

새로운 강소성 가공 공정으로서 Half Channel Angular Extrusion(HCAE)의 유한요소해석

김경진

Finite Element Analysis of Half Channel Angular Extrusion (HCAE) as a New Severe Plastic Deformation Process

K. J. Kim

(Received October 17, 2011 / Revised January 31, 2012 / Accepted February 3, 2012)

Abstract

This paper focuses on the development of a new SPD (severe plastic deformation) process named HCAE (half channel angular extrusion). HCAE technology is based on principle similar to ECAE, but imposes a larger amount and more effective plastic deformation on materials. The amount of shear deformation can be altered by varying the process parameters. Finite element analyses of HCAE were conducted in order to investigate the characteristics of deformation during HCAE and the simulated results show that the predicted value of imposed plastic strain in a single pass reaches 2.5.

Key Words : Half-Channel Angular Extrusion, Severe Plastic Deformation, Finite Element Analysis, Grain Refinement

1. 서 론

최근 급속히 대두되고 있는 환경문제에 따른 자동차, 항공기의 경량화, 기계 부품류의 모듈화 등의 다양한 요구를 만족시킬 수 있는 금속 재료는 고강도·고성형성, 합금 성분의 단순화 등의 조건을 동시에 만족시켜야 하며, 이와 같은 소재 개발의 핵심 기술이 향후 과학 기술 및 산업 경쟁력 확보에 필수적이다. 금속 재료의 기계적·물리적 성질 및 기능성을 극대화시키면서 환경친화적인 특성을 갖도록 하는 가장 효과적인 방법은 재료의 결정립의 크기를 $1\mu\text{m}$ 이하 또는 나노미터 단위로 미세화시키는 것으로, 이러한 초미세결정립 소재는 같은 성분의 소재에 비해 고강도뿐만 아니라 초소성, 높은 전기비저항, 낮은 열전도도, 우수한 전자기적 특성 면에서 월등히 향상된 경향을 나타내며, 인성과 연성을 동시에 향상시킬

수 있는 유일한 방법으로 알려져 있다. 초미세 결정립을 제조하는 공정으로서 강소성 가공 방법 (Severe Plastic Deformation, SPD)은 대량의 소성 변형을 금속 소재의 내부에 축적시키는 기술로서 기존의 가공 열처리에 의한 결정립 미세화에 비해 더 미세한 초미세 결정립을 제조할 수 있다. 또한 공정의 변화 없이 거의 모든 금속 재료에 적용 가능하며 소재의 단면형상이 변하지 않기 때문에 반복 가공을 통해 소재에 높은 변형 에너지 축적 가능하고, 재료 내부의 결함을 제거할 수 있으며, 비교적 균일한 미세 조직 및 기계적 성질을 얻을 수 있다.

대표적인 강소성 가공 방법으로서 등통로각압출(Equal Channel Angular Extrusion, ECAE)[1~9], 고압비틀림(High Pressure Torsion, HPT)[10], 반복 겹침압연(Accumulative Roll-Bonding)[11~13] 등에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 이 중 ECAE 공정은

교신저자 : 경일대학교 기계자동차학부,
E-mail : kkj@kiu.ac.kr

1 회 가공에서 재료에 가해지는 소성 변형량의 크기가 다른 공정에 비해 크기 때문에 결정립 미세화의 효율이 우수하고, 비교적 균일하게 소성 변형을 가할 수 있어서 많은 연구가 집중적으로 이루어져 왔다. 하지만 ECAE 공정은 연속 공정이 불가능하고 생산되는 소재의 크기가 초기 소재와 같아 생산성이 너무 낮고 또한 나노미터 수준으로 결정립을 미세화시키기 위해서는 일반적으로 8-10 회의 반복가능이 필요한 것으로 알려져 있다 [14]. ECAE 공정을 변형하여 결정립 미세화의 효율을 향상시키는 것을 목적으로 하는, 연속회전 등동로각압축(Rotary-Die Equal Channel Angular Pressing)[14,15], 비틀림 각압축 공정(Twist Channel Angular Pressing)[16] 등의 공정이 제안되고 있지만, 공정에 필요한 장비가 복잡해지고 대형화되는 단점이 있고 기존의 ECAE 공정의 단점을 극복하지 못하고 있다.

