

원통형 및 육면체 텅스텐 관통자의 기하형상비에 따른 관통 특성

이상원¹ · 이영신^{1†} · 조종현¹ · 배용운²

¹충남대학교 기계설계공학과, ²국방과학연구소

Penetration Characteristic of Cylindrical and Cubic Tungsten Penetrator due to Geometrical Shape Ratio

Sang-Won Lee¹, Young-Shin Lee^{1†}, Jong-Hyun Jo¹, and Yong-Woon Bae²

¹Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University

²Agency for Defense Development

Received 21 February, 2013; received in revised form 24 July, 2013; accepted 2 August, 2013

ABSTRACT

In this study, the penetration characteristic from the cubic and cylindrical penetrator consisting of tungsten material with the velocity of 2,300 m/s is evaluated and the penetration possibility into the target is confirmed. The design of shape and size of penetrator is directly related to space and weight of the warhead. AUTODYN-3D simulation is used to study the penetration effect of penetrator. The purpose of numerical analysis is to verify the penetration characteristic with various L/D penetrator. The penetration performance of penetrator with identical weight due to the shape is also confirmed. The cylindrical and cubic penetrator has enough penetration energy on constant target body. Because the possibility of 2nd penetration is important factor after 1st penetration into target body, residual velocity of residual mass must be existed as much as possible. As geometrical shape ratio increases, penetration performance is confirmed to improve.

Key Words: Penetration, L/D

1. 서 론

로켓의 추진력으로 가속되어 날아가는 탄도 미사일을 레이더가 탐지하여 격추하는 요격 미사일의 기술 개발이 활발히 진행이 되어 지고 있으며, 새로운 탄두기술은 탄도 미사일 적재에 대응하여 높은 치사력을 얻기 위해 개발 및 설계 되어야 하고 이는 지상의 모든 치명적인 영향을 줄이며 탄

도 미사일의 내부시스템을 모두 파괴할 수 있는 성능을 가지고 있어야 한다. 탄도 미사일의 요격용 탄두개념으로는 대응하기 어려운 첨단 전역탄도미사일(TBM, Theatre Ballistic Missile)이 존재하며 국가생존의 유지차원에서 심각한 문제로 대두되고 있다. 따라서 기존에 운용하던 탄두체계를 벗어나 새로운 탄두 메커니즘에 대한 필요성이 증대되고 있다. 현재 탄도 미사일 요격용으로 부각되는 탄두 개념은 관통자 자탄을 탑재한 탄두이다. 탄두는 크게 ht-to-kill(직격파괴) 방식과 blast and fragmentation(폭풍 및 파편) 방식으로 분류되며,

[†]Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr
©2013 Society of CAD/CAM Engineers

다수의 관통자를 포함하며, 주변의 폭발팩에 의해 관통자가 분산되는 방식으로 탄도탄 표적과 요격 유도탄의 상대속도를 이용하는 탄이다. 관통자의 형상, L/D, 크기, 재료등과 표적체와의 접촉조건들에 의해 관통성능에 영향을 주며, 이는 탄두의 파괴 성능을 분석하는 인자가 된다^[1,2]. hit-to-kill 방식은 표적에 직격하여 탄두를 확실히 파괴할 수 있는 장점이 있으나, 단점은 탄도 미사일의 회피 기술의 발달로 정확히 hit-to-kill을 하지 못할 가능성이 점차 늘어나고 있으며 목표물에 직접타격이 되지 않고 빗겨나갈 경우 탄두가 생존하여 그 기능을 수행할 수 있다는 것이다. 기본적으로 탄도 미사일을 직격하여 무력화 하도록 설계되어 있으나 탄도미사일의 속도가 마하 10 이상으로 매우 빠르고 정밀 타격이 쉽지 않기 때문에 미국을 포함한 각국에서 개발을 중단하고 새로운 개념의 도입필요성을 갖게 되는 계기가 되었다^[3,4].

직격파괴 방식의 한계로 나타난 것이 Fig. 1에서 보이는 관통자 자탄 모듈을 탑재한 폭발파편방식으로 근접 조우탄두가 등장하였다.

