전투 시스템의 순간 화재 예측 프로그램 개발

황훈규* · 이장세** · 이승철*** · 박영주*** · 이해평****

A Development of Flash Fire Prediction Program for Combat System

Hun-Gyu Hwang* · Jang-Se Lee** · Seung-Chul Lee*** · Young-Ju Park*** · Hae-Pyeong Lee****

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음
(과제번호 UD120019OD)

요 약

이 논문에서는 화재와 관련된 전투 시스템의 취약성 및 생존성을 분석하기 위하여 전투 시스템의 순간 화재를 예측하고 관련 정보를 시각화해주는 프로그램의 개발 및 시험에 관한 내용을 다룬다. 화재의 특성에 관한 선행 연구를 기반으로 FTA 기법을 적용하여 치명 부품의 순간 화재 확률 트리를 도출하였다. 개발한 프로그램에서는 도출된 순간 화재 확률 트리를 이용하여 전투 시스템의 순간 화재 발생 확률을 계산한다. 또한 개발한 프로그램은 전투 시스템 모델에서의 치명 부품 위치, 관통 유/무, 순간 화재 확률 트리, 온도 분포를 비롯하여 외부 위협, 내장재, 연료의 물성 테이블과 같은 관련 정보를 표시해주는 기능을 가진다.

ABSTRACT

In this paper, we developed and tested a program for prediction flash fire in a combat system. Purposes of the program are flash fire prediction of combat system for analysis vulnerability and survivability, and visualization for fire-related information. To do this, we defined critical components of the combat system which has probabilities of flash fire occurrence, and proposed Flash Fire Probability Tree which is based on Fault Tree Analysis(FTA). The program visualizes positions of critical components in combat system, positions of penetrated components, selected Flash Fire Probability Tree, temperature profile, and tables for properties of matters.

키워드

전투 시스템, 순간 화재, 화재 예측, 생존성, 취약성 분석

Key word

Combat System, Flash Fire, Fire Prediction, Survivability, Vulnerability Analysis

* 정회원 : 한국해양대학교 대학원 컴퓨터공학과(hungyu@hhu.ac.kr)
** 정회원 : 한국해양대학교 IT공학부
*** 정회원 : 강원대학교 소방방재학부
**** 정회원 : 강원대학교 소방방재학부(교신저자)

접수일자 : 2012. 11. 08
심사완료일자 : 2012. 11. 19

I. 서 론

전투 시스템은 전투 환경에서 국방과 관련된 임무 수행을 하는 시스템을 의미한다. 전투 시스템의 성공적인 임무 수행을 위하여 생존 능력이 뒷받침되어야 하며, 이러한 생존 능력을 전투 시스템의 생존성이라고 부른다[1].

전투 시스템의 생존성을 저하시키는 여러 위협 요인이 존재할 수 있는데, 대표적인 예로 총탄 혹은 포탄 등에 의한 피격을 들 수 있다. 전투 시스템이 위협에 의해 피격되면, 관통으로 인한 전투 시스템의 부품 파손, 충격 파로 인한 전기 및 전자 장비의 손상, 화재 및 폭발로 인한 피해 등이 발생할 수 있다. 위협에 의한 피해의 정도는 곧 전투 시스템의 취약성을 나타내며, 취약성은 생존성과 직결되어 임무 수행을 위한 생존 능력에 큰 영향을 준다. 따라서 전투 시스템의 생존성을 향상시키기 위해서는 위협에 의한 전투 시스템의 피해를 예측 및 분석하여 취약성을 찾고, 이를 개선하는 것이 필요하다. 특히, 화재 및 폭발에 의한 전투 시스템의 취약성을 분석하는 연구는 국내외적으로 미미하여 기반 기술의 확보가 시급한 실정이다.

선행 연구로써 차량의 화재 하중[2], 차량용 오일의 화재 안전성[3], 차량의 착화 특성[4], 차량 내장재의 연소 생성 가스 분석[5] 등을 통한 전투 시스템의 착화 특성 및 구성 부품의 연소 특성에 관한 연구를 수행하였으며, 고속 충격탄의 연료 탱크 관통에 따른 내부 유동, 열전달 특성 및 열유동 해석[6-8], 고속 충격탄의 연료 탱크 관통에 따른 착화 특성 및 순간 화재 발생[9-13] 등 전산 모사 해석뿐만 아니라 확률론적 해석을 수행하였다. 이 논문에서는 선행 연구를 기반으로 FTA(Fault Tree Analysis) 기법[14]을 통해 전투 시스템의 순간 화재 발생 확률을 예측하고, 관련 정보를 시각화해주는 프로그램의 설계 및 구현에 관한 내용을 다룬다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 관련 연구에 대하여 기술하고, 3장에서 개발하는 프로그램의 기능 설계에 관한 내용을 다룬다. 또한 4장에서 설계를 기반으로 구현한 프로그램을 시험하며, 5장의 결론 및 향후 연구로 끝을 맺는다.

