172.3	48.2	24.3
75% 부하	실측치(2000.10.24)	1,527	15,772	232.2	55.1	28.1

- 2002년 특수기밀시트를 이용한 복공식 저장방식이 소개된 바 있음.
 - 기존 CAES의 큰 문제점은 압축공기 주입과 배출과정에서 효율을 크게 떨어뜨리지 않을 수 있는 가동력의 범위가 매우 한정된다는 점임.
 - 암반공동은 자연공동이나 암염공동에 비해 건설단가가 상당히 높고 지상 저장에 비해서도 높으나 암염공동에 비해 유지관리운영비가 적다는 장점이 있음.
 - 암반의 지하수압에 의한 수봉기능을 이용한 무복공식 압축공기 지하암반 저장 실험을 기후현에 위치한 카미오카(神岡) 광산의 폐갱도에서 실시함. 저장 공동은 갱도 입구로부터 수직심도 약 180 m 하부에 위치, 지표로부터 는 약 450 m 심도에 위치.

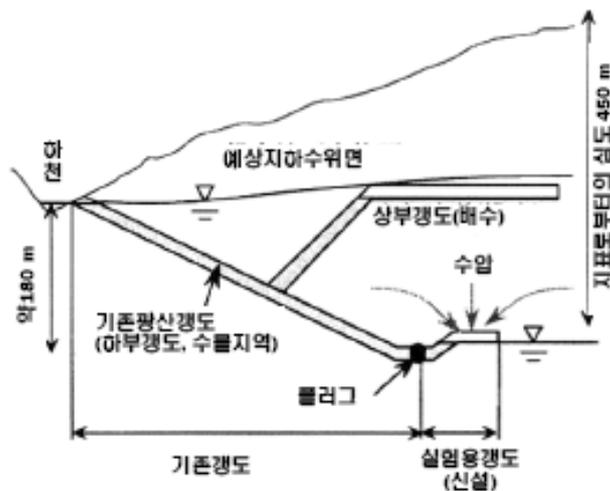
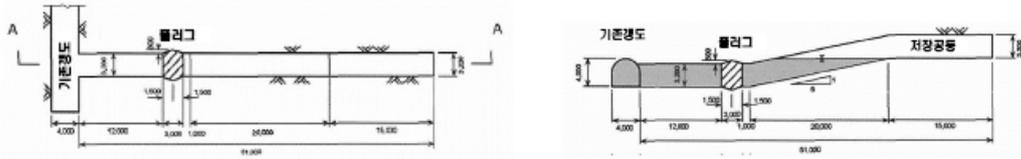


그림 2.46 무복공식 압축공기 저장 실증실험 개요(일본 전력중앙연구소, 2003)



(A) 평면도

(B) 단면도

그림 2.47 압축공기 저장공동 설계사양(일본 전력중앙연구소, 2003)

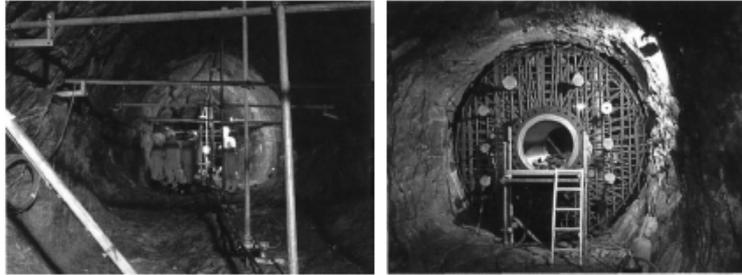


그림 2.48 압축공기 저장공동 내부 및 플러그 철근배열(일본 전력중앙연구소, 2003)

- 복공식 압축공기 지하저장터널을 포함한 CAES-G/T 발전시스템의 실용성과 안전성 확인을 목적, 기존 광산 및 기존 공동의 이용을 중심으로 대상지를 검토하여 전력계통이 근접하고 광산설비의 유지가 양호한 일본 최북단 홋카이도의 탄광을 활용하여 파일럿 플랜트 실증실험을 실시.

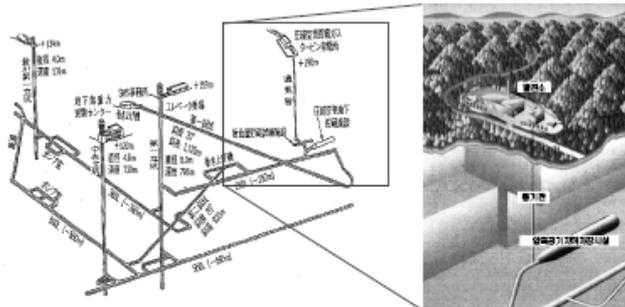


그림 2.49 대상 광산갱도 구조 및 CAES-G/T 발전시설 개념도(지식경제부, 2009)

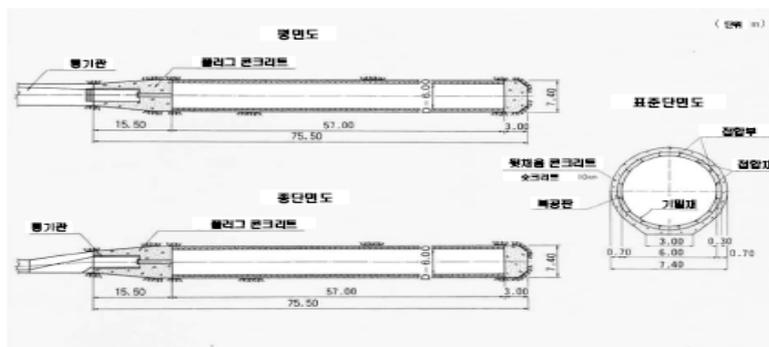


그림 2.50 복공식 압축공기 지하저장 터널 설계 단면도 (지식경제부, 2009)

2. CAES 관련 선진국 산업체의 개발 및 생산 현황

가. CAES 관련 선진국 산업체 현황

- 가스터빈 분야에서는 중국의 방대한 국내시장 규모를 바탕으로 3개의 중국회사가 세계10대 기업 안에 포함됨.
- 가스터빈 연구 개발은 GE, Siemens, Alstom, Mitsubishi 중공업 등 선진 발전 기 자재 업체들이 선점하고 있음.

표 2.16 CAES 관련 선진국의 산업체 현황

회사	용량	비고
ALSTOM	MW 급	AA-CAES project 진행
MAN TURBO	MW 급	AA-CAES project 진행
ESPC Inc.	MW 급	Alabama Plant, Small CAES concept 단계
RWE Innogy	MW 급	Isoengine 개발 진행
Mitsui	MW 급	Isoengine 개발 진행
Active Power	up to 85kW	UPS용 상용화 (Cool Air DC)
Energetix Group	~50kW	UPS 개발 진행

- CAES 관련 선진국 기술의 경제성 수준은 아래와 같음.

표 2.17 CAES 관련 선진국 기술의 경제성 수준

Technologies	Energy-related cost (\$/kWh)	Power-related cost (\$/kW)	Balance of Plant (\$/kWh)	Energy Efficiency	Commercial Maturity
CAES (geological storages)	3	425	50	0.79	Commercial products
Micro-CAES (vessels)	50	517	50	0.7	Designs available

나. 프로젝트 현황

표 2.18 CAES 프로젝트 현황

국명	약칭	개요
미국	PEPCO	<ul style="list-style-type: none"> • 1977년부터 CAES와 UPH(지하저수식양수발전)의 2가지 case에 대한 연구 실시. 1981년 최종보고 제출 • 예정장소 : 워싱턴 D.C. 북방 약 30km • 출력 : 23만 kW×4 units • 저장시설 : 약 62만m³×2(암반층 공동형) • 저장압력 : 약 70기압
	Middle South	<ul style="list-style-type: none"> • 1977년부터 연구실시, 1982년 최종보고서 제출 • 예정장소 : 미시시피주 작크슨 남서 약 40km • 출력 : 22만 kW • 저장시설 : 52.5만m³×2(암반층 공동형) • 저장압력 : 약 70기압
	PSI	<ul style="list-style-type: none"> • 1977년부터 연구실시, 1982년 최종보고서 제출 • 일리노이, 인디애나 양주에서의 대수층 파이프의 후보지조사 및 예비설계실시
	Pittsfield	<ul style="list-style-type: none"> • 1982년부터 일리노이주 핏츠필드에서 야외 test 실시 (대수층형)
	Alabama	<ul style="list-style-type: none"> • 1988년에 설계착수. McIntosh의 암염층을 이용하여, 1주간 전력부하 조정을 실시할 수 있는 10만 kW급의 CAES발전소건설
독일	Huntorf (완성)	<ul style="list-style-type: none"> • 세계최초의 실용 플랜트(1978년 운전개시) • 장소 : 브레멘 근교 • 출력 : 29만 kW(50Hz) • 저장시설 : 15만m³×2(암염층 공동형) • 저장압력 : 75기압(최대)
룩셈부르크	Vianden	<ul style="list-style-type: none"> • 모형실험이나 field test를 포함하여 각종의 study실시 중 • 예정장소 : Vianden 북서 약 30km • 출력 : 30만 kW • 저장시설 : 10만m³(암반 공동형 : 원형터널) • 저장압력 : 50기압
이태리	Sesta	<ul style="list-style-type: none"> • 1984년 현재, Sesta 근교에 출력 2.5만 kW의 시험플랜트 시험 운전중
프랑스	Bretagne	<ul style="list-style-type: none"> • 브류타뉴 남해안지구를 대상지점으로하여 출력 25만 kW의 암반공동형에 대한 문제를 중심으로 한 study실시
러시아	Donbass	<ul style="list-style-type: none"> • 출력 105만 kW의 설계를 수행 • Donbass지방의 암염층에 3개의 압기탱크를 만들
이스라엘		<ul style="list-style-type: none"> • 대수층을 이용한 출력 30만 kW의 플랜트를 설계 중

다. CAES 주요 실증 프로젝트

표 2.19 CAES 주요 실증 프로젝트

국 명	약 칭	적 요
미국	NYSEG CAES	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 1 X 150MW, Salt Mine, 2009~2013 : 건설 중
	Iowa Stored Energy Park	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 2 X 134MW, Sand Stone 2010~2014 : 지하공간 굴착 중 (~2011)
	PG&E CAES	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 300MW, Sand Stone 2010~2014 : 1단계 개발 중 (굴착, 암반샘플 채취 및 평가, 기타규제승인) 2009. 8. 미에너지국 스마트그리드실증 프로그램 보조금지원
	Gaelectric Projects	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 미정
	Norton	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 9 X 300MW, Lime Stone
	Ridge Energy Storage PJTs(2 PJTs)	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 800MW, Sand Stone
	Shell WindEnergy Texas Panhandel Wind Farm	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 미정
독일	EnBW CASE	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 600MW, Salt Dome 2007~2013 : 건설 중
	ADELE	<ul style="list-style-type: none"> 출력규모 200MW, Salt Dome 컨소시엄 구성(2010. 1.) 건설시작 예정 : 2013

3. 국내 기술 인프라·기술 인력 현황

- 2009년 11월 한국기계연구원 국제회의실에서 압축공기에너지저장(CAES) 기술설명회가 개최되었으며, “CAES 기술연구회의 취지 및 향후 사업 추진 계획”이 논의되었음.
- 한국해양연구원에서는 이산화탄소 해양지중저장 연구를 수행하고 있으며 이와 관련한 제반 공정설계 및 안전설비 시스템 연구 중임.
 - 해양 퇴적층을 대상으로 한 연간 100만톤급 이상의 이산화탄소 지중저장 후보지 탐색 및 평가
 - 이산화탄소의 수송, 주입 및 저장 시스템 공정설계 연구
 - 대용량 다단 압축, 냉각, 정제 및 액화 시스템 설계 연구
 - 이산화탄소 열사이클 시뮬레이션 및 열에너지 활용방안 연구
 - 대용량 이산화탄소 파이프라인 수송시스템 및 액화 수송선박 연구
 - 수송 및 저장지로부터의 이산화탄소 유출방지 연구
 - 이산화탄소 지중저장과 관련한 해양환경관리체계 구축 및 법/제도 기반 연구
- 한국기계연구원에서는 액분사식 에릭슨 사이클을 적용한 Micro-CAES 발전 기술 및 정압식 압축공기 저장과 관련한 선행 조사연구를 수행하고 특허를 출원함.
 - 전열면적이 넓고 열전달 특성이 좋은 스크롤기기의 특성을 이용하여 압축 시 효과적으로 냉각, 팽창 시 효과적으로 가열함으로써 중간냉각과 재열을 위한 다단 압축/팽창을 필요로 하지 않는 에릭슨 사이클을 적용한 기술을 개발함.
- 석유 비축기지 시설 경험을 바탕으로 SK건설이 1998년 CAES 예비타당성 조사연구를 수행한 바 있음.
- 한국지질자원연구원 지하공간환경연구실(송원경 박사팀)
 - 지하저장 공동의 장기안정성 확보기술과 기밀성 유지기술 확보
 - Pilot Plant site을 선정하고 지반 특성 조사 및 평가를 수행하였으며 압축공기 지하저장 공동의 단면 형상, 라이닝 제원, 플러그 제원을 결정하여 pilot plant 기본설계

제7절 기존 과제와의 중복성 검토 및 연계방안

- 현재까지 압축공기 저장기술과 관련하여 수행되었거나 수행되고 있는 연구과제는 2개 과제에 불과함
- 한국지질자원연구원에서는 기관고유사업으로 2009년부터 현재까지 “지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발” 과제를 수행하고 있으며, 과제의 주요 내용은 지하 암반내 복공식 에너지 저장 pilot plant 설계 및 기반기술 개발로 지중저장 기술에 해당됨.
- 기존 유사과제를 조사하여 차별성과 연계성을 표 2.21에 제시하였음

표 2.20 유사과제 조사 결과

사업명	과제명	부처명	발주기관	연구기간	주관연구기관	연구비 (백만원)
한국지질자원연구원 기관고유사업	지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발	지식경제부	한국지질자원연구원	2009.1.1. ~ 2011.12.31.	한국지질자원연구원	6,274
해외협력기반 조성사업	양수발전이 결합된 정압식 압축공기 저장 발전시스템의 열경제성 모델링 및 최적화 연구	교육과학기술부	한국연구재단	2010.12.01. ~ 2011.11.30	한국기계연구원	20

표 2.21 유사과제와의 차별성 및 연계방안

과제명	개요 및 연구내용	차별성 및 연계방안
<p>지하 암반내 복공식 에너지 저장시스템 개발 (한국지질자원연구원 기관고유사업)</p>	<p>지하 암반내 복공식 에너지 저장 pilot plant 설계 및 기반기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대상 부지를 선정하여 지하공동 설계를 위한 변수 연구를 진행함. - 암반의 투수성, 초기지압, 절리 특성 및 절리 구조도 분석, 암반평가 실시 - 공동간격결정을 위한 2차원 해석, 수평 주위 안정성 분석을 위한 3차원 해석 등이 이루어짐 - 지하 500m 심도, 폭 14m, 높이 22m, 길이 180m인 4개의 공동이 병렬로 배치되며 각 공동간의 간격은 46m, 압축공기의 저장압력은 50bar를 적용한 CAES 지하저장공동을 대상으로 FLAC-2D code를 이용하여 동역학적 수치해석을 수행 - 압축공기를 2개의 저장수를 내포하는 저장소에 보관함하고 수압펌프를 이용하여 저장수를 강제 이송함으로써 압축기와 터빈의 효율을 극대화할 수 있음 - 에너지 및 엑서지를 해석을 통하여, 준등온 압축, 팽창공정이 단열공정보다 더 효과적인 것으로 평가 - CAES의 경제성과 효율성을 입증하는 기준인 100MW급 지하 저장소를 건설, 시범테스트를 거쳐 향후 5년 내 각 가정에 전력 공급을 목표로 함. 	<ul style="list-style-type: none"> - 압축공기를 이용한 에너지 저장 기술이라는 점에서 유사성이 있으나, 기존의 폐공동 등을 활용하여 대규모 지중저장을 한다는 점에서 입지선정 및 대상구조물과 건설공법 등에 차이가 있음 - 본 기획과제의 경우 신재생에너지를 에너지원으로하여 압축공기를 저장하는 기술이며, 인공구조물(저장체)을 활용하여 병렬분산형의 압축공기저장을 목표로 하며, 수중에 인공저장구조물을 구축하기 위한 설계 및 시공기술 개발이라는 점에서 완전히 차별화됨 - 본 기획과제는 실증 및 실용화를 위하여 대규모 단지조성이 추진되고 있는 해상풍력에 적용하는 것으로 초점을 맞추었으며, 개발완료된 기술은 향후 조류, 파력 등의 해양에너지를 포함하여 다른 신재생에너지원에도 적용할 수 있음 - 지질자원연구원에서 수행하고 있는 지하 암반내 저장 방식과 본 기획과제에서 제안한 병렬분산형 인공구조물을 이용한 저장방식이 실용화된다면 입지조건에 따라 기술적, 경제적으로 타당한 방법을 선택적으로 사용될 수 있으므로 상호 보완적인 기술체계를 구축하여 활용범위를 넓히는 등 시너지 효과가 예상됨
<p>양수발전이 결합된 정압식 압축공기 저장 발전시스템의 열경제성 모델링 및 최적화 연구</p>	<p>기존 압축공기저장 발전과 양수발전의 문제점을 상호 보완할 수 있는 새로운 양수발전이 결합된 정압식 압축공기 저장 발전시스템의 에너지 효율, 환경성, 경제성을 고려한 최적화 기법 연구</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 본 기획과제의 경우 신재생에너지를 에너지원으로하여 압축공기를 저장하는 기술 및 인공구조물(저장체) 설계/시공 기술을 포함한 시스템 엔지니어링 기술개발이라는 점에서 차별화됨 - 현재 수행중인 과제에서 개발된 최적화 기술은 도입하여 적용함으로써 상호 기술을 연계함

제3장 기술개발 전략수립

제1절 STEEP 분석 및 이슈도출

1. STEEP 분석

- 사회경제적 이슈와 분석은 STEEP 분석 틀을 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, 산업의 성장 규모 및 시장특성과 경쟁 환경 등에 대한 분석.
 - STEEP : 국내·외적으로 현재사회와 2020년까지의 미래사회를 지배할 결정인자(혹은 이슈)들을 사회(Social), 과학기술(Technological), 경제(Economic), 생태(ecological), 정치(Political) 및 기타로 구분하여 선정하고 그 영향을 분석, 기술한 후, 이를 표로 요약함.

2. 이슈도출

- 본 기획에서는 각 이슈항목을 아래와 같이 정리함.
 - 사회적 이슈 : 신부가가치 창조, 에너지 자립화 요구, 해양개발 확대, 안전한 에너지 활용 및 개발
 - 기술적 이슈 : 기술 융합 및 진보 가속화, 기술 표준화, 극한조건 극복 기술 요구, 장수명 SOC 확대
 - 경제적 이슈 : 시장의 글로벌화, 에너지 효율적 활용, 고용창출, 비용절감
 - 환경적 이슈 : 환경규제 강화, 생태환경 관심 증대, 온실가스 배출규제 강화
 - 정치적 이슈 : 급격한 국제정세 변화, 정부 정책방향, 입법동향, 국민여론
- 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 개발에 영향을 미치는 요인을 다음과 같이 도출하였음.

(1) 사회적 이슈

- 신부가가치 창조 : 산업구조 재편에 따른 신부가가치 창출 분야 도출 필요성 증대

- 에너지 자립화 요구 : 화석에너지 대체할 수 있는 신재생에너지 활용 극대화
- 해양개발 확대: 해양공간에서의 에너지저장시설의 효율적 구축
- 안전한 에너지 활용 및 개발: 에너지 활용 및 개발 측면에서 자연 및 인공 재해에 따른 피해 최소화

(2) 기술적 이슈

- 기술 융합 및 진보 가속화: 다학제적 기술 융합을 통한 기술 개발
- 기술 표준화: 신재생에너지 이용 저장기술 표준모델 개발 및 세계기술 선도
- 극한조건 극복 기술 요구: 열악한 환경조건을 극복할 수 있는 압축공기저장 시설 설계/시공기술 개발
- 장수명 SOC 확대: 구조물의 내구성 증대 및 모니터링 기술 개발

(3) 경제적 이슈

- 시장의 글로벌화: 시장의 글로벌화에 따른 내수시장보호 및 수출산업 육성 필요
- 에너지 효율적 활용: 에너지 저장기술 적용을 통한 신재생에너지 전력품질 향상
- 고용창출: 압축공기저장기술 산업화에 따른 고용 확대
- 비용절감: 에너지 저장에 의한 신재생에너지 발전 효율 및 개발 경제성 향상

(4) 환경적 이슈

- 환경규제 강화: 해양플랜트 입지 및 건설 환경기준 강화
- 생태환경 관심 증대: 생태친화적 설계/시공 기술개발
- 온실가스 배출규제 강화: 신재생에너지 개발 및 이용 확대
- 해양환경보전 강화: 환경변화 및 환경영향 최소화 기술 개발

(5) 정치적 이슈

- 급격한 국제정세변화: 원유 수급 불균형 및 국제유가상승으로 인한 신재생에너지 개발 요구
- 정부 정책방향: 신재생에너지 발전전력 저장시설 구축과 관련된 정부의 적극적인 정책추진 의지
- 입법동향: 신재생에너지 생산 및 저장 관련 법/제도 제정 및 정비
- 국민여론: 압축공기저장시설구축에 대한 국민적 공감대 형성

○ 다음 표에 가중치에 따른 도출된 순위 제시

표 3.1 STEeP 분석 결과

환경 요인	주요이슈		해당 프로그램에 미치는 영향요인	영향요인의 가중치				
				단기	중기	장기	평균	순위
S	S1	신부가가치 창조	산업구조 재편에 따른 신부가가치 창출 분야 도출 필요성 증대	1.7	2.1	2.3	1.98	17
	S2	에너지 자립화 요구	화석에너지 대체할 수 있는 신재생에너지 활용 극대화	2.0	2.5	2.6	2.33	5
	S3	해양개발 확대	해양공간에서의 에너지저장시설의 효율적 구축	2.0	2.5	2.5	2.28	7
	S4	안전한 에너지 활용 및 개발	에너지 활용 및 개발 측면에서 자연 및 인공 재해에 따른 피해 최소화	1.9	2.2	2.2	2.10	11
T	T1	기술 융합 및 진보 가속화	다학제적 기술 융합을 통한 기술 개발	2.5	2.3	2.2	2.30	6
	T2	기술 표준화	신재생에너지 이용 저장기술 표준모델 개발 및 세계기술 선도	2.0	2.0	2.3	2.07	12
	T3	극한조건 극복 기술 요구	열악한 환경조건을 극복할 수 있는 압축공기저장시설 설계/시공기술 개발	2.2	2.3	2.5	2.28	7
	T4	장수명 SOC 확대	구조물의 내구성 증대 및 모니터링 기술 개발	2.0	2.1	2.1	2.05	14
E	E1	시장의 글로벌화	시장의 글로벌화에 따른 내수시장보호 및 수출산업 육성 필요	1.5	2.1	2.4	2.00	16
	E2	에너지 효율적 활용	에너지 저장기술 적용을 통한 신재생에너지 전력품질 향상	2.1	2.7	2.7	2.48	2
	E3	고용창출	압축공기저장기술 산업화에 따른 고용 확대	1.4	2.0	2.0	1.78	20
	E4	비용절감	에너지 저장에 의한 신재생에너지 발전 효율 및 개발 경제성 향상	1.9	2.3	2.5	2.22	9
e	e1	환경규제 강화	해양플랜트 입지 및 건설 환경기준 강화	1.8	1.9	2.0	1.88	19
	e2	생태환경 관심 증대	생태친화적 설계/시공 기술개발	1.7	2.0	2.1	1.90	18
	e3	온실가스 배출규제 강화	신재생에너지 개발 및 이용 확대	2.0	2.7	2.7	2.43	4
	e4	해양환경 보전 강화	환경변화 및 환경영향 최소화 기술 개발	2.0	2.0	2.2	2.02	15
P	P1	급격한 국제 정세변화	원유 수급 불균형 및 국제유가상승으로 인한 신재생에너지 개발 요구	2.3	2.7	2.5	2.47	3
	P2	정부 정책방향	신재생에너지 발전전력 저장시설 구축과 관련된 정부의 적극적인 정책추진 의지	2.3	2.7	2.5	2.50	1
	P3	입법동향	신재생에너지 생산 및 저장 관련 법/제도 제정 및 정비	2.1	2.3	2.2	2.18	10
	P4	국민여론	압축공기저장시설구축에 대한 국민적 공감대 형성	2.1	2.2	2.0	2.07	12

* 단기: 2015년 이내, 중기: 2016~2020년, 장기: 2021년 이후

* 가중치는 1, 2, 3점을 부여

3. 이슈트리(Issue Tree)

- 환경분석(STEeP)을 통해 이슈 트리 산정
 - 에너지자립화, 해양개발, 기술융복합, 친환경 녹색성장
- 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술의 주요 R&D 수요에 근거하여 3개의 중점목표 선정
 - 압축공기 저장소 건설 기술 확보
 - 압축공기의 에너지화 기술 개발
 - 압축공기 저장 실증단지 구축

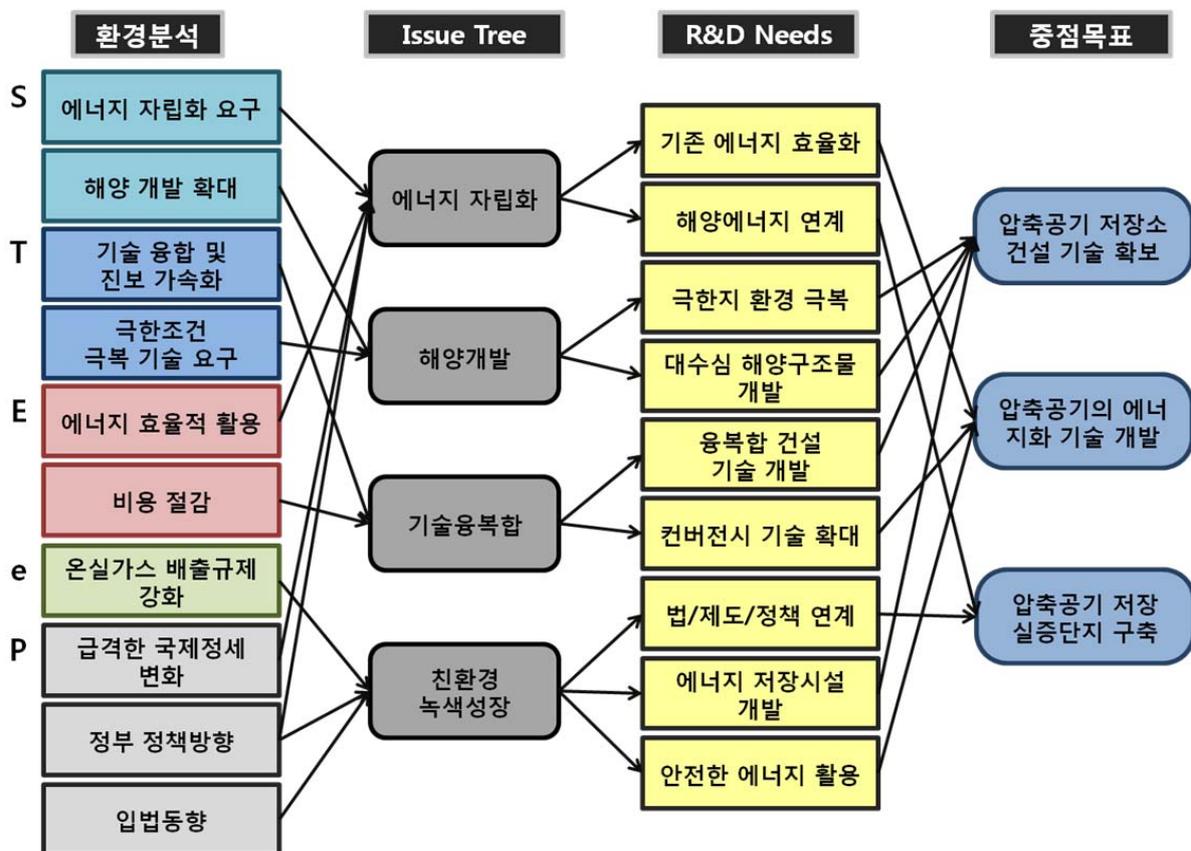


그림 3.1 이슈트리

제2절 SWOT 분석 및 대응전략

- SWOT 분석은 압축공기 발전전력 에너지저장 분야에 대해 국내에서 보유한 내부 자원 및 능력의 강점과 약점을 가감 없이 분석하고 주변 여건의 위협과 그로부터 오는 도약과 발전의 기회를 정량적으로 파악하기 위해 실시함.
- 이를 바탕으로 약점을 보완하고 위협에 대처하기 위한 전략 및 강점을 바탕으로 기회를 활용하기 위한 전략을 제시함.
- 대응전략에서는 SWOT 분석 결과에서 도출된 강점분야 및 약점분야의 이슈에 대응하는 전략을 수립함.
- SO 전략(시너지 창출 전략)
 - 토목 및 기계분야의 높은 기술력과 전문인력을 활용한 융합기술 개발
 - 해상풍력, 해양에너지와 연계된 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 개발
 - 기술개발을 통한 에너지저장분야 국제시장 선도
 - 민간 기업의 참여를 통한 실용화/상용화 기술 개발
- WO 전략 (보완 전략)
 - 인공구조물을 이용한 압축공기 저장기술 개발로 입지부족의 한계 극복
 - 병렬분산형 CAES 개발을 통해 큰 규모의 에너지원에 대한 압축공기 저장방식 활용
 - Pilot test 및 Test-bed 구축을 통한 개발기술의 검증
- ST 전략 (위험 최소화 전략)
 - 인공저장기술 개발에 주력하여 기술 선진국의 기술과 차별화함
 - 정부의 투자 및 지원을 통한 초기진입 시의 부담을 해소
 - 신재생에너지 효율을 최대한 끌어올릴 수 있는 방안 마련
- WT 전략 (위험 극복 전략)
 - 인공저장체 기술 개발로 천연 저장입지 부족문제 해결
 - 신재생에너지원에 대한 맞춤형 CAES 구축기술 확보를 통한 에너지 자립화
 - 국내자체 기술 개발을 통한 국외 기술의존도 및 기술격차 최소화
 - 정부차원의 지원을 통해 기술력 확보

표 3.2 SWOT 분석 및 대응전략 수립

<div style="text-align: center;">내부환경요인</div> <div style="text-align: center;">외부환경요인</div>	강점(s)	약점(W)
		<ul style="list-style-type: none"> • 건설 및 플랜트 산업의 높은 기술력 • 토목/기계 분야 전문인력 풍부 • 해상풍력, 조류, 파력 등 해양에너지 개발 여건이 특히 우수 • 정부의 신재생에너지 개발에 대한 투자 확대
기회(O)	SO 전략 (시너지 창출전략)	WO 전략 (보완전략)
<ul style="list-style-type: none"> • 신재생에너지 전력생산 비중 확대 및 전력품질 향상에 대한 요구 증대 • 에너지저장분야는 시장 미성숙 산업으로 Global 건설시장 초기 진입 가능 • 에너지저장을 통해 발전효율 극대화 및 CO₂ 저감에 의한 CDM 사업화 가능 • 해상풍력 대규모 단지개발이 추진되고 있음 • 신재생에너지 기술 개발에 대한 민간의 관심 높음 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 토목 및 기계분야의 높은 기술력과 전문인력을 활용한 융합기술 개발 ✓ 해상풍력, 해양에너지와 연계된 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 개발 ✓ 기술개발을 통한 에너지저장분야 국제시장 선도 ✓ 민간 기업의 참여를 통한 실용화/상용화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 인공구조물을 이용한 압축공기 저장기술 개발로 입지부족의 한계 극복 ✓ 병렬분산형 CAES 개발을 통해 큰 규모의 에너지원에 대한 압축공기 저장방식 활용 ✓ Pilot test 및 Test-bed 구축을 통한 개발기술의 검증
위협(T)	ST 전략 (위험 최소화 전략)	WT 전략 (위험극복전략)
<ul style="list-style-type: none"> • 미국, 독일 등의 기술 선진국에 의한 기술 독점화 우려 • 세계 각국 기술선점 경쟁 심화 • 미국 등 에너지저장분야 연구개발 투자 확대 • 중국 등 신흥경제대국의 신재생에너지 관련 기술의 급성장 • 신재생에너지 개발 시 초기투자비용이 큼 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 인공저장기술 개발에 주력하여 미국, 독일 등 기술 선진국의 기술과 차별화함 ✓ 정부의 투자 및 지원을 통한 초기진입 시의 부담을 해소 ✓ 신재생에너지 효율을 최대한 끌어올릴 수 있는 방안 마련 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 인공저장체 기술 개발로 천연 저장입지 부족문제 해결 ✓ 신재생에너지원에 대한 맞춤형 CAES 구축기술 확보를 통한 에너지 자립화 ✓ 국내자체 기술 개발을 통한 국외 기술의존도 및 기술격차 최소화 ✓ 정부차원의 지원을 통해 기술력 확보

제4장 연구비전 및 목표

제1절 기술발전 시나리오

1. 기술발전 시나리오

- 본 절에서는 기획연구의 목적에 부합하여 신재생에너지 발전기술과 에너지저장기술의 융합가능성을 살펴보고 현재의 기술-산업 발전단계를 고려하여 융합된 기술의 기술발전 시나리오를 제시하고자 한다.
- 신재생에너지 발전자원 중 에너지장시설의 필요성과 시급성은 표 4.1과 같으며, 현재의 기술-산업 동향을 고려한 연구개발 성과에 의한 과급효과를 고려할 때 풍력발전기술과 에너지 저장기술의 융합 기술이 주목을 받을 것으로 예상된다. 특히, 해상풍력발전의 경우 전세계적으로 개발이 가속화되고 있으므로 에너지저장시설의 필요성과 시급성이 높다고 할 수 있다.

표 4.1 신재생에너지 발전 기술과 융합가능한 에너지 저장기술

신재생에너지 발전기술	에너지 저장기술의 필요성 및 시급성	에너지저장시설		융합가능한 저장기술
		필요성	시급성	
해상풍력발전기술	-풍량에 따라 발전전력의 생산가변성 발생 -해상풍력단지 프로젝트가 다수 계획 및 추진되고 있음 -에너지 저장기술을 활용한 생산전력의 안정화가 요구 -육상풍력에 비해 대용량 터빈이 적용됨 -해상풍력단지의 입지가 육상에서 멀리 떨어져 있으므로 해상에서 적용할 수 있는 에너지 저장시설 및 기술 필요	높음	높음	-CAES -2차전지 -플라이휠
육상풍력발전기술	-에너지 저장기술의 필요성은 크게 요구됨 -풍력발전기술이 점차 해상으로 입지를 확장하고 있음 -에너지 저장 기술 연구개발에 의한 과급 효과가 해상풍력에 비해 낮을 수 있음 -풍력터빈의 용량이 다양하게 설치되고 있으며, 소규모 터빈의 설치가 많으며 수용가와 비교적 가까움	높음	중간	-CAES -2차전지 -플라이휠

신재생에너지 발전기술	에너지 저장기술의 필요성 및 시급성	에저지저장시설		융합가능한 저장기술
		필요성	시급성	
태양광발전기술	-에너지 저장기술이 요구되지만 일광의 특성상 발전전력이 높은 주기성을 지니고 있음 -다른 발전기술과 연계하여 상호 보완적 전력 생산을 하는 것이 경제적인 것으로 예상 -주간 전력소비가 많은 산업의 기저전력으로 활용가능	중간	중간	-CAES -2차전지
조력발전기술	-조수의 특성상 발전전력이 높은 주기성을 지니고 있으나 조수의 시간대가 변경되므로 에너지 저장기술이 요구됨 -대규모 개발이 가능한 에너지원이므로 대규모의 에너지저장기술의 적용이 필요함	중간	중간	-양수발전 -CAES
조류발전기술	-에너지 저장기술이 요구되지만 조류의 특성상 발전전력이 주기성을 지님 -다른 발전기술과 연계하여 상호 보완적 전력 생산을 하는 것이 경제적인 것으로 예상	중간	중간	-CAES -2차전지
파력발전기술	-에너지 저장기술이 요구되지만 파력발전기술이 연구개발 단계에 있음 -해상조건에서 적용가능한 저장기술 필요	높음	낮음	-CAES -2차전지
바이오디젤	-생산량을 조절할 수 있으므로 현재의 기술로 저장이 가능	낮음	낮음	-
바이오가스 발전	-생산량을 조절할 수 있으므로 현재의 기술로 저장이 가능	낮음	낮음	-

- 현재의 CAES 기술은 발전전력 설비와 연계하여 발전 효율을 높이는 기술과 무정전 전원장치 또는 공기자동차와 같이 소형의 용기에 고압의 압축공기를 이용하여 동력을 얻는 기술로 대표될 수 있다. 그러나 CAES 기술은 에너지 저장 기술의 하나로 융합될 수 있는 기술분야가 다양하며, 최근에는 독일, 미국에서 내어놓는 에너지 정책에서 찾아볼 수 있듯이 신재생에너지 발전전력의 생산가변성 문제를 해결하기 위한 수단으로 주목받고 있다.

- 2차전지를 이용한 에너지 저장기술은 활용가능성 및 과급효과가 높을 것으로 판단되지만 2차전지 성능 개선 연구를 통한 경제성 확보 시 비교적 쉽게 신재생 에너지 발전시설 및 스마트 그리드와 연계될 수 있으므로 2차전지의 성능향상을 목적으로 기술개발이 진행될 것으로 예상된다.
- 2차전지의 경우 육상에서의 신재생에너지원에 연계하여 적용될 것으로 예상되며, 해상의 경우에는 유지보수와 수명 측면에서 장기간 운영을 위한 내구성이 확보되어야 하는 문제가 있으므로 해상에 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 예상되어 해상풍력과 조류, 파력 등의 해양에너지와 연계될 수 있는 에너지저장기술 개발이 필요할 것으로 예상된다.
- 해상풍력과 조류, 파력에너지 등의 신재생에너지원 중에서 해상풍력의 대규모 개발이 가장 가시화되어 추진중에 있으므로 해상풍력에 적용할 수 있는 저장기술개발이 가장 시급할 것으로 예상된다.
- CAES 기술의 경우, 풍력발전기술과 다음과 같은 두가지 형태로 연계될 수 있다.
 - 첫째, 그림 4.1과 같이 풍력발전단지에서 생산되는 전력 중 잉여 전력을 CAES 발전 시설의 압축기 가동에 사용하여 발전효율을 개선하는 융합기술. 이 경우 대규모(수백MW급~GW급)의 중앙집중형 압축공기 저장 시설이 요구되며, 발전효율 증대에 따른 단위 발전량 당 생산 원가를 단축할 수 있다.
 - 둘째, 그림 4.2와 같이 풍전발전시설의 전력생산변동성을 완화하기 위한 융합기술. 이 경우 중소규모(수MW급)의 압축공기 저장 시설이 요구되며, 이를 연계하여 대규모 저장 기능을 달성할 수 있다. 해상풍력단지에 적용하기 위해서는 압축공기 저장소는 해상에서 수중에 위치하는 것이 유리할 것임.



그림 4.1 CAES 기술발전 시나리오 1 - 대규모 압축공기저장



그림 4.2 CAES 기술발전 시나리오 2 - 중소규모 압축공기저장

표 4.2 기술발전 시나리오의 비교

	시나리오 1 대규모 압축공기저장	시나리오 2 중소규모 압축공기저장
압축공기 저장 시설	<ul style="list-style-type: none"> -수백MW에서 GW급의 압축공기 저장 시설이 요구됨. -지중 저장의 형식이 가능하며 지질학적 입지의 영향을 받음 -초기 지중응력에 따라 저장될 수 있는 압축공기의 최대압력이 결정됨 	<ul style="list-style-type: none"> -MW급의 압축공기 저장 시설이 요구되며, 용기형태의 저장 구조물을 이용하여 저장가능 -인공구조물을 이용하므로 입지의 영향이 적음 -저장구조물의 저장용량에 따라 최대 저장 압력이 결정됨 -기존의 재료의 한계를 극복할 수 있는 재료 또는 설계 형식이 요구됨
발전시설	-기존의 화력발전소 설비 이용	-가스터빈 또는 공기터빈 이용
발전규모	GW급	MW급
기술목표	-잉여전력을 활용한 발전효율 개선	-풍력발전전력의 안정화
예상되는 문제점	<ul style="list-style-type: none"> -지중저장시설의 초기 투자비 -기존 화력발전소와의 연계가능성 -미국, 독일의 기술선점에 의한 시장진입의 어려움 -풍력발전단지에서 생산되는 전력규모가 증가될수록 압축기에 작용되는 전력의 변동량이 증가되며, 대규모의 공기압축시설이 요구된다. 	<ul style="list-style-type: none"> -새로운 발전 형식으로 기존의 풍력발전 방식과 비교하여 경제성 검토가 요구된다. -고압을 견딜 수 있는 압축공기 저장 시설의 개발이 요구된다.
장점	<ul style="list-style-type: none"> -외국의 기술을 도입하여 일정 수준이상의 기술 발전을 이룰 수 있다. -이미 상용화되어 가동 중인 시설이 존재한다. 	<ul style="list-style-type: none"> -풍력에너지를 안정적으로 생산할 수 있다. -공기터빈을 이용할 경우, 화석연료를 사용하지 않고 전력을 생산할 수 있다.

2. 전략적 연구개발 목표 수립

- 기술발전 시나리오 1의 경우, 미국과 독일의 기술 선점으로 인한 시장 진입의 어려움이 존재하며, 지식경제부의 “에너지저장 기술개발 및 산업화 전략(K-ESS 2020)”(2011. 5. 31.)에서 2017년부터 대규모 발전소용 수백 MW급 에너지 저장 실증을 추진할 계획이 수립되어 있음
- 따라서, 기술발전 시나리오 1에 대한 기술개발은 지식경제부 주도로 중앙집중형 대규모 저중저장 기술 개발이 추진될 것으로 예상됨
- 기술발전 시나리오 2에서 가스터빈을 이용하는 경우, 발전 시스템이 시나리오 1과 같으며, 저장시설의 규모 확대 또는 병렬분산형 연계를 통해 발전용량을 GW단위 이상으로 증가시킬 수 있다. 따라서, 연구개발단계에서는 MW급 단위 발전용량 터빈을 대상으로 연구를 수행하는 것이 전략적으로 타당할 것이다.
- 기술발전 시나리오 2에서 풍력발전기에서 전기를 생산하여 공기를 압축하는 것보다 직접적으로 공기를 압축하는 시스템이 효율이 높을 것이다. 그러나 풍력기를 통해 공기를 직접적으로 압축하는 시스템은 새로운 개발을 진행해야 한다.
- 기술발전 시나리오 2에서 공기터빈을 이용하는 경우, 화석연료 없이 발전이 가능하므로 획기적인 융합기술이 될 수 있으나 공기터빈 자체의 효율개선연구가 요구된다.
- 따라서, 신재생에너지의 효율적 활용을 위한 CAES 조성 및 운영에 있어서 다음과 같은 전략적 목표를 세울 수 있다.
 - **MW급의 병렬분산형 압축공기저장 구조물 조성**
 - 공기압축시스템은 전기를 이용하는 방식이 일반적이거나, 해상풍력의 경우 터빈 블레이드를 직구동하여 압축하는 방식도 가능함. 전기를 이용하는 **기존의 압축기술을 최대한 활용하는 공기압축시스템**과 함께 에너지 변환 단계를 축소할 수 있는 **혁신적인 디자인의 직구동 형태의 공기압축시스템 개발**을 경쟁적으로 진행(상호 비교 검토를 통해 보다 효율적인 시스템 개발)
 - **실증 연구를 통한 기술의 타당성 확보** 이후 규모 확대



그림 4.3 전략적 연구목표에 의한 기술개발 시나리오

- 공기압축시스템은 전기구동 압축공기저장시스템이 일반적인 방식으로 볼 수 있으나, 해상풍력의 경우 터빈 블레이드를 직구동하여 압축하는 방식도 가능함.
- 전기를 이용하는 공기압축시스템은 기존의 풍력발전시스템을 이용하는 방식이며, 직구동 공기압축시스템은 기존의 풍력시스템의 변환이 요구되는 혁신적인 방법임.

