

## 내부 결함을 고려한 주조 제품의 피로수명 예측을 위한 결함 형상단순화 해석모델<sup>§</sup>

곽 시 영\*<sup>†</sup> · 김 학 구\*

\* 한국생산기술연구원 사이버설계센터(과학기술연합대학원대학교 가상공학과)

### Shape-Simplification Analysis Model for Fatigue Life Prediction of Casting Products Considering Internal Defects

Si-Young Kwak\*<sup>†</sup> and Hak-Ku Kim\*

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

(Received April 18, 2011 ; Revised July 31, 2011 ; Accepted August 5, 2011)

**Key Words:** Fatigue Life(피로수명), Internal Defect(내부결함), Casting Process(주조공정), Finite Element Method(유한요소법), SSM(형상단순화법), DSM(직접형상법)

**초록:** 내부결함은 주조제품의 강도 및 피로 수명에 있어 상당한 영향을 미치기 때문에 주조공정에서 주요 관심사 이다. 일반적으로 내부결함은 응력집중을 발생시키며 균열의 시작점이 되므로 피로 수명과 같은 기계적 거동에 있어 수축공과 같은 결함을 이해하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 내부결함을 고려한 인장시험에 대해 피로시험을 수행하고 주조결함을 고려할 때의 특정하중피로노치 계수를 산정하였다. 실제 내부결함은 산업용 CT 장비를 통해서 확인하였으며 확인된 결함은 형상단순화법에 의해 타원체로 단순화 하고 응력해석과 피로해석을 수행하였다. 그 결과 우리가 제안한 방법이 기계적 거동에 있어 내부결함의 영향을 조사하고 피로수명 등을 예측함에 있어 유용함을 확인할 수 있었다.

**Abstract:** Internal defects are a major concern in the casting process because they have a significant influence on the strength and fatigue life of casting products. In general, they cause stress concentration and can be a starting point of cracks. Therefore, it is important to understand the effects of internal defects on mechanical properties such as fatigue life. In this study, fatigue experiments on tensile specimens with internal defects were performed. The internal defects in the casting product were scanned by an industrial CT scanner, and its shape was simplified by ellipsoidal primitives for the structural and fatigue analysis. The analysis results were compared with experimental results for casting products with internal defects. It was demonstrated that it is possible to consider internal defects of casting products in stress and fatigue analysis. The proposed method provides a tool for the prediction of the fatigue life of casting products and the investigation of the effects of internal defects on mechanical performance.

### 1. 서 론

최근 컴퓨터의 비약적인 발전과 더불어 많은 공학자들은 구조해석 시뮬레이션을 수행하여 제품의 구조적 안전성을 평가하고 있다. 또한 내구성에 대한 관심이 증가하면서 응력 등의 구조해석 결과를 이용하여 피로하중에 대한 안전성을 평가하는

피로해석 전용 프로그램(Fe-Safe, Fe-Fatigue 등)들이 개발되어 사용되고 있다. 일반적으로 피로해석을 수행할 때에는 해석대상에 대해 단품 및 조립품의 구조 해석을 수행하고 여기서 얻은 응력 결과나 변형 결과 등을 이용하여 제품의 피로수명을 평가한다. 이 때 해석을 수행하는 공학자들은 해석 모델에 결함이 없다는 가정 하에 피로수명을 계산한다.

하지만 실제 제품의 경우 Fig. 1 에 표시된 부분처럼 제조 공정 중에 발생하는 내부 결함이 존재할 수 있으며 이는 제품의 피로수명을 저하시키는 주된 원인이 되기도 한다. 특히 주조 공정의 경우 고온의 용융금속이 상온으로 냉각되면서 수축공

<sup>§</sup> 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2011. 4. 14.-15., SETEC) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, [vlvwlw@kitech.re.kr](mailto:vlvwlw@kitech.re.kr)

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

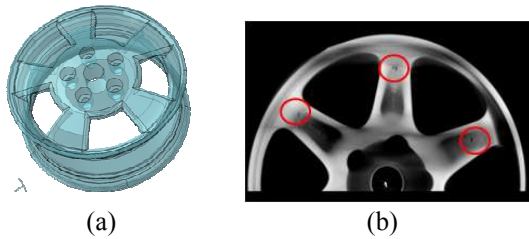


Fig. 1 Internal defects in an aluminum alloy wheel (Inspected by Industrial CT)<sup>(1)</sup>

또는 기포 등의 내부결함이 발생하게 되는데 이러한 결함을 고려하지 않는 경우 피로적으로 안전하다는 평가임에도 불구하고 예상치 못한 파손이나 불량 발생하기도 한다.

