

자유공중폭발에 의한 폭발압력과 충격량에 대한 수치해석

신진원¹ · 이경구^{2*}

¹연구교수, 단국대학교, 건축공학과, ²부교수, 단국대학교, 건축공학과

A Numerical Analysis for Blast Pressure and Impulse from Free-Air Burst

Shin, Jinwon¹, Lee, Kyungkoo^{2*}

¹Research Professor, Dept. of Architectural Engineering, Dankook University, Youngin, 16890, Korea

²Associate Professor, Dept. of Architectural Engineering, Dankook University, Youngin, 16890, Korea

Abstract - The need to accurate quantification of blast pressure loading in the near field is important because the focus of security design of critical infrastructure, buildings and bridges is for near-field detonations. Incident and reflected pressures for near-field detonations are very difficult to be measured by commercially available pressure transducers due to the high pressure and temperature, which requires a verified and validated computational fluid dynamics code to reasonably predict the near-field pressures and impulses. This paper presents numerical studies to verify and validate a CFD code for calculations of incident and reflected overpressures and impulses. The near field is emphasized and recommendations for mesh sizes to optimally simulate the near-field detonation are provided.

Keywords - Computational fluid dynamics, Near-field detonation, Verification, Validation, Numerical analysis

1. 서론

빌딩, 교량, 중요기반시설들에 대한 방폭 설계에 있어서 주 관심사는 근접 거리에서의 폭발에 대한 안전 설계이기 때문에 그 폭발 하중을 정확하게 예측하려는 노력이 절실하다. 현재 방폭설계기준으로 전세계적으로 미국방부문서인 UFC 3-340-02^[1]을 채택하고 있다. 국내에서도 일부 수행된 방폭설계 관련 연구들^[2]도 대부분 이 문서를 참조하고 있으며 기준은 전무한 상태이다.

UFC 3-340-02에서 제시하는 폭발하중 설계 차트들은 수많은 실험데이터를 근거로 개발되었다^[3]. 이 설계차트들은 원거리에서 대해서는 검증된 데이터를 제공하고 있으나 근접거리에서 대하여는 실험데이터 부족으로 검증이 되지 않았

으며 제공되는 폭발압력 및 충격량 등의 폭발압력 변수들은 추측되거나 유도된 값들이 대부분이다. 차트들이 작은 환산 거리, $Z(= R/W^{1/3}$, 여기서 R = 폭발중심으로부터의 거리, W = 폭발물의 무게)에서의 입사 및 반사 초과압력 및 충격량을 제대로 예측하지 못할뿐더러, 초과압력 이력에 대한 초기 폭발물의 팽창효과를 설명하지 못하기 때문에^{[4],[5]} 이에 대한 재평가가 요구된다. 근접폭발의 실험적 검증이 어려운 이유 중 하나는 현재 사용 가능한 압력변환기로는 파이어볼 내부의 높은 압력과 온도로 인하여 직접적인 측정이 힘들기 때문이다^[5].

대신에 최근 십년간의 컴퓨터 기술의 급속한 발전은 복잡한 폭발현상에 대한 정밀한 수치해석을 가능하게 하였으며 검증된 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 코드는 근접 거리에서의 폭발효과를 설명하고 그 폭발 압력 이력을 예측하는데 사용 될 수 있다^[6].

본 연구의 목적은 구형 고폭탄물의 폭발에 대한 수치해석 모델링을 검토하고 근접 거리에서의 그 폭발 효과를 특징지음으로써 근접폭발하중에 대한 구조물의 응답을 보다 합리적으로 예측하는 것이다. 여기서 근접거리는 폭발물 반경의

Note.-Discussion open until February 28, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 31, 2016; revised July 5, 2016; approved on July 13, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-8005-3742 Fax. +82-31-8021-7225

E-mail. kkleee@dankook.ac.kr

대략 10배, 혹은 환산거리, Z , 가 $0.4m/kg^{1/3}$ 이내를 말한다. 여기서 Z 는 폭발의 중심으로부터 거리, R , 나누기 폭발물의 무게, W 의 3분의1승이다. 이 지역에서 충격파는 재연소(afterburning) 및 폭발물의 팽창을 포함한 근접폭발효과에 영향을 받는다.

폭발물로는 TNT가 사용되었고, 폭발 해석은 CFD 코드인 AUTODYN^[7]를 사용하여 수행되었다. 폭발 해석에 대한 CFD 코드의 정확도를 보여주기 위하여 AUTODYN은 확인(verification)되고 검증(validation)된다. 확인은 해석모델이 수학적인 모델이나 그 결과 값들을 잘 구현했는지 확인하는 작업이다. 다른 코드들의 결과 값을 비교하는 것 또한 이에 해당된다. 검증은 해석모델이 어느 정도 실제와 비슷한 지 증명하는 작업이며 주로 실험을 통해서 이루어진다. 확인(verification)과 검증(validation)에 대한 정의는 ASME^[8]에 자세히 기술되어 있다.

AUTODYN은 근거리와 중간거리에 대해서 Needham^[4]의 1차원 수치해석결과를 사용하여 확인되었고, 원거리에서는 LS-DYNA 및 CTH의 결과와 비교함으로써 확인되었다. 이 해석을 위한 폭발물로는 TNT가 사용되었다. 이 코드의 검증을 위하여 Goodman^[9]과 Huffington and Ewing^[10]의 근거리에서 측정된 구형 Pentolite의 폭발에 대한 반사 충격량의 실험값들과 Frost et al.^[11]의 원거리에서 측정된 구형 C4의 폭발에 대한 반사 최대 초과압력의 실험값들이 사용되었다. 검증을 위하여 TNT가 아닌 Pentolite에 대한 실험데이터가 사용된 이유 중 하나는 공개된 연구문헌 중에는 TNT의 근접폭발에 대한 정보가 부족했기 때문이다. Frost et al.의 실험은 근래에 최신장비를 사용하여 수행되었으며 1980년대 이전에 수행되었던 실험에 비하여 상대적으로 정확한 실험결과의 예측을 가능하게 하기때문에 채택되었다. CFD 해석에 있어서는 최적의 메쉬크기를 찾기 위한 메쉬 민감도 연구 또한 수행되었다.

