

유도탄 탄두의 전방구조물 완충효과 연구

Study on Shock Absorb Effect in front Section of Missile Warhead

염기선*

Yeom, Kee-Sun

ABSTRACT

In anti-ship missile, the seeker and guidance control units are located in front of warhead. When the missile hits target, these structures play an important role to warhead structure like a shock absorber. Because the shock waves are attenuated, the survival probability of warhead increases which guarantees the explosive train. In this thesis the role of frontal sections is studied. The theoretical analysis and numerical analyses using LS-DYNA code are performed. To prove the effect of shock absorber, the penetration test using subscale prototype warhead are executed

주요기술용어(주제어) : Missile Warhead(유도탄 탄두), Penetration analysis(관통해석), Shock absorber(완충장치)

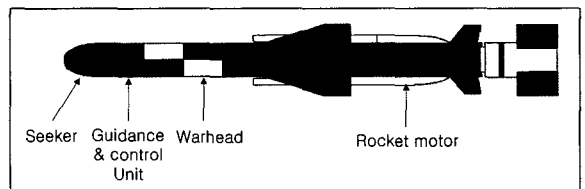
1. 머리말

유도무기의 사거리 증대 및 기동성 향상 등에 의한 위력증대를 위하여 탄두의 경량화는 세계적인 추세이며, 일반적으로 형상최적화(Shape Optimization), 경량소재 개발 등으로 무게는 최소화 하면서 구조물의 강성을 최대화하는 방향으로 설계^[1] 된다. 그러나 형상최적화를 이용한 경량화는 어느 정도 한계가 있으며, 경량소재 개발은 많은 시간과 투자가 요구된다.

이에 본 연구에서는 탄두전방 구조물의 충격완화 효과와 이를 고려한 탄두의 감량설계 가능성에 대하여 분석하였다. 유도탄의 탄두전방구조물은 그림 1 과 같이 탐색기(Seeker)와 유도조종부(Guidance and Control Unit)가 조립되어 있으며 이러한 구조물들은

복합재 레이돔, 알루미늄케이스, PCB보드, 나사류, 케 이블등 매우 복잡한 구조를 가지고 있다.

탄두와 표적의 충돌에서 전방구조물이 충격파 (shock wave)의 감쇄(attenuation)에 미치는 효과를 이론적으로 분석하고 전산모사를 이용하여 관통현상을 해석하였다. 전산모사에서 탄두의 전방구조물은 형상이 매우 복잡하고 다양한 소재로 구성되므로 전 방구조물의 구조분석을 통하여 단순화하여 모델링 하였다. 또한, 실제 축소탄을 이용한 관통시험을^[2,3] 수행하여 이론해석과 전산모사^[1,4]의 타당성을 검증하고 전방구조물이 함대함 유도탄두의 생존성에 미치는 영



[그림 1] 유도탄의 구조

† 2004년 5월 14일 ~ 2004년 6월 22일 심사완료

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)
주저자 이메일 : keesun@hanmail.net

향을 분석하였다.

2. 완충재 충돌현상분석

충격파는 고체 내에 있는 초음파로서 여러 열역학적 변수(밀도, 에너지, 압력, 입자속도)들에 있어서 불연속을 가진 흐름이다. 이러한 충격파에 대한 질량보존법칙, 운동량보존법칙, 에너지보존법칙을 적용하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

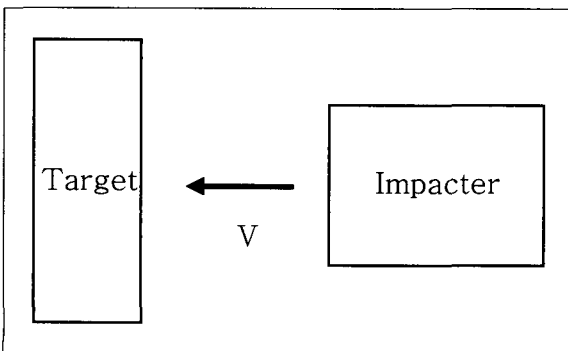
$$\rho_0 U_s = \rho (U_s - U_p) \quad (1)$$

$$P - P_0 = \rho_0 U_s U_p \quad (2)$$

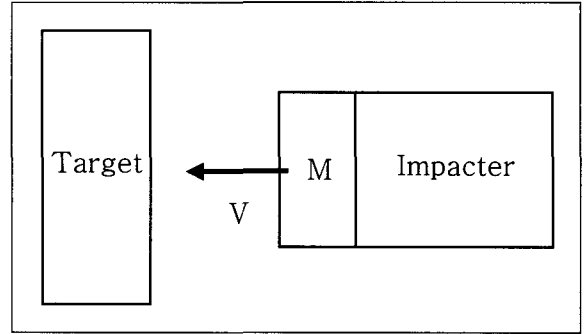
$$E - E_0 = \frac{1}{2} (P + P_0)(v_0 - v) \quad (3)$$

