

< 논문 >

ECAP 성형가공한 Al 2024 초미세결정립 재료의 소성변형량에 따른 강도 변화

최정우** · 마영화* · 윤기봉†

(2005년 7월 6일 접수, 2005년 9월 20일 심사완료)

Strength Change due to Plastic Deformation in Al 2024 Ultrafine Grained ECAP Metal

Jeong Woo Choi, Young Wha Ma and Kee Bong Yoon

Key Words : Small Punch Test(소형편치시험), ECAP(등통로각압축법), Al 2024(알루미늄 2024) Nanostructured Metal(나노구조재료), Strength Assessment(강도평가), Anisotropy(이방성)

Abstract

Strength change of an over-aged Al2024 material was studied after being subjected to several stages of severe plastic deformation by ECAP (Equal Channel Angular Pressing). Various kinds of strength value were measured using the conventional tensile test, Rockwell and Vickers hardness and the SP (small punch) test. Due to limitation of the specimen size, tension test in transverse direction could not be conducted. Hence, SP test was employed for assessing the strength in transverse direction. Based on TEM observation the measured strength characteristics were explained based on the relation between microstructure, dislocation and strength. As the number of ECAP pass increases, the strength of Al2024 was also increased. However, considerable change of strength, which is generally predicted, was not observed in this study. For the strength in transverse direction even decrease of the strength was observed after 6 passes of ECAP. It was argued that this decrease was due to dynamic recovery of dislocation density during or after ECAP processes at 150 °C. The strength assessment equation proposed by the authors in the previous paper was shown to be very accurate. This argument was supported by comparing the results of conventional tensile test with those of SP test. It was also pointed that the Rockwell hardness value seemed to be able to represent the strength in the transverse direction.

1. 서 론

등통로각압축법으로 불리는 ECAP (Equal Channel Angular Pressing) 가공법은 다결정 일반 금속재료에 유효변형률 1.0 이상의 심한 전단 변형을 가하여 초미세결정립 재료로 변환시키는 가공법이다. 이 방법은 재료의 단면적 감소 없이 매우 큰 변형량을 부여함이 가능하고 공정 후에도 재료 내부에

기공이 발생하지 않는 균일한 고강도 초미세결정립 재료를 얻을 수 있는 장점이 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 하지만 ECAP 에 의해 성형 가공된 재료는 강도의 이방성을 가지며,^(2,4-7) 가공 횟수에 따라 인장강도 값이 변하게 된다.⁽⁴⁾ 또한 보통 길이방향으로는 소형 인장 시편 가공이 가능하나 횡방향으로는 인장시편의 가공이 어렵다. 이러한 이유 때문에 현재 ECAP 초미세결정립 재료의 기계적 인장강도의 측정 결과는 길이방향의 특성에 대해서 주로 보고되고 있다. 따라서 길이방향의 강도에 비해 횡방향의 강도특성이 어떻게 차이 나는지 연구할 필요성이 있다. 즉, 고강도 기계부품 및 구조재의 개발 필요성에 따라 ECAP 공정에 의한 고강도 나노구조재료의 개발사용이 고려되고 있으므로 이재료의

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : kbyoon@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5328 FAX : (02)812-6474

* 회원, 중앙대학교 대학원

** 회원, 중앙대학교 대학원

길이방향 강도 뿐 아니라 일축인장시험이 어려운 횡방향에 대한 기계적 강도특성 평가가 필요하였다. 이에 Choi 는 Al 2024 ECAP 재료의 횡방향에 대해 소형편치시험(small punch, SP)을 수행하여 ECAP 가공횟수에 따른 최대편치하중 및 SP 에너지의 변화 특성에 관해 연구하였다.⁽¹⁾ 또한 Ma 등은 ECAP 성형 가공하여 결정립도를 미세화한 Al 2024 재료에 대해 소형편치 시험의 최대 편치하중으로부터 강도값을 평가할 수 있는 정량적인 강도 평가식을 제안하였다.⁽²⁾

본 논문에서는 ECAP 가공 횟수에 따른 Al 2024 재료의 강도값의 변화에 대해 연구하였다. 재료강도는 길이방향 일축인장시험과 길이방향 및 횡방향의 SP 시험으로 측정하였다. SP 시험 결과 얻은 최대편치하중으로부터 강도 특성값을 평가하는데 사용한 평가식의 신뢰성을 검증하기 위해 이를 길이방향 일축인장시험 결과와 비교하였다. 또한 SP 시험 동안 측정된 횡방향 최대편치하중값을 경도 측정 결과와도 비교하였다. 또한 일축 인장시험으로부터 측정되는 강도값을 소량의 재료만으로 간접적으로 평가할 수 있는 방법인 SP 시험법을⁽⁸⁻¹³⁾ 사용하여 ECAP 가공 재료의 횡방향 강도특성을 평가하였다. 강도특성 평가는 이전 연구에서⁽²⁾ 제안된 유효하중지탱 면적비를 고려한 이방성 강도 평가식을 사용하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험재료 및 시편가공

본 연구에 사용된 재료는 Al 2024 이며 AISI 규격에 따른 화학조성은 Table 1 에 나타내었다. 시험재료는 과시효(over ageing) 열처리된 원재를 150 °C 에서 1, 3, 6 회 ECAP 가공하여 결정립도를 미세화하였다. ECAP 가공시에 다이각은 90°, 코너각은 45°이었다. ECAP 가공에 의해 얻은 봉재의 길이방향 및 횡방향에 대해 SP 시험에 의한 강도 특성을 평가하기 위해서 길이방향으로 인장시험편을 가공하였고, SP 시험편은 길이방향 L-시편과 횡방향 T-시편을 준비하였다.⁽²⁾ 시험편은 와이어 절단에 의해 10×10×0.7 mm 로 가공하였다. 시험편 최종 두께는 0.5 mm 이므로 절단 가공된 0.7 mm 두께의 시편을 연마지를 사용하여 0.5 mm 까지 표면 연마하였다. 표면 조도의 영향을 최소화하기 위해 최종 연마는 1200Grit 연마지를 사용하여 마무리하였으며, L-시편의 경우는 최종 연마에 의한 연마 흠집 방향을 횡방향과 일치하도록 하였다.