표 4.3 전기구동방식과 풍력 블레이드 직구동 방식의 특성 비교

분류	전기구동 압축공기저장시스템	풍력 블레이드 직구동 압축공기저장시스템
압축기 구동원	풍력발전 전력 구동	블레이드 회전 동력에 의한 유압구동
압축방식	공기 직접 압축	압축유체를 이용한 공기압축
압축기 운전	정격 전력에서 가동	임의 전력에서 가동
압축효율	중저	중고
기존압축기 활용가능 여부	일부활용가능(열교환기 부분은 개발 필요)	신규개발
압축기 용량	중소용량	대용량

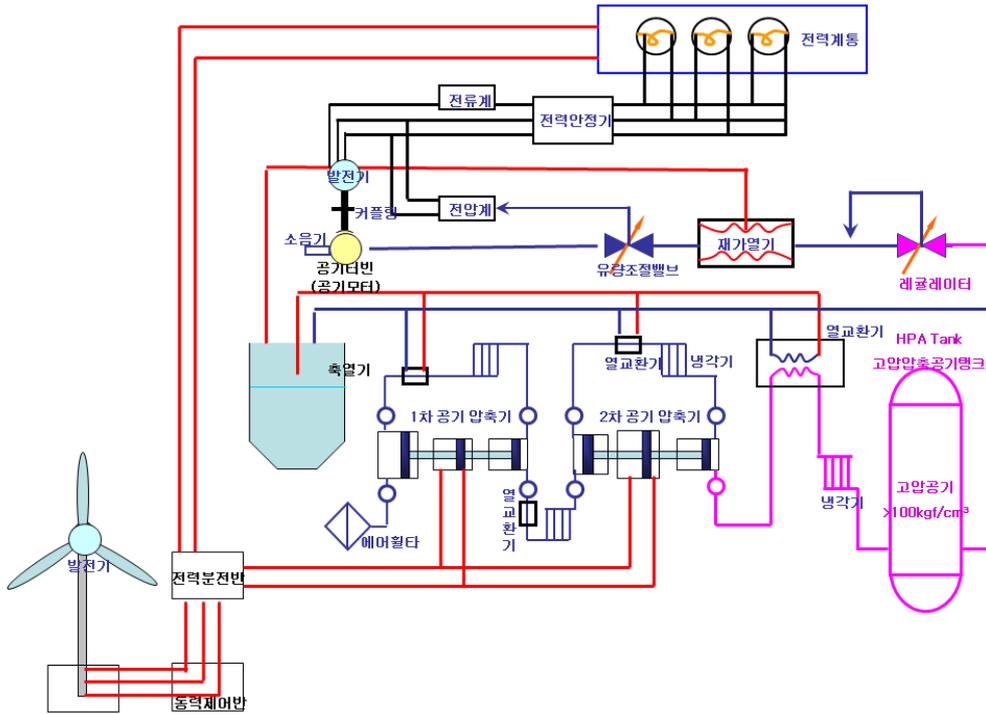


그림 4.4 전기구동식 압축공기 저장시스템 개념도

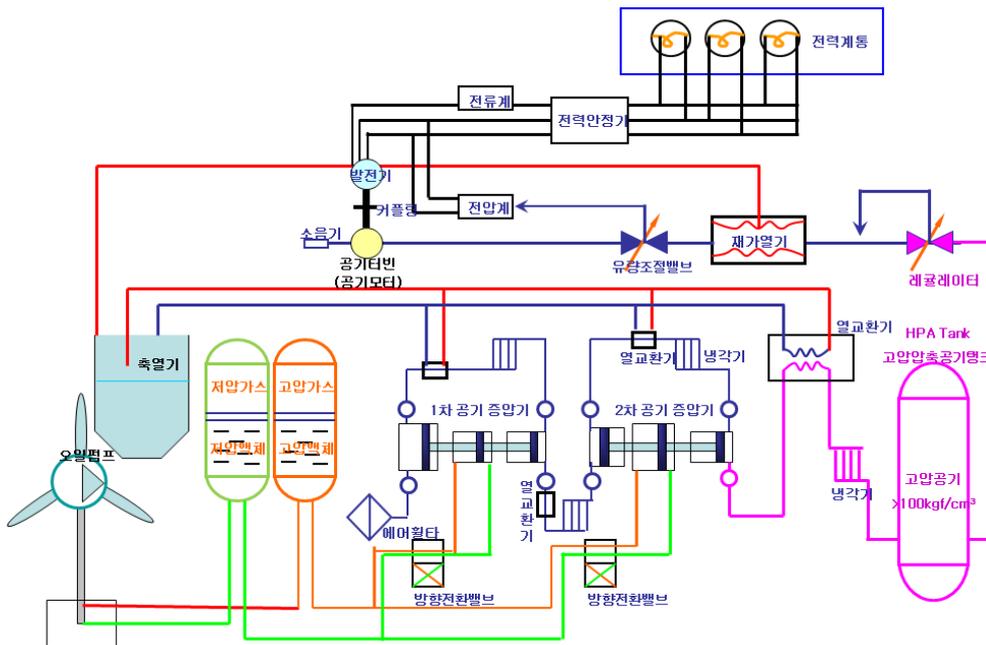


그림 4.5 풍력블레이드 직구동 압축공기 저장시스템 개념도

- 본 과제에서는 전기구동식 CAES 시스템과 에너지 변환 단계를 축소할 수 있는 혁신적인 디자인의 풍력 블레이드 직구동 CAES 시스템 개발을 동시에 추진하여 상호 경쟁 및 보완을 통해 기술개발을 추진하는 것으로 제안함

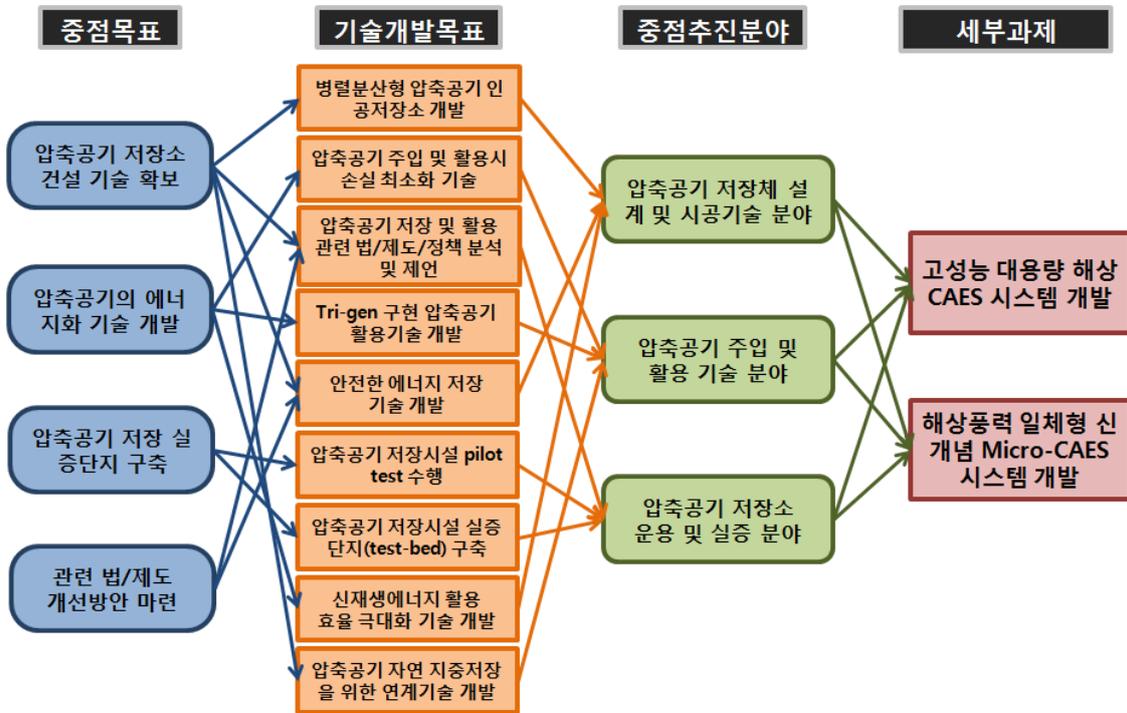


그림 4.6 전략적 연구목표에 따른 세부과제 구성

제2절 비전 및 목표 수립

- 환경분석 및 주요 R&D 수요에 근거하여 도출된 중점 목표를 통해 실현 가능한 연구비전을 제시
 - 『병렬분산형 CAES 시스템 실용화/상용화로 신재생에너지 활용 증대 및 세계 3대 에너지저장산업 강국 도약 기여』
- 비전 달성을 위한 연구목표를 『100MW급 Test-bed 구축을 위한 병렬분산형 CAES 기반기술 확보』로 수립함
- 연구의 비전을 실현하기 위해 수행되어야 할 주요연구 요소
 - 압축공기 저장시설 설계 및 시공 기술
 - 압축공기 주입 및 활용 효율 증대 기술
 - CAES Pilot test
 - CAES 관련 법/제도 개선방안 연구



그림 4.7 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 기획연구 비전

○ 비전 실현을 위한 중점목표 및 핵심요소기술

표 4.4 비전 실현을 위한 핵심요소기술

중점 목표	핵심 요소기술
압축공기 저장시설 (CAES) 개발 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 지중 및 수중 저장식 CAES 설계 및 시공 기술 - Micro-CAES를 이용한 해양에너지 복합발전 설계 및 시공 기술 - 병렬식 압축공기 저장모듈(CAES) 설계, 제작 및 시공 기술 - 신재생에너지 발전시설물을 이용한 압축공기 저장시설 설계 및 시공기술
압축공기의 효율적 주입 및 활용기술	<ul style="list-style-type: none"> - 발전과 저장의 하이브리드 연계 기술 (신재생에너지의 양방향 활용 기술) - Tri-Gen (전력, 냉방, 난방) 에너지를 활용 기술
CAES 모니터링 및 유지관리 기술	<ul style="list-style-type: none"> - Smart Grid 연계기술 - 지반과 구조물의 통합모니터링 기술 - 압축공기 저장시설(CAES) 유지관리 기술

제3절 핵심과제 도출

1. 핵심과제 도출 과정

- 설정된 연구목표를 달성하기 위한 실행방안으로서 핵심기술군 및 핵심개발과제의 도출과정은 다음과 같음.

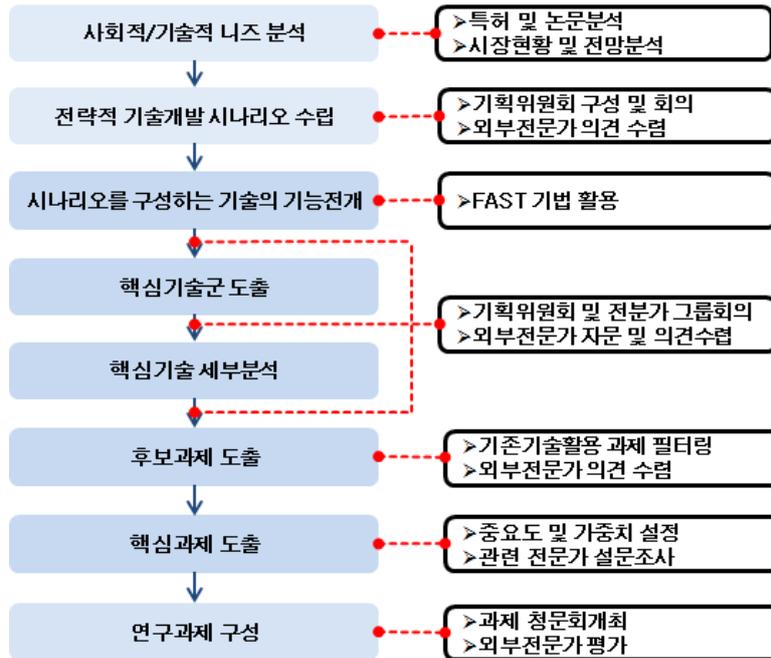


그림 4.8 핵심과제 도출과정

2. 기술기능전개 및 기술트리

가. 기술 기능전개(FAST: Function Analysis System Technique)

- FAST(Function Analysis System Technique)는 총괄목표(R&D 과제)의 세부목표(단계별목표, 중점기술개발과제, 핵심기술과제, 요소기술)를 도출하기 위한 기본적인 분석활동임.
- FAST 전개방법
 - 목표(R&D 과제)의 ‘원리구조/프로세스’에 따라 ‘목적기능’과 ‘기본기능’의 2계층으로 구조화함.
 - 기능 레벨을 낮추어 ‘기본기능 - 2차기능 - 3차기능’등의 다계층 구조화도 가능함.
- 『신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 개발 기획』의 기술 기능전개는 압축공기 저장 시설을 건설 및 운영하기 위한 작업과 관련하여 설정함.
 - 기본 기능을 계획수립 기능, CAES 구조물 설계 및 시공 기능, 압축공기 주입 및 활용 기능, 모니터링 및 유지관리 기능의 4단계로 구분
 - 4가지 기본 기능에 대해 2차 기능, 3차 기능으로 세분화함.
 - 3차 기능에 대해서는 요소기술과 연계하여 추후 요소기술 분석에 활용함.

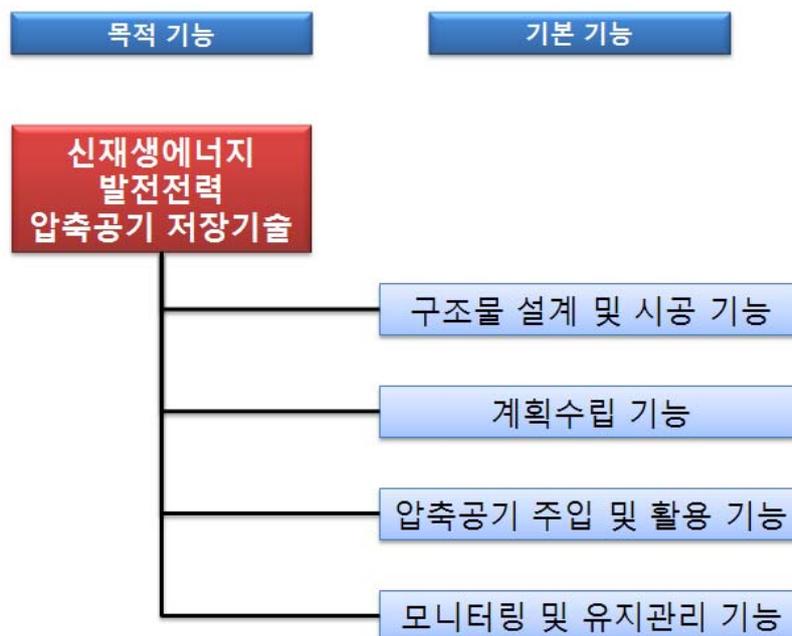


그림 4.9 기술기능전개(FAST)

나. 기술 트리(Technology Tree)

- 기술트리는 FAST에 의해 정의된 기본기능의 세부기능들을 구현하고, 최하위 세부 기능들의 기술을 도출하기 위해 수행.
 - 기본기능에 맞추어, 관련기능을 2차기능 - 3차기능 - 4차기능 관계로 구성
 - 도출된 최하위 세부 기능별로 세부 기술 도출
 - 기본기능별로 FAST와 도출된 기술을 트리 형태로 제시

표 4.5 기술트리-기본 기능 #1 : 계획 수립 기능

기본 기능	2차 기능	3차 기능	세부 기술
계획 수립	입지분석 및 적지선정	현장조사	해양지반 원위치 시험 기술
			해저토사 및 해저암반용 시료채취 기술
			해저지반 물리탐사 기술
			국내 연안 지반정보 지도 구축 기술
			지하공동 탐사 기술
		해양특성분석	파랑 관측 및 분석 기술
			조류 관측 및 분석 기술
			조석 관측 및 분석 기술
			부유사 관측 및 분석 기술
			해양하중 산정 기술
			해양특성 DB 구축 기술
		타당성 평가	인공지능형 전문가 시스템
			VR을 이용한 설계/시공성 평가 기술
			경제성 평가 및 민감도 분석
			파급효과 분석
	환경영향 평가 및 예측	해양물리환경 변화 평가 및 영향예측	해양물리환경 모니터링 및 분석 기술
			해양물리환경변화 예측 기술
			침식/퇴적 영향 평가 및 예측 기술
			해양물리환경변화 최소화 기술
		생태환경변화 평가 및 영향 예측	해양생태 영향 평가 및 예측
			생태 가치 평가 기술
해양생태 영향 최소화 기술			

표 4.6 기술트리-기본 기능 #2 : 구조물 설계 및 시공 기능

기본 기능	2차 기능	3차 기능	세부 기술
설계 및 시공	인공저장체 설계/시공	인공저장체 지지시스템 기술	인공저장체 지중 거동해석 및 설계 기술
			기초지반 지지력 해석 기술
			기초 진동 및 피로해석 기술
			세굴심 예측 및 세굴 방지공 기술
			내압 인공저장체-파랑-지반 상호작용 해석 기술
			지중굴착 및 토류구조물 설계 기술
			인공저장체 지반보강기술
			해중구조물 계류시스템 설계/해석 기술
		인공저장체 최적구조/ 신재료 기술	인공저장체 최적형상 설계 기술
			복합단면구조 기술
			다축 압축 상태 콘크리트 거동(비선형&파괴) 해석 기술
			콘크리트 내구성(염소이온 침투 및 부식) 예측 및 해석 기술
			다축 프리스트레싱(multi-axialprestressing) 설계기술
			다 방향성(multi-directional or rotational) 균열 예측 기술
			콘크리트 장기변형(크리프 및 수축) 예측 기술
			수밀 콘크리트 배합 설계 기술
			고성능 콘크리트 재료기술
			경량골재 콘크리트 기술
			신소재 Membrane Lining/barrier 개발
			탱크 구조해석 /설계
		고온 거동해석	
		구조물 국부설계	
		열응력 해석 및 부재설계기술	
		동적 하중 안정성 해석/평가 기술	
		충돌/폭발/화재 해석	
		인공저장체 시공 기술	토사 및 암반 굴착기술
			지반 및 구조물 보강 시공기술
			콘크리트 시공성능(충전&다짐) 예측 및 유동성 제어 기술
			프리캐스트 콘크리트 부재간 접합 및 접착 기술
			다축 프리스트레싱(multi-axialprestressing) 시공기술

표 4.7 기술트리-기본 기능 #3 : 압축공기 주입 및 활용 기능

기본 기능	2차 기능	3차 기능	세부 기술
압축 공기 주입 및 활용	압축공기 주입기술	고압 다단 압축기	성능해석 기술
			설계, 제작 및 제어 기술
			재생에너지 연계 기술
		유체(유압) 압축 시스템	설계 및 제작 기술
			시스템 연계 기술
			대용량 압축공기 수송관 설계 기술
	압축공기 수송시스템	수송시스템 안전해석 기술	
		압력 레귤레이터 설계 및 제작 기술	
		정압식 저장 기술	
	압축공기 활용기술	고팽창비 팽창기(터빈)	성능해석 기술
			설계, 제작 및 제어 기술
		저공해 연소기	저공해 연소 기술
			외연방식 연소기 기술
		전동발전기 기술	대용량 고속 전동발전기 설계/해석 기술
			대용량 전동발전기 제작/평가 기술
			대용량 PMSM용 영구자석 착자기술
		전동발전기 제어기술	회생형 멀티레벨 컨버터 설계/제작기술
			고압전동기 제어 기술
			계통연계용 발전기 제어 기술
			LVRT 기능을 갖는 전동발전기 제어 기술
			UPS시스템 연계기술
	열에너지 이용기술	열교환기 기술	고온, 고압용 열교환기 설계 기술
			고온용 재료 기술
			대용량화 기술
		열에너지 저장	열교환 성능 및 신뢰성 향상 기술
			축열조 설계 기술
			대용량 열추출 기술
		열에너지 수송	축열(현열, 잠열) 물질 개발
			수송 매체 개발
			누설 감지 기술
		냉난방 열 활용	열손실 저감 기술
	히트펌프 설계/적용 기술		
	신재생에너지연계		
	해수담수기	사이클 설계 및 적용 기술	
		고효율 다단 증발식 담수기술	
		삼투막 담수기술	
	시스템 통합 및 연계기술	안전 설계 및 해석 기술	재생에너지 연계 기술
			(비상감압) 안전설비 개발 기술
			열손실 제어 기술
		시스템 연계 기술	저장 구조물 열응력 해석 기술
			Tri-Gen 시스템 구성
			스마트그리드 연계
CAES 시스템 통합제어기술		해저전력및신호복합케이블 설치 기술	
		열배관 네트워크 연계	
		전력수요 예측 기술	
			전력수요를 고려한 CAES 시스템 운영 프로그램 개발 기술
			CAES 설비를 통합관리할 수 있는 네트워크 구축 기술

표 4.8 기술트리-기본 기능 #4 : 모니터링 및 유지관리 기능

기본 기능	2차 기능	3차 기능	세부 기술
모니 터링 및 유지 관리	저장시설 모니터링 및 유지관리	모니터링 시스템	구조물 실시간 상태 모니터링 기술
			계측자료 전송 및 저장 기술
		구조물 건전도 평가 기술	구조물 염해 내구성 평가 기술
			구조물 안정성 평가 기술
			접속부 누출 감지 기술
			지반 강도변화 평가 기술
			저장시설 장기거동 평가 기술
		저장구조물 보수보강 기술	금속 보강 기술
			콘크리트 열화해석 및 잔존수명 평가
			수중 보수보강 기술
			구조물 해체 및 보강 기술
			접속부 보강 기술
	저장시스템 운영 모니터링	시스템 공정 제어 기술	공정 제어기술
			시스템 효율 해석 기술
		진단 및 모니터링 기술	시스템 진단기술
			운전 모니터링 기술

다. 핵심기술군 분류

- 세부요소기술들의 분석을 통하여 핵심기술군 도출.
- 아래 그림은 핵심기술군 도출과정 중 일부를 예시로 보여줌.
- 핵심기술군은 표 4.9와 같이 도출됨.

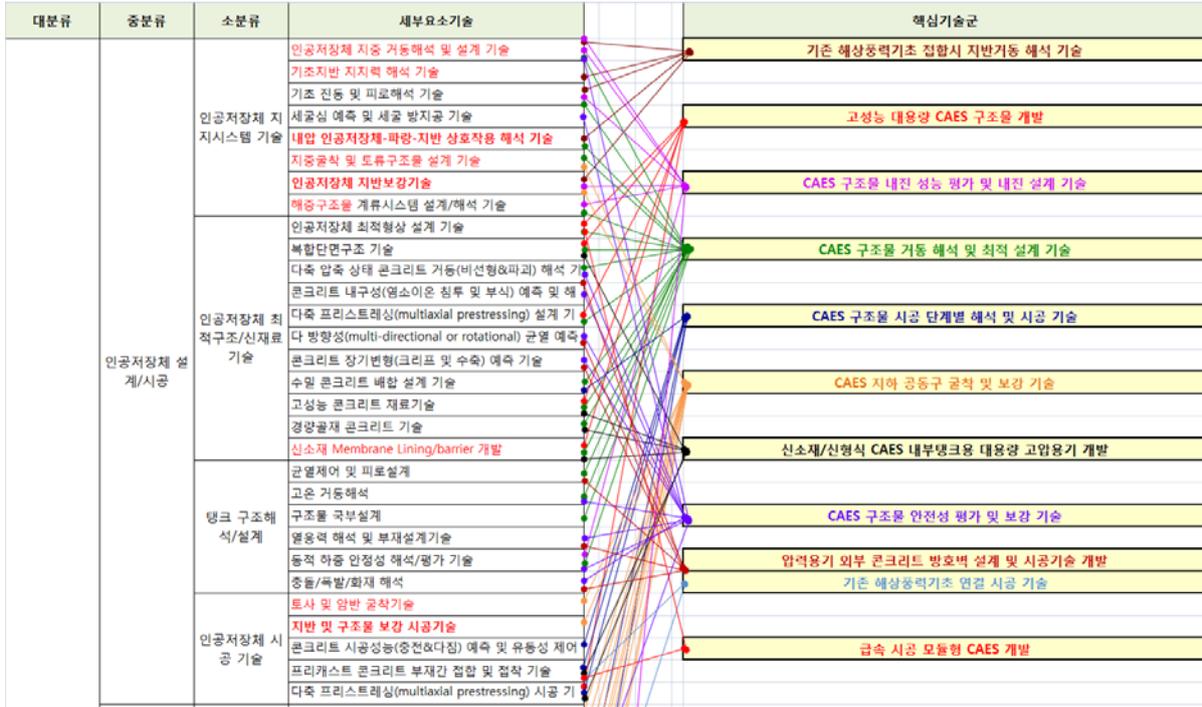


그림 4.10 핵심기술군 도출과정

표 4.9 핵심기술군

대분류	핵심기술군
계획수립	#1 최적 CAES 발전단지 환경조사 및 선정 기법 개발
	#2 CAES 발전 단지 건설 타당성 평가 기법 개발
	#3 해양 생태계 모니터링 및 보전 기술 연구
	#4 해양 환경 영향 평가 기술
설계 및 시공	#5 기존 해상풍력기초 접합시 지반거동 해석 기술
	#6 고성능 대용량 CAES 구조물 개발
	#7 CAES 구조물 내진 성능 평가 및 내진 설계 기술
	#8 CAES 구조물 거동 해석 및 최적 설계 기술
	#9 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발
	#10 CAES 구조물 안전성 평가 및 보강 기술
	#11 압력용기 외부 콘크리트 방호벽 설계 및 시공기술 개발
	#12 기존 해상풍력기초 연결 시공 기술
	#13 급속 시공 모듈형 CAES 개발
압축공기 주입 및 활용	#14 고효율 왕복동(reciprocating)형 고압 공기주입 시스템 개발
	#15 CAES 압축열 및 재생에너지 연계 고효율 하이브리드 발전/담수시스템 개발
	#16 CAES용 정압식 압축공기 저장 기술 개발
	#17 1MW급 전동발전기 제어용 멀티레벨 컨버터 및 전동발전기 개발
	#18 CAES 압축공기 활용 저공해 연소 기술 개발
	#19 CAES 압축공기 활용 전력 생산 시스템 구축
	#20 CAES 성능향상 및 최적화를 위한 열교환기 및 열에너지 저장 기술 개발
	#21 CAES 시스템 공정제어 및 안전설계 기술개발
	#22 CAES 시스템 최적설계 및 성능예측
#23 압축열을 활용한 에너지네트워크 통합기술 개발	
모니터링 및 유지관리	#24 CAES 구조물 건전도 평가 및 보수/보강 기술
	#25 모니터링 시스템 구축 및 분석 기술

라. 요소기술 확보전략

- FAST 및 기술트리로부터 도출한 요소기술을 25개의 핵심기술군에 대하여 연계하였음.
- 각 요소기술에 대해 기존 기술 활용(현재의 국내 기술 적용), 기술 보완(해외기술 도입 또는 연구개발)으로 구분하여 전략을 수립함.
- 연구개발이 필요한 기술에 대해서는 중요도(0~5점)와 시급성(0~5점)을 평가함.

□ 핵심기술군 #1 : 최적 CAES 발전단지 환경조사 및 선정 기법 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
최적 CAES 발전단지 환경조사 및 선정 기법 개발	해양지반 원위치 시험 기술	v				
	해저토사 및 해저암반용 시료채취 기술	v				
	해저지반 물리탐사 기술	v				
	국내 연안 지반정보 지도 구축 기술	v				
	조류 관측 및 분석 기술	v				
	조석 관측 및 분석 기술	v				
	부유사 관측 및 분석 기술	v				
	해양특성 DB 구축 기술	v				
	경제성 평가 및 민감도 분석	v				
	해양생태 영향 평가 및 예측	v				
	CAES 시스템에 대한 법, 제도, 경제적, 정책적 분석			v	5	4

□ 핵심기술군 #2 : CAES 발전 단지 건설 타당성 평가 기법 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
최적 CAES 발전단지 환경조사 및 선정 기법 개발	해양지반 원위치 시험 기술	v				
	해저 토사 및 암반용 시료채취 기술	v				
	해저지반 물리탐사 기술	v				
	국내 연안 지반정보 지도 구축 기술	v				
	조류 관측 및 분석 기술	v				
	조석 관측 및 분석 기술	v				
	부유사 관측 및 분석 기술	v				
	해양특성 DB 구축 기술	v				
	경제성 평가 및 민감도 분석	v				
	해양생태 영향 평가 및 예측	v				

□ 핵심기술군 #3 : 해양 생태계 모니터링 및 보전 기술 연구

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
해양 생태계 모니터링 및 보전 기술 연구	해양물리환경 모니터링 및 분석기술	v				
	해양물리환경변화 최소화 기술	v				
	해양생태 영향 최소화 기술	v				

□ 핵심기술군 #4 : 해양 환경 영향 평가 기술

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
해양 환경 영 향 평가 기술	해양물리환경변화 예측 기술	v				
	침식/퇴적 영향 평가 및 예측 기술	v				
	해양생태 영향 평가 및 예측	v				
	생태 가치 평가 기술	v				

□ 핵심기술군 #5 : 기존 해상풍력기초 접합시 지반거동 해석 기술

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
기존 해상풍 력 기초 접합 시 지반거동 해석 기술	인공저장체 지중 거동해석 및 설계 기술			v	2	3
	기초지반 지지력 해석 기술			v	2	3
	기초 진동 및 피로해석 기술	v				
	내압 인공저장체-파랑-지반 상호작 용 해석 기술			v	3	4
	인공저장체 지반보강기술			v	3	3

□ 핵심기술군 #6 : 고성능 대용량 CAES 구조물 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
고성능 대용 량 CAES 구 조물 개발	인공저장체 최적형상 설계 기술			v	4	4
	복합단면구조 기술			v	4	4
	다축 프리스트레싱 설계기술	v				
	고성능 콘크리트 재료기술	v				
	신소재 Membrane Lining/barrier 개발			v	3	4
	다축 프리스트레싱 시공기술	v				

□ 핵심기술군 #7 : CAES 구조물 내진 성능 평가 및 내진 설계 기술

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 구조 물 내진 성 능 평가 및 내진 설계 기술	해양지반 원위치 시험 기술	v				
	인공저장체 지중 거동해석 및 설계 기 술			v	2	3
	기초 진동 및 피로해석 기술	v				
	인공저장체 지반보강기술			v	3	3
	동적 하중 안정성 해석/평가 기술	v				

□ 핵심기술군 #8 : CAES 구조물 거동 해석 및 최적 설계 기술

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 구조 물 거동 해 석 및 최적 설계 기술	인공저장체 지중 거동해석 및 설계 기술			v	2	3
	기초 진동 및 피로해석 기술	v				
	내압 인공저장체-파랑-지반 상호작용 해석 기술			v	3	4
	해중구조물 계류시스템 설계/해석 기술			v	3	3
	복합단면구조 기술			v	4	4
	다축 압축 상태 콘크리트 거동(비선형 &파괴) 해석 기술			v	3	3
	다축 프리스트레싱(multi- axialprestressing)설계기술	v				
	수밀 콘크리트 배합 설계 기술	v				
	고성능 콘크리트 재료기술	v				
	경량골재 콘크리트 기술	v				
	신소재 Membrane Lining/barrier 개발			v	3	4
	균열제어 및 피로설계	v				
	고온 거동해석	v				
	구조물 국부설계	v				
동적 하중 안정성 해석/평가 기술	v					

□ 핵심기술군 #9 : 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
신소재/신형 식 CAES 내부탱크용 대용량 고압 용기 개발	복합단면구조 기술			v	4	4
	고성능 콘크리트 재료기술	v				
	경량골재 콘크리트 기술	v				
	신소재 Membrane Lining/barrier 개발			v	3	4
	프리캐스트 콘크리트 부재간 접합 및 접착 기술	v				
다축 프리스트레싱 시공기술	v					

□ 핵심기술군 #10 : CAES 구조물 안전성 평가 및 보강 기술

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 구조 물 안전성 평가 및 보 강 기술	인공저장체 지중 거동해석 및 설계 기술			v	2	3
	세굴심 예측 및 세굴 방지공 기술	v				
	다축 압축 상태 콘크리트 거동(비선형 &파괴) 해석 기술			v	3	3
	콘크리트 내구성 예측 및 해석 기술	v				
	다 방향성 균열 예측 기술	v				
	콘크리트 장기변형(크리프 및 수축) 예 측 기술	v				
	고온 거동해석	v				
	열응력 해석 및 부재설계기술	v				
	동적 하중 안정성 해석/평가 기술	v				
	충돌/폭발/화재 해석			v	2	4

□ 핵심기술군 #11 : 압력용기 외부 콘크리트 방호벽 설계 및 시공기술 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
압력용기 외 부 콘크리트 방호벽 설계 및 시공기술 개발	인공저장체 최적형상 설계 기술			v	4	4
	다 방향성 균열 예측 기술	v				
	콘크리트 장기변형(크리프 및 수축) 예측 기술	v				
	균열제어 및 피로설계	v				
	열응력 해석 및 부재설계기술	v				
	충돌/폭발/화재 해석			v	2	4

□ 핵심기술군 #12 : 기존 해상풍력기초 연결 시공 기술

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
기존 해상풍력기초 연결 시공 기술	프리카스트 콘크리트 부재간 접합 및 접착 기술	v				
	세크먼트 설계 및 제작 기술			v	5	5

□ 핵심기술군 #13 : 급속 시공 모듈형 CAES 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
급속 시공 모듈형 CAES 개발	인공저장체 최적형상 설계 기술			v	4	4
	프리카스트 콘크리트 부재간 접합 및 접착 기술	v				

□ 핵심기술군 #14 : 고효율 왕복동(reciprocating)형 고압 공기주입 시스템 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
고효율 왕복동형 고압 공기주입 시스템 개발	성능해석 기술	v			4	4
	설계, 제작 및 제어 기술		v		3	4
	설계 및 제작 기술	v			2	3
	시스템 연계 기술			v	3	4

□ 핵심기술군 #15 : CAES 압축열 및 재생에너지 연계 고효율 하이브리드 발전/담수시스템 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 압축열 및 재생에너지 연계 고효율 하이브리드 발전/담수시스템 개발	재생에너지 연계 기술			v	3	3
	고온, 고압용 열교환기 설계 기술			v	4	4
	신재생에너지연계			v	4	4
	고효율 다단 증발식 담수기술	v			2	3
	삼투막 담수기술	v			2	2
	재생에너지 연계 기술			v	2	2
	Tri-Gen 시스템 구성			v	3	4
	열배관 네트워크 연계			v	3	3

□ 핵심기술군 #16 : CAES용 정압식 압축공기 저장 기술 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES용 정 압식 압축공 기 저장 기 술 개발	대용량 압축공기 수송관 설계 기술	v			4	5
	수송시스템 안전해석 기술			v	3	4
	압력 레귤레이터 설계 및 제작 기술	v			3	3
	정압식 저장 기술			v	2	5

□ 핵심기술군 #17 : 1MW급 전동발전기 제어용 멀티레벨 컨버터 및 전동발전기 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
1MW급 전 동발전기 제 어용 멀티레 벨 컨버터 및 전동발전 기 개발	성능해석 기술	v			4	4
	설계, 제작 및 제어 기술		v		3	4
	대용량 고속 전동발전기 설계/해석기술			v	4	4
	대용량 전동발전기 제작/평가 기술		v		3	4
	대용량 PMSM용 영구자석 착자기술		v		3	3
	회생형 멀티레벨 컨버터 설계/제작기술			v	4	4
	고압전동기 제어 기술		v		3	3
	계통연계용 발전기 제어 기술		v		3	3
	LVRT 기능을 갖는 전동발전기 제어 기술		v		2	2
	UPS시스템 연계기술			v	2	2

□ 핵심기술군 #18 : CAES 압축공기 활용 저공해 연소 기술 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 압축 공기 활용 저공해 연소 기술 개발	저공해 연소기술	v			2	3
	외연방식 연소기 기술	v			2	3
	회생형 멀티레벨컨버터 설계/제작기술			v	4	4
	계통연계용 발전기 제어 기술		v		3	3

□ 핵심기술군 #19 : CAES 압축공기 활용 전력 생산 시스템 구축

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 압 축공기 활 용 전력 생 산 시스템 구축	설계, 제작 및 제어 기술		v		3	4
	외연방식 연소기 기술	v			2	3
	대용량 고속 전동발전기 설계/해석 기술			v	4	4
	대용량 전동발전기 제작/평가 기술		v		3	4
	계통연계용 발전기 제어 기술		v		3	3
	LVRT 기능을 갖는 전동발전기 제어 기 술		v		2	2
	UPS시스템 연계기술		v		2	2

□ 핵심기술군 #20: CAES 성능향상 및 최적화를 위한 열교환기 및 열에너지 저장기술 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 성능 향상 및 최 적화를 위 한 열교환기 및 열에너지 저 장 기술 개 발	고온, 고압용 열교환기 설계 기술			v	4	4
	고온용 재료 기술		v		3	3
	대용량화 기술	v			3	4
	열교환 성능 및 신뢰성 향상 기술			v	3	4
	축열조 설계 기술			v	5	5
	대용량 열추출 기술			v	4	5
	축열(현열, 잠열) 물질 개발			v	5	5
	수송 매체 개발	v			3	4
	누설 감지 기술	v			3	4
	열손실 저감 기술			v	4	5
	히트펌프 설계/적용 기술	v			3	4
사이클 설계 및 적용 기술	v			3	4	

□ 핵심기술군 #21 : CAES 시스템 공정제어 및 안전설계 기술개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 시 스템 공 정제 어 및 안 전설계 기술 개발	(비상감압) 안전설비 개발 기술			v	4	5
	열손실 제어 기술			v	4	5
	저장 구조물 열응력 해석 기술			v	4	5

□ 핵심기술군 #22 : CAES 시스템 최적설계 및 성능예측

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 시스템 최적설계 및 성능예측	Tri-Gen 시스템 구성			v	3	4
	스마트그리드 연계			v	4	5
	열배관 네트워크 연계			v	3	3
	전력수요 예측 기술	v			3	2
	전력수요를 고려한 CAES 시스템 운영 프로그램 개발 기술			v	3	4
	CAES 설비를 통합관리할 수 있는 네트워크 구축 기술			v	3	3

□ 핵심기술군 #23 : 압축열을 활용한 에너지네트워크 통합기술 개발

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
압축열을 활용한 에너지네트워크 통합기술 개발	스마트그리드 연계			v	4	5
	해저전력 및 신호복합 케이블 설치기술	v			3	3
	열배관 네트워크 연계			v	3	3
	전력수요 예측 기술	v			3	2
	전력수요를 고려한 CAES 시스템 운영 프로그램 개발 기술			v	3	4
	CAES 설비를 통합관리할 수 있는 네트워크 구축 기술			v	3	3

□ 핵심기술군 #24 : CAES 구조물 건전도 평가 및 보수/보강 기술

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
CAES 구조물 건전도 평가 및 보수/보강 기술	구조물 염해 내구성 평가 기술	v				
	구조물 안정성 평가 기술			v	2	4
	접속부 누출 감지 기술	v				
	지반 강도변화 평가 기술	v				
	저장시설 장기거동 평가 기술			v	2	3
	급속 보강 기술			v	2	3
	콘크리트 열화해석 및 잔존수명 평가	v				
	수중보수보강기술			v	2	3
접속부 보강 기술			v	1	2	

□ 핵심기술군 #25 : 모니터링 시스템 구축 및 분석 기술

핵심기술군	세부요소기술	기존 기술 활용	기술보완		개발필요	
			해외 기술 도입	기술 개발	시급성 (5점)	중요성 (5점)
모니터링 시 스템 구축 및 분석 기 술	CAES 설비를 통합관리할 수 있는 네트워크 구축 기술			v	3	3
	구조물 실시간 상태 모니터링 기술			v	3	5
	계측자료 전송 및 저장 기술			v	1	2
	구조물 해체 및 보강 기술			v	1	1
	공정 제어기술			v	4	5
	시스템 효율 해석 기술			v	5	5
	시스템 진단기술			v	4	5
	운전 모니터링 기술			v	4	5

3. 후보과제 도출 및 우선순위 선정

가. 후보과제 도출

- 핵심기술 세부분석에서 기존 기술로 대체 가능한 핵심기술을 제외하고, 압축공기의 주입/활용 측면에서 기존의 압축기술을 활용하는 전기구동식(1세부)과 혁신적인 디자인이 요구되는 유압구동식(2세부)으로 세부를 구분함.
- 기획위원 및 외부전문가의 의견을 수렴하여 총괄과제 1개, 1세부과제 11개, 2세부과제 11개의 후보과제를 도출함.