강소성 가공을 이용한 초미세 결정립 소재의 효율적인 생산을 위해서는 (1) 1 회 가공시 소성 변형량의 증대, (2) 반복 가공 횟수의 최소화, (3) 성형 장비의 간소화가 이루어져야 한다.

또한 최근의 연구에서 전단변형과 압축·인장 변형이 서로 다른 방향으로 복합적으로 가해졌을 경우에 결정립 미세화의 효율이 향상되고 고경각 입계(High Angle Boundaries)를 가지는 결정립의 생성 비율이 향상되는 것으로 보고되었다[17].

본 논문에서는 ECAE 공정에 비해 1 회 가공시의 소성 변형량을 증가시키고, 반복 가공 횟수를 최소화하며 1 회 공정에서 서로 다른 방향의 변형이 복합적으로 발생시킬 수 있는 새로운 강소성 가공 공정인 Half-Channel Angular Extrusion (HCAE)을 제안하고 유한요소해석을 통해 제안된 HCAE 공정에서의 소성변형거동을 해석하고, 소재의 변형특성을 고찰하여 HCAE 공정의 설계변수들이 소재에 발생하는 변형률 및 변형률 분포에 대한 영향을 분석한다.

2. Half Channel Angular Extrusion(HCAE)

Half-Channel Angular Extrusion (HCAE) 공정은 1 회가공 공정에서 소재에 가해지는 소성 변형량을 증가시키고, 변형을 복합적으로 발생시키기 위해 기존의 ECAE 공정과 소재의 단면적이 감소하는 전통적인 압출 공정을 한 공정에 구현함으로써 교차각에 의해 발생하는 전단변형과 더불어 압출

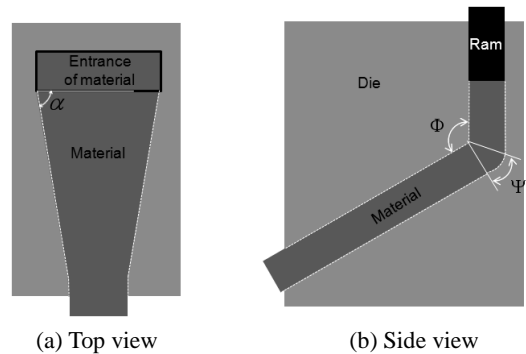


Fig. 1 Schematic diagrams of HCAE process

공정에서의 전단변형 및 압축·인장변형을 복합적으로 부가하여 결정립 미세화 효율을 향상시키는 것을 목적으로 한다. Fig. 1은 HCAE 공정에 사용되는 금형의 기하학적 구조와 변형되는 소재의 개략적인 형상을 나타내고 있다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 HCAE 금형의 측면 형상은 ECAE 공정과 동일하게 높이가 일정한 두 개의 통로(Channel)가 교차하도록 되어있지만, 위에서 본 형상은 전형적인 압출 금형의 형상과 같이 일정한 압출각 α 에 따라 단면이 줄어들면서 소재가 변형되는 형상으로 이루어져 있다. 따라서 ECAE 공정에서 소재에 가해지는 변형률의 크기를 조절할 수 있는 변수인 교차각 Φ 와 만곡각 Ψ 외에도 HCAE 공정에서는 압출각 α 를 변화시켜 재료에 부가되는 변형률을 조절하여 1 회 가공에서 ECAE 공정에 비해 증가된 소성 변형을 소재에 가할 수 있다. 기존의 강소성 가공 공정의 큰 장점 중 한 가지는 가공 후의 시편 단면 형상과 두께가 변하지 않기 때문에 반복 가공이 가능하며 소재에 변형 에너지를 축적할 수 있다는 점이다. 하지만 HCAE 공정에서는 단면 형상이 변하기 때문에 이 상태로는 반복 가공이 불가능하다. 따라서 HCAE 공정에서 반복가공을 가능하게 하기 위해 Fig. 2에서와 같이 성형이 끝난 소재의 폭을 초기 소재의 1/2 이 되도록 금형을 설계하고, 첫 번째 성형을 거친 2 개의 소재를 동시에 다시 진입 채널에 위치시켜 가공함으로써 반복 가공을 가능하게 하는 방법을 채택하였다. 따라서 두 번째 HCAE 공정을 2 회 거친 후에는 소재의 폭이 초기 소재의 1/2 인 4 개의 소재를 얻게 되는 방식이다. 세 번째 가공에서는 앞선 공정에서 얻은 4 개의 시편을 동시에 진입채널에 삽입하여 공정을 진행한다.

