

# CT를 이용한 알루미늄 반응고 성형품의 미세 결함 측정

이상용<sup>#</sup> · 김찬현<sup>1</sup>

## Measurements of Micro-Defects in the Aluminum Thixoformed Part using Computed Tomography(CT) Technology

S. Y. Lee, C. H. Kim

(Received June 29, 2009 / Revised July 9, 2009 / Accepted July 15, 2009)

### Abstract

Computed tomography(CT) has been applied to measure micro-defects in the aluminum knuckle parts manufactured by the thixoforming process. 6061 aluminum alloys were used to form knuckle samples in the semi-solid temperature after the SIMA processing of billets. Tensile specimens were cut from the different locations in a thixoformed knuckle. The size and the distribution of forming defects in tensile specimens were analyzed using CT scanning and image analysis technology before tensile tests. It has been qualitatively shown that the stress-strain curves were significantly affected by the size and the distribution of forming defects although the defect sizes lie in the range of micro-meters.

**Key Words** : Computed Tomography(CT), Aluminum Knuckle, Thixoforming, Forming Defects, Stress-strain Curve

### 1. 서론

지금까지 반응고 성형에 대한 소재, 공정 및 부품개발에 대해서는 많은 연구와 발전이 있어 왔으나, 제품의 제조비용과 특성에 결정적인 영향을 미치는 결함의 영향에 대해서는 연구가 미흡하다. 반응고 성형법은 알루미늄, 마그네슘과 같은 경량 소재 뿐만 아니라 동, 철강과 같은 고용점 소재로 된 복잡형상의 구조용 부품 제조에의 응용이 활발하게 시도 되고 있기 때문에 이들 부품의 안정성 평가하는 일은 매우 중요한 일이다[1, 2]. 적절한 공정조건에서 제조된 반응고 성형 부품에 존재하는 결함의 크기는 보통의 주조법에 의해 제조된 부품의 결함에 비해 작은 것이 보통이다. 그러나 어느 정도의 크기와 분포의 결함이 부품의 사용에 문제가 없는지에 대한 체계적인 분석과 연구가 필요하다. 이를 위해서는 작은 크기의 결

함도 정확하게 측정하여 크기와 분포가 부품의 기계적 특성에 어느 정도 영향을 미치는가를 분석할 수 있어야 한다[3]. 일반적으로 산업현장에서 주조 부품의 결함을 비파괴적으로 검사하는 대표적인 방법으로 X-선 또는 초음파를 이용하는 방법이 대표적이다. 그 중에서 X-선 장비는 보통 2차원의 필름에 나타나는 결함을 측정하며 주로 상당한 크기의 주조결함을 검사하는데 그치는 실정이다.

본 연구에서는 일반적인 X-선 장비에서 측정하기 힘든 반응고 성형품에 존재하는 미세한 크기의 결함을 측정하고 분석하기 위해 CT(Computed Tomography)설비를 이용하였다. CT도 물론 X-선을 이용한 것이기는 하나 3차원적인 단면의 정보를 컴퓨터 영상으로 전산처리 한 후 재구성하여 활용하기 때문에 일반 X-선 사진으로는 알아내기 힘든 사실을 보다 정확하게 측정할 수 있는 장점

1. 주식회사 와이지원 기술부

# 교신저자: 국립안동대학교 공과대학 신소재공학부,

E-mail: sylee@andong.ac.kr

이 있다[4]. 특히 반응고 성형품의 결함은 CT 를 이용하면서도 기술적인 분석이 필요할 정도의 미세한 크기 및 분포를 가지고 있기에 CT 기술의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 CT 를 이용하여 반응고 성형법으로 제조된 자동차용 알루미늄 너클 부품의 결함을 측정하고 분석하는 방법을 기술하고 측정된 결함의 크기 및 분포가 기계적 특성에 미치는 영향을 인장시험을 통해 해석하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 반응고 성형된 Al 너클의 CT 측정

