

## 탄두의 콘크리트 표적관통 시 주장약에 전파되는 압력의 수치해석

윤경재<sup>1)</sup> · 유요한<sup>\*1,2)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

<sup>2)</sup> 과학기술연합대학원대학교 무기체계공학과

### Numerical Analysis of Pressure Propagation to the Main Charge by Warhead Penetration into Concrete Targets

Kyung Jae Yun<sup>1)</sup> · Yo-Han Yoo<sup>\*1,2)</sup>

<sup>1)</sup> *The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

<sup>2)</sup> *Department of Weapon Systems Engineering, University of Science & Technology, Korea*

(Received 25 June 2015 / Revised 4 November 2015 / Accepted 29 April 2016)

#### ABSTRACT

This paper is concerned with the numerical simulation result of pressure propagation to the main charge by warhead penetration into concrete targets. In this study, we developed on-line pressure measurement method in the main charge during warhead penetration. Using the on-line pressure measurement method, we successfully recorded the pressure-time history in the main charge during the field penetration test. Then we compared result of numerical simulations with test data and found that the simulation results are in good agreement with the test results. Finally, through the numerical calculations it is concluded that the installation of liner is effective in reducing pressure level produced in the main charge.

Key Words : Numerical Analysis(수치해석), Pressure Propagation(압력 전파), Main Charge(주장약), Concrete Target(콘크리트 표적)

#### 1. 서론

최근 견고표적 등을 파괴할 수 있는 침투형 무기체계 개발에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 요새화된

견고표적을 효과적으로 파괴하기 위해서는 표적을 침투하여 관통 한 후 표적 내부에서 화약의 폭발에너지를 이용하는 것이 가장 효과적이라 할 수 있다. 이를 위하여 견고한 표적을 효과적으로 관통할 수 있는 탄체형상 설계기술과 대상 표적별로 파괴효과를 극대화할 수 있는 주장약(main charge) 조성을 설계하고 탄두에 충전할 수 있는 기술이 요구된다.

\* Corresponding author, E-mail: yyh1986@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

침투탄두의 형상 및 제원을 결정하는 탄체형상 설계 기술은 표적 침투 시 발생하는 높은 충격압으로부터 탄체를 생존시키면서 요구하는 침투성능을 만족할 수 있도록 탄체 구조 형상과 제원을 결정하는 중요 기술이다.

표적 침투시 발생하는 높은 충격압력은 탄체와 함께 내부의 주장약에도 전달되며 이 때 침투 도중 충격에 의하여 주장약에 허용압력 이상이 인가되면 반응하여 폭발로 이어지므로 표적 파괴 기능을 수행할 수 없게 된다. 침투폭탄 내에 충전되어 탄두의 종말효과를 결정하는 주장약 조성을 운용조건에 부합하도록 설계하고 탄체에 정밀 충전하는 기술은 탄체 구조설계와 함께 침투폭탄의 생존성을 결정하는 중요기술이다.

침투폭탄에 충전되는 주장약 조성을 설계할 경우 표적 침투과정에서 주장약에 전달되는 충격압에 반응하지 않도록 내충격성을 갖는 주장약 조성을 개발해야 하고 이미 개발된 주장약에 대해서는 안전하게 운용될 수 있는 범위를 결정하는 것이 중요하다. 내충격성을 고려하면서 기존 주장약을 안전하게 운용할 수 있는 범위를 결정하기 위해서는 주어진 탄체형상과 운용조건을 고려하면서 표적 침투 시 주장약에 전달되는 충격압의 정확한 크기를 결정하는 것이 중요하다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 전산해석방법을 이용하여 표적 침투시 주장약에 전달되는 충격압의 크기를 분석하고 이를 시험데이터와 비교하여 신뢰성을 검토한 후 라이너 두께의 변화가 표적 침투 시 주장약에 전달되는 충격압의 크기에 미치는 영향을 수치해석 방법을 활용하여 분석하고자한다.

