

## ECAP 가공한 알루미늄합금의 결정립 미세화에 대한 비파괴평가

### Nondestructive Evaluation for Grain Refinement of Aluminum Alloy of Equal-Channel Angular Pressing

안석환\*<sup>†</sup>, 남기우\*\*<sup>†</sup>, 김진환\*\*\*, 강석봉\*\*\*\*

Seok-Hwan Ahn\*<sup>†</sup>, Ki-Woo Nam\*\*<sup>†</sup>, Jin-Hwan Kim\*\*\* and Suk-Bong Kang\*\*\*\*

**초 록** 최근 구속전단가공(Equal-Channel Angular Pressing)이라는 가공법을 이용하여 결정립을 미세화시키는 유효한 수단이 널리 이용되어지고 있다. 이러한 구속전단가공법을 이용해서 알루미늄합금의 결정립을 submicrometer 수준으로 미세화가 가능하게 되었다. 본 연구에서는 인장시험, 경도시험, 미세조직 관찰, 초음파탐상 및 음향방출 시험을 통해 알루미늄합금의 결정립 미세화 정도를 평가하였다. ECAP 가공 후 결정립 미세화에 의하여 강도 및 경도가 확실히 증가하였다. 초음파 탐상으로부터 초음파 음속은 ECAP가공 후의 음속이 빠르게 나타났으며, 시간-주파수 분석에서는 ECAP 가공 전의 시험편이 고주파수의 감쇠가 컸다. 그리고 ECAP가공 후의 시험편에서 음향방출의 높은 중심주파수 대역이 나타났다. 본 논문은 비파괴적인 기법을 사용하여 결정립 미세화를 판단하는데 기초적인 자료로서의 활용이 기대된다.

**주요어 :** 구속전단가공, 초음파 탐상, 음향방출, 시간-주파수 분석

**Abstract** The grain size of aluminum alloy was refined to the submicrometer level by using equal-channel angular pressing(ECAP). The effect of grain size refinement was evaluated by the tensile test, micro-hardness test, microstructure observations, ultrasonic test and acoustic emission test. The strength and the Vickers hardness were increased significantly according to grain size refinement after equal-channel angular pressed. The ultrasonic velocity was faster after equal-channel angular pressed, and the high frequency range appeared. The results of the ultrasonic velocity and the frequency range are expected to be basic data that can prove the grain size refinement.

**Keywords:** equal-channel angular pressing, ultrasonic test, acoustic emission, time-frequency analysis

## 1. 서 론

결정립 미세화는 금속재료의 강도, 인성 등 기계적 특성을 향상시키는데 매우 유효한 방법 중 하나이다. 최근에 ECAP(equal-channel angular pressing)법이라는 아주 간단한 가공방법이 Segal등에 의해 새롭게 개발되어 극도로 미세한 결정립 크기를 갖는 소재를 얻을 수 있는 가능성

이 제시되었다[1,2]. ECAP법은 동일한 단면적을 갖는 두 개의 교차지점에서 채널 안쪽 각( $\phi$ )과 바깥쪽 곡률각( $\psi$ )을 이용해 소재에 매우 심한 전단변형을 가하는 간단한 가공방법이다. ECAP법은 계속적인 반복변형으로 가공량이 증가하더라도 소재의 단면적 감소를 수반하지 않으므로 재료 내에 높은 변형 에너지를 축적시킬 수 있어 결정립 미세화의 구동력을 제공한다. ECAP법으로 얻어진 소재

의 경우 결정립의 크기가 submicron 수준이나 nanometer 수준으로 매우 미세하므로 초소성과 같은 추가적인 성질을 얻을 수 있어 ECAP가공법의 적용은 Al, Cu, Mg 합금 및 철강재료나 금속간 화합물에 이르기까지 많은 소재에 대해 그 연구가 활발히 진행 중이다[3-7].

최근 생산공정의 자동화 및 품질관리의 엄격화가 요구되어지고 있는 실정이며, 이러한 요구에 부응하기 위해 재료의 생산과정에서 미세조직의 변화에 대한 관리가 선행되어야 하는 사항이다. 재료의 미세조직평가는 주로 최종제품이 완성된 후 대표적인 시험편에 대해 파괴적으로 수행되어왔다. 그러나 비파괴시험법의 도입은 생산과정 또는 생산제품에 대해 전면적인 미세조직의 평가가 가능하게 되어 시험편의 제조를 위한 별도의 공정이 생략되므로 시간적, 경제적 잇점을 가진다[8]. 파괴적 평가의 단점을 극복할 수 있는 충분한 매력을 가진 비파괴적 평가(NDE; Nondestructive Evaluation)의 대표적인 것으로 초음파 탐상과 음향방출법이 있다.

