

< 논문 >

소형편치 시험법을 이용한 Al 2024 ECAP 재료의 강도특성 평가

마영화* · 최정우* · 김선화** · 윤기봉†
(2005년 6월 15일 접수, 2005년 12월 19일 심사완료)

Assessment of Strength Characteristics of Al 2024 ECAP Metal Using Small Punch Testing

Young Wha Ma, Jeong Woo Choi, Seon Hwa Kim 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

When subjected to severe shear deformation by ECAP, microstructure of Al2024 becomes extremely refined. 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 $\phi 12$ 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.

1. 서론

금속재료의 결정립도가 작아지면 이론적으로 강도와 인성이 향상된다. 최근에 나노기술(nano technology)에 대한 관심이 증가되면서 재료분야의 연구에서도 마이크론 수준의 미세한 결정립을 갖는 나노구조재료의 연구 및 기계적 강도 특성 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 나노구조재료를 얻기 위한 방법으로 잉곳(ingot) 상태에서 얻어진 재료를 가공 열처리하는 방법, 분말 야금법, 기계적 합금화에 의한 방법 등이 있다. 이 중 소량이 아닌 충분한 양의 구조재료를 단 시간

내에 얻을 수 있는 방법은 잉곳 공정에 의한 방법이 가장 적합하다. 잉곳 공정법은 공정중의 부피 감소 및 안정된 5 μ m 이하의 결정립을 만들기 어려운 단점 등이 있었지만 최근에 이러한 단점을 보완하여 새로운 초미세 결정재료의 제조 방법으로서 심한 소성변형에 의한 강소성 가공(severe plastic deformation) 방법이 개발 사용되고 있다.^(4,5) 강소성 가공법에는 STS(severe torsional straining), ECAR(equal channel angular rolling), ARB(accumulative roll-bonding), ECAP(equal channel angular pressing) 등이 있으며,^(1,2,6) 본 연구에서는 ECAP 법(등통로각압축법 또는 구속 강전단변형법)으로 제작한 재료를 사용하였다. ECAP 법은 다결정 일반 금속재료에 유효변형률 1.0 이상의 심한 전단 변형을 가하여 나노구조재료로 변환시킨다. 이 방법은 재료의 단면적 감소 없이 매우 큰 변형량을 부여함이 가능하고 공정 후에도 재료 내부에 기공이 발생하지 않는 균일한 나노구조재료를 얻을 수 있는 장점이 있다.^(1,2,6) 하

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

* 회원, 중앙대학교 대학원

** 순천향대학교 신소재공학부

지만 ECAP 에 의해 성형 가공된 재료는 이방성을 가지며,⁽⁶⁻⁹⁾ 가공 횟수에 따라 강도 값이 변하게 된다.⁽⁶⁾ ECAP 으로 얻은 재료의 강도 특성에 대한 많은 연구가 수행되었으나 가공방향인 길이방향으로의 강도 이방성에 관한 연구는 없다. ECAP 가공된 재료는 보통 가공 길이방향과 횡방향 크기가 대략 100 mm 와 10 mm 정도의 크기를 갖게 된다. 그러므로 길이방향으로는 소형 인장 시편 가공이 가능하나 횡방향으로는 인장시편의 가공이 어렵다. 이러한 이유 때문에 현재 ECAP 나노구조재료의 기계적 강도특성의 평가 결과는 길이방향의 강도 특성에 대해서만 보고되고 있다. 따라서 길이방향의 강도에 비해 횡방향의 강도 특성이 어떻게 변하는지 연구할 필요성이 있다.

본 연구에서는 소량의 재료만으로도 일축 인장 시험으로부터 측정되는 강도 값을 간접적으로 평가할 수 있는 방법인 소형 펀치(small punch, SP) 시험법을 사용하여 ECAP 재료의 횡방향 강도 평가를 시도하였다. 또한 ECAP 가공하여 결정립을 미세화한 Al 2024 재료의 길이방향에 대해서도 SP 시험으로 강도를 평가하였으며, SP 시험 결과와 비교하기 위해 길이방향에 대해서는 일축 인장시험을 수행하였다. SP 시험으로부터 측정된 하중-변위 곡선 결과는 타 연구자들에 의해 제안된 강도 예측식⁽¹⁰⁻¹³⁾을 사용하여 강도 값을 평가하였다. 이러한 평가 결과를 통해 기존의 평가 방법의 문제점을 제시하였고, 개선방법 및 향후 연구방향에 대해 고찰하였다.

2. 소형펀치시험에 의한 강도 평가

SP 시험법은 작은 크기의 금속재료로 연취성 천이온도를 평가하기 위해 개발된 방법으로 최근에는 일축 인장물성 및 크리프 파단 수명 평가 등에도 응용되고 있다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 유럽공동연구에서는 SP 시험으로부터 측정되는 하중-변위 곡선 결과로부터 인장강도 값을 평가하기 위해서 항복강도와 인장강도가 동일한 탄성-완전소성 재료에 대해 수치해석적 연구를 수행하여 강도 예측식을 제안하였다.⁽¹⁰⁾ Mao 등은 SP 시험으로부터 측정되는 하중-변위 곡선 결과로부터 항복 및 인장강도 예측식을 제안하였고,⁽¹¹⁾ Hankin 등은 오스테나이트 합금에 대해 실린더형상의 펀치를 사용하여 전단강도를 평가하였다.⁽¹²⁾ Leon 등은 Hankin 에 의해 제안된 평가식을 복합재료의 강도평가에 적용하였다.⁽¹³⁾

유럽공동연구 결과 탄성-완전소성 재료에 대해 SP 시험으로부터 측정되는 최대하중 값으로부터 재료의 강도를 평가하기 위한 식 (1)이 제시되었

다. 식 (1)은 항복강도와 인장강도가 동일한 경우에 대한 평가식이다.

$$\sigma_y = \frac{P_{max} + 49.2}{2.35 \times 10^{-6}} \quad (1)$$

여기서, σ_y 는 재료의 항복 강도이고, P_{max} 는 SP 시험으로부터 측정된 최대 펀치 하중을 나타낸다.