## 2. 수치해석 방법

수치적 방법은 하이드로 코드(hydro code)라 불리는 전산해석 코드를 이용하여 고압충격현상을 수치적으로 전산모사하는 방법이다. 하이드로 코드에서 이용하는 지배방정식(governing equation)은 질량보존의 법칙, 운동량 보존의 법칙, 에너지 보존의 법칙이며, 편미분 방정식의 형태이다. 이 식들에 재료 모델링, 초기조건, 경계조건을 부여하여 편미분 방정식을 푸는 것이 하이드로 코드의 기본 해법이다. 하이드로 코드에는 널리 사용되는 LS-DYNA<sup>[7]</sup>, AUTODYN 등의 상용 코드가 있으며, 경우에 따라 특수한 목적으로 고유의 자체 코드를 개발하여 사용하기도 한다.

보존방정식을 수치해석 한다는 점에서는 공력해석이나 구조해석 코드와 유사성이 있으나, 하이드로 코드는 고압충격현상의 특성상 연계되는 상태방정식(equation of state)과 구성방정식(constitutive equation)이 특히 상이한 특성을 갖는다. 해석영역 내의 모든 물질에 대하여 고변형율, 대변형율을 묘사할 수 있는 동적 물성, 파괴 물성 구성방정식이 필수적이며, 국부적으로 높은 압력이 걸리는 부분과 유체로 모델링되는 부분에 대해서는 특히 물질의 상태방정식이 중요한 역할을 한다.

고비용 고위험의 표적관통시험을 통하여 기초적, 제한적 시험결과만을 획득할 수밖에 없으므로 전산수치해석을 통해서 탄두의 화약 설계 시 주장약 생존성을 침투충격 모의시험과 연계하여 설계변수 변경에 따른 성능변화를 정성적으로 비교해서 보여줌으로써 실제 시험횟수를 줄여 개발비용의 절감을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 외연적 시간적분(explicit time integration) 유한요소해석 상용코드인 LS-DYNA를 이용하여 전산해석을 수행하였다.

## 3. 주장약 충돌압력 측정시험

Fig. 1은 주장약 충돌압력 측정시험에 사용된 시험탄두 개념도를 나타낸다. 주장약 내부 세 곳에 압력센서를 설치하여 충돌과정에서 발생하는 동적압력을 폭탄 후미에 설치된 압력측정장치에서 기록하는 방식을 사용하였고 시험에서 적용된 압력센서 위치를 Fig. 1에 도시하였다.

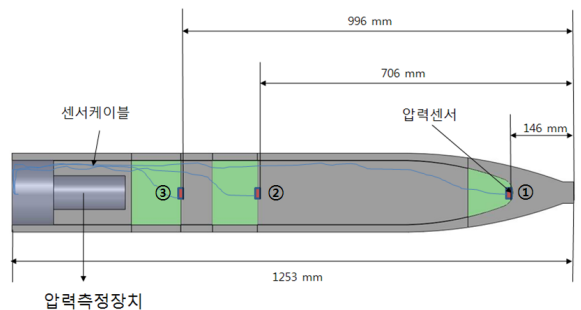


Fig. 1. Schematic diagram of test setup

실험실적 규모가 아닌 야외 콘크리트 침투시험에서 실제 침투폭탄 내부에 압력센서를 삽입하여 주장약에

전달되는 압력을 실시간으로 측정할 수 있는 시험결과는 매우 찾기 힘든 희소성이 큰 중요한 시험결과이다. 주장약 충돌압력 측정시험은 탄체 내부에 라이너 두께 1 mm를 적용하여 충돌속도 328 m/s로 시험한 경우와 라이너를 적용하지 않고 충돌속도 352 m/s로 시험한 경우 등 총 두 발을 수행하였다. 시험에서 사용된 콘크리트 표적의 두께는 1.8 m로서 0.6 m 두께의 철근콘크리트 표적 3장이 적층된 형태이다.