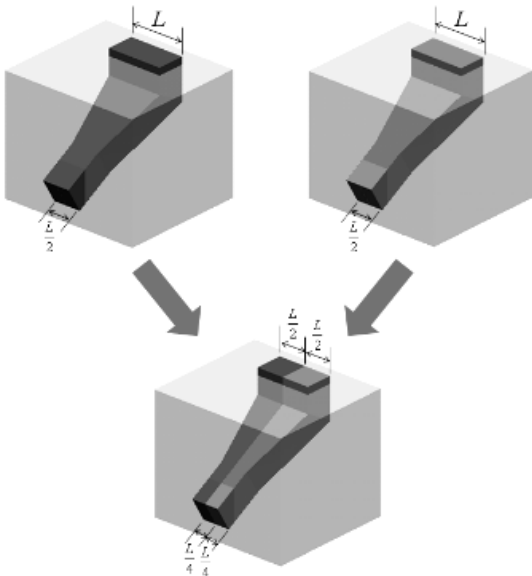


Fig. 2 Second pass in HCAE process

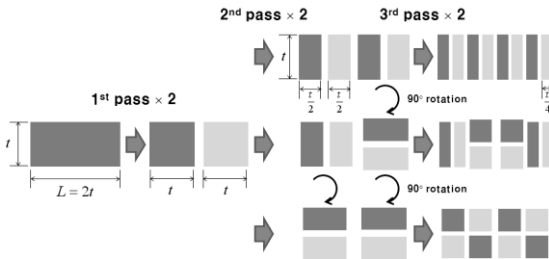


Fig. 3 Various deformation routes in HCAE process

가공 후에 소재의 단면이 초기 소재 단면적의 1/2로 감소하므로 Half-Channel Angular Extrusion 이라 명명하였다. 또한 위와 같은 방법으로 HCAE 공정에서 반복가공을 수행하면서 가공된 소재를 진입채널에 위치시킬 때 소재를 압출방향을 중심으로 90° 또는 180° 회전시켜 소재가 받는 전단변형의 방향을 변화시킬 수 있을 뿐만 아니라 최종 성형되는 소재의 단면의 형상도 변화시킬 수 있다. 따라서 1 회 가공에서 소재에 가해지는 소성 변형량을 증가시킬 뿐만 아니라 서로 다른 단면을 가지는 다수의 초미세 결정립 소재를 동시에 생산가능하기 때문에 강소성 가공 공정의 생산성을 향상시킬 수 있다. Fig. 3에 HCAE 공정의 반복 가공에서 가능한 가공 경로(Route)를 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 HCAE 공정에서의 가공 경로는 최종 가공되는 단면의 형상에 따라 가장 기본적인 가공 경로만 나타내었다. ECAE 공정의 4 가지

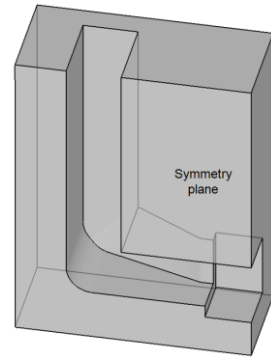


Fig. 4 3D modeling of HCAE die with $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ, \alpha=60^\circ$

가공 경로[3] A, B_a, B_c, C와 Fig. 3에 표시한 가공 경로를 조합하여 각 공정의 사이에 각각의 시편을 90° 또는 180° 회전시킬 때의 방향 및 순서를 변화시킨다면 위에 표시한 것보다 훨씬 다양한 가공 경로를 구현할 수 있다.

3. HCAE 공정의 유한요소해석

HCAE 공정에서 발생하는 소성 유동 특성, 성형 하중, 변형률 분포 등을 분석하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소해석은 소성 가공 전용 해석 프로그램인 DEFORM 3D를 사용하였으며, 초기소재는 20(t)×60(w)×70(l) 크기의 직육면체 형상을 가지며 소재의 종류는 공업용 알루미늄(AA1050)을 적용하였고, 소재의 구성방정식(Constitutive Equation)은 $\sigma=106 \cdot \epsilon^{0.347}$ (MPa) 이다. 유한요소해석 모델은 금형의 대칭성을 고려하여 1/2 형상만을 해석하였다.

