

# 방호터널의 입구형상과 폭풍함정의 깊이에 따른 폭압저감

신진원<sup>1\*</sup> · 방승기<sup>2</sup>

<sup>1</sup>조교수, 가톨릭관동대학교, 건축공학과, <sup>2</sup>교수, 경민대학교, 건축학과

## Blast Overpressure Reduction Using Entrance Shape and Blast Pocket Depth of Protective Tunnels

Shin, Jinwon<sup>1\*</sup>, Pang, Seungki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Catholic Kwandong University, Gangneung, 25601, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architecture, Kyungmin University, Seoul, 11644, Korea

**Abstract** - This paper presents a study to reduce overpressures in protective tunnels for external detonations. A three-dimensional CFD model of the tunnel was established with examining the mesh convergence and overpressure stability, and validated based on UFC 3-340-02. A parametric analysis was performed with various entrance shapes and blast pockets. It was confirmed that the entrance shape and blast pocket reduced overpressures effectively. The overpressure was reduced by 65 % when applying the optimized slope and pocket depth. It is expected though this study to reduce the construction cost efficiently by lowering the overpressure rating of blast valves in protective tunnels.

**Keywords** - Protective tunnel, Entrance shape, Blast pocket, Overpressure reduction, CFD modeling

### 1. 서론

방호설계는 군사시설을 대상으로 주로 적용되어 왔으며, 최근에는 지하에 건설하는 정부 및 민간의 각종 데이터 저장장을 위한 데이터센터, 백업센터 등으로 확대되어 EMP 차폐, 방폭, 방탄 및 화생방에 대한 안전성 검토와 설계를 일부 진행 중이다(Pang *et al.*<sup>[4]</sup>).

지하의 보호시설 접근을 위한 터널의 외부에서 폭발이 발생하여 충격파가 터널로 진입하였을 경우 폭발이 외부로 빠져나가지 못하며, 충격파의 입사에너지는 거리에 따라 감소하나 터널 내부에서의 반복적인 반사에 의한 폭압 증폭(Smith and Hetherington<sup>[10]</sup>)으로 터널 입구로부터 상당한 거리에 있는 지하 시설물에서도 상당한 수준의 폭압이 발생

할 수 있다. 이에 외부 폭발에 대하여 터널 진입부로부터의 내부로 전파되는 폭압(blast overpressure) 저감을 위한 방호설계가 요구되는 상황이다.

대표적인 지하 보호시설인 전산센터의 경우 벽면에 환기 및 내부 인원과 장비를 보호하기 위한 수백 개의 방폭밸브가 설치된다. 방폭밸브는 내압 등급에 따라 소요비용이 급격히 증가하므로 건설시 비용 절감을 위하여 폭압을 저감시키기 위한 방안이 필요하다(Pang *et al.*<sup>[4]</sup>).

터널 내부의 폭압은 다양한 방법으로 저감이 가능하다. 재료적 측면에서 터널 내부에 충격파의 에너지를 흡수할 수 있는 재료 또는 장치를 설치하거나 강도가 작고 연성이 높은 구조물의 파괴를 유도하여 폭압을 저감할 수 있다. 다른 방법으로는 터널 내부의 형상을 이용하는 방법으로 충격 흡수 재료에 비해 폭압 저감 효과를 보다 효과적으로 확인할 수 있다. Zhao *et al.*<sup>[13]</sup>은 수치 시뮬레이션을 통하여 넓은 부피의 확장 챔버를 터널의 길목에 배치함으로써 공기의 부피를 증가시켜 최대폭압을 저감시키기 위한 연구를 수행하였다. Hager and Birnbaum<sup>[2]</sup>의 연구를 참고하면 터널에 측면 챔버를 배치하여 폭압 에너지의 시간차에 의한 최대폭압의 저감이 가능하다. 이러한 연구사례와 같이 터널의 형상을 이

Note.-Discussion open until August 30, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 03, 2021; revised on January 18, 2022; approved on January 19, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-33-649-7694 Fax. +82-33-645-8120

E-mail. jshin@cku.ac.kr

용한 폭압 저감 원리를 이용한다면 터널 내부의 폭압을 보다 효과적으로 줄일 수 있다.

본 연구에서는 터널의 형상을 이용한 폭압 저감 방법으로 출입구와 폭풍함정의 형상을 이용하여 최대폭압을 저감시키기 위한 연구를 형상에 대한 변수해석을 통한 수치 시뮬레이션을 통하여 수행하였다.

방호터널의 폭압을 예측하기 위하여 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 기반 해석을 수행하였으며, 해석모델의 신뢰성을 입증하기 위하여 메쉬 수렴도(mesh convergence), 폭압 안정성(overpressure stability) 연구를 수행하였으며, 미 국방부 방폭설계지침인 UFC 3-340-02(US Department of Defense<sup>[1]</sup>)의 설계차트와 비교하여 폭압을 검증하였다. 이 설계차트는 Kingery and Bulmash<sup>[3]</sup>의 연구를 기반으로 하고 있다. 검증된 해석모델을 이용하여 폭발 시나리오를 설정하였으며, 터널의 입구형상, 폭풍함정 깊이 및 형상 등에 대한 변수해석을 수행하여 폭압 저감을 위한 터널의 최적 형상을 제안하였다.

## 2. 방호터널의 CFD 모델링

### 2.1 방호터널 기준모델

방호터널의 기준모델(reference model)은 Fig. 1과 같다. 기준모델은 크게 아치형 출입구(tunnel entrance), 각형 진입부(entry space) 및 아치형 본 터널(main tunnel)로 구성되며 높이는 7.2 m이다.

