

# 수치해석기법을 이용한 실내시험장 압력특성해석 및 개념설계

정희영<sup>1)</sup> · 박관진<sup>\*1)</sup> · 김남혁<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제8기술연구본부

## Pressure Analysis and Conceptual Design for Indoor Ballistic Test Range by Numerical Methods

Hui-Young Jung<sup>1)</sup> · Kwan-Jin Park<sup>\*1)</sup> · Nam-Hyuk Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 8th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 15 March 2016 / Revised 27 June 2016 / Accepted 9 December 2016)

### ABSTRACT

For evaluating a large caliber ammunition tests, indoor ballistic test range is required to reduce the noise and fragments occurring during the test. To ensure the reliability of the indoor ballistics test range design, we carried out the analysis of the indoor test range using the AUTODYNE hydrodynamic code before its construction. The 120 mm tank ammunition is adopted as a reference model and we analysed the characteristics of the pressure distribution at fire area, the structure design at impact area, the over-pressure applied to the tunnel, and the sabot stopper design. The results of the analysis were applied to the design of the indoor ballistic test range.

Key Words : Indoor Test Range(실내시험장), 120mm Tank Ammunition(120mm 전차포탄), Pressure Analysis(압력특성 해석), Axisymmetric Analysis(축대칭해석)

### 1. 서론

최근 삶의 질 향상과 관련하여 소음, 진동, 파편 등을 유발하는 각종 포 발사 및 폭압 발생시험에 대한 야외 시험장 주변의 민원이 증가하고 있으며, 이에 대한 대책 중 하나로 실내시험장 건설이 요구되고 있다. 대표적인 사례로는 스위스 Armasuisse의 Testcenter내 실내시험장인 LNBR(Low Noise Ballistic Ranges)을 들 수 있다.

LNBR은 스위스의 휴양도시 Thun의 외곽에 위치해 있으며, 주변 주민들의 소음에 대한 거부감을 줄이기 위해 터널 상부를 흙으로 덮어 100 dBA 이상의 소음을 75 dBA(Motor Bike와 유사) 감소시켜 주변 주민 민원을 해결한 대표적인 사례<sup>[1]</sup>이다. 이러한 실내시험장은 사격 및 계측 관련 업무가 모두 실내에서 이루어지므로 소음 해결은 물론, 날씨로 인한 사격 및 계측 제약사항, 파편으로 인한 화재 및 탄 도비 문제에 대해서도 좋은 대안이 되고 있으며, 장기적으로는 시험업무 시스템화를 통한 업무 효율 및 시험 신뢰도 향상의 결과를 가져온다.

\* Corresponding author, E-mail: kjpark@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

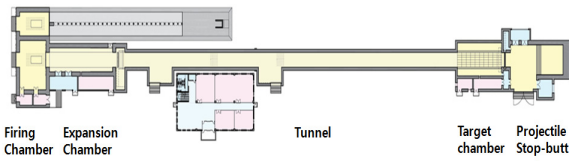


Fig. 1. Sectional view of indoor ballistic test range

실내 시험장은 사용 용도에 따라 다양한 구조로 설계되어 건설되는데, 각종 직사화기 및 전차포탄에 대한 성능 시험평가가 업무 수행을 위해서는 Fig. 1과 같이 사격진지(Firing chamber), 터널(Tunnel) 그리고 탄착지역(Projectile Stop-Butt)을 갖춘 콘크리트 터널구조로 건설되어야 하며, 사격 및 폭발 시 발생하는 각종 충격과와 압력, 파편 등에 의한 손상을 방지하기 위해서는 시험장 설계 단계부터 충분한 검토가 이루어져야 한다.

최근 전산기 및 프로그램 설계 기술의 급격한 발전에 따라 시뮬레이션에 의한 해석에 대한 신뢰도가 높아지고 있으며, 특히 시뮬레이션에 의한 해석은 고 비용, 고 위험도의 실물실험과 이론식에 의한 평가 방법보다 효과적인 것으로 알려져 있다<sup>[2]</sup>. 대표적인 폭발압력 해석 프로그램으로는 유체동력학(Hydrodynamics) 코드로 알려진 LS-DYNA와 AutoDyne 등이 있다. 이 중 AutoDyne은 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하여 4가지의 지배방정식(질량, 운동량, 에너지 보존법칙 및 상태방정식)을 외연적 시간적분법(Explicit Time Integration)으로 계산한다. 또한, 폭발압력 해석에 요구되는 다양한 재료 물성 데이터베이스를 제공하므로 방호 구조물, 철근 콘크리트 구조 및 부재에 대한 폭발 효과와 거동, 폭발 저항 성능에 대한 수치 해석등의 연구 논문에서도 활발히 사용되고 있다<sup>[3-6]</sup>.

