

<div data-bbox="215 1155 451 1274">주 의</div>	<div data-bbox="491 607 523 1330">해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술개발</div> <div data-bbox="491 1458 523 1702">한국해양과학기술원</div>	<div data-bbox="571 555 1326 707"><div>해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술개발</div><div>Studies on optimal drone operation for internet of maritime things</div></div> <div data-bbox="866 943 999 976">2018.02.28</div> <div data-bbox="762 1317 1209 1357">한국해양과학기술원</div>
--	---	--

# 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술 개발”과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2018. 02 .

총괄연구책임자 : 송 유 재

참 여 연 구 원 : 백 승 재

“ : 김 수 미

### 보고서 초록

과제고유 번호	PE99573	해당단계 연구기간	2017/03/01 ~ 2018/02/28	단계 구분	
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술 연구			
연구책임자	송유재	해당단계 참여연구원수	총 : 3 명 내부: 3 명 외부:    명	해당단계 연구비	정부: 100,000 천원 기업:        천원 계 : 100,000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 3 명 내부: 3 명 외부:    명	총 연구비	정부: 100,000 천원 기업:        천원 계 : 100,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 /해양ICT융합연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	21
<p>○ 최종목표 : 해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술 연구 개발 및 이를 위한 연구 기반 구축</p> <p>○ 연구결과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 드론을 하나의 해양 어플리케이션으로 포함하는 3차원 해상 무선 네트워크의 수학적 모델링 제시</li> <li>- 제안한 3차원 해상 무선 네트워크에서, 네트워크 컴포넌트 (예, 해양 어플리케이션, 공중 중계기 등)의 밀도의 변화에 따라 해양 어플리케이션 당 얻을 수 있는 평균 데이터율 분석</li> <li>- 각기 다른 특성을 지닌 해양 어플리케이션의 QoS를 보장하기 위한 최적의 드론 운용 기술 개발</li> <li>- 기술 개발 및 실증에 필요한 관련 연구기반 구축</li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	사물인터넷, 드론, 해양통신, 자원할당, 무선통신			
	영 어	IoT, drone, maritime communication, RRM, wireless communication			

# 요 약 문

## I. 제 목

- 해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술 연구 개발 및 이를 위한 연구 기반 구축

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 드론을 하나의 해양 어플리케이션으로 포함하는 3차원 해상 무선 네트워크의 수학적 모델링 제시
- 제안한 3차원 해상 무선 네트워크에서, 네트워크 컴포넌트 (예, 해양 어플리케이션, 공중 중계기 등)의 밀도의 변화에 따라 해양 어플리케이션 당 얻을 수 있는 평균 데이터율 분석
- 각기 다른 특성을 지닌 해양 어플리케이션의 QoS를 보장하기 위한 최적의 드론 운용 기술 개발
- 기술 개발 및 실증에 필요한 관련 연구기반 구축

## IV. 연구개발결과

- 드론을 포함하는 3차원 해상 무선 네트워크 모델링
- 해양 어플리케이션 당 평균 데이터율 분석 제시
- 해양 어플리케이션의 안정적인 QoS 보장을 위한 최적 드론 운용 기술 제시
- 기술 개발 및 실증에 필요한 관련 연구 기반 구축

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 해양 IoT 기반 대형과제 제안을 위한 핵심 기술로 제안
- 해상 무선 네트워크 성능분석을 통한 해양 관련 서비스 종류 예측 및 제안
- 구축된 연구 환경을 기반으로 하여 해양에서 고려되는 다양한 무선통신 시스템 연구 개발



# S U M M A R Y 및 KEYWORDS

## I . Title

- Research on optimal drone operation for Internet of Maritime Things

## II . Objective

- Development of technology for optimal drone operation for achieving Internet of Maritime Things

## III . Contents

- Analysis on average data rate per each user in maritime wireless networks under the change in densities of maritime application and data sink
- optimal drone base station operation for different types of QoS for different maritime application

## IV . Results

- Modeling of 3-D maritime wireless network
- Proposition of average data rate per each user
- Proposition of optimal drone base station operation for guaranteeing QoS

(KEYWORDS : 사물인터넷, 드론, 해양통신, 자원할당, 무선통신, IoT, drone, maritime communication, RRM, wireless communication)

# C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction

Chapter 2. Status on existing researches

Chapter 3. Research results

Chapter 4. Utilization plan for research results

## 목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4장 연구개발결과의 활용계획

# 1. 서론

## (1) 연구 개발의 개요

### (가) 연구개발의 필요성

- 무인항공기(無人航空機: unmanned aerial vehicles, UAV) 또는 드론(drone, 이하 드론)이 다양한 산업 분야에 활용됨에 따라, 전 세계적으로 드론 산업이 급격히 발전하고 있음
- 한 연구 결과에 따르면 2015년 기준으로 세계드론 시장의 규모는 약 67억 달러이고 그 중 민간 드론 시장은 전체의 10% 정도. 관련 기관들은 전체 드론 시장규모를 2023년 100억불 이상 규모로 빠르게 성장할 것으로 전망
- 세계 드론 시장은 연평균 10%씩 증가하여 2023년에는 125억 달러 규모로 성장하고 민간 드론시장은 6천만 달러에서 연평균 35%씩 증가하여 8.8억 달러 규모로 성장할 것이라 예측
- 2023년 세계 드론 시장 규모를 117억 6천만 달러로 이중에서 상업적 용도의 드론 시장은 약 12%로 예상

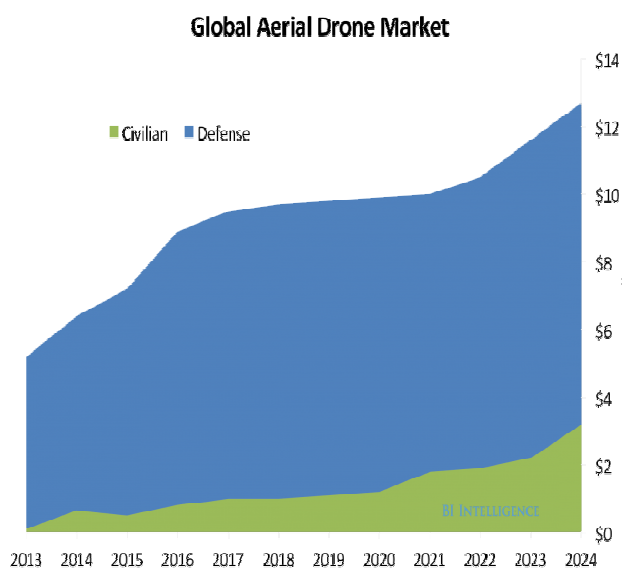


그림 1. 글로벌 드론 시장 전망



그림 2. 드론의 다양한 활용 방안의 예

- 이에 발맞춰, 해양·수산 분야에서도 드론의 다양한 활용 방안을 제시하고 있음
- 항만개발을 위한 육상·해저의 측량조사, 공유수면관리, 양식어장 관리, 해파리·적조의 이동경로 예측, 제한적 범위 내의 해안선 측량·침식모니터링 등
- 하지만, 해양·수산 분야에서의 드론 활용 연구는 해당 분야에서의 드론 활용 가능성에 대해서만 제안할 뿐 구체적인 활용 방안 및 운용 기술에 대한 내용을 제시하고 있지 않음