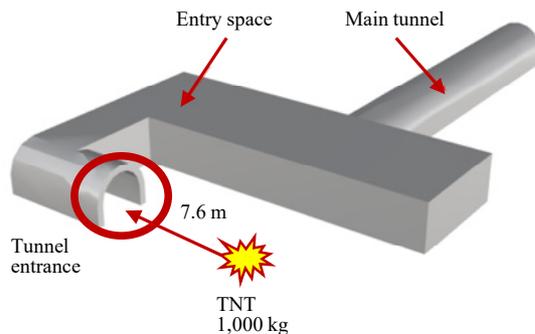


Fig. 1. Reference model of protective tunnel

출입구의 두께는 1 m이며 바깥과 안쪽 폭은 각각 8.9 m와 6.9 m이다. 진입부의 두께는 0.6 m이며 장변은 53.4 m, 단변은 17.7 m이다. 본 터널의 두께는 0.6 m이며 길이는 56 m까지 모델링되었다. 이 연구의 목적은 출입구로부터 본 터널

로 전파되는 폭압을 저감시키는 것이며, 본 터널에서 폭발 충격파가 진입 후 안정될 때까지의 길이를 고려하였을 때 본 터널 56 m 길이는 충분한 것으로 고려되었으며 이후는 모델링에 포함되지 않았다.

### 2.2 폭발하중

폭발물은 방폭설계에 일반적으로 사용되는 TNT로 정의되었다. 폭발하중은 1,000 kg의 TNT와 거리 7.6 m의 폭발로 정의되었으며, 지반의 반사효과는 고려되지 않았다. 폭발하중의 압력, 충격량 등의 변수들은 환산거리  $Z(=R/W^{1/3})$ 에 의해 정의된다. 여기서  $R$  = 폭발 중심으로부터 이격된 거리,  $W$  = 폭발물의 양이다. 고려된 폭발량과 거리를 환산거리로 변환할 경우  $Z=0.76 \text{ m/kg}^{1/3}$ 이다. 이 환산거리는 현재 방폭설계에서 사용되는 폭발하중들 중에서 높은 수준에 상응한다.

### 2.3 CFD 모델링

외부 폭발에 대한 3차원 방호터널 모델의 폭압평가는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 기반의 프로그램 Viper Blast(Stirling Simulation Services Limited<sup>[11]</sup>)를 사용하여 수행되었다. Viper Blast의 기본 해석 방법론은 Rose<sup>[5]</sup>에 기반하고 있으며, Wada and Liou<sup>[12]</sup>의 AUSMDV 수치해석기법을 사용한다.

TNT의 폭발은 해석의 정확도와 비용(시간)을 고려하여 2단계로 수행된다. 첫 번째 단계로 초기 폭발은 1차원 도메인에서 폭발 충격파가 반사 경계에 도달하기 전까지 수행되며, TNT의 팽창에 따른 압력은 Jones-Wilkins-Lee(JWL) Equation of State(EOS)로 구현된다(Shin *et al.*<sup>[8]</sup>). 최초 폭발을 1차원 도메인에서 모델링하기 때문에 적은 비용으로 정밀한 폭압 해석이 가능하다. 두 번째 단계에서는 터널이 모델링된 3차원 도메인에서 본 해석이 수행되며, 1차원 해석결과를 3차원 도메인으로 매핑(mapping)하여 해석을 진행한다(Shim and Lee<sup>[6]</sup>, Shin and Lee<sup>[7]</sup>). 폭압이 반사될 때까지 진행된 1차원 결과를 사용하기 때문에 3차원 도메인에서는 해석 시간과 정확도 측면에서 상대적으로 더 큰 메쉬 크기의 사용을 가능하게 한다.

공기와 구조물의 경계조건 모델링은 Shin *et al.*<sup>[9]</sup>를 참고하였다. 공기는 터널의 해석 범위를 완전히 감싸도록 모델링되었다. 공기 도메인의 하단부는 지표면으로 반사경계

(reflecting boundary)로 모델링되었다. 이외의 모든 표면은 전달경계(transmitting boundary)로 모델링되어 폭발 충격파가 공기 매쉬 바깥쪽에 도달시 반사되지 않고 소멸되도록 하였다. 공기 내부에 배치된 터널 구조물은 강체로 모델링되어 완전반사 경계로 역할을 한다. 터널 모델의 모든 표면은 폭발 충격파를 완전 반사시켜 폭압의 입사, 반사, 회절 등의 복합적 효과를 발생시킴으로써 터널 내부의 복합적인 폭압 시뮬레이션을 가능하게 한다.

터널 구조물을 강체로 모델링하는 것은 구조물과의 상호작용을 무시하는 것을 의미하며, 강체 구조물에 반사된 폭압이 지나치게 보수적으로 계산될 우려가 있다. 모델링에서의 이러한 의문점을 해소하기 위하여 구조물의 강체 모델링에 의한 폭압 시뮬레이션 결과가 실험결과에 따른 UFC 3-340-02(DOD<sup>[1]</sup>) 설계차트의 폭압과 크게 차이가 없음을 3장에서 입증하였다.

### 3. 해석모델 검증

방호터널 CFD 해석모델의 합리성을 입증하기 위하여 검증(validation) 연구를 수행하였다. 해석모델에 대한 신뢰성 검증을 위하여 첫 번째로 메쉬 수렴도(mesh convergence) 연구를 수행하였으며, 두 번째로 폭압의 안정성(stability)을 검토하였고, 마지막으로 미국의 방폭설계지침 UFC 3-340-02(DOD<sup>[1]</sup>)의 실험결과 기반 폭발하중 설계차트를 활용하여 수렴된 메쉬를 사용한 터널 모델의 폭압 예측에 대한 정확도(accuracy)를 검토하였다.

메쉬 수렴도(mesh convergence)와 폭압 안전성(overpressure stability)을 검토하기 위하여 본 터널의 폭압 측정 지점으로 폭압이 터널 입구(Fig. 1의 tunnel entrance)로 진입하여 진입부(entry space)를 거쳐 본 터널(main tunnel)로의 진입 지점으로부터 이 지점을 포함하여 5 m 간격으로 6개 지점의 터널 단면에 7개를 배치하여 총 42개(G1 - G42)를 설정하였다(Fig. 2 참조). 해석모델의 폭압 정확도 검증의 경우 터널 출입구 지표면에 3개의 폭압측정 게이지를 배치하였다. 메쉬 수렴도 검토에서는 0.1 m, 0.2 m 및 0.4 m의 3개 메쉬 사이즈를 사용하였다. 폭발파가 본 터널을 진입하는 과정에서 입사, 반사 및 회절 효과로 인하여 최대폭압의 크기가 상당히 불안정할 것으로 예상된다.