따라서 주조 제품의 설계자는 내부결함이 제품의 거동에 미치는 영향에 대해서 정확히 이해하고 이를 적용하여 설계를 수행하여야 한다. 하지만 아직까지 이에 대한 연구와 이론이 부족한 실정이기 때문에 설계자들은 막연히 과도한 안전계수를 적용하고 있으며 이에 따라 제품의 중량 증가, 생산성 저하 등의 문제가 발생하고 있다.

그러므로 본 논문에서는 내부 결함을 고려하여 피로 해석을 수행하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 사용한다면 내부 결함이 피로 수명에 미치는 영향을 고려하여 피로수명을 예측할 수 있기 때문에 보다 정확하고 효율적인 설계가 가능할 것으로 예상된다.

주조 결함은 매우 낮은 함유량에서도 현저한 기계적 특성의 저하를 가져올 수 있기 때문에 이 분야에 대한 연구는 최근까지 진행되어 왔다. 지금까지 이루어지고 있는 연구 동향을 살펴보면 주조 결함이 피로수명에 미치는 영향에 대한 실험적 연구가 중심을 이루고 있다. Beckermann 등<sup>(2)</sup>은 수축공 및 기공 등의 결함을 크기에 따라 분류하고 탄성계수와와의 상관관계를 파악하여 결함의 크기를 정량화하였고 LEFM(Linear Elastic Fracture Mechanics) 방법으로 피로수명을 예측하는 방법에 대해서 연구하였다. Kim 등<sup>(3)</sup>은 Murakami 등<sup>(4)</sup>이 제안한 파라미터를 이용하여 피로크랙의 발생원으로 선택되는 결함의 크기를 평가함으로써 인공결함이 피로한도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Wang 등<sup>(5)</sup>은 주조용 알루미늄의 피로 거동에 대한 기공 면적의 중요성을 언급한 바 있으며, Ammar 등<sup>(6)</sup>은 Al-Si 계 합금 및 열처리 제품에서 표면에 위치한 기공에서 피로 균열이 생성된다고 보고한 바 있다.

저자의 다른 논문은<sup>(1,7)</sup> 수축공 등의 내부 결함

을 CT 장비로 촬영 후 얻은 결함 데이터를 DSM (Direct Shape Method) 방법과 SSM (Shape Simplification Method) 방법을 통해서 비교하였으며 단순화 허용치를 0.7 까지 줄였을 때 DSM 방법과 비슷한 경향을 얻을 수 있었다. 그러나 이때 형상을 단순화 하는 과정에서 모델의 형상과 크기에 따라서 허용치에 대해 명확한 기준을 내리지는 못하였다. 이렇듯 아직까지 내부 결함을 고려하여 피로 수명을 예측하는 해석적 방법에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 피로 시험의 특성상 많은 시간과 비용이 소요되므로 해석적 접근 방법이 확립되면 보다 효율적으로 설계를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 CT(Computed Tomography)를 활용하여 제품 내부의 결함을 분석 하였고, 이를 구조 해석과 연계하여 피로해석을 수행하는 방법에 대하여 연구하였다. 해석에는 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS 12.1 을 사용하였다.

## 2. 본론

### 2.1 피로수명 예측

#### 2.1.1 피로수명 평가 이론

응력-수명(S-N) 피로수명 평가 이론은 금속의 피로를 이해하고 정량화하기 위하여 사용된 최초의 방법이다. 피로 수명이 높은 경우(High cycle application) 에서의 재료의 거동을 나타내며 재료 파괴 시까지의 반복수 N 에 대한 교번반복응력 S 의 관계로 이루어진다. 피로 수명과 작용 응력 사이의 관계는 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며 Fig. 2 와 같이 S-N 선도로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_a = AN_f^B \quad (1)$$

$N_f$  : Number of cycle to failure

$B$  : fatigue strength exponent

#### 2.1.2 일반적인 주조시편의 피로수명

현재 많은 주조업체에서 X-Ray 촬영 방법을 이용하여 주조품 내부에 존재하는 수축공, 기공 등의 내부 결함을 확인하고 있다. 이 때 Fig. 3 에 보이는 것처럼 제품 내부에 존재하는 결함을 확인할 수 있지만 결함의 크기나 형상 등에 대한 정량화가 어려우며 많은 오차를 내포하게 된다.

