

## 크리깅 근사모델기반 복합충격 저항 샌드위치 패널 최적설계

장성우<sup>1</sup> · 백운경<sup>1</sup> · 최해진<sup>1†</sup> · 박순석<sup>2</sup>

<sup>1</sup>중앙대학교 기계공학부, <sup>2</sup>한화총합연구소

### Design Optimization of Blast and Ballistic Impact Resistance Sandwich Panels Based on Kriging Approximate Models

Sungwoo Jang<sup>1</sup>, Woon-Kyoung Baik<sup>1</sup>, Hae-Jin Choi<sup>1†</sup>, and Soon Suk Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.

<sup>2</sup>Hanwha Corporation Defence R&D Center

Received 25 June 2015; received in revised form 10 July 2015; accepted 29 July 2015

#### ABSTRACT

Sandwich panels consisting of various materials have widely been applied for mitigating dynamic impacts such as ballistic and blast impacts. Especially, the selection of materials for different core set-ups can directly influence its performance. In this study, we design the sandwich panels for alleviating ballistic and blast impacts by controlling the stacking sequence of core materials and their thicknesses. FEM studies are performed to simulate the dynamic behavior of sandwich panels subjected to ballistic and blast impacts. Delamination between the core layers is also considered in the FEM studies for feasible design. Based on the FEM data, kriging models are generated for approximating design space and quickly predicting the FEM outputs. Finally, design optimizations are implemented to find the optimum stacking sequence of core materials and thicknesses with given impact situations.

**Key Words:** Ballistic impact, Blast impact, Design optimization, Kriging model, Sandwich panels

## 1. 서 론

샌드위치 패널은 이종이상의 재료를 겹쳐 접착한 특수 복합패널을 일컫는다. 샌드위치 복합재는 표면 판으로 상대적으로 강도가 큰 재료를 사용하고, 코어(충진재)는 충격흡수에 유리한 경량 재료를 삽입하여 방탄, 충격흡수, 방음 및 방진 성능을 고려하여 제작한다. 이렇게 제작된 샌드위치 패널은 무게대비 강성이 우수하여 항공기 날개, 자동차

차 차체 프레임, 방호 구조물 등 군수 및 민수 산업용에 폭넓은 활용이 가능하다. 본 연구에서는 폭발, 탄자 충격과 같은 강한 충격에 저항하여 군수물자 및 인명 피해를 방지하기 위한 복합충격 샌드위치 패널의 설계에 초점을 두기로 한다.

복합충격 흡수용 샌드위치 패널은 내부 충진재의 재료 선택에 따라 그 성능이 크게 좌우된다. 폭발 및 탄자 충격과 같은 복합충격에 저항하기 위한 샌드위치 패널의 코어 충진재로서 가장 많이 활용되고 있는 재료는 발포 알루미늄이다. 알루미늄괴(Aluminum Ingot)를 용해한 후 증점제와 발포제를 첨가하여 스폰지 형상으로 발포시켜 제조

<sup>†</sup>Corresponding Author, hjchoi@cau.ac.kr  
©2015 Society of CAD/CAM Engineers

한 발포 알루미늄은 우수한 에너지 흡수성능 외에도 경량성, 흡음성, 불연성, 전자파 및 열 차폐성, 환경친화성, 재활용성 등의 다양한 장점을 가지고 있어, 이를 활용한 구조물 해석 및 설계 등 연구개발이 활발히 진행되고 있다<sup>[1,2]</sup>.

발포 알루미늄 외에도 방호 구조물의 충격 흡수성능 향상을 위해 폴리우레아, 폴리우레탄과 같은 재료의 중간층을 추가한 다양한 적층 구조를 가진 샌드위치 패널이 제시되고 있다<sup>[3-5]</sup>. 또한, 탄자의 국부적 충격력을 확산시켜 피해를 저감하기 위하여 샌드위치 패널 표면 층에 고경도 세라믹 패널을 덧대어 활용할 수 있다.

이처럼 다양한 적층 구조를 가진 샌드위치 패널의 충격 해석에서 고려되어야 할 사항은 재료의 각 접합계면에서 발생하는 박리현상이다. 이는 재료가 가지는 고유의 취성 및 강성이 복합적으로 작용하여 본래 적층 구조가 가지는 성능에 미치지 못할 가능성이 있으므로 성능 해석에서 반드시 고려되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 박리현상이 고려된 충격 해석 모델을 기반으로, 충격저감 재료로 선정된 재료의 적층 순서와 두께를 최적화하여 폭발 및 탄자 복합 충격에 우수한 저항 성능을 가지는 샌드위치 패널 설계를 목표로 한다. 이를 위해 본문 2절에서는 다양한 재료를 활용한 샌드위치 패널의 FEM 해석에 대한 고찰, 3절에서는 FEM 해석을 바탕으로 크리징 모델의 생성, 4절에서는 크리징 모델을 활용한 패널의 최적설계, 마지막으로 결론 순으로 기술한다.