램 속도는 10mm/s, 성형 온도는 상온으로 하였고, 소재와 금형 사이의 마찰 상수(m)은 0.2로 가정하였다. 금형의 형상이 $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$ 인 경우와 $\Phi=120^\circ, \Psi=27^\circ$ 인 경우에 α 가 각각 30°, 45°, 60°인 6 가지 HCAE 공정에 대하여 해석을 수행하였다. 초기 소재의 요소는 30098 개의 4 절점, 사면체 요소로 구성하였으며 계산 중에 국부적으로 요소의 심한 변형으로 발생할 수 있는 계산 오차를 줄이기 위해 요소망재구성(Remeshing) 기능을 사용하였다. Fig. 4에 유한요소해석에 사용된 $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ, \alpha=60^\circ$ 인 금형의 1/2 형상을 나타내었다. 성형된 소재의 출구부분은 마찰을 줄이면서 소재가 압출되며 위로 휘어지는 형상을 방지하기 위해 소재의 뒷면만 금형과 접촉하도록 설계하였다.

4. HCAE 공정의 유한요소해석 결과 및 고찰

Fig. 5 는 Fig.4 에 나타낸 $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ, \alpha=60^\circ$ 인 HCAE 금형을 사용하여 소재를 성형한 경우의 소재의 유동 양상이다. HCAE 공정에서 소재의 유동 양상은 다음과 같은 단계로 구분될 수 있다.

Stage I : 소재가 금형과 접촉을 시작하여 변형이 시작되며 소재의 단면적이 줄어들기 시작되는 단계

Stage II : 소재의 단면적이 줄어들면서 교차각에 의해 전단변형이 시작되는 점

Stage III : 교차각에 의한 전단변형이 진행되면서 단면 성형이 완료되는 단계

Stage IV : 단면 성형이 완료된 후 압출이 진행되어 공정이 완료되는 단계

Fig. 6 은 HCAE 공정에서의 램이 받는 하중 - 스트로크 곡선을 나타낸 것이다. Fig.6(a)는 $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$, Fig.6(b)는 $\Phi=120^\circ, \Psi=27^\circ$ 인 HCAE 공정에서 α 의 변화에 따른 하중의 변화를 보여준다. Fig. 6 에서 위의 4 단계의 변형 특징에 따른 하중의 변화를 확인할 수 있다. $\Phi=90^\circ$ 인 경우 공정이 시작되어 스트로크가 약 21mm 진행된 후 교차각에 의한 전단변형이 시작되며 하중의 증가폭이 커지면서, 단면적이 감소되는 변형이 진행된다. α 의 크기에 따라 단면적이 감소되는 과정이 다르므로 하중의 증가 형태가 변하는 것을 확인할 수 있다.

α 의 크기가 증가할수록 Stage III 에서 단면 감소 변형이 서서히 발생하기 때문에 하중이 느리게 증가하게 되며 단면 성형이 완료되어 압출이 진행되는 Stage IV 에서는 하중이 더 이상 증가하지 않고 거의 일정하게 유지되며 정상상태에 도달한다. 또한 α 의 값이 감소할수록 단면을 성형하는 과정이 짧아지기 때문에 마찰의 영향을 줄일 수 있으므로 압출각이 감소할수록 최대성형하중도 감소한다. $\Phi=120^\circ$ 인 경우도 $\Phi=90^\circ$ 인 경우와 같은 하중 증가 양상을 보이며, 공정이 시작되고 스트로크가 약 21mm 진행된 후 전단변형이 시작된다. HCAE 공정에 필요한 성형 하중은 α 의 값에 따라 약간의 차이가 있지만 $\Phi=120^\circ$ 인 HCAE 공정에서는 약 28tons, $\Phi=90^\circ$ 인 HCAE 공정에서는 약 35tons임을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$ 인 HCAE 공정과 $\Phi=120^\circ, \Psi=27^\circ$ 인 HCAE 공정에서 α 가 각각 30°, 45°, 60°인 6가지 경우에 성형이 완료된 후의 소재의 형상 및 변형률의 분포를 나타낸다.