2. 폭발 모델

폭발의 모델링을 위하여 AUTODYN^[7]을 사용하여 구형 TNT 폭발물의 공중 폭발에 대하여 해석하였다. AUTODYN은 폭발 및 충돌 해석 전문 CFD 코드이며 지배보존식을 전산화 하기 위하여 유한체적법(FVM), 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM) 등을 사용한다.

전산유체해석에서 유체의 부피, 밀도 등에 따른 압력의 변화를 정의하기 위하여 Equation of State(EOS)가 사용된다. TNT의 해석에 사용되는 EOS로는 Becker-Kistiakowsky-Wilson(BKW), Kihara-Hikita-Tanaka(KHT), Lennard-Jones-Devonshire(LJD), and Jones-Wilkins-Lee(JWL) 등이 있으며 사용의 편의성과 해석의 정확도를 고려하여 가장 널리 활용되는 JWL EOS이 채택되었으며 공기는 이상기체로 모델링되었다. 폭발 후 재연소(afterburning) 효과는 고려되지 않았는데, 구속이 없는 폭발의 경우 폭발물의 남은 연료가 폭발 후 주변의 산소와 잘 결합하지 않기 때문이다^[12]. JWL 및 이상기체 EOS는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 p = 폭발압력, V = 상대부피(= ρ_0/ρ), ρ_0 = 폭발물의 폭발 전 밀도, ρ = 폭발 후 현재 밀도, E = 폭발물의 내부에너지, A, B, R_1, R_2, w = 상태식 계수들이다. JWL EOS의 계수들은 Dobratz and Crawford^[13]에서 주어진 값을 사용하였다(Table 1 참조). 공기는 이상기체로 모델링 되며, EOS는 다음과 같다.

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (2)$$

여기서 p = 공기압력, γ = 비열비(specific heat ratio), V = 상대부피(= ρ_0/ρ), ρ_0 = 공기의 최초 밀도, ρ = 공기의 현재 밀도, E = 공기의 내부에너지이다. 이상기체 EOS의 값들

Table 1. JWL EOS parameters for TNT

Parameter	Value
Density, $\rho_0(\text{kg/m}^3)$	1630
$A(\text{GPa})$	371.2
$B(\text{GPa})$	3.231
R_1	4.15
R_2	0.95
Detonation velocity, $D(\text{m/s})$	6930
Adiabatic constant, w	0.30
Internal Energy, $E(\text{MPa})$	7,000
CJ pressure(GPa)	21

Table 2. Ideal gas EOS parameters

Parameter	Value
Density, $\rho_0(\text{kg/m}^3)$	1.225
γ	1.4
Internal Energy, $E(\text{MPa})$	0.25

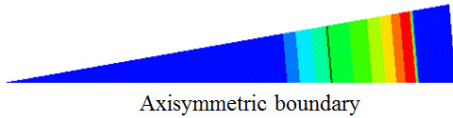


Fig. 1. 1D CFD analysis using AUTODYN

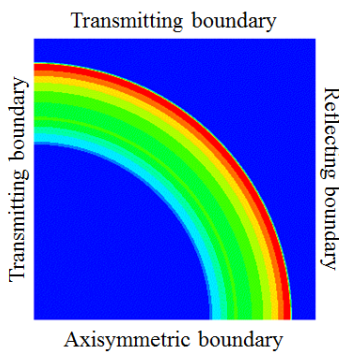


Fig. 2. 2D CFD analysis using AUTODYN

은 Table 2와 같다.

입사 초과압력과 충격량의 시뮬레이션은 Fig. 1과 같이 축대칭을 사용한 1차원(1D)의 도메인에서 수행된다. 반사 초과압력과 충격량은 Fig. 2와 같이 2차원(2D)에서 시뮬레이션 된다. 여기서 2D 해석에 있어서, 전산 비용을 최소화하기 위하여 충격파가 반사되기 전까지의 1D 결과를 2D로 재배치(mapping)하여 사용한다.

현재 UFC 3-340-02 등의 방폭설계기준에서는 표준 해석법으로 등가단자유도 동적해석법을 채택하고 있다^{[14],[2]}. 폭발해석모델에 대하여 규정하고 있는 사항은 없으나 기준에서 제시하는 폭발압력 및 충격량 등의 폭발변수들에 대한 경험적 차트를 활용하여 평가가 가능하다.

3. 폭발 CFD 모델의 확인과 검증

CFD 코드를 이용한 수치해석의 신뢰성을 높이기 위하여 사용된 폭발 모델에 대한 확인(verification)과 검증(validation)이 이루어져야 한다.

AUTODYN을 사용한 CFD 폭발 모델을 확인(verification)하기 위하여 근거리 폭발에 대하여 Needham(2010)의 수치 해석결과를 사용하였고, 원거리에 대하여 LS-DYNA와 CTH를 사용한 해석결과(Brownig et al., 2013)를 사용하였다. CFD 폭발 모델을 확인(validation)하기 위하여 근거리에 대하여 Goodman^[9]과 Huffington and Ewing^[10]의 실험 데이터를 사용하였고, 원거리에 대하여 Frost et al.^[11]의 실험 데이터를 사용하였다.

3.1 근접 폭발 모델에 대한 확인

Needham^[4]은 반경 1400mm, 무게 18,000kg의 TNT 폭발에 대한 근거리 및 원거리에서의 수치해석결과를 보고하였다. 사용되었던 TNT의 밀도는 1570kg/m³이다. 이 해석은 라그랑지안 유한차분코드(Lagrangian finite difference code)를 사용하여 수행되었다. 폭발물은 LSZK EOS를 사용하여 모델링되었고, 공기는 Doan Nickel EOS를 사용하여 모델링 되었다^[4]. Needham은 폭발물의 반경의 1.1배, 2.4배, 2.6배, 4.5배, 11.7배, 26배 및 34배 거리에서 유체역학 변수들에 대한 결과를 보고하였다. 이는 각각 환산거리, Z , 0.058, 0.13, 0.14, 0.24, 0.62, 1.4 및 1.8m/kg^{1/3}에 상응한다. Needham의 해석결과는 근접폭발에 대한 CFD 코드의 확인(verification)을 위하여 사용되었다.