## 2. 복합충격에 대한 FEM 모델링

### 2.1 탄자 충격 FEM 모델링

탄자 충격 해석을 위하여 ANSYS AUTODYN<sup>®</sup>을 활용하였다. Fig. 1과 같이 샌드위치 패널은 탄자 충격을 받는 쪽으로 두께 2 mm의 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 층을 위치시키고 이후 두께 1.2 mm의 AISI 4340 고강도 강으로 구성된 두 표층 사이를 폴리우레아, 폴리우레탄 및 발포 알루미늄으로 구성된 내부 충진재로 채운다. 내부 충진재의 총 두께는 6 mm로 제한하였고 이는 현재 군에서 활용되고 있는 기존 K676 추진장약통의 크기를 변화시키지 않고 충격 저감성능을 향상시키기 위함이다.

해석시간 단축을 위하여 Axisymmetric 조건을 부여하였고 고체 대변형 해석 조건에 적합한

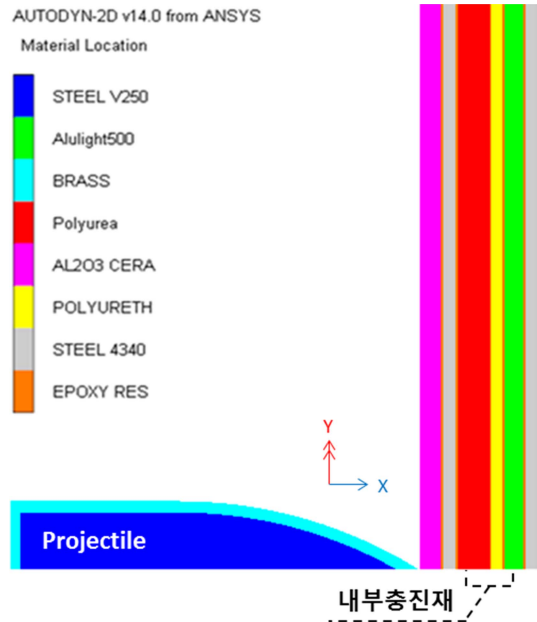


Fig. 1 Ballistic impact FEM model

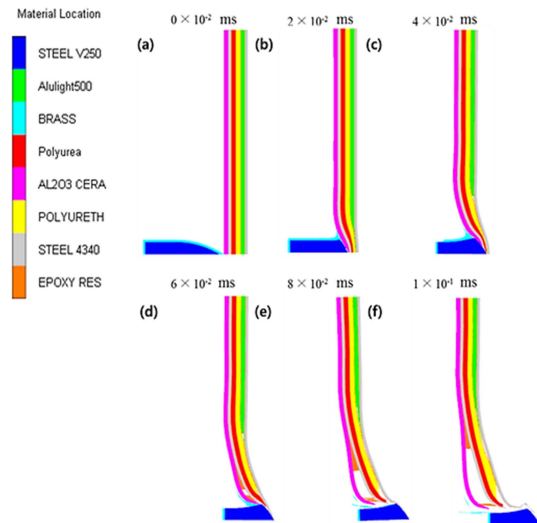


Fig. 2 Ballistic impact FEM simulation results

Lagrange solver를 활용하였다. 탄자 충격을 집약적으로 전달받을 패널 중심부를 세밀한 Mesh로 구성하였다. 패널 상단 부는 Clamped 경계조건으로 고정시켰으며 탄자의 충격속도는 STANAG 4241 규격에 따라 850 m/s로 적용하였다. 또한 각 적층 계면에서 발생하는 박리현상을 고려하기 위하여 에폭시 접착 층을 모델링하여 탄자가 패널을 관통할 때 에폭시 접착 층이 파괴됨으로써 박리현