본 연구에서는 알루미늄합금의 ECAP가공에 의하여 결정립 미세화가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 ECAP가공에 의한 결정립 미세화를 초음파 탐상 및 음향방출 시험을 통해 초음파 음속, 시간-주파수 분석에서의 주파수대역 등으로 비파괴적으로 검사하고자 하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. ECAP(Equal-Channel Angular Pressing)

Segal 등[1]에 의해 처음 소개된 ECAP법은 Fig. 1과 같은 동일한 단면적을 가지면서 일정한 각( $\phi$ )을 이루고 접해 있는 2개의 통로(channel)를 갖는 특별한 금형을 사용하여 심한 전단변형을 가하는 가공법이다. 두 통로간의

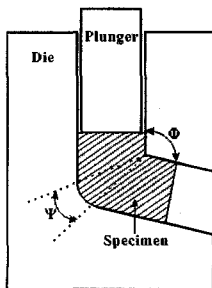


Fig. 1 Schematic diagram of equal-channel angular pressing

교차각을  $\phi$ 로, 2개의 통로가 만나는 지점의 외부만곡부의 각을  $\psi$ 로 나타낸다. ECAP공정으로 가공된 재료의 전단변형량은 사용하는 금형의 형태, 특히 2개의 통로가 교차하는 부분의 형상에 따라 크게 달라지며 Iwahashi 등은 두각 (교차각 $\phi$ , 만곡각 $\psi$ )의 크기에 따른 재료 변형량 변화를 예측하는 관계식을 제시하였는데 그 결과에 의하면  $\psi \neq \pi - \phi$ 인 조건에서 재료가 그 형을 통과할 때 받는 전단 변형량,  $\gamma$ 는 아래와 같이 주어진다[9,10].

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \cdot \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \quad (1)$$

이 식에서 알 수 있는 바와 같이 2개 통로의 교차각이 작을수록, 만곡부의 각이 작을수록 변형량이 증가한다. 2개각의 합이  $180^\circ$  일 때 즉  $\psi = \pi - \phi$ 인 조건에서 전단 변형량을 나타내는 식은 다음과 같이 간단하게 된다.

$$\gamma = \psi \quad (2)$$

(1)식으로 정의되는 전단 변형량을 전체 변형량으로 나타내면 아래의 (3)식과 같이 된다.

$$\epsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \cdot \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \right] \quad (3)$$

위의 식으로부터  $\phi$  및  $\psi$ 를 알면 어떤 조건에서의 ECAP법에 의한 가공량을 알 수 있다. 압연 및 압출 등 기존의 가공공정을 이용하여 재료에 소성변형을 주기 위해서는 전체 재료의 두께가 가공과정 중에 상당히 감소하지만 ECAP법에서는 재료가 투입되는 곳과 나오는 통로의 단면크기가 동일하기 때문에 두께나 직경 감소없이 원하는 소성변형을 줄 수 있다는 점이 기존 가공공정과 근본적으로 다른 점이다[9].

### 2.2. 시간-주파수 분석(Time-Frequency Analysis)

푸리에 변환은 지금까지 신호의 주파수 성질을 연구하는 가장 일반적인 방법이었다. 그러나, 푸리에 변환은 비정상신호(non-stationary signal)를 정확히 표현할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 이러한 단점을 보완한 새로운 신호 해석법인 시간-주파수 해석법들이 개발되었다. 시간과 주파수의 2차원 평면상에 신호의 시간 변화에 따른 주파수 변화를 표현하는 시간-주파수 해석법의 특징은 첫째, 정상신호(stationary signal)뿐만 아니라

비정상신호(non-stationary signal)를 푸리에 변환에 비하여 상세하게 분석할 수 있다. 즉, 시간 변화에 따른 주파수 변화를 시간-주파수 평면상에 정확히 표현할 수 있는 것이다. 둘째, 일반적으로 노이즈는 시간과 주파수 영역에서 퍼지는 특징이 있으며, 신호는 짧은 시간 영역 또는 좁은 주파수 대역에 집중하는 성질을 가진다. 따라서, 노이즈가 포함된 신호를 분석할 경우 시간-주파수 평면상에서 노이즈와 신호의 구별이 쉽고, 노이즈의 제거가 쉽다는 장점이 있다[11,16].

