

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.3.217

등통로각압축 공정용 저하중 분리형 금형 설계

진영관* · 강성훈** · 손일현*** · 임용택†
(2007년 5월 21일 접수, 2008년 2월 15일 심사완료)

Split Die Design for ECAP with Lower Loads

Young Gwan Jin, Seong-Hoon Kang, Il Heon Son and Yong-Taek Im

Key Words : Multi-Pass ECAP(다단계 등통로각압축 공정), Split Die(분리형 금형), Forming Load (성형 하중), Deformed Geometry(변형 형상)

Abstract

Equal channel angular pressing (ECAP) is one of the effective methods to produce bulk-nano materials by accumulating plastic strain into the workpiece without changing its cross-sectional shape in the multi-pass processing. However, the forming load becomes higher for manufacturing large specimens using conventional solid or split dies because of friction, flash formation, and usage of dummy specimen. In the present investigation, better split die was designed to reduce the forming loads and improve the geometrical accuracy of the specimen in the multi-pass ECAP. The new die exit channel was also designed to reduce the friction effect. Experiments with AA1050 specimens with a square cross-section were carried out to examine the design goal using the proposed split dies for routes A and C up to four passes. The numerical forming simulations were used to determine the effective geometry of various die models in the present work.

1. 서론

금속의 결정립을 미세화하는 대표적인 방법인 극한소성변형법 (Severe Plastic Deformation, SPD)은 소재에 큰 소성변형을 가함으로써 결정립을 미세화시키는 방법이다. 그 중 Segal 등⁽¹⁾이 제안한 등통로각압축 (ECAP) 공정은 공정 전후 소재 단면의 형상변화가 없기 때문에 반복적인 공정을 통해 많은 양의 소성변형을 소재에 부가할 수 있어 다결정 소재의 결정립을 마이크로미터 이하 또는 나노미터 크기까지 미세화시킬 수 있다.

등통로각압축 공정은 비교적 적은 하중으로 공정이 가능하다고 알려져 있다.⁽²⁾ 하지만 Son 등⁽³⁾과 Lee 등⁽⁴⁾이 유한요소해석을 통해 밝힌 바와 같이 등통로각압축 공정은 마찰에 매우 민감하고, 실제 공정에서는 소재와 금형 간의 마찰과 플래시 (Flash)의 발생으로 인해 소재의 끼임이나, 소재의 가압에 사용되는 플런저 (Plunger) 등의 파괴와 같은 어려움이 발생할 수 있다.

이러한 마찰에 의한 공정 수행의 어려움을 줄이기 위해 Segal 등⁽⁵⁾은 입구통로에서 사각단면을 가지는 시편의 두 면에 발생하는 마찰력을 제거할 수 있는 플런저와 출구통로의 바닥 면이 이동 가능한 금형설계를 제안하였다. Mathieu 등⁽⁶⁾도 입구통로에서 시편의 세 면에 발생하는 마찰력을 제거할 수 있는 플런저를 제안하였고, 기존의 금형을 사용한 공정에 비해 최대하중이 감소함을 보였다. Kim 등⁽⁷⁾은 원형단면을 가지는 금형의 출구통로 길이를 입구통로보다 짧게 하고 출구통로의 하부

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : ytim@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3227 FAX : (042)869-3210

