

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.3.297>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

세라믹 타일이 삽입된 금속 블록의 최적 방호구조 연구

이 승 환* · 이 민 형**†

* 세종대학교 기계공학과, ** 세종대학교 기계항공우주공학부

Evaluation of Ballistic Performance of Ceramic-Tile-Inserted Metal Block

Seunghwan Lee* and Minhyung Lee**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sejong Univ.

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Sejong Univ.

(Received August 31, 2015 ; Revised January 5, 2016 ; Accepted January 11, 2016)

Key Words: DOP(침투 깊이), Ballistic Performance(방호 성능), Mass Efficiency(질량 효율), Optimum Protective Structure(최적 방호구조)

초록: 세라믹(AD-90 alumina, B_4C) 타일이 삽입된 금속 블록(4340-steel)에 텅스텐 합금(tungsten alloy)의 긴 운동에너지탄을 수직 고속 충돌시키는 수치해석을 수행하였다. 본 연구를 수행하기에 앞서 두 가지의 반무한판 충돌 모델의 침투 깊이에 대해서 검증을 하였다. 세라믹 재료는 JH-2 (Johnson-Holmquist) 모델을 적용하였고 계산된 침투 깊이를 실험값과 비교하여 만족할만한 결과를 얻었다. 앞서 언급한 판에 대해서 세라믹 타일의 세 가지 두께별로 금속판에 삽입된 위치를 다르게 하여 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 긴 관통자의 잔류속도, 잔류질량 그리고 잔류운동에너지를 얻어 세라믹 타일의 위치가 구조물의 방호 성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 그리고 단순 금속 블록 대비 세라믹 타일을 사용하는 경우의 질량 효율이 어떻게 되는지 확인해보았다. 마지막으로 이들을 토대로 질량효율 관점에서 최적 방호구조에 대한 평가를 수행하였다.

Abstract: A numerical simulation has been performed for the penetration of a long-rod penetrator into a metal block (ceramic-tile-inserted 4340-steel plate). The impact velocity is 1.5km/s at a normal incidence angle. The first two validations are conducted for a semi-infinite block measuring the depth of penetration (DOP). The material model of ceramic is the JH-2 (Johnson-Holmquist) model. The predicted DOP values are in close agreement with the experimental data. Then, the primary simulation is performed by varying the position of the confined ceramic tile for three types of thickness of ceramic tile. The residual velocity, residual mass and residual kinetic energy of the long-rod are obtained from the simulation. Based on these predicted values, the trend of the ballistic performance of the protective structure is estimated. In addition, the mass efficiency is calculated in order to determine the performance of the ceramic-tile-inserted metal block. Finally, the optimum protective structure is identified.

1. 서 론

과거에는 생존성을 위하여 일반적으로 재료가 강으로 된 장갑을 많이 사용했다. 강의 방호 효과는 좋다고 할 수 있지만, 무게가 많이 나간다는 단점이 있다. 그리하여 최근에는 우수한 방호

효과를 가지면서 경량을 위한 장갑재가 개발되고 있다. 그들 중에서 세라믹이 대표적인 재료라고 할 수 있다. 세라믹 재료는 높은 압축 강도와 낮은 밀도를 가진다는 이점이 있지만, 취성의 특성과 낮은 인장 강도를 가진다는 단점이 있다. 세라믹의 이러한 성질들을 적절하게 활용하여 방호 시스템의 구성 요소로써 세라믹을 사용할 수 있다. 세라믹의 모든 면이 금속으로 감싸고 있는

† Corresponding Author, mlee@sejong.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

방호 구조는 세라믹의 성질을 가장 잘 활용한 것이라고 볼 수 있다. 적어도 세라믹이 방호 구조에 활용되려면 뒤를 받쳐주는 금속이 필요하다.

본 연구에서는 LS-DYNA를 이용하여 앞서 언급된 방법을 활용해 세라믹 타일이 삽입된 금속판재에 긴 관통자를 충돌시키는 수치해석을 수행하였다. 이를 하기에 앞서 참고문헌⁽¹⁾에 있는 두 가지 모델에 대하여 침투 깊이(depth of penetration, DOP) 값을 비교 및 검증하였다. 반무한판 강(semi-infinite 4340-steel)에 텅스텐 합금(tungsten alloy)으로 된 긴 관통자(long-rod)를 충돌시키는 문제를 통해 기본적인 충돌 수치기법을 파악했다.⁽²⁾ 그다음 반무한판 강의 전면부에 세라믹(AD-90) 타일이 삽입된 타겟에 대한 관통문제를 통해 복잡한 세라믹의 재료 변수들을 파악했다. 이 두 가지 검증을 완료해야 본 연구를 할 수 있는 조건이 갖춰질 수 있다고 판단했다. 검증된 후에 각각 두 가지 세라믹 타일(AD-90, B_4C)이 삽입된 금속판재에서 세라믹 타일의 세 가지 두께별로 삽입된 위치를 다르게 하여 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해서 세라믹 타일의 위치별로 방호 성능(ballistic performance)의 경향성이 어떻게 나타나는지에 대해서 알아보고 어느 위치에서 좋은 방호효과를 가지는지에 대해서 평가하였다. 그리고 순수 금속판재와 세 가지 두께별로 세라믹 타일이 삽입된 금속판재를 질량 효율(mass efficiency)의 관점에서 해석했다. 최종적으로 이들을 활용해 최적 방호구조(optimum protective structure)를 결정하였다.