본 연구에서는 Needham의 1D 모델에 대하여 폭발물은 JWL EOS를, 공기에 대해서는 이상기체 EOS를 사용하여 해석이 수행되었다. TNT의 밀도는 LLNL 밀도인 1,630kg/m³이 사용되었다. 이는 Needham에 의해 가정된 밀도보다 4% 높다. LLNL밀도와 폭발물 반경 1.4m에 대한 폭발물의 무게는 18,735kg으로 Needham의 폭발물무게(= 18,000kg)와 큰 차이가 없다.

18,735kg의 구형 TNT의 폭발에 대하여 AUTODYN을 확인(verification)하기 위한 수치해석이 앞서 언급된, Needham에 의하여 사용된 7개의 환산거리에 대하여 수행되었다. 환산거리 $Z = 0.058$ 와 $0.13\text{m/kg}^{1/3}$ 에 대한 해석결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 거리 R에 따른 초과압력 p로 나타내었다. 수치해석결과의 수렴을 확인하기 위하여 4개의 요소 크기, 1, 5, 10 및 20mm가 사용되었다.

환산거리 $Z = 0.058\text{m/kg}^{1/3}$ 에서 모든 요소 크기에 대하여 해석결과는 Needham의 결과와 매우 유사하였다. Fig. 3에서 대략 $R = 1.3\text{m}$ 근처의 최대초과압력은 폭발 직후 저밀도파(rarefaction wave)가 폭발물의 표면으로부터 폭발의 중

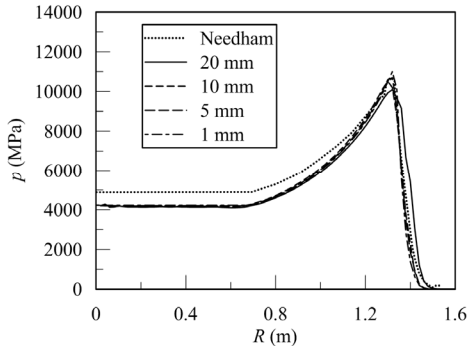


Fig. 3. Verification of CFD code for calculations of incident blast wave; $Z = 0.058\text{m/kg}^{1/3}$

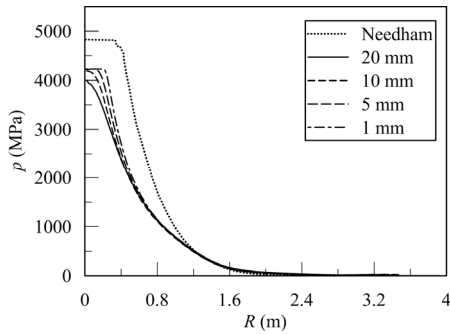


Fig. 4. Verification of CFD code for calculations of incident blast wave; $Z = 0.13\text{m/kg}^{1/3}$

심으로 진행하고 있음을 보여준다. 환산거리 $Z = 0.13\text{m/kg}^{1/3}$ 에서 역시 AUTODYN과 Needham의 결과와 유사하다. 저밀도파의 속도는 고려된 요소크기들에 대하여 AUTODYN에서 더 빠르지만 요소크기를 작게 할수록 Needham에 근접하는 것을 볼 수 있다. 저밀도파의 전면은 1mm의 요소크기에 대하여 폭발중심으로부터 350mm에 위치해 있다.

나머지 4개의 환산거리에 대해서도 AUTODYN과 Needham의 결과는 매우 유사하였다^[5]. 결과에서의 차이는 메쉬크기, 해석 알고리즘, 상태식 및 TNT 밀도의 선택 때문이다. 이 해석결과에 근거하여 AUTODYN은 근접폭발에 대한 1차원 해석에 있어서 확인(verification)되었다.

3.2 원거리 폭발 모델에 대한 확인

Browning 등^[15]은 LS-DYNA^{[16],[17]}와 CTH^[18]을 사용하여 환산거리, Z , 1.190, 1.587 및 $1.987\text{m/kg}^{1/3}$ (각각 3, 4, $5\text{ft/lb}^{1/3}$)에서의 $3,629\text{kg}(8,000\text{lb})$ TNT의 폭발에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 최대입사초과압력 및 입사충격량에 대한 Browning 등의 해석 결과를 AUTODYN으로 해석

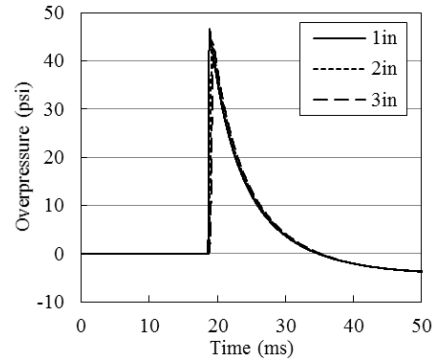


Fig. 5. Incident overpressure histories calculated using AUTODYN; $Z = 1.587\text{m/kg}^{1/3}$; $1\text{MPa} = 145\text{psi}$

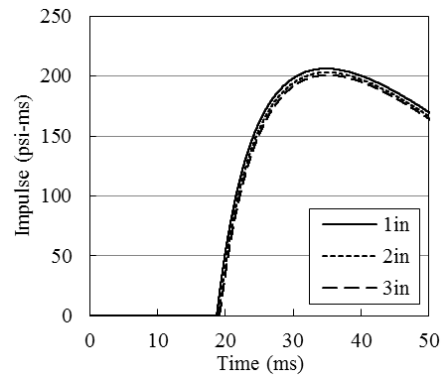


Fig. 6. Incident impulse histories calculated using AUTODYN; $Z = 1.587\text{m/kg}^{1/3}$; $1\text{MPa} = 145\text{psi}$

된 결과와 비교하였다. TNT의 모델링에 있어 Browning 등과 본 연구는 동일하게 JWL EOS를 사용하였으며, 변수들이 값 또한 본질적으로 차이가 없다(Table 1 참조).