**4. 주장약 충돌압력 측정시험과 해석결과의 비교**

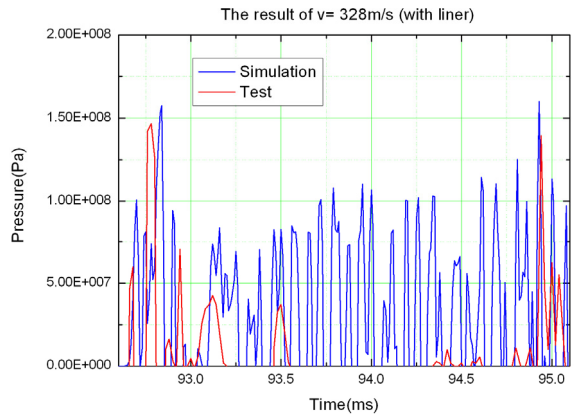
Fig. 2는 2장에서 설명된 측정방법을 사용하여 시험 탄체가 표적을 관통하는 과정에서 압력센서에 계측된 충격압력의 크기와 해석결과를 함께 나타내고 있다. Fig. 13, Fig. 14와 비교하여 시험데이터 처리 과정에서 시간축의 원점이 많이 이동되어 표시되었다. 예로 Fig. 13의 원점은 Fig. 2 (a)에서 92 ms로 표시되었다.

Fig. 2 (a)는 충돌속도가 328 m/s인 경우에 라이너 1 mm가 적용된 탄두의 주장약 앞부분에 설치된 압력센서(Fig. 1의 1번 센서)로부터 측정된 주장약 충격압력에 대한 시험계측 결과와 해석결과를 비교하여 나타내고 있으며, Fig. 2 (b)는 충돌속도가 352 m/s인 경우에 라이너를 적용하지 않은 탄두의 주장약 중간부분에 설치된 압력센서(Fig. 1의 2번 센서)에서 측정된 주장약 압력에 대한 시험계측 결과와 해석결과를 비교하여 나타내고 있다. Fig. 2의 (a)와 (b)에서 일부 전산모사와 시험결과가 다른 부분이 존재하지만 최대압력의 크기가 대체로 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 시험결과와 해석결과의 좀 더 정확한 정량적 분석을 위하여 향후 주장약 물성, 라이너 물성 및 형상 효과 등에 대한 추가적 연구가 필요하다고 판단된다.

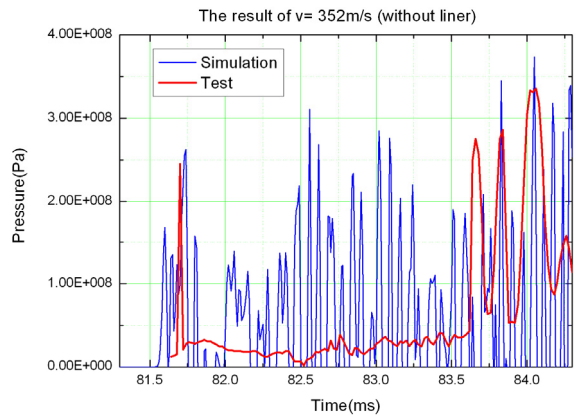
주장약 충돌압력 측정시험과 해석결과의 비교 결과를 토대로 다음 장에서는 수치해석을 통하여 주장약 충돌압력에 미치는 라이너 두께의 영향을 분석하여 보고자 한다.

**5. 주장약 충돌압력에 미치는 라이너 두께의 영향 분석**

수치해석에 사용된 전체 형상을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 탄두 부분에서 파란색 부분은 주장약,



(a) v = 328 m/s, liner thickness = 1 mm



(b) v = 352 m/s, liner thickness = 0 mm

Fig. 2. Pressure comparison of simulation and test in the main charge

빨간색 부분은 탄체, 노란색 부분은 신관 부위를 나타낸다. 그리고 Fig. 4에서는 탄두의 주요구성품인 주장약의 형상에 대해서 라이너가 없는 경우와 라이너가 있는 경우 라이너의 형상을 나타내고 있다. 라이너는 주장약과 탄체 사이에 설치되어 콘크리트 관통 시 주장약에 전달되는 충격압력을 감소시키는 역할을 수행한다.

