

유한요소해석을 이용한 HCAE 공정의 가공 경로가 AZ61 마그네슘 합금의 변형 특성에 미치는 영향에 대한 연구

이상익¹ · 윤종현¹ · 김경진[#]

Effects of Processing Routes on the Deformation Behavior of an AZ61 Mg Alloy by Half Channel Angular Extrusion(HCAE) using 3D Finite Element Analysis

S. I. Lee, J. H. Yoon, K. J. Kim

(Received November 18, 2013 / Revised March 18, 2014 / Accepted April 8, 2014)

Abstract

Half channel angular extrusion(HCAE) is the integration of equal channel angular extrusion(ECAE), which is a well-known severe plastic deformation(SPD) method, with conventional forward extrusion in order to increase the strain per pass and effectiveness of the grain refinement. In the current study, the effects of processing routes during HCAE(Routes A, B, and C) on the strain distribution of the specimens have been investigated for an AZ61 Mg alloy by using three-dimensional finite element analysis. Comparisons with the results from a multi-pass of ECAE are made.

Key Words : Severe Plastic Deformation(SPD), Half Channel Angular Extrusion, AZ61, Finite Element Analysis, Processing Route

1. 서 론

강소성 가공(severe plastic deformation)을 통한 초미세 결정립 재료의 개발은 세계적인 환경 규제의 강화에 따른 자동차, 항공 산업 등에서 금속 소재의 경량화 요구에 대한 대책으로서 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 강소성 가공은 금속 소재에 대량의 소성 변형을 가하여 소재 내부의 결정립을 미세화시키는 방법으로 공정 후 재료의 단면적이 변하지 않기 때문에 반복 가공을 통하여 원하는 수준까지 변형에너지를 축적하여 결정립을 미세화시킬 수 있다. 여러 가지 강소성 가공 방법 중 등통로각 압출(equal channel angular extrusion) 공정은 1 회 가공에서 재료에 가해지는 소성 변형량의 크기가 다른 공정에 비해 크기 때문에 결정립 미세화의 효율이

우수하고, 비교적 균일하게 소성 변형을 가할 수 있어서 지난 10 여년간 알루미늄 및 마그네슘 등의 경량 금속에 적용되어 집중적으로 연구가 이루어져 왔다[1~8]. 하지만, 등통로각 압출 공정을 이용하더라도, 일반적으로 나노미터 수준의 결정립을 얻기 위해서는 8~10 회의 공정을 반복해야 하기 때문에 생산성이 저하되어 시간과 비용이 과다하게 요구되며 [9], 또한 최근의 연구에서 고경각 입계로 나뉘어진 등축정의 초미세 결정립을 생성하고, 결정립 미세화의 효율을 높이기 위해서는 1 회의 공정에서 가능한 큰 소성 변형을 가하는 것이 더 효율적이라는 결과가 보고되고 있다[10]. 강소성 가공을 통한 초미세 결정립 소재의 효율적인 생산을 위해서는 1 회 공정에서 재료에 가해지는 소성 변형량의 크기를 증가시켜야 하며, 소재에 균일한 소성 변형을 축적하기

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
2. 경일대학교 기계자동차학과
Corresponding Author : Kyungil Univ.,
E-mail:kkj@kiu.ac.kr.

위한 반복 가공 횟수가 최소화되어야 한다. 최근 1 회 공정에서 가해지는 소성 변형량을 최대화하기 위해 ECAE 공정과 전방압출 공정을 통합한 반통로 각압출(half channel angular extrusion) 공정이 제안되어 1 회의 HCAE 공정에서 최대 2.5 이상의 소성 변형량을 소재에 가할 수 있음을 확인하였다[11~13]. 이는 ECAE 공정에서 가할 수 있는 소성 변형에 비해 100% 이상 증가된 값이며, 또한 HCAE 공정을 AZ61 마그네슘 합금에 적용하여 4 회 이상의 ECAE 공정에서 얻을 수 있는 결정립 미세화 효과를 1 회의 HCAE 공정에서 얻을 수 있음을 보고하였다[11]. 하지만, 초기 결정립의 크기, 온도 등의 조건을 고려하더라도 결정립의 크기가 $1\mu\text{m}$ 이하의 균일한 초 미세 결정립 구조를 얻기 위해서는 반복 HCAE 공정이 요구되며, 소재에 발생하는 변형률 및 결정립 크기의 분포를 균일하게 하기 위해서도 최소한의 반복공정은 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 유한요소해석을 통하여 HCAE 공정에서 가능한 반복 가공 경로에 따라 소재에 가해지는 응력, 변형률 크기, 변형률 분포 및 소재의 변형 특성을 체계적으로 분석하고, ECAE 공정에서의 반복 가공의 결과와 비교한다. 유한요소해석을 통한 다단계 ECAE 공정에 대한 연구는 많이 이루어졌으나, 대부분 일반적인 다단 공정이 아닌 1 회 ECAE 공정으로 다단계 효과를 거둘 수 있도록 설계된 금형을 사용하여 수행되었기 때문에 단속적으로 이루어지는 실제 ECAE 공정과는 차이가 있다. 본 연구에서는 1 회의 공정을 거친 HCAE 및 ECAE 공정의 변형률 데이터를 그대로 적용하여 가공 경로에 따른 소재의 변형 특성 및 변형률 분포를 정량적으로 분석 및 고찰하였다.