여기에서 P는 압력, E는 내부에너지, ρ 는 밀도, v 는 체적($1/\rho$), U_s 는 충격파속도, U_p 는 입자속도이다. 충격파 앞에 있는 첨자₀은 초기값을 의미한다. 위와 같은 보존법칙에 대한 관계식을 충격파에 대한 Rankine-Hugoniot 관계식이라 한다.^[5~8]

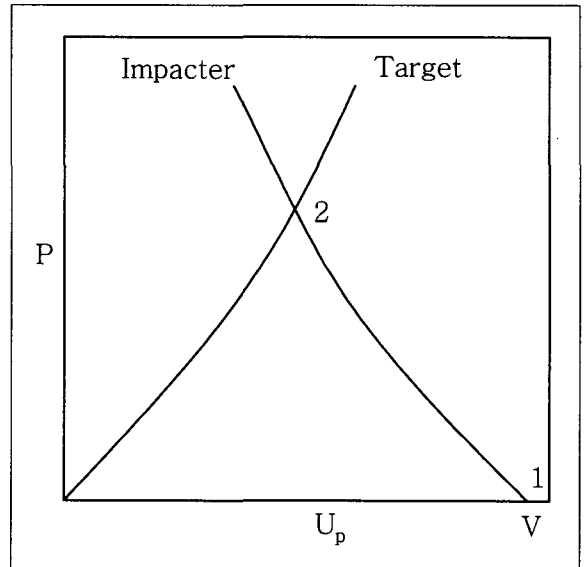
임의의 서로 다른 두 물체가 충돌할 때 충격파의 압력과 물질의 속도는 두 물질사이의 경계점을 가로질러 연속적이라는 가정(shock-impedance match)과 Rankine-Hugoniot 관계식을 이용하면 충돌하는 두 물체에서 충격파가 이동할 때 입자속도와 압력과의



[그림 2] 완충재가 없는 경우 충격자와 표적의 충돌



[그림 3] 완충재가 적용된 충격자의 충돌

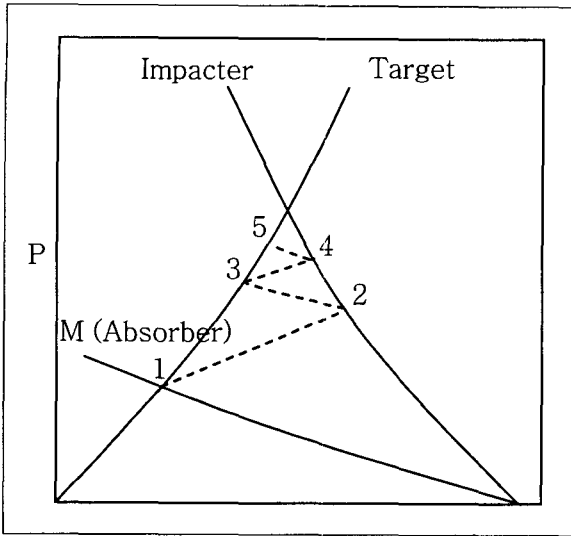


[그림 4] 완충재가 없는 경우의 Hugoniot선도

관계를 얻을 수 있다.

그림 2와 그림 3은 충격자(Impacter)가 V의 속도로 표적(Target)에 충돌하는 것을 나타낸 개념도이다. 그림 1은 완충재가 없는 충격자이고 그림 2는 완충재가 있는 충격자이다.