(나) 연구개발 기술의 기본 개념도

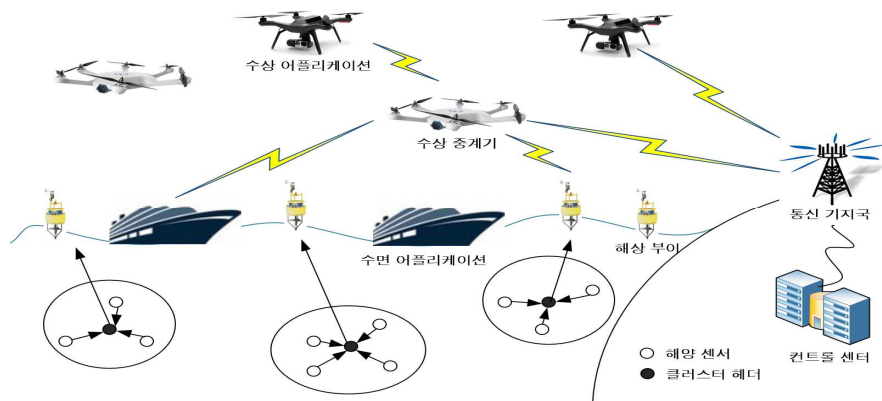


그림 3. 드론을 포함하는 해상 무선 네트워크의 개념도

- 본 연구에서는 해양 어플리케이션을 크게 수면, 수상 어플리케이션으로 구분함
  - 수면 어플리케이션: 해수면에 존재하는 해양 어플리케이션 (예, 선박, 해상 부이)
  - 수상 어플리케이션: 해양 관찰 (예, 환경감시, 해양안전 등)을 위해 수상에서 운용하는 드론을 칭함
- 해양 어플리케이션을 통해 수집한 해양환경 정보를 실시간으로 컨트롤 센터에 전송하기 위한 방안으로써 무선 통신 기술을 고려함
  - 각기 다른 해양 어플리케이션은 각기 다른 Quality of Service (QoS)를 요구함

### (3) 연구개발의 목표 및 내용

#### 가. 연구개발의 목표

##### ① 최종목표

구분	내용
최종목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3차원 해상 네트워크 성능 분석 및 해양 어플리케이션 QoS 보장을 위한 최적 드론 활용 기술 개발</li> <li>- 기술 개발 및 실증을 위한 연구기반 구축</li> </ul>
최종목표 설정근거	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 드론을 공중 중계기 또는 공중 어플리케이션으로 고려하는 3차원 해상 무선 네트워크의 성능 분석 연구가 미비함</li> </ul>
세부목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 드론을 포함하는 3차원 해상 네트워크 모델링 제시</li> <li>- 해양 어플리케이션 당 평균 데이터율 제시</li> <li>- 해양어플리케이션 QoS 보장을 위한 최적 드론 운용 기술 제시</li> </ul>

② 연구원의 비전 및 기능, 중기전략계획 등과의 연계성

○ KIOST 이사부 프로젝트

- 이사부 프로젝트 내 다양한 연구목표와 관련하여 해양 생태계 정보획득 기술 분야에 본 과제에서 개발하는 드론을 포함하는 해상 무선 네트워크 성능 분석 기반 최적 드론 활용 기술이 활용 및 접목 가능함
- 해상 무선 네트워크를 통한 해양 어플리케이션의 실시간 정보 제공은 해양 환경 변화에 따른 예측 및 대응 기술의 향상에 크게 도움이 될 것이라 판단함

□ 국가적 아젠다와의 연계성

○ 해양 신 성장동력 창출 및 체계적인 해양관리 / 미래 성장동력 확충

- 현존하는 모니터링 시스템보다 더욱 향상된 무선 네트워크 기반 원격 모니터링 시스템은 보다 체계적으로 해양 생태계 관리가 가능함
- 본 과제를 통해 구축된 연구 환경은 다양한 미래 해양기술 개발에 기반이 되며, 새로운 성장 동력 창출의 기반이 됨

○ 4차산업혁명의 핵심 기술 중에 하나인 IoT를 해양 분야에 적용하기 위한 해양 통신 관련 원천 기술 연구임

나. 연차별 연구개발의 목표 및 내용

① 정성적 목표

(단위 : 천원)

연차별 성과목표 및 연구내용			
구분	성과목표	연구내용	연구비 (직접비)
1차년도 (2017)	1. 해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술 연구 개발 및 이를 위한 연구기반 구축	1-1. 3차원 해상 무선 네트워크의 수학적 모델링 제시	100,000
		1-2. 제안한 3차원 해상 무선 네트워크에서, 해양 어플리케이션 당 얻을 수 있는 평균 데이터율 분석	
		1-3. 해양 어플리케이션의 QoS를 보장하기 위한 최적의 드론 운용 기술 개발	
		1-4. 해양 IoT 연구개발을 위한 연구기반 구축	
	계		100,000
합 계			100,000

② 정량적 목표

구분		가중치*	달성 목표(건)		세부 가중치
과학적 성과	논문		mrnIF 81점 이상	1	100
			mrnIF 61~80		
			mrnIF 41~60		
			mrnIF 40점 이하		
			소개		
	저서		국제저서		
			국내저서		
			국제편저		
			역서 등		
			소개		
기술적 성과	특허		국제특허 출원		
			국제특허 등록		
			국제특허 추가등록		
			국내특허 출원		
			국내특허 등록		
경제적 성과	기술료		기술이전 성과		
사회적,인프라. ·	홍보활동		..		
	대외활동				
계	-	100%		1	100

