

16CTAP  
-C1149  
08-01

위  
성  
항  
법  
  
대  
체  
항  
법  
시  
스  
템  
  
네  
트  
워  
크  
  
기  
초  
연  
구

최  
종  
보  
고  
서  
  
2018

국  
토  
교  
통  
과  
학  
기  
술  
진  
흥  
원  
  
국  
토  
교  
통  
부

System Network Against GNSS Outage Final R&D Report  
Research on Korean DME/DME Alternative Position and Navigation

보안 과제( ), 일반 과제( √ ) / 공개( √ ), 비공개( )  
국토교통기술촉진연구사업 2018 연도 최종보고서

R&D /  
16CTAP-C11490  
8-01

# 위성항법 이용불능에 대비한 DMD/DME 기반 한국형 대체 항법시스템 네트워크 기초연구 최종보고서

2018 . 7 . 20 .

주관연구기관 / 청주대학교

국토교통부  
국토교통과학기술진흥원

## 제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

‘위성항법 이용불능에 대비한 DMD/DME 기반 한국형 대체 항법시스템 네트워크 기초연구’(연구개발 기간 : 2016.6.22 ~ 2018.6.21) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2018 . 7 . 20 .

주관연구기관명 : 청주대학교 산학협력단 단장 노 근 호



주관연구기관책임자: 조 환 기

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

## 보고서 요약서

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                       |                                                   |                              |                 |                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 16CTAP-C11<br>4908-01 | 해당 단계<br>연구 기간                                    | 2017.06.22. ~<br>2018. 06.21 | 단계구분            | 2016.06.22. ~<br>2018. 06.21                        |
| 연구사업명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 중사업명                  | 국토교통기술촉진연구사업                                      |                              |                 |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 세부사업명                 | 창의도전연구분야                                          |                              |                 |                                                     |
| 연구과제명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 대과제명                  |                                                   |                              |                 |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 세부과제명                 | 위성 항법 이용불능에 대비한 DMD/DME 기반 한국형 대체 항법시스템 네트워크 기초연구 |                              |                 |                                                     |
| 연구책임자                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 조환기                   | 해당단계<br>참여<br>연구원 수                               | 총: 7 명<br>내부: 2 명<br>외부: 5 명 | 해당단계<br>연구개발비   | 정부: 53,000천원<br>기업: 천원<br>정부 외: 천원<br>계: 53,000 천원  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                       | 총 연구기간<br>참여<br>연구원 수                             | 총: 9 명<br>내부: 4 명<br>외부: 5 명 | 총 연구개발비         | 정부: 110,000천원<br>기업: 천원<br>정부 외: 천원<br>계: 110,000천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 청주대학교 산학협력단           |                                                   |                              | 참여기업명: 없음       |                                                     |
| 국제공동연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 상대국명: 없음              |                                                   |                              | 상대국 연구기관명: 없음   |                                                     |
| 위탁연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 연구기관명: 없음             |                                                   |                              | 연구책임자: 없음       |                                                     |
| 본 연구는 위성 항법시스템 이용불능시 대체 항법으로 사용될 수 있는 DME 장비의 거리측정 정확도를 개선하고 한국 지형에 최적화된 DME 지상장비 네트워크 분포 설계를 연구목표로 하였다. DME 장비의 거리측정 정확도 향상을 위해 Multipath에 강인한 SFOL 펄스파형을 유전자 알고리즘을 이용하여 개발하였다. SFOL 펄스는 Multipath에 대하여 기존 가우시안 DME 파형보다 4.5배, SELEX 사의 SCP 펄스에 2.5배 강인함을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 또한 SFOL 펄스는 기존 DME 펄스 국제규격을 준수하며 1,000 Watt로 출력 가능하므로 기존 펄스와 비교할 때 동일한 전파 Coverage를 제공한다. 또한 Binary Integer Linear Programming 기반 센서 네트워크 최적화 알고리즘을 개발하여 SFOL 펄스를 탑재한 DME 장비를 사용할 때 한국지형에 0.3 NM 의 DME/DME 위치측정 정확도를 제공하는 지상 네트워크 분포를 설계하였으며 한국 지형 조건에 적합한 DME/DME 기반 대체 항법시스템 구축방안을 제시하였다. |                       |                                                   |                              | 보고서 면수: 38 page |                                                     |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |      |      |      |  |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|--|
| 연구의<br>목적 및 내용            | <p>전파교란이나 간섭(jamming or interference)으로 위성항법 시스템이 이용불능일 때 미국 연방항공청이 기준으로 고려하는 대체 항법시스템 성능을 제공해주며 한국 지형에 최적화된 거리측정장치(Distance Measuring Equipment, DME) 네트워크 형태 개발에 관한 기초연구를 진행하였다. 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 기존 DME 펄스보다 거리측정 정확도를 향상시키는 펄스파형을 개발하였고 DME 네트워크 형태(geometry) 최적화 알고리즘을 개발하여 현재 분포된 국내 공항 위치를 최대한 이용하며 새로운 DME 지상장비 부지 추가를 최소화하는 효율적인 지상 DME 네트워크 형태를 설계하였다.</p> |      |      |      |  |
| 연구개발성과                    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 거리측정 정확도를 향상시키는 SFOL DME 펄스 파형 개발.</li> <li>2. 한국 상황에 최적화된 지상 DME 네트워크 (0.3NM) 형태 개발.</li> <li>3. 국내 특허 등록 1 (SFOL 펄스), 국내 특허 출원 1 (Dual Operation of SFOL Pulse and Gaussian Pulse), PCT 국제 특허 출원 1 (SFOL 펄스).</li> <li>4. SCI(E) 학술지 2편 출간.</li> <li>5. 국외 학술대회 2편의 논문 발표.</li> </ol>                                                     |      |      |      |  |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <p>SFOL DME 펄스파형은 미래 대체 항법시스템의 원천기술로 SFOL 펄스가 적용된 DME 지상 장비 및 항공기 전자장비(avionics)의 시제품 개발과 상용화를 꾀할 수 있고 SFOL 펄스 파형을 DME 장비의 국제표준으로 추진해 국제 DME 관련 기술과 시장을 주도할 수 있다. 한국 상황에 최적화된 DME 네트워크는 DME 기반 대체 항법시스템 인프라 구축 비용을 산출할 수 있는 기초 자료가 되며 이를 토대로 대체 항법용 DME 네트워크의 실현성을 타진할 수 있다. 무엇보다 이 연구는 앞으로 위성항법 교란에 대비한 항공기 대체 항법시스템이 부재한 한국에서 DME 기반 대체 항법시스템 구축 분석의 시작점이 될 것이다.</p>                |      |      |      |  |
| 핵심어<br>(5개 이내)            | 거리측정장치                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 항공항법 | 대체항법 | 위성항법 |  |

## 〈 SUMMARY 〉

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                        |                           |                               |  |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------|--|
| <b>Purpose &amp; Contents</b> | The objective of the research is to investigate a DME network based Alternative Position and Navigation system for aircraft during GNSS outage due to jamming or interference. The current DME network in South Korea will be optimized to provide 1NM/0.3NM horizontal positioning accuracy that is Federal Aviation Administration's desired positioning accuracy for a GNSS backup system. The research is also to develop an innovative DME pulse shape by using Genetic Algorithms. During the research, we developed SFOL DME pulse which significantly exceeds the distance measuring accuracy of existing DME pulses. We also designed an optimized DME network layout in Korea that maximized the use of the existing airport infrastructure and minimized the number of newly required DME sites. |                        |                           |                               |  |
| <b>Results</b>                | 1. Development of SFOL DME pulse<br>2. Development of an optimized DME network layout in Korea<br>3. Domestic patent registration 1 (SFOL pulse), Domestic patent application 1 (Dual operation of SFOL pulse and Gaussian pulse), PCT international patent application 1 (SFOL pulse)<br>4. Publication of two SCI(E) papers<br>5. Two International conference presentations                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                        |                           |                               |  |
| <b>Expected Contribution</b>  | The SFOL DME pulse will be an important future aircraft navigation technology. The related patents and the development of the SFOL pulse based DME ground stations and avionics could help to grow domestic aerospace industries. The optimized DME network layout could be used for the estimation of the overall cost necessary to build the DME network infrastructure. Most of all, this research will be an important starting point in developing the DME network based alternative position and navigation capability for aircraft during GNSS outage that South Korea does not possess at this time.                                                                                                                                                                                                |                        |                           |                               |  |
| <b>Keywords</b>               | DME                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Aircraft<br>Naivgation | Alternative<br>Navigation | Satellite based<br>Navigation |  |

## < Contents >

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Overview of the research project .....                          | 6  |
| 2. Current status of related technologies .....                    | 11 |
| 3. Research approach and outcomes .....                            | 13 |
| 4. Research outcome and impact evaluation .....                    | 28 |
| 5. Plans on utilization of research outcomes .....                 | 30 |
| 6. Information on foreign technology related to the research ..... | 30 |
| 7. Security level on the research outcomes .....                   | 32 |
| 8. Research facility or equipment registered in NTIS .....         | 33 |
| 9. Safety issue on laboratory during the research .....            | 34 |
| 10. Publications and patents list out of the research .....        | 35 |
| 11. Other issues .....                                             | 36 |
| 12. References .....                                               | 37 |

## < 목 차 >

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....                       | 6  |
| 2. 국내외 기술 개발 현황 .....                     | 11 |
| 3. 연구 수행 내용 및 성과 .....                    | 13 |
| 4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....               | 28 |
| 5. 연구개발성과의 활용 계획 .....                    | 30 |
| 6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....           | 31 |
| 7. 연구개발성과의 보안등급 .....                     | 32 |
| 8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 .....    | 33 |
| 9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ..... | 34 |
| 10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 .....               | 35 |
| 11. 기타 사항 .....                           | 36 |
| 12. 참고 문헌 .....                           | 37 |

## 제1장. 연구개발과제의 개요

### 1. 연구개발 목적

전파교란이나 간섭(jamming or interference)으로 위성항법 시스템이 이용불능일 때 미국 연방항공청이 기준으로 고려하는 대체 항법시스템 성능을 제공해주며 한국 상황에 최적화된 거리측정장치(Distance Measuring Equipment, DME) 네트워크 형태 개발에 관한 기초연구를 진행한다. 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 기존 DME 펄스보다 거리측정 정확도를 향상시키는 펄스 파형을 개발하고 DME 네트워크 형태(geometry) 최적화 알고리즘을 개발하여 현재 분포된 국내 공항 위치를 최대한 이용하며 DME 지상 장비의 개수를 최소화하는 효율적인 지상 DME 네트워크 형태를 설계한다.

### 2. 연구개발의 필요성

#### ○ GNSS의 활용과 전파 교란

GPS를 포함한 위성항법 시스템은(Global Navigation Satellite Systems, GNSS) 현재 군사 및 민간 산업 모든 분야에서 가장 널리 쓰이는 위치측정 센서이다. 일반 차량의 내비게이션에서부터 초정밀 정확도와 높은 안전성을 요구하는 항공기 착륙에 이르기까지 GNSS의 사용은 전 산업에 걸쳐 점점 증가하는 추세이다. 하지만 GNSS의 의도적 전파 교란(jamming)도 점차 지능적이고 강력해지고 있다 [1-3]. 그림 1은 미국 온라인 유통 사이트인 ebay에서 손쉽게 살 수 있는 개인용 GPS 교란 장치와 강력한 러시아산 군용 GPS 교란기기를 보여준다. 불행히도 한국은 전 세계에서 GNSS 전파교란에 가장 노출된 나라중의 하나이다. 북한의 GNSS 전파교란 능력은 이미 잘 알려졌고 2010년 이후부터 한국은 북한의 GNSS 전파교란 공격 때문에 항공기와 선박 통제에 큰 혼란을 겪은 바 있다 (그림 2 참조)[4].

이러한 GNSS 전파교란의 위험에도 불구하고 미래 항공통제에 있어서 GNSS의 의존도는 더 높아질 전망이다. 한 예로 미국의 Next Generation Air Transportation System (NextGen)은 미래 항공기 운항의 원활한 통제를 위해서 GNSS를 현재보다 더 적극 사용할 방침이다 [5]. 한국도 앞으로 늘어날 항공기 운항의 효율적 통제를 위해 초정밀 위성항법(Korean Space-based Augmentation System, SBAS)을 개발 중에 있다 [6]. 이러한 경향은 미국과 한국뿐만 아니라 세계 각국 민간 항공관리국(civil aviation administration)의 계획과도 일치한다. 전 세계 항공운항에서의 GNSS 사용은 단순한 RNAV(Area Navigation)에만 그치지 않고 SBAS와 Ground-based Augmentation System(GBAS)를 이용한 non-precision approach, precision approach 및 자동 착륙에 까지 이르고 있다.

#### ○ GNSS 교란에 대비한 항공기용 대체 위치측정 시스템 개발

이처럼 항공기 운항이나 추적에 있어서 GNSS 역할의 중요성은 이루 말할 수 없기에 FAA는 대규모 GPS 전파교란 공격에 대비한 대체 위치 및 시간 측정(Alternative Position, Navigation, and Timing Service 또는 APNT) 시스템을 2010년부터 연구하고 있다(그림 3 참조) [1-3]. 현재 FAA APNT의 기본 방향은 GPS 이용불능 시 기존의 지상기반 항법시스템(Terrestrial-based navigation aids)을 이용하여 항공기를 근처 공항으로 안내하는 것이다. FAA의 APNT 위치측정 정확도는 1 NM 또는 0.3 NM (수평 정확도, 95%)으로 규정될 것으로 예상된다.