수치해석은 크게 탄두의 실제 시험조건에 해당되는 328 m/s, 352 m/s 두 가지 충돌속도의 경우에 대하여, 그리고 라이너 두께는 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm인 경우에 대하여 탄두의 콘크리트 충돌 시 주장약에 전달되는 압력해석을 수행하였다. Fig. 5부터 Fig. 8까지는 충돌속도 328 m/s에 대해서 라이너 두께 0 mm, 1 mm,

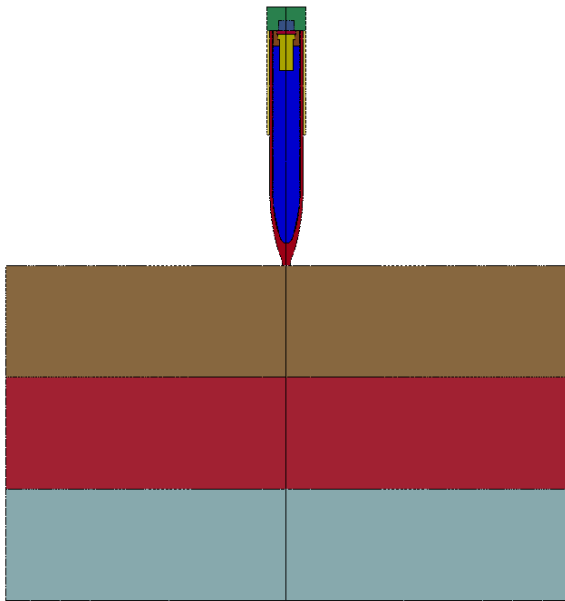


Fig. 3. Computational configuration

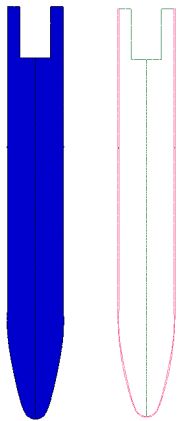


Fig. 4. Configuration of main charge and liner

2 mm, 3 mm의 네 가지 경우를 해석한 결과를 비교한 그림들이고 Fig. 9부터 Fig. 12까지는 충돌속도 352 m/s에 대해서 라이너 두께 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm의 네 가지 경우를 해석한 결과를 비교한 그림들이다. Fig. 5부터 Fig. 12까지에서 그림 안에 표시된 Fringe level은 압력 수준을 의미하며 단위는 MPa입니다.

Fig. 5부터 Fig. 12까지의 해석결과들을 살펴보면 탄두가 표적 충돌 시 발생하는 충격압력은 탄체를 통하여 주장약에 전달된다. 전산해석을 통하여 고찰된 주장약에 전달되는 충격과는 주장약 내부를 진행하면

서 짧은 시간동안에 주장약을 높은 변형률속도로 압축과 인장 변형을 유발시키게 된다. 또한 충격과는 두 가지 경로로 주장약을 통과하는 것을 해석결과로부터 확인할 수 있는데 첫 번째 경로는 표적과 충돌 시 탄체와 주장약이 접촉하고 있는 전면부에서 발생

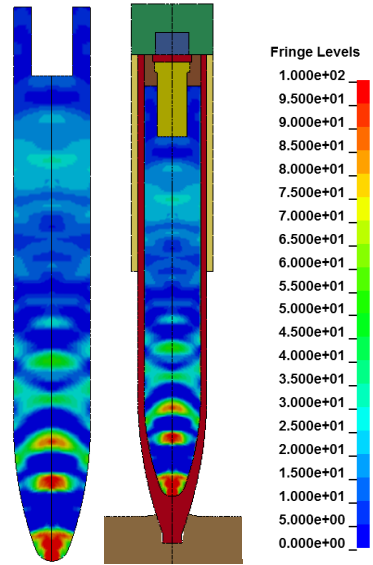


Fig. 5. Calculated pressure distribution( $v = 328$  m/s, liner thickness = 0 mm)

