
 논문

A356 주조 알루미늄 합금의 충격 파괴 예측을 위한 유한요소해석 기법 연구

조성우 · 박재우 ·곽시영*†

과학기술연합대학원대학교 가상공학과, *한국생산기술연구원 사이버설계센터(과학기술연합대학원대학교 가상공학과)

Finite Element Analysis Method for Impact Fracture Prediction of A356 Cast Aluminum Alloy

Seong-Woo Jo, Jae-Woo Park and Si-Young Kwak*†

Dept. of Virtual Engineering, University of Science and Technology, Daejeon 305-333, Korea

*Center for e-Design, Korea Institute of Industrial Technology

(Dept. of Virtual Engineering, University of Science and Technology), Incheon 406-840, Korea

Abstract

Generally, metal is the most important material used in many engineering applications. Therefore, it is important to understand and predict the damage of metal as result of the impact. The objective of this research is to evaluate the damage criterion on the impact performance of A356 Al-alloy castings. Both experimental method and computational analysis were used to achieve the research objective. In this paper, we performed impact test according to various impact velocities to the A356 cast aluminium specimen for damage prediction. Impact computational simulation was done by applying properties obtained from the tensile test, and damages was predicted according to the damage criteria based plastic work. The good agreement of the results between the experiment and computer simulation shows that the reliability of the proposed FE simulation method to predict fracture of A356 casting components by impact.

Key words: Impact, Fracture prediction, Fracture criteria, Finite element method.

1. 서 론

일반적으로 금속은 빠르고 강한 충격에는 깨어지기가 쉽기 때문에 제품 설계와 시험에 있어서 매우 중요한 인자가 되며 재질에 따라 충격강도가 다양하다.

알루미늄 합금으로 제조된 제품은 중량 대비 강도나 가격 등 여러 장점으로 인하여 다양한 산업에서 유용하게 사용되고 있다. 따라서 알루미늄 합금의 사용이 증가함에 따라 신뢰성에 대한 요구가 커져가는 실정이다. 하지만 자동차 분야의 연비향상 또는 소재가격의 급등으로 인하여 제품의 경량화가 요구되고 있으나 주어진 환경에서의 기계적 역할은 충분히 보장되어

야 한다. 기계설계에서는 정적인 구조물에 대한 설계뿐만이 아니라 동적인 장치에 관한 설계 역시 포함된다. 특히 갑작스런 충격을 받을 가능성이 있는 자동차를 비롯한 여러 기계장치들은 충격으로부터 엔진 등 중요부품의 성능유지와 또는 사용자의 안전을 위하여 충격하중을 고려한 설계가 필수적이다.

과거에는 신제품 개발에 각 단계에서 많은 반복적인 실험을 요구하였기에 상당한 시간이 소요되었다. 최근엔 개발시간과 실험횟수를 줄이기 위한 방법이 주요한 이슈가 되고 있으므로 CAE (Computer Aided Engineering)은 가장 강력하고 유용한 툴로 자리 메김하며 제품 개발을 수행하는데 큰 역할을 하고 있다.

Received: November 15, 2012 ; Accepted: April 15, 2013

†Corresponding author: Si-Young Kwak (KITECH)

Tel: +82-32-850-0468, Fax: +82-32-850-0460

E-mail: vlvwlv@kitech.re.kr

Journal of Korea Foundry Society

2013. Vol. 33 No. 2, pp. 063~068

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2013.33.2.063>

ISSN 1598-706X

© Korea Foundry Society, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

근래에 자동차분야를 중심으로 유한요소해석을 적용한 충격해석은 학계 및 산업계에서 활발히 적용되어지고 있으며 실제 해석적으로 파괴 현상을 나타내 줄 수 있는 여러 파괴 기준이 제시 되었다.

Riesner [1]는 휠 충격 해석에 있어서 소성 일을 이용하여 기계적 거동 및 파단을 예측하였고 Hooputra [2]는 유한요소해석을 위한 연성 파괴, 전단 파괴 기준을 제시하였다. 또한 S. Dey [3]는 Johnson-Cook 이 제시한 파괴기준을 이용해 전산해석을 수행하여 실제 충격 시험과 비교함으로써 보다 정확한 예측 방법을 연구하였다. F. Galvez [4]는 충격 시험과 전산해석을 이용해 충격 시간에 따른 재료의 변형등의 충격거동변형을 분석하여 충격시험에 대한 파단을 예측하는 연구를 하였다.