II. 관련 연구

2.1. 전투 시스템 및 생존성

전투 시스템은 전투 환경에서 국방 관련 임무를 수행하는 시스템을 의미하며, 생존성은 전투 시스템이 전투 환경에서 위협을 회피하거나 감내하여 임무를 수행할 수 있는 능력을 의미한다[1]. 전투 시스템의 생존성을 향상시키기 위해서는 위협에 의한 피격 등으로 인한 피해가 최소화되어야 한다. 피해를 최소화하기 위해서는 위협에 의한 전투 시스템의 취약성을 예측 및 분석하고, 그 결과를 통해 해당 취약점을 개선하여 전투 시스템의 생존성을 향상시키는 것이 필요하다.

여러 분야에서 취약성 분석 및 생존성 향상을 위한 연구가 진행되고 있지만, 현재 연구 기반이 미미하여 기반 기술을 확보할 필요가 있다. 특히 화재 및 폭발에 대한 전투 시스템의 취약성을 분석하는 프로그램은 거의 전무한 실정이다.

2.2. 전투 시스템의 치명 부품 및 순간 화재

화재가 발생하기 위해서는 산소, 발화 물질, 발화점 이상 온도의 세 가지 조건이 충족되어야 한다. 위협에 의한 피격 시 전투 시스템을 구성하는 부품 중에서 화재 발생의 가능성이 존재하는 부품은 “연료 탱크”와 “적재 포탄”이 될 수 있다. 즉, 전투 시스템의 화재 발생에 있어서 치명 부품(critical component)은 적재 포탄과 연료 탱크가 된다.

이 논문에서는 전투 시스템의 순간 화재를 “전투 시스템이 위협에 의해 피격되었을 경우, 외부 위협이 장갑을 관통하여 화재 발생의 가능성을 지닌 치명 부품에 도달하고, 도달하는 순간의 잔류 열에너지가 치명 부품 내에 있는 발화 물질의 착화 온도보다 높아 순간적으로 화재가 발생하는 현상”이라고 정의한다.

2.3. FTA(Fault Tree Analysis)

고장 트리 분석 혹은 결합수분석이라고도 하는 FTA는 최상위에 정의된 사건이 발생하게 된 상태 및 원인의 식별과 분석을 위해 사용되는 기법으로 주로 안전성, 가용성, 유지보수성, 신뢰성 분석 등에 사용된다.

이 논문에서는 FTA 기법을 전투 시스템의 순간 화재 발생에 대한 원인을 분석하기 위해 적용하였으며, 화재 확률 트리와 결합하여 순간 화재의 발생 확률을

계산하는데 사용된다. 그림 1은 이 논문에서 다루는 전투 시스템의 순간 화재 발생 FTA이다. 이를 이용하여 위협에 의해 전투 시스템이 관통되어 순간 화재가 발생했을 경우, 그 원인이 되는 치명 부품이 무엇인지, 치명 부품의 어느 부분에서 순간 화재가 발생했는지를 식별할 수 있다.

그림 1. 전투 시스템의 순간 화재 발생 FTA
Fig. 1 FTA for flash fire occurrence of combat system

III. 설 계

3.1. 충격탄 관통 시 장갑의 온도 분포

전투 시스템의 연료 탱크가 충격탄에 의해 관통되었을 경우의 순간 화재발생 여부를 분석하기 위한 연구의 전 단계로, 충격탄 속도 변화에 따른 연료 탱크 내부의 열전달 특성을 분석하기 위해 전산유체역학기법을 도

입하여 수치 해석을 수행하였다. 사용된 지배 방정식은 2차원 비정상 상태 난류 열유동을 해석하기 위한 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류 운동 에너지 방정식, 난류 운동 에너지 소산을 방정식 및 에너지 방정식이다. 또한 난류 해석을 위해서는 표준 k-e 난류 모델을 사용하였다. 충격탄의 이동은 이동 격자의 첨가 및 삭제 방법을 사용하여 구현하였다. 따라서 충격탄은 시간 간격에 따라 항상 일정한 격자 간격만큼 움직이게 된다[6-13].