근접조우탄두는 다수의 관통자를 포함하며 탄두 주변의 폭발팩에 의해 관통자가 분산되는 방식이다. 이러한 탄두 방식은 특히 미사일과 방어미사일이 직접타격이 가능한 궤적으로 근접하여 빗겨나갈 경우에도 자탄 모듈의 근접조우 탄두가 표적 지향성으로 폭발하여 미사일 방어를 할 수 있다. 이는 요격이 어려운 자탄 탑재형 탄도탄에 대해서도 뛰어난 효과를 나타내고 있다. 자탄 모듈을 탑재한 근접조우탄두의 개념 및 설계 개발을 위하여 기초연구 및 선행 연구로서 탄두에 탑재되는 개별 자탄으로써 불리는 관통자의 관통 성능 연구가 필수적이다^[5-7].

탄두는 관통자의 형상(원형, 육각형, 사각형, 십자형)에 의해 생성되는 분산형태에 따라 다양한 방법으로 설계되어진다. 이러한 개념으로 설계가

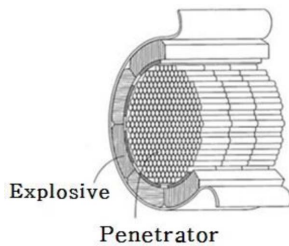


Fig. 1 Description of aimable penetrator warhead^[6]

되어진 관통자는 탄두 중량을 모두 사용하는 중량-집중(mass-focusing) 관통자라 한다.

본 논문은 원통형과 육면체 형상을 이용하여 질량이 동일한 상태에서의 고속 관통 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 접촉, 관통, 폭발, 충돌처럼 비선형 동역학 문제들을 빠르게 해결할 수 있는 AUTODYN-3D 프로그램을 이용하여 고속 관통자와 표적체의 거동 및 관통 후의 상태를 분석할 수 있는 기하형상비에 따른 고속 관통 특성에 관한 기초 연구이다.

2. 모델링 및 해석 방법

2.1 표적체 및 관통자 모델링

동일한 질량(48 g)을 가지는 육면체 및 원통형 관통자를 모델링 하였으며, 수치해석을 수행하기에 앞서 L은 관통자의 길이를, D는 관통자의 직경을 나타내며 L/D는 관통자의 기하형상비를 말한다. 표적체 치수는 두께 20 mm와 각 변의 길이가 50 mm인 육면체를 나타내며 Fig. 2에서 확인을 할 수 있으며, Table 1은 기하형상비에 따른 육면체 및 원통형 관통자 모델들의 관통자의 길이와 직경 그리고 질량에 대한 내용을 나타낸다.

2.2 관통자의 해석 방법

Table 1과 같이 동일 질량을 가지며 기하형상비에 따라 나눈 20가지의 모델을 가지고 초기 속도 2300 m/s를 적용하여 수행이 되었다. 시뮬레이션

