

## 내부 결함을 포함한 주조 알루미늄 합금의 충격 거동 해석<sup>§</sup>

조 성 우\* · 곽 시 영\*\*†

\* 과학기술연합대학원대학교 가상공학과,

\*\* 한국생산기술연구원 사이버설계센터(과학기술연합대학원대학교 가상공학과)

### Analysis of Impact Behavior of Al-Alloy Castings Considering Internal Defects

Seong-Woo Jo\* and Si-Young Kwak\*\*†

\* Dept. of Virtual Engineering, Univ. of Science and Technology

\*\*† e-Design Center, Institute of Industrial Technology(Dept. of Virtual Engineering, Univ. of Science and Technology)

(Received May 23, 2012 ; Revised July 6, 2012 ; Accepted July 12, 2012)

**Key Words:** Finite Element Method(유한요소법), Impact Behavior(충격 거동), Internal Defect(내부 결함), SSM(Shape Simplification Method(형상단순화법))

**초록:** 주조공정에서 발생하는 수축공과 같은 내부 결함은 일반적으로 응력집중을 발생시키며 균열의 시작점이 되므로 충격과 같은 기계적 거동에 있어 결함의 영향을 이해하는 것이 중요하다. 본 연구는 주조 알루미늄 합금의 충격 거동에 대한 내부 수축 결함의 영향을 실험적 방법과 전산 해석을 이용하여 비교 및 평가하였다. 시편의 내부 결함은 주조 후 산업용 CT 장비를 통해 검출하였으며 추출된 결함은 형상단순화법에 의해 타원체로 단순화하고 충격 해석을 위한 전산 해석을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 방법으로 내부 결함을 포함한 주조품의 충격 거동을 실험과 유사하게 예측함을 확인할 수 있었다.

**Abstract:** In general, internal defects, such as shrinkage in casting, cause stress concentration and can be a starting point for cracks. Therefore, it is important to understand the effects of internal defects on the mechanical properties including the impact behavior. This study aim is to evaluate the effects of internal casting defects on the impact performance of Al-alloy castings. Both an experimental method and computational analysis were used to achieve the research objective. The internal defects in the casting were scanned using an industrial CT scanner, and their shape was simplified using ellipsoidal primitives for impact analysis. The good agreement between the experimental and computer simulation results verified the reliability of the proposed computational method for the FEA of casting components with internal defects.

#### 1. 서론

주조는 제품의 내 외부의 형상을 동시에 만들어 낼 수 있으며 복잡한 형상의 제품에도 적용이 가능하기에 다른 제조 방법에 비해 매우 경제적으로 생산이 가능하다. 주조의 주요 목표는 결함이 없고 강도, 치수정확도, 표면 정도에 대한 요구조건을 만족하는 제품을 생산하는 것이다. 목표 중 하나로 응고과정에서 발생하는 응고수축에

따른 체적변화는 Fig. 1과 같이 제품 내에 내부 결함을 내포하게 된다. 이로 인해 단조품 등에 비해 기계적 강도가 취약한 단점이 있다.

일반적으로 금속은 빠르고 강한 충격에 깨어지기 쉽기 때문에 제품의 한 부분으로서 선정하는데 충격요소는 매우 중요한 인자가 되며 재질에 따라 충격강도가 다양하다. 하지만 내부 결함이 존재하는 경우 충격강도는 현저히 저하되는 원인이 되며 안전하다는 평가와는 달리 예상치 못한 파손이 발생하기도 한다. 실제 적용된 재료는 외부 하중에 대해 견딜 수 있는 강도 및 강성을 갖춰야 하며 이러한 이유로 현재 충격특성 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012. 5. 10.-12., 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, vlvwlv@kitech.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

