

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.3.242

## 몬테카를로 모사법을 이용한 무인전투기의 위약도에 영향을 미치는 파라미터와 민감도에 대한 연구

최광식\*, 이경태\*\*

### Study of the UCAS Susceptibility Parameters and Sensitivities by using Monte-Carlo Simulation

Kwang Sik Choi\* and Kyung Tae Lee\*\*

#### ABSTRACT

The typical missions for the current stand-off UAVs are surveillance and reconnaissance. On the other hand, the primary mission for the future UCAS will be combat mission such as SEAD under the man-made ultimately hostile environment including SAM, antiaircraft artillery, threat radar, etc. Therefore, one of the most important challenges in UCAS design is improvement of survivability. The current studies for aircraft combat survivability are focused on the improvement of susceptibility and vulnerability of manned aircraft system. Although the survivability design methodology for UCAS might be very similar to the manned combat system but there are some differences in mission environment, system configuration, performance between manned and unmanned systems. So the parameters and their sensitivities which affect aircraft combat survivability are different in qualitatively and quantitatively. The susceptibility related parameters for F-16 C/D and X-45A as an example of manned and unmanned system are identified and the susceptibility parameter sensitivities are analyzed by using Monte-Carlo Simulation in this study.

#### 초 록

종래의 stand-off 무인항공기가 감시와 정찰에 초점이 맞춰져 있었다면, 무인전투기는 여기서 더 발전하여 극한상황에서의 전투임무를 수행한다. 미래의 전장에서 무인전투기는 유인전투기가 수행하였던 적 방공망제압임무(SEAD)와 같은 극한상황의 임무를 수행할 것이며, 임무 수행 중 지대공 미사일등과 같은 각종 위협에 직면하게 될 것이다. 현재 항공기의 전투생존성에 대하여 많은 연구가 진행되고 있지만 이것은 대부분 유인전투기의 위약도와 취약도를 개선하는 방안에 대한 것이다. 무인전투기의 생존성을 고려한 설계는 일반적으로 유인전투기와 유사할 수 있으나, 임무수행환경 및 형상과 성능에 있어 유인전투기와 차이가 존재하므로 생존성에 영향을 미치는 변수들에 있어 정량적, 정성적인 차이가 존재 한다. 본 논문에서는 무인전투기의 생존성 요소 중 위약도에 영향을 주는 요소를 유인전투기인 F-16C/D와 무인전투기 X-45A를 예제로 하여 식별하고 그 민감도를 몬테카를로 모사법을 이용하여 분석하였다.

**Key Words** : Survivability(생존성), Unmanned Combat Aircraft System(무인전투기체계), Susceptibility(위약도), Vulnerability(취약도), Monte-Carlo Simulation(몬테카를로 모사법), Electronic Counter Measures(전자대응수단), Electronic Support Measures(전자지원수단), Radar Cross Section(레이더 단면적), Radar Warning Receiver(레이더 경보수신장치)

† 2010년 8월 17일 접수 ~ 2011년 2월 15일 심사완료

\* 정회원, 세종대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 정회원, 세종대학교 기계항공우주공학부

교신저자, E-mail : kntlee@sejong.ac.kr

서울시 광진구 군자동 98

## 1. 서 론

현재 세계적으로 무인항공체계 (Unmanned Aircraft System : UAS)의 연구개발이 활발히 진행 중이며, 2010년 10대 항공우주기술에는 무인 전투기, 무인화물 헬기, 복수 무인기 제어 등이 포함되었고, 우리나라를 포함하여 약 40여개 국가에서 무인항공기 체계에 대한 기술개발에 참여하고 있다. 무인전투기 체계(Unmanned Combat Aircraft System: UCAS)는 종래의 무인항공기 시스템 주 임무인 정찰 및 감시 임무에서 신속한 상황판단과 대응이 요구되는 전투임무 수행으로 까지 임무를 확장시키기 위한 무인항공기 시스템이다[1],[2].

또한 무인전투기 체계에서 공통적으로 요구되고 있는 조건들 중 비용 대 효용성 측면이 강조된다. 즉, 대당 획득비용이 유인전투기의 수준보다 대폭 낮아야 한다는 조건을 전제로 하고 있다. 이것은 무인전투기 체계가 운용시 회당 소모율(attrition rate)이 유인기 체계에 비해 대폭 감소되어야 하는 것을 의미한다. 이러한 비용 대 효용성 측면에서 회당 소모율을 감소시키기 위해서는 무인전투기체계의 개념설계 단계부터 전투 생존성에 대한 설계가 필수적으로 고려되어야 한다[3].

일반적으로 항공기의 전투생존성이란, 인공의 적대적인 환경을 회피하거나 타격에 대한 내성 정도를 의미한다. Ball.은 생존성을 크게 위약도(susceptibility)와 취약도(vulnerability)의 개념으로 구별하고 있다. 여기서 위약도는 항공기가 적의 적대적인 위협에 탐지되어 피격을 당할 확률을 의미하고, 취약도는 항공기가 적의 적대적인 위협으로부터 피격을 당했을 때 항공기 시스템이 그 피해로부터 버틸 수 없는 정도의 확률값을 의미한다. 이를 다음의 그림 1에 도시하였다[4].

또한, 미 군사편람 MIL-HDBK-2069는 군사용 항공기에 대하여 생존성평가에 대한 가이드라인을 제공하고 있다[5].

무인전투기 체계도 큰 범주에서 본다면 전투기로 분류되지만, 단순히 조종사가 없는 전투기로 보기에는 고유한 속성을 여러 분야에 걸쳐 보유하고 있기 때문에 무인전투기 체계의 위약도는 유인전투기와는 차이가 있다.

즉, 유인전투기와 무인전투기의 위약도에 영향을 미치는 파라미터들은 유사할 수 있지만, 파라미터들의 민감도에 있어서는 차이가 존재할 수 있는 것이다.

현재 이러한 유인전투기와 무인전투기간의 위

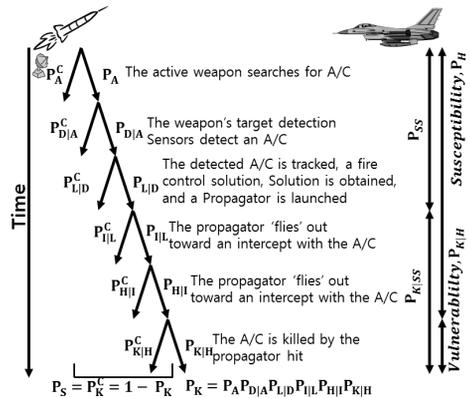


그림 1. Combat survivability tree diagram[4]

약도의 차이에 대한 연구는 국내에서 아직 수행된 바 없다. 그렇기 때문에 본 연구를 통해서 무인전투기 체계에 전투생존성을 적용하기 위한 준비단계로 위약도 파라미터와 민감도를 확인하기 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 유인전투기와 무인전투기체계를 비교하기 위한 예시로서 F-16C/D와 X-45A를 선택하여, 각 체계에서 위약도에 영향을 줄 수 있는 파라미터를 식별한 후 그 민감도를 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 분석했으며, 전제조건으로서 위협은 항공위협을 제외한 지상 무기체계로부터의 위협만을 고려하여 가장 기본단위가 되는 일대일 교전상황에 대하여 모사하였다. 여기서 각 파라미터의 정량적인 값을 알 수 없기 때문에 정성적인 데이터를 이용한 가중치 점수 환산법 (Weighted Score Method)을 적용하였다.