③ 총 연구기간 로드맵(3개년)

추진 일정												
해당연도	세부 성과 목표	월별 추진 일정										책임자 (소속기관)
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2017	컨트롤 센터, 해양 어플리케이션, 공중 중계기 및 공중 어플리케이션을 포함하는 3차원 해양 무선 네트워크의 모델링											송유재 (KIOST)
	3차원 해양 무선 네트워크에서의 해양/공중 어플리케이션 당 얻을 수 있는 평균 데이터율 도출											송유재 (KIOST)
	필드 실험을 위해 해양에 간단한 테스트베드 구축 및 실험 분석과 이론 분석의 비교 분석											송유재 (KIOST)

## 2. 국내외 기술개발 현황

### (1) 국내외 연구현황 - 드론

- 드론 관련 해외 프로젝트
  - 험난한 환경에서 발생하는 사고들의 구조 활동 플랫폼 개발이 목표.
  - 2013년부터 유럽에서 추진되고 있음.
  - 출판된 연구 내용에 따르면 무선통신을 사용 하는 드론이 WiFi, ZigBee, XBee, LTE, WiMAX와 같은 여러 통신 규격들 중에서 WiMAX가 SHERPA에 적합함을 보여줌.
- 기존에 수행된 연구에 의해 출판된 연구 내용에 따르면 드론이 cellular coverage 밖에서 인명구조를 위해 Ad hoc network를 이용하는 시나리오를 소개하고 성능을 평가
- 다른 연구 내용에 따르면 드론을 하나의 flying base station으로 취급하고 연구를 진행하여 유저의 rate requirement를 충족시키면서 전체 전송전력을 최소화시키기 위해 드론의 최적 위치와 coverage를 결정하였고, 또 다른 연구에서는 D2D (Device-to-Device) 유저의 density에 따라 flying base station의 coverage 확률과 평균 sum-rate을 최대화 시키는 드론의 최적 고도를 도출

### (2) 국내외 연구현황 - 해양 무선 네트워크

- IoMT (Internet of Maritime Things)
  - 정보통신 분야의 핫 이슈인 IoT(Internet of Things)을 해양 분야 비즈니스에 활용하기 위한 키워드로 IoMT 또는 해양 산업인터넷 (Maritime Industrial Internet)에 대한 연구가 시작 되고 있음
  - IoMT에서는 선박과 해양에 존재하는 다양한 센서 장치들로부터 정보를 자동으로 받아들이며, 선박의 운영과 유지보수를 최적화하기 위해 적용되고 있음. 이는 다양한 해양 분야에서 적용되어, 최적의 의사결정을 도와줄 것으로 기대
- 분산형 수중 관측 제어망
  - 분산형 수중관측 제어망 개발 연구는 육상에서와 같이 수중에서도 수중 센서노드들을 제어하는 수중 기지국을 개발하여 수중 네트워크 트래픽 제어를 통한 수중 단말기 주파수 재활용과 제한적인 네트워크 효율을 높여 수중에서도 장시간 실시간으로 작동하는 수중 통신망 구축을 목표
  - 2015년에는 수중 관측제어용 해상부이와 수중 기지국간 통신 모델 상위설계를 위한 인터페이스/송수신부, 아날로그 전단부 상위설계를 위한 서해안 실험역 측정을

통한 수중 채널 분석 연구를 수행함. 이에 더하여, 수중관측제어용 네트워크분야로 매체접속제어방식 상위 설계, 전력제어방식, 채널구조와 트래픽 제어와 같은 상위설계 연구가 진행

- 또한, 수중관측 제어망 셀 플래닝 톨 상위설계에 대한 연구가 진행되었으며, 그밖에도 수중 관측제어용 구조물 분야에 대한 기본설계 및 구조해석에 대한 연구 및 수중에서 장시간 실시간 운용을 위한 수중 배터리 관련 연구를 진행

#### ○ 유럽 해양 무선 센서 프로젝트

- 유럽연합(EU)의 지원으로 EU FP 1 IP Project 의 일환으로 이탈리아를 중심으로 포르투갈, 영국, 그리스, 네덜란드, 독일, 터키, 미국 등 다양한 국가가 컨소시엄을 구성하여 2013년부터 IoMT 환경 구축을 목표로 무인 수중 탐사 로봇의 자기 조직화(self-organise)를 가능하게 하는 지능형 센서 개발과, 수중 센서, 수중 통신, 수중 네트워크 구조 및 수중 내비게이션 개발 연구를 진행
- 다양한 통신 프로토콜의 시뮬레이션 및 실험역 테스트를 위해 오픈소스 기반 framework를 이용하여 각기 다른 플랫폼의 수중 음향 모델 및 수중 환경 센서, AUV(Autonomous Underwater Vehicle)등의 수중 장비를 연동하는 연구가 진행됨. 이를 통해 제시한 framework로 다양한 수중 장비들의 통합 가능성을 제시

#### ○ 중국 수중 통신망 연구

- 중국은 863프로그램과 같은 국가 주도의 실용 과학관련 대형 프로젝트들이 길게는 20년 전부터 진행되고 있으며, 이 가운데 중국 국가기관의 지원을 통해 중국의 다양한 대학 및 연구소에서 수중통신망에 관련된 연구들이 활발히 진행
- 수중 센서 네트워크의 효율적인 전력 및 지연시간 제어를 위한 깊이 정보 기반 라우팅 방법이 제안되었으며, 수중에서의 지연시간을 줄이기 위해 DTMAC(a Delay Tolerant MAC)이라는 이름의 프로토콜을 제안 하였음. 또한, 수중 센서 네트워크의 보안 강화를 위한 물리계층 및 MAC계층 요구사항에 대한 연구가 진행

#### (다) 기존 연구 관련 현황분석 및 한계

##### ○ 중국 수중 통신망 연구 현재 다양한 산업 분야에서 드론의 활용에 관한 연구가 활발히 진행 되고 있음

- 카메라/동영상, 개인수송/택배 서비스, 통신 인프라 구축 등

##### ○ 현재 해양·수산 분야에서 드론의 활용에 관한 연구는 현재 초기 단계로써 다양한 활용방안 제안들이 존재함. 드론 산업의 발전 가능성 및 드론의 다양한 활용 가능성을 고려했을 때, 드론과 연계된 해양 연구가 진행 될 것으로 예상됨. 하지만, 아