표적과 완충재가 충돌하면 그 충격파가 완충재의 내부를 따라 전파하여 충격자에 이르게 되는데, 그림 4, 5는 입자속도와 압력과의 관계를 나타낸 Hugoniot 선도이다. 그림 5에서 실선으로 그려진 M(Absorber), Impacter, Target 곡선은 물질 고유의 입자속도와 압력과의 관계를 바탕으로 그려진 곡선이다. 완충재가 없는 경우에 충격자와 표적이 충돌하면 속도와 압



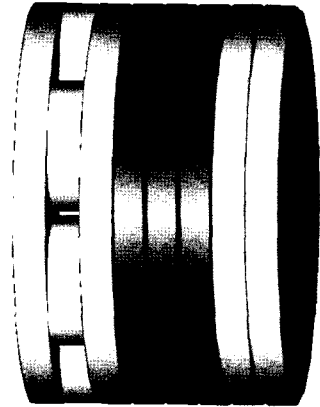
[그림 5] 완충재가 적용된 경우의 Hugoniot선도

력은 그림 4의 1번에서 2번으로 생성되어 속도(V_1)압력(P_1)에서 속도(V_2)압력(P_2)으로 평형상태를 이루며 이 과정에서 큰 충격파가 발생된다.

그러나 그림 5에서는 완충재를 나타내는 M과 충격자는 같은 입자 속도인 U_0 로 비행을 하게 되고 충돌 직후 M의 Hugoniot곡선을 따라 1, 2, 3, 4, 5점으로 점차적으로 이동하게 된다. 그러므로 충격파는 압력이 완만하게 상승하는 형상으로 발생된다. 따라서 impedance가 큰 물체의 충돌에서 impedance가 낮은 매개물질이 존재하는 경우 압력상승속도가 작아지는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 탄두의 전방구조물이 탄두구조물 보다 shock impedance가 낮은 물질들로 구성되어 있다면 전방구조물로 인하여 표적 관통시 탄두가 받는 충격이 감소될 것으로 예상된다.

3. 전방구조물 모사

탄두 전방구조물의 구성은 탐색기(하우징, 안테나, 김발, 레이돔, PCB보드, 케이블 등)와 유도조종부(관성항법장치케이스, 유도조종장치케이스, PCB보드 등)로 구성되어 있으며 이러한 부품의 소재는 폴리머, 알루미늄합금, PCB보드, 나사, 케이블, 전자부품 등으로 이루어져 있다.



[그림 6] 전방구조물의 모사설계

관통해석을 수행할 경우 탄두의 전방구조물의 형상이 매우 복잡하고 다양한 소재로 구성되어 있어 전방구조물을 모델링하고 해석하는 데 많은 어려움이 있으므로 본 연구에서는 전방구조물의 구조분석을 통하여 중량비를 구하고 이를 토대로 단순화한 모델링을 하였다.

전방구조물의 전체 무게는 탄두중량의 30%정도이고 이중 약 80%정도가 알루미늄합금, 나머지 20%는 폴리머, PCB등으로 이루어져 있다. 전방구조물을 모사하기 위하여 알루미늄합금은 원판형의 알루미늄과 알루미늄honeycomb, 나머지 소재는 원판형의 나일론 6(Nylon6, 밀도: $1.1g/cm^2$)소재를 사용하였으며 형상은 그림 6과 같다.

그림에서 좌측이 유도탄의 전방이며 원판형의 알루미늄과 알루미늄 honeycomb 그리고 나일론6의 배열은 탐색기와 유도조종부의 각 부품을 대표할 수 있도록 중량비가 허용하는 범위 내에서 다양한 배열에 대한 관통해석^[4]과 철판관통시험^[3]을 통하여 전방구조물의 모사설계를 결정하였다.

4. 유한요소해석

양해법(Explicit) 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를^[9] 이용하여 2차원 축대칭(Axisymmetric) 해석을 수행하였다. 일반적인충돌해석의 경우 라그랑지안(Lagrangian)기법이나 오일러리안(Eulerian)기법

을 사용하고 있으며 오일러리안 기법의 경우 정확한 계산을 하기 위해서는 전 계산영역에 대하여 조밀한 요소를 사용해야 하기 때문에 계산시간이 많이 소요되고 라그랑지안기법은 계산시간은 오일러리안기법 보다 적게 소요되나 관통과정에서 요소를 소진(Erosion)시킴으로써 오차가 발생하게 된다. 본 해석에서는 라그랑지안 기법을 이용하여 해석을 수행하였다.