Table 1 Chemical composition of Al 2024 by AISI (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Al
0.5	0.5	3.8 ~ 4.9	0.3 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	0.1	0.25	1.7 ~ 2.3	Bal.

2.2 인장시험

일축 인장시험의 채취가 가능한 ECAP 가공 길이방향으로 인장시험을 수행하였다. ECAP 가공으로 얻은 재료는 횡방향 크기가 10 mm 이었으므로 인장시험 가공이 어려워 본 연구에서는 100 mm 길이를 갖는 길이방향에 대해서만 일축 인장시험을 가공하였다. 일축 인장시험은 30 kN 용량의 MTS Sintech 5/G 소형 재료시험기를 사용하였다. 시험조건은 ASTM E 8M 에 준하여 변위제어 방식으로 수행하였다. 시험중 변형률을 측정하기 위해 시험편의 측정부위에 게이지를 장착하였다. 측정된 응력과 변형률 데이터는 자동 저장하였다. 탄성계수 및 항복강도를 측정하기 위해 3% 변형률까지는 0.3 mm/min 속도로 시험하였고, 이후에는 1 mm/min 속도로 실험하여 인장강도를 측정하였다. 시험은 동일한 시험 조건하에서 원재를 포함한 1 회, 3 회, 6 회 ECAP 가공한 각 시험편에 대해 2 회씩 수행하였다.

2.3 경도시험

경도시험은 원재 및 1 회, 3 회, 6 회 ECAP 가공된 시험편을 횡방향에 대해서 원형의 단면으로 절단하였다. 절단된 시편은 측정오차를 최소화하기 위해 1 μm이하의 표면연마용 분말을 사용하여 경면 연마 후 마이크로 비커스(Micro-Vickers) 경도와 로크웰(Rockwell) 경도를 측정하였다. 마이크로 비커스 경도는 Future-Tech Corp.의 Micro-hardness Tester 를 사용하였고, 로크웰 경도는 Time Group Inc.의 TH300 Rockwell Type Hardness Tester 를 사용하여 측정하였다.

마이크로 비커스 경도는 원형시편 중심부로부터 바깥쪽으로 20 개소 이상을 순차적으로 측정하였다. 측정하중은 50 g, 하중 유지시간은 20 초로 하였다. 로크웰 경도 측정은 마이크로 비커스와 달리 측정부의 소성변형 영역이 넓게 형성되므로 8 개소 전후로 측정하였다.

2.4 소형편치시험

SP 시험은 ASTM E643-84(2000)에 준하여 MTS Sintech 5/G 30 kN 용량의 소형재료 시험기를 사용하여 수행하였다. SP 시험 지그의 단면 형상을 Fig. 1 에 보였다. 시험편은 2.1 절에 설명한 폭(D) 10 mm 두께(t) 0.5 mm 시편을 사용하였다. 하중을

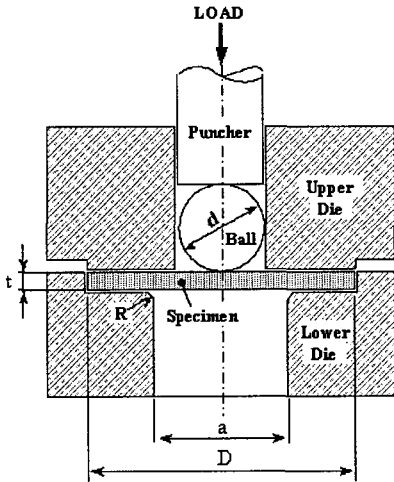


Fig. 1 Schematic diagram of small punch testing jig

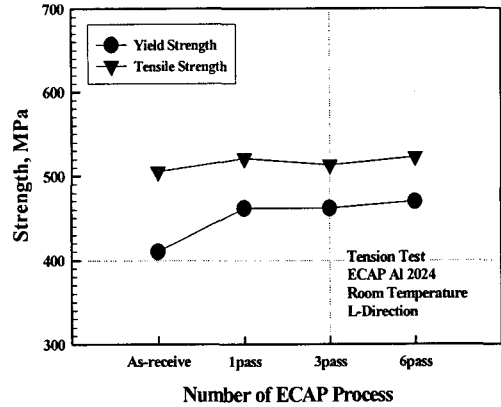


Fig. 3 Strength variations of Al 2024 as a function of a number of ECAP process

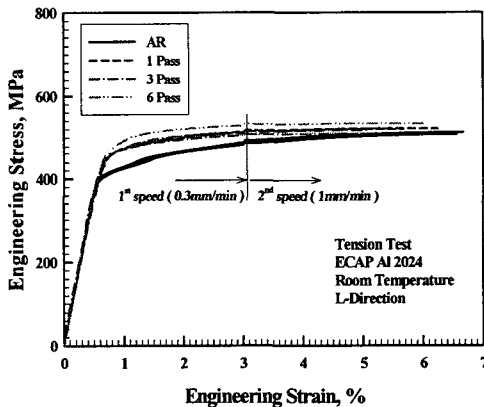


Fig. 2 Nominal stress-strain results of the tensile tests for Al 2024 ECAP metal

Table 2 Measured tensile properties of Al 2024 ECAP metal in longitudinal direction