직까지 해양·수산 분야에서 드론을 활용하는 구체적인 운용 방안을 제시하는 연구는 부족함

- 드론을 포함한 해상 무선 네트워크를 통해 수집한 해양 정보를 안정적으로 컨트롤 센터에 전송하기 위한 연구 내용이 미비함

### (3) 연구개발의 중요성

- 기존의 연구와는 달리, 본 연구에서는 해양·수산 분야에서 드론 활용 방안(해상 무선 네트워크에서의 공중 중계기/어플리케이션)을 제시할 뿐 아니라 그에 따른 구체적인 운용 가이드라인을 제시함
  - 해상 무선 네트워크에서의 최적의 드론 운용 전략 제시
- 이는 최근 대두되고 있는 해양 어플리케이션 IoT 즉, IoMT 구축을 위한 요소 기술이 될 것임

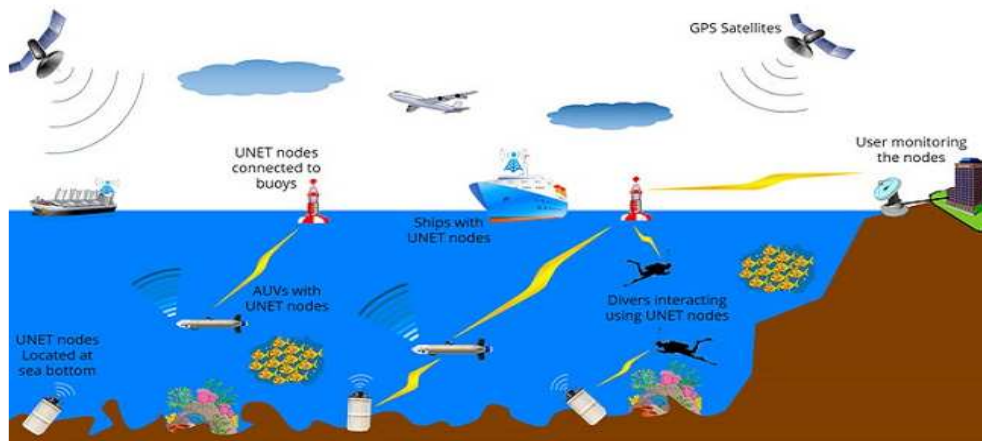


그림 4. IoMT 개념도

- 3차원 해상 무선 네트워크의 수학적 모델링 및 성능 분석은 아직 시도되지 않은 연구 분야로써 새롭고 독창적인 연구 분야를 개척 할 수 있음
  - 3차원 해상 무선 네트워크 운용에 관한 원천 기술 개발을 통해 관련 기술의 국내/국제 특허 선점 및 국제 기술 경쟁력 확보에 기여 할 수 있음

### 3. 연구개발수행 내용 및 결과

#### (1) 총괄 (연차별 목표 대비 달성도)

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	성과목표	연구내용	가중 치 (A)	달성실적	
1년차 (2015)	1.해양 IoT 달성을 위한 최적의 드론 운용 기술 연구 개발 및 이를 위한 연구기반 구축	1-1. 3차원 해상 무선 네트워크의 수학적 모델링 제시	1.0	- Voronoi tessellation을 이용하여 해양 어플리케이션을 모델링	100
		1-2. 3차원 해상 무선 네트워크에서 해양 어플리케이션 당 얻을 수 있는 평균 데이터율 분석		- 3차원 해상 무선 네트워크에서 네트워크 컴포넌트의 밀도 및 거리 변화에 따라 해양 어플리케이션 당 얻을 수 있는 평균 데이터율 도출	
		1-3. 해양 어플리케이션의 QoS를 보장하기 위한 최적의 드론 운용 기술 개발		- 해양 어플리케이션의 QoS를 보장하면서 최소의 드론 수 및 싱크 수 도출	
		1-4. 해양 IoT 연구개발을 위한 연구기반 구축		- 컴퓨터 모의 실험을 위한 연구환경(예, 워크스테이션, 프린터, matlab 등) 구축	
	계		1.0		100

## (2) 연구개발 수행 내용

### (가) 연구내용 및 달성 실적

#### ① 성과실적

##### ☐ 연구내용 1-1.

###### ○ 3차원 해상 무선 네트워크의 수학적 모델링 제시

- 2차원 Voronoi tessellation을 이용하여 해양 어플리케이션을 모델링
- 3차원 Voronoi tessellation을 이용하여 수상 중계기인 드론을 모델링
- 컨트롤 센터는 움직이지 않는 고정된 위치에 있는 것으로 고려
- Voronoi tessellation을 이용한 stochastic geometry 분석을 통해 3차원 해양 어플리케이션의 위치의 랜덤성을 반영 할 수 있음

##### ☐ 연구내용 1-2.

###### ○ 3차원 해상 무선 네트워크에서 해양 어플리케이션 당 얻을 수 있는 평균 데이터율 분석

- 제안한 수학적 모델을 바탕으로, 3차원 해상 무선 네트워크에서 네트워크 컴포넌트의 밀도 및 거리 변화에 따라 해양 어플리케이션 당 얻을 수 있는 평균 데이터율 도출

##### ☐ 연구내용 1-3.

###### ○ 해양 어플리케이션의 QoS를 보장하기 위한 최적의 드론 운용 기술 개발

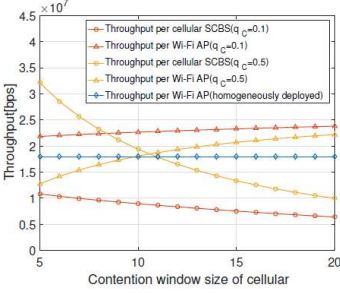
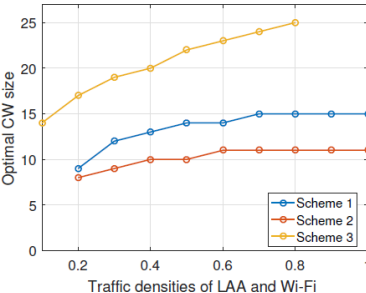
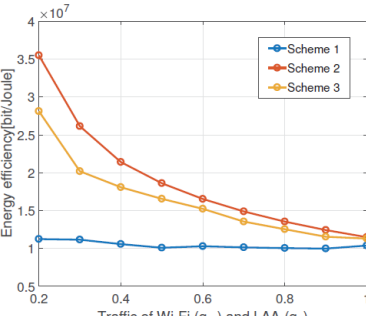
- 수중 어플리케이션의 QoS를 보장하기 위한 최소의 싱크 밀도 도출
- 수상 어플리케이션의 QoS를 보장하기 위한 최소의 드론 밀도 도출