본 논문에서는 A356 주조 알루미늄 합금 시편에 대하여 충격시험과 동일한 조건의 유한요소해석을 수행하고 소성일과 파괴 변형률을 기반으로 하는 파괴기준을 적용하여 충격속도 및 충격에너지에 따른 파손 유무를 예측하고, 속도에 따른 충격시험과의 비교를 통해 두 파괴기준에 대한 정확성 비교 및 해석에 대한 신뢰성을 얻고자 한다.

2. 소성일과 파괴변형률을 이용한 파괴 예측

재료의 정적 또는 고속인장시험에서의 물성을 활용한 파괴기준으로 크게 두 가지 공학적 기준이 있다[1]. 첫 번째로는 파괴변형률 ϵ_f 에서 하중에 의한 소성 일(plastic work)을 기반으로 한 파괴 기준으로서 소성일 W_p 는 다음과 같이 정의 한다.

$$W_p = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon_p \quad (1)$$

여기서 σ 는 실제 응력, ϵ_p 는 소성 변형률이고 ϵ_f 는 인장시험에서의 파괴 변형률이다.

실제 응력 σ 와 소성 변형률 ϵ_p 의 관계를 일반적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma = K(\epsilon_p)^n \quad (2)$$

여기서 K 는 강도 계수이고 n 은 변형 경화 지수(stain hardening exponent)이다. Eq. (2)를 Eq. (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$W_p = \frac{\sigma_f \epsilon_f}{1+n} \quad (3)$$

여기서 σ_f 는 인장시험에서의 파괴 응력이다.

Eq. (3)을 활용하여 충격 시 재료가 변형 또는 파손되면서 소실되는 소성 에너지 밀도(critical plastic energy density)가 결정 된다.

충격시험 과정 중 재료 내에서 소산된 에너지의 양이 재료의 파괴 시 고유 소성 일을 초과하면 재료는 파손 되었다고

판단한다.

충격 성능을 평가하기 위한 두 번째 파괴 기준은 파괴 변형률 기준(a fracture strain criterion) [5,6]을 토대로 하였다. 이러한 기준에서는 계산된 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain)이 재료의 최대 소성 변형률을 초과 하면 재료는 파손 된다고 가정한다. 등가 소성 변형률 $\bar{\epsilon}_p$ 는 주축에서의 소성 변형에 관한 방정식으로 아래와 같이 표현 할 수 있다[7].

$$\bar{\epsilon}_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_{p1} - \epsilon_{p2})^2 + (\epsilon_{p2} - \epsilon_{p3})^2 + (\epsilon_{p3} - \epsilon_{p1})^2} \quad (4)$$

$\epsilon_{p1}, \epsilon_{p2}, \epsilon_{p3}$ 는 세 주축 방향에 연관된 세 축의 변형률을 말한다. 본 연구에서는 최대 소성 변형률(critical plastic strain)을 퍼센트 연신율로 가정한다.

본 연구에서는 시험에 사용된 재료의 소성 소실 에너지 밀도와 등가 소성 변형률의 분포를 우선 유한요소 해석을 통하여 결정하고 연관된 소성일과 파괴변형률과의 비교를 통해 파괴 가능성을 거시적으로 평가하고 예측하였다.

3. 주조 알루미늄 합금의 충격 시험

3.1 시험에 사용된 시편 제작

본 연구에서는 Table 1과 같은 조성의 T6 열처리된 A356 알루미늄 합금을 사용하여 충격 시험을 수행하였다. 충격시편은 KS D6008에 따른 인장시편을 금형을 이용하여 주조하고 Fig. 1과 같은 블록형 규격으로 제작하였으며, 산업용 CT (Computed Tomography)를 이용하여 충격 시험 결과에 영향을 줄 수 있는 내부 결함의 유무를 파악하여 결함이 없는 건전한 시편을 선별하였다.

Fig. 2는 주조시편의 미세조직 사진으로 A356의 표준 조직과 같이 Al 조직의 미세화 및 개량화 처리된 실리콘 (Si) 조직을 볼 수 있다.

3.2 충격 시험 방법

시편에 대한 충격 시험은 Fig. 3와 같은 자유 낙하 하중식의 충격 시험 기기를 이용해 시험을 하였다. 본 장비의 낙하

Table 1. A356 alloy composition in wt%.

