

2차로 마제형 터널 내 폭발 시 동적 거동 시뮬레이션

Dynamic behavior Simulation for Explosion in Two-lane Horseshoe Shaped Tunnel

심재원¹⁾ · 김낙영²⁾ · 이현승[†]

Jaewon Shim · Nagyoung Kim · Hyunseong Lee

Received: March 31st, 2020; Revised: April 13th, 2020; Accepted: April 28th, 2020

ABSTRACT : As the scale of the economy expands, the number of cases of damage in enclosed spaces such as tunnels is increasing due to the accident of transportation vehicles of dangerous substances such as explosive flammable materials that have increased rapidly. In the case of road tunnels in particular, in the aspect of protection against the long-winding trend and the environment in the downtown area, the number of cases of passing through the downtown area increases, and securing the safety of structures against unexpected extreme disasters such as explosions during tunnel passage is very urgent. For this reason, developed countries are already conducting a review of internal bombardment, but there are almost no evaluation and countermeasures for explosion risk in Korea. Therefore, in this study, in order to evaluate the explosion safety of road tunnels, a boiling liquid explosive explosion (BLEVE), which is considered to have the greatest explosion load among vehicles driving on the road, is set as a reference explosion source, and the equivalent TNT explosion load is used for simulation of the explosion. A method of conversion was presented. In addition, by applying the derived explosion load, dynamic behavior simulation was performed by assuming various variables for the tunnel, and the explosion safety of the tunnel was analyzed.

Keywords : Low explosive, TNT Equivalent weight, Impact load, Blast impulse

요지 : 경제규모가 확장됨에 따라 급격히 증가한 폭발성 인화물질과 같은 위험물질 운송차량 사고로 터널과 같이 폐쇄적인 공간에서 피해사례가 증가하고 있다. 특히 도로터널의 경우, 장대화 추세와 도심부 환경을 보호측면에서 도심부 통과사례가 증가하고 터널통과 중 폭발과 같은 예상치 못한 극한 재난에 대한 구조물의 안전 확보는 매우 시급하다. 이와 같은 이유로 선진국에서는 이미 내폭에 대한 검토를 수행하고 있지만, 국내에서는 폭발 위험도에 대한 평가 및 대응책이 거의 전무하다. 따라서 본 연구에서는 도로터널의 폭발 안전성을 평가하기 위하여 도로를 운행하는 차량 가운데 폭발 하중이 가장 크다고 판단되는 비등액체팽창증기폭발(BLEVE)을 기준 폭발원으로 정하고, 폭발 시뮬레이션을 위해 등가TNT 폭발하중으로 전환하는 방법을 제시하였다. 또한, 도출된 폭발하중을 적용하여 터널에 대하여 다양한 변수를 가정하여 동적거동 시뮬레이션을 수행하여 터널의 폭발 안전성을 분석하였다.

주요어 : 저성능 폭발물, TNT등가질량, 충격하중, 폭발충격

1. 서론

경제규모 확장과 더불어 화학 위험물질 수송 차량사고는 최근 약 10배 가까이 증가하였으며, 폭발성 인화물질 수송 차량사고 증가로 구조물 피해사례가 증가하고 있다. 특히 최근들어 도심지 환경보호를 위한 지하도로 건설이 증가하고 있어 위험물 탑재 차량에 화재 및 폭발이 발생할 경우에는 터널 붕괴와 같은 심각한 상황을 초래할 가능성도 증가하고 있다. 따라서 도로터널에 대한 안전을 확보하기 위하여 화재와 폭발사고의 위험수준을 도출하고 이를 기초로 한 적정 수준의 화재 및 폭발 안전대책방안이 필요하다. 터널

내 화재가 발생하는 경우에는 최근 미국, 유럽, 일본 등에서는 화재강도에 대한 실증 연구를 통하여 화재강도를 상향 조정하여 내화설계에 반영하고 있다. 우리나라의 경우, 한국도로공사(2015)에서 내화설계강도를 200MW로 하도록 제시한 바 있다. 그러나 터널 내 폭발의 경우에는 관련연구가 거의 전무한 상태이다. 따라서 터널물의 폭발사고에 대하여 선진국에서 수행한 폭발관련 연구를 참고하여 구조물의 안전성 검증 연구가 필요하다. 이때 위험차량의 운행특성, 설계 및 시공 중인 구조물의 안전성 등에 대한 전반적인 검토를 수행하고 구조물별 폭발에너지강도, 위험수준 및 이에 따른 안전 대책의 수립이 필요하다. 본 연구에서는 일반

1) Senior Research, Safety&Disaster Prevention Research Division, Korea Expressway Coporation Research Institute

2) Senior Research Fellow, Planning Coordination Office, Korea Expressway Coporation Research Institute

† General Manager, Korea Expressway Coporation (Corresponding Author : hslee@ex.co.kr)

적인 터널형상인 마제형 터널에 대하여 폭발 시 안정성을 분석하였다.

2. 폭발하중의 특징

2.1 폭발물의 정의

폭발물(폭약)이란 열이나 충격에 의하여 화학반응을 일으키는 혼합물 또는 화합물로서 많은 양의 에너지가 발생, 고온·고압 가스로 전환, 반응은 특별한 외부 작용이 없어도 가능하며, 일단 적합한 조건하에서 반응이 시작되면 전체 폭약에 파급되는 특징을 갖는다.

폭발물은 분해속도가 비교적 느려 추진장약으로 사용되는 저성능 폭발물과 분해속도가 빨라 주로 작약으로 사용되는 고성능 폭약으로 분류되며, TNT(trinitrotoluene)의 폭발 속도는 약 6,900m/s 수준이다. TNT는 국제적으로 화약류의 기준 폭약이며, 화약류가 지닌 에너지를 TNT를 기준으로 환산하여 표기하는 방법을 일반적으로 사용하고 있다. 각 폭약의 TNT등가질량(TNT equivalent weight)은 각 폭약의 질량비 에너지를 TNT의 질량비 에너지로 나눈 값이다. 예를 들어, 100kg의 RDX(Research Department Explosive)는 에너지로 보면 TNT 118.5kg(폭약 질량×TNT 등가 질량)과 같다.

이러한 폭발물이 터널구조물을 직접 타격하거나 구조물에 접촉 또는 근접 폭발할 때 구조물이 받게 되는 하중은 작용시간에 좌우되며, 직접 타격에 의한 하중이 작용하는 시간은 순간적인 것이므로 이를 충격하중이라 부르며 폭발에 의한 압력파가 구조물에 작용할 때 이를 폭발충격이라고 한다.

