 논문

A356 알루미늄 합금의 파단 충격에너지에 대한 수축공결함의 영향

황성철 ·곽시영 *[†]

과학기술연합대학원대학교 가상공학과, *한국생산기술연구원 사이버설계센터(과학기술연합대학원대학교 가상공학과)

Effect of Shrinkage Defect on Fracture Impact Energy of A356 Cast Aluminum Alloy

Hwang-Seong Chul 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

Internal defects, such as shrinkage during casting, cause stress concentrations and initiate cracking. Therefore, it is important to understand the effects of internal defects on the mechanical properties including the impact behavior. This study evaluates the effects of internal casting defects on the impact performance of A356 Al-alloy castings. The internal shrinkage defects in the casting impact specimen are scanned using an industrial Computed Tomography (CT) scanner, and drop impact tests are performed with varying impact velocities on the A356 casting aluminium specimen (10 mm × 10 mm section area) in order to locate the fracture energy under an impact load. The specimens with defects with a diameter less than 0.35 mm exhibit equivalent fracture impact energies of approximately 32 J and those with a 1.7 mm diameter defect reduced the fracture impact energy by 35%.

Key words: Shrinkage Defect, A356, Drop Impact Test, Absorbed Energy

1. 서 론

주조는 액체금속을 응고시켜서 고체금속을 만드는 공정으로 변형저항이 가장 적은 액체상태의 금속을 이용하기 때문에 단조 또는 용접 등 기타 제조방법에 비해 복잡한 형상도 쉽게 제조할 수 있는 특징이 있다. 하지만 액체 금속이 고체 금속으로 응고하는 과정은 필연적으로 체적변화를 수반하게 되고 수축공과 같은 내부결함을 내포하게 된다. 이로 인하여 설계자들은 주조부품의 수축공 결함에 대한 막연한 불안감을 가지고 있어서 사용을 주저하거나 주조부품에 대해 과도한 안전율을 고려해서 설계하고 있다.

근래 글로벌 에너지 위기가 닥치면서 자동차 산업을 중심으로 연비에 직접적으로 영향을 주는 차체 및 부품의 경량화가

이슈로 떠오르면서 알루미늄의 적용이 증가하고 있다. 주조 알루미늄 합금의 사용이 증가함에 따라 알루미늄 합금의 신뢰성에 대한 요구가 커져가는 있으며 특히 갑작스런 충격을 받을 가능성이 있는 자동차를 비롯한 여러 기계장치들은 충격으로부터 엔진 등 중요부품의 성능유지와 또는 사용자의 안전을 위하여 충격하중을 고려한 설계가 필수적이다.

내부 결함이 존재할 경우의 재료의 충격특성에 대한 연구는 초기 Breznak[1]등에 의해 Ni-Cr-Mo 주강의 내부 결함 시편에 대한 충격시험을 통해 파괴 인성을 평가하였다. 근래에는 해석 기술이 발달함에 따라 F.Galvez[2]는 충격 시험과 전산해석을 이용해 강에 대해 충격 시간에 따른 재료의 변형 등의 충격거동변형을 분석하여 충격시험에 대한 파단을 예측하는 연구를 하였다. 알루미늄 합금에 대해서는 자동차 휠을 중심으로

Received: Nov. 13, 2013 ; Revised: Feb. 10, 2014 ; Accepted: Feb. 11, 2014 Journal of Korea Foundry Society

[†]Corresponding author: Si-Young Kwak (KITECH)

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

E-mail: vlvwlvw@kitech.re.kr

2014. Vol. 34 No. 1, pp. 022~026

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2014.34.1.022>

pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© 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.

충격해석을 통하여 충격파괴를 예측하려는 많은 시도들이 있었다[3-5]. 최근 저자[6]는 건전한 A356 주조 알루미늄 합금 시편에 대하여 충격시험과 충격해석을 수행하여 파괴속도를 예측하였다.