FAA가 현재 APNT로 고려중인 지상기반 항법시스템은 크게 다음과 같은 두 가지로

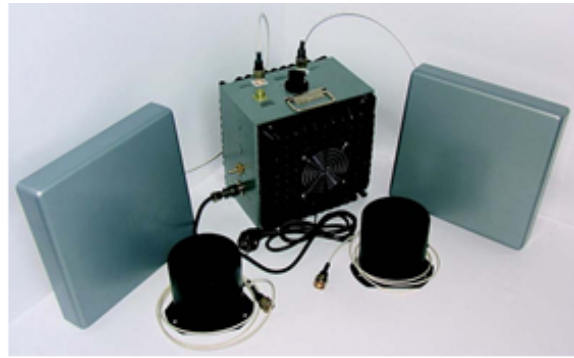
- Passive Wide-Area Multilateration (WAM) 또는
- 거리측정 장치(Distance Measuring Equipment, DME)네트워크 이다.

#### ■ Passive WAM 운영 방식

Multilateration은 공항 주변의 항공기 경로 추적 및 감시 시스템으로 사용되어 왔다. 공항 주변의 좁은 지역에서 쓰이는 방식을 넓은 지역에서 사용할 수 있도록 개선한 것이 WAM이다. WAM은



(a) 개인용 GPS jammer

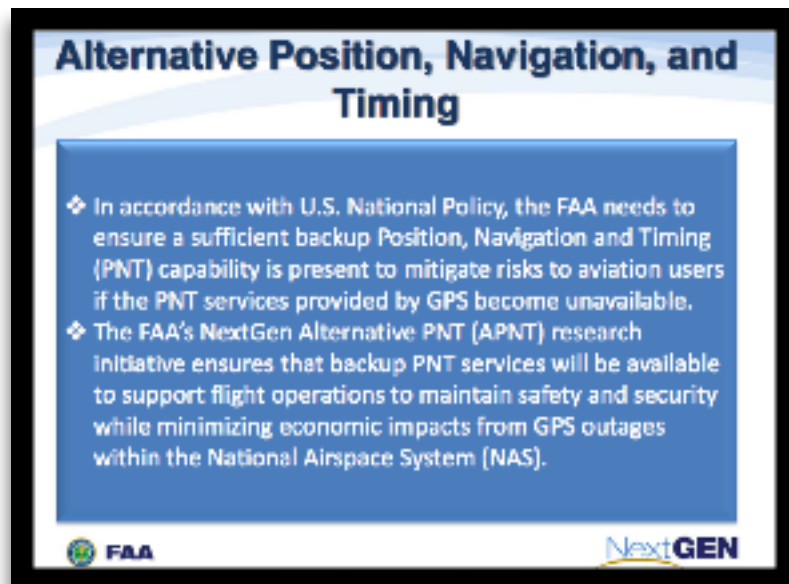


(b) 러시아산 군용 GPS jammer

[그림 1] GPS 교란 장치는 군용에서 민간용으로 확산될 만큼 일반적인 기술이 되었다.



[그림 2] 2011년도와 2012년도의 북한 GPS 교란 사례 [4].



[그림 3] 미국 연방항공청의 대체 위치 및 시간 측정 시스템 개발 설명 (2012 3월 FAA APNT Industry Day).

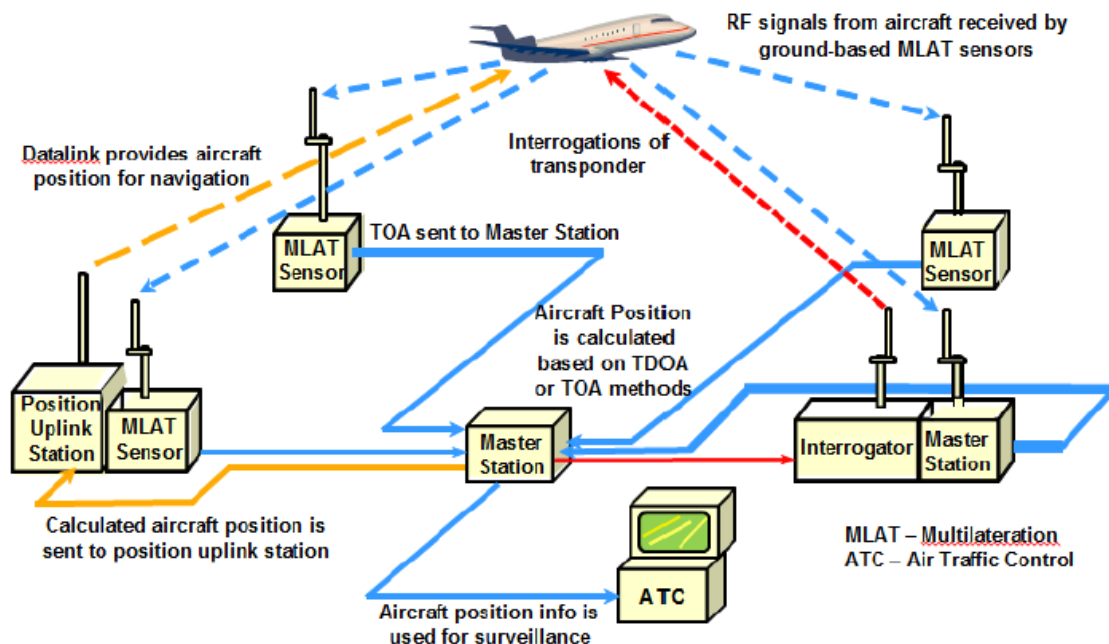
Active와 Passive 방식으로 나뉘는데 Active 방식은 지상에서 요청(interrogation)신호를 보낼 때만 항공기에서 응답신호를 보낸다. Passive 방식은 특별한 경우를 제외하곤 지상에서 요청신호를 보내지 않는다. WAM에서 쓰이는 신호는 항공기에 탑재된 Avionics에 따라 다른데 보통

1090ES(Extended Squitter)나 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast(ADS-B) 신호를 이용한다 [7]. 항공기는 매 1초마다 이 두 가지 중 한 신호를 송신하며 이 신호는 지상 항공기 감시 수신기(MLAT Sensor)에 도착한다. 수신기는 이 신호를 받은 시각과 항공기 ID를 중앙처리기지(Master Station)로 보내고 여기서 항공기 위치를 Time Difference of Arrival(TDOA) 방식으로 계산하며 이를 다시 항공기에 보내는 방식이다 (그림 4 참조).

#### ■ DME 네트워크 운영 방식

DME 네트워크를 이용한 위치측정 방식은 DME/DME라 불린다. 이 방식에서 항공기 DME Avionics는 먼저 지상 DME에 요청신호를 보내고 지상 DME 장비가 응답신호를 보낸다. DME Avionics는 요청신호를 보내는 시간에서부터 응답신호를 받는 시간을 측정하고 이를 이용하여 항공기와 지상 DME 장비의 거리측정을 한다 (그림 5 참조). DME에서 쓰이는 요청신호는 WAM과 달리 한 쌍의 펄스를 이용한다. DME 펄스는 국제 표준으로 정해져 있으며 어떤 펄스 형태를 쓰는가에 따라 거리측정 정확도가 달라진다. 기존의 일반적인 펄스형태는 가우시안(Gaussian)으로 다른 DME 장비에 대한 주파수 간섭이 작은 특성이 있지만 완전한 펄스 상승시간(rise time)으로 인해 잡음과 다중반사파의 영향을 많이 받는다. 따라서 가우시안 펄스의 거리측정 오차는 제조사마다 다르지만 현재 성능이 우수한 지상 장비는 약 100m 정도의 오차를 제공하고 있다 [8].

DME/DME는 항공기가 두 개 이상의 DME로부터 거리측정이 이루어지면 DME 지상 장비의 위치를 이용하여 Tri-lateration 방식으로 항공기 위치를 측정한다. 전통적인 DME/DME 항법 방식은 주로 Enroute에 쓰였기 때문에 100m 거리측정 오차와 이에 뒤 따르는 몇 백 미터의 수평 위치 측정 오차는 큰 문제가 되지 않았다. DME/DME 운영을 위하여 미국 전역에 1100 여개의 DME 지상 장비가 현재 설치되어 있지만 여전히 많은 지역에 Coverage Gap이 존재한다. 이러한 이유로 APNT 운영을 위해서 800 여개의 ADS-B 장비가 설치된 곳에 DME를 설치하는 것도 고려중이다 (그림 6 참조).

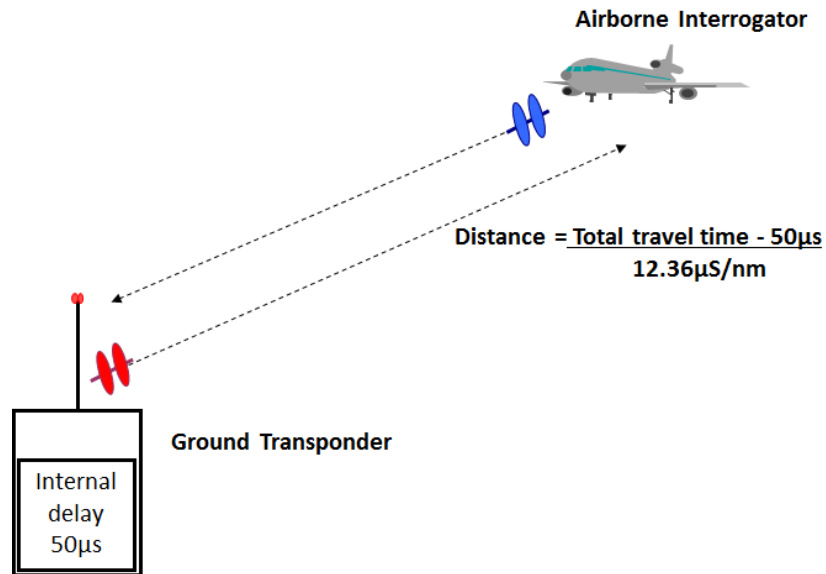


[그림 4] Passive WAM 항공기 추적 및 대체 항법시스템 구조 [7]

#### ■ DME 네트워크와 Passive WAM 비교

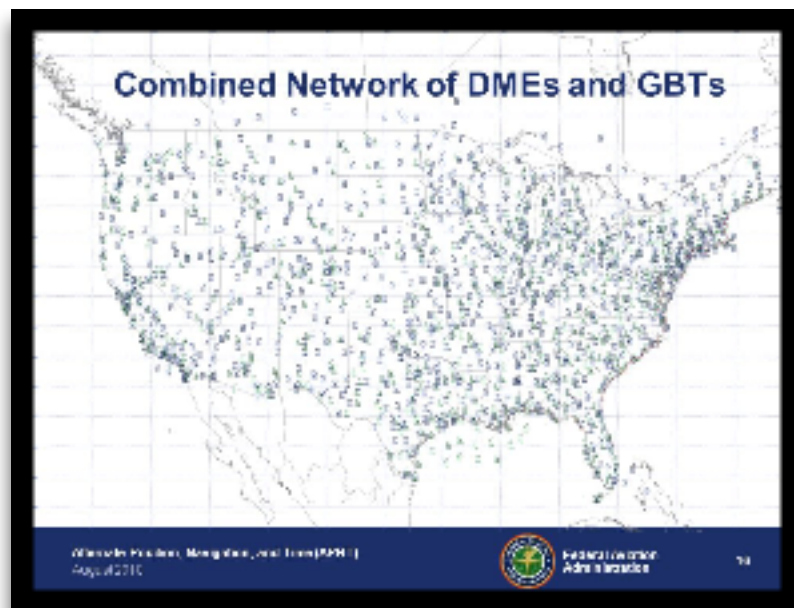
일반적인 Multilateration은 항공기 추적에 사용되어 왔기 때문에 지상 중앙처리기지에서 계산된 항공기 위치정보는 항공통제에 이용되며 항공기에 따로 이 위치 정보를 전달해 주진 않는다. 따라서 중앙처리기지에서 신호를 받고 그 위치를 조종사나 Auto Pilot에 전달해 줄 수 있는 Avionics 제품은 현재 존재하지 않는다. 하지만 기술적으로 어려운 것이 아니기 때문에 저비용의

하드웨어 추가와 ADS-B Avionics 소프트웨어 업그레이드만으로 그러한 기능을 추가할 수 있을 것이다. 따라서 DME Avionics가 없고 ADS-B 기기만 가지고 있고 대부분의 소형항공기(General Aviation) 소유자들은 Passive WAM 방식을 DME 네트워크 방식보다 더 선호하고 있다. Passive WAM 방식은 위치 정보를 다시 항공기에 전달해 주는 방식임으로 이러한 보안에 철저해야 하는 부담이 있다.



