

# 나노/마이크로 프로브 기술을 통한 T6-Al 6061 합금의 석출경화 특성평가

## Evaluation of Precipitation Hardening Characteristic of T6-Al 6061 alloy by Using Nano/Micro-Probe Technology

\*이은경<sup>1</sup>, 조상현<sup>2</sup>, 강충길<sup>3</sup>

\*E. K. Lee<sup>1</sup>, S. H. Cho<sup>2</sup>, C. G. Kang(cgkang@pusan.ac.kr)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 하이브리드소재솔루션 협동과정, <sup>2</sup> 부산대학교 정밀기계공학과, <sup>3</sup> 부산대학교 기계공학부

Key words : Al 6061 alloy, T6 Heat Treatment, Nanoindentation, Vickers hardness test, Precipitation Hardness

### 1. 서론

최근 친환경적이면서 고품질 경량화 부품을 제작 할 수 있는 금속 소재의 레오로지 성형기술이 학계 및 산업계의 관심을 불러 일으키고 있다[1][2].

레오로지 성형기술은 합금소재를 고체와 액체가 동시에 공존하는 상태로 만든 후 3 차원 복잡 형상 부품을 성형하는 기술이다. 또한 반응고 성형은 순수액상에서 성형하는 방법보다 응고시간이 짧아서 일반 다이캐스팅이나 저압주조 공정에 비하여 내부결함, 기공, 응고수축 결함이 적고 인성과 내구성이 좋은 부품을 제작할 수 있으며, 금형 수명을 향상시킬 수 있다. 기존의 단조공정은 많은 하중이 필요한 반면, 반응용 단조의 경우 비교적 적은 하중을 통해서 복잡한 형상의 부품을 성형 할 수 있으며, 기존의 주조용 합금의 강도의 한계를 극복하기 위하여 구조용 합금에 의한 반응용 단조에 관한 연구가 진행되고 있다.

대표적인 석출경화 합금인 Al 6061 구조용 합금의 경우, 적절한 열처리를 통한 석출경화를 통해 금속의 강도와 경도를 증가시킬 수 있다. 이와 같은 구조용 합금의 경우 과시효에 의한 기계적 특성 저하를 막기 위해 적절한 열처리 조건을 찾는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 단조공정을 통하여 성형된 구조용 합금의 T6 열처리에 따른 시효 경화 특성을 평가하고, 미세조직 관찰 및 시효시간에 따른 기계적 성질을 평가하고자 한다.

### 2. 시험방법 및 소재

본 연구를 위해 사용된 구조용 합금인 Al6061 의 화학적 구성비와 고액 공존영역의 열적 특성을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition (wt %) of Al 6061 alloy

	Mg	Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Ti	Al	T <sub>L</sub>	T <sub>S</sub>
6061	0.98	0.62	0.30	0.15	0.03	0.03	0.01	Bal.	652°C	502°C

Al6061 의 레오로지 단조 성형 조건은 Table 2 에 나타나 있다.

Table 2 Experimental conditions for Al 6061 alloy by rheo-forging

Pouring Temperature, °C	Solidification, %	Stirring Current, A	Forging Pressure, MPa(ton)	Holding Time, sec
645°C	55%	60	150(100)	20

최대하중 200ton, 최대속도가 200mm/sec 인 복동식 유압 프레스를 이용하여, 용해 및 전자교반 과정을 통해 프레스를 이용하여 샘플을 제작하였다. 각 시편은 1cm X 1cm 로 절단하여 T6 열처리 하였다. 상업적으로 이루어지고 있는 조건 (condition 1)으로, 530°C의 온도에서 1.5 시간 용체화 처리 후, 177°C에서 시효시간(0, 4, 10, 12, 14, 16, 20, 24, 36 and 48h)을 달리하여 인공 시효 시켰으며, 다른 조건 (condition 2)으로는 530°C에서 1.5 시간 용체화 처리 후 190°C에서 첫 번째 조건과 동일한 시효 시간으로 인공시효 하였다. 석출

경화에 의한 기계적 성질 평가를 위해 Nanoindenter®XP 의 연속강성측정법(CSM)을 이용하여 임의 영역 9 번의 나노 압입 실험을 시행하였으며, 비커스 경도시험기를 사용하여 시효시간에 따른 각 소재를 임의의 영역 25 번의 압입 실험을 동시에 수행한 후 비교하였다. 나노 압입 실험에 사용된 압입자로는 다이아몬드 베르코비치 압자를 사용하였다. 시편 표면 분석에는 광학현미경과 AFM 장비인 XE-100 을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열처리에 따른 미세조직 관찰

Fig. 1 은 Al 6061 합금의 시효시간에 따른 초정- $\alpha$  영역을 AFM 을 이용하여 측정된 표면 형상을 나타내고 있다. Fig. 1 (a) 는 530°C에서 1.5 시간 동안 용체화 처리된 소재의 초정- $\alpha$  영역의 표면이며, 아주 깨끗한 것을 알 수 있다. (b)는 177°C에서 10 시간 시효처리 된 소재의 표면 사진이며, 시효 처리에 따른 과포화된  $\alpha$ -고용체 내에서 석출되는 미세한 Mg, Si 의 성분에 의해 거친 표면 형상을 나타내고 있으며, 과시효된 (c)의 경우 소재의 표면은 석출된 미세한 Mg, Si 성분들이 뭉쳐져 있는 것을 알 수 있다.