가. 해석조건

유한요소해석에 사용된 요소는 축대칭(Axisymmetric) 요소를 사용하였고 재료모델링은 'MAT_PLASTIC_KINEMATIC'을 사용하여 선형탄성-선형소성의 탄소성 재료로 모델링 하였다. 즉, 항복응력에 이르기 전까지 응력 변형률의 관계는 선형적이며 그 기울기가 탄성계수(Young's Modulus)이고, 항복응력을 초과하는 응력이 발생하게 되면 소성계수(Tangent Modulus)의 기울기로 응력변형률의 관계가 결정된다. 요소의 소진은 해석도중 변형이 심하게 발생한 요소를 제거하는 해석기법이다. 관통해석에서 심하게 변형된 요소는 시간증분의 크기를 감소시켜 해석 시간이 증가하게 되며 해석을 진행시킬 수 없는 경우가 생기므로 심한 변형으로 더 이상 물리적인 영향을 줄 수 없다고 판단되는 요소는 소진시키게 된다. 본 해석에서는 소진조건을 변형을 1.0으로 정하여 해석을 수행하였다.

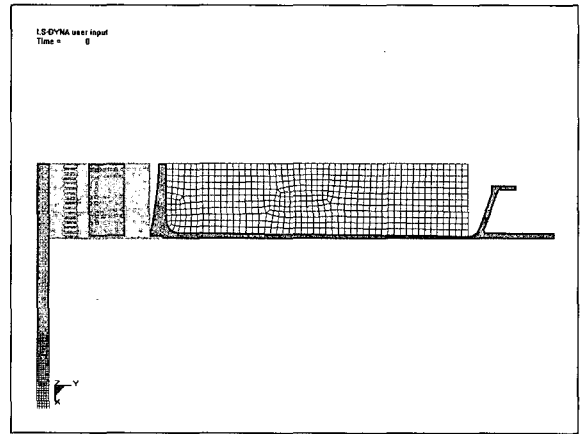
충돌속도는 함대함 탄두의 충돌속도인 289m/s의 속도로 표적에 충돌하는 것으로 설정하였으며 탄두가 표적을 완전히 관통하고 나오는 시간을 고려하여 해석시간을 결정하였다.

표 1은 탄체, 전방구조물, 표적의 기계적 특성을 나타내며 관통해석과 시험결과와 비교^[1~4]를 통하여 결정된 수치이다.

양해법 유한요소 해석의 경우 접촉의 정의가 용이하여 실제 접촉이 일어나는 절점 또는 요소단위의 접촉정의를 필요 없고 파트와 파트의 정의만으로 파트의 모든 부분의 접촉이 가능하다. 본 해석에서는 'Automatic 2-D single surface contact'를 사용하였다. 이 접촉조건은 축대칭 해석에서 모든 파트의 접촉을 한번에 정의해 줄 수 있다.

[표 1] 탄체, 전방구조물, 표적의 기계적 특성

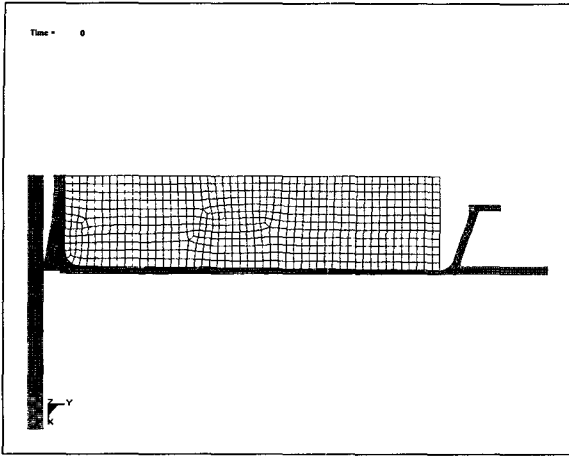
	Warhead	AL & Honey comb	Nylon6	Target
Density(kg/m ³)	7820	2790	1100	7820
Young's Modulus(GPa)	210	71	4.5	210
Poisson's ratio	0.3	0.33	0.375	0.3
Yield Stress(MPa)	1000	220	98	350
Tangent Modulus(MPa)	1050	700	4.5	1050
Eroding strain	1.0	1.0	1.0	1.0



[그림 7] 전방구조물이 적용된 유한요소해석 모델

그림 7은 전방구조물이 적용된 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. LS-DYNA의 대칭축은 Y축으로서 그림에서는 상단의 수평방향이 대칭축이다. 맨 좌측에 위치하고 있는 것이 함대함 탄두의 표적인 함정의 외벽, 그 다음에 위치하고 있는 것이 탄두 전방구조물인 알루미늄원판, Honeycomb, 나일론6원판, 그 다음이 탄두 구조물과 충전화약이다.

