중력하중을 고려한 H형강 기둥의 방폭성능에 대한 해석적 평가

Analytical Evaluation of Blast Resistance of H-shaped Columns Considering Gravity Load

이경구* · 노지은** · 김선웅**

Lee, Kyungkoo · Roh, Jieun · Kim, Seonwoong

Abstract

The behavior of columns under blast loading is very important for blast resistance and progressive collapse resistance of frame structures. In this paper, the blast resistance of H-shaped columns considering initial gravity load was evaluated using finite element analysis method. To this end, three-step analyses of initial gravity load analysis, blast analysis, and residual compression analysis, were conducted by varying the amounts of initial gravity load and blast load. Based on the analysis results, the blast resistance of a column was evaluated in terms of the deformation of column and the residual compressive strength of the damaged column. Also, the relationship between the blast-induced deformation and residual compressive strength of a H-shaped column was derived.

Key words : H-shaped column, Blast resistance, Gravity load, Finite element analysis, Residual compressive strength

요 지

골조구조물의 방폭성능과 연쇄붕괴저항성능에 있어서 폭발하중을 받은 기둥의 거동은 매우 중요하다. 본 논문에서는 초기중력하중을 고려한 H형강 기둥의 방폭성능을 유한요소해석을 통해 평가하였다. 이를 위해, 다양한 중력하중크기와 폭발하중크기를 적용하여 초기중력하중해석, 폭발해석, 잔여압축해석의 3단계 해석을 수행하였다. 해석 결과를 토대로, 기둥의 폭발변형과 폭발 후 잔여압축강도 면에서 기둥의 방폭성능을 평가하였다. 또한, H형강 기둥의 폭발변형과 잔여압축강도의 관계를 유도하였다.

핵심용어 : H형강 기둥, 방폭성능, 중력하중, 유한요소해석, 잔여압축강도

1. 서 론

폭발 관련 연구는 국가안보 및 보안과 밀접하게 관련되어 있어서 주로 군 시설물 등의 구조물에 제한적으로 수행되어 왔다. 그 결과 일반건물 설계시 고려되는 지진이나 태풍 등의 자연적 재해에 비해, 충돌, 폭발 등의 인위적 재해에 대한 대비가 상대적으로 미비한 실정이었다.

지난 십여년간 전세계적으로 2001년 9월 11일 미국의 World Trade Center(WTC) 테러, 2005년 7월 7일 영국의 런던 킹스크로스역 폭탄테러, 2008년 9월 11일 WTC 테러 7주년에 메리어트호텔 트럭폭탄테러, 2008년 11월 26일 인도 뭄바이의 다중이용시설 동시다발테러 등이 발생하였다. 국내에서도 2003년 대구 지하철 방화사건과 2010년 11월 북한의 연평도 포격사건 외에 크고 작은 산업시설 폭발 사고 등이

발생하였다.

이처럼, 폭발테러는 다른 재해에 비해 한정된 공간내에서 수많은 인명 및 재산피해를 발생시킬 수 있기 때문에 그 발생 확률을 떠나서 인명피해방지와 방재차원에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 오늘날 전세계적으로 정부산하 건물이나 국가핵심시설의 경우 보안을 강화하고 잠재적인 폭발에 대한 위협과 건물의 연쇄붕괴 가능성에 대비하는 추세이다. 아울러 폭발하중에 의한 피해감소를 위해 구조물의 거동과 저항성능에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

한편, 구조물의 방폭성능은 일반적으로 구조부재의 폭발에 의한 변형능력을 횡변위 또는 회전각으로 평가한다. 이 때 구조부재에 작용하는 중력하중을 폭발하중과 동시에 고려하지 않는 것이 현실이다(ASCE 2010). 그러나 건물의 수직부재에는 중력하중에 의한 압축력이 작용한 상태에서 폭발하중

*정회원. 단국대학교 건축공학과 교수(E-mail: kkleee@dankook.ac.kr)
Member. Professor, Department of Architectural Engineering, Dankook University

**단국대학교 건축공학과 박사과정
Ph.D Candidate, Department of Architectural Engineering, Dankook University

***교신저자. 정회원. ㈜대우건설 기술연구원, 선임연구원(Tel: +82-31-250-1152, Fax: +82-31-250-1132, E-mail: coreal3@snu.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Senior Researcher, DAEWOO Institute of Construction Technology

에 의한 횡변위가 발생한다. 이 경우 압축력과 횡변위의 $P-\Delta$ 효과로 인해 중력하중을 고려하지 않는 경우보다 큰 횡변위가 발생할 수 있다. 이러한 $P-\Delta$ 효과는 수직부재에 작용하는 중력하중의 크기에 따라 차이가 있을 것으로 예상된다.