2. 검증 해석

2.1 반무한판 강 침투

기초적인 충돌 수치기법을 정립하기 위해 반무한판 강에 대해 침투 수치해석을 수행하였다. 크기가 $50.4\text{mm} \times 50.4\text{mm} \times 140\text{mm}$ 인 반무한판 강(4340-steel)에 질량은 거의 비슷하지만 크기가 다른 $L/D=10(L=80\text{mm}, D=8\text{mm})$, $L/D=15(L=105\text{mm}, D=7\text{mm})$ 텅스텐 합금의 긴 관통자를 충돌시켰다. 형상 모델링은 1/4 대칭으로 하였으며, mesh의 크기는 각 관통자 반지름의 다섯 등분(0.8mm, 0.7mm)으로 하였다. 충돌 속도는 각각 1km/s, 1.25km/s, 1.5km/s로 하였다. 두 재료의 물성값은 Table 1에 있는 값들을 사용하였으며, 각 재료의

Table 1 Material properties of tungsten alloy and 4340-steel

Parameters	Tungsten alloy	4340-steel
$\rho_0(g/cm^3)$	17.4	7.84
$E(GPa)$	350.0	200.0
ν	0.3	0.3
$\sigma_Y(GPa)$	2.0	1.4

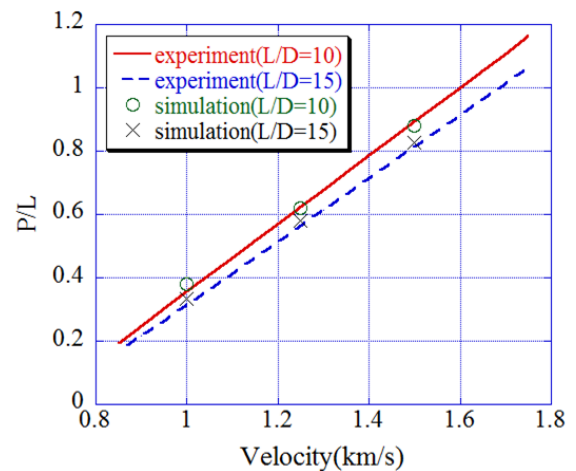


Fig. 1 Comparison of normalized DOP

구성방정식은 완전 소성(perfect plastic) 모델로 하였다.

수치해석을 통해서 얻어지는 침투 깊이를 긴 관통자의 초기 길이로 정규화 시켜 경험식⁽¹⁾과 함께 Fig. 1로 나타냈다. 오차율은 약 0.8%~6.7%의 범위를 가지며 만족할만한 수치 결과를 얻어냈다고 판단된다. 이로써, 텅스텐 합금과 4340-steel 연성 재료에 대한 기본적인 충돌 수치기법이 어느 정도 잘 적용되었다고 해석된다.

2.2 세라믹 타일 전면 삽입 반무한판 강 침투

앞선 문제와 동일한 재료 및 형상의 $L/D=10$, $L/D=15$ 인 긴 관통자를 1.5km/s의 수직 속도로 반무한판 강 전면부에 삽입된 세라믹 타일 타겟에 충돌시키는 시뮬레이션을 수행하였다. 타겟은 실린더 형상이며 세부적인 것들은 Fig. 2에 표현하였다. 강은 이전 문제와 동일한 재료이다. 여기서 세라믹은 참고문헌⁽¹⁾서 AD-90(Sintered 90% alumina)에 대한 실험 데이터가 있기 때문에 AD-90으로 하였다. 세라믹 타일의 두께(t_c)는 28mm, 42mm 2가지로 각각 진행하였다. 세라믹

