

시설물 방호등급 개념 설계

기정훈 · 이현석 · Dongfack Guepi Clovis Jamot · 박종일[†]

서울과학기술대학교 안전공학과

(2015. 3. 12. 접수 / 2015. 4. 22. 수정 / 2015. 5. 27. 채택)

Conceptional Framework of Level of Protection for Facilities

Jung Hun Kee · Hyun Seok Lee · Dongfack Guepi Clovis Jamot · Jong Yil Park[†]

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

(Received March 12, 2015 / Revised April 22, 2015 / Accepted May 27, 2015)

Abstract : Although attention to terrorism has increased sharply in recent years within many countries, it is by no means a new phenomenon. Majority of these countries have limited regulations or guidelines about terrorism. LOP (Level Of Protection) can be consider as a first step. This paper seeks to present a process to determine LOP and allowable damage. LOP is determined by asset value reason why it should be based on cost. The asset value is defined as “cost induced when asset is damaged”. For example, the collateral damage outside the facility should be taken in consideration in the asset value. Allowable structural damage is assigned depending on LOP.

Key Words : protection, blast resistance, safety

1. 배경 및 목적

정부는 다양한 형태의 위협으로부터 국민의 안전을 보장하기 위해 예방, 대비, 대응, 복구 등의 계획을 수립하고 시행하고 있다. 생활수준 향상으로 인해 국민의 안전에 대한 관심과 요구도 급속히 증가하고 있다.

산업 발전으로 인해 사회는 고도화, 대형화되고 있으며, 이에 따라 위협요소가 새로이 생성되기도 하고 그 형태가 복잡해지고 있다. 이 위협들을 완전히 제거할 수 없으며 관리를 통한 피해 경감에 초점을 맞춰야 한다. 이는 개인의 교육, 대비를 통해 해결될 수 없으며 정부차원의 관리가 필요하다.

최근 국제적으로 큰 문제를 야기하고 있으나, 국내에서는 소홀히 다루어지고 있는 위협 중 하나가 테러리즘이다. 테러리즘의 정의는 다양하다. 테러에서 국가를 공격자 항목에 포함시키는데 대한 이견이 있으나, 일반적으로 국가 및 민간인에 영향을 주기위해 의도적으로 수행되는 행위로 정의될 수 있다¹⁻⁶⁾.

전 세계적으로 테러 발생 횟수⁷⁾는 연간 급격하게 증가하고 있고, 50%이상이 폭발물을 공격 수단으로 사용하였다. 또한 50% 정도가 민간 시설을 표적으로 하고 있

으며 이는 정부 시설 대비 민간 시설이 접근하기 용이하고, 야기할 수 있는 피해가 크기 때문으로 추정된다.

테러가 발생하는 경우 직접적인 피해액도 크며, 부가적으로 사회에 발생시키는 사회적 비용도 이를 상회하고 있다. 2001년 발생한 세계무역센터 테러(이하 911)에 의한 직접 피해액은 약 29조원, 간접 피해액은 107조 이상(주식총액 감소 제외)으로 추정되고 있다⁸⁾.

국내의 경우 911 테러 직후 통합테러법의 제정을 추진했으나 아직 입법화는 이루어지지 않았다. 『초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법』(시행 2014.11.19.)에서는 사전재난영향성검토협의 시 테러대비를 고려하도록 명시하고 있으나 그 구체적인 방법이 제시되고 있지 않다.

모든 시설물을 동일한 수준으로 보호하기에는 자원 문제가 발생하므로, 선별적 방호가 필요하며 이를 위해서는 방호등급이 마련되어야 한다. 즉 방호의 시작점은 방호등급의 결정이라고 할 수 있다. 미국의 경우 정부 시설에 한해 적용할 수 있는 방호등급 체계를 보유하고 있다⁹⁾. 총 5등급을 가지며 거주인원 수, 면적, 기능 등에 의해 결정된다. 하지만 그 기준이 정량적 분석을 통해 이루어지기 보다는 단순히 전문가집단의 합의

[†] Corresponding Author : Jong Yil Park, Tel : +82-2-970-6508, E-mail : jip111@seoultech.ac.kr

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

에 의해 도출되어, 합리적인 방호등급이라 할 수 없다.