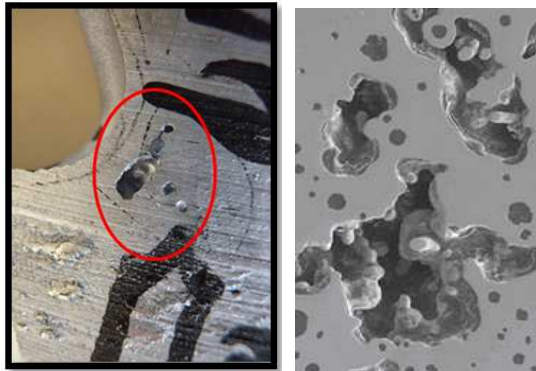


Fig. 1 Internal defects (Macroshrinkage)

S.A. Atroshenko 등<sup>(1)</sup>은 다양한 재료에 대해 충격 특성을 실험적으로 연구하였다. S. Dey 등<sup>(2)</sup>은 Johnson-Cook 이 제시한 파괴기준을 이용해 전산 해석을 수행하여 실제 충격 시험과 비교함으로써 보다 정확한 예측 방법을 연구하였다. F.Galvez 등<sup>(3)</sup>은 충격 시험과 전산해석을 이용해 충격 메카니즘의 분석에 따른 재료의 변형 및 파단을 예측하는 연구를 하였다. 또한 Beckermann 등<sup>(4)</sup>은 주조공정에서 발생한 내부 결함의 크기와 탄성계수와의 상관관계를 파악하여 LEFM(Linear Elastic Fracture Mechanics) 방법으로 탄소성 거동을 예측하는 방법을 연구하였다. 하지만 아직까지 내부 결함을 고려하여 충격 해석을 하는 해석적 방법에 대한 연구가 부족한 실정이다. 본 논문에서는 내부결함의 영향을 파악하기 위해 크기가 다른 결함을 임의적으로 생성하여 충격실험을 수행하고, 내부결함을 구조해석과 연계하여 실험과 충격 해석을 비교 평가하였다. 내부결함을 고려한 충격해석을 수행하기 위해 공업용 CT (Computerized Tomography)를 이용하여 실제 결함의 형상을 검출하고 결함형상을 단순화하였다. 내부결함의 단순화 모델링은 저자의 다른 논문에서<sup>(5)</sup> 제안한 수축공 내부결함을 타원체로 단순 모델링하는 S.S.M(Shape Simplification Method) 방법을 적용하였고 충격해석에는 상용 구조해석 프로그램인 Abaqus CAE 6.10 을 사용하였다.

## 2. 충격 시험

### 2.1 내부 결함을 내포한 시편의 제작

본 연구에서는 T-6 열처리된 A356(Al 91.1~93.3%, Si 6.50~7.50%, Mg0.25~0.45%) 알루미늄 합금을 사용하여 충격 시험을 수행하였다. 내부 결함의

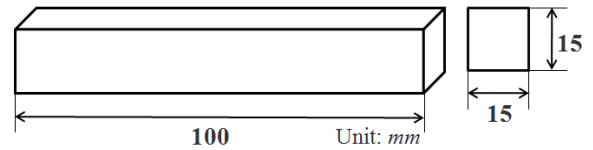


Fig. 2 The shape and dimension of specimen for Impact test

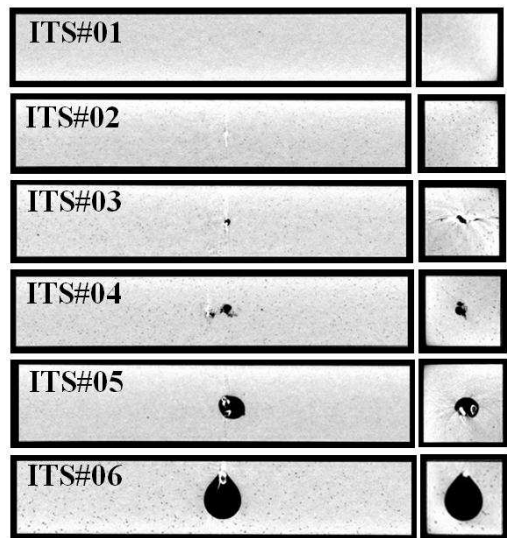


Fig. 3 CT images of Impact test specimen including internal defects(Size of #3 : 2.1 mm, #4 : 3.4 mm, #5 : 4.8 mm, #6 : 8.4 mm)

크기에 따른 영향을 파악하고자 주조 전에 시편 중심부에 크기가 다른 섬유조각들을 몰드에 설치하고 주조를 함으로써 서로 다른 결함을 가진 시편을 제작하였다.