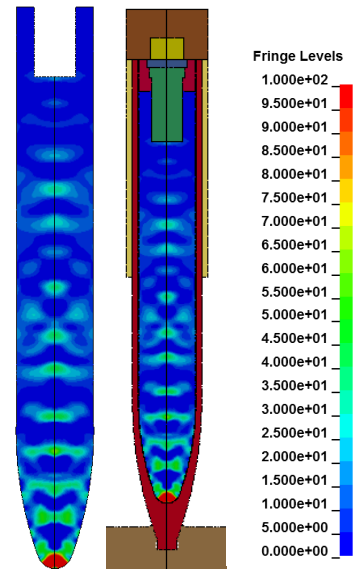


Fig. 6. Calculated pressure distribution( $v = 328$  m/s, liner thickness = 1 mm)

된 충격파가 중심축 방향으로 이동하는 것과 두 번째 경로는 탄체 전면부에서 발생된 충격파 일부는 탄체 측면을 따라 이동하면서 주장약에 충격파를 전달하여 주장약 내부를 이동하는 것으로 나눌 수 있다. 두 가지 경로에 의하여 주장약 내부를 이동하는 충격파는

일정 구간 이후 합쳐져 큰 압력값을 형성하며 주장약을 통과하는 것을 해석결과로부터 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이처럼 주장약전반에 걸쳐서 얼마나 큰 압력이 발생되며 전파되는지를 전산해석을 통해서 확인하였다.

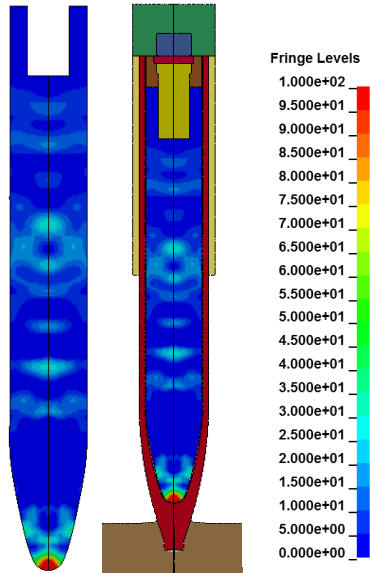


Fig. 7. Calculated pressure distribution( $v = 328$  m/s, liner thickness = 2 mm)

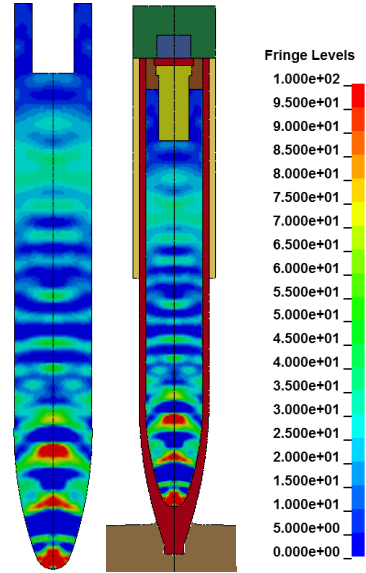


Fig. 9. Calculated pressure distribution( $v = 352$  m/s, liner thickness = 0 mm)

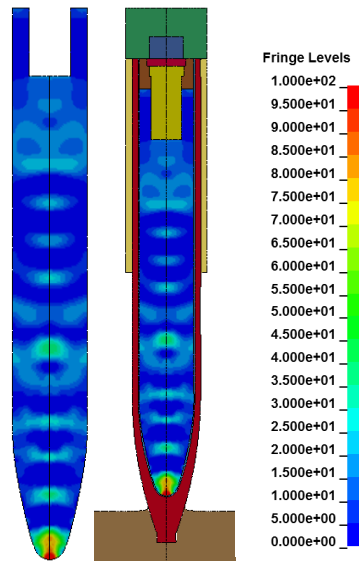


Fig. 8. Calculated pressure distribution( $v = 328$  m/s, liner thickness = 3 mm)