	E (GPa)	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Reduct. of Area (%)	Elong. (%)
AR	73.4	410.4	505.4	34.6	11.4
1Pass	74.4	461.8	521.2	36.6	10.3
3Pass	74.4	461.8	513.6	38.9	10.0
6Pass	75.9	469.2	522.9	36.4	11.1

가한 볼의 직경(d)은 2.4 mm, 하부 다이 내경(a)은 4 mm, 모서리 곡률반경(R)은 0.2 mm 이다. 시험 속도는 0.5 mm/min 로 하였으며, 실험 동안 하중 및 변위 데이터를 자동 저장하였다. 시험 횟수는 길이방향과 횡방향에 대해 원재 및 1 회, 3 회, 6 회 ECAP 가공 시험편을 가지고 동일한 시험 조건하에서 2~3 회씩 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

Al 2024 ECAP 재료의 길이방향 일축 인장 시험 결과 얻은 공칭 응력-변형률 곡선을 Fig. 2 에 나타내었고, 이로부터 측정된 인장물성값은 Table 2 에 정리하였다. 측정결과로부터 ECAP 가공한 Al 2024 의 길이방향 강도변화를 Fig. 3 에 도시하였다.

Fig. 2~3 에서 ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 항복강도는 원재의 항복강도에 비해 1 회 12.5%, 3 회 12.5%, 6 회 14.6%가 증가하였다. 반면 인장강도는 원재의 인장강도에 비해 1 회 3.2%, 3 회 1.6%, 6 회 3.5%가 증가하였다. 항복강도의 경우 ECAP 가공 횟수가 1 회인 경우와 3 회인 경우가 동일한 값을 보였으나 ECAP 가공횟수가 증가함에 따라 약간의 항복강도 증가효과가 나타났다. 인장강도는 3 회 ECAP 가공한 시편의 인장 강도값이 1 회 가공한 경우보다 약간 낮은 강도값을 보였다. 또한 6 회 ECAP 가공한 후에도 1 회 가공한 시편의 인장 강도값과 비교해서 강도값의 증가가 뚜렷하지는 않았다. 즉, ECAP 가공후 강도는 가공 횟수가 증가하여도 원재의 인장강도에 비해 현저히 증가하는 경향은 관찰되지 않았다. 또한 Table 2 에 보인 바와 같이 ECAP 가공 횟수 증가에 따른 단면 감소율 및 연신율의 감소가 나타나지 않았다. 즉, 소성변형량이 증가하여도 최종 파단시까지의 연신율은 거의 일정하였다.

3.2 경도측정 결과

마이크로 비커스 및 로크웰 경도측정 결과를 Fig. 4 에 보였다. 경도측정 결과 경도값은 ECAP

가공횟수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 하지만 6 회 ECAP 가공한 경우 마이크로 비커스와 로크웰 경도값이 모두 감소하는 특징을 보였다. 특히 마이크로 비커스 경도값은 원래의 경도값 수준으로 감소하였다. 경도시편은 횡방향의 SP T-시편을 사용하였다. 따라서 경도측정시 변형이 발생하는 방향은 경도압입자의 반경방향에 해당하는 시편의 횡방향과 동일하다. 즉, 경도값은 횡방향 강도값의 경향을 보여준다고 볼 수 있다. 6 회 ECAP 가공 시편의 경도값 감소 원인에 대해서는 3.5 절에서 논의하였다.

3.3 소형편치시험 결과

Al 2024 ECAP 재료의 길이방향 L-시편 및 횡방향 T-시편에 대해 SP 시험 결과 얻은 하중-변위 곡선 결과를 Fig. 5 와 Fig. 6 에 각각 나타내었다. 최대편치하중은 Table 3 에 정리하였고, 파단된 SP 시편은 Fig. 7 에 보였다.

SP 시험 결과 T-시편 및 L-시편의 하중-변위곡선 형태가 서로 다름을 알 수 있다. SP 시험의 전형적인 하중-변위 곡선의 형상은 초기 탄성영역, 소성 굽힘 영역(plastic bending), 멤브레인 신장 영역(membrane stretching) 및 최대 하중점에서의 파단으로 나눌 수 있다.⁽⁸⁾ 하지만 SP 시험 하중-변위 곡선의 이러한 영역 분류는 시험재료가 큰 연성을 가지고 있어 멤브레인 신장 발생후 파단이 발생하는 경우에만 유효하다.^(2,3) 본 연구재료와 같이 연성이 작은 경우에는 멤브레인 신장 또는 소성굽힘 영역의 변형중에 균열 발생에 의한 파단이 발생하므로 하중-변위 곡선의 형상은 달라지게 되어 Fig. 6 과 같은 형상의 하중-변위 곡선이 나타났다. 이와 같은 이유로 L-시편에 대해서도 Fig. 5 에서 나타나는 하중-변위곡선 천이영역 A 점은 전형적인 연성재료에서 나타나는 소성굽힘 영역과 멤브레인 신장 영역의 경계와는 그 성격이 다르다. 즉, 길이방향 SP 시험의 하중-변위 곡선 천이영역은 시험재료의 이방성의 영향으로 나타난 것이다.