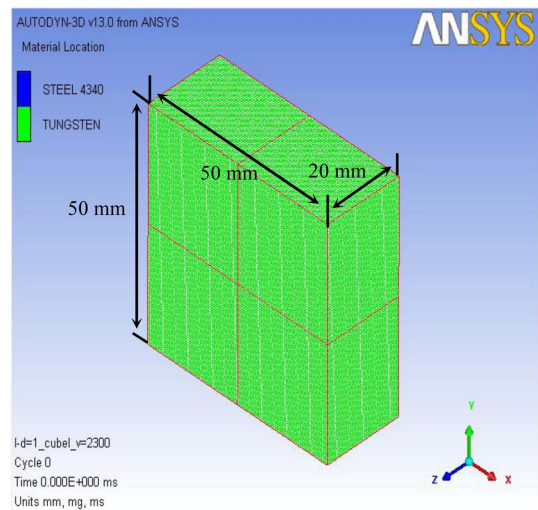


Fig. 2 The target plate model : 50 mm × 50 mm × 20 mm

Table 1 Dimension and mass of penetrators

Geometrical Shape Ratio	Shape	Diameter (mm)	Length (mm)	Mass (g)
L/D = 1	Cylinder	15.00	15.00	47.88
	Cubic	13.84	13.84	47.98
L/D = 2	Cylinder	11.91	23.81	47.80
	Cubic	10.98	21.96	47.92
L/D = 3	Cylinder	10.40	31.20	47.78
	Cubic	9.59	28.78	48.01
L/D = 4	Cylinder	9.45	37.80	47.89
	Cubic	8.72	34.86	47.98
L/D = 5	Cylinder	8.77	43.86	47.76
	Cubic	8.09	40.46	48.05
L/D = 6	Cylinder	8.26	49.53	47.73
	Cubic	7.61	45.69	48.02
L/D = 7	Cylinder	7.84	54.89	47.66
	Cubic	7.24	50.65	48.06
L/D = 8	Cylinder	7.50	59.99	47.42
	Cubic	6.92	55.36	47.98
L/D = 9	Cylinder	7.21	64.92	47.56
	Cubic	6.65	59.89	48.08
L/D = 10	Cylinder	6.96	69.64	47.41
	Cubic	6.42	61.24	47.92

Table 2 Material constitutive model in simulation

Structure	EOS	Strengthen	Failure model
Penetrator	Shock	Von-Mises	Hydro
Steel plate	Line	Johnson-Cook	Principal stress

Table 3 Physical properties for materials

	Penetrator	Steel plate
Material	Tungsten	Steel-4340
Density [g/cm ³]	19.29	7.83
Bulk Modulus [GPa]	310	167.4
Shear Modulus [GPa]	160	81.8
Principal Tensile Failure Stress [GPa]	-	0.72

전반에 걸쳐 적용된 관통자와 표적체의 구성 모델과 재료 물성치는 Table 2와 Table 3과 같다. 관통자는 텅스텐 재료가 사용이 되었고 표적체는 Steel-4340이며 참고문헌에서 인용이 되었다^[8,9]. 표적체

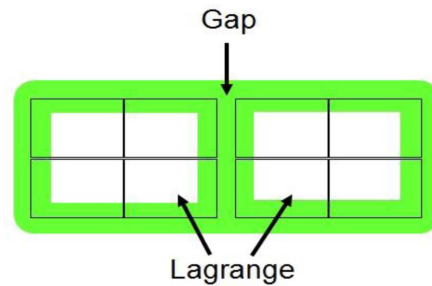


Fig. 3 The contact detection zone of a surface segment^[10]

에 추가학적 파괴기준을 사용하여 관통 시 발생하는 파편을 현실적으로 구현하였고 Steel-4340 재료의 주 파괴응력값은 720 MPa이다^[10,11].

본 연구에서 수행된 충격거동은 AUTODYN-3D의 절점탈락기능(erosion)과 Lagrange, ALE, Shell, Beam 및 비정렬 격자체의 충격해석을 구현하기 위해 적용되는 접촉 알고리즘을 사용하였다. 구체적으로 External Gap으로 요소의 선형 및 각운동량을 보존하는 알고리즘이다. Fig. 3은 요소 사이의 Gap 크기를 보여주며 녹색으로 표시되어있는 부분이 요소표면구간의 접촉감지영역으로 각 요소의 Gap이다. 이러한 모든 접촉감지영역의 노드는 관통의 깊이에 비례하여 가해지는 힘에 의해 격퇴되는 원리로 충격해석을 수행한다. Gap의 크기는 요소간의 상호작용에 관련된 부분으로 1/10 ~ 1/2의 범위에서 생성을 하였다.

본 논문에서의 관통자와 표적체의 Gap 크기는 0.05 mm이다.