Fig. 5와 Fig. 6은 $Z = 1.587\text{m/kg}^{1/3}(= 4\text{ft/lb}^{1/3})$ 에 대하여 메쉬크기 25.4, 50.8 및 76.2mm (각각, 1, 2 및 3in)를 사용한 입사초과압력과 충격량 시간이력에 대한 1차원 AUTODYN 해석결과이다. Browning 등이 US단위를 사용하여 결과를 보고하였기에 본 연구에서도 직접적인 결과비교를 위하여 US단위를 사용하였으며, 대신에 SI단위로 변환하기 위한 계수를 제공하였다. 계산된 입사초과압력 및 충격량 시간이력 모두 메쉬크기와 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다($Z = 1.190$ 및 $1.987\text{m/kg}^{1/3}$ 에 대해서는 Shin 등^[5] 참조).

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 입사초과압력과 충격량에 대하여 AUTODYN, LS-DYNA 및 CTH의 결과를 비교하였고 두 결과 모두 눈에 띄만한 차이는 없었다. 발생된 작은 차이들은 코드별로 다른 알고리즘의 사용으로 기인된 것으로 생각된다.

Browning 등에 의해 수행된 LS-DYNA 및 CTH의 폭발

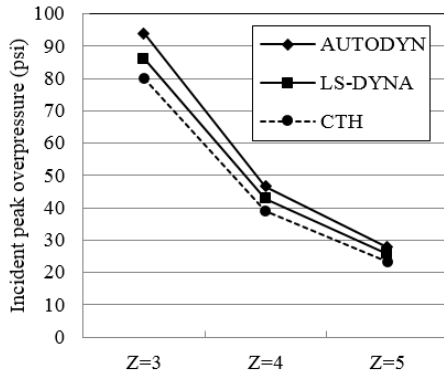


Fig. 7. Comparison of AUTODYN, LS-DYNA and CTH for peak incident overpressure; 1MPa = 145psi

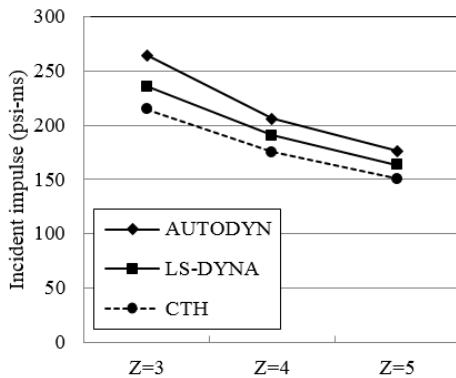


Fig. 8. Comparison of AUTODYN, LS-DYNA and CTH for incident impulse; 1MPa = 145psi

해석결과와 본 연구에서 수행된 AUTODYN의 해석결과와 비교함으로써 원거리 폭발로부터 발생된 압력과 충격량에 대한 CFD 폭발모델이 확인(verification)되었다.

3.3 근접 폭발 모델에 대한 검증

근접폭발에 대한 반사초과압력과 충격량의 해석에 대하여 AUTODYN을 검증(validation)하기 위한 2차원 수치해석이 수행되었다. 이 검증에는 구형 50/50 Pentolite의 폭발에 대하여 Goodman^[9]과 Huffington과 Ewing^[10]에 의해 실험적으로 보고된 수직반사환산충격량의 측정된 값을 사용하였다(TNT의 근접폭발에 대하여 실험적 데이터는 공개된 문헌에서는 찾기 힘들다.). Goodman은 구형 50/50 Pentolite의 공중폭발에 대한 입사 및 수직반사 초과압력과 충격량에 대한 시험데이터를 보고하였다. 환산거리 $Z < 0.4\text{m/kg}^{1/3}$ 의 범위에서는 입사충격량과 수직반사초과압력에 대한 데이터는 보고되지 않았다. 입사최대초과압력에 대한 근거리 데이

터는 보고되었는데, 이 직접적으로 측정된 값은 아니지만 충격과 속도에 대한 광학적 측정으로부터 간접적으로 유도되거나 추측된 값들이다. 수직반사충격량의 데이터는 임펄스 플러그(Impulse Plug)를 사용하여 측정된 값이다^[10]. 이러한 Goodman에 의해 수집된 실험데이터를 바탕으로 $Z = 0.08, 0.12, 0.16$ 및 $0.20\text{m/kg}^{1/3}$ 에 대한 수직반사충격량에 대하여 근접폭발에 대한 AUTODYN의 예측이 검증되었다.

Huffington과 Ewing은 환산거리 $Z = 0.06$ 과 $0.20\text{m/kg}^{1/3}$ 의 범위에서의 구형 50/50 Pentolite 폭발에 대한 57개의 실험으로부터 측정된 수직반사충격량에 대한 실험결과를 보고하였다. 이 실험들에 사용된 폭발물의 중량은 0.227, 0.454 및 0.907kg이다. Huffington과 Ewing은 환산거리 $Z = 0.08, 0.12, 0.16$ 및 $0.20\text{m/kg}^{1/3}$ 에 대하여 각각 13, 16, 15 및 10 실험결과를 보고하였다.

Pentolite는 JWL EOS를 사용하여 AUTODYN에서 모델링되었고, 공기는 이상기체를 사용하였다. 사용된 Pentolite의 밀도는 $1,700\text{m/kg}^{1/3}$ 이다. 50/50 Pentolite에 대한 JWL EOS 변수들의 값은 Dobratz와 Crawford^[13]에서 보고된 값들이다(Table 3 참조).

