

금속복합판재 적용 다층 구조 방호성능 평가

이민형^{*,1)} · 박상원¹⁾ · 조일국²⁾

¹⁾ 세종대학교 기계항공우주공학부
²⁾ 한국재료연구소 기능복합재료연구실

Metal Matrix Composite(MMC) Layered Armour System

Minhyung Lee^{*,1)} · Sang-Won Park¹⁾ · Ilguk Jo²⁾

¹⁾ School of Mechanical & Aeronautical Engineering, Sejong University, Korea
²⁾ Functional Composite Department, Korea Institute of Materials Science, Korea

(Received 25 July 2017 / Revised 26 September 2017 / Accepted 24 November 2017)

ABSTRACT

Analysis has been performed for the penetration of a long-rod into MMC/Ceramic layered armour system with several shot test and a series of simulations. Two types of MMC plate have been fabricated by a liquid pressing method; A356/45%vol.%SiCp with a uniform distribution of SiC particle and Al7075/45%vol.B4Cp with B4C particle. The mechanical properties were measured with the high-speed split Hopkins bar test, hardness test and compression test. The popular Simplified Johnson-Cook model was adopted to represent the material characteristics for FEM simulations. The performance of the MMC applied armour system has been made by comparing with the semi-infinite mild steel target using the depth of penetration(DOP). The results show that placing ceramic front layer provides a certain gain in protection, and that placing another ductile front layer provides a further gain. The application of MMC is found to be attractive.

Key Words : Armour(방호구조), MMC(금속복합재), DOP(침투 깊이), Long-rod (운동탄)

1. 서론

군수분야에 있어서 장갑기능은 방호 성능뿐만 아니라 기동성측면에서 가벼울수록 유리한 측면이 많다. 따라서 무거운 중량을 가진 강을 대체할 수 있는 첨단

소재를 개발하고 있다. 본 연구에서는 이러한 재료로 금속복합소재(Metal Matrix Composites, MMC)를 선정하고 제조과정을 통하여 고속충돌시험까지 기초적인 평가를 수행하였다. 금속복합소재란 금속계 합금을 기지고 하고 세라믹계 강화재를 분산시켜 만든 소재로서 단일 금속재료보다 더 좋은 재료 물성이 예상된다^[1]. 본 연구에서는 금속복합소재(Al7075/SiC)와 세라믹 타일(SiC)로 적층된 판에 고밀도 운동에너지탄을 수직

* Corresponding author, E-mail: mlee@sejong.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

고속 충돌하는 현상을 수치해석 및 고속 충돌시험으로 평가하는 연구를 수행하였다. 먼저 강과 금속복합소재의 질량 효율을 비교해보았다. 다음으로 금속복합소재를 전면부와 후면부에 적층하고 가운데 판재로는 세라믹을 부가한 구조에 대한 충돌해석을 수행하였다. 관통 깊이(DOP, Depth of Penetration) 및 면밀도를(areal density) 비교하여 새로운 MMC재료의 방호구조 성능 평가를 분석하였다.

2. 고속 충돌 시험

2.1 MMC 타겟판재 제작

Table 1에 시험에 사용된 타겟 판재들을 제시하고 있다. 비교 기준값을 제시할 강의 물성은 제조사에서 받았으며 SiC 세라믹 블록의 물성은 제조사 및 재료 연구소에서 추가 시험을 하여 확보하였다. 본 연구의 주요 재료인 MMC에 대한 정적물성은 재료연구소에서 그리고 동적물성은 포항공과대학에서 실험이 수행되었고 이를 제공받았다.