3. 시험편 및 실험 방법

3.1. 시험편

본 실험에 사용된 재료는 직경 20mm의 1080Al alloy와 5083Al alloy의 압출 봉재로서 화학 조성과 기계적 성질은 아래의 Table 1, Table 2에 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of specimens (wt%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1080Al alloy	.053	.086	-	-	-	-	-	-	bal.
5083Al alloy	.132	.181	.014	.489	4.13	.104	.016	.019	bal.

Table 2 Mechanical properties of specimens

	0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
1080Al alloy	45	57	46	28
5083Al alloy	167	337	22	76

3.2. ECAP가공

직경 20mm의 Al alloy를 ECAP 가공하기 위해 직경 12.9mm를 갖도록 선반으로 기계 가공한 후 길이를 100mm로 절단하였다. ECAP 공정동안 소재의 변형량을 결정하는 두 개의 채널각으로서 안쪽 채널각( $\phi$ )은 90°

바깥쪽 만곡각( $\psi$ )은 45°가 되도록 가공을 행하였고, 그 밖의 ECAP가공조건은 아래의 Table 3과 같다[12,13].

Table 3 Conditions of equal-channel angular pressing

Specimen	Using die	Temperature (K)	Pressing speed (mm/sec)
1080Al alloy	SKD11	room	1.5
5083Al alloy	SKD61	473	2.5

3.3. 비파괴 실험(Nondestructive test)

ECAP가공 전과 4회 ECAP가공한 후의 Al alloy를 두께 10mm로 절단해서 초음파 및 AE 실험을 행하였다. 초음파 탐상 및 AE 실험의 개략도를 Fig. 2 및 Fig. 3에 각각 나타낸다.

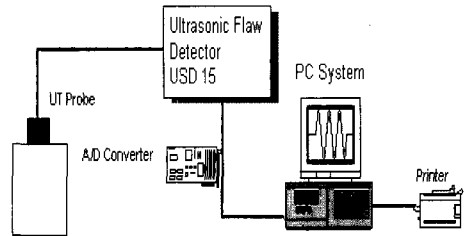


Fig. 2 Measurement system of ultrasonic test

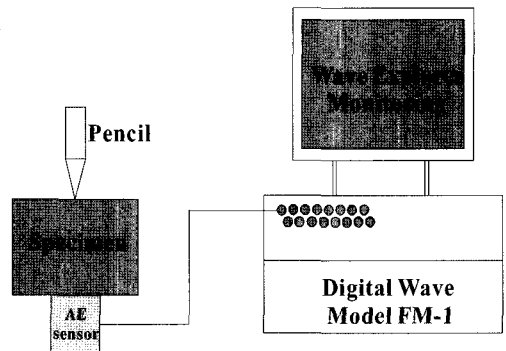


Fig. 3 Measurement system of acoustic emission

초음파 탐상을 위해 초음파 탐상기(USD 15), 초음파 센서(중심주파수 5MHz의 광대역센서) 및 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 초음파의 음속 및 감쇠 후의 주파수 분석을 행하였다. 음향방출(AE) 실험을 위한 장비로 최대 16channel까지 지원되는 Digital Wave사(Model : FM-1)의 AE 측정장치를 이용하였고, 그때의 AE 센서(sensor)로서는 1MHz의 광대역센서를 사용하였다. AE 신호를 검출하기 위하여 pencil break 실험을 수십 차례 실시한 후, Pre-amp에서 10dB, Main-amp에서 12dB를 증폭시켜 Wave Explorer 프로그램에서 분석하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. ECAP가공에 의한 미세조직의 변화

Fig. 4(a)는 1080Al alloy의 Fig. 4(b)는 5083Al alloy의 ECAP 가공 전의 광학현미경 사진들, Fig. 4(c)와 (d)는 1080Al alloy과 5083Al alloy을 1회 ECAP가공한 사진이고, Fig. 4(e)와 (f)는 1080Al alloy과 5083Al alloy을 4회 ECAP 가공한 투과전자현미경사진을 나타낸다. 1080Al

alloy의 경우 ECAP가공 전의 결정립 크기의 평균이 약 108  $\mu\text{m}$ 로 나타났으나, 1회 가공으로 결정립 크기가 약 0.9  $\mu\text{m}$ 로 감소하였다. 1회 가공으로 인한 결정립의 크기는 줄어들었으나 일방향연신이 보였다. 동일방향으로 90° 회전하는 가공 경로를 통해 일방향연신을 없앨 수 있었으며 4회 가공으로 0.37~0.41  $\mu\text{m}$ 로 결정립이 미세화되었다. 이는 1회 가공 후 소제가 갖는 결정립이 전단변형에 의해 저경각 경계를 갖는 아결정립밴드로 되고 가공 횟수의 증가로 저경각 경계를 갖는 아결정립이 고경각 경계를 갖는 등축결정립으로 전개되면서 결정립 미세화를 이룬다는 다른 연구결과와 잘 일치하고 있다[14,15].