## II. 본 론

### 2.1 위약도(Susceptibility)

위약도란, 항공기가 임무수행 중 적의 위협에 감지되어 추적 및 공격을 받은 후 피격을 당할 확률을 말한다. 여기서는 이 확률을 각각  $P_H$ (발사체 탄두에 의한 직접피격의 위약도 확률) 또는  $P_I$ (근접신판 탄두에 의한 간접피격의 위약도 확률)로 표시한다.

전투기의 위약도는 크게 3가지 요인으로부터 영향을 받는다. 이는 각각 전투기의 임무 시나리오(scenario), 적의 위협(threat), 항공기(aircraft)이다. 각 요인은 핵심사건(Essential Event : Ev)과 핵심요소(Essential Elements : El)로 분류할 수 있고 이를 표 1에 수록하였다.

표 1. Essential Events and Essential Elements[4]

	Essential events	Essential elements
Scenario	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aircraft flight path and tactics</li> <li>- Aircraft detection and tracking</li> <li>- Propagator launch / firing and flyout</li> <li>- Warhead detonation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Weapons locations</li> <li>- Terrain</li> <li>- Supporting forces</li> </ul>
Threat		<ul style="list-style-type: none"> <li>- C<sup>3</sup> capabilities</li> <li>- Detection capabilities</li> <li>- Tracking capabilities</li> <li>- Fire control procedures and ballistic projectile characteristics</li> <li>- Missile performance and guidance capabilities</li> <li>- Warhead and fuzing characteristics</li> </ul>
Aircraft		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Countermeasures</li> <li>- Threat warning</li> <li>- Signatures</li> <li>- Performance</li> <li>- Armament</li> </ul>

여기서 시나리오는 위협과 항공기 간의 일대일 전투상황으로 가정하고 유인전투기와 무인전투기에 대해서 상대적인 위약도와 민감도를 정량화하기 위해서 몬테카를로 모사법을 이용한다.

위약도를 구하기 위해서는 다음과 같은 단계를 수행해야한다. 먼저 적 위협의 활성화( $P_A$ ) 여부를 판단하고, 적 위협이 활성화 된 상태에서 탐지 당할 확률( $P_{DA}$ )을 구하고, 미사일이나 대공포가 발사될 확률( $P_{LD}$ )을 계산하고, 발사된 미사일이나 대공포가 전투기에 도달할 확률( $P_{IL}$ )을 구하여 최종적으로 항공기가 피격당할 확률( $P_{HI}$  또는  $P_{HI}$ )을 계산하게 된다. 이것을 계산하는 수식은 조건부 확률로서 다음과 같이 각 확률 값을 곱하게 된다.

$$P_H = P_A P_{DA} P_{LD} P_{IL} P_{HI} \quad (1)$$

여기서 각 단계의 확률을 구하기 위해서 먼저 항공기의 위약도에 영향을 미치는 핵심요소들을 도출해야한다.

## 2.2 가중치 점수 환산법 (Weighted Score Method)

몬테카를로 모사법을 수행하여 위약도를 구하

표 2. Weighted Score table

Usefulness	Score	Criteria
Lowest ▲ ↓ Highest	0	장비가 존재하지 않음
	1	장비가 존재하지 않지만 유사한 효과가 일부 존재함
	2	장비가 존재하지 않지만 유사한 효과가 존재함
	3	장비가 존재하지만 효과가 미약함
	4	장비가 존재하지만 효과가 제한적임
	5	장비가 존재하고 성능이 현존 장비의 평균 수준임
	6	장비가 존재하고 성능이 우수함
	7	장비가 존재하고 성능이 우수하며 대체장비 또는 대체 성능이 존재

기 위해 위협활성화, 탐지, 추적, 발사의 각 단계별 결합모델이 필요하다. 여기에 필요한 정확한 결합 모델을 작성하기 위해서는 각 단계에서 요구하는 정확한 수치적인 정보 및 자료가 있어야 한다.

하지만, 이러한 정보 및 자료는 군사기밀 사항으로 분류되어 있어 접근이 불가능하고 또 이러한 데이터의 취득을 위한 시험은 엄청난 비용을 수반하므로 위약도 분석을 위한 결합모델을 작성하는데 심각한 제약이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 가중치 점수 환산법(Weighted Score Method)을 제안한다. 이 방법은 정량적으로 정확한 값을 알 수 없는 데이터를 얻기 위해서 각 파라미터의 정성적인 경향을 이용하여 각각의 score를 산출하고, 이것을 이용하여 정량적인 값은 아니지만 정성적인 경향을 파악할 수 있는 결과를 도출하는데 그 의미가 있다.

예를 들면, 적의 위협이 활성화 되어있는 경우에 항공기가 적의 위협에 탐지되는지 여부를 판단하기 위한 결합모델을 생성하기 위해서는 다음과 같은 정보가 필요하게 된다. 항공기의 RCS값, 운용고도, 적 레이더의 탐지반경 및 탐지능력 등의 정보를 이용하여 결합모델을 생성해야 한다. 하지만, 이러한 정보는 대부분 공개 되어있지 않기 때문에 결합모델을 작성하는 것은 어려운 문제가 된다. 여기서 가중치 점수 환산법을 적용하기 위해서는 다음의 표 2와 같이 각각의 파라미터에 대해서 효용성을 0부터 7까지 8단계로 나누어 score를 부여한다. 이때 부여한 score는 각 파

라미터간의 정성적 정보를 상대적으로 평가한 값이기 때문에, 정량적인 정보를 나타내지는 않는다. 이 score를 이용하여 각 파라미터간의 상대적인 우위를 분석하고, 상대적 중요도를 찾을 수 있는 결합모델을 생성할 수 있다. 그렇기 때문에, 가중치 점수 환산법을 사용하기 위해서는 파라미터별 정성적인 정보를 규정해야하며, 다음의 각 예시항공기를 이용하여 위약도에 영향을 주는 파라미터를 식별하였다. 물론, 이러한 가중치 점수 환산표는 임의성이 있으며 단계의 구분과 각 단계에 대한 기준척도는 향후 추가적인 연구를 통해 개선의 여지가 있을 수 있다. 본 연구에서는 일단 초안으로 작성한 가중치 점수 환산 척도에 의거하여 위약도에 대한 정성적 경향과 민감도 예측의 가능성을 타진하고자 시도하였다.