본 연구에서는 국내 최초로 건설되는 대구경 전차포탄 사격이 가능한 실내시험장 설계의 신뢰성 확보를 위해서 AutoDyne을 사용하여 전산모사를 이용한 압력 분포 해석을 수행하였으며, 해석 조건은 실내시험장 예상 시험 품목 중 포 발사 속도 및 압력이 가장 높은 120 mm 전차포탄 사격하중을 적용하였다.

120 mm 전차포탄은 날개안정철갑탄(APFSDS-T : Armour Piercing, Fin Stabilized, Discarding Sabot-Tracer)과 대전차고폭탄(HEAT-T : High Explosive Anti Tank-Tracer), 두 종류에 사용한다. 날개안정철갑탄은 운동 에너지에 비례하여 관통력이 증가함으로 추진압력과 포구속도가 상대적으로 높으며, 사격진지에 대한 압력 해석과 이탈피 멈춤장치(Sabot Stop)에 대한 강도 해석

모델로 날개안정철갑탄을 사용하였다. 대전차고폭탄(성형작약탄)은 표적에 탄착하는 순간 고온, 고압의 폭발 에너지를 이용하여 관통력이 생성되므로, 탄착지역에서 고폭탄 폭발 시 발생하는 폭발압력을 해석하기 위한 모델로 사용하였다.

콘크리트 터널 구조로 이루어진 실내시험장은 밀폐된 구조 특성으로 사격진지에서의 포 발사 압력과 탄착지역에서의 고폭탄 폭발로 발생된 압력들이 터널구간을 따라 함께 전파하게 된다. 따라서 본 논문에서는 실내시험장내에서 전차포 발사 시 사격진지의 압력분포 및 탄착지역에서 폭발 시의 압력분포 해석을 먼저 수행한 후, 이 결과를 이용하여 포 발사와 탄 폭발 시 터널 내부에 가해지는 총 압력을 해석하였으며, 마지막으로 탄도 초기 구간에 설계된 이탈피 멈춤장치에 대한 강도 해석을 수행하는 순으로 실내시험장 압력분포 해석 및 개념 설계를 수행하였다.

## 2. 전차포 발사 압력 예측

사격진지는 포 발사압력에 대한 구조안전성 확보는 물론 발사장치 운용자와 각종 계측장치가 설치, 운용되는 장소이므로 발사압력에 대한 검토가 충분히 이루어져야 한다. 따라서 다음과 같은 과정으로 사격진지 압력 분포 해석을 진행하였다.

- ① 강내탄도 해석 코드를 이용한 탄체 포구 이탈시 추진가스의 압력 및 내부에너지 분포 해석
- ② 상기 분포를 초기 조건으로 포열 주위의 축대칭 조건(2-D)을 사용한 압력 전달 해석
- ③ 압력파가 실내시험장 벽체에 도달하는 시점부터 Mapping 기법을 사용하여 3차원 압력 전달 해석  
상기 해석 결과를 야외시험 계측결과와 비교분석을 통하여 타당성을 확인하였으며, 결과 분석을 통하여 사격진지 주위의 압력분포를 제시하였다.

### 2.1 강내탄도를 이용한 탄체 포구이탈 조건 해석

120 mm OOO용 날개안정철갑탄은 8.6 kg의 추진체가 적용되며, 강내 최고압(약실압력)은 측정압 690 MPa, 포구 속도는 1,800 m/sec이다. 이 조건을 적용하여 포구 이탈시의 추진가스의 상태를 분석하기 위하여 강내탄도 프로그램인 PRODAS(Projectile Rocket Ordnance Design & Analysis System)를 사용하여 해석하였다. 추진체의 완전연소를 가정하고 탄약과 포열의

기하학적 모델링으로부터 강내 최고압과 포구속도를 구현할 수 있도록 추진체의 웹(Web)크기, 연소율 지수 등 각종 변수를 조절하여 해석을 수행하였다. Fig. 2는 강내 탄체 진행에 대한 압력변화 선도로서, 탄체 포구 이탈 시(Fig. 2에서 440 mm 지점) 탄저부(Base) 압력은 85 MPa, 약실(Chamber)압력은 135 MPa이다.