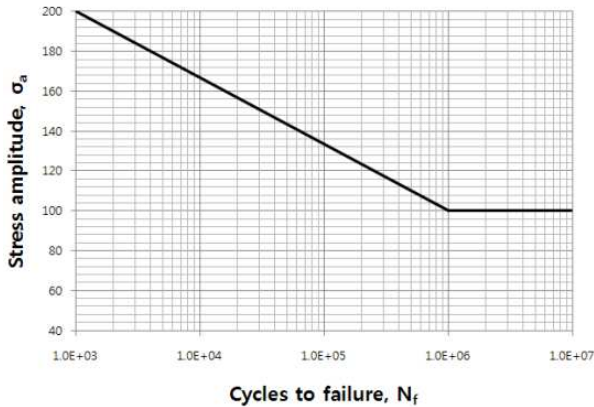


Fig. 2 S-N curve

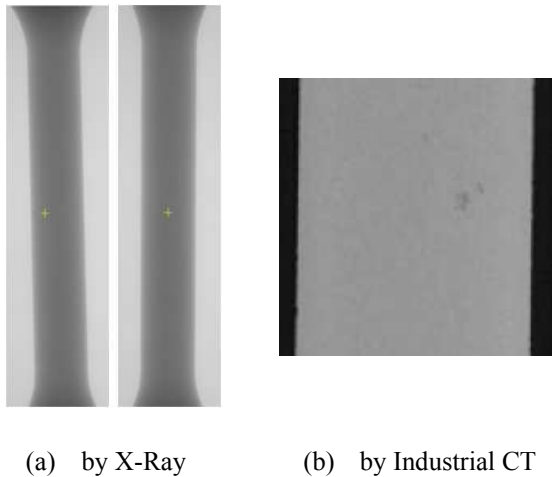


Fig. 3 Internal defects in specimen

현재 알루미늄합금을 이용하여 제품을 제작하는 일반적인 업체의 경우 Fig. 3(a)와 같은 X-Ray 결과를 얻을 경우 제품에 결함이 없다고 판단하고 있으나 실제로는 (b)에 표시된 부분처럼 미세하게 결함이 존재하는 경우가 많다. Fig. 4는 일반 주조 업체에서 X-ray 검사에 통과한 A356 주조 알루미늄 합금 시편의 피로시험 결과이다. 업체에서는 사형 중력주조를 통해 시편을 제작하였고 응력비 R=-1, 주파수 10Hz 조건으로 INSTRON 8801 장비를 사용하여 81~160MPa의 교변응력에서의 시편의 피로수명을 구하였다.

그 결과 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 결함이 없다고 판단하였음에도 불구하고 문헌치의 Sound<sup>(8)</sup> 시편보다 피로강도가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 피로강도에 차이가 나는 원인을 알아보기 위해 산업용 CT를 통해 단층촬영을 수행하였을 때 Fig. 3(b)에 보이는 것처럼 시편 내부에 작은 결함들이

Table 1 Condition of heat treatment

	Solution treatment	Artificial ageing
Temp.(°C)	525	160
Time (h)	8.0	6.0
Cooling condition	Water	Air

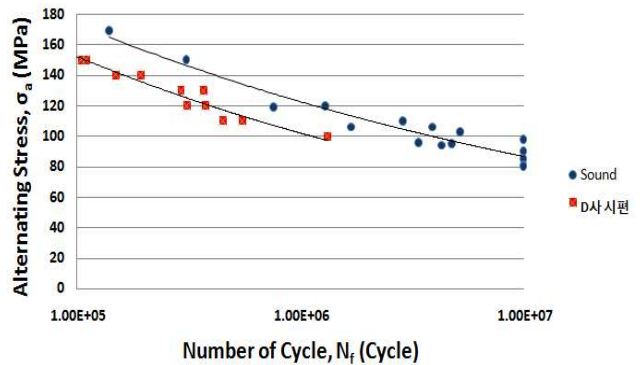


Fig. 4 Result of fatigue life of sound and small internal defect specimens

존재하는 것을 알 수 있었다. Sound 시편의 경우 Electronic arc furnace 방법으로 제품 내부에 결함이 없도록 특수 제작한 시편이기 때문에 Fig. 4에 보이는 것처럼 내부 결함이 존재하는 일반 주조업체의 피로시편보다 피로강도가 더 높은 것을 알 수 있다. Fig. 4에 나타낸 Sound 시편과 일반 주조업체의 피로 시편의 응력-수명 관계식은 각각 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있으며 이 관계식을 통해서 각 시편의 피로수명을 예측할 수 있다.