### 2.3 F-16 C/D

미 공군 전투기인 F-16 C/D는 공중전, 근접지원, 적 방공망제압 등의 임무를 수행 할 수 있는 다목적(multirole) 전투기이다. F-16의 위약도에 영향을 주는 필수요소를 항공기 생존성 분석절차를 적용하여 표 3과 같이 분류 할 수 있다. 표 3에서 대응수단은 ECM(Electronic Counter Measures : 전자대응수단)과 Jammer(전파방해장치)가 있고, 위협경보 수단은 RWR(Radar Warning Receiver : 레이더 경보수신장치)이 있다. Signature의 요소로는 레이더와 RCS(Radar Cross Section : 레이더 단면적)가 있다. 여기서 F-16의 경우는 RCS값을 정확하게 알 수는 없지만, 전투기의 개발 시기를 고려하여 RCS감소 효과는 크게 없다고 가정한다. F-16은 LWF(Light Weight Fighter : 경량전투기) 사업에서 처음부터 전투기의 경량화와 고기동성을 목표로 설계되었다. 이런 항공기의 성능은 적의 위협으로부터 회피 할 수 있는 정도에 영향을 미치므로 위약도에 영향을 주는 파라미터가 된다. 또한 무장도 위약도에 영향을 주는 파라미터이다. 적을 공격하기 위해서 가까이 접근해야만 하는 무장은 결국 위약도를 증가시키기 때문이다.

대응수단 중에서 ECM의 경우는 Chaff와 Decoy로 구분된다. Chaff와 같은 경우에는 대표적인 ECM수단으로 적의 대공미사일이나 유도미사일의 레이더를 기만하는 주요 수단중 하나이다. Decoy의 경우도 마찬가지로 적의 유도 미사일등을 기만하는 용도로 주로 사용된다. 다음으로 Jammer의 경우는 크게 내장하는 방식과 외부포드에 설치하는 두 가지 종류로 나뉘어져 있다. 위협경보 수단으로 레이더 경보수신장치를 가

표 3. F-16's Essential Elements

Elements	Type	Products
Countermeasure	ECM	AN/ALE-40 AN/ALE-47 AN/ALE-50 AN/ALQ-178
	Jammer	AN/ALQ-131 AN/ALQ-165 AN/ALQ-178 AN/ALQ-184 AN/ALQ-187 EL/L-8240
Threat Warning	RWR	AN/ALR-69 AN/ALR-56M AN/ALR-93
Signatures	Radar	AN/APG-68
	RCS	Partial RAM
Performance	Engine	17,800lb 29,100lb(A/B)
	Max Speed (at sea level)	915mph (M 1.2)
	Max Speed (at altitude)	1,350mph (M2.05)
	Max Climb Rate	50,000ft/min
	Service ceiling	+50,000ft
Armament	Air-to-Air	AIM-7 AIM-9 AIM-120A AIM-132 Python3,4 Magic2
	Air-to-Surface	AGM-45 AGM-65 AGM-84 AGM-88 AGM-154 AGM-158 GBU-10 GBU-12 GBU-15 GBU-22 GBU-24 GBU-27 GBU-31 GBU-38 CBU-103 CBU-104 CBU-105

지고 있으며, 주로 전자대응수단과 연동되어 운용되는 특징을 지니고 있다.

Signatures의 경우에는 레이더와 RCS가 파라미터로 존재한다. 레이더의 경우 목표의 위치를 파악하는 등의 중요한 임무를 수행하는 장비지만, 적 위협 또한 레이더 경보수신장치와 같은

장비를 가지고 있기 때문에, 적의 위협에 위치를 노출시키는 파라미터가 된다.

F-16 C/D의 경우는 적의 레이더에 대한 고려로 부분적으로 레이더흡수물질(RAM : Radar Absorbing Material)을 사용하고 있지만 성능은 미미한 것으로 알려져 있다.

성능의 경우는 앞에서 말한바와 같이 F-16의 경우 경량공격기로 실전에서 고기동이 가능한 기체이다. 하지만 유인기의 특성 상 그 기동 성능에는 제한이 있게 마련이다.

마지막으로 무장의 경우는 공대공 능력과 공대지 능력이 있는데 현재 본 논문에서는 지상위협에 대한 일대일 대응의 경우만을 보기 때문에, 공대지 능력을 우선 고려하기로 한다. 각 파라미터에 대해서 표 2의 기준으로 점수를 생성하면 다음의 표 4와 같은 점수를 설정할 수 있다. 여기서 성능의 점수는 어느 한 요소만으로 결정되는 것이 아니라 복합적인 작용에 의해서 결정된다.

F-16 C/D의 핵심요소인 signature 중에 레이더에 대해서 다음과 같은 방법으로 점수를 산정할 수 있다. F-16 C/D에서 사용되는 레이더는 AN/APG-68라는 제품이다. 여기서 각 핵심요소에서 적용되는 각 type이 가지는 의미에 대해서 정의를 하고 그에 맞춰서 점수를 생성해야 한다. 여기서 레이더는 적의 ESM(Electronic Support Measures : 전자지원수단) 장비나 또는 탐지레이더에 어떠한 영향을 줄 수 있는지에 대한 판단으로 점수를 정하게 된다. 적의 위협이 사용하는 레이더의 정보를 미리 얻게 되면, 항공기는 위약도를 낮추기 위해 대응장비를 사용한다. 마찬가지로 위협 또한 항공기에서 발생하는 레이더파를

탐지하게 되면, 확실한 정보를 얻기 위해서 여러 수단을 이용하게 된다. 그렇기 때문에, 레이더의 경우에는 최소한의 전파출력을 이용하여 최대한의 거리에 대한 정보를 얻을 수 있는 것이 유리하다. 이러한 장비의 특성을 바탕으로 AN/APG-68에 대해서 얻을 수 있는 정보를 종합하여 다음과 같은 점수를 선정할 수 있다. F-22와 같은 최신 예기는 AESA라는 능동형 전파 주사방법을 사용하기에 높은 파워의 전파를 이용하여 멀리있는 적의 항공기를 식별하지만, 적의 레이더 경보수신장치에 최대한 식별되는 정도를 낮추는 기술을 사용한다. 하지만, AN/APG-68의 경우에는 pulse-doppler 방식의 레이더로 이러한 적의 레이더 경보수신장치나 레이더를 기만하는 성능은 미약한 것으로 판단이 되기 때문에 장비는 존재하지만 signature에 대해서 효과가 미미한 점수 3으로 설정을 한다. 이와 같은 방법을 적용하여 각 핵심요소에 대해서 각각 점수를 선정한다.