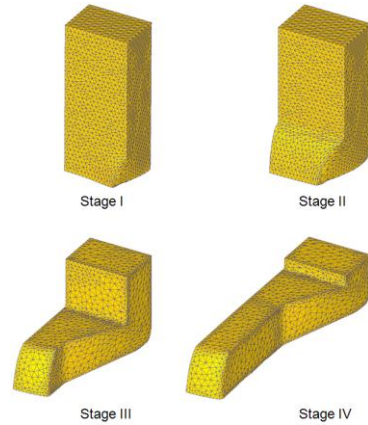
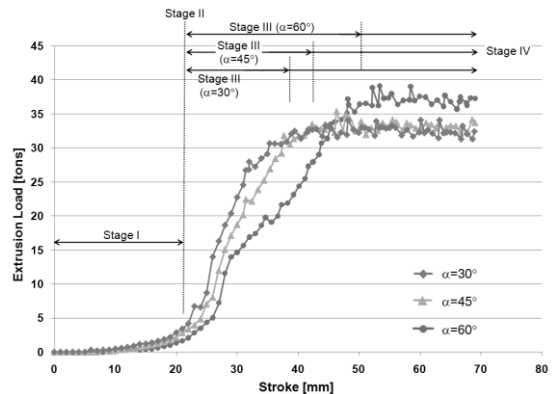
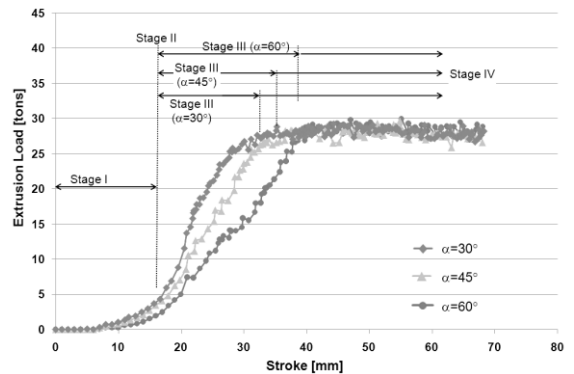


Fig. 5 Variations of deformation geometry during HCAE with $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$

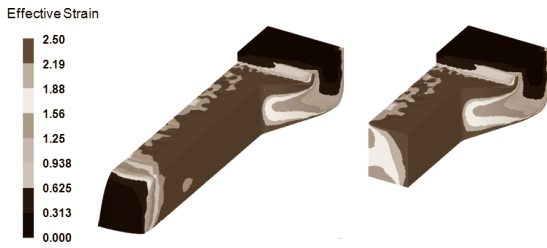


(a) Load-stroke curves during HCAE with $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$

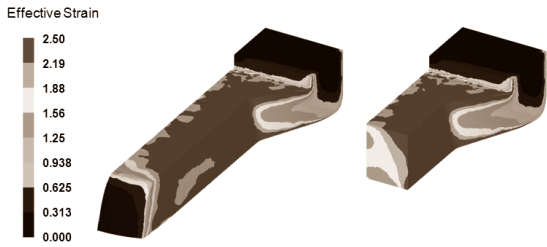


(b) Load-stroke curves during HCAE with $\Phi=120^\circ, \Psi=27^\circ$

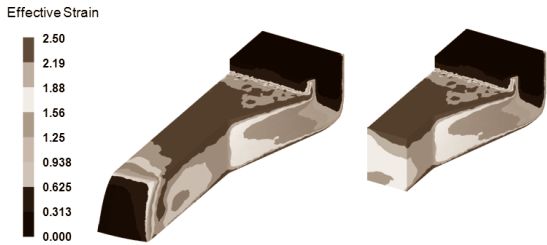
Fig. 6 Load-stroke curves during HCAE



a) $\Phi=90^\circ, \alpha=30^\circ$



b) $\Phi=90^\circ, \alpha=45^\circ$



c) $\Phi=90^\circ, \alpha=60^\circ$

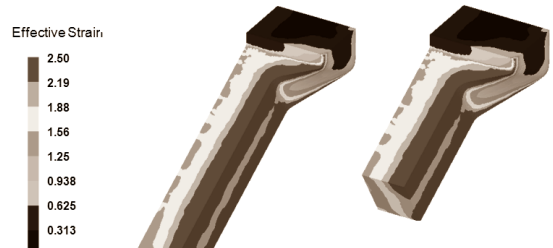
Fig. 7 Distributions of effective strain during HCAE with $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$

Iwahashi 등[2]은 ECAE 공정에서 금형과 재료의 마찰을 무시하고 Φ 와 Ψ 에 따른 금형의 구조만을 고려하여 변형률을 계산하였으며 이는 아래의 식 (1)과 같다.

