

## 표면크랙 예측을 위한 결정립 제어 레오로지 소재 표면의 나노 변형특성에 관한 연구

윤성원\*(부산대 정밀기계공학과), 김현일, 감충길(부산대 기계공학부)

### A Study on the Nano-Deformation Characteristics of Grain-Size Controlled Rheology Material Surfaces for Surface Crack Prediction

S. W. Youn (Prec. Mecha. Eng. Dept. PNU), H. I. Kim, C. G. Kang (School of Mecha. Eng., PNU)

#### ABSTRACT

In this study, the deformation characteristics of grain-size controlled rheology materials' surfaces were investigated as a part of the research on the surface crack prediction in semi-solid formed automobile components. The microstructure of rheology Al-Si alloys consists of primary and eutectic regions. In eutectic regions the crack initiation begins with initial fracture of the eutectic silicon particles and inside other intermetallic phases. Nano-deformation characteristics in the eutectic and primary region of semi-solid aluminum alloys (356 alloy and 319 alloy) were investigated through the nano-indentation/scratch experiments and the AFM observation.

**Key Words** : Nanoindentation (나노압입), Nanoscratch (나노스크래치), Rheology Material (레오로지 소재), Al-Si-Mg alloy (Al-Si-Mg 합금), Al-Si-Cu alloy (Al-Si-Cu 합금), Surface Crack (표면크랙)

#### 1. 서론

결정립 제어 레오로지 성형 공정은 자동차 부품의 고강도 경량화를 목적으로 엔진 브랏켓트, 스테어링 너클, 마스터 실린더, 로우/어퍼 암 등의 제조에 적용되고 있다. 자동차용 레오로지 성형품의 결함은 대부분이 표면에서의 크랙 발생으로 시작된다. 표면에서 시작된 미세 크랙은 제품 내부로 전달되어 최종적으로 파단을 일으킨다. 따라서 결정립 제어 레오로지 소재 표면의 미세 변형기구를 규명하는 것은 성형품의 응용 측면에서 매우 중요하다. 결정립 제어 레오로지 Al-Si 합금 소재는 알루미늄이 주성분인 초정  $\alpha$  상 (primary  $\alpha$  phase)과 경취성 (hard-brittle) 인 Si 이나 석출물들로 구성된 공정상 (eutectic phase)으로 이루어져 있다. 공정상 내에는 기계적 성질과 변형 특성이 다른 물질들이 공존하고 있기 때문에 그 계면에서 결함이 발생하기 쉽다. 벌크 Al 합금 시편을 이용한 인장시험이나 피로시험에서 얻은 결과들에 따르면, 알루미늄 합금의 파

괴는 공정상 내부에 존재하는 경취성의 실리콘 입자에서부터 시작되며, 크고 긴 모양의 실리콘 입자가 많을수록 쉽게 발생한다고 알려져 있다<sup>1,4</sup>. 그러나, 표면크랙을 예측을 하기 위해서는 거시적 파괴거동의 관찰만으로는 부족하며, 표면의 나노/마이크로 스케일 변형 거동에 관한 연구는 아직 초보단계이다. 표면크랙을 예측하는 방법에는 파괴역학의 소성특성과 재료과학의 전위특성에서 출발하는 방법이 있다. 소성특성에 의한 예측은 미시적인 부분에서 취약하여 크랙의 생성에 대한 정확한 예측과는 거리가 있다. 반면에 전위특성에 의한 크랙의 예측은 특정한 조건에서 전위 집중과 같은 전위거동이 발생한다는 가정 하에 크랙을 예측한다. 따라서, 전위의 발생과 전위의 전파방향에 대한 심도 깊은 연구를 위해서는 초정과 공정의 나노스케일 변형거동에 대한 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 결정립 제어 레오로지 소재의 표면 크랙을 예측하기 위한 기초연구로서, 나노인덴터를 이용한 나노스크래치 및 압입실험을 통해 초

정, 공정, 그리고 그 경계 면에서 발생하는 변형거동을 비교 분석 하고자 하였다.

## 2. 소재 및 장치

소재로는 반응용 356 Al 빌렛(SAG, 오스트리아)와 319 Al 빌렛(Pechney, 프랑스)이 사용되었다. 356 반응용 빌렛의 경우 586°C 의 온도조건에서 150 초간 유지시킨 후 가압하여 자동차용 upper arm 부품을 제작한 후 절단하여 시험편을 제작하였으며, 319 반응용 빌렛의 경우에는 578°C의 온도조건에서 180 초간 유지시킨 후 가압하여 임의 형상의 부품을 제작한 후 절단하여 시험편을 제작하였다.

