

# 안전중시 무기체계 개발에서 상호운용성 확보에 관한 연구

김영민\* · 이재천\*

\*아주대학교 시스템공학과

## On Assuring the Interoperability in Development of Safety-Critical Weapon Systems

Young Min Kim\* · Jae-Chon Lee\*

\*Dept. of Systems Engineering, Ajou University

### Abstract

Due to the evolution of war fields to the net-centric one, weapon systems have become very complex in terms of both mission capability and implementation scales. In particular, the net-centric war field is characterized by a set of interconnected and independently operable weapon systems. As such, the individual weapon systems are required to meet the interoperability and thus, assuring it has been becoming more crucial even in the early stage of development. Furthermore, the ever-growing complexity of the weapon systems has attracted a great deal of attention on the safety issues in the operation and development of weapon systems. The objective of the study is on how to assure the interoperability for safety-critical weapon systems while maintaining system complexity. To do so, the approach taken in the paper is to consider the interoperability from the early stage of the development. Specifically, the required functions to satisfy the interoperability are developed first. The functions are then analyzed in order to link the safety requirements to the reliability evaluation, which results in the study of quantifying the effects of the safety requirements on the system as a whole. As a result, we have developed a methodology and procedure on how to assure interoperability while applying the safety requirements in the weapon systems development.

**Keywords :** Complex Systems, Weapon Systems, Interoperability, Systems Safety, Conceptual Design

## 1. 서론

오늘날 개발되는 시스템들은 상당히 고도화된 기술의 집약으로 개발되는 양상을 보이고 있다. 시스템을 구성하는 하부 체계는 과거의 시스템이 주요 공학적 학문을 기반으로 개발되었던 것과는 달리 보다 다양한 학문의 기술적 융합된 하부 체계와의 조합으로 시스템을 구성하고 있는 실정이다. 특히, 국방무기체계, 고속철도차량, 원자력발전소와 같은 대형복합 시스템들은 오늘날 시스템

개발단계에서 시스템 복잡성으로 인해 시스템 운용 및 제어 단계에서 수많은 오류가 발생하고 있다. 이러한 대형 복합 시스템 중 시스템 오류로 인한 사고 발생 시 인적·물적 기준에 상당한 피해를 입힐 수 있는 대상을 안전 중시 시스템이라고 한다[1]. 최근 들어 무기체계 개발 역시 시스템의 대형화로 인해 개발단계에서 시스템 복잡성을 제어하고 이를 설계단계에 반영하는 연구에 대해 중요성이 부각되어 무기체계의 하부를 구성하는 서브-체계간 상호운용성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

† 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임 (No. NRF-2012R1A1A2009193)

† Corresponding author: Prof. Jae-Chon Lee, Dept. of Systems Engineering, Ajou University, Wonchon-dong, Youngtong-gu, Suwon, 443-749. Tel: 031-219-3941, E-mail: jaelee@ajou.ac.kr  
Received Oct. 20, 2013; Revision Received December. 4, 2013; Accepted December. 4, 2013.

또한, 상호운용성이 요구된다는 것은 체계를 구성하는 서브-시스템 및 그 시스템을 구성하는 하부 개체 사이에 공통의 운용 요구사항을 갖게 된다는 것이다. 이러한, 무기체계간의 상호 운용성에 대한 근간은 시스템 개발과 관련한 이해당사자 요구사항과 이를 바탕으로 도출 및 개발된 시스템 요구사항, 그리고 최종적으로 시스템 상호운용성 요구사항이 생성된다. 따라서, 설계단계에서 복잡성을 제어하기 위해 기존의 상호운용성에 대한 대부분의 연구들이 이러한 운용개념 및 초기 요구사항 문서(ORD, Originating Requirement Documents)를 바탕으로 시스템 상호운용성 요구사항 여부에 대한 분석을 수행하였었다. 국방분야에서 무기체계 개발시 상호운용성을 측정하기 위해, LISI (Level of Information System Interoperability) Model을 활용하여 수행하지만 LISI Model은 정보체계의 잠재적 상호운용성을 판단하는데 있어서 활용한 모델이기 때문에 실제적 시스템 설계단계에서 물리적 구현을 반영하는데 있어서 적용하는데 한계성을 지니고 있다. 또한, 대부분의 시스템설계 단계에서의 상호운용성에 관한 연구들이 위에서 언급한 ORD를 바탕으로 연구·분석자료와 LISI Model과 같은 추상적 모델을 바탕으로 상호운용성에 대해 식별 및 평가되기 때문에 상세설계 단계에서 실질적인 반영이 되지 못하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 제기된 문제를 해결하기 위해서, 시스템설계 단계에 적용 가능하도록 필요한 필수요소를 도출하고 이를 반영한 절차안을 구축하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에서는 사회 및 연구의 연구동향과 필요성을 제시하였고, 2장에서는 관련 선행연구 및 연구 목표를 기술하여 문제정의를 언급하였다. 3장에서는 상호운용성의 정량적 평가를 위한 요소식별 및 절차반영을 위한 접근법을 제시한다. 4장에서는 3장에서 제시한 식별된 요소를 프로세스 반영을 위한 방안 및 절차를 확립한다. 5장에서는 구축된 절차안을 바탕으로 국방 무인항공기 시스템 개발에 적용하여 절차안에 대한 검증을 수행하였다. 마지막, 5장에서는 본 논문의 결과를 정리 및 요약 하였다.

## 2. 문제의 정의

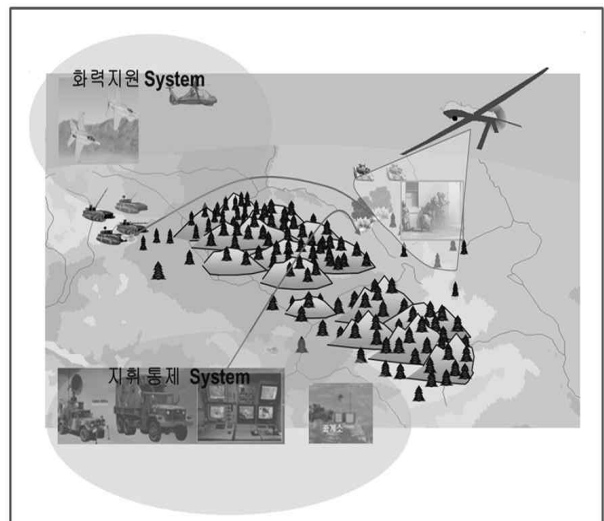
### 2.1 개념설계 단계에서 정량적 접근법을 통한 국방 대형복합 시스템의 상호운용성 제어의 필요성