Mao 등은 대부분의 금속의 구성방정식이 멱급수 형태로 가정되므로 최대 펀치 하중과 인장강도, SP 곡선에서 비선형이 발생할 때의 펀치하중과 항복강도와의 관계식 정립에 관한 연구를 수행하여 식 (2), (3)의 평가식을 제안하였다.⁽¹¹⁾

$$\sigma_y = 360 \left(\frac{P_y}{t_o^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{UTS} = 130 \left(\frac{P_{max}}{t_o^2} \right) - 320 \quad (3)$$

여기서 σ_y 는 재료의 항복강도, σ_{UTS} 는 인장강도, t_o 는 시험편 초기 두께, P_{max} 는 최대 펀치 하중, P_y 는 SP 시험 하중-변위 곡선의 초기 비선형 발생시의 하중이다. 즉, 식 (2)의 항복하중은 초기 탄성 변형구간의 접선과 소성급형 변형구간의 접선이 만나는 점의 펀치하중에 의해 결정된다.⁽¹¹⁾ SP 시험의 항복하중 및 최대하중을 결정하는 방법을 Fig. 1 에 나타내었다. 위에 설명한 식 (1) ~ (3)의 평가식들은 구형의 펀치를 사용하여 연성 파괴가 발생하는 재료에 대한 강도 예측 평가식들이었다. 즉, SP 시험 동안 상당한 처짐변형이 발생한 후에 변형이 가장 많이 발생한 위치에서 네킹이 발생하여 파단이 발생하는 파손형태의 연성재료에 대해 적용 가능한 평가식이다.

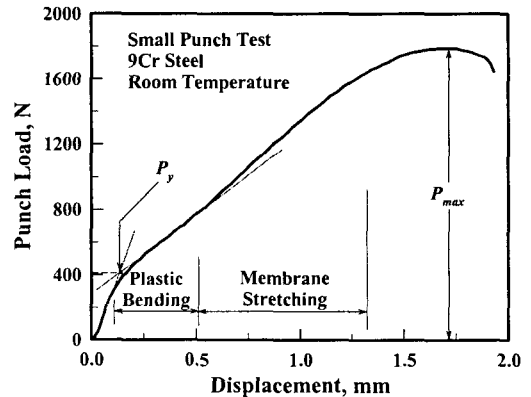


Fig. 1 Load-displacement curve of small punch test for ductile material and definition of P_y and P_{max} by Mao⁽¹²⁾

Hankin 등은 구형 펀치가 아닌 실린더형의 펀치를 사용하여 전단펀치시험을 수행하여 오스테나이트계합금에 대한 유효전단 강도와 인장강도 사이에 선형적인 관계가 있음을 보였다.⁽¹²⁾ 유효전단 강도는 식 (4)~(5)와 같다.

$$\tau_{sy} = \frac{P_{sy}}{2\pi r t} \quad (4)$$

$$\tau_{sm} = \frac{P_{sm}}{2\pi r t} \quad (5)$$

여기서, τ_{sy} 와 τ_{sm} 은 전단력에 의한 전단항복강도와 최대 전단 강도, P_{sy} 와 P_{sm} 은 전단항복하중과 최대전단하중, r 은 실린더 펀치의 반경, t 는 시험편 두께이다. 또한, Leon 등은 Hankin에 의해 제안된 평가식을 Al/Ni-SiC 복합재료의 강도 예측에 적용하였으며,⁽¹³⁾ 이때 유효전단강도 τ_{sy} 와 τ_{sm} 은 인장시험에서 측정된 항복 및 인장강도 τ 사이의 관계를 식 (6)과 같이 제시하였다. 여기서 C 는 보정계수(correlation coefficient)이다.

$$\tau_{sy,sm} = C\tau \quad (6)$$

3. 실험 방법

3.1 실험재료 및 시편가공

본 연구에 사용된 재료는 Al 2024로서 AISI 규격에 따른 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 시험재료는 과시효(over ageing) 시킨 원재를 150°C에서 3회 ECAP 가공하여 결정립도를 미세화하였다. ECAP 성형 가공한 봉재의 길이방향 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. 2에 나타내었다. 시험편은 와이어 절단에 의해 10x10x0.7 mm로 가공하였다. 시험편 최종 두께는 0.5 mm이므로 절단 가공된 0.7 mm 두께의 시편을 연마지를 사용하여 0.5 mm까지 표면 연마하였다. 표면 조도의 영향을 최소화하기 위해 최종 연마는 1200 Grit 연마지를 사용하여 마무리 하였으며, L-시편의 경우는 최종 연마에 의한 연마 흠집 방향을 횡방향과 일치하도록 하였다.

3.2 인장시험

일축 인장시험의 채취가 가능한 ECAP 가공 길이방향으로는 인장시험을 수행하였다. ECAP 가공으로 얻은 재료는 횡방향 크기가 10 mm이었으므로 인장시편 가공이 어려워 본 연구에서는 100

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.

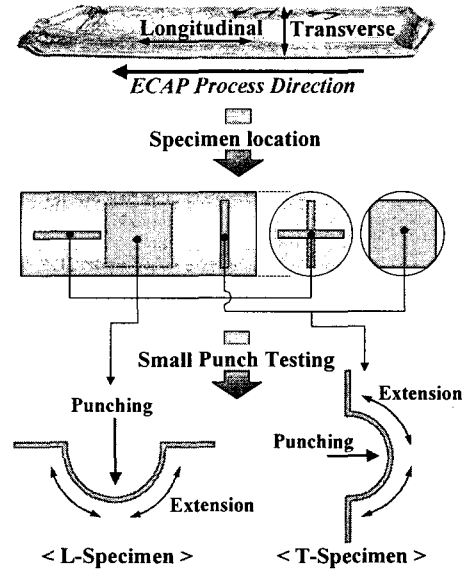


Fig. 2 Specimen machining and directions of small punch testing for L- and T-specimens