폭압 안정성 검토는 폭발 충격파의 본 터널 진입구로부터 내부로 전파시 폭압이 거리에 따라 안정화되는 구간을 정의

하기 위함이다. 거리별 관측지점에서 배치된 7개 폭압의 차이가 약 10 % 미만인 구간이 폭압이 안정화되는 구간으로 정의되었다.

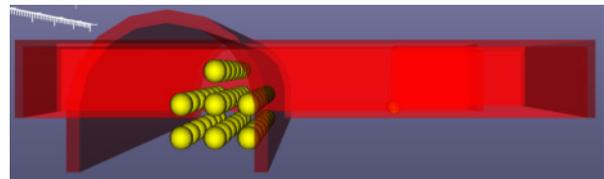


Fig. 2. Monitoring locations

#### 3.1 메쉬 수렴도

메쉬 수렴도 해석은 0.3 s까지 진행되었다. Fig. 3는 본 터널 입구로부터 10 m 거리( $d$ )에서 측정된 해당 단면 7개 지점에서의 폭압이력 결과이다. 최대폭압은 0.15 s - 0.16 s 부근에서 관측되었으며, 입사압력과 반사압력의 영향으로 상승과 감소를 반복하고 있는 모습을 보여준다. 거리 0 m, 5 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m에서의 폭압이력곡선들도 이와 유사한 모습을 보였다.

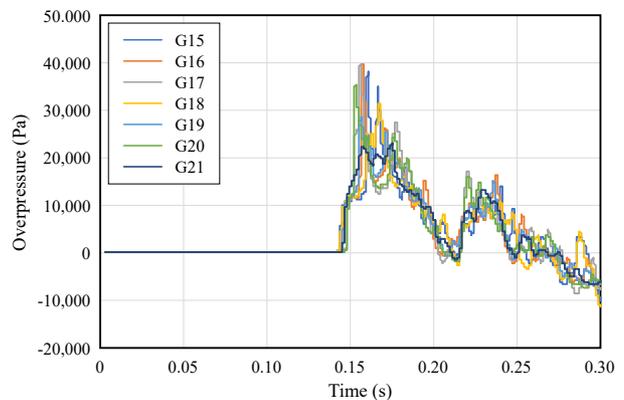


Fig. 3. Overpressure histories for monitoring locations G15 to G21 at  $d = 10$  m; mesh size = 0.1 m

방호터널의 폭압 CFD 시뮬레이션은 Fig. 4와 같이 진행되었다. Fig. 4(a)는  $t = 15$  ms에서의 폭압 분포로서 초기 폭발 후 일부 충격파는 터널 출입구를 통하여 전파되었으며, 이외의 충격파는 구조물에 반사되어 전파되고 있는 모습이다. Fig. 4(b)는  $t = 146$  ms에서의 폭압 분포로서 폭발 충격파가 출입구와 진입부를 거쳐 본 터널로 전파되고 있는 모습을 보여준다. 폭압이 터널 내부에서 전파되는 동안 반사, 회절 등의 복합적인 효과가 효과적으로 구현되고 있는 모습을 확인할 수 있다.

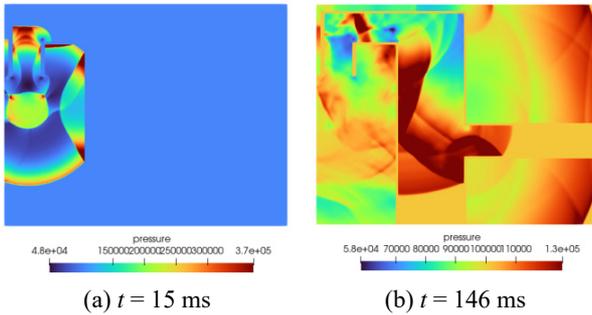


Fig. 4. Simulation results for mesh size of 0.1 m

거리  $d = 10$  m에서의 메쉬 사이즈에 따른 메쉬 수렴도 해석결과는 Fig. 5와 같다. 메쉬 수렴도 검토를 위한 폭압이력으로는 각 단면 7개의 결과들 중 지표면 중앙부에서의 결과가 사용되었다.

해석결과에서 메쉬 사이즈에 따른 압력 거동은 매우 유사하게 나타났다. 반면, 최대폭압의 경우 메쉬 사이즈 0.4 m의 결과는 다른 두 메쉬 사이즈의 결과와는 다소 차이가 발생하였으며, 0.1 m와 0.2 m의 메쉬 사이즈에 대한 최대폭압의 차이는 7.7%로 이 연구에서 설정된 메쉬 수렴도 만족 기준 10% 미만을 만족하였다. 거리 0 m, 5 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m에 대해서도 동일한 경향이 관측되었다.

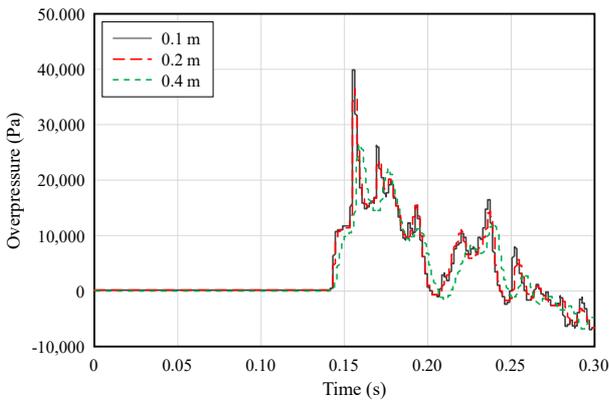


Fig. 5. Overpressure histories depending on mesh sizes at  $d = 10$  m

메쉬 사이즈에 따른 거리별 최대폭압 결과를 Fig. 6와 같이 비교하였으며, 거리별 메쉬 사이즈 간의 오차를 Fig. 7과 같이 나타내었다.