오늘날 국방 시스템 개발과정에서도 가장 큰 문제 중 하나가 시스템 대형화 복잡화로 인해 하나의 무기체계를

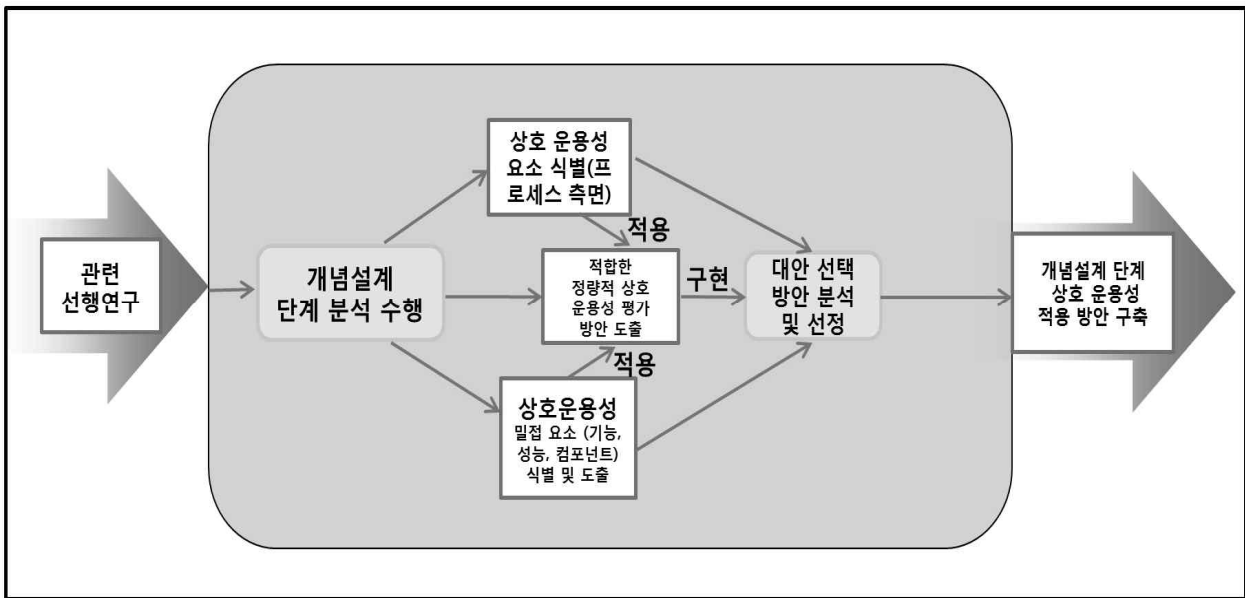
구성하는 하부-서브 시스템 간에 얼마나 원활히 연동되는지에 대한 즉, 상호운용성에 대해 이슈화 되고 있다. 기존의 단일 군의 성격 작전이 아닌 육·해·공군의 합동 연합작전의 체계로 오늘날 많은 작전개념이 변화하는 추세이기 때문에 많은 문제점들이 발생하고 있다[2]. 우리 군의 무기체계를 개발하는데 있어서 제작을 맡고 있는 업체들이 각기 다르고 육·해·공군이 서로 다른 데이터 정보체계를 지녔기 때문에 이로 인해 개발과정에서 오류들이 발생되고 있다. 이러한 문제를 시제품이 다 만들어진 이후에서야 상호 연동문제를 식별하고 발생하는 문제를 해결하기 위해 다시 설계 변경을 하다 보니 비용·시간적으로 막대한 손해를 보고 있다. 또한, 상호운용성에 대해 다른 것이 방대한 범위를 다루는 것이기 때문에 보다 초기 설계단계에서 ORD를 바탕으로만 다루고, 이후 상세설계 및 양산 단계에 반영 및 제작하는 현행의 방법으로는 상당한 잠재적 위험을 내포하고 있다. 이렇듯 본 연구에서는 기존의 시스템 설계단계에서 추상적으로 접근하여 상호 운용성 해결에 관한 문제를 정량적 접근과 체계적 절차를 통해 실질적 반영이 될 수 있도록 노력하였다.

### 2.2 시스템공학 기반의 상호운용성 반영 설계 절차안 생성의 중요성

시스템공학의 활동은 시스템 설계단계에서 초기단계인 개념설계단계 초점을 둔 학문으로서 본 연구에서 언급한 상호운용성과 직접적으로 연관성이 높은 요소인, 요구사항, 기능, 컴포넌트 도출 등이 개념 설계단계에서의 활동을 시작으로 진행되기 때문에 상호 운용성 이슈를 다루기에 적합한 학문이라고 하겠다.



<Figure 1> The top-level concept of a unmanned aerial vehicle in the war field.



<Figure 2> A conceptual diagram representing the objectives of the paper.

국내에서는 국방분야에서 상호운용성에 대한 중요성에 대한 인지로 부대 운용 및 체계개발 단계에 활용하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만, 아직 상호운용성을 시스템설계 단계에 적용시키는 기술적 수준은 걸음마 수준에 머물고 있다. 일반적 단일 시스템을 개발하는데 있어서는 타분야에서도 오랜 설계관습에 따라 수행하고 있다. 그로인해, 국방분야에서도 마찬가지로 군수분야의 무기체계가 대형화 및 <Figure 1>과 같이, 작전 수행의 연합화에 따른 상호운용성이 설계 단계부터 적용되어야 개발 그리고 체계간 운용 및 유지보수 단계에서 보다 비용·시간을 줄일 수 있을 것이다. 따라서, 아직 국내·외적으로 미흡한 개념설계 단계에서 상호운용성 고려한 절차안을 만들어 군수분야를 비롯해 각기 다른 분야에서 활용된다면 시스템 개발과정에서 원활한 상호운용성 고려를 통한 개발 수행이 가능해 질 것이다.

### 2.3 선행연구 고찰

시스템설계 단계의 초기 단계인 개념설계 단계에서부터 대형복합 시스템의 상호 운용성으로부터 야기되는 문제를 해결하기 위해 설계 프로세스 개선을 통한 접근과 상호 운용성 평가모델 개발을 통한 복잡도 해결을 위한 관한 연구가 참고문헌 [3]와 [4],[5],[6]을 통해 발표되었다.

참고문헌[3]에서는 미국방성 DoDAF(Department of Defense Architecture Framework)를 통해서 무기체계

의 개발 및 운용단계에서 대형 복합시스템을 구성하는 하부 체계간 상호운용으로부터 발생하는 이슈사항을 반영하고 관리하는 측면을 활용하여 안전관점에서 새롭게 설계단계에서 상호운용성 문제를 해결 가능한 프레임워크를 제공하고 있다. 따라서, 상호운용성 이슈를 아키텍처 프레임워크 기반으로 접근한다는 점에서 개념적 수준에서 접근한다는 점에서 한계성을 지니고 있다.