$$\sigma_a = 978.2N_f^{-0.15} \quad (2)$$

$$\sigma_a = 1141N_f^{-0.17} \quad (3)$$

### 2.1.3 내부결함 시편의 피로실험

본 연구에서는 T6 열처리된 A356 (Al 91.1~93.3%, Mg0.25~0.45%, Si 6.50~7.50%) 알루미늄 합금을 사용하여 피로시험을 수행하였다. 사형 주조 후 열처리 조건은 Table 1에 나타내었다. 시편의 형상은 Fig. 5에 보이는 것처럼 환봉형 시편을 사용하였고, Fig. 6에 보이는 5개의 시편이 피로시험에 사용되었다. 공업용 CT를 이용하여 단층촬영을 수행한 결과 Fig. 7과 같이 내부에 존재하는 내부 결함을 확인할 수 있었다.

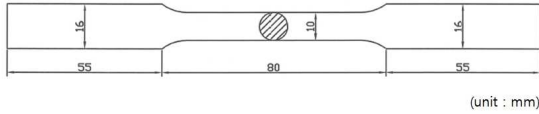


Fig. 5 Specimen model ( Dimension of the specimen)

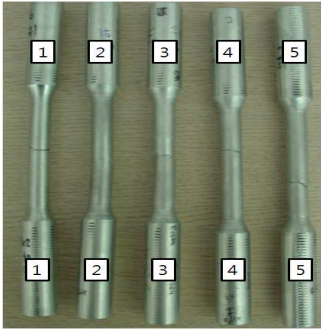


Fig. 6 Fatigue Specimens

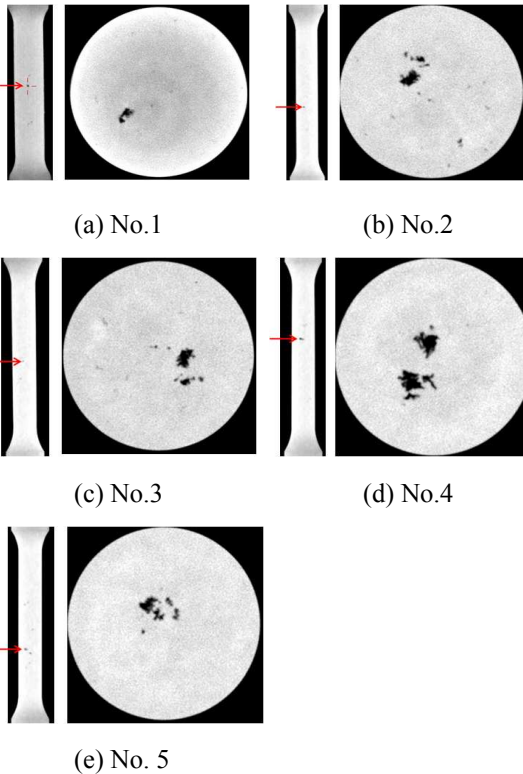


Fig. 7 Internal defects by CT inspection of the specimens

피로시험은 10 톤 용량의 MTS 810 유압 만능 재료시험기로 하중제어방식을 사용하였다. 하중은 응력비 R=-1, 주파수는 30Hz 를 적용하였고 9.425KN( $\sigma_a=120\text{MPa}$ )의 하중을 적용하여 시편의 파단시 까지의 cycle 을 알아보았다.