표 4.10 총괄 후보과제

번호	기술 분야	중점개발과제명 (후보)	후보과제개요
1	총괄	CAES 시스템에 대한 법, 제도, 경제적, 정책적 분석	<ul style="list-style-type: none"> - CAES 시공 및 계통연계를 위한 법적, 제도적 분석 - 발전원, CAES 기법, 설치 위치에 따른 경제성 평가 - CAES 활성화를 위한 정책적 분석 및 제언

표 4.11 1세부과제 후보과제

번호	기술 분야	중점개발과제명 (후보)	후보과제개요
2	구조물	CAES 저장체 최적 배치 설계 기술 개발	해상 풍력 발전단지에서 압축기 및 발전기의 설치와 압축공기 전송효율화를 고려한 CAES구조체의 최적위치 및 배치 설계기술
3	구조물	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	강합성 구조, 복합재료 등의 신형식 또는 신소재를 이용한 대용량-고압 CAES 구조물의 개발 및 해석/설계 기술 개발
4	구조물	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	CAES 구조물의 보호을 위한 외부 보호 구조물 개발 및 설계/시공 기술 개발
5	구조물	GBS 기반 압축공기저장체 설계/시공	신형식 합성 구조를 적용한 Gravity Base Structure를 이용하여, 압축공기를 저장하는 CAES 구조물 개발 및 설계/시공 기술 개발
6	구조물	CAES용 상부 플랫폼 설계/시공 기술	발전설비 및 공기 압축 설비 등의 공기 압축, 발전, 송전 등에 필요한 각종 설비를 설치하기 위해 건설되는 해상 구조물의 설계/시공 기술
7	구조물	인공저장체 건전도 평가 및 보수/보강 기술	CAES 구조물 및 외부 보호 구조물, 상부 플랫폼 구조물의 안전성 및 건전도 평가 기술
8	구조물	CAES 구조물 내진 성능 평가 및 내진 설계 기술	CAES 구조물 및 외부 보호 구조물, 상부 플랫폼 구조물의 내진 성능 평가 및 내진 설계 기술 개발
9	주입/활용	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	기 개발되어있는 요소 기자재(압축기및터보발전기등)을 활용하여 전체 시스템 및 안전계통을 설계 및 통합 실증하는 기술
10	주입/활용	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	고품질 전력생산을 위하여 저장된 압축공기를 균일한 압력으로 추출하고 터보발전기에서 팽창되도록 하는 압력 Regulation시스템 신규개발
11	주입/활용	압축열 및 재생에너지 연계 고효율 하이브리드 담수시스템 개발	압축시 발생하는 열에너지와 태양열을 이용한 하이브리드 고효율 증발식 담수화 시스템 개발
12	주입/활용	1MW급 전동발전기 제어용 멀티레벨 컨버터 및 전동발전기 개발	전동발전기 및 멀티레벨 컨버터 개발

표 4.12 2세부과제 후보과제

번호	기술 분야	중점개발과제명 (후보)	후보과제개요
13	구조물	해상풍력 기초를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	해상 풍력기초 형식인 Monopile, 중력식, 잔교식 기초를 이용한 고압 CAES 저장용기를 개발하여 구조물 내부에 고압공기를 저장하는 방법으로, 저장된 고압공기를 상부 transitionpiece에 설치된 발전실로 유출하여 발전하는 시스템
14	구조물	해상풍력 상부 타워를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	해상 풍력타워 형식인 강관파일, FRP파일을 이용한 고압 CAES 저장용기를 개발하여 상부타워 구조물 내부에 고압공기를 저장하는 방법으로, 저장된 고압공기를 상부 transition piece에 설치된 발전실로 유출하여 발전하는 시스템
15	구조물	Micro-CAES용 상부 플랫폼 설계/시공 기술	각 해상풍력 타워의 발전설비 및 공기 압축설비 등의 공기 압축, 발전, 송전 등에 필요한 각종 설비를 설치하기 위해 건설되는 소규모 해상 구조물의 설계/시공 기술
16	구조물	급속 시공 모듈형 CAES 개발	수중작업 및 공기를 최소화 한 급속시공 모듈형 고압 CAES 구조물 개발 및 설계/시공법 개발로서, 소형, 고압의 모듈형 고압 용기를 각각의 풍력발전기에 부착한 후 각각의 소형 고압 용기를 연결하는 방법을 개발
17	구조물	인공저장체 건전도 평가 및 보수/보강 기술	CAES 구조물 및 외부 보호 구조물, 상부 플랫폼 구조물의 안전성 및 건전도 평가 기술
18	구조물	기존 해상풍력기초 접합시 지반거동 해석 기술	Micro CAES 구조물 하부 해상풍력기초 건설에 따른 해저지반 거동 해석 기술
19	주입/활용	풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	풍력블레이드 회전축으로 직접구동 되고, 유압 펌프, 제어밸브 및 축압기로 구성되는 유압동력 발생장치 개발
20	주입/활용	유압 직구동 용적식 고압 (100bar) 공기압축기 개발	유압으로 구동되는 용적식 왕복동 고압 (100bar 이상) 공기압축기 개발
21	주입/활용	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	고압 압축과정 중 발생하는 열에너지를 저장하는 축열시스템 및 이를 활용하여연소 없이 전력 생산을 가능케하는 열추출 시스템 신규 개발. 특히, 압축공기 해양저장 구조물과 연계된 시스템개발
22	주입/활용	발전시스템모니터링및 분석 기술 개발	유압계통-압력 및 열 저장조-발전계통 통합 시스템 모니터링 및 분석기술 개발
23	주입/활용	폐 열에너지의 지역 냉난방 활용 기술 개발	발전후 잉여 폐 열에너지를 이용한 지역 냉난방 활용 기술 개발

나. 설문조사

- 핵심기술 우선순위 점수산정을 위해 아래 표와 같이 평가항목별 가중치 설문조사를 실시함.
- 기획위원 20명, 외부전문가 31명이 설문에 응답하였으며, 응답자는 학계 14명, 연구원 24명, 산업계 13명으로 집계됨.

표 4.13 가중치 항목과 주안점

항목	주안점
기술적 파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 원천기술 확보 가능성 • 첨단기술 융합 가능성(IT, ET, CT 등 첨단 기술과 융합하여 새로운 기술개발이 가능한가?)
경제적 파급효과	<ul style="list-style-type: none"> • 개발기술 성공시 상용화 가능성 • 투자 대비 경제적 효과(선진 외국기술을 대체 및 새로운 시장 창출 등)
국가전략적 중요성	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 아젠다(NA, 녹색성장, 청정에너지, 고용유발 등) 부합 여부 • 공익적 파급효과(국민의 삶의질 향상, 국가 안위 및 위상 제공 등)
기술개발 능력	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 연구역량을 고려한 기술개발 성공 가능성 • 세계적 경쟁 우위 확보 가능성
정부지원 타당성	<ul style="list-style-type: none"> • 사회경제적 파급효과는 크지만 민간이 독자적으로 수행하기 어려운 미래를 대비하는 모험적 기술 분야인가? • 국가 차원의 투자를 통해 경쟁력을 새로이 확보해야할 분야인가?

- 우선순위 점수산정을 위한 가중치 조사 결과 기획위원 집단과 외부전문가 집단 사이의 큰 차이는 없는 것으로 나타났으며, 경제적 파급효과와 기술적 파급효과를 중요시 하는 것으로 나타남.
- 설문 결과 조사된 우선순위 점수산정을 위한 가중치는 다음 표와 같이 나타남. 우선순위 점수산정을 위해 전체평균으로 나타난 가중치를 적용.

표 4.14 우선순위 점수산정을 위한 가중치

항목	전체평균	기획위원평균	외부전문가평균
기술적 파급효과	22.5	23.0	22.3
경제적 파급효과	23.6	23.5	23.7
국가전략적 중요성	18.3	17.0	19.2
기술개발 능력	19.4	19.8	19.2
정부지원 타당성	16.1	16.8	15.6

다. 우선순위 설문조사 결과

- 도출된 23개 후보과제를 대상으로 각각에 대하여 우선순위 항목별 점수를 조사하여, 후보과제 별 우선순위를 결정함.

표 4.15 우선순위 설문조사 결과 점수 및 과제별 우선순위

구분	번호	기술 분야	세세부과제 후보	전체점수합계	전체 순위	세부 순위
총괄과제	1	법/제도	CAES 시스템에 대한 법, 제도, 경제적, 정책적 분석 (총괄)	52.3	23	
세부과제 1	2	구조물	CAES 저장채 최적 배치 설계 기술 개발	63.0	14	
세부과제 1	3	구조물	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	77.2	1	1
세부과제 1	4	구조물	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	68.3	8	4
세부과제 1	5	구조물	GBS 기반 압축공기저장채 설계/시공	67.1	9	
세부과제 1	6	구조물	CAES용 상부 플랫폼 설계/시공 기술	64.1	11	
세부과제 1	7	구조물	인공저장채 건전도 평가 및 보수/보강 기술	59.7	19	
세부과제 1	8	구조물	CAES 구조물 내진 성능 평가 및 내진 설계 기술	60.7	16	
세부과제 1	9	주입/활용	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	70.3	7	3
세부과제 1	10	주입/활용	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	72.4	5	2
세부과제 1	11	주입/활용	압축열 및 재생에너지 연계 고효율 하이브리드 담수시스템 개발	63.7	13	
세부과제 1	12	주입/활용	1MW급 전동발전기 제어용 멀티레벨 컨버터 및 전동발전기 개발	64.0	12	
세부과제 2	13	구조물	해상풍력 기초를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	76.7	2	1
세부과제 2	14	구조물	해상풍력 상부 타워를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	66.1	10	
세부과제 2	15	구조물	Micro-CAES용 상부 플랫폼 설계/시공 기술	62.5	15	
세부과제 2	16	구조물	급속 시공 모듈형 CAES 개발	59.9	17	
세부과제 2	17	구조물	인공저장채 건전도 평가 및 보수/보강 기술	59.8	18	
세부과제 2	18	구조물	기존 해상풍력기초 접합시 지반거동 해석 기술	59.3	20	
세부과제 2	19	주입/활용	풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	74.3	3	2
세부과제 2	20	주입/활용	유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발	72.7	4	3
세부과제 2	21	주입/활용	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용 기술 개발	70.8	6	4
세부과제 2	22	주입/활용	발전시스템모니터링및 분석기술 개발	56.3	22	
세부과제 2	23	주입/활용	폐 열에너지의 지역 냉난방 활용 기술 개발	57.5	21	

라. 우선순위 과제 선정

- 우선순위 조사결과 23개 후보과제 중 상위 8개과제를 선정.
- 외부 전문가의 의견을 반영하여 CAES 시스템에 대한 법, 제도, 경제적, 정책적 분석을 목표로 하는 후보과제는 연구단 총괄에서 수행하는 것으로 함.
- 선정된 과제는 세부과제 별로 다음 표와 같음.

표 4.16 선정된 세세부과제

구분	기술 분야	세세부과제	전체점수 합계	전체 순위	세부 순위
세부과제 1	구조물	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	77.2	1	1
	구조물	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	68.3	8	4
	주입/활용	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	70.3	7	3
	주입/활용	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	72.4	5	2
세부과제 2	구조물	해상풍력 기초를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	76.7	2	1
	주입/활용	풍력 블레이드 직구동 유압 동력 발생시스템 개발	74.3	3	2
	주입/활용	유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발	72.7	4	3
	주입/활용	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	70.8	6	4

제5장 연구개발과제 구성 및 추진전략

제1절 연구개발과제의 구성 체계

- 본 기획과제에서 도출된 과제는 연구단 규모로 계획하였으며, 압축공기저장 방식 측면에서 2개의 세부과제로 구성할 수 있으며, 두 개의 세부과제를 각각의 독립된 과제로 추진하는 것도 가능함.
- 과제 연구수행 체계는 아래와 같음.

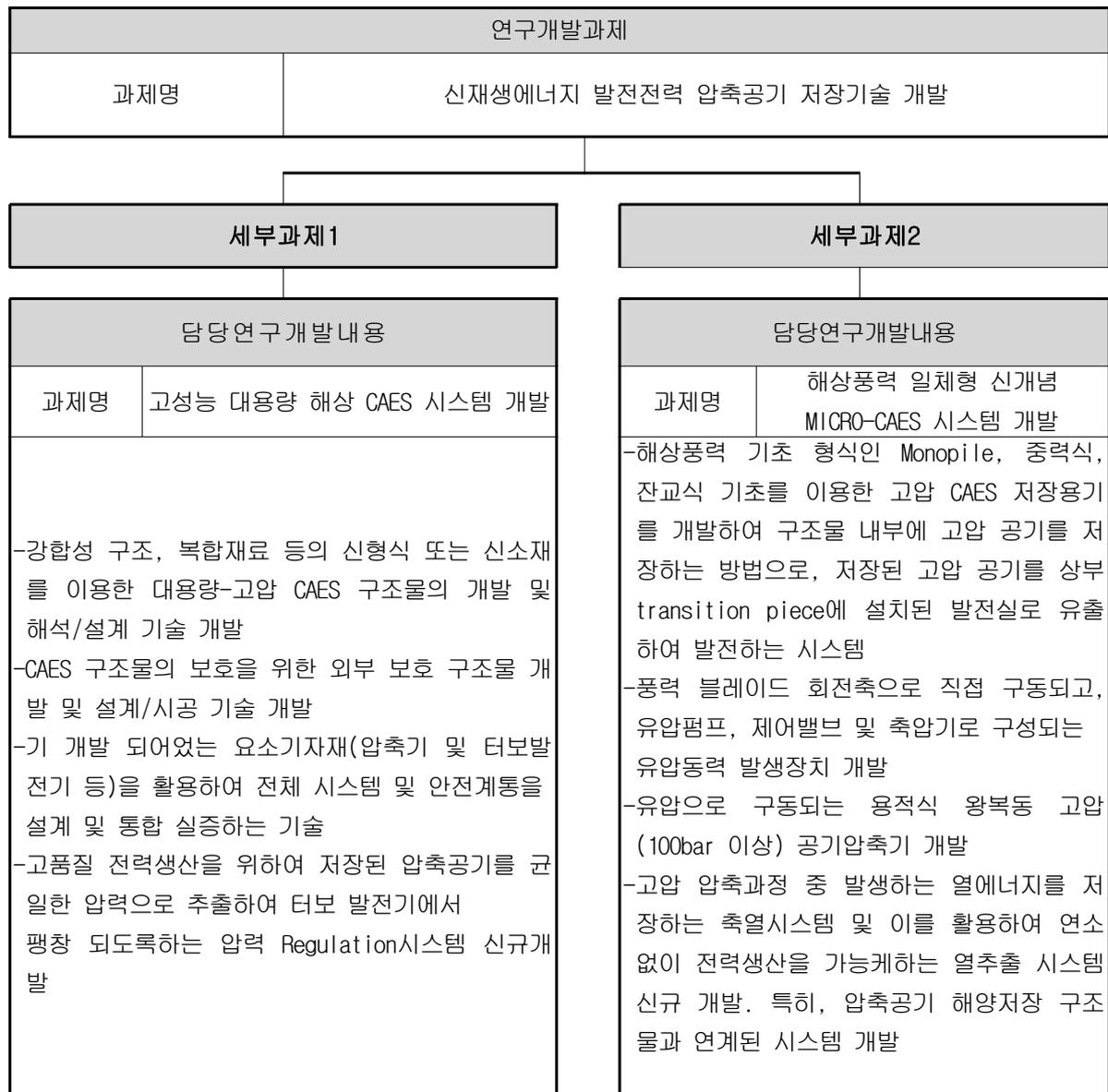
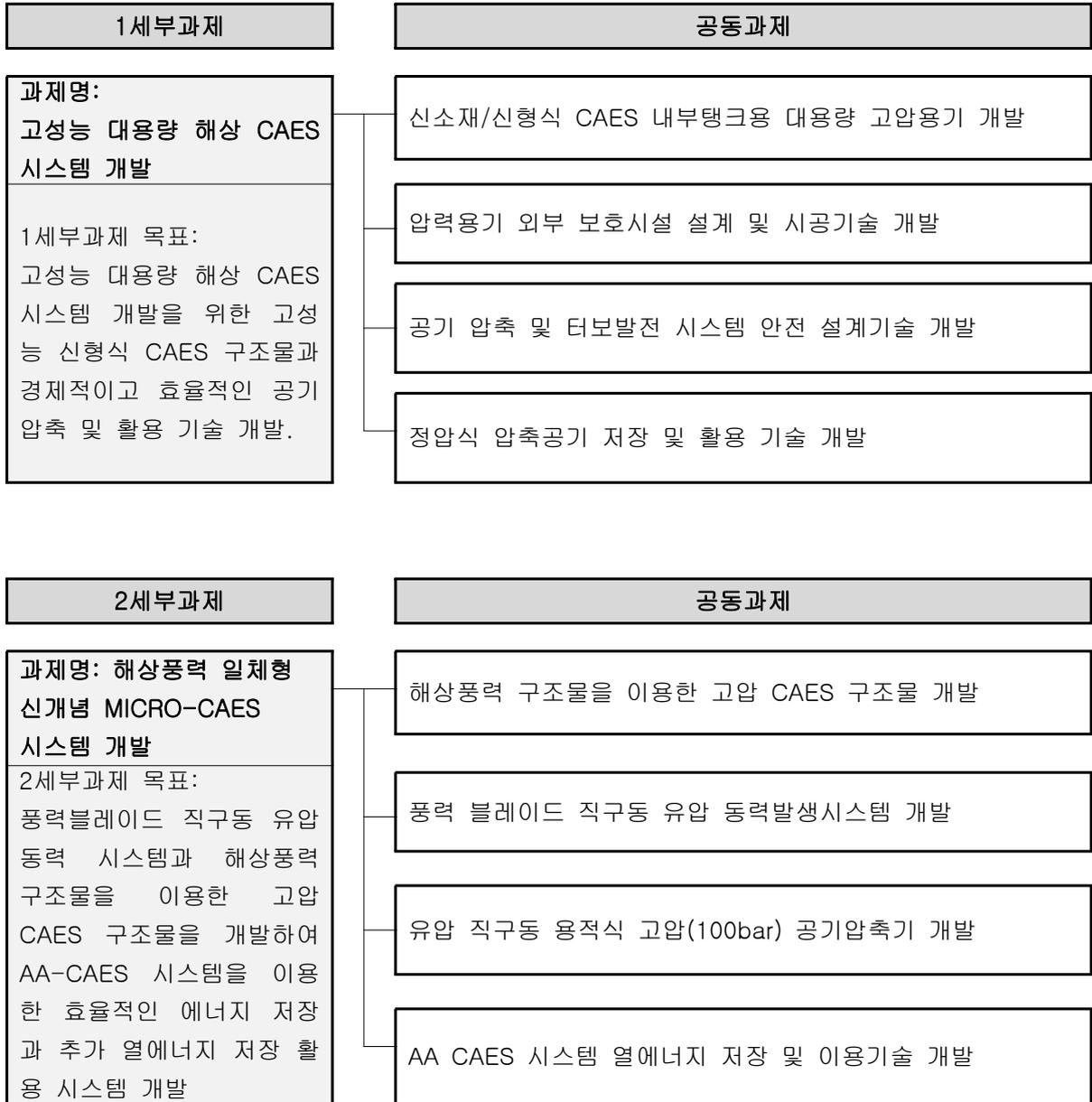


그림 5.1 과제 연구수행 체계

- 세부과제별 연구목표 및 기술개발 내용은 다음과 같음.



○ 1세부과제 연구수행 체계는 아래와 같음.

1세부과제																																	
과제명	고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발																																
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 22%;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">협 동 연 구 기 관</th> </tr> <tr> <th colspan="2">담당 연구개발 목표</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>과제명</td> <td>신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> -CAES 시공 및 계통 연계를 위한 법적, 제도적 분석 및 CAES 활성화를 위한 정책적 분석 및 제언 -규모:4MWh(2MW*2hr)급 전력에너지 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 -성능 : 고압 압축공기(100기압) 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 -기능 : 경제성 및 안정성을 고려한 고강도/고성능 구조물 개발 -기술 : 신형식/신소재를 이용한 구조물 개발 및 해석/설계 기술 개발 </td> </tr> </tbody> </table> </div> <div style="width: 22%;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">공 동 연 구 기 관 1</th> </tr> <tr> <th colspan="2">담당 연구개발 목표</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>과제명</td> <td>압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> -고압 CAES 구조물 보호 구조물 설계 및 시공 기술 개발 -경제적이고 안전한 최적 보호 구조물 형식 및 형상 개발 -외부 보호 구조물의 안전성 평가 -모듈형 급속시공 보호 구조물 개발 -보호 구조물 상부에 발전시설 배치 및 설치 기술 개발 </td> </tr> </tbody> </table> </div> <div style="width: 22%;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">공 동 연 구 기 관 2</th> </tr> <tr> <th colspan="2">담당 연구개발 목표</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>과제명</td> <td>공기 압축 및 터보발전 시스템 안전설계기술 개발</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> - (1MW급) CAES 시스템 공정제어 및 안전설계 기술개발 · CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계, 해석, 제작 및 공정제어 기술개발 · CAES 운전 모니터링 및 200bar/650℃급 안전설비 기술개발 - CAES 최적설계 및 열-전기 에너지네트워크 통합 및 연계기술 개발 · 스마트그리드, 써멀그리드 등 에너지네트워크와의 통합 및 연계 </td> </tr> </tbody> </table> </div> <div style="width: 22%;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">공 동 연 구 기 관 3</th> </tr> <tr> <th colspan="2">담당 연구개발 목표</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>과제명</td> <td>정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> -고압(100bar)의 압축 공기 압력 변동율 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 개발 -공기압력 또는 체적제어의 핵심부품인 비압축성 액체의 양방향 펌핑 가능한 용적식 펌프 개발 </td> </tr> </tbody> </table> </div> </div>		협 동 연 구 기 관		담당 연구개발 목표		과제명	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	<ul style="list-style-type: none"> -CAES 시공 및 계통 연계를 위한 법적, 제도적 분석 및 CAES 활성화를 위한 정책적 분석 및 제언 -규모:4MWh(2MW*2hr)급 전력에너지 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 -성능 : 고압 압축공기(100기압) 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 -기능 : 경제성 및 안정성을 고려한 고강도/고성능 구조물 개발 -기술 : 신형식/신소재를 이용한 구조물 개발 및 해석/설계 기술 개발 		공 동 연 구 기 관 1		담당 연구개발 목표		과제명	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> -고압 CAES 구조물 보호 구조물 설계 및 시공 기술 개발 -경제적이고 안전한 최적 보호 구조물 형식 및 형상 개발 -외부 보호 구조물의 안전성 평가 -모듈형 급속시공 보호 구조물 개발 -보호 구조물 상부에 발전시설 배치 및 설치 기술 개발 		공 동 연 구 기 관 2		담당 연구개발 목표		과제명	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> - (1MW급) CAES 시스템 공정제어 및 안전설계 기술개발 · CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계, 해석, 제작 및 공정제어 기술개발 · CAES 운전 모니터링 및 200bar/650℃급 안전설비 기술개발 - CAES 최적설계 및 열-전기 에너지네트워크 통합 및 연계기술 개발 · 스마트그리드, 써멀그리드 등 에너지네트워크와의 통합 및 연계 		공 동 연 구 기 관 3		담당 연구개발 목표		과제명	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> -고압(100bar)의 압축 공기 압력 변동율 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 개발 -공기압력 또는 체적제어의 핵심부품인 비압축성 액체의 양방향 펌핑 가능한 용적식 펌프 개발 	
협 동 연 구 기 관																																	
담당 연구개발 목표																																	
과제명	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발																																
<ul style="list-style-type: none"> -CAES 시공 및 계통 연계를 위한 법적, 제도적 분석 및 CAES 활성화를 위한 정책적 분석 및 제언 -규모:4MWh(2MW*2hr)급 전력에너지 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 -성능 : 고압 압축공기(100기압) 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 -기능 : 경제성 및 안정성을 고려한 고강도/고성능 구조물 개발 -기술 : 신형식/신소재를 이용한 구조물 개발 및 해석/설계 기술 개발 																																	
공 동 연 구 기 관 1																																	
담당 연구개발 목표																																	
과제명	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발																																
<ul style="list-style-type: none"> -고압 CAES 구조물 보호 구조물 설계 및 시공 기술 개발 -경제적이고 안전한 최적 보호 구조물 형식 및 형상 개발 -외부 보호 구조물의 안전성 평가 -모듈형 급속시공 보호 구조물 개발 -보호 구조물 상부에 발전시설 배치 및 설치 기술 개발 																																	
공 동 연 구 기 관 2																																	
담당 연구개발 목표																																	
과제명	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전설계기술 개발																																
<ul style="list-style-type: none"> - (1MW급) CAES 시스템 공정제어 및 안전설계 기술개발 · CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계, 해석, 제작 및 공정제어 기술개발 · CAES 운전 모니터링 및 200bar/650℃급 안전설비 기술개발 - CAES 최적설계 및 열-전기 에너지네트워크 통합 및 연계기술 개발 · 스마트그리드, 써멀그리드 등 에너지네트워크와의 통합 및 연계 																																	
공 동 연 구 기 관 3																																	
담당 연구개발 목표																																	
과제명	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발																																
<ul style="list-style-type: none"> -고압(100bar)의 압축 공기 압력 변동율 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 개발 -공기압력 또는 체적제어의 핵심부품인 비압축성 액체의 양방향 펌핑 가능한 용적식 펌프 개발 																																	

○ 2세부과제 연구수행 체계는 아래와 같음.

2세부과제			
과제명		해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발	
협동연구기관		공동연구기관 1	
담당 연구개발 내용		담당 연구개발 내용	
과제명	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	과제명	풍력 블레이드 직구동 유압동력 생성시스템 개발
-신형식 합성구조 해상 풍력 기초 개발 -해상풍력 구조물을 이용한 CAES 저장 구조물 개발 -관련 설계/시공 기술 개발		-블레이드 회전축 및 유압피스톤 펌프의 축이음 장치 개발 -고출력 밀도형 고압/대유량 피스톤 펌프 설계 및 제작 -유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 -압력맥동 저감 및 에너지 축압장치 개발 -성능 및 내구시험장비 개발	
공동연구기관 2		공동연구기관 3	
담당 연구개발 내용		담당 연구개발 내용	
과제명	유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발	과제명	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발
-1,300HP급 100bar, 350N ^m /hr 고효율 왕복동 공기 압축기 개발 -해상풍력 1기당 5MW 발전 기준, 1,000kW급 압축기 5대로 압축 공기 주입		-CAES 성능향상 및 최적화를 위한 열교환기 및 열에너지 저장 기술 개발(기존 CAES 열교환 효율 및 열에너지 저장 효율 대비 10% 성능 향상) -CAES 시스템에 최적화된 저장 용기 및 열에너지 저장 물질(PCM) 개발 -CAES 압축열 및 재생에너지 연계 고효율 하이브리드 발전/담수 시스템 개발 -고효율 다중효용 증발식 해수담수기 개발 -재생에너지 연계 발전/담수 하이브리드 시스템 개발	

제2절 연구단 운영전략 및 추진체계

1. 추진전략 및 로드맵

- 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장 기술의 확보를 위해 단계별 추진전략 수립
- 1단계(3년)에서는 핵심요소기술을 확보하고, 2단계(2년)에는 요소기술을 통합하고 Pilot-test를 통한 개발기술의 유효성을 검증하며, 이후 개발기술의 실용화를 추진하는 것으로 전략을 수립함



그림 5.2 단계별 목표 설정

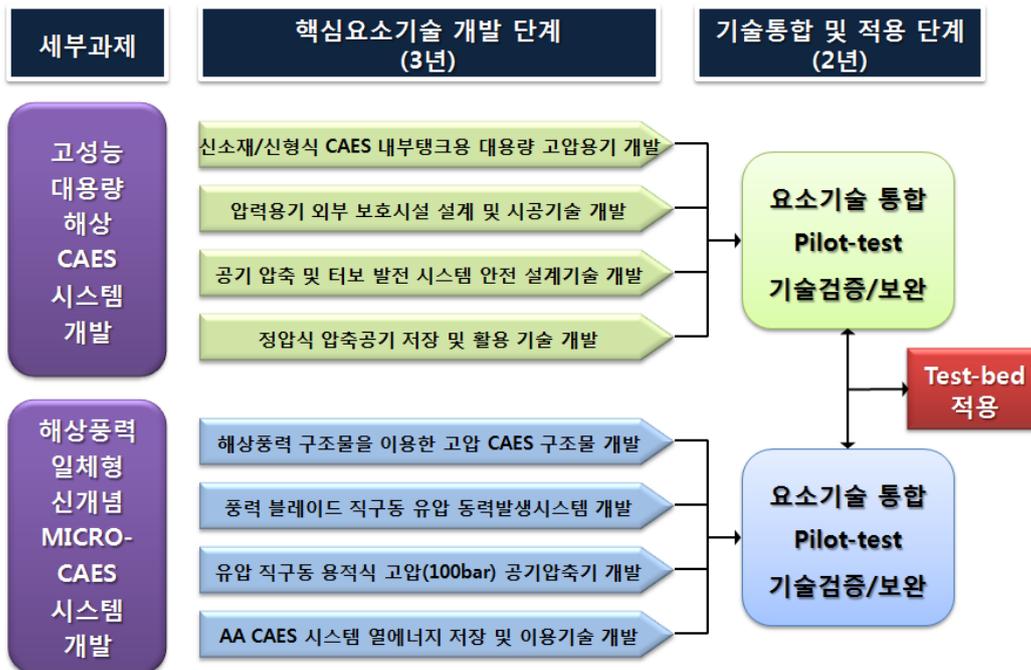


그림 5.3 연구단 MACRO 로드맵

2. 세부과제간 연계전략

- 본 연구 수행을 위하여 “고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발” 및 “해상풍력 일체형 신개념 Micro-CAES시스템 개발”의 2개 세부과제가 도출되었으며, 유기적인 연계와 상호 경쟁적인 구도 속에서 연구성과를 극대화하여 최종목표를 완성하고자 함
- 전기를 이용하는 기존의 압축기술을 최대한 활용하는 공기압축시스템과 함께 에너지 변환 단계를 축소할 수 있는 혁신적인 디자인의 직구동 형태의 공기압축시스템 개발을 경쟁적으로 진행하여 추후 상호 비교 검토를 통해 보다 효율적인 시스템 개발을 위한 시너지 효과를 기대함
- 연구단 중심으로 Pilot-test를 추진하고 기술의 타당성 확보 이후 규모 확대

3. 산·학·연 연계전략

- 연구 추진의 효율성을 높이기 위해 주관기관은 산·학·연·관계의 협동 연구체계를 구축하고 특히 핵심기술 전문가 양성을 위하여 체계적이고 조직적인 지원체계를 구축
- 성과품의 실용화/전문화 제고 및 개발기술의 현장애로 반영을 위하여 관련 분야에 실적이 풍부한 선진업체들의 연구참여를 유도하고, 개발기술의 기술이전에 대한 권리배분계획을 관제협약 과정에서 투명하고 명확히 하여 산업체의 적극적인 연구 참여 기반 조성
- 학계의 전문성을 충분히 활용하고자 관련분야의 교수 및 전공학생들을 연구에 적극 참여시키고, 장기적으로 인력배출된 학생들이 관련 전공분야에서 전문가로 활동하도록 인력양성 프로그램화 기반 구축
- 세부과제에 대한 책임연구기관 또는 협동/공동기관 선정과정을 합리적이고 공평하게 진행하여 동기부여 극대화과 미션 달성에 대한 전문성 제고 및 산·학·연 간의 긴밀한 협력 체계 기반 구축
- 연구과정에서 핵심기술간 경쟁체계를 도입하여 “선택과 집중”을 통한 성과품의 기술수준 향상 및 실용성 극대화

- 연구개발 과정에서 최신 국내외 수집정보 및 연구개발 성과들의 신속한 정보교류가 가능한 개방형 온라인 정보공유 시스템 및 DB화 기반 구축
- 정기적인 발표회 및 워크숍을 추진하여 각 세부과제 간의 연구추진 경과를 점검하고 긴밀한 정보 교류를 통한 실용적/통합적 성과품 생산

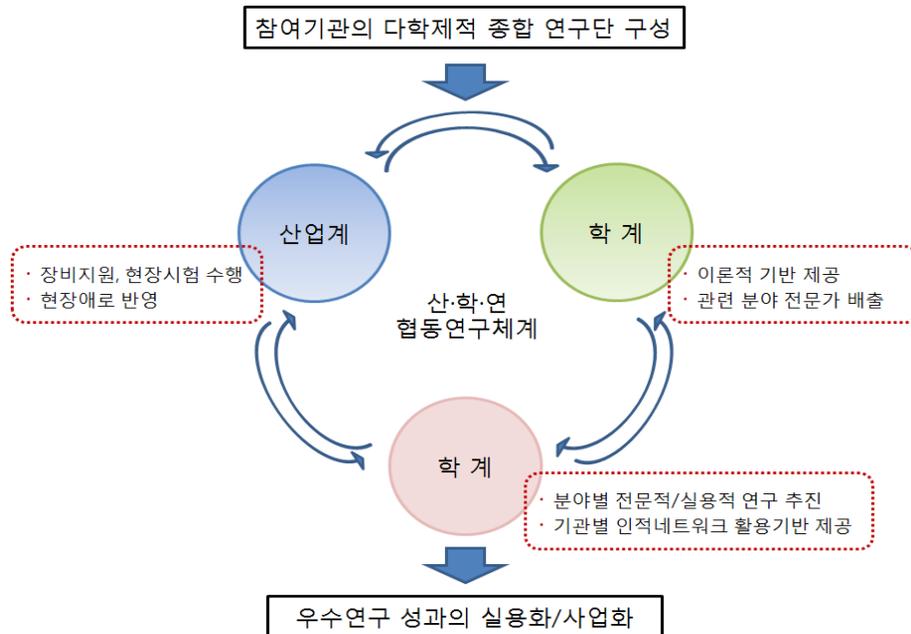


그림 5.4 산·학·연 협동연구체계 활성화 방안

4. 연구단 성과목표 및 지표

가. 성과목표 및 지표 설정

- 본 기획연구에서의 성과목표는 비전과 목표를 달성함과 동시에 개발기술을 실용화 측면에 중점을 두고 표 5.1과 같이 설정하였음.
- 특히, 기술적효과와 학술적효과, 현장시험, 현장적용에 의한 비용 절감효과, 기술실기계약 및 사업화에 높은 가중치를 부여하였음.

나. 성과관리 전략

- 주관연구기관에서 박사급 1인, 원급 1인, 보조원 1인 정도로 구성되는 연구관리팀을 별도 운영하여 연차별/단계별 체계적인 연구단 성과관리 필요

- 연구관리팀을 통한 연구진 애로, 진도 관리 및 예산집행의 적정성 등을 관리함으로써 연구효율 상승 및 예산집행의 투명성 강화
- 또한 연차별/단계별 내부 평가지표를 설정하고 관리함으로써 체계적인 연구단 운영 도모
- 신규 또는 기 개발된 관리시스템 벤치마킹을 통한 개방형 연구관리시스템을 운영하고 연차별/단계별 연구성과를 DB화함으로써 효율적 성과관리 추구 우수한 연구성과를 배출하는 연구기관에 대하여 별도의 인센티브를 부여함으로써 연구동기 극대화

표 5.1 연구단 성과목표 및 성과지표 설정

성과목표	성과지표	가중치	소계
기술적효과	특허출원/등록	0.08	0.20
	실용신안 출원/등록	0.02	
	소프트웨어 등록	0.03	
	신기술 지정	0.07	
학술적효과	국내외 학술지 게재	0.08	0.15
	국내외 학술회의 발표	0.07	
공공적 효과	설계기준, 시방서 지침에 제안	0.07	0.07
연구개발 관련 홍보	연구개발 관련 홍보	0.03	0.03
현장시험	시제품 출시	0.1	0.2
	현장시험	0.1	
연구성과 현장적용에 의한 비용 절감효과	현장적용에 의한 비용절감효과	0.1	0.1
인력활용/양성 효과	국내 장단기 연수지원 성과	0.01	0.04
	인력양성	0.03	
기술실시계약 및 사업화	기술실시계약	0.1	0.2
	사업화/시제품	0.1	
	합계	1	1

5. 실용화 추진 전략

가. 실용화 방안

- 각 세부과제에서 개발된 기술들은 통합형 현장검증/실험을 통하여 성과품의 검증 및 현장적용성 평가가 필요하며 통합매뉴얼 작성/기술이전을 실시하여 성과품의 실용화 방안을 구현해야 함
- 개발기술의 검증 및 현장적용성 평가에서 문제점이 발생될 경우 개발기술을 피드백함으로써 성과품의 성능 보완 및 완성도의 극대화가 가능하도록 연구단이 구성되어야 함
- 본 연구는 실용적 성과물의 개발을 목표로 하기 때문에 관련 기업들의 참여를 적극적으로 유도해야 함
- 또한, 성과품이 완성된 후 기업체들이 연구성과물들을 적극 활용할 수 있는 방안을 계획하여 활발한 기술이전 시스템화가 필요함
- 실용화 및 제품화 방안으로는 연구의 주요 성과품으로 예상되는 시공시스템과 설계기술 및 시공기술을 활용하며, 설계기술은 대형 시공사의 해상풍력터키 시장에 입찰조건으로 활용하여 시장 진입의 가능성을 높이고, 시스템 제작 및 시공시스템과 시공기술은 전문 시공업체가 기술을 활용하여 본 사업에서 직접적으로 사용하도록 함
- 기술이전은 연구에 참여하는 참여기업에 통상실시권의 형태로 실시계약을 추진할 예정이지만, 참여기업의 참여 목적에 부합하도록 대형 시공사, 전문시공업체, 전문설계사로 구분하여 별도의 실시계약을 추진할 수도 있음
- 본 연구단의 연차별 연구로드맵에 따르면, 1단계(3년)에는 요소기술을 개발하고, 이후 2단계(2년)에는 pilot-test를 수행하는 것으로 연구단계가 구성되어 있으며, pilot-test를 통해 기술을 검증하여 3단계로 실증단지 구축 또는 시범사업을 추진하는 것으로 계획함
- 테스트베드는 2개(안)으로 추진될 수 있음
 - 1(안)은 기 추진 중인 서남해안권 대규모 해상풍력단지의 실증 및 시범단지에 연계하여 추진하는 방안이며, 2(안)은 테스트 베드 후보지를 지자체 및 사업주체를 대상으로 공모하는 방법임

- 해상풍력단지조성을 위한 입지후보지로 서남해안과 제주도 인근이 대두되고 있음. 본 개발기술은 그린에너지 창출이라는 국가정책과 세계적인 정책기조에 부합하므로, Test-Bed 적용을 통한 성과검증과 실용화가 용이함. 해상풍력단지 입지로 선정된 지역에서 연구성과를 직접적으로 활용할 수 있을 것으로 기대됨.

나. 실용화를 위한 법/제도 연구 추진 방안

- 신재생 에너지의 비중이 확대되면서 신재생 에너지 고유의 변동성은 전력 시스템 차원에서 새로운 이슈가 될 것이다. 하지만 신재생 에너지의 보급은 온실가스 감축을 향한 글로벌 차원의 움직임인 만큼 각국 정부와 전력회사는 신재생 에너지 도입 확대에 따른 전력 생산의 변동성과 수급 시점의 불일치 문제를 극복할 수 있도록 CAES와 같은 새로운 대안을 모색하는데 적극적인 자세를 취하여야 한다.
- 이에 따라 신재생 에너지의 효율적 활용을 위해서는 국가 차원에서 CAES 시스템의 구축 및 활용에 대한 정책적 접근이 필요하며, 이와 함께 국내외 법적, 제도적 분석 검토 및 관련 규정의 제시가 필요하다.
- 총괄 차원에서의 연구단 과제 중 법/제도/경제적 분석 연구와 관련하여 아래와 같이 정리할 수 있음
 - 병렬 분산형 CAES 시스템 구축 관련 전반적인 법/제도 분석 연구
 - 국내외 정책/기술동향 파악
 - CAES 시스템 관련 국내 법, 제도 정책안 연구
 - 타부처 및 민간과의 관련 정책 협력 방안 연구
 - 기술개발 효율화 제고방안 연구
 - 수중 CAES 건설 관련 제도적 검토 연구
 - 수중 CAES 저장소 건설을 위한 사전 허가
 - 압축공기의 적정 처리 및 활용 분석
 - 압축공기에 대한 누출 모니터링 및 검증
 - 신재생에너지 연계 CAES 시스템의 경제성 분석 연구
 - 발전원에 따른 CAES 시스템 최적 배치 연구
 - Smart Grid 연계 방안 연구
 - 신재생 에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standards, RPS) 연계방안 연구

제3절 1세부과제 구성 및 추진전략

1. 연구목표 및 범위

○ 1세부과제의 연구목표 및 범위는 다음과 같음

구분	과제명	연구목표 및 범위
1세부과제	고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고성능 대용량 CAES 구조물 개발 및 설계/시공 기술 정립 수중 압력 용기 보호 구조물 설계/시공 기술 개발 안전하고 효율적인 공기 압축 기술 개발 정압식 압축공기 저장 기술 개발 효율적인 압축 공기 활용 기술 개발 구조물 및 공기 압축/활용 시설 시스템 최적 설계 기술 개발 개발 기술의 실험적 검증
1-1	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	<ul style="list-style-type: none"> 규모 : 4MWh급 전력에너지 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 성능 : 고압 압축공기(100기압) 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 기능 : 경제성 및 안정성을 고려한 고강도/고성능 구조물 개발 기술 : 신형식/신소재를 이용한 구조물 개발 및 해석/설계 기술 개발
1-2	압력용기 외부 보호 시설 설계 및 시공기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고압 CAES 구조물 보호 구조물 설계 및 시공 기술 개발 경제적이고 안전한 최적 보호 구조물 형식 및 형상 개발 외부 보호 구조물의 안전성 평가 모듈형 급속시공 보호구조물 개발 보호 구조물 상부에 발전시설 배치 및 설치 기술 개발
1-3	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> (1MW급) CAES 시스템 공정제어 및 안전설계 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계, 해석, 제작 및 공정제어 기술개발 CAES 운전 모니터링 및 200bar/650℃급 안전설비 기술개발 CAES 최적설계 및 열-전기 에너지네트워크 통합 및 연계기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> 스마트그리드, 써멀그리드 등 에너지네트워크와의 통합 및 연계
1-4	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고압(100bar)의 압축공기 압력 변동률 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 개발 공기압력 또는 체적제어의 핵심부품인 비압축성 액체의 양방향 펌핑 가능한 용적식 펌프 개발

2. 연구내용

구분	과제명	연구 내용
1세부과제	고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고성능/대용량 해상 CAES 시스템 구축을 위한 압축 공기 저장 구조물, 공기 압축 및 활용 기술을 개발하고 상호 유기적인 구성으로 최적 시스템 구축법을 개발하고 실험적으로 검증한다.
1-1	신소재 / 신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	<ul style="list-style-type: none"> 강합성 구조 또는 FRP-콘크리트 합성 구조 대용량 CAES 구조물 개발 대용량 고압 기체 저장용 복합 보강 구조물 설계 및 제작 기술 개발 대용량 고압기체 저장 용기의 열-응력 CFD 해석 기술 개발 온도변화에 따른 콘크리트 강도 변화 산정 기술 개발 구조물 안전성 평가 및 유지보수 기술 콘크리트 구속효과를 고려한 강도 산정 및 비선형 해석 기술 개발 FRP 강도 산정 및 해석 기술 개발 FRP-Metal 적층구조 압력용기 강도 산정 및 해석 기술 개발 압력용기 구조 거동 해석 기술 개발 해상 고압용기 시공 단계별 해석 기술 개발 저장용기의 기밀성 향상을 위한 밀폐 및 체결 기술 개발 대용량 복합 보강 구조 고압 탱크의 강선 와인딩 기술 개발 구조물 거동 분석 및 성능 검증 실험 수행
1-2	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 모듈형 수중 콘크리트 구조물 개발 및 시공 기술 개발 보호 구조물의 최적 형상 및 구조 형식 개발 수중 구조물의 해양하중 안정성 확보를 위한 수치 및 수리 모형실험 수중 구조물의 내진 안전성, 내충격성 등 안정성 평가 기술 개발 보호 구조물 상부를 이용한 발전 시설 및 기타 시설의 최적 배치법 제시
1-3	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 압축-수송-주입-저장-팽창 전체시스템 공정설계 및 제어 알고리즘 개발 압축공기-열-전기에너지 통합 시스템 설계, 효율 해석, 제작 기술 압축공기 저장소-축열재-축열조-방열 설비 복합시스템 설계, 해석 및 제작 기술 압축공기-열-전기에너지 운전변수 모니터링 및 시스템 진단 기술 개발 비상감압 등 압축공기측 안전설비 설계 및 개발 저장구조물 열응력 해석, 열손실 제어 등 열에너지 계통 안전설비 설계 및 개발 부하에 따른 CAES 구성요소 및 에너지네트워크 선정 CAES 통합 시스템 성능예측 및 최적화 기술 개발 스마트그리드, 써멀그리드 등 에너지네트워크와의 통합 및 연계
1-4	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 정압식 압축공기 저장 발전용 양방향 토출 용적식 수압펌프 개발 정압식 압축공기 저장 제어 시스템 개발 정압식 압축공기 저장 시스템 최적화 기술 개발

3. 추진전략 및 로드맵

가. 추진전략

- 현재, 전 세계적인 탄소저감 대책 논의에 따라 신재생 에너지 개발에 대한 관심과 투자가 집중되고 있으며, 각 나라에서는 새로운 무공해 에너지원인 신재생에너지 기술을 선점하기 위해, 관련 기술에 많은 투자 중이다. 따라서 이와 같은 신재생 에너지 산업의 시장 급성장 추세와 기술 선점을 위한 국가적 지원 필요한 시점이다. 이와 같은 현실은 2013년부터 국제환경규제에 의한 온실가스 저감 의무 이행 대상국에 포함될 가능성이 높으므로, 2030년까지 신재생 에너지 보급률을 30%로 높이는 것을 목표로 추진하는 정책에도 반영이 되어 있으며, 친환경적인 에너지원 확대를 위한 국가적 보급 사업 등의 기본적인 노력 외에 핵심 부품의 국산화 및 신개념 시스템 개발 등의 시장 선도를 위한 적극적인 정책 추진이 필요하다.
- 특히, 신재생 에너지 분야는 생산기반 기술 유관 산업이 차지하는 비중이 높고 고용창출 효과가 매우 크며 전 세계를 마켓으로 할 수 있는 최고의 미래 유망 산업이며, 발전용량 대비 소요면적에 있어 석탄 3,642m²/GWh, 태양광 3,237m²/GWh인 데 비해 풍력은 1,335m²/GWh로 경쟁력이 있으므로 동 분야에 관한 핵심 기술 개발 시급한 실정이다. 하지만, 풍력 및 해양 등 신재생 에너지 발전 전력은 불연속적이고 예측 불가능하므로, 국가 전력망에 계통연계 될 수 있는 정출력의 전력 발전을 위해 에너지 저장 필수이며, 에너지 저장 기능이 없는 섬이나 오지 등의 독립 발전용으로 풍력 에너지 보급 불가능한 실정이다. 따라서 신재생 에너지 산업의 활성화를 위해서 에너지 저장 기술 확보는 필수불가결하다고 할 수 있다. 이러한 에너지 저장 기술 개발은 국가적 정책 추진 방향과 부합하며, 에너지 저장 모듈 방식의 하나인 유체압축식 에너지 저장을 위해서는 기반 기술의 고도화가 동반되어야 한다.
- 하지만, 국내에는 아직 중·대용량 유체 압축식 에너지 저장 및 변환 시스템에 관한 개발 및 제작 경험이 없어, 신재생 에너지의 효율적 이용이 어려운 실정이다. 따라서 본 사업에서는 신재생 에너지의 효율을 극대화하기 위한 에너지 저장 시스템의 핵심 기술인, 1) 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발, 2) 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발, 3) 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발, 4) 정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발을 수행하여, 각 핵심 기술을 유기적으로 연계/통합한, 『고성능 대용량 해상 CAES 시스템』을 개발한다. 각각의 핵심기술을 동시에 확보하고 있는 기업은 흔하지 않으며,

각각의 핵심기술을 각 참여기업이 개발하는 것이 효율적이며, 주관기관은 핵심모듈의 성능향상을 위한 생산기반기술을 지원하며 과제의 총괄지원하고, 대학은 참여기관으로써 주관기관과 기업이 확보하지 못한 기초기술을 지원하는 것이 효율적이라 판단된다. 합성구조 및 급속시공 기술을 갖고 있는 연구원 및 기업의 협동연구로 효율적 기술 개발하고 CAES 설비 분야 개발의 주도적 역할을 추진하고 있는 국내 연구소, 해외 대학 및 해외 CAES 운영사와의 공동연구개발을 추진한다. 또한, 기존 연구성과 활용을 위해 국내외 공동연구 모색하고, 기계, 건설, 토목, 해양, 전기전자, 지질 등 다학제적 융복합 기술개발을 추진한다.