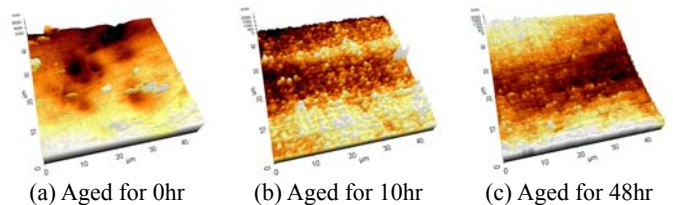


Fig. 1 AFM scan image comparison of primary  $\alpha$  region in Al 6061 alloy according to aging time (a) 0hr, (b) 10hr, (c) 48hr

Fig. 2 는 시효 시간에 따른 공정영역의 변화를 나타내고 있다. Al 6061 합금의 공정영역에 존재하는 금속간 화합물, 즉 석출물은 대부분 Al, Si, Mg 로 침상 모양의 결합된 상태로 존재한다. Fig 2 (a) 는 용체화 처리만 된 소재의 공정영역으로 100 ~ 180 nm 정도의 높이를 가진 침상모양의 석출물들이 존재한다. Fig 2 (b) 는 177°C 10 시간 시효처리 된 소재의 공정영역의 석출물로 300 nm 정도의 높이를 가지고 있다. Fig 2 (c) 는 48 시간 시효처리 된 소재의 공정영역의 석출물으로써 석출물 사이의 간격이 넓어지고 뭉쳐진 형상을 나타내고 있다.

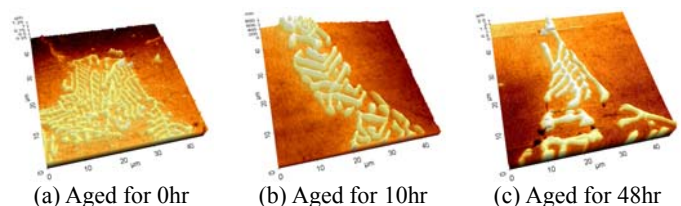


Fig. 2 AFM scan image comparison of eutectic region in Al 6061 alloy according to aging time (1) 0hr, (b) 10hr, (c) 48hr

Al 6061 합금의 경우 T6 시효처리에 따라 중간상에서 가장 좋은 물성을 나타내게 되며, 중간상은 Mg, Si 의 성분으

로 구성되어 있으며, 선진 연구에 따르면 질량비가 1:1에 가깝다고 평가하였다. 따라서 본 연구의 정확하고 관찰을 위해서는 TEM과 DSC 분석이 필요한 것으로 판단된다.

3.2 나노/비커스 압입 실험 결과

Fig. 3은 두가지 조건에 의해 제작된 소재를 2µm-CSM법을 통해 임의의 영역 9번의 나노 압입시험에 의해 구해진 경도 값의 최대, 최소 값을 제외한 평균값을 구하여 시효 시간에 따른 경도 변화를 비교해 나타내고 있다.

팁이 완전히 뾰족한 이상적인 팁이 아니므로 팁 끝과 표면의 탄성접촉 현상에 의한 압입크기효과 (Indentation size effect, ISE)<sup>[3]</sup>가 발생하여 경도 값이 높게 나타나므로 이를 배제한 500nm~1500nm 영역의 평균값을 취하였다. 첫 번째 조건은 시효 시간 10시간에서 최대 경도 값(1.44GPa)이 나왔으며, 두 번째 조건은 시효 시간 4시간에서 최대 경도 값(1.39GPa)이 나왔다.

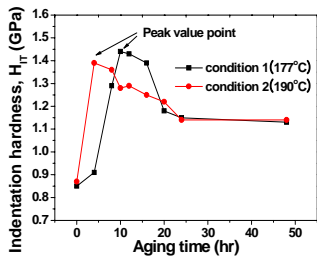


Fig. 3 Comparison of average indentation hardness (H<sub>IT</sub>) of Al 6061 versus aging time according to condition 1, 2

Fig. 4는 시효 온도를 177°C, 190°C로 하여 얻어진 소재를 비커스 경도기를 이용하여 소재의 임의의 영역 25번 압입하여 구해진 값들의 평균값을 비교하여 나타낸 시효 경화 곡선이다.