Honeycomb은 알루미늄 박판을 이용하여 벌집모양의 다공성 구조물을 제작한 것으로 이러한 소재의 재료를 축대칭 해석용으로 모델링 하는 것은 어려울뿐



[그림 8] 전방구조물이 없는 유한요소해석모델

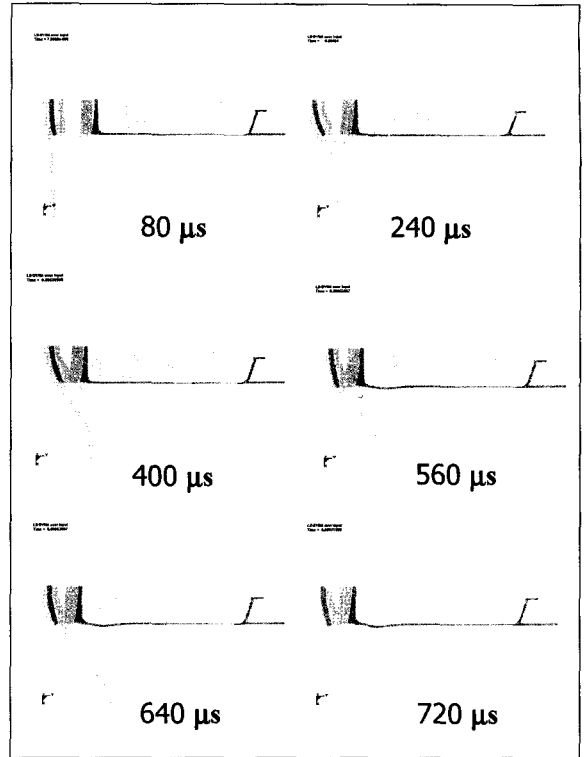
더러 해석의 정확도를 보장할 수 없으므로 본 해석에서는 그림 7과 같이 알루미늄원판과 같은 기계적 특성을 가진 다공성 구조물 형상으로 모델링 하여 해석에 적용하였다.

그림 8은 전방구조물이 없는 유한요소해석모델로서 탄체가 표적에 직접 충돌하게 되어있는 모델이다. 두 모델 모두 해석시간을 줄이기 위해서 표적과의 거리를 최소로 지정하였다.

나. 해석결과

전방구조물이 있는 모델과 없는 모델 모두 표적을 관통하였고 탄두의 전방부 측면에 소성변형이 발생하는 Bulging 현상이 발생되었다. 그림 9는 전방구조물이 있는 모델의 유한요소해석 결과로서 탄체, 전방구조물, 표적의 변형형상을 보여주고 있다. 충돌시 일차적으로 외피와 알루미늄 honeycomb이 압축되었고 그 이후로부터는 나일론6가 압축되면서 소진이 일어나는 현상을 보이고 있으며 표적을 완전관통하게 되는 시점에서는 나일론6소재는 거의 모든 부분이 소진되었다.