1kg Pentolite에 대한 1차원 해석이 AUTODYN을 사용하여 수행되었고, 해석은 충격파가 반사경계 도달하기 직전까지 진행되었다. 메쉬크기에 영향을 받지 않는 결과를 얻기 위하여 4개의 메쉬크기(0.06, 0.12, 0.24, 및 0.48mm)가 사용되었다. 이 메쉬크기들은 정확한 폭발물의 무게(= 1kg)와 각각 0.13%, 0.13%, 1.0% 및 1.0% 차이가 나지만 이 차이는 해석결과에 미미한 효과를 가져올 것으로 사료된다. 메쉬크기 0.06mm를 사용하여 계산된 1차원 해석결과는 0.24, 0.48 및 0.96mm의 메쉬크기를 갖는 2차원 도메인으로 재배치(mapping)되었다. 2차원 도메인은 $R \times R$ 의 크기를 갖는

Table 3. JWL EOS parameters for 50/50 Pentolite

Parameter	Value
Density, $\rho_0(\text{kg/m}^3)$	1,700
$A(\text{GPa})$	540.94
$B(\text{GPa})$	9.3726
R_1	4.5
R_2	1.1
Detonation velocity, $D(\text{m/s})$	7530
Adiabatic constant, w	0.35
Internal Energy, $E(\text{MPa})$	8,100
CJ pressure(GPa)	25.5

다(Fig. 2 참조). 여기서 R 은 폭발의 중심으로부터 반사경계까지의 거리이다. 아래쪽 수평경계는 축대칭(axial symmetry)이다. 왼쪽수직경계 및 위쪽수평경계는 전달경계로 정의된다. 오른쪽수직경계는 완전반사면이다. 폭발시 충격파는 폭발중심으로부터 방사형으로 진행하기 때문에 왼쪽전달경계로부터의 에너지 손실은 거의 없다. 2차원 도메인에서 압력의 관측지점은 오른쪽완전반사경계상의 $(x, y) = (R, 0)$ 이다.

환산거리 $Z = 0.12\text{m/kg}^{1/3}$ 에서 1kg Pentolite에 대하여 계산된 입사초과압력 및 입사충격량 시간이력은 각각 Fig. 9 및 10과 같으며 해석결과는 0.06mm의 메쉬크기에 대하여 1차원 해석결과가 수렴했음을 보여준다. 반사초과압력과 반사충격량 시간이력에 대한 2차원 해석결과도 이와 유사하다(Fig. 11 및 12 참조). 또한 비슷한 해석결과가 환산거리 $Z = 0.08, 0.16$ 및 $0.20\text{m/kg}^{1/3}$ 에 대하여도 관측되었다^[5].

고려된 4개의 환산거리에 대하여 AUTODYN을 사용하여 계산되고 수렴된 수직반사충격량의 값과 Goodman 및

Huffington과 Ewing의 실험값들과의 비교는 Fig. 13과 같다. 모든 환산거리에 대하여 AUTODYN의 해석값들은 근접거리에서 측정된 값들과 매우 유사하였다. 따라서, AUTODYN은 근접폭발에 대한 2차원 해석에 있어서 검증(validation)

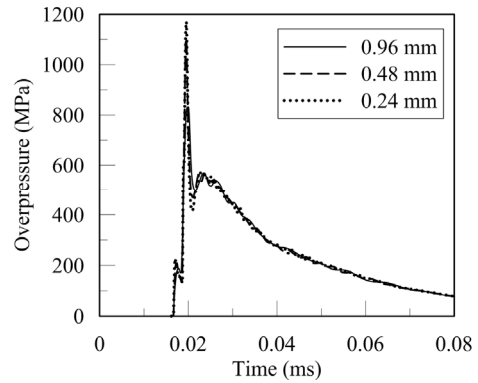


Fig. 11. Reflected overpressure histories calculated using AUTODYN for detonation of 50/50 Pentolite of 1kg at $Z = 0.12\text{m/kg}^{1/3}$

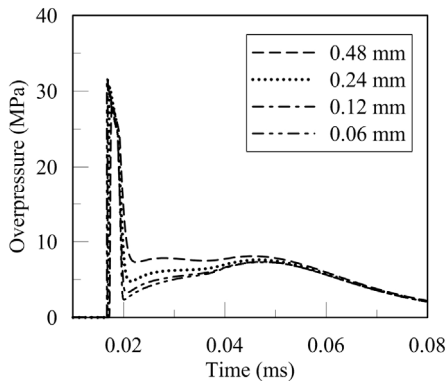


Fig. 9. Incident overpressure histories calculated using AUTODYN for detonation of 50/50 Pentolite of 1kg at $Z = 0.12\text{m/kg}^{1/3}$

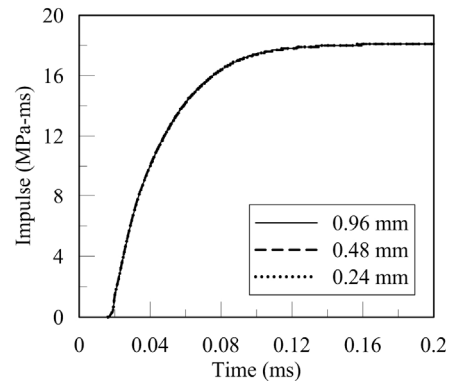


Fig. 12. Reflected impulse histories calculated using AUTODYN for detonation of 50/50 Pentolite of 1kg at $Z = 0.12\text{m/kg}^{1/3}$

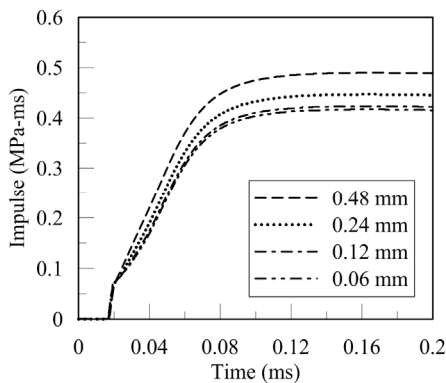


Fig. 10. Incident impulse histories calculated using AUTODYN for detonation of 50/50 Pentolite of 1kg at $Z = 0.12\text{m/kg}^{1/3}$

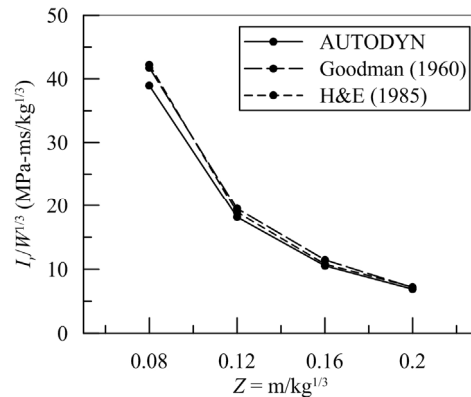


Fig. 13. Validation of AUTODYN for calculations of normally reflected scaled impulse

되었다고 사료된다.

