

구성 부품의 중요도를 활용한 SES/MB 프레임워크 기반 전차 취약성 분석

김헌기 · 황훈규 · 이장세*

A Vulnerability Analysis for Armored Fighting Vehicle based on SES/MB Framework using Importance of Component

Hun-Ki Kim · Hun-Gyu Hwang · Jang-Se Lee*

ABSTRACT

In this paper, we proposed a methodology of vulnerability analysis for armored fighting vehicle based on modeling and simulation. The SES/MB framework serves hierarchical representation of the structure for a complex systems and is easy to conduct modeling for the armored fighting vehicle which consists of various components. When the armored fighting vehicle is hit by the shots from threat, the vulnerability of the armored fighting vehicle is decreased by damaged or penetrated level of armors and components. The penetration is determined by the result of comparing a penetration energy through penetration analysis equation and defence ability of armor and components. And the defence ability is determined in accordance with type and defined property of normal component and armor component, all components have a weighted values for the degree of importance. We developed a simulation program for verification proposed methodology. Thus, the program analyzes vulnerability for armored fighting vehicle SES/MB framework using importance.

Key words : Vulnerability Analysis, Survivability Analysis, Importance, SES/MB Framework

요 약

본 논문에서는 전투 시스템 중 대표적인 지상 공격 수단인 전차를 대상으로 모델링 및 시뮬레이션 기법을 적용한 취약성 분석 방법에 관한 내용을 다룬다. SES/MB(System Entity Structure/ Model Base) 프레임워크는 복잡한 시스템의 구조를 계층적으로 표현할 수 있으며, 다양한 부품으로 구성된 전차를 모델링하기에 용이하다. 전차의 취약성은 전차가 위협탄에 의해 피격 되었을 때, 장갑 및 부품이 파손되거나 관통된 것을 기준으로 분석할 수 있으며 관통 여부는 관통 해석식을 통해 위협탄의 관통 성능과 장갑 및 부품의 방호 성능을 비교한 결과에 따라 결정된다. 방호 성능은 일반 부품과 장갑으로 분류한 전차의 부품 종류 및 정의한 속성에 따라 결정되고, 모든 부품은 중요도를 산정하기 위한 가중치를 가진다. 전차의 취약성을 분석하기 위해 개발한 시뮬레이션 프로그램에서는 위협탄에 의해 관통된 부품 및 피해를 입은 부품의 중요도를 기반으로 하여 전체 취약성을 분석하고, 개별 부품이 전차에서 담당하는 기능을 정의하여 기능별 피해 기준에 따라 취약성을 분석한다.

주요어 : 취약성 분석, 생존성 분석, 중요도, SES/MB 프레임워크

1. 서 론

* 이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(계약번호 UD1500131D).

Received: 2 November 2015, **Revised:** 20 November 2015, **Accepted:** 27 November 2015

*Corresponding Author: Jang-Se Lee

E-mail: jslee@kmou.ac.kr
Division of IT Engineering, Korea Maritime and Ocean University

전투 시스템은 국방과 관련된 임무를 수행하는 화력, 병력, 전략, 시설 등을 의미하며, 실제 전투에 투입되는 공격 수단은 전차, 전투기, 군함 등이 대표적이다^[1]. 전투 환경에서 전투 시스템은 외부 위협에 노출될 수 있고, 총탄 및 포탄 등의 위협탄에 의해 피격이 되면 임무에 필요한 기능을 상실할 수 있다. 이러한 피해 가능성은 전투 시스템의 취약성이 되고, 취약성은 곧 전투 생존성의 저하로

이어진다. 따라서 전투 시스템이 위협에 노출되어 피격되었다고 가정했을 때, 피해를 최소화하기 위해 취약성을 분석하여 이를 개선하고 보강하는 과정이 반드시 필요하다²⁾.

전투 시스템의 취약성을 평가하는 방법으로 실제 전투 상황과 같은 모의환경을 조성하여 총탄, 포탄 등의 위협을 직접 가하는 실험 방법이 있다³⁾. 이 방법은 실험 결과에 대한 신뢰도가 높고, 취약성을 평가하기에 가장 좋은 방법이지만 여러 가지 제약이 따른다. 실제 전차 및 위협탄으로 실험하기 때문에 매우 많은 비용이 들고, 준비 과정 및 실험에 소요되는 시간이 상당히 길다. 또한 사람이 직접 실험을 수행하는 것이므로 안전과 관련된 문제가 따르게 된다. 이와 같은 문제점을 극복하고 보다 효율적인 실험을 수행하기 위한 방법으로, 국방 분야에서는 모델링 및 시뮬레이션(M&S, Modeling and Simulation) 기법을 도입하여 수학적인 모델을 적용하거나 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 전투 시스템의 취약성을 분석하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 전투 시스템 중 대표적인 지상 공격 수단인 전차를 선정하여, 모델링 및 시뮬레이션 기법을 적용한 전차의 취약성 분석 방법에 관한 내용을 다룬다. Zeigler가 제안한 SES/MB(System Entity Structure/Model Base) 프레임워크는 복잡한 시스템의 구조를 체계적으로 표현할 수 있으며, 다양한 부품으로 구성된 전차를 모델링 및 시뮬레이션하기에 용이하다. 전차의 취약성은 전차가 위협탄에 의해 피격되었을 때, 장갑 및 부품이 파손되거나 관통된 것을 기준으로 분석할 수 있으며 관통 여부는 관통 해석식을 통해 위협탄의 관통 성능과 장갑 및 부품의 방호 성능을 비교한 결과에 따라 결정된다. 방호 성능은 일반 부품, 치명 부품, 장갑으로 분류한 전차의 부품 종류 및 정의한 속성에 따라 결정되고, 모든 부품은 중요도를 산정하기 위한 기중치를 가진다. 전차의 취약성을 분석하기 위해 제작한 시뮬레이션 프로그램에서는 위협탄에 의해 관통된 부품 및 피해를 입은 부품의 중요도를 기반으로 하여 전체 취약성을 분석하고, 개별 부품이 전차에서 담당하는 기능을 정의하여 기능별 피해 기준에 따라 취약성을 분석한다.