방호등급 개발의 주 목적이 효율적인 자원분배를 통한 국가 전체의 피해 경감임으로, 비용-효과분석이 가능하도록 설정되어야 한다. 즉 방호등급은 테러 발생 시 피해정도 혹은 직간접 비용을 기준으로 설정되어야 한다. 본 논문에서는 시설물의 자산가치 분석을 통한 방호등급 결정체계의 개념을 제시하고자 한다. 단 위협은 폭발로만 한정한다.

2. 방호등급 설계

본 논문에서 자산가치는 “자산의 파괴에 의해 야기되는 모든 손실”로 정의한다. 즉, 자산가치는 단순히 자산의 대체 비용이 아니라, 그 자산의 파괴에 의해 발생하는 부수적인 피해까지 포함하는 개념이다.

시설물의 방호등급은 시설물의 자산가치에 의해, 구조부재 방호등급은 시설물 방호등급에 의해 결정되도록 설계한다. 즉, 시설물의 방호등급에 따라 허용 가능한 피해정도가 도출되며, 이에 따라 각 구조부재의 방호등급을 결정한다.

2.1 시설물 방호등급

시설물 내에서 이루어지는 영리 활동에 의한 이익을 기능적 자산으로, 이 외 자산을 물리적 자산으로 구분한다. 또한, 자산의 피해가 타 자산에 영향을 주지 않는 경우 독립자산, 자산의 파괴에 의해 장내(시설물 내) 타 자산에 영향을 주는 경우 내부-위협자산, 장외에 까지 피해를 주는 경우 내외부-위협자산으로 구분한다. 인원(Value₁), 설비(Value₂), 보관물(Value₃), 구조물(Value₄), 폭발성물질(Value₅), 유해물질(Value₆), 기능(Value₇)으로 자산 항목을 제한하여 제시한다.

2.1.1 인원

물리적 독립자산에 해당한다. 인명의 손실은 가장 우선적으로 고려되어야 할 자산 중 하나이다. 인원 자산가치는 사회적 비용을 고려하여 인원 사상에 의한 피해액으로 계산한다. 인원의 자산가치는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$Value_1 = \sum_j Value_{1j} \quad (1)$$

여기서, Value₁ = 인원의 총 가치, Value_{1j} = j번째 인원의 가치, 인당 자산가치 25억¹⁰⁾ (j=1~인원의 수, 인원은 방문객과 상주인원). 예를 들어 100명이 시설물 및 구조물에 상주하는 경우 인원 자산가치는 2,500억으로 계산된다.

인명의 가치를 금액으로 환산하기 위해서는 부상 및 사망이 초래하는 비용에 대해 알아볼 필요가 있다. 이때 연구자의 주관적인 판단이 개입될 여지가 많아, 다양한 인당 자산가치¹¹⁾가 제시된다. 영국 Health and Safety Executive (HSE)¹⁰⁾에서 매년 산업재해로 인한 근로자 사상이 사회에 미치는 손실액을 통계적으로 분석해 오고 있다. 사상으로 인한 비용은 비용 부담자에 따라 근로자 비용, 고용자 비용, 정부 비용으로 구분되며 이들의 합이 비용으로 계산된다. 본 논문에서는 HSE에서 제시한 25억을 사용하였으나, 그 수치에 대해서는 추가적인 고찰이 필요하다.

2.1.2 설비

물리적 내부-위협자산에 해당한다. 설비는 장내에 거치되고 기능에 영향을 주는 장비로 정의한다. 설비 자산가치는 설비 자체의 손실 및 기능 손실을 의미하며 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} Value_{2j} &= Value_{2j2} + Value_{2j7} \\ Value_2 &= \sum_j Value_{2j} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, Value₂ = 설비의 총가치, Value_{2j} = j번째 설비의 자산가치, Value_{2j2} = j번째 설비 자체만의 손실, Value_{2j7} = j번째 설비의 손실에 의한 기능 손실, j=1~장비의 수.

2.1.3 보관물

물리적 독립자산에 해당한다. 보관물은 시설물 및 구조물의 기능과 관련되지 않고 장내 단순 보관물을 의미한다. 보관물 자산가치는 보관물의 파괴에 의한 손실액을 의미하며 식 (3)과 같이 계산된다.

$$Value_3 = \sum_j Value_{3j} \quad (3)$$

여기서, Value₃ = 보관물의 총가치, Value_{3j} = j번째 보관물의 자산가치, j=1~보관물의 수.