나노 압입/스크래치 실험, 광학/원자력간 현미경 관찰을 위하여 시험편의 표면은 경면으로 연마되었다. 나노 압입실험을 위한 장비로는 Nanoindenter® XP(MTS, USA)가 사용되었으며 압입자로는 다이아몬드 베르코비치 압자가 사용되었다. 시편 표면의 관찰에는 광학현미경(Olympus, Japan)과 AFM 장비인 XE-100(PSIA, Korea)이 사용되었다(contact-mode). 나노 압입실험에는 기본법(basic method)<sup>5</sup> 과 연속강성측정법(continuous stiffness measurement, CSM)<sup>5</sup> 이 사용되었으며, 열적 변위변화속도(thermal drift rate)와 표면접근 민감도(surface approach sensitivity)는 각각 0.05 와 30 %로 설정하였다. 나노스크래치 실험에는 일정하중스크래치(constant load scratch, CLS) 이 사용되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 2.1 레오로지 Al-Si-Mg 합금

Fig. 1은 나노압입실험(CSM, 25회 압입) 후 반응용 356 알루미늄 합금의 조직사진을 나타내고 있다. 구상의 초정상과 그 주위를 둘러싸고 있는 공정상을 관찰할 수 있다.

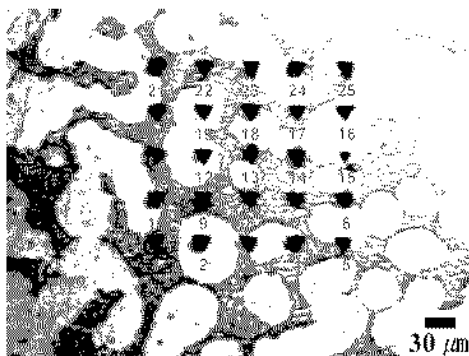


Fig. 1 Optical micrographs of semi-solid Al-Si-Mg alloy after nanoindentation

Fig. 2는 나노압입실험 결과로 얻은 결과들을 나타내고 있다. 팁 반경에 의한 압입크기 효과 외에도 표면에서 약 2000 nm 깊이까지는 표면상태에 따라 기계적 성질의 차가 심함을 관찰할 수 있다. 13, 14, 15 위치(Fig. 1)에서 측정된 기계적 성질 값들은 2000 nm 이하의 압입깊이 범위 내에서 심한 기복을 나타내었는데 Fig. 1의 광학현미경 사진에서도 결함을 관찰할 수 있다. 그러나 일정 압입깊이 이상에서는 일정한 기계적 성질 값의 변화를 나타내고 있다. 경도와 탄성계수 크기는 공정>계면>초정 순으로 나타났다.

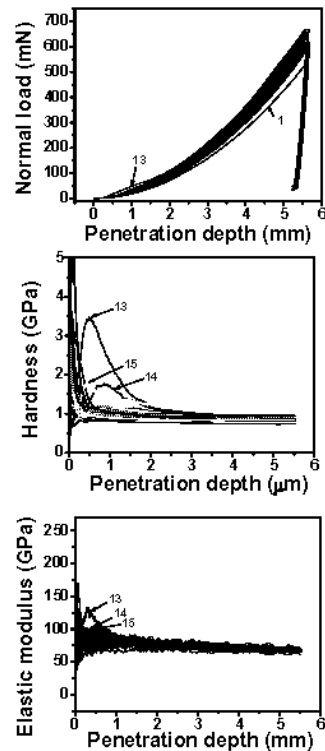


Fig. 2 Mechanical properties of Al-Si-Mg alloy after nanoindentation

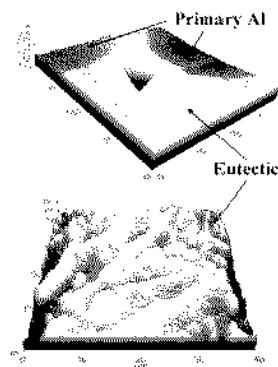


Fig. 3 AFM images of the eutectic and the boundary region between eutectic and primary regions.

Fig. 3의 AFM 사진은 초정과 공정의 계면을 나타내고 있다. 공정 내에 존재하는 석출물 및 Si 입자에 의해 공정의 높이가 초정보다 500-700 nm 높았다. 이는 연마 공정 중 상대적으로 경도가 낮은 초정이 공정보다 연마가 더 잘되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 4의 AFM 사진들은 각각 공정, 초정, 계면을 압입한 후의 표면모습을 나타내고 있다. 공정에 형성된 압흔은 초정에 비하여 크기가 작았으며, 파일-업 높이가 높았다. 이는 공정의 경도가 높음을 나타낸다.