2. HCAE 반복 공정

HCAE 공정은 1 회 가공 공정에서 소재에 가해지는 소성 변형량을 증가시키고, 변형을 복합적으로 발생시키기 위해 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 기존의 ECAE 공정과 소재의 단면적이 감소하는 전통적인 압출 공정을 한 공정에 구현함으로써 교차각에 의해 발생하는 전단변형과 더불어 압출공정에서의 전단변형 및 압축·인장 변형을 복합적으로 소재에 부가한다. HCAE 공정은 ECAE 공정과 마찬가지로 일정한 교차각 (Ψ)으로 교차하는 두 개의 채널을 갖

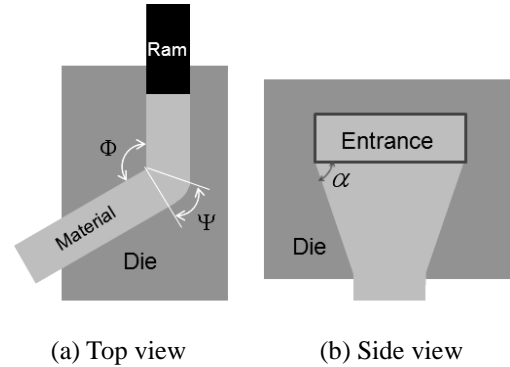


Fig. 1 Schematic diagrams of HCAE process

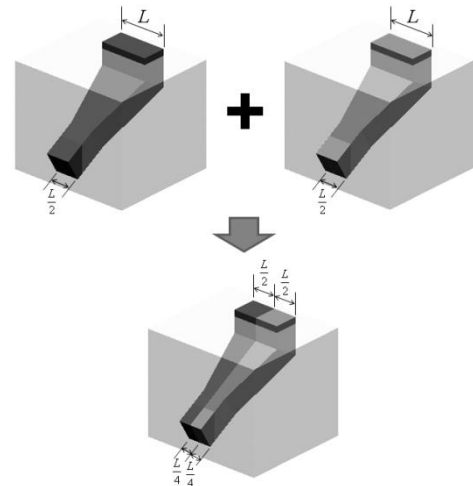


Fig. 2 Repetitive process in HCAE

지만, 출구 채널의 폭이 일정한 압출각도(α)에 따라 감소하기 때문에 1 회 공정을 거친 소재의 폭이 초기 소재 폭의 1/2 이 된다. 소재의 단면 형상이 변하기 때문에 HCAE 공정에서 반복가공을 수행하기 위해 Fig. 2 에서와 같이 첫 번째 성형을 거친 2 개의 소재를 동시에 입구채널에 위치시켜 2 번째 성형을 진행시키는 방법으로 반복 HCAE 공정을 수행한다. 일반적으로 ECAE 공정에서 가능한 가공 경로 (processing route)는 시편의 압출방향에 대한 회전 방향에 따라 4 가지로 알려져 있다[14]. Fig. 3 에 각각의 가공 경로에 대한 개략도를 나타내었다. 경로 A 는 소재의 회전 없이 그대로 반복 공정을 적용하고, 경로 B_A 는 재가공시 시편을 압출방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$ 씩 회전시키며, 경로 B_C 는 시편을 계속 같은 방향으로 90° 회전시키며 반복가공을 진행하며, 경로 C 는 180° 씩 시편을 회전시키며 반복공정을 수행하게 된다. HCAE 공정에서는 공정 후에 소재의 폭이 1/2 로 줄어들기 때문에 ECAE 공정의 가공 경로를

