<학술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.9.1021** ISSN 1226-4873

라틴방격법을 이용한 고속 충격 알루미늄합금의 파괴거동에 미치는 충격자 영향 분석§

김종탁* · 조창희* · 김진영** · 김태원***†

* 한양대학교 자동차공학과, ** 국방과학연구소, *** 한양대학교 기계공학부

Influence Factor Analysis of Projectile on the Fracture Behavior of Aluminum Alloys Under High Velocity Impact with Latin Square Method

Jong-Tak Kim*, Changhee Cho*, Jin-Young Kim** and Tae-Won Kim***†

* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,
** Agency for Defense Development,
*** School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received December 20, 2010 ; Revised July 6, 2011 ; Accepted July 13, 2011)

Key Words : Latin Square Method(라틴 방격법), Finite element analysis(유한요소해석), Fracture behavior (파괴거동), High velocity impact(고속 충돌)

초록: 경량화와 강도 관점에서 구조부재에 대한 충돌 문제들은 방위산업, 고속운송수단을 포함한 다양한 분야에서 매우 중요시 되고 있다. 본 연구에서는 수치해석적 기법을 도입하여 알루미늄합금 판재에 대해 충격자의 충돌 조건에 따라 고속충격 환경에서의 파괴거동을 분석하였다. 충격자의 충돌조건은 형상, 속도, 각도의 3 가지 조건을 설정하였으며, 반복적 계산 소요를 줄이기 위하여 실험계획법의 한 종류인 라틴방격법을 도입하였다. 조건 변화에 따른 유한요소해석 결과를 통하여 충격흡수에너지량과 소성변형량을 계산하였으며, 이를 바탕으로 분산분석법을 수행하였고 따라서 각 인자 대한 영향도 평가를 수행할 수 있었다. 결과를 통해 충격흡수에너지 관점에서 충돌속도가 가장 큰 영향을 나타내었으며, 소성변형량 관점에서는 충돌각도가 가장 큰 영향인자로 평가되었다.

Abstract: Structural impact problems are becoming increasingly important for a modern defense industry, high-speed transportation, and other applications because of the weight reduction with high strength. In this study, a numerical investigation on the impact fracture behavior of aluminum plates was performed under various projectile conditions such as nose shapes, velocities, and incidence angles. In order to reduce the iterative numerical analysis, the Latin Square Method was employed. The influence factor was then determined by an FE analysis according to the conditions. The results were evaluated by means of a statistical significance interpretation using variance assessment. It was shown that the velocity and incidence angle can be the most important influence factors representing the impact absorption energy and plastic deformation, respectively.

- 기호설명 -

A_n : 충격자의 충돌속도(m/s)
B_n : 충격자의 충돌각도(Deg.)
C_n : 충격자의 형상
A : 항복응력(yield stress)
B : 강도계수(hardening coefficient)
n : 가공경화지수(strain hardening exponent)
m : 열적연화지수(thermal softening exponent)
F_{EA} : 충격에너지 흡수량의 분산비
F_{PDL} : 소성 변형량의 분산비
D : 손상계수(damage parameter)
σ_{eff} : 유효 응력(effective stress)
σ_m : 평균 응력(mean stress)
ε^f : 파단 변형률(failure strain)
T : 절대 온도(absolute temperature, K)

§ 이 논문은 대한기계학회 2010 년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임
† Corresponding Author, twkim@hanyang.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

고속충격의 영향이 고려되는 구조용 재료의 설계는 정적 하중 상태와 달리 변형률 속도에 따른 기계-재료적 특성 변화가 수반되며 따라서 내충격성은 재료의 경량화와 더불어 제품 설계 시 필수사항으로 고려되고 있다.[1]