Fig. 1은 CT를 이용한 내부결함 측정에 활용된 알루미늄 너클 반응고 단조품의 모습이다. 6061 알루미늄이 반응고 단조용 소재로 사용되었으며 가열온도는 약 646℃, 반응고 상태에서의 유지시간 1분의 조건에서 성형되었고 성형 직후 대기 중에서 상온으로 냉각되었다. 반응고 단조품에 존재하는 결함 측정과 결함이 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 각 부위를 A~E로 나타내었으며 본 실험에서는 A, C, D 부위에서 1개의 시편을 채취하여 원통형 인장시편으로 가공하였고 CT를 이용하여 사진촬영 후 인장시험을 시행하는 순서로 실험하였다. 너클의 여러 부위에서 A, C, E 부위에서 만 시편을 채취하고자 선택한 이유는 여러 차례의 반응고 성형품을 분석한 결과 이 부위에서 비교적 결함이 생기는 확률이 높았기 때문이다. B, E 부위는 거의 결함이 없어 결함의 영향을 연구하기에 적절치 않았기 때문이다. 인장시편의 표점거리 내에 존재하는 결함만을 분석에 활용하였다. Fig. 2에는 본 실험에 사용된 인장시편의 형상과 치수를 나타냈다.

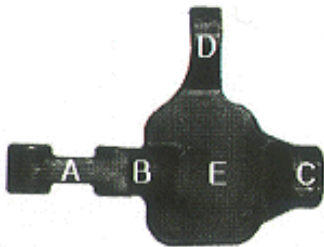


Fig. 1 Appearance of thixoformed knuckle and marking of specimen positions(A-E)

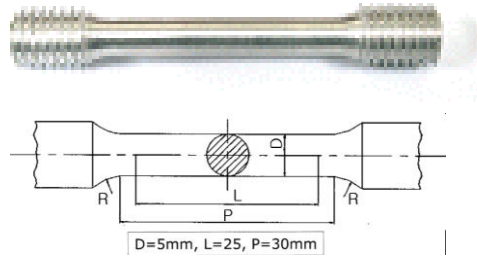


Fig. 2 Specimen for CT measurement and tensile test

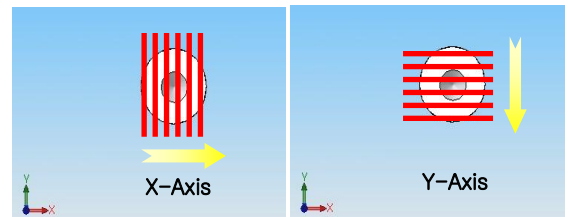


Fig. 3 CT scan method

너클 전체 및 인장시편에 대한 CT 촬영은 한국생산기술연구원에서 운영되고 있는 산업용 3D CT 장비를 이용하여 수행하였다. 이 장치는 두 개의 X-선 발생 장치, Flat panel detector, 회전선반 및 컴퓨터와 주변 장치들로 구성되어 있다. 본 장비는 225 kV의 micro focus X-ray tube를 갖추었기 때문에 촬영하려는 물체의 크기 및 재질에 따라서 적절한 X-선 발생장치를 선택적으로 사용할 수가 있으며 최대 해상도가 약 10 $\mu$ m(voxel size)인 3차원 마이크로 CT 데이터를 얻을 수 있다. 일반적인 CT 측정에서 스캔 작업은 물체의 크기 및 해상도 그리고 프로젝션 개수에 따라서 30~45분 정도가 소요되고, 재구성 작업은 두 개의 CPU를 갖는 컴퓨터 5대를 병렬 연결한 PC-Cluster를 이용하여 수행되기 때문에 촬영과 거의 동시에 완료된다. Fig. 3에는 인장시편의 단면 부위에서 CT 스캔 방법 및 방향을 나타내었다.

### 2.2 CT 촬영된 결함의 이미지 분석

CT 스캔을 통해 촬영된 이미지를 3차원적으로 가시화 하기 위해서는 측정방향에 따라 단층사진을 조합하여 동영상파일로 제작하여 결함의 위치를 가시적으로 구현할 수 있고, 수많은 단층사진 파일을 간략화 할 수 있다. 그러나 결함의 정확한 크기를 측정하기 위해서는 2차원적 평면 이미지