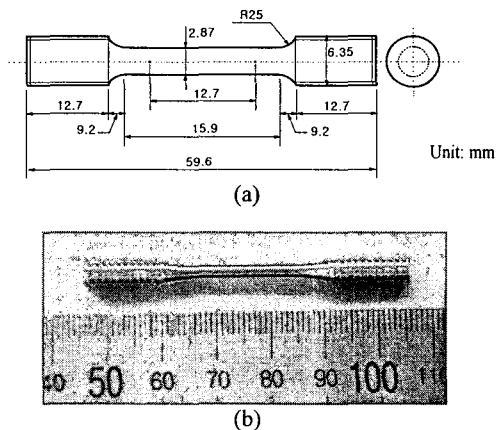


Fig. 3 Subsize uniaxial tensile specimen of longitudinal direction, (a) geometry of uniaxial tensile specimen; (b) uniaxial tensile specimen

mm 길이를 갖는 길이방향에 대해서만 일축 인장시험을 가공하였다. ECAP 가공 방향인 길이방향에 대해 가공된 일축 인장시험편의 형상 및 치수를 Fig 3에 나타내었다.

Table 2 Measured tensile properties of Al 2024 ECAP metal in L-direction (* $\epsilon_{plastic} = D\sigma^m$)

E (GPa)	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	D (MPa ^{-m})	m	Reduction of Area (%)	Elongation (%)
74	462	514	1.624×10^{-58}	20.65	39	10

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 2 개의 시험편에 대해 수행하였다.

3.3 소형펀치시험

SP 시험은 ASTM E643-84(2000)에 준하여 MTS Sintech 5/G 30 kN 용량의 소형재료 시험기를 사용하여 수행하였다. SP 시험 지그(jig)의 단면 형상을 Fig. 4 에 나타내었다. 시험편은 3.1 절에 설명한 10x10x0.5 mm 시편을 사용하였다. 하중을 가한 볼의 직경 d 는 2.4 mm, 하부 다이의 내경 a 는 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 길이 방향과 횡방향에 대해 동일한 조건으로 3 회씩 실시하였다. SP 시험 중 시험편의 변형과정과 파손모드를 관찰하기 위해 길이방향 시험의 경우 하중-변위 곡선에서 하중이 갑자기 증가하는 지점, 최대하중에 근접한 지점에서 각각 시험을 일시 중단하여 시험편의 변형 및 파손 특성을 관찰하였다. 횡방향 시험에 대해서는 하중-변위 곡선의 최대하중 지점에서만 시험을 일시 중단하여 시험편을 관찰하였다.

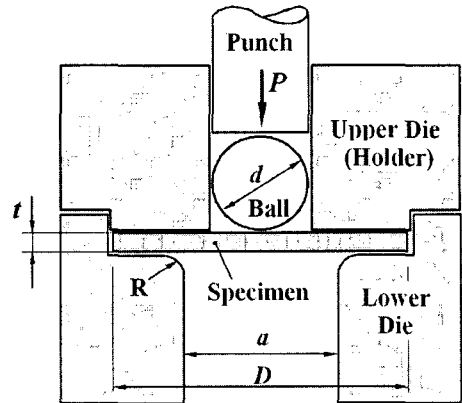


Fig 4 Schematic diagram of small punch creep testing jig

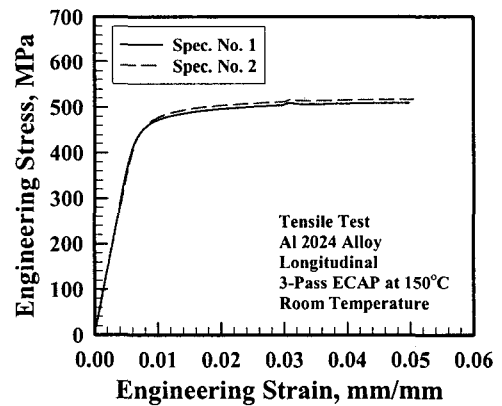


Fig. 5 Nominal stress-strain results of the tensile tests of Al 2024 ECAP metal

4. 결과 및 고찰

4.1 하중-변위곡선 측정 결과

Al 2024 ECAP 재료의 길이방향 일축인장 시험 결과 얻은 공칭응력-공칭변형률 곡선을 Fig. 5 에 나타내었고, 진응력-진소성변형률 데이터를 Fig. 6 에 도시하였다. 이로부터 측정된 인장 및 소성상수 값은 Table 2 에 정리하였다. 측정 결과로부터 ECAP 가공한 Al 2024 는 항복강도가 462 MPa, 인장강도가 514 MPa 로서 인장강도가 항복강도에 비해 11.2% 밖에 증가되지 않아 ECAP 가공에 의해 높은 가공 경화가 발생하였음을 알 수 있다. 또한

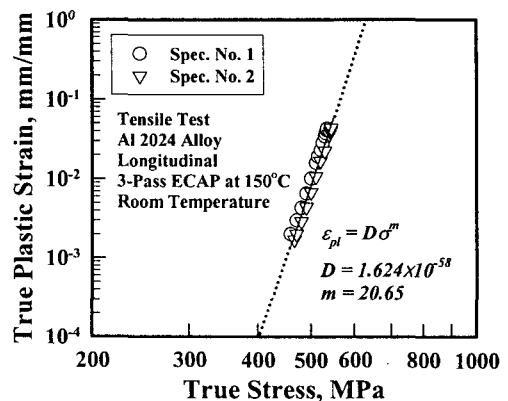


Fig. 6 True stress-true plastic strain data for determining the plasticity constants of Al 2024 ECAP metal