FEMA(Federal Emergency Management Agency, 2006)에서 폭발하중은 단시간 내에 높은 압력의 압력파가 작용하는 하중으로서 구조물에 하중이 전달되어 파괴되는 현상은 Fig. 1과 같이 건물에 작용하는 폭발하중의 경우와 같이 나타낼 수 있다. 첫 번째 단계로 폭풍파(blast wave) 또는 충격파(shock wave)라 불리는 폭발하중이 구조물의 창문 등과 부속물을 파괴하고 구조적인 외벽이 무너지기 시작하면서 기둥이 피해를 입기 시작한다. 두 번째 단계로 폭풍파가 건물의 바닥을 위로 밀어올리기 시작하고 마지막 단계로 폭풍파가 구조물을 감싸면서 지붕 위에서 작용하는 하향 압력과 건물의 모든 외부면에서 내부면으로 향하는 압력들이 작용하여 구조물이 파괴된다. 폭발하중은 폭발압력과 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 폭발압력 또는 과압(over pressure)은 자유장(free field)에서 공중(air burst) 또는 지면 기폭(surface

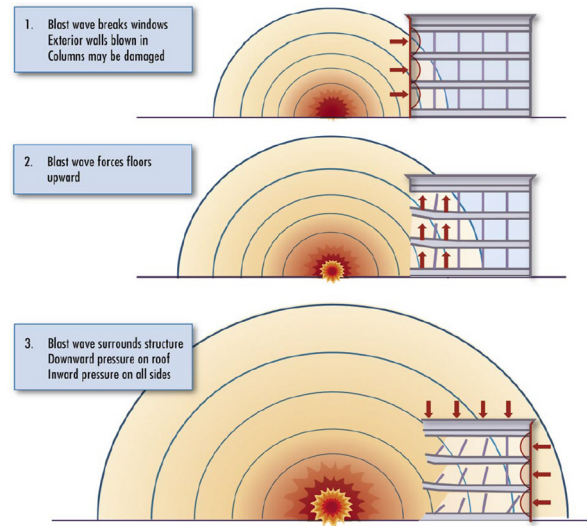


Fig. 1. Destruction stage of the structure due to the explosion load (FEMA, 2006)

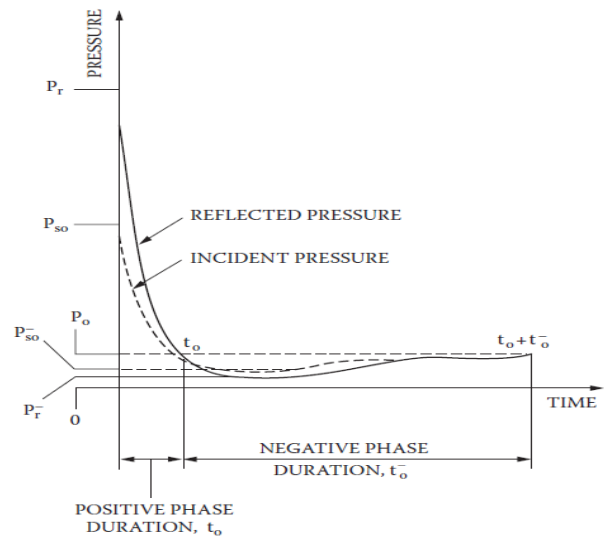
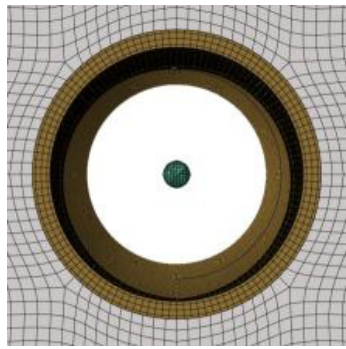


Fig. 2. Types of incident pressure and reflected pressure according to the explosion load (FEMA, 2006)

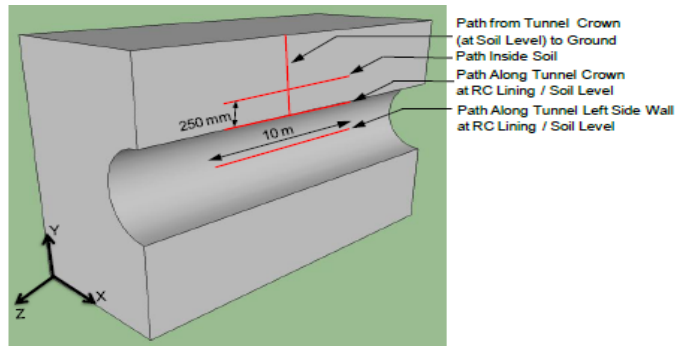
burst)에 의해 대기를 통해 전달되는 입사압(Side On Pressure P_{so} 또는 Incident Pressure P_i)과 어떤 물체 표면의 방해를 받아 압력이 반사되어 발생하는 반사압(Reflected Pressure P_r)으로 구성되어 있다. Fig. 2는 전형적인 입사압과 반사압의 형태를 보여주고 있으며, 입사압에 비해 반사압은 표면 반사에 의해 동일 압력이 전달되더라도 최대치가 항상 더 크게 나타난다.

2.2 폭발 시 터널 구조물의 거동특성

터널 내에서 폭발이 발생되면 폭발물질은 고온, 고압의 가스로 변환되고, 초기에 아주 빠른 속도로 주변에 충격파를 발생시킨다. 이러한 상승된 압력은 아주 짧은 시간 동안



(a) Numerical modeling of tunnel structures



(b) Tunnel analysis boundary condition example

Fig. 3. Example of tunnel explosion simulation (Tiwari et al., 2014)

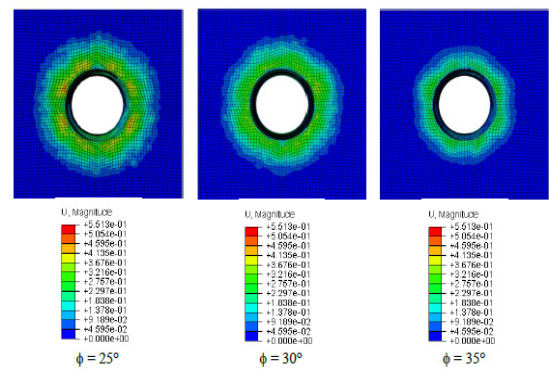
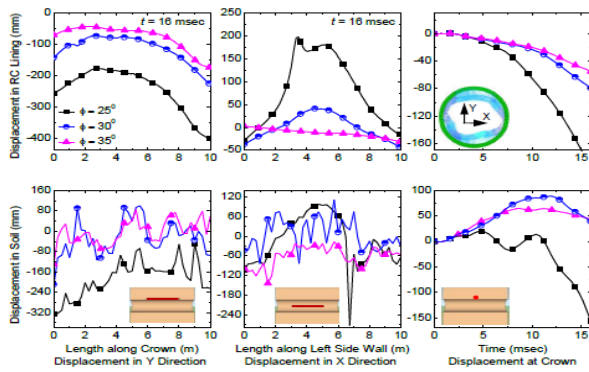


Fig. 4. Example of tunnel simulation results (Tiwari et al., 2014)

감소 후 소멸되고, 발생원으로부터의 거리에 따라 급격하게 감소한다. 일반적으로 터널 내에서의 폭발사고는 매우 낮은 확률로 발생되지만, 터널 내에서 폭발사고가 발생되면 인명과 구조물의 안전성에 심각한 피해를 초래할 수 있다. 이러한 폭발 하중의 작용은 실험적으로 분석하는 것은 거의 불가능하므로 일반적으로 수치해석을 통한 분석을 수행하고 있다.