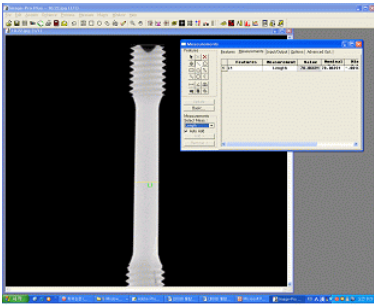


Fig. 4 Measurements of defect size by image-pro

가 보다 더 정확한 데이터를 제공하기에 동영상으로 간략화된 CT 측정 결과를 단층사진으로 재편집하는 과정이 필요하다. 특히, 결함이 존재하는 부위를 선택적으로 편집하기 위해서는 각 단층사진에서 결함이 존재하는 단층사진만을 선택적으로 추출할 수 있고 이미지로 가시화 할 수 있는 동영상 분석 프로그램을 이용하여 결함의 크기, 유형, 면적을 분석하였다. 각 단층이미지 파일은 이미지분석 프로그램(Image-Pro)을 이용하여 결함의 크기, 수 및 면적을 분석하였다. 결함의 크기 측정방법은 버니어캘리퍼스를 이용해 실제 인장 시편의 지름을 측정하고 CT측정 또는 미세 조직사진에서의 시편의 지름과 결함의 지름을 측정된 인장시편의 실제 지름에 대입하여 결함의 크기를 측정하였다. Fig. 4는 사용된 이미지 분석 프로그램의 예시이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3. 1 CT 측정된 성형 결함의 분석

CT 스캔은 최적의 해상도를 얻기 위한 조건인 225kV X-선 발생장치를 이용하여 180kV, 300 $\mu$ A의 조건으로 측정하여 결함 측정의 오차를 최소화하고자 하였고, 동영상 분석 프로그램과 이로부터 결함이 존재하는 각 단층사진을 추출하여 단층이미지로 가시화하였다. 각 단층간 결함 유무를 확인하고자 동영상 편집프로그램을 이용하여 단층사진으로 재구성하였다. 인장시편의 표점거리 부위의 직경은 5020 $\mu$ m이고 표점거리를 완전히 통과할 때까지 측정된 동영상을 사진으로 재구성하면 34장의 단층사진이 나왔기 때문에 각 단층사진 사이의 거리는 147.65 $\mu$ m(약 150 $\mu$ m)로 측정되었다.

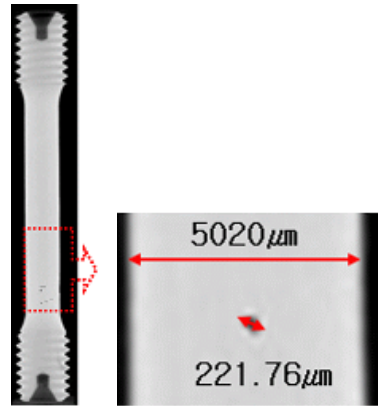


Fig. 5 Determination method of defect size

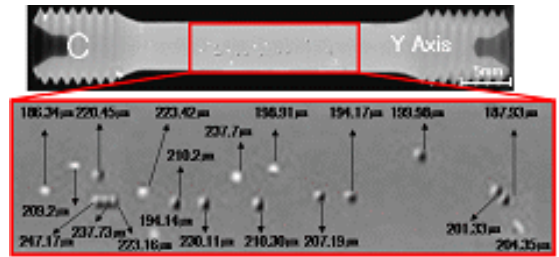


Fig. 6 Images and sizes of defects within the gauge length of a tensile specimen

각 단층사진에 존재하는 결함크기는 단층사진간 거리측정과 동일한 방법으로 구하였다. A, C, D부위에서 제작한 인장시편의 X축 Y축 단층사진 중 결함이 관측되는 단층사진을 표점거리 부위의 시편의 실제 직경(5020 $\mu$ m)과 이미지 분석 프로그램에서의 거리를 비례식으로 계산하여 실제 결함의 크기를 구하였다(Fig. 5).

Fig. 6은 너클의 C부위에서 채취하여 제작한 인장시편의 Y축 방향의 CT측정을 통해 발견된 결함이미지 중에서 인장시편의 표점거리(30mm)내에 존재하는 모든 결함의 이미지를 보여주며 각 결함의 크기는 이미지 프로그램을 이용하여 구하였다. 결함의 크기는 대체적으로 170 $\mu$ m~270 $\mu$ m의 크기를 가지고 있었다.