Table 1. Target layers

	Front Layers	Back-Up (Semi-Infinite)
Case 0 (Reference)		Mild steel
Case 1	SiC only	Mild steel
Case 2	Steel / SiC / Steel	Mild steel
Case 3,4,5	MMC/SiC/MMC	Mild steel

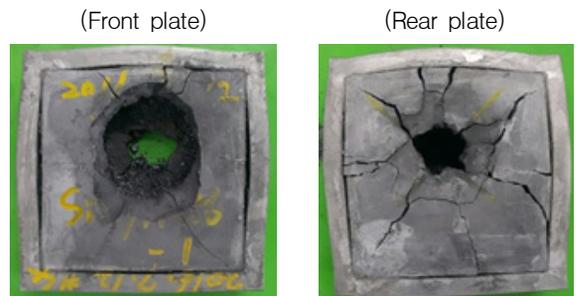
2가지 종류의 MMC를 제조하였다. 첫 번째는 A356 모체에 45 %의 체적비로 10 μ m SiC 입자 강화재를 주입하였고, 두 번째는 Al7075에 동일한 체적비로 B4C 강화재를 사용하였다. 제조 과정은 참고논문^[2]에 자세히 설명되어 있다.

2.2 고속 충돌 시험

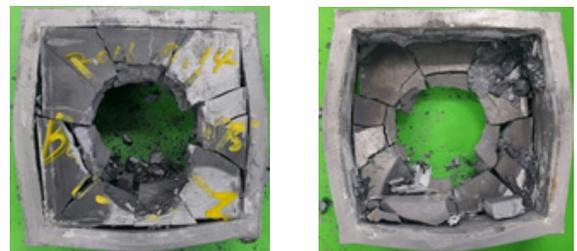
운동탄 고속충돌시험은 국방과학연구소에서 이루어졌으며 충돌속도 1.3 km/s 이상에서 수행되었다. 본 시험의 주요 목적은 다른 재료대비 MMC재료의 방탄성능을 비교 평가한 것이다. 칩투깊이에 대한 결과 비교

는 다음 장에서 기술하고 여기서는 충돌시험 후 회수한 2가지 종류의 MMC 방탄판재 사진을 Fig. 1에 제시하였다.

우선적으로 두 종류 MMC 모두에서 공통으로 나타나는 현상은 다음과 같다. 전면 MMC보다 후면 MMC에서 반경방향 크랙이 많이 나타난다. 가운데 삽입된 SiC 세라믹은 분쇄되어 가루로 변하지만 연성의 물성을 일부 지니는 MMC는 대체로 형상을 유지하면서 반경방향 크랙이 주로 발생되었다. 두 가지 MMC 재료간의 비교에서는 SiC주입 MMC보다 B4C MMC에서 상대적으로 많은 크랙이 발생함을 알 수 있다.



(a) 회수한 판재(전·후면 A356/45%vol.%SiCp)



(b) 회수한 판재(전·후면 Al7075/45%vol.%B₄Cp)

Fig. 1. Recovered MMC layered targets

3. 수치 해석

3.1 재료물성 및 재료모델

본 연구에 사용된 재료는 모두 4가지이다. 운동탄은 텅스텐합금, 백업 반무한판은 연강, 중간 적층판은 SiC 세라믹, 그리고 앞뒷면 적층판으로 MMC 재료가 적용되었다. 첫 번째 두 재료는 연성의 성질을 지니므로 완전소성재료 모델을 사용하였고 Table 2에 물성값을 제시하였다. 그리고 세라믹재료는 가장 일반적인 JH-2

(Johnson-Holmquist) model^[3]이 적용되었다. 이 모델은 여러 가지의 재료상수값을 필요로 하는데 기본적인 것은 자체 구하였고 특수한 값은 문헌을 참고하였다.

2가지 종류의 MMC 재료에 대해 포항공과대학에서 split Hipkins bar test로 동적시험을 수행하였다. Fig. 2에 SiC입자를 사용한 MMC 재료의 시험자료 및 피팅한 결과를 비교하여 제시하였다. 그 자료를 바탕으로 일반적이고 간단한 다음의 Simplified Johnson-Cook model로 피팅하고 계수값 4개(A, B, N, C)를 확보하였다.

$$\sigma_y = (A + B\epsilon_p^N)(1 + C\ln\dot{\epsilon}) \quad (1)$$

여기서, σ_y 는 flow stress, ϵ 는 plastic strain, 그리고 $\dot{\epsilon}$ 는 plastic strain rate이다. 현재 strain rate = 0.001, 1000 2 가지에서 시험이 이루어졌는데 차후 추가적으로 더 큰 변형률속도에서도 이루어질 예정이다. 다소 정확도에서 차이를 보일 수는 있으나 경향을 보여주는 수치 해석의 역할로는 무난할 것으로 판단된다.