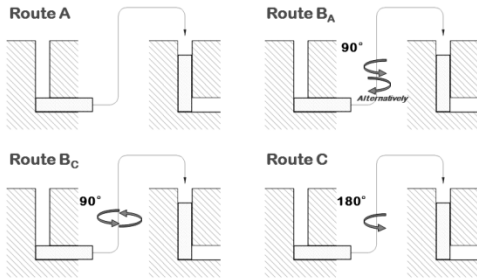


Fig. 3 Processing routes in ECAE

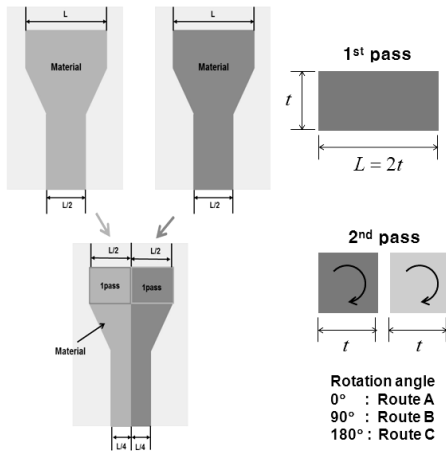


Fig. 4 Processing routes in HCAE

그대로 적용할 수는 없다. 본 연구에서는 HCAE 공정에 적용되는 초기 소재의 폭이 두께의 2 배가 되도록 설계하여, 첫 번째 성형을 거친 소재의 단면 형상이 정사각형이 되도록 하여, 두 번째 공정을 시작할 때 ECAE 공정에서의 가공 경로와 같은 방법으로 시편을 압축되는 축을 중심으로 하여 0°, 90° 또는 180° 회전시켜 두 번째 공정을 진행하여 반복 HCAE 공정을 수행하였다. 이때 HCAE의 가공 경로를 ECAE 공정에서와 동일하게 시편의 회전 각도가 0°, 90°, 180° 인 경우에 각각 경로 A, B, C 라고 한다. Fig. 4 에 HCAE 에서의 반복가공 경로를 개략적으로 나타내었다.

3. HCAE 공정의 유한요소해석

HCAE 공정에서 Fig. 4 에 나타낸 것과 같은 반복 가공 경로(경로 A, B, C)에 따른 소성유동 특성, 변형률 크기, 변형률 분포 등을 분석하기 위해 본 연구에서는 소성가공 전용 해석 프로그램인 DEFORM 3D 를 사용하여 HCAE 공정에서 소재의 3 차원 소성

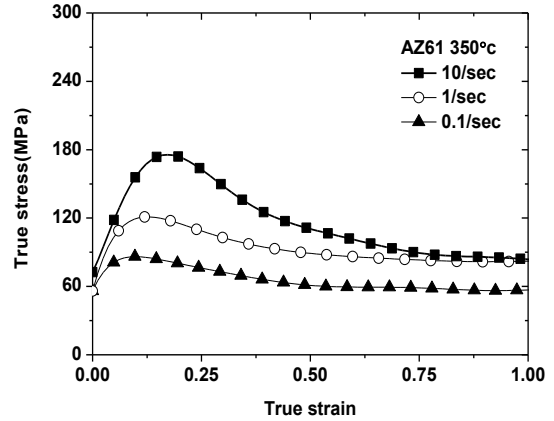


Fig. 5 Stress-strain curves from compression tests of AZ61 Mg alloy for FE simulations

유동을 해석하였고, 동일한 조건에서 ECAE 공정의 가공 경로(경로 A, B, C) 반복가공 공정을 해석하여 HCAE 공정의 결과와 비교하였다. HCAE와 ECAE 공정의 가공 경로에 따른 해석 결과의 정량적인 비교를 위해 두 공정이 동일한 경로를 가질 수 있는 두 번째 패스까지 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 소재는 AZ61 마그네슘 합금으로 해석에 사용될 기계적 성질을 획득하기 위하여 고온 압축 실험을 실시하였다. 마그네슘의 경우 조밀육방구조로 인하여 슬립계의 수가 적어 상온 성형성이 떨어지므로, 비저면 슬립시스템을 활성화시키기 위하여 고온 성형이 이루어지게 된다[15]. 압축 시편 사이즈는 직경 10mm, 높이 15mm로 원기둥시편을 가공하여 사용하였다. 압축시험은 350°C 에서 변형률 속도 10, 1, 0.1/sec에 대하여 실시하였다. Fig. 5는 압축시편에 대하여 온도조건은 350°C 에서 변형률 속도 10, 1, 0.1/sec 대한 유동응력 분포를 나타내고 있다.