이와 관련하여 구조용 재료에 있어 고속충격에 따른 재료 손상 및 파괴 거동의 물리적 메커니즘 이해와 해석적-실험적 기반 연구가 현재 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 충격 특성과 관련한 사항으로서 충격자의 직경(D)과 길이(L)의 비(ratio) 및 기하학적 형상(nose shape), 충돌 시 충격자와 플레이트(plate)의 각도, 충격자의 충돌 속도 등을 들 수 있다.[2~4] 이들 인자와 관련한 개별적 연구는 비교적 많이 수행되고 있음에 반해 각 인자들의 상호 영향도에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고속충격에 따른 재료 형상, 각도 및 속도 인자들의 상호 영향도(effectiveness)에 관한 분석을 수행하였으며 비선형 해석 프로그램인 LS-DYNA 를 이용하여 유한요소해석 하였다. 충격자의 영향도 분석은 라틴방격법[5]을 이용하여 형상, 각도 그리고 속도를 독립변수로 하는 삼원배치법에 기반한 분산분석(analysis of variance)을 통해 각 변수들간의 영향성과 유의성(significance)을 고찰하였다. 해석에 이용된 충격자는 강체로 가정하였으며, 알루미늄 합금의 물성치는 기존의 연구 결과[1] 및 실험결과를 활용하였다.

2. 라틴방격법

인자(factor) 각 수준(level)의 조합에 대하여 실험을 행하는 요인배치법(factorial design)은 인자간의 상호 영향과 주효과(main effect)를 파악할 수 있는 장점이 있으나, 인자와 수준 수의 증가 시 행하게 되는 실험의 수가 기하급수적으로 증가하게 되어 많은 시간과 비용이 소비된다. 따라서 본 연구에서는 보다 효율적인 해석을 위해 일부 실시법의 일종인 라틴방격법을 사용하여 각 인자의 주효과를 평가하였다.

Table 1 은 3 인자, 3 수준인 경우, 라틴방격법을 적용한 해석계획을 나타낸다. 여기서 인자 A_n 은 충돌속도를 의미하며, 하첨자 1, 2, 3 은 400 m/s, 800 m/s, 1200 m/s 를 각각 의미한다. 또한 인자 B_n 은 충돌각도를 의미하며, 하첨자 1, 2, 3 은 90º, 60º, 30º 를 나타낸다. 마지막으로 C_n 은 충격자의 충돌 부분의 형상을 표현하고 있으며 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 각각의 형상을 원통형(cylinder), 둥근 형상의 원뿔형(round cone) 및 원추형(sharp cone)으로 모델링을 하였다.

3. 수치해석

3.1 존슨-쿡 모델

고속충격 시 알루미늄 합금의 파괴거동 해석을 위해 존슨-쿡(Johnson-Cook model) 모델을 이용하였으며 구성방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.[7]

$$\sigma = \left[A + B\varepsilon^{n}\right]\left[1 + C\ln\dot{\varepsilon}\right]\left[1 - T^{*m}\right] \quad (1)$$

$$T^{*} = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$$

구성방정식의 첫 번째 항은 기준 온도 및 변형률 속도에 따른 응력-변형률의 관계를 나타내며, 여기서 ε 는 유효소성변형률, A 는 항복응력(yield stress), B 는

Table 1 Analysis design for Latin Square Method: impact velocity(A_n), incidence angle(B_n), nose shape(C_n)

No.	Analysis	Velocity (m/s)	Incidence angle(deg)	Nose shape
1	$A_1B_1C_1$	400	90º	Cylinder
2	$A_2B_1C_2$	800	90º	Round cone
3	$A_3B_1C_3$	1200	90º	Sharp cone
4	$A_3B_2C_1$	1200	60º	Cylinder
5	$A_1B_2C_2$	400	60º	Round cone
6	$A_2B_2C_3$	800	60º	Sharp cone
7	$A_2B_3C_1$	800	30º	Cylinder
8	$A_3B_3C_2$	1200	30º	Round cone
9	$A_1B_3C_3$	400	30º	Sharp cone

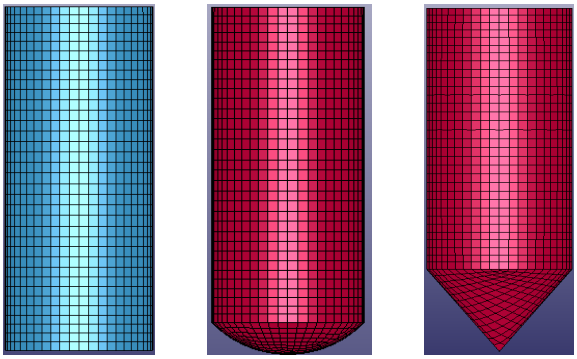

Fig. 1 The impactor's nose shape: (a) Cylinder(C_1), (b) Round cone(C_2), and (c) Sharp cone(C_3)