2. 전투 시스템 취약성 및 관련 연구

2.1 전투 시스템과 취약성

전투 시스템은 육상전, 해상전, 공중전 등의 전투 환경에서 국방과 관련된 임무를 수행하는 능력을 갖춘 시스템으로 첫째, 전차, 야전포, 군함, 전투기 그리고 보병 등과 같이 실제 전투에 가담하는 화력 및 병력 등, 둘째, 박격포, 기관총, 개인 화기, 보급품 등을 지원하기 위한 수송

수단 등, 셋째, 그 이외 전투에 운용하는 군수 물자, 시설물, 전략, 전술용 장비 및 체계 등이 있다. 이와 같은 여러 전투 시스템의 생존성을 향상시키기 위하여 취약성의 분석이 필요하다. 전투 환경에서 생존성은 “전투 시스템이 적으로부터 위협을 회피하거나 견뎌내어, 임무가 가능한 상태를 유지하거나 성공적으로 수행해낼 수 있는 능력”으로 정의된다⁴⁾. 전차가 위협탄에 의해 피격되어 중요 부품이 파손되면 관련 기능이 무력화되기 때문에 임무 수행에 치명적일 수 있다. ‘중요 부품’이란 전차가 임무를 수행하는데 필요한 공격, 이동 등과 같은 기능을 수행하는 핵심 부품을 의미한다. 예를 들어, 전차의 가장 강력한 공격 수단인 주포가 파손된다면 기관총이나 기본 화기 등으로 밖에 대전할 수가 없기에 임무 수행 능력이 현저히 떨어지게 된다. 또한 무한궤도를 움직이게 하는 여러 부품 중 기동륜이 파손될 경우, 엔진에서 발생한 동력을 무한궤도가 전달받지 못하게 되어 이동할 수 없게 된다.

2.2 관련 연구

전투 생존성을 향상시키기 위해 전투 시스템의 취약성 분석을 목적으로 한 기반 기술을 마련할 필요성이 대두되고 있으며, 이와 관련하여 전투 시스템의 생존성 분석을 위해 3차원 관통 해석 프로그램을 개발한 선행 연구가 있다^{4,5)}. Open CASCADE 그래픽 라이브러리를 이용하여 전차를 3차원으로 모델링하고, 전투시스템 취약성 분석 프로그램인 GSS에서 사용되는 관통 해석식을 적용하여 대전차 포탄의 관통 여부를 판단하였다. 이 프로그램에서는 균질압연장갑을 기준으로 환산한 방호 성능 데이터를 사용하여, 기존의 연구 대비 신뢰도를 높이고 포탄의 관통 성능을 다양하게 설정하여 실험하였다. 또한, [6,7]의 연구에서는 연료탱크 및 적재포탄과 같은 화재 잠재력을 가진 부품을 대상으로, 순간 화재의 발생 여부를 예측하는 프로그램을 개발하였다. 위협탄으로 운동 에너지탄과 성형작약탄을 선정하여 서로 다른 관통 성능을 가진 것으로 설정하였으며 연료의 종류는 휘발유, 경유, 등유로 설정하였다. 포탄의 최대 관통 성능과 장갑의 임계 두께를 비교하고, 연료의 발화점 및 인화점에 따라 화재 발생 여부를 판단하였다. 또한, 함정의 전투 환경에서 위협, 함정의 구성품, 위협에 따른 구성품의 취약확률을 정의하여 구성품의 위치와 면적에 따른 취약 확률로 취약성을 평가하는 방법을 제시한 사례가 있다. [8]에서 제안한 방법은 취약 면적을 기반으로 하여 함정의 단순 모델을 이용하여 이동과 관련된 부품의 취약성을 계산법을 적용하여 취약성을 분석하는 연구를 수행하였다.

3. SES/MB 프레임워크 및 중요도

3.1 SES/MB 프레임워크

SES/MB 프레임워크는 시스템의 분할 및 분류(decomposition), 결합(coupling) 등의 관계에 대한 각종 지식이 포함된 구조적 지식 표현 기법으로, 계층적 관계가 포함된 시스템에서 설계를 용이하게 하는 장점이 있으며 SES와 MB로 구성되어 시뮬레이션 모델을 이룬다^{9, 10)}. SES는 모델간의 관계를 표현하기 위해 트리 형태로 표현되며 Entity 간의 관계는 Decomposition(Aspect), Specialization, Multiple로 나타낸다. Entity 노드는 독립적으로 식별될 수 있는 모델 또는 시스템의 구성원 모델을 의미한다. Entity 노드는 트리의 하위 노드와 연결되기 위해 세 가지 모드 중 하나를 선택해야한다. 하위 노드가 상위 Entity 노드의 구성원일 경우, Decomposition(Aspect) 노드로 부르고, 하위 노드가 어떤 구성원들로 이루어졌는지 나타내는 분할적 표현을 담당하며 한 줄의 수직선(Ⅰ)으로 표현한다. 상위 Entity 노드의 분류 및 종류를 나타내는 노드는 Specialization 노드로 부르고 선택적 상황일 때 어떤 것을 선택할지에 대한 대안을 나타내며, 두 줄의 수직선(Ⅱ)으로 표현한다. 그리고 중복의 수가 가능하거나 다수의 선택을 할 수 있는 구조일 때는 Multiple Entity라고 부르며 세 줄의 수직선(Ⅲ)으로 표현하고, 최대로 선택할 수 있는 경우의 수를 수직선과 함께 표시한다. SES는 이와 같은 관계 표현을 통해 시스템의 전체 구조를 표현할 수 있다. SES는 다음과 같은 규칙을 따른다. SES는 Entity로 시작해서 Entity로 끝나야하며, 동일한 이름의 Entity가 연속적인 계층 구조상에 존재할 수 없다. 또한, Entity의 특성을 표현하는 Attribute 변수는 타입 간 유일한 값을 가져야한다.