## 2.4 X-45A

초기에 미국 DARPA와의 ATD(Advanced technology Demonstration) 계약에 의해서 4개의 회사가 참여하고 최종적으로 Boeing이 선정되어 시작된 J-UCAS(Joint Unmanned Combat Air System) 프로그램의 일환으로 발전된 무인전투기 체계이다. 주 임무는 전시에 적의 방공망을 제압(SEAD : Suppression Enemy Air Defense)하는 것이다. 하지만 이런 SEAD임무는 적의 위협에 직접적으로 노출되는 상황의 위험한 임무이기 때문에, 성공적으로 임무를 수행하기 위해서는 기체의 위약도를 최대한 낮추어야 한다. 이러한 요구조건을 충족시키기 위해서 X-45A는 stealth 형상과 레이더 흡수 구조를 채택하여 RCS값을 감소시키는 설계를 시도하였다. 또한, 위험한 임무를 수행하기 위해서 조종사가 탑승하지 않는 무인기이므로 유인기와는 위약도에 영향을 주는 요소가 다르다. 위약도에 영향을 주는 필수요소는 다음 표 5와 같이 설정하였다. 표 5에서 볼 수 있듯이 유인전투기의 분류와 거의 유사한 분류를 할 수 있다. 일단 유인전투기에서의 핵심요소인 대응수단, 위협경보, signature, 성능, 무장을 그대로 유지한다. X-45의 경우는 오퍼레이터가 동시에 4대를 통제하도록 구성 되어있기 때문에, 대부분의 임무 수행을 자동화하였다. 임무를 자동적으로 수행하기 위해서는 여러 가지 센서에 의한 실시간 정보와 임무에 대한 입력된 정보 등을 이용해야 하고, 적의 위협에 대응하기 위해서는 유인전투기와는 다르게 통제 컴퓨터의 성능

표 4. F-16 C/D's Scores

Elements	Type	Score
Countermeasure	ECM	3
	Jammer	3
Threat Warning	RWR	3
Signatures	RCS	2
	Radar	2
Performance	Engine	4
	Max Speed (at sea level)	
	Max Speed (at altitude)	
	Max Climb Rate	
	Service ceiling	
Armament	Air-to-Air	3
	Air-to-Surface	3

표 5. X-45A's Essential Elements

Elements	Type	Products
Countermeasure	ECM	TBD
Threat Warning	ESM	TBD
	RWR	ALR-69
Signatures	RCS	RAS RAM
	Radar/ SAR	Raytheon AESA
Performance	Engine	28,000N
	Operation Altitude	35,000ft
	Max Cruising Speed	M0.8
Armament	Air-to-Surface	GBU-28 SBD GBU-35 JDAM
Control Computer	VMS	BAE systems

이 무인전투기의 위약도에 큰 영향을 주는 파라미터이다. X-45A는 적의 방공망을 제압하는 능력을 검증하기 위해 가상으로 적의 방공망을 설정하고, 목표에 대해서 타격을 가하는 시험을 성공적으로 수행하였다. X-45에 대한 핵심요소를 다음의 표 5에서 나타내고 있다. X-45A의 대해서는 F-16 C/D보다는 자세한 정보가 상대적으로 부족하였다.

대응수단으로 전자대응수단이 존재하지만, 상세한 성능은 알 수 없으며, F-16 C/D보다 개발 시기가 비교적 최근이기 때문에, 전자대응수단의 성능은 거의 유사하거나 개선된 형태로 가정하였다.

X-45A의 위협경보는 레이더 경보수신장치와 전자지원수단이 있다. 레이더 경보수신장치의 경우는 F-16 C/D에 장착되는 AN/ALR-69보다 성능이 향상되고 또한, 전자지원수단과 연동할 수 있는 발전된 ALR-69계열이다. 전자지원수단에 대한 정확한 정보는 없지만, 기능은 레이더 경보수신장치를 통하여 적의 레이더파를 수신하면 레이더의 종류를 분석하고, 그 정보를 통제 컴퓨터에 정보를 넘겨주거나, 대응수단을 자동적으로 제어하는 기능을 가진다.

성능또한 자세한 정보를 획득할 수는 없지만, 유인전투기보다 기동성이 우수하며 설계최대 값인 +9G~ -3G의 기동을 수행 할 수 있다고 가정한다.

무장은 F-16 C/D와는 다르게 공대공을 배제한 공대지 무장만을 보유하고 있다. 이는 적의

표 6. X-45A's Score

Elements	Type	Products
Countermeasure	ECM	3
Threat Warning	ESM	3
	RWR	3
Signatures	RCS	6
	Radar/ SAR	3
Performance	Engine	3
	Operation Altitude	
	Max Cruising Speed	
Armament	Air-to-Surface	3
Control Computer	VMS	3

방공망 제압을 하기 위해서 Stand-off 개념으로 목표를 공격할 수 있는 종류의 무장을 주로 장착한다.

통제 컴퓨터의 경우는 다음과 같은 방식으로 구성되어있다. 적의 방공망에 대한 지리적 정보를 미리 입력받고, 또한 실시간으로 전자지원수단등을 통해서 들어오는 정보를 처리하여 적 방공망의 종류에 대해서 판단하고 그 방공망에 의한 위협지역을 설정하여 자동으로 회피하는 등의 능력을 지니고 있다. 이런 파라미터를 고려하여 다음의 표 6에 X-45A의 Score를 설정 하였다.

### 2.5 적 위협(Threat)

적의 위협에는 적의 공중위협, 지상위협으로 나뉜다. 본 논문에서는 일대일 교전상황에서 적의 지상위협만을 가정하고, 적의 지상위협은 크게 두 가지 경우로 구분한다.

첫 번째, 지상위협은 대공포이다. 대공포의 경우는 발사체 탄두를 사용하고, 고정식과 자주식의 두 가지 경우가 존재한다. 여기서는 적이 일반적으로 사용하는 자주식 대공포(SPAAG : Self-Propelled Anti-Aircraft Gun)를 지상위협으로 선정한다. 여기서 선정할 대공포는 러시아의 ZSU-23-4으로, 통칭 "Shilka"로 불리며, 궤도차량 위에 23mm의 대공포 4문과 탐지 및 추적 레이더를 장착한 자주식대공포이다.

두 번째, 지상위협은 지대공미사일(SAM: Surface to Air)로 가정한다. 여기서 지대공미사일은 적이 일반적으로 사용하는 러시아의 지대공미사일로 NATO 식별코드로 SA-10 Grumble로 불리는 미사일을 선정하였다.