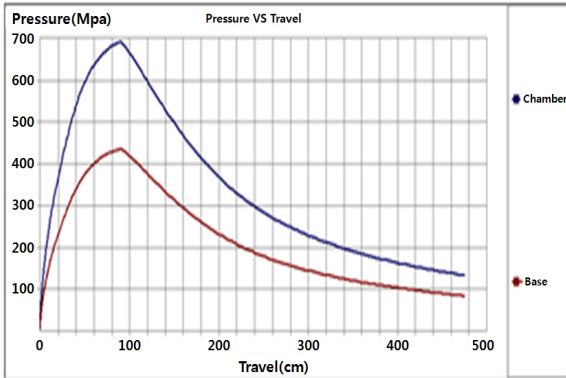


Fig. 2. PRODAS's analysis : pressure vs travel

추진체의 완전연소(Burn-Out)이후의 가스거동을 이상기체의 단열팽창(Adiabatic Expansion)으로 가정하면, 압력(P)과 체적(V)의 관계는 식 (1)과 같다.

$$P \cdot V^\gamma = const. \quad \text{where } \gamma = C_p / C_v \quad (1)$$

식 (1)에서  $\gamma$ 는 비열비,  $C_p$ 는 정압비열,  $C_v$ 는 정적비열이다. 단열과정에서 추진가스의 내부에너지(U)의 변화는 식 (2)와 같이 단열일(W)과 같으며, 이상기체에 대한 폴리트로프(Polytrope) 과정에서의 단열일은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$U_2 - U_1 = -W \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{\gamma - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) \quad (3)$$

추진체가 연소하기 직전의 압력( $P_1$ )은 “0”이므로 압력 P에서의 내부에너지는 식 (4)와 같이 계산되며, 여기서  $\rho$ 는 밀도이다.

$$u = \frac{P}{(\gamma - 1)\rho} \quad (4)$$

일반적인 추진가스의 비열비는 1.24이며 포강내의 추진체가스의 밀도가 일정(계산에 의하면 0.137 g/cc)하다고 가정하면 탄저부 가스의 내부에너지는 3.09 MJ/kg ( $P = 85 \text{ MPa}$ ), 약실부의 내부에너지는 4.96 MJ/kg ( $P = 135 \text{ MPa}$ )이 된다. 강내에 존재하는 연소가스의 내부에너지와 압력은 약실쪽이 최대, 탄저부가 최소로 되는 선형적 분포를 가정하고 포열 주위의 압력해석에 사용하였다.

### 2.2 축대칭을 이용한 포열 주위의 압력 전달 해석

압력파가 실내시험장 벽면에 도달하기 전(포구 중심으로부터 2 m)까지의 과정을 2차원 축대칭으로 AutoDyne 코드를 사용하여 해석을 수행하였다. 전절 2.1의 해석결과를 이용하여 포열과 함께 탄두가 포신의 끝에 도달할 때의 압력과 속도(1,794.7 m/sec)를 초기 값으로 포신 해석을 진행하였으며, 약 40만개의 오일러(Euler) 요소와 25개의 라그랑지(Lagrange) 요소를 커플링<sup>17)</sup>하여 Fig. 3과 같이 모델링하였다.

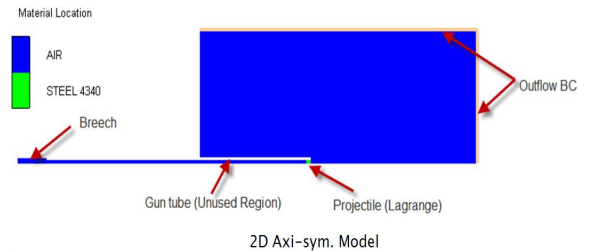


Fig. 3. Analysis model for pressure distribution around the muzzle at the time of firing

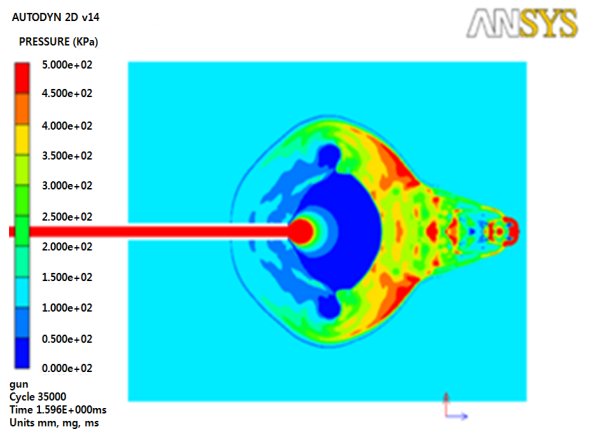


Fig. 4. Pressure contour around the muzzle

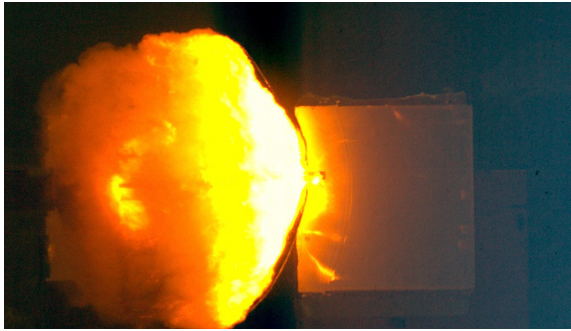


Fig. 5. Initial flight image of tank ammunition

Fig. 4는 탄두가 포신의 끝에서부터 출발하여 1.6 ms 진행된 후 포열 주위의 압력 해석 결과이며, Fig. 5는 실제 120 mm 전차포탄 발사 시 포열로부터 탄의 초기 탄도 비행영상을 초고속 카메라로 측정한 자료이다.