Table 2 Mechanical property of aluminum alloy plate

	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Poisson's Ratio	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m
Al2024-T4	413	79	594	18.2	0.33	440	504	0.015	0.166	1

Table 3 The failure parameters of aluminum alloy plate[11]

	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
Al2024-T4	0.310	0.045	-1.7	0.005	0

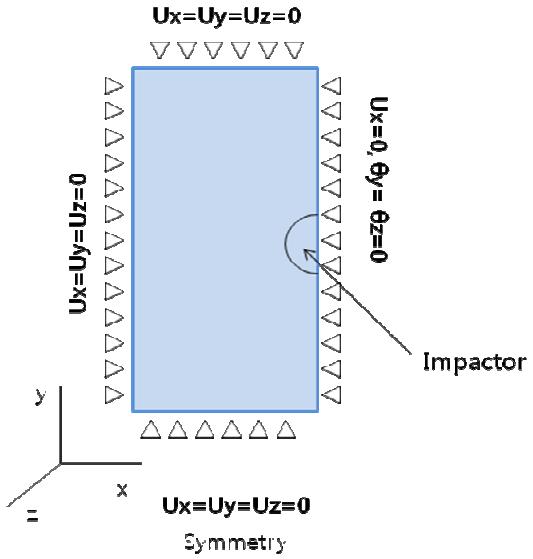

Fig. 2 Finite element analysis model

강도계수(hardening coefficient)이고, n 은 가공경화지수(strain hardening exponent)를 나타낸다. 두 번째 항은 변형률속도 효과를 나타내는 것으로 이때 $\dot{\varepsilon}$ 는 유효소성변형률 속도이며, C 는 재료상수이다. 아울러 세 번째 항은 온도의 영향을 표현하는 식으로 m 은 열적연화지수(thermal softening exponent)를 나타낸다.[7] 한편 파단 변형률(failure strain)은 식 (2)와 같이 주어지며, 여기서 첫 번째 항은 응력과 변형률의 관계를, 또한 두 번째 및 세 번째 항은 변형률속도 및 온도의 영향을 각각 의미한다.

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \varepsilon^*][1 + D_5 T^*] \quad (2)$$

한편 $D_i, i = 1,...,5$ 는 각 항의 재료 상수를 의미하며, σ^* 는 평균응력을 유효응력으로 나눈 비(σ_m / σ_{eff})를 나타낸다.[4] 충격거동 고찰을 위한 파괴 조건은 파단 변형률과 유효소성 변형률의 조합으로 표현할 수 있으며 따라서 다음과 같이 손상계수(damage parameter), D 가 1 의 값을 가질 때 파괴가 발생한다고 가정하였다.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f} \quad (3)$$

3.2 유한요소해석

라틴방격법을 적용한 해석 조건을 존슨-쿡 모델을 이용하여 비선형 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA 를 통해 수치해석 하였다. 유한요소해석 모델은 대칭성을 고려하여 전체 모델의 1/2 형상으로 하였으며 Fig. 2 와 같이 설정하였다. 각 요소는 8 개의 절점을 갖는 직육면체 요소로 구성되며, 선행연구를 바탕으로[1] 알루미늄 합금 플레이트의 형상은 100 × 200 × 15 mm 이고, 충격자는 직경 15 mm 의 원통형을 기본으로 하여 알루미늄 합금과 충돌하는 부분의 형상을 변화시켰다. 이에 따라 각 충격자는 직경을 고정하고, 부피를 일정하게 유지시키기 위해 높이를 변화시키는 방법을 취하였으며, 해석 시 재료가 변하지 않는 강체로 가정을 하였다.

알루미늄 합금의 항복강도를 고려한 탄-소성(elasto-plastic)영역에서, 충격자의 고속 충격거동을 분석하기 위하여 충격 에너지 흡수량과 소성변형량을 측정하였으며 식 (4)와 같이 운동에너지의 손실, 즉 충격 에너지 흡수량을 계산하였다.

$$E_{absorption}^{structure} = E_{initial}^{impactor} - E_{final}^{impactor} = \frac{1}{2} m (V_{initial}^2 - V_{final}^2) \quad (4)$$

해석결과를 통해 재료 항복점 이전의 변형구간은 0 으로, 재료의 연신율이 최대인 18.2%를 1 로 환산하였으며, 따라서 환산된 값이 0 보다 큰 구간을 소성변형 구간으로 판단하였다. 또한 충격자와 알루미늄 합금 플레이트의 충돌 중심을 원점으로, 앞서 정의한 소성변형 구간을 반지름으로 하는 원의 최대 지름을 소성 변형량으로 정의하였다.