3.2. 치명 부품 및 관통 유/무 표시

3차원 전투 시스템 모델에서 치명 부품인 연료 탱크 및 적재 포탄의 위치를 빨간색으로 표시하였다. 또한 3차원 전투 시스템 모델에서 치명 부품인 연료 탱크 및 적재 포탄의 위치를 전면, 측면, 후면에 해당하는 2차원 전투 시스템 모델에 매핑(mapping)하였다. 또한 위협에 의해 전투 시스템의 치명 부품이 관통되면 빨간색, 관통되지 않으면 녹색으로 표시하여 관통 여부를 쉽게 알아볼 수 있도록 하였다.

3.3. 순간 화재 확률 트리

선행 연구를 통해 전투 시스템의 순간 화재 발생 확률에 영향을 미치는 요인이 “전투 시스템 관통 유/무”, “위협 탄의 종류”, “탄의 소이효과 유/무”, “적재 포탄 관통 유/무”, “연료 탱크 관통 유/무”, “연료의 종류”라는 것을 확인하였다. 이러한 요인과 앞 장에서 설명한 전투 시스템의 화재 발생 FTA를 기반으로 그림 2와 같은 순간 화재 확률 트리를 도출하였다.

그림 2. 전투 시스템의 순간 화재 확률 트리
Fig. 2 Probability tree for flash fire of combat system

IV. 구현 및 시험

4.1. 개발 환경

전투 시스템의 순간 화재 분석 프로그램 개발 환경으로 운영체제는 Windows 7 Professional K (64-bit), 개발 도구는 Microsoft Visual Studio Team System 2008, 개발 언어는 .NET Framework 3.5 기반 C#을 이용하였으며, 충격탄 관통 시 장갑의 온도 분포에 관한 계산은 CD-adapco 사의 STAR-CD Ver. 4.10 프로그램[15]을 사용하였으며, 시간에 대해서는 Implicit 알고리즘과 압력 보정 방법은 PISO 알고리즘을 사용하였다. 대류항의 차분에는 상류차분법을 사용하였고, 계산에 사용된 격자수는 547,094개로 충격탄의 이동 경로에 격자를 집중시켰다.

Implicit 알고리즘은 특정 시간 증분이 주어지면 각 시점에서의 해를 구하기 위해 여러 번 반복 계산을 하는 방법이며, PISO 알고리즘은 디커플링(decoupling)되어 있는 속도와 압력을 커플링(coupling)하기 위해서 사용하는 압력 보정 방법이다.

4.2. 사용자 인터페이스

전투 시스템 순간 화재 분석 프로그램의 사용자 인터페이스는 그림 3과 같이 구성하였다.

그림 3. 사용자 인터페이스
Fig. 3 User interface

화면 왼쪽의 설정부에는 “외부 위협”, “전투 시스템”, “연료 탱크”, “적재 포탄”에 관한 설정 값을 선택 및 입력하는 부분이 있다. 화면 중앙의 전투 시스템 표

시부에는 전투 시스템의 모습을 표시하며, 상단의 탭을 이용하여 “치명 부품”, “관통 유/무”, “화재 확률 트리”, “온도 분포”를 표시하는 화면으로 전환할 수 있다. 또한 화면의 오른쪽에는 전투 시스템, 연료 탱크, 적재 포탄, 각각의 관통 여부를 설정하는 관통 유/무 설정부와 순간 화재 발생 확률의 계산 “결과”를 출력하는 결과 출력부가 있다. 화면의 아래쪽에는 선행 연구를 통해 수집된 전투 시스템의 “외부 위협”, “연료”, “내장재”에 관한 물성 테이블을 표시해주는 물성 테이블 표시부가 있다.

4.3. 시험

이 논문에서 개발한 전투 시스템 순간 화재 예측 프로그램의 유용성을 검증하기 위하여 다음과 같이 설정하고 시험하였다. 위협의 형태는 “포탄”, 위협의 종류는 “소이탄”, 전투 시스템은 “전차”, 연료 종류는 “휘발유”, 포탄 적재 여부는 “예”로 설정하였으며, 전투 시스템 관통 여부는 “예”, 연료 탱크 관통 여부는 “예”, 적재 포탄 관통 여부는 “예”로 분석을 실행하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다.