Table 2 JH-2 parameters of AD-90^(4,5) and B₄C⁽⁶⁾

Parameters	AD-90	B ₄ C
Density $\rho_0(g/cm^3)$	3.6	2.51
Shear modulus $G(GPa)$	117	197
Hugoniot elastic limit $HEL(GPa)$	8.3	19.0
HEL pressure $P_{HEL}(GPa)$	4.37	8.71
Intact strength coefficient A	0.989	0.927
Intact strength exponent N	0.3755	0.67
Strain rate coefficient C	0.0	0.005
Fracture strength coefficient B	0.77	0.70
Fracture strength exponent M	1.0	0.85
Maximum fracture strength $SFMAX$	0.5	0.2
Tensile strength $T(GPa)$	0.221	0.260
Pressure constant1 $K_1(GPa)$	160.0	233
Pressure constant2 $K_2(GPa)$	0.0	-593
Pressure constant3 $K_3(GPa)$	0.0	2800
Bulking factor β	1.0	1.0
Damage coefficient D_1	0.01	0.001
Damage exponent D_2	1.0	0.5

Table 3 Comparison of normalized residual DOP

	P_r/L (experiment)	P_r/L (simulation)
L/D=10 $t_c = 28mm$	0.56	0.58
L/D=15 $t_c = 28mm$	0.55	0.61
L/D=10 $t_c = 42mm$	0.455	0.42
L/D=15 $t_c = 42mm$	0.485	0.47

을 하여 얻어낸 값을 사용했다. 세라믹이 등방성 재료라는 가정 하에 탄성계수($E = 276 GPa$), 전단계수($G = 117 GPa$), 푸아송비($\nu = 0.22$)를 이용하여 다음과 같은 세 가지 방법으로 체적 탄성계수를 추정하였다.

$$K_1 = \frac{EG}{3(3G - E)} = 143.52 GPa \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} = 164.3 GPa \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{2G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} = 170.0 GPa \quad (3)$$

세 가지 방법으로 얻은 체적 탄성계수 값들의 평균값을 사용했다.

수치해석을 통해서 얻어지는 잔류 침투 깊이 (residual DOP, P_r)를 긴 관통자의 초기 길이로 정규화 시켜 실험값⁽¹⁾과 함께 Table 3으로 나타냈다. 실험값은 각 조건마다 두 개의 데이터를 가지고 있어서 이를 평균 낸 값으로 나타냈다. 오차율은 약 3.5%~11%의 범위를 가지며 만족할만한 수치 결과를 얻어냈다. 이로써, 취성의 성질을 가지는 세라믹 재료에 대한 충돌 수치기법이 어느 정도 잘 적용되었다고 판단된다.

3. 수치해석 결과

앞서 두 가지 모델에 대한 검증이 어느 정도 되었다고 판단이 되기 때문에 본 연구를 수행할 수 있는 조건이 갖춰졌다고 할 수 있다. 긴 관통자의 재료 및 형상은 앞선 문제들과 동일하며 1.5km/s의 수직 속도를 가진다. 두 번째 검증 문제와는 다르게 반무한 판이 아닌 판재 형태이며 세라믹 타일은 각각 두 가지(AD-90, B₄C) 종류

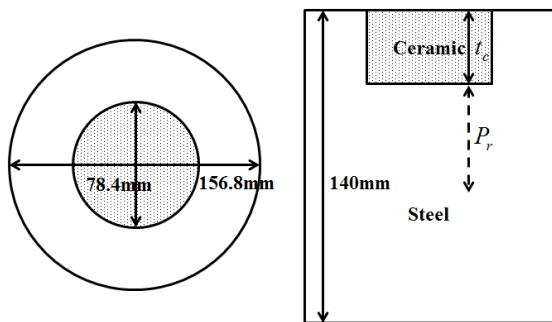


Fig. 2 Schematic diagram of cylindrical semi-infinite target configuration

의 재료 모델링은 세라믹이 취성의 성질을 갖고 있다는 것을 고려하여 JH-2(Johnson-Holmquist)⁽³⁾로 하였다. AD-90에 대한 JH-2 파라미터들은 Table 2에 있는 값들을 사용하였다. 참고문헌⁽¹⁾에서 AD-90은 Coors Ceramics라는 회사에서 만들어진 것을 사용했기 때문에 Table 2에서 밀출된 기본적인 값들은 Coors Ceramics에 있는 값⁽⁴⁾을 사용했다. 그 외에 나머지 값들은 참고문헌⁽⁵⁾에 있는 값을 사용했다. 여기서 K_1 값은 재료의 체적 탄성계수(bulk modulus)를 의미하며 따로 계산