2.1.4 구조물

구조물의 물리적 내부위협자산에 해당한다. 구조물의 자산가치는 구조물 자체의 가치와 타 자산에 미치는 손실액을 의미하며 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} Value_{4j} &= \sum_k Value_{4jk} \\ Value_4 &= \sum_j Value_{4j} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, Value_{4j} = j번째 구조물의 자산가치, j=1~구조물의 수, Value_{4jk} = j번째 구조물의 파괴에 의해 k자

산이 입는 피해.

건물 자체의 가치 $Value_{44}$ 를 산정하기 위해서 국제청에서 제시하는 건물 기준시가 산정 방법을 적용할 수도 있다. 기준시가는 아래의 식(5)으로 계산 될 수 있다.

$$\text{기준시가} = \text{m}^2\text{당 금액} \times \text{평가대상 건물의 면적(m}^2\text{)} \quad (5)$$

여기서 $\text{m}^2\text{당 금액} = \text{건물신축가격기준액} \times \text{구조지수} \times \text{용도지수} \times \text{위치지수} \times \text{경과연수별잔가율} \times \text{개별 건물의 특성에 따른 조정률}$

2.1.5 폭발성 물질

폭발성 물질은 외부자극에 의해 폭연 혹은 폭발 현상을 야기할 수 있는 물질을 의미한다. 폭발성 물질의 파괴에 의해서는 장내 뿐 아니라 장외에도 영향을 줄 수 있으므로 물리적 내부위협자산으로 구분되며 자산가치는 아래 식(6)과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} Value_{5j} &= \sum_k Value_{5jk} + Out Value_{5j} \\ Value_5 &= \sum_j (Value_{5j5} + Out Value_{5j}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $OutValue_{5j} = j$ 번째 폭발성 물질에 의한 장외 피해액, $j=1 \sim$ 폭발성 물질의 수.

폭발성 물질에 의한 장외 피해액은 시설물 및 구조물 인원, 장비, 보관물, 구조물의 피해액을 합산한 금액을 나타낸다. 이를 산출하기 위해서는 폭발에 의한 압력¹²⁾을 예측하고 장외에 위치한 자산의 취약성¹³⁾과 비교하여 그 피해액을 산출한다.

2.1.6 유해 물질

유해 물질은 유출시 인체 혹은 환경에 영향을 줄 수 있는 것을 의미한다. 유해 물질의 유출은 장내 뿐 아니라 장외에도 영향을 줄 수 있으므로 물리적 내부위협 자산으로 구분되며 자산가치는 아래의 식 (7)과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} Value_{6j} &= \sum_k Value_{6jk} + Out Value_{6j} \\ Value_6 &= \sum_j (Value_{6j6} + Out Value_{6j}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $OutValue_{6j} = j$ 번째 유해 물질에 의한 장외 피해액, $j=1 \sim$ 폭발성 물질의 수.

주변 피해액은 폭발성 물질의 경우와 유사한 방법을 통해 산출될 수 있다.

2.1.7 기능

시설물 및 구조물이 고유의 기능을 가지고 있을 때

(예: 영업이익), 타 자산의 파괴에 의해 발생하게 되는 피해액을 기능 자산으로 고려하며 식 (8)과 같다.

$$Value_7 = \text{타 자산의 피해에 의한 시설물의 기능적 피해액} \quad (8)$$

기능 자산 산정을 위해서는 기업후시보험에서 보험가를 산정하는 개념을 도입할 수 있다.

2.1.8 여론 민감도 가중치

자산에 따라 국민 혹은 정부가 느끼는 피해는 달라질 수 있다. Peter Sandman¹⁴⁾는 위험에 공학적 개념 외에 대중의 분노(outrage)를 포함시켜야 된다고 주장한다. 이는 여론 악화에 의한 사회적 비용을 의미한다. 미군의 경우에도 정치적 민감도(political sensitivity)¹⁵⁾를 하나의 자산 항목으로 설정하고 있다.

본 연구에서는 여론 민감도를 가중치 W_i 로 산정하여 자산가치에 곱함으로써 자산규모를 고려하고자 한다.

$$Value_i = W_i \times Value_i \quad (9)$$

여기서, i =자산항목.