##### ☐ 연구내용 1-4.

###### ○ 해양 IoT 연구개발을 위한 연구기반 구축

- 해양 IoT 통신 기술 모의 실험을 위한 워크스테이션 및 표출 장치 구축
- 컴퓨터 모의실험용 S/W (매틀랩) 구매
- 드론 통신 실험을 위한 드론 구매

② 당해연도 대표적 우수성과

우수성과 - 1.	해양 어플리케이션 QoS 보장을 위한 LAA 기술 개발 (SCI 1건 게재 완료, 학술대회 2건 게재완료)
성과 내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 세계 첫 번째 해상 드론 통신에 적용할 수 있는 Licensed-assisted access (LAA) 통신 기술 개발</li> <li>○ 비면허 대역을 사용하는 다양한 Radio access technology(RAT)와 조화로운 공존이 가능한 listen-before-talk 최적화 기술 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구 1: Non-saturated traffic condition에서 다양한 RAT과 조화로운 공존이 가능하게 하는 최적의 LBT parameter 도출 (SCI, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 게재 완료)</li> <li>- 연구 2: Non-saturated traffic condition에서 각기 다른 LBT mechanism 제시 및 결과 분석 (국제학술대회, IEEE APWCS ,게재 완료)</li> <li>- 연구 3: 네트워크 에너지 효율 최대화를 목표로 하는 LAA LBT mechanism 개발 (국제학술대회, IEEE APCC ,게재 완료)</li> </ul> </li> </ul>
성과의 우수성	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 5G 최신 기술인 LAA 기술을 해양 드론 통신에 적용 가능성 제시</li> <li>- 제안하는 기술을 통해 해양에 존재하는 다양한 해양 어플리케이션의 Quality of Service를 보장하면서 다른 RAT과 조화로운 공존이 가능</li> </ul>
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a) 연구 1 결과물</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b) 연구 2 결과물</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(c) 연구 3 결과물</p> </div> </div>	
증빙자료	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 논문명 (게재지, 일시)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Y. Kim, Y. Song, Y. Choi and Y. Han, "Non-Saturated Throughput Analysis of Coexistence of Wi-Fi and Cellular with Listen-Before-Talk in Unlicensed Spectrum," accept for IEEE Transactions on Vehicular Technology.</li> </ul> </li> <li>○ 학술발표명 (일시, 장소, 발표회명)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Y. Kim, Y. Song, and Y. Han, "Performance Analysis of Licensed-Assisted Access With Listen-Before-Talk in Non-Saturated Condition," in Proc. APWCS 2017.</li> <li>- Y. Kim, E. Park, Y. Song, and Y. Han, "Energy-Efficient Sensing Mechanism for Licensed-Assisted Access Under Non-Saturated Traffic Condition," in Proc. APCC 2017.</li> </ul> </li> </ul>

# Nonsaturated Throughput Analysis of Coexistence of Wi-Fi and Cellular With Listen-Before-Talk in Unlicensed Spectrum

Yongjae Kim<sup>1</sup>, Yujae Song<sup>1</sup>,  
Yonghoon Choi, *Senior Member, IEEE*,  
and Younghan Han, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**—This paper analyzes the coexistence performance of Wi-Fi and cellular networks conditioned on nonsaturated traffic in the unlicensed spectrum. Under the condition, the time-domain behavior of a cellular small-cell base station (SCBS) with a listen-before-talk (LBT) procedure is modeled as a Markov chain, and it is combined with a Markov chain which describes the time-domain behavior of a Wi-Fi access point. Using the proposed model, this study finds the optimal contention window size of cellular SCBSs in which total throughput of both networks is maximized while satisfying the required throughput of each network, under the given traffic densities of both networks. This will serve as a guideline for cellular operators with respect to performing LBT at cellular SCBSs according to the changes of traffic volumes of both networks over time.

**Index Terms**—Coexistence, licensed-assisted access (LAA), non-saturated traffic, unlicensed spectrum, Wi-Fi.

## I. INTRODUCTION

In recent years, enabling cellular small-cells to operate in the unlicensed spectrum at typically 5 GHz has received considerable attention as one of the solutions to cope with a spectrum scarcity problem. Since the unlicensed spectrum is available to anyone, it can be used fronthaul links as well as access links in 5G ultra dense networks [1].

There are several types of LTE and Wi-Fi coexistence models in sharing the unlicensed spectrum: LTE-unlicensed (LTE-U), licensed-assisted access (LAA), and MulteFire [2]–[10]. LTE-U with no regulatory requirement for listen-before-talk (LBT) is based on an adaptive on/off switching of cellular small-cells [2]–[5]. On the contrary, both LAA and MulteFire abide by a listen-before-talk (LBT) procedure introduced in 3GPP Release 13 to access the unlicensed spectrum [6]–[10]. The difference between LAA and MulteFire is whether an anchor in the licensed spectrum is required [6]. Hereafter, we focus on LAA-based medium access mechanisms.

In [7], the authors propose a Markov chain that describes the behavior of a cellular small-cell base station (SCBS) with a LBT procedure in the unlicensed spectrum, and then present the coexistence perfor-

mance of Wi-Fi and cellular networks with different LBT procedures. The analysis in [7] is performed under the condition that Wi-Fi access points (APs) and cellular SCBSs always have packets to transmit, i.e., a saturated traffic condition. In [8], an analytic model which evaluates the coexistence performance between cellular and Wi-Fi networks under the non-saturated traffic condition is presented for the first time. The authors show the validity of adopting a LBT procedure in a Wi-Fi and cellular coexistence scenario by comparing with the case that the LBT procedure is not adopted. However, to the best of our knowledge, an analysis with respect to the effect of adjustment in the LBT parameter of cellular SCBSs, i.e., a contention window (CW) size, under the non-saturated traffic condition on the coexistence performance has not been identified in the literature before.