메쉬 사이즈 0.2 m와 0.4 m에 대해서는 최대폭압에 대하여 대략 10% - 24%의 오차로 수렴되지 않은 결과가 도출되었다. 반면, 0.1 m와 0.2 m의 메쉬 사이즈는 전체적으로 10% 이하의 오차를 도출하여 수렴된 결과가 도출된 것으로 분석되었다. 따라서 외부 폭발에 대한 본 터널에서의 최

대폭압의 경우 메쉬 수렴도는 0.2 m 이하의 메쉬 사이즈에 대하여 얻어지는 것으로 평가된다. 수치 해석의 특성상 메쉬 사이즈에 따라 해석 시간이 급격히 증가하는 것을 고려하여 이 연구의 터널 모델에 대한 최적 메쉬 사이즈는 0.1 m와 0.2 m 사이의 수준이 적절할 것으로 판단되었다. 본 해석에서는 터널과 공기의 크기, 해석시간, 결과의 정확도 등을 종합적으로 고려하여 0.12 m의 메쉬 사이즈를 설정하였다.

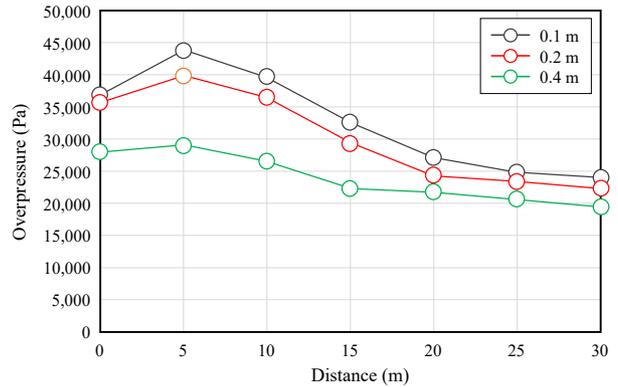


Fig. 6. Peak overpressures versus distance according to mesh sizes

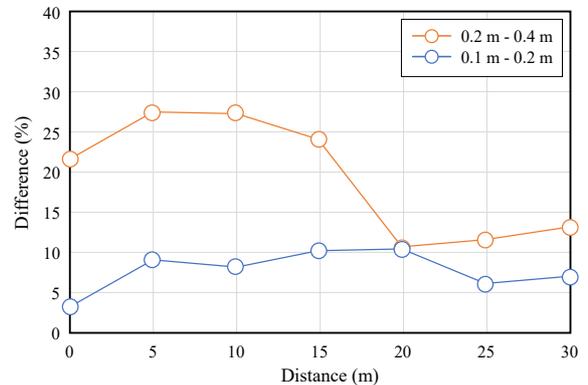


Fig. 7. Peak overpressure differences versus distance according to mesh sizes

### 3.2 폭압 안정성

본 터널 입구로부터 거리별 최대폭압의 안정성(stability)을 평가한 결과는 Fig. 8과 같다. 거리  $d = 0$  m는 본 터널의 입구 위치를 의미한다. L1 - L7은 Fig. 2와 같이 거리별 터널 단면에서의 7개 관측지점을 의미한다. 예를 들면, 거리 0 m에서 L1 - L7은 G1 - G7에 대응되며, 거리 5 m에서는 G8 - G14에 대응된다. 각 본 터널 단면 7개 지점에서의 최대폭압은 거리 0 m, 5 m, 10 m, 15 m의 경우 단면상의 위치별 폭압 변동 폭이 큰 반면, 거리 20 m, 25 m, 30 m의 경우 모두 폭압이 안정된 것을 확인할 수 있어 이 연구의 본 해석에서 폭압측

정 위치는 본 터널 입구로부터 20 m 이상의 거리에서 측정해야 함을 확인하였다.

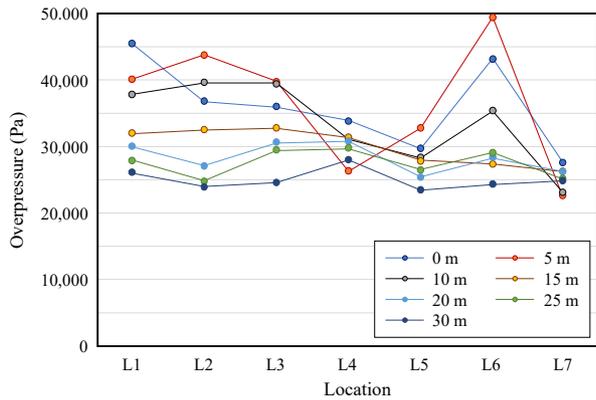


Fig. 8. Stability of overpressure versus distance from the entrance of main tunnel

### 3.3 폭압 검증

해석모델에 의한 폭압의 정확도를 평가하기 위하여 메쉬 사이즈에 따른 터널 출입구의 폭압을 미국 방폭설계지침인 UFC 3-340-02 (DOD<sup>[1]</sup>)과 비교하였다. 비교결과는 Fig. 9과 같다. 메쉬 사이즈 0.1 m와 0.2 m의 경우 최대폭압이 10%의 오차를 초과하여 수렴되지 않은 결과가 도출되었다. 이에 0.05 m에 대한 해석을 추가 수행한 결과 메쉬 사이즈 0.05 m와 0.1 m에 대하여 최대폭압의 오차가 10% 미만으로 수렴된 결과가 도출되었다.

수렴된 메쉬 0.05 m와 0.1 m에 대한 터널 출입구에서의 최대폭압은 각각 1.76 MPa 및 1.60 MPa로 UFC 3-340-02 차트에 의한 폭압(1.70 MPa)과는 각각 4% 및 6% 차이를 보여 수렴된 메쉬에 대한 해석의 정확도 또한 검증된 것으로 평가되었다.