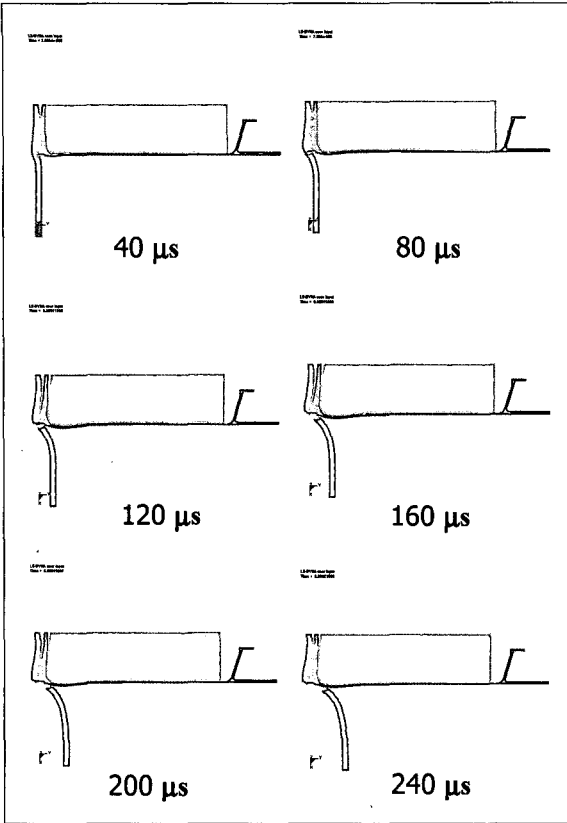
그림 10은 전방구조물이 없는 모델의 유한요소 해석결과로서 탄체와 표적의 변형형상을 보여주고 있다. 표적을 관통할 때 전방구조물이 있는 경우와는 달리 표적이 전단에 의해 파손이 일어나는 것을 볼 수 있고 또한 전방구조물이 있는 모델보다 탄체의 변형이 크게 발생한다.



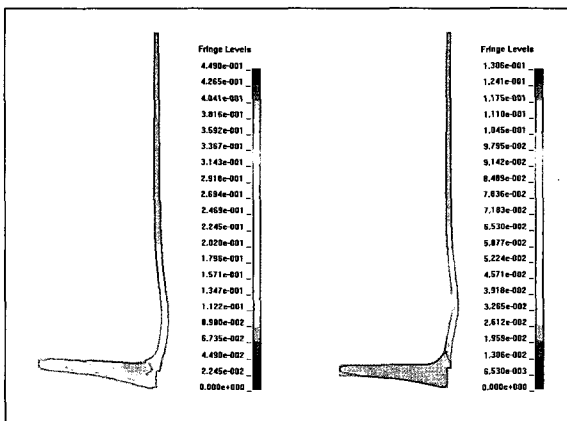
[그림 9] 전방구조물이 있는 모델의 유한요소해석결과 변형형상

그림 11은 유한요소해석결과 탄체에 대한 소성변형을 분포를 비교하여 나타낸 그림이다. 좌측이 전방구조물이 없는 경우, 우측이 전방구조물이 있는 경우 탄체의 소성변형을 분포이다. Bulging 현상은 전방구조물이 없는 경우에는 탄체와 전방부가 만나는 모서리 부분에 집중적으로 발생하였고 소성변형율이 최대 45%, 전방구조물이 적용된 경우에는 소성변형이 주로 탄체의 측면에 발생하였고 최대 13%의 소성변형율이 발생하였다.

또한 충돌 시에 변형과 요소의 소진으로 인해 탄체가 가지고 있던 운동에너지가 감소되었다. 그림 12, 13은 전방구조물이 없는 모델과 전방구조물이 있는 모델의 표적 관통시 속도, 가속도 분포비교이다. 관통 후 탄체의 속도는 각각 252m/s와 186m/s이며 가속도는 최대 130000g와 30000g로서 전방구조물의 변형과 소진에 의하여 충돌가속도가 현저히 감소하였고 속도의 감소 또한 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이로

