

공업용 순 알루미늄의 반통로각압출(Half Channel Angular Extrusion) 공정에서의 소성 변형 특성

Characteristics of Plastic Deformation of Commercially Pure Aluminum in Half Channel Angular Extrusion (HCAE)

김경진^{1,✉}, 조현덕¹

Kyung Jin Kim^{1,✉} and Hyun Deog Cho¹

¹ 경일대학교 기계자동차학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil Univ.)

✉ Corresponding author: kkj@kiu.ac.kr, Tel: +82-53-850-7301

Manuscript received: 2012.10.12 / Accepted: 2012.10.19

A novel severe plastic deformation process named half channel angular extrusion (HCAE) is proposed in order to produce bulk UFG materials. In HCAE process, equal channel angular extrusion (ECAE) and conventional forward extrusion process is integrated to increase the strain per pass and effectiveness of the SPD process. Three-dimensional finite element analysis was carried out to study the deformation behavior of the materials in the HCAE process. HCAE process was performed experimentally on commercially pure aluminum (AA1050) and micro-Vickers hardness test was used to measure the distribution of hardness on the section of normal to the extrusion direction. The results show that HCAE is able to impose more intensive strains per pass and give rise to higher micro-hardness than ECAE.

Key Words: Half Channel Angular Extrusion (반통로각압출), Severe Plastic Deformation (강소성 가공), UFG Materials (초 미세 결정립 소재), Finite Element Analysis (유한요소해석), Micro-Hardness (마이크로 경도)

1. 서론

결정립의 크기가 1 마이크로미터 미만, 혹은 나노미터 단위의 초미세 결정립 (Ultrafine-grain, UFG)을 가지는 소재는 강도 및 인성의 향상, 높은 성형성, 높은 내마멸성, 우수한 전자기적 특성 등 동일한 성분의 조대한 결정립을 가지는 소재에 비해 월등히 향상된 물리적, 기계적 성질을 갖고 있을 뿐만 아니라, 단순한 합금성분으로 산업적으로 필요한 기계적 성질을 구현할 수 있기 때문에 친환경 소재의 개발이라는 주제와 맞물려 많은 연구가 이루어지고 있다. 초미세 결정립을 제조하는 방법으로서 강소성 가공 (Severe plastic deformation)

공정은 대량의 소성 변형을 금속 내부에 축적시키는 기술로서 기존의 가공 열처리 또는 분말야금법에 비해 소재 내부의 결함, 다른 물질로 인한 오염을 방지할 수 있고, 균일한 미세조직 및 기계적 성질을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 공정의 변화없이 다양한 금속소재에 적용이 가능하기 때문에 등통로각압출 (Equal channel angular extrusion, ECAE),¹⁻¹² 반복접침압연 (Accumulative Roll Bonding)¹³⁻¹⁵ 등의 강소성 가공 공정이 연구되어 왔으며, 최근에도 새로운 강소성 공정의 개발에 대한 다양한 접근이 이루어지고 있다. 기존의 강소성 가공 공정 중 대표적인 방법인 등통로각압출 공정은 1 회 공정에서 소재에 가해지는 소성 변형량의 크기가 다른 공정

에 비해 크고, 비교적 균일한 변형을 가할 수 있으며 공정을 위한 장비가 간단하기 때문에 많은 관심을 받고 있으며, 최근 10 여년간 다양한 소재에 적용된 연구결과에 의해 초미세결정립 소재를 제조할 수 있음을 확인하였다. 등통로각압출 공정은 동일한 단면을 가지는 두 개의 채널(Channel)을 가지는 금형을 사용하여 이루어진다. 두 개의 채널은 일정한 각도(Φ)로 교차하는 형태를 가지며, 교차하는 채널의 외측부의 원호가 이루는 각(Ψ)을 만곡각이라고 한다. 공정을 거친 소재의 단면형상이 변화하지 않기 때문에 반복가공을 통하여 소재 내부에 변형에너지를 축적하여 나노미터 수준의 크기까지 결정립을 미세화시킬 수 있다. 하지만, 등통로각압출 공정은 연속 공정이 불가능하고, 일반적으로 나노미터 수준으로 결정립을 미세화시키기 위해서는 8 - 10 회의 공정을 반복해야 하기 때문에 생산성이 저하되어 시간과 비용이 과다하게 되는 문제가 발생하였다.¹⁶ 또한 최근의 연구에서 고경각 입계로 나뉘어진 등축성의 초미세 구조를 생성하고, 결정립 미세화의 효율을 높이기 위해서는 반복 공정으로 변형 에너지를 축적하는 것보다 1 회의 공정에서 큰 소성 변형을 가하는 것이 더 효율적인 것으로 알려져 있다.^{11,12}

