

나노인덴터와 AFM 을 이용한 T5-A356 합금의 결정립 크기에 따른 기계적 특성 평가

*조상현¹, 이창수¹, 강충길²

¹ 부산대학교 정밀기계공학과, ² 부산대학교 기계공학부

Evaluation of Mechanical Properties of T5-A356 Alloy with Grain Size by using Nanoindenter and AFM

*S. H. Cho¹, C. S. Lee¹, C. G. Kang²

¹ Department of Precision and Mechanical Engineering, Pusan National Univ., ² School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

Key words : Thixo/Rheo-casting, Vickers hardness, Nanoindentation

1. 서론

최근 경량화 금속소재의 레올로지성형기술이 학계 및 산업계의 관심을 불러일으키고 있다^{1,2}.

레올로지성형공정은 고액공존 합금소재의 제작과정에 따라 틱소성형 공정과 레오성형 공정으로 나눌 수 있다.

틱소성형은 전자교반에 의해서 제조한 반응용 빌렛을 재가열 과정을 거쳐 성형하는 방법이다. 이 공정은 반응고 금속을 고상 성분과 액상 성분이 공존하는 온도 영역으로 재가열하여 반응용 상태에서 합금을 압연, 압출 또는 사출 등의 방법을 응용해 성형함으로써 주조공정과 열간 압연 공정의 장점을 동시에 취한 공정으로 각광받고 있다. 레오성형은 반응용된 알루미늄을 전자교반 과정을 통하여 수지상정 조직을 구상화하여 원하는 형태로 성형, 응고시키는 방법이다. 이 공정은 액상율이 50~60% 상태에서 제조함으로써, 복잡한 제품의 성형이 용이하고, 제품의 원가 측면에서 틱소 공정보다 우수하다. 이와 같이 전자교반에 의해 제조된 소재들은 전자교반의 영향으로 수지상정 조직이 미세화 되고 파괴되어 구상화 정도가 향상된다. 또한 전자교반을 함에 있어서 교반전류, 초기용탕, 교반시간의 제어로 구상화 조직의 결정립 크기가 미세화됨을 알 수 있다³. 이렇게 전자교반으로 구상화된 조직과 결정립 크기 미세화를 통해 만들어진 소재는 수지상정조직 및 액상편석등으로 인한 균일하지 못한 기계적 물성치로 고기능성 부품 개발에 많은 어려움을 해결할 수 있으며, 그 기계적 성질이 우수함을 이전의 연구결과로 알 수 있다⁴.

본 연구의 목적은 현재 산업용으로 많이 사용되고 있는 Al-Si 합금계 중 A356 합금의 재가열 및 전자교반에 의해 구상화된 초정의 결정립 크기에 따른 기계적 성질 평가이다. 초정 α 영역만의 압입실험을 통하여 결정립의 크기에 따른 물성을 평가 하였다.

2. 실험과정 및 장비

틱소/레오 캐스팅을 위한 실험 소재로는 A356 합금이 사용되었다. 틱소공정을 위한 과정은 이미 제작된 반응용 빌렛의 재가열 공정을 통하여 액상율 50~60%로 가열시킨 후 성형하여 시험편을 제작하였으며, 레올로지 소재의 재가열 조건은 kang 의 연구 결과를 바탕으로 재가열 조건을 설정하여 이용하였다. 레오공정을 통한 시험편은 완전 용해된 A356 합금을 액상율 50~60% 로 냉각시킨 후 40 압폐어 조건에서 60 초간 전자교반후 성형하여 시험편을 제작 하였다⁵. 제작 후 T5-10h 열처리를 시행 하였다. 본 연구에서 결정립 크기에 따른 두 공정의 특성을 평가하기 위해 결정립 크기 GS(Grain Size)를 세가지로 분류하였다. GS 분류를 위해

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \text{-----(1)}$$

(1)식을 이용하였으며, GS1 은 측정된 결정립 크기의 평균직경(D_{eq})이 70 μm 미만, GS2 는 70 μm 이상 100 μm 미만, GS3 는 100 μm 이상인 입자를 나타낸다. 압입 공정을 통한 결정립 크기별 경도실험을 위해 나노인덴터의 연속강성측정법(CSM)과 비커스 경도 실험(Vickers microhardness)을 동시에 수행한 후 비교하였다. 나노 압입실험을 위한 장비로는 Nanoindenter[®] XP (MTS, USA)를 사용하였으며, 압입자로는 다이아몬드 베르코비치 압자를 사용하였다. 시편 표면의 분석에는 광학현미경과 AFM 장비인 XE-100 을 사용하였다.