The main contributions of this paper are listed as follows:

- 1) We propose an analytical model, i.e., a Markov chain, that describes the time-domain behavior of a cellular SCBS under the non-saturated traffic condition with the LBT procedure described in 3GPP TR 36.889 [9], and it is combined with a Markov chain describing the time-domain behavior of a Wi-Fi AP introduced in [11].
- 2) Based on the analytical model, we investigate the throughputs of Wi-Fi and cellular nodes according to the change in traffic densities of both networks. For evaluating the coexistence performance, we adopt the concept of graceful coexistence, which is defined as the condition that the throughput of each node under a scenario with  $n_W$  Wi-Fi and  $n_C$  cellular nodes is better than that of each node under a scenario with homogeneously deployed  $n_W + n_C$  Wi-Fi APs [7]. With the definition of graceful coexistence, we identify whether the graceful coexistence is satisfied by adjusting the CW size of the cellular SCBSs in all traffic densities of both networks. Then, we find the optimal CW size, by which total throughputs of both networks is maximized while satisfying the graceful coexistence.
- 3) Our results will serve as a guideline for cellular operators in performing LBT at cellular SCBSs according to the changes in traffic volumes of both networks over time, to coexist well with Wi-Fi APs in the unlicensed spectrum.

## II. COEXISTENCE PERFORMANCE ANALYSIS

We consider a scenario in which  $n_W$  Wi-Fi APs and  $n_C$  cellular SCBSs coexist on the same channel in the 5GHz unlicensed spectrum and operate under the non-saturated traffic condition. In [12], a Markov chain model is proposed to investigate the saturation throughput performance of the 802.11 distributed coordination function. As the extension of [12], [11] provides a Markov chain for describing the time-domain behavior of a Wi-Fi AP under the non-saturated traffic condition. In this work, we propose a Markov chain to describe the time-domain behavior of a cellular SCBS under the non-saturated traffic condition in the unlicensed spectrum, and it is combined with the Markov chain of [11] for evaluating the coexistence performance between cellular and Wi-Fi networks. Same as [7], [11], [12], a fundamental assumption is that Wi-Fi and cellular nodes have a fixed collision probability regardless of their previous transmission history.

### A. Wi-Fi AP Model

In [11], the Markov chain consists of post-backoff and backoff stages. The post-backoff stage stands for a set of states presenting

Manuscript received April 19, 2016; revised October 24, 2016 and April 25, 2017; accepted July 13, 2017. Date of publication July 31, 2017; date of current version December 14, 2017. This work was supported by “The Cross-Ministry Giga KOREA Project” grant from the Ministry of Science, ICT, and Future Planning, Korea. The review of this paper was coordinated by Prof. C. Zhang. (Corresponding authors : Yujae Song and Younghan Han.)

Y. Kim and Y. Han are with the Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, South Korea (e-mail: yongjaekim@kaist.ac.kr; ynhn@kaist.ac.kr).

Y. Song is with ICT R&D Unit, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan 425-600, South Korea (e-mail: yjsong@kiost.ac.kr).

Y. Choi is with the Department of Electrical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, South Korea (e-mail: yh.choi@jnu.ac.kr).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TVT.2017.2734109



# Performance Analysis of Licensed-Assisted Access with Listen-Before-Talk in Non-Saturated Condition

Yongjae Kim\*, Yujae Song<sup>†</sup>, Rumin Yang<sup>‡</sup>, and Youngnam Han\*<sup>‡</sup>

\*Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea

<sup>†</sup>ICT R&D Unit, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Gyeonggi-do, Korea

<sup>‡</sup>College of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology (CQUT)

Email: {yongjaekim, ynhan}@kaist.ac.kr, <sup>†</sup>yjsong@kiost.ac.kr, <sup>‡</sup>yangrumin@163.com

**Abstract**—This paper analyzes the performance of licensed-assisted access (LAA) systems conditioned on non-saturated traffic in unlicensed spectrum. Under the condition, we propose Markov chain models which describe time-domain behavior of a LAA system with different listen-before-talk (LBT) procedures. For evaluation of coexistence performance, a Wi-Fi access point model is adopted and combined with the proposed models. We find an optimal contention window (CW) size of the LAA systems in which total throughput of both networks is maximized while satisfying the required throughput of each network, under the given traffic densities of both networks. Total throughput improvement is compared according to different LBT procedures. Numerical results show that the LAA systems with the optimal CW size lead to higher throughput improvement than without the optimal CW in the coexistence scenario.

## I. INTRODUCTION

In recent years, enabling cellular small-cells to operate in the unlicensed spectrum has received considerable attention as one of the solutions to cope with a spectrum scarcity problem. Since that Wi-Fi with 802.11 n/ac standards is the typical radio access technology in the unlicensed spectrum, various issues for coexistence between Wi-Fi and cellular networks have been investigated in [1]–[8].

The majority of researches on this subject are about developing medium access mechanisms for cellular small-cells to access the unlicensed spectrum, which is classified into two categories: one is a mechanism for a scenario that there is no regulatory requirement for listen-before-talk (LBT) at cellular small-cells and the other is a mechanism for the opposite scenario. The medium access mechanisms belonging to the first category are based on the on/off switching of cellular small-cell base stations (SCBSs) [1]–[3] and it is called LTE-unlicensed (LTE-U). Although LTE-U is the simplest way of coexistence by switching the status of SCBSs, the transmissions of Wi-Fi can be blocked when LTE-U is ‘on’ period and it results in the fairness issues in the unlicensed spectrum. For this problem, the mechanisms based on LBT at cellular SCBSs have been investigated [4]–[8] and it is called licensed-assisted access (LAA).

In [7], an analytic model which describes the behavior of a LAA SCBS which performs a simple LBT scheme is proposed. The effect of LAA SCBSs with LBT and without LBT in the unlicensed spectrum is evaluated and it validates the need for LBT scheme to coexist Wi-Fi networks. In [8], the

authors propose a Markov chain that describes the behavior of a LAA SCBS in the unlicensed spectrum, and then present the coexistence performance of Wi-Fi and cellular networks with different LBT schemes. The analysis in [8] is performed under the condition that Wi-Fi access points (APs) and LAA SCBSs always have packets to send, i.e., a saturated traffic condition. However, the saturated traffic condition is typically far from real networks. Typical data traffic such as video streaming or web browsing tends to be bulk or on/off manner, and hence the wireless networks obviously operate under the non-saturated traffic condition in practice. Therefore, the work with respect to the coexistence of Wi-Fi and cellular networks under the non-saturated condition is needed to be studied.