등통로각압출 공정의 반복 가공 편의성 및 효율성을 높이기 위해 연속회전등통로각압출 (Rotary-die equal channel angular extrusion),^{16,17} 양방향등통로각압출 (Dual equal channel angular extrusion)¹⁸ 등의 강소성 공정이 제안되었고, 또한 1 회의 공정에서 소재에 가해지는 소성 변형율을 증가시키기 위해 비틀림각압출 (Twist channel angular pressing),¹⁹ 소용돌이 압출 (Vortex extrusion),²⁰ 토션-등통로각압출 (Torsional-equal channel angular extrusion)²¹ 등이 제안되었지만, 공정에 필요한 장비가 대형화 되어야 하고, 금형의 형상이 복잡해지는 등의 단점을 극복하지 못하고 있다. 강소성 가공을 통한 초미세 결정립 소재의 효율적인 생산을 위해서는 우선 1 회 공정에서 소재에 가해지는 소성 변형량의 크기를 증가시켜야 하며, 소재에 균일한 소성 변형이 가해지기 위한 반복 가공의 횟수가 최소화되어야 할 것이다.

또한 강소성 가공 공정에 사용되는 소재의 기계적 성질의 변화는 공정 중에 가해지는 변형 양식(Deformation mode)에 따라 밀접한 영향을 받는다. 등통로각압출 등과 같이 많은 연구가 이루어진 강소성 가공 공정은 변형이 대부분 2 차원 평면에서 발생한다. 등통로각압출 등의 공정에서 반복 가공

사이에 시편을 회전시켜 변형 양식을 변화시키는 것은 가능하지만, 이는 순차적으로 변형이 발생하는 방향을 변경시키는 방식이고, 동시에 소재에 3 차원적 변형이 가해지는 경우에 소재의 미세구조 및 기계적 성질의 변화에 대한 이루어진 사례는 없었다.

본 연구에서는 1 회 공정에서 서로 다른 방향의 변형이 복합적으로 발생하여 소재에 가해지는 소성 변형량을 기존 강소성 가공에 비해 증가시키고, 반복가공의 횟수를 최소화할 수 있는 새로운 강소성 가공 공정인 반통로각압출 (Half channel angular extrusion, HCAE)을 제안하고 제안된 공정을 통한 소재의 결정립 미세화에 대한 가능성을 관찰한다. 유한요소해석을 통하여 반통로각압출 공정에서 소재에 가해지는 변형률 및 변형률 분포, 소성유동에 대한 특징을 분석하였고, 공업용 순 알루미늄 (AA1050)을 반통로각압출 공정에 적용하여 기계적 성질의 변화를 측정하였다. 본 연구에서는 초미세 결정재료를 생성할 수 있는 방법으로 반통로각압출 공정의 가능성을 분석하기 1 회 공정에 대해서만 고려하였고, 반복 가공의 영향 및 구체적인 변형 모드에 대한 연구는 향후에 진행될 예정이다.

2. 반통로각압출 (HCAE) 공정

반통로각압출 공정에 사용되는 금형은 등통로각압출 공정과 마찬가지로 일정한 각도로 교차하는 두 개의 채널로 구성되어 있다. 등통로각압출 공정과의 가장 큰 차이점은 출구 채널의 폭이 입구 채널의 1/2 의 크기를 가지고 있다는 점이다. 출구 채널의 폭이 입구 채널의 절반이기 때문에 반통로각압출 공정이라고 명명하였다.

