

자유비행 다중 충돌회피 효율성 측정 연구

Measurement of Multi Conflict Avoidance for Free flight Efficiency

이대용*, 강자영**

Lee-Dae Yong*, Kang-Ja Young**

요 약

본 논문에서는 자유형 운항 알고리즘을 활용하여 분리보증 해결과 충돌탐지거리와의 상관관계, 충돌회피 후 경로점 복귀와 시간제약 조건에 따른 항로 복귀, 3대 이상의 다중 충돌회피 상황의 분리보증 실험을 수행하여 운항환경에서 발생하는 실증적인 문제를 규명하였다. 실험결과 자유비행 충돌회피를 위하여 탐지거리 확대가 분리보증 해결과 운항 효율성 향상에 유리하며, 충돌회피 후 복귀기동 시 충돌예측상황에 따라 고정 경로점 복귀 또는 시간제약 조건을 적용한 항로 복귀기동을 선택할 수 있었다. 그리고 다중 충돌 상황에서 2도 이상의 선회각을 적용하면 분리보증 해결되었고, 최적의 선회각 선택 시에는 운항 효율성을 대폭 향상시킬 수 있었다.

Abstract

In this paper, study the substantial issues which occurs upon free flight environment by performing separation assurance under multiple conflict(over 3 Aircraft), recovery en route under the terms of time constrains and fixed way point after the conflict avoidance, correlations between conflict detection distance and separation assurance by utilizing Autonomous flight algorithm. Result of this experiment demonstrates that the extension of detection distance is advantageous to solution of separation assurance and enhancing of flight efficiency, choose to maneuver by applying time constrain terms and fixed way point according to the situation of conflict prediction in case of recovery maneuver after the conflict avoidance. And separation assurance can be solved by applying 2 degrees or more of bank angle. When choosing the optimal bank angle could be drastically improved flight efficiency.

Key words : Multiple conflict, Recovery maneuver, Time constrains, Fixed way point

I. 서 론

미국과 유럽 등의 선진국에서는 이미 급증하는 항공 교통량 문제를 해결하기 위해 1970년대 중반부터 항공안전 및 공역 효율성 향상 측면에서 자유비행에

관한 다양한 연구를 수행하였다. 특히 통신 (Communication), 항법(Navigation), 감시(Surveillance) 기술 등의 항공교통 인프라 개선뿐만 아니라 항공교통관리 측면에서 자유비행이라는 새로운 패러다임을 적용하여 분리보증의 위임, 중앙 집중식(Centralized)

* 한국항공대학교 항공운항관리학과 박사과정(수료)

** 한국항공대학교 항공체계시험인증연구센터/교수

· 제1저자 (First Author) : 이대용

· 투고일자 : 2012년 3월 27일

· 심사(수정)일자 : 2012년 3월 28일 (수정일자 : 2012년 4월 24일)

· 게재일자 : 2012년 4월 30일

시스템에서 분산식(Distributed) 시스템으로의 교통제어 및 책임이관, 그리고 다양한 충돌회피 알고리즘 개발, 유인 항공기에서 무인 항공기로의 항공교통 임무전환 및 비행안전 보장 등의 과제를 성공적으로 실시하였다[1]-[5]. 하지만 우리나라는 항공교통관리 측면에서 자유비행에 관한 선행연구 및 충돌회피 알고리즘 개발, 분리보증 해결등 기초적인 연구가 아직까지 상당히 부족한 것이 사실이다. 이는 공역 관리전반을 군에서 담당하고 있어 민간부문의 결정권과 역량이 상당히 제한된다는 현실과 더불어 항공교통개선에 대한 항공사, 고객, 항공 산업 부문에서의 전반적인 필요성 및 인식도 상당히 낮기 때문에 지속적인 연구를 통해 선진국 수준의 연구역량과 인프라를 구축할 필요성이 있다. 선행연구[6]-[8]을 통해 자유비행 개념의 자율형 운항 충돌회피 알고리즘 설계와 실제 항공기 및 다양한 시나리오를 적용, 알고리즘의 성능측정과 분리보증 위입측면, 항공기 최적기동, 운항 효율성 등의 연구를 수행하였다. 이에 본 논문에서는 후속연구 일환으로 자율형 운항 알고리즘을 활용하여 분리보증 해결과 충돌탐지거리의 상관관계, 3대 이상의 다중 충돌회피 상황해결과 충돌회피 후 경로점 복귀와 시간제약 조건에 따른 항로복귀 실험을 통해 운항환경에서 발생하는 실증적인 문제를 규명하고자 한다.