Fig. 3은 터널의 폭발모사 해석 모델링 및 경계조건을 나타내고 있으며, Fig. 4는 터널 폭발모사 해석의 사례를 보여주고 있다.

2.3 폭발 시 콘크리트 재료모델

RHT(Riedel-Hiermaier-Thomas) 콘크리트 모델은 취성재료에 적합한 고급 소성 모델로 Riedel et al.(1999) 및 Riedel et al.(2009)에 의해 제안되었다. 이 모델은 동적하중을 받는 콘크리트의 모델링에 특히 유용하며, 암석이나 세라믹 등 콘크리트 이외의 취성재료를 모델링하는 데도 사용된다. RHT 콘크리트 모델의 파괴면(failure surface) F_{RHTC} 은 Eq. (1)으로 나타내며, 이는 압력 경화, 변형률 경화, 변형률속도 경화, 손상에 따른 변형률 연화 및 전단강도 감소의 영향을 고려하고 있다.

$$F_{RHTC} = \sigma_{eq} - Y_{TXC} \cdot F_{\cap(P)} \cdot R_3(\theta) \cdot R_{RATE}(\dot{\epsilon}) \quad (1)$$

Eq. (1)에서 σ_{eq} 는 등가응력이고, R_3 는 인장, 압축 상태에 따른 기준면의 차이를 나타내기 위한 항이며, Y_{TXC} 는 Eq. (2)와 같다.

$$Y_{TXC} = f_c A (P^* - P_{spall}^* R_{RATE})^n \quad (2)$$

여기서, f_c 는 콘크리트의 압축강도, A 와 n 은 각각 파단면을 정의하기 위한 상수와 지수, P^* 와 P_{spall}^* 은 각각 압축강도에 의해 정규화된 압력과 동적파괴강도(spall strength)이다. 그리고 F_{RATE} 는 변형률속도 계수이며, 압력(P)의 크기에 따라 Eq. (3)와 Eq. (4)로 표현된다.

$$F_{RATE} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}\right)^\alpha \text{ for } P > \frac{1}{3}f_c \text{ ; compression} \quad (3)$$

$$F_{RATE} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}\right)^\delta \text{ for } P > \frac{1}{3}f_c \text{ ; tension} \quad (4)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_0$ 는 인장일 때 3×10^{-6} , 압축일 때 3×10^{-7} 이다. Eq. (1)의 R_3 는 Eq. (5), Eq. (6) 및 Eq. (7)과 같이 정의되

고, 3축 압축상태에 비해 3축 인장상태에서 감소하는 재료의 강도를 표현한다.

$$R_3 = \frac{2(1 - Q_2^2)\cos\theta + (2Q_2 - 1)\sqrt{4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta - 4Q_2}}{4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta + (1 - Q_2)^2} \quad (5)$$

$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}J_3}{2^{3/2}\sqrt{J_2}} \quad (6)$$

$$Q_2 = Q_{2,0} + BQP^* \quad (7)$$

여기서, $Q_{2,0}$ 은 압력이 0일 때의 강도비, BQ 는 압력의 증가에 따른 파단면의 변화를 나타내는 계수이다.

RHT 콘크리트 모델에서 손상은 소성변형률의 축적에 의해 발생하며, Eq. (8)과 Eq. (9)로 정의된다.

$$D = \Sigma \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^{failure}} \quad (8)$$

$$\epsilon_p^{failure} = D_1 (P^* - P_{spall}^*)^{D_2} \quad (9)$$

여기서, D_1 , D_2 는 재료상수로, 압력의 함수로 표현되는 재료 고유의 파괴 변형률을 정의하기 위해 사용된다. 손상은 재료에 변형을 연화 및 전단강도의 감소를 유발한다. 파단면 및 전단강도는 Eq. (10)과 Eq. (11)에 의해 감소된다.

$$Y_{fracture}^* = (1 - D) Y_{failure}^* + D Y_{residual}^* \quad (10)$$

$$Y_{residual}^* = \min[B(P^*)M, Y_{XTC} \cdot SFMAX] \quad (11)$$

여기서, B 와 M 은 각각 압력에 따른 잔류강도면을 정의하기 위한 상수와 지수, $SFMAX$ 는 잔류강도면의 한계를 설정하기 위한 파단면과의 비이다. 이 모델에서 정의된 재료

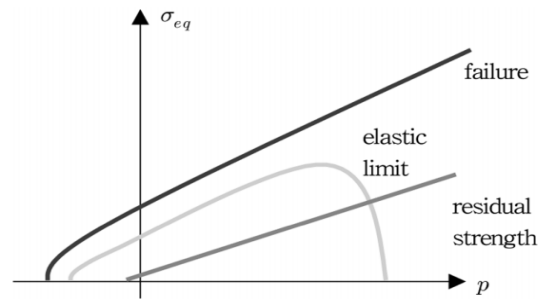


Fig. 5. Correlation of pressure and equivalent stress in RHT concrete models

의 파괴면, 탄성한계면 및 잔류강도면을 압력과 등가응력에 관한 형태로 도시하면 Fig. 5와 같다. RHT 콘크리트 모델에서 사용되는 재료의 매개변수는 압축강도와와의 비로, 요구되는 인장강도 및 전단강도, 그리고 콘크리트의 거동특성을 묘사하는 다양한 계수들을 정의하기 위한 상수 및 지수로 이루어져 있다. 이러한 매개변수를 결정하기 위해서는 많은 실험적 연구(정적재하시험, 관통 및 천공시험, 폭발하중시험 등)가 필수적으로 요구된다. 하지만 현재까지 RHT 콘크리트 모델의 매개변수를 결정하기 위한 실험적 연구는 압축강도 35MPa과 140MPa에 대해서만 수행되어, 현재 위 두 가지의 강도의 콘크리트에 대한 매개변수만이 Riedel et al. (1999)과 Riedel et al.(2009)에 의해 제안되고 있다. 결정된 두 종류의 매개변수군을 비교해 보면, 단지 압축강도와 변형률속도 계수를 정의하기 위한 지수만이 다를 뿐 나머지는 동일하다. 따라서 압축강도가 35MPa에서 140MPa 사이인 콘크리트의 경우는 제안된 매개변수 중 압축강도 및 변형률속도 계수를 제외한 나머지를 그대로 사용해도 무방할 것으로 분석되었다.