	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Ti
wt%	92.23	6.98	0.13	0.008	0.345	0.096

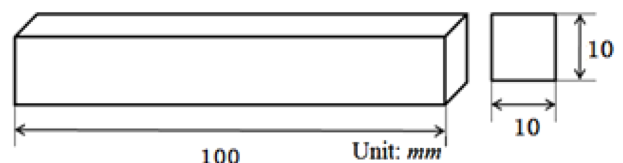


Fig. 1. Dimension of the specimen for impact test.

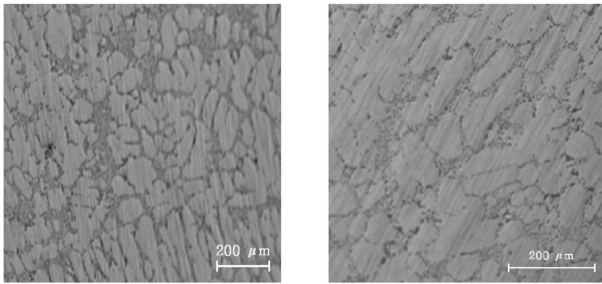


Fig. 2. Optical photographs of microstructure A356-T6 specimens.



Fig. 3. Instron Dynatup® Impact Test Machine used in experiment.

추 하중은 25 kg이며 낙하추의 높이, 속도, 에너지로 충격 시험을 수행할 수 있다. 본 시험에서는 낙하추의 속도를 조절하여 시편의 파괴 유무를 판단하고자 하였으며 충격 시험 시 시편이 변형하는 형상을 촬영하였다.

4. 주조 알루미늄 합금의 충격 해석

4.1 충격 해석을 위한 인장 데이터 취득

A356와 같은 Al-Si-Mg 계열합금 내 실리콘 입자의 파손은 합금의 파괴 전진의 중요한 요소이다. 실리콘 입자가 파손되는 동안 입자 주위에 파괴핵의 생성 및 성장이 진행되며, 그 후 수지상정 내에서 파괴 핵들의 연결로 파괴 전진을 시작한다. D. Dighe의 연구[8]에서 저 변형률부터 고 변형률 속도에 따른 파괴된 실리콘 입자 수의 비율을 구하였는데 변형률속도에 대한 파괴된 입자의 비율은 25% 내에서 비슷함을 알 수 있었다. 결국 변형률 속도와 파괴된 실리콘입자 수의 비율은 크게 차이가 나지 않는다는 연구 결과를 보여준다.

결론적으로 D. Dighe의 연구를 토대로 A356 합금은 Fig. 4와 같이 인장특성이 변형률 속도에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 A356 재료의 탄성계수와 포아송비는 2 mm/min 속도의 인장 시험을 통해 나온 물성을 충격해석에 적용하였다. 그리고 소성변형 물성은 진 응력 - 진 변형률 곡선에서 소성구간의 물성을 이용하여 해석을 수행하였다. 인장시

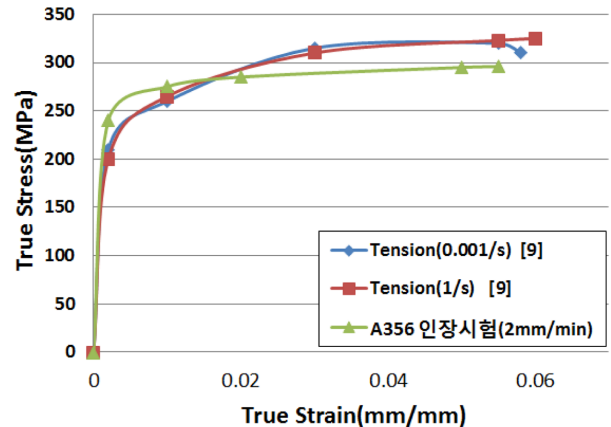


Fig. 4. Stress-Strain curves of the A356-T6 aluminum alloy as a function of strain rate.

Table 2. Material properties of A356-T6 specimens.

Youngs modulus (GPa)	Position ratio	Density (g/cm^3)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
72.89	0.33	2.7	256.32	309.64	3.98

험결과와 해석에 사용한 물성치는 Table 2에 정리 하였으며 해석에서는 인장과 압축의 물성치가 동일하다고 가정하였다.

4.2 유한 요소 해석 방법

순간적인 동적 반응과 복잡한 접촉 문제를 해석하기에 적합한 ABAQUS V6.10의 외연적 시간 적분 유한요소법(Explicit time integration finite element method)을 활용하여 충격해석을 수행하였다.