[그림 5] 두 개의 펄스를 이용한 DME 거리측정 방식

DME/DME는 현재 미국 FAA가 고려하는 가장 유력한 APNT 시스템이고 한국에도 항공기에 가장 적합한 APNT라 할 수 있다. 그 첫 번째 이유는 대부분의 대형 항공기들이 이미 DME avionics 장비를 갖추고 있다는 것이다. 새로운 장비의 구입과 장착에 걸리는 시간은 항공기 운항 회사(airliners)들에겐 큰 부담이 되기에 항공기 운항 회사들은 DME/DME를 APNT로 지지하고 있다. 두 번째 이유는 위치측정의 보안성이다. DME/DME에선 항공기가 직접 자신의 위치를 계산하는 방식이므로 이러한 보안 문제가 일어나지 않는다. 소형항공기 소유자가 적고 북한의 전파교란과 보안침투 능력을 감안할 때 DME/DME 방식이 한국 상황에 더 적합한 APNT 시스템이라 할 수 있다.



[그림 6] 미국 전역에 설치된 1100 여개의 DME (□) 와 800 여개의 ADS-B Ground Based Transceivers (GBT, ▽)

---

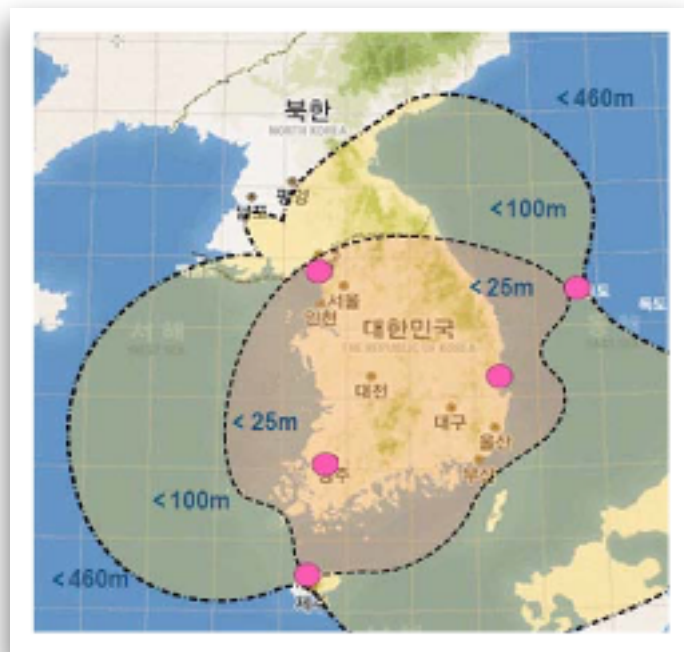
### 3. 연구개발 범위

- DME 거리측정 정확도를 예측하는 시뮬레이터를 Matlab 소프트웨어를 사용하여 구축한다. DME 펄스는 International Civil Aviation Organization(ICAO)에서 정한 규격을 맞춰야 하는데 그 첫 번째 규격은 펄스 파형 형태에 관련한 것으로 ICAO에서 정한 상승시간(rise time), 폭(width), 하강시간(fall time)의 범위를 만족시켜야 한다. 또 다른 규격은 펄스의 형태가 초래하는 주파수대에서의 power spectrum 분포가 다른 DME channel의 운영을 방해하지 않도록 ICAO에서 정한 허용치를 넘지 말아야 한다. 유전자 알고리즘을 이용하여 이 두 가지 기본적인 조건을 만족시키며 거리정확도가 뛰어난 DME 펄스형태를 찾는다.
  - FAA는 92.6m(95%) 수평위치 정확도를 GNSS 대체 위치측정시스템의 기준 정확도로 삼으려 하였지만 기존 DME 장비의 제약으로 1NM/0.3NM 정확도를 사용할 예정이다. 이러한 경향을 참고하여 한국의 지형조건에 최적화된 DME 네트워크 형태와 수평위치 정확도를 찾는다. 최적화된 DME 네트워크를 개발하기 위해서 센서 네트워크 최적화 알고리즘의 선행 연구를 토대로 DME 지상 장비 네트워크 최적화 알고리즘을 Matlab 소프트웨어를 이용하여 구축한다. 이 알고리즘은 기존 공항 부지를 최대한 이용하여 새로운 부지를 구입하는 비용을 최소화하는 네트워크 형태를 찾을 것이다.
-

## 제2장. 국내외 기술 개발 현황

### ○ 국내 현황

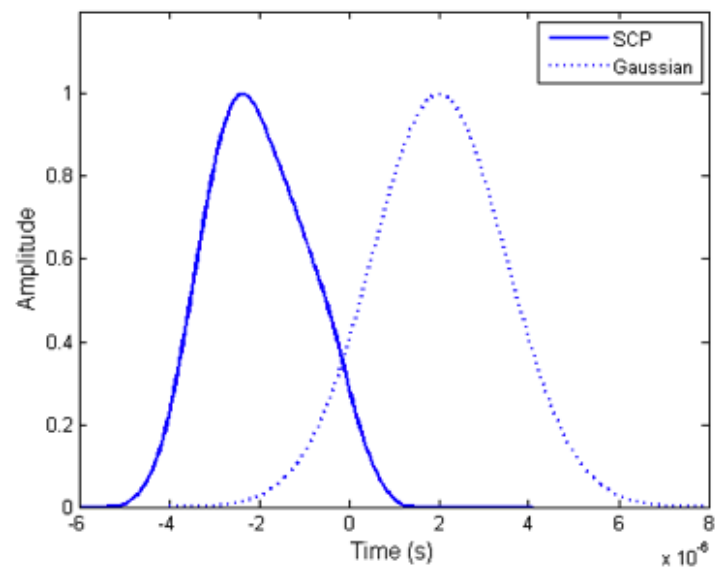
국내에선 한국공항공사가 DME를 생산판매하고 있지만 새로운 DME 펄스파형이나 네트워크 최적화에 대한 연구는 진행되고 있지 않는 것으로 보인다. 대신 한국 정부는 대체 위치측정 시스템의 한 방식으로 2013년에 enhanced-Long Range Network (e-Loran) 연구개발 프로그램을 발표하였다(그림 7 참조) [4]. Loran은 1950년도부터 선박항해에 전통적으로 쓰인 시스템이며 e-Loran은 Loran의 성능을 월등히 개선한 시스템으로 한국에서는 위치 정확도를 20미터 까지 향상시킬 예정이다. 한국뿐만 아니라 유럽, 미국에서도 e-Loran을 APNT로 사용하려는 의견들이 있지만 현재 저주파를 사용하는 e-Loran의 특성상 수신기나 안테나 크기가 매우 큰 단점이 있다. 따라서 e-Loran은 항공기 보단 선박항해에 주로 쓰일 예정이고 한국에서도 해양수산부를 중심으로 e-Loran 연구개발이 이루어지고 있다.



[그림 7] 대한민국에서 예상되는 e-Loran 위치정확도 [4].

### ○ 국외 현황

미국 FAA는 최근 DME를 2030년경 까지 단기간의 대체 항법시스템으로 사용할 것으로 발표했다 [9]. DME가 단기간 동안만 대체 항법시스템으로 지정된 가장 큰 이유는 GNSS 에 비해 현저히 떨어지는 위치측정 정확도 때문일 것으로 여겨진다. DME의 위치측정 정확도를 향상시키기 위해선 거리측정 정확도를 높여야 한다. 거리측정 성능을 높이는 가장 현실적인 방법은 DME 장비의 펄스 파형을 바꾸는 것이며 펄스 파형의 변화는 DME 장비의 소프트웨어나 firmware 업그레이드로 가능하기 때문이다. 이에 연관된 연구로 미국 SELEX사에서 Smoothed Concave Hexagonal Pulse (SCP)를 개발하였고 특허를 출원하였다 (그림 8 참조). SCP 펄스 파형은 기존 DME 장비에서 가장 널리 쓰이는 가우시안 펄스 파형보다 30% 정도 향상된 거리측정 성능을 나타내며 DME 펄스 파형 관련 국제 표준을 다 만족시키기에 모든 DME 장비와 호환되는 장점이 있다.



[그림 8] SELEX사의 SCP 펄스와 전통적인 Gaussian 펄스의 비교

---

### 제3장. 연구 수행 내용 및 성과

#### 1. 유전자 알고리즘을 이용한 DME 펄스파형 개발

##### 가. 국제 DME 지상장비 펄스파형 규격

DME 펄스는 International Civil Aviation Organization(ICA0)에서 정한 규격을 맞춰야 하는데 그 첫 번째 규격은 펄스 파형 형태에 관련한 것으로 ICA0 및 미국연방항공청에서 정한 상승시간(rise time), 폭(width), 하강시간(fall time)의 범위를 만족시켜야 한다. 또 다른 규격은 펄스의 형태가 초래하는 주파수대에서의 power spectrum 분포가 다른 DME channel의 운영을 방해하지 않도록 ICA0에서 정한 허용치를 넘지 말아야 한다. DME 지상장비의 펄스파형은 규격은 그림 9에 정리되어 있다.

| Pulse Shape Parameters | Range                                                                                          |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rise Time              | 2.5 (+0.5, -1.0) $\mu$ s                                                                       |
| Pulse Top              | No instantaneous fall below a value which is 95% of the maximum voltage amplitude of the pulse |
| Pulse Duration (width) | 3.5 ( $\pm$ 0.5) $\mu$ s                                                                       |
| Fall Time              | 2.5 ( $\pm$ 0.5) $\mu$ s                                                                       |

[그림 9] 미국연방항공청의 DME 펄스파형 규격 [10]

##### 나. 유전자 알고리즘을 이용한 펄스파형 개발

유전자 알고리즘은 찰스 다윈의 진화론에 근거한 heuristics를 사용하는 최적화 방법이다. 최적화 문제에선 흔히 gradient descent나 dynamic programming과 같은 방법을 사용하지만 이와 같은 방법들은 로컬 미니мум이 수없이 존재하는 복잡한 문제에선 만족할 만한 성능을 줄 수 없다. 유전자 알고리즘은 로컬 미니мум에 수렴하지 않고 글로벌 optimum을 찾을 확률이 크기에 여러 분야에서 각광받는 최적화 알고리즘이기도 하다.

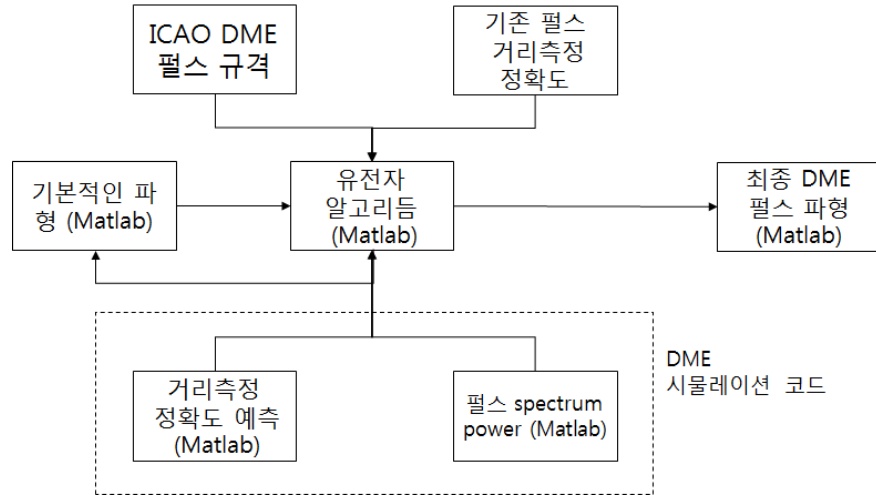
유전자 알고리즘은 DNA로 구성된 염색체 집단을 수천세대 동안 진화시키는 방식으로 최적화 문제에 접근한다. 이때 염색체가 곧 최적화 문제의 해가 되며 세대가 진화될수록 염색체가 글로벌 optimum에 가깝도록 변형된다. 예를 들면 염색체는 (x,y) 좌표값으로 나타내거나 항공기 날개 모양같은 형상으로 표현될 수 있다. 유전자 진화를 위해서 일반적으로 아래와 같은 6가지 절차가 필요하다 [11].

- initial population
- fitness evaluation
- natural selection
- paring and mating
- mutation
- termination

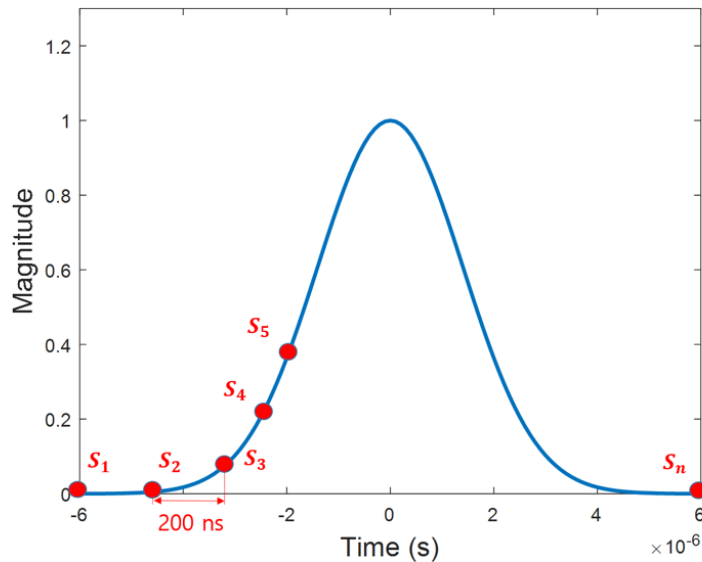
Initial population은 일반적으로 random 값으로 생성된 수백 개의 염색체로 구성된다. Fitness evaluation은 각 염색체의 우열을 가리는 함수를 이용하여 판단되며 우성과 열성을 가진 염색체를 natural selection에서 선택한다. 선택된 염색체는 다음 세대를 생성하는 부모의 역할을 하여 다음 세대를 만드는데 이 때 우수한 염색체와 열성인 염색체의 DNA가 복합적으로 구성된 다음 세대가 만들어진다. 생성된 다음 세대 중의 일부는 변이과정을 통해 부모에게 물려받지 않은 다른 DNA를 보유하기도 한다. 이러한 과정을 수천 수만번 거치면서 글로벌 optimum에 가까운 염색체를 만들게 된다.