Table 2 는 실험적으로 측정한 알루미늄 합금의 물성값과 해석모델에 사용된 Johnson-Cook 계수를 나타내고 있으며, Table 3 은 파손과 관련하여 동일 소재에 대한 참고자료의 값을 나타낸다. 한편 Table 4 는 충격자의 형상과 관련된 제원을 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

충격자 형상, 충돌 속도 및 각도에 따라 수행한 유한요소해석 결과는 다음과 같다. Table 5 는 이와 같은 조건에 따라 총 9 가지 경우에 대한 충격 에너지 흡수량과 소성 변형량을 계산한 결과이다. 이 결과를 이용하여 분산분석법을 사용, 요소의 주효과를 분석하였으며, Table 6 은 이를 바탕으로 계산된 충격 에너지 흡수량에 대한 평가 결과를 나타낸다. 여기서 자유도는 상대인자 수준의 수를 의미한다. 또한 F(0.95)는 95%의 주효과를 가질 때의 값을 의미하며, F(0.99)의 값은 99%의 주효과를 평가하기 위한 기준으로 사용된다.

결과를 통해 충돌속도(A_n)는 $F(0.95) < F_{EA} < F(0.99)$, 충돌각도($B_n$)는 $F(0.9) < F_{EA} < F(0.95)$, 그리고 형상($C_n$) 은 $F(0.9) < F_{EA} < F(0.95)$의 값을 획득하였다. 즉 충돌속도는 95%이상의 영향을 나타내며, 충돌각도와 형상은 90%이상의 영향을 확인하였다. 이를 바탕으로, 즉 본 연구에서 설정한 3 요소가 충격 에너지 흡수량에 모두 영향을 미쳤다는 결과를 알 수 있었으며, 이들 중 충돌속도(A_n) 인자가 충격각도 및 형상에 비해 충격 에너지 흡수량에 보다 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4 Impactor design

	Cylinder	Round cone	Sharp cone
높이(mm) (Nose 제외)	50	66.386	63.333
지름(mm)	30	30	30
Nose 길이(mm)	20	6.77	20
총 높이(mm)	70.00	73.16	83.33
부피(mm^3)	4.95E+04	4.95E+04	4.95E+04
질량(g)	1.78E-01	1.78E-01	1.78E-01

Table 7 은 소성 변형량에 대한 분산분석법 평가 결과이다. 충돌속도(A_n)와 형상은 $F_{PDL} < F(0.9)$의 결과를 얻었으며, 충돌각도(B_n) 인자 $F(0.9) < F_{PDL} < F(0.95)$의 결과를 확인하였다. 즉 소성 변형량에서의 주효과는 충돌각도가 90% 이상의 효과를 보인다. 위의 결과를 통해 형상 인자와 충돌속도는 소성 변형량에 영향이 미미하였음을 확인하였고 아울러 이에 반해 충돌각도가 소성 변형량에 더욱 지배적임을 알 수 있었다.

Fig. 3 은 충돌 각도와 소성 변형량의 관계를 나타낸다. 주어진 충돌 속도 하에서 충돌 각도가 증가함에 따라 소성 변형량은 반비례함을 확인할 수 있다. 아울러 소성 변형량은 충돌 속도보다 충돌 각도가 더욱 지배적인 주효과가 됨을 알 수 있다.

Fig.4 는 충격 에너지 흡수량과 속도와의 관계를 나타내고 있다. Table 6 에서와 같이 충격 에너지 흡수량의 주 영향인자는 충돌 속도가 됨을 알 수 있다. 또한 충돌 속도 보다는 적은 영향이지만 충돌 각도도 어느 정도 충격 에너지 흡수량에 영향을 미침을 확인하였다.

Fig. 5 는 충돌 후 알루미늄 합금의 소성변형 양상을 보여준다. Fig. 5(a)는 저속 상태에서의 충돌 현상을 나타내고 있으며, 특히 충격자가 원통형(cylinder)형상일 경우 Plugging 형상을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 또한 충격자의 형상이 날카로울수록 관통면이 매끈한 점을 확인할 수 있었다(Fig. 5(b), 5(c)). Fig. 5(d) 는 충격자의 충돌각도가 30º 일 때 알루미늄 합금을 관통 하지 못하고 표면에서 튕기는 현상을 관찰할 수 있다(Fig. 5(d)).