이 때 채널의 폭은 일정한 압출각도(α)에 따라 줄어든다. 따라서 반통로각압출 공정은 전통적인 전방 압출 공정과 등통로각압출 공정을 한 공정에 구현함으로써 교차각에 의해 발생하는 전단변형과 더불어 전방 압출에 의한 전단변형 및 압축, 인장 변형을 동시에 복합적으로 소재에 가하여 결정립 미세화의 효율을 향상시키는 것이 목적이다. Fig. 1 에 반통로각압출 공정에 사용되는 금형의 기하학적 구조의 개략적인 형상을 나타내었다. Fig. 1 에서 나타난 바와 같이 반통로각압출공정의 금형을 옆에서 본 형상은 기존의 등통로각압출 공정과 동일하고, 위에서 본 형상은 종래의 전방 압출 공정과 같이 일정한 압출각에 의해 단면이 줄어들면서

소재의 변형이 발생한다. 따라서 반통로각압출 공정에서는 등통로각압출 공정에서 소재에 가해지는 변형률의 크기를 조절할 수 있는 교차각 (Φ)과 만곡각 (Ψ) 이외에도 압출각을 조절하여 재료에 가해지는 변형률의 크기를 조절할 수 있으므로, 1 회 공정에서 ECAE 공정에 비해 증가된 소성 변형을 소재에 가할 수 있다. 강소성 가공 공정에서 소재에 발생하는 변형률을 균일하게 하고, 원하는 크기까지 결정립을 미세화시키기 위해서는 최소한의 반복공정이 반드시 필요하다. 하지만, 단면의 형상이 줄어들기 때문에 반통로각압출 공정에서는 등통로각압출 공정에서와 같은 방식의 반복 가공이 불가능하다. 반통로각압출 공정에서의 반복 가공은 출구 채널의 폭이 입구 채널의 1/2 이기 때문에 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이, 1 회 성형을 마친 2 개의 소재를 동시에 다시 입구채널에 투입하여 공정을 진행함으로써 이루어진다. 이때 초기 소재의 폭이 두께의 2 배가 되도록 설계하면, 첫 번째 성형 후 소재의 단면 형상은 정사각형 형상이 된다.

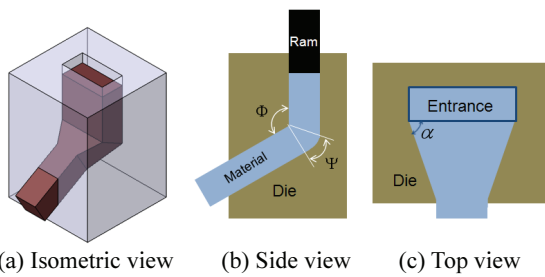


Fig. 1 Schematic view of HCAE process

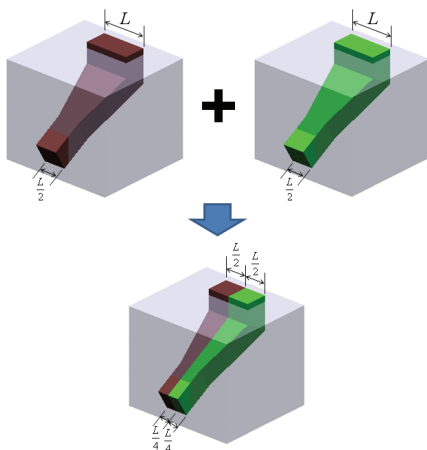


Fig. 2 Repetitive process in HCAE

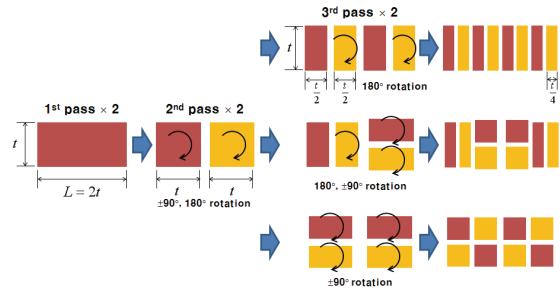


Fig. 3 Process routes in HCAE

따라서 두 번째 공정을 시작할 때 등통로각압출 공정에서의 가공 경로 (Route)⁴ 와 같은 방법으로 시편을 압출되는 축을 중심으로 하여 180°, 시계방향으로 90° 또는 반시계방향으로 90° 회전시켜 두 번째 공정을 진행시킬 수 있으므로, 소재에 발생하는 변형률의 분포를 조절할 수 있다. 3 번째 공정에서는 2 회의 두 번째 공정 후에 생산되는 4 개의 시편을 동시에 입구 채널에 투입하여 공정을 진행한다. 3 번째 공정에서는 시편의 회전 방향에 따라 소재가 받는 변형의 방향뿐만 아니라, 최종 성형되는 단면의 형상도 변화시킬 수 있다. Fig. 3 에 반통로각압출 공정에서의 가공 경로에 대해서 개략적으로 나타내었다.

