

고폭탄물의 근접폭발이 폭발압력과 충격량에 미치는 효과

Effects of Near-Field Explosion of High Explosives on Blast Overpressures and Impulses

신진원* · 김진규**

Shin, Jinwon* and Kim, Jinkyu**

Abstract

The effects of near-field detonation of high explosives in free air are characterized by blast overpressure and impulses. The typical practice for blast resistant design of structures in the United States, United Kingdom and elsewhere involves the use of the US government-published document of UFC 3-340-02. The UFC 3-340-02 approach has been developed for far-field detonations based on a number of test results but not been validated for near-field detonations due to a lack of the test data. Further, the near-field effects including the rarefaction wave, afterburning and expanding detonation products, fireball have not been addressed in the existing design approaches including UFC 3-340-02. Numerical studies are therefore performed to examine the effect of near-field detonations on blast overpressure and impulse. Recommendations for determining blast loading in the near field are provided.

Key words : Near-Field Detonation, Computational Fluid Dynamics, Afterburning, Expanding Detonation Products, Numerical Modeling

요 지

고폭탄물의 공중 근접폭발의 효과는 폭발압력 및 충격량에 의하여 특징지어진다. 미국, 영국 등 전세계적으로 구조물의 방폭설계에 대한 일반적인 연구는 미국방부 문서인 UFC 3-340-02를 사용하여 수행된다. UFC 3-340-02는 수많은 실험데이터에 근거하여 원거리 폭발을 대상을 개발되었지만 실험데이터의 부족으로 근접폭발에 대해서는 검증되지 않았다. 더욱이 저밀도파, 재연소, 팽창하는 폭발물, 파이어볼 등의 근접폭발효과가 UFC 3-340-02를 포함한 현재 방폭설계에서 반영되지 않았다. 따라서 폭발압력과 충격량에 대한 근접폭발효과를 알아보기 위하여 수치해석이 수행되었다. 근접거리에서의 폭발하중을 결정하기 위한 주요사항들을 기술하였다.

핵심용어 : 근접폭발, 전산유체역학, 재연소, 팽창 폭발물, 수치 모델링

1. 서 론

최근에 발생했던 프랑스 테러 이후 전 세계가 테러의 위협과 직면하였다. 대도시에서 테러가 발생할 경우, 사회적 혼란과 그 인명 피해가 얼마나 큰지를 이번 프랑스 테러를 통해 전 세계가 다시 한 번 느꼈다. 테러위협이 전 세계적 이목을 받게 된 사건은 뉴욕 세계무역센터 붕괴의 911테러라 할 수 있다. 이 사건은 테러에 의해 건물이 붕괴될 수 있다는

새로운 과제를 던졌다.

폭발하중을 받는 구조물의 설계, 이른바 방폭설계를 위한 연구는 크게 두가지 방향으로 이루어진다. 전산유체역학 (computational fluid dynamics, CFD) 및 유한요소 수치해석을 이용한 방법과 경험적 차트, 간략하중식, 단자유도해석법 등을 통한 방법이다. 후자는 1950년대 원거리 핵폭발로 야기된 위협에 대한 지상군사기반시설의 설계에 초점을 맞추어서 개발되었다. Biggs (1964), Norries et al.(1959) 등은 이러

*정회원, 단국대학교 건축공학과 연구교수(E-mail: jshin@dankook.ac.kr)

Member, Research Professor, Dept. of Architectural Engineering, Dankook University

**교신저자, 정회원, 한양대학교 ERICA 캠퍼스 건축학과 건축공학부 연구교수(Tel: +82-31-436-8116, Fax: +82-31-436-8169, E-mail: jinkyu29547@gmail.com)

Corresponding Author, Member, Research Professor, School of Architecture and Architectural Engineering, Hanyang University

한 위협에 대하여 단자유도법에 의한 설계법을 소개하였다. 전자는 후자의 해석결과에 대한 검증위하여 사용되거나 또는 복잡한 폭발현상이나 실험적으로 규명하기 힘든 경우에 대한 예측을 가능하게 한다.

구조물 또는 부재에 대한 방폭설계는 우선적으로 폭발효과를 모델링 하는 것이다. 미국, 영국, 오스트리아 등에서의 사용되는 방폭설계는 Kingery and Bulmash (1984)에 의해 개발된 경험적인 차트의 사용을 수반한다. 이 차트는 미국 국방부 문서인 UFC 3-340-02 (DoD 2008)에서 제시하고 있으며 환산 거리, $Z (= R/W^{1/3})$, 여기서 R = 폭발중심으로부터의 거리, W = 폭발물의 무게)에 따른 입사 및 반사 압력 및 충격량, 폭발파 도달시간, 폭발압력지속시간 등에 대한 값들을 제공한다. ConWep (Hyde 1992)과 같은 컴퓨터 코드들은 이 차트에 대한 데이터를 전산화 하여 설계차트의 사용성을 증진시켰다.