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국기계연구원 소재성형 연구센터

*** POSCO 선재연구 그룹

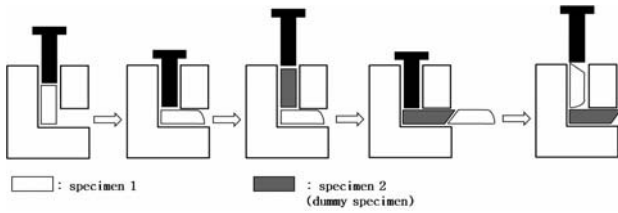


Fig. 1 Procedures of the multi-pass ECAP using conventional dies

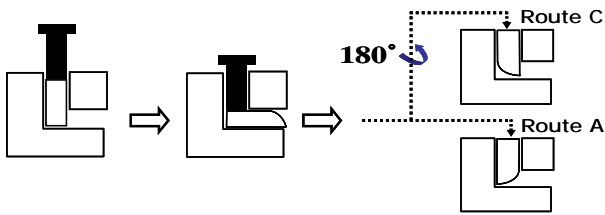


Fig. 2 Schematic diagram of processing routes A and C in the multi-pass ECAP

와 상부의 길이를 비대칭으로 하여 시편과 금형 간의 마찰력을 줄이고자 하였다. 공정 중 하중을 감소시키기 위한 금형의 형상에 관한 연구와 함께, Yoon 등⁽⁸⁾은 시편의 초기 형상을 적절하게 선택함으로써 1 단계 가공 중 최대하중을 감소시킬 수 있음을 밝혔다

이와 같은 대부분의 연구가 일체형 금형을 사용하거나 일체형 금형을 보완하여 실험이 이루어졌는데, 이 경우 다단계 공정 과정은 Fig. 1과 같다. 금형의 입구통로에 제 1 시편을 삽입하고 플런저로 가압하여 제 1 시편을 출구통로로 이동시킨다. 추가시편을 입구통로에 삽입하고 플런저로 가압함으로써 출구통로의 제 1 시편을 제거하고, 심한 전단변형을 가하기 위하여 이를 다시 추가시편이 출구통로에 끼어 있는 상태의 금형의 입구통로에 삽입하고 가압한다.

이러한 다단계 공정 시 플런저와 출구통로에 위치하는 시편 사이에는 추가시편 (또는 제 1 시편)이 항상 놓이게 되므로, 추가시편에 의한 하중증가를 피할 수 없다. 또한, 시편이 서로 접촉하고, 가압되는 과정에서 시편의 형상이 크게 찌그러지는 문제가 있다. 이는 소재의 기하학적 가공정밀도를 크게 감소시킬 뿐만 아니라 성형가공 시 소재의 심하게 찌그러진 앞과 뒤 부분을 제거해야 하는 추가적인 공정이 요구된다. 또한, 소재의 강도를 향상시키기 위하여 등통로각압축 공정은 반복 적용 되는 데 일반적으로 공정이 진행될수록 소재의 강도가 향상되므로 가공 상의 어려움은 배가된다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 다

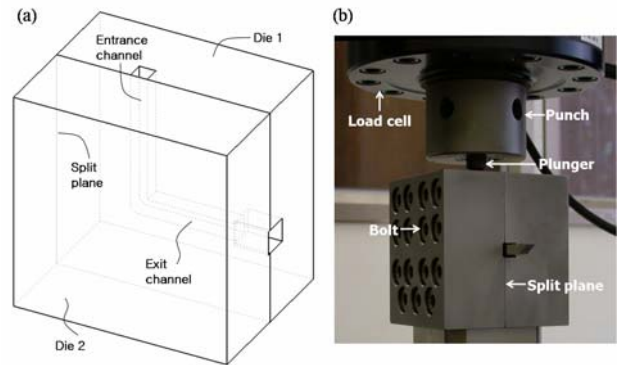


Fig. 3 (a) Schematic diagram of conventional dies, and (b) experimental set-up

단계 등통로각압축 공정 시 마찰에 의한 영향이 감소된 사각형 통로의 저하중용 분리형 금형을 설계 및 제작하고자 한다. 또한, 저하중용 분리형 금형을 사용하여 상용 순수 알루미늄합금, AA1050에 대해 Fig. 2와 같이 경로 A와 C의 등통로각압축 공정을 4 단계까지 수행하고, 이를 통해 등통로각압축 공정 중 추가 시편과 마찰이 성형하중 및 소재 형상에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 여기서, 경로 A는 출구통로로부터 제거된 소재를 다음 단계에 사용하기 위해 회전 없이 소재를 다시 삽입하는 것이고, 경로 C는 압출방향에 대해 소재를 180°씩 회전시켜 입구통로에 다시 삽입하는 경로이다.