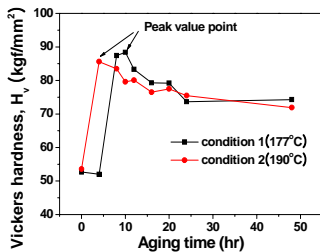
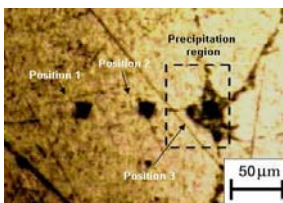


Fig. 4 Comparison of average Vickers hardness (H<sub>V</sub>) of Al 6061 versus aging time according to condition 1, 2

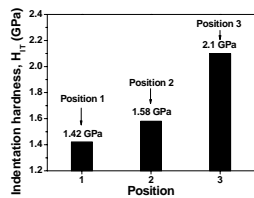
전체적으로 나노 압입 시효 경화 곡선과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

첫 번째 조건에서 10시간 시효 처리된 소재의 경도 값이 가장 높게 나왔다. 이는 공정영역의 영향을 받은 것으로 판단되며, 공정영역의 영향을 평가하기 위해 공정영역의 근접거리에 따른 나노 압입 실험을 수행하여 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

Fig. 5(a)는 공정영역 근접 거리에 따른 각 위치별 마이크로 조직을 나타내고 있다. position 1, 2, 3에 따른 각각의 경도 값은 1.42GPa, 1.58GPa, 2.1GPa로 나타났으며, Fig. 5(c)의 position 3의 압입 형상 AFM 사진을 보면 석출물에 의해 압입 형상이 불규칙한 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

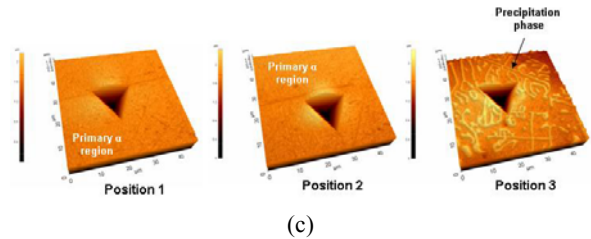


Fig. 5 Indented surface microstructure and load-displacement curve and hardness according to position of Al 6061 alloy aged for 10hr (a) Microstructure, (b) indentation hardness, (c) AFM scan image

이와 같은 결과로 볼 때 공정영역에 근접할수록 공정영역에 영향을 받아 소성변형에 필요한 전위 이동을 방해함으로써 압입을 위한 경도 값이 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

Al 6061 구조용 합금을 이용한 레오로지 단조 공정을 통해 성형된 소재의 T6에 따른 시효경화 특성에 대하여 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Al 6061 합금의 초정-α 영역은 시효 처리에 따라 과포화된 초정-α 내의 석출상 (Mg, Si)에 의하여 시효 시간이 증가함에 따라 표면이 점점 거칠어 지는 것을 관찰 할 수 있었으며, 10시간 시효처리 된 표면이 가장 거칠게 나타났으며, 경도 값이 가장 높은 10시간 시효처리 된 재료에서 중간상이 형성된 것으로 판단되며, 과시효 뒤에 따라 석출상들이 묻쳐지는 현상을 관찰 할 수 있었다.
- (2) 첫 번째 조건(용체화 온도 530°C, 시효 온도 177°C)에서 나노/비커스 압입 실험을 통하여 얻어진 시효 경화 곡선은 시효 시간 10시간에서 최고 경도 값을 나타내었으며, 두 번째 조건(용체화 온도 530°C, 시효 온도 190°C)에서는 시효시간 4시간에서 최고 경도 값을 나타내었다.
- (3) 소재의 경도에 대한 공정영역 영향을 평가하기 위한 나노 압입실험에서 공정영역에 근접해 질수록 경도 값이 증가하였다. 이는 공정영역에 근접할수록 공정영역의 영향을 받아 소성변형에 필요한 전위의 이동을 방해함으로써 압입을 위한 경도 값이 증가 함을 알 수 있다.

위의 결과에 따라 두 조건의 최대 경도 값을 비교해 보았을 때 첫 번째 조건(용체화 온도 530°C, 시효 온도 177°C)을 통한 값이 가장 크게 나왔으며, 이에 따른 Al 6061 합금의 T6 열처리가 적당한 것으로 판단된다

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구소(NRL) 사업으로 진행된 결과입니다.

참고문헌

1. S. Ji, Z. Fan, and M. J. Bevis, "Semi-Solid Processing of Engineering Alloys by a Twin-Screw Rheomoulding Process," Mater. Sci. Eng. A, Vol. 299, pp. 210~217, 2001
2. M.Adchi, S. Sato, H. Sasaki, Y. Harasa, T. Maeda, and N. Ishibash, "The Effect of Casting Condition for Mechanical Properties of Cast Alloys made with New Rheocasting Process," Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 629~634, 2002
3. Anthony C. Fischer-Cripps, "Nanoindentation," Mecha Eng. Series, Nerlin, Germany, Springer-Verlag, 2002