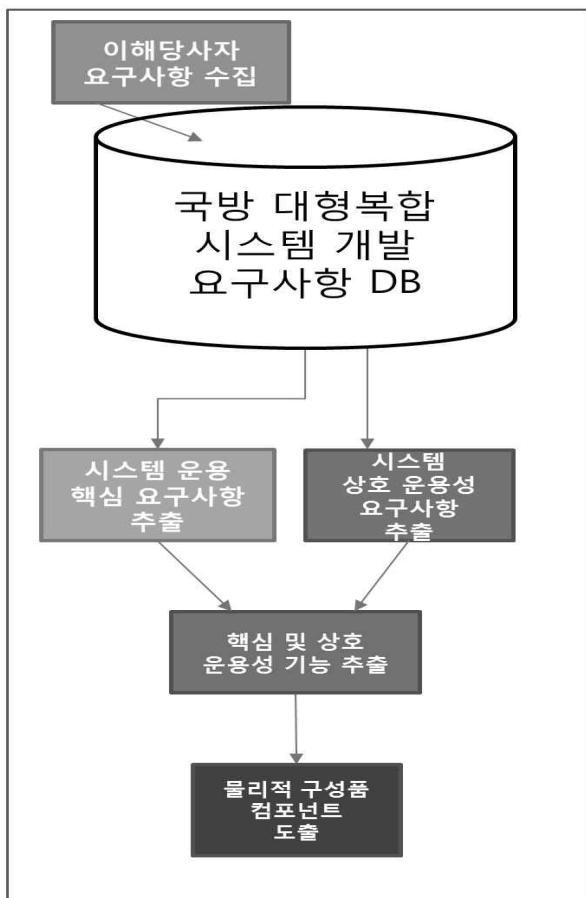
참고문헌[4]에서는 NCEI(Net Centric Entity Interoperability) 레이어 모델을 활용하여 네트워크 중심의 전장 환경(Network Centric Warfare)에서 참여하는 국방 무기체계간 통신 및 정보체계에 참여하는 다양한 엔티티를 식별하고 객체간 상호연동을 개체의 능력에 따른 영향도로 판단하기 때문에 설계단계에서 본 연구를 통해 접근하려는 것보다 보다 상위 단계에서의 능력을 통한 상호연동성을 판단하다보니 실제 하부 설계단계에서 적용하는 관점에서 어려움을 내포하고 있다.

참고문헌[5]에서는 국방무기체계 개발단계에서 상호운용성 문제를 해결하기 위해 접근 가능한 다양한 접근법에 대해 기술하고 있지만, 특히 정량적 산출을 통한 상호 운용성 평가 방안에 대해서 직접적으로 다루지 못하고, 상호 운용성 평가모델을 생성하여 상호운용성 문제를 해결하고 있다. 마지막으로, 본 연구와 밀접한 참고문헌[6]에서는 복합시스템을 대상으로 Birnb aum이 강조한 컴포넌트 중요도를 활용하여 시스템 전체 미치는 영향을 측정하였지만, 이러한 결과를 바탕으로 시스템 설계단계에서 활용안에 대해서 제시하지 못하고 있다.

## 2.4 연구 목표 및 범위

본 연구의 초기단계에서는 개념설계 단계에서 식별 가능한 상호 운용성 요소를 식별한다. 식별된 요소를 바탕으로 설계된 컴포넌트에 우선순위 평가를 통해 대안분석을 실시하여 최종 구축되는 시스템에 과연 어떠한 영향을 미치는지 대해 전체 설계에 대한 최적화 영향도를 분석 및 반영하는지에 대한 방안을 구축한다. <Figure 2>을 통해 설계단계에 상호 운용성 적용방안을 도출하고 상호운용성에 대해 정량적 접근법을 통한 수행방법을 제시한다. 이에 따라 상호 운용성을 반영한 설계안 구축에 대한 연구 수행 방법을 도식화 하였다.

일반적으로 시스템공학에서 분류하는 시스템 수명주기는 참고문헌 [7],[8],[9]에서 제시하는 것처럼 다양한 형태로 제시되고 있지만, 개념 설계단계, 상세 설계단계, 양산 및 운용단계라는 크게 3~4단계로 정의할 수 있다. 따라서, 본 연구는 상위수준의 설계 단계인 개념 설계 단계로 연구범위를 한정하고 적용 가능한 방안을 마련하였다.



<Figure 3> A procedure for interoperability assurance in conceptual development.

## 3. 개념설계 단계에 상호운용성 반영을 위한 절차 분석활동

### 3.1 국방분야 무기체계 개발단계에서 상호 운용성 적용 절차 분석

본 연구를 통해 개념설계 단계에서의 상호 운용성 문제를 반영하기 위해 <Figure 3>과 같이, 설계단계에서 상호 운용성을 반영할 수 있는 요소들을 분석하고 실질적인 설계 반영이 될 수 있도록 이해당사자 요구사항 정의 및 분석, 기능분석, 설계조합, 검증 및 확인 단계로 구성되는 개념설계단계의 단계별 과정에 대해 분석을 수행하여 설계반영 요소 및 방안을 적용할 수 있도록 중점을 두어 도출하였다.

- Step 1. 이해당사자로부터의 정보를 바탕으로 요구조건 및 기준 도출
- Step 2. 상호운용요소를 내포한 요구사항, 기능 분석 및 물리적 컴포넌트 도출
- Step 3. 컴포넌트 수준에서의 상호운용성 특성 중점 분석, 정량적 분석 및 반영 방안분석
- Step 4. 제시된 방안으로 도출된 컴포넌트의 통합 및 검증단계에서의 수행방안 분석 및 도출
- Step 5. 개념설계 단계를 거쳐 최종적으로 통합된 물리적 완성품의 검증 및 확인(초기 요구사항 기반의 수행, 상호 운용성 평가 또한 수행)

### 3.2 설계단계에서 상호운용성 반영위한 핵심요소 분석 및 도출

한국군의 국방무기체계를 개발하는 과정에서 상호 운용성 요소를 개발 및 반영하기 위해서는 다음과 같이 일반적 무기체계 설계단계와 같이 크게 4가지 단계를 거쳐 진행이 되어 진다.

1. 소요제기
2. 선행연구
3. 탐색개발
4. 체계개발

위 연구개발 과정을 거쳐 설계가 구체화되고 상호 운용성 반영이 진행된다.