이러한 UFC 3-340-02에서 제시하는 방폭설계차트는 원거리 폭발에 대한 수많은 실험자료를 기반으로 개발되었다. 이 차트들은 근접폭발에 대한 데이터를 제시하고 있지만 이 데이터들은 유도되거나 추측된 값들이 대부분이며 실험적으로 검증이 되지 않았으며 이론적으로도 정밀하게 검토되지 않았다. 이는 현재 상용 가능한 압력측정기로는 폭발시 근접거리에서의 높은 온도와 압력으로 인하여 측정이 매우 어렵기 때문이다 (Shin et al. 2014). UFC 3-340-02 차트는 또한 폭발하중을 폭발파의 도달과 동시에 순간적인 압력의 증폭과 이후 서서히 대기압으로 감소하는 형태로 가정하였는데, 이 또한 근접거리에서의 파이어볼 내부에서의 효과를 고려할 경우 다른 양상을 띌 수 있으며 또한 파이어볼 내부에서의 근접폭발효과인 재연소 효과등을 고려하지 않았기 때문에 이에 대한 재평가가 필요하다.

근접폭발에 대한 연구는 실험기술의 한계로 인하여 제한을 받지만, 대신에 최근 컴퓨터 기술이 급격한 발전은 이러한 근접폭발현상에 대한 정밀한 해석을 가능하게 하였다. 검증된 전산유체역학 코드들은 근접폭발에 대하여 발생 가능한 폭발효과를 설명하고 압력 및 충격량에 의한 폭발하중에 대한 예측을 가능하게 한다.

본 연구의 목적은 구형의 폭발물에 대한 폭발하중을 합리적으로 예측하기 위하여 실험적으로 확인하기 힘든 근접폭발효과를 수치해석적으로 특징짓는 것이다. 본 연구에서 근접폭발효과는 크게 재연소효과와 파이어볼 효과로 구분하였다.

폭발 초기 근접폭발파의 전파, 저밀도파의 생성 등을 해석을 통하여 관찰하였고 TNT의 무게 및 파이어볼 전파 범위이내의 환산거리에 따른 온도변화에 대하여 연구를 수행하였다. 이어 온도변화에 대한 연구를 바탕으로 근접폭발에 있어서 압력과 충격량에 영향을 줄 수 있는 재연소 효과에 대한 연구를 수행하여 이에 대한 수치해석모델링 기법을 제시하였다. 또한 근접폭발하중 산정시 고려되어야 하는 파이어볼

의 효과에 대한 연구를 수행하였다. 여기서 근접거리는 파이어볼이 폭발압력과 충격량에 영향을 미치는 범위로 정의되며 환산거리 $Z = 0.8 \text{ m}^{1/3}$ 을 말한다. 폭발과 관련한 저밀도파, 온도, 재연소, 파이어볼 등의 효과들 자체에 대한 연구들은 여러 문헌에서 찾아볼 수 있지만 환산거리에 따른 폭발하중 산정과 관련하여 기술된 자료는 거의 없다.

폭발 해석은 CFD 코드인 AUTODYN (ANSYS 2013)을 사용하여 수행되었다. CFD 폭발 모델링 기법을 소개하였고 폭발물과 공기를 모델링 하기 위하여 사용된 상태식과 계수들을 정의하였다.

2. CFD 모델링

폭발 해석은 폭발 및 충격 하중에 대한 수치해석에서 널리 이용되는 AUTODYN (ANSYS 2013)을 사용하여 수행되었다. AUTODYN은 유체의 흐름에 대한 지배보존식을 수치적으로 풀기 위하여 유한체적법(FVM), 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM) 등을 사용한다. 폭발에 대한 모델링은 두단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 오일러 유체 알고리즘을 사용하여 공기와 폭발물을 모델링하여 폭발물의 초기팽창을 1차원 방사형 도메인에서 구현하는 것이다 (Fig. 1. 참조). 이 해석은 폭발파가 반사경계에 도달하기 전까지 수행된다. 두 번째 단계는 1차원 해석결과를 구조물 또는 반사경계를 가진 2차원 또는 3차원 도메인으로 가져와서 해석을 수행하는 것이다 (Fig. 2. 참조). 이러한 수치해석기법은 초기 충격파의 팽창과정에 대한 해석에서 정밀한 해석을 가능하게 한다.

폭발물은 방폭설계에 일반적으로 고려되는 TNT가 사용되었다. TNT의 팽창에 따른 압력을 정의하기 위하여



Fig. 1. 1D Autodyn Analysis.

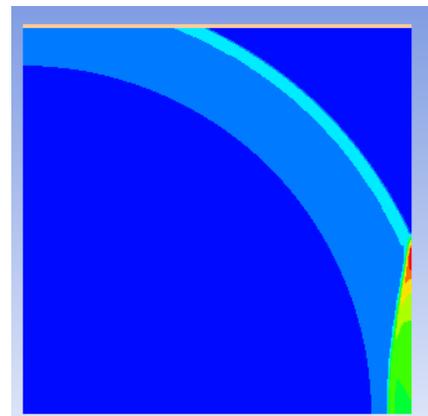


Fig. 2. 2D Cfd Analysis Using Autodyn.

Jones-Wilkins-Lee (JWL) Equation of State (EOS)가 사용되었으며 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + w \rho e \quad (1)$$

여기서 p = 폭발압력, V = 상대부피 ($= \rho_0 / \rho$), ρ_0 = 폭발물의 초기 밀도, ρ = 폭발 후 현재 밀도, e = 폭발물의 내부에너지, A, B, R_1, R_2, w = 계수들이다. JWL EOS의 계수들의 값은 Dobratz and Crawford (1985)에서 제시한 값을 사용하였다 (Table 1. 참조).