3.2 중요도

중요도란, 시스템을 이루는 요소 중 하나가 전체 시스템에서 차지하는 비중을 뜻하며¹⁰⁾, 전차의 취약성 분석에서는 특정한 부품의 손상이 전차 전체에서 미치는 정도를 나타낸다. 식 (1)은 중요도를 산정하는 식으로, 이를 적용하여 취약성을 분석하는 연구가 수행되었다. [11,12]의 연구에서는 일반적인 전차의 특성을 고려하여 부품을 선정하였고, 전차의 부품을 기능에 따라 ‘공격’부품, ‘방어’부품, ‘이동’부품, ‘관측’부품, ‘통신’부품으로 대부분을 정의하였다. 동일한 계층에 있는 기능의 가중치 합은 ‘1’이 되며, 각 기능은 전차 전체에서 차지하는 중요도에 따라 가중치를 가진다. 대부분 아래에 있는 개별 부품 또한 동일한 계층에서의 가중치 합은 ‘1’이 되며, 부품들은 각

자의 가중치를 가진다.

$$IC = \prod_{i=0}^n WC_i \tag{1}$$

여기서, IC : 부품의 중요도
WC : 부품의 가중치
i : 부품의 계층

4. SES/MB 프레임워크 기반의 전차 모델링

4.1 전차 및 구성 부품 모델링

전차에는 수많은 부품 및 장비가 탑재되어 있으며, 임무 수행에 필요한 기능을 기준으로 구성 부품을 정의할 수 있다. 즉, 전차를 큰 시스템으로 보고 하나의 구조로 표현할 수 있으며, SES/MB 프레임워크 기법을 적용하기에 적합하다¹³⁾. 전차는 수많은 부품들로 구성되지만, 본 논문에서는 각 기능별로 몇 가지의 주요 부품을 선정하여 제안한 분석 방법을 검증한다. 또한, 전차 모델을 구성하는 부품의 위치적 관계를 고려하기 위해, Fig. 1과 같이

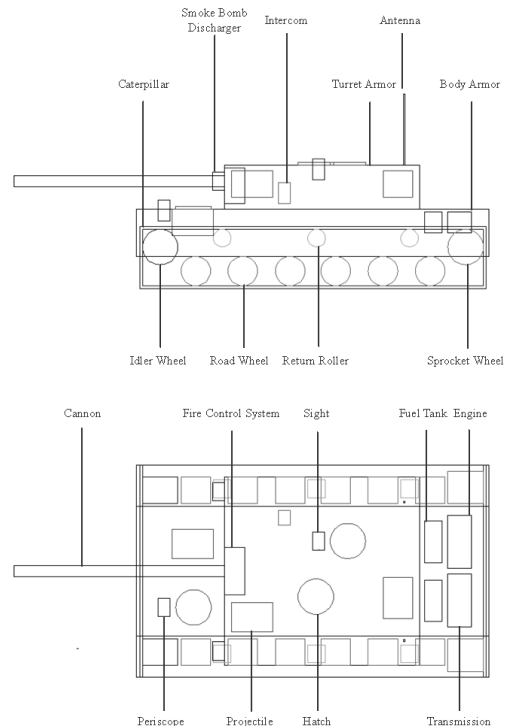


Fig. 1. AFV model and selected components (side and top view)

전차의 주요 부품을 CAD 기반의 설계도로 나타내었다. 전차의 부품들은 일반적으로 알려진 전차의 구조와 유사하게 단순화하여 배치 및 구성하였으며, 각 부품들은 좌표를 가지고 있다.

4.2 SES/MB 프레임워크 적용

SES/MB 프레임워크를 적용하여 시뮬레이션 구조의 모델링을 수행하였으며, 그 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 또한 Fig. 3의 SES에 가지치기 과정을 수행하여 도출된 PES(Pruned Entity Structure)를 기반으로 모델링한 시뮬레이션 구조를 Fig. 4에 나타냈다. 모델링한 ‘Vulnerability Analysis System’은 크게 ‘Generator’ 모델, ‘전차(Armored Fighting Vehicle)’ 모델, ‘Transducer’ 모델로 구성된다. ‘전차’ 모델은 전차가 어떤 부품군 및 부품으로 구성되어있는지를 나타내며 ‘잠망경(Periscope)’, ‘주포(Cannon)’, ‘사격 통제 장치(Fire Control System)’, ‘조준경(Sights)’, ‘해치(Hatches)’, ‘연막탄발사기(Smoke Bomb Dischargers)’, ‘장갑(Armors)’, ‘바퀴(Wheels)’, ‘탄약(Projectiles)’, ‘무전기(Communication Devices)’, ‘연료 탱크(Fuel Tanks)’, ‘구동계(Power Train)’이 있다. ‘장갑’은 종류에 따라 ‘Turret’과 ‘Body’를 Specialization 노드로 분류하였으며, ‘Turret’과 ‘Body’는 각각 위치적 부분에 따라 ‘Front’, ‘Side’, ‘Rear’를 Decomposition 노드로 가진다. ‘Side’ 또한 위치적 부분에 따라 ‘Left Side’와 ‘Right Side’를 Decomposition

노드로 가진다. ‘무전기’는 ‘인터콤(Intercom)’과 ‘안테나(Antennas)’를 Decomposition 노드로 가지며, ‘구동계’는 Decomposition 노드로 ‘엔진(Engine)’과 ‘트랜스미션(Transmission)’을 가진다. ‘조준경’, ‘탄약’, ‘연막탄 발사기’, ‘해치’, ‘안테나’, ‘연료 탱크’는 다수를 선택할 수 있는 부품이므로 Multiple Entity로 구성하였다. ‘바퀴’은 크게 전차의 좌, 우측의 부품으로 구분하기 위해 Multiple Entity로 구성하였으며 ‘무한궤도(Caterpillar)’, ‘유동바퀴(Idle Wheel)’, ‘사슬 톱니 바퀴(Sprocket Wheel)’, ‘지지륜’, ‘보기륜(Road Wheels)’를 Decomposition 노드로 가진다. ‘지지륜(Return Rollers)’와 ‘보기륜’은 다수의 부품으로 구성되어있기 때문에 Multiple Entity로 나타내었다. 또한, ‘Generator’ 모델은 위협탄을 생성하여 ‘전차’ 모델로 보내는 기능을 하며 ‘Transducer’ 모델은 ‘전차’ 모델에서 발생한 시뮬레이션 결과를 수집하고 분석하는 기능을 한다.