적의 지상위협에 대해서 표 1을 이용하여 필수요소를 분류한다. 이때, 각각의 요소는 대공포

표 7. SPAAG's Essential Elements

Elements	Type	Products
Detection Capabilities	Radar	RPK-2 "Tobol"
Tracking Capabilities	Radar	RPK-2 "Tobol"
Fire Control Procedures	Reaction time	14s
Ballistic projectile Characteristics	Muzzle velocity	960-1,000m/s
	Muzzle energy	87-96kJ
Warhead and fuzing characteristics	API-T	BZT
	HEI	OFZ
	HEI-T	OFZ-T

인 경우와 지대공미사일의 경우에 따라 포함되는 요소가 달라진다. 표 1에서 나타나고 있는 적의 위협에 대한 요소는 다음과 같다.

$C^3$  능력과 탐지능력, 추적능력, 화기통제와 탄환의 특성, 미사일의 성능과 유도능력, 탄두와 점화능력으로 구분한다. 여기서  $C^3$  능력의 경우에는 적 방공망의 각 구성 요소 간에 얼마나 신속하고 정확한 정보전파가 가능한지를 판단하는 요소이다. 하지만, 적과의 일대일 교전상황으로 문제를 설정하였기 때문에, 이 필수요소는 시뮬레이션에서 일단 배제하고 나머지 요소를 각 위협에 따라 다음의 표 7과 표 8로 구분하여 분류하였다. 표 7에서 자주대공포의 경우에는 탐지능력과 추적능력 모두 동일한 레이더가 요소로 들어간다. ZSU-23-4의 경우 지속적인 개선이 진행되고 있지만 비교적 오래된 기종이다. 여기서 사용되는 자주대공포의 경우는 주로 저고도로 침투하는 적기에 주로 사용되기 때문에, 레이더의 성능은 한계가 존재한다.

화기통제 파라미터에서는 반응시간을 필수요소로 선정하였다. ZSU-23-4의 반응시간은 저고도의 적 기체를 탐지하고 나서 준비시간까지 약 14s 정도의 시간이 소요되는 특징을 지니고 있다. 저고도로 침투하는 적의 경우는 레이더에 탐지되는 거리가 짧기 때문이다.

발사체 탄환의 특성 파라미터는 총구속도와 총구 에너지로 설정하였다. 총구속도와 총구에너지는 탄환이 목표물까지 갈수 있는지 여부를 나타내며 속도와 에너지에 비해 목표물의 고도가 높으면 성능 상의 제약요소로 작용한다.

탄두의 종류와 점화조건은 고풍 소이탄 (HEI : High explosive incendiary)과 고풍 소이예광탄

표 8. SAM's Essential Elements

Elements	Type	Products
Detection capabilities	Radar all altitude	36D6 (TIN SHIELD) 200km
		96L6E 200km
	Low altitude radar	76N6 (CLAM SHELL) 120km
Tracking capabilities	Radar	30N6 (FLAP LID A/B) 100km
		64N6 (Tombstone) 250km
	tracked	6 target
Fire control procedures	Control and Command	83M6E
	Reaction time	28 sec
	Set up time	5 min
Missile performance and guidance capabilities	Range	48N6E 150km
		48N6E2 200km
		5V55K 45km
		5V55R 75km
		5V559 90km
	Maximum velocity	48N6E 2km/s 48N6E2 2km/s 5V55K 1.7km/s 5V55R 1.7km/s 5V559 2km/s
missile guided	12	
TVM	48N6E 48N6E2	
SARH	5V55R 5V559	
Command-guidance	5V55K	
Warhead and fuzing characteristics	HE	5V55K 100kg 5V55R 100kg 5V559 100kg 48N6E 145kg 48N6E2 145kg

(HEI-T : High Explosive Incendiary Tracer) 그리고 마지막으로 장갑관통 소이예광탄 (API-T : Armour-Piercing Incendiary Tracer)의 3가지의 형태가 존재한다. 각 종류에 따라 무게와 총구속

도가 달라지는 특징을 가지고 있다. 자주대공포에 대한 Score를 표 9에 정리하여 나타내었다.

표 8을 보면 지대공미사일의 필수요소를 보여준다. SA-10 지대공 미사일의 경우는 발사체의 종류에 따라서 성능이 다르게 나타나는 것이 특징이다.

표 9. SPAAG's score

Elements	Type	Products
Detection Capabilities	Radar	2
Tracking Capabilities	Radar	2
Fire Control Procedures	Reaction time	4
Ballistic projectile Characteristics	Muzzle velocity	3
	Muzzle energy	2
Warhead and fuzing characteristics	API-T	3
	HEI	3
	HEI-T	3

표 10. SAM's Essential Elements

Elements	Type	Products
Detection capabilities	Radar all altitude	4
	Low altitude radar	4
Tracking capabilities	Radar	4
	tracked	4
Fire control procedures	Control and Command	3
	Reaction time	3
	Set up time	2
Missile performance and guidance capabilities	Range	4
	Maximum velocity	3
	missile guided	3
	TVM	3
	SARH	3
	Command-guidance	3
Warhead and fuzing characteristics	HE	3

탐지능력에는 두 가지 종류의 레이더가 사용되는데 첫 번째 레이더는 장거리 고고도 레이더 이고 36D6 'TIN SHIELD'이다. 그리고 두 번째 레이더는 저고도로 침투하는 적을 탐지하는데 주로 사용되는 76N6 'CLAM SHELL'이다. 두 레이더의 경우 초기부터 개선이 진행되어서 현재는 상당한 수준의 탐지능력을 보유하고 있다.

추적능력에 사용되는 레이더는 30N6 'FLAP LID A / B'와 64N6 'Tombstone'이 사용된다. SA-10의 추적레이더는 차량을 이용하여 이동된다. 또한 동시에 6개의 목표를 동시에 추적할 수 있다.

화기통제에서는 준비시간과 반응시간 그리고 통제 및 명령체계를 중요하게 본다. SA-10의 차량을 이용하여 이송이 가능하기 때문에 원하는 위치에서 발사를 준비할 수 있고 이때, 소요되는 시간은 5분정도가 된다. 설치 및 반응시간은 약 28초 정도가 된다.

미사일의 성능과 유도능력은 장착되는 발사체의 종류에 따라 다르다. 유도능력은 크게 TVM(Track Via Missile)과 SARH(Semi-Active Radar Homing)그리고 Command-guidance가 있고, 이것은 발사체에 따라 다르다. 또한 동시에 최대 12개의 발사체를 유도할 수 있는 특징을 가지고 있다.

발사체의 탄두와 점화특성에서 55계열과 48계열 모두 고폭약(HE)을 장착하며, 경우에 따라 48N계열은 핵을 장착할 수 있다. 이러한 특징을 고려하여, 다음의 표 10에 SA-10 지대공미사일의 Score를 나타내었다.