충격 해석 모델은 Fig. 5와 같이 실제 시편과 동등하며, 고정된 지지대와 낙하추는 강체(Rigid body)로 정의하였다. 충격 시편 모델의 요소는 1.5 mm 크기의 C3D8R (An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control) element로 모델링하였으며 충격 부분의 변형 및 충격 메커니즘을 보다 정확히 분석하기 위해 격자에 따른 해석결과의 수렴률을 분석하여 충격 부위는 1 mm 크기로 모델링하였다. 부연 적으

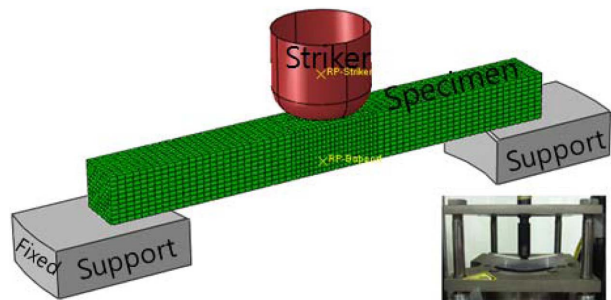


Fig. 5. Finite Element Analysis model for the impact test simulation.

로 설명하면 본 해석에서 격자 수렴에 대한 부분은 낙하추와 시편사이에 접촉되는 부분의 변위량에 대한 수렴으로 확인하였다. 그 결과 변위량에 대한 응답은 거의 격자 크기 1 mm에서 수렴되어짐을 알 수 있었다.

5. 결과 및 비교

5.1 충격 유한요소 해석 결과

2절에서 정의한 식(1) 과 Fig. 4의 2 mm/min 속도의 인장 시험데이터를 활용하여 알루미늄 재료 파손에 필요한 소성 일 (Plastic work) W_p 을 계산하면 다음과 같다.

$$W_p = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon_p = 10.83 Nmm/mm^3$$

해석한 결과 Fig. 6 과 같이 낙하추의 충격하중으로 시편의 아랫부분(M)에서 소성 소실 에너지 밀도 값이 최대로 나타남을 알 수 있다. 충격해석에서 시편은 낙하추와 직접 접촉하는 부분에서 충격하중에 의해 소성 변형이나 파손이 나타난다. 하지만 파괴나 크랙의 시작점이 아니므로, 직접 접촉하는 부분에서의 값은 파손으로 고려하지 않았다. 그래서 Fig. 6의 충격접촉부위는 분석에서 고려하지 않았다.

Fig. 7은 각각 0.5 m/s, 0.6 m/s, 0.7 m/s, 0.8 m/s의 속도에

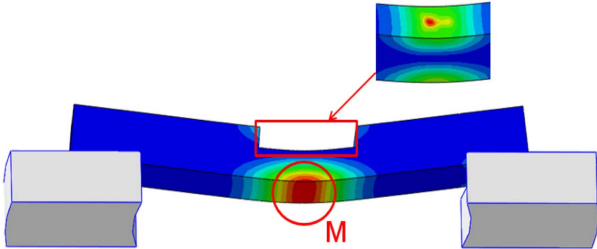


Fig. 6. Position of max plastic dissipation energy density.

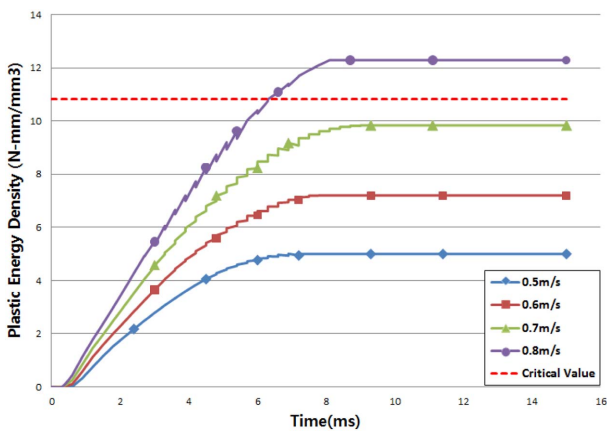


Fig. 7. Curves of plastic dissipation energy density at M point (position of max plastic dissipation energy density) with time.