3.4 원거리 폭발 모델에 대한 확인

원거리에서의 반사초과압력과 충격량에 대한 해석에 있어서 CFD코드를 검증(validation)하기 위한 2차원 수치해석이 수행되었다. 이 검증은 구형 C4의 폭발에 대한 Frost 등에 의해 보고된 수직반사초과압력과 충격량에 대한 측정값들을 사용하였다. Frost 등은 폭발물의 중심으로부터 1.2m 떨어진 1kg 및 0.5kg의 구형 C4의 폭발에 대한 반사초과압력과 충격량에 대한 실험결과를 보고하였다. 사용된 환산거리 $Z = 1.2$ 및 $1.51\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 에 대한 AUTODYN 해석과 Frost 등에 의한 실험값들이 비교 및 검토되었다.

C4에 대한 JWL EOS 변수들은 Dobratz와 Crawford^[13]에 의해 보고된 값들이다(Table 4 참조). AUTODYN의 모델링 기법 및 메쉬 민감도 해석은 앞서 기술된 근접폭발에 대한 해석과 유사하게 수행되었다. 1차원 해석에서는 1mm 및 0.5mm의 메쉬크기가 사용되었고, 2차원 해석에서는 1.2mm 및 2.4mm의 메쉬크기가 사용되었다.

반사최대초과압력과 반사충격량에 대한 AUTODYN의 해석결과와 Frost 등의 실험결과와의 비교는 각각 Fig. 14 및 15와 같다. 환산거리 $1.51\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 에 대하여 계산된 반사최대초과압력은 Frost 등의 결과보다 다소(32%) 작지만, 환산거리 $1.2\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 의 해석결과는 Frost 등의 결과에 매우 근접하였다(Fig. 14 참조). 더욱이, 반사충격량에 대해서는 해석값과 실험값이 환산거리 둘 다에 대하여 매우 유사하였다(Fig. 15 참조). 따라서, 원거리 폭발에 대한 반사초과압력과 충격량에 대한 2차원 해석에 대하여 AUTODYN이 검증되었다고 사료된다.

Table 4. JWL EOS parameters for C4

Parameter	Value
Density, $\rho_0(\text{kg}/\text{m}^3)$	1,601
$A(\text{GPa})$	609.77
$B(\text{GPa})$	12.95
R_1	4.5
R_2	1.4
Detonation velocity, $D(\text{m}/\text{s})$	8193
Adiabatic constant, w	0.25
Internal Energy, $E(\text{MPa})$	9,000
CJ pressure(GPa)	28

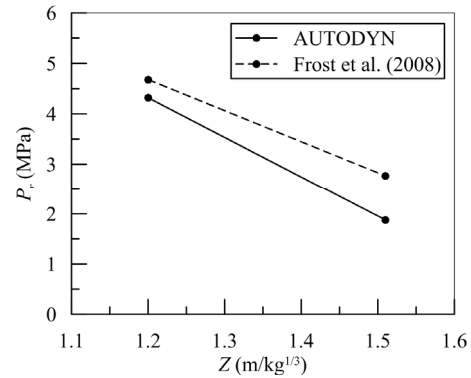


Fig. 14. Validation of CFD code for calculations of normally reflected peak overpressure

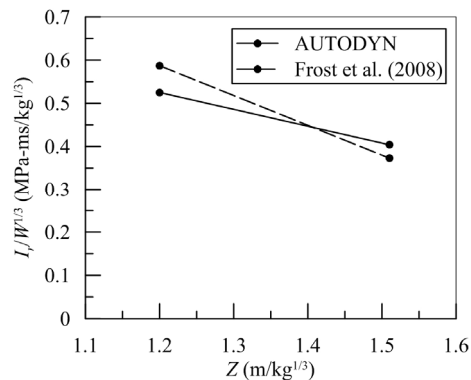


Fig. 15. Validation of CFD code for calculations of reflected impulse

4. 메쉬 민감도 연구

CFD해석에 있어서 적절한 메쉬의 사용은 수치해석의 이상적인 결과를 얻기 위한 필수 과정이다. TNT 근접 폭발에 대한 축대칭을 사용한 일련의 1차원 해석이 AUTODYN을 사용하여 수행되었다. 사용된 TNT의 중량은 22.68kg(50lb)인데, 이는 구조물의 안전설계에 있어서 고려되는 전형적으로 손으로 운반이 가능한 폭발물 무게이다. 이에 대한 폭발물의 반경은 149mm이며 밀도는 고려된 폭발물의 중량을 구현하기 위하여 $1,636\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 정의되었다. TNT는 JWL EOS를 사용하여 모델링 되었고, 공기는 이상기체로 모델링 되었다.