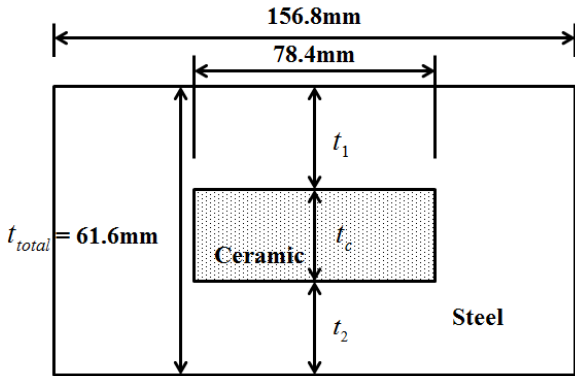
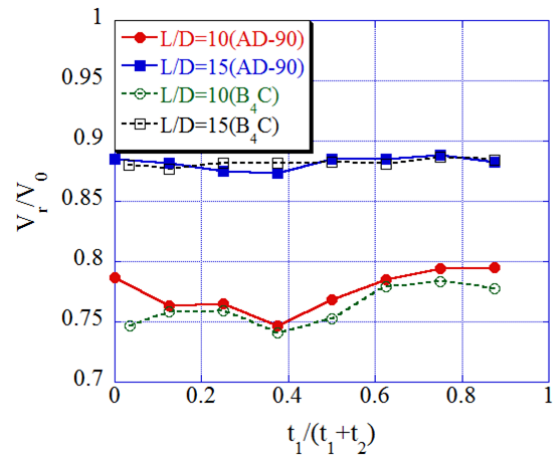


Fig. 3 Schematic diagram of ceramic tile inserted cylindrical plate target configuration

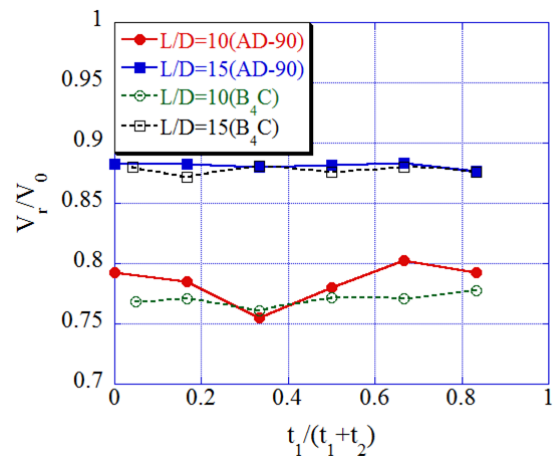
로 하였다. 타겟은 실린더 형상이며 세부적인 것들은 Fig. 3에 나타냈다. 강(4340-steel)의 전체 두께(t_{total})는 세라믹 타일을 충분히 감쌀 수 있고, 긴 관통자가 타겟을 뚫고 지나갈 수 있을만한 임의의 두께로 정하였다. 세라믹 타일의 세 가지 두께(16.8mm, 28mm, 39.2mm)에 대해서 t_{total} 은 항상 일정한 값이고, 강의 앞쪽 두께(t_1)와 뒤쪽 두께(t_2)를 다르게 하여 충돌 수치해석을 수행하였다. 삽입된 세라믹 타일의 위치별로 t_1 은 5.6mm씩 증가하고 t_2 는 그만큼 감소한다. B_4C 의 경우 이전의 두 번째 검증 문제에서 적용한 수치기법과 동일하며 AD-90의 파라미터들 대신에 Table 2에 있는 B_4C 의 파라미터들⁽⁶⁾을 이용해 충돌 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 얻어지는 긴 관통자의 잔류속도(V_r), 잔류질량(M_r), 잔류운동에너지(KE_r)를 가지고 두 가지 세라믹에 대한 삽입 위치별로 방호 성능이 어떻게 되는지 파악하였다. 그리고 구조물에 세라믹 타일을 삽입하거나 두께를 늘리는 것의 효과를 질량 효율의 관점에서 해석해 보았다. 마지막으로 각 케이스 별로 방호 성능과 질량 효율을 가지고 금속판재에 삽입된 세라믹 타일이 어느 조건을 가질 때 최적의 방호구조를 갖는지 판단하였다.

3.1 세라믹 타일의 위치에 따른 방호 효과

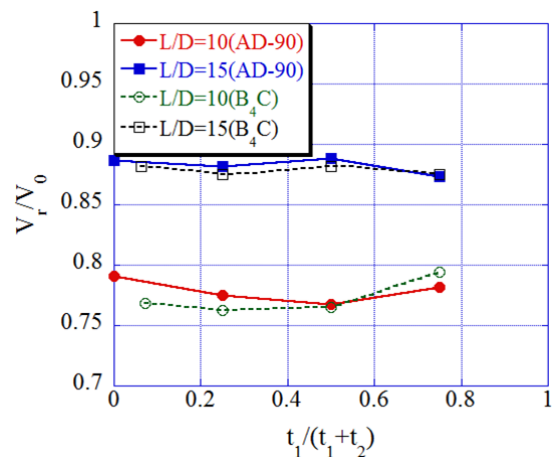
각 조건에 따라 충돌 수치해석을 수행한 결과 긴 관통자의 초기속도 대 잔류속도의 비(Fig. 4), 초기질량 대 잔류질량의 비(Fig. 5), 초기운동에너지 대 잔류운동에너지의 비(Fig. 6)에 대한 그래프를 얻어냈다. 그래프 가로축의 $t_1/(t_1+t_2)$ 는 세라믹 타일이 금속판재에서 어디에 위치해 있는지



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Predicted residual velocity ratio under the ceramic tile thickness of (a) 16.8mm, (b) 28mm, (c) 39.2mm

를 나타내는 비를 의미한다. 세라믹 타일의 위치 비 값이 커진다는 것은 금속판재에 삽입된 세라믹 타일의 위치가 뒤쪽에 있다는 것을 의미한다.