해석 결과를 시험 계측 결과와 비교하기 위하여 폭발 센서(PCB-137A23, 50 psi)를 포구 측면으로부터 2 m (1 m 지점은 센서 파손 가능성으로 삭제) 지점에 설치한 후, 120 mm 대전차고폭탄을 사격하여 폭발을 계측하였다. 해석과 시험에 의한 게이지압(Over Pressure)은 Table 1과 같다.

Table 1. Comparisons between analysis and measurement

Distance from muzzle	Over Pressure [kPa]	
	Analysis	Measured
1 m	388.7	-
2 m	67.0	48.3

전산 해석은 날개안정철갑탄, 실 사격 계측은 대전차고폭탄으로 수행하였지만, 포구 전방에서의 압력과 와 거동 및 분포, 포구 이격거리 2 m 지점에서의 압력수치 비교로부터 본 해석의 타당성을 평가할 수 있다. 또한, 실 사격 계측시 포구 측면 3 m, 5 m 지점에 대한 압력측정을 실시한 결과 25.5 kPa 및 13.4 kPa로 나타나, 포구 주변에 대한 압력은 거리에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다.

### 2.3 사격진지 3차원 해석

실내시험장의 사격진지는 사격준비 및 장전 등의 업무를 수행하는 진지 부분과 실제 포가 발사되는 감

압실로 이루어져 있으며, 사격 시 안전 확보를 위하여 진지와 감압실 사이는 포열이 지나갈 수 있는 정도의 공간만을 확보한 후 방폭문으로 차단하여 사격을 진행하도록 설계되었다.

따라서 진지와 감압실로 이루어진 사격진지의 3차원 해석을 위하여, 감압실과 진지 사이에는 200 mm의 틈새가 있고, 포신은 감압실로부터 2,000 mm 전진한 상태에서 지면에서 1,500 mm 높이에서 발사된다고 가정하였다. 전절 2.2의 2차원 해석 결과로부터 이를 3차원 공간상에 Mapping기법을 적용하여 Fig. 6과 같이 3차원 오일러리안 메쉬(약 384,000개)를 사용하여 해석을 진행하였으며, 오일러의 Void 영역으로의 공기 유출을 막기 위하여 12,279개의 더미 라그랑지 요소를 사용하였다.

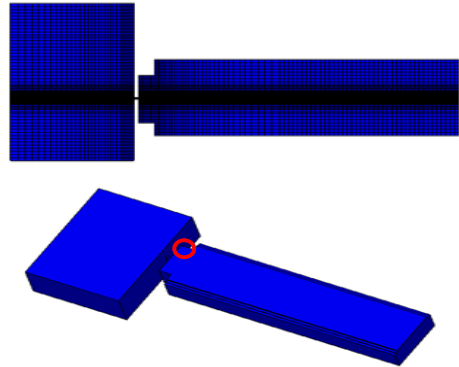


Fig. 6. 3D euler model for fire area

Gauge History ( Ident 0 - room\_filled\_norm )

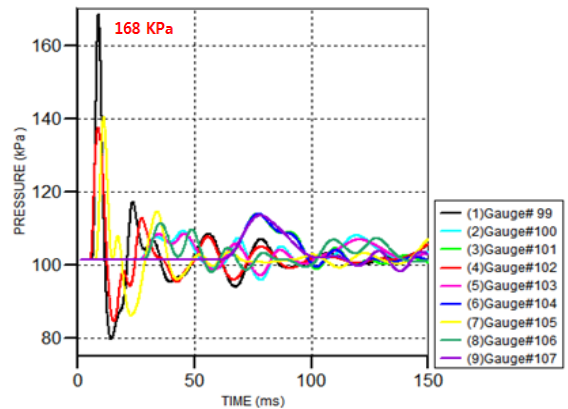


Fig. 7. Pressure distribution of decompression chamber

시간의 경과에 따른 각종 변수를 관측하기 위하여 진지 및 방폭문 감압실에 일정한 간격으로 Gauge Point를 설치하였으며, 해석 결과 감압실에서 압력이 가장 높게 작용하는 부분은 방폭문의 모서리(Fig. 6의 원표시 지점)로 Fig. 7과 같이 최대 절대압 168 kPa이 작용하였으며, 압력파는 시간에 따라 반사와 간섭에 의한 진동 및 감쇄과정을 거쳐 일정한 수준으로 수렴하였다.