길이방향 L-시편의 SP 시험 하중-변위 곡선 결과를 보면 Fig. 5 에 보인 바와 같이 ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 A 점의 위치가 원래 0.47 mm 에서 1 회 0.45 mm, 3 회 3.3 mm, 6 회 3.3 mm 정도로 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 이는 ECAP 가공에 의해 재료의 횡방향의 연성이 소진되기 때문이다. 따라서 길이방향 L-시편은 SP 시험동안 A 점에서 시편 하부에 균열이 생성되고 이 균열이 성장하면서 파손되므로, 연성이 충분한 경우엔 발생이 가능한 멤브레인 신장 영역 현상이 나타나기 전에 균열에 의한 파손이 먼저 발생하게 된다.⁽²⁾

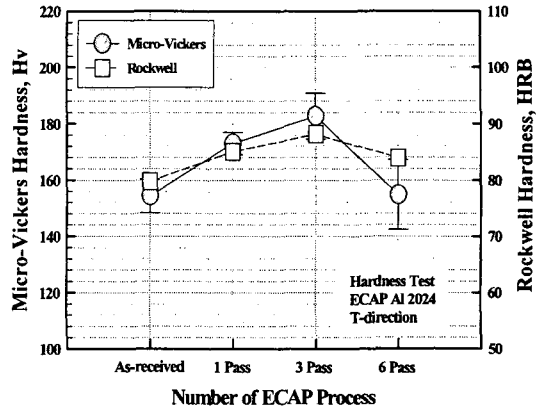
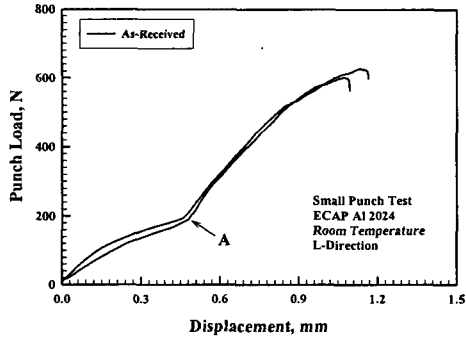


Fig. 4 Hardness variations of Al 2024 as a function of the number of ECAP process

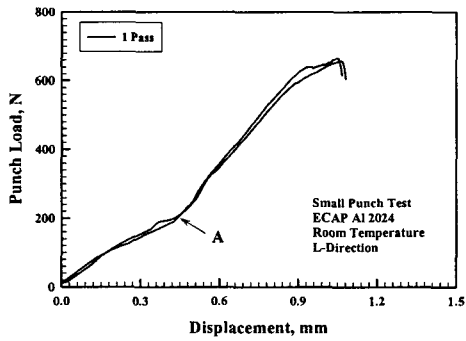
횡방향 T-시편의 SP 시험 결과 Table 3 에 보인 최대하중값은 ECAP 가공횟수가 증가함에 따라 원래와 비교해서 증가하였다. 하지만 6 회 ECAP 가공 시편의 경우 최대편치하중은 경도 측정결과와 유사하게 감소하였다. 즉, 횡방향 T-시편의 강도값을 경도값이 나타내고 있으며 이유는 앞에 설명하였다.

SP 시험 결과 얻은 Fig. 5, Fig. 6, Table 3 에서 횡방향 최대편치하중과 길이방향 최대편치하중의 외면상 차이는 크지 않아 보인다. 하지만 이전 연구 결과⁽²⁾에서 Al 2024 ECAP 재료는 횡방향 T-시편의 SP 시험에서 편치하중을 지탱하는 유효면적이 길이방향 L-시편의 SP 하중을 지탱하는 면적보다 넓음을 보였다. 즉, 길이 방향 L-시편의 경우 재료의 이방성 때문에 소성변형이 높은 길이방향과 일치하는 균열이 소성굽힘 변형 초기에 횡방향측에서 먼저 발생하여 성장하기 때문에 횡방향 측의 재료는 SP 하중을 지탱하는 능력이 상실되어 하중지탱 면적이 등방성인 횡방향의 하중 지탱면적보다 작아지게 되므로 재료의 강도는 커지게 된다.

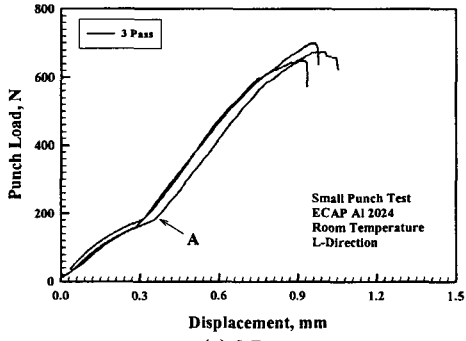
SP 시험동안 측정된 횡방향 최대편치하중의 신뢰성을 검증하기 위해 횡방향 경도측정 결과인 Fig. 4 와 비교하였다. 측정방법 및 평가값의 단위가 다르므로 원래에서 측정된 각 시험값을 기준으로 비례값으로 나타내어 비교하였다. 결과를 Fig. 8 에 도시하였다. 비교결과 ECAP 가공 횟수가 증가함에 따른 SP 시험의 최대편치하중의 변화와 경도값의 변화가 유사한 경향을 보였다. 특히, 로크웰 경도 변화값과는 만족할 만한 수준의 일치하는 경향을 보였다. 마이크로 비커스 경도값은 변화 경향은 유사하였으나 비례값은 0.05~0.08 정도의 차이를 보였다. 이는 마이크로 비커스 경도 측