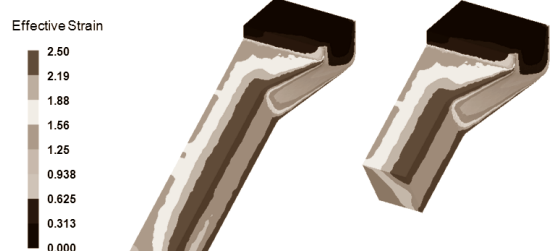
$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left(2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \cos ec \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right) \quad (1)$$

N : Number of passes

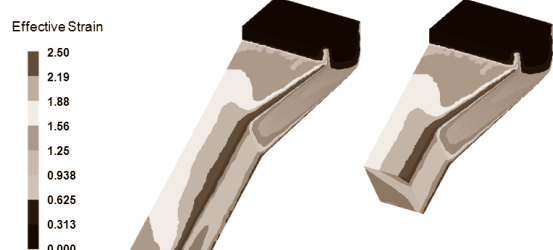
식 (1)에 따르면 본 연구의 HCAE 공정에 적용한 교차각 및 만곡각을 사용한 ECAE 공정의 1회 가공에서 소재에 가해지는 변형률은 $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$ 인 경우 0.99이고 $\Phi=120^\circ, \Psi=27^\circ$ 인 경우



a) $\Phi=120^\circ, \alpha=30^\circ$



b) $\Phi=120^\circ, \alpha=45^\circ$



c) $\Phi=120^\circ, \alpha=60^\circ$

Fig. 8 Distributions of effective strain during HCAE with $\Phi=120^\circ, \Psi=27^\circ$

0.63이다. 반면 α 의 크기에 따라 약간의 차이는 있지만 $\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$ 인 HCAE 공정은 소재의 중심부에서 약 1.5, 소재의 표면 부분에서는 약 2.5의 변형률을 발생시키며, $\Phi=120^\circ, \Psi=27^\circ$ 인 HCAE 공정에서는 중심부에서 약 1.3, 소재의 표면 부분에서는 약 2.0의 변형률이 발생된다. 최소값을

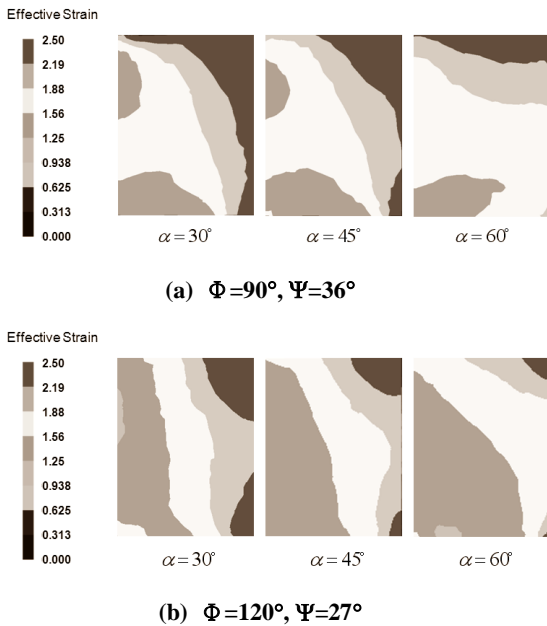


Fig. 9 Distributions of effective strain in the section of steady state region during HCAE

기준으로 하더라도 1회의 HCAE 공정에서 가해지는 소성변형량의 크기가 ECAE 공정에 비해 최소값 기준으로는 50% 이상, 최대값 기준으로는 100% 이상 증가한 것을 알 수 있다. 단면 성형이 완료된 이후의 소재는 압출방향을 따라서 거의 동일한 변형률 분포를 나타내고 있지만, 압출방향에 수직인 평면으로 절단한 소재의 단면에서는 변형률의 분포에 불균일성이 존재한다.