유전자 알고리즘을 이용하여 펄스파형 규격을 만족시키며 거리정확도가 뛰어난 DME 펄스형태를 찾기 위해 그림 10 과정이 이용되었다. 유전자 알고리즘은 Matlab toolbox를 사용하였고 DME 시뮬레이터는 Matlab 소프트웨어를 이용하여 본 연구팀이 개발하였다. 유전자 알고리즘을 이용하기 위해선 먼저 펄

스형태 자체를 염색체로 모델링해야 한다. 본 연구에서는 normalized 된 펄스진폭의 크기를 유전자로 사용하고 연속된 유전자 벡터가 한 염색체를 구성하도록 하였다 (그림 11).



[그림 10] 유전자 알고리즘을 이용한 DME 펄스 파형 개발 과정



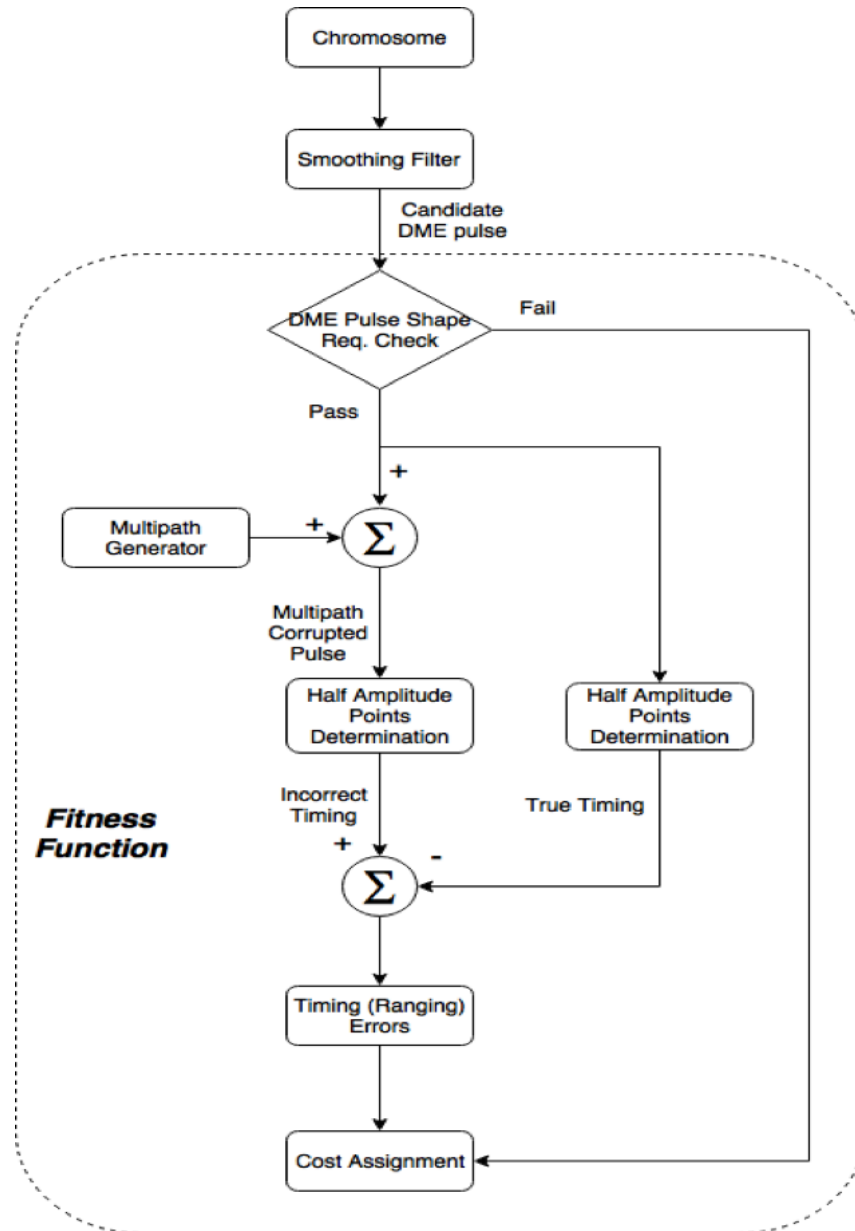
[그림 11] 펄스 진폭을 유전자로 모델링하여 펄스파형 염색체 구성

염색체 성능의 우열을 가리는 적합도 (fitness) 함수 정의와 평가방법 (evaluation)에 따라 진화과정의 결과물이 달라져 유전자 알고리즘의 핵심 과정이라 할 수 있다. 본 연구에서는 그림 12의 알고리즘 수행도에 나온 적합도 함수와 평가과정을 개발하였다. 염색체의 적합도를 평가하기 위해서 일련의 multipath가 염색체 펄스에게 주입되고 이 결과로 야기되는 거리측정 오차를 평가점수로 산정하는 방식이다. 그림 13은 일반적인 유전자 알고리즘 과정과 제안된 적합도 함수를 적용했을 때에 생성되는 DME 펄스파형의 개발과정을 보여주고 그림 14는 최종 수렴된 SFOL 펄스파형을, 그림 15는 SFOL 펄스를 기존 가우시안 및 SCP 펄스와 비교하였다 [12].

#### 다. SFOL 펄스 성능분석

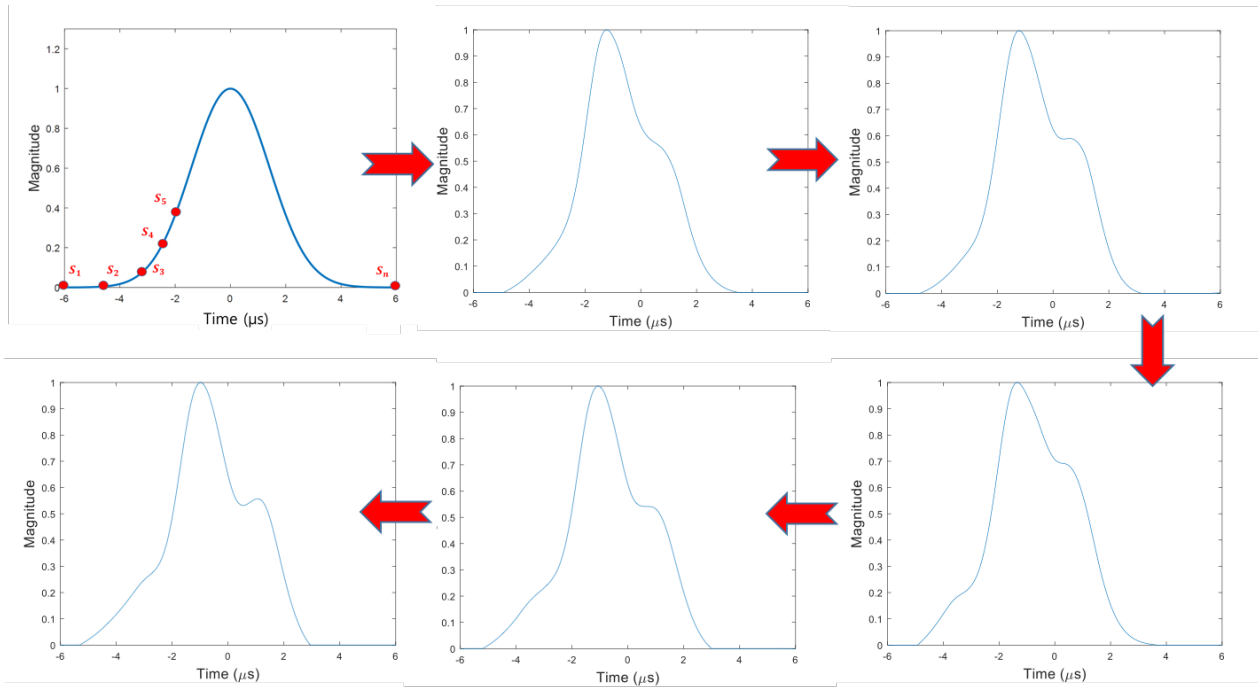
SFOL 펄스의 상승시간은  $2.8 \mu s$ , 폭은  $3.4 \mu s$ , 하강시간은  $3.0 \mu s$  으로 ICAO/FAA DME 펄스파형 규격을 만족시키며 그림 16에 보이는 것과 같이 1000 watt transmission power 에도 spectrum ERP 규격

을 (0.8 MHz 에 23 dBm, 2.0 MHz에 3 dBm 기준) 만족시킨다.

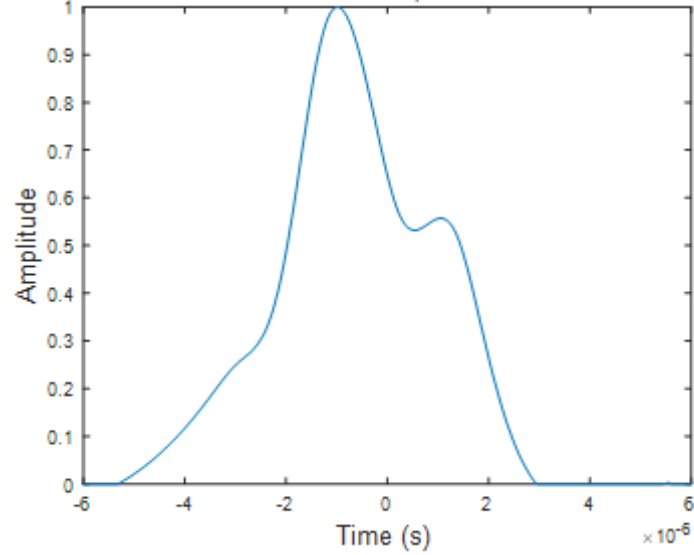


[그림 12] 염색체 적합도 함수와 평가방법 수행도

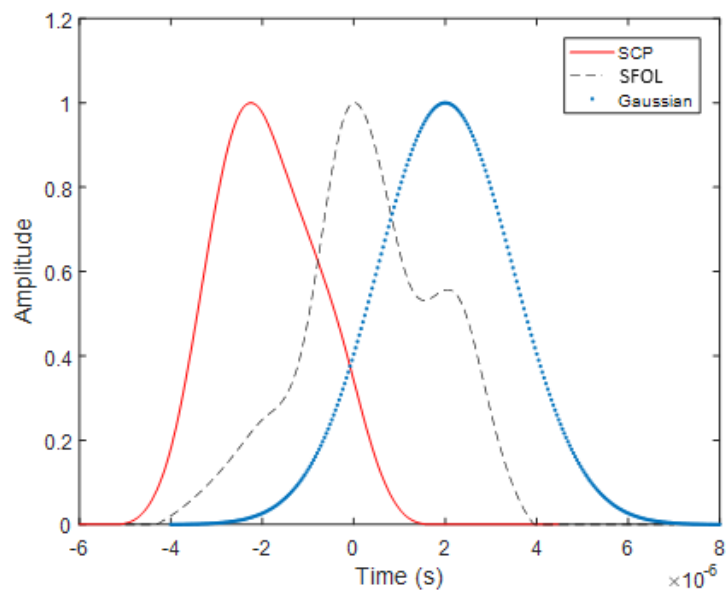
SFOL 펄스 형태는 기존 DME 펄스파형과 비교하여 multipath에 강인함을 가지고 있다. 그림 17과 그림 18은 direct pulse 와 multipath 가 1:0.3 비율이고 multipath 가 1.2  $\mu$ s delay를 가질 때에 송출된 펄스파형이 왜곡되어 발생하는 거리측정 오차를 보여준다. 이 multipath 조건에 가우시안 펄스는 47.6 미터의 거리오차를 생성한 반면 SFOL 펄스는 -3.41 미터의 오차를 유도하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 SFOL 펄스 형태는 multipath에 대해 펄스 상승곡선의 왜곡이 적은 특성을 가지고 있다. DME 거리측정은 송출된 펄스의 상승곡선 50% 지점을 기준으로 결정되기에 상승곡선의 형태보존이 거리측정 정확도에 직접적인 영향을 미치고 따라서 상승곡선의 왜곡이 적은 SFOL 펄스가 multipath에 강인할 수밖에 없다. 그림 19는 SFOL, 가우시안, SCP 펄스에 위와 같은 조건의 multipath를 in-phase 와 out-phase 로 각각 주입하고 시간 delay를 변경시켰을 때의 거리측정 오차를 보여준다. 그림 19의 거리측정 오차 통계는 그림 20에 요약되어 있다.