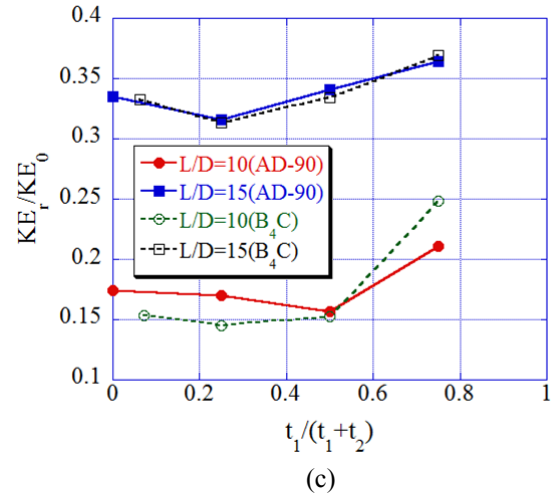
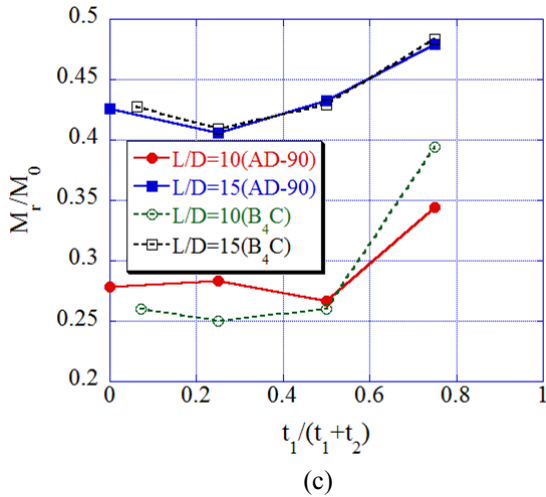
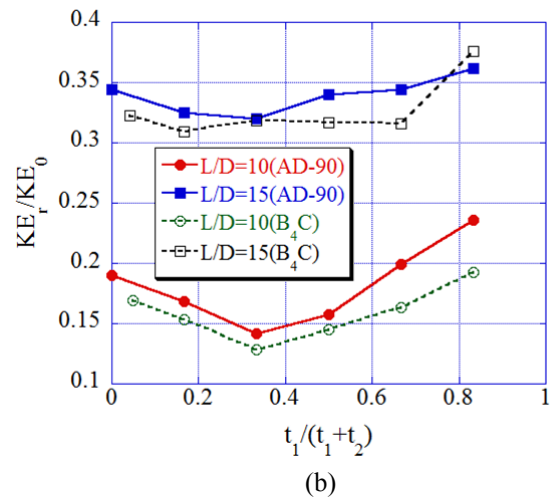
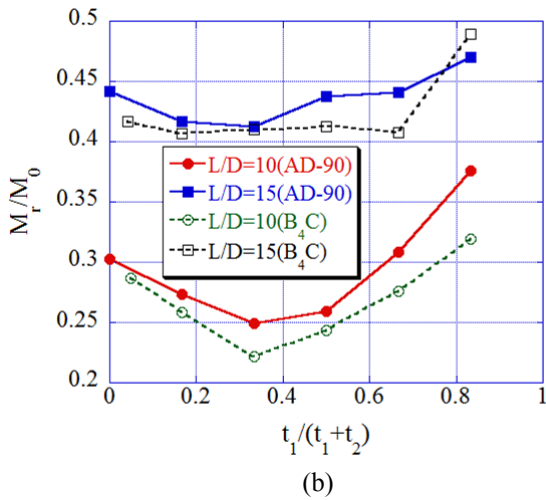
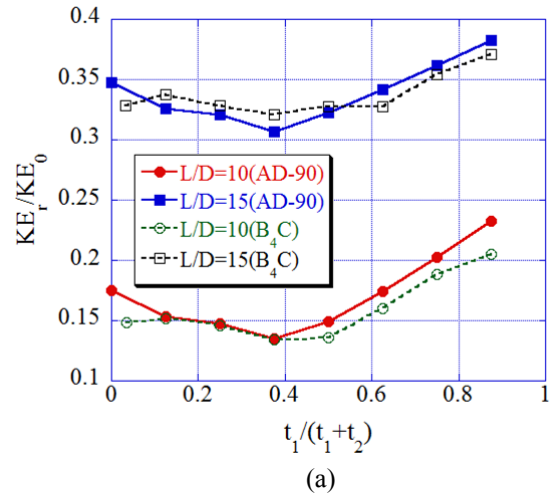
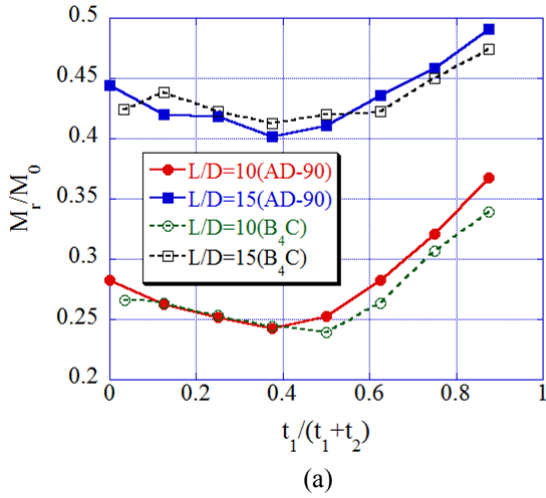