2.4 국외 내폭관련 방호구조물 설계기준 현황 조사

국외의 방호·방폭 관련 기준 중 체계적으로 잘 정리가 되

Table 1. U.S. department of defense's protective design documentation system

Classification	Document quantity
Unified Facilities Guide Specifications (UFGS)	919
Unified Facilities Criteria (UFC)	326
Unified Master Reference	1
Engineering and Construction Bulletins (ECB)	417
DOD Unified Design Guidance	4
DOD Supplemental Technical Criteria	18
DOD Handbooks	2
DOD Manuals	10
DOD CAD Resources	194
DOD Unit Cost/Area Cost Factors and Facilities Pricing Guides	1
Washington Headquarters Services: Building Code	1
Military Health System (MHS): DoD Space Planning Criteria for Health Facilities	40
MIL-STD-1691 Military Medical and Dental Facilities	1

어 있는 미국 국방부의 설계관련 문서 체계는 Table 1과 같다. 미국의 GSA(Government Service Administration)에서는 연방정부 조달청 소속의 지주역할을 하는 곳으로 국가 시설물에 대해서 보안설계에서 테러 피해 경감을 위한 구조적 가이드라인 PBS-P100(The Facilities Standards for the Public Buildings Service)을 제공하고 있다. 또한 연방 재난 관리청(FEMA)은 2003년에 테러공격의 피해경감을 위해 FEMA 426과 427을 발간하였고 구체적으로 폭발물 증량에 따른 최소 이격거리를 제시하고 있다. 요구되는 최소 이격거리를 확보하지 못한 경우에는 방폭 설계, 옹벽 설치 등의 추가적인 보강을 하도록 제안하고 있다.

미국의 원전 관련 방호에 관해서 US NRC(United States Nuclear Regulatory Commission)에서 폭발효과로 인한 지중 구조물의 거동에 대한 평가 방안을 제시하였으며, 현재 UFC(Unified Facilities Criteria)의 배경이 되는 FY2016 Program은 Fig. 6은 UFC 프로그램의 조직 구성은 나타내고 있다.

2.5 폭발하중의 해석

폭발하중을 해석하기 위한 대표적인 방법으로는 수치해석이 있으며, 그 중에서도 폭발 현상을 해석하기 위한 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)이 널리 사

용되고 있다. 전산 유체 역학은 폭발 현상을 실제 유사 실험 환경 조건으로 수치 해석을 수행하여 적은 비용으로 비교적 신뢰도 높은 데이터를 분석할 수 있는 장점이 있다. 그러나 실제 실험 조건에 대한 다양한 변수들이 충분히 고려되지 않을 수 있는 약점이 있으므로, 변수들의 누락 또는 상수들의 오용 등은 신뢰도가 낮은 결과를 보일 수가 있다. 그러므로 전산 유체 역학의 신뢰도와 정확도는 반드시 실제 실험을 통한 결과 비교로써 검증이 되어야만 한다. Table 2는

Table 2. Program for the analysis of the detonation effect and structural behavior

Name	Purpose and type of analysis	Author/Vendor
BLASTX	Blast prediction, CFD code	SAIC
DYNA3D	Structural response + CFD (Coupled analysis)	LLNL
ALE3D	Structural response + CFD (Coupled analysis)	LLNL
LS-DYNA	Structural response + CFD (Coupled analysis)	ANSYS Inc.
CONWEP	Blast prediction(emperical)	US Army
AUTODYN	Structural response + CFD (Coupled analysis)	ANSYS Inc.
ABAQUS	Structural response + CFD (Coupled analysis)	ABAQUS Inc.

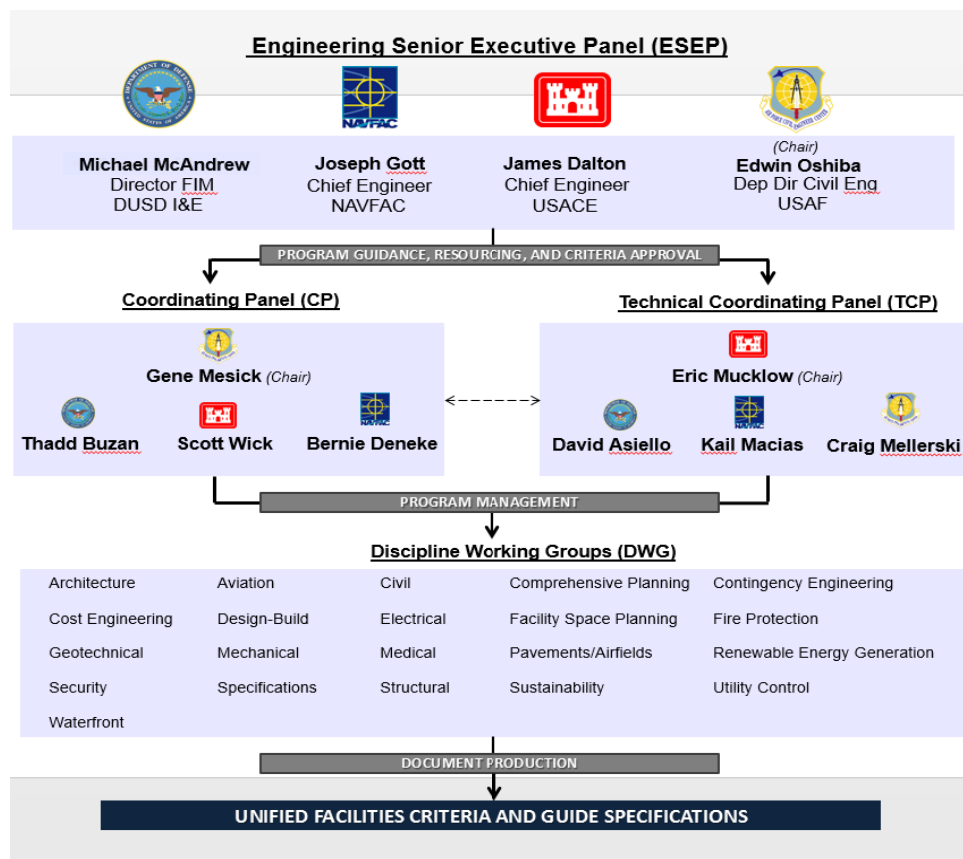


Fig. 6. Organization of UFC program in USA

폭압 효과와 구조적 거동 해석을 위한 프로그램을 나타내고 있다.

Table 2의 해석 프로그램은 BLASTX, CONWEP 등과 같은 폭발하중을 예측하는 기법, LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS 등과 같은 폭발하중에 따른 구조물의 거동 현상을 해석하는 기법으로 구분할 수 있다. 특히 폭발 하중과 구조물의 상호 작용에 따른 상세 분석(Coupled Analysis)을 통해 구조물의 거동 현상 분석이 이루어져야만 한다. CONWEP은 비공개로 제한되어 있지만 LS-DYNA에서 제공하는 Load_Blast 기능을 통해 간접적으로 하중을 재하할 수 있다. 그러나 CONWEP과 Load_Blast를 이용한 간접 하중 재하 방식은 Coupled Analysis가 고려되지 않았기 때문에 과대 하중이 재하될 수 있다.