3. 관통 해석 결과

고속 관통자의 전체적인 관통과정은 Fig. 4에서와 같이 진행이 되고 관통과정을 총 3단계로 나누어 볼 수가 있다. 관통자가 접촉하는 과정 (a)와 표적체를 관통하는 과정 (b), 마지막으로 관통 후 관

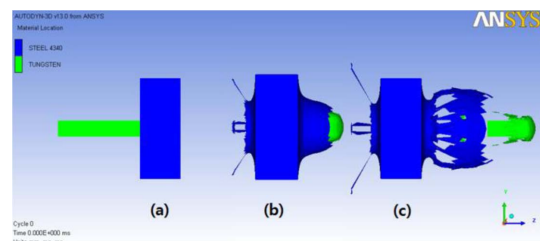


Fig. 4 Evolution of the penetrator at 2300 m/s

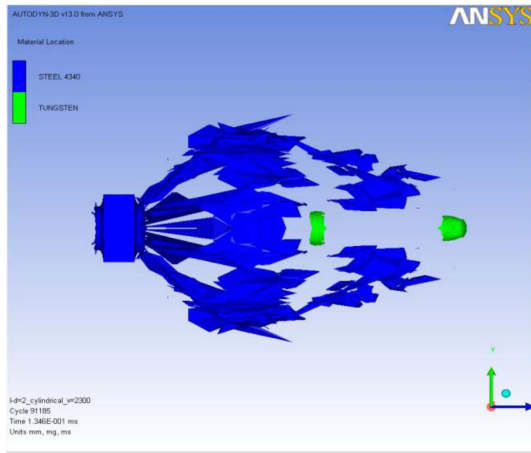


Fig. 5 After penetration cylinder L/D = 2 shape

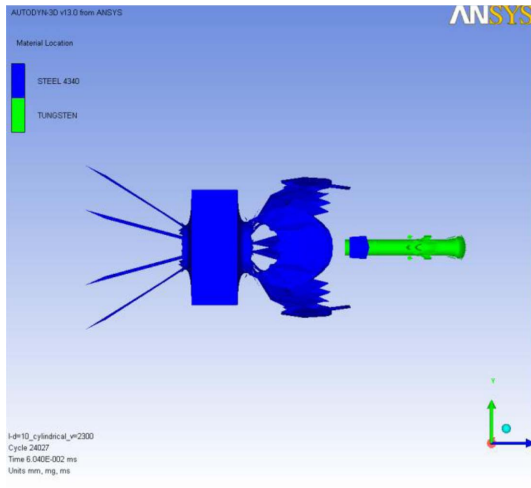


Fig. 6 After penetration cylinder L/D = 10 shape

통자가 표적체를 빠져나가는 과정인 (c)이다. 시물레이션 전반에 걸쳐 이러한 관통과정이 보여진다. Fig. 5는 L/D = 2인 원통형 관통자가 표적체를 관통한 후의 모습을 나타내며 Fig. 6은 L/D = 10인 원통형 관통자가 표적체를 관통한 후의 진행 모습을 보여준다.

3.1 기하형상비에 따른 해석 결과

원통형과 육면체 형상을 가진 관통자가 2300 m/s의 동일한 충격속도를 가질 때 L/D에 대한 수치해석이 수행되었으며 잔류질량, 잔류속도, 운동에너지를 각각의 선도로 나타내었다.

초기 질량이 48 g인 관통자는 관통 후 질량이 감소할 것을 볼 수 있으며, L/D의 값이 클 수록 잔류

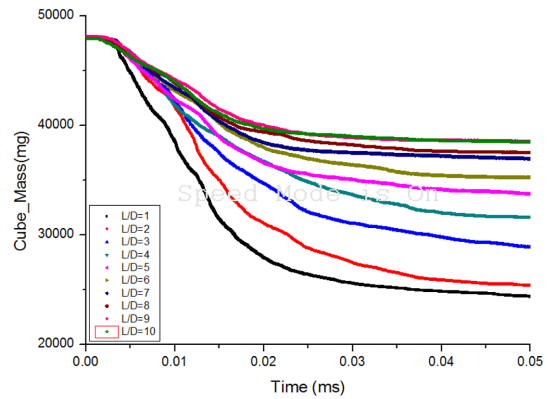


Fig. 7 Residual mass of cubic

Table 4 Residual mass of cube

Cubic	Mass			
	Max	Min	Gap	Ratio (%)
L/D = 1	47.98	25.88	22.10	46.1
L/D = 2	47.92	29.98	17.94	37.4
L/D = 3	48.01	34.84	13.17	27.4
L/D = 4	47.98	36.45	11.52	24.0
L/D = 5	48.05	38.05	10.00	20.8
L/D = 6	48.02	39.11	8.91	18.6
L/D = 7	48.06	40.02	8.03	16.7
L/D = 8	47.98	40.36	7.62	15.9
L/D = 9	48.08	40.98	7.10	14.8
L/D = 10	47.92	40.86	7.06	14.7

질량의 큰 것을 알 수가 있다. 이는 관통 거동에 의해 관통자가 표적체의 접촉 면적이 적어 관통 성능이 향상되기 때문이다.