기존의 상호운용성 적용방안은 설계 초기단계(소요제기, 선행연구)에서는 운용개념, 운용환경 등의 정보를

| 요구사항 정의서 |               |  |         |
|----------|---------------|--|---------|
| 요구사항 ID  | 요구사항 명        | 요구사항 상세 내용   | 요구사항 유형 |
| URQ001   | UAV 목적        | 1.군단 관심지역 및 작전지역의 정찰이 목적이며, 작전지역내 핵심 및 고가치 표적 추적, 실시간 표적 정보 획득 및 제공, 표적 파해평가 지원, 대화력전 임무 수행 등을 지원한다.<br>2.사단 적지중심작전 및 예하여단 근접작전을 지원한다.   | 시스템     |
| URQ002   | UAV 운용환경 및 개발 | 1.군단정찰용 무인항공기는 일반적으로 비행체, 지상통제장비, 임무탑재체, 데이터링크, 이착륙장비와 같은 주요 구성요소로 이루어진다. 먼저 시스템에서는 앞에서 서술한 주요 구성요소인 비행체, 통신장비, 관제장비 등으로 구성되어있고 구성장비 측면에서는 데이터링크 장비들로 이루어져 있다. 이들 장비들은 운용 목적 및 방식, 비행체의 크기와 수행하는 임무에 따라 그 구성이 달라 약간씩의 차이가 있다.<br>2.무인항공기 체계성능요구조건 중, 주요 항목들을 정리하면 개발비용을 최소화하기 위하여, 운용환경 조건은 안전한 비행시험을 수행할 수 있는 최소한의 범위로 한정하였다. 정찰제공비행은 성능권과 같이 일정한 바람이 부는 조건에서 비행시험을 수행할 수 없는 점을 고려할 때, 시험결과를 활용한 분석적인 방법으로 평가를 수행하여야 할 것이다.<br>3.본 개발은 사단급 무인항공기 및 운용 경험이 부족한 가운데 짧은 시간에 수행하여야 하는 본 연구를 통해 사단급 무인항공기 시스템의 모델링 개발을 위한 기반기술을 확보하고, 동 분야에 있어 우위를 확보한다.   | 시스템     |
| URQ003   | 지상장비          | 기능을 수행한다. 이러한 기능을 수행할 수 있도록 Windows 2000기반 상업용 컴퓨터, VxWorks기반 VME버스 컴퓨터, 내외부 조종기, 비행모드선택기, GPS수신기, 노브/스위치 시스템 등의 하드웨어로 구현하였으며 소프트웨어로는 임무계획분석, 비행통제도시, 디지털지도처리, 실시간 제어 및 네트워크 관리로 구성하였다.<br>2.비행선과 지상관제장비 간의 통신을 위해 C-밴드 주 통신과 UHF 보조통신 채널을 가지고 있다. 그리고 비상시 헬륨을 방출하며 착륙할 수 있도록 UHF 비상채널을 추가로 보유하고 있는데, 이는 별도의 탑재 발전기에 의해 작동되도록 한다.<br>3.비행선은 다양한 임무를 수행할 수 있는 임무장비들을 탑재할 수 있지만 본 개발단계에서는 비행선 임무 시범차원에서 원격관측을 수행할 수 있는 탑재카메라 시스템을 장착하였다. 따라서, 본 단계에서의 임무장비로는 원격 관측을 위해 안정화 플랫폼에 CCD카메라모듈이 장착되어 있는 탑재영상장비와 지상에는 관제장비와 상호 연동되어 탑재장비를 조종하고 수신된 영상을 도시/분석하는 지상영상장비로 구성되어 있다.<br>비행조종장치는 비행조종컴퓨터, 양방향지상 주 통신장치로 구성되는데, 비행조종컴퓨터는 비행선과, 비행선 컴퓨터 및 제어의 주요기능을 수행하며 하드웨어는 VME버스 컴퓨터시스템으로 구현되어 있다. 현재 개발중인 무인항공기의 항법장치로는 관성항법과 GPS항법을 통합한 시스템이며 관성, 자세, 위치 등을 측정한다. 그리고, 구동장치는 경력도크가 120Nm이고 대역폭은 1.2Hz인 저속, 고속력 BLDC 서보 모터로 구현되었다.   | 기능      |
| URQ003-1 | 비행조종장치        | 비행선을 지상에서 안전하게 운용하기 위한 무어링 장치, 비행선의 지상계류 중에 여압 조절을 수행할 지상 여압 조절기, 비행선의 지상점검 시 전원을 고압화 외부전원 공급기 등의 다양한 지상지원장비 품목을 선정하고 설계/개발 중에 있다.   | 기능      |
| URQ003-2 | 지상지원장비        | 비행선과 지상관제장비 간의 통신을 위해 C-밴드 주 통신과 UHF 보조통신 채널을 가지고 있다. 그리고 비상시 헬륨을 방출하며 착륙할 수 있도록 UHF 비상채널을 추가로 보유하고 있는데, 이는 별도의 탑재 발전기에 의해 작동되도록 설계하였다. 통신거리는 50km를 보장함을 지상 성능시험을 통해 확인하였다.  | 기능      |
| URQ003-3 | 통신장비          | 1.근거리, 단거리, 중거리, 장거리로 구분되어진 무인항공기의 목적에 따라 약 50, 200, 650, 3000 km 내외의 비행 환경에서 임무 수행 및 지원 여부를 고려한다.<br>2.저고도, 중고도, 고고도로 구분 되어지며 20000 ft이하, 45000 ft이하, 45000 ft이상의 비행 고도에서 각종 영상 정보 탑재장비를 통하여 임무 수행 및 지원 여부를 고려한다.<br>3.초소형, 소형, 중소형, 중형, 대형급으로 나누어 임무에 적절한 무인기를 투입한다.<br>4.지상할주이륙, 발사대 이륙, 공중 부하 방식, 자동 이착륙 등의 방식을 통한 환경에 걸맞는 이륙방식을 고려한다.<br>5.작전임무 수행과 크기와 형태에 따른 추진체에 의해 적절한 체공시간이 주어진다.<br>6.일반적으로 추진장치는 2행정 또는 4행정, 로터리 내연엔진과 전기모터, 로켓 그리고 터보제트 엔진 등이 사용된다. 일반적으로 사단 정찰용 무인기는 내연기관을 주로 사용하며, 고속용 무인기는 우수한 출력 중량비를 갖는 공기 흡입식 터빈엔진을 사용한다. 무인항공기는 대부분이 일반엔진으로 액체연료가 사용되나, 로켓엔진에는 고체연료가 사용되며, 전역모터에는 이차전지가 사용된다. 새로운 동력원으로 연료전지와 이차전지의 복합시스템이 관심을 받고 있으며, 미래에는 태양열 추진시스템 등이 예상된다.<br>7.동체, 날개, 착륙장치, 꼬리날개로 구성되며, 구조적인 부분은 유리탄소 섬유 복합재료를 만들어지며, 동체 등 일부 부분은 알루미늄과 탄소복합재료를 만들어 진다. 각종 전자장비가 장착되는 동체부는 전자장비 격실, 임무장비 격실, 연료탱크 격실, 엔진 부분으로 구성된다. 날개 부분은 날개와 에일러론, 엘리베이터, 러더 등과 같은 비행 조종면, 서보 작동기 등으로 구성되어 있다. 주 착륙장치, 전방 착륙장치 등의 착륙장치와 어레스팅 훅, 브레이크 등의 제동장치를 구성된다. 꼬리날개 부분 기저에는 엘리베이터가 장착되어 있는 수평 안정판과 러더가 장착되어 있다. | 기능      |
| URQ004   | 비행체           |  | 기능      |

<Figure 4> Derived requirement from collected stakeholder requirements.

가지고 <Figure 4>와 같이, 상호운용성 요구기능을 도출하고 다시 이를 바탕으로 연동대상 체계를 식별한다. 또한, 식별된 대상을 기준으로 상호운용성 수준을 결정해 왔다. 이러한 기존의 상호운용성 반영의 방법으로는 설계단계에 직접적인 반영하는 것이 쉽지 않다. 따라서, 본 연구진은 시스템설계 과정에서 상호운용성과 관련한 핵심요소를 다음과 같이 도출하고 반영할 수 있는 방안을 마련하였다.