3. HCAE 공정의 유한요소해석

반통로각압출 공정에서의 소성유동 특성, 변형률, 변형률 분포 등을 분석하기 위해 본 연구에서는 소성가공 전용 해석 프로그램인 DEFORM 3D 를 사용하여 반통로각압출 공정에서 소재의 3 차원 소성 유동을 해석하였다. 해석에 사용된 소재는 공업용 순 알루미늄 (AA1050)이며, 해석에 사용된 소재의 구성 방정식은 $\sigma = 132 \cdot \epsilon^{0.285}$ (MPa) 이며 이에 대한 응력 - 변형률 곡선을 Fig. 4 에 표시하였다. 유한요소해석 모델은 금형의 대칭성을 고려하여 1/2 형상만을 해석하였으며, 초기 소재의 크기는 $20 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ 이고, 30267 개의 4 절점, 사면체 요소로 구성하였다. 계산 중에 국부적으로 요소의 심한 변형으로 발생할 수 있는 계산 오차를 줄이기 위해 요소망재구성 (Remeshing) 기능을 사용하였다. 성형 온도는 상온이고, 램 속도는 5 mm/s, 소재와 금형 사이의 마찰 상수 (m)은 0.12 로 가정하였다. 금형의 형상이 교차각 90°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 경우와 교차각 120°, 만곡각 20°, 압출

각 45° 인 두 가지 경우의 반통로각압출 공정에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 5 에 유한요소해석에 사용된 교차각 120°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 반통로각압출 금형의 1/2 형상을 나타내었다.

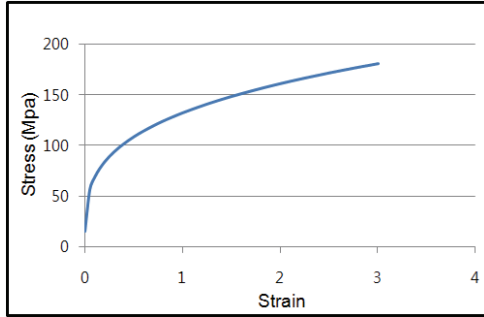


Fig. 4 Stress-strain curve of AA1050 used in FE analysis

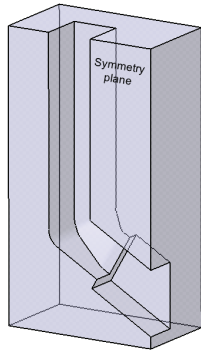


Fig. 5 3D modeling of HCAE die with $\Phi = 120^\circ$, $\Psi = 20^\circ$, $\alpha = 45^\circ$

4. 실험 방법

유한요소해석에 사용된 2 가지 형상의 금형 중, 교차각 120°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 반통로각압출 공정을 위한 금형을 제작하여 실험을 수행하였다. 사용된 소재는 유한요소해석에 사용된 소재와 동일한 공업용 순 알루미늄을 사용하였다. 소재의 크기는 $20 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ 이고, 상온에서 400-톤 유압프레스를 이용하여 램 속도 5 mm/s 로 실험을 수행하였다. 실험 전에 펀치와 시편은 충분히 윤활하여 사용하였다.

반통로각압출 공정에 의해 제조된 소재의 기계적 성질의 변화를 측정하기 위해 반통로각압출 공정을 거친 소재의 정상상태 부분에서 시편을 채취하여 단면의 마이크로 비커스 경도를 측정하였

다. 소재의 기계적 성질을 향상시키기 위한 방법으로 반통로각압출 공정의 효율성을 정량적으로 고찰하기 위해 반통로각압출 공정에 사용된 소재와 동일한 소재를 교차각 90°, 만곡각 10° 를 가지는 등통로각압출 금형을 사용하여 생산된 소재의 정상상태 영역에서 채취된 시편의 단면에서 측정된 비커스 경도와 비교하였다. 등통로각압출 공정에 사용된 소재의 단면 크기는 $20 \times 60 \text{ mm}^2$ 이다. 마이크로 비커스 경도는 상온에서 490.3 mN 의 시험하중을 적용하여 측정되었다.