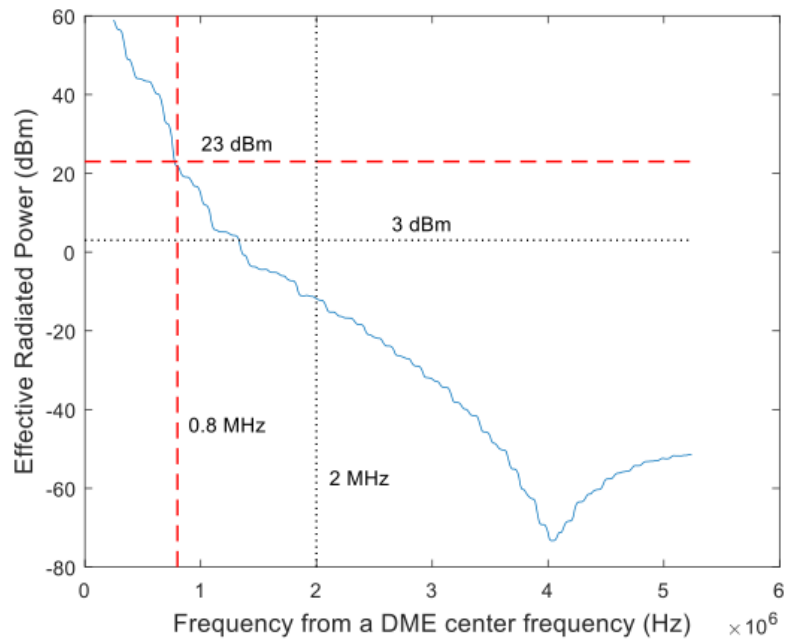
[그림 13] 유전자 알고리즘을 적용한 펄스파형 개발과정



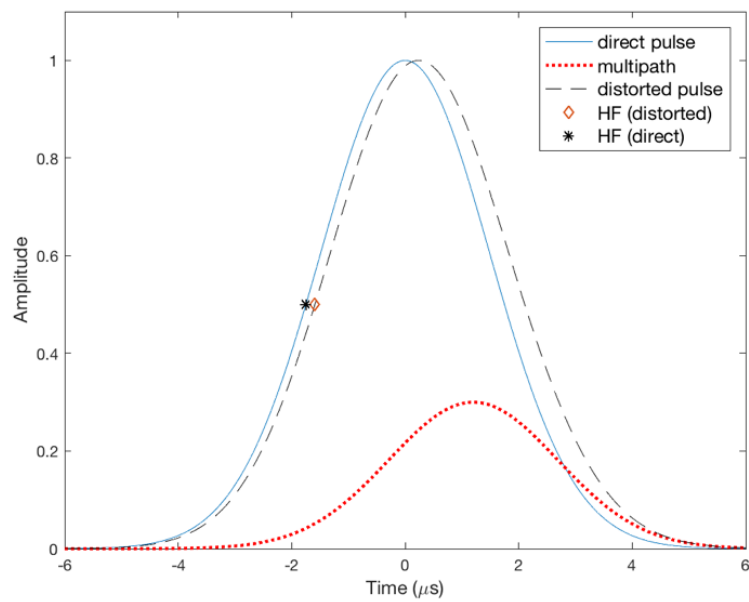
[그림 14] 유전자 알고리즘을 이용해 개발한 SFOL 펄스



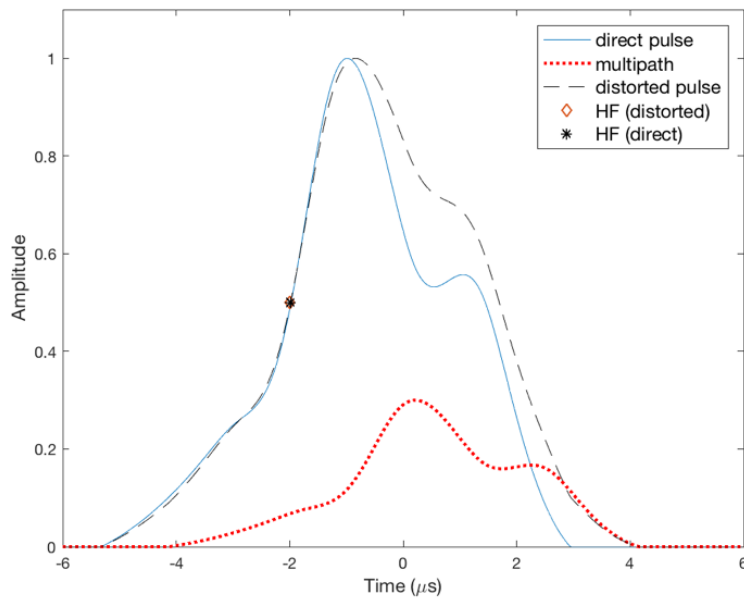
[그림 15] 왼쪽부터 SCP, SFOL, 그리고 가우시안 DME 펄스



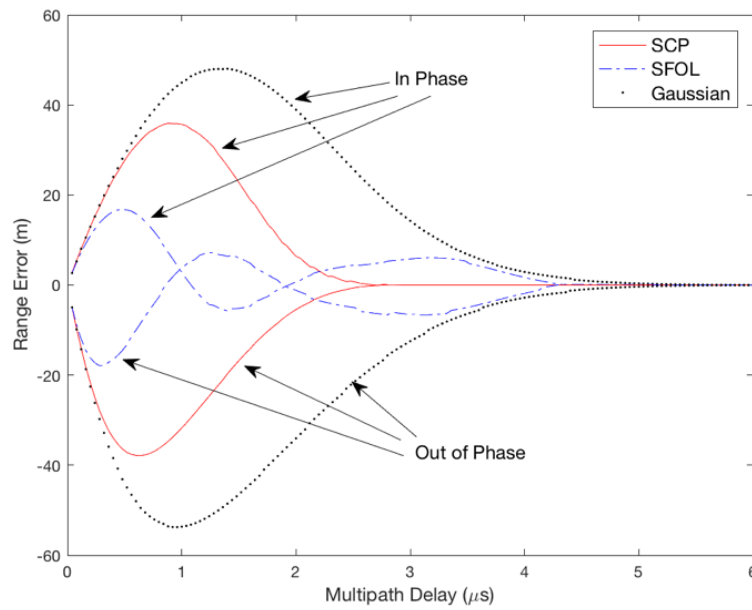
[그림 16] SFOL 펄스 Effective Radiated Power 와 국제 표준 규정 (0.8 MHz에서 23 dBm, 2 MHz에서 3 dBm)



[그림 17] 주입된 multipath에 Gaussian 펄스는 47.6 미터의 거리오차를 생성함



[그림 18] 주입된 multipath에 SFOL 펄스는 -3.41 미터의 거리오차를 생성함



[그림 19] SFOL, 가우시안, SCP 펄스의 multipath 에 대한 거리측정 오차

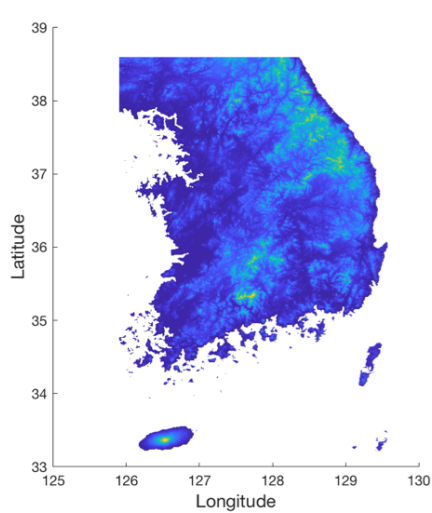
| Pulse Error | RMS (m) | Maximum in Phase (m) | Maximum out of Phase (m) |
|-------------|---------|----------------------|--------------------------|
| Gaussian    | 26.1    | 48.0                 | -53.75                   |
| SCP         | 14.9    | 35.9                 | -37.9                    |
| SFOL        | 5.9     | 16.8                 | -17.9                    |

[그림 20] SFOL, 가우시안, SCP 펄스의 multipath 에 대한 거리측정 오차 통계

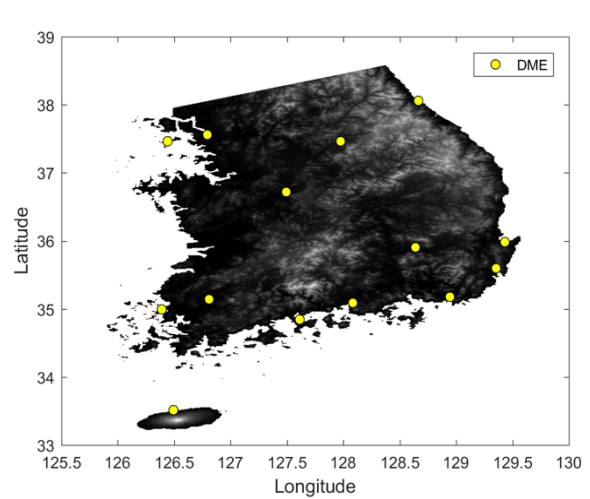
## 2. SFOL 펄스 DME를 이용한 지상장비 네트워크 최적화 방안 개발

### 가. 한국 지형의 디지털 맵, DME 설치공항 및 구역조사

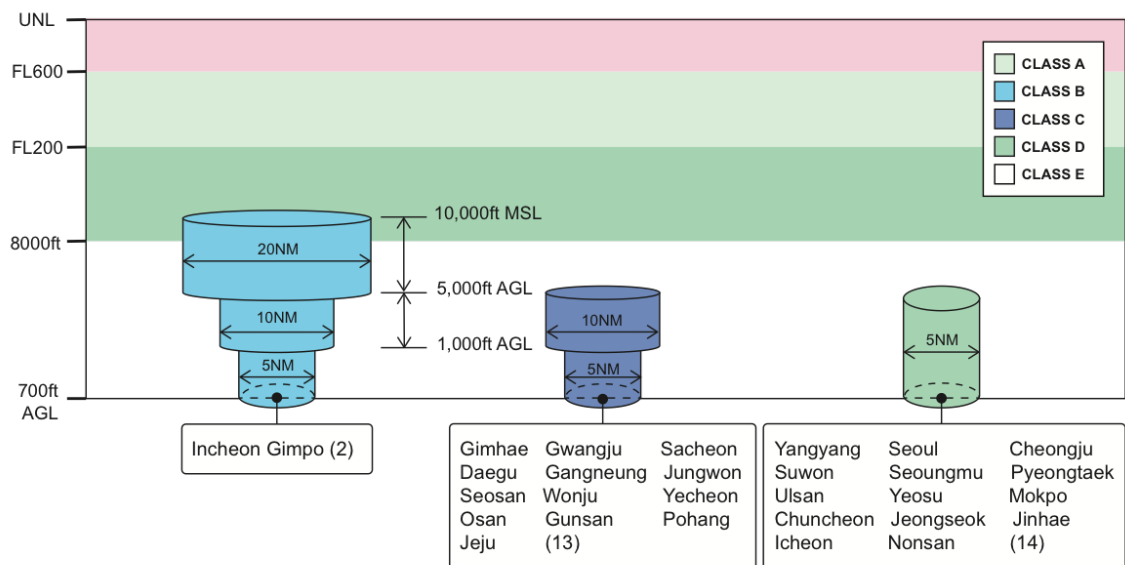
국내 지형을 포함한 GTOP040 디지털 지도를 입수하여 (그림 21) 지상과 항공기간의 line-of-sight 분석에 사용하였고 국내 14개 민간공항에 설치된 DME 위치를 파악하고 (그림 22) 구역조사를 하여 비행구간을 정하였다 (그림 23).



[그림 21] 한국지형 고도를 담은 GTOP 40 디지털 맵



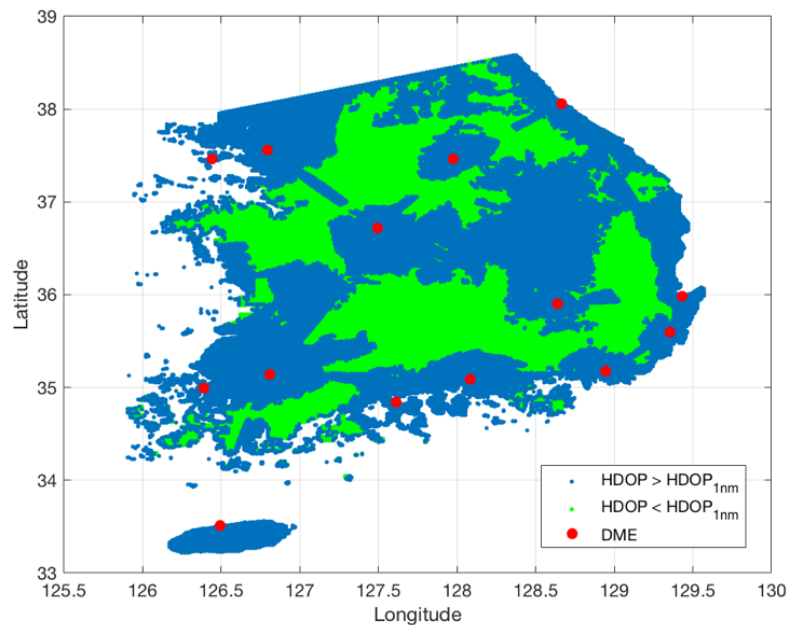
[그림 22] 14개 민간공항의 DME 설치 위치



[그림 23] 한국의 공항과 구역정의

#### 나. 기존 DME 네트워크의 coverage 조사

여러 문헌 및 인터넷 검색을 통하여 대한민국 14개 민간공항에 각 1개의 DME가 설치되어 있음을 조사하였고 14개의 민간공항 외에도 10여개의 군/민간 겸용 VORTAC이 설치되어 있어 DME 서비스를 제공하고 있다. 현재 설치된 DME는 공통적으로 가우시안 펄스를 사용할 것으로 예상되며 FAA의 선행연구를 참조하여 가장 최근의 DME는 70 미터의 거리측정 정확도를 가질 것으로 예상된다. 항공기에 사용되는 DME/DME 항전장비는 최대 3개의 DME 까지 tracking 할 수 있다고 가정하였다. 이러한 가정과 DME 위치, 한국지형 디지털 지도와 공역을 참조하고 14개의 DME를 사용하여 수평위치측정 정확도 1NM의 coverage를 그림 24와 같이 측정할 수 있었다. Coverage를 생성하기 위해 한국공역을 1 KM씩 위도 경도로 나눠 그리드를 생성하였으며 그리드의 고도는 공역의 정의에 따라 지정되었다. 각 그리드에서 line-of-sight 안에 있는 DME는 Matlab radio propagation toolbox를 사용하였고 이 때의 수평위치 정확도는 Dilution of Precision 과 거리측정 정확도를 곱하여 산출하였다. 각 그리드에서 산출된 수평위치 정확도가 요구되는 위치측정도보다 높으면 coverage로 지정된다. 그림 24에서 볼 수 있듯이 현재 한국 DME 네트워크는 높은 수평위치측정 정확도가 요구되는 공항주변에서는 대부분 1NM 정확도에 미치지 못하고 있다.