5083Al alloy도 1080Al alloy와 같이 ECAP가공 전의 결정립의 크기는 약 37  $\mu\text{m}$ 였으나 1회 가공으로 결정립의 평균 폭과 길이가 각각 156nm, 523nm로 감소하였고, 4회 가공으로 약 233nm의 평균 결정립 크기가 나타났다. Fig. 4(g)와 (h)는 1080Al alloy와 5083Al alloy를 4회 가공한 후 573K에서 열처리한 조직사진이다. 4회 가공 후의 열처리를 행하지 않은 것보다 결정립이 조대화된 것을 관찰할 수 있다.

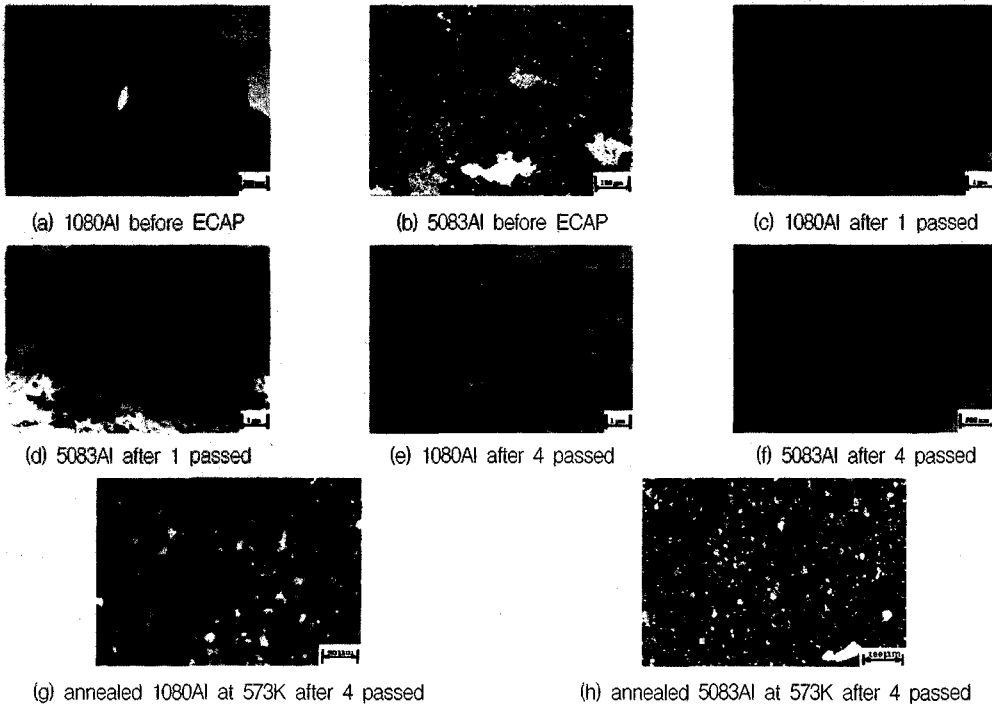


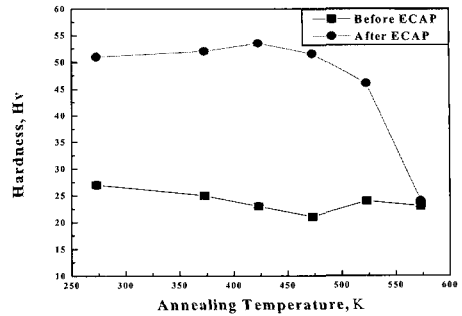
Fig. 4 Optical and TEM photographic of aluminum alloy