4.3 시뮬레이션 구조 모델링

전차의 각 부품은 하나의 모델로서 현재 상태를 가지고 외부의 입력에 따라 상태를 변화시킨 뒤 다음 부품으로 전달하는 구조를 가지며, PES를 기반으로 도출된 시뮬레이션 구조는 Fig. 5와 같다.

먼저, ‘Generator’ 모델은 위협탄을 생성하고, 이를 출력 함수를 이용하여 ‘전차’ 모델로 보내고, ‘전차’ 모델의 부품들은 위협탄을 입력으로 받게 된다. 부품이 위협탄에 의해 파손되거나 관통이 되면 상태가 천이되고, 시간 함수를 통해 다음 입력이 발생할 때까지 일정 시간 상태를 유지한다. 또한, 일정 시간이 흐르면 위협탄 및 피격에 의한 피해 정보를 계산하고, 커플링되어 있는 다음 모델이 위협탄을 입력으로 전달받게 된다. 최종 부품 모델은 ‘전차’ 모델을 빠져나가서 ‘Transducer’ 모델로 정보를 전달한다. ‘Transducer’ 모델은 위협탄, 관통된 부품, 위협탄이 관통하지 못하고 최종적으로 멈춘 부품 등의 정보를 수집 및 해석하여 취약성을 분석하며, ‘Generator’ 모델로 시뮬레이션이 종료되었음을 알린다.

이때, 커플링은 서로 영향을 미치거나 관통력이 전달될 수 있는 모든 부품 모델 간에 이루어져 있으며, Fig. 5와 같이 하나의 시뮬레이션 구조를 구성한다. 각 부품은 하나의 모델로서 자신의 상태를 가지며, 외부 입력 즉, 위협탄에 의해 변화된 상태 및 정보를 커플링 관계로 결합된 부품으로 전달하며, 모든 모델은 포트를 가지며 모델로 들어가기 위해서는 입력 포트를, 모델로 나가기 위해서는 출력 포트를 거쳐야한다.