육면체 L/D = 2의 경우 관통 전 47.92 g에서 관통 후 29.98 g으로 37.4%의 감소 비율을 보이는 반면에 육면체 L/D = 4의 경우에는 관통 전 47.98 g에서 관통 후 36.45 g으로 24.0%의 감소 비율을 보인다. L/D = 10의 경우는 관통 전 47.92 g에서 관통 후 40.86 g으로 14.7%의 감소율을 보인다. 육면체 관통자의 경우에 L/D 값이 증가함에 따라 잔류 질량이 상대적으로 적게 감소하는 것을 볼 수가 있다. Fig. 7에서의와 Table 4에서 값을 확인하여 볼 수가 있다.

Fig. 8에서도 볼 수 있듯이 원통형에서 보여 주었던 잔류 질량의 소모량이 L/D의 값이 증가함에 따라 적게 감소하는 것을 볼 수가 있다.

L/D = 2의 경우 관통 전 47.8 g에서 관통 후 33.43 g으로 30.1%의 감소비율을 보이고 있으며 L/D = 4의 경우 관통 전 47.89 g에서 관통 후 39.67 g으로 17.2%의 감소 비율을 보인다. L/D = 10에서도 관통 전 47.41 g에서 관통 후 41.8 g으로 11.8%로 L/D = 2에 비해 작은 감소량을 보이고 있다. 아래 Table 5는 원통형의 잔류질량에 대한 데이터 값이다.

잔류질량의 감소율은 잔류운동에너지에 영향을 미치는 인자이며 이는 다음에 올 수도 있는 2, 3차 관통 여부와도 관계가 깊다.

육면체 관통자와 원통형 관통자의 잔류 속도 역시 L/D 값이 증가함에 따라 속도의 감소율이 작아지게 된다. L/D = 1과 L/D = 10의 잔류 속도의 차이는 863 m/s를 보이며 동일하게 L/D 값이 증가함에 따라 관통자의 잔류속도가 상대적으로 크게 남아있는 결과를 보인다. 이러한 결과는 L/D의 값

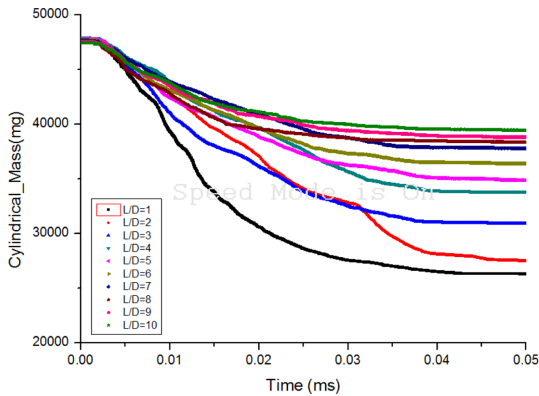


Fig. 8 Residual mass of cylinder

Table 5 Residual mass of cylinder

Cylinder	Mass			
	Max	Min	Gap	Ratio (%)
L/D = 1	47.88	27.26	20.62	43.1
L/D = 2	47.80	33.43	14.37	30.1
L/D = 3	47.78	36.84	10.94	22.9
L/D = 4	47.89	39.67	8.21	17.2
L/D = 5	47.76	39.36	8.39	17.6
L/D = 6	47.73	40.82	6.91	14.5
L/D = 7	47.66	41.54	6.11	12.8
L/D = 8	47.42	41.19	6.23	13.1
L/D = 9	47.56	42.19	5.37	11.3
L/D = 10	47.41	41.80	5.61	11.8

이 증가함에 따라 관통자의 관통성능이 향상 되었음을 볼 수가 있다.