Table 2. Mechanical properties

	Tungsten alloy	Mild steel
Density (g/cm ³)	17.2	7.82
E (GPa)	350.0	200.0
Poisson ratio	0.3	0.3
Flow stress (GPa)	2.0	0.65

Table 3. JH-2 model constants(SiC)

Property	Value	Property	Value
Density (g/cm ³)	2.82	SFmax	0.8
G (GPa)	183	HEL	14.567
A	0.96	P_HEL	5.9
B	0.35	D1	0.48
M	1	D2	0.48
N	0.65	K1 (GPa)	204.79
EPSI	1	K2	0
Sig (GPa)	0.37	BETA	1

*. 변수 설명은 참고문헌 [1]

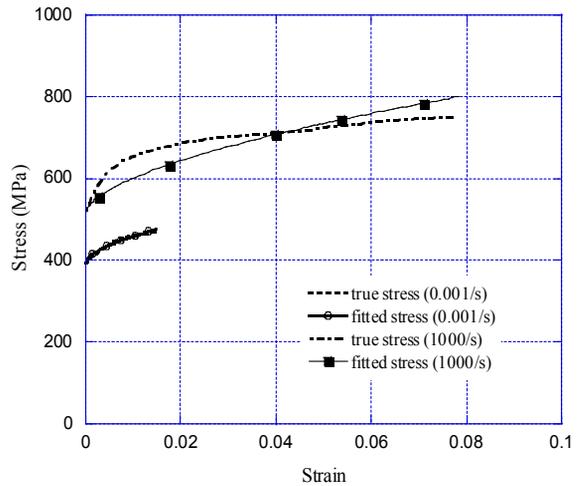


Fig. 2. Stress-strain curves(A356/45%vol%SiCp)

3.2 수치 모델링

수치계산 방법론을 검증하기 위해 기준값을 제시할 수 있는 연강 반무한판에 대한 침투해석을 수행하였다. 해석은 3차원 LS-DYNA explicit solver를 활용하였다. 반무한판의 크기는 100.8 mm × 100.8 mm × 140 mm(깊이)로 정하였다. 수직충돌결과로도 성능평가는 충분하며 이 경우 대칭면의 존재로 1/4 블록 계산영역만 설정가능하다. 충돌속도는 1.3 km/s 이상에서 수행하였다. 운동탄의 길이대 직경비는 10.6이다. 동일 크기의 메쉬를 사용하였으며 최종적으로 정한 메쉬 사이즈는 0.7 mm이다. 이 경우 평균적인 전체 요소수는 약 800,000개이며 계산 시간은 대략 12시간 50분 소요되고 있다. 적절한 요소 수와 계산시간으로 판단된다. 그리고 여러 번의 테스트를 바탕으로 erosion strain은 1.2로 통일하게 모든 계산을 수행하였다. 타겟의 형상을 비교 대상별로 Fig. 3에 나타내었다.

연강 반무한 블록의 경우 (Case 0) 시뮬레이션으로 얻어진 침투깊이는 88.9 mm이다. 이 결과는 시험 결과값 대비 3 % 이내의 오차를 나타내는 만족스러운 값이다. 따라서 충돌 수치해석 방법론 및 금속 재료모델에 대한 신뢰도를 확보하였다고 볼 수 있다.

다음으로 이중의 소재들을 사용한 적층의 변화에 따른 방호성능 자료를 확보하기 위해 Case 1에서는 20.3 mm의 세라믹 판재를 전면부 부착하고 계산을 수행하였다. 다음으로 Case 2에서는 연강/세라믹/연강 3개의 적층을 부착하고 고속충돌 계산을 수행하였다. 여기서 연성의 금속으로 추가로 적층을 만든 이유는 금속이

세라믹 방호재에 구속효과를 가하여 방호력의 극대화 가능성을 확인하는 것이다.