위협탄은 종류, 관통 성능, 좌표 등에 관한 정보를 가진

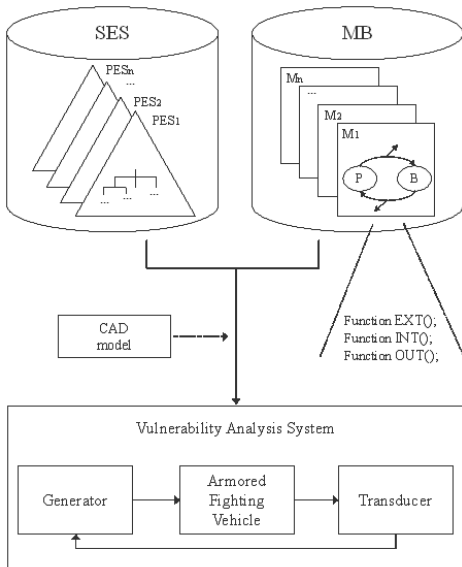


Fig. 2. SES/MB framework and modeling process

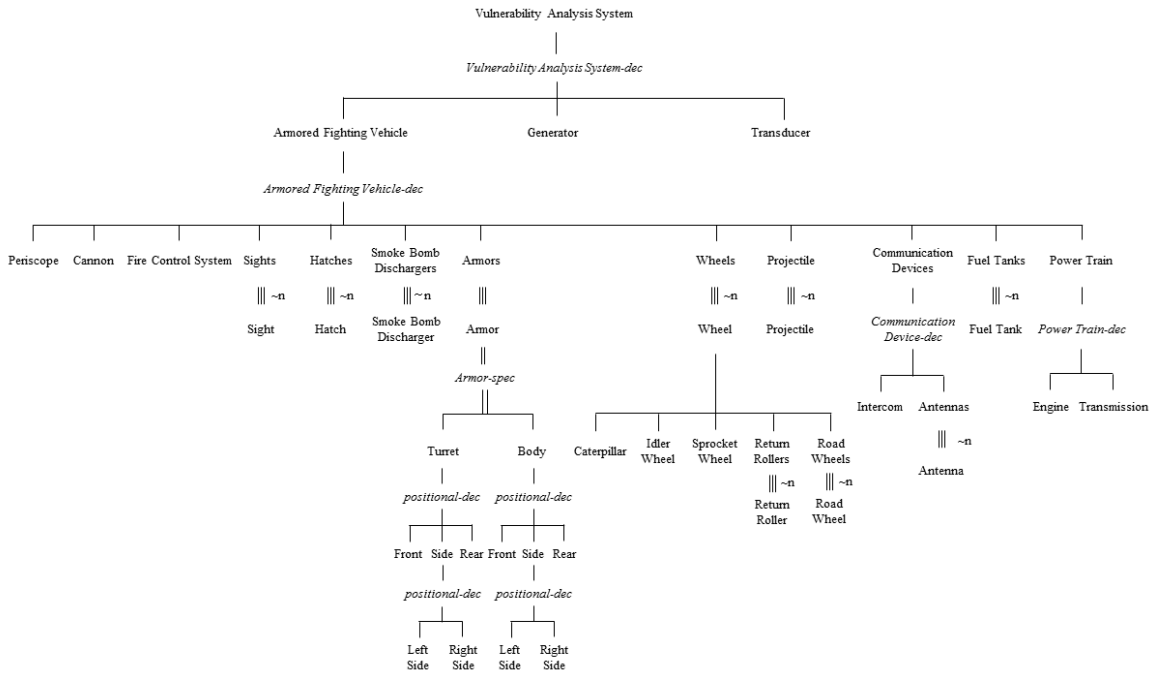


Fig. 3. System Entity Structure for vulnerability analysis system

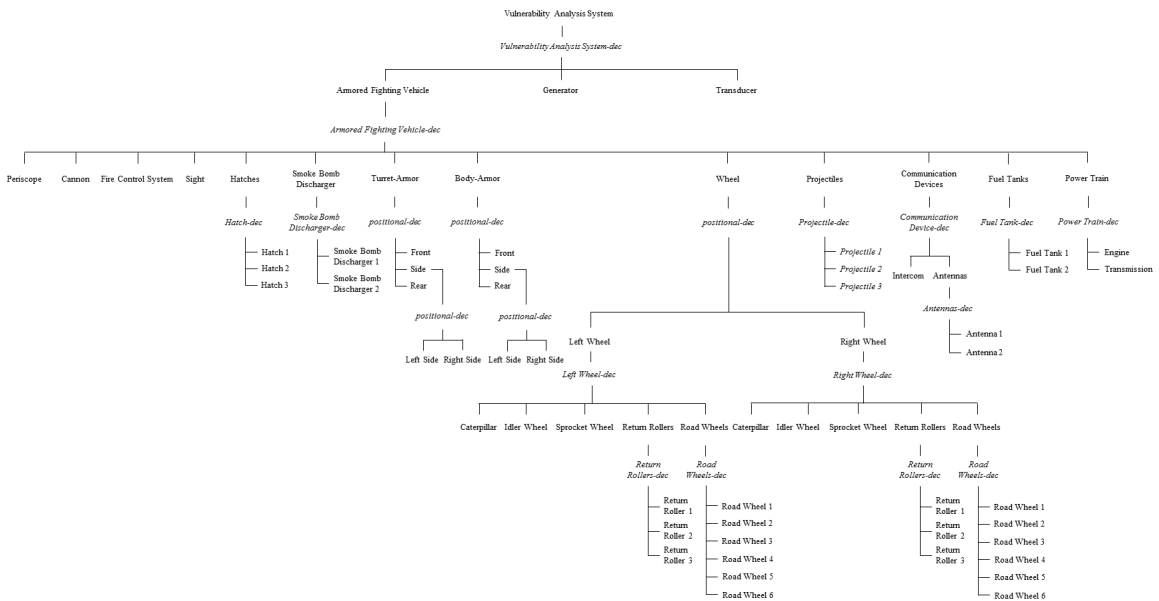


Fig. 4. Pruned Entity Structure for vulnerability analysis system

다. 위협탄에 의해 전차의 부품이 관통되었다면 부품을 관통한 이후의 잔여 관통 성능은 일직선상에 위치하는 다음 부품까지 전달되고, 잔여 관통 성능을 전달받은 부품

은 위협탄이 부품을 관통했는지 여부를 판단한다. 각 부품 모델은 위협탄의 관통 성능이 자신의 방호 성능보다 높으면 관통한 것으로 판단하고, 피해의 정도와 위협탄의

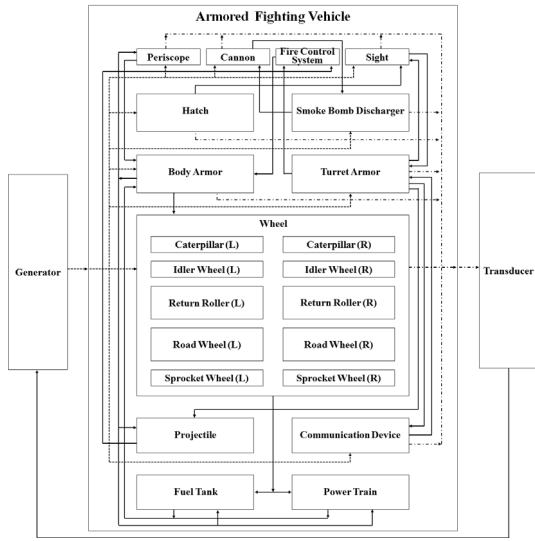


Fig. 5. SES/MB framework and modeling process

관통 성능에 대한 정보를 수집한다. 이와 같이 위협탄의 관통 성능을 전달하기 위한 과정은 Fig. 5의 시뮬레이션 구조에 의해 이루어진다.

5. 가중치 트리 구성 및 중요도 계산

5.1 중요도 계산을 위한 가중치 트리 구성

전차의 취약성 분석에서 중요도는 어떤 하나의 부품이 전차 전체에서 차지하는 비중을 의미한다. 중요도를 산정하기 위해 식 (1)을 이용하며, 가중치는 모든 부품에 부여된다. 가중치는 전차의 기능에 따라서도 부여되며, Fig. 6