AZ61 합금의 350°C 에서의 유동응력 곡선은 소성 변형이 진행됨에 따라 최대 유동응력에 도달한 뒤 연화가 일어나며 포화응력상태에 이르게 된다. 유동응력곡선은 위로 볼록한 형태의 경화가 일어나게 된다. 변형률 속도가 감소함에 따라 비저면 슬립의 임계분해 전단응력이 감소하여 쌍정(twin)형성을 억제시키며 슬립 시스템이 활성화되어 유동곡선은 위로 볼록한 경화 곡선을 나타내고 있다. 초기 소재의 크기는 HCAE 의 경우는 25×50×80mm³, ECAE 의 경우는 25×25×80mm³ 이며, 각각 42,408 개 52,759 개의 사면체 요소로 구성하였다. 첫 번째 HCAE 공

정 후 단면의 형상은 $25 \times 25 \text{mm}^2$ 가 된다. 계산 중에 국부적으로 요소의 심한 변형으로 발생할 수 있는 계산 오차를 줄이기 위해 요소망재구성(Remeshing) 기능을 사용하였다. 성형 온도는 350°C 이고, 램 속도는 10 mm/s , 소재와 금형 사이의 마찰 상수 (m)은 0.25 로 가정하였다. 교차각(Φ) 90° , 만곡각(Ψ) 10° , 압출각(α) 45° 를 갖는 HCAE 금형과 동일한 교차각과 만곡각을 갖는 ECAE 금형을 사용하여 HCAE 해석을 수행하였다. 첫 번째 성형이 끝난 HCAE 및 ECAE 소재의 앞부분과 뒷부분을 제거하고, 변형 데이터를 유지한 채, 가공 경로에 따라 회전시켜 두 번째 성형에 적용하였다.

4. 유한요소해석 결과

교차각 90° , 만곡각 10° 인 ECAE 공정과 동일한 교차각과 만곡각을 가지며, 압출각이 45° 인 HCAE 공정의 첫 번째 패스를 거친 소재의 유한요소 해석 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 소재 내부의 유효 변형률의 분포를 관찰하기 위해 y 축 방향으로 $1/2$ 절단면에 대한 유효 변형률 분포를 표시하였고, 정상 상태라고 할 수 있는 A-A' 단면 전체에서의 유효 변형률 분포를 표시하였다. 소재 내부의 유효 변형률은 ECAE 공정을 거친 소재의 경우 약 $0.7 \sim 1.2$, HCAE 공정을 거친 소재는 약 $1.6 \sim 3.0$ 의 범위에 분포해 있다. ECAE 공정을 거친 소재의 단면에서 유효 변형률 분포는 폭방향(Y 방향)으로는 거의 일정한 유효 변형률 분포를 나타내지만 길이 방향(Z 방향)으로의 유효 변형률의 변화가 크며, 특히 소재의 단면에서 아래 부분에 변형이 집중되고 있다. HCAE 공정을 거친 소재는 단면의 윗면을 중심으로 방사형으로 유효 변형률이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 공정을 거친 소재의 유효 변형률을 유지한 채, 소재의 앞부분과 뒷부분을 삭제하고 두 번째 공정에 적용하였다. Fig. 7 에 두 번째 공정에 사용한 소재의 형상 및 유효 변형률의 분포를 나타내었다. 두 번째 공정에서 압출 방향을 중심으로 0° (경로 A), 90° (경로 B) 및 180° (경로 C) 회전시켜 세 가지 종류의 두 번째 공정을 진행하였다. ECAE 공정의 경우 시편의 단면 형상의 변화가 없지만, HCAE 공정의 경우 두 번째 공정 후에는, 소재의 단면 형상이 $12.5 \times 25 \text{mm}^2$ 가 된다.

Fig. 8 과 9 에 ECAE 와 HCAE 의 가공 경로에 따

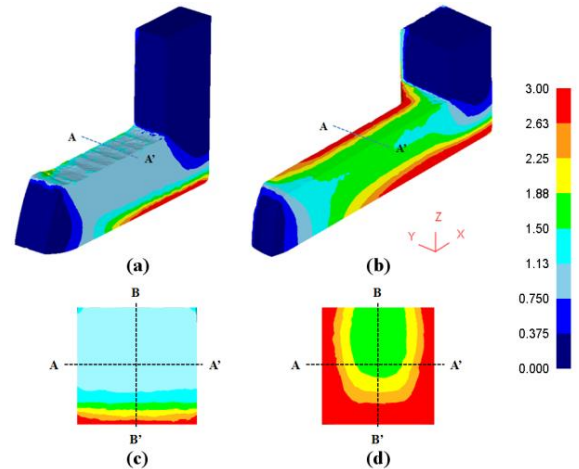


Fig. 6 Distributions of effective strain of AZ61 after first pass of (a), (c) ECAE and (b), (d) HCAE