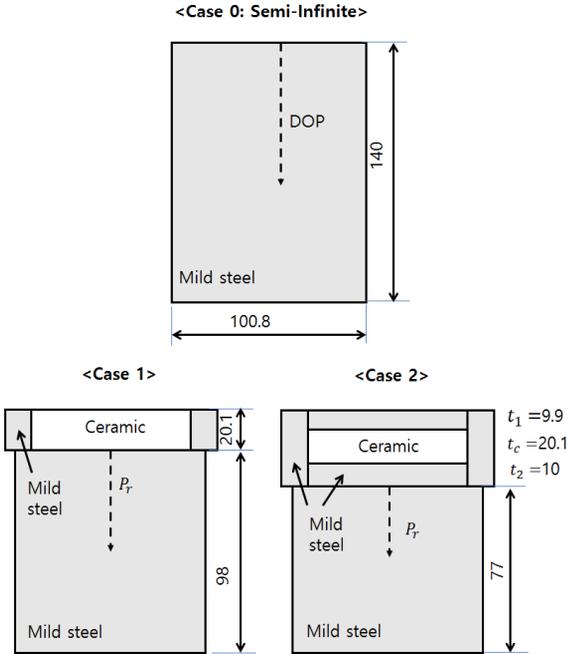


Fig. 3. Target cases(0, 1, 2)

밀도 즉 중량이 다른 재료간의 성능을 비교하기 위해 아래 식 (2), (3)과 같이 질량 비(M_ratio)와 침투깊이 비(DOP_ratio)를 설정하였다. 질량비는 일반적인 용어인 면밀도를 이용한 것이다. 면밀도 기준값은 역시 연강 반무한판으로 사용하였다. 여기서 면밀도는 방호에 사용된 방호판재의 단위면적당 질량을 의미한다. 아래 식 (2)와 같이 정의하면 질량비가 1보다 작으면 연강보다 가벼운 판재로 동일한 방호성능을 나타내는 것을 의미한다. 질량비가 작으면 작을수록 방호판재 중량감소 이득이 많음을 나타낸다. 두 번째 지수로 설정된 DOP 비는 기준 침투깊이 대비 각각의 구조에 대해 얻어지는 침투깊이의 비를 나타낸다. 아래 식에 사용되는 변수들을 Fig. 3에 도시하였다.

$$M_{ratio} = \frac{\rho_1 t_1 + \rho_{sic} t_c + \rho_{steel} P_r}{\rho_{steel} DOP_{steel}} \quad (2)$$

$$DOP_{ratio} = \frac{DOP_{total}}{DOP_{case0}} = \frac{\text{부가판재} + P_r}{DOP_{case0}} \quad (3)$$

Fig. 4의 결과에서 먼저 전면에 세라믹 판재를 부가한 경우(Fig. 3에서 Case 1), 연강 반무한판보다 침투깊이에서는 비슷하나 중량에서 20 % 감소이득이 있음을 알 수 있다. 즉, 20 % 가벼운 방호구조로 동일한 방호성능을 얻을 수 있음을 잘 보여준다. 그리고 Case 2의 경우 추가적인 약 3~4 % 질량감소효과뿐만 아니라 침투깊이의 감소도 5 % 정도 얻어지는 것을 보여준다. 따라서 세라믹을 감싸는 encapsule 효과는 일부 나타나는 것으로 확인된다¹⁴. 각각의 수치값을 Table 3에 별도로 제시하였다.

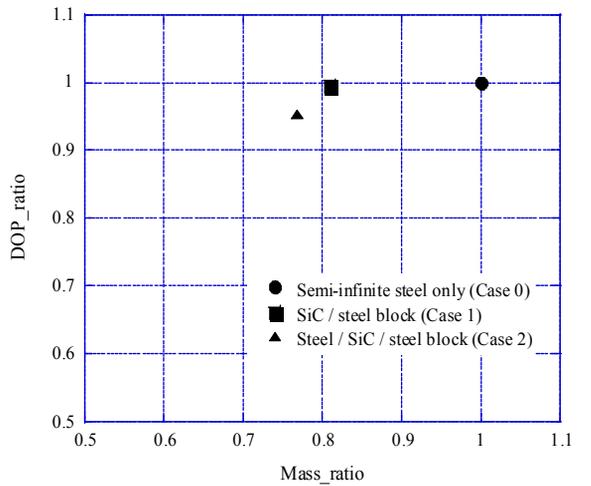


Fig. 4. DOP_ratio vs. Mass_ratio

Table 4. Summaries of results for cases 0~2

	DOP_total (mm)	DOP_ratio		M_ratio
		Simulation	Test	
Case 0	88.9	1.0	3% error	1.0
Case 1	88.37	0.994	N/A	0.809
Case 2	84.74	0.953	N/A	0.768