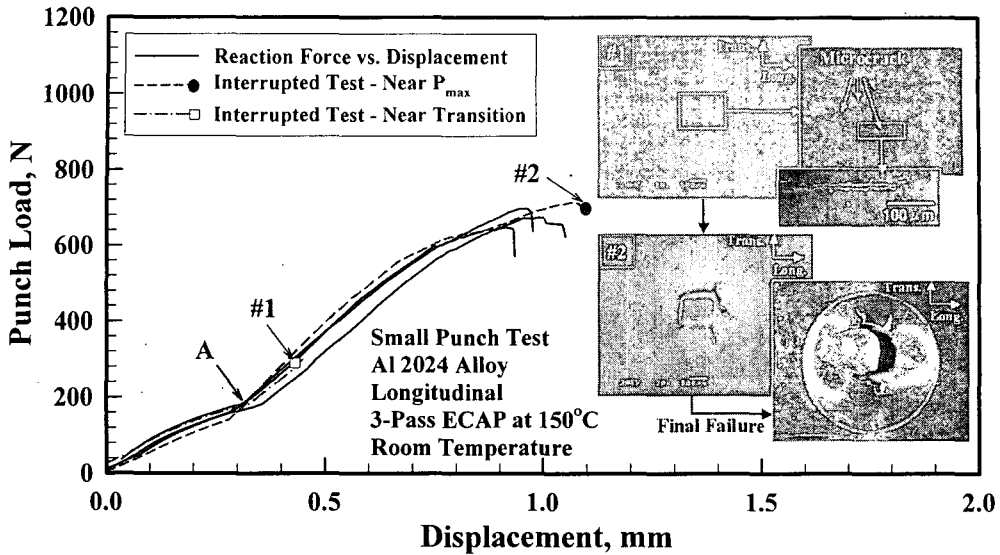


Fig. 7 Small punch test results of the L-specimens of Al 2024 ECAP metal

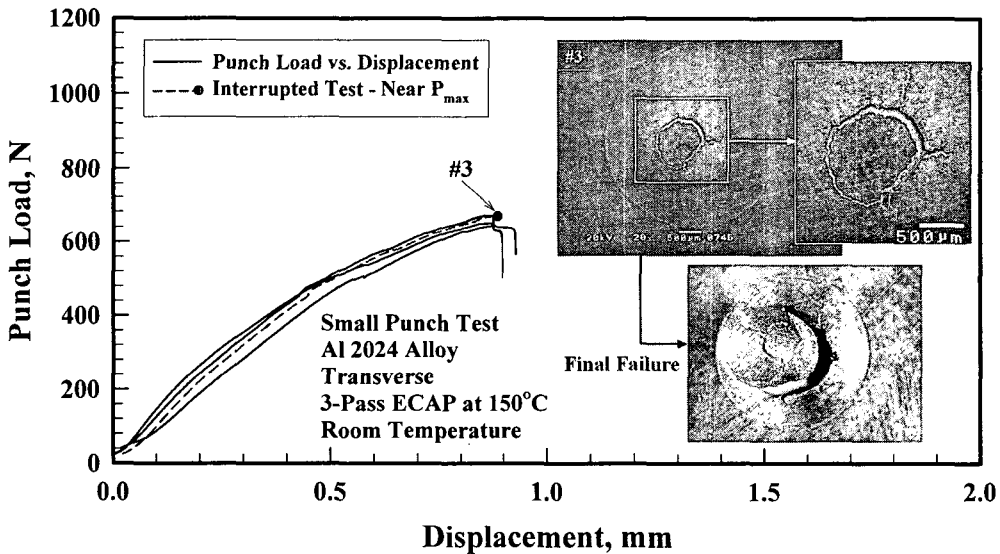


Fig. 8 Small punch test results of the T-specimens of Al 2024 ECAP metal

연신률은 10%로서 연성이 거의 소진된 재료 특성을 나타내고 있다. Fig. 6은 재료의 소성상수를 결정하기 위해 진응력-진소성변형률 데이터를 로그(log) 좌표상에 표현한 것이며 상호관계를 멱급수 법칙에 따른다고 가정하여 소성 상수를 결정하는 과정을 표시한 그래프이다.

길이방향에 대한 일축인장 시험 중에는 길이방향 변형이 발생하며, Fig. 2에 나타난 SP 시험의 길이방향 L-시편의 경우에도 길이방향의 변형(extension)이 발생하므로 이 두 시험을 유사한 시험으로 간주할 수 있다. Al 2024 ECAP 재료의 길이방향 L-시편 및

횡방향 T-시편에 대해 SP 시험 결과 얻은 하중-변위 곡선 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. 또한 일시 중단시험(interrupted test) 결과도 함께 도시하였다. SP 시험 결과 T-시편 및 L-시편의 하중-변위 곡선 형태가 서로 다를 수 있다. SP 시험의 전형적인 하중-변위 곡선의 형상은 Fig. 1에 보인 바와 같이 초기 탄성영역, 소성굽힘영역(plastic bending), 멤브레인 신장(membrane stretching) 영역 및 최대하중점에서의 파단으로 나눌 수 있다.⁽¹⁸⁾ 하지만 SP 시험 하중-변위 곡선의 이러한 영역 분류는 시험 재료가 큰 연성을 가지고 있어 멤브레인 신장 발생후 파단

이 발생⁽¹⁸⁾하는 경우에만 유효하다. 본 연구재료와 같이 연성이 소진된 경우에는 멤브레인 신장 또는 소성굽힘 영역의 변형중에 균열 발생에 의한 파단이 발생하므로 하중-변위 곡선의 형상은 달라지게 된다. 길이방향 L-시편의 SP 시험 결과를 보면 Fig. 7에 보인 바와 같이 하중-변위 곡선에 천이영역 Fig. 7 A 점이 나타났으나 이는 Fig. 1의 소성굽힘 영역과 멤브레인 신장 영역의 경계 영역과는 그 성격이 다르다. 즉, 길이방향 L-시편 SP 시험의 하중-변위 곡선 천이 영역은 가공 경화에 의한 시험재료의 이방성 영향으로 나타난 것이며, 연성재료의 SP 시험에서 나타나는 멤브레인 신장 때문에 발생하는 천이영역과는 다른 현상이다. AI 2024 ECAP 재료는 연성이 부족하므로 소성굽힘이 발생하는 단계에서 이미 시편 하부에 균열이 생성되고 이 균열이 성장하면서 파손되므로, 연성이 충분한 경우어나 발생이 가능한 멤브레인 신장 영역 현상이 나타나기 전에 파손이 먼저 발생하는 것이다. 또한 재료의 이방성 때문에 균열의 발생 현상도 소성변형이 심한 길이방향과 일치하는 균열이 소성굽힘 변형 초기에 우선 발생하게 된다. 균열은 Fig. 7에 보인 바와 같이 하중이 가해지는 볼 접촉부의 반대쪽 시편 표면상에 횡방향 축에서 발생한다. 즉, 길이방향 L-시편의 경우 천이영역 이전에는 위에 설명한 길이방향 균열이 주로 발생하며, 천이영역 이후에는 횡방향축 비균열부와 균열이 발생하지 않은 길이방향 축의 재료가 SP 하중을 받게 되면서 SP 하중이 증가하게 된다. 이와 같은 파손기구를 확인하기 위해 일시 중단시험을 실시하고 시편상태를 관찰하였다.