1. 운용개념
2. 요구사항
3. 기능
4. 컴포넌트

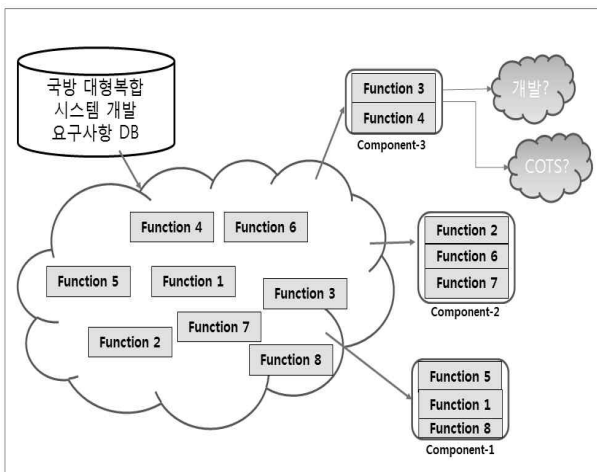
5. 시스템
6. 시스템 단위 사용조직
7. 시스템간 데이터 연동성

위의 도출된 7가지 상호운용성과 직접적으로 영향을 미치는 설계요소에 대해 설명하겠다. 모든 설계 과정에서 운용개념을 바탕으로 요구사항과 기능이 생성이 된다. 특히, 국방무기체계의 대형화로 인해 하부 구성 시스템간의 연동의 핵심은 시스템 기능에 있다. 따라서, 요구사항으로부터 기능 도출과 그 기능들을 물리적 구현하는 컴포넌트 도출 단계에 초점을 두어야 한다. 따라서 아래와 같은 6단계를 기초로 하여 최종적으로 <Figure 6>과 같은 설계단계에서 상호운용성이 적용 가능한 설계 절차안을 제안하였다.

<Table 1> Developed evaluation criteria to prioritize the alternatives.

| 평가요소          | 설명   |
|---------------|--|
| 요구사항 충족       | 개발되는 시스템을 구성하는 컴포넌트는 요구조건서 요구하는 기능과 성능, 상호운용성과 직결되므로 평가요소로 선정.   |
| 파생 컴포넌트의 대안분석 | 요구사항으로부터 도출된 기능을 실제 물리적 구현하는 과정에서 대안(개발 및 상용품)의 후보군 중에 선택에 따라 상호운용성에 많은 영향을 끼치게 된다.                            |
| 대안 컴포넌트의 우선순위 | Birnbaum 중요도 척도에 최종적 반영. 요구사항으로부터 추출된 기능을 바탕으로 기능고장에 따른 중요도 지수를 나타내어 여러 대안들 중에 우선 순위화하는 과정을 거쳐 최종적 활용에 중요한 요소. |
| 신뢰도           | 국방무기체계 개발되는 시스템은 극한의 전장 환경에서도 원활히 운용되도록 해야하기 때문에 고신뢰도 컴포넌트 및 시스템으로 개발되어야 함.                                    |
| 민감도           | 시스템을 구성하는 하부 컴포넌트의 전환에 따른 전체 시스템에 미치는 영향도  |
| 비용            | 도출된 기능을 구현하기 위한 컴포넌트의 개발 및 상용품 대체시 비용적 요소 고려   |
| 일정            | 복합시스템을 개발시 하나의 시스템 뿐만 아니라 다른 시스템의 개발 속도에 맞춰 개발되어야 하기 때문에 기술성숙도에 따른 일정 고려요소가 중요 평가요소로 도출                        |
| 유지보수 효용성      | 국방무기체계의 경우 작전 및 전시상황시 시스템의 고장시 구성 컴포넌트의 대체가 필요시 상용품(COTS)를 사용시 원활한 공급을 받지 못하는 상황이 발생하기 때문에 유지보수의 편의성이 고려되어야 함. |

1. 운용개념
2. 일반 요구사항
  - 2.1 요구사항으로부터 도출된 기능 및 기능오류 영향도 분석



<Figure 5> Development of functions and components from DB.

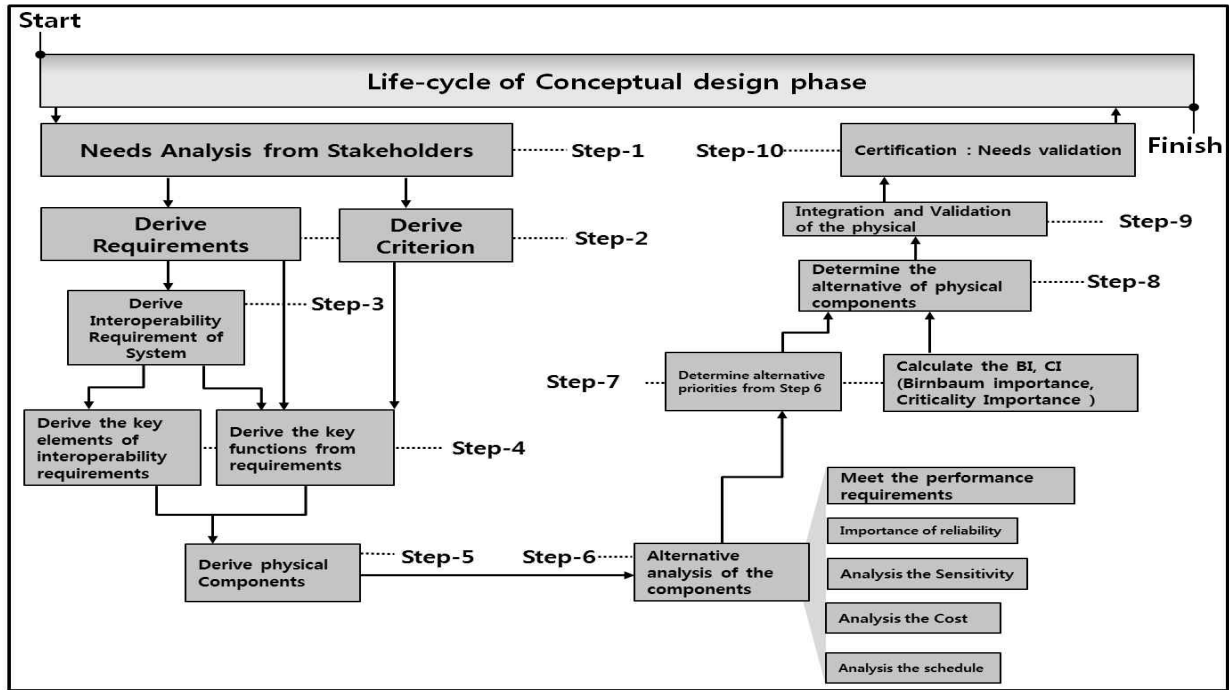
3. 상호운용성 요구사항
  - 3.1 상호운용 요구사항의 핵심요소
  - 3.2 상호운용성 요구사항으로부터 도출된 기능 및 기능오류 영향도 분석
4. 2.1, 3.2에서 도출된 기능들의 물리적 구성품 파생
5. 구성품의 대안 분석
6. 구성품의 최적화 정량적 접근 및 우선순위 선정

#### 4. 개념설계 단계 상호운용성 적용 절차안 구축

##### 4.1 개념설계 단계에서 상호운용성 반영을 위한 평가기준 및 요소 도출

4.1절에서 소개할 내용에 대한 모식도 <Figure 4>를 통해 나타내었다. 초기 설계단계에서 상호운용성과 관련된 요구사항 뿐만 아니라 보다 광범위한 요구사항이 수집 및 개발된다. 이러한 요구사항들 중 시스템의 개발 목적과 시스템이 의도하는 기능, 성능과 관련한 요구사항을 핵심 요구사항으로 추출한다. 이러한 기능과 시스템이 추구하는 목적을 달성하기 위해서는 시스템 기능과 요구되는 성능기준이 절대시되기 때문에 기능과 성능을 기준으로 시스템 운용 핵심 요구사항을 도출한다. 또, 이와는 별도로 전체 요구사항 DB 중 체계 간 연동과 관련한 상호 운용성 요구사항을 추출한다.