3.3 MMC 결과 비교

Fig. 5와 Table 5에서와 같이 3가지 조합으로 MMC 방호재료의 성능을 평가해 보았다. 전면 또는 후면 위치에 따라 다른 종류의 MMC를 설치하고 그 효과를 조사하였다(경사 기능이라 지칭함). SiC세라믹 블록은 모든 경우에 대해 중간 판재로 설치하였으며 옆면에는 연강소재로 가이드를 만들어 추가적인 감싸는

(encapsule) 효과를 도모하였다.

시험 및 수치계산 각각의 결과를 Fig. 6과 Table 6에 비교하여 제시하고 있다. 시험에서는 동일 방호구조를 3가지 준비하고 최대한 동일조건에서 3번의 시험을 수행하고 그 평균값을 얻었다. 본 연구에서와 같이 고속충돌 시험의 경우 충돌각도 및 시편의 제작상태에 따라 시험 결과값의 편차가 많이 나타나는 특징을 보임을 인지할 필요가 있다. 본 시험은 국내에서는 유일하게 국방과학연구소에서 가능하다.

Table 5. MMC layered target configuration

	MMC_front layer	middle layer	MMC_rear layer
Case 3	Al7075/B4Cp	SiC	A356/SiCp
Case 4	A356/SiCp	SiC	A356/SiCp
Case 5	Al7075/B4Cp	SiC	Al7075/B4Cp

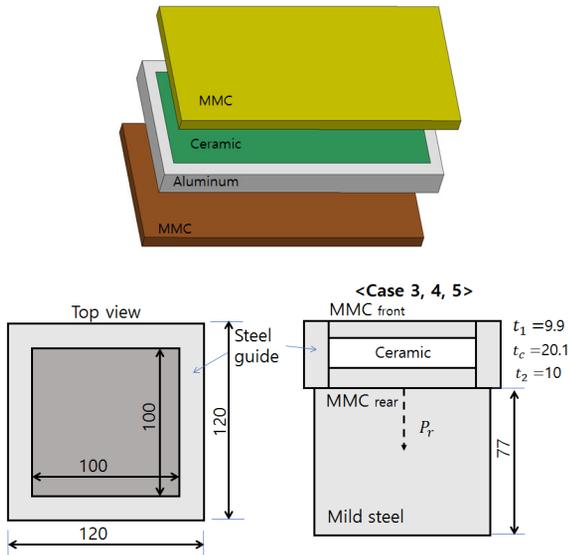


Fig. 5. Target cases with MMC(3, 4, 5)

기준이 되는 Case 0 대비 거의 모든 방호구조 조합에서 방호성능의 저하 없이 중량감소 이득을 보이고 있다. MMC를 적용한 방호구조의 경우 연강만을 사용한 구조대비(Case 0) 성능저하 없이 30% 이상 중량감소 효과를 보인다. 또한 강/SiC/강 구조(Case 2) 대비해서도 약 15% 정도의 중량감소 이득이 나타난다.

수치계산의 경우 Case 5가 가장 우수한 구조로 예측하고 있으나 시험에서는 Case 3가 가장 우수한 것으로 나타났다. 하지만 차이가 미비하여 오차 범위 이내로 볼 수도 있기에 선부른 결론은 무리라 판단된다. 시편 시험에서 얻어진 재료강도와 실제 방호구조 제작에 사용된 판재의 기계적 물성이 다소 상이한 경우 이러한 결과가 얻어질 수 있다. 현재 MMC 복합판재 제작 공정 기술의 안정화가 더욱 요구된다.