2.1.9 자산합산

시설물 및 구조물의 자산가치는 식 (1)~(9)에서 기술된 자산가치와 가중치를 이용하여 합산함으로써 산정된다.

$$Value = \sum W_i \times Value_i \quad (10)$$

2.1.10 종합

시설물 방호등급 체계의 주요 개념은 자산가치에 의한 방호등급 결정, 방호등급 별 허용되는 피해액이 설정, 각 등급 별 동일한 피해액이 되도록 설정, 방호등급 별 자산가치가 다름으로 허용 피해액 비율은 등급이 높을수록 낮아짐으로 설정한다. Table 1은 시설물 및 구조물 방호등급(안)의 예시를 나타낸다.

Table 1. Example of LOP

LOP	Asset value	Allowable damage (absolute value)	Allowable damage (%)
I(High)	more than 4,000	500	less than 12
II(Medium)	1,000~4,000	125~500	12
III(Low)	250~1,000	125~500	50

2.2 구조부재 방호등급

본 논문에서 고려하는 구조부재는 슬래브, 기둥으로

한정한다. 기존 미군의 피해(방호)등급¹⁴⁾은 5단계로 과도하게 세분화되어 있다(Table 2). 시설물 LOP에 따라 위협에 관계없이 일괄적으로 적용되고 있어 과다 설계되는 경향이 있다. 또한 보수 및 재사용 여부는 폭발과 같이 빈번하지 않고 인명의 사상 유무가 핵심인 사고에 대해 적용할 필요성은 없는 것으로 판단된다. 따라서 구조부재의 파괴 여부만을 정성적 방호등급으로 제시한다(Table 3).

미군의 정량적 피해기준¹⁴⁾은 철근콘크리트의 경우 연성비와 지점회전각을 사용하고 있다. 하지만 연성비와 지점회전각으로는 구조부재의 구조적 거동만을 볼 수 있으므로, 국부피해를 위한 breach distance를 추가하여 정량 지표로 설정 한다(Table 4).

2.3 시설물 및 구조물 방호등급과 구조부재 방호등급 연동

시설물 및 구조물 방호등급 Table 1은 구조부재 방호등급 Table 3과 연동되어야 한다. 이를 위해 시설물 및 구조물의 파괴에 의한 자산피해가 파괴된 가용면적에 비례한다는 개념을 도입한다. 즉 ‘자산 대비 허용

Table 2. US DoD damage level of structural components¹⁴⁾

Component Damage Level	Description of Component Damage
Blowout	Component is overwhelmed by the blast load causing debris with significant velocities.
Hanardous Failure	Component has failed, and debris velocities range from insignificant to very significant
Heavy Damage	Component has not failed, but it has significant permanent deflections causing it to be unrepairable
Moderate Damage	Component has some permanent deflection. It is generally repairable, if necessary, although replacement may be more economical and aesthetic
Superficial Damage	Componet has no visible permanent damage

Table 3. Proposed qualitative damage criteria

LOP of structural component	Global response	Local response (breach)
S (survive)	Residual load carry capacity exceeds design load	Less than 50% of area is breached
F (fail)	Residual load carry capacity is less than design load	More than 50% of area is breached

Table 4. Proposed quantitative damage criteria

	Global response	Local response
Criteria	Ductility ratio, support rotation angle	normalized breach distance

Table 5. Linkage of LOP and damage criteria

LOP	Asset value	Allowable damage (%)	Allowable damage of slab (%)
I(High)	more than 4,000	less than 12	less than 12
II(Medium)	1,000~4,000	12	12
III(Low)	250~1,000	50	50

피해액 비율’과 동일한 값을 가지는 ‘허용 가용면적 피해 비율’을 설정한다(Table 5). 위협 분석 후 해당 위협 별 허용 가용면적 피해 비율을 충족시키도록 구조부재 방호등급을 설정하고, 모든 위협 시나리오를 충족시킬 수 있도록 구조부재 별 방호등급을 지정한다. 예를 들어 방호등급 II의 건물인 경우 전체 슬래브의 88% 이상이 S등급을 만족하여야 한다. 단 연쇄붕괴(Progressive collapse)를 무시한 경우에 한한다.