식(1)의 마지막 항은 공기의 모델링에 사용된 이상기체 상태식과 동일한 형태이며 다음과 같은 식을 정의된다.

$$p = (\gamma - 1) \rho e \quad (2)$$

여기서 p = 압력, γ = 비열비, ρ = 밀도, e = 공기의 내부에너지이다. 이상기체 EOS에 입력된 값들은 Table 2.와 같다.

3. 근접폭발파의 전파

근접거리에서의 폭발파의 모델링 및 전파를 이해하기 위하여 1차원 해석이 AUTODYN을 사용하여 수행되었다. 사용된 TNT의 무게는 23 kg이며 반지름은 150 mm 이다. 이는 손으로 운반 가능한 서류가방에 담을 수 있는 폭발물의 양과 유사하다. Fig. 3.은 AUTODYN을 통하여 계산된 폭발 직후 시간에 다른 압력이 변화를 보여준다. 최초 TNT 표면의

Table 1. JWL EOS Parameters for TNT.

Parameter	Unit	Value
ρ_0	kg/m ³	1630
A	GPa	371.2
B	GPa	3.231
R_1	-	4.15
R_2	-	0.95
w	-	0.30
e	J/kg	4.3E+06

Table 2. Ideal Gas EOS Parameters.

Parameter	Unit	Value
ρ_0	kg/m ³	1.225
γ	-	1.4
e	J/kg	2.068E+05

위치는 $t = 0.015$ ms에서 거리 150 mm에서의 가는 선으로 확인된다. 폭발의 팽창에 따라 이 선이 오른쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 최초 6930 m/s의 속도로 팽창하는 폭발충격파는 0.020 ms와 0.025ms에 사이에 TNT의 표면에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이 시점에 가는 선으로 확인되는 위치와 유사한 지점에 있는 충격파는 계속해서 바깥쪽으로 팽창함과 동시에 저밀도파가 생성되어 폭발물의 표면으로부터 중심으로 향하는 것을 볼 수 있다. 저밀도파는 폭발물의 중심에 도달하기 직전 중심에서의 최고압력은 4.5 GPa가량이다. 저밀도파는 폭발물의 중심에 $t = 0.065$ ms에 도달하여 압력을 급격하게 감소시킨다.

방폭설계에서는 일반적으로 충격파의 전면에 대해서만 고려하지만 근접거리에서는 이 저밀도파의 효과도 매우 중요하다. 이 저밀도파가 충격파 전면뒤의 압력을 해소하기

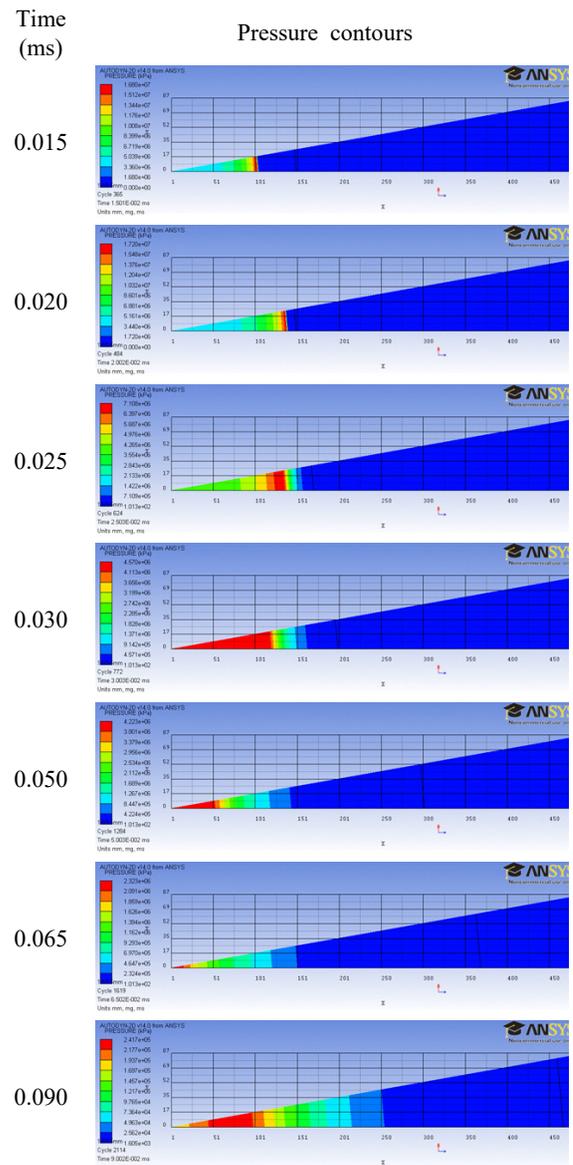


Fig. 3. Blast Wave Propagation.

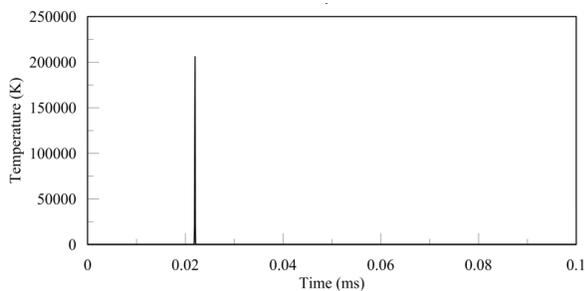
전까지는 압력이력에 상당한 영향을 끼친다. 이 효과는 아래 팽창하는 폭발물의 효과에 대해 다루는 부분에서 추가적으로 설명하였다.