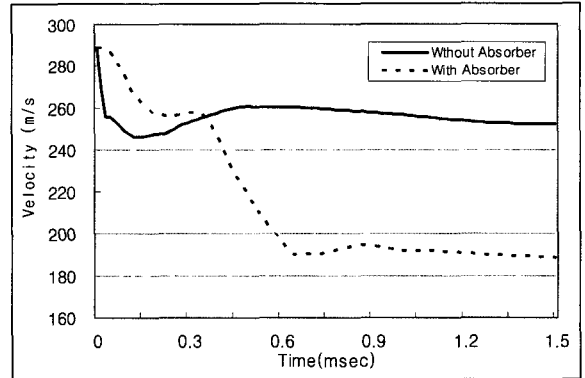


[그림 10] 전방구조물이 없는 모델의 유한요소해석결과 변형형상

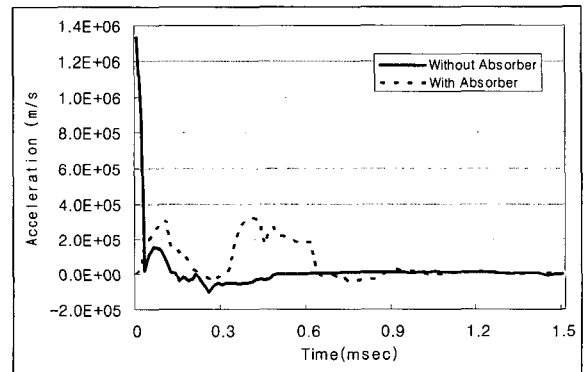


[그림 11] 충돌해석후 탄체의 소성변형을 분포 비교

인하여 앞서 서술한 탄체의 소성변형율의 차이가 나타난 것으로 판단된다. 따라서 탄체의 표적 충돌시



[그림 12] 표적 관통시 탄체의 평균속도 비교



[그림 13] 표적 관통시 탄체의 평균가속도 비교

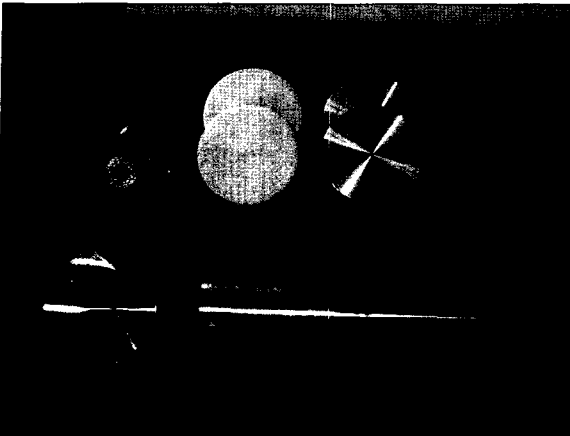
전방구조물의 완충효과에 의하여 탄체의 변형과 잔류 속도 등에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

5. 철판관통시험

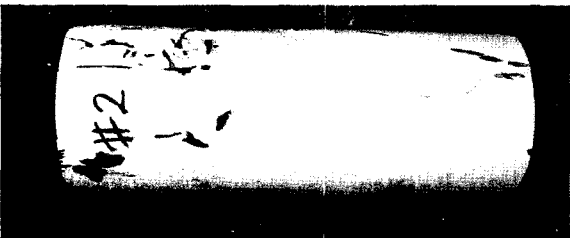
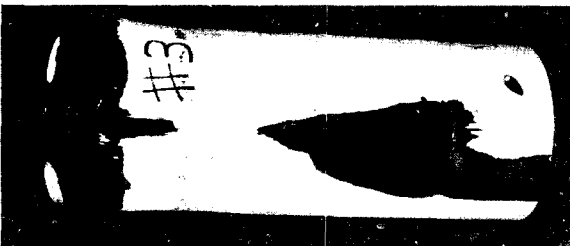
이론해석과 수치해석으로 분석한 전방구조물의 충격완화효과 타당성 검증을 위하여 철판관통시험을 축소형탄두를 이용하여 수행하였다.

본 연구에서 설계한 전방구조물도 축소형탄두에 맞추어 축소하여 제작한 후 철판관통시험을 수행하였다. 사진 1은 제작된 축소탄체와 전방구조물이다.

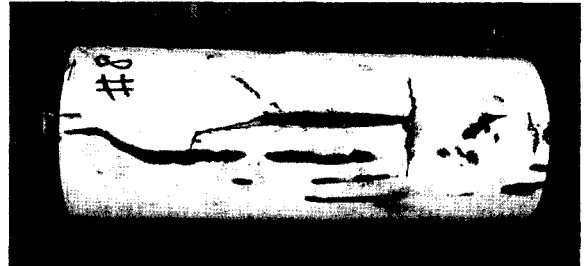
관통시험결과 관통 후 축소탄의 형상은 사진 2와 같다. 전방구조물 유/무에 상관없이 철판을 용이하게 관통하였으며, 탄체의 변형은 해석과 유사한 결과를 나타내었다. 전방구조물의 나일론6는 충돌 후 관통하



[사진 1] 제작된 전방구조물과 축소탄



[사진 2] 축소탄두 관통시험결과 변형된 탄체
전방구조물이 없는 경우(上)
전방구조물이 있는 경우(下)



[사진 3] 압력상승홈이 적용된 탄체의 관통시험 결과
전방구조물이 없는 경우(上)
전방구조물이 있는 경우(下)

오차로 판단된다.