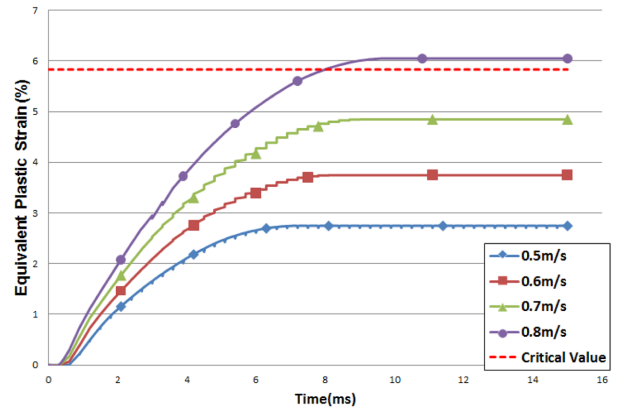


Fig. 8. Curves of equivalent plastic strain at M point (position of max plastic dissipation energy density) with time.

따른 시간에 대한 시편의 최대 소성 소실 에너지 밀도 값을 나타낸다. 위에서 정의한 소성 일 $10.83 Nmm/mm^3$ 을 넘어서는 속도는 0.8 m/s이며 최대값이 나타나고 있는 시편의 아랫부분에서 파손이 시작될 것으로 예측할 수 있다.

또한 파괴 변형률 기준을 이용하기 위해 각 속도에 따른 시간에 대한 등가 소성 변형률의 값을 Fig. 8에 나타내었다. 2 mm/min 속도의 인장 시험데이터에서의 소성 변형률의 최대값 (Critical Value)은, $\epsilon_c = 0.0583 mm/mm$ 이며 Fig. 8의 속도 0.8 m/s에서 알 수 있듯이 위 최대 소성 변형률 값을 넘어감으로서 파손이 되었음을 예측할 수 있었다.

이를 통해 다음의 시편에서는 0.7 m/s 이하의 속도에서는 소성 일 W_p 과 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain)의 값을 넘지 않으므로 파단이 되지 않을 것으로 예측할 수 있었다.

5.2 충격 시험 결과

Fig. 9와 같이 0.5 m/s, 0.6 m/s, 0.7 m/s, 0.8 m/s의 속도로 충격 시험을 수행하였다. 시편에 충격 하중을 받는 순간 Fig. 9(a) 와 같이 시편은 굽힘 변형이 발생하고 그 후 Fig. 9(b) 와 같이 시편 내부에서 파손이 일어나며 시편이 파괴될 때까지 진행된다.



Fig. 9. Process of impact test for specimen: (a) Specimen underwent bending deformation, (b) Damage initiation and evolution in specimen.

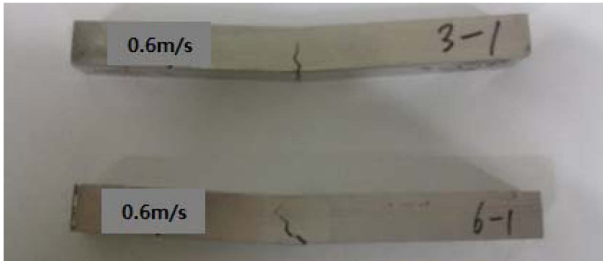


Fig. 10. Partially fractured specimens by velocity 0.6 m/s in the impact test.

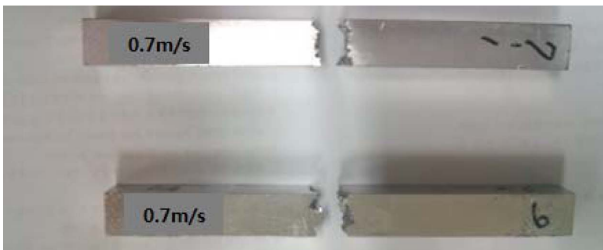


Fig. 11. Fully fractured specimens by velocity 0.7 m/s in the impact test.

본 시험에서 여러 속도에 따른 시편의 파손 유무를 파악하였다. Fig. 10과 같이 속도 0.6 m/s까지 시편은 파단 되지 않았으며 0.7 m/s부터 Fig. 11과 같이 시편은 파단 되었다.

5.3 충격 시험과 유한요소해석 결과 비교

Table 3과 같이 각 속도에 따른 충격 시험과 해석의 최대 충격하중을 비교해본 결과, 오차가 5% 이내로 나타나 실제 충격시험 결과에 근접한 하중이 가해졌음을 알 수 있다.

시편이 파단되는 속도는 충격 시험에서는 0.7 m/s, Fig. 5와 같이 해석에서는 0.8 m/s로 예측되었다.