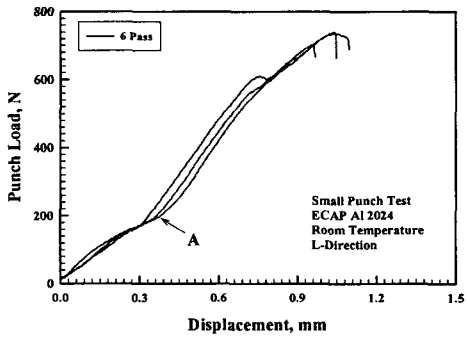
(a) As-received



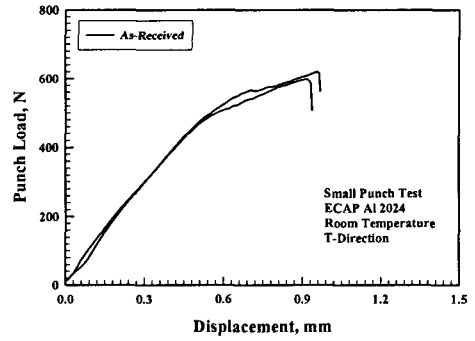
(b) 1 Pass



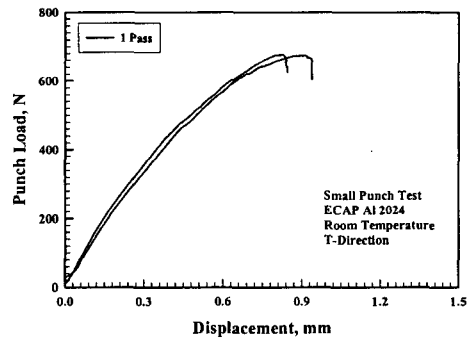
(c) 3 Pass



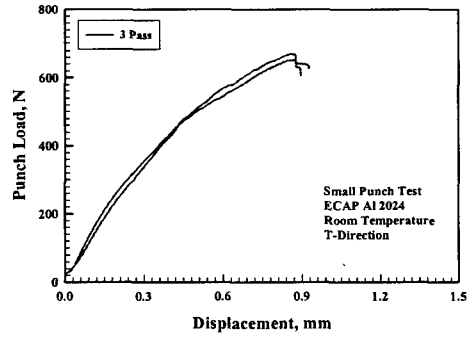
(d) 6 Pass



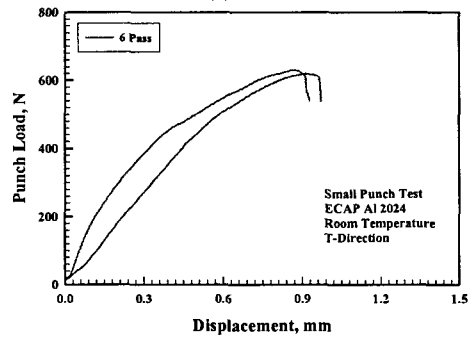
(a) As-received



(b) 1 Pass



(c) 3 Pass



(d) 6 Pass

Fig. 5 Punch load-displacement curves measured during the small punch testing for Al 2024 ECAP metal in longitudinal direction

Fig. 6 Punch load-displacement curves measured during the small punch testing for Al 2024 ECAP metal in transverse direction

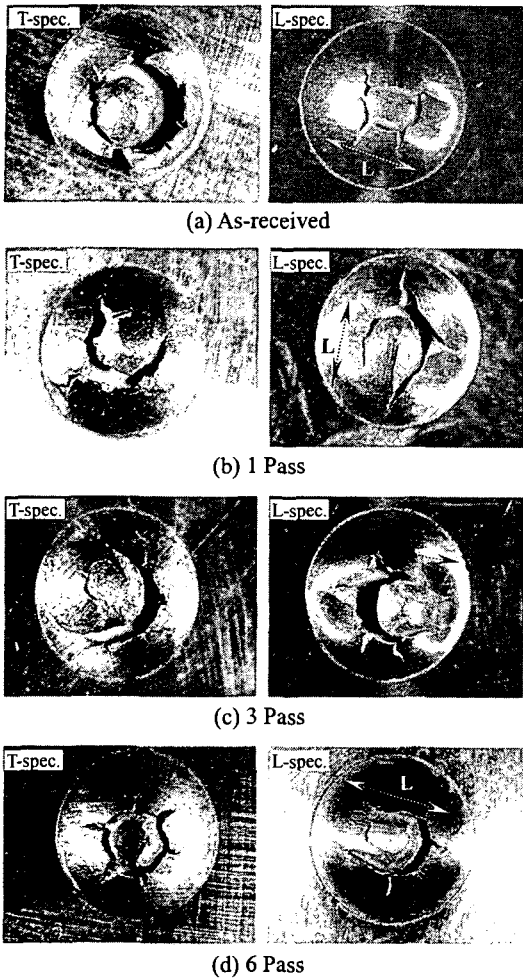


Fig. 7 Photographs of the fracture surfaces from small punch test

Table 3 Maximum punch load measured during the small punch testing for Al 2024 ECAP metal

Direction	Maximum Punch Load (N)			
	AR	1Pass	3Pass	6Pass
L	606	664	674	727
T	596	638	655	630

정에 사용된 압자(indenter)의 형상차이에서 발생한 차이로 볼 수 있다. ECAP 가공횟수에 따른 SP 시험 동안 측정된 최대편치하중값과 경도값의 변화를 비교한 결과 SP 시험의 최대하중값이 만족할 만한 수준의 결과값임을 확인할 수 있다.

3.4 인장강도 평가

이전 연구에서 $Ma^{(2)}$ 등은 SP 시험 동안 측정된 하중-변위곡선 결과로부터 강도값을 예측하기 위

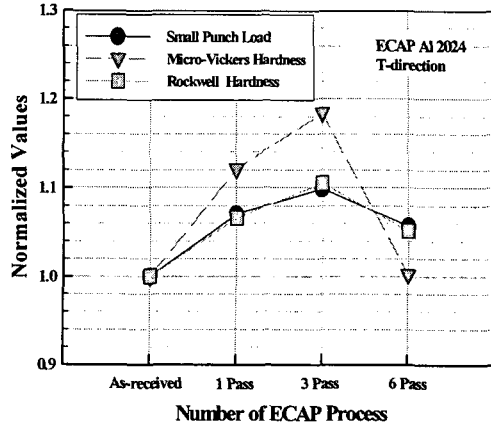


Fig. 8 Comparison of normalized load and hardness in transverse direction as a function of the number of ECAP process

한 FIPCA,⁽⁹⁾ Mao,⁽¹⁰⁾ 등에 의해 제안된 평가식은 연성이 작아서 전단변형에 의해 파손이 발생하는 이방성 Al 2024 ECAP 재료에 대해서는 강도평가가 부적절함을 보이고 ECAP 가공 재료의 강도 특성 평가를 위해 다음과 같은 강도 예측식을 제안하였었다.