3. 적용 예제

총 가용 면적 2,592 m²을 가지는 백화점 건물을 신축하고자 한다. 구조물의 기준시가는 150억이며, 평균적으로 100명의 방문객 및 직원이 상주하고 있다. 여론 민감도를 모든 자산에 대해 1로 가정한 경우 총 자산 가치는 2,650억으로 계산된다(식 10). 이 경우 Table 5를 적용하는 경우 시설물의 LOP는 Level II가 되며 허용파괴면적은 12%로 설정된다.

초기 설계 시 슬래브의 두께는 150 mm, 철근은 HD10@150로 양방향 배근하였다. 위협분석을 통해 Fig. 1의 위치에서 200kg TNT 기폭이 예상되는 경우 해당

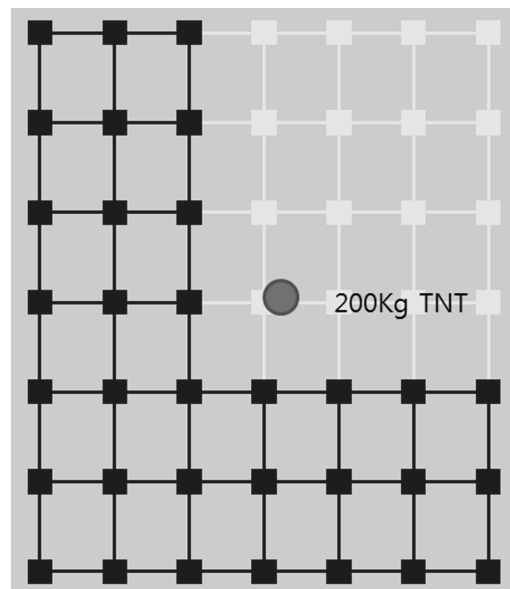


Fig. 1. Location of detonation.

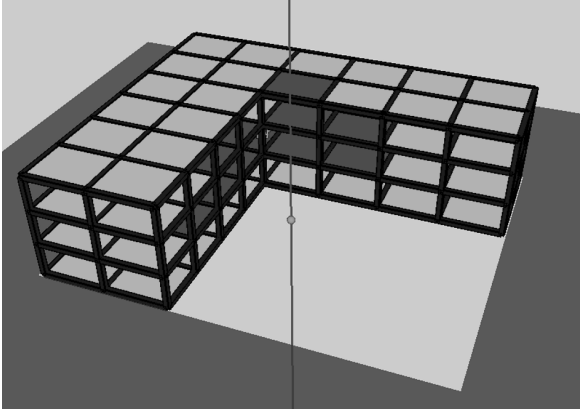


Fig. 2. Slab damage for 150 mm thickness (red represents collapse of slab).

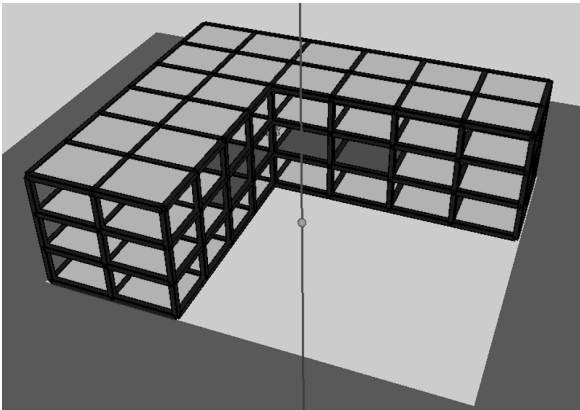


Fig. 3. Slab damage 180 mm thickness (red represents collapse of slab).

위협에 의한 건물의 파손정도를 WEAS(Weapon Effectiveness for Above and underground Structures)¹⁷⁾를 사용하여 계산하였다. 가용면적의 경우 총 가용면적 2,592 m² 중 605 m²가 파손되어 23%의 가용면적 파괴가 나타났다(Fig. 2). 이는 허용 가용면적 피해 비율 12%를 초과하는 수치임으로 현재 설계로는 구조물 방호등급 II를 만족시키지 못한다. 즉 슬래브의 88%가 S 등급이어야 하는데, 77%만이 S 등급을 만족시키고 있다. 슬래브의 88%이상 S 등급을 만족시키기 위해서 슬래브의 두께를 150 mm에서 180 mm로 변경하였다. 이후 피해분석 결과 총 가용면적 2,592 m² 중 216 m²가 파손되어 8%의 가용면적 파괴가 나타났다(Fig. 3). 이는 구조물 방호등급 II 등급에 명시된 12% 미만임으로 해당 건물은 방호등급에 맞게 설계되었다.