5. 결과 및 토의

5.1 유한요소해석

Fig. 6 은 교차각 120°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 금형을 사용한 반통로각압출 공정에서의 소재의 유동 양상이다. 대칭성으로 인해 해석에 적용했던 1/2 형상을 대칭면에 대해 거울상을 생성하여 완전한 소재의 변형 형상을 나타내었다. 반통로각압출 공정에서의 소재의 유동은 크게 4 단계로 구분될 수 있다. 첫 번째 단계는 소재가 금형과 접촉하여 교차각에 의한 전단변형 없이 단면의 변형이 이루어지는 단계이다. 두 번째 단계에서 소재의 단면적이 감소하면서 동시에 교차각에 의한 전단변형이 발생하기 시작한다. 이후 스트로크가 진행되면서 소재가 금형을 완전히 채우면서 소재의 폭이 1/2 로 줄어들어 단면 성형이 완성되고 압출이 계속 진행되어 공정이 완료된다. Fig. 7 과 8 은 각각 금형의 형상이 교차각 90°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 경우와 교차각 120°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 반통로각압출 공정의 종료 후 소재의 소재의 바깥쪽과 대칭면에서의 유효 변형률 (Effective plastic strain)의 분포이다. 소재의 단면 형상이 정사각형으로 성형되기 때문에 모서리 부분에 변형률이 집중되어 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반통로

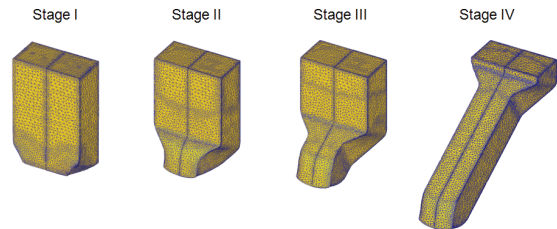


Fig. 6 Deformation of material during HCAE with $\Phi = 120^\circ$, $\Psi = 20^\circ$, $\alpha = 45^\circ$

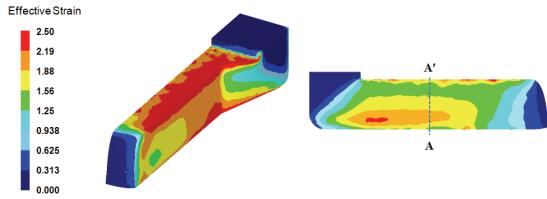


Fig. 7 Distribution of effective strain in material after HCAE with $\Phi = 90^\circ, \Psi = 20^\circ, \alpha = 45^\circ$

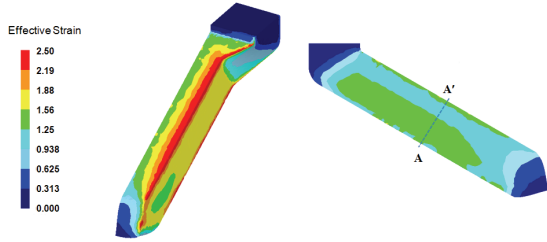


Fig. 8 Distribution of effective strain in material after HCAE with $\Phi = 120^\circ, \Psi = 20^\circ, \alpha = 45^\circ$

각압출 공정에서 소재에 가해지는 변형률의 크기는 교차각이 90° 인 경우 약 1.6 에서 2.5 사이의 분포를, 교차각이 120° 인 경우에는 약 1.3 에서 2 사이의 분포를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

교차각이 90° 인 경우와 120° 인 경우 모두 반통로각압출 공정을 거친 소재는 변형률이 0 에 가까운 앞부분의 삼각형 형상으로 이루어진 영역, 소재의 변형이 정상 상태를 이루는 영역, 변형이 이루어지고 있는 영역으로 구분할 수 있다. Fig. 7 과 8 의 A-A'로 표시된 소재의 변형이 정상 상태를 이루는 영역의 단면에서 유효 변형률 분포를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 대칭면에서의 유효 변형률의 분포를 살펴보면, 두께방향보다는 폭방향으로 불균일한 유효 변형률 분포를 가지는 것을 알 수 있다. 특히 교차각이 90° 인 경우에 불균일성이 더 확연하며, 소재의 중앙의 아래 부분에서 2 이상의 큰 유효 변형률이 발생하는 것을 알 수 있다. 반면 교차각이 120° 인 경우 두께 방향으로서는 상당히 균일한 변형률을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.