3. 비커스 경도 실험

Fig. 1 은 레오/틱소 합금의 미세조직을 나타내고 있다. 두 조직 모두 초정 α 의 형상이 구상화 되어있는 것을 알 수 있다. 하지만, 틱소의 경우 Fig. 2 처럼 성형 과정시 초정 끼리 합쳐지면서 생긴 entrapped eutectic phase 가 관찰 되었다.

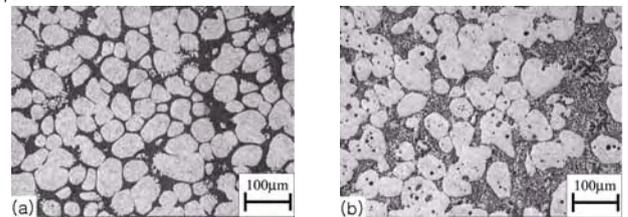


Fig. 1 Microstructure of with casting (a) rheo (b) thixoi

Table 1 Vickers hardness with casting at GS1, GS2, GS3

Position	Mean(kgf/mm ²)				
	Rheo	53.6	59.1	61.9	58.2
GS1	Thixo	75.2	77.1	65.7	72.7
GS2	Rheo	51.3	53.6	52.4	52.4
	Thixo	72.4	65.7	71.5	69.9
GS3	Rheo	46.3	46.8	42.4	45.2
	Thixo	54.2	55.3	58.5	56.0

Table 1 에서 결정립 크기에 따른 비커스 경도값을 나타내었다. 결정립이 커질수록, 즉 GS1 에서 GS3 로 갈 수록 경도값이 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 결정립 크기가 작은 경우 인접한 공정조직의 영향을 받게 되며, 작은 결정립 일수록 소성변형에 대한 전위이동의 방해로 인해 경도값이 높게 나온 것으로 판단된다.

또한, 틱소/레오 성형부품의 경도차이는 틱소 성형부품의 경도값이 레오 성형부품보다 높게 나왔는데, 이러한 이유는 이전의 연구결과에 의하면 T5 시효 처리시 공정조직은 Si, Mg2Si 와 같은 다른 기계적 성질을 가지는 입자들이 공존하게 되며 그러한 입자들의 형상과 크기가 성형 부품에 따라 차이를 나타내었는데 이러한 공정조직의 차이가 압입 실험에 영향을 준 것으로 생각 된다. 이와 같이 결정

립 크기에 따른 공정영역의 영향을 평가함에 있어서 공정 영역의 석출물에 대한 평가는 중요한 것으로 평가되며, 이러한 석출물의 차이는 기계적 성질에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다⁶⁻¹⁰.

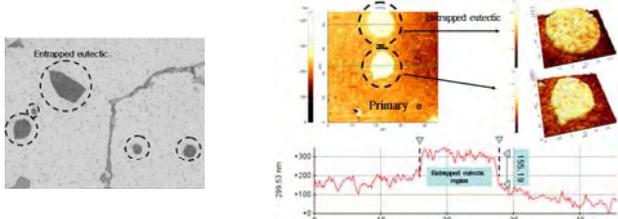


Fig. 2 Microstructure and AFM scan image of entrapped eutectic in thixo-cast

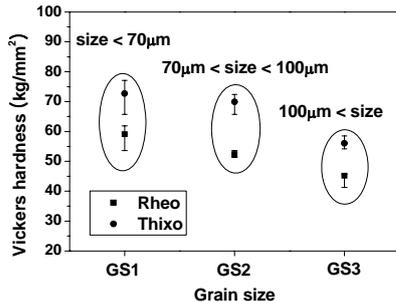


Fig. 3 Vickers hardness with grain size

결정립 크기에 따른 틱소/레오 성형 부품의 비커스 경도 비교 데이터를 Fig. 4 에 나타내었다. 결정립 크기가 커질수록 경도값이 낮아지며, 전체적으로 틱소 성형부품의 경도값들이 레오 성형부품에 비해 10~20 (kg/mm²) 정도 높게 평가 되었다.

4. 나노인덴테이션 실험

Table 2 는 나노인덴테이션을 통한 결정립 크기(GS1,2,3) 및 성형 부품에 따른 경도값들을 비교해 놓았다.