Table 5 Impact analysis result

Analysis	Initial Vel. (m/s)	Final Vel. (m/s)	Absorption Energy (kJ)	Plastic Deformation (mm)
$A_1B_1C_1$	400	290.22	6.74	51.53
$A_2B_1C_2$	800	686.27	15.04	54.42
$A_3B_1C_3$	1200	1108.80	18.74	53.56
$A_3B_2C_1$	1200	988.56	41.18	54.42
$A_1B_2C_2$	400	188.97	11.06	53.64
$A_2B_2C_3$	800	689.50	14.65	54.77
$A_2B_3C_1$	800	480.77	36.39	79.68
$A_3B_3C_2$	1200	900.44	56.00	90.38
$A_1B_3C_3$	400	204.04	10.53	70.24

Table 6 Analysis of variance for impact energy absorbed amount

Factor	자유도	F_{EA}	F(0.9)	F(0.95)	F(0.99)
A_n	2.00	48.50	9.00	27.44	99.00
B_n	2.00	24.65	9.00	27.44	99.00
C_n	2.00	12.96	9.00	27.44	99.00

Table 7 Analysis of variance for plastic deformation

Factor	자유도	F_{PDL}	F(0.9)	F(0.95)
A_n	2.00	1.00	9.00	27.44
B_n	2.00	16.62	9.00	27.44
C_n	2.00	0.37	9.00	27.44

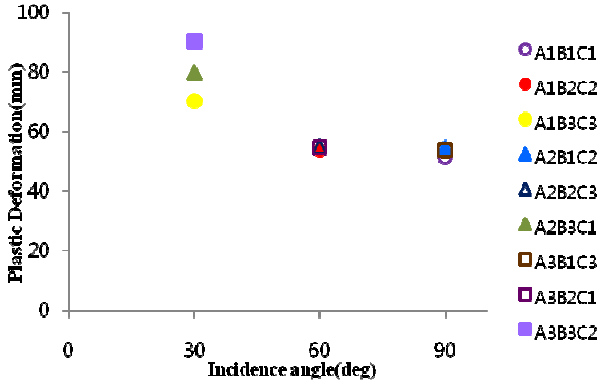

Fig. 3 Relationship between plastic deformation and incidence angle (Initial vel. ●:400m/s, ▲:800m/s, ■:1200m/s)

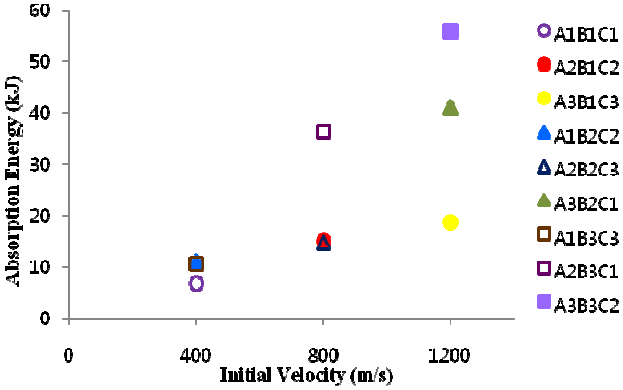

Fig. 4 Relationship between absorption energy and initial velocity(Incidence angle, ●: 90°, ▲: 60°, ■: 30°).

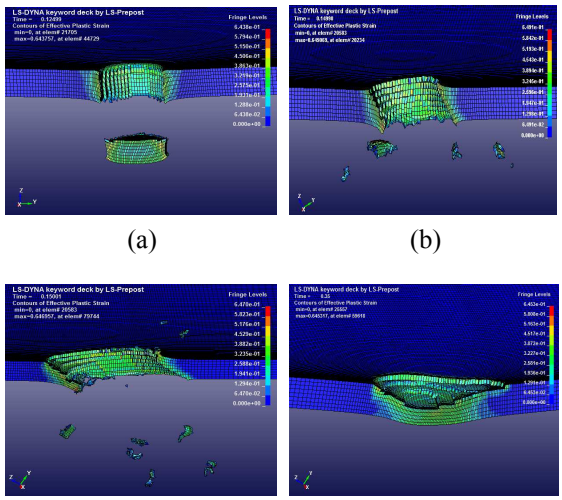

Fig. 5 Fracture shapes obtained from finite element analysis; (a) $A_1B_1C_1$ (400m/s, 90°, cylinder), (b) $A_2B_2C_3$ (800m/s, 60°, Sharp cone), (c) $A_1B_1C_1$ (1200m/s, 30°, Round cone), (d) $A_1B_1C_1$ (400m/s, 30°, Sharp cone)