Fig. 7의 #1 시편은 SP 하중-변위 곡선이 천이영역을 지난 후에 중단하여 하중을 받는 반대쪽 시편 표면을 관찰한 결과이다. 사진에 보인 바와 같이 편치하중을 받는 반대쪽 시편 표면에 ECAP 가공방향인 길이방향과 평행하게 크고 작은 여러 개의 균열이 생성된 것을 관찰할 수 있다. 이는 ECAP 가공에 의해 가공방향으로 가공경화가 발생하여 재료가 방향성을 갖게 되며, 길이방향 강도가 횡방향 강도보다 높기 때문에 횡방향에 수직인 길이방향 균열이 먼저 생성되게 되는 것이다. 최대하중 점에서 시험을 멈춘 #2 시편을 관찰하여 보면 길이방향 균열이 성장한 후에 길이방향에 수직인 횡방향으로도 균열이 생성되어 길이방향 균열과 연결되는 것을 관찰할 수 있다. 최종 파단 형태를 보면 하중을 받는 반대쪽 시편 표면의 직사각형 균열형상과 달리 하중을 받는 쪽의 파면형상은 원형이다. 즉, 실험 초기 길이방향의 표면균열이 발생한 이후 축대칭 형상으로 균열이 성장하여 파단됨을 알 수 있다. 최종 파단 양상을 Fig. 9

에 보였다. 길이방향 L-시편에 대한 SP 시험 결과 AI 2024 ECAP 재료는 길이방향과 횡방향의 기계적 강도가 서로 다른 이방성 재료거동 특성을 보였으며, 또한 길이방향 강도가 횡방향 강도에 비해 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 횡방향 T-시편에 대한 SP 시험 결과로서 하중-변위 곡선상에 소성굽힘 변형 이후 멤브레인 신장 상태의 변형이 나타나지 않았다. 이는 소성굽힘 변형이 발생하는 도중에 균열이 먼저 발생 및 성장하여 멤브레인 응력 상태에서의 하중 증가 현상이 나타나지 못하고 파괴가 발생되기 때문이다. 이를 확인하기 위해 최대하중 지점에서 시험을 중단하여 시편을 관찰하였다. 관찰 결과 하중을 가한 시편 반대쪽 표면에 약 1 mm 정도의 직경을 갖는 원형 균열이 발생하였으며, 시편의 원주방향을 따라 균일하게 형성된 균열을 관찰할 수 있었다. 이는 길이방향 L-시편과는 전혀 다른 파면 양상이다. 즉, 횡방향 T-시편은 등방성 재료의 파면양상을 보인다. 최종 파면 형상을 보면 L-시편과 T-시편 모두 균열이 원주방향을 따라 원형으로 성장하여 파단 되었음을 알 수 있다.

4.2 파면의 SEM 관찰결과

SP 시험을 종료한 후의 길이방향 L-시편 및 횡방향 T-시편 형상을 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다 또한 파면의 몇몇 주요 위치에서 SEM 파면사진을 나타내었다. Fig. 9는 길이방향 L-시편에 대해 SP 시험후 파면을 SEM으로 관찰한 것이다. 앞 절에 설명한 것과 같이 파손이 발생한 시나리오는 T1' 부위에서 균열이 먼저 발생하였고 T2', L1, L3 부위가 하중을 지탱하다가 최대하중 근처에서 L1→T2' & L2 순서로 파단이 발생하게 되는 것이다. 관찰 결과 균열이 시작된 T1'영역은 크기 400~1200 nm 정도의 딥플(dimple)이 관찰되었으며, 이 딥플은 변형(elongated)되지 않은 등축성(equiaxed) 딥플로서 이 균열이 수직인 응력이 작용한 초기 균열임을 나타낸다. 이러한 딥플은 길이방향의 일축인장 시험편의 파면에서 관찰되는 Fig. 11의 딥플 형상과 유사하다. 인장시편 파면의 딥플 크기는 400~1000 nm 정도 이었다. 이는 Fig. 7에 보인 #1-시편 중단 실험에서 관찰된 횡방향축에 길이방향과 평행하게 발생한 초기 균열이 시험편 표면의 스트레칭(stretching)에 의해 발생한다는 증거가 된다. T2' 영역에서는 이러한 등축성 딥플이 파손 진행중에 심하게 늘어지면서 문드러진 형상을 보여주고 있다. 그러나 L-시편의 길이방향축 파면인 L1 영역에서는 타원형으로 늘어난 딥플이 관찰된다. 이는 전단변형에 의해 균열이 생기면서 딥