도출 및 추출된 요구사항을 바탕으로 <Figure 5>에서 제시하는 그림처럼 요구사항을 이행하기 위한 기능들이 도출된다. 또한, 도출된 기능들이 최종적으로 물리적 구현되는 모습을 볼 수 있다. 기능의 도출과 물리적 구현은 또 다른 문제이다. 최적화된 기능조합으로 완성된 컴포넌트가 개발될지 또는 상용품(COTS, Commercial off-the-shelf)을 통해서 대체될지는 보다 많은 과정을 거쳐 결정에 있어서 보완된 결정이 이루어져야 할 것이다. 국방무기체계의 경우 일반 민수분야와 달리 사용되는 사용자환경이 전장 환경을 기준으로 개발되는 시스템이다 보니 보다 혹독한 환경에서 시스템의 운용 및 유지보수가 요구되고 있다. 때문에 보다 높은 시스템 신뢰도를 지녀야 한다. 특히, 군수분야에서는 개발 대상시스템의 컴포넌트의 개발단계에서 비용, 개발일정, 유지보수 등의 요소를 고려한 상용품(COTS)으로 전환 가능한 품목이 점차 확대되고 있는 추세이다. 이렇기 때문에 <Table 1>에서 언급한 요소들에 대한 평가와 적용이 중요한 시점에 와있다.



<Figure 6> Procedure for conceptual development while reflecting the interoperability requirements.

#### 4.2 도출된 핵심 구성품의 설계대안 분석 및 대안의 우선순위 선정

위에서 언급했듯이 기능 구현을 위한 물리적 구성품인 컴포넌트가 개발될지 상용품에 의해 대체 될지에 대한 선택도 중요하지만, 도출된 기능을 구현하는 컴포넌트가 지니고 있는 대안들 중에 과연 최적의 대안이 있고 선택된 대안이 전체의 최적화에 과연 어떠한 영

향을 미치는지에 대한 연구가 본 연구를 통해 수행되고 설계단계 적용위한 방안도 제시하였다. <Figure 5>에서 제시하는 것처럼, 요구사항 DB를 이행하는 기능들을 구현하는 컴포넌트는 다양한 기능의 조합으로 생성될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기능의 조합 구현 단위인 컴포넌트가 전체 시스템에 미치는 영향도를 Birbaum Importance를 활용하여 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다.

<Table 2> Birbaum index obtained from the fault tree for a propulsion system of UAV.

| 소요군 요구사항   | 요소 명칭                | Basic Event                          | Birbaum 중요도 지수 |
|--|----------------------|--------------------------------------|----------------|
| 운용온도 조건 :<br>-40°C ~ +60°C                         | 추진계통<br>엔진(E)<br>고장  | (E1)_시동 발전기 고장-원격시동 오작동              | 0.53235        |
| 비행 중 3회 이상 공중 제시동<br>기능 포함                         |                      | (E2)_저온환경 과냉각                        | 0.256348       |
| 운행속도에서 생활소음 이하로<br>운용 가능                           |                      | (E3)_고온 환경 대응 불능                     | 0.236578       |
| 지상에서 원격시동 가능한<br>기능 포함                             |                      | (E4)_엔진 마운트 방진기능 고장-<br>엔진소음 경감기능 불능 | 0.331100       |
| 운행 중 엔진 결빙방지 기능을<br>포함                             |                      | (E5)_강수환경 대응기능 불능                    | 0.333983       |
| 고 신뢰성 엔진을 개발하고 기존<br>대비 최소 부품으로 개발요함<br>누유 차단기능 포함 | 고장<br>시동발전기(G)<br>고장 | (G1)_원격시동 오작동                        | 0.335812       |
| 프로펠러 무동력 기본항법 기능                                   |                      | (G2)_운행 중 제시동 기능 불능                  | 0.326598       |
|  | 연료계통(F) 고장           | (F1)_엔진 일정 rpm 이상시 연료소모<br>차단기능 불능   | 0.435248       |
|  |                      | (F2)_연료 누수 감지 및 차단 기능 불능             | 0.421257       |
|  | 프로펠러(P)고장            | (P1)엔진동력 차단시 일정 속도 유지 기능 불능          | 0.345786       |

다시말해, 구성품 단위의 우선순위를 선정하기 위해 구성품의 중요도 분석은 <Figure 4>와 <Table 2>와 같이 도출된 기능과 컴포넌트를 바탕으로 전체 구성체계가 지니고 있는 하부 기능의 오류를 계층적으로 나타내었다. 이러한 Fault Tree를 나타내어 이후 개별적 기능 오류가 나타내는 중요도 지수를 나타내는데 활용하였다.

이러한 기능오류로부터 기능안전 요구사항 생성 또한 가능하고, 해당 기능안전 요구사항을 포함한 기능으로부터 BI 지수를 활용하여 최적 설계를 위한 컴포넌트의 중요도를 확인할 수 있기 때문에 결국 안전요구사항으로부터 시스템 전체의 설계 신뢰도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 안전요구사항이 시스템 상호운용성에 직접 관련한 컴포넌트와 매우 밀접한 관련이 있다고 볼 수 있다.

### 4.3 BI(Birnbaum Importance) 및 CI(Criticality Importance) 통한 구성품 신뢰도 평가

번바움 중요도(Birnbaum Importance, BI)는 시스템 신뢰도를 컴포넌트 신뢰도로 편미분 한 것이다. 따라서, 개별적 컴포넌트 신뢰도 향상에 따른 시스템 전체의 신뢰도 향상 값을 나타낸다[4]. 이렇게 때문에 본 연구에서는 최적화된 단위기능의 조합을 구현하는 컴포넌트들에 대한 대안선택의 중요성을 강조하였다. 이렇듯, 부분의 최적화를 통해 시스템 전체의 최적화를 구현하기 위해서 BI를 활용하였다. 따라서, 컴포넌트의 대안 중에 BI 값이 큰 컴포넌트를 선택하여 시스템 전체의 신뢰도를 확보하여 시스템을 개발하는 방안에 대해 기술하였다. 이러한, BI는 시스템의 구조와 구성 컴포넌트의 고장 확률과 신뢰도가 알려져 있을 때 정의할 수 있다. 따라서 국방 분야의 특수성과 국내자료의 불충분으로 <Table 2>에서 제시하는 BI 지수를 가정 하에 연구를 진행하였다.

다음과 같이 시스템 가용도를 컴포넌트 가용도로 편미분하여 사용할 수 있다.