또한, 현재 미국방부의 설계기준 중 하나인 UFC 4-023-03(DoD 2009)에서 제시하고 있는 연쇄붕괴저항설계방법 중 하나인 대체경로법(alternate path method)은 구조물의 주요 위치에 있는 수직부재(벽체, 기둥)의 완전파괴를 가정한 후, 파괴된 수직부재에 작용하던 중력하중이 인접한 보, 접합부, 기둥으로 전달되도록 구조물을 설계하는 방법이다. 폭발하중에 의해 수직부재의 손실을 가정하고 구조물 전체의 연쇄붕괴저항성을 평가하는 것은 보수적인 접근일 수 있다. 그러나 실제로 수직부재의 폭발피해 정도에 따라 손상된 수직부재의 중력하중에 대한 저항능력이 존재하며, 이는 구조물 전체의 연쇄붕괴저항성 평가에 고려될 필요가 있다.

본 연구에서는 철골구조물의 연쇄붕괴 여부에 결정적인 영향을 미치는 기둥의 방폭성능에 대해 평가하였다. 이를 위해 H형강 기둥에 가해지는 중력하중과 폭발하중의 이격거리(standoff distance)를 달리하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과를 토대로, 중력하중이 H형강 기둥의 손상도에 미치는 영향을 평가하였고, 손상된 기둥의 중력하중에 대한 저항능을 평가하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델

범용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA (2009)를 사용하여 재료적, 기하학적 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 높이가 3.6m인 H-300×300×10×15 단면의 기둥을 대상으로 기둥 중간높이에 질량 500 kg의 구형 TNT가 다양한 이격거리에서 폭발하는 시나리오를 가정하였다.

H형강 기둥모델은 비선형 유한요소로서 8절점 육면체 요소를 적용하였다. 이 요소는 8개의 절점을 가지며, 각 절점에서는 x, y, z 방향의 3개의 직선 변위를 자유도로 가진다. 육면체 요소는 요소 내의 변위 분포를 나타내는 형상 함수를 동일하게 선택한 등매개 요소(isoparametric element)로써 왜곡이 없을 경우 더욱 정확하다. 정밀한 등매개 요소가 중요한 영역에 사용될 경우 전산효율의 손실 없이 정확한 결과가 도출되므로 이 요소를 사용하였다. 모델링의 메쉬(mesh) 간격은 Fig. 1과 같이 기둥 높이 3.6m의 길이방향으로는 40 mm

Fig. 1. Column model meshes

Fig. 2. SM490 steel stress-strain curve based on strain rate (Lee 2010)

간격으로 등분하였으며, 하나의 요소 크기가 최대한 정사각형에 가깝도록 플랜지와 웨브의 폭을 각각 8등분, 7등분을 하였다. 플랜지와 웨브의 두께방향으로는 4등분을 하였고, 플랜지와 웨브가 만나는 부분은 보다 정밀도를 높였다. 기둥의 양단은 고정단으로 가정하였다.