**Table 1** Material properties

	EOS Model	Strength Model	Failure Model
Aluminum Foam (Alulight 500)	P-alpha	Von Mises	Hydro
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Porous density: 0.5 g/cm<sup>3</sup></li> <li>· Porous soundspeed: 3075.974 m/s</li> <li>· <math>\rho_c</math>: 2311.402 KPa</li> <li>· <math>\rho_s</math>: 40804.59 KPa</li> <li>· Compaction exponent: 3.0</li> <li>· Solid EOS: Shock</li> <li>· Parameter C1: 5240.0</li> <li>· Parameter S1: 1.4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Shear Modulus: 18140 KPa</li> <li>· Yields Stress: 2311.402 KPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Hydro Tensile Limit: -2 GPa</li> </ul>
Polyurea	Hyperelastic	Hyperelastic	None
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Reference Density: 1.1 g/cm<sup>3</sup></li> <li>· Reference Temperature: 293 K</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mooney-Rivlin 2parameters</li> <li>· C 10: 872.2 KPa</li> <li>· C 01: 6321.3 KPa</li> <li>· d: <math>4 \times 10^7</math> KPa</li> </ul>	
Polyurethane	Linear	Elastic	Principal Stress
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Reference Density: 1.26 g/cm<sup>3</sup></li> <li>· Bulk Modulus: 2 KPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Shear Modulus: 5000 KPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Principal Tensile Failure Stress: 34.5 MPa</li> </ul>
Steel 4340	Linear	Johnson Cook	Johnson Cook
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Reference Density: 7.83 g/cm<sup>3</sup></li> <li>· Bulk Modulus: 159 GPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Shear Modulus: 77 GPa</li> <li>· Yields Stress: 0.792 GPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Damage Constant, D1: 0.05 D2: 3.44 D3: -2.11 D4: 0.002 D5: 0.61</li> </ul>
Ceramic (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -99.5)	Polynomial	Johnson-Holmquist	Johnson-Holmquist
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Reference Density: 3.89 g/cm<sup>3</sup></li> <li>· Bulk Modulus A1: 2.31 GPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Shear Modulus: 1.52 GPa</li> <li>· Hugoniot Elastic Limit: 6.57 GPa</li> <li>· A: 0.88 · N: 0.64 · B: 0.28</li> <li>· M: 0.6</li> <li>· Max. Fracture Strength Ratio: 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Hydro Tensile Limit: -0.262 GPa</li> <li>· Damage Constant, D1: 0.01 D2: 0.7</li> </ul>
Epoxy Resin	Shock	Cowper Symonds	Hydro
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Reference Density: 1.19 g/cm<sup>3</sup></li> <li>· Parameter C1: 2730 m/s</li> <li>· Parameter S1: 1.49</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Shear Modulus: 1.6 GPa</li> <li>· Yield Stress: 450 MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Hydro Tensile Limit: -1.5 KPa</li> </ul>
Pentolite	JWL	None	None
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Parameter W:0.35</li> <li>· C-J Detonation velocity: 7530 m/s</li> <li>· C-J Energy/unit volume: 8.1 GJ/m<sup>3</sup></li> </ul>		
Steel V250	Shock	Steinberg Guinan	None
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Reference Density: 8.13 g/cm<sup>3</sup></li> <li>· Gruneisen coefficient : 1.6</li> <li>· Parameter C1 : 3980 m/s</li> <li>· Parameter S2 : 1.434</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Shear Modulus : 71.8 GPa</li> <li>· Yield Stress : 1.56 MPa</li> </ul>	
Brass	Shock	None	None
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Reference Density: 8.45 g/cm<sup>3</sup></li> <li>· Gruneisen coefficient : 2.04</li> <li>· Parameter C1 : 3726 m/s</li> <li>· Parameter S1 : 1.434</li> </ul>		
Air	Ideal Gas	None	None
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Gamma: 1.4</li> </ul>		

상을 모사하게 하였다. 이와 같은 모사기법은 Ackland *et al.*<sup>[6]</sup>의 연구에서 실험치와 비교, 그 정확성이 검증된 바 있다. 본 해석에 적용된 재료의 물성과 구성방정식은 Table 1과 같다.

Fig. 2는 탄자 충격 해석 결과를 나타낸다. 최초 충격 후 시간 경과에 따른 패널의 관통 모습을 관찰할 수 있으며 접착계면 사이 에폭시 층의 유실로 박리현상을 관찰할 수 있다. 해석을 통해 패널의 충격 저항 성능을 확인하기 위하여 탄자가 패널을 관통한 직후의 탄자 잔류속도를 계산하여 패널의 저항성능으로 평가하였다.

2.2 폭압 충격 FEM 모델링

폭압 충격 FEM 모델 또한 Fig. 1과 같은 샌드위치 패널 구성을 가지고 수행하였다. Fig. 3과 같이 폭압 충격이 가해지는 패널의 중심부 관찰과 해석 시간 절감을 위해 Quarter symmetry 조건으로 구성하였고 패널과 10 mm 떨어진 곳에 지름 54.34 mm 과 중량 142.85 g을 가지는 Pentolite 폭발을 구성하였다. 또한 패널 주변 공간에 공기 층을 모델링하여 공기를 매개로 폭압이 전파될 수 있도록 구성하였다. 폭압 전파는 유체거동 해석에 적합한 Euler solver를 활용하고 패널의 변형은 Lagrange solver를 활용하여 두 해석간의 Coupling을 통해 폭압 전달로 인한 패널의 변형을 해석하였다. 패널 주변부는 탄자 충격과 마찬가지로 Clamped boundary condition을 부여하여 고정시켰으며 공기 층의 모든 측면에 Flow out조건을 부여하여 생성한 공기 측면으로부터 반사되는 폭발 압력 및 에너지를 배제하도록 구성하였다.

해석의 결과로 샌드위치 패널의 충격 저항 성능을 확인하기 위하여 패널 중심부 뒤편의 처짐 값을 관찰하였다.

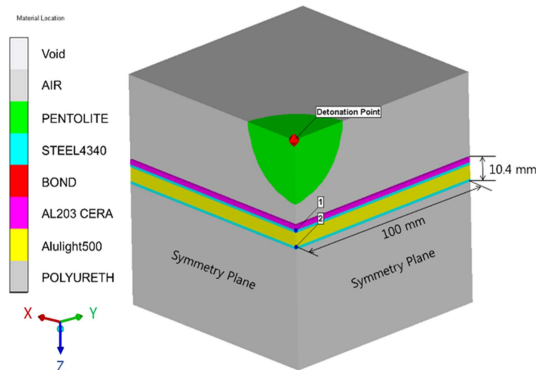


Fig. 3 Blast impact FEM model

을 관찰하였다. 해석에 적용한 재료 물성 데이터는 Table 1과 같으며 폭압 해석의 모습은 Fig. 4와 같다. 해석 결과, 폭발이 시작되고 짧은 시간 안에 폭발 압력이 패널 중심부로 전달되면서 패널의 처짐이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 특히 기공성 재질인 발포 알루미늄 층은 폭압이 전달됨에 따라 압축되는 것을 확인할 수 있다. 폭압 해석에서도 충돌해석에서와 마찬가지로 각 재료의 접착 계면이 벌어지면서 박리현상이 관찰되었다.

3. 복합충격 크리깅 근사모델

앞서 2장에서 수행한 폭압 및 탄자 충격 FEM 해석 모델을 바탕으로 크리깅(Kriging) 근사모델을 생성하였다. 크리깅 모델은 Deterministic한 시뮬레이션 모델을 대체하여 설계 인자 값이 변함에 따라 신속히 해석 결과 값을 예측할 수 있는 메타 모델링 기법으로 많은 공학설계 문제에서 도입되어 활용되고 있다<sup>[7,8]</sup>. Kriging 근사 모델의 수학적 모델은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$y(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x})^T \boldsymbol{\beta} + Z(\mathbf{x}) \tag{1}$$

여기서 설계변수  $\mathbf{x}$ 는 각 적층구성 별 재료의 두께 변수이며,  $\mathbf{f}(\mathbf{x})^T \boldsymbol{\beta}$ 는 설계공간 내 일반적 근사화

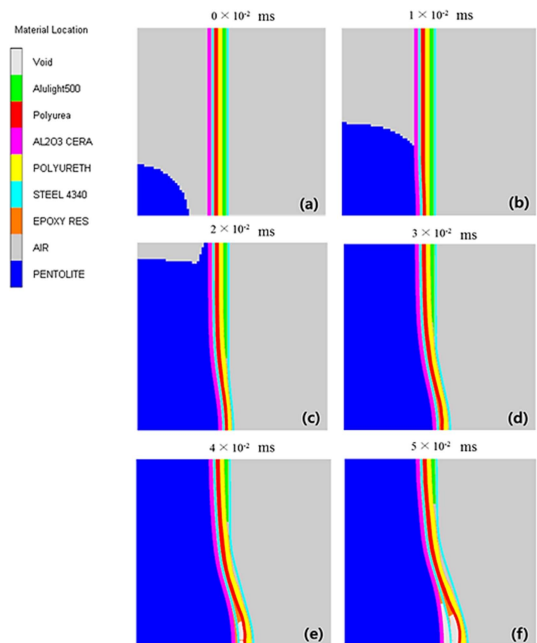


Fig. 4 Blast impact FEM simulation results

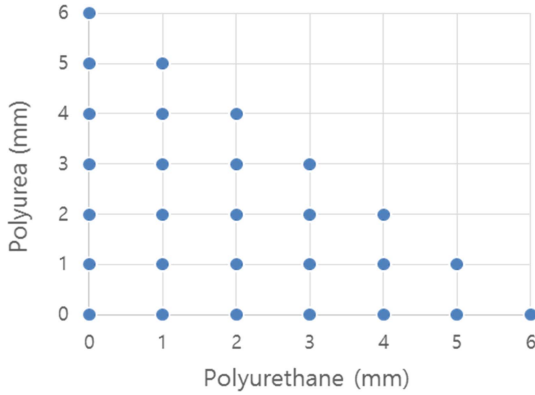


Fig. 5 Kriging sample points

를 위한 회귀 모델이다. 또한  $Z(\mathbf{x})$ 는 회귀 모델 근사값에서 각 시뮬레이션 결과값의 오차를 보정하기 위한 국부적 오차 값을 나타낸다.

설계 변수는 3가지 충전 재료가 총 6가지 적층 순서를 가질 수 있으며, 각 적층 순서 별로 3가지 재료의 두께를 설계 변수로 나타낼 수 있으나, 총 충전재 두께의 합은 6 mm이므로, 이중 두 재료의 두께가 독립 설계변수라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 폴리우레아와 폴리우레탄의 두께를 독립 변수로 각각  $t_1, t_2$ 로 지정하였다.

크리깅 근사모델을 생성하기 위하여 설계공간 내 FEM 해석을 수행할 샘플 포인트를 결정해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 폴리우레아, 폴

리우레탄의 두께를 각 적층 순서 별로 28개의 샘플 포인트를 생성하여 탄자 및 폭압 해석을 수행하였다. 이는 설계 공간 내 샘플 포인트를 많이 생성할수록 크리깅 모델의 정확도가 높아지나 해석에 필요한 시간을 고려하여 적절히 선택하였다. 수행한 FEM 해석 결과를 바탕으로 설계 전역을 근사화하는 크리깅 근사모델을 재료의 적층 순서에 따라 각각 생성하였다.

Fig. 6은 탄자 충격 해석 결과를 바탕으로 적층 순서 별로 크리깅 모델을 생성한 모습이다. 그림에서 각 크리깅 모델은 검은 점으로 표현한 28개의 샘플 포인트 해석 값과 이외 주변 공간을 근사화한 것을 확인할 수 있다. 이렇게 생성한 크리깅 모델은 각 적층 순서와 재료 두께가 주어질 때 탄자의 잔류 속도를 신속히 예측할 수 있어 반복적인 목적 또는 제약함수를 계산해야 하는 최적 설계에 효과적으로 활용할 수 있다.

탄자 충격 크리깅 근사모델의 결과를 살펴보면 우선 충전재 구성을 단일 재료로 구성할 때(삼각형 면적의 각 꼭지점) 탄자의 잔류속도가 전반적으로 높은 것을 확인할 수 있었으며 이로부터 탄자 충격 저항 성능을 향상시키기 위해 적층 구조가 많을수록 더욱 유리한 것을 확인할 수 있다. 또한 폴리우레탄만 패널 내부 충전재로 구성할 때 탄자 잔류 속도가 가장 높은 것을 보아 단일 재료 충전 시 폴리우레탄이 비교적 불리한 것을 확인할

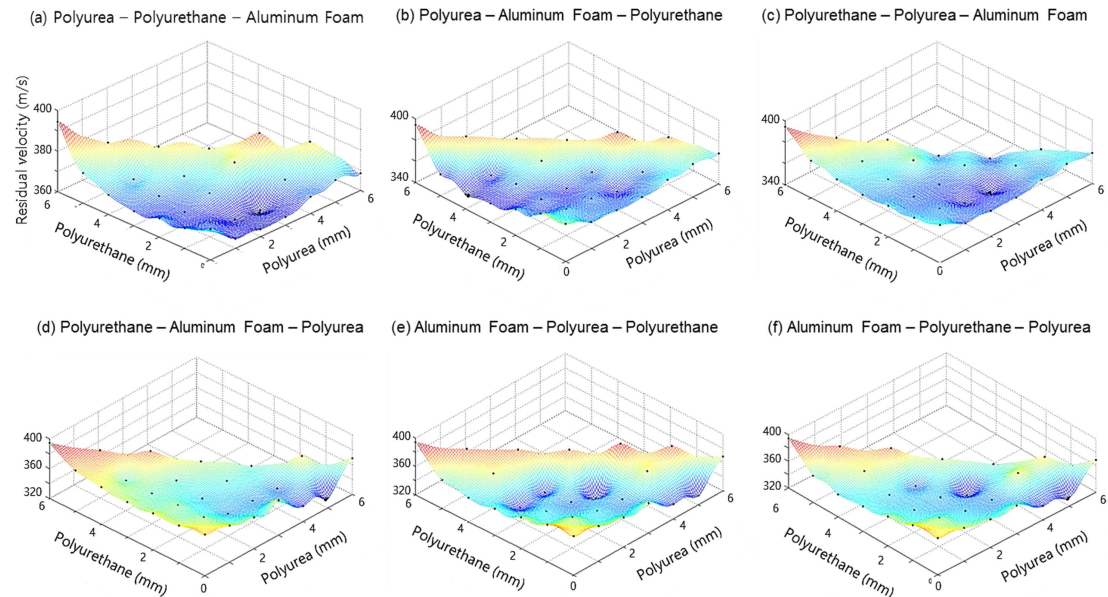


Fig. 6 Bullet impact kriging models

수 있다. Fig. 6의 (e), (f) 를 살펴보면 발포 알루미늄이 충전재 구성에서 앞서 위치할 때 잔류속도 분포가 비선형적이며 비교적 탄자 잔류속도가 높은 것을 보아 발포 알루미늄은 폴리우레탄, 폴리우레아보다 탄자 충격이 가해질 시 가장 뒤쪽에 배치하는 것이 유리하다고 볼 수 있다. 반면, Fig. 6의 (c)의 경우 비교적 선형적이며 낮은 탄자 잔류속도가 분포된 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 외판으로부터 폴리우레탄-폴리우레아-발포 알루미늄 순서로 적층된 샌드위치 패널이 탄자 충격에 보다 효과적인 것으로 판단하였다.

탄자 충격 크리깅 모델과 마찬가지로 Fig. 7과 같이 폭압 충격 크리깅 모델을 생성하였다. 폭압 충격 크리깅 모델은 내부 충전재 적층 순서에 따른 패널의 처짐 값의 변화가 민감하지 않아 탄자 충격에 가장 유리한 폴리우레탄-폴리우레아-발포 알루미늄 순의 적층 구조만을 고찰하였다. 그림의 크리깅 근사모델에서 보면 폴리우레아, 폴리우레탄의 두께가 작을수록 처짐 값이 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 다시 말해, 샌드위치 패널의 내부 충전 구성에서 발포 알루미늄의 비중이 높을수록 폭압 충격에 대한 저항 성능이 증대되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 탄자 및 폭압 복합충격에 대한 샌드위치 패널의 다목적 최적설계

앞서 수행한 크리깅 모델의 생성 결과, 샌드위치 패널의 충전재 적층 순서는 폴리우레탄-폴리우레아-발포 알루미늄이 가장 효과적이며, 탄자 충격에는 적층 구조가 많을수록, 폭압 충격에는 발포 알루미늄의 구성이 많을수록 충격 흡수에 유리한 것을 확인하였다. 이에 따라 충격 상황에 따라 적절한 충전재 구성이 필요한 것을 알 수 있으며 이 두 가지 복합충격에 대한 충전재 두께 최적설계를 수행하였다. Table 2는 다목적 최적 설계를 위한 문제 정식화를 나타낸다.

설계 변수는 앞서 언급한 바와 같이 폴리우레아, 폴리우레탄의 두께  $t_1, t_2$ 이며 두 재료의 두께가 정해지면 발포 알루미늄의 두께가 정해지도록 제약 조건을 부여하였다. 또한 단일 재료로 충전 구성이 가능하도록 각 재료의 두께를 6 mm까지 설계 범위를 지정하였다. 두 재료의 두께 값이 변함에 따라 패널의 처짐 값 및 탄자 잔류속도는

**Table 2** Problem formulation for multi-objective optimization of sandwich panel

Given		
$f_1(t_1, t_2)$ = residual velocity from bullet impact kriging model (smaller-the-better)		
$f_2(t_1, t_2)$ = deflection from blast impact kriging model (smaller-the-better)		
Find		
$t_1$ = Polyurea thickness (mm)		
$t_2$ = Polyurethane thickness (mm)		
Satisfy		
- Constraints		
$t_1 + t_2 \leq 6$ mm		
- Bounds		
$0 \leq t_1$ (mm) $\leq 6, 0 \leq t_2$ (mm) $\leq 6$		
Minimize		
$Z = w_1 \cdot \frac{f_1(t_1, t_2)}{f_{1MAX}} + w_2 \cdot \frac{f_2(t_1, t_2)}{f_{2MAX}}$		
where $w_1 + w_2 = 1$		
[Case 1] $w_1 = 0, w_2 = 1$	[Case 2] $w_1 = 1, w_2 = 0$	[Case 3] $w_1 = w_2 = 0.5$

3절에서 생성한 크리깅 모델을 활용하여 예측할 수 있다. 최소화하기 위한 목적함수는 각각의 크리깅 모델의 결과로 도출되는 탄자 잔류속도와 처짐 값을 각각의 최대값으로 Normalize한 후 가중치를 부여하여 구성하였다.

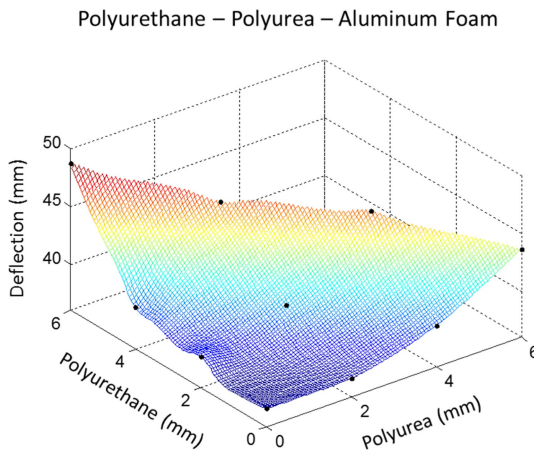
본 연구에서는 세가지 경우로 가중치를 설정하여 최적설계를 수행한다. Case 1은 폭압 충격 하에 패널의 처짐 값에만 가중치를 부여하여 최적 두께를 구하는 조건이며, 반대로 Case 2는 탄자 충격에 대한 최적 설계 조건이다. 마지막으로 Case 3의 경우 탄자 잔류속도와 처짐 값을 동일한 가중치로 부여하여 두 성능을 최적화하도록 설정하였다. 최적 설계는 최적화 알고리즘 중 유전자 알고리즘을 활용하여 수행하였으며 결과는 Table 3과 같다.

Case 1의 최적 설계 결과, 폭압 충격으로 인한 처짐량을 최소화하기 위한 패널은 폴리우레아를 제외한 폴리우레탄 약 1 mm와 발포 알루미늄 5 mm의 두께가 최적인 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 7의 폭압 충격 크리깅 모델을 통해 확인할 수 있다. Case 1의 결과는 탄자 잔류속도의 성능에 대한 가중치가 부여되지 않는 목적함수



**Table 3** Optimization results of sandwich panels

Case 1. $w_1 = 0$ and $w_2 = 1$				
Design variables		Performances		Z
$t_1$ (mm)	$t_2$ (mm)	Residual velocity (m/s)	Deflection (mm)	
0.00	1.04	369.69	37.27	0.75
Case 2. $w_1 = 1$ and $w_2 = 0$				
Design variables		Performances		Z
$t_1$ (mm)	$t_2$ (mm)	Residual velocity (m/s)	Deflection (mm)	
2.93	0.92	361.4	37.76	0.90
Case 3. $w_1 = 0.5$ and $w_2 = 0.5$				
Design variables		Performances		Z
$t_1$ (mm)	$t_2$ (mm)	Residual velocity (m/s)	Deflection (mm)	
1.17	0.12	364.09	37.48	0.83

**Fig. 7** Blast impact kriging model

로 최적화하였기 때문에 이와 같은 적층패널 구성은 탄자 잔류속도가 다소 증가되는 것을 확인할 수 있다.

Case 2의 경우, 탄자 잔류속도를 가장 많이 감소시키는 최적 두께는 Case 1과 비교하여 상대적으로 더욱 많은 폴리우레아 구성을 확인할 수 있다. 이는 예상된 바와 같이 탄자 충격에 대한 충진재 구성은 적층구조가 많은 것이 효과적임을 확인할 수 있었다.

마지막으로 Case 3의 경우는 폭압 및 탄자 충격 완화를 위해 폴리우레아, 폴리우레탄, 발포 알루미늄

미늄의 최적 적층 두께가 도출되었으며 상대적으로 발포 알루미늄의 비중이 큰 패널 구성을 확인할 수 있다.