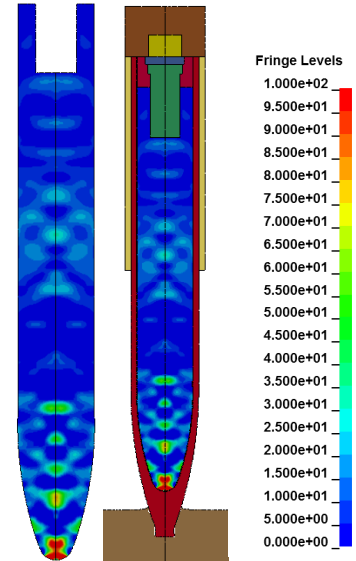


Fig. 10. Calculated pressure distribution( $v = 352$  m/s, liner thickness = 1 mm)

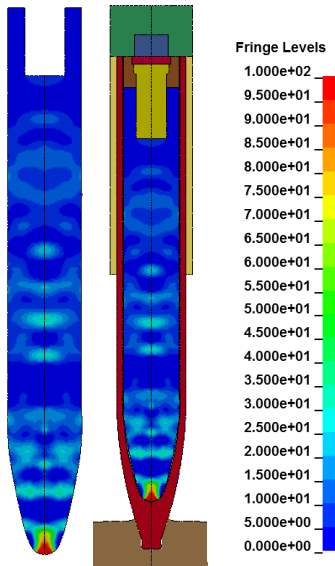


Fig. 11. Calculated pressure distribution( $v = 352$  m/s, liner thickness = 2 mm)

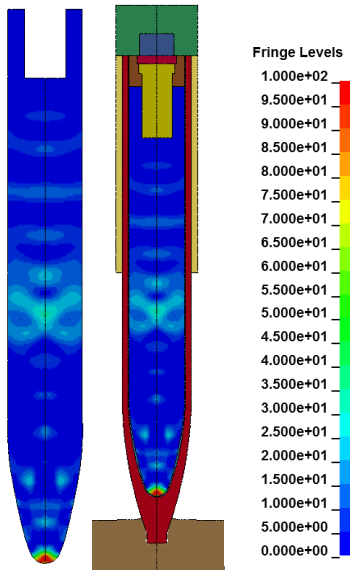


Fig. 12. Calculated pressure distribution( $v = 352$  m/s, liner thickness = 3 mm)

Fig. 13은 충돌속도가 328 m/s인 경우에 탄두의 주장약 앞부분에 설치된 압력센서(Fig. 1의 1번 센서)로부터 측정된 주장약 충격압력에 대한 변화를 라이너두께에 따라 비교하여 그래프로 나타내고 있으며, Fig. 14는 충돌속도가 352 m/s인 경우에 탄두의 주장약 중간

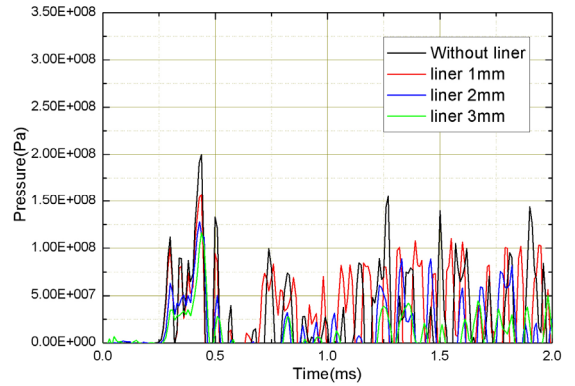


Fig. 13. Calculated pressure-time history in sensor position #1( $v = 328$  m/s)