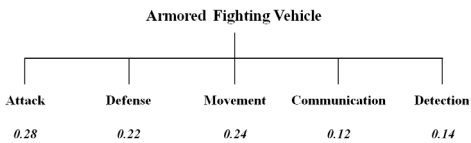


Fig. 6. Weight tree for armored fighting vehicle

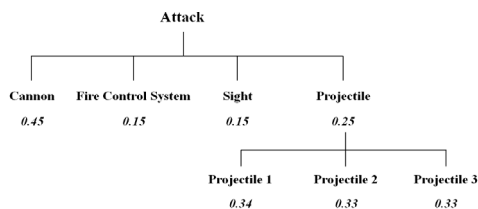


Fig. 7. Weight tree for attack function

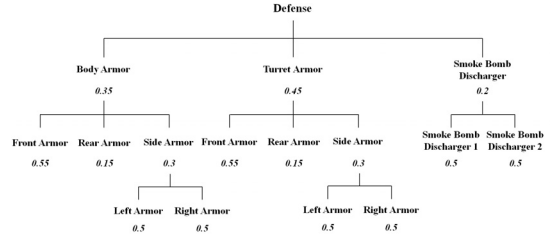


Fig. 8. Weight tree for defense function

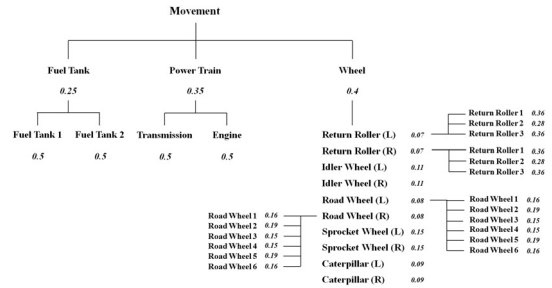


Fig. 9. Weight tree for movement function

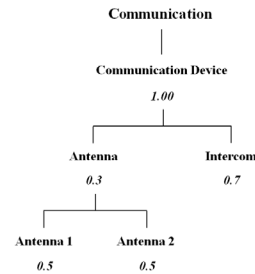


Fig. 10. Weight tree for communication function

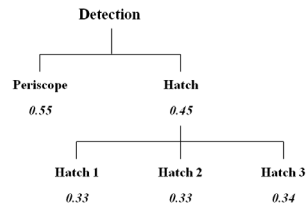


Fig. 11. Weight tree for detection function

은 기능에 따른 가중치를 나타낸 트리이다. 전차는 ‘기지의 지시를 받아 적군을 찾아내어 파괴하고, 전선을 확보하기 위한 목적의 전투 차량’이므로, 전차의 기능을 크게 ‘공격’, ‘방어’, ‘이동’, ‘통신’, ‘탐지’로 분류하였으며, 각 기능에 따른 부품의 가중치 트리는 Fig. 7에서 Fig. 11과 같다. 동일한 계층에 있는 부품의 가중치 합은 항상 ‘1’이며, 기능에 따라 분류한 부품의 가중치 합 또한 ‘1’이 된다. 전

차의 모든 기능이 중요하지만, 특히 공격 및 이동과 관련된 부품은 전차의 핵심 기능을 담당하는 부분이므로 전차의 다른 기능에 비해 상대적으로 높은 가중치를 가진다^[4]. 예를 들어, 이동 기능에 관한 가중치 트리인, Fig. 9를 보면, ‘지지륜 1’, ‘지지륜 3’은 전차의 하중을 많이 받기 때문에 ‘지지륜 2’에 비해 높은 가중치를 부여하였고, ‘보기륜 2’, ‘보기륜 5’는 파손될 경우 궤도를 정렬하는데 지장을 줄 수 있기 때문에 상대적으로 가중치를 높게 부여하였다.

5.2 전차를 구성하는 주요 부품의 중요도 계산

부여한 가중치를 기반으로 식 (1)을 이용하여 모든 부품의 중요도를 산정하였다. 예를 들어, ‘무한궤도 (L)’의 중요도는 ‘이동 기능의 가중치 × 바퀴의 가중치 × 무한궤도 (L)의 가중치’로 계산되어 중요도는 $0.24 \times 0.4 \times 0.09 = 0.00864$ 가 된다. 이런 방식으로 모든 부품의 중요도를 계산하였으며, 이를 Table 1에 정리하였다.

6. 중요도 기반의 전차 취약성 분석

6.1 장갑의 방호 성능과 부품의 내구도 고려 방법

장갑의 방호 성능이나 부품의 내구도를 고려한 취약성 분석을 위해서는 이를 위한 해석식이 필요하다. [4,5]에서는 독일에서 개발한 상용 관통 해석 프로그램에서 사용하는 식을 사용하였다. 본 논문에서는 이를 기반으로 식 (2) ~ 식 (4)를 정의하였다. 식 (2)는 잔류 관통 성능을 구하기 위한 식으로, 계산된 결과인 P_{res} 값이 0보다 크면 위협탄이 관통된 것을 의미하며, 0보다 작으면 관통되지 않은 것을 의미한다. 즉, P_{res} 값이 양수이면 위협탄의 관통 성능이 장갑의 방호 성능 또한 부품의 내구도보다 높은 것을 의미한다.

$$P_{res} = P_0 - (ST_{eq} \text{ or } D_{component})$$

여기서, P_0 : 위협탄의 관통 성능 (2)

ST_{eq} : RHA 대비 장갑의 방호 성능

$D_{component}$: 부품의 내구도

$$ST_{eq} = \frac{L_{path} \times \rho_{Armor}}{\rho_{RHA}}$$

여기서, L_{path} : 관통 경로에 의한 장갑 두께 (3)

ρ_{Armor} : 장갑 밀도(Steel : 7.87g/cm^3)

ρ_{RHA} : RHA 밀도(7.85g/cm^3)