- 첫번째 핵심기술인 「신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발」 분야에서는 다음과 같은 핵심 기술을 개발하며, 이는 산학연 협동 연구로 추진된다.
 - 대용량 고압 기체 저장용 복합 보강 구조물 설계 및 제작 기술
 - 대용량 고압기체 저장 용기의 열-응력 CFD 해석 기술
 - 온도변화에 따른 콘크리트 강도 변화 산정 기술
 - 구조물 안전성 평가 및 유지보수 기술
 - 콘크리트 구속효과를 고려한 강도 산정 및 비선형 해석 기술
 - FRP 강도 산정 및 해석 기술
 - FRP-Metal 적층구조 압력용기 강도 산정 및 해석 기술
 - 압력용기 구조 거동 해석 기술
 - 해상 고압용기 시공 단계별 해석 기술
 - 저장용기의 기밀성 향상을 위한 밀폐 및 체결 기술
 - 대용량 복합 보강 구조 고압 탱크의 강선 와인딩 기술
 - 구조물 거동 분석 및 성능 검증

- 두번째 핵심기술인 「압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발」 분야에서는 다음과 같은 핵심 기술을 개발하며, 이는 산학연 협동 연구로 추진된다.
 - 모듈형 수중 콘크리트 구조물 개발 및 시공 기술
 - 보호 구조물의 최적 형상 및 구조 형식 결정 기술
 - 수중 구조물의 해양하중 안정성 확보를 위한 수치 및 수리모형실험
 - 수중 구조물의 내진 안전성, 내충격성 등 안정성 평가 기술
 - 보호 구조물 상부를 이용한 발전 시설 및 기타 시설의 최적 배치 기술

- 세번째 핵심기술인 「공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발」 분야에
서는 다음과 같은 핵심 기술을 연구한다.
 - 압축-수송-주입-저장-팽창 전체시스템 공정설계 및 제어 알고리즘 개발
 - 압축공기-열-전기에너지 통합 시스템 설계, 효율 해석, 제작 기술
 - 압축공기 저장소-축열재-축열조-방열 설비 복합시스템 설계, 해석 및 제작 기술
 - 압축공기-열-전기에너지 운전변수 모니터링 및 시스템 진단 기술 개발
 - 비상감압 등 압축공기측 안전설비 설계 및 개발
 - 저장구조물 열응력 해석, 열손실 제어 등 열에너지 계통 안전설비 설계 및 개발
 - 부하에 따른 CAES 구성요소 및 에너지네트워크 선정
 - CAES 통합 시스템 성능예측 및 최적화 기술 개발
 - 스마트그리드, 써멀그리드 등 에너지네트워크와의 통합 및 연계

- 네번째 핵심기술인 「공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발」 분야에
서는 다음과 같은 핵심 기술을 연구한다.
 - 정압식 압축공기 저장 발전용 양방향 토출 용적식 수압펌프 개발
 - 정압식 압축공기 저장 제어 시스템 개발
 - 정압식 압축공기 저장 시스템 최적화 기술 개발

나. 로드맵

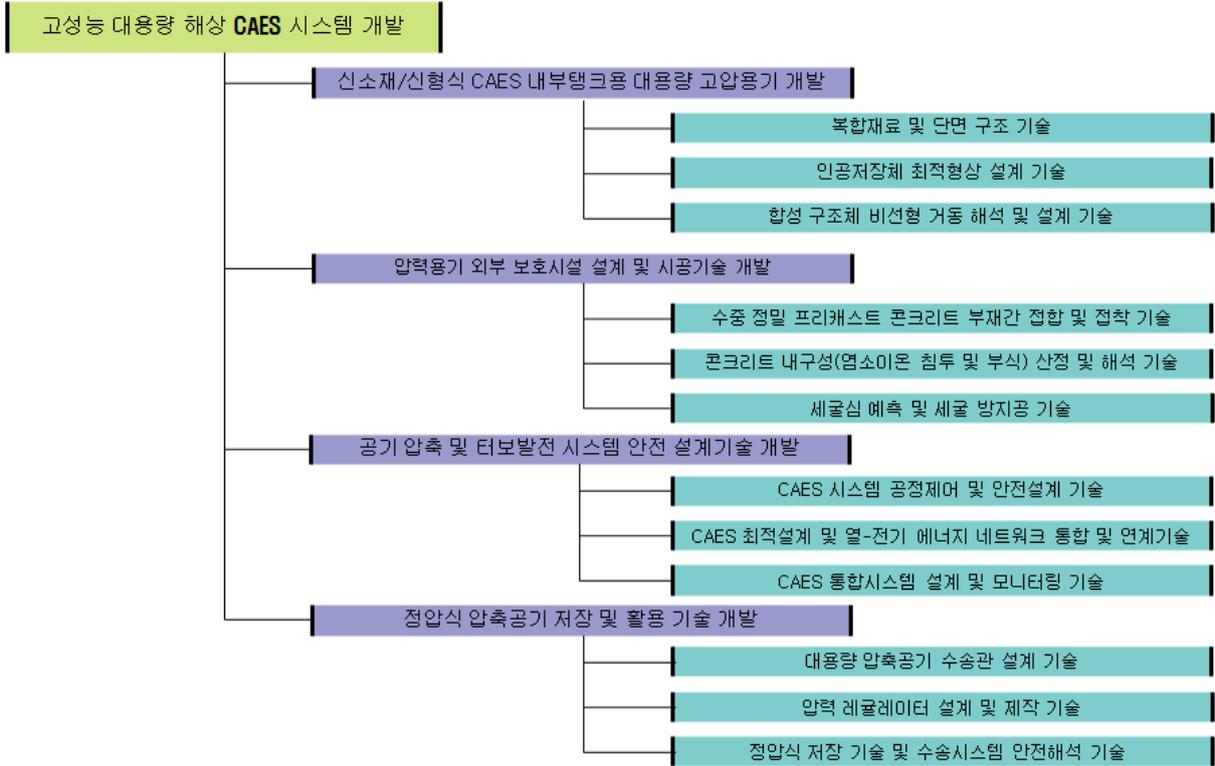


그림 5.5 1세부과제 기술 체계도

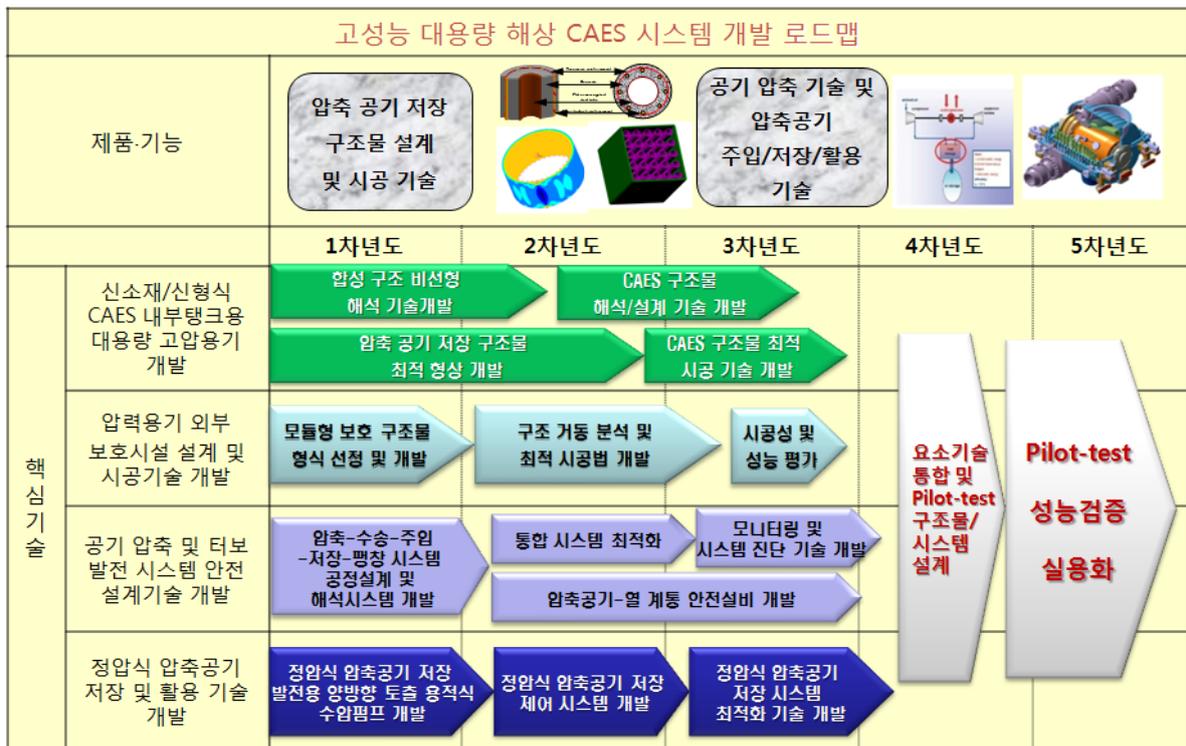


그림 5.6 1세부과제 기술개발 로드맵

4. 예상 연구성과물의 목표성능

	핵심기술	목표 성능 및 기술수준	목표설정근거
1	신소재 / 신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 압축공기 저장용 고강도/고성능 구조물 설계/시공 기술 완성 • 100기압, 4MWh급 압축공기 저장구조물 개발 • 신소재/신형식 압축공기 저장 구조물 해석 및 안전성 확보 기술 완성 	<ul style="list-style-type: none"> • 압축공기압의 목표치가 100기압이므로 이를 저장할 수 있는 고압용기 개발 • 해상풍력 5MW급 타워 4기의 최소 압축공기 저장 용량으로 MWh급 정출력 발전시스템은 20MW급 해상풍력의 최소 지속 발전 용량임
2	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 모듈형 급속시공 보호 구조물 개발 및 시공 기술 개발 (기존대비 공기 20% 이상 단축) • 보호 구조물 상부 설치 발전 설비 배치 최적화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 지상 모듈형 급속시공으로 교량적용시 최대 80%까지 공기 단축이 가능하다는 보고 있으나, 해상시공임을 고려하여 기존대비 공기 20% 이상 단축하는 것을 목표로 함
3	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 1MW급 CAES시스템 공정설계, 해석 기술 확보 및 최적화 • 고온, 고압 CAES 안전설비 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 주입-저장-활용 통합시스템의 해석, 공정설계 및 시스템 최적화 필요 • 고압의 압축공기 및 고온의 축열 계통의 안전설비 개발을 통한 전체 시스템의 안전성 확보 필요
4	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 고압(100bar)의 압축공기의 압력 변동율을 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 압축공기 저장에 따른 압력상승과 활용에 따른 압력저감의 변동율을 $\pm 10\%$ 이내로 제어함

5. 성과목표 및 성과지표

○ 1세부과제에서 예상되는 성과지표별 예상 목표치는 다음과 같다.

성과목표	성과지표	목표치	가중치
기술적효과	특허출원/등록	5	0.08
	실용신안 출원/등록	2	0.02
	소프트웨어 등록	2	0.03
	신기술 지정	1	0.07
학술적효과	국내외 학술지 게재	15	0.08
	국내외 학술회의 발표	28	0.07
공공적 효과	설계기준, 시방서 지침에 제안	1	0.07
연구개발 관련 홍보	연구개발 관련 홍보	4	0.03
현장시험	시제품 출시	1	0.1
	현장시험	1	0.1
연구성과 현장적용에 의한 비용 절감효과	현장적용에 의한 비용절감효과	1	0.1
인력활용/양성 효과	국내 장단기 연수지원 성과	2	0.01
	인력양성	4	0.03
기술실시계약 및 사업화	기술실시계약	1	0.1
	사업화/시제품	1	0.1
	합계		1

6. 실용화 방안

○ 본 연구 사업에서 개발되는 기술은 궁극적으로 모든 신재생 에너지의 효율성을 극대화 시킬 수 있으며, 모든 종류의 신재생 에너지 생산 시설에 접목이 가능하다. 설비 부문에서는 CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계도, 해석 프로그램, 제작 사양서, 공정제어 알고리즘, 랩스케일 프로토타입 시제품, 통합 에너지네트워크 연계 및 운영지침서 등을 제공하여, 기업이 CAES 설비 건설시 안전하고 효율적인 설비 시설 제작을 할 수 있도록 하며, 필요한 원천기술을 제공하여 국외 기술 이용으로 인한 기술 종속을 탈피하도록 한다. 또한, 건설사, 중공업사 및 해양/항만설계사, 설비제조사에 기술 이전하고, Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인

증/성능 검증 및 육성하여, 경제성이 확보된 신재생 에너지를 생산한다. 이를 위해서는 개발 기술을 특허 등록, 신기술 등록하여 각 기술 필요 기업에 기술 이전과 교육을 실시하며, 설계 가이드와 설계 예제를 제공하고, 시공 지침, 운영 지침을 제공한다. 이와 같이 실제 현장에 적용 가능한 기술을 도출하기 위해서는 연구 단계에서 각 전문 기업의 사업 참여와 공동 연구가 반드시 필요하다.

7. 기대성과 및 활용방안

가. 기대성과

- 본 연구 사업은 신재생 에너지의 효율적인 이용을 위하여 반드시 필요하며, 본 연구가 성공적으로 완료되었을 때, 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다. 먼저, 안정적인 해상풍력, 조류발전, 파력발전 등의 신재생에너지 고효율 발전 시스템 개발로 신시장 창출 및 관련 산업의 육성이 가능하며, 신재생에너지 활용성 극대화 및 기저발전 시스템개발로 친환경 녹색성장 주도하게 되어, 세계 시장 점유율을 확대하여 국익에 기여할 것이다. 또한, 건설 측면에서 본다면, 고성능 구조물 설계/시공 기술 개발에 따른 타 건설 구조물 영역의 기술발전 및 시장 확대가 가능하다. 또한, 에너지저장을 통한 신재생에너지 보급 및 확산에 기여할 수 있으며, 국가적으로 추진 중인 스마트그리드 및 에너지그리드 정책 수행에 기여한다. 설비 부문 또한, CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 기술(시스템 공정제어, 안전설계, 최적설계 등) 확보를 통한 경제성 증진하고, 기술 확보 및 파일럿 등 실증 실적으로 경쟁력 있는 CAES 플랜트 수출 산업화 가능할 것이다.

나. 활용방안

- 본 연구 사업에서는 최종 성과물로 고성능 대용량 해상 CAES 시스템의 토털솔루션인 고성능 대용량 해상 CAES 시스템 설계/건설 기술을 개발한다. 각 핵심 연구 부문에서, 1) 고성능 대용량 압축공기 저장 구조물 해석/설계/시공 기술, 2) 수중 모듈러 구조물 안전성 확보 및 시공 기술, 3) CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계/해석 기술 및 시제품, 4) 통합 에너지네트워크 연계 및 운영지침서, 5) 정압식 압축공기 저장 발전용 양방향 토출 용적식 수압펌프, 6) 정압식 압축공기 저장 제어 시스템, 7) 고압(100bar)의 압축공기 압력 변동률 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 등의 연구 결과를 도출하며, 이는 최종 수요처인 건설사, 중공업사, 해양/항만설계사, 발전설비/장비 제조사, 및 발전사 등에 기술 이전되어, Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성, CAES 발전 단지 구축 및 적용, 원천기술 확보, 파일럿 플랜트 적용 및 보급화 가이드라인 반영, 해상풍력 경제성 확보 및 확대적용 등으로 활용될 것이다. 또한, 해상풍력을 기반으로 개발되었

으나, 생산된 전기를 이용하여 압축공기를 저장하는 시스템이므로 조류발전과 파력발전 등의 해양에너지를 포함하여 태양광발전 등 불규칙하게 생산되는 특성이 있는 신재생에너지에 개발기술의 적용이 가능하다. 따라서, 다양한 신재생에너지원에 활용가능하다.

구분	과제명	최종 성과물	최종 수요처	활용방안	
1세부과제	고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고성능 대용량 해상 CAES 시스템 설계/건설 기술 (Total Solution) 			
공통	공통 1	<ul style="list-style-type: none"> 신 소재 / 신 형 식 CAES 내부탱크 용 대용량 고압 용기 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 고성능 대용량 압축공기 저장 구조물 해석/설계/시공 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 건설사 (현대건설, GS건설, SK건설 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 건설사, 중공업사 및 해양/항만설계사, 설비제조사에 기술 이전
	공통 2	<ul style="list-style-type: none"> 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 수중 모듈러 구조물 안전성 확보 및 시공 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 중공업사 (두산중공업, 삼성중공업, 현대중공업 등) 	<ul style="list-style-type: none"> Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성
	공통 3	<ul style="list-style-type: none"> 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계/해석 기술 및 시제품 통합 에너지네트워크 연계 및 운영지침서 	<ul style="list-style-type: none"> 해양/항만설계사 (건일엔지니어링, 헤인이엔씨, 한국전력기술 등) 	<ul style="list-style-type: none"> CAES 발전 단지 구축 및 적용 원천기술 확보, 파일럿 플랜트 적용 및 보급화 가이드라인 반영 등
	공통 4	<ul style="list-style-type: none"> 정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 정압식 압축공기 저장 발전용 양방향 토출 용적식 수압펌프 정압식 압축공기 저장 제어 시스템 고압(100bar)의 압축공기 압력 변동률 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 	<ul style="list-style-type: none"> 발전설비/장비 제조사 (현대로템 등) 발전사 (한국서부발전 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 해상풍력 경제성 확보 및 확대적용 조류발전과 파력발전 등 타해양에너지 및 태양광발전 등 타신재생에너지에 개발기술 적용 가능

제4절 2세부과제 구성 및 추진전략

1. 연구목표 및 범위

구분	과제명	연구목표 및 범위
2세부과제	해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 저장 구조물 개발 • 기존 나셀의 발전기를 이용한 발전시스템이 아닌 직구동 유압 동력발생 장치를 개발하여 효율적인 공기압축 에너지 저장 시스템의 개발과 정출력의 일정 발전 시스템의 개발 • 유압 직구동 용적식 고압 공기압축기의 개발을 통해 효율적인 압축 공기 활용 기술 개발 • 기존 CAES시스템보다 효율적인 AA-CAES를 이용하여 열에너지의 저장과 효율적 활용을 통한 경제적인 고효율 압축공기에너지 저장 시스템 개발 • 개발 기술의 실험적 검증
2-1	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 규모 : 1MWh(1MW*1hr)급 전력에너지 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 • 성능 : 고압 압축공기(100기압) 저장구조물의 설계/시공 기술 개발 • 기능 : 경제성 및 안정성을 고려한 고강도/고성능 구조물 개발 • 기술 : 해상풍력 구조물을 이용한 신형식/신소재 CAES 저장 구조물 개발 및 해석/설계 기술 개발
2-2	풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 블레이드 회전축 및 유압피스톤 펌프의 축이음 장치 개발 • 고풍력 밀도형 고압/대유량 피스톤 펌프 설계 및 제작 • 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 • 압력맥동 저감 및 에너지 축압장치 개발 • 성능 및 내구시험장비 개발
2-3	유압 직구동 용적식 고압 (100bar) 공기압축기 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 1,300HP급 100bar, 350N^m/hr 고효율 왕복동 공기 압축기 개발 • 해상풍력 1기당 5MW 발전 기준, 1,000kW급 압축기 5대로 압축공기 주입
2-4	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • CAES 성능향상 및 최적화를 위한 열교환기 및 열에너지 저장 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 기존 CAES (열교환 효율 및 열에너지 저장 효율) 대비 10% 성능 향상을 통한 시스템최적화 - CAES 시스템에 최적화된 저장 용기 및 열에너지 저장 물질(PCM) 개발 • CAES 압축열 및 재생에너지 연계 고효율 하이브리드 발전/담수 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 고효율 다중효용 증발식 해수담수기 개발 - 재생에너지 연계 발전/담수 하이브리드 시스템 개발

2. 연구내용

구분	과제명	연구 내용
2세부과제	해상풍력 일체형 신개념 MICRO -CAES 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 해상풍력 기초 형식인 Monopile, 중력식, 잔교식 기초나 상부 타워 구조물을 이용한 고압 CAES 저장용기를 개발하여 구조물 내부에 고압 공기를 저장하는 방법으로, 저장된 고압 공기를 상부 transition piece에 설치된 발전실로 유출하여 발전하는 시스템을 개발한다
2-1	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 해상풍력 기초구조물이나 타워를 ICH RC 또는 DSCT 구조로 개발하여, 내부 강관 고압 공기 저장 기술 개발 • 해상풍력 기초구조물의 해양하중 안정성 확보를 위한 수치 및 수리모형실험 • 해상풍력 타워구조물의 풍하중 안정성 확보를 위한 수치 및 풍동모형실험 • 고압 기체 저장용 복합 보강 구조물 설계 및 제작 기술 • 구조물 안전성 평가 및 유지보수 기술 • 콘크리트 구속효과를 고려한 강도 산정 및 해석 기술 • 압력용기 구조 거동 해석 기술 개발 • 저장용기의 기밀성 향상을 위한 밀폐 및 체결 기술 개발 • ICH RC 및 DSCT 고압용기 연결부 설계 및 시공기술 개발
2-2	풍력 블레이드 직 구동 유압 동력발 생시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 블레이드 회전축 및 유압피스톤 펌프의 축이음 장치 개발 • 고회전 밀도형 고압(350bar)/대유량 피스톤 펌프 설계 및 제작 • 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 • 압력맥동 저감 및 에너지 축압장치 개발 • 성능 및 내구시험장비 개발
2-3	유압 직구동 용적 식 고압(100bar) 공기압축기 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 유압식 저속 고투오크 회전구동 장치개발 • 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 • 왕복동 플런저 윤활설계기술 개발 • 공기 압축기 헤드 설계기술 개발 • 성능 및 내구시험기술 개발
2-4	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • CAES 시스템 공정, 설비 장소, 수요처 조건 등을 고려한 압축열 최적 활용 시스템 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> . 압축열 이용 발전 시스템 기술 개발 . 압축열 이용 담수플랜트 기술 개발 . 압축열 이용 난방 공급 기술 개발 . 재생에너지 연계 발전/담수 하이브리드 시스템 공정 설계 기술 개발 . 발전/담수 하이브리드 시스템 제작 및 실증시험 • CAES 시스템 압축열에너지 이용 공정기기 개발 <ul style="list-style-type: none"> . 고온, 고압 대용량 열교환을 장기간 유지할 수 있는 열교환기 개발 . 압축공기와 열교환을 통해 얻은 열에너지를 안정적으로 유지할 수 있는 축열기술(저장용기, PCM 등) 개발 . 압축열 회수 및 저장 기술 개발 . 최적 열교환 시스템 개발

3. 추진전략 및 로드맵

가. 추진전략

- 일본 후쿠시마 원전의 방사능 누출 사고로 인해 전세계 각국의 신재생에너지 개발 의지는 고조되고 있으며, 원자력 발안의 대안으로서 가장 각광받고 있는 신재생에너지 분야는 대규모 해상풍력 단지 개발이다. 우리나라에서는 서남해안 2.5GW급 해상풍력 단지 개발을 계획을 수립하고, 관련 연구에 박차를 가하고 있으며, 원자력 발전과 달리 방사능 유출 위험이 없는 무한 청정에너지라는 점에서 해상풍력 발전의 개발 가능성이 높아지고 있다.
- 해상풍력은 대규모 단지화로 생산기반 기술 유관 산업이 차지하는 비중이 높고 고용창출 효과가 매우 크며 전 세계를 마켓으로 할 수 있는 최고의 미래 유망 산업이며, 발전용량 대비 소요면적에 있어 석탄 3,642m²/GWh, 태양광 3,237m²/GWh인 데 비해 풍력은 1,335m²/GWh로 경쟁력이 있으므로 동 분야에 관한 핵심 기술 개발 시급한 실정이다. 하지만, 해상풍력의 발전 전력은 불연속적이고 예측 불가능하므로, 국가 전력망에 계통연계 될 수 있는 정출력의 전력 발전을 위해 에너지 저장 필수이며, 에너지 저장 기능이 없는 섬이나 오지 등의 독립 발전용으로 풍력 에너지 보급 불가한 실정이다. 따라서 신재생 에너지 산업의 활성화를 위해서 에너지 저장 기술 확보는 필수불가결하다고 할 수 있다. 이러한 에너지 저장 기술 개발은 국가적 정책 추진 방향과 부합하며, 에너지 저장 모듈 방식의 하나인 유체 압축식 에너지 저장을 위해서는 기반 기술의 고도화가 동반되어야 한다.
- 기존의 공기압축 에너지 저장 시스템(Compressed Air Energy Storage System)이 화력 발전소 등의 유휴 전력을 이용하여 압축 공기를 저장한 후 개스터빈으로 발전시 압축 공기를 이용하여 개스터빈의 효율을 올리는 용도로 사용되는 것에 반하여, 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템은 기존의 해상풍력 나셀부에 기어박스과 발전기 대신에 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템만을 설치하여 나셀부의 구조를 경량화하여 타워 하중을 크게 경감하고 유지보수를 매우 쉽게 할 수 있는 장점이 있으며, 해상풍력 기초나 타워 구조물의 일부를 저장소로 이용하고 상부 Transition Piece에 압축 공기를 이용한 발전 시설을 설치함으로써 공사비의 획기적의 절감, 시공의 편의성 확보 및 유지보수 비용의 대폭 절감하다. 또한, 풍력 에너지의 간헐적인 발생 특성으로 인한 불규칙적인 발전 전력을 안정적인 효율적인 정출력 기저 발전 시스템으로 만들 수 있으므로 해상풍력 발전의 효율성을 극대화시킬 수 있다. 기존의 해상풍력 시스템과는 전혀 다른 시스템과

정출력 발전 시스템을 개발하게 되므로 기존 해상풍력 개발의 패러다임 자체를 바꿀 수 있으며, 관련 기술의 선점을 통해 국내 산업 육성 발전 및 해외 시장 진출과 점유율 제고가 가능하여 국가 녹색 성장 전략에 크게 기여할 수 있다.

- 하지만, 국내에는 아직 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템에 관한 개발 및 제작 경험이 없어, 해상풍력을 직접 유압시스템을 이용한 정출력 발전 시스템으로 개발하기는 어려운 실정이다. 따라서 본 사업에서는 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템의 핵심 기술인, 1) 해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발, 2) 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발, 3) 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발, 4) AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발, 각 핵심 기술을 유기적으로 연계/통합한, 『해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템』을 개발한다. 각각의 핵심기술을 동시에 확보하고 있는 기업은 흔하지 않으며, 각각의 핵심기술을 각 참여기업이 개발하는 것이 효율적이며, 주관기관은 핵심모듈의 성능향상을 위한 생산기반기술을 지원하며 과제의 총괄지원하고, 대학은 참여기관으로써 주관기관과 기업이 확보하지 못한 기초 기술을 지원하는 것이 효율적이라 판단된다. 합성구조 및 급속시공 기술을 갖고 있는 연구원 및 기업의 협동 연구로 효율적 기술 개발하고 CAES 설비 분야 개발의 주도적 역할을 추진하고 있는 국내 연구소, 해외 대학 및 해외 CAES 운영사와의 공동연구개발을 추진한다. 또한, 기존 연구성과 활용을 위해 국내외 공동연구 모색하고, 기계, 건설, 토목, 해양, 전기전자, 지질 등 다학제적 융복합 기술개발을 추진한다.
- 첫번째 핵심기술인 「해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발」 분야에서는 다음과 같은 핵심 기술을 개발하며, 이는 산학연 협동 연구로 추진된다.
 - 해상풍력 기초구조물이나 타워를 ICH RC(Internally Confined Hollow Reinforced Concrete Column) 또는 DSCT(Double-Skinned Composite Tubular Columns) 구조로 개발하여, 내부 강관 고압 공기 저장 기술 개발
 - 중력식 해상풍력 기초 구조물인 경우 강합성 구조인 ICH RC(Internally Confined Hollow Reinforced Concrete Column)나 FRP 합성형 기초로 개발하여 압축공기 저장 구조물로 활용하는 기술
 - 잔교식 해상풍력 기초 구조물인 경우 기초 파일을 DSCT(Double-Skinned Composite Tubular Columns)나 FRP 합성형 파일로 개발하여 압축공기 저장 구조물로 활용하는 기술
 - Monopile 해상풍력 기초 구조물인 경우 기초 파일을 DSCT(Double-Skinned Composite Tubular Columns)나 FRP 합성형 파일로 개발하여 압축공기 저장 구조물로 활용하는 기술

- 해상풍력 상부타워에 압축 공기 저장소를 설치시에는 상부타워의 일부를 기초 파일을 DSCT(Double-Skinned Composite Tubular Columns)나 FRP 합성형 파일로 개발하여 압축공기 저장 구조물로 활용하는 기술
 - 해상풍력 기초구조물의 해양하중 안정성 확보를 위한 수치 및 수리모형실험
 - 해상풍력 타워구조물의 풍하중 안정성 확보를 위한 수치 및 풍동모형실험
 - 해상풍력 복합 하중(바람, 파랑, 조류등) 평가 기술 및 상하부 구조 통합 해석 기술
 - 고압 기체 저장용 복합 보강 구조물 설계 및 제작 기술
 - 구조물 안전성 평가 및 유지보수 기술
 - 콘크리트 구속효과를 고려한 강도 산정 및 해석 기술
 - 압력용기 구조 거동 해석 기술 개발
 - 저장용기의 기밀성 향상을 위한 밀폐 및 체결 기술 개발
 - ICH RC 및 DSCT 고압용기 연결부 설계 및 시공기술 개발
- 두번째 핵심기술인 「풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발」 분야에서는 다음과 같은 핵심 기술을 개발하며, 이는 산연 협동 연구로 추진된다.
- 블레이드 회전축 및 유입 피스톤 펌프의 축이음 장치 개발
 - 저소음, 플레시블 축이음 기술
 - 병렬구동 기어 트레인 구성기술
 - 고출력 밀도형 고압(350bar)/대유량 피스톤 펌프 설계 및 제작
 - 대용량(1,000cc/rev급) 레이디얼 피스톤 펌프 설계 및 주문제작
 - 저소음 고효율화 설계기술
 - 흡입부 캐비테이션 저감기술
 - 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발
 - 풍력 타워 또는 헤드에 설치하기위한 컴팩트한 카트리지형 유압제어밸브블록 설계
 - 압력맥동 저감 및 에너지 축압장치 개발
 - Accumulator 용량설계 기술
 - 타워 내부공간 활용 형상 설계기술
 - 성능 및 내구시험장비 개발
 - 시험장비 설계 및 제작
 - 동력발생시스템의 손실동력 측정
 - 내구수명 및 신뢰성시험

- 세번째 핵심기술인 「유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발」 분야에서는 다음과 같은 핵심 기술을 연구한다.
 - 유압식 저속 고토오크 회전 구동 장치 개발
 - 저속 고토오크 유압모터 적용기술
 - 회전속도 균일화 설계기술
 - 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발
 - 컴팩트한 카트리지형 유압제어밸브블록 설계
 - 왕복동 플런저 윤활설계기술 개발
 - 씰링설계 기술
 - 방열구조 설계기술
 - 공기 압축기 헤드 설계기술 개발
 - 흡토출 체크밸브 설계 기술
 - 압축기 헤드 냉각기술
 - 성능 및 내구시험기술 개발
 - 압축기 성능시험 회로구성
 - 압축요율 측정
 - 내구수명 및 신뢰성시험

- 네번째 핵심기술인 「AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발」 분야에서는 다음과 같은 핵심 기술을 연구한다.
 - CAES 시스템 공정, 설비 장소, 수요처 조건 등을 고려한 압축열 최적 활용 시스템 기술 개발
 - 압축열 이용 발전 시스템 기술 개발
 - 압축열 이용 담수플랜트 기술 개발
 - 압축열 이용 난방 공급 기술 개발
 - 재생에너지 연계 발전/담수 하이브리드 시스템 공정 설계 기술 개발
 - 발전/담수 하이브리드 시스템 제작 및 실증시험
 - CAES 시스템 압축열에너지 이용 공정기기 개발
 - 고온, 고압 대용량 열교환을 장기간 유지할 수 있는 열교환기 개발
 - 압축공기와 열교환을 통해 얻은 열에너지를 안정적으로 유지할 수 있는 축열 기술(저장용기, PCM 등) 개발
 - 압축열 회수 및 저장 기술 개발
 - 최적 열교환 시스템 개발

나. 로드맵

해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발

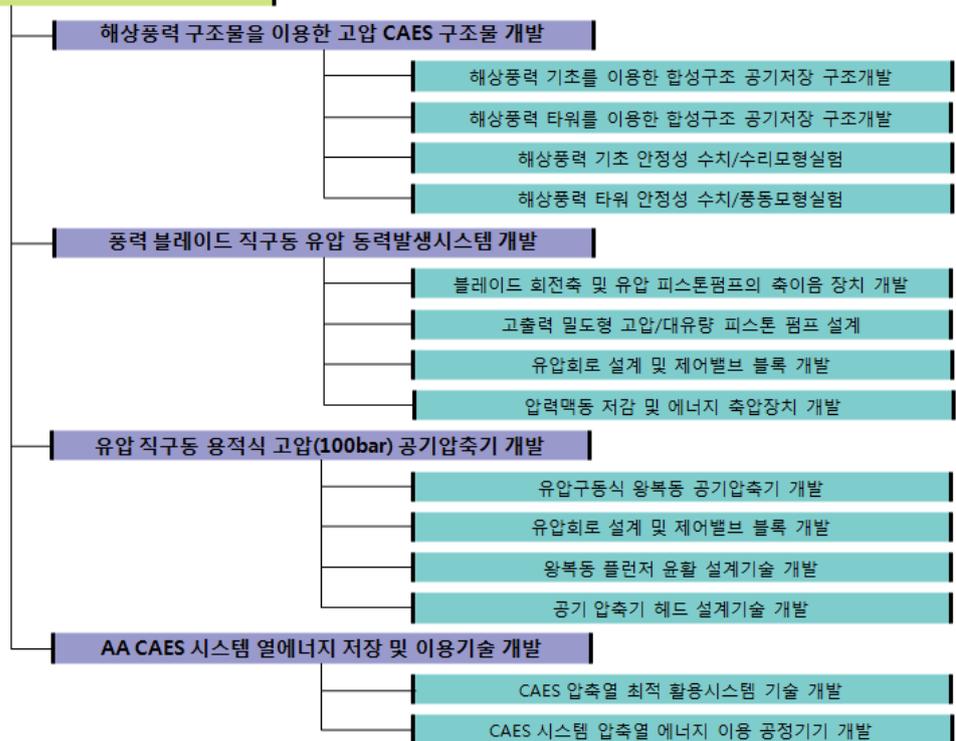


그림 5.7 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발 기술트리

해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발 로드맵					
제품-기능	<p>해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 저장용기 개발</p>		<p>블레이드 직구동 유압 동력 발생 시스템 및 AA-CAES 에너지 저장 활용 시스템</p>		
핵심기술	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
핵심기술	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	해상풍력 기초를 이용한 합성구조 공기저장 구조개발 해상풍력 타워를 이용한 합성구조 공기저장 구조개발	해상풍력 기초 안정성 수치/수리모형실험 해상풍력 타워 안정성 수치/풍동모형실험	Pilot-test 구조물 설계	Pilot-test 성능검증 실용화
	풍력 블레이드 직구동 유압 동력 발생시스템 개발	블레이드 회전축 및 유압 피스톤펌프의 축이음 장치 개발 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발	고출력 밀도형 고압/대유량 피스톤 펌프 설계 압력맥동 저감 및 에너지 축압장치 개발	기술통합	
	유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발	유압구동식 왕복동 공기압축기 개발 왕복동 플런저 윤활 설계기술 개발	유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 공기 압축기 헤드 설계기술 개발		
	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	CAES 압축열 최적 활용 시스템 기술 개발	CAES 시스템 압축열 에너지 이용 공정기기 개발		

그림 5.8 2세부과제 기술 개발 로드맵

4. 예상 연구성과물의 목표성능

	핵심기술	목표 성능 및 기술수준	목표설정근거
1	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	<ul style="list-style-type: none"> 해상풍력 중력식, Monopile식, 잔교식 기초를 이용한 강합성형 고압 CAES 구조물 개발 1MWh급 압축공기저장용 고압(100bar) 합성구조 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 해상풍력 5MW급 타워당 기초구조물의 크기를 고려한 최소 압축공기 저장 용량 1MWh급 정출력 발전 시스템은 5MW급 해상풍력의 최소 지속 발전 용량임
2	풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> 유압동력변환 효율이 85%이상인 5MW급 유압동력 발생 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 풍력 블레이드의 회전동력(기계동력)을 유압동력으로 직접 변환하여 동력손실을 최소화 함
3	유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발	<ul style="list-style-type: none"> 압축비 100인 용적형 공기압축기 압축기 전효율이 80%이상 달성 	<ul style="list-style-type: none"> 동력손실을 최소화 하기위해 유압으로 직접 압축기를 구동 하여 고효율 운전
4	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> AA-CAES 시스템 성능향상 기술 개발 (기존 CAES 대비 에너지 효율 10% 향상) 하이브리드 발전/담수 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 열경제학적 해석을 통하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음. 압축시 발생하는 열을 발전, 담수, 난방 등에 활용할 수 있음.

5. 성과목표 및 성과지표

○ 2세부과제에서 예상되는 성과지표별 예상 목표치는 다음과 같다.

성과목표	성과지표	목표치	가중치
기술적효과	특허출원/등록	4	0.08
	실용신안 출원/등록	2	0.02
	소프트웨어 등록	1	0.03
	신기술 지정	1	0.07
학술적효과	국내외 학술지 게재	15	0.08
	국내외 학술회의 발표	25	0.07
공공적 효과	설계기준, 시방서 지침에 제안	2	0.07
연구개발 관련 홍보	연구개발 관련 홍보	4	0.03
현장시험	시제품 출시	1	0.1
	현장시험	1	0.1
연구성과 현장적용에 의한 비용 절감효과	현장적용에 의한 비용절감효과	1	0.1
인력활용/양성 효과	국내 장단기 연수지원 성과	1	0.01
	인력양성	2	0.03
기술실시계약 및 사업화	기술실시계약	1	0.1
	사업화/시제품	1	0.1
	합계		1

6. 실용화 방안

○ 본 연구 사업에서 개발되는 기술은 궁극적으로 해상풍력 발전의 효율성을 극대화시킬 수 있으며, 새로운 해상풍력 구조물의 개발, 풍력 블레이드 직구동 유압 동력 발생시스템 개발, 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발 및 AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발이 가능하도록 고효율의 경제적 해상풍력 발전 단지 개발이 가능하다. 설비 부문에서는 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템, 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발 및 AA CAES

시스템 열에너지 저장 및 이용 통합시스템 설계도, 해석 프로그램, 제작 사양서, 공정제어 알고리즘, 랩스케일 프로토타입 시제품, 통합 에너지네트워크 연계 및 운영지침서 등을 제공하여, 기업이 해상풍력 일체형 MICRO-CAES 설비 건설시 안전하고 효율적인 설비 시설 제작을 할 수 있도록 하며, CAES 저장 시스템을 포함한 새로운 형식의 해상풍력 구조물의 개발에 필요한 원천기술을 제공하여 국외 기술 이용으로 인한 기술 종속을 탈피하도록 한다. 또한, 건설사, 중공업사 및 해양/항만설계사, 설비제조사에 기술 이전하고, Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성하여, 경제성이 확보된 해상풍력 CAES 시스템 및 단지를 개발한다. 이를 위해서는 개발 기술을 특허 등록, 신기술 등록하여 각 기술 필요 기업에 기술 이전과 교육을 실시하며, 설계 가이드와 설계 예제를 제공하고, 시공 지침, 운영 지침을 제공한다. 이와 같이 실제 현장에 적용 가능한 기술을 도출하기 위해서는 연구 단계에서 각 전문 기업의 사업 참여와 공동 연구가 반드시 필요하다.