TNT 폭발로부터 발생된 근접거리의 초과압력과 충격량 시간이력에 대한 메쉬 민감도 연구를 위하여 3개의 매우 작은 메쉬크기인 1, 0.5 및 0.25mm가 사용되었다. 근접거리는 $Z < 0.4\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 으로 정의되었으며, 사용된 환산거리는 Z

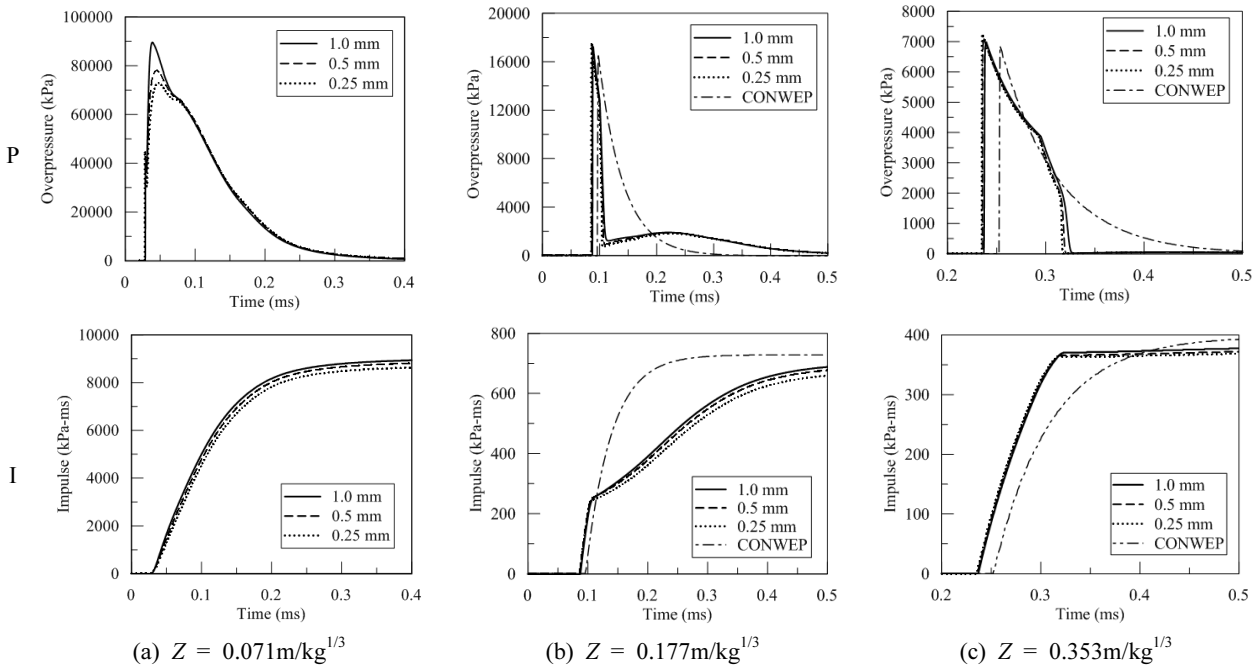


Fig. 16. Overpressure and impulse histories for a spherical charge of TNT of 22.68kg

= 0.071, 0.177 및 0.353m/kg^{1/3}이다. 결과는 Fig. 16과 같으며 $Z > 0.147\text{m/kg}^{1/3}$ 의 범위의 결과에 대해서는 방폭설계에 있어 폭발하중산정에 종종 사용되는 CONWEP^[19]의 결과와 비교하였다. CONWEP은 $Z < 0.147\text{m/kg}^{1/3}$ 의 범위의 환산거리에 대해서는 압력 및 충격량 시간이력 데이터를 제공하지 않는다. CONWEP의 데이터는 LS-DYNA에 의하여 제공되었다.

환산거리 $Z = 0.071, 0.177$ 및 $0.353\text{m/kg}^{1/3}$ 에서의 초과압력 시간이력에 대하여 각각 0.5, 1 및 1mm의 메쉬크기에 대하여 수립된 결과가 얻어졌으며, 이는 각각 $R/400, R/500$ 및 $R/1000$ 에 상응한다. 여기서 R은 폭발의 중심으로부터 관측지점까지의 거리이다. 충격량 시간이력은 고려된 모든 메쉬크기들에 대하여 수립하였다.

환산거리 $Z = 0.177$ 및 $0.353\text{m/kg}^{1/3}$ 에 대해서 CONWEP의 예측치들과 비교해 본 결과, CONWEP과 CFD 해석으로부터의 초과압력 시간이력들의 폭발과 도달시간, 최대초과압력 및 최대충격량의 값들은 매우 유사하였다. 압력과 충격량 시간이력의 형상은 상당한 차이를 보이기도 하였는데, 이는 초기에 팽창하는 폭발물의 물리적인 영향으로 기인한 것이다^[5]. 폭발초기에 폭발물들은 대략 $Z = 0.8\text{m/kg}^{1/3}$ 까지 팽창하여 압력과 충격량에 영향을 준다. 그럼에도 불구하고 충격하중을 받는 구조물의 응답은 주로 초과압력 시간이력

의 모양이 아닌 최대초과압력과 충격량에 영향을 받기 때문에 AUTODYN과 CONWEP의 데이터는 구조물에 매우 유사한 응답을 이끌어 낼 것으로 기대된다^{[20],[21]}. 환산거리 $Z = 0.177\text{m/kg}^{1/3}$ 에서의 초과압력 시간이력에서 대략 $t = 0.09\text{ms}$ 에서의 1차 압력증가는 폭발 충격파가 도달하여 발생된 것이고, 대략 $t = 0.13\sim 0.4\text{ms}$ 근처의 2차 압력증가는 폭발초기 충격파가 폭발물의 표면을 통과하는 동시에 폭발의 중심으로 향하는 저밀도파(rarefaction wave)의 영향 때문에 발생된 것이다. 환산거리 $Z = 0.071\text{m/kg}^{1/3}$ 에서는 폭발물의 표면에 매우 근접하여 이 근접폭발 효과가 명확히 관찰되지 않으며, 환산거리 $Z = 0.353\text{m/kg}^{1/3}$ 에서는 이 효과가 사라졌음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 AUTODYN을 사용한 CFD 해석을 통하여 근접 및 원거리 공중폭발모델을 확인(verification)하고 검증(validation)하였다. AUTODYN은 Needham^[4]에 의해 계산된 유체역학변수들, 원거리 폭발에 대하여 CTH와 LS_DYNA를 사용하여 얻어진 입사초과압력 및 충격량, 근접 폭발에 대하여 Goodman^[9] 및 Huffington과 Ewing^[10]

에 의해 측정된 반사충격량, 그리고 원거리 폭발부터의 수직 반사초과압력 및 충격량에 대한 Frost 등의 측정값들과 유사한 예측값들을 제시하였다.