Table 1. Calculated importances of components

Function	Category/Component		Importance
Attack	Cannon		0.126
	Fire Control System		0.042
	Sight		0.042
	Projectile	Projectile 1	0.0238
		Projectile 2	0.0231
		Projectile 3	0.0231
Defense	Body Armor	Front Armor	0.04235
		Rear Armor	0.01155
		Side Armor	Left Armor 0.01155 Right Armor 0.01155
	Turret Armor	Front Armor	0.05445
		Rear Armor	0.01485
Side Armor		Left Armor 0.01485 Right Armor 0.01485	
Smoke Bomb Discharger	Smoke Bomb Discharger 1	0.022	
	Smoke Bomb Discharger 2	0.022	
Power Train	Transmission	0.042	
	Engine	0.042	
Fuel Tank	Fuel Tank 1	0.03	
	Fuel Tank 2	0.03	
Return Roller (L)	Return Roller 1	0.002419	
	Return Roller 2	0.001882	
	Return Roller 3	0.002419	
Return Roller (R)	Return Roller 1	0.002419	
	Return Roller 2	0.001882	
	Return Roller 3	0.002419	
Movement	Idler Wheel (L)		0.01056
	Idler Wheel (R)		0.01056
	Road Wheel (L)	Road Wheel 1	0.001229
		Road Wheel 2	0.001459
		Road Wheel 3	0.001152
		Road Wheel 4	0.001152
		Road Wheel 5	0.001459
		Road Wheel 6	0.001229
	Road Wheel (R)	Road Wheel 1	0.001229
		Road Wheel 2	0.001459
		Road Wheel 3	0.001152
		Road Wheel 4	0.001152
		Road Wheel 5	0.001459
		Road Wheel 6	0.001229
Sprocket Wheel (L)		0.0144	
Sprocket Wheel (R)		0.0144	
Caterpillar (L)		0.00864	
Caterpillar (R)		0.00864	
Comm.	Comm. Device	Antenna	Antenna 1 0.018 Antenna 2 0.018
		Intercom	0.084
	Periscope		0.077
Detection	Hatch	Hatch 1	0.02079
		Hatch 2	0.02079
		Hatch 3	0.02142

$$D_{component} = L_{path} \times R_{Durability}$$

여기서, L_{path} : 관통 경로에 의한 부품 두께
 $R_{Durability}$: 부품의 내구도

6.2 관통 해석 및 피해 분석

취약성 분석 실험을 위해 설정한 위협탄은 ‘250’의 관통 성능을 가지는 ‘운동 에너지탄’이며, 전차의 좌측면을 기준으로 하여 특정 좌표(460,170)로 발사된다고 가정하였다. 위협탄 및 피격 좌표를 설정하면, Generator가 위협탄을 생성하게 되고, 전차의 각 부품 모델은 자신의 좌표와 위협탄의 좌표를 비교하여, 피격 여부를 판단한다. 생성된 위협탄은 ‘회전포탑 좌측 장갑(Turret Left Armor)’, ‘인터컴’, ‘회전포탑 우측 장갑(Turret Right Armor)’를 차례로 피격하며, 해당 부품의 Table 2와 같은 속성 값을 가진다.

장갑인 ‘회전포탑 좌측 장갑’의 방호 성능은 식 (3)에 의해, 150.38로 계산되며, 식 (5)에 이를 나타냈다. 또한, 위협탄의 잔여 관통 성능을 구하기 위해서, 관통 성능 P_0 와 ST_{eq} 를 식 (2)의 계산식에 적용하였으며, 이를 식 (6)에 나타내었다. P_0 에서 ST_{eq} 를 뺀 값이 양수이므로 위협탄이 ‘회전포탑 좌측 장갑’을 관통한 것을 의미하고, ‘회전포탑 좌측 장갑’을 관통한 이후의 잔여 관통 성능 P_{res} 는 ‘99.62’가 된다.

$$ST_{eq} = \frac{150 \times 7.87}{7.85} = 150.38 \quad (5)$$

$$P_{res} = 250 - 150.38 = 99.62 \quad (6)$$

잔여 관통 성능 P_{res} 는 다음 부품인 ‘인터컴’으로 전달되며, ‘인터컴’은 부품에 해당하므로 부품의 관통 해석식인 식 (4)를 적용하며, 이를 식 (7)에 나타내었다. 또한, 잔여 관통 성능은 식 (2)에 의해 72.12가 되고 이를 식 (8)에 나타내었다.

$$D_{component} = 25 \times 1.1 = 27.5 \quad (7)$$

$$P_{res} = 99.62 - 27.5 = 72.12 \quad (8)$$

‘인터컴’을 관통한 이후의 잔여 관통 성능 P_{res} 는 ‘회전포탑 우측 장갑’의 관통 해석을 위한 식에서 P_0 가 되며, 식 (9)과 같이 계산된다. 속성이 동일하기 때문에 ST_{eq} 는 ‘회전포탑 좌측 장갑’과 동일하고, P_{res} 의 값이 ‘-78.26’로 계산되었으므로 위협탄이 ‘회전포탑 우측 장갑’을 관통하지 못한 것을 의미한다.

$$P_{res} = 72.12 - 150.38 = -78.26 \quad (9)$$

Table 3은 시뮬레이션의 결과를 나타낸 정리한 표이다. 이를 통해 ‘회전포탑 좌측 장갑’과 ‘인터컴’은 관통이 되어 ‘100%’의 피해가 발생하였고, ‘회전포탑 우측 장갑’은 피격되었지만 관통은 되지 않는 것을 알 수 있다. ‘회전포탑 우측 장갑’이 입은 피해는 ‘(피해 정도 ÷ 방호 성능) × 100(%)’로 계산할 수 있으며, ‘(72.12 ÷ 150.38) × 100 = 0.48%’가 된다.

6.3 취약성 분석

중요도를 기반으로 전차의 취약성을 계산식은 식 (10)과 같이 정의된다. 한 부품에 대한 취약성은 방호 성능 대비 피해의 비율과 부품 중요도의 곱으로 계산되며, 피격당한 모든 부품의 취약성을 합하면 전차 전체에서의 취약성이 된다.

$$Vulnerability = \sum_{i=1}^n (IC_i \times R_{damage}) \quad (10)$$

여기서, R_{damage} : 부품의 피해 비율

따라서, 취약성은 다음과 같이 계산된다. Table 1을 보면, ‘회전포탑 좌측 장갑’ 및 ‘회전포탑 우측 장갑’의 중요

Table 2. Properties of components

Name	Thickness	Type(property)
Turret Left Armor	150	장갑(재질 : Steel)
Intercom	25	부품(내구도 : 1.1)
Turret Right Armor	150	장갑(재질 : Steel)

Table 3. Simulation result

Name	Type	Penetration	Damage rate(%)
Turret Left Armor	장갑	O	100
Intercom	부품	O	100
Turret Right Armor	장갑	X	48

도는 '0.01485'이며, '인터컴'의 중요도는 '0.084'인 것을 알 수 있다. 여기에 식 (2)를 적용하면, $(0.01485 \times 1) + (0.084 \times 1) + (0.01485 \times 0.48) = 0.1060$ 이 되므로, 설정한 위협탄에 의해 '회전포탑 좌측 장갑', '인터컴', '회전포탑 우측 장갑'이 피격되면 부품의 손상으로 인해 전차는 10.06%의 취약성을 가진다고 볼 수 있다.