7. 기대성과 및 활용방안

가. 기대성과

- 본 연구 사업은 해상풍력 발전의 효율적인 이용을 위하여 반드시 필요하며, 본 연구가 성공적으로 완료되었을 때, 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다. 먼저, 안정적인 해상풍력 신재생에너지 고효율 발전 시스템 개발로 신시장 창출 및 관련 산업의 육성이 가능하며, 해상풍력 활용성 극대화 및 기저발전 시스템개발로 친환경 녹색성장 주도하게 되어, 세계 시장 점유율을 확대하여 국익에 기여할 것이다. 또한, 건설 측면에서 본다면, 구조물을 추가로 건설할 필요 없이 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 구조물 설계/시공기술을 타 건설 분야의 기술발전 및 시장 확대가 가능하다. 또한, 에너지저장을 통한 신재생에너지 보급 및 확산에 기여할 수 있으며, 국가적으로 추진 중인 스마트그리드 및 에너지그리드 정책 수행에 기여한다. 설비 부문 또한, 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템, 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발 및 AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용 통합시스템(시스템 공정제어, 안전설계, 최적설계 등) 확보를 통한 경제성증고하고, 기술 확보 및 파일럿 등 실증 실적으로 경쟁력 있는 해상풍력 일체형 MICRO-CAES 플랜트 수출 산업화 가능하며, 선진국도 확보하지 못한 첨단 해상풍력 발전 시스템의 기술 확보로 해상풍력 사업 분야의 기술적 경제적 대변혁을 초래할 수 있다.

나. 활용방안

- 본 연구 사업에서는 최종 성과물로 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템을 개발한다. 각 핵심 연구부문에서, 1) 해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발, 2) 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발, 3) 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발, 4) AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발의 연구 결과를 도출하며, 이는 최종 수요처인 건설사, 중공업사, 해양/항만설계사, 발전설비/장비 제조사, 및 발전사 등에 기술 이전되어, Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성, 해상풍력-CAES 발전 단지 구축 및 적용, 원천기술 확보, 파일럿 플랜트 적용 및 보급화 가이드라인 반영, 해상풍력 경제성 확보 및 확대적용 등으로 활용될 것이다. 또한, 해외 풍력발전 시장에도 진출하는 수출산업으로의 육성도 가능할 것으로 기대된다.

구분	과제명	최종 성과물	최종 수요처	활용방안
2세부과제	해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> 해상풍력 일체형 풍력 블레이드 직구동 정출력 MICRO-CAES시스템 (Total Solution) 	<ul style="list-style-type: none"> 건설사 (현대건설, GS건설, SK건설 등) 중공업사 (두산중공업, 삼성중공업, 현대중공업 등) 해양/항만설계사 (건일엔지니어링, 헤인이엔씨, 한국전력기술 등) 발전설비/장비 제조사 (현대로템 등) 발전사 (한국서부발전 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 건설사, 중공업사 및 해양/항만설계사, 설비제조사에 기술 이전 Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성 해상풍력 일체형 MICRO-CAES 발전 단지 구축 및 적용 원천기술 확보, 파일럿 플랜트 적용 및 보급화 가이드라인 반영 등 해상풍력 경제성 확보 및 확대적용 수출산업화
	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	<ul style="list-style-type: none"> Monopile식, 중력식, 잔교식 기초 및 상부타워를 이용한 고압 CAES 구조물 해석/설계/시공 기술 		
	풍력 블레이드 직구동 유압 동력 발생 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> 풍력 블레이드 직구동 유압 동력 시스템 개발 해석/설계/설비 시제품 제작 기술 		
	유압 직구동 용적식 고압 공기압축기 개발	<ul style="list-style-type: none"> 유압식 저속 고토오크 회전 구동 장치 개발 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 		
	AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> CAES 시스템 공정, 설비 장소, 수요처 조건 등을 고려한 압축열 최적 활용 시스템 기술 개발 CAES 시스템 압축열에너지 이용 공정기기 개발 		

제5절 연구단 소요예산

1. 연구단 소요예산 총괄

- 연구단의 소요예산은 총 345.52억원(정부 259.11억, 민간 86.41억)으로 도출하였으며, 민간부담금은 전체 예산의 약 25% 수준임.

표 5.2 세부과제별 연구비 총괄표

(단위 : 백만원)

구분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	합 계
1세부	2,566	3,079	3,492	5,874	3,281	18,292
2세부	2,445	3,269	3,780	3,824	2,942	16,260
합계	5,011	6,348	7,272	9,698	6,223	34,552

표 5.3 세부과제별 총괄 예산(안)

(단위: 백만원)

구분	정부출연금	민간부담금	소계	비율
고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발 (1세부)	13,718	4,574	18,292	52.94%
해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발 (2세부)	12,193	4,067	16,260	47.06%
합 계	25,911	8,641	34,552	100.00%
비율	74.99%	25.01%	100.00%	

표 5.4 연차별 재원조달계획

(단위: 백만원)

년도	정부출연금	민간부담금	합계	비율
1차년도	3,758	1,253	5,011	15%
2차년도	4,760	1,588	6,348	18%
3차년도	5,454	1,818	7,272	21%
4차년도	7,272	2,426	9,698	28%
5차년도	4,667	1,556	6,223	18%
총계	25,911	8,641	34,552	100%

표 5.5. 연구내용별 예산 총괄

구분	과제명	총예산(백만원)			과제 우선순위
		정부	민간	합계	
1세부과제	고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발	13,718	4,574	18,292	
1-1	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	3,788	1,263	5,051	1
1-2	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	3,149	1050	4,199	4
1-3	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	4,371	1457	5,828	3
1-4	정압식 압축공기 저장 및 활용기술 개발	2,410	804	3,214	2
2세부과제	해상풍력 일체형 신개념 Macro-CAES 시스템 개발	12,193	4,067	16,260	
2-1	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	3,959	1,638	5,597	1
2-2	풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	2,242	748	2,990	2
2-3	유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기 압축기 개발	2,541	847	3,388	3
2-4	AA-CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	2,501	834	3,335	4
2-5	법제도 분석 및 개선방안 도출	950	0	950	5

표 5.6 연구내용에 따른 연차별 연구비

(단위 : 백만원)

세부과제명	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	합 계	구성비 (%)	비 고
1. 고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발	2,566	3,079	3,492	5,874	3,281	18,292		1세부 소계
1.1 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	919	948	970	1,379	835	5,051	15%	
1.2 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	527	696	919	1,186	871	4,199	12%	
1.3 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	634	767	900	2,460	1,067	5,828	17%	
1.4 정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	486	668	703	849	508	3,214	9%	
2. 해상 풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발	2,445	3,269	3,780	3,824	2,942	16,260		2세부 소계
2.1 해상풍력 기초를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	879	1,071	1,112	1,314	1,221	5,597	16%	
2.2 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	486	690	714	581	519	2,990	9%	
2.3 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발	530	774	820	662	602	3,388	10%	
2.4 AA CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	400	534	934	1,067	400	3,335	10%	
2.5 법제도 분석 및 개선방안 도출	150	200	200	200	200	950	3%	
합계	5,011	6,348	7,272	9,698	6,223	34,552	100%	

2. 세부과제별 소요예산

가. 1세부과제 총괄

표 5.7 1세부과제 비목별 연구비

(단위: 원)

비 목		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	합 계	구성비 (%)	비고	
1)	내/외부 인건비	818,582,400	891,648,000	928,800,000	947,376,000	910,224,000	4,496,630,400	24.6%		
2)	연구장비재료비	연구기자재및 시설비	937,768,489	795,000,000	1,248,000,000	861,000,000	619,561,350	4,461,329,839	24.4%	
		시작품 제작비	150,000,000	593,000,000	613,742,362	2,985,000,000	970,000,000	5,311,742,362	29.0%	
		재료비	154,474,084	232,196,830	88,955,093	247,675,040	191,794,883	915,095,930	5.0%	
	연구활동비	여비	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	250,000,000	1.4%	
		수용비 및수수료	49,114,940	53,498,880	55,728,000	56,842,560	54,613,440	269,797,820	1.5%	
		기술정보활동비	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	250,000,000	1.4%	
	연구수당	122,787,360	133,747,200	139,320,000	142,106,400	136,533,600	674,494,560	3.7%		
3)	간접비	233,272,727	279,909,090	317,454,545	534,000,000	298,272,727	1,662,909,089	9.1%		
4)	합계	2,566,000,000	3,079,000,000	3,492,000,000	5,874,000,000	3,281,000,000	18,292,000,000	100%	1)+2)+3)	
5)	정부지원	1,924,500,000	2,309,000,000	2,619,000,000	4,45,000,000	2,460,500,000	13,718,000,000			
	민간부담	641,500,000	770,000,000	873,000,000	1,469,000,000	820,500,000	4,574,000,000			

나. 2세부과제 총괄

표 5.8 2세부과제 비목별 연구비 총괄표

(단위: 원)

비 목		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	합 계	구성비 (%)	비고	
1)	인건비	788,241,600	796,291,200	809,294,400	809,294,400	801,244,800	4,004,366,400	24.6%		
2)	직접비	연구기자재및시설비	663,712,960	1,045,995,780	1,530,000,000	632,000,000	510,000,000	4,381,708,740	26.9%	
		시작품제작비	230,923,200	647,000,000	542,000,000	1,594,000,000	952,041,000	3,965,964,200	24.4%	
		재료비	274,318,783	215,310,052	285,117,417	171,117,417	142,998,255	1,088,861,924	6.7%	
	연구활동비	여비	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	250,000,000	1.5%	
		수용비및수수료	47,294,490	47,777,470	48,557,660	48,557,660	48,074,680	240,261,960	1.5%	
		기술정보활동비	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	250,000,000	1.5%	
	연구수당	118,236,240	119,443,680	121,394,160	121,394,160	120,186,720	600,654,960	3.7%		
3)	간접비	222,272,727	297,181,818	343,636,363	347,636,363	267,454,545	1,478,181,816	9.1%		
4)	합계	2,445,000,000	3,269,000,000	3,780,000,000	3,824,000,000	2,942,000,000	16,260,000,000	100%	1)+2)+3)	
5)	재원조달	정부지원	1,833,500,000	2,309,000,000	2,619,000,000	4,405,000,000	2,460,500,000	13,718,000,000		
		민간부담	611,500,000	818,000,000	945,000,000	957,000,000	735,500,000	4,067,000,000		

제6장 연구기획의 자체 사전타당성 검토

제1절 정부지원의 타당성

1. 정부지원의 타당성

- 풍력, 해양 등 신재생 에너지 산업의 시장 급성장 추세에 따른 국가적 지원 필요
 - 2013년부터 국제환경규제에 의한 온실가스 저감 의무 이행 대상국에 포함될 가능성이 높으므로, 2030년까지 신재생 에너지 보급률을 30%로 높이는 것을 목표로 정책 추진중임
 - 친환경적인 에너지원 확대를 위한 국가적 보급 사업 등의 기본적인 노력 외에 핵심 부품의 국산화 및 신개념 시스템 개발 등의 시장 선도를 위한 적극적인 정책 추진이 필요함
 - 신재생 에너지 분야는 생산기반 기술 유관 산업이 차지하는 비중이 높고 고용 창출 효과가 매우 크며 전 세계를 마켓으로 할 수 있는 최고의 미래 유망 산업임
 - 발전용량 대비 소요면적에 있어 석탄 3,642m²/GWh, 태양광 3,237m²/GWh인데 비해 풍력은 1,335m²/GWh로 경쟁력이 있으므로 동 분야에 관한 핵심 기술 개발 시급
- 신재생 에너지 산업의 활성화를 위해서 에너지 저장 기술 확보는 필수불가결
 - 풍력 및 해양 등 신재생 에너지 발전 전력은 불연속적이고 예측 불가능
 - 국가 전력망에 계통연계 될 수 있는 정출력의 전력 발전을 위해 에너지 저장 필수
 - 에너지 저장 기능이 없는 섬이나 오지 등의 독립 발전용으로 풍력 에너지 보급 불가
- 에너지 저장 기술 개발은 국가적 정책 추진 방향과 부합
 - 14대 산업원천기술 분야 중 생산기반 기술 분야의 “2010년도 R&D 중점 추진 방향(2009. 11. 23, 2010년도 산업원천기술개발사업 과제기획 공청회)”의 중점 영역 중 “그린에너지 생산기반기술”이 포함되어 있으며, 추진목표로 풍력발전용 에너지 저장 및 발전용 대형부품 제조 기술 개발이 설정되어 있음
 - 2030년까지 국가 단위의 스마트그리드 구축을 위해 기술개발, 사업화 및 제도 개선 등 「스마트그리드 국가로드맵」 수립('10.1월)
 - K-MEG(Korea Micro Energy Grid) 기술개발 ('11.6월~'14.5월)

- K-ESS2020(에너지저장 기술개발 및 산업화 전략)과 부합 ('11.5.)
- 에너지 저장 모듈 방식의 하나인 유체압축식 에너지 저장을 위해서는 기반 기술의 고도화가 동반되어야 함
 - 국내에는 아직 중대용량 유체 압축식 에너지 저장 및 변환 시스템에 관한 개발 및 제작 경험이 없음

2. 국토해양부 연구과제로의 추진 타당성

가. 관련 법령

- R&D 관련 정책
 - 국가과학기술위원회(2007.4)는 국토해양부의 융합기술 R&D 역할에 대해 ‘해양 산업, 자원, 환경 등의 융합기술 및 인프라를 구축’하는 것으로 설정함
 - 동 위원회는 융합기술 R&D의 중점추진영역으로 ‘새로운 에너지자원 확보’ 영역을 선정하였으며 2030과학기술예측 결과 중의 주요 융합기술에도 ‘미래에너지·환경기술’을 포함시킴
- 해양에너지 개발과 이용을 위한 시책마련과 시행은 국토해양부 장관 소관
 - 정부조직법 제37조에서 “국토해양부장관은 국토종합계획의 수립·조정, 국토 및 수자원의 보전·이용 및 개발, 도시·도로 및 주택의 건설, 해안·하천·항만 및 간척, 육운·해운·철도 및 항공, 해양환경, 해양조사, 해양자원개발, 해양과학기술연구·개발 및 해양안전심판에 관한 사무를 관장한다.”는 원칙을 밝힘
 - 해양수산발전기본법 제16조에서 “해양자원의 관리·보전과 개발·이용을 위하여 필요한 시책을 마련하고, 이를 시행하여야 한다”고 하였으며, 여기서 “해양자원”이라 함은 개발·이용이 가능한 해양생물자원·해양광물자원·해양에너지·해양관광자원 및 해양공간자원 등 국가경제 및 국민생활에 유용한 자원을 말한다고 동법 제3조에 명시되어 있음
 - 해양에너지 생산시설의 입지선정과 발전소 건설에 필요한 해양수산관계 법령
 - 해양에너지 생산시설은 「연안관리법」에 의한 연안관리지역계획에 반영되어야 함
 - 발전 플랜트와 같은 시설물 설치를 위해서는 「공유수면관리법」에 따라 국토해양부 장관의 허가가 필요함

나. 국토해양부 연구과제로의 추진 전략

- 본 기획과제에서 도출한 압축공기저장기술의 최종성과물은 압축공기저장을 위한 해상인공저장구조물과 이를 이용한 압축공기저장기술로 규정할 수 있으며, 인공저장구조물의 설계 및 시공기술을 포함하는 시스템 엔지니어링 기술을 개발하는 것이므로 국토해양부에서 추진하는 것이 타당함
- 부처간 특성을 감안하여 역할을 분담하여 추진하는 것이 효율적임
 - 국토해양부 : 압축공기 저장을 위한 인공구조물 조성 분야는 구조물 건설기술 개발 측면을 고려하여 국토해양부가 담당하는 것이 타당함
 - 지식경제부 : 저장 에너지의 발전 및 송전 등의 에너지 활용분야는 지식경제부가 담당하도록 함
- 국가 경쟁력 확보 차원에서 미래 지향적인 압축공기저장기술 개발을 위해 부처간 업무 연계 및 협력 방안 구축 필요
 - 전략개발상품의 성공적인 실용화 및 국제 경쟁력 확보를 위해서는 범 정부적 역할 분담 및 연계·협력 구조가 필수적
 - 국토해양부를 비롯하여 에너지 저장 관련 업무를 담당하고 있는 지식경제부 등의 부처간 중복성 탈피
- 2011년 5월 31일 발표된 “에너지저장 기술개발 및 산업화 전략(K-ESS 2020)”과의 연계방안
 - 본 과제의 경우에는 신재생에너지원을 이용한 압축공기저장기술 개발을 목적으로 인공저장구조물 및 저장시스템 구축에 초점을 맞추고 있으므로 건설 및 시스템 엔지니어링 기술 분야로 볼 수 있음
 - 지식경제부에서는 잉여 전력으로 공기를 동굴이나 지하에 압축하여 압축된 공기를 가열하여 터빈을 돌리는 방식으로 대규모 저장이 가능하지만, 입지선정에 제약이 있음
 - 본 과제에서는 MW급의 CAES를 병렬분산형으로 연계하여 대용량 CAES 시스템을 구축하는 방식으로 기술 개발을 추진함으로써 차별화하여 추진함
 - 지식경제부의 대규모 지하 공동 저장방식과 병렬분산형 CAES는 상호 보완적인 시스템으로 압축공기저장기술의 시장확대에 시너지효과를 창출할 것으로 기대됨

제2절 경제적 타당성 및 파급효과 분석

1. R&D사업의 경제성 분석

가. 경제성 분석의 개요와 기본가정

1) 분석의 개요

- 경제성 분석에서는 먼저 CAES 사업에 대한 비용편익분석을 이용하여 경제성 분석을 수행하고,
- 경제적 타당성(경제성) 분석은 해당 사업에 소요되는 비용과 비교해 볼 때, 해당 사업이 어느 정도의 경제적 가치가 있는지를 사회적 관점 또는 국가 전체적인 관점에서 파악하는 것으로 흔히 비용편익분석(Cost-Benefit Analysis)이라고도 불림
- 경제성은 추정된 비용과 편익을 이용한 비용편익 분석에 근거하여 판단하되, 순현재가치(net present value, NPV), 편익/비용비율(benefit/cost ratio), 내부수익률(internal rate of return, IRR)의 3가지 기준을 적용할 수 있는데, 각각 장단점이 혼재되어 있으므로 서로 보완적으로 사용될 필요가 있음
- 비용편익분석을 위해서는 먼저 1단계에서 해당 사업에 소요되는 비용을 추정해야 하는데, 실제 지출된 비용보다는 기회비용(opportunity cost)의 관점에서 그리고 외부비용까지 포함한 사회적 비용의 관점에서 평가해야 하며, 비용추정시 이전지출, 감가상각비, 매몰비용의 처리에 주의해야 하고 예비비 및 잔존가치도 고려해야 함
- 비용을 추정한 다음에는 2단계로 해당 사업으로 발생하는 편익을 추정해야 하는데, 편익의 추정결과는 경제성 분석 결과에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 해당 사업의 종류와 성격을 명확히 규명한 다음에 편익의 범위를 정확하게 설정한 후, 편익을 추정하는 것이 매우 중요함
- 편익은 경제학적 개념에 근거하여 평가되어야 하는데 이는 소비자에게 미치는 편익은 소비자 잉여의 관점에서 그리고 기업 또는 산업에 미치는 편익은 부가가치의 관점에서 측정되어야 함을 의미하는데, 본 연구에서는 본 사업의 시행으로 인해 발생하는 CAES 사업의 활성화로 인한 부가가치 창출효과를 편익으로 추정함

- 3단계에서는 3가지 평가기준을 이용한 비용편익분석을 적용하여 경제성 분석을 실시함
 - 첫째, 순현재가치(NPV) 기준이란 사업에 수반되어 사업의 최종년도(T)까지 발생한 모든 비용과 편익을 기준년도의 현재가치로 할인한 다음에 총 편익의 현재가치에서 총 비용의 현재가치를 차감한 값으로 정의되는 순현재가치가 0보다 크면 경제성이 있으며 0보다 작으면 경제성이 없다고 해석함

$$\text{순 현재가치}(NPV) = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

B_t : t 기의 편익

C_t : t 기의 비용

r : 할인율

- 둘째, 편익/비용비율 기준이란 현 시점으로 할인된 총 편익 대 총 비용의 비율로서, 장래에 발생될 비용과 편익을 현재가치로 환산하여 편익의 현재가치를 비용의 현재가치로 나눈 것으로, 편익/비용비율이 1보다 크면 경제성이 있다고 판단함

$$\text{편익/비용비율}(B/C) = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} / \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

- 셋째, 내부수익률(IRR)은 투자사업이 원만히 진행된다는 전제 하에 기대되는 예상수익률로서 투자사업의 전 기간에 걸쳐 발생하는 순현재가치가 0이 되게 하는 할인율, 즉 편익흐름의 현재가치의 합이 비용흐름의 현재가치의 합과 같아지는 할인율로 투자사업의 예상수익률인데, 내부수익률이 사회적 할인율(r)보다 크면 경제성이 있다고 판단함

$$\text{내부수익율}(IRR) : \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+R)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+R)^t}$$

- 경제성 분석의 마지막 단계인 4단계에서는 민감도 분석을 수행한다. 즉 경제적 타당성을 평가하기 위해서 사용되는 비용편익분석에서의 편익과 비용의 계산 과정에는 많은 불확실성이 내포되어 있으므로 불확실성을 반영하기 위해 비용, 편익, 할인율 변동이 경제성 평가에 미치는 영향을 살펴보는 민감도 분석을 할 필요가 있음

2) 기본가정

- 경제성 분석을 위해서는 기본적으로 분석에 이용할 사회적 할인율(discount rate), 분석기간(planning horizon), 기준년도(base year)를 결정해야 함
- 첫째, 연구개발사업 수행의 비용과 편익은 어느 한 시점에만 발생하는 것이 아니라 보통 수년 혹은 수십년에 걸쳐 발생하므로, 사업 수행에 대한 경제성 분석은 시점을 일정하게 놓고 이루어져야 하며, 통상 현재시점에서 평가됨
 - 적정 사회적 할인율을 추정하는 작업은 매우 복잡하므로 굳이 새롭게 추정하는 것보다는 한국개발연구원에서 제시하고 있는 사회적 할인율 (2010년 1월 현재 5.5%)을 이용하는 것이 바람직함을 감안하여, 본 연구에서는 이 값을 이용할 것임
- 둘째, 다음으로 분석기간을 정의해야 하는데, 연구개발사업의 경제성을 평가하기 위해서는, 사업수행기간이 아니라 해당 사업의 효과가 몇 년이나 지속될 것인지를 의미하는 분석기간, 즉 비용편익분석의 대상기간이 결정되어야 함
 - 이 기간을 너무 짧게 잡으면 사업의 효과가 제대로 반영되지 못하는 문제점이 발생하며, 너무 길게 잡으면 비용 또는 편익 측정에서의 불확실성이 너무 커져 결과 자체를 신뢰하기 어렵게 되므로, 합리적인 범위 내에서 분석기간을 적절하게 설정하는 것은 중요한 문제임
 - 경제성 분석의 대상기간은 연구개발사업의 사업시간인 5년(2012년~2016년)과 기술수명주기(13년) 동안 편익이 발생한다고 가정한 총 18년(2012년~2029년)으로 설정함
 - KISTEP 내부 지침에 따르면 ‘액체압 액튜에이터; 유체학 또는 공기역학일반’의 기술수명주기는 13년임
- 셋째, 경제적 타당성 평가에서 편익과 비용이 제각기 다른 시점에서 발생되므로, 사회적 할인율을 이용하여 비교 가능한 동일시점의 가치로 일치시켜야 하는데, 본 조사에서는 비용편익분석의 기준연도를 2010년 12월 시점으로 설정함

나. 비용 추정

- 본 사업과 관련하여 발생하는 비용은 연도별 연구개발투자비와 예비비로 구성된다. 연구개발투자비의 경우 정부에서 100% 부담하는 것이 아니라 민간부문의 대응자금이 있을 수 있지만 정부투자의 편익과 민간투자의 편익을 엄밀하게 구분하는 것이 현실적으로 쉽지 않으므로, 정부투자분과 민간투자분의 합으로 비용을 산

정하며, 뒤에서 제시될 편익의 추정과정에서도 마찬가지로 투자 부담자를 구분하지 않을 것임

- SOC사업의 경우 특정 수준의 원하는 효과를 창출하기 위해 소요되는 비용을 큰 불확실성 없이 비교적 수월하게 산정할 수 있는 반면에, 연구개발사업의 경우는 특정 수준의 원하는 효과를 창출하기 위해 소요되는 비용에 대한 불확실성이 매우 크기 때문에 비용을 산정하기가 어려우므로, 일단 각 분과위원회에서 산정한 연구개발비용에 근거하는 것이 현실적임
- 본 사업은 장비구축사업이 아니므로 중간에 개·보수비 또는 재투자비용이 발생하지 않으므로 이에 대한 고려는 필요 없으며, 연구장비나 시설과 같이 분석기간이 종료한 이후에도 사업시설이 남아 있는 것이 있다면, 이것의 잔존가치(salvage value)를 계산하여 이를 비용에서 차감해야 하는데, 본 사업은 기술개발사업이므로 분석기간이 종료되는 2029년 사업의 잔존가치를 0으로 산정함
- 추정된 R&D 비용은 및 [표 6.1]과 같이 345.52억원으로 추정되었음

표 6.1 CAES 사업의 연도별 소요예산

(단위 : 억원)

연도	2012	2013	2014	2015	2016	합계
비용	50.11	63.48	72.72	96.98	62.23	345.52

다. 편익 추정

1) 편익 추정의 개요

① 편익추정의 원칙

- 편익을 추정하는 데 있어서 견지해야 할 중요한 원칙 중 하나는 연구개발사업이 있을 때와 없을 때의 상황을 비교해야 한다는 것임
- 연구개발사업이 있기 전과 후를 비교하는 전후검정(before/after test)으로 비용편익분석을 수행해서는 안 되며, 연구개발사업이 있을 때와 없을 때를 비교하는 유무검정(with/without test)이 되어야 함

- 즉 연구개발사업이 수행되지 않아도 시간의 경과에 따라 발생가능한 효과를 연구 개발사업의 효과로 포함하는 오류를 범해서는 안 됨

② 편익추정의 범위

- 국가연구개발사업의 편익은 원칙적으로 연구개발 투자활동의 결과로 나타나는 모든 긍정적 효과를 총칭하며, 미시적 수준에서 긍정적 효과를 구분한 다음에 각각을 추정한 후 거시적 수준에서 각각의 긍정적 효과를 적절하게 합산해야 함
- 특정 연구개발사업으로 인해 혜택을 얻는 경제주체를 크게 소비자(또는 가계)와 생산자(기업 또는 산업)으로 구분한다면, 소비자에게 발생하는 편익은 소비자 잉여(consumer surplus)의 관점에서 평가되어야 하며, 생산자에게 발생하는 편익은 부가가치(value-added)의 관점에서 평가되어야 함
- 수혜의 대상을 소비자와 생산자로 뚜렷하게 구분하기 어려운 경우는 국가 전체적인 차원에서의 부가가치 창출액으로 평가하거나 정성적으로 평가할 수 있음
- 경제적 타당성 분석을 위한 작업 중에서 가장 어렵고 힘든 작업은 편익을 추정하는 것으로, 편익의 추정은 우선 편익항목을 도출하는 작업으로부터 시작됨
- 연구개발사업의 편익항목은 사업의 성격과 내용에 따라 매우 다양하므로, 연구개발사업의 성격별 특수성을 반영하기 위한 가장 근본적이고 완전한 방법은 각 사업별로 발생할 수 있는 편익항목을 최대한 선별하고, 이를 이론적으로 타당한 금전화 기법에 의해 적정하게 추정하는 방식임
- 아울러 계량화가 가능한 편익항목 위주로 금전화를 시도하되 계량화가 가능하지 않은 부분은 정성적으로 언급해야 할 필요가 있음
- 연구개발사업의 편익 항목은 사업마다 다르고, 또한 동일한 종류의 사업이라고 하더라도 투자규모에 따라서 편익이 다를 수 있음
 - 일반적으로 사업의 편익은 크게 직접편익과 간접편익을 나눌 수 있는데, 직접 편익은 사업의 효과를 바로 나타내는 것이고, 간접편익은 직접편익으로 인하여 유발되는 2차 편익을 의미함
 - 본 연구에서는 연구개발사업의 수행으로 인한 경제적인 편익 중에서 정량적으로 측정할 수 있고, 객관적 화폐가치를 산출할 수 있는 직접편익만을 고려함

③ 편익의 범주

- 경제성 분석에 있어서 편익이란 해당 사업으로 인해 새롭게 창출되는 가치를 의미하므로, 편익을 추정한다는 것은 가치를 어떻게 측정하느냐와 직접적으로 결부되어 있으며, 가치를 측정하기 위한 접근방법은 가치창출의 수혜자가 생산자와 소비자 중에 누구냐에 따라 크게 두 가지로 구분될 수 있음
- 본 CAES 사업의 경우 소비자 측면의 편익이 발생한다고 보기 어려우며, 생산자 측면의 부가가치 창출효과가 중요한 편익 항목이 될 수 있음
- CAES 사업의 결과로서 발생하는 가치창출의 일차적인 수혜자가 개발된 CAES 기술을 적용하여 발전을 하는 사업자라 할 수 있으며, 이 경우 연구개발사업으로 인한 CAES 사업의 활성화로 발생하는 추가적인 부가가치의 크기가 바로 CAES 사업의 편익이 될 수 있음
- CAES 사업의 활성화로 인해 고용이 증가하고, 생산이 증가하고, 정부의 세수가 증가하는 등 여러 효과가 있을 수 있지만, 결국 중요한 것은 CAES 사업의 활성화로 인해 발생하는 부가가치의 순 증분만이 이 사업의 편익이 될 수 있음

④ 부가가치 창출 편익의 추정

□ 부가가치 창출 편익의 정의

- 연구개발사업의 효과가 생산자에게 발생하는 경우, 연구개발사업의 산출물을 부가가치 생산을 위한 투입요소 중에 하나로 간주하여 해당 산출물의 부가가치 창출분을 구하거나 사업 미행시의 부가가치 창출액과 사업 시행시의 부가가치 창출액의 차이를 편익으로 산정할 수 있는데, 본 사업으로 인한 CAES 사업의 활성화는 부가가치를 신규로 창출함
- CAES 사업의 부가가치 창출효과란 본 사업으로 인해 CAES 사업이 활성화되어 CAES 사업 자체의 부가가치가 확대되거나 혹은 외국기술이 점유하고 있는 CAES 부분을 국산기술로 대체함으로써 부가가치가 발생됨을 의미
- [그림 6.1]과 같이 CAES 사업의 국내 활성화로 창출되는 부가가치 중에서 본 연구개발사업의 기여만을 평가하여 생산자 측면에서의 편익으로 삼을 수 있음

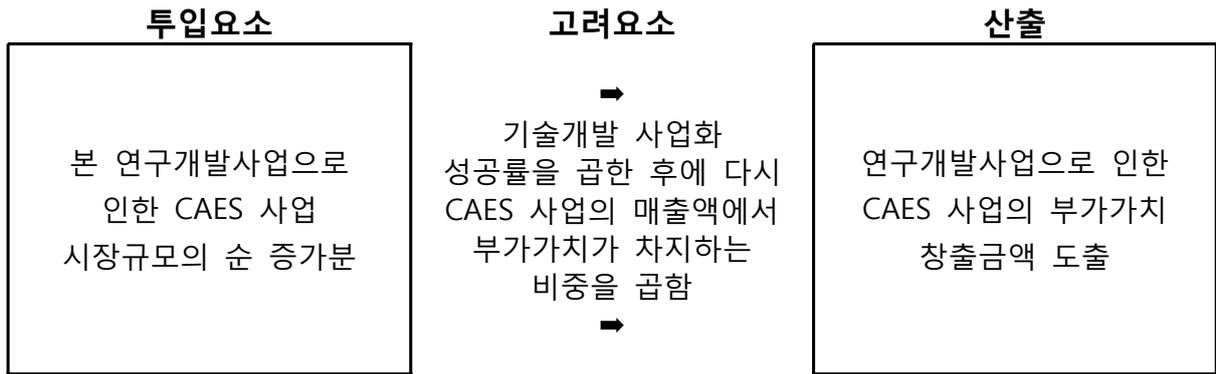


그림 6.1 CAES 사업으로 인한 부가가치 창출효과

□ CAES 시장에 대한 전망

- CAES 시장은 해상풍력시장으로 가정함
 - 첫째, 해외 시장의 경우 미래 예측에 대한 불확실성이 매우 크므로, 신뢰성있는 예측 결과를 얻기 어려움
 - 둘째, 국내 시장만을 대상으로 경제성 분석에서 경제성을 확보한다면, 굳이 해외 시장에 대한 분석을 하지 않더라도 경제성 분석에 대한 결론을 얻을 수 있음
 - 셋째, 현실적으로 국내 시장에서의 어느 정도 점유율을 확보하면서 시장에서 검증이 되어야 해외로 진출할 수 있으므로, 우선 국내 시장에 초점을 맞추어 분석할 필요가 있음

- 본 사업이 종료된 직후인 2012년부터 2029년까지의 18년 동안 CAES 시장의 규모를 표 6.2와 같이 예측할 수 있음

표 6.2 CAES 관련 시장규모 예측 결과

(단위 : 억원)

사업연도	국내 시장			관련 국외 시장규모
	본 사업이 없을 때의 시장규모	본 사업이 있을 때의 시장규모	본 사업으로 인해 신규로 창출되는 시장규모	
2017	19,766	39,532	19,766	73,581
2018	19,767	39,534	19,767	87,216
2019	19,767	39,534	19,767	111,753
2020	20,439	40,878	20,439	136,275
2021	21,134	42,268	21,134	141,726
2022	21,853	43,705	21,853	147,177
2023	22,596	45,191	22,596	152,628
2024	23,364	46,728	23,364	158,079
2025	24,158	48,316	24,158	163,530
2026	24,980	49,959	24,980	168,981
2027	25,829	51,658	25,829	171,699
2028	26,707	53,414	26,707	174,432
2029	27,615	55,230	27,615	174,432

□ 기술개발 사업화 성공률 및 CAES 사업의 부가가치율

- 연구개발사업의 경제적 편익을 산정하는 데 있어서 기술개발 사업화 성공률을 감안하는 것은 매우 중요하며, 객관적인 값을 적용해야 함
- 본 연구에서는 중소기업청에서 2008년에 발표한 보도자료에 제시된 중소기업 기술개발 사업화성공률 36.2%를 활용함
 - 중소기업기술통계조사에 따르면 최근 2년간('05~'06년) 중소기업의 기술개발 사업화성공률은 36.2%로 기술개발 성공률(58.4%)의 62%에 불과한 수준임

표 6.3 중소기업의 기술개발 사업화성공률

구 분	기술개발시도	기술개발성공	사업화성공
건수(건)	5.32	3.11	1.93
비율(%)	100.0	58.4	36.2

자료) 중소기업기술통계조사(중기청, '07.12)

- CAES 사업의 부가가치율이란 CAES 사업의 총산출액에서 부가가치가 차지하는 비중임
 - 가장 최근인 2010년에 한국은행에서 발표된 산업연관표 상에서 CAES 사업에 해당하는 산업에 대해 부가가치율을 계산하면 22.0%로 계산되므로 이 값을 이용하여 CAES 사업의 부가가치율로 산정함

□ 부가가치 창출 편익

- KISTEP에 따르면 부가가치 창출 편익을 산정하는 식은 다음과 같음

<p>경제적 편익 = 시장규모 증가분</p> <p>X ①부가가치율(%)</p> <p>X ②R&D 기여도(%)</p> <p>X ③동 사업 점유효과(%)</p> <p>X ④사업화 성공률(%)</p>

- CAES 사업으로 인한 CAES 사업의 활성화 측면을 다루기 위해서는 본 사업이 없더라도 CAES 사업이 성장할 수 있음을 감안하여 본 사업만의 순 효과를 구할 수 있어야 하는데, 표 6.2에 본 사업 유무에 따른 CAES 사업의 규모가 제시되어 있음
- 하지만 표 6.5의 결과가 곧 경제적 편익은 아니므로, 4가지 요소를 반영하여 최종적인 부가가치 창출편익을 추정해야 함
- ① 부가가치율(%)
 - 표 6.2의 결과는 시장규모이지 곧 부가가치는 아니므로 부가가치 창출액을 구하기 위해서는 부가가치율을 곱해야 하는데, 앞에서 CAES 사업의 부가가치율을 22.0%로 산정하였음
- ② R&D 기여도(%)
 - KISTEP 지침에 따르면 10.9% 또는 28.1%를 적용하는데 본 연구에서는 보수적으로 보고 10.9%를 적용하였음
- ③동 사업 점유효과(%)
 - 동 사업 점유효과도 보수적으로 보아 25%를 가정함

○ ④사업화 성공률(%)

- 만약 기술개발이 실패한다면 표 6.3의 효과는 달성하는 것이 불가능하며 기술개발이 성공했다 하더라도 사업화에 실패하게 되면 마찬가지로 표 6.3의 효과를 달성할 수 없으므로 기술개발 사업화 성공률을 반영해야 하며, 앞에서 기술개발 사업화 성공률은 36.2%로 산정하였음

○ 본 CAES 사업의 부가가치 창출편익 추정결과는 표 6.4에 제시되어 있음

표 6.4 본 사업의 부가가치 창출편익 추정결과

(단위 : 억원)

사업연도	편익(억원)		
	본 사업으로 인해 신규로 창출되는 시장규모	부가가치 창출편익	현재가치
2012			
2013			
2014			
2015			
2016			
2017	19,766	43	29
2018	19,767	43	28
2019	19,767	43	26
2020	20,439	44	26
2021	21,134	46	25
2022	21,853	47	25
2023	22,596	49	24
2024	23,364	51	24
2025	24,158	52	23
2026	24,980	54	23
2027	25,829	56	23
2028	26,707	58	22
2029	27,615	60	22
합계	297,974	647	322

라. 경제성 분석결과

- 각 분과별로 경제성 분석을 수행한 결과를 요약하면 표 6.5과 같이, 경제성 분석을 통과함

- 순현재가치는 44억원으로 0보다 크며, 편익/비용 비율은 1.16으로 1.0을 상회하며, 내부수익률은 7.36%로 5.5%를 상회하므로, CAES 사업은 경제적 타당성을 확보함

표 6.5 CAES 사업의 경제성 분석결과 요약

구분	순현재가치(NPV) (억원)	편익/비용 비율 (B/C ratio)	내부수익률(IRR)
값	44	1.16	7.36%

- 보다 자세한 비용 및 편익의 흐름은 아래의 표에 제시되어 있음

표 6.6 CAES 사업에 대한 비용 및 편익의 흐름

사업 연도	비용(억원)		편익(억원)			순편익(억원)	
	값	현재 가치	본 사업으로 인해 신규로 창출되는 시장규모	부가가치 창출편익	현재가치	값	현재가치
2012	50.11	45				-50	-45
2013	63.48	54				-63	-54
2014	72.72	59				-73	-59
2015	96.98	74				-97	-74
2016	62.23	45				-62	-45
2017			19,766	43	29	43	29
2018			19,767	43	28	43	28
2019			19,767	43	26	43	26
2020			20,439	44	26	44	26
2021			21,134	46	25	46	25
2022			21,853	47	25	47	25
2023			22,596	49	24	49	24
2024			23,364	51	24	51	24
2025			24,158	52	23	52	23
2026			24,980	54	23	54	23
2027			25,829	56	23	56	23
2028			26,707	58	22	58	22
2029			27,615	60	22	60	22

2. 경제적 파급효과 분석

가. 분석방법론 : 산업연관분석

1) 산업연관분석의 개요

- 본 절의 목적은 본 사업의 경제적 파급효과를 분석하기 위해 적용하는 연구방법론인 산업연관분석에 대해 설명하면서 생산유발효과, 부가가치 유발효과, 취업유발효과 등의 경제적 파급효과에 대한 정량적 정보를 도출하고자 함
- 이를 위해서는 CAES 사업뿐만 아니라 다른 모든 경제부문을 미시적으로 파악하면서도 거시적인 상호관계도 관찰하여야 하는데, 본 연구에서는 산업연관분석(inter-industry analysis)을 적용함
- 산업연관분석 또는 투입산출분석(input-output analysis)이란 생산활동을 통하여 이루어지는 산업간의 상호연관관계를 수량적으로 파악하는 분석방법으로 국민경제 전체를 포괄하면서 전체와 부분을 유기적으로 결합함
- 따라서 산업연관분석은 거시적 분석이 미치지 못하는 산업과 산업간의 연관관계까지도 분석이 가능하기 때문에 구체적인 경제구조를 분석하는 데 유리함
- 본 사업의 경제적 파급효과와 타 부문과의 비교를 시도할 뿐만 아니라 CAES 사업을 중심으로 살펴보기 위해서는 CAES 사업의 총산출 변동에 초점을 맞추어 CAES 사업을 외생화(exogenous specification)한 분석도 수행함
- 산업연관분석에서는 내생변수와 외생변수가 혼합되어 있는 경우, 외생적인 힘이 될 변수를 밖으로 내어주어 그 변수가 내생적인 경제부문에 미치는 영향을 살펴볼 수가 있는데 이를 외생화라고 하며, 외생화 기법을 적용하면 총수요가 아닌 특정부문의 산출물이 미치는 영향과 그 산출물이 타 산업에 유발하는 효과를 보다 명확히 알 수 있음
- 그림 6.2와 같이 CAES 사업은 국민경제의 기초산업부문으로서 생산활동을 위해서는 여러 부문의 산출활동, 즉 다른 부문의 산출물을 중간재로 수요하므로, CAES 사업의 생산활동은 타 산업의 생산활동에 직·간접적으로 영향을 미침

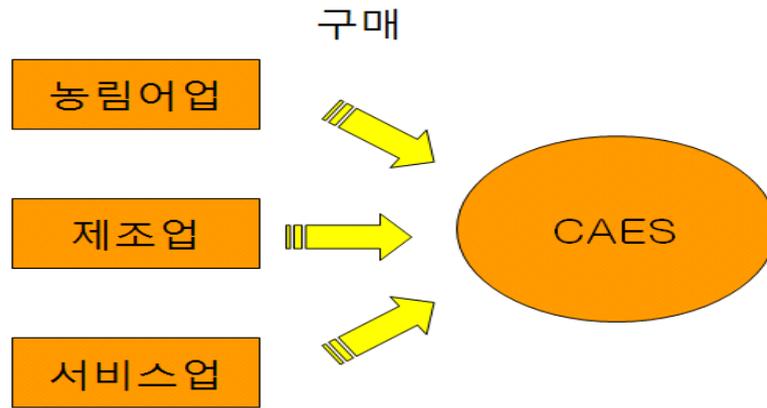


그림 6.2 본 연구에서 CAES 사업을 바라보는 구도

- 특히 CAES 사업 부문은 투자가 타 부문에 미치는 파급효과가 클 수 있는데, 이 파급효과는 생산유발의 관점, 부가가치 유발의 관점, 취업유발의 관점이라는 3개 관점에서 살펴 볼 수 있으며, 본 절에서는 바로 이러한 제반 파급효과에 대한 분석모형을 소개하고 실증분석을 수행하고자 함