강재는 SM490 강재를 채택하고, 정적 재료물성치인 탄성계수 $E = 2.06 \times 10^6$ MPa, 항복강도 $F_y = 325$ MPa, 인장강도 $F_u = 490$ MPa를 사용하였다(KSSC 2009). 한편, 폭발해석을 위해서 폭발하중의 빠른 재하속도로 인해 강재의 항복강도와 인장강도를 증가시키는 변형률속도(high strain rate) 효과를 반영하였다. 이를 위해 변형률속도에 따라 각각 다른 응력-변형률 관계의 적용이 가능한 선형소성모델(piecewise linear plasticity model)을 사용하였다. 선형소성모델에는 von Mises 소성을 기반으로 하는 등방경화규칙(isotropic hardening rule)이 적용되었다. 국내에서는 SM490 강재의 변형률속도를 반영한 응력-변형률 관계를 보여주는 실험 등의 명확한 자료가 없으므로 미국 UFC 3-340-02(DoD 2008)의 자료를 근거로 변형률 속도에 따른 동적증폭계수(dynamic increase factor)를 유추하여, Fig. 2와 같은 변형률 속도를 고려한 응력-변형률 관계를 적용하였다.

질량 500 kg의 구형 TNT에 의한 폭발하중산정을 위하여 CONWEP하중을 사용하였다. TNT 질량 500 kg은 테러범에 의해 승용차로 운반될 수 있는 최대 TNT량이다. CONWEP하중은 폭발해석에서 널리 사용되는 실험결과를 근거로 하는 경험적 모델이다(Baker 1973). 또한, CONWEP하중은 입사 및 반사압력의 감쇠를 등가삼각펄스의 형태로 나타내며 시간에 따른 압력을 지수함수로 가정하여 현실적인 접근방식을 취한다(Remennikov 2003). 본 연구에서는 LS-DYNA (2006) 해석프로그램의 *load_blast 명령어를 이용하여, TNT 질량 크기와 폭발위치, 폭발하중을 받는 기둥 표면을 정의함으로써 CONWEP하중을 기둥에 재하하였다. 재하된 하중은 해당 기둥표면의 각 요소에 폭발물 이격거리와 폭발파의 입사각도가 고려되어 산정되며, Fig. 3과 같이 폭발압력 시간이력곡선의 형태로 적용된다.

Fig. 3. Blast pressure time history curve

2.2 해석변수

건물의 기둥은 상부에서 재하되는 중력하중에 의해 일정한 압축력이 작용된 초기상태에서 폭발하중이 재하된다. 본 연구에서는 기둥의 공칭압축강도(P_n) 대한 초기중력하중(P_i)의 크기를 변수로 하여 해석을 수행하였다. 높이 3.6 m인 H-300×300×10×15 단면 기둥의 강축방향 공칭압축강도는 3,811 kN로 산정되었다. 폭발하중이 작용되기 이전에 기둥상부에 재하되는 중력하중을 초기중력하중으로 정의하고, Table 1과 같이 공칭압축강도 대 초기중력하중 비를 0.1간격으로 증가시키면서 해석을 수행하였다.

폭발하중의 크기는 일반적으로 (1)식의 폭발물의 질량과 이격거리를 동시에 반영하는 축척거리(scaled distance, Z)를 통해 결정된다(DoD 2008).

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

여기서, R = TNT와 기둥간 이격거리(m), W = TNT 질량(kg).

Table 1. Parameter - initial gravity load

$\alpha (= P_i/P_n)$	P_i (kN)
0.1	381
0.2	762
0.3	1,143
0.4	1,524
0.5	1,905
0.6	2,287
0.7	2,668
0.8	3,049
0.9	3,411

Table 2. Parameter - scaled distance

TNT 질량 (kg)	이격거리 (m)	축척거리 ($m/kg^{1/3}$)
500	4	0.50
	5	0.63
	6	0.76
	8	1.01
	10	1.26

이 연구에서는 Table 2에 정리된 축척거리를 통해 결정된 다양한 폭발하중 크기를 적용하였다. 압축재의 중간높이인 1.8 m 높이에 폭발물을 위치시킨 후, 강제압축재로부터 TNT 중심까지의 이격거리를 4 m, 5 m, 6 m, 8 m, 10 m로 달리하였다.

2.3 해석절차

중력하중을 고려한 기둥의 방폭성능을 평가하기 위하여 초기중력하중해석(initial gravity load analysis), 폭발해석(blast analysis), 잔여압축해석(residual compression analysis)의 3단계 해석이 수행되었다. 다시 말해, H형강 기둥에 초기중력하중을 재하하는 단계, 폭발하중에 의해 기둥이 손상되는 단계, 손상된 기둥의 잔여압축성능을 평가하는 단계로 수행되었다.