4. 폭발초기 온도

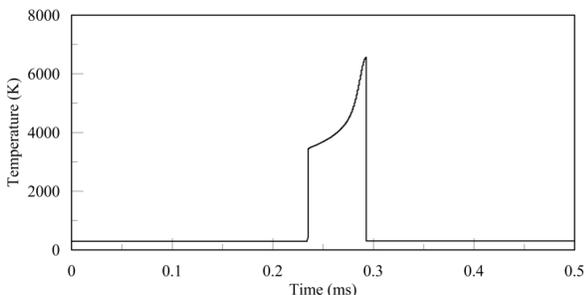
근접폭발에서 압력변환기를 사용하여 압력 및 충격량을 측정하기 어려운 이유는 높은 압력과 온도이다. 매우 높은 압력과 온도를 측정할 수 있는 PAINE 211, OMEGA PX1009 등의 고성능 압력변환기는 대략 200 MPa까지의 압력에 대한 측정이 가능하다. 이는 파이어볼 내부에서의 중심 근처까지의 압력을 포함한다. 하지만 대부분의 압력변환기는 1000K 이상 온도의 환경에서는 작동이 불가능하다. 이는 파이어볼 내부의 대부분의 범위를 포함한다. 폭발 초기의 온도변화를 관찰하기 위하여 AUTODYN을 사용하여 CFD 해석을 수행하였다. 또한 폭발물의 무게에 따른 압력의 변화를 관찰하기 위하여 23 kg, 960 kg, 18735 kg의 3가지 무게가 해석에 사용되었다.

TNT 무게 23kg에 대하여 폭발물의 표면과 매우 가까운 거리, 즉 환산거리 $Z = 0.054 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에서의 온도는 대략 200,000K이다 (Fig. 4.(a) 참조). (폭발물의 표면에서의 환산거리는 $Z = 0.0527 \text{ m/kg}^{1/3}$ 이다.) 폭발파의 진행에 따라 온도는 급격히 감소하며 파이어볼 내부의 대략 중간지점에서의 온도는 대략 6,500K이다(Fig. 4.(b) 참조). 파이어볼의 최종 범위는 대략 $Z = 0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 이다.

환산거리에 따른 온도분포는 Fig. 5와 같다. 온도는 폭발



(a) $Z = 0.054 \text{ m/kg}^{1/3}$



(b) $Z = 0.353 \text{ m/kg}^{1/3}$

Fig. 4. Temperature History for Spherical Detonation of TNT of 23 kg.

물의 무게에 영향을 받지 않고 환산거리에 따라 서서히 감소한다. 파이어볼의 가장 바깥쪽 표면 $Z = 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에서의 온도는 1000K 이상이다. 이는 파이어볼 내부의 근접거리에서의 폭발에 대해서는 기존에 사용되는 압력변환기의 작동환경을 넘어서는 것을 알 수 있다.

근접폭발효과중 하나로 재연소(afterburning)효과는 높은 온도로 인하여 연소되지 않은 TNT의 연료가 팽창하면서 추가적으로 주위의 산소와의 결합으로 연소하여 폭발압력을 증가시키는 효과를 말한다. 계산된 환산거리에 따른 온도에 대한 정보는 아래에 재연소 효과에 대한 연구에 사용되었다.

5. 재연소 효과

TNT를 포함한 대부분의 폭발물들은 산소 부족으로 폭발 시 모든 연료가 소모되지 않는다. 남은 연료들은 폭발이 일어나는 동안 주위의 공기와 결합하여 추가 연소를 일으키며 압력을 증가시키는데 이를 재연소(afterburning)라고 한다. 일반적인 공중폭발에 대한 방폭설계에서는 재연소 효과는 고려되지 않는데 이는 구속되지 않은 공간에서는 산소와의 결합 효율이 떨어지기 때문이다. 하지만 구속된 공간에서는 폭발물내의 연료가 주위의 공기와 섞여 활발한 산화작용이 일어나기 때문에 재연소 효과는 폭발환경에 따라 신중히 고려되어야 한다.

재연소 효과가 일어나기 위해서는 두가지 조건이 요구된다. 첫번째로는 화학작용이 일어나기에 충분히 높은 온도가 요구되며, 두 번째로는 공기 중에 충분한 산소이다. TNT의 경우 구성성분은 탄소, 일산화탄소, 수소, 메탄 등이며 이 연료들은 각각의 발화 온도에서 활발한 화학작용을 일으킨다. Souer et al. (2001), McNesby et al. (2010)의 연구에 따르면 폭발 후 주위의 산소가 충분하고 연료와 효율적으로 화학작용이 일어난다는 가정 하에 요구되는 온도는 1,800K 이상이다. AUTODYN에서는 재연소 효과와 같은 화학적 작용에 의한 효과는 모델링 되지 않기 때문에 폭발파의 진행 시점에 따른 각 단계에서 주위의 공기의 양에 따라

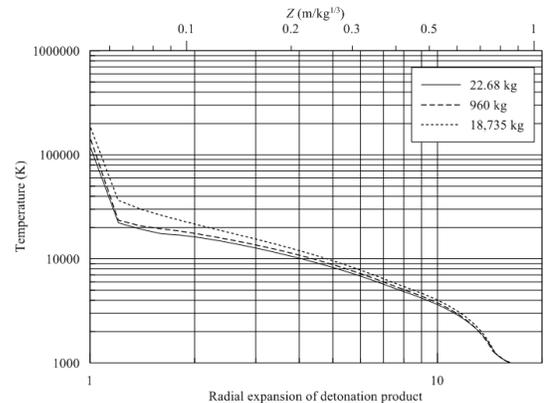


Fig. 5. Temperature Variation with Expansion of TNT.

Table 3. Afterburning Energy at Each Interval for Spherical Charge of TNT of 23 kg.

step	1	2	3	4	5	6
r	1-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-13
V _{air} (m ³)	0.87	2.1	4.1	6.8	10.1	9.4
W _{air} (kg)	1.07	2.58	5.02	8.28	12.4	11.5
W _{TNT} (kg)	0.34	0.81	1.58	2.60	3.89	3.62
E _{TNT} (MJ)	3.37	8.12	15.8	26.1	38.9	36.2

계산된 추가 에너지를 해석모델에 적용하였다. Table 1.에서 사용된 e는 폭발파가 주위의 공기와 결합하여 재연소하기 전의 폭발물의 내부에너지이다. 따라서 폭발압력에 영향을 주는 총 폭발 에너지는 폭발물의 내부에너지와 재연소 에너지의 합이다.

Fig. 5. 와 같이 1,800K에 해당하는 범위는 $Z = 0.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 또는 팽창률 $r = 13.4$ 이다. (여기서 팽창률은 팽창한 폭발물의 표면에 대한 최초 폭발물의 반지름의 비율이다.) 이는 파이어볼의 가장 바깥쪽 표면 ($Z = 0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$)과 매우 가까운 거리이기 때문에 파이어볼 내부의 대부분의 범위에서 재연소 효과가 일어날 수 있다.

23kg의 TNT에 대하여 폭발물의 표면과 충격파 사이의 공기의 부피는 팽창률 $r = 13.4$ 및 환산거리 $Z = 0.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에 대하여 33.3 m³이다. Donahue(2008)는 1 kg의 TNT의 최대 재연소 에너지는 10.01 MJ이며 3.18 kg의 공기가 필요하다고 보고하였다. 따라서 상온에서의 공기의 밀도는 1.225 kg/m³에 대하여 공기의 부피 33.3 m³에 대한 재연소 에너지는 총 129 MJ이며 1kg의 TNT 무게에 대해서는 5.67 MJ이다. 이는 폭발에너지(96 MJ)의 132%에 상응한다. Cullis and Huntington -Thresher (2007), McNesby et al. (2010) 등의 연구에 따르면 폭발 초기에는 주위의 결합 가능한 산소 부족 및 산소와의 혼합효율이 떨어지기 때문에 재연소 효과가 폭발파에 심각한 영향을 주지는 않는다. 본 연구에서는 폭발물내의 연료가 주위의 공기와 충분히 섞인다고 가정하였다.

재연소 에너지는 폭발파의 진행 시점에서 주위의 공기의 양에 따라 총 재연소 에너지는 6단계로 나누어 해석모델에 적용되었으며 각 단계에 대한 재연소 에너지 E_{TNT}가 산정되었다 (Table 3. 참조). 팽창하는 TNT의 전면이 팽창률 $r = 1, 4, 6, 8, 10, 12, 13$ 에 대하여 각각 $t = 0.0215, 0.123, 0.245, 0.406, 0.610, 0.897$ and 1.15 msec에 도달한다.

재연소 에너지는 0.0215 msec ($r = 1.0$)에서 1.15 msec ($r = 13$)까지 적용된다. 폭발 팽창률에 따른 최대의 재연소 에너지를 생산하기 위한 공기의 양은 Fig. 6.과 같다. 이를 근거로 계산된 시간에 따른 재연소 에너지를 계산하였다. (Fig. 7. 참조).

최대 재연소에너지 129 MJ에 대하여 근접환산거리 Z

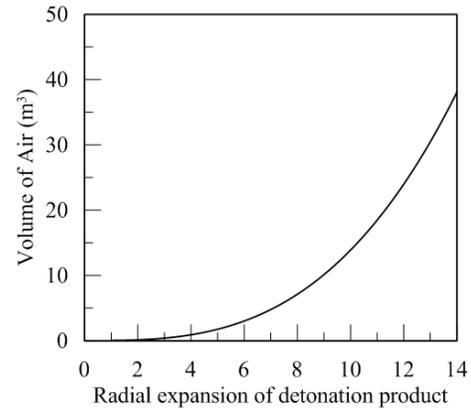


Fig. 6. Available Volume of Surrounding Air.

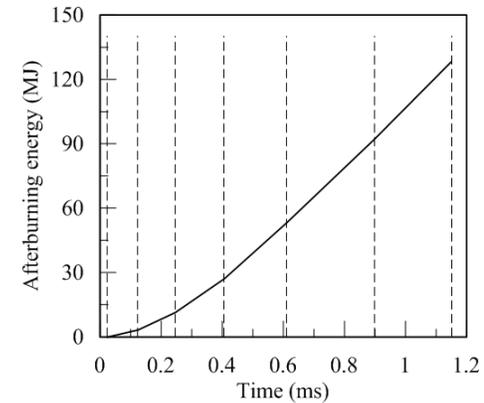
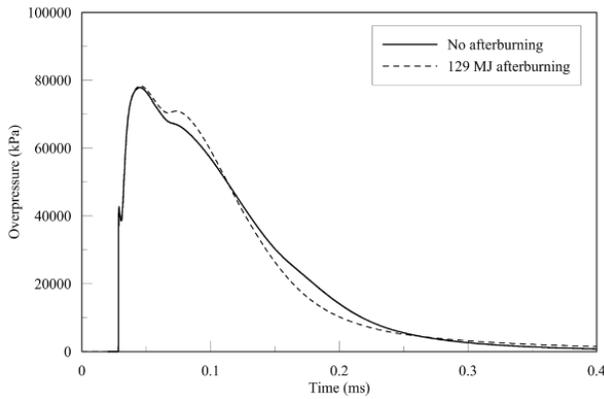


Fig. 7. Afterburning Energy History Input.