II. 다중 충돌회피 모델링

항공기의 충돌이 예측될 경우에 충돌회피를 위한 최적기동이 필요하다. 이 경우 기존의 논문에서는 특정 각도 등을 미리 지정해두고, 이 각도의 경우에 대해서만 회피 기동이 가능한 경우를 찾거나, 혹은 기하학적 모델링을 통해서 초기에 회피 기동 경로를 설정하는 방법이 적용되어 왔다[9]-[10]. 그러나 전자의 경우, 단순한 경우의 수로 회피기동을 제한하므로, 회피기동의 다양성을 확보하기 어렵고, 후자의 경우는 갑작스럽게 발생하는 우발상황 시(제 3의 항공기의 침입, 제한구역, 금지공역의 설정, 낙뢰·태풍·화산 폭발 등 자연재해 등)에 대응이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 이에 본 실험에서는 항공기 최적기동

측면을 고려하여 상태추정기법, 비행속도와 선회각 회피결합 방법, 충돌탐지거리 설정, 충돌회피 후 복귀기동 등을 기반으로 다중 충돌회피 모델을 제안하고자 한다.

2-1 상태추정기법

자율형 운항 알고리즘은 상태추정 기법 중 비행계획 공유기법(Flight sharing plan)[11]을 활용한다. 이는 새롭게 발생하는 상황에 유동적으로 대처가 가능하며 최적 회피기동을 위한 다양성 확보와 충돌 탐지 및 회피기동 시점을 실제 항공기 운항환경과 동일하게 실험자가 자유롭게 설정할 수 있다는 장점이 있다.

2-2 비행속도와 선회각 결합

본 논문에서는 참고문헌[8]의 예측 식을 활용하며, 두 가지 경우 모두 충족하는 최적의 선회각 a_i 와 비행속도 V_i 를 선택하여 최적 기동과 분리보증 해결을 수행하며 이는 다음과 같이 정의할 수 있다.

If(distance > protection distance)

{(all Δa_i), MIN(Δa_i), (all ΔV_i), MIN(t_1) = cost function}

{*If* several $d = 0$ is \exists , MIN(a_i) = cost function}

else

{(all Δa_i), MIN(Δa_i) = cost function}

{*If* several $d = 0$ is \exists , MIN(a_i) = cost function}

end

2-3 충돌탐지거리

충돌탐지거리에 따른 회피기동 시점의 문제는 항공기 운항 효율성과 비행안전성에 직접적인 영향을 준다. 충돌회피 시점이 조기에 수행되어진다면 회피기동 시간과 거리가 증가할 것이며 다른 항공기의 운항에도 영향을 줄 수 있다. 하지만 충돌회피시점이 늦어지면 충돌이 발생할 수 있기 때문에 탐지거리의 설정과 충돌회피 시점은 자유비행 분리보증 해결의

중요한 문제이다. 본 논문에서는 충돌탐지거리(12~15NM)에 따른 분리보증의 효율성을 측정하였으며 충돌탐지거리와의 상관관계를 실험하였다.

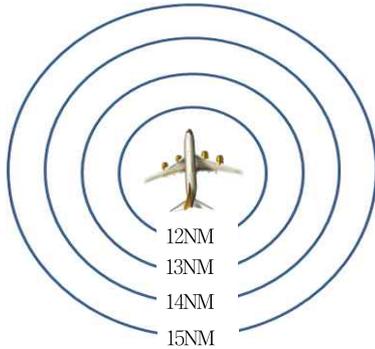


그림 1. 항공기 탐지거리 설정(12~15NM)
Fig. 1 Aircraft detection range setting(12~15NM)

2-4 충돌회피 후 복귀기동

회피기동 후, 충돌상황이 예측되지 않는 시점에서 원래의 항로로 복귀하기 위한 기동이 이루어져야 한다. 항공기 복귀기동의 방법으로 원래의 항로의 특정 위치를 고정하여 경유하는 고정 경유점 복귀 기동 방법이 있으며, 특정 시간제약을 통해 원래의 항로에 진입하는 시간제약 항로복귀 방법이 있다[12][13].