1단계 초기중력하중해석은 앞 절에서 언급한 바와 같이, Table 1에 따라 공칭압축강도의 일정량(α)을 변수로 수행되었다(Fig. 4 참조). 이 해석단계에서는 반복계산을 통해 평형, 구성, 적합방정식을 만족하는 해를 도출하는 암시적 방법(implicit method)을 사용하였다.

2단계 폭발해석에서는 초기중력하중이 가해진 상태(1단계 해석)에서 기둥에 CONWEP폭발하중을 적용하였다(Fig. 5 참조). 앞 절에서 언급한 바와 같이 Table 2에 따른 폭발하중의 크기를 변수로 하여 해석을 수행하였다. 이 해석단계에서는 폭발하중에 의해 기둥의 비선형 변형이 크므로 명시적방법의 수렴문제를 해결하기 위하여 폭발해석에서 일반적으로 이용하는 명시적 방법(explicit method)을 사용하였다. 결과의 정확도를 높이기 위해 7×10^{-7} 의 해석시간간격(time step)을

Fig. 4. Initial gravity load analysis(step 1)

Fig. 5. Blast analysis(step 2)

Fig. 6. Residual compression analysis(step 3)

적용하였다. 폭발해석결과로부터 기둥의 손상도를 파악할 수 있으며, 기둥의 손상도는 Fig. 5와 같이 기둥의 수평변위(Δ)와 회전각(θ)으로 평가하였다.

3단계 잔여압축해석은 폭발하중에 의해 손상된 기둥의 폭발이후 중력하중에 대한 잔여압축성능을 평가하기 위한 것으로 암시적 방법을 이용하여 수행되었다(Fig. 6 참고). 이 해석은 2단계 해석에서 기둥이 폭발로 인해 최대회전각이 발생하였을 때의 변형 및 내부 응력을 보존한 상태에서 암시적 해석으로 전환하여 수행하였다. 해석은 변위제어로 수행되었으며, 손상된 기둥이 저항하는 최대 압축강도를 산정하고 이를 잔여압축강도(P_{res})로 정의하였다.

3. 해석결과

3.1 초기중력하중을 고려한 폭발변형능력 평가

1단계 초기중력하중해석과 2단계 폭발해석을 통해 초기중력하중(P_i)과 이격거리(R)에 따른 기둥의 방폭성능 중 하나인 변형능력을 평가하였다. 우선 초기중력하중이 기둥의 폭발거동, 즉 변형능력에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 7에서 보여주듯이, 초기중력하중을 고려하지 않고 폭발해석을 통해 평가된 변형에 비해[Fig. 7(a) 참조], 초기중력하중을 고려하여 폭발해석을 수행하였을 때 양단에 국부적 소성변형이 보다

Fig. 7. Example of blast deformation

크게 발생함을 알 수 있다[Fig. 7(b) 참조].

한편, 각각의 이격거리마다 초기중력하중이 존재하지 않을 때부터 초기중력하중을 증가시켰다. 그러나 동일한 폭발하중에 대해서도 일정 크기 이상의 초기중력하중이 재하된 상태에서 폭발하중을 작용하였을 때 기둥이 폭발에 저항하지 못하고 파괴되었다. 폭발에 저항할 수 있는 초기중력하중의 최

Table 4. Maximum initial gravity loads

이격거리	4 m	5 m	6 m	8 m	10 m
$P_{i,max}$	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9

(a) $R = 4$ m

(b) $R = 6$ m

(c) $R = 8$ m

Fig. 8. Effects of gravity load on blast deformation

대값을 $P_{i,max}$ 로 정의하고, 그 값을 각 이격거리에 대하여 Table 4에 정리하였다. 폭발하중을 받는 철골기둥은 이격거리가 멀수록 저항할 수 있는 초기중력하중의 크기도 커짐을 확인하였다.