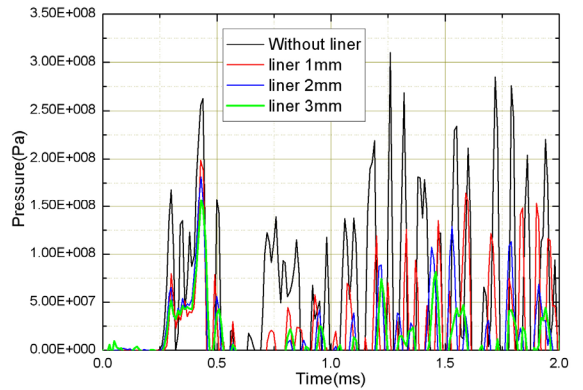


Fig. 14. Calculated pressure-time history in sensor position #2( $v = 352$  m/s)

Table 1. Maximum pressure change according to the liner thickness

Impact Velocity (m/s)	Liner Thickness (mm)	Maximum Pressure (MPa)	Pressure Reduction (%)
328	0	200	-
	1	153	23.5
	2	128	36.0
	3	112	44.0
352	0	313	-
	1	200	36.1
	2	172	45.0
	3	155	50.5

부분에 설치된 압력센서(Fig. 1의 2번 센서)로부터 측정된 주장약 충격압력에 대한 변화를 라이너두께에 따라 비교하여 그래프로 나타내고 있다.

Fig. 13과 Fig. 14에서 알 수 있듯이 라이너가 있는 경우가 없는 경우에 비해 주장약에 전달되는 압력의 크기가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 또한 라이너 두께가 증가하면 주장약의 최대 압력이 감소하는 경향을 보이거나 라이너 두께가 증가함에 따라 감소율은 줄어든다는 사실을 알 수 있다. 해석 결과들을 종합하여 아래 Table 1에 정리하였다.

## 6. 결론

본 연구에서 침투탄두의 콘크리트 표적 관통 시 주장약에 전파되는 압력을 시험결과와 비교하고 라이너 두께의 변화가 주장약 압력전파에 미치는 영향을 수치해석을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주장약 내에 설치된 압력센서에서 측정된 시험계측 결과와 해석결과를 비교하면 일부 전산모사와 시험결과가 다른 부분이 존재하지만 최대압력의 크기가 대체로 잘 일치하고 있다.
- (2) 주장약에 전달되는 압력은 라이너 두께에 비례하여 압력이 감소하는 경향을 보이거나, 라이너 두께 증가에 대한 압력 감소율은 줄어든다.
- (3) 시험결과와 해석결과를 좀 더 정확한 정량적 분석

을 위하여 향후 주장약 물성, 라이너 물성 및 형상 효과 등에 대한 추가적 연구가 필요하다고 판단된다.

## References

- [1] S. Lecume, P. Chabin and L. Minguet, "The SNPE Survivability Protocol," Presented at the IMEMTS, Bordeaux, October, 2001.
- [2] J. S. Park, G. D. Lee and J. S. Chae, "Study of Measurement Method of Dynamic Material Properties for Functional High Explosive Formulation Simulant at Various Strain Rate," ADD Technical Report, ADDR-419-111578, 2011.
- [3] J. S. Park, J. W. Lee, Y. S. Kim and H. G. Yeo, "A Study on Measurement of Transmitted Impact Stress Wave to the Main Charge," KIMST Annual Conference, 2012.
- [4] K. J. Yun, Y. H. Yoo, J. S. Park and H. J. Kim, "Study on the Analysis of Transmitted Impact Stress Wave to the Main Charge," ADD Technical Report, ADDR-J416-120123, 2012.
- [5] J. A. Zukas, et al., "Impact Dynamics," John Wiley & Sons, Inc, 1982.
- [6] M. A. Meyers, "Dynamic Behavior of Materials," John Wiley & Sons, Inc, 1994.
- [7] LS-DYNA User's & Theory Manual