

ECAP Al 2024 합금의 소성변형량에 따른 강도 특성 및 이방성 연구

최정우¹, 마영화¹, 윤기봉[#]

A Study on Strength Characteristic Variation as amount of Plastic Deformation and Strength Anisotropy for ECAP Al 2024 Alloy

J.W.Choi, Y.W.Ma, K.B.Yoon

Abstract

When subjected to severe shear deformation by ECAP, microstructure of Al2024 becomes nanocrystalline grained texture material. To measure the strength of that, small punch (SP) testing method was adopted as a substitute for the conventional uniaxial tensile testing because the size of material processed by ECAP were limited to $\phi 12\text{mm}$ in transverse direction. SP tests were performed with specimens in longitudinal and transverse directions of Al 2024 ECAP metal. For comparing the strength values with those assessed by SP tests, uniaxial tensile tests were also conducted with specimens in longitudinal direction. Failure surfaces of the tested SP specimens showed that failure mode was shear deformation and Al 2024 ECAP metal has an anisotropy in strength. Thus, conventional equations proposed for assessing the strength characteristics were improper to assess those of Al2024 ECAP metal. In this paper a way of assessing the strength of Al 2024 ECAP metal was proposed and was proven to be effective.

Key Words : Small Puch Test(소형편치시험), ECAP(등통로각압출법), Al 2024(알루미늄 2024), Nanostructrued Metal(나노구조재료), Strength Assessment(강도평가), Anisotropy(이방성)

1. 서론

최근에 나노기술에 대한 관심이 증가되면서 재료분야의 연구에서도 마이크론 수준의 미세한 결정립을 갖는 나노구조 재료의 연구 및 기계적 강도 특성 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1,2] 심한 소성변형에 의한 강소성 가공(severe plastic deformation) 방법 중 하나 인 ECAP 은 다결정 일반 금속재료에 유효변형률 1.0 이상의 심한 전단 변형을 가하여 나노구조 재료로 변환시킨다. 이 방법은 재료의 단면적 감소 없이 매우 큰 변형량을 부여함이 가능하고 공정 후에도 재료 내

부에 기공이 발생하지 않는 균일한 나노 구조재료를 얻을 수 있는 장점이 있다.[1-3]

ECAP 에 의해 성형 가공된 재료는 강도의 이방성특성을 가지며, 가공 횟수에 따라 강도 특성 값이 변하게 된다.[4] 하지만 지금까지 강도 이방성 평가에 관한 연구는 보고된바 없으며, 강도 특성 평가에 관한 연구도 ECAP 공정 특성상 약 100 mm 크기를 가지는 가공 길이 방향에 대한 강도 특성에 관한 연구만 수행되었다. 따라서 횡방향 강도 특성값이 어떻게 변하는지 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 소량의 재료만으로도 일축 인장

1. 중앙대학교 대학원

교신저자: 중앙대학교 기계공학부, kbvoon@cau.ac.kr

시험으로부터 측정되는 강도 값을 간접적으로 평가할 수 있는 방법인 소형 펀치(small punch, SP) 시험법을 사용하여 ECAP 재료의 이방성 주축방향들의 강도특성을 평가 하였다. SP 시험으로부터 측정된 하중-변위 곡선 결과는 이전 연구 결과에 의해 제안된 강도 예측식[5,6] 을 사용하여 강도 값을 평가였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 재료 및 시편 가공

본 연구에 사용된 재료는 Al 2024로서 AISI 규격에 따른 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 시험재료는 150°C에서 ECAP 가공하여 결정립도를 미세화하였다. ECAP 가공에 의해 얻은 봉재의 길이 방향 및 횡방향에 대해 SP 시험에 의한 강도 특성을 평가하기 위해서 길이방향 L-시편과 횡방향 T-시편을 준비하였다. 각 방향 별 SP 시험편 채취 방법과 SP 시험편 형상을 Fig. 1에 보였다. 시험편은 10x10x0.7mm로 와이어 절단한 후 1200Grit 연마지를 사용하여 최종 두께인 0.5mm까지 표면 연마하였다.