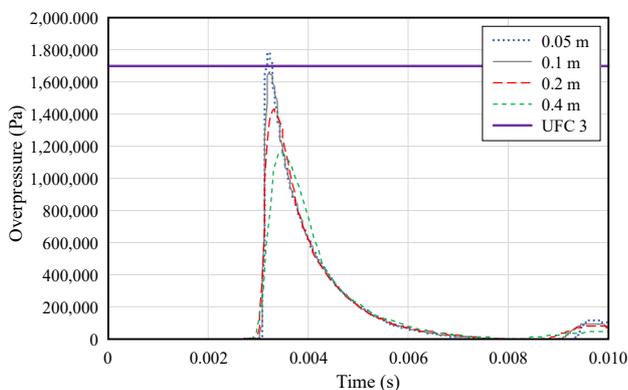


Fig. 9. Validation of numerical results in comparison to design charts in UFC 3-340-02

### 3.4 검증결과

해석모델의 검증 연구에서 본 터널의 폭압 측정시 0.1 m와 0.2 m의 메쉬 사이즈에 대하여 메쉬 수렴도를 확보하였으며, 출입구 폭압 측정시 0.05 m와 0.1 m의 메쉬 사이즈에 대하여 메쉬 수렴도를 확보하였다. 본 터널에서 폭압은 진입 입구로부터 20 m 이상의 거리에서 안정된 경향을 보임을 확인할 수 있었으며, UFC 3-340-02의 방폭설계차트를 기반으로 해석모델의 정확도를 검증하였다. 이에 따라 본 해석에서의 최적 메쉬는 0.12 m로 설정되었으며 터널 CFD 해석모델 및 모델링 방법론은 합리적으로 검증된 것으로 평가되었다.

## 4. 폭발 시나리오

앞서 검증된 방호터널의 기준모델을 이용하여 본 터널의 폭압을 저감시키기 위한 변수해석을 수행하였다. 변수 해석 매트릭스는 Table 1과 같다. Model No. 1의 모델명은 90-05-arc로 되어 있는데, 이는 입구경사가 90도이고, 폭풍함정의 깊이가 폭의 0.5배이며, 입구형상이 아치형인 것을 의미한다.

Table 1. Parametric study matrix for the slope of tunnel entrance and the depth of blast pocket

No.	Model	Slope (degs)	Blast pocket depth	Note
1	90-05-arc	90	0.5W	-
2	90-10-arc	90	1.0W	-
3	90-15-arc	90	1.5W	-
4	75-05-arc	75	0.5W	-
5	75-10-arc	75	1.0W	-
6	75-15-arc	75	1.5W	-
7	60-05-arc	60	0.5W	-
8	60-10-arc	60	1.0W	-
9	60-15-arc	60	1.5W	-
10	45-05-arc	45	0.5W	-
11	45-10-arc	45	1.0W	-
12	45-15-arc	45	1.5W	-
13	st-arc	90	0	Ref. model

우선적으로 고려된 설계변수는 터널 출입구의 경사와 폭풍함정의 깊이이다. 출입구에 기준 형태인 90도로부터 75도,

60도, 45도로 Fig. 10과 같이 변화를 주었다. 폭발 충격파가 입구의 상부 면에 반사되어 폭압을 증가시키는 효과를 저감하기 위하여 입구에 경사를 적용할 경우 해당 경사 각도만큼의 충격량이 터널 외부로 빠져나가게 되어 폭압을 저감시킬 수 있다.

폭풍함정은 통로가 꺾이는 부분에 2개소 설치되었으며 폭풍함정의 깊이는 Fig. 11과 같이 통로 폭( $W$ )의 0.5배, 1.0배, 1.5배로 설정되었다. 폭풍 함정 깊이를 조정할 경우 터널 내부의 폭발 충격량 측면에서는 크게 차이가 없으나 폭풍 함정 깊이만큼의 충격량이 시간차를 두고 터널 내부에 전파되기 때문에 충격량 분산에 의한 폭압 저감이 가능하다. 예를 들면, 90도로 꺾어지는 부분에 폭풍함정이 설계될 경우 충격파의 일부는 90도로 전파되고, 일부는 폭풍함정으로 분산되기 때문에 90도로 꺾여 전파되는 충격파의 폭압이 저감되는 원리이다.

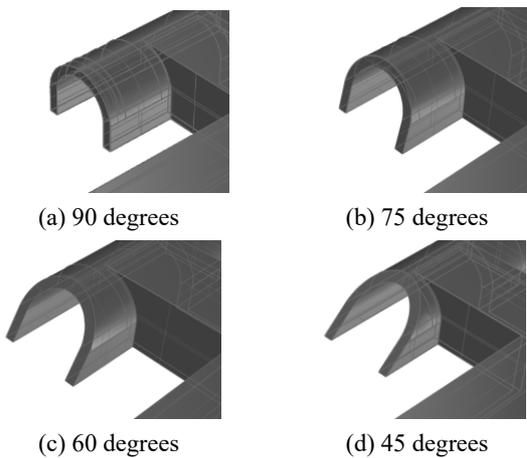


Fig. 10. Shapes varying angle of entrance slope

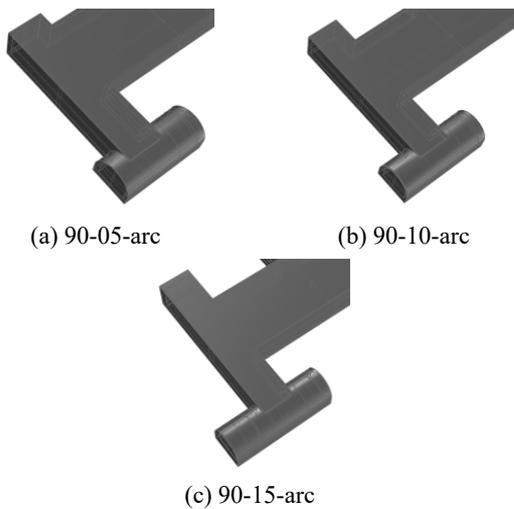
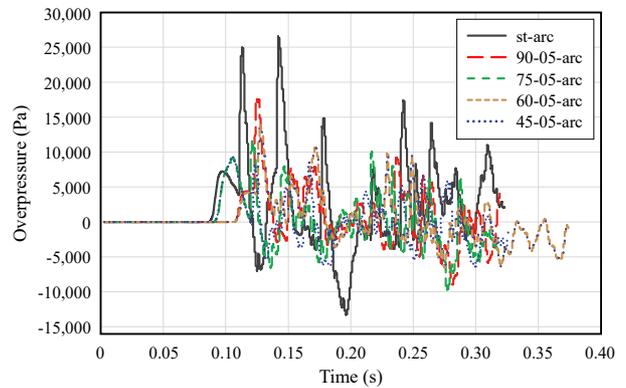