2) 산업연관분석의 역사

- 산업연관분석은 미국의 레온티에프(Wassily W. Leontief)에 의하여 1936년 최초로 고안되었는데, 레온티에프는 추상적인 이론모형에 머물러 있던 왈라스의 일반균형 이론을 경험적인 경제사실과 결합하기 위한 실증적 연구로서 산업연관분석을 시도하였음(Miller and Blair, 1985)
- 이러한 이론적 바탕 위에서 레온티에프는 산업연관분석을 통하여 제2차 세계대전 후 미국의 철강생산수준과 그에 관련된 고용문제를 예측함으로써 정책입안도구로서의 산업연관분석기법의 유용성을 입증하였으며, 이 공로를 인정받아 노벨 경제학상을 수상한 바 있음
- 산업연관분석을 위해서는 산업연관표가 필요한데, 산업연관표란 일정기간 중 국가 경제 내에서 재화와 용역의 생산 및 처분과정에서 발생하는 모든 거래를 일정한 원칙과 형식에 따라 기록한 종합적인 통계표로, 우리나라의 산업연관표 작성은 1958년 당시의 부흥부 산업개발위원회가 1957년과 1958년의 산업연관표를 작성하면서부터 비롯되었음(한국은행, 1987).
- 그러나 비교적 체계적인 형식과 내용을 갖춘 실질적인 산업연관표 작성은 한국은

행에서 1960년 산업연관표를 작성하면서부터, 이 표는 제1차 경제개발 5개년 계획 수립을 위한 기초자료로 이용하기 위해 정부의 요청에 따라 1962년에 착수하여 약 1년 반의 작업을 거쳐 완성 발표되었음

- 그 후 경제규모의 확대와 경제발전에 따른 산업구조의 변화를 더욱 정확히 파악하고 경제개발계획수립의 기초자료 및 제반 경제정책 입안자료로 이용하기 위하여 1963년부터 1995년까지 매 5년마다 실측표를 그리고 1968년부터 1998년까지 1년에서 5년 간격으로 연장표를 작성하여 한국경제에 대한 다각적인 분석을 시도해 왔으며, 가장 최근에 발표된 것은 2010년에 발표된 2008년도 산업연관표임
- 산업연관분석은 비록 선형계획법(linear programming)에 의한 단순한 분석수단임에도 불구하고 다음과 같은 여러 가지 장점을 지니고 있음
 - 첫째, 산업연관분석은 국민경제 전체를 포괄하면서 전체와 부분을 유기적으로 결합하고 있으며, 재화의 산업간 순환을 포함하고 있기 때문에 구체적인 경제구조를 분석하는데 유리
 - 둘째, 거시 및 미시분석이 모두 가능하기 때문에 소비, 투자, 수출 등의 변화에 따른 부문별 생산, 고용, 수입 등에 대한 분석을 포함하여 경제계획의 수립 및 예측 또는 산업구조정책의 방향설정 등에 유익한 자료를 제공
 - 셋째, 산업연관분석은 소비, 투자, 수출 등 최종수요의 변동이 각 부문의 생산 및 수입에 미치는 파급효과를 분석할 수 있기 때문에 경제정책의 실시에 따른 생산, 고용, 수입, 물가 등에 미치는 파급효과 측정에 유리하여, 특정산업부문의 수요, 공급, 또는 가격의 변화가 타 산업 혹은 국민경제에 미치는 파급효과도 분석할 수 있어 유용

3) 산업연관표의 구조

(1) 개방모형과 폐쇄모형

- 산업연관표는 그 구조에 따라 폐쇄모형(closed model)과 개방모형(open model)으로 구분할 수 있음
 - 폐쇄모형은 개방모형에서 외생부문으로 취급하는 부문을 내생부문인 산업으로 간주하여 모든 부문을 생산부문으로 만들고 있으므로, 이 체계에서는 특정해가 존재하지 않고 무수히 많은 해가 존재할 수 있음
 - 개방모형은 재화와 용역의 배분을 중간수요와 최종수요로 구분하여 기록하고, 투입 면에서는 생산을 위한 원재료 등 중간투입과, 노동 등의 원초적 투입으로

나누어 기록하여 최종수요부문과 원초적 투입부문을 개방부문(open sector)으로 취급한 것으로, 주로 개방모형이 사용되며 본 연구에서도 개방모형을 다룸

(2) 우리나라의 산업연관표

- 우리나라 산업연관표의 간단한 형태를 살펴보면 표 6.7과 같음
 - 산업연관표를 종으로 보면 어떤 산업이 생산활동을 위해 중간재로서 다른 산업에서 생산된 산출물을 얼마나 구입하였는가를 나타내 주는 중간투입 부문과, 생산된 생산요소가 아닌 원초적 생산요소에 대하여 얼마나 지불했는가를 보여주는 부가가치 부문으로 구분됨
 - 산업연관표를 횡으로 보면, 어떤 산업의 생산물이 타 산업의 중간재로 얼마나 판매되었으며, 최종재로서 최종수요 부문에 얼마나 판매되었는가를 알 수 있음

표 6.7 우리나라 산업연관표의 간단한 형태

투입 \ 산출		내생 부문				외생 부문					총 수요계	수입 (-)	산출액
		1차 산업	2차 산업	3차 산업	중간 수요계	민간 소비	정부 소비	투자	수출	최종 수요계			
내생 부문	1차 산업	0.7	6.2	0.1	7.0	2.8	-	-0.7	0.4	2.5	9.6	1.8	7.8
	2차 산업	1.3	25.5	9.4	36.2	11.8	-	4.8	9.2	25.8	62.0	13.5	48.5
	3차 산업	0.3	5.4	7.6	13.3	10.2	4.4	7.5	2.8	24.9	38.2	0.9	37.3
	중간투입계	2.3	37.1	17.1	56.5	24.8	4.4	11.6	12.4	53.2	109.8	16.2	93.6
외생 부문	피용자보수	0.8	4.7	9.8	15.2								
	영업잉여	4.4	2.9	8.2	15.5								
	자본소모 총당금	0.2	1.4	1.4	3.0								
	순 간접세	0.03	2.4	0.9	3.4								
	부가가치계	5.4	11.4	20.3	37.1								
총 투입액		7.8	48.5	37.7	93.6								

(3) 생산자 가격과 구매자 가격

- 산업연관표를 작성하는 데 있어 사용되는 가격은 생산자 가격과 구매자 가격이 있음
 - 생산자 가격은 수송비 및 유통마진을 포함하지 않은 가격으로서, 생산지에서의 생산자 출하가격을 의미하므로, 생산자 가격 체계에서는 제품수취의 대가로서 생산자가 수령하는 가격으로 평가되어 각 산업이 투입물을 구매할 때 그 재화

를 구입하는 데 지불한 금액과 그 재화를 생산한 부문에서 실제 수령한 금액과의 차이, 즉 수송비용과 유통마진은 모두 유통과 운수부문에 지불하는 것으로 처리됨

- 구매자 가격은 구매자가 구입하는 시점의 가격으로서 여기에는 수송비용과 유통마진이 포함되므로, 산출물의 판매에 있어서 실제 수령한 금액을 초과하는 수송비용과 유통마진은 유통·운수부문으로부터의 서비스 구매형태로 취급함

- 생산자 가격을 이용할 경우 부문에 따라 상이한 유통마진율이 적용되고 있으므로, 이러한 차이에서 오는 과급효과를 배제할 수 있기 때문에 각 산업상호간의 물량적 의존관계를 분석하는 데 있어서는 구매자 가격을 사용하는 것보다 적함
- 구매자 가격을 사용할 경우 재화와 용역의 실제 거래관계를 그대로 반영하고 있어 보다 현실적이기는 하나, 산업연관분석이 생산기술, 특히 투입계수의 안정성을 중시하므로 생산자 가격에 의한 분석이 바람직하며, 본 연구에서도 생산자 가격표에 근거하여 분석을 수행함

(4) 경쟁수입형과 비경쟁수입형 산업연관표

- 경쟁수입형(competitive imports) 산업연관표의 경우 수입품은 국내산업의 생산물과 비슷하고, 구매자에게 무차별하므로 국내 생산품과 동일하게 취급하는 비경쟁수입형(non-competitive imports)은 그렇지 않음
- 경쟁수입형은 최종수요의 변화에 따른 과급효과 분석에 있어서 누출되는 수입액을 파악할 수 없는 단점이 있는 반면에 비경쟁수입형은 수입품 소비구조가 반영되므로 산업부문별 수입유발효과를 계측할 수 있게 하는 이점이 있지만, 국산품과 수입품의 구입비율이 해외시장이나 국내사정에 따라 변동되는 경우 수입품에 대한 투입계수가 안정적이지 못하다는 약점이 있음
- 따라서 종합적인 경제예측이나 계획수립에 있어서는 보다 안정적인 투입구조를 반영하는 경쟁수입형이 적절하며, 본 연구에서도 경쟁수입형을 사용함

4) 기본모형

- 산업연관분석 모형은 산출량 결정에 대해 선형인 부문간 모형으로 한 부문의 생산 수준 변화가 다른 부문의 생산물에 대한 연속적인 수요를 어떻게 발생시키는지 나타내고 있음

- 이 모형은 투입요소의 판매와 구매사이의 연관관계에 강조를 둔 일반균형모형의 성격을 가지기 때문에, 전반적인 경제적 영향을 분석하고 예측하는 데 유용한 방법으로 인식되어 왔다
- n 개의 산업이 경제 내에 존재한다고 할 때, 생산된 재화들은 최종수요를 충족하기도 하고 다른 산업에 중간재로 사용되기도 하며, 중간재를 z 로 나타내고 아래에 첨자를 붙여서 z_{ij} 라고 표기하면 이는 i 부문에서 j 부문으로 투입되는 중간재의 양을 의미
- 산업연관표를 행(行)으로 보면 i 산업의 중간수요(z_{ij}), 최종수요(Y_i), 수입(M_i) 및 총 산출(X_i)이 기록되는데 이는 i 부문의 산출구조를 보여주며, 이러한 산출구조에 대한 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있음

$$X_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} + Y_i - M_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + Y_i - M_i \quad (1)$$

- 여기서, a_{ij} 는 j 부문에 사용되는 i 재의 투입량의 몫($a_{ij} = z_{ij}/X_j$)이며, 이를 투입계수(input coefficient) 또는 기술계수(technical coefficient)라고 함
- 이 비율은 j 부문에서 한 단위의 산출물을 생산하기 위해 투입된 i 산업의 산출물을 의미하며, 투입과 산출간의 관계를 보여줌으로써 각 부문별 기술구조 또는 생산관계를 나타냄
- 식 (1)은 특정부문의 총생산이 경제 내 모든 부문의 한 단위 생산을 위해 투입되는 i 번째 부문의 생산액과 소비지출, 수출, 투자, 정부지출에 의한 최종 용도에 수요되는 양을 합한 것과 같다는 것을 의미
- 식 (1)과 달리 산업연관표에서 j 라는 산업을 열(列)로 보면 중간투입(z_{ij}), 부가가치(W_j), 총 투입(X_j)이 기록되는데 이는 j 부문의 투입구조를 보여주며 식 (2)로 표현됨

$$X_j = \sum_{i=1}^n z_{ij} + W_j = \sum_{i=1}^n r_{ij} X_i + W_j \quad (2)$$

- 여기서, r_{ij} 는 행벡터로 구성된 중간투입을 총 투입으로 나눈 것이며 ($r_{ij} = z_{ij}/X_i$), 이를 산출계수(output coefficient)라고 함

- 식 (2)는 어떤 부문의 총 생산은 그 부문이 경제 내 모든 부문과 수입부문으로 부터 구매한 금액에 이 부문의 원초적 투입요소 또는 부가가치(즉, 임금, 이윤, 세금 등)에 대한 모든 수익을 합한 것과 같다는 것을 의미

o n 개의 산업이 존재하는 경제의 산업연관표의 기본 구조는 아래의 표와 같음

표 6.8 산업연관표의 구조

구 분	중간수요 (중간재)	최종수요	수입	총산출
중간투입 (중간재)	$z_{11} z_{12} \cdots z_{1n}$ $z_{21} z_{22} \cdots z_{2n}$ $\vdots \quad \ddots \quad \vdots$ $z_{n1} z_{n2} \cdots z_{nn}$	Y_1 Y_2 \vdots Y_n	M_1 M_2 \vdots M_n	X_1 X_2 \vdots X_n
부가가치	$W_1 W_2 \cdots W_n$			
총 투입	$X_1 X_2 \cdots X_n$			

o 식 (1)을 전 산업에 대해 축약된 행렬식으로 나타내면 식 (3)이 됨

$$X = Zl' + Y - M = A\hat{X}l' + Y - M \quad (3)$$

- 여기서, Z 는 z_{ij} 로 이루어진 $n \times n$ 행렬
- X 는 x_{ij} 로 이루어진 $n \times 1$ 행렬
- l 은 1을 원소로 하는 $1 \times n$ 행렬
- '은 전치한 것(transpose)을 의미
- A 는 $n \times n$ 으로 이루어진 투입계수 행렬
- 따라서 다음과 같은 식들이 성립

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_n \end{bmatrix}$$

o 이 때, 투입계수행렬의 정의에 따라 $Z = A(\hat{X})$ 이 성립하며, 또한 \hat{X} 은 행벡터인 X 의 원소를 대각행렬로 나타낸 것으로 $X = \hat{X}l'$ 이고, 식 (3)을 정리하여 다시 쓰면 다음 식이 됨

$$X = (I - A)^{-1}(Y - M) \quad (4)$$

- 여기서, I 는 n 차원 단위행렬

5) 산업연관표의 통합

- 가장 최근인 2010년에 발표된 2008년도 산업연관표는 403 부문으로 구성되어 있는데, 이들 403 부문을 직접 표를 다루는 것은 매우 번거로우며 비효율적이므로 부문을 적절하게 통합한 후 분석을 하는 것이 바람직함
- 산업연관표에서 부문간 통합을 하는 방법은 다음과 같은 사례를 통해 설명할 수 있는데, 표 6.9의 3부문 산업연관표를 2부문에 통합하면 표 6.10이 되며, 여기서 1부문이 새로운 1부문으로, 2부문과 3부문이 합쳐져 새로운 2부문이 됨
 - 각각의 중간재와 최종수요 그리고 총생산의 통합되는 내용은 아래에 제시된 식과 같은데, *는 통합 후의 결과를 의미하는 상첨자

$$z_{11}^* = z_{11}$$

$$z_{21}^* = z_{21} + z_{31}$$

$$z_{12}^* = z_{12} + z_{13}$$

$$z_{22}^* = z_{22} + z_{23} + z_{32} + z_{33}$$

$$Y_2^* = Y_2 + Y_3$$

$$X_2^* = X_2 + X_3$$

표 6.9 통합 전 3부문의 산업연관표

부문	1	2	3	최종수요	총생산
1	z_{11}	z_{12}	z_{13}	Y_1	X_1
2	z_{21}	z_{22}	z_{23}	Y_2	X_2
3	z_{31}	z_{32}	z_{33}	Y_3	X_3

표 6.10 통합 후 2부문의 산업연관표

부문	1	2	최종수요	총생산
1	z_{11}^*	z_{12}^*	Y_1	X_1
2	z_{21}^*	z_{22}^*	Y_2^*	X_2^*

- 앞의 예에서 볼 수 있듯이 통합의 과정은 매우 번거로우며 실제로 통합하여야 할 행렬이 커지면, 통합행렬을 구하기가 매우 복잡하고 계산상의 오류를 범하기가 쉽지만, 통합행렬 S 를 이용하면 통합은 쉽게 이루어짐
 - 통합행렬 S 는 1과 0으로 구성된 행렬로서, $k \times n$ 차원으로 구성된 행렬 S 는 곧 n 부문의 $n \times n$ 행렬을 k 부문의 $k \times k$ 행렬로 만듦
 - 우선 산업연관표를 열로 보고, 이 열로 본 산업연관표를 새로운 산업연관표로 재구성하는 방법은 다음과 같음
 - 예를 들어 2×3 의 통합행렬을 구성하여, 3개의 부문을 2개 부문으로 통합할 때, 2부문과 3부문을 묶어 통합행렬의 두 번째 부문으로 만들려면, 통합행렬 S 는 다음과 같이 구성됨

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- 통합 전에 3×3 의 중간수요 행렬을 Z 로 정의하고, 통합 후 2×2 의 중간재 행렬을 Z^* 로 정의하면, 총 산출액은 중간재와 최종수요의 합이 되므로 다음 식이 성립

$$X^* = Z^*l' + Y^*$$

- 새로운 산업연관표를 구하려면 다음 식을 이용하면 된다.

$$Y^* = SY = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 + Y_3 \end{bmatrix}$$

$$Z^* = SZS' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} + z_{13} \\ z_{21} + z_{31} & z_{22} + z_{32} + z_{23} + z_{33} \end{bmatrix}$$

- 본 연구에서는 위와 같은 통합 방법을 통해 새로운 산업연관표를 구성하고 이로부터 투입계수표를 산출하여 각종 경제적 분석을 수행

나. 수요유도형 산업연관분석 모형

1) 수요유도형 모형의 개요

- 식 (4)를 특별히 수요유도형(demand-driven model) 모형이라고 하는데, 이는 식 (4)를 이용하여 최종수요(Y)를 충족하기 위해 필요로 하는 산출량(X)을 구할 수 있기 때문이며, 이러한 수요유도형 모형을 이용하면 생산유발효과, 부가가치 유발효과, 취업유발효과 등을 분석할 수 있음
- 이러한 유발효과를 관찰하기 위해서는 먼저 CAES 사업의 특성에 맞는 생산유발계수표를 선택해야 하는데, CAES 사업의 산출물은 특성상 수입할 수 있지만 수입 부문을 굳이 고려할 필요가 있으며, 국내에서의 파급효과가 우선적인 관심대상 이므로 국내수요가 미치는 영향만을 관찰하는 것이 바람직
- 보다 엄밀한 의미에서, CAES 사업 부문이 경제에 유발시키는 효과를 계측하기 위해서는 국산과 수입을 구분하여 작성한 비경쟁수입형표를 이용하는 것이 합리적
- 따라서 비경쟁수입형표에서 도출되는 $(I - A^d)^{-1}$ 형의 생산유발계수를 이용하여 분석하는데, A^d 는 비경쟁수입형표를 통해 재구성한 투입계수를 의미하며, 국내(domestic)를 나타내는 d 를 편의상 이후엔 생략하여, 식 (4)를 비경쟁수입형의 수요유도형 모형으로 재구성하면 식 (5)가 도출됨

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad (5)$$

2) 생산유발효과

- 식 (5)를 변동모형(variability model)으로 바꾸면 식 (6)이 됨

$$\Delta X = (I - A)^{-1} \Delta Y \quad (6)$$

- 여기서 Δ 는 변화량을 나타내고, 특히 $(I - A)^{-1}$ 를 레온티에프 역행렬(Leontief inverse) 또는 투입역행렬(Leontief or input inverse matrix)이라 하며, 각 원소는 $\alpha_{ij} = \partial X_i / \partial Y_j$ 로 j 부문 최종수요 한 단위 증가로 인해 직·간접적으로 소요되는 i 부문 산출의 총 변화량을 의미하는 총 상호의존계수를 나타냄

- 투입산출분석은 산업의 투입과 산출을 CAES 사업에 대한 중간수요 및 최종수요와 상호 연관지을 수 있으므로 CAES 사업에 대한 수요를 분석하는 데 유용하며, 식 (6)을 통해 최종수요가 변화하는 경우(ΔY), 이를 충족할 산출량(ΔX)을 계산할 수 있음
- 경제에서 CAES 사업 부문의 최종수요액(총 산출액) 변화는 곧 그 경제 모형에 외생적인 힘으로 작용하여 여타 산업에 영향을 미치지만, 그러나 통상적인 산업연관분석을 이용할 경우 CAES 사업은 내생변수로서 작용하여 다른 부문에 미치는 경제적 파급효과가 정확히 파악될 수 없음
- 또한 다른 부문의 산출에 영향을 미치는 것은 수요가 구체화된 CAES 사업의 산출이므로, CAES 사업이 여타 부문에 미치는 영향만을 보이고 CAES 사업 산출에 의한 파급효과를 계산하기 위해서는 외생화 작업을 거쳐야 함
- 이러한 외생화 방법을 쓰게 되면 총수요가 아닌 특정부문의 산출이 미치는 영향과 그 산출이 타 산업에 유발하는 효과를 보다 명확히 알 수 있으며, 외생화시키는 것을 e 로 표시하고 CAES 사업을 편의상 H 로 표기하기로 함
- 경제를 3개 부문의 단순경제로 보았을 때, 외생화의 작업을 다음과 같이 예를 들어 설명할 수 있음

$$X_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + Y_1 \quad (7)$$

$$X_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + Y_2$$

$$X_3 = a_{31}X_1 + a_{32}X_2 + a_{33}X_3 + Y_3$$

$$\begin{bmatrix} (1-a_{11}) & -a_{12} & 0 \\ -a_{21} & (1-a_{22}) & 0 \\ -a_{31} & -a_{32} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_{13} \\ 0 & 1 & a_{23} \\ 0 & 0 & -(1-a_{33}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

- 식 (8)에서 부분행렬(Partitioned matrix)의 역행렬을 취하면 식 (9)가 도출

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & 0 \\ \beta_1 & \beta_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_{13} \\ 0 & 1 & a_{23} \\ 0 & 0 & -(1-a_{33}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

- 이 중에 우리가 외생화 작업을 하기 위해서는 식 (7)에서 세 번째 식을 없애는 작업을 하여야 하는데, 이를 식 (9) 행렬을 통해 살펴보면 결과적으로 식 (10)이 됨

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_{13} \\ 0 & 1 & a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 + a_{13}X_3 \\ Y_2 + a_{23}X_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

- 즉, 식 (10)을 행렬식으로 다시 표기하면 식 (11)이 됨

$$X^e = (I - A^e)^{-1} (Y^e + A_3^e X_3) \quad (11)$$

- 이 중 투입계수는 늘 일정하여 산출물계수도 일정하므로 식 (11)을 변동률 식으로 표시하면 식 (12)가 도출

$$\Delta X^e = (I - A^e)^{-1} (\Delta Y^e + A_3^e \Delta X_3) \quad (12)$$

- n 부문으로 일반화시키면서 다른 부문의 최종수요는 변동이 없고 오직 CAES 사업의 산출량만 변화한다고 가정하면 식 (12)를 식 (13)과 같이 변형시킬 수 있음

$$\Delta X^e = (I - A^e)^{-1} (A_H^e \Delta X_H) \quad (13)$$

- 여기서, ΔX^e 는 CAES 사업을 제외한 다른 부문의 산출량으로서 CAES 사업의 산출에 영향을 받은 타 부문의 산출 증감량을 나타냄
- $(I - A^e)^{-1}$ 는 투입계수행렬에서 CAES 사업이 포함된 열과 행을 제외시켜 작성한 레온티에프 역행렬을 나타냄
- A_H^e 는 투입계수행렬 A 에서 CAES 사업을 나타내는 열벡터 중에서 CAES 사업 원소를 제외한 열벡터
- X_H 는 CAES 사업의 산출액을 나타낸다.

- 식 (13)은 CAES 사업의 산출이 경제 내 다른 부문의 산출에 미치는 직·간접적인 효과를 나타내는데, CAES 사업에 대한 투자는 자체로서의 산출효과에 그치는 것이 아니라 연관효과를 통해 타 산업 부문의 생산을 유발시켜 결과적으로 전체

산업의 생산을 촉진하므로, 식 (13)으로부터 CAES 사업의 총 산출 또는 총 투자로 인한 파급효과를 구할 수 있음

3) 부가가치 유발효과

- 최종수요의 발생이 국내생산을 유발하고 생산활동에 의해서 부가가치가 창출되므로 결과적으로 최종수요의 발생이 부가가치 창출의 원천이라고 할 수 있음
- 따라서 산업연관표를 이용하면 최종수요와 부가가치와의 기능적인 관계도 파악할 수가 있는데, 이러한 관계는 식 (14)로 요약됨

$$W = \hat{A}_v X = \hat{A}_v (I - A)^{-1} Y \quad (14)$$

- 이 때 \hat{A}_v 는 부가가치계수의 대각행렬을 의미하며 부가가치계수행렬은 산출물 1단위의 변동시 부가가치의 변동량을 나타냄
- 식 (14)를 변동모형으로 바꾸면 식 (15)가 됨

$$\Delta W = \hat{A}_v \Delta X = \hat{A}_v (I - A)^{-1} \Delta Y \quad (15)$$

- 이 때 $\hat{A}_v (I - A)^{-1}$ 을 부가가치유발계수 행렬이라 부르며, 생산물에 대한 최종수요 한 단위 발생시 유발되는 부가가치의 크기를 의미
- 생산유발효과의 경우와 동일하게 CAES 사업의 산출액으로만 유발되는 부가가치 유발효과를 관찰하기 위해서는 CAES 사업을 외생화할 필요가 있으므로, 식 (15)를 외생화하면 식 (16)이 됨

$$\Delta W^e = \hat{A}_v^e \Delta X^e = \hat{A}_v^e (I - A^e)^{-1} (A_H^e \Delta X_H) \quad (16)$$

- W^e 는 CAES 사업 외 다른 부문들의 부가가치로 이루어진 행렬
- ΔX^e 는 총산출 행렬에서 CAES 사업을 제외한 행벡터로서 식 (13)에서 유도된 것
- \hat{A}_v^e 는 부가가치계수의 대각행렬에서 CAES 사업 부문의 행과 열을 제외시키고 남은 행렬을 의미

4) 취업유발효과

- 일반적으로 최종수요가 생산을 유발시키고 생산은 다시 노동수요를 유발시키므로, 최종수요와 노동유발을 연결시킴으로써 최종수요가 유발시키는 취업효과를 의미하는 취업유발효과를 구할 수 있음
- 최종수요와 노동유발을 연결시켜 분석하려면 취업계수와 생산유발계수를 기초로 취업유발계수를 도출해야 하는데, 취업계수(n_i)란 일정기간 동안 생산활동에 투입된 노동량(N_i)을 총산출액(X_i)으로 나눈 계수($n_i = N_i/X_i$)로서 한 단위의 생산에 직접 소요된 노동량을 의미
- 이 경우 노동량은 취업자와 피용자(피용자뿐 아니라 자영업주와 무급가족종사자 포함)의 두 가지로 나뉘어 파악되므로 각각의 취업계수를 계측하게 되므로, X 를 생산하기 위해서 요구되는 취업자수는 식 (17)로 표현

$$N = \hat{n} X = \hat{n} (I - A)^{-1} Y \quad (17)$$

- 식 (17)에서 $\hat{n}(I - A)^{-1}$ 을 취업유발계수행렬이라 부르며, \hat{n} 은 취업계수행렬의 대각행렬
- 취업유발계수는 어느 산업부문의 생산물 한 단위 생산에 직접 필요한 노동량 뿐만 아니라 생산과급과정에서 간접적으로 필요한 노동량도 모두 포함
- 생산유발효과처럼 CAES 사업의 산출액이 미치는 취업유발효과를 보기 위해서는 CAES 사업을 외생화시켜야 하며, CAES 사업을 외생화한 식은 다음과 같이 표현됨

$$N^e = \hat{n}^e \Delta X^e = \hat{n}^e (I - A^e)^{-1} (A_H^e \Delta X_H) \quad (18)$$

- N^e 는 CAES 사업을 제외한 각 부문별 취업인수
- \hat{n}^e 는 취업계수 대각행렬에서 CAES 사업 부문의 행과 열을 제외시키고 남은 행렬

5) 산업간 연쇄효과

- 산업간 연쇄효과를 살펴볼 수 있는 지표로는 확산감응도(sensitivity of dispersion)를 측정함으로써 전방연쇄효과(forward linkage effect)를 나타내는 감응도 계수와 확산력(power of dispersion)을 측정함으로써 후방연쇄효과(backward linkage effect)를 나타내는 영향력 계수가 있음(Hirschman, 1958; Jones, 1976)
- 감응도 계수(FL_i)는 전 부문의 최종수요를 모두 한 단위씩 증가시키기 위해 i 번째 산업이 생산해야 할 단위의 전 산업 평균치에 대한 비율로 i 부문에 대해 식 (19)로 정의됨

$$FL_i = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}}{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}} = \frac{n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}} \quad (19)$$

- 영향력 계수(BL_j)는 전 산업 평균 생산유발계수에 대한 산업별 생산유발계수의 비율로 j 번째 산업에 대해 식 (20)으로 정의됨

$$BL_j = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_{ij}}{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}} = \frac{n \sum_{i=1}^n \alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}} \quad (20)$$

다. 경제적 파급효과 분석 결과

1) 산업연관표

- 한국은행에서 가장 최근에 작성된 2008년 산업연관표를 이용하되, 28부문 통합대 분류 방식에 근거하여 403 부문에서 CAES 사업을 별도로 구분된 29부문에 통합하였음
- 본 연구에서는 CAES 사업을 해상풍력발전에 국한되는 것으로 가정하였음
 - CAES 사업을 정의한 결과는 다음의 표에 제시되어 있음

표 6.11 403 부문 상에서의 CAES 사업의 정의

부문번호	부문명
038	모래및자갈
039	쇄석
040	기타 건설용석재
179	시멘트
180	레미콘
181	콘크리트제품
188	선철
189	합금철
191	철근및봉강
192	형강
193	선재및케조
194	열간압연강재
195	강관(주철강관제외)
196	냉간압연강재
198	철강단조물
199	표면처리강재
200	기타철강1차제품
209	건물용금속제품
210	구조물용 금속제품
211	설치용금속탱크및저장용기
214	나사제품
215	철선제품
217	금속처리
220	내연기관 및 터빈
221	밸브
222	베어링,기어및전동요소
224	공기조절장치및냉장냉동장비
226	난방및조리기기
227	펌프및압축기
230	금속절삭가공기계
231	금속성형처리기계
236	금형및주형
240	발전기및전동기
241	변압기
242	기타전기변환장치
243	전기공급및제어장치
244	전선및케이블
245	전지
247	기타 전기장치
248	전자관
249	디지털표시장치
281	강철제선박
301	기타발전
303	증기 및 온수공급업
311	항만시설
317	전력시설
319	기계조립설치
320	기타건설

- 따라서 표 6.12와 같이 총 29부문을 대상으로 분석을 하며, CAES 사업은 제29부
 문으로 처리하였고, 이 부문을 외생화하게 되면 결국 28개 부문을 다루게 됨

표 6.12 CAES 사업을 포함한 29부문 산업분류표

부문 번호	부문명
1	농림수산물
2	광산물
3	음식료품
4	섬유 및 가죽제품
5	목재 및 종이제품
6	인쇄 및 복제
7	석유 및 석탄제품
8	화학제품
9	비금속광물제품
10	제1차 금속제품
11	금속제품
12	일반기계
13	전기 및 전자기기
14	정밀기기
15	수송장비
16	기타제조업제품
17	전력, 가스 및 수도
18	건설
19	도소매
20	음식점 및 숙박
21	운수
22	통신 및 방송
23	금융 및 보험
24	부동산 및 사업서비스
25	공공행정 및 국방
26	교육 및 보건
27	사회 및 기타서비스
28	기타
29	CAES 사업

2) 수요유도형 모형의 분석 구도

- 수요유도형 모형을 이용한 CAES 사업의 국민경제적 역할과 관련된 경제적 파급
 효과는 그림 6.3과 같이 자기부문 효과와 타 부문 효과의 합으로 구성되어야 함

3) 산업간 연쇄효과 분석결과

- 모든 부문의 생산물에 대한 수요가 각각 한 단위씩 발생할 때, 중간재로 사용되는 CAES 사업의 산출물 공급도 증가해야 하며, 이때 중간재 산업으로서 CAES 사업이 받는 영향의 정도가 감응도 계수임
 - 감응도 계수로 파악할 수 있는 전방연쇄효과는 CAES 사업의 산출물을 다른 산업생산의 원료로 파악하는 것인데, 일반적으로 한 산업의 제품이 각 산업부문에 중간재로 널리 사용되는 산업일수록 감응도 계수는 커짐
- CAES 사업의 영향력 계수는 CAES 사업의 최종수요가 한 단위 발생할 때 중간재로 사용되는 타 산업부문에 미치는 영향력을 의미
 - 영향력 계수로 파악할 수 있는 후방연쇄효과는 CAES 사업의 산출물을 최종재로 보고 다른 산업의 산출물을 CAES 사업에서의 생산을 위한 원료로 파악
 - 일반적으로 생산과정에서 여러 산업으로부터 중간재를 필요로 하는 산업일수록 영향력 계수는 커짐
- 감응도 계수의 평균과 영향력 계수의 평균은 정확하게 1이므로 1보다 낮으면 평균보다 낮으며, 1보다 크면 평균보다 크다고 볼 수 있음
- 29개 부문에 대해 감응도 계수와 영향력 계수를 계산한 결과는 표 6.13에 제시되어 있는데, 각 산업별 감응도계수는 CAES 부문이 2.3455로 가장 크며, 화학제품과 교육 및 보건 부문이 각각 2.0183 및 1.7829로 각각 2위 및 3위를 차지함
- 감응도계수가 1보다 크다는 것은 일반적인 경기가 활황일 때 CAES 부문이 전반적으로 산업성장에 자극받는 정도가 크다는 것을 의미하는데, 즉 CAES 부문도 다른 산업들처럼 경기변동에 영향을 받는데 다른 산업에 비해 그 정도가 큰 산업이라는 것을 의미하며, 최종수요적 성격보다는 중간수요적 성격을 가짐
- 각 산업별 영향력계수는 기타 부문이 1.4530으로 가장 높게 나타났으며, 수송장비 및 금속제품 부문이 각각 1.3268 및 1.2556으로 2위 및 3위를 차지하였고, CAES 부문은 0.9043으로 20위를 차지하여 CAES 부문의 영향력계수는 비교적 작음을 알 수 있음
 - 영향력계수가 작다는 것은 CAES 부문의 투자지출에 따른 경제적 파급효과, 즉 다른 산업을 견인하는 정도가 다른 부문보다 상대적으로 작음을 의미함

- 따라서 CAES 부문은 제조업적 성격보다는 원시산업적 성격을 가지며, 다시 말해, CAES 부문은 전방연쇄효과보다 후방연쇄효과가 더 작기에 중간수요적 원시산업이라 할 수 있음³⁾

표 6.13 한국은행 대분류 기준 29개 산업의 감응도 계수와 영향력 계수

산업 번호	부문명	감응도 계수 (전방연쇄효과)		영향력 계수 (후방연쇄효과)	
		값	순위	값	순위
1	농림수산물	0.9822	14	0.9689	19
2	광산물	0.5582	28	0.8964	21
3	음식료품	1.1460	7	1.0848	9
4	섬유 및 가죽제품	0.7968	17	1.0457	14
5	목재 및 종이제품	1.1044	8	1.0520	13
6	인쇄 및 복제	0.6671	22	1.0575	11
7	석유 및 석탄제품	1.3240	4	0.5935	28
8	화학제품	2.0183	2	1.0747	10
9	비금속광물제품	0.6755	21	1.0200	15
10	제1차 금속제품	1.1004	9	1.1733	5
11	금속제품	0.7069	20	1.2556	3
12	일반기계	0.6424	24	1.2364	4
13	전기 및 전자기기	0.7650	18	0.9839	17
14	정밀기기	0.6152	26	1.1017	7
15	수송장비	1.0351	13	1.3268	2
16	기타제조업제품	0.6512	23	1.1530	6
17	전력, 가스 및 수도	1.0497	11	0.7905	27
18	건설	0.6106	27	1.0908	8
19	도소매	1.2848	5	0.8507	23
20	음식점 및 숙박	1.0484	12	1.0535	12
21	운수	1.0555	10	0.8145	25
22	통신 및 방송	0.9029	16	0.9828	18
23	금융 및 보험	1.2197	6	0.8929	22
24	부동산 및 사업서비스	1.7829	3	0.8041	26
25	공공행정 및 국방	0.5420	29	0.5208	29
26	교육 및 보건	0.6342	25	0.8174	24
27	사회 및 기타서비스	0.7532	19	1.0004	16
28	기타	0.9819	15	1.4530	1
29	CAES 사업	2.3455	1	0.9043	20

3) 전후방연쇄효과의 크기에 따라 산업을 크게 네 가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫째, 전후방연쇄효과가 모두 높은 산업은 중간수요적 제조업형, 둘째, 전방연쇄효과가 높고 후방연쇄효과가 낮은 산업은 중간수요적 원시산업형, 셋째, 후방연쇄효과가 높고 전방연쇄효과가 낮은 산업은 최종수요적 제조업형, 마지막으로 전후방연쇄효과가 모두 낮은 산업은 최종수요적 원시산업형으로 구분할 수 있다(한국은행, 1987).

4) CAES 사업에서의 투자가 타 산업에 미치는 파급효과

- CAES 사업이 타 산업에 미치는 생산유발효과, 부가가치 유발효과, 취업유발효과를 보다 엄밀하게 살펴볼 필요가 있는데, 주요 분석결과는 표 6.14에 제시되어 있음
- CAES 사업의 1.0000원 투자는 타 산업의 생산을 0.8436원, 타 산업의 부가가치를 0.2576원 만큼 유발하며, 10억원 투자는 타 산업의 취업을 4.3690명 만큼 유발하는 것으로 분석되었음
- 전반적으로 보면 CAES 사업의 생산은 부동산 및 사업서비스, 음식점 및 도소매 등과 같은 서비스산업의 생산, 부가가치, 취업, 고용을 많이 유발하며 제조업 중에서는 제1차 금속제품 부문에 대한 파급효과가 큰 것으로 판단됨
- 한편 각 경제적 파급효과의 분석결과는 그림 6.5에 요약되어 있는데, 본 사업의 사업비 345.52억원의 투자로 인해 생산유발효과는 총 637.0억원, 부가가치 유발효과는 총 165.0억원, 취업유발효과는 총 231.8명에 달하는 것으로 분석되었음

	자기 산업 효과		타 산업 효과		총 효과
	↓		↓		↓
생산 유발효과	→ $\frac{1.0000\text{원}}{345.5\text{억원}}$	+	$\frac{0.8436\text{원}}{291.5\text{억원}}$	=	$\frac{1.8436\text{원}}{637.0\text{억원}}$
	⇕		⇕		⇕
부가가치 유발효과	→ $\frac{0.2200\text{원}}{76.0\text{억원}}$	+	$\frac{0.2576\text{원}}{89.0\text{억원}}$	=	$\frac{0.4776\text{원}}{165.0\text{억원}}$
	⇕		⇕		⇕
취업 유발효과	→ $\frac{10\text{억원당 } 2.3392\text{명}}{80.8\text{명}}$	+	$\frac{10\text{억원당 } 4.3690\text{명}}{151.0\text{명}}$	=	$\frac{10\text{억원당 } 6.7082\text{명}}{231.8\text{명}}$

그림 6.5 CAES 사업 투자의 경제적 파급효과 종합화 결과

표 6.14 CAES 사업에서의 투자가 타 산업에 미치는 파급효과

부문명칭	생산유발계수		부가가치 유발계수		취업유발계수	
	값(원)	순위	값(원)	순위	값 (명/10억원)	순위
농림수산물	0.0037	24	0.0019	21	0.1314	10
광산품	0.0035	25	0.0021	20	0.0185	25
음식료품	0.0068	21	0.0018	22	0.0213	23
섬유 및 가죽제품	0.0044	22	0.0014	24	0.0322	21
목재 및 종이제품	0.0123	16	0.0030	17	0.0511	16
인쇄 및 복제	0.0022	27	0.0009	25	0.0236	22
석유 및 석탄제품	0.0695	4	0.0131	7	0.0085	26
화학제품	0.0799	3	0.0146	6	0.1507	8
비금속광물제품	0.0311	9	0.0105	8	0.1219	11
제1차 금속제품	0.1998	1	0.0266	3	0.1748	7
금속제품	0.0191	13	0.0077	10	0.2011	5
일반기계	0.0102	18	0.0025	19	0.0404	19
전기 및 전자기기	0.0232	12	0.0050	15	0.0585	15
정밀기기	0.0103	17	0.0027	18	0.0589	14
수송장비	0.0307	10	0.0065	11	0.0697	13
기타제조업제품	0.0029	26	0.0008	26	0.0198	24
전력, 가스 및 수도	0.0397	7	0.0086	9	0.0425	17
건설	0.0039	23	0.0016	23	0.0359	20
도소매	0.0527	5	0.0318	2	1.2477	1
음식점 및 숙박	0.0142	14	0.0056	13	0.3064	4
운수	0.0443	6	0.0151	5	0.3906	3
통신 및 방송	0.0141	15	0.0061	12	0.0410	18
금융 및 보험	0.0360	8	0.0203	4	0.1881	6
부동산 및 사업서비스	0.0852	2	0.0579	1	0.6830	2
공공행정 및 국방	0.0004	28	0.0000	27	0.0036	27
교육 및 보건	0.0078	20	0.0053	14	0.1135	12
사회 및 기타서비스	0.0086	19	0.0044	16	0.1343	9
기타	0.0269	11	0.0000	27	0.0000	28
합계	0.8436		0.2576		4.3690	

3. 인공구조물 저장방식에 대한 개략 경제성 검토

가. 목표 수준 설정

- 2003년 기준 덴마크에서 생산된 풍력에 의한 출력값 중 84%가 잉여값임. 즉, 풍력 전력 중 16%만 덴마크에서 활용되고 나머지는 싼값에 외국으로 수출됨.
 - 풍력발전에 따른 전력생산은 상당히 불규칙함.
 - 저장장치를 활용하지 않을 경우에는 소요되는 전력 요구에 따라 규칙적인 전력값에 치중하여 활용되고 나머지는 잉여값으로 처리되어 비효율적임.
 - 반면, CAES를 활용할 경우, 잉여값(덴마크의 경우 84%)의 대부분을 압축공기 형태로 저장한 이후 필요에 따라 원하는 시간에 발전할 수 있으므로 효율적인 활용이 가능함.

- CAES의 평균 효율(45%, KISTI, 2007)을 고려하면, 84%의 잉여값 중 37.8%가 CAES를 활용하여 추가적인 전력생산이 이론적으로 가능하다고 할 수 있음.
 - CAES 발전효율 : Huntorf (42%), McIntosh (54%)
 - AA-CAES를 활용할 경우 발전효율은 평균 45%에서 70%까지 증가될 수 있음.

- 본 연구에서는 이론적인 추가 가능 전력비율인 37.8% 중 기존의 풍력발전 활용비율인 16%의 2배인 32%로 증대(16% 추가)되는 것으로 목표를 설정함. 즉, 기존 수익과 비교하여 2배의 수익이 발생하는 것을 목표로 함.

나. CAES 구축비용 검토

- 100MW급을 기준으로 Wind/CAES 구축비용 (미국 Colorado 주의 Wind/CAES 발전 타당성 조사, 2007)
 - CAES의 타당성(feasibility)과 실용성(practicality) 파악 목적
 - 과잉 전력생산(기저 또는 풍력)시 전력 저평가 방지, 발전 차액 수익 계산
 - 결과
 - Wind/CAES 공사 단가는 730\$/kW ⇒ 800억원/100MW
 - 투자비 회수기간 : 4.8년

- 해상 수중 CAES 구축비용 추정
 - CAES 구축비용을 하부기초(저장소 포함)와 상부시설물(발전기, 압축기 등 포함)로 구분 가능하며, 육상 조건(지하 공동 활용)일 때 하부:상부의 구축 비용은 50:50으로 가정할 수 있음.