2.2 소형펀치시험

SP 시험은 ASTM E643-84(2000)에 준하여 MTS Sintech 5/G 30kN 용량의 소형재료 시험기를 사용하여 수행하였다. 시험편은 2.1 절에 설명한 10x10x0.5mm 시편을 사용하였다. 하중을 가한 볼의 직경 d 는 2.4mm, 하부 다이의 내경 a 는 4mm, 모서리 곡률반경 R 은 0.2mm 이다. SP 시험 지그를 Fig. 2 에 나타내었다. 시험 속도는 0.5mm/min 로 하였으며, 실험 동안 하중 및 변위 데이터를 자동 저장하였다. 시험 횟수는 길이방향과 횡방향에 대해 동일한 조건으로 2~3 회씩 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소형펀치시험 결과

ECAP 가공 길이 방향 및 횡 방향에 대한 SP 시험 결과 측정된 하중-변위 곡선 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다. 길이 방향과 횡 방향에 대한 SP 시험의 하중-변위 곡선은 다른 양상을 보인다. 길이 방향 SP 시험 결과인 Fig. 3에서는 하중이 급격하게 변하는 천이 점 A가 나타난 반면, 횡 방향 SP 시험 결과인 Fig. 4에서는 나타나지 않았다. 이는 이방성 특성에 의해 초기 소성 급형

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

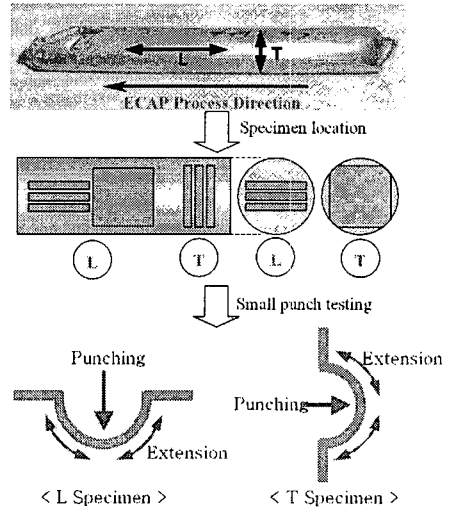


Fig. 1 Specimen machining and directions of small punch testing for L- and T-specimens

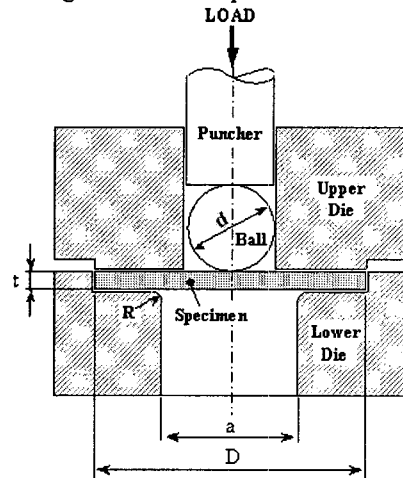


Fig 2 Schematic diagram of small punch testing jig

영역에서 길이방향으로의 균열이 생성되어 횡 방향으로의 하중 지탱 능력이 상실하기 때문에 나타나는 현상이다.[2]

이방성 주축 방향에 대한 SP 시험 결과 얻은 최대하중을 Table 2에 정리하였다. 길이 방향과 횡방향 모두 최대하중은 ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 하지만 6회 ECAP

가공한 경우의 횡 방향 최대 편치 하중은 감소하였다. 이는 ECAP 가공 온도인 150°C는 Al 2024 재료가 동적 회복이 발생이 가능한 상온 (homologous temperature)에 해당하기 때문에 ECAP 가공 중 미세화된 결정립 일부에서 동적 회복이 발생하였기 때문이다.[2]

3.2 강도특성 평가

ECAP 에 의해 결정립도를 미세화한 Al 2024 에 대해 이전 연구결과에서 다음과 같은 강도 평가 식이 제안되었다. [2]

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{2\pi \cdot r_m \cdot t_s \cdot \xi \cdot \cos \theta_3} \quad (1)$$

$$t_s = \frac{t_o}{\sin \theta_2} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{90^\circ - \theta_4}{90^\circ} \quad (3)$$

A_s 는 전단면적, ξ 는 이방성 특성에 의한 실제 하중을 지탱하는 유효전단면적비로써 등방성인 경우 1.0 이다. r_m 은 펀치볼 중심으로부터 파단면 중심까지의 평균 반경방향 거리, t_o 는 시험편 초기 두께, t_s 는 전단면의 길이이다.

본 논문에서는 식(1)을 사용하여 ECAP 가공한 Al 2024 의 강도특성을 평가하였다. 강도평가 결과를 Table 3 에 정리하였다. 강도 평가 결과를 검증하기 위해 이전 연구 결과[2] 얻은 길이 방향 인장 강도 값을 함께 나타내었다. 가공 길이 방향에 대한 일축 인장시험 결과인 소성유동응력(항복강도와 인장강도의 평균값)을 고려할 때 길이방향 L-시편에 대한 SP 시험의 최대편치하중으로부터 계산된 강도 값이 만족할 만한 일치하는 결과를 보였다. 따라서 횡 방향 강도특성 값도 신뢰할 수 있는 값으로 볼 수 있다. ECAP 가공횟수에 따른 길이방향 및 횡 방향 강도 특성 값의 변화를 Fig. 5 에 도시하였다. Fig. 5 에서 SP 시험 동안 측정된 최대편치하중으로부터 평가한 길이방향 강도 특성 값은 ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 일축인장시험 결과인 소성유동응력과 동일한 변화양상을 보였다. ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 가공 길이방향 인장강도가 증가하는 경향을 보이고 있으나, 급격한 증가는 관찰되지 않았다. 횡 방향 강도특성 값은 원재와 비교해서 전체 강도 값은 증가하였으나, ECAP 가공 횟수가 6 회인 경우 강도 값이 감소하였다.