Table 2 Calculation  $K_{\sigma f}$  by fatigue life test of specimens shown at Fig. 8

Specimen	$\sigma_a$ (MPa)	$N_f$ (Cycle)	$\sigma_c$ (MPa)	$K_{\sigma f}$
1	120	307,611	147.0	1.225
2	120	529,821	135.5	1.129
3	120	166,483	161.1	1.343
4	120	235,095	153.0	1.275
5	120	343,986	144.5	1.204

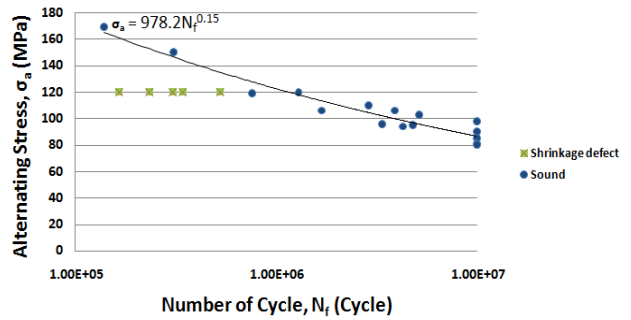


Fig. 8 Result of fatigue life test

Table 2 에 피로 시험 결과를 정리하였고 Fig. 8 에서 내부 결함이 없는 시편의 피로수명과 내부 결함을 내포하는 시편의 피로수명을 비교하였다.

2.1.4 특정하중 피로노치 계수

응력-수명 방법에서 노치효과는 피로노치 계수로 설명된다. 일반적인 피로노치 계수는 노치 없는 시편의 피로강도와 노치시편의 피로강도의 비율이다. 일반적으로 Al 합금은  $10^8$  승 cycle 범위까지의 영역에서 피로강도가 뚜렷이 나타나지 않는 특성이 있으므로 각 시험하중에서의 노치의 효과를 고려할 수 있는 계수를 정의하여 사용하는 것이 편리하다.

결함을 가지고 있는 시편의 피로하중에 의한 피로응력( $\sigma_a$ )과 동일한 피로수명을 나타내는 결함이 존재하지 않는 시편의 피로응력( $\sigma_c$ )의 비율을 특정하중피로노치계수( $K_{\sigma f}$ )로 정의하고 다음과 같이 표현하였다

$$K_{\sigma f} = \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \tag{4}$$

Fig. 4 의 X-ray 검사를 통과한 일반적인 시편과 Sound 시편과의 피로시험 결과를 비교하여 구한

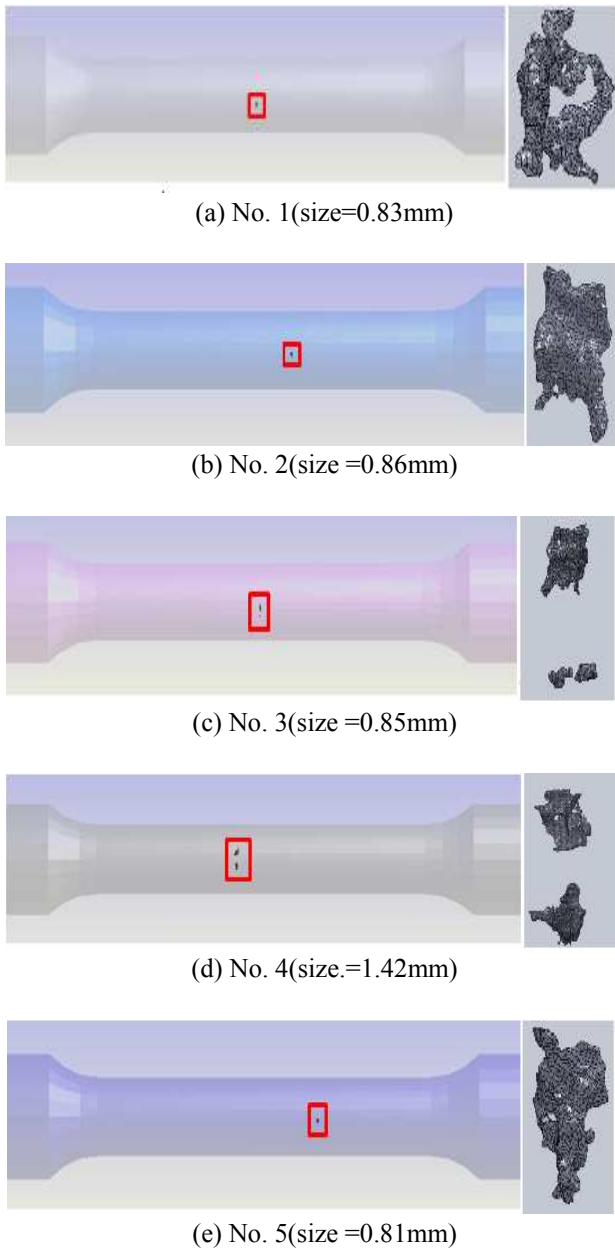


Fig. 9 Shape and location of defects extracted by CT on specimens shown at Fig. 8

특정하중피로노치 계수는 평균적으로 1.15 였다. Fig. 7 은 큰 결함이 존재하는 Fig. 6 의 시편에 대해 CT를 통해 구한 결함의 형태를 보여주고 있으며 그 결함의 크기는 평균적으로 1mm 내외였다.