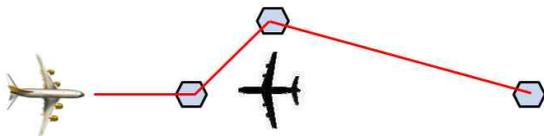


그림 2. 고정 경유점 복귀기동
Fig. 2. Fixed point recovery maneuver.

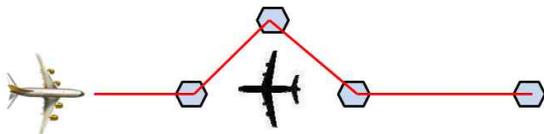


그림 3. 항로 복귀기동(시간제약)
Fig. 3. En route recovery maneuver(time constraint).

일반적인 고정 경유점 복귀 기동의 방법은 충돌회피 후 기존 항로를 크게 벗어나지 않은 경우에 적합하다. 이 방법은 현재의 항공기의 위치에서 고정 경유점의 위치 벡터차이와 복귀 진로각을 계산한 후, 이 벡터의 방향으로 기수(선회각 θ)를 조정하여 운항

하면 된다. 항공기 복귀 기동 시 효율성 측면을 고려한다면 항공기 회피기동 수행 후 최소설정 항로를 크게 벗어난 경우와 다른 항공기의 분리보증에 영향을 줄 수 있다면 특정시간을 설정하여 신속하게 원래의 항로에 접근하는 시간제약 조건방법이 필요하다. 이를 위해 현재의 항공기의 위치와 기존의 항로의 거리(D), 제한시간(T)동안 항로 진입에 필요한 선회각은 다음과 같이 정의할 수 있다.

- 기존 항로 : $ax + by + c = 0$
- 현재 위치좌표 : x_i, y_j
- 거리 : $D^2 = (ax + by + c)^2 / (a^2 + b^2)$
- 항로진입 선회각: $\theta = \text{ArcCOS}(D / T \parallel V_j \parallel)$

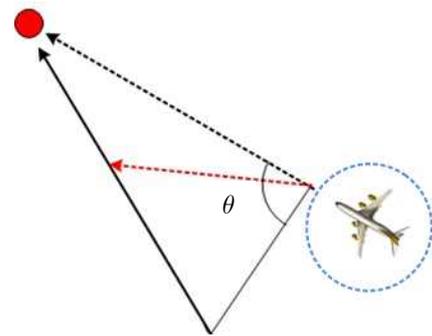


그림 4. 충돌회피 복귀기동
Fig. 4. Conflict resolution recovery maneuver.

III. 실험방법

3-1 컴퓨터 시뮬레이션 설정

본 연구에서는 3차원 공간의 $1,000,000\text{NM}^3$ 의 영역(X, Y, Z축 각 100NM)을 가정하고 3가지 경우의 조우상황 시나리오에 대한 충돌탐지 및 회피기동 시뮬레이션을 실시하였다. 또 실제 비행환경에서의 바람요소와 선회 시 발생하는 양력침하 현상과 추력증가 등의 비행 역학적 요소는 실험에서 생략하였다.

3-2 항공기 성능 파라미터

표 1은 B-777 항공기의 성능지표[14]를 사용하여 분리보증 해결 및 충돌탐지거리와의 상관관계, 다중 충돌회피 상황해결 등의 실험을 수행하였다.

표 1. B-777 항공기 성능지표

Table 1. B-777 Aircraft Performance index.

계수	정의	성능
W	Norminal weight(Klb)	465
V_O	Aircraft cruise Mach number(TAS(Kts)@FL310)	0.84 (493)
ρ	Air density@FL310(slugs/ft ³)	0.857E-3



그림 5. B-777 항공기[15]
Fig. 5. B-777 Aircraft.