Table 6. Summaries of results for cases 0, 3~5

	DOP_total (mm)	DOP_ratio		M_ratio
		Simulation	Test	
Case 0	88.9	1.0	1.0	1.0
Case 3	91.21	1.026	0.91*	0.633
Case 4	89.78	1.010	0.96*	0.638
Case 5	85.17	0.958	0.95*	0.548

* 동일 3번 시험 평균값

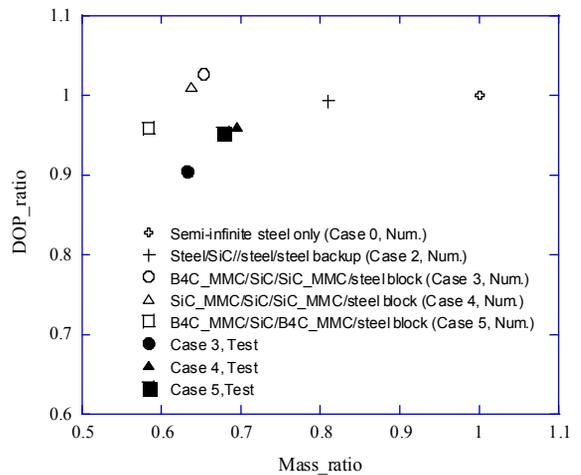


Fig. 6. Comparison of DOP_ratio vs. M_ratio

4. 요약

새로운 공정으로 제작한 금속판재(MMC)가 운동에너지탄을 막는 부가방호구조로 적용가능성을 확인하기 위해 고속충돌시험 및 수치계산으로 평가연구를 수행하였다. 충돌속도는 1.3 km/s 이상에서 우선적

로 수직충돌상황만 고려하였다. 연강의 반무한판에 대한 침투깊이를 기준값으로 설정하고 새로운 부가장갑을 설치하는 경우에 대해 침투깊이 및 질량효율을 비교 검토하였다. MMC판재의 제작은 한국재료연구소에서 이루어졌으며, 이 재료에 대한 고속변형 물성은 포항공과대학에서 수행되었다. 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 연강 반무한판에 세라믹 판재를 부가하는 것만으로도 방호성능 감소 없이 중량이득이 나타난다.
- (2) 세라믹 판재 앞뒷면에 연성의 금속을 추가 부가하면 중량 증대 없이도 방호성능은 다소 증가하였다. 이는 세라믹을 감싸는 효과가 일부 나타난 것으로 판단된다.
- (3) 세라믹 판재 앞뒷면에 부가된 연성의 금속을 MMC로 변경한 경우 방호성능 감소 없이 방호성능이 추가적으로 다소 증대되었다. 이것은 단순 연성의 금속보다는 연성과 취성을 모두 지니는 MMC가 바람직한 역할을 수행하였다고 보인다. 즉 세라믹을 감싸는 *encapsule* 효과 및 탄 저지력이 우수한 세라믹의 취성이 동시에 나타남을 의미한다.
- (4) 마지막으로 현재의 자료만으로는 강화재로 SiC와 B4C중에 우열을 가리기에는 미소한 차이만 발생하기에 부족함이 있다.

후 기

본 연구는 2014년 민군기술협력사업의 지원을 받아 이루어졌음에 감사드립니다(2014M3C1A9060719).

References

- [1] G. R. Johnson and T. J. Holmquist, "An Improved Computational Constitutive Model for Brittle Materials," High Pressure Science and Technology, AIP Conference Proceedings 309, 1994.
- [2] J. M. Lee, S. K. Lee, S. J. Hong and Y. N. Kwon, "Microstructures and Thermal Properties of A356/ScCp Composites Fabricated by Liquid Pressing Method," Materials and Design, Vol. 37, pp. 313-316, 2012.
- [3] D. S. Cornin, K. Bui, C. Kaufman, G. McIntosh and T. Berstad, "Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-DYNA," 4thEuropeanLS-DYNA User Conference, 2003.
- [4] C. E. Anderson and S. A. Royal-Timmons, "Ballistic Performance of Confined 99.5%-Al₂O₃ Ceramic Tiles," International Journal of Impact Engineering, Vol. 19, pp. 703-713, 1997.