3차원 전투 시스템 모델 상에서의 치명 부품의 위치는 그림 4의 (a)와 같고, 치명 부품의 관통 유/무는 그림 4의 (b)와 같으며 연료 탱크 및 적재 포탄이 관통되었다고 설정했기 때문에 각각의 위치가 빨간색으로 표시된다. 또한 순간 화재 발생 확률의 계산을 위한 순간 화재 확률 트리는 그림 4의 (c)와 같으며, 설정에 따라 선택된 항목은 빨간색으로 표시되고, 이 항목에 해당하는 확률 값을 적용하여 오른쪽 결과 창에 순간 화재 발생 확률이 출력된다. 이때, 확률은 순간 화재 확률 트리(그림 2 참조)에 따라 다음과 같이 계산된다. 즉, “전투 시스템 관통(1.0) × 포탄(0.9) × 소이성(1.0) × 적재 포탄 관통(0.99) × 연료 탱크 관통(0.6) × 휘발유(0.9) = 순간 화재 발생 확률(0.4811)”이 된다. 마지막으로 관통 순간의 온도 분포를 애니메이션으로 표시하는 화면은 그림 4의 (d)와 같다.

V. 결론 및 향후 연구

이 논문에서는 위협에 의해 전투 시스템이 피격되어 치명 부품이 관통되었을 경우, 순간 화재의 발생 확률을

(a)

(b)

(c)

(d)

그림 4. 전투 시스템의 순간 화재 예측 프로그램
(a) 치명 부품 (b) 관통 유/무 (c) 순간 화재 확률 트리 (d) 온도 분포

Fig. 4 Program for flash fire prediction of combat system

(a) Critical components (b) Positions of penetrated components (c) Selected Flash Fire Probability Tree
(d) Temperature profiles

분석하고, 분석 결과를 비롯하여 관련된 여러 정보를 시각화해주는 목적을 가진 프로그램의 개발에 관한 내용을 다루었다. 이때, 위험에 대한 전투 시스템의 순간 화재 발생 확률은 FTA를 기반으로 화재와 관련된 여러 요인을 고려하여 도출된 화재 확률 트리를 이용하여 계산하였다. 그래픽 사용자 인터페이스를 통해 전투 시스템의 종류, 전투 시스템 장갑의 재질, 연료 탱크 및 적재 포탄, 위협의 종류 등을 쉽게 설정 가능하다. 또한 화재에 대한 취약성을 가진 치명 부품의 위치 및 관통 여부를 전투 시스템 모델에 표시해주었으며, 위험탄이 전투 시스템을

관통하는 순간의 열전달에 관한 온도 분포를 애니메이션으로 표현해주어 분석 결과 및 관련 정보를 이해하기 쉽게 개발하였다. 개발한 전투 시스템의 순간 화재 예측 프로그램에서는 여러 형태의 전투 시스템 중 전차 모델에 대해서만 분석을 수행하였는데, 향후에는 전차뿐 아니라 다양한 전투 시스템 모델로의 확장이 필요하다. 또한 치명 부품의 위치는 3차원 전투 시스템 모델에 표시했지만, 관통 유/무 및 온도 분포는 2차원 전투 시스템 모델을 통해 표시하였다. 따라서 여러 정보를 3차원 전투 시스템 모델로 표시하는 것에 관한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(과제번호 UD1200190D)