## 2.6 몬테카를로 모사법 (Monte-Carlo Simulation)

위약도를 구하기 위해서 사용되는 몬테카를로 모사법은 확률변수로부터 표본을 임의의 수만큼 추출하여 난수를 생성하고 이것을 각 단계의 결합모델에 대입하고 이것을 계산하여 최종적으로 위약도의 확률분포 또는 확률 값을 추정할 수 있도록 하는 기법이다. 이러한 몬테카를로 모사법의 일반적인 특징으로 프로그램 코드를 간단하게 할 수 있어 쉽게 적용할 수 있는 장점을 지니지만, 보다 정확한 모사를 하기 위해서 충분히 많은 횟수의 임의의 수를 추출을 해야 하기 때문에 계산시간이 증가하게 되는 단점이 있다. 그렇기 때문에, 수식이 매우 복잡한 경우는 추출횟수를 증가시키면 오히려 효율이 떨어지는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 단점에도 불구하고 많은 수의 표본만 생성할 수 있다면, 실제상황을 거의

정확하게 근사할 수 있는 장점 때문에, 현재도 많은 경우 몬테카를로 모사법을 사용하고 있다. 그렇기 때문에, 본 논문에서도 위약도를 구하기 위한 모사법으로 몬테카를로 모사법을 사용하였고, 이것을 이용한 MATLAB 프로그램을 개발하였다.

**2.7 시뮬레이션 알고리즘(Simulation Algorithm)**

위약도를 구하기 위한 시뮬레이션 알고리즘은 몬테카를로 모사법을 사용하기 위해서 최대한 간단한 코드로 구성 하였다. 앞서서도 언급한 몬테카를로 모사법의 특징은 최대한 많은 수의 표본을 추출하여 많은 수의 반복계산을 하면, 실제상황을 근접하게 모사할 수 있는 점이다. 그렇기 때문에 알고리즘을 구성할 때 중요하게 고려한 점 중 하나는 바로 간결한 코드이다. 이런 코드를 사용하면 많은 수의 반복계산에서 높은 효율을 얻을 수 있다. 다음 그림 2와 같은 순서도로 코드를 구성하였다. 순서도에서 초기설정 부분은 항공기의 종류와 적 위협에 대한 파라미터와 점수를 입력받아 프로그램을 초기화 하는 모듈이다. 그 후에는 각 단계별 모듈에서는 위약도 확률을 구하기 위해 각 단계에 따른 확률을 찾도록 구성하였다.

프로그램은 MATLAB을 이용하여 개발하였다. MATLAB의 특징 중 하나인 행렬연산을 기반으로, 제공하는 난수생성기를 이용하여 최대한 빠른 속도로 계산을 수행하는 프로그램을 구성하였다.

현재 MATLAB에서 제공하는 난수생성기의 알고리즘은 Mersenne Twister Algorithm[12]으로 특징으로는 빠른 난수생성과  $2^{19937} - 1$ 의 긴 주기를 가지는 특징이 있다. 그러므로 몬테카를로 모

사법과 같이 많은 수의 난수를 추출할 때, 이러한 특징은 강점으로 작용한다.

**2.8 시뮬레이션 결합모델**

그림 2와 같은 순서도로 프로그램을 작성할 때, 제일 중요한 부분 중 하나는 각 모듈에서 상황에 적합한 결합모델을 생성하는 것이다. 일단 본 논문에서 개발한 프로그램의 특징은 일대일 교전상황에서 지상위협만을 가정된 경우이기 때문에 각 모듈에서의 결합모델은 다음과 같이 생성한다.

처음으로  $P_A$ 에 대한 결합모델은 적의 위협 활성화 여부를 판단하는 것에 일차적 목적이 있다. 일반적인 경우에 대해서 적의 위협은 아군에 의해서 비활성화 상태가 되거나 다른 아군 항공기에 의한 Jamming에 의해 무력화가 되는 경우가 있을 수 있고, 위협의 고장에 의한 점검으로 비활성화 상태가 될 수도 있다. 하지만, 현재 개발한 프로그램의 경우는 일대일 교전상황을 가정하였기 때문에, 아군에 의한 무력화는 배제를 한다. 또한, 위협의 고장과 정비 시간 등에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 활성화에 대한 결합모델에서는 위협의 활성화 여부를 단순하게 활성화 또는 비활성화를 판단하는 모델로 만들었다. 그렇기 때문에, 결합모델을 간단하게 Bernoulli 확률[12]을 이용하여 0또는 1의 값으로 활성화, 비활성화로 모사하도록 만들었다. 차후에는 위협의 고장률을 이용하는 결합모델에 대해서 생각해 볼 수 있고, 또한 시나리오를 일대 다수 또는 다수 대 다수의 경우에 대해서 정립할 때는 아군의 위협 저지력까지 모사하는 과정을 포함해야 할 것이다.