충격 시편의 형상은 Fig. 2 처럼 블록형 시편을 사용하였고, 공업용 CT 를 이용하여 Fig. 3 과 같이 6 개 충격 시편의 내부 결함의 형상과 크기를 파악할 수 있었다. 충격 시편 ITS#03 ~ 06은 주조 공정에서 인위적으로 내부 결함을 생성시켰으며, 충격 시편 ITS#01 과 ITS#02 는 내부에 미세 수축공만을 포함하고 있으므로, 건전한 시편으로 간주하여 내부 결함에 대한 영향을 비교하였다.

### 2.2 시험 방법

시편에 대한 충격 시험은 Fig. 4 와 같은 자유낙하 하중식의 충격 시험 기기를 이용해 시험을 하였다. 본 장비의 낙하체 하중은 25kg 이며 초기 에너지 120J 로 충격 시험을 수행하였으며 충격 시험 시 시편이 변형하는 형상을 촬영하였다.

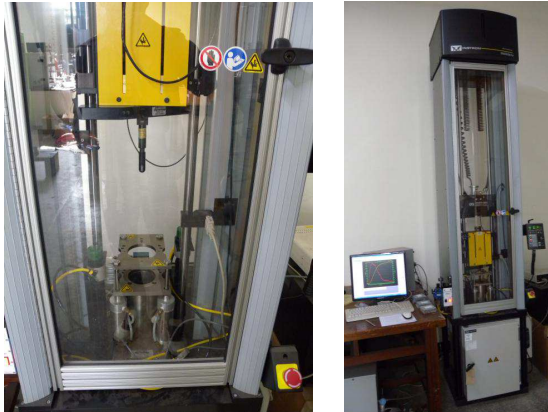


Fig. 4 Instron Dynatup® Impact Test Machine

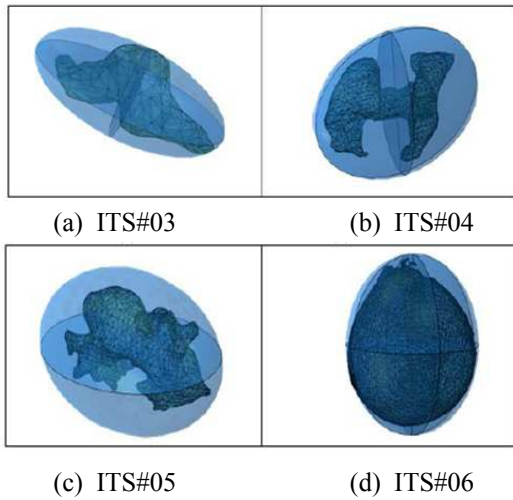


Fig. 5 Shape simplification of defects

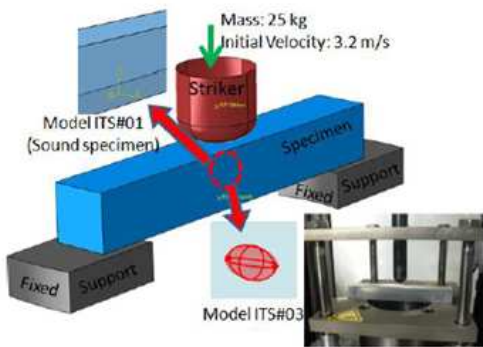


Fig. 6 Model assembly for impact simulation

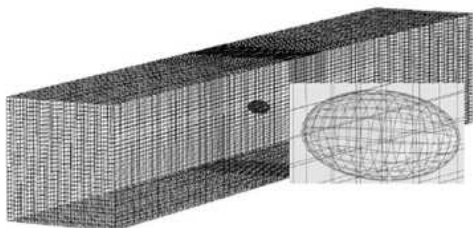


Fig. 7 Mesh view of ITS#03 Model

### 3. 충격 해석

#### 3.1 결함 추출 및 모델링

본 논문에서 내부 결함이 존재하는 경우의 전산 해석을 위해 결함을 모델링하는 형상 단순화 (SSM)방식을 사용하였다. 본 방식은 Abaqus CAE에서 사용되는 툴을 이용하며 내부 결함의 형상을 Fig. 5와 같이 단순화하여 나타낼 수 있다.