2. 기존 금형을 사용한 예비실험

등통로각압축 공정 상의 문제점을 파악하고 저하중용 금형 설계에 반영하기 위해, 본 연구에서는 통로 교차각이 90°이고 입구 및 출구통로의 두께와 폭이 $5.1 \times 5.1 \text{ mm}^2$, 외측 곡률 반지름이 2.5 mm인 금형을 Fig. 3과 같이 제작하였다. 이 때, 공정 중 소재의 끼임 및 플런저의 파괴로 인한 금형의 수리가 용이하도록 금형 통로의 한쪽 끝에 분리면을 두었고, 필요 시 체결된 볼트를 풀어 금형을 분리 가능토록 하였다. 제작된 상용 순수 알루미늄합금, AA1050을 사용하여 1 단계 등통로각압축 공정을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 제작된 AA1050을 사용하여 경로 A와 C에 대해 4 단계까지 공정을 수행한 소재의 형상을 Fig. 5에 나타내었다.

하중-변위선도를 살펴보면 제 1 시편을 삽입하여 가압하는 과정 중 하중이 급격히 증가한 후 점진적으로 증가함을 알 수 있었다. 이는 시편이 전단변형영역을 통과할 때까지 하중이 급격히 증가

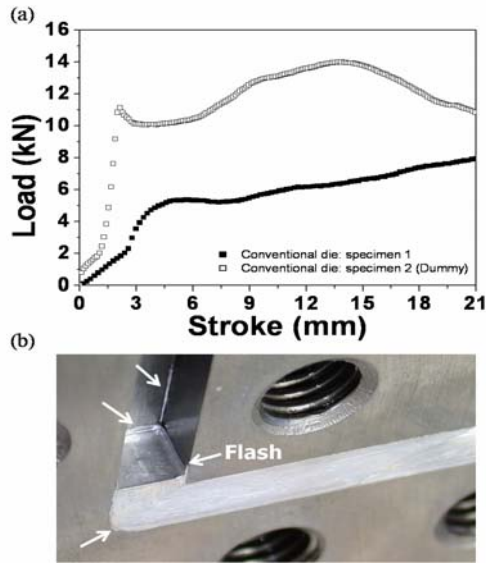


Fig. 4 (a) Load stroke curves, and (b) generated flash obtained from experiments using conventional dies

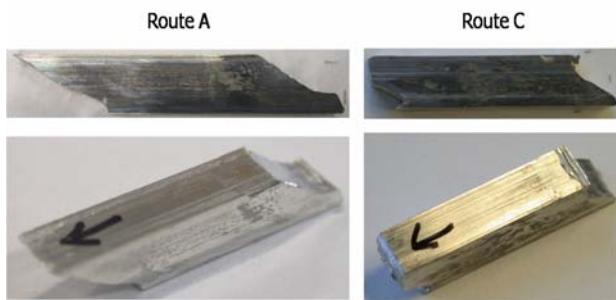


Fig. 5 Deformed specimens obtained from experiments using conventional dies

한 후 압출되는 과정에서 시편과 출구통로와의 접촉에 의한 마찰로 인하여 계속적으로 하중이 증가하기 때문이다. 이러한 제 1 시편이 끼어 있는 금형에 제 2 시편 (추가 시편)을 삽입하여 가압할 경우 하중이 크게 증가함을 알 수 있는데, 이는 추가시편에 의해 소재가 금형에 접촉하는 총 면적이 증가하여 전체적인 하중의 증가를 가져오기 때문이다. 동시에 마찰에 의한 전체적 하중의 증가는 Fig. 4(b)에 나타나듯 플런저와 금형 사이에 플래시 발생을 유발하게 되고, 이는 하중의 증가로 이어지는 원인이 되어, 이는 플래시 발생 및 하중 증가라는 악순환을 발생시킬 수 있다. 그리고, 출구통로에서의 소재와 금형 간 마찰에 의해 전단변형영역에서 소재가 분리면으로 일부 침투하고 있음을 알 수 있었다.