본 논문에서는 내부에 수축공 결함을 가진 A356 주조 알루미늄 합금 시편에 대하여 CT(3차원 단층촬영기)를 통해 내부 결함의 크기 등 기하학적 형상을 조사하고 각 시편에 낙하 충격시험을 실시하여 파괴치(파괴낙하속도, 충격에너지)와 결함의 상관관계에 대하여 연구하였다.

2. 시험 방법

본 연구에서 시험은 아래와 같은 일련의 과정을 통하여 수행하였다.

- 1) KS D6008 규격 알루미늄 주조 인장시편용 금형을 이용하여 시편을 주조함(Fig. 1)
- 2) 인장시편을 충격시편으로 가공(Fig. 2)
- 2) 가공한 충격시편에 대해 3차원 단층촬영 장비인 CT를 활용하여 전수검사 실시(Fig. 3)
- 3) CT의 결함 데이터를 분석해서 각 시편의 결함 크기 및 위치를 파악(Fig. 4)
- 4) 상기에서 확인한 결함 위치에 따라 시편의 충격부위 선정(Fig. 6)
- 5) 낙하 충격자치의 낙하속도를 변화시키면서 각 시편에 충격을 주어 파단속도 결정

Table 1. A356 alloy composition in wt%.

	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Ti
wt%	92.01	6.77	0.11	0.007	0.313	0.094

Fig. 1. Tensile test specimen.

Fig. 2. Test Specimens (a) Dimension of the specimen for impact test (b) The picture of impact specimens.

- 6) 수축공 결함의 크기 위치에 따른 시편의 파단 충격치에 대한 영향 분석

2.1 시편 제작

본 연구에서는 충격 시험 전 시편의 인장 특성을 파악하기 위해 Table 1과 같은 조성의 T6 열처리된 A356 알루미늄 합금을 사용하여 인장 시편을 Fig. 1과 같이 제작하고 인장시험을 수행하였다.

인장 특성을 파악한 후 충격시험을 수행하였으며, 충격시편은 KS D6008에 따른 인장시편을 금형을 이용하여 주조하고 Fig. 2와 같은 블록형 규격으로 제작하였다.

2.2 수축공 내부결함의 검출

수축공 내부의 결함을 검출하기 위하여 본 논문에서는 독일 HWM(Hans Walischmiller GmbH)사의 비파괴 검사용 단층촬영 장비인 산업용 CT를 활용하여 수축공의 내부결함을 확인하였다. Fig. 3은 시편의 CT 촬영 결과를 보여주고 있다.

총 14개의 시편에 대해 결함검사를 수행하여 4개의 건전한 시편을 확보하였다. 나머지 10개의 결함 시편의 경우 Fig. 4와 같이 결함의 크기 및 위치를 나타내었으며 Table 2에 결함시편의 크기와 위치를 정리 하였다. D는 수축공 평균직경이며, L은 시편 바닥에서부터 수축공까지의 높이이다.

Fig. 3. Inspection of shrinkage defects by CT.

Fig. 4. Size and location of shrinkage defect in a section of impact specimen.

Table 2. Diameter and location of shrinkage of defected specimens.

Number	D (mm)	L (mm)
Defect 1	0.35	2
Defect 2	0.35	3
Defect 3	0.75	4
Defect 4	0.8	2
Defect 5	1.365	3.5
Defect 6	1.55	3.5
Defect 7	0.9	8
Defect 8	0.9	3
Defect 9	1.1	3
Defect 10	1.7	5.5

2.3 주조 알루미늄 합금의 충격 시험

시편에 대한 충격 시험은 Fig. 5와 같은 자유 낙하 하중식의 충격 시험 기기를 이용해 시험을 하였다. 본 장비의 낙하추 하중은 25 kg이며 낙하추의 높이, 속도, 에너지로 충격 시험을 수행할 수 있다. 본 시험에서는 낙하추의 속도를 조절하여 시편의 파괴 유무를 판단하고자 하였다.