[기호]

$x_i$  구성품  $i$ 의 상태 (*state*);  
 $[x_i = 0, \text{컴포넌트 } i \text{ 작동}, 1, \text{컴포넌트 } i \text{ 고장}]$

$\vec{x}$  구성품들의 상태벡터;  $\vec{x} = (x_1, \dots, x_n)$

$p_i$  구성품  $i$ 의 가용도

$\vec{p}$  구성품 가용도 확률벡터;  $\vec{p} = (p_1, \dots, p_n)$

$q_i$  구성품  $i$ 의 불가용도;  $q_i = \Pr(x_i = 1) = E[x_i]$   
 $\vec{q}$  구성품 불가용도 벡터;  $\vec{q} = (q_1, \dots, q_n)$

$$BI(i) = \frac{\partial A(\vec{p})}{\partial p_i} = A(1_i, \vec{p}) - A(0_i, \vec{p}) \quad \text{식 (1)}$$

시스템 불가용도를 평가하는 경우에는 BI를 다음과 같이 바꾸어 사용할 수 있다.

$$BI(i) = \frac{\partial U(\vec{q})}{\partial q_i} = U(1_i, \vec{q}) - U(0_i, \vec{q}) \quad \text{식 (2)}$$

위에서  $A(\vec{p}) = 1 - U(\vec{1} - \vec{p}) = 1 - U(\vec{q})$  식 (1)과 (2)는 동일하다. 즉, 체계의 불가용도를 낮추고자 할 때, BI값이 큰 컴포넌트의 불가용도를 낮추어야 된다는 것을 의미한다.

<Table 2>에서 제시되는 의미를 살펴보면 다음과 같다.

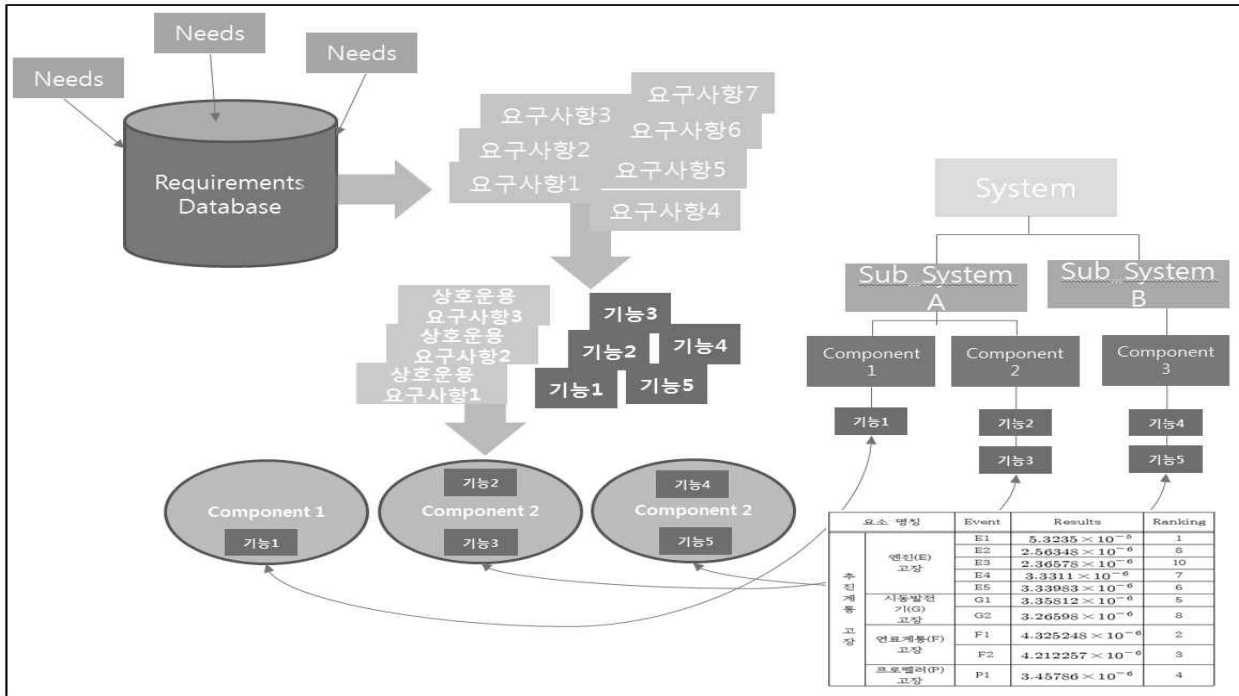
Basic Event인 (E1) “원격시동 발전기의 오류”와 (F1)과 (F2)로 인한 고장시 Birnbaum 중요도가 큰 편으로 나타났다. 특히, (E1)의 고장시 “엔진” 고장으로 인해, 전체 추진계통에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 또한, 이렇게 구한 BI를 통해 임계중요도(Criticality Importance : CI)를 구할 수 있다.

<Table 3> BI ordering according to the event of system fault tree.

| 요소 명칭 | Event       | Results | Ranking                   |    |
|-------|-------------|---------|---------------------------|----|
| 추진계통  | 엔진(E) 고장    | E1      | $5.3235 \times 10^{-5}$   | 1  |
|       |             | E2      | $2.56348 \times 10^{-6}$  | 8  |
|       |             | E3      | $2.36578 \times 10^{-6}$  | 10 |
|       |             | E4      | $3.3311 \times 10^{-6}$   | 7  |
|       |             | E5      | $3.33983 \times 10^{-6}$  | 6  |
| 고장    | 시동발전기(G) 고장 | G1      | $3.35812 \times 10^{-6}$  | 5  |
|       |             | G2      | $3.26598 \times 10^{-6}$  | 8  |
| 고장    | 연료계통(F) 고장  | F1      | $4.325248 \times 10^{-6}$ | 2  |
|       |             | F2      | $4.212257 \times 10^{-6}$ | 3  |
|       | 프로펠러(P) 고장  | P1      | $3.45786 \times 10^{-6}$  | 4  |

아래 식 (3)을 통해 구한 값이, 임계 중요도 지수 값이 크다는 것은 해당 Basic Event의 신뢰성을 증가시키면 상위레벨에서의 Event의 발생확률을 크게 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다. 이러한, 구성품  $i$ 의 임계중요도(Criticality Importance : CI)는 다음과 같다.





<Figure 7> Resulting conceptual diagram for assuring interoperability.

$$CI(i) = \frac{BI(i)(1-p_i)}{1-A(\bar{p})} = \frac{q_i BI(i)}{U(q)} \quad \text{식 (3)}$$

따라서, CI는 체계 고장이 발생했다는 전제 하에서 구성품  $i$ 의 고장을 제거한다면 체계의 고장 또한 제거되므로 CI는 정비활동의 우선순위를 정하는데 사용된다. 이를 활용해, <Table 1>에 제시한 유지보수 효율성을 판단하는데 활용하면 보다 신뢰도 높은 컴포넌트를 선별하는데 도움을 줄 수 있다.