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A_s \cdot \cos \theta} \tag{1}$$

$$A_s = 2\pi \cdot r_m \cdot t_s \cdot \xi \tag{2}$$

P 는 최대편치하중, A_s 는 편치하중을 지탱하는 유효전단면적, θ 는 편치볼의 중심축과 시편의 전단면이 이루는 각도, ξ 는 이방성 특성에 의한 실제 하중을 지탱하는 유효전단면적비로서 등방성인 경우 1.0 이다. r_m 은 시편의 중심축으로부터 파단면 중심까지의 평균 반경방향 거리, t_s 는 전단면 길이로서 파단면 각도를 45°로 가정하면 $t_s = 0.707$ mm (시편 초기 두께, $t_0 = 0.5$ mm)이다.

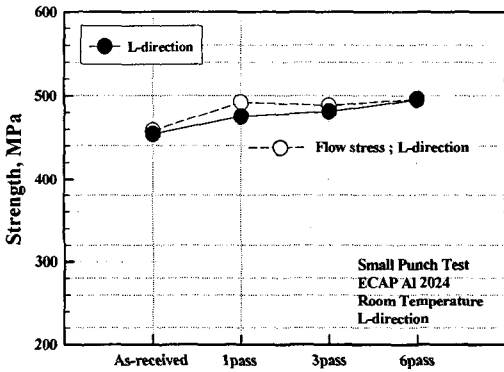
본 논문에서는 식 (1)을 사용하여 ECAP 가공한 Al 2024의 강도특성을 평가하였다. 강도특성을 평가하기 위해 SP 시험후 식 (1), (2)에 포함된 측정 변수들을 파단된 시험편에 대해 이동식 현미경을 사용하여 측정하였다. 측정결과를 Table 4에 정리하였다. Table 3의 최대편치하중, Table 4의 측정된 변수 그리고 식 (1)을 사용해서 Al 2024 ECAP 재료의 가공 길이방향 및 횡방향에 대한 강도 특성값을 평가하였다. 강도평가 결과를 Table 5에 정리하였다. 가공길이방향 일축 인장시험 결과인 항복강

Table 4 Measuring parameters for assessing strength of Al 2024 ECAP material

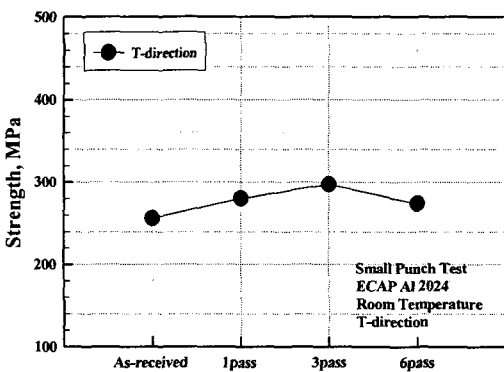
Measuring parameters	L-direction				T-direction			
	AR	1 pass	3 pass	6 pass	AR	1 pass	3 pass	6 pass
r_i (mm)	0.80	0.78	0.78	0.79	0.71	0.70	0.68	0.71
r_o^T (mm)	0.25	0.27	0.26	0.27	0.42	0.41	0.40	0.41
r_o^L (mm)	0.51	0.49	0.49	0.48	-	-	-	-
r_o^{TL} (mm)	0.26	0.25	0.24	0.23	-	-	-	-

Table 5 Measured strength for Al 2024 ECAP material in longitudinal and transverse directions

	Direction	Tension tests				SP tests			
		AR	1Pass	3Pass	6Pass	AR	1Pass	3Pass	6Pass
Flow stress (MPa)	L	458	492	488	496	454	475	481	495
	T	-	-	-	-	256	280	297	274



(a) Longitudinal direction



(b) Transverse direction

Fig. 9 Results of the strength assessment of Al 2024 ECAP metals

도와 인장강도의 평균값인 소성유동응력을 고려할 때 3.1 절에서 설명한 바와 같이 동일한 시험으로 간주된 길이방향 L-시험에 대한 SP 시험의 최대편

차하중으로부터 계산된 강도값이 매우 만족할 만 하게 일치하는 결과를 보였다. 따라서 횡방향 강도 특성값도 신뢰할 수 있는 값으로 볼 수 있다. ECAP 가공횟수에 따른 길이방향 및 횡방향 강도 특성값의 변화를 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9(a)에서 SP 시험 동안 측정된 최대편차하중으로부터 평가한 길이방향 강도 특성값은 ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 일축인장실험 결과인 소성유동응력과 동일한 변화양상을 보였다. ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 가공길이방향 인장강도가 증가하는 경향을 보이고 있으나, 급격한 증가는 관찰되지 않았다. Fig. 9(b) 횡방향 강도 특성값은 원재와 비교해서 전체 강도값은 증가하였으나, ECAP 가공 횟수가 6 회인 경우 강도값이 감소하였다. 이는 Fig. 4 경도측정 결과와 동일한 경향이다.

3.5 미세조직 관찰

ECAP 가공 횟수에 따른 Al 2024 재료의 횡방향 미세조직 변화를 투과전자현미경 (transmission electron microscopy, TEM)으로 관찰하였다. 관찰 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 보였다.