[그림 24] 기존 DME 지상장비의 DME/DME 수평위치측정 정확도 1NM coverage 분석

#### 다. 고정밀도 DME/N 개발 방안

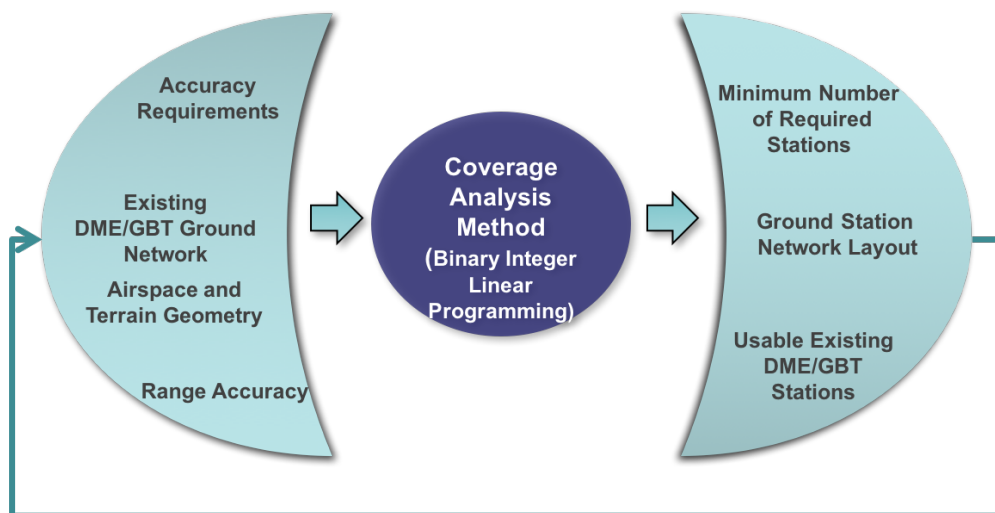
그림 24에서 볼 수 있듯이 여러 지역에서 1NM coverage gap 이 존재한다. 이러한 coverage gap을 줄이기 위해선 DME 지상장비의 개수를 증가하고 거리측정 정확도를 향상시키는 방법이 있을 수 있다. SFOL 펄스는 multipath의 영향을 줄여 거리측정 정확도를 향상시키지만 펄스 자체가 해결할 수 없는 시스템 bias들이 각 장비마다 존재해 이를 해결해 주어야만 더 나은 거리측정 정확도를 얻을 수 있다. 따라서 SFOL 펄스를 송출하는 미래 DME는 여러 bias 요소들과 thermal noise 등을 DME/P 장비 수준으로 줄이면 DME/N 으로서 DME/P와 유사한 고정밀 DME를 개발할 수 있다. 그림 25는 SFOL 펄스 기반 고정밀 DME (HA DME/S) 의 거리측정 정확도 budget 과 양방향 거리측정 정확도 (26.7 미터, 95%)를 보여준다. 현재 가우시안 DME의 거리측정 정확도를 70 미터로 볼 때 약 2.5배 이상 향상된 정확도를 얻을 수 있다.

| Error Sources       | HA DME/S (m) |
|---------------------|--------------|
| Transponder bias    | 10.0         |
| Avionics bias       | 15.0         |
| Multipath (m/d=0.3) | 17.8         |
| Thermal Noise       | 8.4          |
| Total (95%)         | 26.7         |

[그림 25] SFOL 펄스 기반 고정밀 DME 거리측정 정확도 Budget

#### 라. DME 네트워크 최적화 알고리즘

대체항법에 요구되는 위치측정 정확도를 제공하기 위한 DME 네트워크 구성의 기본 원칙은 기존 DME 설치를 최대한 유지하여 새로운 DME 설치와 부지를 최소한으로 하는 것이다. 이러한 네트워크 기본 원칙은 수학적 최적화 알고리즘을 요구하기에 본 연구는 기 개발된 Binary Integer Linear Programming을 이용한 Coverage Analysis Method 기법을 [13] 한국지형에 무리없이 적용할 수 있도록 알고리즘을 개선하였다. 그림 26은 Coverage Analysis Method의 전체 프로세스를 보여주는데 이 기법은 위치정확도 요구사항, 기존 DME 설치위치, 지형, 공역, DME 장비의 거리측정 정확도 등을 constraint으로 사용하여 위치측정 정확도를 제공하는 최소한의 DME 지상장비 개수, 형태 및, 현재 설치된 지상장비 부지 중 사용가능한 부지를 출력물로 제공한다.

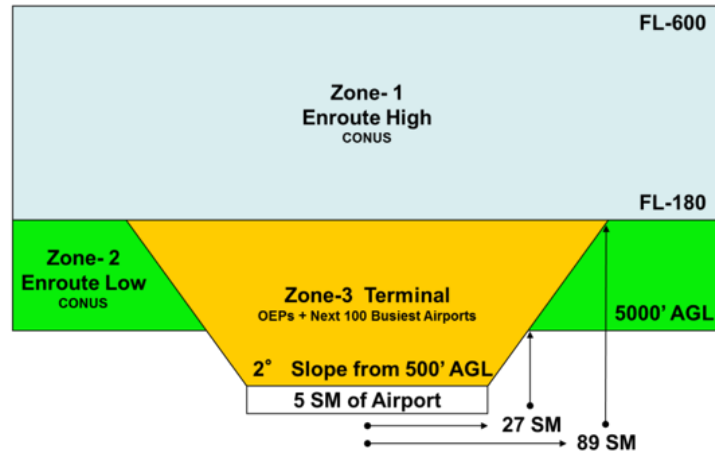


[그림 26] Coverage Analysis Method 프로세스의 입력 및 출력 항목

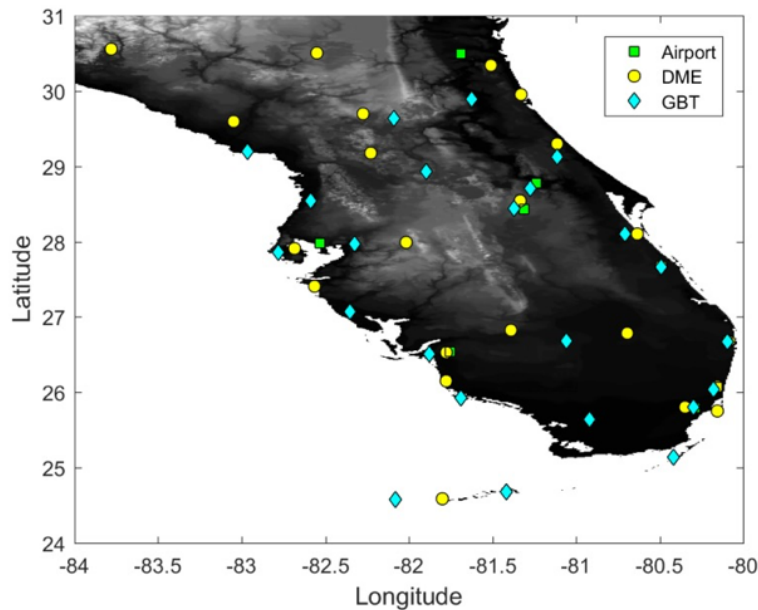
Binary integer linear programming 기법은 DME coverage 분석에 사용된 Matlab radio signal propagation toolbox를 사용하여 지상 및 공역 그리드의 line-of-sight 관계를 산출한다. 한 공항 주변 공역 그리드에서 line-of-sight 안에 있는 지상 그리드 최소 거리 조건을 만족시키는 2~3개의 DME를 선택한 후 이 기지국들이 제공되는 coverage를 산출한다. 만약 coverage에서 제외된 공역 그리드가 존재하면 이 공역 그리드를 위해 새로운 DME를 추가하고 이 같은 방법을 반복하여 모든 공역 그리드가 coverage 안에 있도록 지상 네트워크를 만든다. 전체적인 search가 반복되어 진행될수록 보다 적은 수의 네트워크 형태가 찾아지며 최적화 과정을 수행한다. 보다 상세한 네트워크 디자인 방법과 linear programming에 필요한 수학적 공식은 참고문헌 [13]에서 찾을 수 있다.

마. DME 네트워크 최적화 사례 1: 미국 플로리다 지역

미국 플로리다 지역은 평지에 가까운 지형을 가지고 있어 항공기와 지상 DME와의 line-of-sight에 제약이 거의 없어 적은 수의 지상 DME 로도 위치측정 정확도를 높일 수 있다. 그림 27 은 미국 FAA의 대체항법시스템 공역 정의를 나타낸다 [1]. 그림 28 은 미국 플로리다 지역의 8개의 국제공항, 23개의 DME, 23 개의 ADS-B GBT 설치 부지를 보여준다. ADS-B GBT 부지는 FAA의 소유는 아니지만 DME 추가 설치가 가능한 지역으로 FAA 발표하였다.



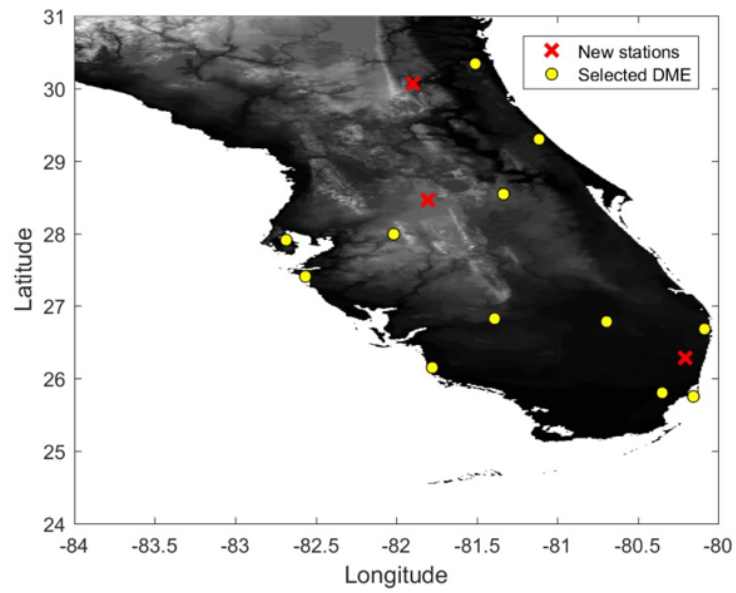
[그림 27] FAA 의 대체항법 공역정의



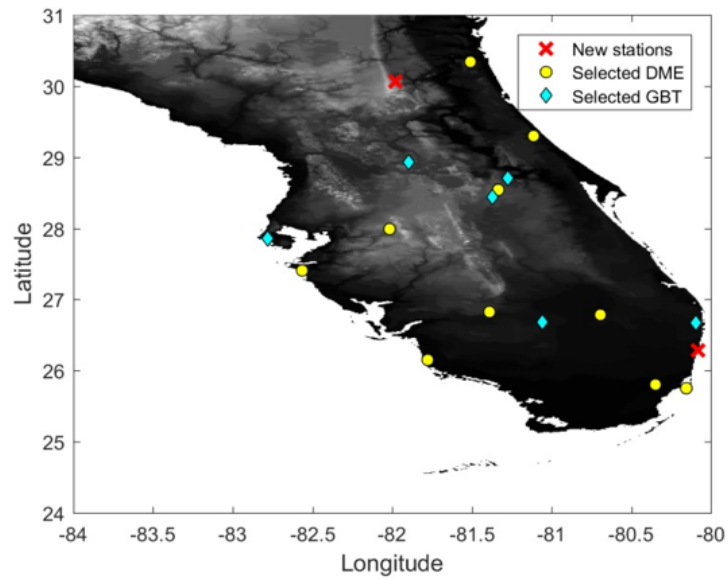
[그림 28] 미국 플로리다 지역의 국제공항, DME, GBT 부지 위치

그림 29 는 플로리다 지역 공역에 0.3 NM 수평위치 정확도를 제공하는 DME 네트워크 형태이다 [14]. 총 12 개의 DME 가 필요하며 그 중 3개의 새로운 설치부지를 요구하는데 이는 공항 저고도 공역에 0.3 NM 정확도를 제공하기 위해 필요한 부지이다.