## 5. 구축된 상호 운용성 반영한 설계 절차안의 적용 및 검증

### 5.1 국방 대형복합 무기체계 체계의 적용 사례

지금까지의 연구 수행을 통해 국방 대형복합 시스템을 개발하는데 있어서 상호 운용성을 개념설계 단계에서의 반영하기 위한 필수적 요소 도출과 적용 방안에 대해 논의 하였다. 본 연구결과를 <Figure 1>에서 제시하는 국방 무인항공기 체계를 바탕으로 개발된 상호 운용성 반영한 설계 절차안의 활용에 관해 예를 들어 설명 하겠다. <Figure 6>에서 제시하는 절차안에 따르면, 개발 초기에 개발과 관련한 이해당사자로부터 요구

사항을 수집하게 된다. 수집된 자료는 요구사항화 되어 Database를 통해서 관리 되어질 것이다. DB화된 요구사항중 분석을 통해서 소요되는 기능과 상호운용성과 직결되는 요구사항을 분류해낸다. 분류화된 요구사항을 바탕으로 <Figure 5>와 <Figure 7>에서 보여주는 것처럼, 요구사항으로부터 기능들이 도출된다. 또한, 이렇게 도출된 기능을 물리적 구현되기 위해서 여러 조합으로 컴포넌트가 개발이 될 것이다. 본 연구에서는 시스템을 구성하는 하부 컴포넌트의 최적화된 대안 선택을 통해한 설계 반영을 통해 시스템 전체의 최적화를 이루는데 강조하고 있다.

따라서, 도출된 요구사항과 기능을 바탕으로 체계 구성도를 <Figure 7>의 오른쪽에 제시된 것처럼 나타나고 구성 컴포넌트에 할당된 기능을 분류한다. 계층적으로 분화된 시스템 체계와 기능을 바탕으로 Fault Tree를 생성하여 <Table 2>에서 제시하는 BI 지수를 구하게 된다. BI 지수는 <Table 3>처럼 결과 값별로 순위를 부여하여 해당 기능의 오류를 포함한 컴포넌트가 얼마나 중요한지를 분석하여 최종적으로 통합을 통한 시스템 설계 반영 시 해당 컴포넌트의 중요도를 인지하게 만들어 준다. 또한, <Table 3>을 통해서도 알 수 있듯이 하나의 컴포넌트에 다양한 기능이 할당되는 경우, 해당 컴포넌트에 할당된 기능들의 Event Results 값들에 대한, 평균(Average)를 구함으로써 개별 컴포넌트의 중요성에 대한 지표로 활용할 수 있다.

## 5.2 결론 및 요약

국방 무기체계의 개발과정에서 우리 군의 연합작전 강화로 기존 체계의 개발에서 체계의 대형화 및 복잡화 추세로 인해 개발에 상당한 어려움을 겪고 있다. 특히, 이러한 추세는 기존의 단일 군 작전 개념에서 벗어나서 연합군 작전의 확대로 인해 추후 보다 상호 운용성으로 부터 운용 및 안전상에 많은 문제점이 많이 발생할 수 있는 불가피한 상황이 발생 될 것 이다.

국·내외 국방분야 환경에서 상호운용성에 대한 이슈를 해결하고자 많은 노력이 있었지만, 평가모델 개발 또는 아키텍처 기반의 상호 운용성 평가 모델을 생성하는 추상적인 접근아래 수행되어져 왔다. 또한 이러한 연구결과들이 상위 수준의 정보체계를 기반으로 수행되다 보니 설계단계에서 실질적인 상호 운용성 반영이 미흡한 실정이다. 따라서 대형복합 시스템 체계의 안전성까지 직결되는 문제를 야기시키고 있다. 본 연구진은 설계단계에서 요구되는 상호 운용성 정보를 분석하여 관련 핵심요소와 기능을 도출하였다. 도출된 요소와 기능은 상호 운용성 평가를 수행하는데 있어서 핵심 지표로 활용하였다. 또한 본 연구에서는 초기설계 단계에서 도출된 요구사항과 기능을 바탕으로 이를 구현하기 위한 물리적 생성품인 컴포넌트 수준에서 최적화된 설계를 수행하기 위해서, BI·CI 지수를 활용하였다. 컴포넌트 설계시 대안이 될 수 있는 개별적 대안 컴포넌트에 대해 신뢰도를 계산하여 이를 바탕으로 최종적으로 전체 시스템 신뢰도에 가장 긍정적 영향을 미친 컴포넌트를 선별하여 전체 시스템의 최종적 구성을 마무리하게 된다. 따라서, 기존의 연구결과로서는 상호운용성 관련 이슈사항을 설계 단계에 반영하는 구체적인 방안을 제시하지 못하였으나 본 연구에서 제안한 결과를 통해 상호운용성 이슈 해결 및 이로부터 야기되는 안전성 확보방안에 상당한 진전을 이뤘다고 생각한다. 후속 연구 활동을 통해서 본 연구를 통해 개념설계단계에 반영 되어야 할 상호운용성 평가 및 반영 지표를 도출하였지만 일부, 일정, 비용, 운용유지보수 효용성 등에 대한 지표를 결과 값에 반영할 수 있는 정량화 방안을 제시하지 못하였다. 따라서 후속 연구를 통해 보다 신뢰도 높은 상호운용성이 반영된 설계 절차안을 개선하고자 한다.

## 6. References

- [1] J. H. Yoon and J. C. Lee, "A Process Model for the Systematic Development of Safety-Critical Systems," *Korea Safety Management & Science*, vol. 11, pp. 19-26, (2009)
- [2] S. L. Kim, W. J. Jang, and C. W. Chu, "Technology Trends defense electronics sector ", *Electronics and Telecommunications Research Institute Trend analysis of electronic communication*, Vol. 24(6), pp77-85, (2009)
- [3] Y. M. Kim and J. C. Lee, "A Study on Safety Coordination among Interoperable Systems of a System based on DoD Architectural Framework," *Korea Safety Management & Science*, vol. 15, pp. 1-10, (2013)
- [4] H.S Son and T. G. Lee " A Study on the Net Centric Entity Interoperability Layer", *Korea Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 4, PP.269-277, (2012)
- [5] C. G. Jung., "South Korean military development direction of interoperability evaluation model", *Korea Association of Defense Industry Studies*, vol.19(2), PP.114-169, (2012)
- [6] D John and B. Sally, "Birbaum's Measure of Component Importance for Noncoherent Systems," *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, VOL. 52, NO.2, June, (2003)
- [7] A. Kossiakoff and W. N. Sweet, *Systems Engineering Principles and Practice*. New Jersey: Wiley, 2003, pp. 117-138.
- [8] DoD, "Operation of the Defense Acquisition System," Department of Defense, INSTRUCTION, 5000.02, pp. 1-80, (2008)
- [9] *Systems Engineering - System life cycle process*, in ISO/IEC 15288:2002(E): International Organization for Standardization, (2002)

## 저 자 소 개

김 영 민



현 아주대학교 시스템공학과 박사과정 수료. 관심분야는 시스템 안전설계, 요구사항 관리, 모델기반 시스템공학, Modeling & Simulation 등.

주소: 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지 아주대학교 성호관 243호

이 재 천



현 아주대학교 시스템공학과 정교수. 서울대학교 전자공학과에서 공학사, KAIST 전기 및 전자공학과에서 공학석사 및 박사학위를 취득. 미국 MIT에서 Post-Doc을 수행하였으며, Univ. of California (Santa Barbara)에서 초빙연구원, 캐나다 Univ. of Victoria (BC)에서 방문교수, KIST에서 책임연구원 재직. 이 후 미국 Stanford Univ. 방문교수 역임. 현재 연구 및 교육 관심분야는 시스템공학 및 Systems Safety에의 응용 등.

주소: 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지 아주대학교 서관 309호