반응고 성형법으로 제조된 알루미늄 너클의 부위별 결함 측정 결과를 비교하기 위해 너클의 A, C, D부위에서 제작한 인장시편의 X축 및 Y축 CT 단층 사진 관찰과 이미지 분석 프로그램을 이용한 결함 분석 결과를 Fig. 7과 같이 도시하였다.

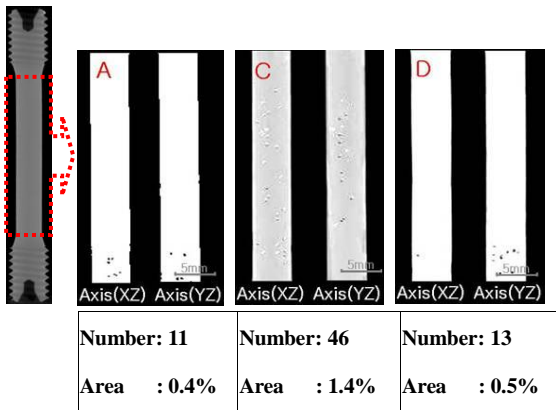


Fig. 7 Number and area of defects in specimens A, C and D

여기서 결함의 수는 인장시편의 표점거리 내의 전체 면적에서 관찰된 결함의 수를 의미하고 결함면적은 전체면적에 대한 결함면적의 비를 백분율로 나타낸 것을 의미한다.

A와 D부위에서 채취한 시편의 경우 결함이 국부적, 특히 시편의 한쪽으로 치우쳐서 발생한 것으로 나타난 반면 C 부위에서 채취한 시편은 시편의 중심에서 결함의 분포가 비교적 높으면서도 인장시편 전 부위에 걸쳐 결함이 발견되는 양상을 보이고 있었다. 각 시편부위별 결함의 수는 A는 11개, C는 46개, D는 13개로 C부위의 결함의 수가 다른 부위에 비하여 약 3~4배 높은 것으로 나타났다. 결함면적(비율)은 A와 D부위에서 제작한 인장시편이 약 0.4%와 0.5%로 유사한 면을 보이지만 C부위의 경우 약 1.4%로 약 3배 정도 더 많은 결함면적(비율)을 보이고 있다.

Fig. 8에는 A, C, D 부위에서 측정된 결함들에 대해 일정한 범위의 결함크기에 대한 결함의 수를 비교하여 나타내었다. 여기서 너클의 C 부위에서 채취한 시편은 결함의 수도 많고 결함이 차지하는 면적도 높은 것으로 나타났고, 특히 220 $\mu\text{m}$  이하 크기의 결함의 수는 다른 부위에 비하여 많지만 230 $\mu\text{m}$  이상 크기의 결함의 수는 다른 부위와 같은 수준을 보이고 있다.

위에 언급한 알루미늄 너클 인장시편의 결함 분석은 같은 조건의 반응고 성형법에 의해 제조된 하나의 너클 부품에 대해 수행한 것이다. 비록 본 논문에는 하나의 너클 부품에 대한 분석 결과가 예시되었지만 유사한 부품에 대한 다양한 미세조직 분석 결과[2] 및 예비실험결과를 볼 때 정

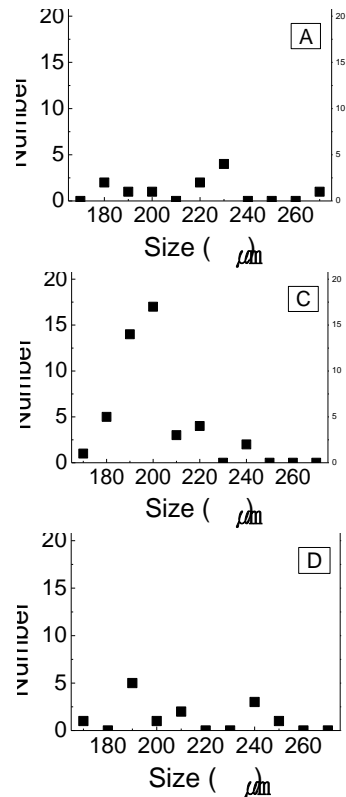


Fig. 8 Size and the number of defects in specimens A, C and D

성적인 측면에서는 어느 정도 대표성을 나타낼 수 있는 결과로서 충분히 의미가 있다.