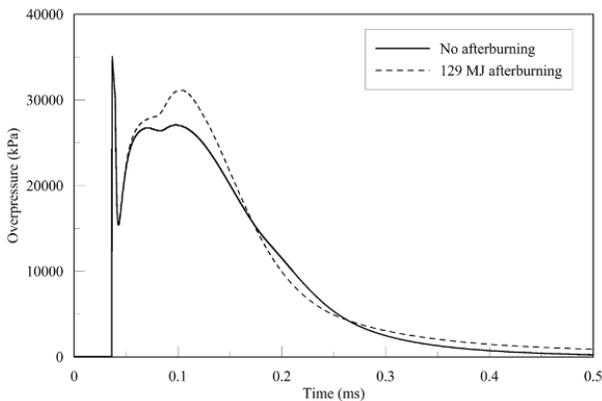
= 0.0707, 0.0883 및 0.176 $\text{m/kg}^{1/3}$ 에 대한 해석결과는 Fig. 8.과 같다. 앞서 언급된 바와 일관되게 폭발물의 표면에 매우 근접한 환산거리 $Z = 0.0707 \text{ m/kg}^{1/3}$ ($r = 1.34$)에 대해서는 주위의 공기의 부족으로 인하여 재연소의 효과는 미비하다. 폭발의 팽창에 따른 압력에 대한 재연소 효과는 환산거리가 증가함에 따라 증가한다 (Fig. 8. 참조). $Z = 0.0883$ ($r = 1.68$) 및 0.176 $\text{m/kg}^{1/3}$ ($r = 3.35$)에서 재연소 효과는 최고 압력에는 영향을 주지 않지만 충격량을 대략 1.5배까지 증가시킨다. 구조해석에 있어서 구조물의 피해정도의 척도는 최고압력보다는 충격지속시간동안 받는 충격량에 의해 결정되므로 재연소 효과는 반드시 고려되어야 한다.

6. 파이어볼 효과

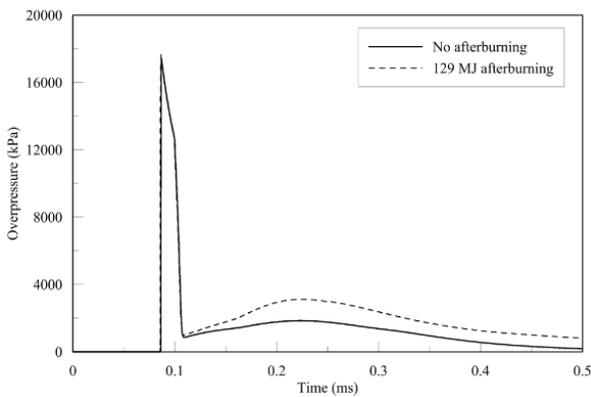
TNT와 같은 고폭탄물의 폭발시 충격파는 중심으로부터 방사형으로 바깥쪽으로 초음속으로 전파하기 때문에 폭발 초기 폭발파가 폭탄물의 표면 통과시에 충격파는 폭발물보다 공기 중의 음속만큼 더 빠르게 전파된다. 여기서 폭발물의 전파 범위는 파이어볼의 전파범위와 같다. 일반적으로 폭발 하중 산정시 충격파에 대한 효과만을 고려한다. 방폭설계에 있어서 전 세계적으로 기준 되는 UFC 3-340-02에서 제시하는 방폭설계차트 또한 충격파에 대해서만 고려하였고, 매우



(a) $0.0707 \text{ m/kg}^{1/3}$



b. $r = 250 \text{ mm}$ (101 mm from face of charge)
(b) $Z = 0.0883 \text{ m/kg}^{1/3}$



(c) $Z = 0.176 \text{ M/Kg}^{1/3}$

Fig. 8. Overpressure Histories with the Effect of Afterburning.

근접한 거리에서의 폭발물 또는 파이어볼의 효과는 고려하지 않았다. 따라서 이 파이어볼의 효과가 폭발압력에 미치는 영향이 CFD 해석을 통하여 관찰되었다. AUTODYN을 이용하여 수행된 CFD 또는 열역학 유체해석에서는 폭발파의 전파에 따른 압력이 및 분포를 통하여 충격파, 저밀도파, 파이어볼 효과 등에 대한 상세한 정보를 직접적으로 얻을 수 있다.