Table 4에서 볼 수 있듯이 시험에서 파단되었던 속도 0.7 m/s의 소성 소실 에너지 밀도는 9.84 Nmm/mm^3 로 소성 일 (10.83 Nmm/mm^3)의 약 91% 정도 미치는 값을 알 수 있다. 따라서 해석에서 소성 일의 값을 넘지는 못하였으나 소성 소실 에너지 밀도의 값이 소성 일의 90% 이상으로 나타난다면 파단될 수 있다고 예측할 수 있다.

Table 3. Comparison of maximum impact load between experiment and analysis as a function of velocity.

Velocity (m/s)	Impact Experiment	Impact Analysis	Error (%)
	Max load (kN)	Max load (kN)	
0.5	2.80	2.92	4.29
0.6	2.91	3.05	4.81
0.7	3.13	3.21	2.56
0.8	3.23	3.31	2.48

Table 4. Comparison of plastic energy density and critical value as a function of velocity.

Velocity (m/s)	Impact Analysis	Critical value Difference (%)
	Plastic Energy Density (Nmm/mm^3)	
0.5	5.02 (46.35)	-5.81
0.6	7.20 (66.48)	-3.63
0.7	9.84 (90.86)	-0.99
0.8	12.30 (113.57)	1.47

6. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 A356-T6 합금의 인장 시험으로부터 얻은 물성을 이용하여 재료의 소성 일과 파괴 변형률 기준을 이용한 충격해석을 하였다. 또한 충격 시편을 제작하여 해석과 동일한 조건의 충격시험을 하였으며 해석 결과와 비교하였다.

1) 소성 일 기준을 적용한 결과 시험에서 파단된 0.7 m/s에서 소성 일 값은 9.84 Nmm/mm^3 로, 소성 일의 최대값인 10.83 Nmm/mm^3 의 아래에서는 파단 되지 않을 것으로 판단하였기에 약 10%의 오차가 발생됨을 알 수 있었다.

2) 파괴 변형률 기준을 적용한 결과 시험에서 파단된 0.7 m/s에서 파괴 변형률 값은 0.0484 mm/mm 로, 파괴 변형률의 최대값인 0.0583 mm/mm 의 아래에서는 파단되지 않을 것으로 판단하였기에 약 17%의 오차가 발생됨을 알 수 있었다.

3) 파괴 기준을 적용하여 발생된 오차는 해석을 위한 물성에 따른 원인으로 파악되지만 일반적인 인장 시험을 통해 얻은 물성을 이용하여 파단 예측을 하는데 유용한 결과를 얻었다고 판단된다.

4) 본 논문에서 제안된 방법은 4.1절에서 설명하였듯이 알루미늄 A356-T6 합금에 국한된 방법이며, 강과 같은 다른 재질의 경우 고속인장에 따른 물성의 차이를 고려하여 추가적인 연구가 요구된다.

참고문헌

- [1] Riesner M, Zebrowski MP and Gavalier RJ, The Sixth International Conference on Vehicle Structural Mechanics, Society of Automotive Engineers, "Computer Simulation of Wheel Impact Test", Detroit, MI, (1986) 269-275.
- [2] Hooputra H, Gese H, Dell H and Werner H, 2004 International Journal of Crash, "A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness simulation of Aluminium Extrusions", (2004) 449-463.
- [3] Dey S, Borvik T, Hopperstad OS and Langseth M, International journal of Impact Engineering "On the influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates", **34** (2007) 464-486.
- [4] Galvez F, Cendon D, Garcia N, Enfedaque A and Sanchez-

- galvez V, Engineering Failure Analysis, "Dynamic fracture toughness of a high strength armor steel", **16** (2009) 2567-2575.
- [5] Loh Y. -L., "Finite Element Impact Analysis and Test of 13 Degree Disc Wheel and a Study on its Failure Criteria", M.S. Thesis, National Taiwan University, (2004).
- [6] Chan H. -T., "Analysis of Impact Test for Aluminum Alloy Wheel", M.S. Thesis, National Yunlin University of Science & Technology, (2006).
- [7] Dowling NE, Mechanical Behavior of Materials, 3rd Ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, USA (2007) 624.
- [8] Manish D. Dighe, Arun M. Gokhale, Mark F. Horstemeyer, and D. A Mosher, Metallurgical and Materials Transactions A, "Effect of Strain Rate on Damage Evolution in a Cast Al-Si-Mg Base Alloy", **31A** (2000) 3.
- [9] Tucker MT, Horstemeyer MF, Whittington RW Solanki KN and Gullett PM, Mechanics of Materials, "The Effect of varying strain rates and stress states on the plasticity, damage, and fracture of aluminum alloys", **42** (2010) 895-907.