In this paper, we provide an analytical framework for evaluating the coexistence performance of Wi-Fi and cellular small-cell networks under the non-saturated traffic condition in the unlicensed spectrum. Under the condition, we propose Markov chain models to describe time-domain behaviors of LAA SCBSs with different LBT schemes that are based on different channel sensing mechanisms, and each model is combined with a Markov chain introduced in [9] describing the time-domain behavior of a Wi-Fi AP. Based on the proposed models, we analyze the throughput of Wi-Fi APs and LAA SCBSs according to the changes of traffic densities of both networks. For evaluating the coexistence performance, we adopt the concept of graceful coexistence [8], which is defined as the condition that the throughput of each node under a scenario with  $n_W$  Wi-Fi APs and  $n_C$  cellular SCBSs is better than that of each node under a scenario with homogeneously deployed  $n_W + n_C$  Wi-Fi APs. We first identify whether the graceful coexistence condition is satisfied by adjusting the LBT parameter of LAA SCBSs, i.e., a contention window (CW) size, in all traffic densities of both networks. Then, we find the optimal CW size, by which total throughput of both networks is maximized while satisfying the graceful coexistence. Total throughput improvement is compared according to different LBT schemes. Our results will serve as an operating guideline for performing LBT at cellular SCBSs according to the changes of traffic volumes of both networks over time.

## II. SYSTEM MODEL

In this paper, we consider a scenario where  $n_W$  Wi-Fi APs and  $n_C$  LAA SCBSs coexist in the same channel in the

# Energy-Efficient Sensing Mechanism for Licensed-Assisted Access Under Non-Saturated Traffic Condition

Yongjae Kim, Eunhye Park, Yujae Song<sup>†</sup>, Younghan Han

Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea

<sup>†</sup>ICT R&D Unit, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Gyeonggi-do, Korea

Email: {yongjaekim, eunhyepark, ynhan}@kaist.ac.kr, <sup>†</sup>yjsong@kiost.ac.kr

**Abstract**—This paper investigates the energy-efficiency of licensed-assisted access (LAA) which enable long-term evolution systems to operate in unlicensed spectrum. Since Wi-Fi with 802.11 n/ac is a typical radio access technology in the unlicensed spectrum, we consider a scenario that the LAA small-cell base stations (SCBSs) are deployed together with Wi-Fi access points. We propose three different listen-before-talk (LBT) schemes according to the channel sensing mechanisms for LAA SCBC, and establish Markov chain models for each scheme under non-saturated traffic condition. Using these analytical models, the energy-efficiencies of LAA SCBSs that perform the different LBT schemes are investigated. We also propose the algorithm to obtain the optimal contention window size of LAA SCBSs by which total energy-efficiency of networks is maximized while satisfying the required energy-efficiency of both LAA and Wi-Fi networks. Numerical results show that the LBT scheme which has an efficient channel sensing mechanism outperforms the other LBT schemes for the energy-efficiency perspective.

## I. INTRODUCTION

As the number of mobile devices dramatically increases, the cellular networks are faced with increasing demands for data traffic. To deal with the challenge, enabling long-term evolution (LTE) systems to operate in unlicensed spectrum, which is typically 5GHz, has received considerable attention. Since Wi-Fi with 802.11 n/ac standard is a typical radio access technology (RAT) in the unlicensed spectrum, there are various issues for coexistence between Wi-Fi and LTE, and those have been investigated in [1]–[9].

There are two categories for coexistence mechanisms of Wi-Fi and LTE in the unlicensed spectrum: LTE-unlicensed (LTE-U) and licensed-assisted access (LAA). LTE-U is the simplest form of coexistence mechanisms which requires a minor modifications in LTE protocol, i.e., an on/off switching of LTE small-cell based stations (SCBSs) in the unlicensed spectrum. For LTE-U, an almost blank subframe (ABS) has been developed in [1], and the ABS scheme without priority to mitigate the co-channel interference from cellular to Wi-Fi systems is proposed in [2]. In [3], joint licensed and unlicensed resource block allocation algorithms to maximize energy-efficiency of each LTE-U SCBS are proposed. Also, they prove that unlicensed spectrum can be used to improve the energy-efficiency only when the allocated licensed resource blocks are not enough. However, the transmission of Wi-Fi is blocked by LTE-U transmission during ‘on’

period, since LTE-U does not conduct a contention-based protocol. Therefore, LTE-U can cause fairness issues and is not suitable in Europe and Japan where the listen-before-talk (LBT) is mandated as well. To alleviate these problems, LAA which abides by the LBT procedure has been proposed and investigated [5]–[9] and we concentrate on LAA in this paper.

In [7], an analytic model which describes the behavior of a LAA SCBS with simple LBT is proposed. They show the validity of operation of LAA SCBSs in the unlicensed spectrum. In [8] and [9], each Markov chain model which describes the behavior of a LAA SCBS with LBT is proposed for evaluation of coexistence performance under saturated and non-saturated traffic condition, respectively. They evaluate the network throughput of LAA and Wi-Fi nodes for the coexistence in the unlicensed spectrum. To evaluate the coexistence performance, they adopt the graceful coexistence condition [8], which is defined as the condition that the throughput of each node under a scenario with  $n_W$  Wi-Fi and  $n_L$  LAA nodes is better than that of each node under a scenario with homogeneously deployed  $n_W + n_L$  Wi-Fi APs. They identify the optimal contention window (CW) size of LAA SCBSs by which network throughput is maximized while satisfying the graceful coexistence.

To transmit information over the unlicensed spectrum, LAA SCBSs should perform a channel sensing mechanism before data transmission for coexistence with other RATs, which result in additional energy consumption at the LAA SCBSs unlike in the licensed spectrum. Thus, it is required to develop the channel sensing mechanism that could improve energy-efficiency without compromising network performance. However, to the best of our knowledge, the energy-efficiency of LAA SCBSs has not been investigated yet.