그림 30은 92.6 미터의 수평위치를 제공하는 DME 네트워크로 총 16개의 DME 부지를 사용하지만 그 중 14개의 기존 부지가 포함되어있어 경제적으로도 부담이 되지 않는 네트워크 형태라 할 수 있다 [14].



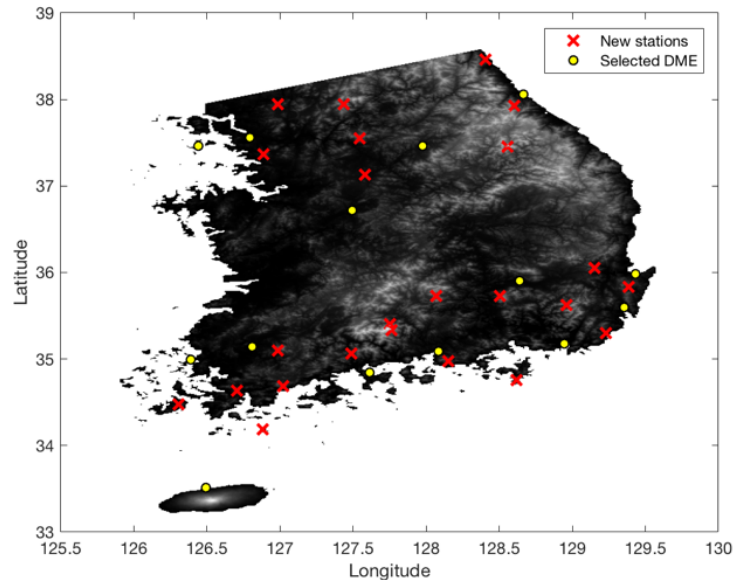
[그림 29] 미국 플로리다 지역에 0.3 NM 수평 위치 정확도를 제공하는 DME 네트워크



[그림 30] 미국 플로리다 지역에 92.6 미터 수평 위치 정확도를 제공하는 DME 네트워크

#### 바. DME 네트워크 최적화 사례 2: 대한민국 지역

미국 플로리다 지역은 대부분 평지이기에 SF0L DME를 사용하면 16개의 DME 부지로도 92.6 미터의 수평위치 정확도를 제공할 수 있었다. 하지만 그림 21에서 보듯이 대한민국은 0에서 1800 미터에 이르는 지형의 변화를 가지고 있고 이는 항공기와 지상장비와의 line-of-sight을 방해하여 DME 신호의 원활한 수신을 방해하는 큰 요소가 된다. 그림 31은 0.3 NM 수평위치 정확도 제공에 필요한 DME 네트워크 형태를 보여주며 기존 14개의 DME 와 더불어 총 37개의 DME 가 요구된다. 따라서 23 개의 새로운 DME 설치 부지가 필요하며 만약 92.6 미터의 수평위치 정확도가 요구된다면 23 개 보다 많은 새로운 DME 설치 부지가 필요할 것이기에 한국 지역 공역전체에 92.6 미터 DME/DME 수평위치 정확도를 제공하는 사실상 불가능 할 것으로 예상된다.



[그림 31] 한국 공역에 0.3 NM 수평위치 정확도를 제공하는 네트워크 형태

#### 사. 성과

SF0L 펄스의 우수성 및 상업성을 인정받아 국내특허 1건 등록뿐 아니라 청주대학교 산학협력단의 지원으로 PCT 국제 특허 출원 1건을 진행하였다. SF0L DME 개발 및 상용화에 필요한 dual operation of SF0L and Gaussian pulse 관련 국내 특허 출원 1건도 완료되었다. 펄스 디자인 관련 국제저명 SCI 논문 2편을 출간하였고 2 번의 국제학회에서 (2017 ICNS, 2018 IEEE/ION PLANS) 본 과제의 연구결과를 발표하였다. 2017 Integrated Communication Navigation and Surveillance (ICNS) 국제학회에서는 Best Session Paper로 선정되었다. 또한 국내 DME 제조업체와 프랑스 Thales 사와의 시제품 제작도 현재 논의 중이다.

### 3. 후속연구

본 연구과제를 수행한 후 제안된 펄스 형태를 송출하는 시스템과 네트워크 구축을 위해 다양한 후속연구가 필요하다.

#### 가. 대한민국 지형에 적합한 대체항법 구역 설정 및 DME 네트워크 구축 방향 제안

한국 지역의 험란한 지형 특성상 구역 전체에 0.3 NM 이상의 수평위치 정확도를 공급하는 것은 막대한 지상장비 구축비용이 요구되기에 현실적으로 실현되기 어려울 것으로 보인다. 하지만 현재 대부분의 항공기 항로는 그림 32에서 보듯이 4개의 항로가 사용되고 있다. 따라서 대체항법을 위한 DME 네트워크 서비스 구역을 이 4개의 항로 근방으로 제한 한다면 보다 효율적인 DME 네트워크를 구축할 수 있을 것이다. 구역 설정과 이에 연관된 DME 네트워크 구축 방안은 이 과제의 연구목표에서 벗어나므로 후속연구를 통해 진행될 것이다.

본 연구의 네트워크 최적화는 민간공항 14개만을 사용하였지만 아래 표에 나타난 9개의 군/민간 겸용 VORTAC을 사용하면 새롭게 요구되는 부지를 줄일 수 있을 것이다. 이외에도 새롭게 추가되는 DME와 본 연구에 파악되지 못한 DME 부지가 있다면 대체항법용 지상 네트워크 요구를 완화시키는데 사용가능 할 것이다.

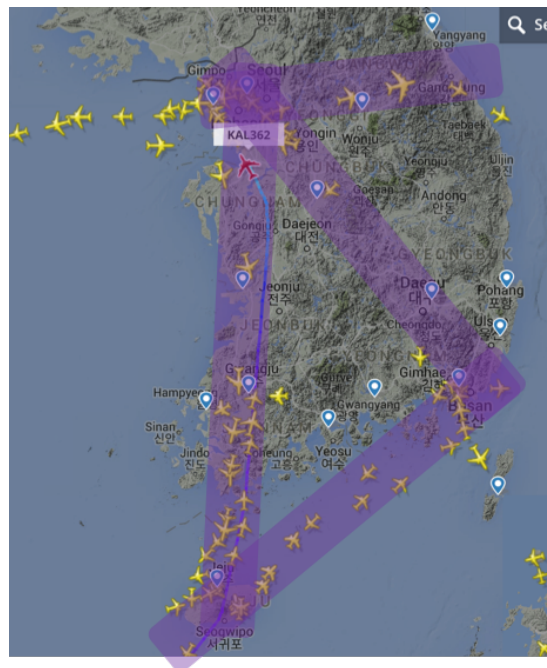
| 기지국 | ID  | 주파수                    | 운용시간 | 위치                  | 안테나 고도<br>(FT AMSL) |
|-----|-----|------------------------|------|---------------------|---------------------|
| 안양  | SEL | 115.5 MHz<br>(CH 102X) | H24  | 372449N<br>1265542E | 900                 |
| 부산  | PSN | 114.0 MHz<br>(CH 87X)  | H24  | 350721N<br>1285958E | 1900                |
| 달성  | TGU | 112.2 MHz<br>(CH 59X)  | H24  | 354835N<br>1283527E | 2200                |
| 강원  | KAE | 115.6 MHz<br>(CH 103X) | H24  | 374203N<br>1284514E | 3400                |
| 군산  | KUZ | 112.8 MHz<br>(CH 75X)  | H24  | 355437N<br>1263641E | 0                   |
| 광주  | KWJ | 1009 MHz<br>(CH 88X)   | H24  | 350713N<br>1264802E | 100                 |
| 제주  | CJU | 116.1 MHz<br>(CH 108X) | H24  | 332305N<br>1263727E | 2800                |
| 포항  | KPO | 112.5 MHz<br>(CH 72X)  | H24  | 355838N<br>1292828E | 800                 |
| 송탄  | SOT | 116.9 MHz<br>(CH 116X) | H24  | 370540N<br>1270154E | 100                 |

#### 나. DME/S 개발을 위한 pre-distortioner 알고리즘 개발

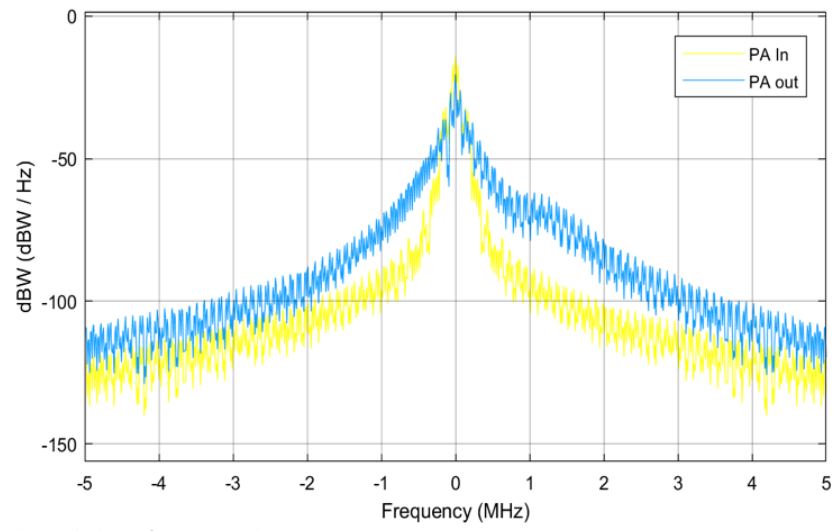
SFOL 펄스는 DME 표준에서 허락하는 대부분의 spectrum power를 사용한다. 실제 시스템에서 펄스가 송출될 때 power amplifier를 사용하여 송출 power를 1,000 watt 까지 증폭시켜야 하는데 power amplifier 통과 시 펄스 형태가 왜곡되고 이에 따라 원치 않는 spectrum power도 증가한다. 이러한 현상 때문에 송출된 SFOL 펄스가 DME 표준에서 정한 spectrum power 한계를 초과하거나 출력 power를 줄여 coverage가 줄어드는 단점이 생길 수 있다. 또한 펄스형태의 왜곡은 SFOL 펄스가 원래 제공하는 거리측정 정확도를 줄일 수 있는 가능성도 있다. 그림 33은 power amplifier 시뮬레이션을 통해 SFOL power spectrum이 증가하는 현상을 (spectrum regrowth) 보여준다. 이러한 spectrum regrowth를 줄이기 위해 이동통신 분야에서는 펄스 형태를 미리 왜곡해서 power amplifier 통과 후 원하는 펄스 형태를 얻는 pre-distortioner 방법을 일반적으로 사용하고 있고 SFOL 펄스 사용을 위해선 pre-distortioner 알고리즘이 후속연구를 통해 개발되어야 한다.

#### 다. 시제품 개발, 국제협력 및 해외시장 개척 전략

개발된 pre-distortioner를 이용하면 빠른 시일 내에 시제품 개발이 가능할 것이다. 펄스 형태 개발 이론과 더불어 성능이 향상된 시제품 개발은 제안된 방식을 검증하는 데에 반드시 필요하며 미국연방항공청과 ICAO에 DME/S를 새로운 운영 방식으로 제안할 수 있는 근거가 된다. 개발된 시제품을 이용하여 국내에 시범 네트워크를 구축 및 점검기를 이용한 비행 테스트 후 추가적인 연구를 진행할 수 있으며 대체항법 기술을 찾고 있는 미국연방항공청과 유럽항공청에 시제품을 보내 국제공동 연구와 해외 테스트베드를 이용한 비행실험도 진행할 수 있을 것이다. 이러한 시제품을 통한 성능 검증 노력과 국제 공동연구는 DME/S와 SF0L 펄스의 상용화를 앞당길 뿐만 아니라 국제표준 지정에도 도움이 될 것이다. DME/S 방식의 국제 표준 지정은 우리나라 항공기술의 위상을 높일 뿐만 아니라 모든 항공기에 제안된 기술을 사용해야 하므로 관련 국내 항전산업의 활성화에 기여할 수 있을 것이다. 나아가 기존 국제기구 DME 신호규격 완화 시 보다 정밀한 펄스를 개발할 수 있을 것으로 기대한다. 다만 스펙트럼 규격 완화에 따른 지상 기지국 서비스 coverage 축소가 예상되는데 위치측정 정확도와, 지상 네트워크 형태, coverage 등의 복합적 연구를 진행하여 현재 규격을 최소한으로 완화하면서도 위치측정 정확도를 높일 수 있는 방안도 연구할 것이다.