위와 같은 방법으로 사격 진지 내의 위치에 따른 압력분포를 확인할 수 있으며, 이를 적용하여 진지, 감압실, 방폭문의 요구조건을 설계에 반영하였다.

### 3. 성형작약탄착지 폭발현상 해석

실내시험장에서 120 mm 대전차고폭탄(성형작약탄)의 관통시험을 수행하기 위해서는 파편 방호는 물론 화약폭발에 의한 내압성도 동시에 보유하여야 한다. 화약폭발에 의한 충격과 인장하중에 취약한 콘크리트 구조의 실내시험장에서 이러한 취약점을 보완하기 위해서는 Fig. 8과 같은 방호 구조(성형작약탄착지)가 설계에 적용되어야 한다. 이러한 구조 설계를 위하여 대전차고폭탄에 의한 폭발현상 전산모사를 실시하여 실내시험장에서 대전차고폭탄의 폭발에 의한 압력분포를 예측, 성형작약탄착지의 개념 설계에 활용되었다.

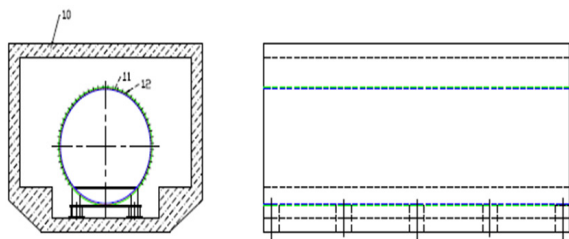


Fig. 8. Conceptual design for HEAT's impact area

전산모사에 의한 해석의 폭압 조건은 실내 시험장 운용예상 품목 중 폭발 압력이 가장 높은 Comp-B 화약이 2.1 kg 충전된 120 mm OOO용 대전차고폭탄을 기준으로, 성형작약탄착지와 폭발현상이 축대침입을 고려하여 2차원 축대침입으로 Eulerian 연산자를 사용하여 해석하였다. 해석의 효율과 정밀성을 향상시키기 위하여 아래와 같은 기법을 포함하여 해석을 수행하였다.

- ① 기폭에 의한 압력파가 실내시험장 벽면에 도착하기 직전까지 상세(Fine Element) 해석.
- ② 압력전파가 실내시험장 벽체에 도달시점부터 상기 해석 결과를 Mapping 기법을 사용하여 전체(Coarse Mesh) 해석.

#### 3.1 성형작약탄 초기 폭발해석

성형작약탄착지의 개념설계안은 반지름 3 m, 길이 20 m이며, 한 쪽이 밀폐되는 구조로 성형작약탄은 중심부에서 기폭된다고 가정하였다. 기폭에 의한 압력분포만을 해석하기 위하여 탄체가 없는 순수 COMP-B만을 모델링(Bare Charge)하였으며, 해석의 효율과 정밀성을 향상시키기 위하여 Fig. 9와 같이 우선적으로 제한적 공간(반경 1.5 m, 길이 3 m 구간)에 500,000개의 Eulerian Cell을 사용하였다.

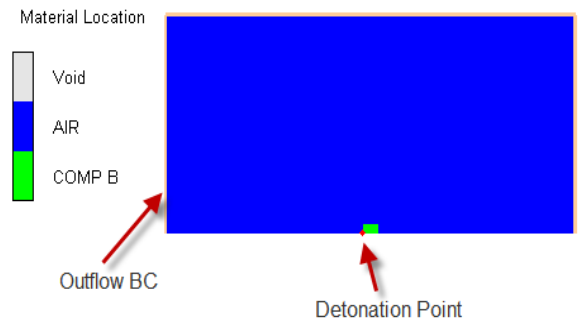
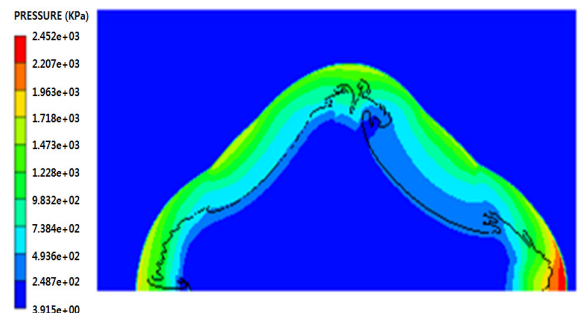


Fig. 9. 2D euler model



#### Pressure Contour

Fig. 10. Pressure contour of COMP-B

Fig. 10은 기폭 후 압력파가 경계면에 도달하기 전까지의 압력 분포 선도이며, 압력파가 경계에 도달하기 직전(기폭 후 0.483 ms)에 해석을 중단하였다.