HCAE 금형의 형상에 따른 단면에서의 변형률 분포를 분석하기 위해 소재의 변형이 정상상태에 도달했다고 할 수 있는, 단면형상이 일정한 부분의 중간에서 압출 방향과 수직하게 절단된 단면의 변형률을 Fig. 9에 나타내었다.

ECAE 공정을 거친 소재는 소재의 두께 방향으로 불균일한 변형률을 가지는 것으로 알려져 있는데 반해 HCAE 공정으로 성형된 소재는 Fig. 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 두께 방향으로 상당히 균일한 변형률을 나타내고 폭방향으로 불균일한 변형률을 나타낸다. 그리고 단면에서의 변형률의 분포는 α 의 크기가 증가할수록 더 균일한 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있는데 이는 단면이 감소하는 과정에서 변형이 서서히 발생하여 두께 방향으로 변형이 상대적으로 균일하게 발생

하기 때문이다[18].

$\Phi=90^\circ, \Psi=36^\circ$ 인 HCAE 공정으로 가공된 소재는 두께방향으로의 변형률의 불균일성이 남아있지만, $\Phi=120^\circ, \Psi=27^\circ$ 인 HCAE 공정으로 성형된 소재는 두께 방향으로는 거의 균일한 변형률을 가지며 폭방향으로 변형률이 다소 변화하지만 그 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다. 특히 변형률이 집중되는 모서리 부분을 제외한다면 거의 전 영역에서 약 1.6의 변형률을 나타내며, 특히 $\alpha=60^\circ$ 인 경우 전 단면에 걸쳐 거의 균일한 변형률 분포를 나타낸다. HCAE 공정을 통해 생산된 소재의 단면에서 발생하는 불균일한 변형률은 반복가공을 하면서 진입채널에 성형된 시편을 위치 또는 방향을 조절하여, 즉 시편을 90° 회전시키거나 또는 첫 번째 가공에서 금형과 접촉되었던 바깥면을 안쪽으로 향하게 하여 두 번째 가공을 진행하는 방법 등으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

유한요소해석에 적용된 공업용 순 알루미늄(AA1050)을 강소성 가공 공정에 적용한 기존의 연구 결과에 따르면, 평균 결정립의 크기가 $160 \mu\text{m}$ 인 초기 소재에 ECAE 공정을 통해 크기가 1인 변형률을 1회에 가한 경우와 1.2의 변형률을 2회에 나누어 가한 경우에 평균 결정립의 크기가 각각 $10 \mu\text{m}, 17 \mu\text{m}$ 로 감소한 결과를 확인할 수 있었으며[6], 튜브 형상의 AA1050 소재에 크기 2의 변형률이 가해졌을 때, 평균 결정립의 크기가 약 $2.5 \mu\text{m}$ 에서 $0.9 \mu\text{m}$ 로 미세화되는 것으로 보고되었다[17]. 또한, 알루미늄 합금에 대해서 여러 회의 공정을 반복하여 소성 변형을 축적하는 것보다 1회 공정에서 큰 소성 변형을 가한 경우에 결정립을 미세화하는데 효과적인 것으로 보고되고 있다[4, 8]. 본 연구에서 제안한 HCAE 공정을 공업용 순 알루미늄(AA1050)에 적용할 경우 1회의 공정에서 가할 수 있는 변형률이 1회의 ECAE 공정에서 가할 수 있는 변형률보다 1.5배에서 2배 증가하였으므로, 결정립 미세화에 미치는 영향은 그 이상의 효과를 가질 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

금속 소재에 대량의 소성 변형을 축적시켜 초미세 결정립을 제조하는 강소성 가공 방법의 새로운 방법으로 Half-channel angular extrusion 공정 및 반복가공 방법을 제안하고 금형의 형상이 Φ

$\alpha=90^\circ$, $\Psi=36^\circ$ 인 경우와 $\Phi=120^\circ$, $\Psi=27^\circ$ 인 경우에 α 가 각각 30° , 45° , 60° 인 6 가지 HCAE 공정에 대하여 해석을 수행하여 공정에서 소재의 소성변형 특성을 고찰하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) HCAE 공정에서의 변형 특징은 i) 성형 시작, ii) 교차각에 의한 전단변형 시작, iii) 전단변형과 단면감소 성형 동시에 진행, iv) 단면성형 완료 및 정상상태 압출의 4 단계로 구분될 수 있다.