Fig. 10은 제트 시닝 용액(zet thinning solution)을 사용하여 전해연마 후 TEM으로 관찰한 결과이다. Fig. 10(a) 원재에서는 입계 및 입내에서 20~400 nm 크기의 석출물들이 관찰되었다. 또한 전형적인 알루미늄합금의 석출상인 θ 상으로 보이는 디스크형상의 석출상이 관찰되었다. 1회 ECAP 가공한 시험편의 Fig. 10(b)에서는 D 영역과 같은 검은색의 강한 전위 밀도 집적 현상이 관찰되었다. 또한 초기 결정립 경계의 일부가 불명확해진 B 영역이 나타났다. ECAP 가공 횟수가 6회인 Fig. 10(c)에서는 Fig. 10(a), (b)에서 보여진 결정립의 경계가 관찰되지 않아 결정립이 미세화 되었음을 확인할 수 있다. 또한, 강한 전위 밀도 집적군들이 관찰되며, 크기는 약 50 nm~2 μ m 정도이다. 이는 Fig. 10(b)에

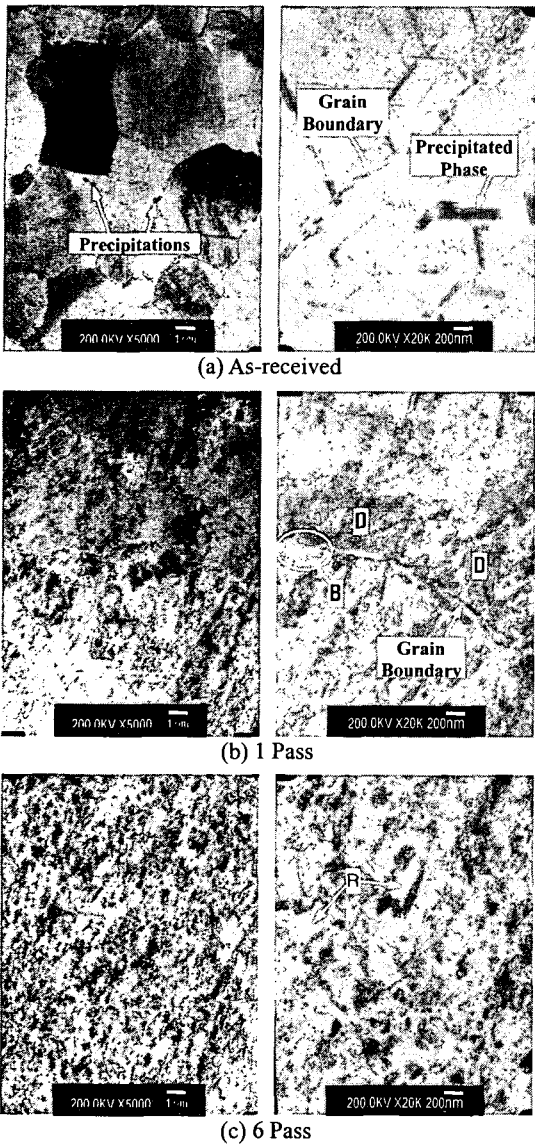


Fig. 10 TEM analysis for microstructures in the transverse direction of Al 2024 ECAP metals

서 관찰된 전위 밀도 집적군의 크기에 비해서 작은 크기이다.

Fig. 11 은 석출물상 및 전위 밀도 집적현상을 관찰하기 위해 3 회 ECAP 가공한 시편에 대해 석출물상의 회절점을 암시야상(dark field)과 명시야상(bright field)으로 관찰한 결과이다. 관찰 결과 Fig. 11(a)에서 검은 점처럼 보이는 수많은 석출상들이 관찰되었다. 관찰된 석출상들은 Fig. 10(a)에서의 결정립 크기를 고려하면 입계와 입내에서 생성된

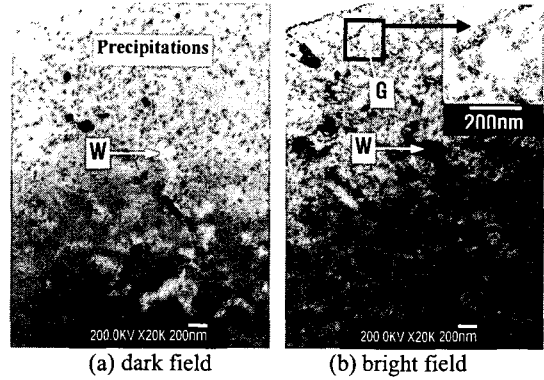


Fig. 11 TEM analysis for microstructures in the transverse direction of Al 2024 performed the number of three ECAP process

것처럼 보인다. 하지만 석출상들은 미세립화된 결정립의 경계에 분포하고 있음을 Fig. 11(b)를 통해 확인할 수 있다. Fig. 11(a)에서 흰색으로 보이는 W 영역은 전위 밀집 영역을 나타내며, 명시야상에서 검은색으로 나타나는 것으로 확인할 수 있다.

미세립화된 결정립들은 ECAP 성형가공에 의해 Fig. 10(a)의 초기 결정립내에 형성된 작은 결정립들이다. 즉, ECAP 가공에 의해 형성된 전위 밀도 집적군들이 석출상으로 둘러싸여 각각의 작은 결정립들을 형성한 것이다. 미세화된 결정립들은 직접적으로 강도 및 경도의 증가를 유발하게 된다. 따라서 ECAP 가공횟수가 증가함에 따라 강도와 경도값이 증가하게 된다. 이는 본 연구 결과 얻은 강도특성값 및 경도값이 증가하는 것으로써 확인된다. 단, 석출물상과 전위 밀도 집적현상이 강도나 경도값의 증가 요인이긴 하지만 강도와 전위밀도사이의 관계를 정량적인 함수관계로 설명하기는 어렵다.