4.2. ECAP가공에 의한 기계적 성질

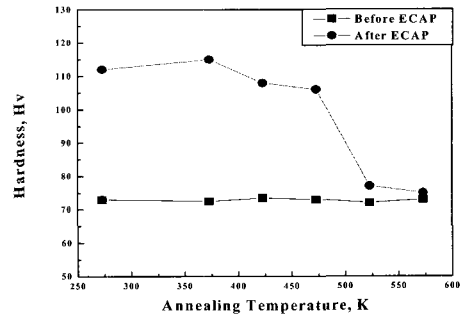
ECAP가공 전과 ECAP가공한 후의 Al alloy의 기계적 성질과 상온에서의 인장시험 결과를 Table 4에 나타낸다. 1080Al alloy의 경우 ECAP가공에 의하여 1회 가공으로 ECAP 전의 소재에 비해 변형에너지의 축적에 의한 항복강도와 인장강도가 각각 3배 및 2.5배 이상의 큰 상승률을 나타낸 반면, 연신율은 약 70%나 감소하였다. 가공횟수의 증가로 항복강도 및 인장강도는 조금 상승했으나 연신율은 1회 이상의 가공으로도 더 이상 감소하지 않았고 오히려 증가하는 경향이 나타났다. 이는 1회 가공에 의하여 길게 연신된 밴드구조를 가지면서 결정립내에서 높은 전위를 가지는 결정립들이 가공횟수의 증가로 결정립이 더욱 미세화 되고 결정립내 전위도 일부 등축결정립 형태로 변화면서 연신율의 증가를 초래한 것으로 판단된다[13]. 5083Al alloy의 경우도 1080Al alloy과 유사하게 가공횟수의 증가로 항복강도와 인장강도는 증가하였고, 연신율은 1회 가공으로 감소한 연신율이 4회 가공으로 증가하는 경향을 나타냈다. Fig. 5는 열처리 온도에 따른 경도값의 변화를 나타낸다. ECAP가공 전의 소재는 열처리에 따른 경도값의 변화가 나타나지 않았으나 523K부터 급격히 경도가 감소하기 시작하여 573K에서는 가공 전의 경도값과 비슷한 값을 나타내었다. 이는 가공으로 축적된 변형에너지가 재결정의 구동력이 되어 523K에서 재결정이 시작되어 573K에서 재결정이 완료된 것으로 여겨진다.

Table 4 Mechanical properties of before and after equal-channel angular pressing

	0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Before 1080Al alloy	45	57	46	28
1 passed 1080Al alloy	133	140	13	50
4 passed 1080Al alloy	150	162	26	51
Before 5083Al alloy	167	337	22	76
1 passed 5083Al alloy	268	352	18	105
4 passed 5083Al alloy	281	348	21	110



(a) 1080 aluminum alloy



(b) 5083 aluminum alloy

Fig. 5 Hardness of 1080 and 5083 aluminum alloy according to annealing temperature

4.3. 초음파 탐상

Fig. 6은 ECAP 가공전과 4회 가공 후, 그리고 4회 가공 후 573K 열처리한 Al alloy의 초음파의 음속을 나타낸다. 1080Al alloy, 5083Al alloy 모두 ECAP가공 후 초음파의 음속이 가공 전의 음속 보다 높게 나타났으며, ECAP가공한 Al alloy를 573K에서 열처리했을 때 ECAP가공 후의 음속보다는 낮게 나타났다. 초음파의 음속은 재료의 종탄성계수, 밀도, 포아송비에 의존하는 함수이다. ECAP가공 후의 초음파의 음속이 높게 나타난 것은 결정립의 미세화에 따른 종탄성계수의 증가에 의한 것으로 판단되며 열처리에 따른 음속의 감소는 열처리에 의한 재결정 및 성장에 의한 것으로 여겨진다. 그리고 재료내부를 통과하는 초음파의 음속은 종탄성계수, 밀도, 포아송비 외에 재료내부의 잔류응력 등도 음속에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[8]. 초음파의 음속과 Al alloy에서 ECAP가공으로 인한 재료내부에 높은 잔류응력과의 관계는 앞으로 연구해야 될 과제로 여겨진다.

Fig. 7은 결정립크기에 따라 감소되는 주파수 영역이 달라짐을 이용하여 ECAP 가공전과 4회가공한 후, 그리고 4회 가공 후 573K 열처리한 알루미늄합금의 시간-주파수 분석을 나타낸다. 1080Al alloy와 5083Al alloy의 재료의 종류에 관계없이 ECAP가공 전에는 중심주파수가 0.25MHz 나 0.5MHz의 저주파수 대역(Fig. 7(a)와 (d)이, ECAP