### 3.2 공간 압력 전파 해석

3.1절의 초기 폭발해석 결과로부터 성형작약탄착지 공간상에 Mapping기법을 적용하여 오일러리안 메쉬(약 172,000개)로 연결 후 해석을 계속 진행하였다. Fig. 11은 기폭 1.4 ms 경과 후의 압력 분포선도이며, Fig. 12는 가장 압력이 크게 발생하는 기폭지점 원주상의 시간에 대한 압력변화선도이다.

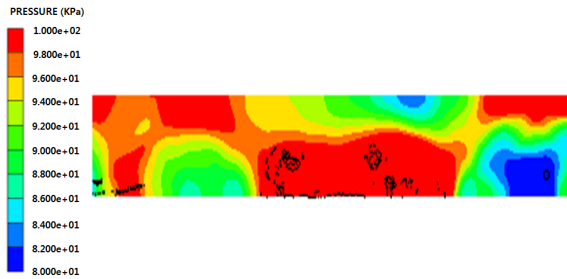


Fig. 11. Pressure distribution for HEAT's impact area at 1.4 ms

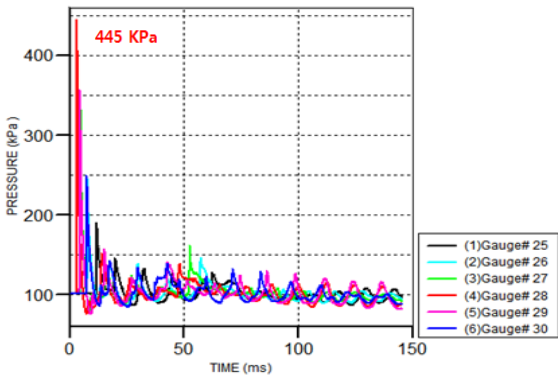


Fig. 12. Pressure vs time at impact area

해석 결과, 탄착지내에서의 폭발압력(파)은 약 3,000 m/s의 속도로 전파되어 기폭지점 원주방향 지점(기폭 지점으로부터 3 m 지점)에서 최대 절대압 445 kPa의 압력이 작용하였으며, 이후로는 반사의 영향으로 진동과 감쇄를 나타내었다.

해석 결과의 타당성을 분석하기 위하여 실제 시험 계측결과<sup>[8]</sup>와 비교하였다. 폭풍형 화약 Tritonal 2 kg의 내폭풍압시험(Internal Blast) 결과로부터, 3.6 m 이격된 위치에서 최대압력은 715 kPa으로 계측되었으며, 해석 결과와 비교하였을 때, 38 %의 오차가 존재하지만 해석 결과는 충분히 타당성이 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 성형작약탄착지 개념설계

3.2절의 해석 결과로부터 성형작약탄착지에 작용되는 최대 내압은 445 kPa임을 확인하였다. 항복강도 300 MPa의 일반탄소강을 소재를 사용하면 내압 용기 응력공식( $t = p \cdot r / \sigma$ )에 따라 최소 두께는 4.45 mm가 요구된다. 그러나

- ① 반영구적 사용을 위한 구조적 안전계수
- ② 반복 하중에 의한 피로파괴 방지
- ③ 각종 파편 방호를 위한 방탄판재의 설치 및 판재 조립용 구멍 설치
- ④ 탄착지 내 중량물 취급을 위한 플랫폼 설치 등

의 다양한 기능을 부여하기 위하여 실시설계 단계에서는 안전계수 10을 적용하였다. 따라서 탄착지 내부에 설치되는 성형작약탄착지는 반지름 3 m, 길이 20 m, 그리고 두께 50 mm의 원통형 고탄소강으로 제작되도록 설계하였다.

## 4. 터널구간 압력전파 해석

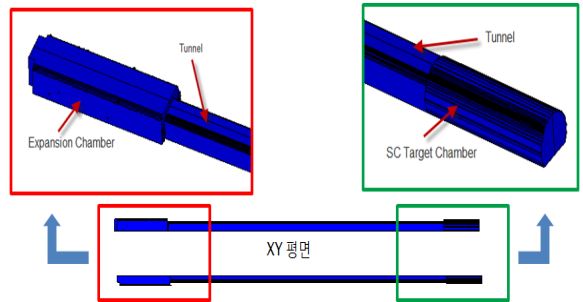


Fig. 13. Pressure propagation modeling of the tunnel for indoor test range

실내시험장 내 터널구간 압력전파에 대한 최악의 조건 설정을 위해 사격진지는 120 mm 날개안정철갑탄으로, 탄착지는 Comp-B 화약을 사용하는 120 mm 대전차고폭탄 대한 해석결과를 이용하여 압력전파 해석을 수행하였다. Fig. 13과 같이 612,000개의 Euler 3차원 요소를 사용하여 감압실로부터 터널을 포함한 성형작약탄착지까지 모델링을 실시하였으며 양 끝단(감압실과 성형작약탄착지)은 단혀있다고 가정하였다. 2장의 사격 진지 해석 결과를 1차로 Mapping한 후,

해석이 진행되면서 탄 발사 후 탄착지 도착까지의 비행시간을 고려하여 107.61 ms 경과 후에 3장의 탄착지에서 탄 폭발시의 압력 해석결과를 Mapping하여 전체 터널구간에 대한 압력 계산을 수행하였다.