Table 4와 Table 5를 통하여 보게 되면 육면체 관통자와 원통형 관통자의 잔류 질량이 L/D > 4

Table 6 Residual velocity of cubic

Cubic	Velocity			
	Max (m/s)	Min (m/s)	Gap	Ratio (%)
L/D = 1	2300	1315	985	42.8
L/D = 2	2300	1686	614	26.7
L/D = 3	2300	1880	420	18.3
L/D = 4	2300	1985	315	13.7
L/D = 5	2300	2046	254	11.0
L/D = 6	2300	2080	220	9.6
L/D = 7	2300	2120	180	7.8
L/D = 8	2300	2141	159	6.9
L/D = 9	2300	2155	145	6.3
L/D = 10	2300	2178	122	5.3

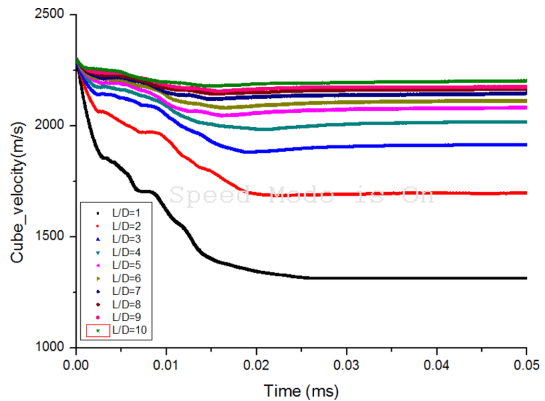


Fig. 9 Residual velocity of cubic

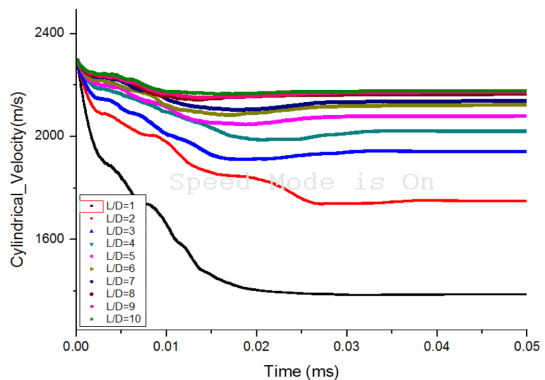


Fig. 10 Residual velocity of cylinder

Table 7 Residual velocity of cylinder

Cylinder	Velocity			
	Max (m/s)	Min (m/s)	Gap (mm)	Ratio (%)
L/D = 1	2300	1388	912	39.7
L/D = 2	2300	1741	559	24.3
L/D = 3	2300	1913	387	16.8
L/D = 4	2300	1993	307	13.3
L/D = 5	2300	2050	250	10.9
L/D = 6	2300	2087	213	9.3
L/D = 7	2300	2107	193	8.4
L/D = 8	2300	2146	154	6.7
L/D = 9	2300	2155	145	6.3
L/D = 10	2300	2168	132	5.7

의 감소 비율이 10% 이상인 값에 비해 $L/D \leq 4$ 부터 감소하는 5% 이하로 줄어는 드는 것을 알 수가 있다. Table 6과 Table 7에서도 잔류 속도는 $L/D > 4$ 에서는 8%에서 16%까지 감소 비율이 나타나는 반면에 $L/D \leq 4$ 부터는 3% 이하로 감소가 됨을 알 수가 있다.

관통자가 일정한 표적체에 대해 충분한 관통에너지를 가지며 1차 관통 후 2차로 올 수도 있는 표적체에 대한 관통 가능여부에 미치는 중요한 인자이기 때문에 관통 과정 중 잔류 속도나 잔류 질량이 최대한 존재해야 한다. 앞서 말한 바와 같이 기하형상비가 증가함에 따라 관통 성능이 향상이 되었으며 이러한 결과로 L/D 의 값이 커질수록 관통 성능에 영향을 준다는 것을 알 수가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속 관통자의 관통 특성을 수치 해석 시뮬레이션으로 구현하여 관통 거동에 의해 생성되는 잔류 질량, 잔류 속도를 도출하였으며, 육면체와 원통형의 기하형상비(L/D)에 따른 관통자의 관통 성능을 해석하였다.