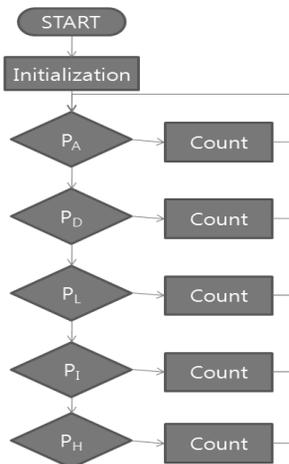


그림 2. Flow Chart

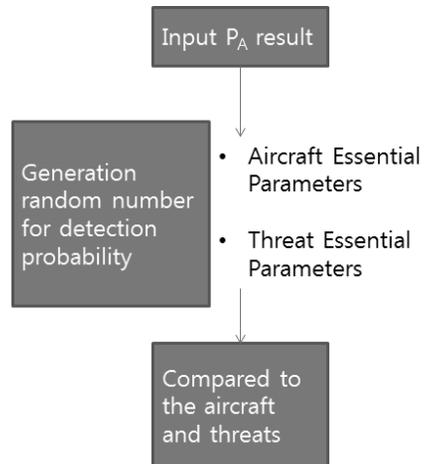


그림 3. Flow Chart for Detection

$P_D$ 의 결합모델의 경우는 가중 점수 환산법을 이용하여 생성한다. 결합모델을 생성하기 위해서는 모델에 필요한 핵심요소를 선별해야 한다.  $P_D$ 는 위협에 의해 항공기가 탐지될 확률을 의미하며, 이것을 계산하기 위해서는 선정된 파라미터의 점수를 이용하여 난수를 생성하고 이 점수를 비교하여 탐지여부를 결정하는 방식으로 프로그램을 작성하였다. 여기서 사용되는 핵심요소는 다음과 같다. 위협의 파라미터 중에 탐지와 관련된 radar의 파라미터들을 선정하고, 항공기의 파라미터 중 signature와 대응수단을 선정했다. 여기서 signature 에서는 레이더와 RCS를 사용하고, 대응수단에서는 jammer를 사용한다. 이 모델에서 중요한 것은 결론적으로 탐지 여부를 파악하는 것이고, 이때 요소는 항공기와 위협에 대해서 서로 대립적으로 작용한다. 다시 말하면, 탐지에 대해서 항공기의 파라미터 중 RCS의 점수와 radar의 점수 그리고 jammer의 점수가 상대적으로 적 위협의 탐지 레이더 점수보다 높으면 탐지가 되지 않는 것으로 판단하는 것이다. 아울러 산정한 점수 값을 평균으로 하는 확률정규분포를 생성하여 교전상황을 모사한다. 즉, 탐지를 하기 위해서 필요한 파라미터가 항공기의 RCS와 위협의 레이더 단 두 개만 있다고 가정을 하고, RCS의 점수를 3, 레이더의 점수도 3으로 한다. 여기서 점수가 의미하는 것은 항공기의 RCS의 효과를 8단계의 경우에 대해서 어느 정도 단계의 능력인지를 판단하는 점수이다. 마찬가지로, 적 위협의 레이더의 점수는 항공기를 찾아낼 수 있는 효용성에 대한 점수를 의미한다. 점수 3점은 각 파라미터의 대표값으로 생각한다. 왜냐하면, 항공기의 RCS성능 또는 적 위협의 레이더 성능이 현실에서 언제나 일정한 효과를 보이지 않는 것을 모사하기 위해서 프로그램에서는 각 점수를 평균으로 하는 정규분포를 기반으로 난수를 생성하게 된다. 이렇게 생성된 난수에 의해서 탐지에 대한 모사를 수행한다.

$P_D$ 의 결합모델에 대해서 추가적인 설명을 하자면, 앞에서 말한 항공기의 파라미터는 RCS의 효용성과 항공기에 장착되는 레이더가 적 레이더에 대해서 어느 정도 은닉하는지에 대한 점수 그리고 대응수단에서는 jammer가 얼마나 효과적으로 적의 레이더를 방해 할 수 있는지에 대한 점수를 나타낸다. 적 위협의 레이더는 jammer에 대한 내성과 항공기에서 나오는 radar파를 탐지하는 능력 그리고 항공기에서 돌아오는 전파를 얼마나 멀리에서 또 어느 고도에서 탐지할 수 있는지에 대해서 점수를 선정할 수 있다.  $P_D$ 의

결합모델은 그림 3과 같은 순서로 탐지여부를 판단하게 된다.  $P_A$ 의 활성화 결합모델의 결과에 따라 적 위협이 활성화가 되어있다면, 다음 단계로 탐지에 대한 평가를 시작하도록 구성되어있다. 시뮬레이션을 위해서 위에서 언급했던 파라미터 점수를 평균으로 하는 정규분포로부터 난수를 추출하고 이렇게 추출한 난수를 항공기의 부분과 위협의 부분에 대해서 평가를 수행하여 탐지 여부를 결정하는 과정을 거치게 된다. 여기서  $P_D$ 의 결합모델의 경우에는 항공기에 적용되는 파라미터가 적 위협보다는 수가 많은 것을 알 수 있다. 항공기의 점수와 위협의 점수를 비교하기 위해서 항공기의 점수를 산술평균하여 사용하게 된다. 이것을 위해서 다음과 같은 가정을 한다. 탐지의 결합모델은 항공기의 부분과 위협의 부분으로 구성되고 이때 각 파트는 서로에게 대립적으로 작용한다. 또한 항공기 부분에서 점수가 높은 파라미터와 점수가 낮은 파라미터가 있는데 이때, 점수가 높은 파라미터가 존재하더라도 점수가 낮은 파라미터에 의해서 탐지될 수 있는 가능성이 커지게 되기 때문에, 전체적인 점수는 제일 높은 점수에 비해서는 낮아지므로 산술평균을 이용한다. 이것을 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$J = \frac{\sum_{i=1}^n Aircraft_i}{n} - \frac{\sum_{j=1}^m Threat_j}{m} \quad (2)$$

if  $J > 0, undetected$   
 else if  $J < 0, detected$

나머지 결합모델에 대해서도 위와 같은 절차로 결합모델을 생성할 수 있다. 차후에 보다 정교하면서 실제 상황을 가깝게 모사할 수 있는 추가적인 연구를 수행 할 예정이다.

## 2.9. 시뮬레이션 결과와 민감도 분석

앞에서 제안한 결합모델과 알고리즘을 이용하여 MATLAB 프로그램을 개발하였다. 일대일 교전상황 모사를 하기 위해서 사용하는 표본 수는 100만개로 설정하여 프로그램을 실행시켜 다음의 표 11과 표 12와 같은 결과를 얻었다. 활성화여부를 나타내는  $P_A$ 의 값은 일단 Bernoulli 확률로 모사하였기 때문에 각 경우에는 대부분 0.5정도

표 11. F-16 one-on-one engagement

	$P_A$	$P_{D/A}$	$P_{L/D}$	$P_{I/L}$	$P_{H/I}$	$P_H$
SA-10	0.4999	1.0000	0.5005	0.8413	0.5002	0.1053
ZSU-23-4	0.4999	0.7186	0.0371	0.0508	0.5148	3.4e-4

의 확률 값을 보이고 있다. 계산 결과에 의하면 SA-10의 경우는 F-16 C/D와 X-45A를 탐지하는 것에 대해 ZSU-23-4보다 효과적인 것을 알 수 있지만,  $P_{L/D}$ 의 확률에서 X-45A의 경우가 낮은 것을 알 수 있다. 여기서 자주대공포는 예시 항공기들의 경우에 대해 유용하지 않다는 것을 확인할 수 있다. 실제로 자주대공포의 경우 주로 저고도에서 접근하는 저속 항공기에 효과적이지만, 높은 고도의 고속 항공기에 대해서는 효과적이지 않다는 일반적인 상황을 제대로 묘사하고 있음을 알 수 있다. 또 프로그램에서 보여주는 결과에 의하면 지대공미사일 SA-10에 대해서는 F-16 C/D의 경우보다 X-45A가 더 낮은 위약도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 스텔스 기술을 적용하여 설계한 무인전투기인 X-45A가 F-16에 비해서는 위약도가 낮기 때문에 궁극적으로 생존성이 향상 될 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