사격진지에서 탄 발사 후 약 2.7초까지 압력 해석을 수행하였으며 해석 결과, 양단 위치(감압실과 성형작약탄착지)에서 발생된 압력과는 음속의 속도(331.5 m/s)의 속도로 각각 터널 구간을 진행하였으며, 진지에서 125 m 지점에서 두 개의 압력파가 중첩하면서 114 kPa(과압으로는 0.13 bar)의 가장 높은 압력이 발생되었다.

Gauge History ( Ident 0 - tunnel\_high )

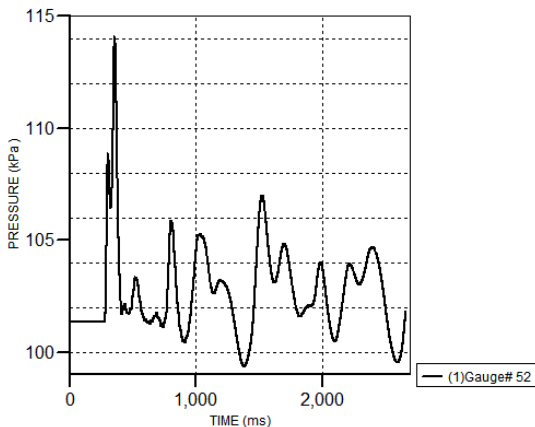


Fig. 14. Pressure variation in the 125 m tunnel

Fig. 14는 터널구간 125 m 지점의 압력변화 선도이다. 각각의 압력파는 약 0.6초를 주기로 중첩/반사가 이루어지며, 약 5회의 반사가 발생한 경우에도 압력의 감쇄현상은 미미하였다.

터널내의 공기의 속도는 탄 폭발 직후 최대 20 m/s 였으나, 진지에서 발생하는 공기속도 성분과 중첩 및 반사과정을 거치면서 2.7초 후에는 최대 6 m/s의 속도로 감쇄되었다. 이는 사격 직후, 터널 내에 다소의 공기 유동이 유지될 것이 예상된다.

## 5. 이탈피 멈춤장치 강도해석

이탈피 멈춤장치(Sabot Stop)는 실내시험장에서 날개 안정철갑탄을 발사할 때 수반되는 이탈피의 고속 분산

으로부터 콘크리트 구조물을 보호하여 시험장의 구조적 안전성을 확보하기 위해 포구 전방에 설치하는 강철 소재의 구조물로서, 충분한 내충격성을 보장할 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위해서, AutoDyne으로 80,926개의 Solid Lagrangian 요소와 180,061개의 Shell Lagrangian 요소를 사용하여 Fig. 15와 같이 모델링하여, 이탈피 충돌장치에 대한 관통해석을 수행하였다. 해석조건은 가장 악조건인 경우를 고려하여 120 mm 날개안정철갑탄의 이탈피가 1,800 m/s속도로 각각 두께 100 mm, 150 mm, 200 mm 이탈피 멈춤장치에 수직으로 충돌하는 것을 가정하였으며, 이탈피와 함께 폭압(감압실에서 계산된 최대폭압 168 kPa)이 작용되도록 경계조건을 부여하였다.

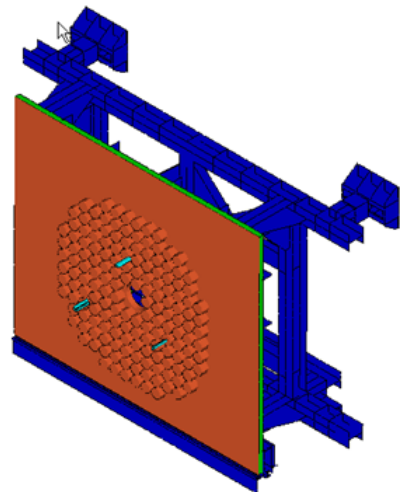


Fig. 15. FE analysis mode for sabot stop

해석결과, 두께 100 mm, 150 mm 이탈피멈춤장치는 이탈피가 관통하였으나, 200 mm 멈춤장치는 관통되지 않았다. 그러나 이탈피 멈춤장치의 안전성, 경량화, 유지보수 등을 위하여 두께 100 mm의 강판을 이용하되 Fig. 15와 같이 원통형의 돌기를 적용하여 상당두께(접촉면 돌기부분)가 200 mm가 되도록 충돌판을 보강해 주는 개념을 설계에 적용하였다.