3. 터널 폭발 시뮬레이션

일반적으로 폭발하중에 대한 실험적 검증은 지극히 제한적이므로 폭발하중에 대한 구조물의 거동을 분석하는 방법은 수치 해석적 방법이 대표적이다. 그 중에서도 폭발 현상을 해석하기 위한 전산 유체 역학(Computation Fluid Dynamics, CFD)이 널리 사용되고 있다. 전산 유체 역학은 폭발 현상을 실제 유사 실험 환경조건으로 수치 해석을 수행하여 적은 비용으로 비교적 신뢰도 높은 데이터를 분석할 수 있는 장점이 있다. 그러나 실제 실험 조건에 대한 다양한 변수들이 충분히 고려되지 않을 수 있는 단점이 있으므로 변수의 누락 또는 상수의 오용 등으로 인하여 신뢰도가 낮은 결과를 보일 수가 있다. 그러므로 전산 유체 역학의 신뢰도와 정확도는 반드시 실제 실험을 통한 결과 비교로써 검증이 되는 것이 바람직하다.

해석 프로그램은 BLASTX, CONWEP 등과 같은 폭발 하중을 예측하는 기법, LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS 등과 같은 폭발 하중에 따른 구조물의 거동 현상을 해석하는 기법으로 구분할 수 있다. 특히 폭발 하중과 구조물의 상호 작용에 대한 연계해석(Coupled Analysis)을 통해 구조물의 거동 현상 분석이 이루어져야 한다. CONWEP은 비공개로 제한되어 있지만 LS-DYNA에서 제공하는 Load_Blast

기능을 통해 간접적으로 하중을 재하할 수 있다. 하지만 CONWEP과 Load_Blast를 이용한 간접 하중 재하 방식은 연계해석이 이루어지지 않아 과대 하중이 재하될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 CONWEP에 의한 폭발 하중을 예측하고 AUTODYN을 이용하여 폭발 하중에 따른 터널구조물의 거동특성을 분석하였다.

3.1 폭발 시뮬레이션을 통한 작용 폭압 예측

폭발 수치해석에는 다목적 범용 해석 하이드로코드인 AUTODYN을 사용하였다. 위험물질 폭발 시 등가 TNT 질량을 바탕으로 Fig. 7과 같이 최형빈 & 김한수(2015)은 1D Wedge 모델에 폭발물과 그 외부 공기를 채운 후 일정 거리까지 미리 폭발의 전파를 계산하는 방식을 통해 폭발 시 시간에 따른 거리별 폭압을 예측하였다.

1D Wedge 모델을 2D나 3D 공간상에 불러오게 되면 혼합가스 부분은 공기로 채워진 수치해석 영역의 중앙부에 폭발 원점을 중심으로 각각 원형, 구형으로 위치하게 되고, TNT 폭발에서 발생하는 과압이 공기 요소를 통해 전파되며 시간에 따른 과압 이력을 계산할 수 있다. 1D Wedge의 폭발물은 등가 TNT 질량 25kg(탱크로리 27,000리터)을 갖는 반지름을 입력하여 구의 형태로 부피를 계산하며, 그 계산식은 Eq. (12)와 같다.

$$W = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \quad (12)$$

여기서, W 는 폭발물질의 질량이며, r 은 반지름, ρ 는 폭발물질의 밀도를 나타낸다.

Fig. 8은 TNT 25kg 폭발에 따른 폭압 전파를 나타내고 있으며, Fig. 9는 그 결과를 나타내고 있다.

게이지 번호는 폭발물 위치에서 떨어진 이격거리 1m, 2m, 3m, 4m 및 5m를 나타내며, 폭발물에서 이격거리 1m에 작용하는 최대 폭압은 0.30ms에서 6.9MPa를 나타내었다. 또한 이격거리 증가에 따라 작용하는 폭압은 감소하는 경향을 나타내었다. 이격거리 2m에서의 최대 폭압은 0.72ms에서 3.1MPa, 이격거리 3m에서의 최대 폭압은 1.33ms에서 1.8MPa 수준으로 분석되었다. 또한 최대 이격거리 5m에서의 최대

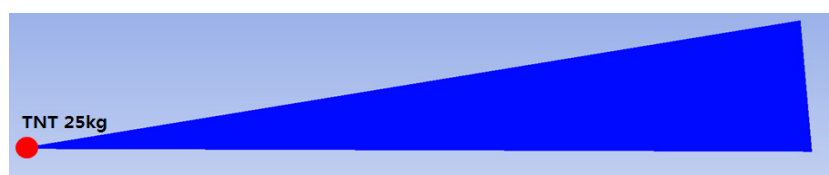


Fig. 7. TNT's 1D Wedge Model

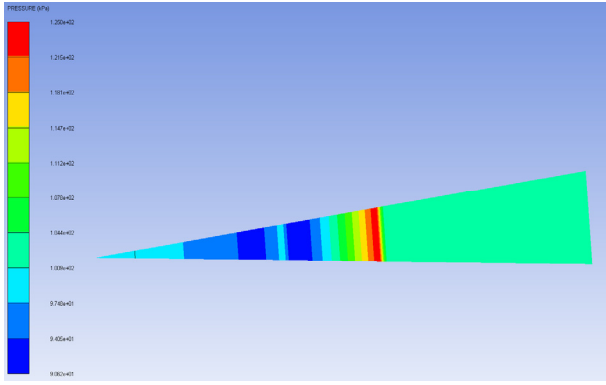


Fig. 8. Propagation characteristics of explosion pressure due to TNT 25 kg explosion

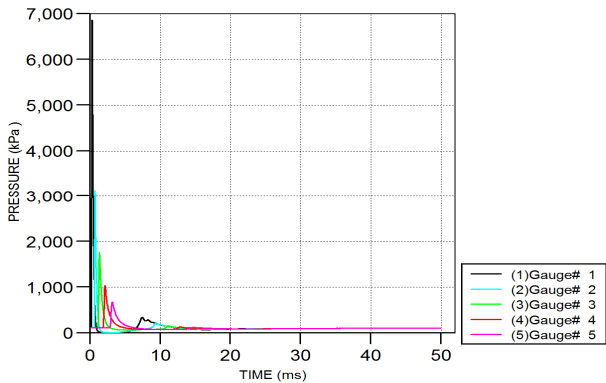


Fig. 9. TNT 25 kg explosion

폭압은 3.19ms에서 0.67MPa 수준으로 이격거리 증가에 따라 작용 최대 폭압은 현저히 감소하는 것으로 분석되었다.

3.2 터널 폭발 시뮬레이션 변수 설정

본 연구에서의 도로터널 형상은 고속도로 내 마제형 터널과 동일한 크기로 모델링하여 폭발 시뮬레이션을 수행하였다. 폭발물 크기 또한, 터널 구조물 현치 유무에 따른 폭발 시뮬레이션에 사용한 폭발물 크기와 동일한 TNT 질량 25kg을 사용하였으며, 폭발물 위치는 중앙부 기준으로 1m, 2m, 3m, 4m, 5m 수평 이동시켜 폭발 시뮬레이션을 수행하였다. 터널 내부 도로폭은 9.2m, 높이는 7.295m, 길이는 20m로 모델링하여 해석적 연구를 수행하였다. Table 3은 장대터널 폭발 시뮬레이션에 사용된 해석 변수를 나타내고 있다.