충격시험의 데이터를 정확하게 추출하기 위해서는 낙하추가 낙하하는 선상으로 결함이 있는 부분의 단면을 정확히 충격을 가해야 한다. CT로 검출한 시편의 결함(Fig. 6(a)) 위치를 시편의 표시 후(Fig. 6(b)), 시편에 표시된 부분과 충격장비의 낙하추와 동일선상에 놓이게 조절을 하고, 낙하추의 속도를 조절하여 시험을 실시한다(Fig. 6(c)).

3. 실험결과 및 고찰

인장시험을 통하여 얻어진 A356-T6 시편의 특성을 Table 3에 정리하였다.

시편은 낙하 추에 의해 에너지를 받는 순간 굽힘 변형이 발

Fig. 5. Instron Dynatup® Impact Test Machine used in experiment.

Fig. 6. Determination of impact zone of defected specimen for impact test: (a) Inspection of shrinkage defect, (b) Marking on the specimen, (c) impact test.

생하기 시작하면서 시편의 하단부에서부터 균열이 발생하여 완전히 파단 될 때까지 진행한다. 건전한 시편의 경우 충격속도 1.58 m/s(충격에너지 31.2 J)이상부터 시편이 파단 되었다. 건전 시편의 충격속도와 충격에너지, 파단유무 결과를 정리하면 Table 4와 같다.

결함 시편의 충격시험 결과는 Table 5에 나타내었다. 충격속도 1.5 m/s에서 Sound 시편과 Defect 1은 모두 파단 되지 않았고, 1.58 m/s 이상에서 Sound 시편과 Defect 2 시편이 파단 되었다. Defect 1과 Defect 2의 수축공 크기는 0.35 mm(시편의 단면높이 10 mm의 3.5%)이며 결함이 없는 건전시편과 0.35 mm의 수축공을 가진 시편들은 동등한 파괴속도(약 1.6 m/s)와 파괴 충격에너지(약 31J)를 보였다. Defect 10 시편의 경우 1.7 mm(시편 단면높이의 약 17%)이상 수축공을 가지며 건전시편에 비해 약 65%의 파괴충격치를 보였다.

Fig. 7은 파단이 일어난 시편들의 속도를 비교한 그래프이다. 전술한바와 같이 직경 0.35 mm 미만의 결함시편은 건전시편과 동등한 파괴특성을 보이는 반면 직경 1.3 mm 이상의 결함이 있는 시편은 건전한 시편보다 낮은 충격속도에서 파단 되었다

Table 3. Material properties of A356-T6 specimens.

Youngs modulus (GPa)	Position ratio	Density (g/cm^3)	Yield strenth (MPa)	Ultimate strenth (MPa)	Elongation (%)
56.234	0.29	2.7	220	290	6

Table 4. Results of velocity, impact energy, fracture of sound specimens.

Specimen Number	Velocity (m/s)	Impact Energy (J)	Fracture
Sound 1	1.6	31.6	F(Fracture)
Sound 2	1.5	27.6	N(None)
Sound 3	1.55	29.6	N
Sound 4	1.58	31.2	F

Table 5. Results of velocity, impact energy, fracture of defected specimens.

Specimen Number	Velocity (m/s)	Impact Energy (J)	Fracture
Defect 1	1.5	27.6	N
Defect 2	1.6	31.7	F
Defect 3	1.5	27.6	N
Defect 4	1.3	20.89	N
Defect 5	1.3	20.58	N
Defect 6	1.4	23.91	F
Defect 7	1.3	21.13	N
Defect 8	1.5	27.93	N
Defect 9	1.4	24.79	F
Defect 10	1.3	21.22	F

Fig. 7. The comparison of fracture velocity between sound and defected specimens.

(Defect 5, Defect 6, Defect 10 시편).

이때 건전한 시편(파단에너지 31.2 J)에 비하여 Defect5 (20.58 J), Defect6(23.91 J), Defect 10(21.22 J)의 파단에너지는 약 65~76% 수준이다.