Fig. 5 Predicted residual mass ratio under the ceramic tile thickness of (a) 16.8mm, (b) 28mm, (c) 39.2mm

수치해석 결과 대략적으로 그래프의 거동은 초기에 세라믹 타일의 위치 비 값이 증가하면서 예측되는 값들이 감소하다가 위치 비가 약 0.4이상

Fig. 6 Predicted residual kinetic energy ratio under the ceramic tile thickness of (a) 16.8mm, (b) 28mm, (c) 39.2mm

이 되면서부터 예측되는 값들이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다시 말해, 두 세라믹 재료가 $t_1/(t_1+t_2)$ 값이 처음부터 뒤로 갈수록 구조물의

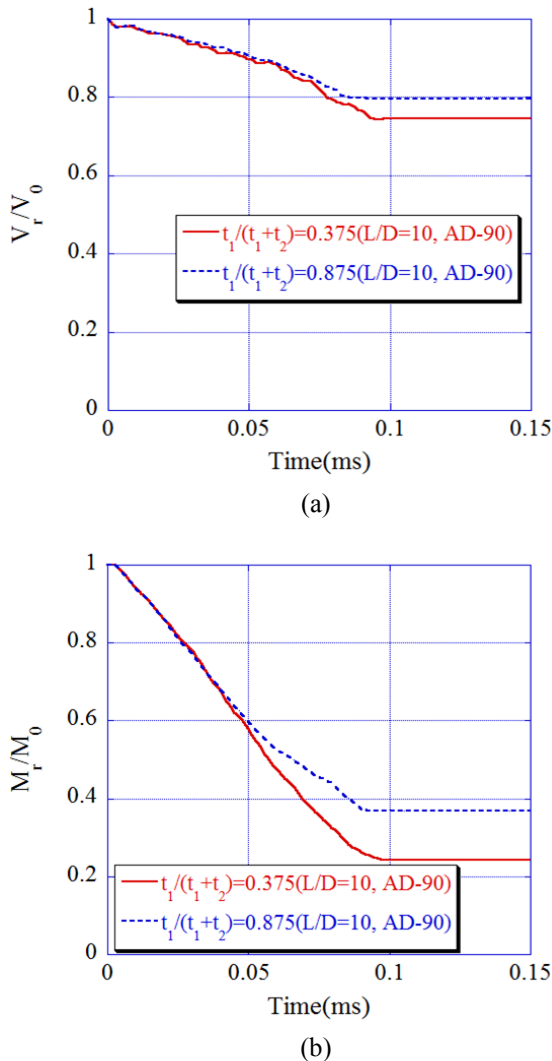


Fig. 7 Predicted residual velocity(a) and residual mass(b) about the two position ratios(0.375, 0.875) of AD-90 ceramic tile(L/D=10, $t_c = 28mm$)

방호 성능이 증가했다가 감소하는 경향을 보인다는 것이다. AD-90이 B_4C 보다 그리고 $L/D=10$ 이 $L/D=15$ 보다는 앞에서 언급한 그래프의 거동이 더 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 그래프들을 토대로 일반적으로 앞쪽의 금속판이 세라믹 타일의 방호 성능을 향상시킨다는 점을 발견했다. 참고문헌⁽⁷⁾에서도 세라믹 타일 앞쪽의 cover plate가 세라믹 타일의 방호 성능을 향상시킨다고 언급되어 있다. 그리하여, 현 문제에 대해서는 두 가지 세라믹 타일 모두 다 $t_1/(t_1+t_2)$ 값이 대략 0.3~0.5 정도로 설계하는 것이 바람직하다. 하지만, $t_1/(t_1+t_2)$ 값이 0.7 이상인 경우에는 설계를 피하는 것이 좋다. 뒤쪽 판이 얇아지

게 되면 충돌에너지를 견디지 못해 판이 뒤쪽으로 밀리는 현상이 일어나게 되는 것을 시뮬레이션 영상으로 관찰할 수 있었다. 이러한 현상으로 인해 오히려 방호 성능이 $t_1/(t_1+t_2)$ 값이 초기일 때 보다 더 저조하게 나온 것으로 추정된다.