Fig. 5의 AFM 사진들은 일정하중 나노스크래치 후 표면을 나타내고 있다. 초정에 형성된 스크래치는 깊이, 폭, 파일-업 측면에서 매우 균일한데 반하여, 공정의 것은 매우 불균일 하였다.

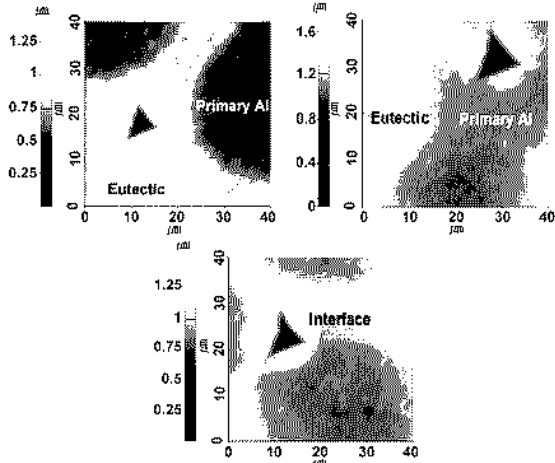


Fig. 4 AFM images of the eutectic and primary Al surfaces after nanoindentation (356 Al alloy).

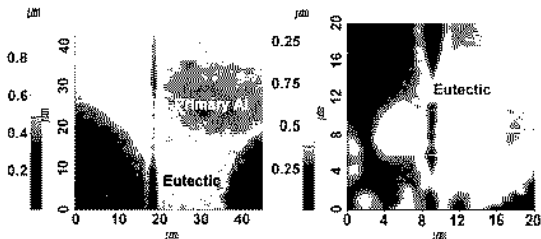


Fig. 5 AFM images of the eutectic and primary Al surfaces after constant load nanoscratch (356 Al alloy).

## 2.2 레오로지 Al-Si-Cu 합금

Fig. 6은 각각 초정, 공정, 계면을 압입(Basic, 80 g) 한 후의 반응용 319 알루미늄 합금의 조직사진을 나타내고 있다. 경도와 탄성계수 크기는 356 합금과 마찬가지로 공정>계면>초정 순으로 나타났으며, Table 1에 결과를 정리하였다.

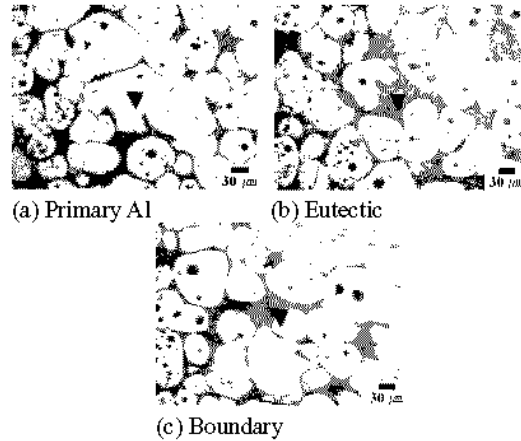


Fig. 6 Optical micrographs of semi-solid Al-Si-Cu alloy after nanoindentation

Table 1 Nanoindentation results of rheology 319 Al alloy

|                       | Primary Al | Eutectic | Boundary |
|-----------------------|------------|----------|----------|
| Elastic modulus (GPa) | 55         | 65       | 61       |
| Hardness (GPa)        | 0.92       | 1.218    | 1.118    |

Table 2 Bulk tensile test results of rheology 319 Al alloy

|         | Ultimate tensile strength (MPa) | Yield Stress (MPa) | Elongation (%) |
|---------|---------------------------------|--------------------|----------------|
| Case I  | 270                             | 163                | 3.6            |
| Case II | 260                             | 181                | 2.2            |

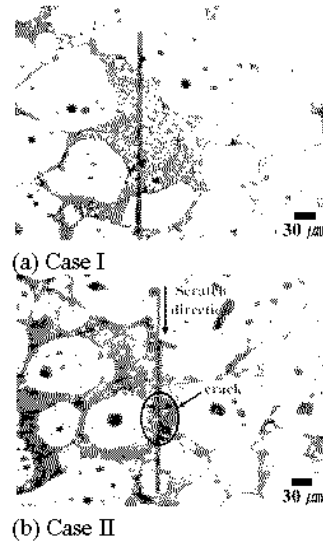


Fig. 7 Optical micrographs of semi-solid Al-Si-Cu alloy after nanoscratch (normal load: 10 mN)

Cerri등<sup>(2)</sup>은 A319 알루미늄 합금을 이용한 인장실험을 통하여, 알루미늄 합금의 파괴는 공정상에서 발생하며 크랙의 시작점은 실리콘 입자라고 보고하였다. 그 원인은 고경도 취성 물질인 실리콘이 주

위의 기지(matrix)인 연성 물질의 소성변형을 견디지 못하기 때문이라고 하였다.