본 논문에 적용된 부품의 형상, 사용된 소재, 적용된 성형조건에 대해서는 실험결과에 대한 정성적인 설명이 가능하다. Fig. 1에서 표시된 너클 형상의 A~E부위는 적용된 반응고 성형 공정의 특성으로 볼 때 성형 후의 미세조직이 미세하게 차이가 있으며 이는 기계적 특성의 미세한 차이로 나타난다. 너클의 바닥 부위인 E부위의 미세조직이 가장 치밀하고 결함이 발생할 확률이 가장 적고 A부위에 결함 발생 확률이 가장 높다. B, C, D 부위는 A와 E부위의 중간 정도의 조직치밀도 및 결함 발생 확률을 나타내는 부위로서 성형조건에 따라 달라질 수 있다. 본 논문의 연구에서 조사된 A, C, D 부위의 결함분석 결과를 볼 때 A, D 부위는 유사하게 좁은 단면적을 가지는 부위여서 마지막에 응고되는 끝 부분(Fig. 7 A, D의 아래 부분)에 결함이 주로 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 반면 C부위는 단면적이 A, D부위에 비해 크다.

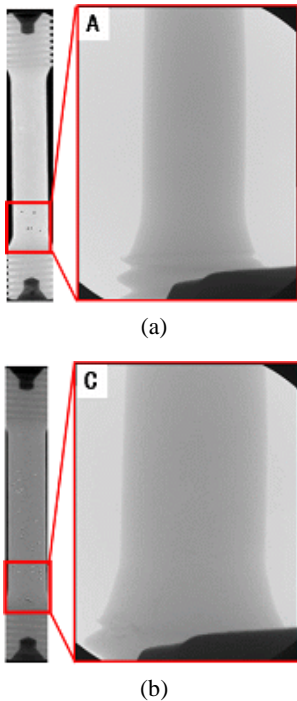


Fig. 9 Ultrasonic measurements of defects

따라서 C 부위에서는 결함 발생이 C부위 전체에 골고루 나타나게 된다. 이 A, C, D에서 나타나는 대부분의 결함은 전형적인 응고결함의 양상이다. 그러나 그 원인으로 볼 때는 성형이 진행되는 과정의 반응고 상태의 소재의 유동을 적절히 제어하지 못하거나 응고가 일어나는 동안의 적절한 가압과 발생하는 기공의 포집 제거를 위한 설계가 적절치 못한 것에 기인하기 때문에 성형결함으로 해석해도 무방할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 CT측정 결과와 비교하고자 초음파 결함측정기를 이용하여 CT측정을 통해 확인된 인장시편내 결함 존재 부위를 검사한 결과이다. 초음파 결함측정기를 이용한 결함측정에서는 인장시편내 결함의 존재를 확인할 수 없었다. 인장시편에 내포된 결함의 크기가 작고 CT 단층촬영기를 이용한 결함측정이 초음파 측정정보보다 높은 분해능을 가지고 있기에 기인한 결과로 판단된다

### 3. 2 결함이 인장시험결과에 미치는 영향

반응고 성형품의 결함이 인장시험결과에 영향을 미치고 있음은 이미 발표된 연구결과에 나타 내었다[5]. Fig. 10은 너클 부품에 대해서 측정된 결함분석 결과가 응력-변형률 곡선에 어떻게 영향을