4. 결론

테러 현황 분석 (테러에 발생 증가, 50% 이상이 폭

발물을 공격 수단으로 사용, 50% 정도가 민간 시설을 표적으로 함)과 발생 시 피해액 조사(9/11 테러의 경우 직접비 46조, 간접비 중 소득감소만 80조 등)를 통해 방호등급 필요성, 범위, 기본 개념 설정을 설정하였다. 폭발물을 이용한 민간 시설물에 대한 피해 경감 대책이 시급히 마련되어야 하며, 시설물을 일괄적으로 방호하기에는 재원문제가 발생함으로, 선별적 방호가 필요하며 이를 위해서는 방호등급이 마련되어야 한다. 방호등급 개발의 주 목적이 효율적인 재원분배를 통한 국가 전체의 피해 경감임으로, 방호등급은 피해액을 기준으로 설정되어야 한다.

방호등급은 시설물 방호등급, 구조부재 방호등급으로 구성하였다. 시설물 방호등급의 경우 자산분석을 통해 설정하도록 설계하였다. 구조부재 방호등급은 생존과 파괴로만 구분하였으며, 허용 가용면적 개념을 도입하여 시설물 방호등급과 연동하였다.

감사의 글: 이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단 (과제번호 : 13건설연구S02)의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) U. S. Department of State, "Country Reports on Terrorism 2011, Report, United States of America", 2012.
- 2) FBI, What We Investigate, <<http://www.fbi.gov/albuquerque/about-us/what-we-investigate>>
- 3) Joint Publication 1-02, DOD Dictionary of Military and Associated Terms, 2001. <http://www.dtic.mil/doctrine/jel/new_pubs/jp1_02.pdf>
- 4) P. Klein, "International Convention for the Suppression of the Financing of Terrorism", United Nations Audiovisual Library of International Law, pp.1-5, 2009.
- 5) B. Ganor, "Defining Terrorism: Is One Man's Terrorist Another Man's Freedom Fighter?", Police Practice and Research: An International Journal, Vol. 3, Issue 4, pp. 287-304, 2002.
- 6) J. J. Michael, "Terrorism's Slippery Definition Eludes UN Diplomats, The Christian Science Monitor", 2002.
- 7) Global Terrorism Database, <<http://www.start.umd.edu/gtd>>
- 8) W. Enders and E. Olson, "Measuring the Economic Costs of Terrorism", The Oxford Handbook of the Economics of Peace and Conflict, 2012.
- 9) US Dept of Justice, US Marshals Service and United States of America, "Vulnerability Assessment of Federal Facilities", 1995.

- 10) Health and Safety Executive (HSE), “The Costs to Britain of Workplace Injuries and Work-related Ill Health in 2006/07”, 2011.
- 11) Viscusi, W. Kip, “The Value of Risks to Life and Health”, *Journal of Economic Literature*, pp.1912-1946, 1993.
- 12) US Army Engineers Waterways Experimental Station, TM 5-855-1, *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*, US Army, 1986.
- 13) I. Bowen, E. Gerald, R. Fletcher and D. R. Richmond, “Estimate of Mans Tolerance to the Direct Effects of Air Blast”, 1968.
- 14) P. Sandman, “Responding to Community Outrage: Strategies for Effective Risk Communication”, AIHA, 2011.
- 15) Unified Facilities Criteria Program, DoD Security Engineering Facilities Planning Manual (UFC 4- 020-01), Manual, Department of Defense, Washington, D.C, 2008.
- 16) Protective Design Center, Single Degree of Freedom Response Limits for Antiterrorism Design(PDC-TR-06-08), Report, U.S. Army Corps of Engineers, 1986.
- 17) J. Y. Park, S. U. Lee and H. S. Kim, “Framework of Weapon Effectiveness Tool for Hardened Target”, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 27, No. 6, pp.551-555, 2014.