Fig. 11. Models varying the depth of blast pocket

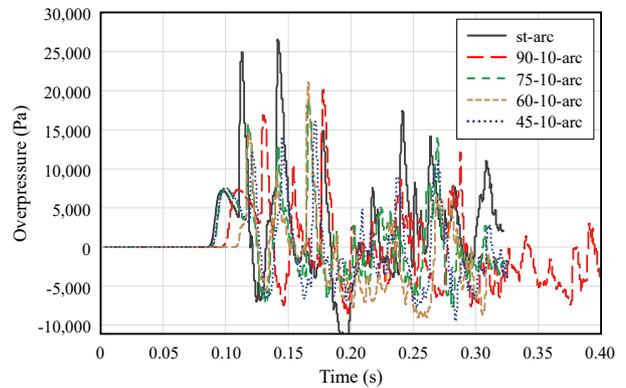
## 5. 해석결과

### 5.1 출입구 형상

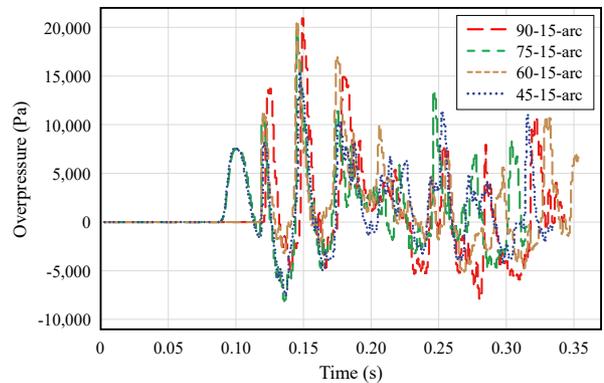
방호터널 기준 모델(st-arc)에 대하여 폭풍함정 2개소 깊이와 터널 출입구의 형상(기울기)에 따른 폭압을 해석한 결과는 Fig. 12와 같다. 기준모델에 폭풍함정 깊이를 통로 폭의 0.5배(0.5W)로 적용하였을 경우 최대폭압은 기준모델을 1.0으로 했을 경우 0.67로 저감되었다. 입구경사 75도, 60도, 45



(a) Depth of blast pocket = 0.5W



(b) Depth of blast pocket = 1.0W



(c) Depth of blast pocket = 1.5W

Fig. 12. Results varying the depth of blast pocket

도에 대하여는 최대상대폭압은 기준모델 1.0 대비 각각 0.44, 0.52, 0.35로 나타났다. 저감 효과는 예상대로 입구경사가 가장 낮은 45도에서 가장 크게 나타났다.

폭풍합정 깊이가 통로폭의 1.0배(1.0W)인 경우 입구 경사 90도, 75도, 60도, 45도에 대하여 최대상대폭압은 기준모델 대비 각각 0.76, 0.70, 0.79, 0.61로 나타났다. 상대적으로 폭풍합정 깊이가 0.5배인 경우에 비해서는 폭압저감 효과는 작게 나타났다. 폭풍합정 깊이 1.5배(1.5W)인 경우 최대 상대 폭압은 각각 0.79, 0.74, 0.78, 0.58로 나타났다.

전반적으로 폭풍합정 2개소를 반영한 방호터널에 대하여 출입구 각도에 따른 폭압저감은 상당히 효과적인 것으로 나타났다. 입구 경사의 폭압저감 효과는 폭풍합정 깊이가 통로 폭의 0.5배인 경우 전체적으로 크게 나타났으며, 입구 각도가 45도인 경우 저감 효과가 가장 크게 나타났다. 기준모델 (st-arc)의 최대폭압을 1.0으로 했을 경우 터널 출입구 경사에 따른 변수해석모델들의 상대폭압을 Table 2에 정리하였다.