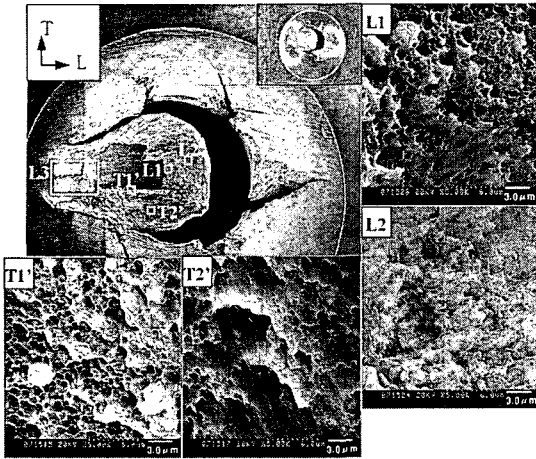


Fig. 9 SEM observation of the tested SP L-specimen of Al 2024 ECAP metal

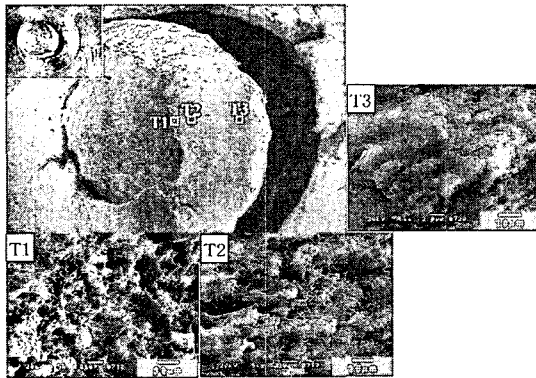


Fig. 10 SEM observation of the tested SP T-specimen of Al 2024 ECAP metal

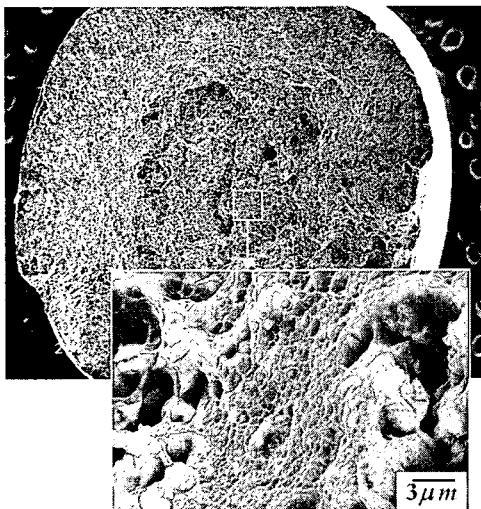


Fig. 11 SEM observation of fracture surface of the tensile specimen on L-direction of Al 2024 ECAP metal

플이 늘어지기 때문이다. L2 영역은 덩플의 늘어난 형상이 더 커지면서 T2' 영역과 마찬가지로 파면이 완전한 전단 변형에 의해 파손된 것을 보여주고 있다. Fig. 9의 결과로부터 Al 2024 ECAP 재료의 길이방향 L-시편은 SP 시험중 초기 균열 개시 시점을 제외한 대부분의 시험동안 주요 변형모드가 전단 변형임을 알 수 있다. Fig. 10은 횡방향 T-시편의 SP 시험후 파면을 관찰한 결과이다. 여기서는 균열 발생 초기 단계인 T1 영역에서도 타원형의 늘어난 덩플이 관찰되었고, 덩플의 한쪽이 열려 있어서 전단응력을 받았음을 알 수 있다. T2, T3 영역으로 갈수록 덩플의 늘어난 길이도 길게 나타났으므로 전단변형이 계속 진행되었음을 알 수 있다. 특히, T3 영역에서는 덩플을 관찰할 수 없을 정도로 심하게 문드러진 양상을 보이고 있다. 횡방향 T-시편인 Fig. 10에서는 파면양상이 균열의 원주방향으로 거의 동일한 축대칭 양상을 보였다.

4.3 인장강도 평가

Fig. 7 ~ Fig. 8의 SP 시험 결과 측정된 최대 하중은 길이방향 L-시편의 경우 674 N, 횡방향 T-시편의 경우 655 N 이었다. 항복하중은 Mao에 의해 제안된 방법으로 측정하였으며, 측정된 항복 하중은 횡방향 T-시편의 경우 193 N 이었다. 길이방향 L-시편의 경우 이방성 영향에 의한 초기 소성굽힘 변형 형태의 곡선 이후 실제 소성굽힘 영역에서 탄성 영역의 기울기를 찾기 어려워 항복하중 측정을 제외하였다. 측정된 하중 값들을 2절에서 설명한 강도 예측식들에 대입하여 강도 특성을 평가하였다. 결과는 Table 3에 나타내었으며, 평가 결과의 정확도에 대한 기준 값인 길이방향 일축인장 시험 결과도 함께 나타내었다. 평가 결과의 정확성을 살펴보기 위해 먼저 길이방향 인장시험과 유사한 시험조건으로 간주된 L-시편의 SP 시험 결과를 인장시험 결과와 비교하여 보면, 제안된 강도 예측 평가식들을 사용한 평가 값이 실제 강도값과 오차가 많이 남을 알 수 있다. Hankin의 평가식은 편치의 형상이 다른 데서 오는 평가 오차이다. FIPCA와 Mao의 평가식에 의한 인장강도 값이 현저히 다른 것은 본 재료의 경우 멤브레인 신장에 의한 연성과파단이 아닌 전단파괴 형상으로 파단이 발생하기 때문이다. 즉, 제안된 강도 예측식들은 2절에 설명한 바와 같이 충분한 굽힘 처짐이 발생한 멤브레인 신장 상태에서 볼직경 크기의 원주상의 가장 약한 부위에서 두께 감소가 발생하여 파단에 이르는 연성재료에 대한 강도 평가 방법들이기 때문에 파손모드가 전단 변형인 본 연구 대상 재료인 Al 2024 ECAP 재료에는 적용이 어려움을 확인하였다. 이는 Fig. 9 ~ Fig. 12의 SEM 관찰 결과에서 확인할 수 있다.