Table 3. Variables used in this study

Variable	Condition
Tunnel shape specifications	9.2×7.295×20m
Explosive size	TNT 25kg
Location of explosives (ground explosion)	0m (Central), 1m, 2m, 3m, 4m, 5m (Horizontal movement)
Explosion time	10ms
Material model	RHT Concrete

3.2.1 사용 콘크리트 재료모델

재료의 동적 거동 문제를 풀기 위해 질량보존의 법칙, 운동량 보존의 법칙, 에너지 보존 법칙과 이에 대한 적절한 초기조건과 경계조건이 필요하며, AUTODYN과 같은 하이드로코드는 상태방정식, 강도 방정식, 그리고 손상 방정식으로 구성된다. 상태방정식은 압력, 밀도, 내부에너지와의 관계를 나타내며, 강도 방정식은 재료의 소성 변형, 소성 변형률, 온도 등을 적절하게 정의하기 위해 사용된다.

또한 파괴 방정식은 재료의 응력, 변형률 등을 기준으로 파괴 또는 변형을 나타낸다. Table 4는 사용 RHT(Riedel-Hiermaier-Thoma) 콘크리트 재료물성을 나타내고 있다.

Table 4. RHT concrete material properties

Parameter	Value
Equation of state	P alpha
Parameter B1	1.220E+00 (none)
Parameter T1	3.527E+07 (kPa)
Parameter T2	0.000E+00 (kPa)
Reference temperature	3.000E+02 (K)
Specific heat	6.540E+02 (J/kgK)
Thermal conductivity	0.00E+00 (J/mKs)
Compaction curve	Standard
Bulk modulus A1	3.52E+07 (kPa)
Strength	
Shear modulus	1.670E+07 (kPa)
Compressive strength(fc)	3.50E+04 (kPa)
Tensile strength (ft/fc)	1.0E-01 (none)
Shear strength (fs/fc)	1.80E-01 (none)
Intact failure surface constant A	1.60E+00 (none)
Intact failure surface exponent N	6.10E-01 (none)
Failure	
Damage constant, D1	4.00E-02 (none)
Damage constant, D2	1.00E+00 (none)
Minimum strain to failure	1.00E-02 (none)
Residual shear modulus fraction	1.30E-01 (none)
Tensile failure	Hydro (Pmin)
Erosion	Geometric strain
Erosion strain	2.00E+00 (none)

3.2.2 RHT(Riedel–Hiermaier–Thoma) concrete

콘크리트 강도모델은 Riedel et al.(1999)이 제안한 RHT 모델을 사용하였으며, 이는 일정한 식에 따라 콘크리트 파괴면, 탄성 영역, 잔류 강도 상태가 콘크리트의 항복응력과 압력에 의해 나타내어진다. 콘크리트는 재료의 불균질과 다공성 때문에 복잡한 비선형 압축 거동을 하는 취성 재료로서, 격납건물에 사용한 RHT 콘크리트 모델은 충돌, 폭발 등에 주로 사용된다.

3.2.3 사용 토피(토질 구조체) 재료모델

터널 구조물 외부를 둘러싸고 있는 토질 구조체의 사용 재료모델은 Autodyn library에서 제공하는 Limestone 재료 모델을 사용하였으며, Table 5는 폭발 시뮬레이션에 사용한 Limestone 모델의 재료물성을 나타내고 있다.

Table 5. Limestone material properties

Parameter	Value
Young's modulus	3.7845E+10 (Pa)
Poisson's ratio	0.3077
Bulk modulus	3.280E+10 (Pa)
Shear modulus	1.447E+10 (Pa)

3.2.4 마제형 터널 폭발 시뮬레이션

Fig. 10은 고속도로 상에 있는 마제형 터널의 횡단면도이며, 마제형 터널 실제 크기를 모사하여 터널 내부에서 27,000리터 유조차의 폭발을 모사하여 폭발 시뮬레이션을 수행하였다. 터널 내부 도로 폭은 9.2m, 높이는 7.3m이며, 길이는 20m로 모델링하여 폭발 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 목적은 마제형 터널 내폭 특성 분석이고 변수는 폭발물 위치(지면폭발 중앙부 기준 0m, 1m, 2m, 3m, 4m, 5m(수평이동))로 적용하였다. 적용프로그램은 Ansys Autodyn R18.1을 이용하였다. 적용된 폭발물 크기는 BLEVE 환산 TNT 25kg(탱크로리 27,000리터(27m³)), Ductile Failure($\beta=0.45$)이다. 그 외 폭발 적용시간(10ms), 구속조건(Fixed support), 그리드 크기(0.25×0.25m), Lagrange cell(터널 구조체, 38,960), Euler Cell(32,320)을 적용하였다. 본 분석에 적용된 모델은 폭발하중과 같이 매우 짧은 시간 동안 작용하는 하중의 속도를 재료의 변형속도가 따라가지 못해 파괴가 되기 전에 항복점과 극한응력에 도달하기 때문에 Riedel 등에 의해 정립된 RHT 콘크리트 모델을 사용하였다.