앞서 고려된 해석과 유사하게 23kg, 반경 150 mm의 TNT

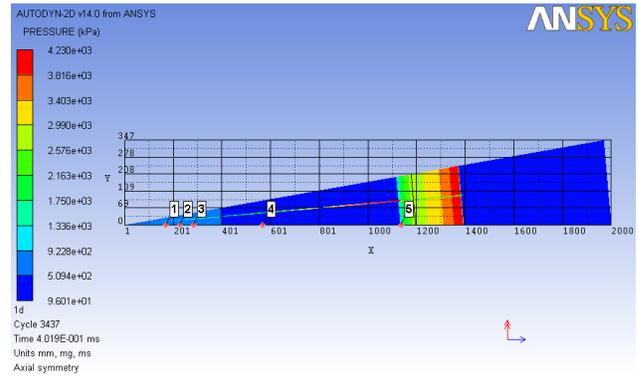
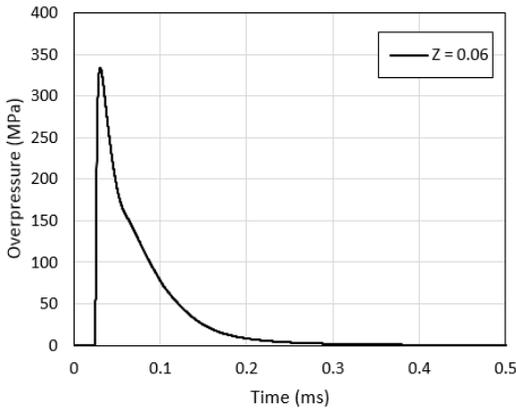


Fig. 9. Effect of Expanding Detonation Products (Fireball).

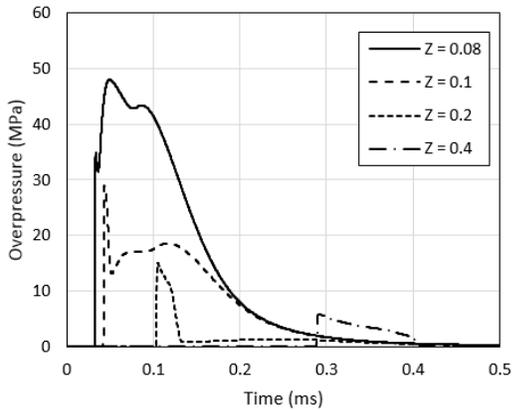
가 사용되었고 팽창하는 폭발물 (파이어볼)의 효과를 관찰하기 위하여 파이어볼 범위 ($Z = 0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$) 이내에서 5개의 환산거리 $Z = 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에서 팽창하는 폭발물이 압력에 미치는 영향을 관찰하였다.

앞서 언급되었던 충격파와 파이어볼의 팽창 위치를 구분하기 위하여 수행된 해석은 Fig. 9와 같다. 충격파의 위치는 대략 1,400 mm에서 4,700m/s의 속도로 이동하고 있으며 파이어볼의 위치는 가는 선으로 표시된 1,200 mm부근에 위치하여 있다. 근접폭발에 대한 압력이력에 대한 평가시 이 두가지 요소가 동시에 고려되어야 합리적인 폭발하중을 산정할 수 있다.

5가지 경우의 폭발 근접 환산거리에 대한 압력이력 해석결과는 Fig. 10.과 같다. 폭발전 폭발물의 표면 ($Z = 0.0527 \text{ m/kg}^{1/3}$)과 매우 가까운 거리 ($Z = 0.06 \text{ m/kg}^{1/3}$)에서의 압력이력(Fig. 10.(a) 참조)에서는 파이어볼의 효과가 관찰되지 않는다. 이는 충격파와 뒤이어 따라오는 파이어볼 사이의 거리가 매우 짧아 명확히 구분이 되지 않기 때문이다. 환산거리 $Z = 0.08 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 경우 최초 충격파 도달시 압력의 증가가 이루어지고 뒤이어 파이어볼 도달시 2차 압력증가가 이루어진다. 여기서 압력이력에서의 최고 압력은 파이어볼에 의한 압력(=48 MPa)이며 충격파에 의한 압력(= 33 MPa)에 비해 대략 1.5배 크다. 환산거리 $Z = 0.1 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 경우 최고압력은 충격파에 의해 결정되지만 파이어볼 효과에 의하여 충격파가 증가되는 것을 볼 수 있다. (충격파는 압력을 시간에 대하여 적분한 값이다.) 환산거리 $Z = 0.2 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 경우 파이어볼의 효과는 그리 크진 않지만 충격파의 증가에 영향을 주고 있다. 환산거리 $Z = 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 경우, 파이어볼의 효과는 더 이상 관찰되지 않는다. 폭발파의 전파에 따른 파이어볼 내부의 압력 감소는 앞서 언급된 저밀도파의 영향 때문이다. 최초 폭발파가 폭발물의 표면의 도달시 발생되어 폭발물의 중심으로 향하는 이 저밀도파는 충격파의 진행과 함께 파이어볼 내부의 압력을 계속해서 감소시킨다. 앞서 재연소 효과를 고려한 폭발압력 이력의 해석결과에서의 불규칙적인 압력이력 형태도 여기서 관찰된 파이어볼 효과를 고려하면 쉽게 설명될 수 있다.



(a) $Z = 0.06 \text{ m/kg}^{1/3}$



(b) $Z = 0.08, 0.1, 0.2, 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$

Fig. 10. Overpressure Histories for Near-Field Detonations.

현재 방폭설계에서 폭발하중을 산정하기 위하여 일반적으로 사용되는 압력이력의 형태는 Fig. 10.(a)와 유사하게 충격파의 도달시 순간적으로 증가하는 압력과 뒤이어 대기압으로 서서히 감소하는 형태로 정의된다. 하지만 Fig. 10.(b)과 같이 근접폭발에서는 파이어볼의 영향으로 이상적인 폭발압력 형태와는 상당한 차이가 있다. 더욱이 파이어볼 효과로 인하여 충격파가 증가되는데 이는 구조물의 방폭설계에 있어서 매우 중요한 고려사항이 될 수 있다.