가공 후에는 1MHz나 1.25MHz의 중심주파수 대역(Fig. (b)와 (e)이 각각 나타났다. 그리고 열처리 후에는 0.25MHz와 0.5MHz의 중심주파수 대역이 나타났으나, 1MHz나 1.25MHz의 주파수 대역(Fig. (c)와 (f)이 ECAP 가공 전보다 높은 값을 나타내고 있다. 가공 후의 경우가 가공 전보다 고주파수 영역이 보다 많이 나타난 것은 ECAP가공 전에는 조대한 결정립에 의해, 짧은 파장의 고 주파수 영역이 감소되었으나, 가공 후 결정립의 미세화에 의해 고주파수의 경우가 감소가 적어져 저주파수보다 높 게 나타난 것으로 판단된다. 그리고 파장이 긴 저주파수가 중심주파수로 나타나지 않은 것은 실험에 사용한 중심주 파수 5MHz의 광대역 센서가 0.25~0.5MHz대역에서 수신 감도가 낮기 때문이다. 열처리에 의한 중심주파수는 재결 정 및 성장에 의해서 ECAP가공 전과 유사한 중심주파수 대역이 나타났다[8,16-18].

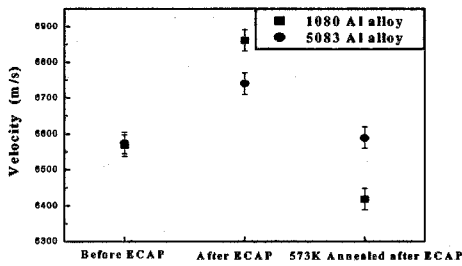
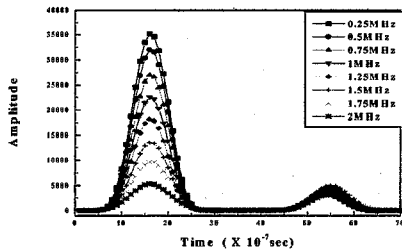
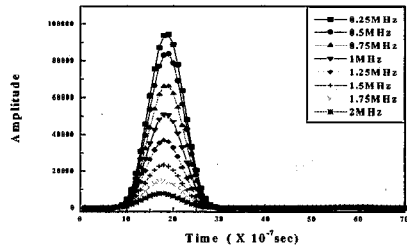


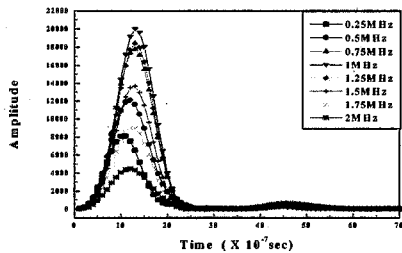
Fig. 6 Ultrasonic velocity of aluminum alloy



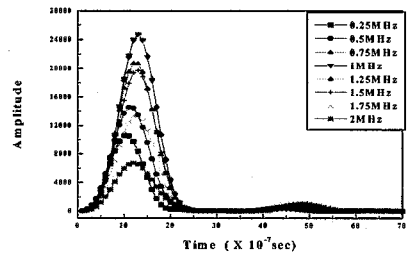
(a) 1080Al alloy before ECAP



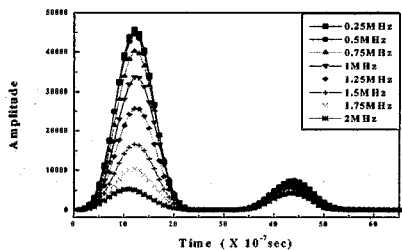
(d) 5083Al alloy before ECAP



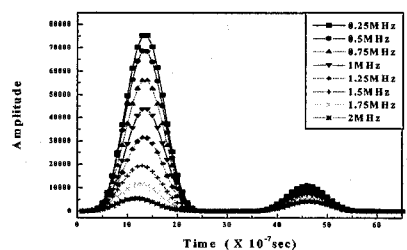
(b) 1080Al alloy after 4 passed



(e) 5083Al alloy after 4 passed



(c) 1080Al alloy with heat treatment after 4 passed



(f) 5083Al alloy with heat treatment after 4 passed

Fig. 7 Time-frequency analysis of aluminum alloy according to ECAP and heat treatment

#### 4.4. 음향 방출

초음파 탐상을 통해서 수신되는 초음파의 중심 주파수 영역이 비교적 저주파수 영역인 것에 착안해서 수신 주파수 영역이 1MHz인 광대역 센서를 이용하여 연필심이 부러질 때 수신되는 AE신호의 주파수를 분석함으로써 초음파 탐상에서 검토했던 중심주파수 대역을 다시 확인하였다. 이때, AE수신신호의 신뢰를 위하여 수십차례에 걸쳐 연필심을 부러뜨려 대표적인 AE신호를 검토하였다.