- 1) 초기 질량이 48 g인 관통자에 L/D 의 값이 증가함에 따라 전체적으로 잔류질량, 잔류속도, 잔류운동에너지가 증가하였다.
- 2) L/D 에 따른 잔류질량의 감소 비율은 최대 4배 가까이 차이를 보였으며, 잔류 질량의 감소 비율은 최대 8배 가까이 차이를 보였다.

- 3) L/D 의 값이 증가함에 따라 관통자의 관통 성능이 향상되었음을 알 수가 있었으며, L/D 의 값이 커짐에 따라 잔류 질량 및 잔류 속도의 손실도 작아진다.

References

1. "The Resistance of Various Metallic Materials to Perforation by Steel Fragments", Ballistic Analysis Laboratory, Johns-Hopkins University, Baltimore, MD, BAL, April 1963, THOR TR No. 51, Confidential.
2. Wollmann, E., Hoog, K., Koerber, G. and Wellige, B., 1996, "Performance of Ballistic Terminal Performance at Incidence", Institute Franco-Allemand De Recherches De Daint-Louis, Deutsh-Franzoisches Forschung Instut Saint Louis, ISL, RI 10/96.
3. Kim, Y.H., 2010, Ballistic Missile Defense System : Its Current Status and South Korea's Policy Choice, *The Korean Journal of International Relations*, 50(5), pp.151-164.
4. Park, J.S., Kang, H.G., Park, D.Y. and Yun, T.G., 2012, Near Miss Warhead Developments Status for International Ballistic Missile Defense, *Proceedings of 2012 Conference of the KIMST*, pp.1766-1769.
5. Lloyd, R.M., 1998, Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA Book, Vol. 179.
6. Lloyd, R.M., 2001, Physics of Direct Hit and Near Miss Warhead Technology, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA Book, Vol. 194.
7. Paulus, G., 2004, "Geschoss mit erhohter Lateralwirkung (PELE). Eine Theorie der Lateralwirkung beim Durchschlag einer dunnen Platte," ISL—Report R 115/2004.
8. Zukas, J.A., editor. High Velocity Impact Dynamics. New York: Wiley, 1990.
9. WWW.ANSYS.COM, 2011, "ANSYS/AUTODYN-3D," 12.1 User's Manual, Material Models Chapter.
10. Jo, J.H. and Lee, Y.S., 2012, Numerical Simulation of Failure Mechanism of PELE Perforating Thin Target Plates, *Trans. of KSME(A)*, 36(12), pp.501-508.
11. Jo, J.H. and Lee, Y.S., 2012, Numerical Simulation of Steel/Kevlar Hybrid Composite Helmet Subjected to Ballistic Impact, *Trans. of KSME(A)*, 36(12), pp.722-729.



이 상 원

2007년 2월 우석대학교 자동차
공학 학사
2012년 9월~현재 충남대학교 기계
설계 공학과 석사 과정
관심분야: 충격, 관통, 인체 모델링
및 응용역학, FSI(Fluid Structure
Interaction), 최적 설계



이 영 신

1972년 2월 연세대학교 기계공학학사
1974년 2월 연세대학교 기계공학
석사
1980년 8월 연세대학교 기계공학박사
2003년~2004년 대한기계학회 응용
역학부문 회장
2008년~2010년 충남대학교 산업대
학원장
2007년~현재 한국복합재료학회 감사
1977년~현재 충남대학교 기계설계
공학과 교수
관심분야: 충격, 관통, 셸(shell)구조
해석, 최적설계, 인체모델링 및
응용역학, FSI(Fluid Structure
Interaction)



조 종 현

2011년 2월 충남대학교 기계설계
공학 학사
2013년 2월 충남대학교 기계설계
공학 석사
2013년~현재 LG화학 기술연구원
연구원
관심분야: 충격, 관통, 최적설계



배 용 운

1988년 2월 한양대학교 정밀기계
공학 학사
1990년 2월 한양대학교 정밀기계
공학 석사
1990년~현재 국방 과학 연구소
관심분야: 미래형 탄두 개념 설계