**Table 2.** Overpressure reduction varying the slope of tunnel entrance

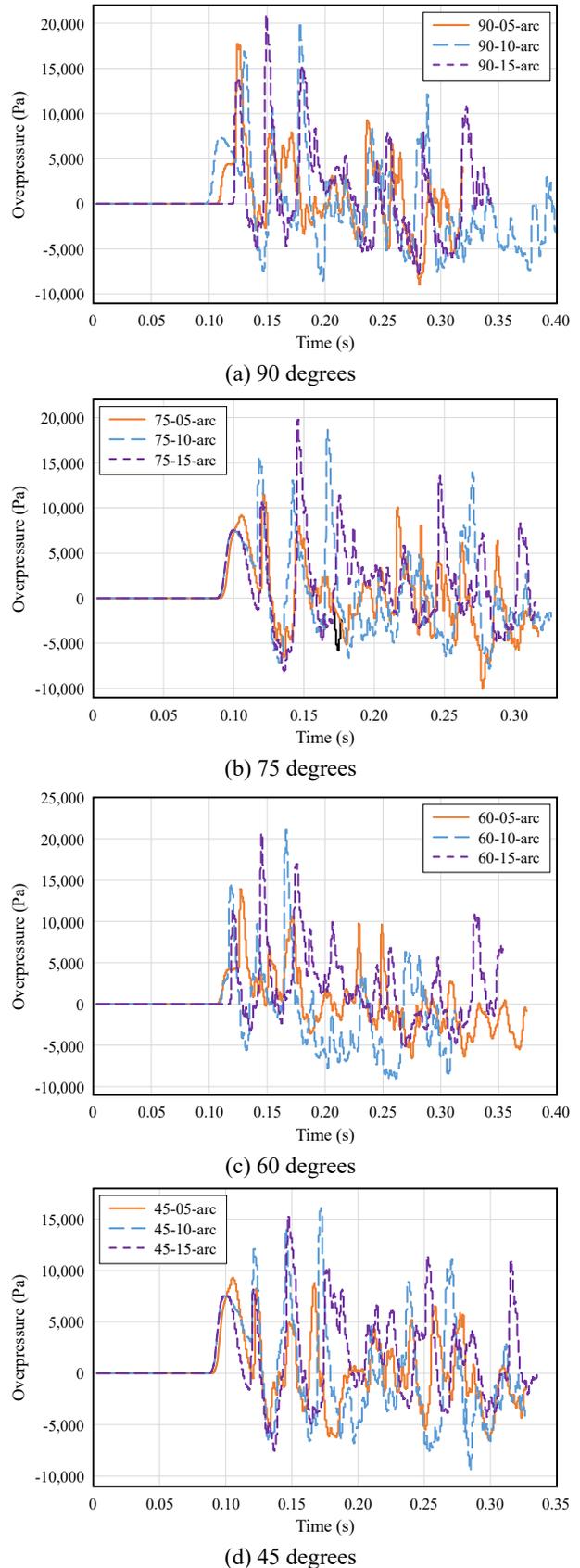
Slope of entrance	Depth of blast pocket		
	0.5W	1.0W	1.5W
90 degrees	0.67	0.76	0.79
75 degrees	0.44	0.70	0.74
60 degrees	0.52	0.79	0.78
45 degrees	0.35	0.61	0.58

\* peak overpressure for reference model (st-arc) = 1.0

### 5.2 폭풍합정 깊이

외부 폭발에 대한 방호터널의 폭압저감에 대한 입구경사에 따른 폭풍합정 깊이 효과를 살펴보았다. 출입구의 경사 각도들에 대하여 폭풍합정 깊이에 따른 폭압이력 결과를 Fig. 13과 같이 나타냈다. 입구의 경사가 90도일 때, 폭풍합정의 깊이가 통로폭의 0.5배, 1.0배 및 1.5배인 경우 방호터널의 폭압을 해석한 결과, 폭풍합정의 깊이가 통로폭의 0.5배인 경우를 기준값 100%로 하면, 통로폭의 1.0배 깊이인 경우 13.5% 폭압이 증가하는 것으로 나타났으며, 통로폭의 1.5배로 폭풍합정의 깊이를 설정하였을 경우에는 약 18% 폭압이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 경사가 90도인 경우 폭풍합정의 깊이는 통로폭의 0.5배로 하는 것이 가장 유리한 결과를 얻는 것을 알 수 있다.

방호터널 출입구의 경사가 75도인 경우 폭압은 통로폭의



**Fig. 13.** Results varying the depth of blast pocket

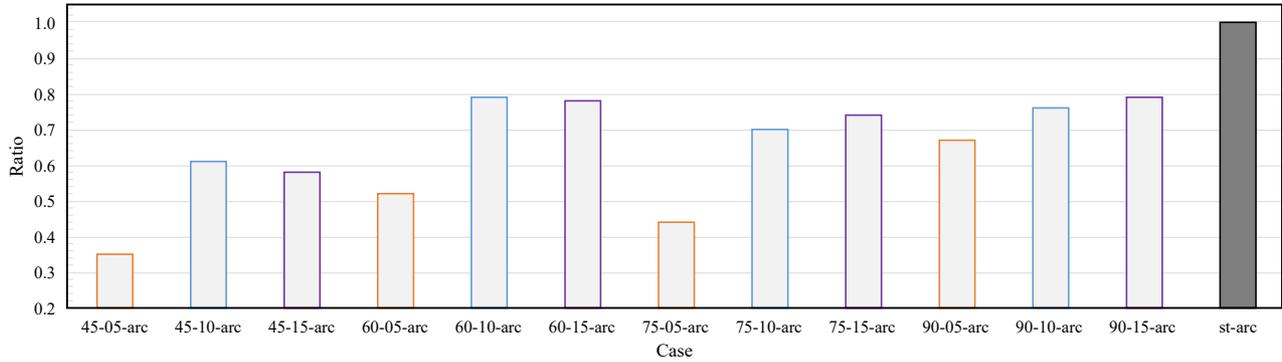


Fig. 14. Ratios of overpressures from parametric study and reference model

0.5배를 폭풍함정의 깊이로 한 경우가 가장 낮은 폭압을 보였다. 폭풍함정의 깊이가 통로폭의 1.0배와 1.5배인 경우 0.5배와 비교하여 폭압이 각각 159% 및 169.5%로 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였다. 경사 60도의 경우에도 유사한 경향을 보였는데, 폭풍함정 깊이 0.5배를 100% 기준으로 1.0배와 1.5배의 경우 최대폭압이 각각 151.4% 및 148.5%로 나타났다. 입구의 경사가 45도인 경우 폭풍함정 깊이가 통로폭의 0.5배를 100% 기준으로 1.0배의 경우 172.8%, 1.5배의 경우 165.1%로 폭압이 나타났다.

입구 경사에 대하여 폭풍함정 깊이에 따른 최대폭압에 대하여 해석한 결과 통로폭의 0.5배로 폭풍함정의 깊이를 설정하는 것이 가장 유리할 것으로 판단된다.