#### 3.2 유한 요소 해석 방법

충격 해석의 조건은 Fig. 6과 같고 시편 모델은 실제 시편과 동등하며, 고정된 지지대와 낙하체는 강체로 정의하였다. 충격 시편 모델의 요소는 Fig. 7과 같이 1.5mm크기의 8 절점 육면체 솔리드 요소로 모델링하였으며 결함이 포함된 충격 부분의 변형 및 충격 메커니즘을 보다 정확히 분석하기 위해 충격 부위는 더욱 조밀한 격자로 모델링하였다. 순간적인 동적 반응과 복잡한 접촉 문제를 해석하기에 적합한 ABAQUS V6.10의 외연적 시간 적분 유한요소법(Explicit time integration finite element method)을 사용하였다.

Table 1 Material parameters of A356-T6

Young's Modulus	70 GPa
Poisson's Ratio	0.3
Yield Strength (0.2%)	220 MPa
Ultimate Strength	275 MPa
$\epsilon_T^+$	0.44
$\epsilon_T^-$	1494.0
$k_0$	8.63
$\epsilon_s^+$	0.35
$\epsilon_s^-$	1.2
$k_s$	0.3

\*Material parameters were assumed as strain-rate independent

$\epsilon_T^+$ ,  $\epsilon_T^-$  : Equivalent plastic strain in equibiaxial tension/compression at ductile fracture

$k_0$  : material parameter in ductile fracture curve

$\epsilon_s^+$ ,  $\epsilon_s^-$  : Equivalent plastic strain in equibiaxial tension/compression at shear fracture

$k_s$  : material parameter in shear fracture curve

3.3 적용된 재료 물성

충격 시험은 물체의 비선형 거동 및 점진적인 파손의 형상을 포함한다. 파손 형상을 표현하기 위한 파손조건은 전단 및 연성 파손조건 (shear damage criterion, ductile damage criterion)를 적용하였다.

파손의 형상을 나타내기 위한 연성 및 전단 조건에 대한 물성치 조건은 H. Hooputra 등<sup>(6)</sup>이 제시한 ‘알루미늄 합금 EN AW-7108 T6’의 재질 변수인 Table 1 을 기초로 하였다.

상기 논문에서 제시한 아래의 관계식을 통해 연성 및 전단 소성 변형률( $\epsilon_D^{pl}$ )을 계산할 수 있으며 파손형상은 시편의 소성변형률이 해석에 적용한 파괴 시작 기준에 도달한 이후부터 요소제거법(Element Removal)기법에 의해 구현된다.

$$\epsilon_D^{pl}(\eta, \epsilon^{pl}) = \frac{\epsilon_T^+ \sinh[k_0(\eta^- - \eta)] + \epsilon_T^- \sinh[k_0(\eta - \eta^+)]}{\sinh[k_0(\eta^- - \eta^+)]} \quad (1)$$

$$\epsilon_D^{pl}(\theta_s, \epsilon^{pl}) = \frac{\epsilon_s^+ \sinh[k_0(\theta_s - \theta_s^-)] + \epsilon_s^- \sinh[k_0(\theta_s^+ - \theta_s)]}{\sinh[k_0(\theta_s^- - \theta_s^+)]} \quad (2)$$

$\epsilon_D^{pl}$  : Equivalent plastic strain at onset of fracture

$\eta^+, \eta^-$  : Stress triaxiality in equibiaxial tension/compression at ductile fracture

$\theta_s^+, \theta_s^-$  : Shear stress parameter for equibiaxial tension/ compression