7. 결 론

전투 시스템의 취약성을 분석하기 위해 위협탄을 전투 시스템에 직접 발사하는 실험 방법은 많은 비용 및 시간이 소요되고, 안전성과 관련된 문제가 따른다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위한 대안으로 모델링 및 시뮬레이션 기법을 전투 시스템에 도입하였고, 전투 시스템 중 전차를 선정하여 취약성을 분석하는 연구를 하였다.

본 논문에서는 SES/MB 프레임워크를 이용하여 전차의 부품을 계층구조적으로 표현하였고, 위협탄에 따른 부품의 손상으로 변화하는 취약성의 분석이 가능함을 검증하였다. 군사 보안상 실제 데이터를 수집하는 것이 불가능하기 때문에 일반적으로 알려진 기준에서 부품의 속성 및 장갑의 속성을 정의하여 방호 성능을 산정하였으며, 전차 전체에서 차지하는 각 부품의 중요도와 피해 비율을 기반으로, 전차의 취약성을 평가하였다. 본 논문에서 제안한 취약성 분석 방법은 전차 이외의 다른 전투 시스템에 적용할 수 있고, 여러 전투 시스템의 취약성을 분석하기 위한 확장된 시스템을 구성하기에 용이하며 그 기반을 마련하였다.

감사의 글

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(계약번호 UD150013ID)

References

1. Michael O. Said (1995), "Theory and practice of total ship survivability for ship design", Naval Engineers

Journal, Vol. 107, No. 4, pp. 191-203.

2. 황훈규, 김현기, 이장세 (2012), "전투 시스템 생존성 분석을 위한 에이전트 기반 모델링 및 시뮬레이션" 한국정보통신학회논문지, Vol. 16, No. 12, pp. 2581-2588.

3. 진근찬, 최창 (1992), "전투차량의 취약성 분석 및 감소기법", 국방과 기술 92/12(166호), pp. 48-55.

4. 황훈규, 김현기, 이장세, 이현주, 박중서 (2013), "전투 시스템 통합 생존성 분석을 위한 관통 해석 프로그램의 개발", 2013년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집, pp.1997-1998.

5. 황훈규, 이재웅, 이장세, 박중서 (2015), "전투 시스템 생존성 분석을 위한 3차원 관통 해석 프로그램 개발 : 전차 모델을 대상으로" 한국정보통신학회논문지, Vol. 19, No. 1, pp. 244-250.

6. 황훈규, 이장세, 이승철, 박영주, 이해평 (2013), "전투 시스템의 순간 화재 예측 프로그램 개발", 한국정보통신학회 논문지, Vol. 17, No. 1, pp. 255-261.

7. 황훈규, 김현기, 이장세, 이현주, 이은민, 이해평 (2013), "순간 화재에 의한 전투 시스템 취약성 분석 프로그램의 개발", 2013년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집. pp. 1999-2000.

8. 김광식, 이장현, 황세윤 (2011), 취약면적 기반의 함정 취약성 간이 평가 방법에 관한 연구. 대한조선학회논문집, Vol. 48, No. 5, pp.404-413.

9. Zeigler, B.P. (1990), "Object-oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic systems", Academic Press.

10. Zeigler, B.P. (1984), "Multifaceted Modeling and Discrete Event Simulation", Academic Press.

11. 황훈규, 박동욱, 박종일, 이장세, 류길수 (2014), "부품별 고장 영향 및 교체 알람을 제공하는 시설물 관리 시스템의 개발", 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 38, No. 4, pp. 456-462.

12. 황훈규, 김현기, 이재웅, 이장세 (2014), "전투 시스템 생존성 분석을 위한 주요 부품의 중요도 산정 기법 연구", 2014 제1회 미래국방컨퍼런스 발표 자료집, pp. 145-146.

13. 황훈규, 이재웅, 유병규, 이장세 (2015), "부품의 중요도를 활용한 3차원 전차 모델 기반 생존성 분석 시스템 개발" 한국정보통신학회논문지, Vol. 19, No. 5, pp. 1269-1276.

14. 김현기, 황훈규, 강지원, 이장세 (2015), "전차 취약성 분석을 위한 DEVS 기반 시뮬레이션 아키텍처 설계". 2015년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집, pp. 601-602.



김 현 기 (hunki81610@gmail.com)

2012 한국해양대학교 IT공학부 컴퓨터정보공학전공 공학사
2015 한국해양대학교 대학원 컴퓨터공학과 공학석사

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 정보보안, 국방 생존성



황 훈 규 (hungyu@kmou.ac.kr)

2009 한국해양대학교 IT공학부 컴퓨터정보공학전공 공학사
2011 한국해양대학교 대학원 컴퓨터공학과 공학석사
2011 ~ 현재 한국해양대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 신뢰성 분석, 해양정보시스템, 정보보안



이 장 세 (jslee@kmou.ac.kr)

1997 한국항공대학교 컴퓨터공학과 공학사
1999 한국항공대학교 컴퓨터공학과 공학석사
2003 한국항공대학교 컴퓨터공학과 공학박사
2004 ~ 현재 한국해양대학교 IT공학부 부교수

관심분야 : 컴퓨터보안, 지능시스템, 모델링 및 시뮬레이션