Table 2 Nanoindenter-hardness with casting at GS1, GS2, GS3

Position	Mean(GPa)				
GS1	Rheo	1.28	1.23	1.18	1.23
	Thixo	1.43	1.40	1.31	1.38
GS2	Rheo	1.01	1.14	1.15	1.10
	Thixo	1.22	1.21	1.18	1.20
GS3	Rheo	0.83	0.83	0.80	0.82
	Thixo	1.16	1.08	1.11	1.12

경도값은 압입크기효과¹¹를 배제한 500-1500nm 구간의 평균값을 취하였다. 결정립 크기가 GS1 에서 GS3 로 갈수록 경도값이 낮아 졌으며, 성형 부품에 따른 경도값은 틱소 성형 부품이 레오 성형 부품보다 높게 나타났다. 전체적으로 비커스 경도실험과 비슷한 경향을 나타내었다.

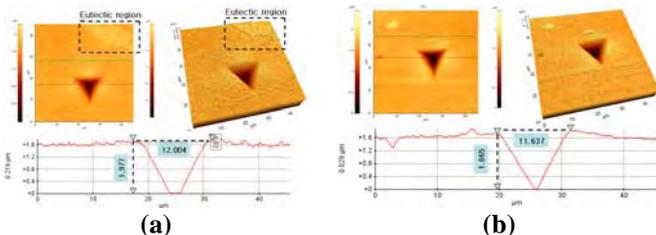


Fig. 4 AFM scan image of indented surface with casting process at GS1 (a)rheo (b)thixo-cast

Fig. 4(a), (b)는 GS1 일 때의 나노인덴터의 2µm-CSM 모드 이용하여 틱소/레오 성형부품에 압입된 압흔의 AFM 사진을 나타내고 있다. 깊이 제어 모드를 이용하였기

때문에 압입 깊이 및 폭은 거의 동일 하였으며, 파일-업은 관찰되지 않았다. GS2, GS3 에서도 GS1 과 마찬가지로 거의 동일한 압입 깊이 및 폭이 관찰 되었다.

Fig. 5 은 결정립 크기에 따른 나노인덴터 경도값을 비교해서 나타내었다.

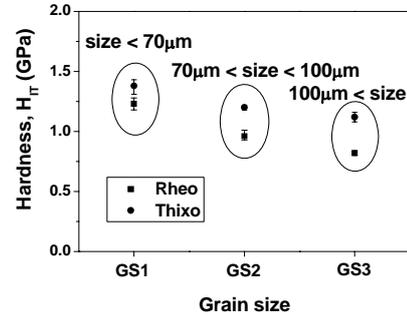


Fig. 5 Nanoindenter hardness with grain size

5. 결론

A356 합금의 결정립 크기에 따른 기계적 특성에 대해서 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비커스 실험의 경우, 동일 하중에서 결정립 크기가 커질수록 비커스 경도값이 낮게 측정 되었으며, 이것은 압입시 결정립 아래쪽에 존재하는 공정 영역의 영향 및 전위 이동의 방해로 인해 경도값이 높게 나온것으로 보여진다.

(2) 나노인덴테이션 실험의 경우, 비커스 실험과 마찬가지로 결정립 크기가 커질수록 경도값이 낮게 측정 되었으며, 성형부품에 따른 경도값은 전체적으로 틱소성형부품에 대한 경도값이 높게 나왔다.

(3)위의 결과로부터 알 수 있는 것은 미세하고 구형의 초정 α 가 기계적 성질이 좋으며, 이러한 결정립 크기 제어를 통한 기계적 특성을 개선 시킬 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업으로 진행된 결과입니다.

참고문헌

1. T. Basner, SAE paper 2000010059, SAE International, Warrendale, 1-5, 2000
2. C. G. Kang, Trans. of material processing, **11**, 123-131.
3. G. Chirmetta and L. Zanardi, Proc. of A^{4th} Int. Conf. on semi-solid processing of alloys and composites, 235-244, 1996
4. Z. Yang, P. K. Seo and C. G. Kang, J. Mater. Sci. Technol., 219-225, 2005
5. C. G. Kang, Y. J. Jung and S. W. Youn, J. Mater. Sci. Technol., **135**, 158-171
6. S. W. Youn, S. H. Cho and C. G. Kang, 8th Int. Conf. on Technology of Plasticity (ICTP)
7. S. H. Cho, S. W. Youn and C. G. Kang, Int. Sym. Nanoengineering, 350-355, 2005
8. R. X. Li, R. D. Li, Y. H. Zhao, L. Z. He, C. X. Li, H. R. Guan and Z. G. Hu, Materials letters. **51**, 2096-2101, 2004
9. A. K. Dahle, K. Nogita, S. D. McDonald, C. Dinnis and L. Lu, Materials Science and Engineering A, **413-414**, 243-248, 2005
10. P. L. Schaffer, L. Arnberg and A. K. Dahle, Scripta Materialia, **54**, 677-682, 2006
11. Anthony C. Fischer-Cripps, Nanoindentation, 2002