Fig. 11은 마제형 터널 모델링을 나타내고 있으며, Fig. 12는 폭발 시뮬레이션에 사용된 폭발물 위치를 나타내고

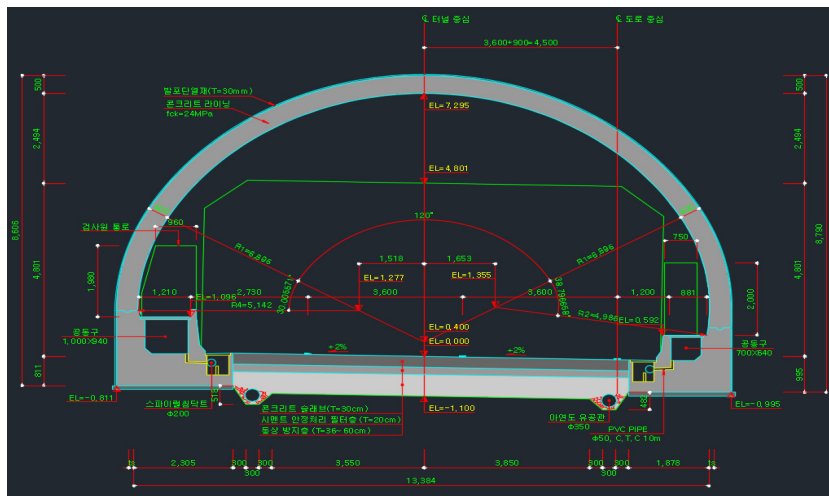


Fig. 10. Tunnel detailed design drawing

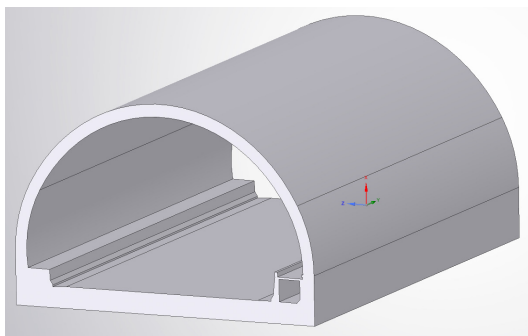


Fig. 11. Tunnel modeling

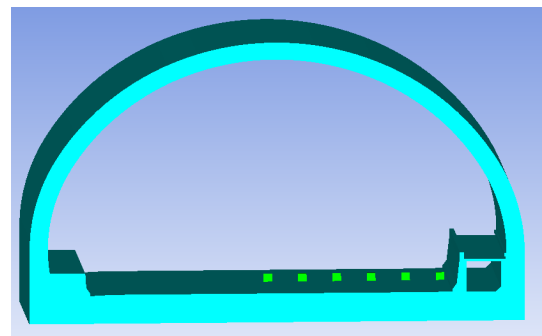


Fig. 12. Explosive location

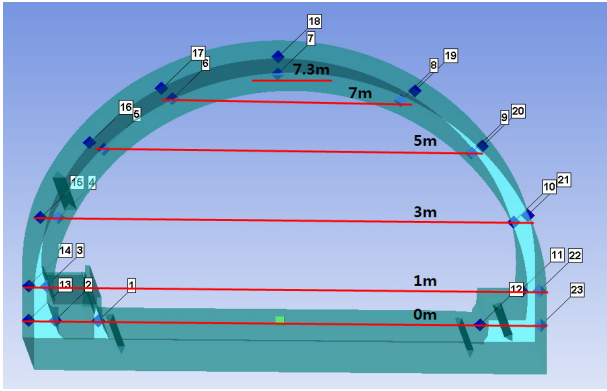
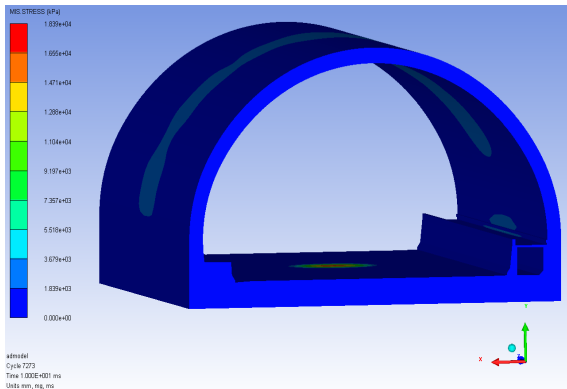


Fig. 13. Gauge position

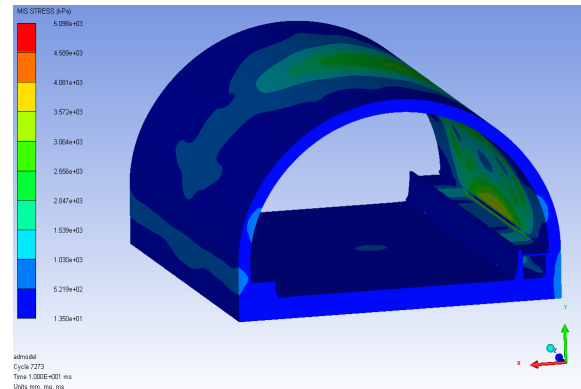
있다. 폭발 시뮬레이션을 통해 폭발물 위치에 따른 응력 및 변위 거동을 측정하기 위하여 지면에서 0m, 1m, 3m, 5m, 7m, 7.3m에 전면 및 배면에 게이지를 설치하여 폭발에 따른 응력 및 변위를 측정하였다. Fig. 13은 게이지 설치 위치를 나타내고 있다.

3.3 마제형 터널 폭발 시뮬레이션 해석결과

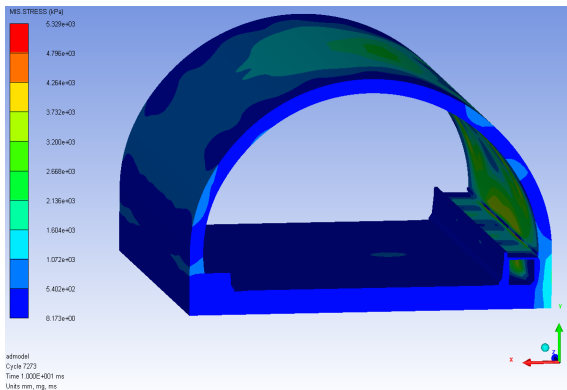
Fig. 14는 마제형 터널 폭발 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 마제형 터널 중앙부에서 폭발하였을 경우, 터널 지면에서 1m 높이에서 가장 큰 최대응력 값을 나타내었다. 이는



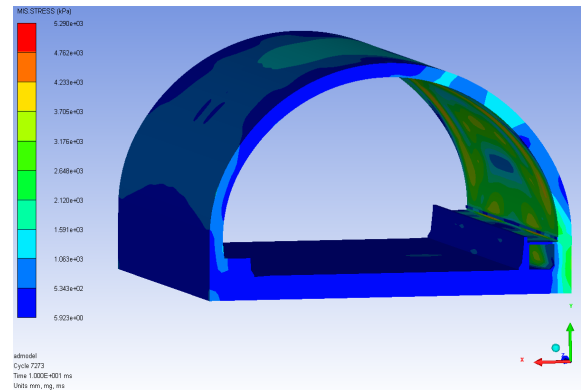
(a) Explosion at concrete central explosion



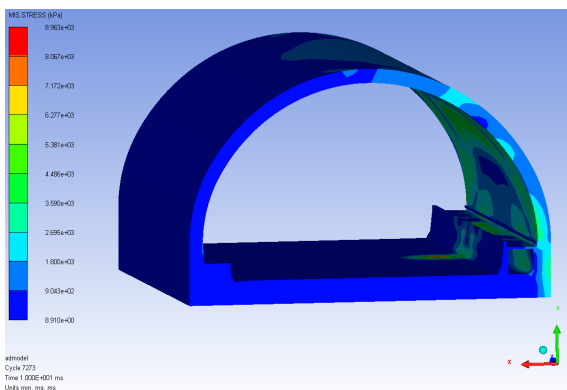
(b) Explosion at 1m shift (right) from the center



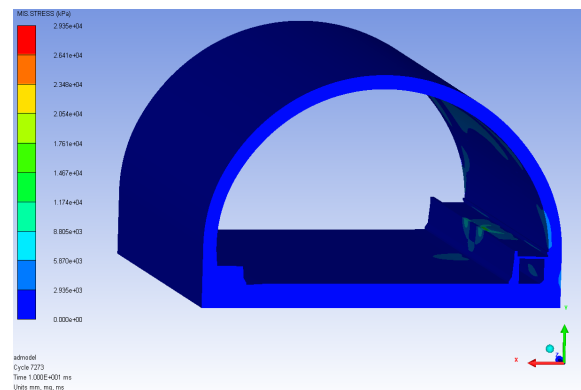
(c) Explosion at 2m shift (right side) from the center