반통로각압출 공정에서 가해지는 유효 변형률의 크기 및 분포를 정량적으로 분석하고 기존의 등통로각압출 공정에 대한 결과와 비교하기 위하여 Fig. 9 에 표시된 단면에서의 유효 변형률 분포에 대한 평균값을 계산하였다. 표면 부분에서의 마찰의 영향과 모서리 부분에서 집중되는 변형률

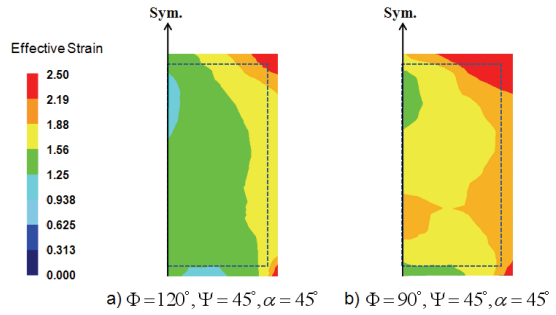


Fig. 9 Distribution of effective strain in the section of steady state region during HCAE

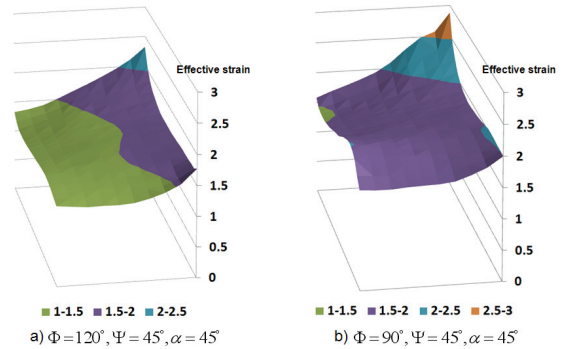


Fig. 10 Distribution of effective strain at the sampling points

의 영향을 피하기 위해 Fig. 9 에서 점선으로 표시한 영역과 같이 소재의 표면에서 1 mm 떨어진 내부 영역에서 폭방향으로 10 개, 두께 방향으로 20 개, 총 200 개의 샘플링 점에서 유효 변형률 값을 구하였다. Fig. 10 은 샘플링 된 점에서의 구한 값을 이용하여 단면의 점선 내부에서의 유효 변형률 분포를 나타내었다. 단면 내에서의 유효 변형률의 평균값은 다음의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\bar{\epsilon}_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_i}{n} \quad (1)$$

여기서 n 은 단면내에서 샘플링 점의 개수이고 $\bar{\epsilon}_i$ 는 i 번째 점에서의 유효 변형률 값이다.

반통로각압출 공정에서 소재에 가해지는 평균 유효 변형률의 크기는 교차각 90°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 경우 1.83 이고, 교차각 120°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 경우 1.48 이다.

기존의 등통로각압출 공정에서 소재에 가해지는 변형률을 계산하기 위해, 등통로각압출 공정에서 교차각 (Φ)와 만곡각 (Ψ)을 고려하여 변형률을 계산하는 아래의 식 (2)를 이용하였다.³

$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left(2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right) \quad (2)$$

N : Number of passes

식 (2)에 따르면 본 연구의 반통로각압출 공정에 적용한 교차각 및 만곡각을 사용한 등통로각압출 공정의 1 회 가공에서 소재에 가해지는 변형률은 교차각 90°, 만곡각 20° 인 경우 1.05 이고 교차각 120°, 만곡각 20° 인 경우 0.63 이다.

반통로각압출 공정은 동일한 교차각과 만곡각을 가지는 등통로각압출 공정보다 1 회 공정에서 각각 73%, 130% 이상 증가된 변형률을 가할 수 있다는 것을 나타내고 있으며, 이는 반통로각압출 공정이 기존의 등통로각압출 공정에 비해 훨씬 향상된 결정립 미세화 효율을 보일 수 있다는 것을 의미한다.

5.2 반통로각압출된 소재의 기계적 성질

공업용 순알루미늄 (AA1050) 합금을 교차각 120°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 반통로각압출 금형을 이용하여 1 회 공정을 거친 소재의 정상상태 영역에서 시편을 채취하여 그 단면에서 마이크로 비커스 경도를 측정하여 공정을 거치지 않은 초기 시편과 교차각 90°, 만곡각 10° 를 가지는 등통로각압출 공정을 거친 시편의 정상 상태 영역에서 채취한 시편의 마이크로 비커스 경도와 비교하였다.