Table 3 Strength characteristic of Al 2024 ECAP material in L- and T-direction

	Longitudinal direction				Transverse direction		
	Tensile Test	SP tests			SP tests		
		FIPCA	Mao	Hankin	FIPCA	Mao	Hankin
σ_{ys} (MPa)	462	308	-	-	300	278	-
σ_{UTS} (MPa)	514		30	179		21	174

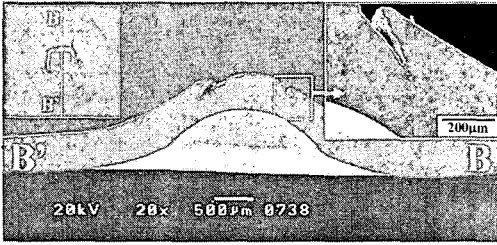


Fig. 12 Cross-section of the interrupted Small punch test specimen of L-specimen of Al 2024 ECAP metal

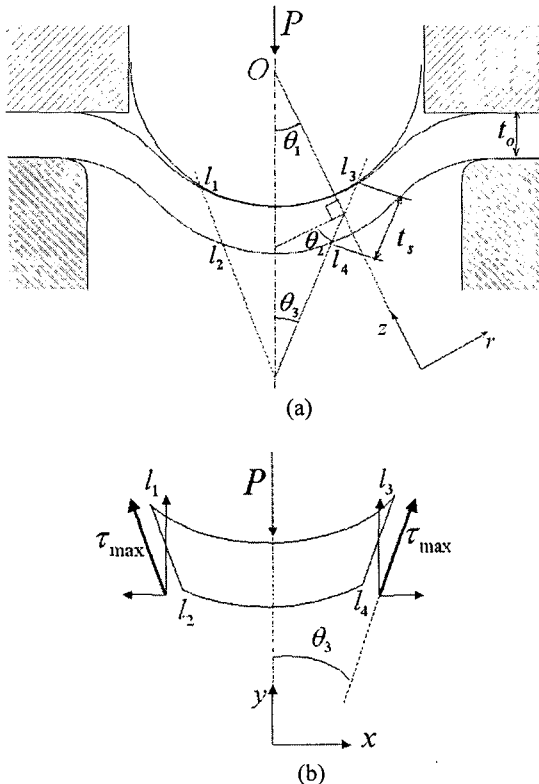


Fig. 13 Measuring parameters for assessing the strength characteristics

Fig. 7에서 보인 길이방향 L-시편에서 #2-중단시험 시편을 횡방향으로 절단하여 절단된 단면을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 균열은 약 45° 방향으로 경사지게 성장하였음을 알 수 있다. 따

라서 SP 시험 결과 측정된 하중은 인장모드에 의한 파손이 아닌 전단모드의 파손을 지탱하는 하중으로 볼 수 있다. 이는 Fig. 9 및 Fig. 10에서도 균열이 발생한 파면이 두께방향으로 경사져 있는 것으로도 확인할 수 있다.

위 고찰 결과들을 토대로 정량적으로 강도값을 평가하였다. 단, Al 2024 ECAP 재료의 SP 시험결과 얻은 하중-변위 곡선에서 소성굽힘/천이/멤브레인 신장 영역의 구분이 명확하지 않으므로 Mao 등에 의해 제안된 항복하중 결정이 어려워 SP 시험의 최대하중에 의한 인장강도 특성만을 평가하였다. 이때 SP 시험으로부터 측정된 최대 하중은 소성굽힘 변형 동안 파손이 발생한 실험 결과로부터 얻어진 값이므로 인장실험 결과 얻은 항복강도와 인장강도의 중간 값인 소성유동응력과 비교하였다

SP 시험동안 시편 두께는 일정하고, 편치하중은 하부 다이의 홀 직경에 해당하는 시편부위의 변형에만 관련된다고 가정하면, 편치 중심으로부터 임의의 거리 r만큼 떨어진 점에서의 소성유동응력은 다음 식 (7)로 표현된다.⁽¹⁹⁾

$$\sigma_f = \frac{\sigma_r}{\ln\left(\frac{2r}{a}\right)} \quad (7)$$

여기서 σ_f 는 소성유동응력, r은 시편 중심으로부터 임의의 반경방향 거리, σ_r 은 Fig. 2에 나타난 변형(extension) 방향의 스트레칭 응력, a는 하부 다이의 홀 직경이다. SP 시험으로부터 강도값을 평가하기 위해 앞에서 설명한 SP 시편의 파손모드를 기초로 평형방정식 식 (8)을 얻었다. 측정변수들을 Fig. 13에 나타내었다. 이때 최대 하중점에 도달하기 전까지 균열이 발생하지 않는다고 가정하였다. SP 시편 파면의 원주방향 길이는 L-시편의 경우 가공경화에 의한 이방성 영향으로 시편 중심으로부터 파면까지의 평균반경의 자취가 타원형의 형상이므로 식 (9) 두 번째 항으로 표현할 수 있다.

$$P_{max} - (\tau_{max} A_s) \cos \theta_3 \approx 0 \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} A_s &\cong l_m t_s \\ l_m &\cong \pi \left(\frac{5}{4} (r_m^L + r_m^T) - \frac{r_m^L \cdot r_m^T}{r_m^L + r_m^T} \right) \\ t_s &\cong \frac{t_o}{\sin \theta_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

여기서 A_s 는 전단면 파면의 면적, l_m 은 SP 시편 파면의 원주방향 평균 길이이다. r_m^L 과 r_m^T 은 시편 중심으로부터 길이방향 및 횡방향측 파단면까지의 반경방향 평균 거리이며, T-시편의 경우 등방성 재료의 파면형상을 가지므로 $r_m^L = r_m^T$ 이다. 따라서 T-시편의 원주방향 길이 $l_m = 2\pi r_m^T$ 이다. t_o 는 시험편 초기 두께, t_s 는 전단면 파면의 길이로서 $l_1 l_2$ 또는 $l_3 l_4$ 의 길이이다. 식 (8)을 정리하면, 최대 전단응력에 관한 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{A_s \cos \theta_3} \quad (10)$$

따라서 다축 응력 상태에서의 최대 전단응력이 최대 주응력의 1/2 임을 고려하면, 시편 중심으로부터 파단면까지의 평균 반경방향 거리에서의 소성유동응력은 식 (11)로 표현할 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{\left[\frac{2P_{\max}}{A_s \cos \theta_3} \right]}{\ln \left(\frac{2r_m}{a} \right)} \quad (11)$$

여기서 $r_m = (r_m^T + r_m^L)/2$ 이고, 횡방향 T-시편의 경우 $r_m^T = r_m^L$ 이므로 $r_m = r_m^T$ 이다. 식 (11)에서 L- 및 T-시편 모두 $\theta_2 \cong 45^\circ$ 로 가정하면 소성유동응력은 최대 펀치하중과 시편중심으로부터 파단면까지의 평균 반경방향 거리의 함수로서 식 (12)와 같이 간단한 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_f \cong \frac{0.49P_{\max}}{r_m (\ln r_m - 0.69)} \quad (12)$$