## 6. 결론

실내시험장의 구조설계와 안전성 확보를 위하여 압력특성 및 개념설계를 진행한 결론은 아래와 같다.

- (1) 120 mm 날개안정철갑탄과 대전차고폭탄을 이용하여 사격진지와 탄착지역에서의 전산모사를 수행하였으며, 실제 시험결과와 비교하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 또한, 사격진지와 탄착지에 대한 각각의 압력 해석결과를 이용하여 실내시험장 터널내의 압력전파 특성을 분석을 위한 데이터로 활용하였다.
- (2) 대전차고폭탄(성형작약탄)을 적용한 성형작약탄착지에서의 고폭탄 폭발시 발생하는 폭발압력을 해석한 결과, 탄착치내 폭발압력은 최대 445 kPa로 나타났으며, 실제 시험 계측결과와 비교하였을 때 해석 결과의 타당성이 있다고 판단된다. 따라서 성형작약탄착지는 안전계수와 안전율등을 고려하여 반지름 3 m, 길이 20 m, 두께 50 mm의 원통형 고탄소강으로 제작해야 하는 것으로 나타났다.
- (3) 대전차고폭탄(성형작약탄)을 고려한 터널구간 압력전파 해석 결과, 탄 발사 후 양단 위치(감압실 및 성형작약탄착지)에서 발생한 압력파가 발사진지로 부터 125 m 지점에서 중첩되며 114 kPa의 압력이 발생되었으며, 0.6초를 주기로 중첩/반사가 이루어졌다. 또한 터널내 공기의 속도는 탄 폭발 직후 20 m/s에서 2.7초 후에는 최대 6 m/s로 감쇄되어, 사격 이후에도 터널 내의 공기의 유동이 다소 유지될 것으로 예상되었다.
- (4) 날개안정철갑탄을 고려한 이탈피 멈춤장치(Sabot Stop) 해석 결과, 200 mm 두께의 강판에서만 관통이 되지 않는 것으로 나타났다. 하지만, 장치의 안전성, 경량화, 유지보수 성능확보를 위해 충돌면의 상당두께(접촉면 돌기부분)를 200 mm로 되도록 보강하는 설계를 적용하여, 실내시험장 구조물 파손을 방지할 수 있도록 하였다.

모든 해석결과는 실내시험장 설계, 건설에 반영되었으며 완공 후 운용 시 적극적으로 활용 될 것이다.

## References

- [1] K. M. BUCHER, "The Underground Ballistic Test Range for Large Calibre Weapons in Switzerland," E.BASLER & PARTNERS LTD, CH-8702 ZOLLIKON, SWITZERLAND, 1993.
- [2] M. H. Noh, S. Y. Lee, "Evaluation of Impact Damage Behavior of a Reinforced Concrete Wall Strengthened with Advanced Composite Materials," The Magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 1, No. 3, pp. 41-48. 2010.
- [3] E. S. Kim, J. H. Kim, J. H. Shim, J. P. Kim, J. M. Goh, N. K. Park, "A Forensic Engineering Study on Evaluation of Explosive Pressure and Velocity for LNG Explosion Accident using AUTODYN," Journal of the Korean Society of Safety Vol. 40, No. 4, pp. 56-63, 2015.
- [4] H. S. Ahn, "A Study on Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Building Caused by Blast Load," Graduate School of Konkuk University, 2014.
- [5] J. Y. Lee, "Evaluation and Improvement of Blast Resistance Performance for the Columns Using Computational Analysis," Graduate School of Konkuk University, 2012.
- [6] H. S. Choi, "Study of Residual Strength of Reinforced Concrete Columns Under Blast Load," Graduate School of Kyung Hee University, 2014.
- [7] J. W. Park, "Analysis of Structure subjected to Blast Load using Parallel and Domain Decomposition," Graduate School of Hanyang University, 2012.
- [8] S. H. Oh, J. S. Jang, H. G. Seung, T. S. Noh, D. H. Choi, "Chamber Pressure and Muzzle Velocity According to Web size of Multi Perforated Propellant," Journal of the Korea Society for Aeronautical & Sapce Sciences. pp. 921-924, 2012.
- [9] S. H. Kim, J. K. Lee, "Performance and Safety Evaluation Test Results on Castable PBX DXC-09," TEDC-319-051246, Agency for Defense Development, 2005.
- [10] O. C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method," McGraw-Hill, 1977.
- [11] K. J. Park, B. H. Jung, K. W. Lee, "The Simulation of Firing Pressure Distribution for Tank Gun in Indoor Range," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 1519-1520, 2013.