

음향현미경을 이용한 알루미늄 5052 합금의 소성변형 특성평가

Characterization of plastic deformation of aluminum 5052 alloy by acoustic microscope

*.#김정석¹, 박익근²

*.# C. S. Kim (chs2865@hanyang.ac.kr)¹, I. K. Park²

¹ 한양대학교 자동차공학과, ² 서울산업대학교 기계공학과

Key words : Elastic modulus, Al 5052, Acoustic microscopy, Acoustic material signature

1. 서론

탄성특성으로는 영률, 전단탄성계수, 프와송비, 벌크탄성계수, 램상수 등으로 이들은 기계적 물성을 특성짓는 가장 근본적인 요소라 할 수 있다. 따라서 이들을 정확하게 측정하는 분석기술이 마이크로화 나노화 되어 가는 첨단과학기술분야에서 대단히 중요시 되고 있다. 이들 탄성특성 중에서도 가장 기본이 되는 영률은 지금까지 많은 방법에 의해 측정되어져 왔다. 가장 잘 알려진 방법은 인장시험법이라 할 수 있다. 하지만 이는 소재들이 마이크로/나노화 되면서 측정의 표준화 및 장비개발이 또 다른 문제가 되고 있다.

그러므로 현재는 나노압입시험법이 미소크기의 벌크 및 박막소재에 대해서 널리 사용이 되고 있다. 나노압입시험은 일정 기하학적 형상을 갖는 압입자를 대상시료의 표면에 하중을 인가하고 제거하는 과정에서 하중과 압입깊이를 동시에 기록하여 얻게 되는 하중-변위곡선을 해석하므로써 대상재료의 기계적 물성을 측정하는 기법이다. 음향법을 이용한 탄성계수 측정법으로 공진주파수를 이용하는 초음파 공진법, 공진초음파분광법이 있다[4-6]. 그리고 고전적이 방법으로 초음파 종파 및 횡파 속도를 이용한 동적탄성계수 측정법이 있지만 이들 역시 시편을 준비하는 문제로 제품수준의 측정에 한계가 있다. 하지만 음향재료신호(acoustic material signature, AMS)를 이용한 표면파의 음속측정으로 재료의 탄성계수를 정밀하게 측정하는 것이 가능하다[1-5]. 하지만 다결정체의 경우 인장방향에 대한 탄성계수만을 측정할 뿐 결정의 방위에 따른 탄성계수를 측정하는 것은 인장시험과 나노압입시험 모두 불가능하다. 본 연구에서는 우수한 내식성, 성형가공성, 용접성 등으로 자동차 및 선박, 건축자재로 각광 받는 소재인 알루미늄 5052 합금에 강소성변형을 도입하여 소성변형을 받은 전 후 인장시험과 나노압입시험 그리고 음향현미경을 이용하여 탄성계수를 측정하고 ECAP 강소성 변형이 탄성계수 변화에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 개개의 결정립에서 측정된 탄성계수와 결정방위 관계에 대해 고찰하고자 하였다.

2. 시험장치 및 방법

ECAP 으로 얻어진 소재의 경우 결정립 크기가 마이크로미터 이하로 매우 미세하므로 초소성과 같은 부가적인 성질을 얻을 수 있으므로 매우 효과적인 가공기술이다. 본 연구에 사용된 재료는 알루미늄 5052 상용 압출재를 500℃에서 1 시간 동안 균일한 고용체를 만들기 위해서 용체화 처리 후 공냉 하였다. ECAP 은 $\Phi = 90^\circ$, $\Psi = 40^\circ$ 다이로 150℃에서 3 mm/s 로 가공하였다. ECAP 가공 후 170℃에서 2 시간 동안 어닐링처리를 실시하였다. 원자현미경에 장착되어진 캔틸레버의 다이아몬드 압입자가 대상 소재의 표면을 일정하중으로 압입하는 동안 압입 깊이에 대한 시간 그리고 응력에 대한 시간을 동시에 기록하게 되고 데이터가 저장된 후 하중-깊이 곡선 그리고 팁 접촉 면적-

접촉 깊이로부터 나노표면 영역에서의 탄성계수를 구하게 된다. 음향현미경은 사파이어 지연로드와 결합된 종파탐촉자인 음향렌즈를 사용한다.

다음의 Fig. 1 은 본 연구에 사용한 음향현미경의 개략도를 나타낸 것이다. 음향렌즈는 구형의 표면을 가지므로 음향렌즈 초점을 갖게 한다. 렌즈는 접촉매질 즉, 증류수를 통해서 시편의 표면에 초음파가 전달되게 된다. 만일 음향렌즈의 조리개각이 표면에서 표면파의 발생을 만족하는 임계각을 포함한다면 탐촉자에 수신된 신호는 시편의 표면에서 직접 반사한 신호와 시편의 표면에서 발생되어진 표면파에 의한 두 신호간의 상호간섭의 결과로 수신된다.