In this paper, we investigate the energy-efficient sensing mechanism for LAA SCBSs under the non-saturated traffic condition. For this, we propose three different Markov chain models that describe the behaviors of each LAA SCBS which has different LBT schemes according to the channel sensing mechanisms. To evaluate the coexistence performance, we adopt the concept of graceful coexistence [8], and then identify the optimal CW size of LAA SCBSs by which network energy-efficiency is maximized while satisfying the graceful coexistence. Our results provide insight into the operation of

## ② 연구결과의 창의성 및 혁신성

### □ 기존의 연구

- 2차원 무선 네트워크에서 grid 모델을 이용하여 네트워크를 구성하고 무선 자원을 효율적으로 활용하는 방법 및 최적화 알고리즘 연구
- 네트워크 구성이 복잡해짐에 따라 grid 모델로 최신의 무선 네트워크 환경을 적절하게 표현하지 못함. 이에 확률론적 기하학적 구조를 바탕으로 네트워크를 구성하고 무선 네트워크 기술들의 성능을 분석하는 연구가 수행됨
- 확률론적 기하학적 구조 중 2차원 무선 네트워크에 적용된 이론은 Poission point 분포, Poission voronoii tessellation로, 이 이론의 적합성은 다른 연구에서 이미 검증됨. 또한 확률론적 기하학적 구조는 grid 모델보다 수학적으로 2차원 무선 네트워크를 분석하기 용이. 이를 바탕으로 지금까지 이중 네트워크 시스템, Ad-hoc 네트워크, D2D통신 등의 수많은 무선 네트워크 환경에서 무선자원관리 기술 연구가 수행됨
- 현재까지 확률론적 기하학적 구조에 기초한 기술 연구는 2차원 공간에서의 지상 단말 및 기지국의 분포만을 고려함. 이에 기지국의 높이, 지상 단말의 3차원 공간에서의 위치, 공중 단말 위치에 대한 정보를 고려한 연구는 수행되지 않음
- 3 dimensional Poission voronoii tessellation 이라는 이론을 바탕으로 3차원 공간 표현 가능. 하지만 이 이론을 3차원 무선 네트워크 환경 특히, 해양 무선 네트워크 환경에 적용한 연구는 없고, 올바르게 적용하는 방법 또한 연구되지 않음

### □ 연구개발의 창의성

- 본 연구는 2차원 해상 무선 네트워크 환경을 수학적으로 모델링한 기존의 연구와 다르게 3차원 해상 네트워크 환경을 수학적으로 모델링 하고 성능을 분석함
  - 드론이 해양 어플리케이션과 컨트롤 센터를 연결하는 공중 중계기로 활용 할 수 있다는 새로운 개념을 제시하고 이를 바탕으로 드론이 공중 중계기 역할을 하는 3차원 모바일 네트워크 모델을 제시함
- 지금까지 고려되지 않은 3차원 공간에 적합한 확률론적 기하학적 구조를 제시함에 따라 다른 연구를 선도할 수 있음
  - 3차원 해상 무선 네트워크를 구성함에 있어 확률론적 기하학적 구조 이론을 적용하고, 해수면에 위치하고 있는 해양 어플리케이션에 더하여 공중 중계기를 추가적



으로 고려함으로써 새롭고 독창적인 연구 분야를 개척함.

- 본 연구에서 제시한 3차원 해상 무선 네트워크 환경을 바탕으로 다양한 연구가 파생될 것이고, 이런 연구들에 근간이 되는 모델을 제시하는 기술 연구의 우수성, 혁신성을 가짐

(나) 정량적 연구성과

① 2017년도 목표 대비 달성도

구분		가중치*	달성 목표(건)		세부 가중치	달성(건)	달성도(%)
과학적 성과	논문	100	mrnIF 81점 이상	1	100	1	100
			mrnIF 61~80				
			mrnIF 41~60				
			mrnIF 40점 이하				
			소계	1	100	1	100
	저서		국제저서				
			국내저서				
			국제편저				
			역서 등				
			소계				
기술적 성과	특허		국제특허 출원				
			국제특허 등록				
			국제특허 추가등록				
			국내특허 출원				
			국내특허 등록				
경제적 성과	기술료		기술이전 성과				
사회적,인프라.	홍보활동		..				
	대외활동						
계	-	100%		1	100	1	100

#### 4. 연구개발결과의 활용 계획

구분	주요 내용
연구 결과물의 활용성	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 4차산업혁명 핵심기술인 IoT를 해양 분야에 적용하는 Internet of Maritime Thing (IoMT) 국가 대형사업 도출에 기여               <ul style="list-style-type: none"> <li>- IoMT 관련 국가 대형사업을 도출하는데 기반 기술로 활용</li> </ul> </li> <li>○ 해양 관측 시스템과의 상호 보완을 통한 진화된 국가 해양 관측 시스템 구축에 기여               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 해양 무선 네트워크를 이용한 다양한 해양 정보의 실시간 모니터링 및 정보 제공을 통해 기존에 해양 관측을 위해 존재하고 있는 위성, 플로트, 현장 관측 플랫폼을 보완</li> <li>- 이를 통해, 국내 연근해의 환경 및 국방 모니터링을 위한 진화된 국가 해양 관측 시스템 구축에 기여</li> </ul> </li> <li>○ 다양한 해양 관련 서비스 종류 예측 및 제안               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 본 연구 결과를 통해 3차원 해양 무선 네트워크 환경에서 해양/공중 어플리케이션이 얻을 수 있는 평균 데이터율을 도출함으로써, 해양/고중 어플리케이션을 통해 제공 할 수 있는 서비스 종류를 예측 및 제안</li> </ul> </li> </ul>
연구 결과물의 기술적 경제적 사회적 파급 효과	<p><b>[기술적 측면]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 해양 IoT 실현을 위한 3차원 해양 무선 네트워크 관련 국제 기술 경쟁력 확보               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3차원 해양 무선 네트워크 바탕으로 한 다양한 운용 기술(예, 저전력 운용 기술, 무선 자원 할당 기술)을 개발함으로써, 관련 기술의 국내/국제 특허 선점을 통한 국제 기술 경쟁력 확보에 기여 할 수 있음</li> </ul> </li> </ul> <p><b>[경제·산업적 측면]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 해양 신산업 창출 및 기술 선도               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 해상에서 운용하는 드론이 유발 할 수 있는 어플리케이션 타입을 제시함으로써 해양 모니터링 분야 등 새로운 해양산업 창출 기대</li> </ul> </li> </ul> <p><b>[사회적 측면]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 해양환경 위해요소 대응기술 강화               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연간 4,000억원 이상의 수산업 피해를 가져오는 적조, 해파리, 고수온 문제를 해상에서 운용하는 드론의 실시간 모니터링 시스템을 통해 피해액 절감 가능</li> <li>- 적조 이외에도 해상 공사 중 부유토사 문제 또는 기후 변화 등에 따른 다양한 해양 환경 변화를 신속하고 정확하게 파악하고 조기 대처를 통해 해양환경 관리비용 절감 가능</li> </ul> </li> </ul>

## 뒷 면

### 주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