Fig. 11 은 각각의 시편의 크기와 경도 측정 위치를 나타낸다. 초기 시편과 등통로각압출 공정을 거친 시편의 크기와 경도 측정 위치는 동일하다. Table 1, 2, 3 에 각각의 시편의 단면에서의 마이크로 비커스 경도의 분포를 나타내었다. 평균 마이크로 비커스 경도 값이 초기 소재의 32.47 에서 등통로각압출 공정을 거친 소재는 40.61, 반통로각압출 공정을 거친 소재의 경우 44.14 로 증가하는 것을 알 수 있다. 반통로각압출 1 회 공정에서 얻을 수 있는 경도의 증가량이 등통로각압출 공정에서 발생하는 경도의 증가량보다 상당히 큰 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 금속 소재의 경도가 인장강도와 직접적인 연관이 있다는 것을 고려했을 때,

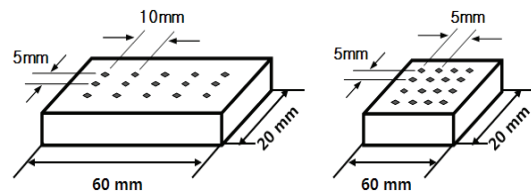


Fig. 11 Positions for measurement of micro Vickers hardness

Table 1 Micro-Vickers hardness of initial specimen

		Columns				
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Rows	1 st	31.3	34.3	32.0	32.3	33.3
	2 nd	31.7	30.6	31.7	33.8	29.6
	3 rd	31.2	35.2	34.7	32.8	32.5
Average		32.47				

Table 2 Micro-Vickers hardness of ECAE processed specimen

		Columns				
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Rows	1 st	35.3	41.8	38.9	35.9	40.9
	2 nd	38.9	38.0	44.6	43.3	38.3
	3 rd	42.7	42.3	42.0	43.3	42.9
Average		40.61				

Table 3 Micro-Vickers hardness of HCAE processed specimen

		Columns			
		1 st	2 nd	3 rd	4 th
Rows	1 st	43.2	40.7	45.1	44.7
	2 nd	38.9	40.7	41.2	49.8
	3 rd	44.8	49.1	46.4	42.3
	4 th	48.7	44.4	39.5	46.7
Average		44.14			

반통로각압출 공정이 기존의 등통로각압출 공정보다 기계적 성질의 향상시키는 측면에서 효율적이라는 것을 알 수 있다. Table 3 의 반통로각압출 공

정을 거친 소재의 마이크로 비커스 경도의 값이 Fig. 9의 유한요소해석을 통한 유효 변형률의 분포와 대체로 일치하지만 몇 개의 측정점에서는 가해지는 유효 변형률에 비해 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 초기 소재의 조대한 결정립이 아직 충분한 미세화가 이루어지지 않았기 때문으로 생각된다.

6. 결론

초미세 결정립을 가지는 금속 소재를 제조하는 방법으로 새로운 강소성 가공 방법으로서, 1 회 공정에서 소재에 가해지는 소성 변형률을 기존 강소성 가공에 비해 증가시키고, 반복가공의 횟수를 최소화할 수 있는 새로운 강소성 가공 공정인 반통로각압출 공정을 제안하고 유한요소해석과 실험을 통해 결정립 미세화와 기계적 성질의 변화에 대한 효율성을 검증하였다. 유한요소해석 결과 반통로각압출 공정에서 소재에 가해지는 평균 유효 변형률의 크기는 교차각 90°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 경우 1.83 이고, 교차각 120°, 만곡각 20°, 압출각 45° 인 경우 1.48 로 동일한 교차각과 만곡각을 가지는 등통로각압출 공정보다 1 회 공정에서 각각 73%, 130% 이상 증가된 변형률을 가할 수 있는 것을 확인하였다. 또한 마이크로 비커스 경도 값이 초기 소재의 32.47 에서 등통로각압출 공정을 거친 소재는 40.61, 반통로각압출 공정을 거친 소재의 경우 44.14 로 증가하는 것을 확인하였다. 이상의 결과에서 본 연구에서 제안한 반통로각압출 공정이 기존의 등통로각압출 공정보다 결정립 미세화 및 기계적 성질의 향상에 있어서 효율적인 방법이 될 수 있음을 알 수 있다. 반복 공정을 통한 결정립 미세화 효율의 향상, 소재의 단면에 발생하는 두께방향 및 폭 방향으로 불균일성을 극복하는 방법들이 후속연구로 진행되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2010 년 경일대학교 신입교원정착 연구비 지원에 의하여 수행된 것임.