Fig. 8 의 시험 결과를 보면 결함이 없는 시편의 경우 120MPa 의 교변하중에서 약 1,189,000 cycle 정도의 피로수명이 예상되는데 비해서 내부결함이 있는 시편의 경우 약 166,483 cycle ~ 529,821 cycle 정도로 피로수명이 현저히 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 이 시험결과를 이용하여  $K_{of}$  를 유도

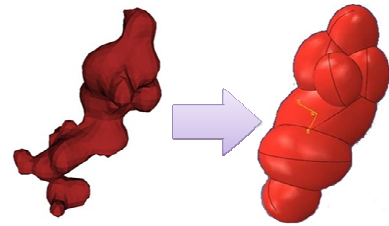


Fig. 10 Ellipsoidal approximation model of internal shrinkage defect

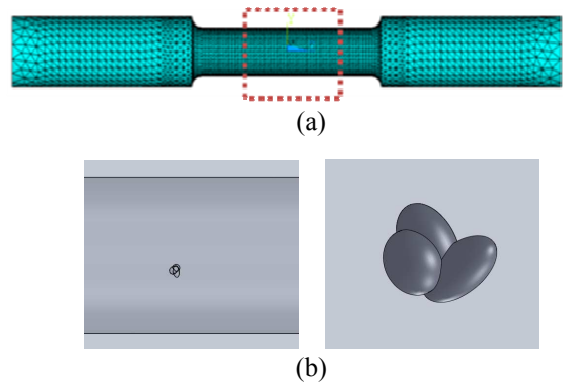


Fig. 11 FEM model of specimen; (a) FEM model of specimen, (b) model of shrinkage cavity

한 것을 Table 2 에 나타내었다. Table 2 에서  $\sigma_c$  는 현재 시험한 시험응력  $\sigma_a$  에서의 피로수명  $N_f$  와 동일한 수명을 나타내는 결함이 없는 시편의 피로응력으로 2.1.2 의 식 (2)를 활용하여 계산하였다.

### 3. 주조품의 피로수명 예측

결함이 존재할 경우와 건전한 제품 사이의 피로노치 계수  $K_{of}$  를 활용하여 내부결함이 존재하는 제품에 대한 구조해석과 피로해석에 적용하기는 어렵다.

본 논문에서는 내부결함이 존재하는 경우의 구조 및 피로해석을 수행하기 위해 내부결함을 Fig. 10 과 같이 모델링 하는 형상단순화(SSM)방식을 사용하였다.<sup>(1,7)</sup>

Fig. 11 은 구조 및 피로해석을 위한 No. 1 시편의 내부결함이 고려된 유효요소 모델이다.

Fig. 12 에 시편에 대해 결함을 고려한 구조해석 결과를 나타내었다. 구조해석은 탄소성 해석을 수행하였으며 하중은 시험과 동일한 120MPa 를 사용하였다. 구조 해석 결과는 결함 부위에서 최고 약 160MPa 의 응력이 발생하였다.

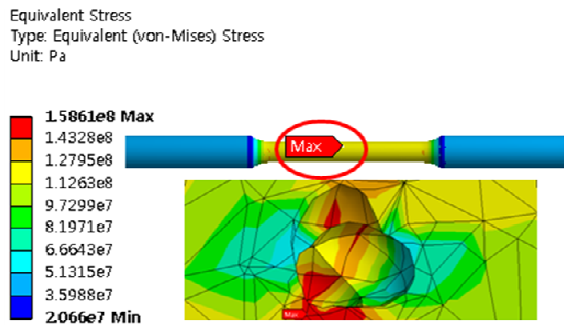


Fig. 12 Result of Finite Element Analysis (Von-Mises)