3.2 예측되는 값들의 관계 및 분석

긴 관통자의 잔류운동에너지의 경향성은 잔류속도보다는 잔류질량이 결정하는 것으로 나타났다. 그래프에서 볼 수 있듯이 잔류속도 보다는 잔류질량의 그래프가 잔류운동에너지와 비슷하게 행동하는 것을 알 수 있으며, 예측되는 값들 중에서 잔류속도의 경향성은 가장 뚜렷하지 않다. 어떤 물체의 운동에너지는 질량에 비례하고 속도의 제곱에 비례하는데 상식 밖의 결과가 나왔다. 그 이유를 알아보기 위해 AD-90($t_c = 28mm$), $L/D=10$ 이면서 세라믹 타일의 위치 비가 각각 0.375, 0.875인 조건에서 시간에 따라 긴 관통자의 잔류속도의 비와 잔류질량의 비가 어떻게 되는지 알아보기 위해 Fig. 7로 나타났다. 시간별로 잔류속도와 잔류질량은 감소하고 있지만 변화율의 차이를 보이고 있다. 잔류속도는 천천히 감소하는 반면에 잔류질량은 이보다는 더 급격하게 감소한다. 즉, 잔류질량이 잔류속도보다 시간에 대한 감소 변화율이 크기 때문에 Fig. 7을 통해서도 알 수 있듯이 세라믹 타일의 각 위치별로 예측되는 잔류질량의 차이는 잔류속도의 차이보다 더 클 수밖에 없다.

3.3 세라믹 타일의 두께에 따른 질량 효율

질량 효율은 방호 구조에서 세라믹 타일을 추가시키거나 두께를 증가시키는 것이 의미가 있는지를 판단하는 기준이다. Fig. 6에서 각 세라믹 타일마다 최고의 방호효과를 가지는 총 12개의 값을 선택하였다. 질량 효율을 알아보기 위해 이 값들을 가지고 질량비(M_{ratio})에 따른 잔류운동에너지의 비($KE_r/KE_{r(ref)}$)에 대해 Fig. 8로 나타났다. 여기서 하첨자로 ref라고 표시된 값은 타겟이 세라믹 타일이 없고 순수 4340-steel로만 되어 있을 경우의 값을 의미한다. 질량비는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$M_{ratio} = \frac{M_{ref}}{M} = \frac{\rho_{steel} t_{total}}{\rho_c t_c + \rho_{steel} (t_{total} - t_c)} \quad (4)$$

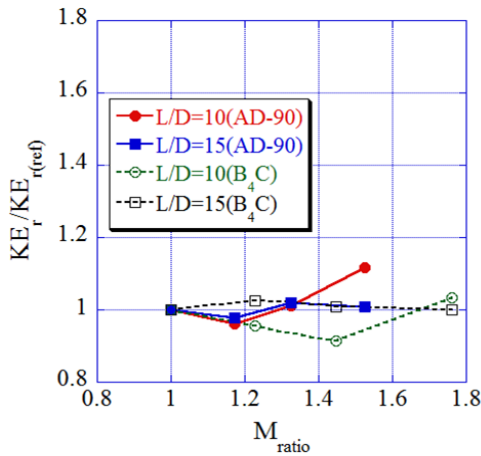


Fig. 8 Mass efficiency of ceramic tile

고려한 두 종류의 세라믹 밀도는 4340-steel의 밀도보다 작기 때문에 M_{ratio} 값이 증가한다는 것은 구조물에서 세라믹의 두께가 두꺼워 졌다는 것을 의미한다.

질량 효율은 그래프 기울기가 감소하거나 완만하면 질량 효율이 좋다는 것을 뜻하며 기울기가 가파르면 질량 효율이 나빠져 구조물에 세라믹 타일을 추가하는 것이 의미가 없다는 것을 나타낸다. 여기서 양의 기울기일 때 완만한지 가파른지에 대한 판단은 방호구조 설계자의 몫이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 세라믹의 두께가 증가할수록 질량비는 계속 늘어나 구조물의 질량이 줄어들고 있지만 그에 비해 잔류운동에너지의 비는 대략 1 근처에서 변화가 작기 때문에 세라믹 타일을 구조물에 추가시키거나 두께를 늘리면 질량 효율이 좋아지는 것을 확인할 수 있다.