참고문헌

1. Segal, V. M., "Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A271, No. 1-2, pp. 322-333, 1999.

2. Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon, T. G., "The process of grain refinement in equal-channel angular pressing," *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 9, pp. 3317-3331, 1998.
3. Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon, T. G., "Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials," *Scripta Mater.*, Vol. 35, No. 2, pp. 143-146, 1996.
4. Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon, T. G., "Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A281, No. 1-2, pp. 82-87, 2000.
5. Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon, T. G., "An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing," *Acta Mater.*, Vol. 45, No. 11, pp. 4733-4741, 1997.
6. Sun, P. L., Kao, P. W., and Chang, C. P., "Characteristics of submicron grained structure formed in aluminum by equal channel angular extrusion," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A283, No. 1-2, pp. 82-85, 2000.
7. Gholinia, A., Prangnell, P. B., and Markushev, M. V., "The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAE," *Acta Mater.*, Vol. 48, No. 5, pp. 1115-1130, 2000.
8. Kim, K. J., Yang, D. Y., and Yoon, J. W., "Investigation of microstructure characteristics of commercially pure aluminum during equal channel angular extrusion," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A485, No. 1-2, pp. 621-626, 2008.
9. Kim, K. J., Yang, D. Y., and Yoon, J. W., "Microstructural evolution and its effect on mechanical properties of commercially pure aluminum deformed by ECAE (Equal Channel Angular Extrusion) via routes A and C," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A527, No. 29-30, pp. 7927-7930, 2010.
10. Kwon, G. H., Chae, S. W., Kwun, S. I., Kim, M. H., and Hwang, S. K., "Frictional Effects on the Deformation Behavior of Materials and Die during Equal Channel Angular Pressing (ECAP) with Pure-Zr," *J. of the KSPE*, Vol. 18, No. 6, pp. 182-187, 2001.

11. Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon, T. G., "Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing," *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 5, pp. 1589-1599, 1998.
12. Valiev, R. Z. and Langdon, T. G., "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement," *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 51, No. 7, pp. 881-981, 2006.
13. Saito, Y., Utsunomiya, H., Sakai, T., and Hong, R. G., "Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process," *Scripta Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
14. Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N., and Sakai, T., "Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process," *Acta Mater.*, Vol. 47, No. 2, pp. 579-583, 1999.
15. Tsuji, N., Saito, Y., Utsunomiya, H., and Tanigawa, S., "Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process," *Scripta Mater.*, Vol. 40, No. 7, pp. 795-800, 1999.
16. Nishida, Y., Arima, H., Kim, J. C., and Ando, T., "Rotary-die equal channel angular pressing of an Al-7 Mass% Si-0.35 Mass% Mg alloy," *Scripta Mater.*, Vol. 45, No. 3, pp. 261-266, 2001.
17. Yoon, S. C., Seo, M. H., and Kim, H. S., "Finite Element Analysis of Continuous Rotary-Die Equal Channel Angular Pressing," *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 7, pp. 524-528, 2006.
18. Talebanpour, B., Ebrahimi, R., and Janghorban, K., "Microstructural and mechanical properties of commercially pure aluminum subjected to Dual Equal Channel Lateral Extrusion," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A527, No. 1-2, pp. 141-145, 2009.
19. Kocich, R., Gregera, M., Kursá, M., Szurman, I., and Machácková, A., "Twist channel angular pressing (TCAP) as a method for increasing the efficiency of SPD," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A527, No. 23, pp. 6386-6392, 2009.
20. Shahbaz, M., Pardis, N., Ebrahimi, R., and Talebanpour, B., "A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A530, pp. 469-472, 2011.
21. Mani, B., Jahedi, M., and Paydar, M. H., "A modification on ECAP process by incorporating torsional deformation," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A528, No. 12, pp. 4159-4165, 2011.