5. 결 론

400~1200 m/s 속도 하에서 충격자의 충돌속도, 형상 및 입사각들에 대한 내충격 거동 연구와 관련하여 라틴방격법에 기반된 유한요소해석을 수행하였으며 이를 바탕으로 영향인자들 간의 주효과를 분산분석법으로 고찰하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

충격 에너지 흡수량으로 영향인자를 평가하였을 때, A_n, B_n, C_n 의 순으로 영향도가 큰 것으로 나타났다. 특히 충돌속도(A_n)은 95% 이상의 영향을 미치는 인자로 평가 되었고, 나머지 충돌각도(B_n) 및 충격자의 형상(C_n)도 90% 이상의 영향을 확인하였다..

소성 변형량으로 인자 A_n, B_n, C_n을 평가하였을 때, B_n, A_n, C_n 의 순서로 영향도가 큰 것으로 나타났다. 이들 중 충돌각도(B_n)는 90%의 영향인자로 평가 되었지만, 충돌속도(A_n)와 충격자 형상(C_n)은 그 영향이 미미한 것으로 확인되었다. 그러므로 소성 변형량에서 지배적인 요소는 충돌각도임을 확인하였다.

소변형에서는 예상한 바와 같이 적은 충격 에너지 흡수량을 보이며, 대변형에서는 많은 충격 에너지 흡수량을 보여주고 있다. 이와 같은 결과로 충격 에너지 흡수량과 소성 변형량은 비례하여 증가함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음 (계약번호 UD090090GD).

참고문헌

(1) Kim, J.T., Cho, C.H., Jeon, J.I., Gimm, H.K., Koo, M.H. and Kim, T.W., 2010, "A Study of the Projectile-Material Shape on Damage and Fracture Behavior of Aluminum Alloys Under High Velocity Impact," *Proceeding of 40th Anniversary conference on the establishment of Agency for Defence Development*, New Special Energy, pp. 371~374.

(2) Goldsmith, W., 1999, "Review, Non-Ideal Projectile Impact on Targets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, pp. 95~395.

(3) Corbett, G.G., S Reid,.R. and Johnson, W., 1995, "Impact Loading of Plates and Shells by Free-Flying Projectiles: A Review," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, pp. 141~230.

(4) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1985, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures," *Engineering Fracture Mechanies,* Vol. 21, No. 1, pp. 31~48.

(5) Børvik, T., Forrestal, M.J., Hopperstad, O.S., Warren, T.L. and Langseth, M., 2009, "Perforation of AA5083-H116 Aluminum Plates with Conical-Nose Steel Projectiles- Calculations," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 426~437.

(6) Jang, K., 2006, "Theory of Optimization Design of Experiments," *Jayu-academy*, Paju.

(7) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *Proceeding of the Seventh International Symposium on Ballistics*, the Hague, The Netherlands, pp. 541~547.

(8) Bonora, N., Ruggiero, A., Schmidt, M. and Nixon, M., 2003, "Investigation on Flying Plate Diameter to Thickness Ratio Influence on Damage Pattern and Spall Signal," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.29, pp.127~138

(9) Hashin, Z., 1980, "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 329~334.

(10) Yen, C.F., 2002, "Ballistic Impact Modeling of Composite Materials," *Proceeding of the 7th International LS-DYNA Users Conference*, Dearborn MI, May 19-21, 6.15-6.25.

(11) Buyuk, M., Kan, S. and Loikkanen, M. J., 2009, "Explicit Finite-Element Analysis of 2024-T3/T351 Aluminum Material Under Impact Loading for Airplane Engine Containment and Fragment Shielding," *Journal of Aerospace Engineering,* Vol. 22, pp. 287~295.