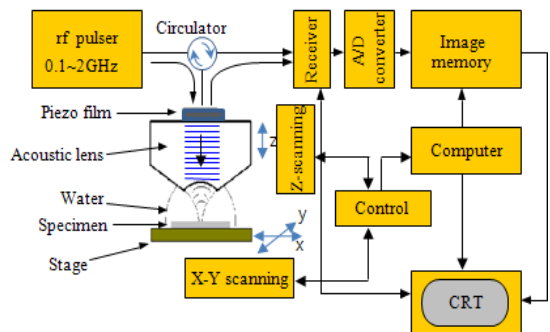


Fig. 1 Block diagram of AM for the measurement of surface wave.

3. 실험결과

Fig. 2 는 ECAP 가공된 알루미늄 5052 합금의 이미지와 투과전자현미경사진이다. EBSD 로 관찰한 Al 5052 합금은 용체화처리 직후로 ECAP 가공을 하지 않은 상태의 미세조직 사진이다. Fig. 2(a)에서 EBSD 로 관찰한 바와 같이 용체화처리 후 우선결정방위는 발달되지 않았다. 그림에 화살표로 표시한 바와 같이 진한 붉은색으로 표시된 부분은 (001)면이고 진한 파란색으로 표시된 부분은 (111)면으로 분석되었다. ECAP 가공 한 후 미세조직을 TEM 으로 관찰한 결과 1 pass 는 가공방향으로 길게 연신된 전위 band 구조를 4 pass 후에는 Fig. 2(c)와 같이 0.2~0.6 μm 의 등축형의 미세 하부 결정립이 형성되었으며 전위밀도의 차이는 크게 보이지 않았다.

Table 1 은 알루미늄 5052 인장시험과 나노압입시험의 측정결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 분순물의 정도에 차이는 있지만 순수 알루미늄 단결정의 탄성계수는 71 GPa, 상용 알루미늄 5052 합금은 약 70 GPa 정도이다. 본 연구에서 인장시험을 통하여 측정된 탄성계수는 벌크 알루미늄 5052 합금에서 각각 61~64 GPa 을 나타내어 알려진 탄성계수보다 낮은 값을 나타냈었다. 또한 인장결과를 통해 얻은 탄성계수는 ECAP 이나 열처리에 의한 효과를 구분할 수가 없으며 그 측정오차 범위 내에서 변하므로 소성변형이나 열처리에 의한 영향을 인장시험으로는 평가하는 것이 불가능하였다.

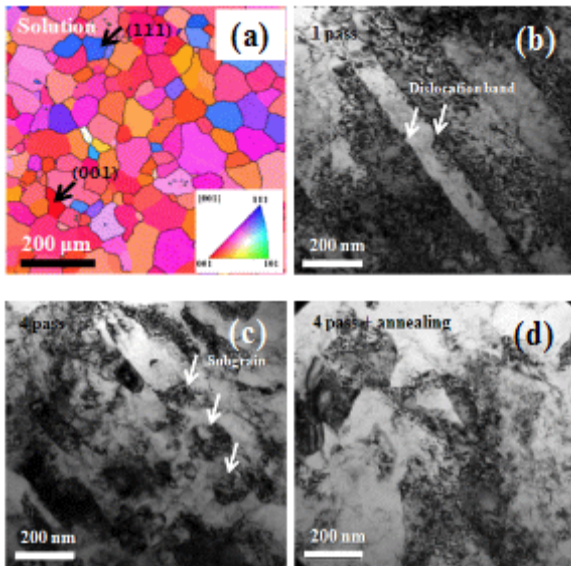


Fig. 2 Microstructure of the solution treated and ECAPed aluminum 5052 alloy.

Table 1 Mechanical properties of Al 5052 alloy measured by nanoindentation and tensile test

	E_I	E_T	H_v	UTS	YS	e
	(GPa)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
solution	71±7	61±7	70	226	93	34
1 pass	82±4	63±3.5	104	285	233	11
4 pass	79±8	62±4	115	345	307	12
4pass+ann.	74±4.5	64±6	105	325	291	14

Fig. 3(a)와 3(b)는 음향렌즈의 비촉점거리 $z=0$ 과 $z=-25$ 일때 각각 관찰한 결과이다. 비촉점거리 $z=0$ 일 경우 시편의 표면에서 직접 반사되는 신호만이 존재하고 표면파가 발생되지 않으므로 어떠한 컨트라스트차이도 구분되지 않는다. 이와 달리 비촉점거리 $z=-25$ 일 경우 음향렌즈의 일정부분에서 표면파 발생의 임계각을 만족하게 되고 시편의 표면에는 표면파가 발생하게 된다. 따라서 결정의 불연속부인 결정립계는 결정립 내부와 컨트라스트 차이를 갖게 되고 Fig. 3(b)와 같이 결정립 구조를 명확하게 관찰할 수 있다.