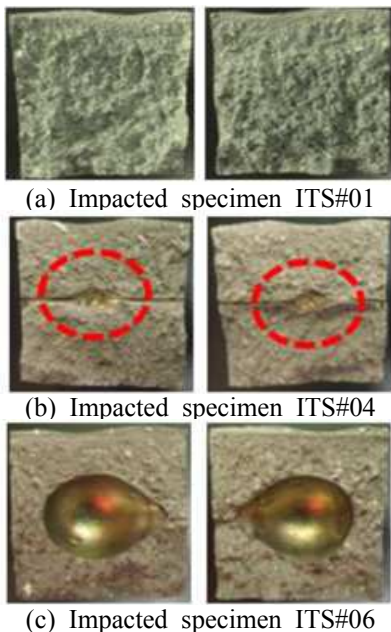
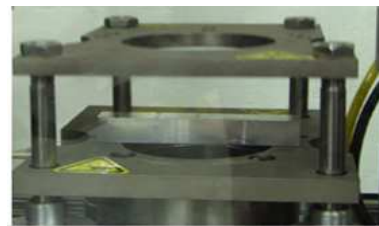


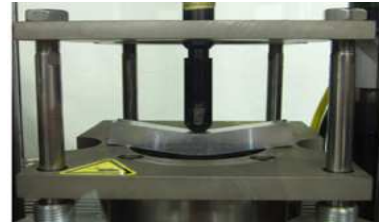
Fig. 8 Fractured surfaces of specimens after test

Table 2 Results of Impact Test

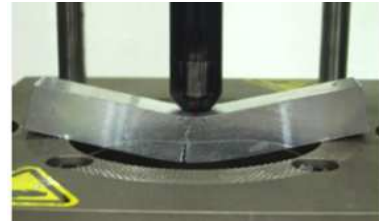
Model No.	Energy Absorbed(J)	Impact Toughness (J/cm <sup>2</sup> )
ITS#01(#02)	113.29	50.35
ITS#03	105.54	47.64
ITS#04	86.32	39.98
ITS#05	64.42	31.13
ITS#06	48.04	28.32



(a) Set the position of specimen for test



(b) Specimen underwent bending deformation



(c) Damage initiation and evolution in specimen

Fig. 9 Impact Test Process

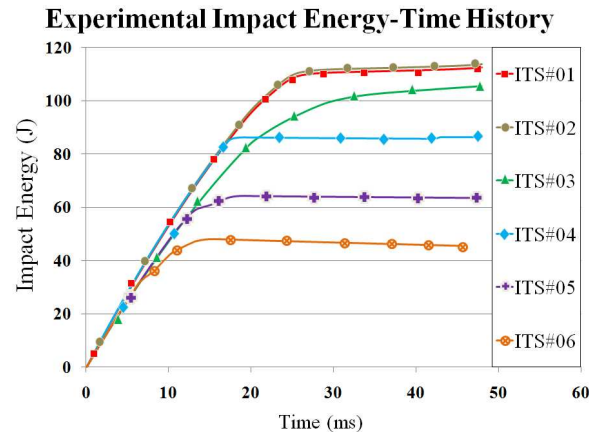


Fig. 10 Curves of impact energy along time

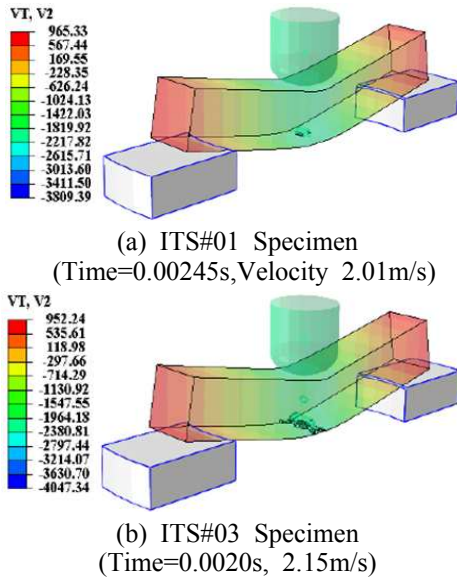


Fig. 11 Results of impact simulation(Damages initiates in models)

#### 4. 결과 및 비교

##### 4.1 충격 시험 결과

ITS#01 시편의 충격 시험의 경우 충격 하중을 받는 순간 Fig. 9(b)와 같이 시편은 굽힘 변형이 발생하고 그 후 (c)와 같이 시편 내부에서 파손이 일어나며 시편이 파괴될 때까지 진전한다. 본 시험을 통해 파괴된 시편의 단면에 Fig. 8과 같이 결함이 있음을 확인할 수 있었다.