3-3 충돌회피 시나리오

참고문헌[8]에서 이미 자율형 운항 알고리즘의 성능측정과 두 가지 시나리오(두 항공기의 90도 조우 시, 45도 조우 시)를 통해 분리보증 해결과 최적기동, 비행안전성 등을 측정하였다. 본 연구에서는 분리보증 해결과 탐지거리와의 상관관계를 규명하기 위해 90도 조우 시 12~15NM 범위에서 1NM 간격으로 충돌탐지거리를 증가시켜 분리보증 해결과 효율성을 측정하였다. 또 3대의 항공기가 운항 중 특정 경로점에서의 조우상황과 추가적으로 1대를 더 투입하여 총 4대의 항공기가 동시에 조우상황을 해결하는 것으로 실험을 확장하였으며, 이는 궁극적으로 가상의 특정 공역을 설정하고 항공기 대수를 점진적으로 증가시켜 실제 운항환경과 유사한 조건으로 시뮬레이션을 개선하면 추후 공역 안전성 및 효율성 측정모델로 발전시킬 수 있을 것이다.

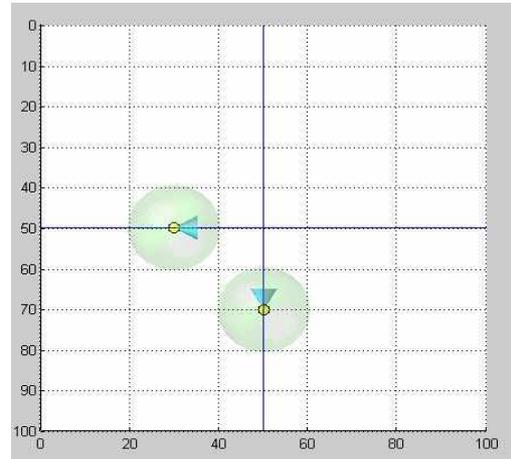


그림 6. 90도 조우상황(2-D)
Fig. 6. encounter at 90°(2-D).

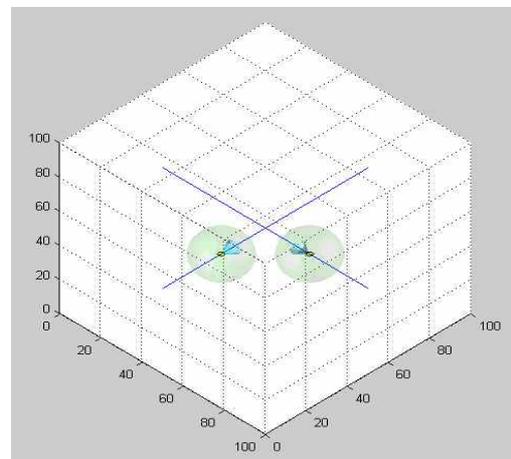


그림 7. 90도 조우상황(3-D)
Fig. 7. encounter at 90°(3-D).

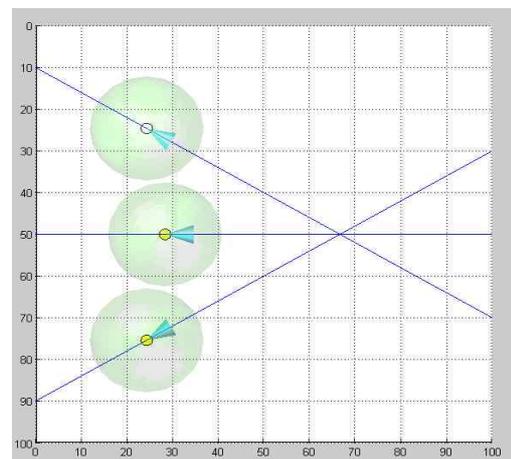


그림 8. 다중충돌상황(3대, 2-D)
Fig. 8. Multiple conflict situation(3 Aircraft, 2-D)

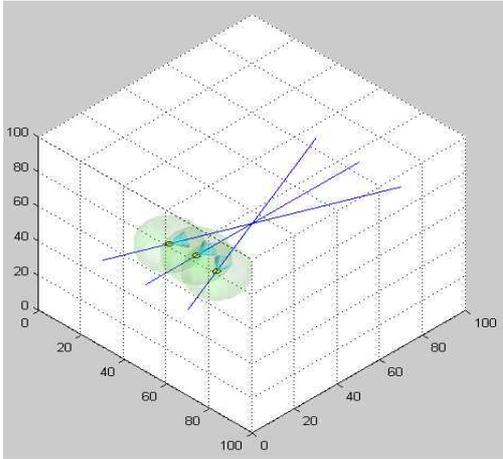


그림 9. 다중충돌상황(3대, 3-D)