결과적으로 볼 때, 폭압 충격 완화만을 위해서는 발포 알루미늄이 상대적으로 효과적이며 탄자 충격을 고려한 복합충격 패널은 세가지 재료 모두 활용하는 것이 유리한 것을 확인할 수 있으며 또한 폴리우레아가 폴리우레탄보다 더욱 효과적인 것을 확인할 수 있다. 또한, 위 세가지 경우에 따른 패널의 각 성능 차이가 미소하게 나타났으나, 이는 총 두께를 6mm로 제한된 공간 내에서 충진재를 사용하였기 때문인 것으로 판단되며, 공간의 여유가 증가할수록 그 차이는 커질 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 탄자 및 폭압 충격에 저항하기 위한 샌드위치 패널의 최적 구성에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 충격 완화를 위한 발포 알루미늄, 폴리우레아, 폴리우레탄의 충진 재료를 고려하여 폭압 및 탄자 충격에 대한 FEM 해석을 수행하였다. 또한 재료의 접합계면에서 발생하는 박리현상을 고려하기 위하여 접착 층을 모델링하여 충격에 따른 접착 재료 파괴로 박리현상을 모사하였다. 이후 다양한 적층 순서와 두께 별로 수행한 해석 데이터를 바탕으로 설계 공간을 근사화할 수 있는 크리깅 모델을 생성하여 최적의 적층 순서와 충격 상황에 유리한 충진 재료를 확인하였다. 확인 결과, 외관에서부터 폴리우레탄-폴리우레아-발포 알루미늄 적층 순서가 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 이러한 적층 순서를 토대로 각 재료의 최적 두께를 도출하였다. 최적 설계 결과, 발포 알루미늄이 폭압 충격 완화를 위해 더욱 유리한 재료로 판단되었고, 탄자 충격을 포함한 복합충격에는 폴리우레탄, 폴리우레아, 발포 알루미늄 모두 적절히 활용하는 것이 유리한 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 크리깅 모델을 활용한 최적 해에 대한 FEM 재해석을 통해 모델의 유효성을 검증하였다. 도출한 최적 설계 결과를 바탕으로 향후 연구에서는 실제 폭발 및 탄자 충격 시험을 거쳐 복합충격에 대한 최적 샌드위치 패널 구성의 효용성을 검증할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 Hanwha Corporation R&D center의 지원으로 수행하였습니다.

### References

1. Gama, B.A. *et al.*, 2001, Aluminum Foam Integral Armor: A New Dimension in Armor Design, *Composite Structures*, 52(3), pp.381-395.
2. Hou, W. *et al.*, 2010, Ballistic Impact Experiments of Metallic Sandwich Panels with Aluminium Foam Core, *International Journal of Impact Engineering*, 37(10), pp.1045-1055.
3. Yang, Y. *et al.*, On the Dynamic Response of Sandwich Panels with Different Core Set-ups Subject to Global and Local Blast Loads, *Engineering Structures*, 33(10), pp.2781-2793.
4. Grujicic, M. *et al.*, 2010, Blast-Wave Impact-Mitigation Capability of Polyurea when Used as Helmet Suspension-Pad Material, *Materials & Design*, 31(9), pp.4050-4065.
5. Yehia, A. *et al.*, 2007, Behavior of Sandwich Plates Reinforced with Polyurethane/Polyurea Interlayers under Blast Loads, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 9(3), pp.261-281.
6. Ackland, K. *et al.*, 2013, Deformation of Polyurea-Coated Steel Plates under Localised Blast Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 51, pp.13-22.
7. Lee, S.J., 2012, An Efficient Heuristic Algorithm of Surrogate-Based Optimization for Global Optimal Design Problems, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 17(5), pp.375-386.
8. Lim, W. *et al.*, 2015, Integrated Design Optimization for Combat Vehicle Using Kriging Surrogate Model of Firepower and Mobility, *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Conference*, pp.658-661.



**장 성 우**

2012년 중앙대학교 기계공학과 학사  
 2014년 중앙대학교 기계공학과 석사  
 2015년~현재 중앙대학교 기계공학과 박사과정



**백 운 경**

2013년 중앙대학교 기계공학과 학사  
 2015년 중앙대학교 기계공학과 석사



**최 해 진**

1995년 연세대학교 기계공학과 학사  
 1997년 연세대학교 기계공학과 석사  
 2001년 Georgia Institute of Technology, Mechanical Engineering, M.S.  
 2005년 Georgia Institute of Technology, Mechanical Engineering, Ph.D  
 2007년~2009년 싱가포르 난양공대 기계항공공학부 조교수  
 2010년~현재 중앙대학교 기계공학부 부교수



**박 순 석**

2007년 모스크바국립항공대학교 항공우주 학사  
 2010년 모스크바국립항공대학교 항공우주 석사  
 2011년~현재 ㈜한화 종합연구소 방산체계연구개발