충격 시험을 통해 시편이 파괴되는 동안 흡수된 에너지는 그 시편의 충격에 대한 인성이라 할 수 있다. 각 시편에 대한 충격 인성을 Fig. 10과 같이 시간에 따른 결과로 나타내었으며 Table 2와 같이 각 내부 결함의 크기에 따라 시편에 흡수된 에너지의 변화를 정리하였다. 이를 통해 충격 시험 시 시편의 내부 결함은 충격에 대한 인성을 저하시키고 있음을 알 수 있다. 또한 SFRF<sup>(7)</sup>에서 제시한 수축결함을 내포한 제품의 정적 굽힘 하중에 대한 충격 인성보다 더 큰 저하를 가져온다는 것을 알 수 있다.

ITS#01 과 ITS#02 가 건전한 시편임을 고려할 때 흡수된 에너지, 즉 충격 인성의 평균값은 113.29J로 ITS#03 ~ 06 시편의 충격 인성과 비교하였고, 수축 결함의 크기가 증가함에 따라 시편의 충격 인성에 대한 수축 결함의 영향은 더욱 커짐을 알 수 있었다.

Table 3 Results of impact simulation

Model No.	Energy Absorbed(J)	Impact Toughness (J/cm <sup>2</sup> )
ITS#01(#02)	116.85	51.93
ITS#03	107.53	48.54
ITS#04	94.24	43.64
ITS#05	70.86	34.25
ITS#06	53.67	31.64

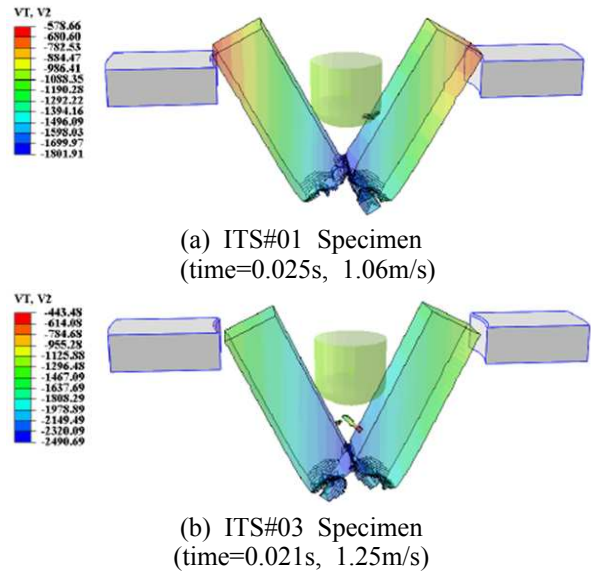


Fig. 12 Results of impact simulation(Model totally broken)

##### 4.2 충격 전산 해석 결과

충격 시간에 따라 건전한 시편인 ITS#01 과 내부 결함이 있는 시편ITS#03 을 비교하였다. 일단 낙하체가 시편에 충격을 가하기 시작하면, 두 시편 모델은 Figs 11~12와 같이 서로 다른 충격 거동 및 낙하체의 속도를 나타낸다. ITS#01 은 0.025초에서 완전히 파괴되었고 낙하체의 속도는 1.06m/s의 속도로 감소하였으며, ITS#03 은 0.021초에서 완전히 파괴되었고 낙하체의 속도는 1.25m/s 이다.