또한 폭발압력 및 충격량에 대한 메쉬 민감도 연구를 통하여 근접폭발에 대한 수치해석시 $R/1000$ 보다 작은 메쉬를 사용하였을 경우 수렴된 결과가 얻어지는 것으로 확인되었다. 여기서 사용된 해석결과는 최대초과압력 및 충격량에 대하여 방폭설계에서 폭발하중을 산정하는데 일반적으로 사용되는 CONWEP 하중과 비교함으로써 검증되었다.

폭발하중에 대한 구조물의 안전설계에 있어서의 주요 관심사는 근접거리인 반면, 기존의 폭발하중산정 설계차트들은 근접거리에 대하여 검증되지 않은 불확실한 추측성 데이터를 제시하고 있다. 더욱이, 차트들은 근접거리에서의 폭발과 이외의 파이어볼 효과 등의 근접폭발효과를 고려하지 않았기 때문에 저평가된 폭발하중을 제시할 수 있어 본 연구에서 수행된 검증된 수치해석 기법은 실제 근접폭발에 대한 구조물의 응답을 보다 정확하게 예측하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌(References)

[1] DoD (2013) *Unified Facilities Criteria (UFC): Design of Buildings to Resist Progressive Collapse (UFC 4-023-03)*. Departments of Defense, Washington, DC.

[2] 이경구, 이문창(2015) 강재압축재의 방폭성능에 대한 중력하중효과의 해석적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제3호, pp.273-280.
Lee, K. and Lee, M. (2015) Analytical Study on Effects of Gravity Load on Blast Resistance of Steel Compressive Members, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.3, pp.273-280.

[3] 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.

[4] Needham, C.E. (2010) *Blast Waves*. Springer, NY.

[5] Shin, J., Whittaker, A.S., Aref, A.J., and Cormie, D. (2014) "Air Blast Effects on Civil Structures." *Technical Report MCEER 14-0006*, University at Buffalo, Buffalo, New York, December.

[6] Sherkar, P., Whittaker, A.S., and Aref, A.J. (2010). "Modeling the Effects of Detonations of High Explosives to Inform Blast-Resistant Design." *Technical Report MCEER-10-0009*, The State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.

[7] ANSYS (2013) *AUTODYN User's Manual Version 15.0*. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA.

[8] ASME (2006) Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics. *ASME V & V 10-2006*, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.

[9] Goodman, H.J. (1960) Compiled Free-Air Blast Data on Bare Spherical Pentolite. *BRL Report No. 1092*, US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.

[10] Huffington, Jr., N.J. and Ewing, W.O. (1985). Reflected Impulse Near Spherical Charges. *Technical Report BRL-TR-2678*, US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.

[11] Frost, D.L., Cairns, M., Goroshin, S., Leadbetter, J., Ripley, R., and Zhang, F. (2008) Reflected Heterogeneous Blast. *Proceedings, 20th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock*, Oslo, Norway.

[12] 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*, Vol.35, No.1, pp. 57-65.

[13] 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.

[14] 김나은, 이철호, 김성용(2015) 고진동수 계단의 진동응답 산정을 위한 등가임펄스 산정식 제안, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제2호, pp.181-193.
Kim, N., Lee, C., and Kim, S. (2015) Formula for Equivalent Impulsive Force to Predict Vibrational Response of High-Frequency Staircases, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.181-193.

[15] Browning, R., Cormie, D., Shin, J., and Whittaker, A.S. (2014) "Computational Fluid Dynamics Predictions of Blast Loads." *Proceedings, Structures Congress 2014 -ASCE*. Boston, MA, April.

[16] LSTC (2013) LS-DYNA Keyword User's Manual Ver. R7.0. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.

[17] 김규동, 노명현, 이재익, 이상열(2016) 고속 변형률 속도를 고려한 폭발하중을 받는 보강형 방폭벽 구조의 동적 특성, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제2호,

pp.65-74.

Kim, G., Noh, M., Lee, J., and Lee, S. (2016) Dynamic Characteristics Stiffened Blast-Wall Structures Subjected to Blast Loading Considering High Strain-Rate Effects, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.2, pp.65-74.

[18] McGlaun, J.M., Thompson, S.L., and Elrick, M.G. (1990) CTH: A Three-Dimensional Shock wave Physics Code. *International Journal of Impact Engineering*, Vol.10, No.1-4, pp.351-360.

[19] Hyde, D.W. (1992) *ConWep: Conventional Weapons Effects (Application of TM 5-855-1)*. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

[20] Smith, P.D. and Hetherington, J.G. (1994) *Blast and Ballistic Loading of Structures*. Butterworth-Heinemann, Oxford; Boston.

[21] Dusenberry, D.O. (2010) ed. *Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings*. Wiley, Hoboken, NJ.

요 약 : 근접거리에서의 폭발하중의 정확한 정량화에 대한 요구는 주요기반시설물, 빌딩 및 교량의 안전설계가 근접폭발에 대한 것이라는 점에서 매우 중요하다. 근접폭발에 대한 입사 및 반사압력은 높은 압력과 온도로 인하여 사용가능한 압력변환기로는 직접적인 측정이 매우 힘들며, 이는 근접거리에서의 압력과 충격량에 대한 합당한 예측을 가능하게 하는 확인되고 검증된 전산유체역학코드를 필요로 한다. 본 논문은 입사 및 반사 초과압력 및 충격량의 산정에 대하여 CFD 코드를 확인하고 증명하기 위한 수치해석에 대하여 소개하였다. 연구는 근접거리에서 초점을 맞추어 수행되었으며, 근접폭발 시뮬레이션을 최적화하는 메쉬크기에 대해 대해서도 제안하였다.

핵심용어 : 전산유체역학, 근접폭발, 확인, 검증, 수치해석