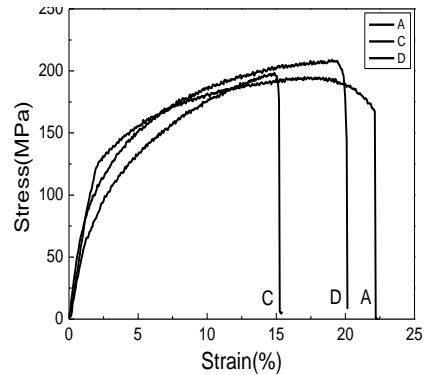


Fig.10 Stress-strain curves of specimens A, C and D

미치는가를 보여주고 있다. 너클의 A, C, D 부위에서 채취하여 인장시험으로 가공한 시편은 CT를 이용한 결함분석이 끝난 후에 동일한 조건에서 인장시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 변형률에 따른 응력의 변화 양상 및 응력의 수준은 유사하게 나타났다. 동일한 소재 및 부품이기 때문에 초기의 응력곡선의 미세한 차이는 약간의 실험 및 측정 오차에 기인한 것으로 미세조직의 차이는 아니다. 즉 일반적인 6061 알루미늄 합금 반응고 성형품의 응력-변형률 양상과 유사하다. 그러나 파단 변형률(fracture strain)에 있어서는 분명한 차이가 있으며 어느 정도 측정된 결함분석 결과와 관련이 있는 것으로 해석될 수 있다. 파단 변형률은 결함면적 비율에 반비례 하는 것으로 보인다. 특히 결함면적(비율)이 높은 C 부위는 A 및 D 부위에 비해 5~7% 낮은 파단 변형률을 보이고 있다.

A와 D를 비교하면 측정된 결함면적(비율) 값에서는 0.1% 정도의 근소한 차이를 보였지만 응력-변형률 곡선에서는 2~3% 정도의 파단 변형률의 차이를 나타내고 있다. 기존의 연구결과[1, 5]에서 볼 수 있듯이 20~23%의 파단변형률은 결함이 없는 6061 합금 반응고 성형품이 가지는 파단변형률 값의 범위에 있다. 즉, A와 D는 미량의 결함의 존재에도 불구하고 합금성분이 나타내야 하는 파단 변형률 값을 구현하였으나 C의 경우는 분명한 조기 파단의 양상으로 해석된다. 이 결과는 결함의 크기 및 분포가 파단 변형률 값에 심각한 영향을 미치기 위해서는 결함크기 및 분포가 어느 정도 이상의 되어야 한다는 것으로 해석할 수 있다. A와 D는 파단 변형률의 미소한 차이 외에도 네킹(necking) 양상의 차이를 보여준다. A는 D에 비해 더욱 분명한 네킹 현상을 보이고 있다. 즉, 결함이 최대 인장강도에

영향을 미치지 않았으며 건전한 성형품의 특성을 보이고 있다고 해석할 수 있다.

#### 4. 결 론

알루미늄 반응고 성형품에 존재하는 미세 결함의 크기와 분포를 CT 기술을 이용하여 측정하고 인장 시험에서 얻은 응력-변형률 곡선에 미치는 영향을 분석하였다. 너클 형태의 반응고 성형품에 존재하는 결함은 약  $270\mu\text{m}$  이하의 미세 결함이었다. 너클 부위에 따라 크기 및 분포에 차이가 존재하였으며 이 차이는 응력-변형률 곡선의 과단 변형률에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 성형품에 존재하는 소량의 미세결함과 인장특성의 관계를 정량적으로 해석하는 것이 가능하며 CT 는 이를 위한 유용한 설비 및 기술이 될 수 있음을 보여주었다.

#### 후 기

이 논문은 2006년도 안동대학교 특성화추진지원사업에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] W. S. Jung, S. Y. Lee, P. W. Shin, 2005, Process Control and Thixoforming of Cu Rotor for High Efficiency Motors, J. Kor. Soc. Technol. Plast., Vol. 14, No. 7, pp. 642~ 648.
- [2] S. Y. Lee, S. I. Oh, 2002, Thixoforming characteristics of thermo-mechanically treated AA6061 alloy for suspension parts of electric vehicles, J. Mater. Process. Technol., Vols. 130-131, pp. 587~593.
- [3] A. M. Gokhale, G. R. Patel, 2005, Analysis of variability in tensile ductility of a semi-solid metal cast A356 Al-alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 392, pp. 184~190.
- [4] S. M. Yoo, I. S. Jo, M. G. Choi, J. G. Choi, 2005, Inspection of Casting Defects and Quality Improvement using Industrial CT Equipment .
- [5] S. Y. Lee, B. H. Choi, 2008, Effects of Thixoforming Defects on the Stress-Strain Curves of Aluminum Structural Parts for Automobile, Solid State Phenomena, Vols. 141-143, pp. 743~748.