Table 6과 Fig. 8에서 결함시편 6, 8, 9번의 수축공결함 모습과 실험결과를 비교하였다. 모두 수축공의 위치(L)는 유사하나 수축공의 제일 작은 Defect 8은 다른 시편에 비해 높은 충격속도에서도 파괴되지 않았다.

본 시험과 같은 충격시편은 충격 굽힘에 의해 하단부에 큰 인장 응력이 작용하고 상단부에 큰 압축응력이 작용한다. 그러므로 상단과 하단의 중간부위는 비교적 적은 응력이 발생한다.

Table 6. Comparison of specimen 6, 8 and 9.

	Defect6	Defect8	Defect9
Fracture	F	N	F
L (mm)	3.5	3	3
D (mm)	1.55	0.9	1.1
Impact Energy (J)	23.91	27.93	24.79
Velocity (m/s)	1.4	1.5	1.4

(a) Defect 6 (e) Defect 8 (f) Defect 9

Fig. 8. Pictures of shrinkage defects in defected specimen section.

하지만 Defect 10의 경우 거의 시편 가운데 있음에도 불구하고 1.7 mm의 큰 수축공으로 인하여 가장 취약한 충격에너지 값을 보였다. 이로써 수축공의 위치보다 수축공의 크기가 파단에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 즉 큰 응력이 걸리는 하단부의 작은 수축공보다 비교적 작은 응력이 작용하는 중간부위의 큰 수축공이 더 취약하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 A356-T6 합금 충격시편에 대해 CT를 활용하여 건전시편과 수축공 결함시편을 분류하고 충격시험을 수행하여 내부 수축공의 충격 특성에 대한 영향을 평가하였다.

1) 10 × 10 단면 충격시편에서 0.35 mm(단면높이의 3.5%)이하 수축공은 시편의 파괴충격치에 큰 영향을 주지 않았다.

- 결함이 없는 건전시편과 0.35 mm의 수축공을 가진 시편은 동일한 파괴치(1.6 m/s, 32 J)를 보였다.

2) 10 × 10 단면 충격시편에서 1.7 mm(단면크기의 약 17%)이상 수축공은 건전시편에 비해 약 65%의 파괴충격치를 보였다.

- 건전 시편의 파괴충격치(1.6 m/s, 32 J)에 비해 1.7 mm의 수축공 결함시편은 충격 시 가장 응력이 작은 중심부에 있음에도 불구하고 1.3 m/s, 21 J의 파괴충격치를 나타내었다.

- 즉 본 시험과 같은 낙하충격시험에서는 내부의 수축공 크기가 수축공의 위치보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다

References

- [1] E. S. Breznak, Constantine Vishnevsky and John F. Wallace. Steel Foundry Research Foundation, "The Effect of Internal Shrinkage Discontinuities on the Fatigue and Impact properties of Cast steel sections".
- [2] F. Galvez, D. Cendon, N. Garcia, A. Enfedaque, V. Sanchez-

- galvez, "Dynamic fracture toughness of a high strength armor steel", *Engineering Failure Analysis*, **16** (2009) 2567-2575.
- [3] M. Riesner, M. P. Zebrowski, and R. J. Gavalier, "Computer Simulation of Wheel Impact Test", *The Sixth International Conference on Vehicle Structural Mechanics*, Society of Automotive Engineers, pp. 269-275 in *Proceedings of Detroit*, MI, 1986.
- [4] H Hooputra, H Gese, H Dell and H werner, "A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness simulation of Aluminium Extrusions", *2004 International Journal of Crash*, (2004) 449-463.
- [5] Y. -L. Loh, "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] Seong-Woo jo, Jae-Woo Park and Si-Young Kwak, "Finite Element Analysis Method for Impact Fracture Prediction of A356 Cast Aluminum Alloy", *Journal of Korea Foundry Society*, **33**(2) (2013) 63-68.