Fig. 9. Multiple conflict situation(3 Aircraft, 3-D)

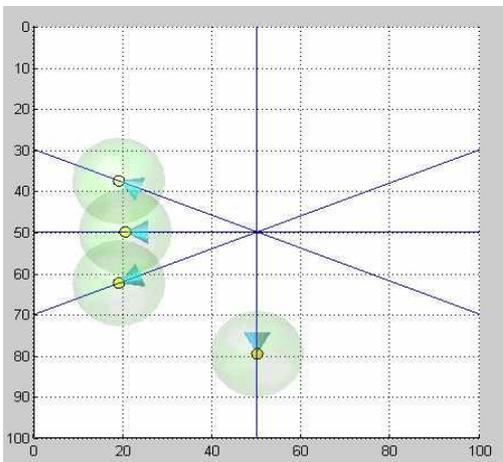


그림 10. 다중충돌상황(4대, 2-D)

Fig. 10. Multiple conflict situation(4 Aircraft, 2-D)

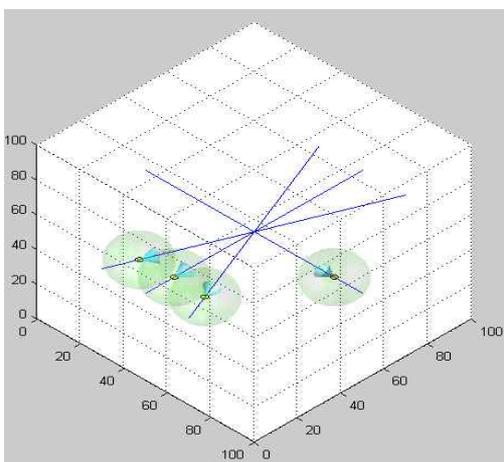


그림 11. 다중충돌상황(4대, 3-D)

Fig. 11. Multiple conflict situation(4 Aircraft, 3-D)

IV. 실험결과

4-1 충돌탐지거리와 운항효율성

충돌탐지거리와 운항 효율성 상관관계를 규명하기 위해 90도 조우 시 12~15NM 범위에서 1NM 간격으로 충돌탐지거리를 확장하여 실험을 수행한 결과, 전체 운항 효율성 측면에서 탐지거리 14NM 설정 시 가장 우수한 것으로 나타났다. 하지만 15NM 탐지거리 설정 시 선회각 22° 까지는 운항시간 등 효율성 측면에서 가장 우수하였으나 23° 이후부터는 운항시간이 대폭 증가하였다. 이는 20° 이상의 급격한 회피 기동을 수행하지 않는다면 탐지거리의 확대가 충돌 회피 및 분리보증 해결과 운항 효율성이 향상되는 것으로 나타났다[그림 12-13].

4-2 충돌회피 후 복귀기동

충돌회피 후 복귀기동에 관한 실험을 위해 고정 경유점 복귀 기동 방법과 특정 시간제약을 통해 원래의 항로에 진입하는 항로 복귀방법을 수행하였으며 운항 효율성 측면에서는 고정 경유점 방법이, 분리보증 및 비행안전 측면에서는 시간제약 설정방법을 통한 항로 복귀 적용이 유리한 것으로 나타났다. 이는 충돌회피 후 복귀기동 시 다른 항공기에 대한 충돌이 예측되는 상황에 따라 운항 효율성과 비행안전성 측면을 조종사가 선택할 수 있다는 것이다[그림 14].

4-3 다중충돌회피(3대~4대)

충돌탐지거리를 15NM로 설정하고 다중 충돌회피 상황 적용 시 3대의 충돌 상황 시는 선회각 2도 이상 시, 4대의 충돌해결 상황 시는 선회각 2~11도 적용 시 분리보증 해결이 가능 하였다.(12도 이상 적용 시는 다른 항공기 기동에 영향을 미치고 충돌이 발생함) 또 최적회피기동 측면에서 3대의 충돌해결 상황에서는 선회각 7도 적용 시, 4대의 충돌해결 상황 시는 선회각 4도 미만 적용 시 충돌해결과 운항 효율성이 각각 우수 하였다[그림 15-18 참조].