Fig. 8은 기둥에 작용하고 있는 초기중력하중(P_i)에 따른 폭발에 의한 기둥의 수평변위(Δ)의 시간이력곡선 일부를 나타낸 그림이다. 동일한 이격거리, 즉 동일한 폭발하중크기에 대하여 초기중력하중이 클수록 폭발하중에 의한 기둥의 수평변위는 급속히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 모든 경우에 기둥이 최대수평변위에 도달한 후에 일정크기의 진폭을 가지며 진동을 하게 되는데, 기둥을 압축하고 있는 초기중력하중이 클수록 기둥은 작은 진폭으로 진동하는 것을 알 수 있다. 초기중력하중과 이격거리에 따른 기둥의 변형능력을 최대회전각(최대수평변위를 기둥높이의 1/2로 나눈 값)으로 Table 5에 정리하였다.

Fig. 9는 최대회전각과 축척거리(Z)와의 관계를 보여준다. 실선은 초기중력하중이 없는 경우($P_{i,non}$)를 표현한 것이고, 점선은 최대 초기중력하중이 재하된 경우($P_{i,max}$)를 표현한 것이다. 그림에는 표현되지 않았지만, 초기중력하중의 크기에 따라 최대회전각과 축척거리와의 관계 곡선은 두 곡선의 사이에 존재하였다. 일정한 축척거리에서 TNT가 폭발하여 폭발하중크기가 동일하더라도 초기중력하중의 존재 유무에 따라

최대화회전각의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 예를 들어, 축척거리가 $0.76 \text{ m/kg}^{1/3}$ (TNT질량 500 kg, 이격거리 6 m)인 경우, 초기중력하중이 없으면 기둥의 최대회전각은 0.023 rad 이고, 초기중력하중이 $0.8 P_n$ 이면 최대회전각은 0.043 rad 이다. 이 결과는 현재의 방폭설계에서 중력하중을 고려하지 않고 부재의 변형능력을 평가하는 것이 매우 비보수적임을 보여준다.

3.2 손상된 기둥의 잔여압축성능 평가

3단계 잔여압축해석을 통해 손상된 기둥의 잔여압축강도(P_{res})를 평가하였다. 잔여압축강도는 손상된 기둥이 초기중력하중 이상으로 압축력에 대하여 최대로 저항할 수 있는 압축강도로 정의하였다. Table 6은 잔여압축강도를 공칭압축강도(P_n)으로 정규화하여 이격거리와 초기중력하중에 따라 나타낸 것이다. 이격거리가 가까울수록 폭발피해가 커 기둥의 손상이 증가하기 때문에 잔여압축강도도 감소함을 재확인하였다. 또한, 동일한 이격거리(폭발하중크기)에 대하여도 초기중력하중이 클수록 잔여압축강도가 감소하는데 그 감소량은 최대 약 20%($R = 4 \text{ m}$ 인 경우)정도임을 알 수 있다.

3.3 폭발변형능력과 잔여압축강도 관계

Fig. 10에서는 폭발에 의한 기둥의 최대회전각과 잔여압축강도와의 관계를 나타내었다. 종축은 기둥의 잔여압축강도를

Table 5. Maximum column rotation

$P_i \backslash R$	4 m	5 m	6 m	8 m	10 m
0.0	0.065	0.037	0.023	0.011	0.007
0.1	0.066	0.038	0.023	0.011	0.007
0.2	0.068	0.039	0.024	0.011	0.007
0.3	0.072	0.040	0.025	0.011	0.007
0.4	0.079	0.042	0.026	0.012	0.007
0.5	0.093	0.047	0.028	0.012	0.007
0.6	Failure	0.053	0.031	0.013	0.007
0.7	Failure	0.065	0.036	0.015	0.008
0.8	Failure	Failure	0.043	0.017	0.008
0.9	Failure	Failure	Failure	0.021	0.010
1.0	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure

Table 6. Residual compressive strength of column

$P_i \backslash R$	4 m	5 m	6 m	8 m	10 m
0.0	0.77	0.87	0.92	0.97	0.99
0.1	0.77	0.87	0.92	0.97	0.99
0.2	0.75	0.87	0.92	0.97	0.99
0.3	0.71	0.86	0.92	0.97	0.99
0.4	0.66	0.85	0.92	0.97	0.99
0.5	0.58	0.82	0.91	0.96	0.98
0.6	Failure	0.80	0.89	0.96	0.98
0.7	Failure	0.76	0.87	0.95	0.98
0.8	Failure	Failure	0.84	0.94	0.97
0.9	Failure	Failure	Failure	0.92	0.96
1.0	Failure	Failure	Failure	Failure	Failure