2) α 의 크기에 따라 다소 차이가 있지만 $\Phi=90^\circ$, $\Psi=36^\circ$ 인 HCAE 공정은 최대 성형 하중 35 tons 가 요구되며 $\Phi=120^\circ$, $\Psi=27^\circ$ 인 HCAE 공정은 최대 성형 하중 28 tons 가 요구된다.

3) HCAE 공정은 같은 크기의 교차각과 만곡각을 갖는 ECAE 공정에 비해 1 회 가공에서 최소 50%, 최대 100% 이상 증가된, 최고 2.5 에 해당하는 변형률을 부여할 수 있어 초미세 결정립 소재의 생산에 매우 효과적인 공정임을 확인 할 수 있었다.

4) HCAE 공정으로 성형된 소재의 단면에서는 두께방향으로 균일한 변형률 분포를 나타내는 반면 폭방향 변형률 분포에 불균일성이 발생한다.

후 기

이 논문은 2009 년도 경일대학교 신입교원정착 연구비 지원에 의하여 수행된 것임.

참 고 문 헌

- [1] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, 1998, The Process of Grain Refinement in Equal-channel Angular Pressing, *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 9, pp. 3317~3331.
- [2] Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, 1996, Principle of Equal-channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-fine Grained Materials, *Scr. Mater.*, Vol. 35, No. 2, pp. 143~ 146.
- [3] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, 2000, Development of a Multi-pass Facility for Equal-channel Angular Pressing to High Total Strains, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 281, No. 1~2, pp. 82~87.
- [4] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, 1997, An Investigation of Microstructural Evolution during Equal-Channel Angular Pressing, *Acta Mater.*, Vol. 45, No. 11, pp. 4733~4741.
- [5] P. L. Sun, P. W. Kao, C. P. Chang, 2000, Characteristics of Submicron Grained Structure Formed in Aluminum by Equal Channel Angular Extrusion, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 283, No. 1~2, pp. 82~85.
- [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] S. C. Yoon, M. H. Seo, H. S. Kim, 2006, Preform Effect on the Plastic Deformation Behavior of Workpieces in Equal Channel Angular Pressing, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 5, pp. 382~386.
- [8] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, 1998, Influence of Channel Angle on the Development of Ultrafine Grains in Equal-channel Angular Pressing, *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 5, pp. 1589~1599.
- [9] Y. G. Jin, I. H. Son, Y. T. Im, 2010, Three-Dimensional Flow Characteristics of Aluminum Alloy in Multi-pass Equal Channel Angular Pressing, *Met. Mater. Int.*, Vol. 16, No. 3, pp. 413~420.
- [10] A. P. Zhilyaev, G. V. Nurislamova, B. K. Kim, M. D. Baró, J. A. Szpunar, T. G. Langdon, 2003, Experimental Parameters Influencing Grain Refinement and Microstructural Evolution during High-pressure Torsion, *Acta Mater.*, Vol. 51, No. 3, pp. 753~765.
- [11] Y. Saito, H. Utsunomiya, T. Sakai, R. G. Hong, 1998, Ultra-fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-bonding(ARB) Process, *Scr. Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221~1227.
- [12] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, 1999, 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.
- [13] N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya, S. Tanigawa, 1999, Ultra-fine Grained Bulk Steel Produced by Accumulative Roll-bonding(ARB) Process, *Scr. Mater.*, Vol. 40, No. 7, pp. 795~800.

- [14] 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, *Scr. Mater.*, Vol. 45, pp. 261~266.
- [15] S. C. Yoon, M. H. Seo, H. S. Kim, 2006, Finite Element Analysis of Continuous Rotary-die Equal Channel Angular Pressing, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 7, pp. 524~528.
- [16] R. Kocich, M. Greger, M. Kurska, I. Szurman, A. Machackova, 2010, Twist Channel Angular Pressing(TCAP) as a Method for Increasing the Efficiency of SPD, *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 527, pp. 6386~6392.
- [17] K. J. Kim, J. W. Yoon, D. Y. Yang, 2009, Development of Ultrafine-grained Aluminum Tubes using Severe Plastic Deformation Process, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 33, No. 10, pp. 1087~1090.
- [18] K. Laue, H. Stenger, 1981, *Extrusion; Processes, Machinery, Tooling*, American Society for Metals, Ohio, p. 18.