사진 3은 압력상승홈(Stress Riser Groove)이 적용된 탄체일 경우 전방구조물의 영향을 보여주고 있다. 압력상승홈이란 함대함 탄두가 전상에서 유지/보수 되므로 파폭 또는 화재시 탄두가 폭발하지 않고 연소될 수 있도록 압력이 높아지면 구조물이 파손될 수 있게 측면에 노치를 설계한 구조이다. 그러나 압력상승홈은 관통시에 응력집중이 발생함으로 생존성에 큰 취약점이 되고 있다. 전방구조물이 없는 경우(上)는 탄체의 파손이 심각하게 일어나고 내부에 있던 화약이 노출되었으나 전방구조물이 있는 경우(下)에는 압력상승홈을 따라서 파손이 발생하나 전체적인 형상을 유지하고 있는 것으로 보아 전방구조물의 완충효과가 크다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

유도탄 탄두의 전방구조물 충격완화 효과를 고려하기 위하여 탄두 전방모사구조물을 설계하고 이에 대한 유한요소 해석과 시험을 수행하여 결과를 분석하

면서 미세한 파편으로 비산하였으며 honeycomb은 완전 압착되어 회수되었다. 축소탄의 변형은 전방구조물이 없는 경우(사진 2의 上) 지름 7%가 증가하는 bulging이 발생하여 시험과 해석이 거의 일치하였다. 그러나 전방구조물이 있는 경우 해석에서는 지름의 5%정도가 변형되는 것으로 결과가 나온 반면, 시험(사진 2의 下)에서는 2%정도로 비교적 작게 발생하였다. 이는 전방구조물의 대변형과 소진현상에서 재료모델링의 단순화와, 파손 및 소진모델링에 기인한

었다. 결론은 다음과 같다.

- 1) 표적 관통시 유도탄의 탄두부 전방구조물은 탄두에 가해지는 충격을 완화하는 역할을 하며 이는 유한요소 해석과 실험을 통하여 탄두의 변형이 5%이상 감소되는 것을 확인하였다. 탄두는 완충재에 의하여 생존성이 향상된다.
- 2) 철판관통시험 결과, 수치해석과 일치되는 경향을 나타내었지만, 완충재가 적용된 탄체의 변형은 다소 오차를 나타내었으며, 이는 수치해석에서 완충재 재료의 재료모델링과 파손모델링에 기인한 것으로 판단된다. 향후 일대일 탄두실험 및 3차원 정밀 구조해석을 통하여 보다 정확한 자료가 확보된다면 정량적인 완충효과를 산출할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 관통형 또는 침투형 탄두구조물의 생존성향상과 경량화를 위하여 전방구조물 모사가 아닌 완충재 구조를 적용한 탄두구조물의 개발이 가능할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] 박관진, 김성식, “함대함 탄두구조물 설계보고서”,

기술보고서, TEDC-419-010800, 국방과학연구소, 2001.

[2] 박관진, 김성식, 임완권, 김호수, 노진한, “함대함 탄두 축소구조물 철판관통시험 보고서”, 기술보고서, TEDC-419-010801, 국방과학연구소, 2001.

[3] 염기선, 정태신, 박관진, 김성식, 김호수, “관통형 축소탄두 성능시험평가 보고서”, 기술보고서, TEDC-319-021261, 국방과학연구소, 2002.

[4] 염기선, 박관진, 정태신, 김호수, “관통형 경량탄두 구조설계”, 기술보고서, TEDC-519-021537, 국방과학연구소, 2002.

[5] Marc Andre Meyers, “Dynamic Behavior of Materials”, John Wiley & Sons Inc. 1994.

[6] Jonas A Zukas, Theodore Nicholas, Hallock F. Swift, “Impact Dynamics”, John Wiley & Sons Inc. 1992.

[7] Balazs F. Rozsnyai, James R. Albritton, David A. Young, “Theory and experiment for ultrahigh pressure shock Hugoniot”, Physics Letter A 291 (2001) 226-231.

[8] Akira Yoneda, “Complete thermodynamic analysis on Hugoniot”, Physics of Earth and Planetary interiors 96 (1996) 129-134.

[9] “LS-DYNA Keyword User’s Manual version 970”, Livermore Software Technology Corporation, 2003.