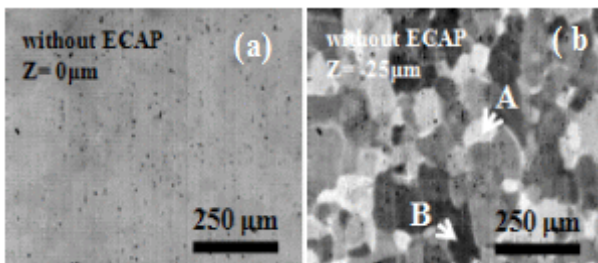


Fig. 3 AM images and $V(z)$ curves of as-solution heat treated Al 5052 alloy.

Table 2 는 음향재료신호를 이용하여 Fig. 3(b)에 표시한 바와 같이 음향이미지 상에서 밝은 곳 (A)과 어두운 곳 (B)에 대해서 10 개의 지점에 대해 측정하고 이에 대한 평균 표면파의 속도로부터 계산한 동적탄성계수를 나타내었다. 상용 알루미늄 5052 의 프와송비는 0.33 으로 밀도는 2700 kg/m^3 으로 가정하였다. A와 B에서는 표면파의 속도가 명확하게 차이가 남을 알 수 있다. 용체화 처리 후 명확하게 결정립이 구분되는

시편에서 밝은 A부분에서 표면파의 속도는 2991 m/s 이고 어두운 B부분에서는 2807 m/s 로 측정되었다. 동일 지점에 대한 속도 측정에 대한 오차는 $\pm 1 \text{ m/s}$ 였으며 속도로부터 계산한 탄성계수는 73.9 GPa 이고 측정오차는 $\pm 0.05 \text{ GPa}$ 로 매우 정밀한 측정결과를 나타내었다. A와 B부분만을 비교해 보면 강소성 변형에 따라서 미소하지만 탄성계수는 감소하였다. 결정립에 관계없이 모든 결정립들에서 Al 5052 합금의 전체평균 탄성계수는 $69.5\sim 70.3 \text{ GPa}$ 로 측정되었다. Fig. 4(b)에서 표시한 밝은 부분 A와 어두운 부분 B는 표면파의 속도로부터 측정된 탄성계수와 이론적으로 계산한 결정방위에 따른 탄성계수 그리고 Fig. 2(a)의 EBSD결과로 보아 (111)면과 (001)면이라고 판단된다.

Table 2 Surface wave velocity and elastic modulus measured by acoustic material signature

	A (bright)		B (dark)	
	V_R (m/s)	E_{SAM} (GPa)	V_R (m/s)	E_{SAM} (GPa)
solution	2991	73.9	2807	65.1
1 pass	2986	73.7	2803	64.9
4 pass	2916	70.3	2913	70.1
4 pass+ann.	2917	70.4	2916	70.3

4. 결론

알루미늄 5052 합금의 탄성특성의 변화에 대한 강소성 변형과 어닐링효과를 연구하고 개개의 결정립에서 탄성계수를 정밀하게 측정하고자 하였다. ECAP 가공으로 $1 \mu\text{m}$ 이하의 초미립 결정립을 얻을 수 있었다. 이로 인해 경도 및 인장강도 등 기계적 성질의 향상을 얻을 수 있었다. 강소성 변형 및 열처리와 재료의 탄성특성 간에는 밀접한 상관성을 보였다. 미소영역의 정밀측정이 가능한 음향재료신호를 이용하여 개개의 결정면에 대한 탄성계수의 측정이 가능하였다.

후기

이 논문은 2008 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2008-03516).

참고문헌

- Luo, J. K., Flewitt, A. J., Spearing, S. M., Fleck, N. A., and Milne, W. I., "Young's modulus of electroplated Ni thin film for MEMS applications," Materials Letters, **58**, 2306-2309, 2004.
- Jen, S. U., and Wu, T. C., "Young's modulus and hardness of Pd thin films," Thin Solid Films, **492**, 166-172, 2005.
- Jeon, E. C., Kwon, D. I., Choi, Y., and Jang, J. I., "Nondestructive Advanced Indentation Technique:The Application Study from Industrial Structure to Nanomaterial," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, **22**, 333-346, 2002.
- Li, Z. S., Fang, Q. F., Veprek, S., and Li, S. Z., "Evaluation of the internal friction and elastic modulus of the superhard films," Materials Science and Engineering: A, **370**, 186-190, 2004.
- Kim, S. H., "Determination of mechanical properties of electroplated Ni thin film using the resonance method," Materials Letters, **61**, 3589-3592, 2007.