각 파라미터들에 대해 민감도를 확인하기 위해 각각 파라미터의 Score를 10%씩 50%까지 증가시켜 계산을 수행하고, 그 결과를 다음 표 13

과 표 14에 나타내었다. 이때 민감도의 경우는 각 항공기에 대해서 모두 효과적인 SA-10에 대해서 계산을 수행 하였다. 먼저 표 13을 보면, F-16 C/D의 경우는 대응수단과 위협경보 그리고 성능의 3가지 경우에 대해서 위약도가 크게 변하는 것을 확인할 수 있다. 위협경보의 반응속도 또는 성능이 좋을수록 미리 적의 공격을 예측하여 먼저 회피를 할 수 있기 때문에, 이러한 요소가 위약도에 큰 영향을 주는 것은 상식적으로도 적합한 것을 알 수 있다. 다음으로 X-45A의 경우인 표 14를 살펴보기로 하자. X-45A의 경우에서 대응수단과 위협경보, 성능 그리고 signature의 변화 따르는 위약도의 변화를 확인할 수 있으며, F-16 C/D와 마찬가지로 대응수단과 위협경보가 가장 민감한 것을 확인할 수 있다. 이는 무인기의 경우도 유인기와 다르지 않게 적의 위협을 빠르게 경고 받을수록 위약도가 낮아지는 것을 의미한다. F-16 C/D와 X-45A 둘 다 동일한 파라미터가 위약도에 민감한 것을 알 수 있다.

### III. 결 론

표 12. X-45 one-on-one engagement

	$P_A$	$P_{D/A}$	$P_{L/D}$	$P_{I/L}$	$P_{H/I}$	$P_H$
SA-10	0.5002	0.9987	0.1280	0.9771	0.4977	0.0311
ZSU-23-4	0.5002	0.2812	0.0022	0.3101	0.4490	4.4e-5

표 13. F-16 C/D Sensitivity & probability

		$P_{D/A}$	$P_{L/D}$	$P_{I/L}$	$P_{H/I}$	$P_H$
Countermeasure	0%	1.0000	0.5000	0.8413	0.5000	0.1051
	50%	1.0000	0.1103	0.6327	0.5014	0.0192
Threat warning	0%	1.0000	0.5000	0.8413	0.5003	0.1051
	50%	1.0000	0.2075	0.8394	0.5003	0.0436
Signature	0%	1.0000	0.5004	0.8419	0.5005	0.1054
	50%	0.9999	0.5000	0.8409	0.4991	0.1048
Performance	0%	1.0000	0.4997	0.8409	0.5004	0.1051
	50%	1.0000	0.4996	0.2020	0.5007	0.0253
Armament	0%	1.0000	0.5009	0.8415	0.4989	0.1051
	50%	1.0000	0.4995	0.8414	0.4999	0.1050

표 14. X-45A Sensitivity & probability

		$P_{D/A}$	$P_{L/D}$	$P_{I/L}$	$P_{H/I}$	$P_H$
Countermeasure	0%	0.9938	0.1286	0.9775	0.5010	0.0313
	50%	0.9938	0.0115	0.9329	0.5003	0.0027
Threat warning	0%	0.9938	0.1279	0.9773	0.5020	0.0312
	50%	0.9939	0.0071	0.9779	0.4941	0.0017
Signature	0%	0.9774	0.1284	0.9775	0.5006	0.0307
	50%	0.8419	0.1286	0.9775	0.5007	0.0265
Performance	0%	0.9772	0.1288	0.9773	0.5003	0.0308
	50%	0.9771	0.1279	0.7494	0.4970	0.0233
Armament	0%	0.9773	0.1282	0.9766	0.5009	0.0307
	50%	0.9773	0.1285	0.9772	0.4998	0.0307

항공기의 생존성에 관련된 요소에 가중 점수 환산법을 적용하여 생성한 결합모델로 예시 항공기들의 상대적인 위약도를 측정하고, 파라미터별 민감도를 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 보면 대응수단과 위협 경보 파라미터는 유인기와 무인기 모두 위약도에 상당히 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, X-45A의 경우에는 signature가 가장 민감한 반응을 보이는 파라미터임을 확인할 수 있었다. 위에서 나타난 결과는 비록 가중 점수 환산법이라는 정성적인 평가 방법을 이용하여 수행한 모사법이지만 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 항공기의 위약도 분석을 수행함에 있어 기존 유인전투기에 사용하는 방법과 절차를 무인항공기에도 유사하게 적용할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

2. 본 모사법을 이용한 결과 무인전투기의 위협경보가 상대적으로 중요한 파라미터이다.

현재 적용한 결합모델은 최대한 단순화 시킨 모델이다. 따라서 추가적으로 다음과 같은 연구를 수행할 필요가 있다.

첫째로 현재 제안한 가중 점수 환산법 체계를 분석하고 개선하기 위한 연구가 필요하다. 실제 항공기에서의 정확한 제원과 시험평가데이터, 전투 데이터 등을 알 수 있는 경우 가중 점수 환산 체계에 대한 보정(calibration) 방법을 분석할 수

있을 것이다.

둘째로 보다 정교하게 실전 상황을 모사할 수 있는 단계별 결합 모델에 대한 연구가 요구된다. 단계별로 고려해야할 파라미터의 도출과 이들 파라미터를 결합하는 방식에 대하여 개선의 여지가 있으며, 이에 대한 검증이 요구된다.

셋째로 현 단계에서는 일대일 지상 위협 상황만을 고려했으나 실전 상황에서 발생할 수 있는 일대다, 다대일, 그리고 다대다 교전 상황에 대한 결합모델 도출이 요구된다.

### 참고문헌

- 1) "올해 주목할 만한 항공우주기술 10가지", 월간항공 2010년 4월호, 2010.04, pp. 10-15.
- 2) 김정엽, 이경태, "미국의 국방과학 역사를 통해 관찰한 UCAV의 진화과정", 한국항공우주학회지 제 30권 2호, 2002. 3, pp. 152-174.
- 3) 이경태, "UCAV 개발 동향과 발전 전망", KSAS 매거진 제 3권 2호, 2009. 7, pp. 73-89.
- 4) Robert E. Ball, The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design, AIAA Education series, Edition 2, New York, 2009, pp. 1-300.
- 5) MILITARY HANDBOOK, "Aircraft Survivability", Department of Defense, MIL-HDBK-2069, April 1997, pp. 1-24.
- 6) "UAS Roadmap 2005-2030", Office of the Secretary of Defense, August 2005, Section2 pp. 11.
- 7) "F-16 Fighting Falcon Multi-Role Fighter", <http://www.aerospaceweb.org/aircraft/fighter/f16>.
- 8) <http://www.astronautix.com/lvs/s300.htm>
- 9) "S-300(missile) Russian long range SAM", [http://en.wikipedia.org/wiki/S-300\\_\(missile\)#cite\\_note-astronautix-4](http://en.wikipedia.org/wiki/S-300_(missile)#cite_note-astronautix-4).
- 10) <http://www.boeing.com>
- 11) <http://www.janes.com>
- 12) MATLAB User Manual