(d) Explosion at 3m shift (right side) from the center



(e) Explosion at 4m shift (right) from the center



(f) Explosion at 5m shift (right) from the center

Fig. 14. Analysis results of majestic tunnel explosion simulation by TNT location

폭발 시뮬레이션을 지면폭발로 설정하여 해석을 수행하였으며, 지면폭발의 특징은 폭발이 되는 순간부터 지면에 의한 반사가 이루어져 폭발압의 형태가 반구형으로 작용하여 이러한 결과를 가져온 것으로 분석되었다. 마제형 터널 중앙부 우측 1m(터널 벽체에서 4m)에서 폭발하였을 경우, 장대 터널 중앙부 폭발 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 지면에서 1m 높이에서 가장 큰 약 5.2MPa의 최대응력을 나타내었다. 또한 이격거리가 터널 중앙부 폭발보다 1m 가까워진 영향으로 최대응력 및 최대 변위 값이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 마제형 터널 중앙부 우측 2m(터널 벽체에서 3m)에서 폭발하였을 경우, 지면에서 1m 높이에서 약 5.5MPa의 최대응력을 나타내었다.

마제형 터널 중앙부 우측 3m(터널 벽체에서 2m)에서 폭발하였을 경우, 지면에서 1m 높이에서 약 5.7MPa의 최대응력을 나타내었다. 이는 터널 중앙부 우측 1m(터널 벽체에서 4m) 및 터널 중앙부 우측 2m(터널 벽체에서 3m)에서 폭발 시뮬레이션 결과와 비교하여 약 4% 및 11% 증가한 최대응력을 나타내었다. 어느 정도 거리가 떨어지면 폭압이 터널 벽체의 응력 증가에 있어 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 마제형 터널 중앙부 우측 4m(터널 벽체에서 1m)에서 폭발하였을 경우, 지면에서 1m 높이에서 약 6.4MPa의 최대응력을 나타내었다. 폭발물과 터널 벽체와의 거리가 가까워짐에 따라 공동구 시작부의 최대응력이 약 10.9MPa 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 터널 공동구가 터널의 현지 역할로 작용하여 폭압에 의한 벽체의 응력이 크게 증가하지 않은 것을 확인할 수 있었다.

마제형 터널 중앙부 우측 5m(터널 벽체에서 0m)에서 폭발하였을 경우, 지면에서 1m 높이에서 약 6.4MPa의 최대응력을 나타내었다. 이는 터널 중앙부 우측 4m(터널 벽체에서 1m)에서 폭발할 결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 또한 폭발물과 터널 벽체와의 거리가 가까워짐에 따라 공동구 시작부의 최대응력이 약 48.7MPa 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

UFC(Unified Facilities Criteria)에서 제시하는 지점회전각을 활용하여 터널 구조물의 안전성 평가를 수행하였다. 각 위치별 변위 측정지점에서 측정된 변위를 통하여 상대적인 지점회전각을 계산한 결과, 마제형 터널의 경우 약 0.1°수준의 지점회전각을 나타냈다. 이는 UFC나 국방부 방호설계기준에서 제시하고 있는 급작스런 폭발(accidental explosion)을 받는 지하구조물은 지점회전각 1°이하(또는 연성비 10에 해당하는 최대 처짐을 허용) 기준을 만족하는 수준이며, 폭발로 인한 국부적인 콘크리트의 파손은 발생하더라도 전체적인 구조물의 안전성에는 크게 영향이 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 도로터널의 폭발 안전성을 평가하기 위하여 도로를 운행하는 차량 가운데 폭발 하중이 가장 크다고 판단되는 비등액체팽창증기폭발(BLEVE)을 기준 폭발원으로 정하고, 폭발 시뮬레이션을 위해 등가TNT 폭발하중으로 전환하는 방법을 제시하였다. 이와같이 도출된 폭발하중을 적용하여 터널에 대하여 다양한 변수를 가정하여 동적거동 시뮬레이션을 수행하여 터널의 폭발 안전성을 분석하였다.

- (1) 터널 구조물에 적용 가능한 수치해석적 기법을 정립하여 모델링 및 해석을 수행하였으며, 사용 프로그램은 AUTODYN으로 폭발하중은 등가 TNT 질량 25kg을 적용하였다. 터널의 경우, 단면의 형상을 변수로 설정하였고 폭발물의 위치를 이동하며 터널구조물에 작용하는 응력 및 변위를 분석하였다.
- (2) 마제형 2차로 터널의 경우, 폭발물의 위치가 중앙부일 때, 터널 지면에서 1m 높이에서 최대응력 발생하였고, 벽체로부터 3m 및 2m 이격 폭발 시 약 5.5MPa 및 약 5.7MPa의 응력을 나타내었다. 그리고 일정 이격거리 이상에서는 폭압이 터널 벽체의 응력 증가에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.
- (3) 터널 구조물 내에서 폭발이 발생하였을 경우, 각 위치별 변위 측정지점에서 측정된 변위를 통하여 상대적인 지점회전각을 분석한 결과, 마제형 터널의 경우 약 0.1°수준의 지점회전각을 나타내었다. 이는 UFC나 국방부 방호설계기준에서 제시하고 있는 급작스런 폭발(accidental explosion)을 받는 지하구조물은 1°의 지점회전각(또는 연성비 10에 해당하는 최대 처짐을 허용) 기준 이하를 만족하는 수준으로 분석되었다.
- (4) 구조물의 변형이 제한된 터널 구조물의 경우, 폭발로 인한 국부적인 콘크리트의 파손은 발생하더라도 전체적인 구조물의 안전성에는 영향이 크지 않은 것으로 분석되었다.

References

1. 최형빈, 김한수 (2015), 구조체에 작용하는 중소규모 혼합가스 폭발해석을 위한 등가 TNT 해석 기법, 대한건축학회논문집 구조계, pp. 3~10.
2. 한국도로공사 (2015), 경부고속도로 직선화공사 지하차도 내 화설계 기준 개발 연구, pp. 11~99.
3. Department of Defence (2014), Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions, UFC

3-340-02, DoD.

4. Department of Defence (2016), DoD Unified Facilities Criteria Program: FY 2016 Program Review. DoD.
5. FEMA 453 (2006), Risk Management Series Design Guidance for Shelters and Safe Rooms.
6. Riedel, W., Thoma, K., Hiermaier, S. and Schmolinske, E. (1999), Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500, numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes, Proceedings of the 9th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, pp. 315~322.
7. Riedel, W., Thoma, K., Mayrhofer, C. and Stolz, A. (2009), Engineering and numerical tools for explosion protection of reinforced concrete, Int. J. Prot. Struct. I, pp. 85~101.
8. Tiwari, R., Chakraborty, T. and Matsagar, V. (2014), Dynamic analysis of underground tunnels subjected to internal blast loading, In World Congress of Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona.