



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(7), 465-470(2022)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.7.465

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 알루미늄 6061의 고속 충격 거동 특성 연구

변선우<sup>1</sup>, 안상현<sup>2</sup>, 백준우<sup>3</sup>, 이수용<sup>4</sup>, 노진호<sup>5</sup>, 정일영<sup>6</sup>

### High-Velocity Impact Behavior Characteristics of Aluminum 6061

Seon-Woo Byun<sup>1</sup>, Sang-Hyeon Ahn<sup>2</sup>, Jun-Woo Baek<sup>3</sup>, Soo-Yong Lee<sup>4</sup>, Jin-Ho Roh<sup>5</sup> and Il-Young Jung<sup>6</sup>

Korea Aerospace University, Goyang, Republic of Korea<sup>1-5</sup>

Hanwha Aerospace, Seongnam, Republic of Korea<sup>6</sup>

#### ABSTRACT

This paper studied the high-velocity impact behavior characteristics of metal materials by cross-checking the high-velocity impact analysis with the high-velocity impact experiment results of aluminum 6061. The coefficients of the Huh-Kang material model and the Johnson-Cook fracture model were calculated through quasi-static using MTS-810 and dynamic experimenting using the Hopkinson bar equipment for high-velocity impact analysis. The penetration velocity and shape were predicted through high-velocity impact analysis using the LS-DYNA. The results were compared with the experiment results using a high-velocity impact experiment equipment. It is intended to be used the containment evaluation research for aircraft gas turbine engine blade.

#### 초 록

본 논문은 알루미늄 6061의 고속 충격 해석과 고속 충격 시험 결과를 비교 검증하여 금속 재료의 고속 충격에 의한 거동 특성을 연구하였다. 고속 충격 해석을 위해 만능재료시험기를 이용한 준정적 시험과 Hopkinson bar를 이용한 동적 시험을 통해 Huh-Kang 모델과 Johnson-Cook 파손 모델의 계수를 구했다. LS-DYNA 프로그램 해석을 이용하여 관통 속도와 형상을 결과로 예측했고 고속 충격 시험기를 이용한 시험 결과와 비교하였다. 이를 바탕으로 항공기 가스터빈 엔진 블레이드 컨테인먼트 평가 연구에 적용하고자 한다.

**Key Words** : High Velocity Impact(고속 충격), Huh-Kang Model, Johnson-Cook Fracture Model, Strain Rate(변형률 속도)

#### 1. 서 론

항공기 운용에서 엔진 내부의 블레이드 파손이 발생하게 되면 항공기 동체에 큰 위협된다. 이 때문에 항공기 엔진 컨테인먼트 평가 연구 중 고속 충격에 의한 관통 해석은 중요하다. 충격 하중을 받는 구조물의 거동은 정적 하중을 받는 구조물의 거동과 다른 특성을 가진다[1].

충격 하중에서의 정확한 거동 분석을 위해서는 변형률 속도에 대한 재료 특성의 분석이 필요하다. 하중 조건은 변형률 속도에 따라 구분되는데 동적 하중 조건에서 재료는 짧은 시간에서 충격으로 변형된다. 동적 하중의 금속 재료 물성을 도출하기 위한 시험 방법으로는 Hopkinson bar와 Taylor 시험 방법 등이 있다[2]. 동적 하중에 의한 재료 거동 분석을 위해서는 변형률 속도에 대한 재료 특성 분석이 필요하다.

† Received : April 25, 2022 Revised : May 26, 2022 Accepted : June 1, 2022

<sup>1-3</sup> Graduate Student, <sup>4,5</sup> Professor, <sup>6</sup> Lead Researcher

<sup>5</sup> Corresponding author, E-mail : jinhoroh@kau.ac.kr, ORCID 0000-0002-4496-1490

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Sasso *et al.*[3]은 Hopkinson bar를 이용해 변형률 속도 500~1500 s<sup>-1</sup>에서 동적 모델의 계수를 산출하고 유한요소해석을 통해 검증하였다.

동적 모델 중 Johnson-Cook 모델과 파손 모델은 온도와 변형률 속도에 의한 영향을 고려하기 때문에 항공기 엔진의 블레이드 컨테이너먼트 해석과 같은 고속 충격에서 금속 재료 거동을 모사하는 데 많이 사용되어왔다. Zukas[4]는 정적 하중 조건에서의 지배방정식에 변형률 속도를 고려한 모델을 적용한 유한요소해석법을 통해 충격 거동 연구를 수행했고, 동적 하중에서 재료 거동을 표현한 재료 모델로서 Johnson-Cook 모델이 가장 적합함을 보였다. Lee *et al.*[5]은 Hopkinson bar를 이용하여 알루미늄 재료의 Johnson-Cook 모델의 계수를 도출하였다. Banerjee *et al.*[6]은 Johnson-Cook 모델과 파손 모델의 계수를 유한요소법에 의해 산출하고 충격 시험 결과와 비교하였다. 그리고 Wang *et al.*[7]은 Johnson-Cook 모델 계수를 이용, 충격 해석을 통해 충격 파편을 시험과 비교하여 동적 거동을 모사하였다. Kay[8]는 시험을 통해 항공기 엔진 케이스 재료의 Johnson-Cook 모델 계수를 도출하였으며, 이를 적용한 유한요소해석과 충격 시험을 비교하였다. Buzyurkin *et al.*[9]은 Johnson-Cook 모델 계수를 적용한 티타늄 엔진 케이스의 대한 고속 충격에 의한 재료 거동을 유한요소해석을 통해 예측하고 충격 시험으로 검증하였다. He *et al.*[10]은 Johnson-Cook 모델 계수를 적용한 가스터빈 엔진의 블레이드 파손에 의한 고속 충격을 해석하고 시험과 비교하였다. 하지만 Johnson-Cook 모델의 변형률 속도항에서 변형률 속도에 의한 동적 소성 하중은 선형적으로 변화하는 것으로 가정하기 때문에 변형률 속도가 높아짐에 따라 유효성이 떨어진다. 따라서 Kang *et al.*[11]은 Johnson-Cook 모델을 기반으로 변형률 속도에 대한 동적 소성 하중을 비선형적으로 변화하는 것으로 가정하는 Huh-Kang 모델을 제안하였다. Schwer[12]은 동적 소성 재료 모델의 변형률 속도에 따른 하중을 시험과 해석을 비교하였고 Johnson-Cook 모델이 변형률 속도에 따른 소성 하중이 약 14%의 오차를 보이는 반면, Huh-Kang 모델은 약 5%의 오차를 나타냄을 제시하였다.

본 연구에서는 알루미늄 6061에 대한 고속 충격에서의 정확한 관통 속도를 예측하기 위해 Huh-Kang 모델 계수와 Johnson-Cook 파손 모델 계수를 구하고 고속 충격 해석을 통한 관통 속도를 예측하였다. 알루미늄 6061에 대한 Huh-Kang 모델 계수와 Johnson-Cook 파손 모델 계수를 만능재료시험기(MTS-810)를 이용한 준정적 시험과 Hopkinson bar를 이용한 동적 시험을 통해 산출하였다. 고속 충격에 의한 파손 해석은 LS-DYNA 프로그램을 이용하였고 결과를 통해 관통이 발생하는 속도와 형상을 예측하였다. 이를 고속 충격 시험기를 이용한 시험결과와 비교하여 두 결과를 검증하였다.

## II. 본 론

### 2.1 충격 해석 모델

#### 2.1.1 Huh-Kang 모델

Johnson-Cook 모델의 경우 변형률 속도에 대한 동적 항복 응력의 변화를 선형적으로 가정한다. 이에 따라 변형률 속도가 높아짐에 따라 해석의 정확도가 감소한다. 따라서 Johnson-Cook 모델에 자연 로그 제곱항을 추가하여 변형률 속도에 대한 동적 항복 응력의 변화를 비선형적으로 가정하는 Huh-Kang 모델이 제시되었다(식 (1)).

$$\sigma_Y = [A + B\bar{\epsilon}_p^n][1 + C_1 \ln(\dot{\epsilon}^*) + C_2 \ln(\dot{\epsilon}^*)^2][1 - (T^*)^m] \quad (1a)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\bar{\epsilon}_p}{\epsilon_0}, \quad T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (1b)$$

여기에서  $\sigma_Y$ 는 동적 항복 응력,  $A$ 는 초기 항복 응력,  $B$ 와  $n$ 은 변형 경화 지수,  $\bar{\epsilon}_p^n$ 은 등가 소성 변형,  $C$ 는 변형률 속도에 따른 민감도,  $\dot{\epsilon}^*$ 은 무차원 변형률 속도,  $T^*$ 는 등가 온도,  $m$ 은 열적 연화 지수를 의미한다.

Huh-Kang 모델의 변형률 경화항의 모델 계수는 준정적 시험을 통해 도출한다. 준정적 시험은 변형률 속도 0.01 s<sup>-1</sup>으로 수행하며, 금속 재료 시험편은 ISO 26203-2에 의해 제작하였다[13]. 준정적 시험은 만능 재료시험기를 이용하였다. 알루미늄 6061에 대한 응력과 변형률 선도에서 초기 항복 강도는 0.2% offset 법을 이용한다. 이를 통해 Huh-Kang 모델의 초기 항복 응력( $A$ ), 변형 경화 지수( $B, n$ )를 구한다(Fig. 1).

Huh-Kang 모델에서 변형률 속도 경화항의 모델 계수는 동적 시험을 통해 도출하였다. 변형률 속도 10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup>에서 재료의 동적 거동 특성을 확인하고 계수를 도출하기 위해 Fig. 2와 같이 Split Hopkinson Tensile Bar(SHTB)를 이용하였다. 시험에서 시험편에 별도의 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 측정하

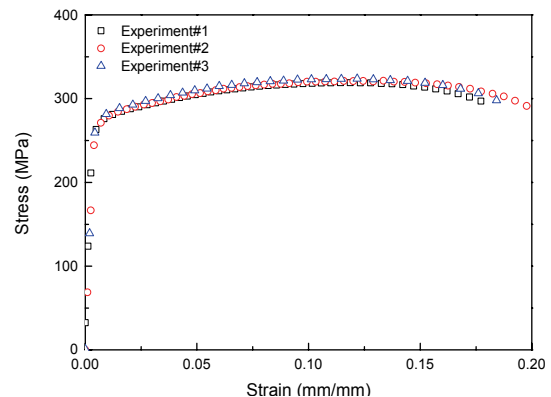


Fig. 1. Strain Hardening for Aluminum 6061

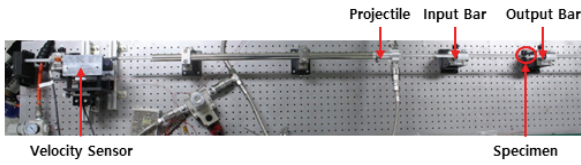


Fig. 2. SHTB Experiment Equipment

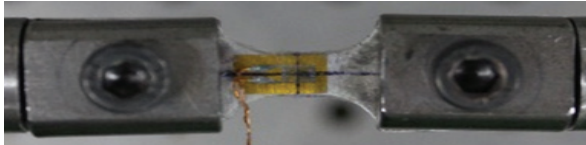


Fig. 3. SHTB Experiment Specimen

였다(Fig. 3). SHTB는 동적 인장에 대한 특성을 분석하기 위해 사용된다. 동적 인장 물성을 확인하기 위해 압축 공기로 인해 발사체가 발사되어 벽에 부딪히게 된다. 이에 따라 생성된 탄성파의 반사와 투과를 입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로 측정하여 응력을 구한다(식 (2)).

$$\sigma_{Ave}(t) = \frac{E_b A_b}{A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (2)$$

여기에서 입력봉과 출력봉은 시편과 같은 재료이고 단면적이 같다.  $E_b$ 는 입력봉과 출력봉의 탄성 계수,  $A_b$ 는 입력봉과 출력봉의 단면적,  $\varepsilon_i$ 는 인장파,  $\varepsilon_r$ 는 반사파,  $\varepsilon_t$ 는 투과파이다.

Huh-Kang 모델식에서 변형률 속도 경화항의 계수를 구하기 위한 상온 시험에서는 등가 소성 변형의 효과를 무시하고 변형률 속도 경화항만 고려하였다. 동적 소성 응력 결과를 통해 Huh-Kang 모델의 변형률 속도 경화항의 계수( $C_1$ ,  $C_2$ )를 구했다(Fig. 4). Table 1은 Huh-Kang 모델 계수이다.

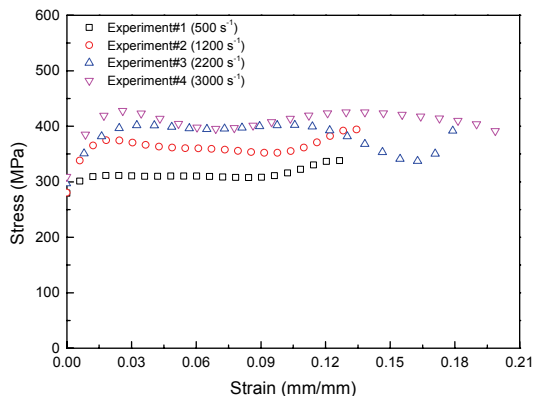


Fig. 4. Strain Rate Hardening for Aluminum 6061

Table 1. Coefficient of Huh-Kang Material Model

A	B	n	$\dot{\varepsilon}^*$	$C_1$	$C_2$	m
272	247	0.490	1	-0.052	0.009	0

### 2.1.2 Johnson-Cook 파손 모델

Johnson-Cook 파손 모델 방정식은 동적 거동 특성을 표현하기 위해 변형률 경화항, 변형률 속도 경화항 그리고 열적 연화항을 곱의 형태로 추가하여 관성에 의한 영향을 고려한다(식 (3)).

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] [1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}^*)] [1 - D_5 T^{*m}] \quad (3a)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}, \dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}, T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3b)$$

여기에서  $\varepsilon_f$ 는 파단 변형률,  $D_1$ 는 기공 성장 변형,  $D_2$ 는 지수 함수 계수,  $D_3$ 는 응력 삼축비 계수,  $\dot{\varepsilon}_p^n$ 은 등가 소성 변형,  $\dot{\varepsilon}^*$ 은 무차원 변형률 속도,  $D_4$ 는 변형률 속도 경화항 계수,  $T^*$ 는 등가 온도 그리고  $D_5$ 는 온도항의 계수를 의미한다. 시편은 노치의 크기에 따라 정수 응력이 파단에 미치는 영향을 파악하기 위해 노치의 크기를 다르게 제작하여 사용하였다. Fig. 5는 제작한 노치별 시편 형상이다.

응력 3축비를 계산하기 위해 시편의 파단 이후 횡단면 반지름과 기존 시편의 노치 반지름으로 이루어진 구성식 식 (4)를 적용하였다[14]. 준정적 시험은 만능재료시험기를 통해 변형률 속도  $0.01 \text{ s}^{-1}$ 으로 시험하여 결과를 구했다(Fig. 6).

$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{t}{4R}\right) \quad (4)$$

여기서 R은 기존 시편 노치 반지름(10 mm, 30 mm, 45 mm), t는 두께이다. 그러나 식 (4)에서는 줄어드는 면적의 반지름을 시간에 따라 계산하기 때문에 시험적인 방법으로는 한계가 있다. 따라서 인장 해석과 시험의 일치함을 검증하고 이를 이용한 응력 3축비와 파단 변형률의 관계를 통해 Johnson-Cook 파손 모델의 변형률 경화항 계수( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ )를 구하였다.

변형률 속도항 계수( $D_4$ )는 SHTB 시험 장비를 이용하였다. Johnson-Cook 파손 모델식에서 변형률 속도 경화항의 계수를 구하기 위해 온도에 대한 영향을 무시하고 변형률 속도에 대한 파단 변형률의 관계를 통해 구하였다. Table 2는 Johnson-Cook 파손 모델 계수이다.

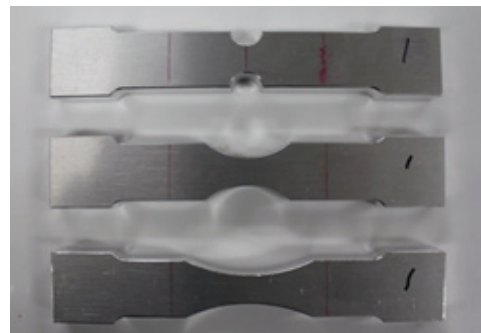


Fig. 5. Difference Shape of the Notch

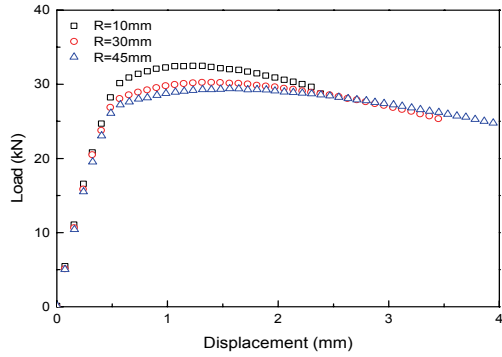


Fig. 6. Experiment Results of Notch Specimen

Table 2. Coefficient of Johnson-Cook Fracture Model

D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
-0.794	1.494	-0.465	0.0106

## 2.2 충격 해석 모델 검증

### 2.2.1 고속 충격 시험

고속 충격 시험기를 사용하여 알루미늄 6061에 대한 고속 충격 시험하였다(Fig. 7). 시험 장치는 크게 압력 탱크, 배럴, 테스트 섹션으로 나누어진다. 가스를 이용하여 충격체에 압력을 가해 발사된다. 가스 압력 최대 100 bar에서 충격체(무게: 150 g)는 최대 380 m/s의 속도까지 시험할 수 있다. 충격체의 속도는 고속 카메라를 이용하여 측정했고, 충격체의 공기 저항과 쇼크 방지를 위해 테스트 섹션을 진공 상태로 만들었다. 식 (5)는 충격체의 사출 속도 예측식이다. 이 식에 따라 사출 속도를 예측하여 가스 압력을 조절했다[15]. Fig. 8은 고속 충격 시험에서 예측 속도와 시험 속도를 비교한 그래프이다.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2P_1V_1}{m_pR} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}\right) \left(c_v + \frac{R}{1-n}\right)} \quad (5a)$$

$$V_2 = V_1 + V_b \quad (5b)$$

여기에서  $R$ 은 기체 상수,  $c_v$ 는 정적 비열,  $n$ 은 폴리트로픽 상수,  $V_1$ 은 압력 탱크 부피,  $V_2$ 는 사출 후 부피,  $V_b$ 는 배럴 부피,  $P_1$ 은 탱크 압력,  $v_2$ 는 최종 속도이다.

고속 충격 시험은 알루미늄 6061 평판에 충격체는 지름 25 mm와 64 g의 스틸 구를 사용하였다. 충격체에 압력을 가해주는 가스는 헬륨을 이용했고, 약 -0.96 bar의 진공 상태에서 시험했다. 충격체의 직진성을 위해 별도의 Sabot을 제작하였다. 고속 충격 시험 후 평판의 형상을 확인하고 속도를 측정하였다. 관통과 비관통 관정은 육안 검사를 통해 판단하였다. 부분관통의 경우 완전관통에 포함했다. 3 mm, 6 mm 그리고 8 mm의 두께의 알루미늄 6061 평판에 대해 시험을 진행하였고, Fig. 9는 시험 결과 형상이다. 시험 후 관통 시편에서는 일반적으로 금속 재료의 고속 충격에서 보이는 플러그를 확인할 수 있었다.

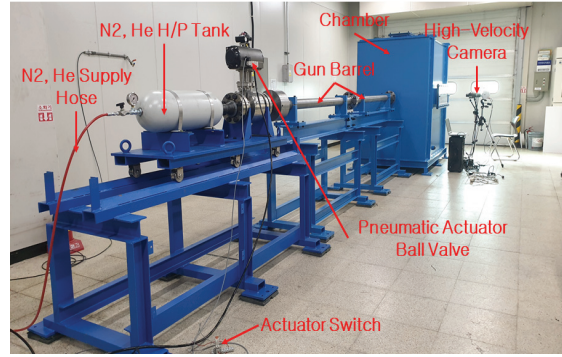


Fig. 7. High Velocity Impact Experiment Equipment

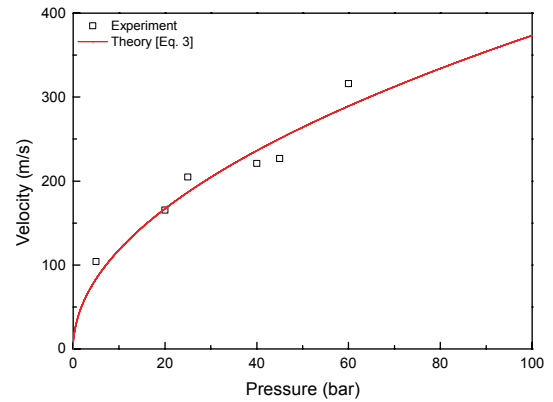
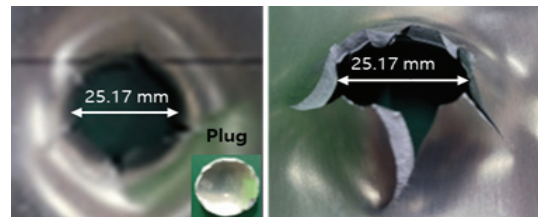
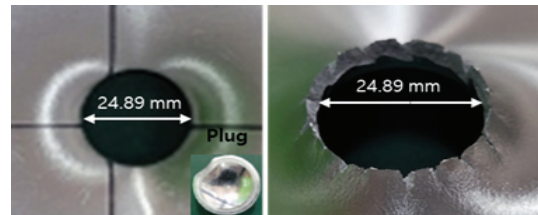


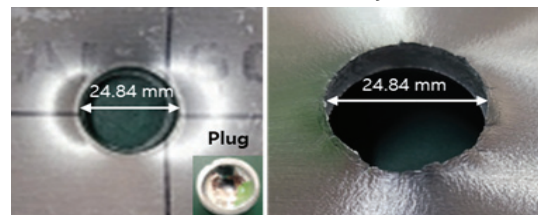
Fig. 8. Comparison of Prediction Velocity and Experiment Velocity [15]



a. Thickness : 3mm (Velocity : 103.9 m/s)



b. Thickness : 6mm (Velocity : 166.7 m/s)



c. Thickness : 8mm (Velocity : 211.9 m/s)

Fig. 9. Depending on the Thickness of High Velocity Impact Experiment Results

2.2.2 고속 충격 해석

고속 충격 해석은 LS-DYNA 프로그램을 이용하였고, 앞서 산출한 Huh-Kang 모델과 Johnson-Cook 파손 모델을 적용하였다. 고속 충격 해석 모델(Fig. 10) 알루미늄 6061 재료의 물성치(Table 3)를 적용한 솔리드 요소로 두께별로 모델링하여 해석했다. 관통 형상의 모사는 솔리드 요소의 파손 기준에 의한 요소 삭제 표현이 가능한 접촉 조건(CONTACT\_ERODING\_SINGLE\_SURFACE)을 적용했다.

충격 상황에서는 충격에 의해 압축된 재료의 상태를 결정해야 한다. 이를 위해 Table 4와 같이 특정 온도에서 재료 부피와 압력의 관계를 표현한 알루미늄 6061의 Mie - Grüneisen 상태방정식 모델을 사용하였다[16].

Figure 11 해석 결과 형상이고 고속 충격 시험과 해석 후 형상 비교를 통해 두께별로 보이는 관통 특성과 금속 재료 관통에서 보이는 특성(플러그, 형상 등)을 해석을 통해 확인하였다. 두께별 충격 시험과 해석에서 관통 수준은 완전관통을 기준으로 관통과 비관통 속도를 판단했다. Huh-Kang 모델을 적용하여 예측된 관통 속도는 고속 충격 시험의 비관통/관통 범위에 해당함을 알 수 있었다(Table 5, Fig. 12).

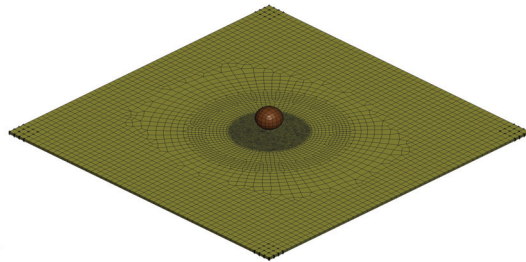


Fig. 10. High Velocity Impact Model

Table 3. Material Properties of Model

Material Properties (Aluminum 6061)	
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2.713
Modulus of Elasticity [GPa]	68.3
Shear Modulus [GPa]	27.7
Poisson's Ratio	0.33
Melting Temperature [K]	925
Specific Heat Capacity [J/(kg • K)]	890

Table 4. Aluminum 6061 of Mie - Grüneisen Equation of State Model

Mie - Grüneisen Equation of State Model (Aluminum 6061)	
Grüneisen Coefficient	1.97
Wave Speed, C [m/s]	5240
Parameter, S	1.40
Reference temperature (K)	293.2

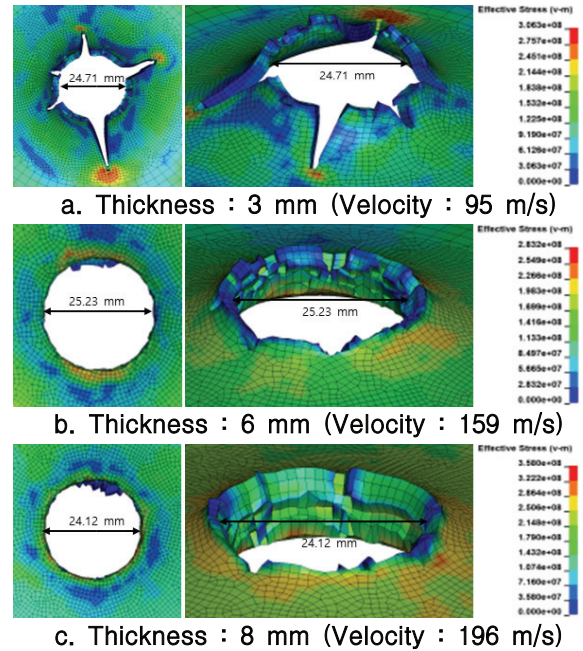


Fig. 11. Depending on the Thickness of High Velocity Impact Analysis Shape Results

Table 5. Comparison of High Velocity Impact Results (Penetration / Non-Penetration)

	Experiment	Analysis	Error
3 mm	103.9 m/s (Penetration)	95 m/s (Penetration)	8.6 %
	87.5 m/s (Non-Penetration)		
6 mm	166.7 m/s (Penetration)	159 m/s (Penetration)	4.6 %
	153.2 m/s (Non-Penetration)		
8 mm	211.5 m/s (Penetration)	196 m/s (Penetration)	7.3 %
	191.3 m/s (Non-Penetration)		

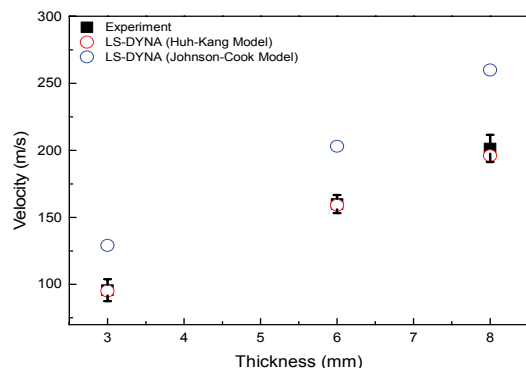


Fig. 12. Penetration Velocity with Respect to Thickness Variations

각 시험을 통해 구한 Huh-Kang 모델과 Johnson-Cook 파손 모델의 계수를 적용한 고속 충격 해석 결과는 약 5~9%의 오차로 관통 속도를 예측하였다. 이를 통해 충격 해석 모델의 계수를 검증했다.

### III. 결 론

알루미늄 6061의 고속 충격 거동 특성을 확인하기 위해 Huh-Kang 모델과 Johnson-Cook 파손 모델을 사용해 고속 충격 해석했고, 이를 통해 관통 형상과 관통 속도를 예측하였다. Huh-Kang 모델과 Johnson-Cook 파손 모델 계수는 만능재료시험기를 이용한 준정적 시험과 SHTB를 이용한 동적 시험을 통해 산출하였다. 고속 충격 시험은 고속 충격 시험기를 이용한 시험 결과를 통해 관통 형상과 관통 속도를 측정하였다. 이를 고속 충격 해석을 통해 모사한 관통 형상과 관통 속도와 비교하여 고속 충격 해석과 고속 충격 시험 결과를 검증하였다. 따라서 향후 항공기 가스터빈 엔진 케이스의 블레이드 컨테인먼트 평가를 위한 해석과 시험 방법으로 이용하고자 한다.

### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 주관 항공우주부품 기술 개발사업(20002700)의 지원을 받아 수행되었습니다.

### References

- 1) Huh, H., Ahn, K., Lim, J. H., Kim, H. W. and Park, L. J., "Evaluation of dynamic hardening models for BCC, FCC, and HCP metals at a wide range of strain rates," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, 2014, pp. 1326~1340.
- 2) Johnson, G. R. and Cook, W. H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," *Proceedings 7th International Symposium on Ballistics*, April 1983, pp. 541~547.
- 3) Sasso, M., Newaz, G. and Amodio, D., "Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization," *Materials Science and Engineering*, Vol. 487, 2008, pp. 289~300.
- 4) Zukas, J. A., "High velocity impact dynamics," *Wiley-Interscience*, November 1990.
- 5) Lee, O. S., Choi, H. and Kim, H., "High-temperature dynamic deformation of aluminum

alloys using SHPB," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 1, 2011, pp. 143~148.

- 6) Banerjee, A., Dhar, S., Acharyya, S., Datta, D. and Nayak, N., "Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel," *Materials Science and Engineering*, Vol. 640, 2015, pp. 200~209.

- 7) Wang, X. and Shi, J., "Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 60, 2013, pp. 67~75.

- 8) Kay, G., "Failure modeling of titanium 6Al-4V and aluminum 2024-T3 with the Johnson-Cook material model," *Office of Aviation Research, Federal Aviation Administration*, September 2003.

- 9) Buzyurkin, A., Gladky, I. L. and Kraus, E. I., "Determination and verification of Johnson - Cook model parameters at high-speed deformation of titanium alloys," *Aerospace science and technology*, Vol. 45, 2015, pp. 121~127.

- 10) He, Q., Xie, Z., Xuan, H., Liu, L. and Hong, W., "Multi-blade effects on aero-engine blade containment," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 49, 2016, pp. 101~111.

- 11) Kang, W. J., Cho, S. S., Huh, H. and Chung, D. T., "Modified Johnson-Cook model for vehicle body crashworthiness simulation," *International Journal of Vehicle Design* 21, Vol. 4, No. 5, 1999, pp. 424~435.

- 12) Schwer, L., "Optional Strain-rate forms for the Johnson Cook Constitutive Model and the Role of the parameter  $\epsilon^0$ ," *6th European LS-DYNA Users' Conference*, 2007.

- 13) ISO 26203-2, "Metallic materials - Tensile testing at high strain rates -Part 2 : Servo-hydraulic and other test systems," *International Standard*, 2011.

- 14) Bao, Y., "Prediction of ductile crack formation in uncracked bodies," *Massachusetts Institute of Technology*, 2003.

- 15) Vander Klok, A. J., "Experimental impact testing and analysis of composite fan cases," *Michigan State University*, 2016.

- 16) Phadnis, V. A. and Silberschmidt, V. V., "Finite element analysis of hypervelocity impact behaviour of CFRP-Al/HC sandwich panel," *EPJ Web of Conferences*, Vol. 94, 2015.