현재 접촉 조건은 서로 마찰이 없으며 외부로의 에너지 소비는 전혀 없으므로 에너지 보존 법칙에 따라 시편에 흡수된 에너지의 양은 (3)을 이용해 계산할 수 있으며 각 시편 모델의 흡수된 에너지는 Table 3과 같다.

$$E_{absorbed} = \frac{1}{2}m(v_t^2 - v_0^2) \quad (3)$$

$v_t$  : Instantaneous velocity

$v_0$  : Initial velocity

**Table 4** Results of Experiment and Computation

Model No.	Energy Absorbed(J)		
	Experiment	Computation	Difference (%)
ITS#01 (#02)	113.29	116.85	3.14
ITS#03	105.54	107.53	1.89
ITS#04	86.32	94.24	9.18
ITS#05	64.42	70.86	10.00
ITS#06	48.04	53.67	11.72

#### 4.1 충격 시험과 전산해석 결과 비교

결함을 고려한 시편의 충격 시험과 전산 해석의 에너지 값은 Table 4 와 같다. 결함이 작은 경우는 실험과 해석의 차이가 작았으나 결함의 크기가 증가하면서 최대 11.72% 까지 차이가 커졌다.

내부 결함의 모델링의 어려움과 유한 요소 해석에서 재료 파괴 역학을 고려해 볼 때 본 결과의 오차는 충분히 받아들일 수 있는 범위이며 이를 통해 내부 결함을 고려한 전산 해석의 적용 가능성과 신뢰성에 대한 확인은 주조 제품의 동적 해석을 가능케 한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 알루미늄 A356-T6 합금의 내부 결함의 영향을 파악하기 위해 크기가 다른 결함을 생성하여 충격실험을 수행하였고, 내부결함을 고려한 충격해석과 비교 평가하였다.

(1) 시편의 내부 결함의 크기에 따라 충격 흡수 에너지의 양이 달라지며 이는 충격에 대한 충격 인성이 저하되는 것으로 확인할 수 있었다.

결함이 없는 A356-T6의 충격 인성은 113.29J 이고 결함이 시편의 0.20%( 결함크기 2.1mm) 이하에서는 100J 이상이었으나 0.32%( 결함크기 3.4 mm) 가 되면 86.32J로 급격히 떨어졌다.

(2) 공업용 CT 를 이용하여 시편에 존재하는 내부 결함 형상데이터를 3D CAD 모델로 추출하였고 SSM (Shape Simplification Method) 을 통해 타원체로 단순화하여 충격 해석을 수행하였으며

충격실험과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 본 논문에서 적용한 결함의 형상단순화법에 의한 충격 해석 기법을 활용하여 주조공정에서 발생하는 내부 결함의 영향을 이해하고 충격에 의한 특성 등을 예측할 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) Atroshenko, S. A., Naumova, N. S. and Novikov, S. A., 2006, "Influence of High-Velocity Impact on Metals," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.33, pp.62~67.
- (2) Dey, S., Borvik, T., Hopperstad, O. S. and Langseth, M., 2007, "On the Influence of Constitutive Relation in Projectile Impact of Steel Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.34, pp.464~486.
- (3) Galvez, F., Condon, D., Garcia, N., Enfedaque, A. and Sanchez-galvez, V., 2009, "Dynamic Fracture Toughness of a High Strength Armor Steel," *Engineering Failure Analysis*, Vol.16, pp.2567~2575.
- (4) Hardin, R. and Beckermann, C., 2012, "Effect of Proximity on Deformation, Damage, and Fracture of Cast Steel," *The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol.2, pp.217~224.
- (5) Kwak, S. Y., Lim, C. H. and Baek, J. W., 2009, "Contribution Analysis Using Shape Simplification Method for Casting Structure Shrinkage," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 33, No. 8, pp. 807~812.
- (6) Hooputra, H., Gese, H., Dell, H. and Werner, H., 2004, "A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminium Extrusions," *International Journal of Crash*, Vol. 9, No.5, pp.449-463.
- (7) Breznak, E. S., Vishnevsky, C. and Wallace, J. F., 1969, "The Effect of Internal Shrinkage Discontinuities on the Fatigue and Impact Properties of Cast Steel Section," *Steel Foundry Research Foundation (SFRF)*.