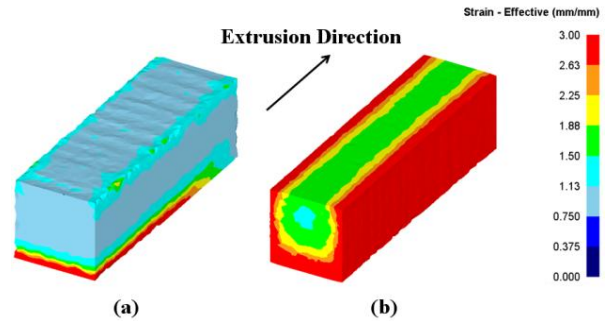


Fig. 7 Distributions of effective strain of starting specimens for the second pass of (a) ECAE and (b) HCAE

른 두 번째 공정을 거친 소재의 유효 변형률 분포를 나타내고 있다. 두 번째 ECAE 공정을 거친 소재의 경우, 첫 번째 공정에서 소재의 바닥 부분에 변형이 집중되어 있었기 때문에 두 번째 공정을 거친 소재는 경로에 따라 첫 번째 소재의 바닥 부분이 위치하는 부분에 유효 변형률이 크게 발생하며, 소재 내부의 유효 변형률과 첫 번째 소재의 바닥 부분이 위치한 영역의 유효 변형률의 차이가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 두 번째 HCAE 공정을 거친 소재는 첫 번째 공정을 거친 소재에 비해 유효 변형률 분포의 불균일성이 크게 개선되었음을 확인할 수 있다. ECAE 와 HCAE 모두 경로 B 를 거친 소재의 유효 변형률의 불균일성이 가장 두드러진다. 공정 및 경로에 따라 소재에 가해지는 유효 변형률의 크기 및 분포를 정량적으로 비교·분석하기 위하여 Fig. 6, 8 및 9 에 표시된 단면에서의 유효 변형률의 평균값을 계산하였다.

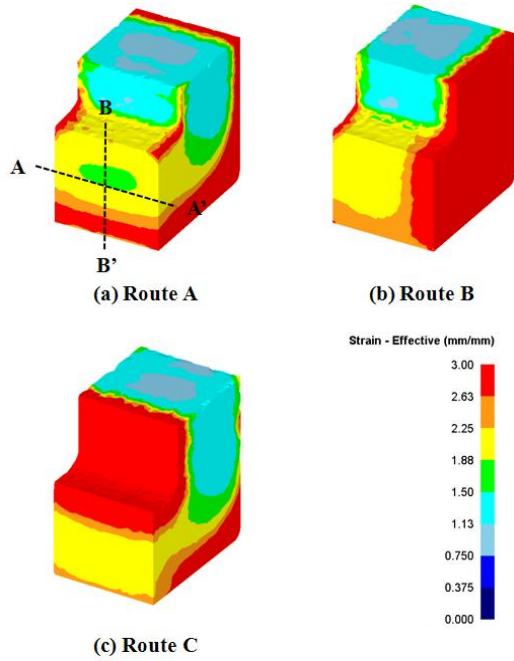


Fig. 8 Distributions of effective strain of AZ61 after second pass of ECAE via: (a) Route A, (b) Route B and (c) Route C

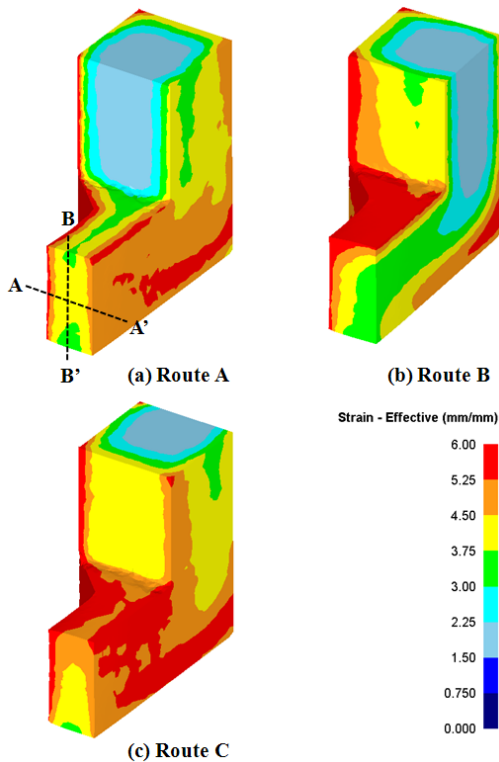


Fig. 9 Distributions of effective strain of AZ61 after second pass of HCAE via: (a) Route A, (b) Route B and (c) Route C

표면 근처에서의 마찰의 영향과 모서리 부분에서 집중되는 변형률의 영향을 피하기 위해 소재의 표면에서 2 mm 떨어진 내부 영역에서 등간격으로 폭 방향 10 개, 두께 방향 10 개의 총 100 개의 샘플링 점에서 유효 변형률 값을 구하여 다음의 식을 이용하여 평균 유효 변형률을 계산하였다.

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

여기서 n 은 단면 내에서 샘플링 점의 개수이며, $\bar{\epsilon}_i$ 는 i 번째 점에서의 유효 변형률 값이다. 또한 단면에서의 유효 변형률 분포의 불균일한 정도를 정량적으로 비교하기 위해 다음의 식 (2)와 같이 변형 불균일 지수(deformation in-homogeneity index), C 를 정의하여 각 공정을 거친 소재의 변형의 불균일 정도를 비교하였다.

$$C = \frac{\bar{\epsilon}_{max} - \bar{\epsilon}_{min}}{\bar{\epsilon}_{ave}} \quad (2)$$

$\bar{\epsilon}_{max}$ 와 $\bar{\epsilon}_{min}$ 는 소재의 단면에서 유효 변형률의 최대값과 최소값이며, $\bar{\epsilon}_{ave}$ 는 위의 식 (1)을 이용하여 계산한 유효 변형률의 평균값이다. 공정 및 경로에 따른 평균 유효 변형률, 변형 불균일 지수 등은 다음의 Table 1 과 같다. 또한 소재의 단면 내부에서 유효 변형률 분포의 변화를 관찰하기 위해, Fig. 6, 8 및 9 에 나타낸 단면의 가로 중심축 (AA')과 세로 중심축 (BB')을 따라서 유효 변형률의 변화를 Fig. 10 과 11 에 나타내었다. 두 번째 HCAE 공정을 거친 시편의 AA'의 길이가 다른 시편에 비해 1/2 이므로 이를 같은 길이로 변환하여 비교하였다. 1 회의 ECAE 공정을 거친 소재의 경우 평균 유효 변형률이 약 1.2 정도이며 가로 방향으로 거의 균일한 유효 변형률 분포를 갖는 반면, 세로 방향으로의 불균일성이 두드러진다. 이로 인해 전체적인 변형 불균일 지수가 1.172 로, Table 1 에서 고려한 8 가지의 공정 중에서 가장 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 두 번째의 ECAE 공정을 거친 소재의 변형 불균일성에 큰 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 1 회의 HCAE 공정을 거친 소재에서는 약 2.41 의

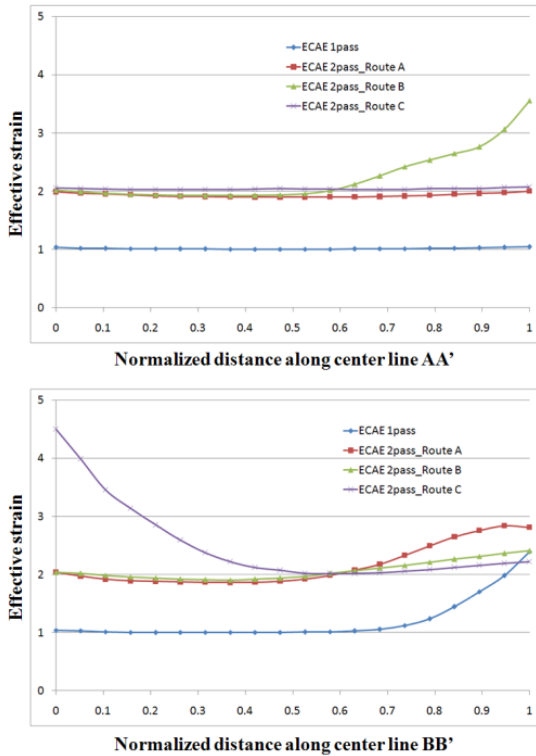


Fig.10 Variation of effective strain along horizontal and vertical center line on the section after ECAE processes

평균 유효 변형률을 가지며 이는 ECAE 공정에서 보다 두 배로 증가한 값으로 HCAE 공정이 ECAE 공정보다 우수한 결정립 미세화 효과를 가질 수 있다는 것을 알 수 있으며, 저자의 이전 연구에서 확인되었다[11]. 또한 전체적인 변형 불균일 지수도 0.887로 ECAE에 비해서는 균일한 변형을 소재에 가할 수 있음을 확인할 수 있다. 경로에 따른 유효 변형률의 변화를 살펴보면, HCAE와 ECAE 모두 경로에 상관없이 두 번째 공정을 거친 소재의 변형 불균일 지수가 낮아졌다.

HCAE에서는 경로 A와 B를 통한 소재의 경우 변형 불균일 지수가 각각 0.323, 0.375로 유사한 값을 갖는 반면 경로 B를 이용하여 성형된 소재의 경우 변형 불균일 지수가 0.685로 다른 두 가지의 경로에 비해 확연히 불균일한 변형이 발생한다. ECAE의 경우에도 경로 A를 사용하여 두 번째 공정을 수행하였을 때, 가장 균일한 유효 변형률 분포를 얻을 수 있었지만, 경로 B와 C를 통해 두 번째 공정을 수행한 경우에는 1에 근접한 변형 불균일

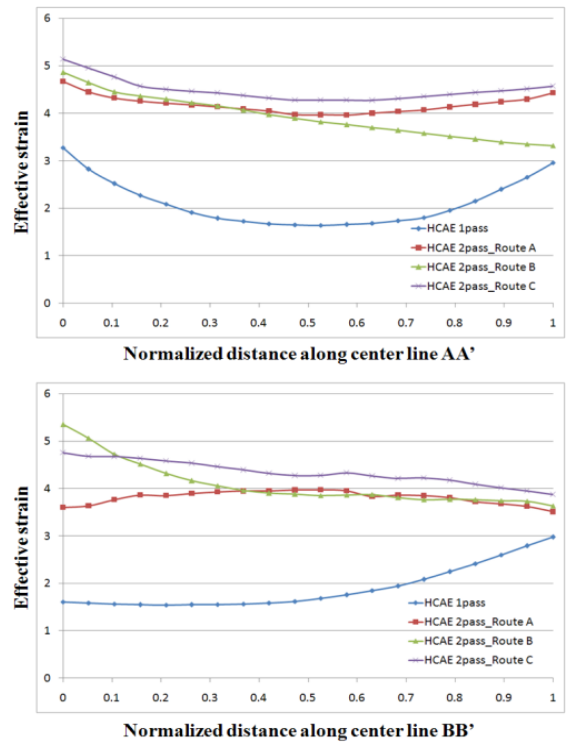


Fig. 11 Variation of effective strain along horizontal and vertical center line on the section after HCAE processes

지수를 보이고 있어, 첫 번째 공정을 거친 소재에 비해 변형의 불균일 분포가 크게 개선되지는 않았다. Fig. 10과 11에서 확인할 수 있듯이, HCAE의 경우 경로 A와 C의 경우 폭방향과 길이방향 모두의 불균일한 유효 변형률 분포의 개선이 두드러진다. ECAE의 경우 경로 A와 C의 경우에 첫 번째 공정을 거친 시편과 마찬가지로 폭방향으로는 상당히 균일한 유효 변형률 분포를 갖지만, 길이방향의 불균일한 유효 변형률 분포의 개선이 이루어지지 않았다. 평균 유효 변형률의 경우 경로에 상관없이 HCAE 공정을 거친 소재가 ECAE를 거친 소재에 비해 약 1.8배 정도 증가된 값을 얻을 수 있으며, 경로 C를 이용한 경우에 가장 큰 값을 얻을 수 있었다. 두 번째 공정에서 경로에 따른 유효 변형률의 최대값의 차이에 비해 HCAE 공정이 ECAE 공정에 비해 거의 일정하게 약 1.8배 증가된 평균 유효 변형률을 소재에 가할 수 있다는 것은, HCAE 공정이 ECAE 공정보다 상당히 균일한 변형을 소재 내부까지 가할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 1 Variations of max, min, average effective strain and in- homogeneity index

		1 pass	2 pass with Route A	2 pass with Route B	2 pass with Route C
HCAE	$\bar{\epsilon}_{\max}$	3.68	4.74	6.09	5.43
	$\bar{\epsilon}_{\min}$	1.54	3.44	3.26	3.75
	$\bar{\epsilon}_{ave}$	2.41	4.04	4.14	4.48
	C	0.887	0.323	0.685	0.375
ECAE	$\bar{\epsilon}_{\max}$	2.38	2.76	4.22	4.49
	$\bar{\epsilon}_{\min}$	0.96	1.86	1.88	2.01
	$\bar{\epsilon}_{ave}$	1.21	2.17	2.36	2.52
	C	1.172	0.415	0.990	0.981

5. 결론

본 연구에서는 기존 ECAE 공정과 전방 압출 공정을 한 공정에서 구현한 HCAE 공정의 반복가공 방법 및 가공 경로를 제안하였고, 반복 가공 경로가 소재에 가해지는 유효 변형률의 크기 및 분포에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 고찰하고, ECAE 공정의 반복가공에서의 결과와 비교하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) HCAE 공정은 ECAE 공정과 달리 변형 후 소재의 폭이 초기 소재의 1/2 로 줄어들지만, 두 번째 공정에서 2 개의 시편을 동시에 투입하여 성형하는 방법으로 ECAE 공정에서의 가공 경로와 유사하게 압출 방향을 중심으로 시편을 0°, 90°, 180° 회전시키는 가공 경로 A, B, C 를 구현할 수 있었다.

(2) HCAE 와 ECAE 모두, 1 회의 공정으로는 소재의 내부에서 균일한 유효 변형률의 분포를 얻을 수 없지만 반복 가공을 통해 변형 불균일 지수가 개선되었지만, HCAE 공정의 경우에 ECAE 공정에 비해 확연히 균일한 유효 변형률 분포를 발생시키는 것을 알 수 있었다.

(3) HCAE 와 ECAE 모두, 경로 A 를 통해 두 번째 가공이 이루어졌을 때 가장 균일한 유효 변형률 분포를 나타내었으며, 경로 B 를 이용하였을 때, 가장 불균일한 분포를 나타내었다.

(4) 두 번째 성형을 거친 소재에서 경로에 상관없이 HCAE 공정이 ECAE 공정에 비해 거의 일정하게 1.8 배 정도 증가된 평균 유효 변형률을 소재에 가할 수 있으며, 이는 소재 내부의 결정립을 미세화

시키는데 있어서, HCAE 공정이 ECAE 공정보다 훨씬 효율적인 방법임을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0014602).

REFERENCES

- [1] R. B. Figueiredo, I. J. Beyerlein, A. P. Zhilyaevc, T. G. Langdon, 2010, Evolution of Texture in a Magnesium Alloy Processed by ECAP Through Dies with Different Angles, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 527, - No. 7-8, pp. 1709~1718.
- [2] X. Zhang, L. Hua, Y. Liu, 2012, FE Simulation and Experimental Investigation of ZK60 Magnesium Alloy with Different Radial Diameters Processed by Equal Channel Angular Pressing, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 535, pp. 153~ 163.
- [3] L. B. Tong, M. Y. Zheng, X. S. Hu, K. Wu, S. W. Xu, S. Kamado, Y. Kojima, 2010, Influence of ECAP Routes on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Ca Alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 527, No. 16-17, pp. 4250~4256.
- [4] R. B. Figueiredo, T. G. Langdon, 2006, The Development of Superplastic Ductilities and Microstructural Homogeneity in a Magnesium ZK60

- Alloy Processed by ECAP, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 430, No. 1-2, pp. 151~156.
- [5] Z. Zuberova, Y. Estrin, T. T. Lamark, M. Janecek, R. J. Hellmig, M. Krieger, 2007, Effect of Equal Channel Angular Pressing on the Deformation Behaviour of Magnesium Alloy AZ31 under Uniaxial Compression, J. Mater. Process. Technol. Vol. 184, No. 1-3, pp. 294~299.
- [6] K. J. Kim, D. Y. Yang, J. W. Yoon, 2008, Investigation of Microstructure Characteristics of Commercially pure Aluminum during Equal Channel Angular Extrusion, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 485, No. 1-2, pp. 621~626.
- [7] K. J. Kim, D. Y. Yoon and J. W. Yoon, 2010, 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. Eng. A, Vol. 527, No. 29-30, pp. 7927~7930.
- [8] Y. Nishida, H. Arima, J. C. Kim, T. Ando, 2001, 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.
- [9] R. Z. Valiev, T. G. Langdon, 2006, Principles of Equal-channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement, Prog. Mater. Sci., Vol. 51, No. 7, pp. 881~981.
- [10] Y. Saito, H. Utsunomiya, T. Sakai, R. G. Hong, 1998, Ultra-fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-bonding (ARB) Process, Scripta Mater, Vol. 39, No. 9, pp. 1221~1227.
- [11] K. J. Kim, J. H. Yoon, 2013, Evolution of the Microstructure and Mechanical Properties of AZ61 Alloy Processed by Half Channel Angular Extrusion (HCAE), a Novel Severe Plastic Deformation Process, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 578, pp. 160~166.
- [12] K. J. Kim, H. D. Cho, 2013, Characteristics of Plastic Deformation of Commercially Pure Aluminum in Half Channel Angular Extrusion (HCAE), J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 1, pp. 120~127.
- [13] K. J. Kim, 2012, Finite Element Analysis of Half Channel Angular Extrusion (HCAE) as a New Severe Plastic Deformation Process, Trans. Mater. Process, Vol. 21, No. 3, pp. 164~171.
- [14] M. Furukawa, Y. Iwahashi, Z. Horita, T. G. Landon, 1998, The Shearing Characteristics Associated with Equal-channel Angular Pressing, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 257, No. 2, pp. 328~332.
- [15] C. F. Gu, L. S. Toth, D. P. Field, J. J. Fundenberger, Y. D. Zhang, 2013, Room Temperature Equal-Channel Angular Pressing of a Magnesium Alloy, Acta Mater. Vol. 61, No. 8, 3027~3036.