- 미국 Colorado 주의 타당성 조사 결과를 바탕으로 100MW급을 기준으로 상부 시설물 부분은 600억원(400억원의 1.5배)으로 추정.
- 하부기초의 경우 수심 20m 조건^{*)}에서 석션기초를 활용^{**)}하여 수중에 구조물을 설치하는 방식을 가정함.
 - *) 현재 국내 해상풍력단지에는 수심 20m를 기준으로 우선 실증 계획 중임.
 - **) 국토해양부의 R&D과제인 ‘대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(2007)’에 따르면, 수심 20m에서 25m(B)×50m(L) 크기의 석션파일기초 방파제를 울산지역의 연약지반에서 시공한 사례가 있음.
- 저장 시간을 6시간, 저장 압력을 60~100bar로 가정할 때 100MW급의 CAES 구조물의 저장 공간은 50,000m³ 정도로 추정됨.
- 울산의 R&D사업 공사비는 8함의 석션파일과 상부케이슨에 대한 재료비 및 해상 시공비를 모두 포함하여 140억원 정도 소요.
- 50,000m³의 저장소를 확보하기 위해서는 수심 20m 조건에서 50m(B)× 50m(L)의 하부기초가 필요하며, 이 경우에는 케이슨 비용까지 고려하여 280억원 정도 비용이 소요될 것으로 예상됨.
- Steel 구조의 내부탱크는 공장제작 후 설치의 개념으로 활용 가능. 100MW급에 적용시 직경 4m, 높이 10m의 내부탱크 약 400개가 필요하며, 이때 탱크 제작비 및 시공비는 1,000억원 정도로 예상됨(제작비는 두께 10cm의 내부탱크 1개당 재료비와 제작비를 포함하여 약 2억원 정도로 추정하는 경우 400개 제작에는 약 800억원 정도 소요 예상되며, 시공비는 200억원 정도로 가정함).
- 따라서, 총 구축비용은 100MW급을 가정하여 600억원(상부시설물)+280억원(하부기초)+1,000억원(저장시설)+376억원(부대비용으로 직접비용의 20%로 가정)=2,256억원으로 추정됨.
- 한편, 지식경제부에서 발표한 100MW급 해상풍력발전단지의 구축비용은 3,000억원 정도(1MW당 30억원) 소요되는 것으로 예상됨.

다. 개략 경제성 검토

- CAES의 목표수준(기존 전력생산수익의 2배)과 CAES 구축비용을 고려하여 이윤(B)는 CAES 구축에 의한 전력생산수익 증가분으로 하고, 비용(C)는 CAES 시스템 구축에 투입되는 비용으로 하여 개략적으로 산정하면, $B/C=3,000/2,256=1.33$ 정도임.
 - 미국 Colorado의 타당성 조사에 따르면 Wind/CAES의 가치는 Wind energy만의 수입에 비해 2.4배 정도의 수준임.
 - 실제 목표수준을 2배 이상으로 끌어올릴 수 있을 것으로 판단됨.

- 본 과제는 압축공기 저장을 위한 신형식 구조물의 개발을 포함하기 때문에 연구개발결과에 따라 구조물 설계 및 시공비용의 절감이 가능할 것으로 기대됨

- 본 경제성 검토는 개략 검토이므로 연구개발을 수행하여 인공저장 구조물에 대한 상세설계를 수행하여 경제성을 재평가하여 pilot-test를 추진하는 것이 타당함.

제3절 전문가 설문에 의한 타당성 검토

1. 종합평가

- 본 기획연구에서 제안된 개발기술들의 정책적, 기술적, 경제적 타당성을 검토하고자 관련 분야의 전문가들에게 연구기획의 사전타당성 검토를 의뢰하여 분석하였음
- 자문위원들은 발전사, 풍력 전문가, CAES 전문가를 포함하였으며, 본 기획과제와 연구내용 측면에서 연계 가능성이 있는 “풍력발전타워의 설계 및 시공기술 개발” 기획과제의 연구책임자와 “대구경 대수심 해양기초시스템 기술 개발” 연구단의 사무국장을 자문위원으로 포함하였음
- 기획보고서 초안을 검토한 후 연구기획의 객관적 평가와 전문적인 견해를 제시하였음
- 연구기획의 사전타당성 평가를 위한 평가항목은 표 6.16과 같으며, 각 항목에 대하여 5점(매우 타당) ~ 1점(매우 미흡)으로 평가하여 그 결과를 표 6.17에 정리하였음
- 사전 타당성 평가 결과, 정책적 타당성은 4.1점(5점 만점), 기술적 타당성은 4.3점(5점 만점), 경제적 타당성은 4.3점(5점 만점)으로 조사되어 대체로 타당한 것으로 평가되었음

표 6.15 자문위원 명단

성명	강현일	김수창	김영민	김주형	박종섭	이권희	이대수
소속	한밭대학교 전기공학과	한국서부발전 (주)	한국기계 연구원	한국건설기술 연구원	상명대학교	현대로템 주식회사	한전 전력연구원
직위	조교수	차장	선임연구원	연구위원	조교수	부장	처장
비고	신재생에너지 분야 전문가	발전사	CAES 전문가	“대구경 대수심 해양기초시스 템 기술 개발” 연구단 사무국장	“풍력발전타 워의 설계 및 시공기술 개 발” 기획과 제의 연구책 임자	풍력 분야 전문가	한전

표 6.16 사전타당성 검토 평가 항목 및 주안점

구분	항목	주안점
정책적 타당성 검토	국가 전략적 중요성	-국가 차원에서의 필요성 -정부 지원의 타당성 -사업 추진의 시급성 등
	상위 계획과의 부합성	-국가/산업 계획간의 부합도 -국토해양부 및 관련부처 정책 부합성 등
	사업추진의지와 관련기관 협조체계	- 조직 및 기관의 사업추진의지 - 관련 기관 및 부처의 협조체계
기술적 타당성 검토	사업의 독창성 및 연계성	-기존 사업과의 중복성여부 -기존 사업과의 연계성 등
	기술개발 계획의 완성도	-목표, 내용, 성과의 구체성 -추진체계의 적절성과 실효성 -성과 활용 계획 등
	과학기술적 파급효과	-과학기술 경쟁력 향상 -타기술분야로의 파급효과 -과학기술인력 양성 효과 등
	기술 수준 및 개발 성공 가능성	-기술 개발의 기대 수준 -성공 가능성 -추진과정에서 예상되는 기술적 위험요소와 대안 등
경제적 타당성 검토	예산 적정성	-총사업비의 적정성 -세부과제별 예산 배분의 적정성
	목표성과물의 예상 경제성	- 목표 성과물의 산업파급효과, 고용효과 등 경제적 기대성과 등

표 6.17 사전타당성 평가 결과

구분	항목	평가점수	평균
정책적 타당성 검토	국가 전략적 중요성	4.6 / 5.0	4.1 / 5.0
	상위 계획과의 부합성	4.0 / 5.0	
	사업추진의지와 관련기관 협조체계	3.9 / 5.0	
기술적 타당성 검토	사업의 독창성 및 연계성	4.3 / 5.0	4.3 / 5.0
	기술개발 계획의 완성도	4.0 / 5.0	
	과학기술적 파급효과	4.9 / 5.0	
	기술 수준 및 개발 성공 가능성	4.0 / 5.0	
경제적 타당성 검토	예산 적정성	4.1 / 5.0	4.3 / 5.0
	목표성과물의 예상 경제성	4.5 / 5.0	

2. 정책적 타당성 검토

- 본 기획과제의 정책적 타당성에 대한 자문위원들이 제시한 의견은 다음과 같음

항목	검토의견
국가 전략적 중요성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신재생에너지의 불안정한 전력공급이라는 취약점을 보완하기 위해 기존의 신재생에너지 개발 사업과 더불어 CAES 개발사업이 매우 시급하여 이에 대한 국가 차원의 연구개발이 먼저 시행되어야 할 것임 ○ 효율적 에너지 생산/활용을 위한 기술개발이 필요하고, 이를 극대화 할 기술개발에 지원이 필요함. ○ 전력저장은 신재생 Energy 보급과 연계할 때 필수기술임. ○ 정부의 에너지 정책과 매우 부합하는 것으로 판단됨. ○ 실용화 사업이 시급하다고 판단됨. ○ 신재생에너지 보급에 있어 에너지 저장은 반드시 필요하며 특히 인공구조물을 이용하는 Micro-CAES는 향후 큰 성장 가능성이 있음 ○ 녹색기술의 국내 기술력 확보와 신재생에너지 저장기술 개발은 민간 독자기술로 개발되기에 어려운 분야임. ○ 최근 풍력발전 등 신재생에너지 단지 조성이 본격적으로 추진되는 바 저장기술은 시급하게 추진될 필요가 있음.
상위 계획과의 부합성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 에너지 저장은 최근 국가적으로 중요하고 시급한 분야로 다루고 있음 ○ 국내 “녹색성장 국가전략 및 5개년 계획” 수립 및 추진으로 신재생 에너지 산업화 촉진 및 청정 에너지 보급 확대가 이루어지고 있다. 이에 저장기술은 에너지 효율을 극대화할 수 있는 방안이 될 것임. ○ 대용량 저장장치의 설계, 시공 및 유지관리는 저장기술확보를 위한 중요한 인자이며, 해양환경 적용시 국토해양부의 적극적인 노력이 필요함 ○ 국토해양부에서 추진하는 항만내 해상풍력단지를 테스트베드가 수준이 아닌 완전한 전력플랜트로 개발하기 위해서 매우 필요한 기술임 ○ 지경부 해상풍력 및 전력저장2020 계획의 추진 목표, 목적, 방향을 검토하고 조율 및 반영할 필요가 있음. ○ 지상·해상의 자원을 이용하여 에너지 저장 시스템을 개발하는 것은 국토부의 정책 및 분야와 매우 부합됨
사업추진의지와 관련기관 협조체계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 사업은 전력의 안정적인 생산에 대한 내용으로 신재생에너지 플랜트 건설분야의 국토해양부와 전력생산 공급의 지식경제부가 범부처적으로 대응하여 공동 개발의 필요성이 있음. ○ 조직 및 기관의 추진의지는 강하나, 향후 과제 추진시에는 시스템을 구축할 전문가 및 기관의 참여자가 필요하며, 발전사업자와 공동협력체계 구축 필요 ○ 협조체계가 적절하게 구축됨. ○ 지경부와의 역할 분담 또는 협조체계 필요 ○ 신재생에너지 발전에 있어서 많은 기관과 부처가 관여하고 있기에 기술개발 및 활용을 위해서는 범정부적인 지원과 협조체계를 갖추어야 될 것임. ○ 국토해양부는 단지조성, 지경부(한국전력 등) 생산전력의 경제적인 그리드망 이용 권한 등 다양한 기관 관리업무 분산을 효율적으로 추진할 필요가 있음.

3. 기술적 타당성 검토

- 본 기획과제의 기술적 타당성에 대한 자문위원들이 제시한 의견은 다음과 같음

항목	검토의견
사업의 독창성 및 연계성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 풍력일체형 압축공기발전은 상당히 독창적 ○ 세부과제1은 독창성이 약하나 해상지반을 이용한다는 점을 부각시킬 필요가 있으며, 세부과제 2는 압축원을 풍력으로 활용한다는 것을 강조할 필요가 있음. ○ 기존 육지에서는 지중에 CAES 발전을 구축하는 연구가 진행되고 있으나 본 기획에서는 해상에서도 사용할 수 있는 인공구조물 개발에 초점을 둔다는 것에 차별성이 있다고 판단됨 ○ 매우 독창적인 아이디어이나 지상CAES와 차별화가 필요함 ○ 지경부 기획 CAES 과제와 차별성이 있음
기술개발 계획의 완성도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 목표, 내용, 성과의 내용이 매우 구체적임 ○ 초기단계로 파악되는 에너지 저장기술의 선도화를 위해서 본 개발과제의 독창적인 추진이 시급함. ○ 도전적이고 혁신적인 과제는 선행연구를 통해 검증이 필요하므로 pilot test 적용 부분과 구분될 필요가 있음
과학기술적 파급효과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 향후 토목, 건축, 기계, 전기분야에 포괄적으로 적용가능하여 파급효과가 클 것으로 판단됨 ○ 풍력변환, 압축기, 유압장치, 해상구조물 등의 연관기술분야에 영향을 줄 것으로 판단됨 ○ 본 기술은 신규수요를 창출할 수 있으며 범용적으로 응용이 가능한 파급효과가 큰 선행기술로 사용할 수 있는 기초 원천기술로 판단됨 ○ 신재생에너지 저장기술의 개발은 타에너지 개발분야에 파급효과가 크며, 새로운 신성장 시장형성에 크게 기여할 것으로 판단됨. ○ 도전적이고 혁신적인 과제 도출 포함은 바람직한 것으로 생각됨
기술 수준 및 개발 성공 가능성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초기 연구개발단계이기 때문에 기초 연구를 탄실히하여 실용화 단계에서 성공적인 시스템을 구축하길 기대함 ○ 첨단 기술로 성공여부는 불투명 ○ 본 과제는 다학제가 융합된 기술로 한쪽 분야에 쏠림이 없도록 다양한 연구분야의 인력이 참여하여 연구를 수행해야 기술 개발이 성공할 것으로 판단됨 ○ 신속한 본과제 추진으로 초기단계인 신재생에너지 저장기술의 기술력을 확보할 필요가 있으며, 상세 단계별 기술개발을 통한 단계별 실용화 추진이 필요함. ○ 첨단 기술이고, 혁신적인 부분이 있어 기술개발 리스크가 있는 부분이 있으나, 기술개발 성공시 파급효과는 클 것으로 기대됨

4. 경제적 타당성 검토

○ 본 기획과제의 경제적 타당성에 대한 자문위원들이 제시한 의견은 다음과 같음

항목	검토의견
예산 적정성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 두 개의 세부과제 구성에 예산 배분은 적절한 것으로 판단되나, 상세보고서를 통해 소요되는 상세 연구비의 적절성을 평가, 기술할 필요가 있음. ○ 예산이 조금 부족한 감이 있으나 적절하다 판단됨. ○ 모든 과제를 수행하기 위해서는 검토가 더 필요(부족 할 것으로 예상) ○ 예산은 적절한 것으로 판단되며 연구목표를 상향 조정하는 경우의 추가 예산에 대한 검토도 필요할 것으로 판단 ○ 연구아이템에 비해 사업비 규모가 작아 선행연구 부분과 pilot test 부분을 구분할 필요가 있음
목표성과 물의 예상 경제성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신재생에너지 저장기술의 관련분야 파급효과는 클 것으로 기대되며, 경제적인 성과를 얻기 위해서는 효율의 극대화, 독창적인 기술개발을 통한 선도시장 형성이 중요할 것으로 판단됨. ○ 타 산업 및 고용효과가 클 것으로 기대됨 ○ 인근 사업에의 파급효과 있음. ○ 본 기초원천기술이 확보된다면 국내 뿐만 아니라 현재 해외에서 운용되고 있는 해상풍력발전단지에도 적용할 수 있어 이에 대한 산업파급효과와 경제적 효과는 매우 높다고 판단됨

제7장 기획타당성검토위원회 결과를 반영한 수정안

제1절 기획타당성검토위원회 개요 및 검토결과

1. 기획타당성검토위원회 개요

구분	기획과제명	일시 및 장소	기획담당실
상시 제안 도출	신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술 개발 기획연구	8.17(수) 13:30~15:30 3층 1회의실	연구기획실

2. 기획타당성검토위원회 결과

- 본 기획결과에 대한 최종보고서를 검토하여 다음과 같은 검토의견을 제시함.
- 1세부과제를 별도 과제로 변경
 - 1단계(1~3차년도) 요소기술 개발, 2단계(4~5차년) 시스템 통합 및 검증으로 구분
 - 1단계 연구기간을 당초 3년에서 2년으로 단축하고 총 정부출연금 13,718백만원은 1단계(2년) 5,768백만원, 2단계(2년) 6,716백만원으로 조정
- 2세부과제를 별도 과제로 변경
 - 1단계(1~3차년도), 2단계(4~5차년)로 구분하고, 시장성 및 성공가능성을 확보한 이후 연구추진
 - 1단계 연구기간을 당초 3년에서 2년으로 단축하고 총 정부출연금 12,193백만원은 1단계(2년) 5,307백만원, 2단계(2년) 3,674백만원으로 조정

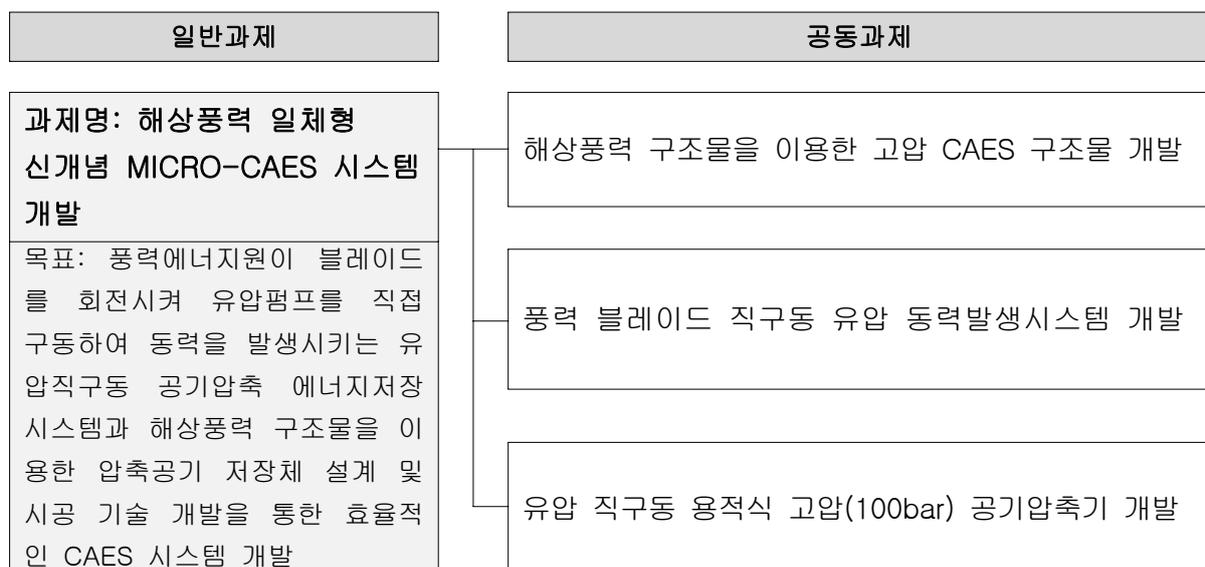
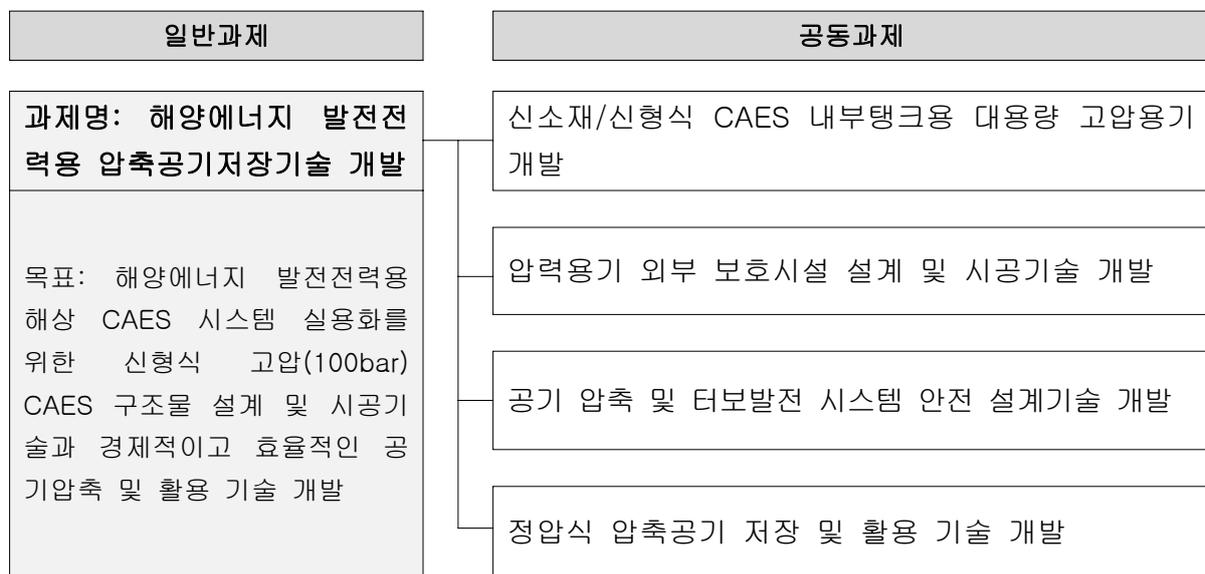
구분	과제명	기획타당성 검토위원회 검토의견				
		과제추진 타당성	예산검토(백만원)			과제추진 우선순위
			정부	민간	합계	
1세부 과제	고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발	△ -해상 CAES 제품개발의 상용화가 불투명하여 요소기술 개발 위주로 추진 · 다른 저장장치와 비교하여 기술적 /경제적 우위가 있는지 불분명 · 시장전망 불투명 · 새로운 제품의 개발이므로 연구개 발 및 상용화에 장기간 소요 -요소기술 위주로 1단계(1~3차년도 (2년간 추진)), 2단계(4~5차년)구분 하여 추진 -시스템개발이므로 1-1~1-4 동시 추진 필요	13,718	4,574	18,292	1
			↓	↓	↓	
			1단계	1단계	1단계	
			5,768	1,923	7,691	
			2단계	2단계	2단계	
			6,716	2,239	8,955	
1-1	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	△ -대용량 에너지 저장을 해상에 적용 하기 위한 고압 용기 개발이 필요하 다고 생각됨 -1차, 2차년도는 통합하고, 1단계 연 구기간 2년으로 추진(1차년도 연구 비 919백만원 삭감)	3,788	1,263	5,051	1
			↓	↓	↓	
			1단계	1단계	1단계	
			1,438	480	1,918	
			2단계	2단계	2단계	
			1,661	553	2,214	
1-2	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	△ -육상과는 다른 해상에서 에너지의 저장을 위한 설계 및 시공 기술개발 이 필요하다고 사료됨 -1차, 2차년도는 통합하고, 1단계 연 구기간 2년으로 추진(1차년도 연구 비 527백만원 삭감) -4차년도는 연구시설 및 장비비는 1-1과제와 중복되므로 삭감(해상크 레인 및 바지선 이용 200백만원)	3,149	1,050	4,199	1
			↓	↓	↓	
			1단계	1단계	1단계	
			1,211	404	1,615	
			2단계	2단계	2단계	
			1,393	464	1,857	
1-3	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	○ -타 기관 연구결과를 토대로 본 연구 에 적용을 위한 우선적인 연구 테마 라고 생각함 -1~3차년도 연구를 1~2차년으로 압 축하여 1단계로 추진	4,371	1,457	5,828	1
			↓	↓	↓	
			1단계	1단계	1단계	
			1,726	575	2,301	
			2단계	2단계	2단계	
			2,645	882	3,527	
1-4	정압식 압축공기 저장 및 활용기술 개발	○ -설치 여건을 감안하여 파일롯트 등 용량의 조정을 통해 실용성이 높아 질 수 있는 연구로 조정이 필요함 -1~3차년도 연구를 1~2차년으로 압 축하여 1단계로 추진 -2~5 법제도 분석 및 개선방안 도출 을 포함하여 수행(연구비 350백만 원 추가)	2,410	804	3,214	1
			↓	↓	↓	
			1단계	1단계	1단계	
			1,593	531	2,124	
			2단계	2단계	2단계	
			1,018	339	1,357	

구분	과제명	기획타당성 검토위원회 검토의견					과제추진 우선순위
		과제추진 타당성	예산검토(백만원)				
			정부	민간	합계		
2세 부 과제	해상풍력 일체형 신개념 Micro-CAES 시스템 개발	○	-현시점에서 시장성이 있을지는 불분명하나 독창적인 아이디어이므로 창의적 연구로 추진 바람직하나 성공 가능성이 낮음(차후 시장성을 고려하여 추진) -요소기술 위주로 1단계(1~3차년도), 2단계(4~5)구분하여 추진 -시스템개발이므로 2-1~2-4 동시 추진 필요	12,193 ↓ 1단계 5,307 2단계 3,674	4,067 ↓ 1단계 1,769 2단계 1,225	16,260 ↓ 1단계 7,076 2단계 4,899	2
2-1	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	○	-해상 풍력 구조물은 설치되어 안전하게 운전되는 경우에 이용이 가능할 것으로 판단되므로 연구 진행을 조금 늦추어 진행할 필요가 있다고 사료됨	3,959 ↓ 1단계 2,297 2단계 1,901	1,638 ↓ 1단계 765 2단계 634	5,597 ↓ 1단계 3,062 2단계 2,535	2
2-2	풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	○	-해상에 적용하기 위해 필요한 것으로 사료되지만, 현재 육상에 사용되고 있는 곳의 시범 적용을 통해 검증하고서 적용하는 것도 필요하다고 사료됨	2,242 ↓ 1단계 1,417 2단계 825	748 ↓ 1단계 473 2단계 275	2,990 ↓ 1단계 1,890 2단계 1,100	2
2-3	유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기 압축기 개발	○	-에너지 저장을 위해 필요한 연구라고 사료됨	2,541 ↓ 1단계 1,593 2단계 948	847 ↓ 1단계 531 2단계 316	3,388 ↓ 1단계 2,124 2단계 1,264	2
2-4	AA-CAES 시스템 열에너지 저장 및 이용기술 개발	X	-차세대 기술로서 본 과제 성공 후 추진 바람직 -발전 및 계통연계 방안 연구로 대체 요망 -에너지의 저장과 변환을 위한 필요 연구라고 사료됨	2,501 (0)	834 (0)	3,335 (0)	-
2-5	법제도 분석 및 개선방안 도출	△	-인건비는 46백만원으로 나머지 비용이 과다 계산되어 1-4과제로 통합하고 1~2차년도 연구비로 추진	950 (0)	0	950 (0)	-

제2절 연구개발과제 수정안

1. 연구개발과제 구성 및 추진체계

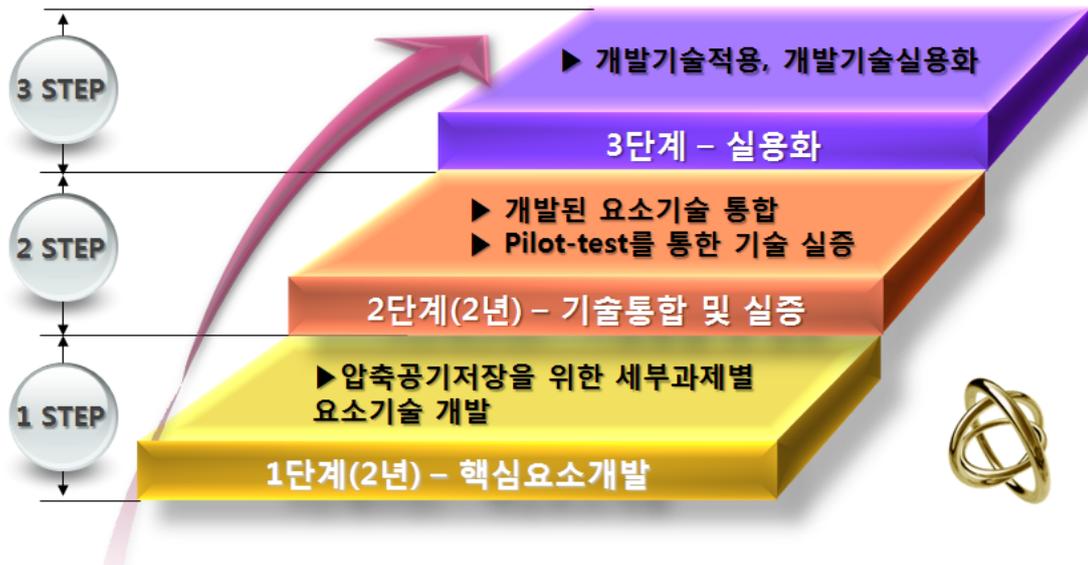
- 기획타당성검토위원회 결과를 반영하여 본 기획에서 도출된 연구개발과제를 아래와 같이 2개의 일반과제로 추진하는 것으로 수정할 수 있음.
- 두 개의 과제중 “고성능 대용량 해상 CAES 시스템 개발”은 과제명이 구체적이지 않다는 자문위원의 의견에 따라 연구내용에 부합하도록 “해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발”로 변경하였음



- 도출된 과제 of 추진우선순위와 추진전략은 다음과 같음

구분	과제명	과제추진 전략	과제추진 우선순위	
일반과제1	해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발	-시스템개발이므로 공동과제의 동시 추진 -1단계(2년) 요소기술개발과 2단계(2년) 요소기술통합 및 pilot-test로 구분하여 추진	1	
	공동1			신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발
	공동2			입력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발
	공동3			공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계 기술 개발
	공동4			정압식 압축공기 저장 및 활용기술 개발
일반과제2	해상풍력 일체형 신개념 Micro-CAES 시스템 개발	-시스템개발이므로 공동과제의 동시 추진 -1단계(2년) 요소기술개발과 2단계(2년) 요소기술통합 및 pilot-test로 구분하여 추진 -독창적인 아이디어이므로 창의적 연구로 추진 바람직하나 혁신적인 기술이므로 차후 시장성을 고려하여 추진	2	
	공동1			해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발
	공동2			풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발
	공동3			유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기 압축기 개발

- “해상풍력 일체형 신개념 Micro-CAES 시스템 개발”과제는 독창적인 아이디어이므로 창의적 연구로 추진 바람직하나 혁신적인 기술이므로 차후 시장성을 고려하여 추진하는 것이 바람직할 것으로 판단되므로 “해양에너지 발전전력용 압축공기 저장기술 개발” 과제를 우선적으로 추진
- 신재생에너지 발전전력 압축공기 저장기술의 확보를 위해 1단계(2년)에서는 핵심요소기술을 확보하고, 2단계(2년)에는 요소기술을 통합하고 Pilot-test를 통한 개발기술의 유효성을 검증하며, 이후 3단계에서 개발기술의 실용화를 추진하는 것으로 단계별 전략을 제시함
 - 1단계(1~2차년도, 24개월) : 핵심요소기술 개발
 - 국내·외 기술현황 분석 및 핵심기술 개발방향 정립
 - 핵심요소기술 개발 및 검증
 - 2단계(3~4차년도, 24개월) : 핵심요소기술통합 및 실증
 - 핵심요소기술의 통합 및 연계
 - 핵심개발기술의 Pilot-test를 통한 현장 적용성 평가
 - 핵심개발기술의 실용화 기반 구축



2. 연구개발과제 주요내용

가. “해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발” 과제

구분	과제명	연구 내용
일반과제	해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> CAES 시스템에 대한 법, 제도, 정책 분석 및 제안 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발터링 기술 정압식 압축공기 저장 및 활용기술 개발
공동1	신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	<ul style="list-style-type: none"> 복합재료 및 단면구조 개발 인공저장체 최적형상 설계 기술 개발 합성 구조체 비선형 거동 해석 및 설계 기술 개발
공동2	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 수중 정밀 프리캐스트 콘크리트 부재간 접합 및 접착 기술 콘크리트 내구성 산정 및 해석 기술 개발
공동3	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> CAES 시스템 공정제어 및 안전설계 기술 개발 CAES 최적 설계 및 열-전기에너지 네트워크 통합 및 연계 기술 개발 CAES 통합시스템 설계 및 모니터링 기술
공동4	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 대용량 압축공기 수송관 설계 기술 개발 압력 레귤레이터 설계 및 제작 기술 개발 정압식 저장 기술 및 수송시스템 안전해석 기술 개발 법/제도 분석 및 개선방안 도출

나. “해상풍력 일체형 신개념 Micro-CAES 시스템 개발” 과제

구분	과제명	연구 내용
일반과제	해상풍력 일체형 신개념 MICRO -CAES 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> 해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기 압축기 개발
공동1	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	<ul style="list-style-type: none"> 해상풍력 기초를 이용한 합성구조 공기저장 구조 개발 해상풍력 타워를 이용한 합성구조 공기저장 구조 개발 해상풍력 기초 안정성 수치/수리모형실험 해상풍력 타워 안정성 수치/풍동모형실험
공동2	풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> 블레이드 회전축 및 유압 피스톤펌프의 축이음 장치 개발 고출력 밀도형 고압/대용량 피스톤 펌프 설계 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 압력맥동 저감 및 에너지 축압장치 개발
공동3	유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발	<ul style="list-style-type: none"> 유압구동식 왕복동 공기압축기 개발 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 왕복동 플런저 윤활 설계 기술 개발 공기 압축기 헤드 설계기술 개발

3. 연구개발과제 성과활용방안

가. “해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발” 과제

- 본 연구 사업에서는 최종 성과물로 고성능 대용량 해상 CAES 시스템의 토털솔루션인 고성능 대용량 해상 CAES 시스템 설계/건설 기술을 개발한다. 각 핵심 연구 부문에서, 1) 고성능 대용량 압축공기 저장 구조물 해석/설계/시공 기술, 2) 수중 모듈러 구조물 안전성 확보 및 시공 기술, 3) CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계/해석 기술 및 시제품, 4) 통합 에너지네트워크 연계 및 운영지침서, 5) 정압식 압축공기 저장 발전용 양방향 토출 용적식 수압펌프, 6) 정압식 압축공기 저장 제어 시스템, 7) 고압(100bar)의 압축공기 압력 변동률 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 등의 연구 결과를 도출함.
- 이는 최종 수요처인 건설사, 중공업사, 해양/항만설계사, 발전설비/장비 제조사, 및 발전사 등에 기술 이전되어, Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성, CAES 발전 단지 구축 및 적용, 원천기술 확보, 파일럿 플랜트 적용 및 보급화 가이드라인 반영, 해상풍력 경제성 확보 및 확대적용 등으로 활용 가능
- 또한, 해상풍력을 기반으로 개발되었으나, 생산된 전기를 이용하여 압축공기를 저장하는 시스템이므로 조류발전과 파력발전 등의 해양에너지를 포함하여 태양광발전 등 불규칙하게 생산되는 특성이 있는 신재생에너지에 개발기술의 적용이 가능하다. 따라서, 다양한 신재생에너지원에 활용 가능

구분	과제명	최종 성과물	최종 수요처	활용방안
일반과제	해양에너지 발전 전력용 압축공기 저장기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고성능 대용량 해상 CAES 시스템 설계/건설 기술 (Total Solution) 	<ul style="list-style-type: none"> 건설사 (현대건설, GS건설, SK건설 등) 중공업사 (두산중공업, 삼성중공업, 현대중공업 등) 해양/항만설계사 (건일엔지니어링, 헤인이엔씨, 한국전력기술 등) 발전설비/장비 제조사 (현대로템 등) 발전사 (한국서부발전 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 건설사, 중공업사 및 해양/항만설계사, 설비제조사에 기술 이전 Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성 CAES 발전 단지 구축 및 적용 원천기술 확보, 파일럿 플랜트 적용 및 보급화 가이드라인 반영 등 해상풍력 경제성 확보 및 확대적용 조류발전과 파력발전 등 타해양에너지 및 태양광발전 등 타신재생 에너지에 개발기술 적용 가능
공동 1	신소재 / 신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고성능 대용량 압축공기 저장 구조물 해석/설계/시공 기술 		
공동 2	압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 수중 모듈러 구조물 안전성 확보 및 시공 기술 		
공동 3	공기 압축 및 터보발전 시스템 안전설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> CAES 압축공기-열에너지 통합시스템 설계/해석 기술 및 시제품 통합 에너지네트워크 연계 및 운영지침서 		
공동 4	정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 정압식 압축공기 저장 발전용 양방향 토출 용적식 수압펌프 정압식 압축공기 저장 제어 시스템 고압(100bar)의 압축공기 압력 변동률 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 		

나. “해상풍력 일체형 신개념 Micro-CAES 시스템 개발” 과제

- 본 연구 사업에서는 최종 성과물로 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템을 개발한다. 각 핵심 연구부문에서, 1) 해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발, 2) 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발, 3) 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발의 연구 결과를 도출함.
- 연구개발결과는 최종 수요처인 건설사, 중공업사, 해양/항만설계사, 발전설비/장비 제조사, 및 발전사 등에 기술 이전되어, Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성, 해상풍력-CAES 발전 단지 구축 및 적용, 원천기술 확보, 파일럿 플랜트 적용 및 보급화 가이드라인 반영, 해상풍력 경제성 확보 및 확대적용 등으로 활용 가능

- 또한, 혁신적이고 창의적인 풍력발전시스템으로서 선진국도 확보하지 못한 첨단 해상풍력 발전 시스템의 기술 확보로 해상풍력 사업 분야의 기술적 경제적 대변혁을 초래하여, 국내 및 해외 풍력발전 시장에 진출하는 수출산업으로의 육성도 가능할 것으로 기대됨.

구분	과제명	최종 성과물	최종 수요처	활용방안
일반과제	해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 해상풍력 일체형 풍력 블레이드 직구동 정출력 MICRO-CAES시스템 (Total Solution) 	<ul style="list-style-type: none"> • 건설사 (현대건설, GS건설, SK건설 등) 	<ul style="list-style-type: none"> • 건설사, 중공업사 및 해양/항만설계사, 설비제조사에 기술 이전
공동1	해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발	<ul style="list-style-type: none"> • Monopile식, 중력식, 잔교식 기초 및 상부타워를 이용한 고압 CAES 구조물 해석/설계/시공 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 중공업사 (두산중공업, 삼성중공업, 현대중공업 등) 	<ul style="list-style-type: none"> • Test-Bed 구축사업을 통한 관련 산업 인증/성능 검증 및 육성
	풍력 블레이드 직구동 유압 동력 발생 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 풍력 블레이드 직구동 유압 동력 시스템 개발 해석/설계/설비 시제품 제작 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 해양/항만설계사 (건일엔지니어링, 헤인이엔씨, 한국전력기술 등) 	<ul style="list-style-type: none"> • 해상풍력 일체형 MICRO-CAES 발전 단지 구축 및 적용
	유압 직구동 용적식 고압 공기압축기 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 유압식 저속 고토오크 회전 구동 장치 개발 • 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 발전설비/장비 제조사 (현대로템 등) 	<ul style="list-style-type: none"> • 원천기술 확보, 파일럿 플랜트 적용 및 보급화 가이드라인 반영 등
공동3	유압 직구동 용적식 고압 공기압축기 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 유압식 저속 고토오크 회전 구동 장치 개발 • 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 발전사 (한국서부발전 등) 	<ul style="list-style-type: none"> • 해상풍력 경제성 확보 및 확대적용 • 수출산업화

4. 기대효과

가. “해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발” 과제

- 에너지저장시스템은 경부하시 유휴전력을 저장하고 과부하시 전력을 사용함으로써 첨두부하 분산을 통해 발전소 건설비, 송전선 설치비 등의 투자비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 예비율을 높여 여름·겨울철의 전력 피크와 대규모 정전 사고 등에 효과적 대응 가능
- 안정적인 해상풍력, 조류발전, 파력발전 등의 신재생에너지 고효율 발전 시스템 개발로 신시장 창출 및 관련 산업 육성
- 국가적으로 추진 중인 스마트그리드 및 에너지그리드 정책 목표달성에 기여
- 신재생에너지 활용성 극대화 및 기저발전 시스템개발로 친환경 녹색성장 주도
- 개발기술의 pilot-test 등 실증을 통해 경쟁력있는 CAES 플랜트 산업을 육성하여 수출 산업화 가능

나. “해상풍력 일체형 신개념 Micro-CAES 시스템 개발” 과제

- 에너지저장시스템은 경부하시 유휴전력을 저장하고 과부하시 전력을 사용함으로써 첨두부하 분산을 통해 발전소 건설비, 송전선 설치비 등의 투자비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 예비율을 높여 여름·겨울철의 전력 피크와 대규모 정전 사고 등에 효과적 대응 가능
- 풍력에너지의 효율적인 에너지변환을 통한 에너지수급 개선 및 활용 증대
- 기존 풍력발전 대비 생산성 향상 및 원가절감에 기여하여 신시장 창출
- 국가적으로 추진 중인 스마트그리드 및 에너지그리드 정책 목표달성에 기여
- 신재생에너지 활용성 극대화 및 기저발전 시스템개발로 친환경 녹색성장 주도
- 개발기술의 pilot-test 등 실증을 통해 경쟁력있는 CAES 플랜트 산업을 육성하여 수출 산업화 가능

5. 연구개발과제 소요 예산

가. “해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발” 과제 소요예산

○ 총괄소요예산

(단위 : 천원)

공동과제명	1단계		2단계		합 계
	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	
[공동1] 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	1,027,854	890,145	1,534,063	679,937	4,132,000
[공동2] 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	762,016	852,984	1,051,656	805,344	3,472,000
[공동3] 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	1,259,852	1,041,148	2,420,049	1,106,951	5,828,000
[공동4] 정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	1,051,925	1,072,074	857,471	499,529	3,481,000
합계	4,101,647	3,856,352	5,863,239	3,091,761	16,913,000

○ 1단계(2년) 소요예산

(단위 : 천원)

과제명	1단계					
	1차년도		2차년도		합계	
	정부	민간	정부	민간	정부	민간
[총괄] 해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발	3,076,236	1,025,411	2,892,264	964,088	5,968,500	1,989,500
[공동1] 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	770,891	256,963	667,609	222,536	1,438,500	479,500
[공동2] 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	571,512	190,504	639,738	213,246	1,211,250	403,750
[공동3] 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	944,889	314,963	780,861	260,287	1,725,750	575,250
[공동4] 정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	788,944	262,981	804,056	268,018	1,593,000	531,000

○ 2단계(2년) 소요예산

(단위 : 천원)

과제명	2단계					
	1차년도		2차년도		합계	
	정부	민간	정부	민간	정부	민간
[총괄] 해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발	4,397,429	1,465,810	2,318,821	772,940	6,716,250	2,238,750
[공동1] 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발	1,150,547	383,516	509,953	169,984	1,660,500	553,500
[공동2] 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발	788,742	262,914	604,008	201,336	1,392,750	464,250
[공동3] 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발	1,815,037	605,012	830,213	276,738	2,645,250	881,750
[공동4] 정압식 압축공기 저장 및 활용 기술 개발	643,103	214,368	374,647	124,882	1,017,750	339,250

나. “해상풍력 일체형 신개념 Micro-CAES 시스템 개발” 과제 소요예산

○ 총괄소요예산

(단위 : 천원)

공동과제명	1단계		2단계		합계
	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	
[공동1] 해상풍력 기초를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	1,453,553	1,608,447	1,439,180	1,095,819	5,597,000
[공동2] 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	888,383	1,001,617	607,760	492,240	2,990,000
[공동3] 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발	1,147,061	976,938	718,090	545,909	3,388,000
합계	3,488,997	3,587,002	2,765,031	2,133,968	11,975,000

○ 1단계(2년) 소요예산

(단위 : 천원)

과제명	1단계					
	1차년도		2차년도		합계	
	정부	민간	정부	민간	정부	민간
[총괄] 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발	2,616,748	872,249	2,690,252	896,750	5,307,000	1,769,000
[공동1] 해상풍력 기초를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	1,090,165	363,388	1,206,335	402,112	2,296,500	765,500
[공동2] 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	666,287	222,096	751,213	250,404	1,417,500	472,500
[공동3] 유압 직구동 용적식 고압 (100bar) 공기압축기 개발	860,296	286,765	732,704	244,234	1,593,000	531,000

○ 2단계(2년) 소요예산

(단위 : 천원)

과제명	2단계					
	1차년도		2차년도		합계	
	정부	민간	정부	민간	정부	민간
[총괄] 해상풍력 일체형 신개념 MICRO-CAES 시스템 개발	2,073,774	691,257	1,600,476	533,492	3,674,250	1,224,750
[공동1] 해상풍력 기초를 이용한 고압 CAES 구조물 개발	1,079,386	359,794	821,864	273,955	1,901,250	633,750
[공동2] 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발	455,820	151,940	369,180	123,060	825,000	275,000
[공동3] 유압 직구동 용적식 고압 (100bar) 공기압축기 개발	538,568	179,522	409,432	136,477	948,000	316,000

참고문헌

- 강광하 (2000), 산업연관분석론, 연암사.
- 과학기술부 (2000), 『선도기술개발사업 성과분석 및 추진방향에 관한 연구』, 연구수행기관 : 아주대학교 · 한국과학기술평가원.
- 과학기술부 (2001), 『국가연구개발 투자방향 설정연구』, 연구기관 : 과학기술정책연구원, 한국산업기술진흥협회.
- 과학기술부 (2001), 『다년도 연구사업의 평가개념 도입방안』, 연구수행기관 : 한국과학기술기획평가원.
- 과학기술부 (2001), 『원자력 연구개발사업의 평가지표 개발에 관한 연구』, 연구수행기관 : 고려대학교.
- 과학기술정책연구원 (2000), 『특정연구개발사업 성과분석 및 추진체계 개선방안』.
- 과학기술정책연구원 (2001), 『농림기술개발사업 성과분석 및 추진체계 개선방안』.
- 곽승준, 유승훈, 김찬준 (2002), “다속성 효용분석을 이용한 원자력연구개발과제 사후평가 지표 개발, 기술혁신학회지, 한국기술혁신학회, 제5권, 제1호, pp. 90-109.
- 곽승준, 유승훈, 신철오 (2002), 원자력연구개발사업의 사후평가를 위한 계층화 분석법 (AHP)의 적용, 기술혁신연구, 기술경영경제학회, 제10권, 제1호, pp. 201-217.
- 곽승준, 유승훈, 신철오 (2004), 해양과학기술 정책과제의 도출과 우선순위 평가에 관한 연구, 기술혁신학회지, 한국기술혁신학회, 제7권, 제2호, pp. 397-412.
- 김영민, Favrat, D. (2006), 분산형 압축공기 전력저장 발전 기술, 전기저널, sno. 357 (2006년 9월호), pp. 45-57
- 김택곤, 김지연, 이진무 (2008), 압축공기에너지 저장(CAES)의 현황과 전망, 2008 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 123-131
- 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경 (2009), 무복공식 압축공기 지하암반공동 저장기술 사례 연구, 한국지구시스템공학회지, Vol. 46, No. 5, pp. 614-624
- 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경 (2009), 복공식 압축공기 지하저장을 위한 가변성 분할라 이닝 터널기술, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) Vol. 19, No. 2, pp. 77-85
- 박완문, 이경복, 정훈영, 송원경, 류동우, 김형목, 최종근 (2010), 압축공기저장시설의 국내 적용을 위한 지하공동의 기밀성 분석, 한국지구시스템공학회지, Vol. 47, No. 1, pp. 17-25

- 박주형·김정흠 (1999), 연구개발사업 우선순위 설정에 있어서 다속성 효용이론과 계층분석과정의 비교, 기술혁신학회지, 제2권 제2호, 한국기술혁신학회.
- 산업자원부 (1998), 『공업기반기술개발사업 10년 성과분석 및 개선방안 수립연구』, 연구수행기관 : 산업기술정책연구소, 연구보고 98-17-086.
- 산업자원부 (2000), 『기술기반조성사업의 경제적 효과 분석』, 연구수행기관 : 한국산업기술평가원, 연구보고 200-02-097.
- 산업자원부 (2007), 신재생에너지 RD&D 전략 2030[해양]
- 산업자원부.(2007). 『2006 산업자원백서』 . 과천.
- 신승식, 광승준, 유승훈 (2002), “헤도닉 가격모형을 이용한 개인컴퓨터의 비시장 속성에 대한 가치추정”, 기술혁신학회지, 한국기술혁신학회, 제3권, 제3호, 85-101.
- 오완근, 민완기, 이성국 (2000), “디지털TV의 경제적 가치 평가 - IO분석을 중심으로”, 「기술혁신학회지」, 제3권 제1호, 한국기술혁신학회, pp. 100-112.
- 유승훈 (2003), “정보통신산업의 국민경제적 산업과급효과 분석”, Telecommunications Review, SK Telecom, 제13권, 제3호, pp. 347-359.
- 유승훈 (2003), 정부 R&D 투자와 민간 R&D 투자의 인과관계 분석, 기술혁신연구, 한국기술경영경제학회, 제11권, 제2호, pp. 175-193.
- 유승훈 (2005), 『갈릴레오 프로젝트 참여의 경제적 타당성 분석』, 국가과학기술자문회의 보고자료.
- 유승훈, 문혜선 (2002), “과학기술연구개발활동조사의 개선방안 - 기업부문을 중심으로”, 기술혁신학회지, 한국기술혁신학회, 제5권, 제2호, pp. 228-244.
- 유승훈, 박두호 (2005), 기술혁신 횡수의 분포함수 추정, 기술혁신학회지, 제8권, 제3호, 한국기술혁신학회, pp. 887-910.
- 유승훈, 원중호, 채경석 (2003), “케이블TV 방송 신제품의 잠재적 가치평가 - 양분선택형 조건부 가치측정법의 적용을 중심으로”, 기술혁신학회지, 제3권, 제1호, 한국기술혁신학회, 113-126.
- 유승훈·양창영 (2004), 하이테크 수출과 경제적 성과에 대한 다국가 분석, 기술혁신학회지, 한국기술혁신학회지, 제7권, 제2호, pp. 283-304.
- 유승훈·허재용·김기주 (2004), “투입산출표의 외생화를 이용한 전파방송산업의 산업과급효과 분석”, 산업경제연구 제 17권 제 5호, pp. 1593-1612.
- 이윤중 (1999), 의사결정론, 세종출판사.
- 이창효 (1999), 다기준 의사결정론, 세종출판사.