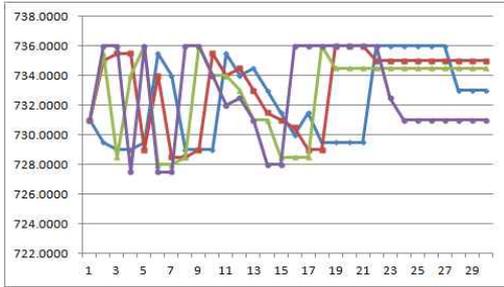


그림 12. 충돌탐지거리(선회각/시간)
 Fig. 12. Conflict detection range(BA/Time)
 ※ Blue 12NM, Red 13NM, Green 14NM, Purple 15NM

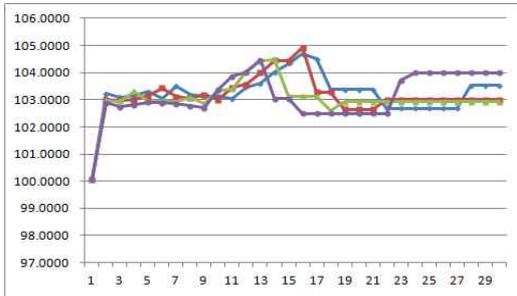


그림 13. 충돌탐지거리(선회각/거리)
 Fig. 13. Conflict detection range(BA/Distance)
 ※ Blue 12NM, Red 13NM, Green 14NM, Purple 15NM

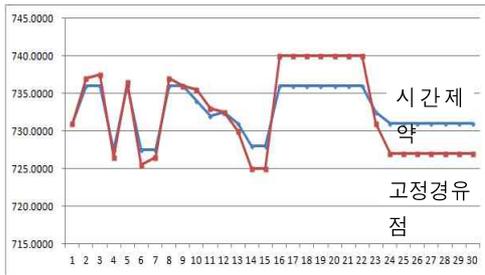


그림 14. 고정 경유점/시간제약(운항시간)
 Fig. 14. Fixed way point/Time constraint(flight time)

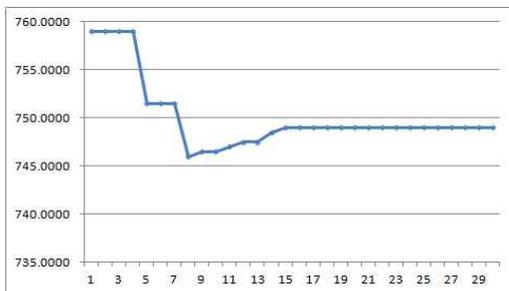


그림 15. 다중충돌상황(3대, 평균 운항시간)
 Fig. 15. Multiple conflict situation(3 Aircraft, time average)

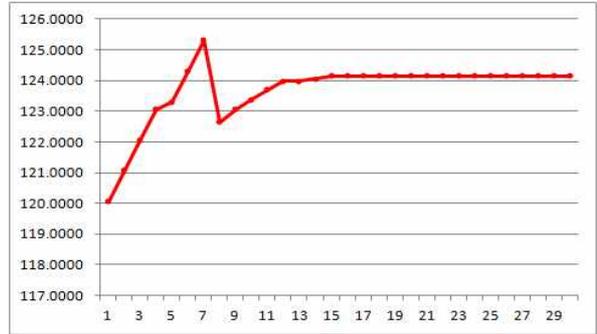


그림 16. 다중충돌상황(3대, 평균 운항거리)
 Fig. 16. Multiple conflict situation(3 Aircraft, average distance)

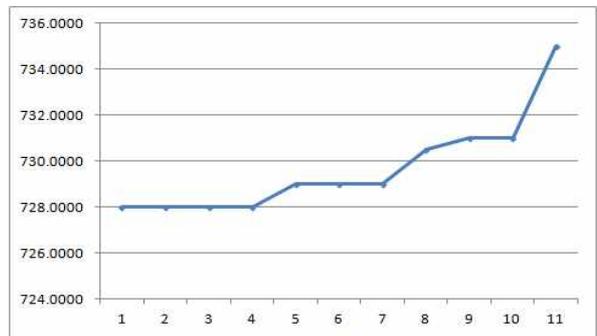


그림 17. 다중충돌상황(4대, 평균 운항시간)
 Fig. 17. Multiple conflict situation(3 Aircraft, time average)