Fig. 8은 pencil break 실험을 통해 얻은 대표적인 AE신호의 waveform의 형태를 나타내고 있으며, Fig. 8과 유사한 waveform은 시험한 모든 시편으로부터 얻을 수 있었다.

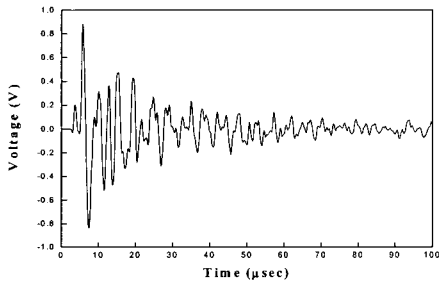


Fig. 8 Waveform derived from aluminum alloy when a pencil is broken

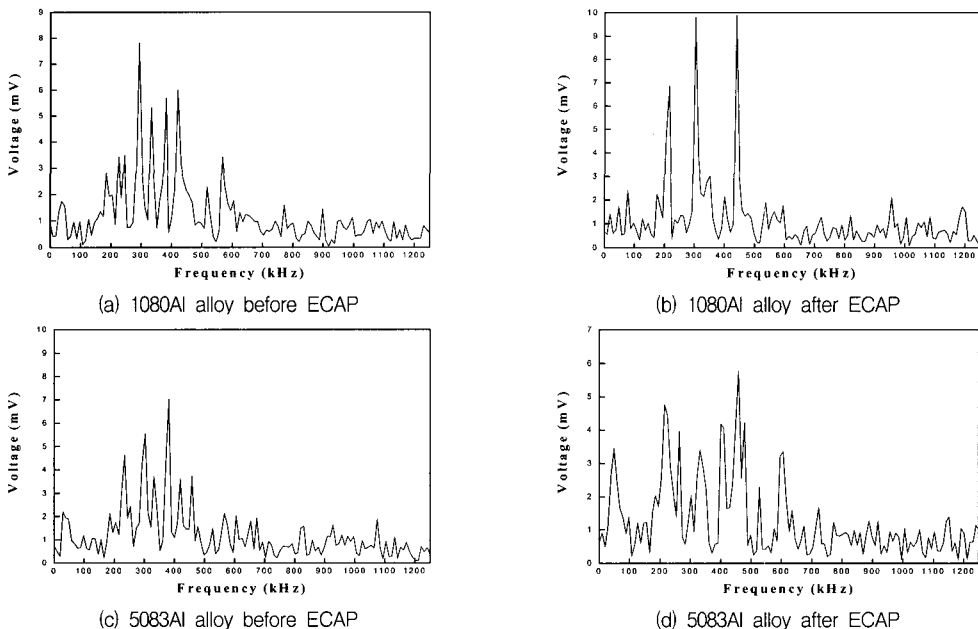


Fig. 9 Frequency analysis of 1080Al alloy and 5083Al alloy

Fig. 9는 연필심이 부러졌을 때 수신된 AE 신호의 주파수를 분석한 그림이다. 1080Al alloy에서는 연필심이 파괴되었을 때의 중심주파수 대역은 약 300kHz 대역으로 나타났다.

그리고, ECAP가공 후에는 가공전의 중심주파수보다 높은 450kHz 영역이 나타났다.

5083Al alloy는 연필심이 파괴되었을 때 중심주파수가 200~450kHz인 영역이 나타났으며 가공 후에는 가공전에 나타나지 않은 600kHz 근처의 고주파수 영역이 나타났다. 이것은 초음파의 주파수 분석에서와 같이 결정립의 미세화로인해서 고주파수 영역이 나타난 것으로 생각되어진다[19]. 또한, 긴 파장의 저주파수 영역도 고주파수만큼은 아니지만 감소가 적어진 것이 관찰되었다.

#### 5. 결론

1080 및 5083 알루미늄합금의 ECAP가공 전과 후의 미세조직의 변화에 따른 기계적 성질 및 비파괴평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 1080Al alloy 및 5083Al alloy의 ECAP가공에 의한 결정립의 미세화로 높은 항복강도와 인장강도를 얻을 수 있었다.