이러한 공정과 초정의 표면변형 특성의 차이를 조사하기 위하여 두 가지 시편에 대해서 나노스크래치 실험을 하였다. 표면크랙을 발생시키는 것이 목적이므로 시험편의 선택기준은 벌크 인장시험 결과(Table 2)로 측정된 연신율로 하였으며, Case II 는 연신율이 낮게 나온 시편이다.

나노스크래치 실험 후 Case I 과 Case II의 미세조직사진을 Fig. 7 (a)와 Fig. 7 (b)에 각각 나타내었다. Case II의 경우 나노스크래치에 의하여 공정부분에 표면크랙이 발생하였음을 관찰할 수 있다.

나노스크래치 실험결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8은 Case I에 대한 결과를 나타내고 있다. 공정영역은 초정에 비하여 경도가 높기 때문에 스크래치 깊이가 낮았으며, 마찰력과 마찰계수도 감소하였다. Fig. 9는 Case II에 대한 결과를 나타내고 있는데, Case I에 비하여 공정부분의 마찰력 및 마찰계수가 높음을 관찰할 수 있었다.

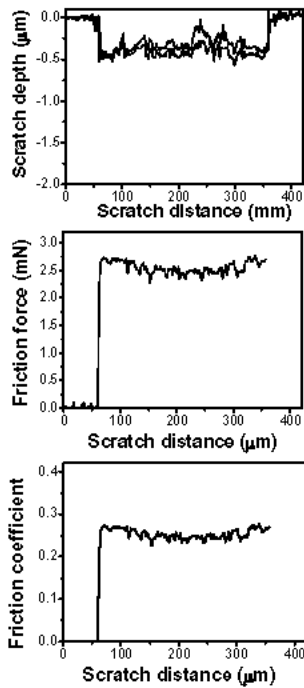


Fig. 8 Tribological characteristics of rheology 319 alloy surface with increasing scratch distance (Case I).

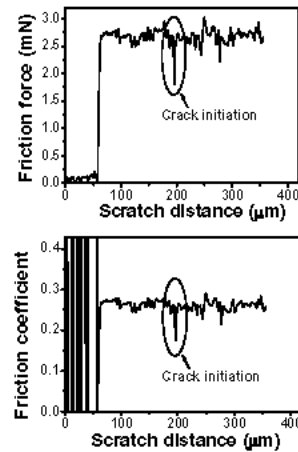
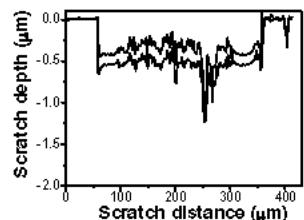


Fig. 9 Tribological characteristics of rheology 319 alloy surface with increasing scratch distance (Case II).

#### 4. 요약

결정립 제어 레로로지 Al 합금 소재 (356, 319 합금)에 대한 나노 압입/스크래치 실험을 통하여 초정, 공정, 계면의 기계적 성질을 측정하였으며 표면모습을 AFM 관찰하였다. 356 과 319 합금의 경우 모두 경도와 탄성계수 크기는 공정>계면>초정 순으로 나타났다. 또한, 319 합금의 나노스크래치 실험을 통하여 스크래치 길이 증가에 따른 압입깊이, 마찰력, 마찰계수 데이터를 조사하였으며 크랙은 공정부분에서 발생함을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업으로 진행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Caceres, C.H., Griffiths, J.R., Acta Mater., Vol.44, No.1, pp. 25~33, 1996.
2. Cerri, E., Nenna, S., Materials Science and Engineering A, Vol.355, pp. 160~166, 2003.
3. Yeh, J.W., Liu, W.P., Metall. Trans., Vol.27A, No.11, pp. 3558~3568, 1996.
4. Mishnaevsky Jr, L.L., Lippmann, N., Schmauder, S., Gumbsch, P., Engineering Fracture Mechanics, Vol.63, pp. 395~411, 1999.
5. Oliver, W.C. and Pharr, G.M., J. Mater. Res., Vol. 7, pp. 1564~1583, 1992.