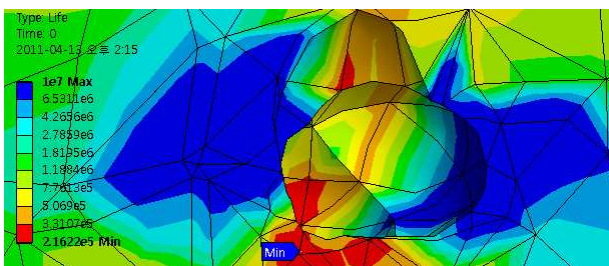


Fig. 13 Result of fatigue analysis

Fig. 12 와 같이 내부결함을 고려한 시편 모델에 대한 응력결과를 이용한 피로해석 결과를 Fig. 13 에 나타내었다. 내부결함을 고려하여 피로해석을 수행한 결과 결함부근의 피로수명이 가장 낮았으며 최저수명이 약 210,000 cycle 이었다. 추가로 No. 1 번 시편의 피로수명은 약 180,000 cycle 로 예측되었다. 상기 예측치는 실제 피로시험결과의 범위에는 포함되나 각 시험 시편의 피로시험결과와 1:1 로 피로수명을 정량적으로 예측하는 것은 시편 각각의 결함 형상, 위치, 형상단순화 정도, 재료물성 등에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

(1) 내부결함이 존재하는 알루미늄 A356 합금의 인장 시편에 대하여 피로시험을 수행하고 특정하중피로노치 계수  $K_{or}$  를 구하였다. 내부결함이 존재하는 시편의 피로수명은 166,483 cycle ~529,821 cycle 정도로 저하되는 것을 확인할 수 있었고  $K_{or}$  는 1.13~1.34 의 분포를 보였다.

(2) 공업용 CT 를 이용하여 시편에 존재하는 내부결함 형상데이터를 추출하였고 STL 형식의 3D CAD 모델을 생성하였다. 그리고 SSM 을 통해 생성된 결함 형상 데이터를 타원체 등으로 단순화하

여 구조 및 피로해석을 수행하였다.

(3) SSM 방법으로 내부결함을 고려했을 때의 피로 수명은 약 210,000 cycle 로 시험결과의 범위에 포함되나 각 시험 시편의 피로시험결과와 1:1 로 피로수명을 정량적으로 예측하는 것은 시편 각각의 결함 형상, 위치, 형상단순화 정도, 재료피로물성 등의 요소를 고려한 연구가 필요하다.

(4) 정량적인 정확성의 한계에도 불구하고 본 논문에서 제안한 결함의 형상단순화법에 의한 구조 및 피로해석 기법은 피로 거동에 있어 내부결함의 영향을 조사하고 피로수명 등을 예측함에 있어 유용함을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Lee, S. W., Kim, H. K., Hwang, H. Y. and Kwak, S. Y., 2010, "Modeling for the Fatigue Analysis of Al Alloy Casting Containing Internal Shrinkage Defect," *Journal of the Korea Foundry Society*, Vol.30, No.5, pp. 196~200.
- (2) Sigl, K. M., Hardin, R. A., Stephens, I. and Beckermann, C., 2004, "Fatigue of 8630 Cast Steel in the Presence of Porosity," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 17, No. 3, pp.130~146.
- (3) Kim, M. G. and Kim, J. H., 1999, "Influence of Artificial Defect on Fatigue Limit in Austempered Ductile Iron," *Korea Society of Mechanical Engineers*, A, Vol. 23, No. 11, pp. 1922~1928.
- (4) Murakami, 2002, *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, Elsevier, pp.25~37
- (5) Wang, Q. G., Apelian, D. and Lados, D. A., 2001, "Fatigue Behavior of 356-T6 Aluminum Cast Alloys. Part I. Effect of Casting Defects," *J. Light. Met.*, Vol.1, pp. 73~84.
- (6) Ammar, H. R., Samuel, A. M. and Samuel, F. H., 2008, "Effect of Casting Imperfections on the Fatigue Life of 319-F and 356-T6 Al-Si Casting Alloys," *Mater. Sci. Res. Eng.*, Vol. 413, No.1-2, pp.65~75.
- (7) Kwak, S. Y., Lim, C. H. and Beak, J. W., 2009, "Contribution Analysis Using Shape Simplification Method for Casting Structure Shrinkage," *KSME-A* Vol. 33, No. 8, pp.807~812
- (8) The Society of Materials Science, 1996, *Databook On Fatigue Strength of Metallic Materials*, Vol.2, pp.1703~1710.