- (2) ECAP가공으로 인한 연신율은 1회 가공으로 감소되었으나 가공 횟수의 증가로 다시 연신율이 상승하였다.
- (3) 초음파 음속을 구한 결과 ECAP가공 전의 초음파의 음속에 비해 가공 후의 음속이 높았다. 이것은 ECAP가공에 의한 결정립 미세화를 초음파 음속으로 나타낼 수 있음을 나타낸다.
- (4) 초음파 신호를 시간-주파수 분석한 결과 가공 전에는 0.25MHz, 0.5MHz의 주파수 대역이 주를 이루었지만 ECAP가공 후에는 결정립의 미세화로 1MHz, 1.25MHz의 주파수 대역을 얻을 수 있었다. ECAP가공에 의한 결정립의 미세화를 초음파 신호의 주파수 대역을 통해 나타낼 수 있었다.
- (5) 음향방출 시험을 통해 ECAP가공 전과 후에 수신되는 중심주파수대역의 구별이 가능하였다. 단, 본 실험은 pencil break 실험을 통하여 얻은 결과로서 연필의 부러짐에 따른 신호의 특성이 달라질 수 있기 때문에, 금후 이에 대한 오차를 줄일 수 있는 보정방법의 검토가 필요하다고 생각한다.
- [9] 고흥석, 장준연, 최성규, 문인기 “구속전단가 공법 (ECAP)에서 전단변형 특성”, 대한금속학회지, Vol. 37, No. 4, pp. 441-447, (1999)
- [10] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto and T. G. Langdon, *Acta metall. et Mater.*, Vol. 45, pp. 4733, (1997)
- [11] M. A. Malik, X. M. Jin and J. San lie, “Joint time-frequency processing of ultrasonic signals,” *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15B, pp. 2089-2096, (1996)
- [12] 진선화, 김형욱, 강석봉, “ECAP 가공을 이용한 상용 알루미늄 합금의 결정립 미세화 및 기계적 성질”, 대한금속학회지, Vol. 38, No. 12, pp. 1600-1605, (2000)
- [13] 강효경, L. Bachelard, 김형욱, 강석봉, “온간 ECAP 법에 의해 제조된 5083 Al 합금의 미세조직과 기계적 특성”, 대한금속학회지, Vol. 39, No. 5, pp. 553-559, (2001)
- [14] T. G. Langdon, K. Nakashima, Z. Horita and M. Nemoto, *Acta Metall. et Mater.*, Vol. 46, pp. 1598, (1998)
- [15] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto and T. G. Langdon, *Acta metall. et Mater.*, Vol. 46, pp. 3317, (1998)
- [16] 김현수, 심규현, 안석환, 남기우, “시간-주파수 해석법을 이용한 선박용 디젤엔진배기밸브의 열화도 평가에 관한 기초적 연구 (II)”, 한국해양공학학회지, Vol. 14, No. 4, pp. 68-72, (2000)
- [17] 남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권, “시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴 거동”, 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 39-45, (2001)
- [18] K. W. Nam, S. H. Ahn and A. K. Mal, “Acoustic Emission from Fatigue Crack Extension in Corroded Aluminum Alloys,” *LiMAT-2001*, Vol. II, pp. 701-706, (2001)
- [19] 안석환, 남기우, “음향방출 및 초음파시험을 이용한 CFRP 시험편의 파괴 거동 해석”, 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 3, pp. 251-260, (2001)
- [1] V. M. Segal, *Mater. Sci. Eng.(A)*, Vol. 197, pp. 157, (1995)
- [2] R. Z. Valiev, N. A. Krasilnikov and N. K. Tsenev, *Mater. Sci. Eng.(A)*, Vol. 137, pp. 35, (1991)
- [3] S. Komura, Z. Horita, M. Nemoto and T. G. Langdon, *J. Mater. Res.*, Vol. 14, pp. 4044, (1999)
- [4] 신동혁, 오계희, 김우진, 이상우, 주용용, “ECAP 강가공에 의한 0.15% C 강의 결정립 미세화”, 대한금속학회지, Vol. 37, No. 9, pp. 1048-1054, (1999)
- [5] 장준연, 고흥석, 최성규, 문인기, “구속전단가공 (ECAP)한 Al합금의 미세조직”, 대한금속학회지, Vol. 37, No. 12, pp. 1584-1589, (1999)
- [6] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, R. Z. Valiev and T. G. Langdon, *Acta Metall. et Mater.*, Vol. 44, pp. 4619, (1996)
- [7] M. Mabuchi, H. Iwasaki and K. Higashi, *Scripta Mater.*, Vol. 36, pp. 681, (1997)
- [8] 홍순택, 권숙인, 주용용, “초음파 감쇠측정에 의한 탄소강 미세조직의 비파괴적 평가”, 대한금속학회지, Vol. 37, No. 7, pp. 754-759, (1999)

## 참고문헌