3.4 최적 방호구조 결정

참고문헌⁽⁸⁾에서 실험을 통해 앞선 두 번째 검증문제와 비슷한 모델로 여러 종류의 세라믹 타일의 방호 성능을 측정하였다. 그 결과, B_4C 가 AD-90보다 방호 효과의 측면에서 더 효과적이라고 언급되어 있다. Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6을 통해서 알 수 있듯이 $t_c = 16.8mm$, $L/D=15$ 를 제외하고는 대체로 AD-90 그래프 아래에 B_4C 그래프가 있다. 참고문헌에서 얻어진 결과가 충돌 수치해석을 통해 완벽하진 않지만 어느 정도 맞게 나왔음을 확인하였다. B_4C 가 AD-90보다 방호 효과가 좋을 뿐만 아니라 무게가 가볍기 때문에 단순 금속판재에 대비하였을 경우 질량 효율적인 측면

에서도 $t_c = 16.8mm$, $L/D=15$ 인 경우를 제외하고는 좀 더 좋은 효과를 보인다는 것을 Fig. 8을 통해서도 알 수 있다.

소제목 3.1과 3.3을 가지고 각각 두 가지 세라믹 재료가 삽입된 금속판재에 대한 최적의 방호구조를 종합적으로 판단할 수 있다. 현 문제의 케이스들 중에서 두 세라믹 타일 모두 다 약 0.64의 두께 비를 가지면서 위치 비가 약 0.3~0.5의 범위를 가지는 조건이 가장 이상적인 방호 구조물이라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 세라믹 타일이 삽입된 금속판재의 최적 방호구조를 평가하기 위해 각각 두 종류의 세라믹 타일의 세 가지 두께에 대해서 금속판재에 삽입된 위치를 다르게 하여 충돌 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충돌 후 긴 관통자의 예측되는 잔류속도, 잔류질량, 잔류운동에너지를 통해 두 세라믹 타일 모두 위치 비가 처음에서부터 증가할수록 구조물의 방호 성능이 일반적으로 증가했다가 감소하는 경향을 보인다.

(2) 두 가지 세라믹 타일의 위치 비가 대략 0.3~0.5의 범위를 가질 때 구조물의 방호 성능이 가장 좋다.

(3) 세라믹 타일의 위치 비에 따라 긴 관통자의 잔류운동에너지의 경향은 잔류속도 보다는 잔류질량에 의해서 결정된다.

(4) 세라믹 타일 세 가지 두께 비(약 0.27, 0.45, 0.64) 중에서 0.64인 경우에 질량 효율의 관점에서 가장 좋다.

(5) 금속판재에 삽입된 B_4C 는 AD-90보다 예측되는 방호 성능과 질량 효율이 대체로 좋다.

(6) 금속판재에 삽입된 각각 두 가지 세라믹 타일의 위치 비에 따른 방호 성능과 두께 비에 따른 질량 효율을 바탕으로 두 가지 모두 두께 비가 약 0.64이면서 위치 비가 약 0.3~0.5일 때에 가장 최적의 방호 구조를 가진다는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 2014년 민군기술협력사업 및 방위사업청/국방과학연구소 (UD140011GD) 지원을 받아 이루어졌음에 감사드립니다.

참고문헌
(References)

- (1) Anderson, C. E., Jr. and Morris, B. L., 1992, "The Ballistic Performance of Confined Al₂O₃ Ceramic Tiles," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp.167~187.
- (2) Lee, C. H., Choi, J. H., Chang, S. N. and Hong, S. I., 1994, "A Study on High Velocity Impact Phenomena by a Long Rod Penetrator," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 18, No. 3, pp. 573~583.
- (3) Johnson, G. R. and Holmquist, T. J., 1994, "An Improved Computational Constitutive Model for Brittle Materials," *High pressure science and technology-1993*, Vol. 2, pp. 981~984.
- (4) CeraSurf Wear-Resistant Ceramic Components, www.coorstek.com, 2014.
- (5) Lundberg, P., Westerling, L. and Lundberg, B., 1996, "Influence of Scale on the Penetration of Tungsten Rods into Steel-Backed Alumina Targets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp.403~416.
- (6) Johnson, G. R. and Holmquist, T. J., 1999, "Response of Boron Carbide Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures," *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No. 12, pp. 8060~8073.
- (7) Anderson, C. E., Jr. and Royal-Timmons, S. A., 1997, "Ballistic Performance of Confined 99.5%-Al₂O₃ Ceramic Tiles," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp.703~713.
- (8) Woolsey, P., Mariano, S. and Kokidko, D., 1989, "Alternative Test Methodology for Ballistic Performance Ranking of Armor Ceramics," *Fifth Annual TACOM Armor Coordinating Conference*.