SP 시험 후 식 (9)에 포함된 측정 변수들을 파단된 시험편에 대해 이동식 현미경을 사용하여 측정한 결과 r_m 은 횡방향 T-시편의 경우 0.54 mm, 길이방향 L-시편의 경우 0.55 mm(길이방향측 $r_m^L = 0.62$ mm, 횡방향측 $r_m^T = 0.48$ mm)이었다. θ_1 은 T-시편의 경우 21.9°, L-시편의 경우 22.3°(길이방향측 25.4°, 횡방향측 19.2°)이므로 θ_2 는 T-시편 23.1°, L-시편 22.7°(길이방향측 19.6°, 횡방향측

Table 4 Quantitative Strength characteristic of Al 2024 ECAP material in longitudinal and transverse direction

	Long. Dir.		Trans. Dir.
	Tensile Test	SP test	SP test
Flow Stress (MPa)	488	466	455

25.8°)이다. 식 (12)를 사용해서 Al 2024 ECAP 재료의 길이방향 및 횡방향에 대한 강도값을 평가한 결과를 Table 4에 정리하였다. 횡방향 T-시편 강도값은 455 MPa, 길이방향 L-시편 강도값은 466 MPa로서 강도값의 차이가 작았다. 길이방향 일축인장 시험 결과 얻은 강도값과 이와 유사한 시험으로 간주할 수 있는 길이방향 L-시편의 SP 시험으로부터 예측된 강도값을 비교해 보면 SP 시험으로 예측된 값이 인장시험 결과 얻은 강도값 보다 22 MPa 낮게 평가되었다. 즉, SP 시편으로 구한 길이방향 강도값은 일축인장 시험으로 구한 강도값 보다 4.5% 정도 낮은 강도값이 얻어졌다. 따라서 횡방향에 대한 강도값 측정 결과에도 4.5% 오차범위 내에서 신뢰성을 부여할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Al 2024 ECAP 재료의 강도 특성을 평가하기 위해 소형펀치(small punch, SP) 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Al 2024 ECAP 재료의 길이방향 및 횡방향 SP 시험편의 파단 과정을 밝힘으로써 ECAP 재료의 경우 SP 시험으로부터 측정되는 하중-변위 곡선 결과로부터 강도값을 예측하는 기존의 평가식들이 부적절함을 보이고, 새로운 강도 평가식을 제안하였다.

(2) 정량적인 강도값을 평가한 결과 SP 시험으로 구한 길이방향 강도값은 일축인장 시험으로 구한 강도값 보다 4.5% 작은 강도값이 얻어졌다. 따라서 횡방향에 대한 강도값 측정 결과에도 이에 해당하는 오차범위 내에서 신뢰성을 부여할 수 있다.

(3) Al 2024 ECAP 재료의 길이방향 및 횡방향 SP 하중-변위 곡선 형상은 다르지만 평가된 강도값은 거의 동일하였다. 즉, 횡방향 강도값이 길이방향 강도값에 비해 2.3% 작았다.

(4) 이방성 ECAP 재료의 횡방향 강도값의 정확성을 평가하기 위해서는 향후 횡방향 초소형(micro scale) 일축 인장시험을 수행하여 본 논문에 제시된 강도 평가식의 정확도를 확인할 필요성이 있다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원(과제번호 R01-2005-000-10621-0, 2005) 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 주신 한국 기계연구원의 강석봉 박사님께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, Jeong Woo, 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) 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," *Journal of the Korean Institute of Metal & Materials*, Vol. 40, No. 2.
- (3) Ahn, S. H., Nam, K. W., Kim, J. H. and S. Kang, B., 2002, "Nondestructive Evaluation for Grain Refinement of Aluminum Alloy of Equal-Channel Angular Pressing," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 22, No. 2, pp. 132~139.
- (4) Seo, C. W., 1999, "Microstructure and Mechanical Characteristics of 5083 Al and 0.15%C steel by Equal-Channel Angular Pressing," ME Thesis, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Hanyang University
- (5) Ahn, B. D., Cho, H. S., Kim, J. L., Park, K. T. and Shin, D. H., 2004, "Grain Refinement of Structural Materials by Severe Plastic Deformation" *Trends in Metals & Materials Engineering*, Vol. 17, No. 2
- (6) 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," *Journal of the Korean Institute of Metals & Materials*, Vol. 39, No. 5
- (7) Patlan, V., Higashi, K., Kitagawa, K., Vinogradov, A. and Kawazoe, M., 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.
- (8) 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, Pages 4733~4741.
- (9) 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*, Volume 50, Issue 5, pp. 613~617.
- (10) 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"
- (11) 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.
- (12) Hankin, G. L., Toloczko, M. B., Hamilton, M. L., Garner, F. A. and Faulkner, R. G., 1998, *Journal of Nuclear Materials* 258A, 1657.
- (13) Leon, C. A. and Drew, R. A. L., 2002, "Small Punch Testing for Assessing the Tensile Strength of Gradient Al/Ni-SiC Composites," *Materials Letters* 56, pp. 812~816.
- (14) Kwon, K. H., Chae, S. W., Kwun, S. I., Kim, M. H. and Hwang, S. K., 2001, "Effect of Die Deformation and Channel Angle on Deformation Behavior of Material During Equal channel Angular Pressing with Pure-Zr," *Transactions of the KSME A*, Vol. 25, No. 11, pp. 1751 ~1758.
- (15) 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," *Transactions of the KSME A*, Vol. 27, No. 1, pp. 94~101.
- (16) 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," *Transactions of the KSME A*, Vol. 25, No. 9, pp. 1493~1500.
- (17) Park, T. G., Shim, S. H., Yoon, K. B. and Jang, C. H., 2002, "A Study on Parameters Measured during Small Punch Creep Testing," *Transactions of the KSME A*, Vol. 26, No. 1, pp. 171~178.
- (18) 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.
- (19) Kim, Young Seok, 2003, "Theory of Plasticity," Sigmapress, p. 414.