Fig. 9. Relationship between scaled distance and maximum column rotation

Fig. 10. Relationship between maximum rotation and residual compressive strength of column

공칭압축강도로 정규화(P_{res}/P_n)하여 표현하였다. 폭발에 의한 기둥의 최대회전각(폭발변형능력)과 정규화된 잔여압축강도는 선형관계에 가까움을 확인할 수 있다. 즉, 중력하중에 대한 손상된 기둥의 잔여압축성능은 폭발하중에 의한 기둥의 최대회전각(폭발변형능력)의 일차함수로 나타낼 수 있다. 또한, 폭발하중 크기를 대표하는 축척거리와 초기중력하중의 크기에 따라 기둥의 최대회전각이 결정되면 손상된 기둥의 잔여압축성능을 쉽게 판단할 수 있다. 이러한 선형관계는 기존 연구(Lee, 2010)에서 제시한 초기중력하중을 고려하지 않은 다양한 단면형상의 강재기둥의 경우에 보여준 선형관계와도 그 내용이 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 폭발하중을 받은 철골 구조물의 H형강 기둥의 방폭성능을 평가하였다. 이를 위해 구조물 상부에서 작용하는 초기중력하중을 고려하고 폭발물의 이격거리(축척거리)를 달리하였을 때의 H형강 기둥의 변형능력과 폭발 후 손상된 기둥의 잔여압축성능을 분석하였다. 해석결과를 통해 구조부재의 방폭성능평가에서 초기중력하중 효과의 중요성을 확인하였고, 구조부재의 변형도를 통해 잔여압축성능을 유추할 수 있는 관계식을 제시하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초기중력하중을 고려한 폭발해석결과, 기둥의 폭발변형은 초기중력하중의 존재 유무에 따라 큰 차이가 발생함을 확인하였다. 동일한 이격거리에서 폭발이 일어날 경우에도 초기중력하중 존재 유무에 따라 기둥의 폭발변형이 최대 약 90%까지 증가할 수 있음을 확인하였다. 이는 초기중력하중이 클 경우 현 기준에서 초기중력하중을 고려하지 않는 방폭성능평가가 매우 비보수적임을 보여준다.
- 2) 폭발 손상된 기둥의 잔여압축성능을 분석하였다. 폭발에 의한 기둥의 변형이 일정범위를 초과하면 잔여압축성능이 급속히 감소하였다. 또한, 동일한 이격거리에서 폭발이 일어날 경우에 초기중력하중 존재 유무에 따라 잔여압축성능이 최대 약 25%까지 감소할 수 있음을 확인하였다.

- 3) 최종적으로 폭발 손상된 기둥의 최대회전각과 잔여압축성능의 관계를 유도하였다. 초기중력하중의 유무에 관계없이 최대회전각과 잔여압축성능은 선형관계를 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(과제번호: 2012009490)의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사를 드립니다.

References

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2010) Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, Second edition, ASCE.
- Baker, W.E. (1973) Explosions in Air, University of Texas Press. Austin, TX.
- Department of Defense (DoD) (2008) Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Unified Facilities Criteria UFC 3-340-02.
- Department of Defense (DoD) (2009) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Unified Facilities Criteria UFC 4-023-03.
- Korean Society of Steel Construction (2009) Design of Steel Structures: KBC2009, Goomibook.
- Lee, K. (2010) Evaluation of Residual Capacity of Steel Compressive Members Under Blast Load, *Journal of the Architectural Institute of Korea: Structure & Construction*, Vol. 26, No. 10, pp. 37-44.
- LS-DYNA (2006) LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- LS-DYNA (2009) LS-DYNA Keyword User's Manual, version 971, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- Remennikov, A.M. (2003) A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings, *J Battlefield Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 5-10.

© Received January 16, 2013

© Revised January 18, 2013

© Accepted February 13, 2013