7. 결론

국내의 방폭설계는 대부분은 UFC 3-340-02의 설계법을 참고한다. 이 지침서는 근접폭발에 대하여 추측 및 유도된 값들을 제시하고 있지만, 실험 데이터 부족으로 검증이 되지 않았을 뿐더러 근접폭발시 발생 가능한 여러 가지 주요 효과들에 대해서도 고려하지 않았다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 방폭설계에 고려되어야 하는 주요 근접폭발 효과인 저밀도파, 재연소, 폭발물의 팽창효과(또는 파이어볼)등이 폭발압력과 충격량에 미치는 영향에 대한 연구를 CFD해석을 통하여 수행하였으며 재연소 효과에 대한 모델

링 기법을 제안하였다.

폭발시 매우 근접한 거리에서는 압력변환기가 파이어볼 내부($Z=0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$)의 고온에서 작동하지 않기 때문에 환산 거리에 따른 온도변화를 고려하여 실험에서 사용될 압력변환기가 결정되어야 한다. 파이어볼 내부의 온도는 1,000K 이상으로 대부분의 압력변환기를 사용할 수 없는 환경이다.

구속된 환경에서의 대부분의 폭발물들은 폭발시 팽창하면서 주위의 산소와 결합하여 재연소 효과를 일으킨다. CFD 해석에서는 화학적 효과를 구현할 수 없기 때문에 이를 열역학적 모델링에 도입하기 위한 모델링 기법이 제시되었다. 재연소 효과는 추가 에너지를 발생시켜 근거리 압력 및 충격량을 증가시키므로 근접폭발에 대한 폭발하중 산정시 반드시 고려되어야 한다. 또한, 고폭탄물에 따라 폭발 후 재연소 가능한 연료의 양이 다르기 때문에 폭발물의 종류에 따른 재연소 효과가 고려되어야 한다. TNT 환산거리 $Z=0.176 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 경우 재연소 효과는 충격량을 최대 1.5배까지 증가시켰다.

폭발 초기 근접 관측지점에서 최초 충격파에 의하여 1차 압력증가가 이루어지고 뒤이어 따라오는 팽창하는 폭발물(파이어볼)에 의하여 2차 압력증가가 이루어진다. 매우 근접한 거리에서는 팽창 폭발물에 의한 2차 압력증가가 1차 압력증가보다 클 수 있으며 2차 압력증가로 인하여 충격량의 증가를 발생시킨다. 본 연구에서 고려된 근접환산거리 $Z = 0.08 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 경우 2차 압력은 1차 압력에 비해 1.5배 가량 크다.

현재 국내외적으로 근접폭발에 대한 설계기준이 정립되지 않은 상황에서 본 연구에서 관찰된 근접폭발 효과들은 근접거리에서의 폭발하중에 대한 합리적인 예측을 가능하게 하고, 추후 근접폭발 범위에 대한 방폭설계기준을 세우는데 일조할 것으로 기대된다.

References

- ANSYS. 2013. AUTODYN User's Manual Version 15.0. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA.
- Biggs, J. M. 1964. *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw-Hill, NY.
- Cullis, I. G. and Huntington-Thresher, W. 2007. Blast structure interaction and the role of secondary combustion. *Proceedings, 23rd International Symposium on Ballistics*, Tarragona, Spain.
- Dobratz, B. M. and Crawford, P. C. 1985. LLNL Explosive Handbook, Properties of chemical explosives and explosive simulants. Report UCRL-52997, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- DoD. 2013. Unified Facilities Criteria (UFC): Design of Buildings to Resist Progressive Collapse (UFC

- 4-023-03). Departments of Defense, Washington, DC.
- Donahue, L. K. 2008. Afterburning of TNT detonation in air. *M.A.Sc. Thesis*. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia.
- Hyde, D. W. 1992. ConWep: Conventional Weapons Effects (Application of TM 5-855-1). US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Kingery, C. N. and Bulmash, G. 1984. Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst. Report ARBRL-TR-02555, US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.
- McNesby, K. L., Homan, B. E., Ritter, J. J., Quine, Z., Ehlers, R. Z. and McAndrew, B. A. 2010. Afterburn ignition delay and shock augmentation in fuel rich solid explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 35 (1): 57-65.
- Norris, C. H., Hansen, R. J., Holley, JR. M. J., Biggs, J. M., Namyet, S. and Minami, J. K. 1959. *Structural Design for Dynamic Loads*. McGraw-Hill, New York; Toronto; London.
- Shin, J., Whittaker, A. S., Aref, A. J., and Cormie, D. "Air blast effects on civil structures." Technical Report MCEER 14-0006, University at Buffalo, Buffalo, New York, December 2014.
- Souers, P. C., Forbes, J. W., Fried, L. E., Howard, W. M., Anderson, S., Dawson, S., Vitello, P. and Garza, R. 2001. Detonation energies from the cylinder test and CHEETAH V3.0. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 26 (4): 180-190.

<i>Received</i>	■	August 22, 2016
<i>Revised</i>	■	August 24, 2016
<i>Accepted</i>	■	October 11, 2016