## 6. 터널 최적 형상

방호터널 기준모델의 최대폭압이 1.0일 경우 변수해석모델들의 상대적인 최대폭압을 Fig. 14과 같이 나타내었다. 기준 모델(st-arc)의 최대폭압 1.0을 기준으로 변수해석모델들의 상대적인 최대폭압을 나타낸 것으로 ratio는 모델별 최대폭압을 기준모델(st-arc)의 최대폭압으로 나눈 무차원의 값을 의미한다. 각 변수해석모델들의 폭압저감 효과를 한눈에 확인할 수 있으며 터널의 진입부의 입구와 폭풍함정 방호설계시 근거자료로 활용 가능하다. 전체 해석결과에서 볼 수 있듯이 진입구의 각도를 45도로 하고 폭풍함정의 크기를 통로폭의 0.5배로 한 경우 폭발 압력이 최대 65%까지 저감되는 것을 확인할 수 있다.

## 7. 결론

외부 폭발에 대하여 방호터널에 설치되는 방폭밸브에 미

치는 폭압을 저감하기 위한 연구를 수행하였다. CFD 기반 방호터널의 모델을 수립하여 메쉬 수렴도와 폭압 안정성을 검토하고 계산된 폭압을 UFC 3-340-02 폭발하중 설계차트와 비교하여 검증하였다. 검증된 터널 모델을 이용하여 터널 출입구 경사, 폭풍함정의 깊이와 형상을 변수로 변수해석을 수행하여 터널의 최적 형상을 제안하였다.

터널 출입구의 경사 각도 조절엔 폭압 저감에 매우 효과적인 것으로 확인되었다. 폭압은 출입구 경사가 45도일 때 최대 47.5%까지 저감되었다. 출입구의 경사에 의한 폭압 저감 효과는 폭발 위치가 입구에 가까워질수록 더 커질 것으로 예상된다. 폭풍함정 깊이의 경우 통로폭의 0.5배를 적용하였을 경우 1.0배와 1.5배와 비교하여 효과적으로 폭압을 저감시키는 것을 확인하였다. 통로폭 0.5배의 경우 입구 경사에 따라 33% - 65% 폭압을 저감시켰다.

방폭밸브가 설치되는 시설의 건설비용은 폭압의 크기에 따라 크게 증가하므로 본 연구는 방호터널에 설치되는 방폭밸브의 내압등급을 낮춰 건설비용을 효과적으로 절감시킬 수 있을 것으로 기대되며, 수집된 데이터베이스를 기반으로 후속 연구를 통하여 보다 효과적인 폭압저감 설계가 가능할 것으로 사료된다.

또한 후속 연구에서는 확장챔버 및 폭풍함정의 최적화를 통해 외부의 폭압으로부터 터널 내 각종 시설물의 폭압을 지연, 저감시킬 수 있는 방안을 연구 중에 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(21CTAP-C163526-01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Department of Defense (2008) *Unified Facilities Criteria (UFC): Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02), USA.
- [2] Hager, K., and Birnbaum, N. (1996) Calculation of the Internal Blast Pressures for Tunnel Magazine Tests, *Proceedings of the 27th DoD Explosives Safety Seminar*, Naval Facilities Engineering Service Center, USA.
- [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, USA.
- [4] Pang, S.-K., Shin, J.-W., and Kim, W.-D. (2018) Evaluation of Pressure Effects on Blast Valves for Facility Protection of Underground Computing Center, *Journal of the Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy*, KSGHE, Vol.14, No.3, pp.21-28 (in Korean).
- [5] Rose, T.A. (2001) *An Approach to the Evaluation of Blast Loads on Finite and Semi-Infinite Structures*, Ph.D. Dissertation, Cranfield University, UK.
- [6] Shim, K.B., and Lee, T.S. (2020) Design of Frame Type Blast Door Reflecting Explosion Proof Test, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.2, pp.67-74 (in Korean).
- [7] Shin, J., and Lee, K. (2016) A Numerical Analysis for Blast Pressure and Impulse from Free-Air Burst, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.4, pp.271-280 (in Korean).
- [8] Shin, J., Whittaker, A.S., Aref, A.J., and Cormie, D. (2014) *Air Blast Effects on Civil Structures*, Technical Report MCEER 14-0006, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (University at Buffalo, New York), USA.
- [9] Shin, J., Whittaker, A., and Cormie, D. (2015) Incident and Normally Reflected Overpressure and Impulse for Detonations of Spherical High Explosives in Free Air, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.141, No.12, 04015057.
- [10] Smith, P.D., and Hetherington, J.G. (1994) *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Butterworth-Heinemann, USA.
- [11] Stirling Simulation Services Limited (2020) *Viper Blast User Manual and Examples for Version 1.17.0*, SSS, UK.
- [12] Wada, Y., and Liou, M.-S. (1994) *A Flux Splitting Scheme With High-Resolution and Robustness for Discontinuities*, NASA Technical Memorandum 106452, National Aeronautics and Space Administration, USA.
- [13] Zhao, B.-I., Cui, C.-Y., Chen, J.-P., and Wang, Y. (2015) Numerical Simulation about the Effect of Tunnel Expansion Chamber on the Shock Wave Attenuation, *Proceedings of the 2015 4th International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (ICCMCEE 2015)*, Atlantis Press, China, pp.589-594.

---

**요약**: 본 논문은 외부 폭발에 대하여 방호터널의 입구형상과 폭풍함정에 의해 폭압을 저감시키기 위한 연구이다. 방호터널의 3차원 CFD 해석모델을 수립하여 메쉬 수렴도와 폭압 안정성을 검토하였고 미국 방폭설계지침인 UFC 3-340-02를 기반으로 폭압을 실증적으로 검증하였다. 검증된 모델을 이용하여 입구형상과 폭풍함정을 달리하여 변수해석을 수행하였다. 입구형상과 폭풍함정은 효과적으로 폭압을 저감하는 것을 확인하였다. 터널 최적 형상으로 입구 경사 45도와 폭풍함정 깊이의 통로 폭 0.5배를 적용하여 터널의 최대 폭압을 65% 저감하였다. 본 연구는 방호터널에 설치되는 방폭밸브의 내압등급을 낮춰 건설 비용을 효과적으로 절감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어**: 방호터널, 입구형상, 폭풍함정, 폭압저감, CFD 모델링

---