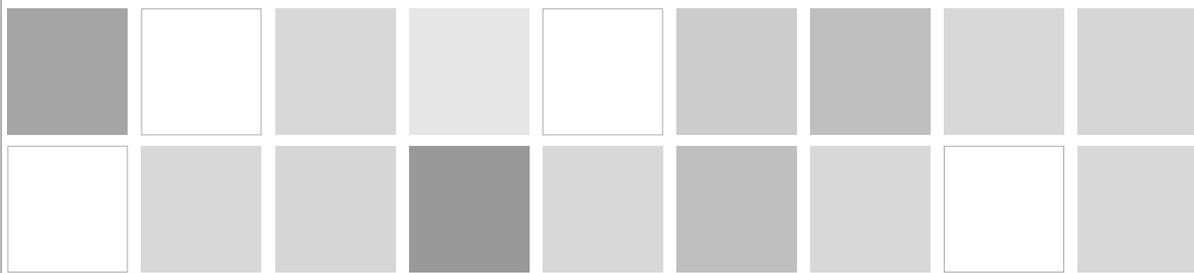
- 임명환·조상섭 (2004), 휴대인터넷 도입의 국민경제적 파급효과 분석, Telecommunications Review, 14(1), pp. 48-56.
- 장정인, 유승훈, 박승준 (2006), 국내 제조업 기업의 기술혁신 요인 및 기술파급효과 분석: 가산자료 모형을 이용하여, 기술혁신연구, 제14권, 제3호, pp. 23-42.
- 정보통신부 (2002), 『정보통신연구개발사업 투자성과분석 연구(VIII) : 국내외 연구개발 성과분석 방법론 및 사례조사』, 연구수행기관 : 호서대학교.
- 지식경제부 (2008), 제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획, pp. 10-18
- 지식경제부 (2008), 제4차 전력수급기본계획(2008~2022년), 46p.
- 지식경제부 (2009), 지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발 연차보고서
- 지식경제부 (2010), 해상풍력 추진 로드맵
- 지식경제부 (2011), 에너지저장 기술개발 및 산업화 전략
- 한국과학기술기획평가원 (2001), 『첨단기술의 기술가치 평가방법론에 대한 연구』.
- 한국과학기술기획평가원 (2006a), 2005년도 국가연구개발사업 사전타당성조사에 관한 연구, 종합조정 2006-13.
- 한국과학기술기획평가원 (2006b), 대형광학망원경개발사업 사전타당성조사 보고서.
- 한국과학기술기획평가원 (2007), 토양·지하수 오염방지 기술개발사업 사전타당성조사 보고서.
- 한국은행 (2009), 『2007년 산업연관표』.
- 한국전자통신연구원 (2004), 『MPEG-21 표준과 방송콘텐츠의 경제성 분석에 관한 연구』, 연구수행기관 : 호서대학교.
- 한국전자통신연구원 (2007), IT 이노베이션 국가구현에 따른 경제적 파급효과 연구, 연구수행기관 : 호서대학교 산학협력단.
- 한국전자통신연구원 (2008), 디지털 방송산업의 파급효과 연구, 연구수행기관 : 호서대학교 산학협력단.
- 한국전자통신연구원 (2008), 유비쿼터스 전파감시 사업의 경제적 효과 분석 연구, 연구수행기관 : 호서대학교 산학협력단.
- 한국항공우주연구원 (2009), 위성항법 기반 육상교통 서비스의 경제성 분석, 연구수행기관 : 호서대학교 산학협력단.
- 한국해양과학기술진흥원 (2009), 해양에너지개발을 위한 세부실행계획 수립
- 菊地齊藤 (1977) dam 基礎岩盤の 耐荷性評價 目的とした 岩盤等級の檢討, 發電水力, No. 147.

- 篠原俊彦、合田佳弘、川上博史、福田和寛 (2001)、地下450mの 岩盤中に高圧圧縮空気を貯蔵、トンネルと地下、p.495-503
- 合田佳弘 (2002)、地下深部岩盤内における新しい高圧圧縮空気貯蔵技術の開発、日本土木學會誌, 87, p.39-41.
- 横山英和、篠原俊彦、加藤拓一郎 (2002)、圧縮空気貯蔵発電パイロットプラソトの 實証運轉、電力土木, p.150-154.
- Arnold, E. and Guy, K. (1997), Technology Diffusion Programmes and the Challenge for Evaluation, OECD Conference, 1997.
- Aziz, K. and Settari, A. (1979), Petroleum reservoir simulation. Applied Science Pub.
- Bach L., Ledoux M. -J., and Matt M. (2000), Evaluation of the BRITE-EURAM Programme, presented at US-European Workshop on Learning from Science and Technology Policy Evaluation Bad Herrenalb, Germany, September 11-14, 2000 (Co-sponsored by the Georgia Tech School of Public Policy and the Fraunhofer Institute for Systems and Innovations Research).
- Bradshaw, D.T. (2000), IEEE PES Meetings on Energy Storage
- Brent, R. J. (1995), Applied Cost-Benefit Analysis, Edward Elgar, Cheltenham.
- Brown, M. A., Curlee, T. R. and Elliott, S. R. (1995), Evaluating technology innovation programs: the use of comparison groups to identify impacts, Research Policy, 24, pp. 669-684.
- Bulmer-Thomas, V. (1982), Input-Output Analysis in Developing Countries, Wiley, New York.
- Crotogino, F., Mohmeyer, K.U. and Scharf, R. (2001), Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation, Spring 2001, Solution Mining Research Institute (SMRI), Technical Conference, Orland, FL, USA.
- EIA(U.S. Energy Information Administration) (2010), International Energy Outlook 2010
- Electricity Storage Association (2008), www.electricitystorage.org
- EPRI-DOE (2003), Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications
- Georghiou, L. and Roessner D. (2000), Evaluating technology program: tools and methods, Research policy, 29, pp. 657-678.

- Georghiou, L., and Meyer, K. F. (1992), Evaluation of Socio-economic Effects of European Community R&D Programmes in the SPEAR Network, Research Evaluation, Vol. 2, No. 1.
- Jaffe, A. B. (1998), The Importance of Spillovers in the Policy Mission of the Advanced Technology Program, Journal of Technology Transfer, 23(2), pp. 11-19.
- Jessica, L.N. (2006), Reservoir Simulation of Combined Wind Energy and Compressed Air Energy Storage in Different Geologic Settings, MS Thesis, Colorado School of Mines, USA.
- Jessica, L.N., Graves, R., and Fanchi, J.R. (2009), "Feasibility of Using Wind Energy and CAES Systems in a Variety of Geologic Systems," Society of Petroleum Engineers.
- Kim, Y.M. and Favrat, D. (2010), Energy and exergy analysis of a micro-compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system, Energy, Vol. 35, pp. 213-220
- King, M.J., Moridis, G., Paniagua, G., Crowder, R. (2000), Executive Summary and Technical Overview: Norton Compressed-Air Energy Storage Project: Air Storage System Characterization and Performance Review, Norton Mine, Norton, Ohio: Consultant Report to Norton Energy Storage, L.L.C., October 6.
- Laurent Bach, Universite L. Pasteur (2000), "Evaluation of the BRITE/EURAM Programme", presented at US-European Workshop on Learning from Science and Technology Policy Evaluation Bad Herrenalb, Germany, September 11-14 (Co-sponsored by the Georgia Tech School of Public Policy and the Fraunhofer Institute for Systems and Innovations Research).
- Miller, R.E. and Blair, P.D. (1985), Input-output analysis: foundations and extensions, Prentice-Hall, New Jersey.
- Paatero, J.V. and Lund, P.D. (2005), Effect of energy storage on variations in wind power, Wind Energy, Vol. 8, pp. 421-441
- Papaconstantinou, G. and Polt W. (1997), Policy Evaluation in Innovation and Technology: An Overview, OECD Conference.
- Robertsa, E. B. and Bellottib P. R. (2002), Managerial determinants of industrial R&D performance: An analysis of the global chemicals/materials industry, Technological Forecasting and Social Change, 69(2), pp. 129-152.
- SBI Energy (2010), CAES Compressed Air Energy Storage Worldwide

- Succar, S, Greenblatt, J.B. and Williams, R.H. (2006), Comparing Coal IGCC with CCS and Wind-CAES Baseload Power Options in a Carbon-Constrained World, Proceedings of the Fifth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration - DOE/NETL, pp. 1-9
- Susan C. (2000), "Frameworks for Evaluating Science and Technology Policies in the United States", presented at US-European Workshop on Learning from Science and Technology Policy Evaluation Bad Herrenalb, Germany, September 11-14, 2000 (Co-sponsored by the Georgia Tech School of Public Policy and the Fraunhofer Institute for Systems and Innovations Research.)
- Werner, B. M. and Souder W. E. (1997), "Measuring R&D performance - state of the art", *Research • Technology Management*, 40(2), pp. 34-42.
- Whiteley, R., Parish T., Dressler, R. and Nicholson G. (1998), Evaluating R&D performance using the new sales ratio, *Research • Technology Management*, Sept.-Oct., pp. 20-22.
- William, D. and Rank, A. D. (1998), Measuring the Economic Benefits of Research and Development: the Current status of the art, *Research Evaluation*, 7(1), pp. 17-30.
- Yoo S. -H. and Yang C. -Y. (1999), "Role of Water Utility in the Korean National Economy", *International Journal of Water Resources Development*, 15(4), pp. 527-542.
- Yoo S. -H., & Yoo T.- H.(2009), "The role of the nuclear power generation in the Korean national economy: An input-output analysis", *Progress in Nuclear Energy*, 51, 86-92.

부 록



[일반과제1]

과제명	해양에너지 발전전력용 압축공기저장기술 개발
1. 기술개발 목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 『신재생에너지 발전전력의 불균질성으로 인하여 기저전력으로의 활용이 어려운 점을 해결하고, 발전 입지에 구애받지 않으며, 현재 기술로 적용 가능한 최적의 에너지 저장시설로 평가받는 압축공기 저장기술 개발』 - 해양에너지 발전전력용 해상 CAES 시스템 실용화를 위한 신형식 CAES 구조물 설계 및 시공기술과 경제적이고 효율적인 공기압축 및 활용 기술 개발
2. 기술개발 동향	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대용량 전력저장용 압축공기에너지 저장시스템의 상용화는 1978년에 건설된 독일 Hunterf의 290MW급 발전소와 1991년에 건설된 미국 Alabama의 McIntosh에 있는 AEC(Alabama Electric Corporation)의 110MW급 발전소가 있으며, 두 곳 모두 20년 이상 안정적인 전력공급이 이루어지고 있음. ○ 2000년대 초반부터 유럽, 미국을 중심으로 기존 에너지원(화력, 원자력 등) 및 풍력 등 신재생에너지를 저장하는 하기 위한 방법으로 연구가 대두됨 ○ 미국 Iowa 전력협회(IAMU, Iowa Association of Municipal Utilities)는 풍력발전과 압축공기에너지저장(CAES)을 결합시키는 ISEP(Iowa Stored Energy Plant) 프로젝트 착수하여 Iowa에 흩어져 있는 75MW의 풍력 발전설비를 이용하여 풍력에서 발생한 전기로 공기를 압축시켜 지하 1km 깊이의 대수층에 집어넣는 계획임. ○ 미국 시리우스 익스플로레이션사는 최근 풍력에 의한 전기로 동굴에 압축공기를 저장한 다음, 바람이 불지 않을 때 이를 방출하여 풍력발전터빈을 돌려 전기를 생산하는 프로젝트를 진행중임. ○ 최근 선진국에서는 간헐적인 신재생 에너지 및 잉여전력 저장용으로 대형 CAES 뿐만 아니라 소규모의 인공 압축공기 저장조를 이용하는 분산형 압축공기 에너지 저장시스템(Micro-CAES)이 부각되고 있으며, 국내에서는 아직 인식이 부족한 상태임 ○ 대용량 고압 기체저장 용기 제조기술 현황 <ul style="list-style-type: none"> - 자동차용 비금속 라이너 복합재료 고압용기에 대한 기술은 확보되어 있지만 내용적이 500ℓ 이상인 대용량 복합재료 고압 기체저장 용기에 대한 기술 미흡. - 미국의 Lincoln composites社에서는 천연가스 및 수소가스 등의 대용량 수송 및 저장을 위해 내용적이 8400ℓ인 대용량 복합재료 탱크 시제품을 개발함. - 독일의 MCS社, 프랑스의 Ullit社 등에서 자동차용 비금속 라이너 복합재료 고압용기를 개발 생산하고 있음. - 해외에서는 Large tow 탄소섬유를 사용하여 생산성 향상 및 원가절감을 도모하고 있음. ○ 영국의 Nottingham 대학에서는 해상풍력이나 조류, 파력에너지를 압축공기 형태로 수중에 저장하는 기법에 대해 구상하고, 기초연구를 수행하고 있으며, 캐나다의 Hydrostor 에서는 수심 80m이상의 조건에서 활용할 수 있는 Balloon 형태의 수중 저장장치에 대해 계획을 수립하는 등 수중저장기법은 현재 기획 및 기초연구단계임 ○ 국내에서는 지하 암반 내 복공식 에너지저장시스템 개발 연구가 수행중이며, Micro-CAES에 대한 연구사례는 아직 없음 ○ 미국, 독일 등 일부 선진국을 중심으로 CAES 기술이 상용화 되고 있으며, 국내에서도 100MW급 이상의 풍력발전 단지 등이 다수 계획 중에 있어 CAES 기술개발 필요성이 대두됨(미국의 경우 CAES를 포함한 에너지저장기술에 16억달러 연구지원 발표(2009))

3. 기술개발
필요성

- 에너지저장 시스템(Energy Storage System)은 전력 공급 안정화, 신재생에너지 확산 등의 부가가치를 창출하는 녹색 분야의 Key Technology로 급격한 시장 확대가 예상되는 신산업 분야임
- 에너지저장 시스템은 경부하시 유휴전력을 저장하고 과부하시 전력을 사용함으로써 첨두 부하 분산을 통해 발전소 건설비, 송전선 설치비 등의 투자비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 예비율을 높여 여름·겨울철의 전력 피크와 대규모 정전 사고 등에 효과적인 대응이 가능함
- 출력이 불규칙한 신재생에너지를 고품질 전력으로 변환하는 등 신재생에너지 보급 확산과 동시에, 실시간 전력 거래가 이루어지는 스마트그리드 구현을 위해서도 반드시 필요한 기술임
- 미국, 일본 등 일부 선진국 중심으로 '10년 기준 2조원 규모의 초기 시장이 형성되어 있으며, 신재생 에너지 확산, Global 전력 수요의 증가에 따라 세계 ESS 시장이 급팽창할 전망('35년까지 전력 수요는 연평균 2.2% 증가할 것으로 예측되고, 신재생에너지 발전은 '10년보다 3배 이상 증가하여 33%에 달할 전망(IEA 전망, '10.11))
- 현재는 시장 형성전이나 향후 전력 소비량 증가 및 신재생에너지 확대에 따라 중장기적으로는 수요가 급팽창할 전망이다(제5차 전력수급기본계획('10.12)상의 신재생에너지 발전설비누적량 대비 에너지저장시스템 필요 비중으로 10%로 가정하는 경우 2015년까지 960MW, 2020년까지 1680MW 규모의 에너지저장 수요 예측)
- 중장기적인 에너지저장 수요에 선제적으로 대응하고 미국 등 급팽창하는 해외시장 선점을 위해 국내 시장 창출을 촉진할 필요가 있음(미 PIKE리서치에 의하면, 에너지저장 시장규모를 2010년 2조원에서 2020년 47.4조원 규모로 약 24배의 폭발적 성장을 예측하고 있음).
- 풍력, 해양 등 신재생 에너지 산업의 시장 급성장 추세에 따른 국가적 지원 필요
 - 2013년부터 국제환경규제에 의한 온실가스 저감 의무 이행 대상국에 포함될 가능성이 높으므로, 2030년까지 신재생 에너지 보급률을 30%로 높이는 것을 목표로 정책 추진 중임
 - 친환경적인 에너지원 확대를 위한 국가적 보급 사업 등의 기본적인 노력 외에 핵심 부품의 국산화 및 신개념 시스템 개발 등의 시장 선도를 위한 적극적인 정책 추진이 필요함
 - 신재생 에너지 분야는 생산기반 기술 유관 산업이 차지하는 비중이 높고 고용창출 효과가 매우 크며 전 세계를 마켓으로 할 수 있는 최고의 미래 유망 산업임
- 신재생에너지 산업의 활성화를 위해서 에너지 저장 기술 확보는 필수불가결
 - 풍력 및 해양 등 신재생 에너지 발전 전력은 불연속적이고 예측 불가능
 - 국가 전력망에 계통연계 될 수 있는 정출력의 전력 발전을 위해 에너지 저장 필수
 - 에너지저장없이 섬이나 오지 등에 독립 발전용으로 풍력에너지 보급 불가
- 에너지 저장 기술 개발은 국가적 정책 추진 방향과 부합
 - 14대 산업원천기술 분야 중 생산기반 기술 분야의 “2010년도 R&D 중점 추진방향(2009. 11. 23, 2010년도 산업원천기술개발사업 과제기획 공청회)”의 중점 영역 중 “그린에너지 생산기반기술”이 포함되어 있으며, 추진목표로 풍력발전용 에너지 저장 및 발전용 대형부품 제조 기술 개발이 설정되어 있음
 - 2030년까지 국가 단위의 스마트그리드 구축을 위해 기술개발, 사업화 및 제도 개선 등 「스마트그리드 국가로드맵」 수립('10.1월)
 - K-MEG(Korea Micro Energy Grid) 기술개발 ('11.6월 ~'14.5월)
 - K-ESS2020(에너지저장 기술개발 및 산업화 전략)과 부합 ('11.5.)

<p>4. 기술개발 추진전략</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1단계(2년)에서는 핵심요소기술을 확보하고, 2단계(2년)에는 요소기술을 통합하고 Pilot-test를 통한 개발기술의 유효성을 검증하며, 이후 개발기술의 실용화를 추진하는 것으로 전략을 수립함 - 1단계(1~2차년도, 24개월) : 핵심요소기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 국내·외 기술현황 분석 및 핵심기술 개발방향 정립 · 세부과제별 핵심요소기술 개발 및 검증 - 2단계(3~4차년도, 24개월) : 핵심요소기술통합 및 실증 <ul style="list-style-type: none"> · 세부과제별 핵심요소기술의 통합 및 연계 · 핵심개발기술의 Pilot-test를 통한 현장 적용성 평가 · 핵심개발기술의 실용화 기반 구축
<p>5. 세부과제별 연구내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 복합구조 및 단면형상 개발 - 인공저장체 최적형상 설계 기술 개발 - 합성 구조체 비선형 거동 해석 및 설계 기술 개발 ○ 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 프리캐스트 콘크리트 부재의 수중 정밀 조립 및 접합 기술 개발 - 수중 콘크리트 내구성 산정 및 해석 기술 개발 ○ 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - CAES 시스템 공정제어 및 안전설계 기술 개발 - CAES 최적 설계 및 열-전기에너지 네트워크 통합 및 연계 기술 개발 - CAES 통합시스템 설계 및 모니터링 기술 ○ 정압식 압축공기 저장 및 활용기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 대용량 압축공기 수송관 설계 기술 개발 - 압력 레귤레이터 설계 및 제작 기술 개발 - 정압식 저장 기술 및 수송시스템 안전해석 기술 개발 ○ CAES 시스템에 대한 법, 제도, 정책 분석 및 제안
<p>6. 연구수행 체계</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시스템 엔지니어링으로서의 기술개발이 필요하므로 공동과제로 “신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발”, “압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발”, “공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발”, “정압식 압축공기 저장 및 활용기술 개발”을 동시에 추진함. ○ 2단계로 구분하여 1단계(2년)에는 요소기술을 개발하고, 2단계(2년)에서 요소기술통합 및 pilot-test를 수행하는 단계적으로 연구를 추진함. ○ 연구 추진의 효율성을 높이기 위해 주관기관은 산·학·연·관계의 협동 연구체계를 구축하고 특히 핵심기술 전문가 양성을 위하여 체계적이고 조직적인 지원체계를 구축
<p>7. 기술개발 최종성과물</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신소재/신형식 CAES 내부탱크용 대용량 고압용기 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 압축공기 저장용 고강도/고성능 구조물 설계/시공 기술 - 100기압, 4MWh급(1MWh*4기)의 압축공기 인공저장구조물 개발 - 합성 구조체 비선형 거동 해석 및 설계 기술 개발 ○ 압력용기 외부 보호시설 설계 및 시공기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 모듈형 급속시공 보호 구조물 개발 및 시공 기술 개발 (기존대비 공기 20% 이상 단축) - 보호 구조물 상부 설치 발전 설비 배치 최적화 기술 개발 ○ 공기 압축 및 터보발전 시스템 안전 설계기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 1MWh급 CAES 시스템 공정설계, 해석 기술 확보 및 최적화 - 고온, 고압 CAES 안전설비 기술 확보 ○ 정압식 압축공기 저장 및 활용기술 개발

	<ul style="list-style-type: none"> - 정압식 압축공기 저장 발전용 양방향 토출 용적식 수압펌프 - 정압식 압축공기 저장 제어 시스템 - 고압(100bar)의 압축공기 압력 변동률 $\pm 10\%$ 이내로 제어 가능한 시스템 <p>○ CAES 시스템에 대한 법, 제도, 정책 분석 및 제안</p>						
8. 성과활용 방안	<p>○ 국내외 건설시공사, 설계사 등에 기술 이전을 통한 신재생에너지 및 CAES 시장 선점 및 수출산업화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 연구의 주요 성과품으로 예상되는 시공시스템과 설계기술 및 시공기술을 활용하며, 설계기술은 대형 시공사의 해상풍력터빈 시장에 입찰조건으로 활용하여 시장 진입의 가능성을 높이고, 시스템 제작 및 시공시스템과 시공기술은 전문업체에게 기술 이전을 통해 실용화 - pilot-test 등 실증을 통해 경쟁력 있는 CAES 플랜트 산업을 육성하여 수출 산업화 <p>○ 계통전원 공급이 어려운 도서지역에 신재생에너지와 연계한 CAES 시스템 적용을 통한 신재생에너지 보급</p> <p>○ 해상풍력, 조류발전, 파력발전 등의 해양에너지 개발에 적용하여 에너지 효율 및 활용성 증대</p>						
9. 기술개발 기대효과	<p>○ 에너지저장시스템은 경부하시 유휴전력을 저장하고 과부하시 전력을 사용함으로써 첨두부하 분산을 통해 발전소 건설비, 송전선 설치비 등의 투자비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 예비율을 높여 여름·겨울철의 전력 피크와 대규모 정전 사고 등에 효과적 대응 가능</p> <p>○ 안정적인 해상풍력, 조류발전, 파력발전 등의 신재생에너지 고효율 발전 시스템 개발로 신시장 창출 및 관련 산업 육성</p> <p>○ 국가적으로 추진 중인 스마트그리드 및 에너지그리드 정책 목표달성에 기여</p> <p>○ 신재생에너지 활용성 극대화 및 기저발전 시스템개발로 친환경 녹색성장 주도</p> <p>○ 개발기술의 pilot-test 등 실증을 통해 경쟁력있는 CAES 플랜트 산업을 육성하여 수출 산업화 가능</p>						
10. 연구개발 과제 규모	구분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도 이후	
연차별 연구비 (백만원)	정부	3,076	2,892	4,397	2,319	-	
	민간 (추정)	1,026	964	1,466	773	-	
합 계	합 계	4,102	3,856	5,863	3,092	-	
	총 연구비 (백만원)	정부	12,685		총 연구기간	4 년	
		민간	4,228			연도별 평균소요인력	51 명
총합계		16,913					

[일반과제2]

과제명	해상풍력 일체형 micro-CAES 시스템 개발
1. 기술개발 목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 『해상풍력 발전전력의 불균질성으로 인하여 기저전력으로의 활용이 어려운 점을 해결하고, 발전 입지에 구애받지 않으며, 현재 기술로 적용 가능한 최적의 에너지 저장시설로 평가받는 압축공기 저장기술 개발』 - 풍력에너지원이 블레이드를 회전시켜 유압펌프를 직접 구동하여 동력을 발생시키는 시스템과 해상풍력 구조물을 이용한 압축공기 저장체 설계 및 시공 기술 개발을 통한 효율적인 압축공기 에너지 저장 및 활용 시스템 개발
2. 기술개발 동향	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대용량 전력저장용 압축공기에너지 저장시스템의 상용화는 1978년에 건설된 독일 Hunterf의 290MW급 발전소와 1991년에 건설된 미국 Alabama의 McIntosh에 있는 AEC(Alabama Electric Corporation)의 110MW급 발전소가 있으며, 두 곳 모두 20년 이상 안정적인 전력공급이 이루어지고 있음. ○ 2000년대 초반부터 유럽, 미국을 중심으로 기존 에너지원(화력,원자력 등) 및 풍력 등 신재생에너지를 저장하는 하기 위한 방법으로 연구가 대두됨 <ul style="list-style-type: none"> - 미국 Iowa 전력협회(IAMU, Iowa Association of Municipal Utilities)는 풍력 발전과 압축공기에너지저장(CAES)을 결합시키는 ISEP(Iowa Stored Energy Plant) 프로젝트 착수하여 Iowa에 흩어져 있는 75MW의 풍력 발전설비를 이용하여 풍력에서 발생한 전기로 공기를 압축시켜 지하 1km 깊이의 대수층에 집어넣는 계획임. - 미국 시리우스 익스플로레이션사는 최근 풍력에 의한 전기로 동굴에 압축공기를 저장한 다음, 바람이 불지 않을 때 이를 방출하여 풍력발전터빈을 돌려 전기를 생산하는 프로젝트를 진행중임. ○ 최근 선진국에서는 간헐적인 신재생 에너지 및 잉여전력 저장용으로 대형 CAES 뿐만 아니라 소규모의 인공 압축공기 저장조를 이용하는 분산형 압축공기 에너지 저장시스템(Micro-CAES)이 부각되고 있음 ○ 국내에서는 지하 암반 내 복공식 에너지저장시스템 개발 연구가 수행중이며, Micro-CAES에 대한 연구사례는 아직 없음 ○ 미국, 독일 등 일부 선진국을 중심으로 CAES 기술이 상용화 되고 있으며, 국내에서도 100MW급 이상의 풍력발전 단지 등이 다수 계획 중에 있어 CAES 기술개발 필요성이 대두됨(미국의 경우 CAES를 포함한 에너지저장기술에 16억달러 연구지원 발표(2009)) ○ 유압은 윤활성이 있는 작동 매체로 비압축성 액체 이므로 용적형 펌프구동에 의해 효율 높은 유압에너지를 발생시키므로 기존의 건설중장비에서 필수적으로 활용되고 있음 ○ 동력전달 수단으로는 축이음, 전동, 공압, 유압, 수압 등이 있으나, 현재 기술 수준으로서는 유압방식이 원거리 동력전달과 상업적 사용에 있어서 가장효율이 좋으며 건설중장비 및 산업용 유압시장은 이미 형성되어 성숙단계임
3. 기술개발 필요성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 에너지저장 시스템(Energy Storage System)은 전력 공급 안정화, 신재생에너지 확산 등의 부가가치를 창출하는 녹색 분야의 Key Technology로 급격한 시장 확대가 예상되는 신산업 분야임 ○ 에너지저장 시스템은 경부하시 유휴전력을 저장하고 과부하시 전력을 사용함으로써 첨두 부하 분산을 통해 발전소 건설비, 송전선 설치비 등의 투자비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 예비율을 높여 여름·겨울철의 전력 피크와 대규모 정전 사고 등에 효과적인 대응이 가능함 ○ 출력이 불규칙한 신재생에너지를 고품질 전력으로 변환하는 등 신재생에너지 보급 확산과 동시에, 실시간 전력 거래가 이루어지는 스마트그리드 구현을 위해서도 반드시 필요한 기술임

	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미국, 일본 등 일부 선진국 중심으로 '10년 기준 2조원 규모의 초기 시장이 형성되어 있으며, 신재생 에너지 확산, Global 전력 수요의 증가에 따라 세계 ESS 시장이 급팽창할 전망('35년까지 전력 수요는 연평균 2.2% 증가할 것으로 예측되고, 신재생에너지 발전은 '10년보다 3배 이상 증가하여 33%에 달할 전망(IEA 전망, '10.11)) ○ 중장기적인 에너지저장 수요에 선제적으로 대응하고 미국 등 급팽창하는 해외시장 선점을 위해 국내 시장 창출을 촉진할 필요가 있음(미 PIKE리서치에 의하면, 에너지저장 시장규모를 2010년 2조원에서 2020년 47.4조원 규모로 약 24배의 폭발적 성장을 예측하고 있음). ○ 풍력 등 신재생 에너지 산업의 시장 급성장 추세에 따른 국가적 지원 필요 ○ 신재생에너지 산업의 활성화를 위해서 에너지 저장 기술 확보는 필수불가결 <ul style="list-style-type: none"> - 풍력발전 전력은 불연속적이고 예측 불가능 - 국가 전력망에 계통연계 될 수 있는 정출력의 전력 발전을 위해 에너지 저장 필수 - 에너지저장없이 섬이나 오지 등에 독립 발전용으로 풍력에너지 보급 불가 ○ 에너지 저장 기술 개발은 국가적 정책 추진 방향과 부합 <ul style="list-style-type: none"> - 14대 산업원천기술 분야 중 생산기반 기술 분야의 "2010년도 R&D 중점 추진방향(2009. 11. 23, 2010년도 산업원천기술개발사업 과제기획 공청회)"의 중점 영역 중 "그린에너지 생산기반기술"이 포함되어 있으며, 추진목표로 풍력발전용 에너지 저장 및 발전용 대형부품 제조 기술 개발이 설정되어 있음 - 2030년까지 국가 단위의 스마트그리드 구축을 위해 기술개발, 사업화 및 제도 개선 등 「스마트그리드 국가로드맵」 수립('10.1월) - K-MEG(Korea Micro Energy Grid) 기술개발 ('11.6월 ~'14.5월) - K-ESS2020(에너지저장 기술개발 및 산업화 전략)과 부합 ('11.5.) ○ 기존의 공기압축기 구성은 전기동력을 이용하므로 전동기로 구동되는 고압의 경우 왕복동 압축기 구조로서, 전동기를 이용하여 압축기를 구동할 경우 출력밀도가 낮아 부피가 커지고 효율이 낮아지는 단점이 있으므로 CAES시스템을 위한 풍력은 전기에너지로 변환할 필요없이 직접 유압에너지로 변환된 유압동력으로 공기압축기를 구동하는 것이 더욱 효율적임 ○ 풍력터빈에서 직접적으로 공기압축하는 경우, 공기의 압축성으로 인해 가변 용량형으로 설계할 수 없고 따라서 정유량 공기압축기를 사용할 수밖에 없고 이로 인해 컷인풍속이 높아지게 됨. 반면, 유압연계방식은 직접공기압축하는 경우에 비해 부피/중량이 저감되어 너셀에 무리를 주지 않을 뿐만 아니라 저풍속에서도 정압을 발생시켜 무효에너지를 최소화 할 수 있는 방법임. ○ 유럽에서 일부 선행연구가 진행되고 있는 시점에서 기술 및 시장을 선점할 필요가 있음
<p>4. 기술개발 추진전략</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1단계(2년)에서는 핵심요소기술을 확보하고, 2단계(2년)에는 요소기술을 통합하고 Pilot-test를 통한 개발기술의 유효성을 검증하며, 이후 개발기술의 실용화를 추진하는 것으로 전략을 수립함 <ul style="list-style-type: none"> - 1단계(1~2차년도, 24개월) : 핵심요소기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 국내·외 기술현황 분석 및 핵심기술 개발방향 정립 · 세부과제별 핵심요소기술 개발 및 검증 - 2단계(3~4차년도, 24개월) : 핵심요소기술통합 및 실증 <ul style="list-style-type: none"> · 세부과제별 핵심요소기술의 통합 및 연계 · 핵심개발기술의 Pilot-test를 통한 현장 적용성 평가 · 핵심개발기술의 실용화 기반 마련

<p>5. 세부과제별 연구내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 해상풍력 기초를 이용한 합성구조 공기저장 구조 개발 - 해상풍력 타워를 이용한 합성구조 공기저장 구조 개발 - 수치/수리모형실험을 통한 해상풍력 기초 안전성 평가 - 수치/수리모형실험을 통한 해상풍력 타워 안전성 평가 ○ 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 블레이드 회전축 및 유압 피스톤펌프의 축이음 장치 개발 - 고회전 밀도형 고압/대용량 유압펌프 사양설계 - 유압회로 설계 및 유압 제어시스템 개발 - 압력맥동 저감 및 유압에너지 축압장치 개발 ○ 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기 압축기 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 유압 구동식 왕복동 공기압축 메커니즘 개발 - 유압회로 설계 및 제어밸브 블록 개발 - 왕복동 플런저 윤활 설계 기술 개발 - 공기 압축기 헤드 설계기술 개발
<p>6. 연구수행 체계</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시스템 엔지니어링으로서의 기술개발을 이므로 공동과제인 “해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발”, “풍력 블레이드 직구동 유압동력 발생 시스템 개발”, “유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기압축기 개발”을 동시에 추진함. ○ 창의적이고 독창적인 아이디어이므로 2단계로 구분하여 1단계(2년)에는 요소 기술을 개발하고, 2단계(2년)에서 요소기술통합 및 pilot-test를 수행하는 단계적으로 연구를 추진함. ○ 연구 추진의 효율성을 높이기 위해 주관기관은 산·학·연·관계의 협동 연구체계를 구축하고 특히 핵심기술 전문가 양성을 위하여 체계적이고 조직적인 지원체계를 구축
<p>7. 기술개발 최종성과물</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해상풍력 구조물을 이용한 고압 CAES 구조물 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 5MW급 해상풍력에의 적용을 위한 MICRO-CAES 시스템용 강합성형 고압 CAES 구조물 설계, 제작, 시공기술 - 1MWh급(1MW급 1시간 저장용) 고압(100bar) 합성구조 개발 ○ 풍력 블레이드 직구동 유압 동력발생시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 풍력 블레이드 직구동 고효율 유압동력발생 시스템(변환 효율 75%이상, 압력 350bar) - 유압시스템 성능 및 내구시험 장비(내압 350bar이상, 내구성능 50,000 cycle이상) ○ 유압 직구동 용적식 고압(100bar) 공기 압축기 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 유압모터 직구동 고효율 공기 압축 시스템(1,300HP급 100bar) - 플런저형 공기압축기의 성능 및 내구시험 결과(내구성능 50,000 cycle이상)
<p>8. 성과활용 방안</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내외 건설시공사, 설계사 등에 기술 이전을 통한 신재생에너지 및 CAES 시장 선점 및 수출산업화 <ul style="list-style-type: none"> - 연구의 주요 성과품으로 예상되는 시공시스템과 설계기술 및 시공기술을 활용하며, 설계기술은 대형 시공사의 해상풍력터키 시장에 입찰조건으로 활용하여 시장 진입의 가능성을 높이고, 시스템 제작 및 시공시스템과 시공기술은 전문업체에게 기술 이전을 통해 실용화 - pilot-test 등 실증을 통해 경쟁력 있는 CAES 플랜트 산업을 육성하여 수출 산업화 ○ 계통전원 공급이 어려운 도서지역에 신재생에너지와 연계한 CAES 시스템 적용을 통한 신재생에너지 보급

<p>9. 기술개발 기대효과</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 에너지저장시스템은 경부하시 유휴전력을 저장하고 과부하시 전력을 사용함으로써 첨두부하 분산을 통해 발전소 건설비, 송전선 설치비 등의 투자비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 예비율을 높여 여름·겨울철의 전력 피크와 대규모 정전 사고 등에 효과적 대응 가능 ○ 풍력에너지의 효율적인 에너지변환을 통한 에너지수급 개선 및 활용 증대 ○ 기존 풍력발전 대비 생산성 향상 및 원가절감에 기여하여 신시장 창출 ○ 국가적으로 추진 중인 스마트그리드 및 에너지그리드 정책 목표달성에 기여 ○ 신재생에너지 활용성 극대화 및 기저발전 시스템개발로 친환경 녹색성장 주도 ○ 개발기술의 pilot-test 등 실증을 통해 경쟁력있는 CAES 플랜트 산업을 육성하여 수출 산업화 가능 					
<p>10. 연구개발 과제 규모</p>	<p>구분</p>	<p>1차년도</p>	<p>2차년도</p>	<p>3차년도</p>	<p>4차년도</p>	<p>5차년도 이후</p>
<p>연차별 연구비 (백만원)</p>	<p>정부</p>	<p>2,617</p>	<p>2,690</p>	<p>2,074</p>	<p>1,600</p>	<p>-</p>
	<p>민간 (추정)</p>	<p>872</p>	<p>897</p>	<p>691</p>	<p>534</p>	<p>-</p>
	<p>합 계</p>	<p>3,489</p>	<p>3,587</p>	<p>2,765</p>	<p>2,134</p>	<p>-</p>
<p>총 연구비 (백만원)</p>	<p>정부</p>	<p>8,981</p>		<p>총 연구기간</p>	<p>4 년</p>	
	<p>민간</p>	<p>2,994</p>		<p>연도별 평균소요인력</p>	<p>39 명</p>	
	<p>총합계</p>	<p>11,975</p>				