그림 18. 다중충돌상황(4대, 평균 운항거리)
 Fig. 18. Multiple conflict situation(4 Aircraft, average distance)

V. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 분리보증 해결과 충돌탐지거리의 상관관계를 규명하였으며, 3대 이상의 다중 충돌상황을 설정하여 실험을 실시하였다. 또 충돌회피 후 경로점 복귀와 시간제약 조건을 설정한 경로점 복귀 기동을 통해 운항환경에서 발생하는 실증적인 문제

를 규명하였으며, 이는 추후 가상 공역을 설정하고 다수의 항공기 운항하는 환경을 조성하여 공역 안전성 및 효율성 측정모델로 실험을 확장시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Joint Planning and Development Office. Concept of Operations for the Next Generation Air Transportation System. *Technical report*, June 2007.

[2] SESAR Consortium. SESAR Master Plan, deliverable 5. Technical report, April 2008.

[3] ICAO CIR. 13, "ICAO outlook for air transport to the year 2025"

[4] FAA, "SafeFlight 21 Master Plan Ver 1.0.2, 1997 .7

[5] European Commission and EUROCONTROL, "European Air Traffic Management Master Plan",2009. 3

[6] 이대용, 강자영, “자유비행 공역 혼잡성 측정에 관한 연구” *한국항공학회 학술발표 논문집 Vol. 15, No. 1*, pp. 145-149. 2011. 10. 21

[7] 이대용, 강자영, “자유비행 분리보증 효율성 측정 모델연구” *한국항공학회 논문지 제 15 권 제 6호* pp. 976-985. 2011. 12. 31

[8] 이대용, 강자영, “자율형 운항 알고리즘 설계 연구” *한국항공학회 논문지 제 16 권 제 1호* pp. 122-130. 2012. 2. 28

[9] 이대용, 강자영, “자유비행 충돌회피 알고리즘 비교 분석” *한국항공운항학회 추계학술대회 논문집* pp. 9-12, 2011. 11. 25

[10] 이대용, 강자영, “자유비행 충돌회피 알고리즘 비교분석” *한국항공운항학회 논문지 제 19 권 제 4 호* pp. 83-90. 2011. 12. 31

[11] Unmanned Aircraft Collision Detection and Resolution: Concept and Survey B. M. Albaker, N. A. Rahim UMPEDAC Research Centre, *Faculty of Engineering University of Malaya 50603 KualaLumpur, Malaysia*

[12] NASA/TM-2005-213769 KB3D Reference Manual Ver 1.a June 2005

[13] NASA/TM-2011-000000 Stratway v1.1 User Manual DRAFT 27 April 2011

[14] Anon, "User Manual for the Base of Aircraft(BADA), Rev. 3.1," Eurocontrol, EEC Note No. 25/98, November 1998

[15] www.aerospaceweb.org

이 대 용(李大龍)



2008.3~2010. 3 : 한국 항공대학교 항공운항학과 박사과정(수료)
 1999.3~2005.6 : 해군 조종사 근무
 2002. 5 : 사업용 조종사
 2006. 8~현재 : 방위사업청 공무원 재직
 관심분야 : 충돌회피 알고리즘, 자유비행 분리보증, 운항 효율성, 최적기동 등

강 자 영(姜自永)



2002.3~현재 : 한국항공대학교 항공운항학과 교수
 2009.3~2010.2. : Univ of Illinois, Urbana Champaign 연구 교수
 2002.6.~2002.3. : ETRI 책임연구원/팀장
 1996.2.~1997.3. : Northrop Grumman 파견 연구원
 1993.7.~1993.8. : Lockheed Martin 파견 연구원
 1979.3.~1984.8. : ADD/DTAQ 연구원
 1992.6. : Auburn Univ, AE/Ph.D.
 관심분야 : CNS/ATM, 비행안정성 및 조종성, 항공체계공학