Table 2 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

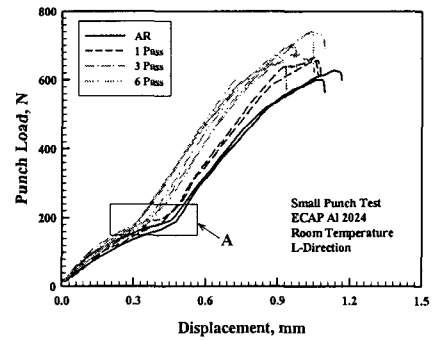


Fig. 3 Punch load-displacement results of the small punch tests for Al 2024 ECAP metal

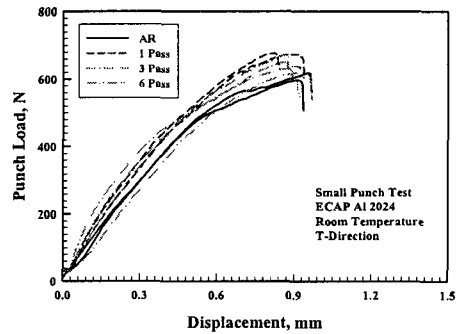


Fig. 4 Punch load-displacement results of the small punch tests for Al 2024 ECAP metal

5. 결 론

본 연구에서는 Al 2024 ECAP 재료의 이방성 주축 방향(L-방향 및 T-방향)의 강도특성을 평가하기 위해 소형편치(small punch, SP)시험을 수행하였다. Al 2024 ECAP 재료의 강도평가 결과 ECAP가공 길이 방향은 ECAP 가공 횟수가 증가함에 따라 강도값이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 횡방향

Table 3 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

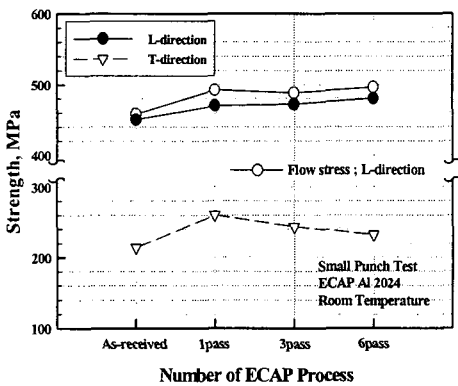


Fig. 5 Results of the strength assessment of Al 2024 ECAP metals

은 3회 ECAP가공했을 때까지는 강도가 증가하였으나 6회 ECAP 가공한 시편의 강도값은 감소하는 경향을 보였다. 이는 동적회복이 발생하여 미세화되었던 결정립이 일부 성장하였기 때문이다. 향후 이방성 강도 특성을 가지는 ECAP 재료의 이방성 주축 방향에 대한 초소형(micro scale) 일축 인장시험을 수행하여 본 논문에서 제시된 강도 특성 평가 결과의 정확도를 다시 평가할 필요성이 있다.

후 기

본 연구에 도움을 주신 한국 기계연구원의 강석봉 박사님께 특별히 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Jeong Woo Choi, 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] H. K. Kang., H. W. Kim. And S. B. Kang, 2002, "Influence of Pressing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Al Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing", Journal of the Korean Institute of Metal & Materials, Vol.40, No.2
- [4] Y.-Y. Wang., P. L. Sun., P. W. Kao. and C. P. Chang., 2004, "Effect of Deformation Temperature on the Microstructure Developed in Commercial Purity Aluminum Processed by Equal Channel Angular Extrusion", Scripta Materialia, Volume 50, Issue 5, pp.613~617
- [5] Tae Gyu Park, Young Wha Ma, Ill Seok Jeong and Kee Bong Yoon., 2003, "A Study on Applicability of SP Creep Testing for Measurement of Creep Properties of Zr-2.5Nb Alloy", Transactions of the KSME A, Vol.27, No.1, pp.94~101
- [6] Kee Bong Yoon, Tae Gyu Park, Sang Hoon Shim and Ill Seok Jeong, 2001, "Assessment of Creep Properties of 9Cr Steel Using Small Punch Creep Testing," Transactions of the KSME A, Vol.25, No.9, pp.1493~1500.