[그림 32] 한국 지역 공역에 사용되는 4개의 대표적 항로



[그림 33] SFOL 펄스가 power amplifier 통과 시 발생하는 spectrum regrowth 현상 (시뮬레이션)

---

## 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 1. 목표 달성도

본 연구과제의 제안시 설정한 연구목표는 아래 표에 요약되었다.

| 구분    | 내용                                                                                                                                                                                                     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 최종 목표 | 전 파교란이나 간섭(jamming or interference)으로 위성항법 시스템이 이용불능 일 때 미국 연방항공청이 기준으로 고려하는 대체 항법시스템 성능(수평 위치 정확도 92.6 미터)을 제공해주며 한국 상황에 최적화된 DME 네트워크 개발.                                                            |
| 세부 목표 | 1. 기존 DME 장비에 널리 쓰이는 가우시안 펄스와 최근 개발된 SELEX사의 SCP 펄스 보다 거리측정 정확도가 높은 GA 파형을 유전자 알고리즘을 이용하여 개발.<br>2. 한국 상황에 최적화된 지상 DME 네트워크 형태(geometry) 개발로 기존 공항에 설치된 DME를 최대한 이용하며 새롭게 필요한 추가적인 DME 부지의 개수를 최대한 줄임. |

세부 목표 1: SF0L 펄스는 SELEX 사의 SCP 펄스 보다 62.5% 향상된 거리측정 정확도를 제공한다 (목표 달성도 100%)

세부 목표 2: DME 네트워크 최적화 알고리즘을 개발 및 사용하여 0.3 NM 수평위치 정확도를 제공하는 한국 지형에 최적화된 DME 네트워크 형태를 개발하였다. 이 네트워크 형태는 기존 공항의 DME를 모두 사용하며 새롭게 추가되는 DME 설치 부지를 최소한으로 억제하는 알고리즘에 의해 개발 되었다 (목표 달성도 100%).

다만 최종 목표에서 수평위치 정확도 92.6 미터를 목표로 하였지만 미국 플로리다 지역과 달리 한국의 험란한 지형은 92.6 미터 수평위치 정확도를 달성하기에 현실적으로 불가능한 것을 분석을 통해 제시하였다.

과제 제안시 목표한 성과목표는 아래 표와 같고 실제 달성한 성과는 ( ) 안에 표시되었으며 총 점수는 9점을 달성하여 목표치를 만족시켰다.

| 성과지표               | 성과 목표               | 최소 성과 목표 |
|--------------------|---------------------|----------|
| SCI(E)급 학술지 게재(2점) | 2건 (2)              | 1건       |
| 일반학술지게재(1점)        | 3건 (0)              | 2건       |
| 특허출원(1점)           | 1건 (2)              | 1건       |
| 특허등록(2점)           | (1)                 |          |
| 디자인 등록(1점)         |                     | 1건       |
| 소프트웨어(1점)          |                     |          |
| 하드웨어(1점)           |                     |          |
| 기타(1점)             | 디지털 GA 펄스 파형 1건 (1) |          |
| 소계(점수)             | 8점 (9)              | 5점       |

---

## 2. 관련 분야 기여도

본 과제의 연구 결과물인 SFOL 펄스는 국내외 DME 제조사로부터 상업화 관심 및 문의를 받고 있으며 본 과제 실적인 SFOL 관련 SCI 저널은 출간 후 10개월의 짧은 기간에도 2편의 SCI 저널에 citation 되었다. 2편의 저널은 아래와 같다.

- Park, K.; Lee, D.; Seo, J. Dual-polarized GPS antenna array algorithm to adaptively mitigate a large number of interference signals. *Aerospace Science and Technology* **2018**, 78, 387.

- Schneckenburger, N.; Fiebig, U.-C.; Lo, S.; Enge, P.; Lilley, R. Characterization and Mitigation of Multipath for Terrestrial based Aviation Radionavigation. *Navigation* **2018**.

이외에 관련연구는 아래 4편의 해외학술대회지에 citation 되었다.

- Son, Pyo-Woong, et al. "Preliminary study of multichain-based Loran positioning accuracy for a dynamic user in South Korea." *Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2018 IEEE/ION*. IEEE, 2018

- Kim, Euiho, and Hwankee Cho. "High accuracy SFOL DME/N pulse and its recommended implementation in South Korea for alternative aircraft navigation." *Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2018 IEEE/ION*. IEEE, 2018.

- S. Lee and J. Seo, "IR-UWB radar-based near-field head rotation movement sensing under fixed body motions," *2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, Honolulu, HI, 2018, pp. 1-3.

- G. Battista, R. Kumar, O. Osechas and B. Belabbas, "New APNT ranging signals as an opportunity for rationalizing ground infrastructure," *2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, VA, 2018, pp. 4D1-1-4D1-11.

특히 독일항공우주국은 (DLR; German Aerospace Center) 본 연구에서 제안된 alternative DME 펄스와 DLRI 자체 개발중인 대체항법인 LDAC1을 합친 hybrid system을 2018 ICNS 학회 (미국 Herdon, VA) 에서 발표하였다.

DME 제조업체로는 프랑스 Thales 와 국내 모피언스가 SFOL 펄스 기반 DME 시제품 개발에 관심을 보였다. 위 citation 과 여러 기관의 관심으로 볼 때 본 연구가 대체항법분야에 상당한 기여를 하였다고 사료된다.

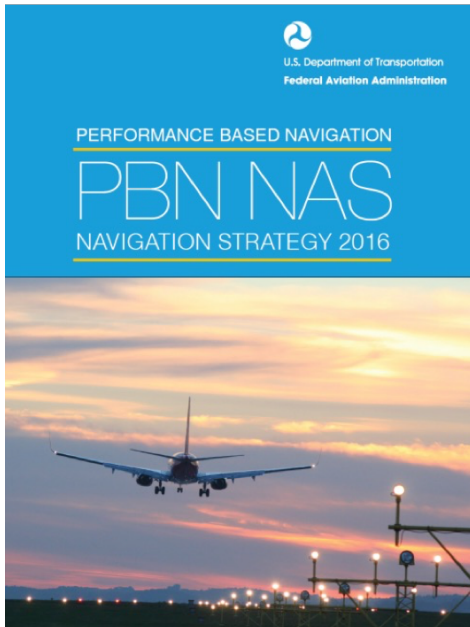
## 제5장. 연구개발성과의 활용계획

---

- DME 제조업체와의 협력으로 SFOL 기반 DME 시제품 개발하여 SFOL 펄스의 실용화와 국제 표준 채택을 시도할 것이다. 성공적인 시제품 개발 후 미국 연방항공청과 독일항공우주국에 SFOL DME을 소개하여 국제협력 연구와 상업화도 진행할 수 있다. 이는 미래 GNSS 대체 항법시스템의 원천기술 확보로 이어질 수 있으며 SFOL 펄스가 적용된 DME 지상장비 및 항공기 전자장비(avionics)를 개발하여 제품화 할 수 있을 것이다.
  - 한국 상황에 최적화된 DME 네트워크와 대체항법용 공역설정 연구를 진행하여 DME APNT 인프라 구축 비용과 공역의 실효성에 관한 분석을 이어가 경제성과 항공교통의 효율성 및 안전성을 보장하는 DME 기반 대체항법 시스템 구축 모델이 제시할 것이다.
-

## 제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

2017년 10월 미국연방항공청은 여러 가능한 대체항법시스템 (APNT) 중 DME 를 2030년 까지 주 대체 항법 시스템으로 사용하기로 하였고 지상 DME 네트워크를 보강 중에 있다 (그림 34) [9]. 이는 본 연구 결과물이 향후 미국연방항공청에 의해 채택되어 국제적으로 공인된 기술로 실용화 될 가능성을 높여 줄 것으로 기대된다.



### RESILIENT SERVICES

Resiliency is the ability of the NAS to maintain safety and an acceptable level of service when a system fails or facility is degraded, and to prevent or mitigate impact to air traffic

operations. Within the timeframe of this strategy, the FAA will retain and expand the Distance Measuring Equipment (DME) infrastructure as necessary to support continued PBN operations in the event of GNSS service disruptions (Figure 6). Non-PBN operations will be supported through a rationalized network of other ground-based navigation equipment to ensure safety for all NAS users.<sup>9</sup>



Figure 6 – Resilient PBN will be achieved through satellite- and ground-based navigation systems.

[그림 35] 미국 연방항공청은 DME 네트워크를 대체항법 시스템으로 2030년 경까지 사용하기로 결정했다.



제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입<br>기관 | 연구시설/<br>연구장비명 | 규격<br>(모델 명) | 수량 | 구입 연월일 | 구입 가격<br>(천원) | 구입처<br>(전 화번호) | 비고<br>(설 치 장소) | NTIS장비<br>등록 번호 |
|----------|----------------|--------------|----|--------|---------------|----------------|----------------|-----------------|
|          | 해당사항없음         |              |    |        |               |                |                |                 |

## 제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

---

컴퓨터 시뮬레이션과 분석위주의 연구로 연구수행 중 안전에 대한 우려는 없음.

---

## 제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

| 번호 | 구분<br>(논문/<br>특허/<br>기타) | 논문명/특허명/<br>기타                                                                         | 소속<br>기관명 | 역할     | 논문<br>게재지/<br>특허 등록<br>국가                             | 영향력<br>지수 | 논문 게재일<br>/특허 등록일 | 사사 여부<br>(단독 사사<br>또는<br>중복 사사) | 특기 사항<br>(SCI<br>여부/인용<br>횟수 등) |
|----|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-------------------------------------------------------|-----------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1  | 논문                       | Improving DME performance for APNT using alternative pulse and multipath mitigation    | 홍익대학교     | 참여 연구원 | IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems | 1.975     | 2017년 4월          | 단독 사사                           | SCI/3회 인용                       |
| 2  | 논문                       | SFOL Pulse: A High Accuracy DME Pulse for Alternative Aircraft Position and Navigation | 홍익대학교     | 참여 연구원 | Sensors                                               | 2.475     | 2017년 9월          | 단독 사사                           | SCIE/2회 인용                      |
| 3  | 특허                       | 항법 시스템에 사용되는 DME 펄스 생성 장치 및 방법                                                         | 청주대학교     | 참여 연구원 | 한국                                                    |           | 2017년 9월 19일      | 단독 사사                           | 특허등록                            |
| 4  | 특허                       | 항법 시스템에 사용되는 DME 펄스 생성 장치 및 방법                                                         | 청주대학교     | 참여 연구원 | 국제 (PCT)                                              |           | 2017년 7월 6일       | 단독 사사                           | 특허출원                            |
| 5  | 특허                       | 가우시안 펄스 및 SFOL 펄스 듀얼모드 DME 지상 트랜스폰더 및 그 제어방법                                           | 홍익대학교     | 참여 연구원 | 한국                                                    |           | 2018년 4월 23일      | 단독 사사                           | 특허출원                            |

제11장. 기타 사항

---

|         |
|---------|
| 해당사항 없음 |
|---------|

---

- 
- [1] Narins, Mitch, et al. "Alternative Position, Navigation, and Timing-The Need for Robust Radionavigation." *Proc. Global Navigat. Satellite Syst., Rep. Joint Workshop Nat. Acad. Eng. Chin. Acad. Eng.* 2012.
  - [2] Lo, Sherman, et al. "Alternative Position Navigation & Timing (APNT) Based on Existing DME and UAT Ground Signals." *Proceedings of the Institute of Navigation GNSS Conference*, Portland, OR. 2011.
  - [3] Eldredge, Leo, et al. "Alternative Positioning, Navigation & Timing (PNT) Study." *International Civil Aviation Organisation Navigation Systems Panel (NSP), Working Group Meetings*, Montreal, Canada. 2010.
  - [4] Seo, Jiwon, and Mincheol Kim. "eLoran in Korea-Current Status and Future Plans." *Proceedings of the European Navigation Conference*, Vienna. 2013.
  - [5] Yun, Ho, Changdon Kee, and Doyoon Kim. "Korean Wide Area Differential Global Positioning System Development Status and Preliminary Test Results." *International Journal Aeronautical and Space Sciences* 12.3 (2011): 274-282.
  - [6] Gibbons, Glen. "Air traffic control modernization: FAA, NextGen, GNSS, and Avionics Equipage." *Inside GNSS* 30.April (2011): 1-6.
  - [7] Niles, Frederick A., et al. "Wide Area Multilateration for Alternate Position, Navigation, and Timing (APNT)." *MITRE-CAASD, Tech. Rep* (2012).
  - [8] Lilley, R., and Robert Erikson. "DME/DME for Alternate Position, Navigation, and Timing (APNT)." *APNT White Paper, August* (2012).
  - [9] Federal Aviation Administration (FAA)., Performance-based navigation (PBN) national airspace system (NAS)navigation strategy 2016, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., July 2016
  - [10] Federal Aviation Administration (FAA). *Performance Specification Distance Measuring Equipment (DME)*, *FAA-E-2996*; U.S. Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2008; pp. 18-19.
  - [11] Haupt, Randy L., and Sue Ellen Haupt. *Practical Genetic Algorithms*. John Wiley & Sons, 2004.
  - [12] Kim, E.; Seo, J. SFOL Pulse: A High Accuracy DME Pulse for Alternative Aircraft Position and Navigation. *Sensors* **2017**, *17*, 2183
  - [13] Kim, E., Investigation of APNT optimized DME/DME network using current state-of-the-art DMEs: Ground station network, accuracy, and capacity In *Proc. IEEE/ION Position Location Navigat. Syst. Conf.*, Myrtle Beach, NC, USA, Apr. 2012, pp. 146-157.
  - [14] Kim, E., "Benefit analysis of a GA-based DME/N pulse on PBN," *2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, VA, 2017, pp. 4B1-1-4B1-7. doi: 10.1109/ICNSURV.2017.8011922
-

#### 주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.