참고문헌

- [1] Michael O. Said, "Theory and Practice of Total Ship Survivability for Ship Design", Naval Engineers Journal, Volume 107, Issue 4, pp.191-203, 1995.
- [2] 김해림, 박영주, 이승철, 이해평, "차량의 화재하중에 관한 연구", 한국안전학회, 2010년도 한국안전학회 추계학술대회 초록집, p.59, 2010.
- [3] 이해평, 박영주, 이승철, 김해림, "차량용 오일의 화재안전성에 관한 연구", 한국방재학회, 2011년도 한국방재학회 학술발표대회 논문집, pp.653-658, 2011.
- [4] 이해평, 박영주, 황미정, 홍소영, 이승철, 김해림, "차량의 착화특성에 관한 연구", 한국안전학회, 2011년도 한국안전학회 춘계학술대회 초록집, p.104, 2011.
- [5] 김해림, 박영주, 이승철, 이해평, "차량내장재의 연소생성가스 분석 연구", 한국화재소방학회, 2010년도 한국화재소방학회 추계학술발표회 논문집, pp.354-357, 2010.
- [6] 이승철, 박영록, 이해평, 박영주, 김해림, "고속 충격탄의 연료탱크 관통에 따른 내부 유동해석", 한국안전학회, 2010년도 한국안전학회 추계학술대회 초록집, p.34, 2010.
- [7] 이승철, 박영록, 이해평, 박영주, "고속 충격탄의 연료탱크 관통 시 내부 열유동해석", 한국화재소방학회, 2010년도 한국화재소방학회 추계학술논문발표회 논문집, pp.324-327, 2010.
- [8] 이승철, 박영록, 전우철, 이해평, "고속충격탄의 연료탱크 관통시 열전달 특성", 한국화재소방학회, 2011년도 한국화재소방학회 추계학술논문발표회 논문집, pp.533-536, 2011.
- [9] H. P. Lee, M. J. Hwang, S. C. Lee, H. R. Kim, Y. J. Park, "Risk Analysis of Car Fire through Combustion Characteristics", The 1st International Conference on Accident Prevention, pp.432-435, 2010.
- [10] H. P. Lee, S. C. Lee, Y. J. Park, M. J. Hwang, C. S. Baek, "Fire Accident of Fuel Tank by Bullet Penetration", Asia Pacific Symposium on Safety 2011, pp.476-479, 2011.
- [11] Y. J. Park, H. P. Lee, M. J. Hwang, S. C. Lee, "Ignition Characteristics of Vehicles with External Impact", International Conference on Materials and Reliability, 2011.
- [12] S. C. Lee, H. P. Lee, Y. R. Park, "A Numerical Simulation in the Thermo-fluid Flow Characteristics on the High Speed Bullet Penetrated a Fuel Tank", International Conference on Materials and Reliability, 2011.
- [13] H. P. Lee, S. C. Lee, Y. J. Park, M. J. Hwang, M. J. Kim, H. J. Lee, "A Study on the Vulnerability Model for the System by Flash Fire", The 4th International Conference on Design and Analysis of Protective Structures, 2012.
- [14] International Electrotechnical Commission, IEC 61025 : Fault Tree Analysis (FTA) Second edition, International Electrotechnical Commission, 2006.
- [15] <http://www.cd-adapco.com/>

저자소개

황훈규(Hun-Gyu Hwang)

2009년 2월 한국해양대학교
IT공학부 컴퓨터정보공학
전공 (공학사)

2011년 2월 한국해양대학교 대학원
컴퓨터공학과 (공학석사)

2011년 3월~현재 한국해양대학교 대학원 컴퓨터공학과
박사과정

※관심분야: 정보보안, 모델링 및 시뮬레이션, 해양정보
시스템, 네트워크

이장세(Jang-Se Lee)

1997년 한국항공대학교
컴퓨터공학과(공학사)
1999년 한국항공대학교
컴퓨터공학과(공학석사)

2003년 한국항공대학교 컴퓨터공학과(공학박사)
2004년 3월~현재 한국해양대학교 IT공학부(부교수)
※ 관심분야: 컴퓨터보안, 지능시스템, 모델링 및
시뮬레이션

이승철(Seung-Chul Lee)

1993년 한양대학교
기계공학과(공학사)
1995년 한양대학교
기계공학과(공학석사)

2000년 한양대학교 기계공학과(공학박사)
2004년 10월~현재 강원대학교 소방방재학부(부교수)
※ 관심분야: 방재설비, 터널(지하 대공간) 및
초고층빌딩 환기 및 방재

박영주(Young-Ju Park)

1996년 강원대학교
재료공학과(공학사)
2000년 강원대학교
재료공학과(공학석사)

2009년 강원대학교 도시환경방재 전공(공학박사)
2010년 5월~현재 강원대학교 소방방재학부(연구교수)
※ 관심분야: 화재조사 및 감식, 연소공학, 시뮬레이션

이해평(Hae-Pyeong Lee)

1986년 한양대학교
화학공학과(공학사)
1988년 한양대학교
화학공학과(공학석사)

1996년 한양대학교 화학공학과(공학박사)
2003년 9월~현재 강원대학교 소방방재학부(부교수)
※ 관심분야: 연소공학, 화재감식, 소화약제, 재해통계