횡방향 T-시편에 대한 3.2 절의 경도측정결과와 3.3 절의 소형편치시험 결과 6 회 ECAP 가공한 시편의 측정값이 감소하는 원인은 Fig. 10(c)의 R 영역으로 설명이 가능하다. Fig. 10(c)의 우측 TEM 결과에서 보면 전위 밀도가 감소하여 동적회복이 일어난 것으로 보이는 밝은 R 영역이 약 500 nm 이상의 크기를 갖는 미세결정립을 형성하고 있다. 이 영역의 크기는 3 회 ECAP 가공한 시편의 Fig. 11(b)에서 약 50~200 nm 크기의 미세립화된 결정립보다 크을 알 수 있다. 따라서 6 회 ECAP 가공한 시편의 경우 일부 결정립의 크기가 3 회 ECAP 가공한 시편에 비해 크므로 강도와 경도가 감소한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Al 2024 과시효재의 ECAP 가공 후의 강도특성을 평가하기 위해 인장시험, 경도시험 및 SP 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Al 2024 ECAP 재료의 강도평가 결과 ECAP 가공 길이방향은 ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 강도값이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 횡방향은 3 회 ECAP 가공했을 때까지는 강도가 증가하였으나 6 회 ECAP 가공한 시편의 강도값은 감소하는 경향을 보였다. 이는 동적회복이 발생하여 미세화 되었던 결정립이 일부 성장하였기 때문으로 추측할 수 있다.

(2) ECAP 재료의 SP 시험에 의한 강도평가 결과 ECAP 가공 길이방향의 강도 특성값은 일축 인장시험의 항복강도보다는 높고 인장강도보다는 낮은 강도 특성 값이 얻어졌다. Al 2024 ECAP 재료의 경우 변형경화 정도가 ECAP 가공 횟수 1 회 12.9 %, 3 회 11.2 %, 6 회 11.4 % 정도로 낮기 때문에 인장강도와 항복강도가 큰 차이가 없는 경우이며 두 값의 평균인 소성유동응력과 SP 시험에 의한 강도평가값이 매우 잘 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 횡방향에 대한 강도특성 평가 결과에도 신뢰성을 부여할 수 있다.

(3) 횡방향 SP 시편에서 측정된 경도 측정값은 횡방향의 강도값을 나타낸다. 따라서 SP 시험으로 측정된 횡방향 강도값 변화 경향과 로크웰 경도값 변화 경향이 일치하였다.

(4) 향후 이방성 ECAP 재료의 길이방향 및 횡방향에 대한 강도특성을 평가하기 위해서는 이방성 주축방향에 대한 초소형 일축 인장시험을 수행하여 본 논문에 제시된 강도특성 평가 예측식의 정확도를 재평가할 필요성이 있다.

후 기

본 논문은 2000 학년도 중앙대학교 학술 연구비 지원에 의한 것입니다. 본 연구에 도움을 주신 강석봉 박사님, 김선화 교수님, 최병학 교수님, 이용복 박사님, 송병준 박사님께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Choi.J.W., 2005, "A Study on Relation between Grain Size Refinement and Strength by Equal Channel Angular Pressing (ECAP)," MS Thesis, School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University.

- (2) Ma. Y. W., Choi. J. W. And Yoon. K. B., 2005, "Assessment of Strength Characteristics of Al 2024 ECAP Metal Using Small Punch Testing," *Trans. of the KSME (A)*, submitted.
- (3) Kang. H. K., Kim. H. W. And Kang. S. B., 2002, "Influence of Pressing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Al Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing," *J. of Kor. Inst. of Met & Mater*, Vol. 40, No.2, pp. 168~176.
- (4) Kang. H. K., Bachelard. L., Kim. H. W. And Kang. S. B., 2001, "Microstructure and Mechanical Properties of 5083 Aluminum Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing at Elevated Temperature," *J. of Kor. Inst. of Met & Mater*, Vol. 39, No. 5, pp. 553~559.
- (5) V. Patlan., K. Higashi., K. Kitagawa., A. Vinogradov. and M. Kawazoe., 2001, "Cyclic Response of Fine Grain 5056 Al-Mg Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing," *Material Science and Engineering A319-321*, pp. 587~591.
- (6) Iwahashi. Y., Horita. Z., Nemoto. M. and Langdon. T. G., 1997, "An Investigation of Microstructural Evolution during Equal-Channel Angular Pressing," *Acta Materialia*, Volume 45, Issue 11, pp. 4733~4741.
- (7) Wang. Y. Y., Sun. P. L., Kao. P. W. and Chang. C. P., 2004, "Effect of Deformation Temperature on the Microstructure Developed in Commercial Purity Aluminum Processed by Equal Channel Angular Extrusion," *Scripta Materialia*, Vol. 50, Issue 5, pp. 613~617.
- (8) Fluery. E. and Ha. J. S., 1998, "Small Punch Tests to Estimate the Mechanical Properties of Steels for Steam Power Plant: I. Mechanical Strength," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 699~706.
- (9) FIPCA ISP 13663-1998-02, "Characterization of Punch and Bulge Testing of Small Specimens Employing Theoretical, Finite Element and Experimental Methods and a Technical Market Survey."
- (10) Mao. X. and Takahashi. H., 1987, "Development of a Further-Miniaturized Specimen of 3mm Diameter for TEM Disk(ϕ 3mm) Small Punch Tests," *Journal of Nuclear Materials* 150, pp. 42~52.
- (11) Park. T. G., Ma. Y. W., Jeong. I. S. and Yoon. K. B., 2003, "A Study on Applicability of SP Creep Testing for Measurement of Creep Properties of Zr-2.5Nb Alloy," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 27, No.1, pp. 94~101.
- (12) Yoon. K. B., Park. T. G., Shim. S. H. and Jeong. I. S., 2001, "Assessment of Creep Properties of 9Cr Steel Using Small Punch Creep Testing," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 25, No.9, pp. 1493~1500.
- (13) Park. T. G., Shim. S. H., Yoon. K. B. and Jang. C. H., 2002, "A Study on Parameters Measured during Small Punch Creep Testing," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No.1, pp. 171~178.