소재형상의 경우 4 단계까지 공정이 수행되는 과정에서 경로에 따라 조금 차이가 있으나, 두 경우 모두 소재의 앞면과 뒷면이 심하게 찌그러짐을

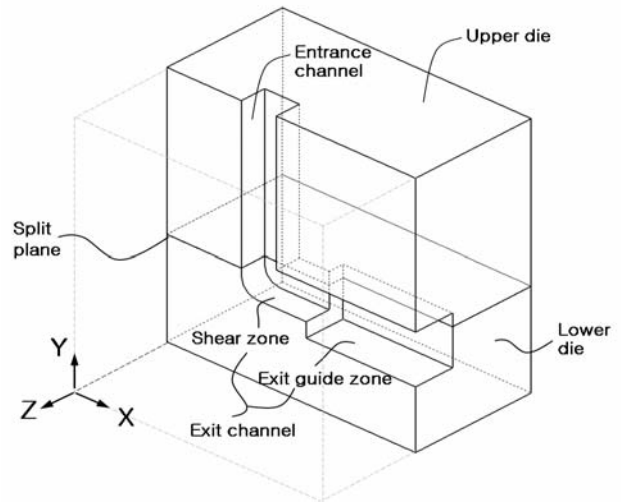


Fig. 6 Schematic illustrations of proposed split die

알 수 있었다. 특히, 소재 내부의 불균일 변형 영역과 심하게 찌그러진 영역을 제외할 경우 실제 생산 공정에 사용될 수 있는 소재 영역이 매우 적으므로, 충분히 균일한 영역을 얻기 위해서는 소재의 길이가 증가되어야 한다. 즉, 길어진 소재의 압축을 위해서는 플런저의 길이가 증가되어야 하고, 이는 플런저의 파괴 가능성을 증가시킬 수 있다.

3. 유한요소해석을 통한 금형 설계

사각형 통로를 가지는 등통로각압축 공정에서 시편의 변형은 폭 방향 변형률이 0인 평면변형률 상태로 가정할 수 있으므로, 본 연구에서는 등통로각압축 공정의 유한요소해석을 위해 Lee와 Kobayashi⁽⁹⁾가 제안한 열강점소성 유한요소법에 기반을 둔 범용 단조 해석프로그램인 *CAMPform 2D*⁽¹⁰⁾를 사용하였다.

해석 중 금형과 플런저는 모두 강체로 가정하였다. 입구통로와 출구통로의 두께는 모두 5.1 mm이고, 마찰에 의한 영향을 고려하기 위해 마찰상수, $m_f=0.3$ ⁽⁴⁾을 적용하였다. 또한, 금형의 입구통로와 출구통로의 교차각은 90°, 교차영역의 외측모서리 각은 20°로 설정하였다. 변형속도는 플런저의 하강속도를 0.01 mm/s로 일정하게 유지하였다.

유한요소해석에서 시편의 초기 형상은 두께와 길이가 5 x 30 mm²이고, 초기 요소망에는 총 1520개의 요소와 1632개의 절점이 사용되었다. 그리고 해석에 사용된 소재는 AA1050으로서, 등통로각압축 공정실험에 사용된 소재와 동일하며, 상온에서의 압축시험을 통해 응력-변형률 곡선을 다음과

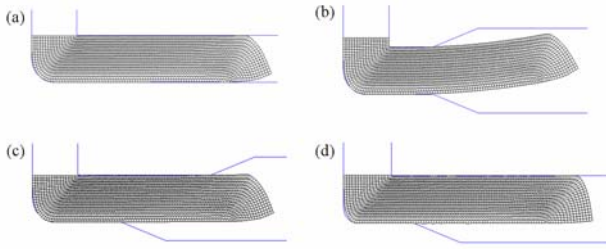


Fig. 7 FEA for the geometry effect of the exit channel

같은 $\sigma = 141.8\epsilon^{0.254} MPa$ 의 근사식을 얻어 유한요소 해석에 사용하였다.

본 연구에서 설계 및 제작된 금형은 Fig. 6과 같다. 금형을 살펴보면 금형의 내부에는 소재가 삽입되는 입구통로와 소재가 압출되어 빠져나가는 출구통로가 형성되어 있고, 출구통로는 전단변형통로와 출구안내통로로 형성되어 있다. 또한, xz 평면 상에 분리면이 형성되어 상부 금형 및 하부 금형으로 상하 분리되며, 등통로각압축 공정 시에는 볼트로 체결된다.

3.1 출구통로 형상

금형의 전단변형통로는 등통로각압축 공정 시 소재에 전단변형을 제공하는 영역으로서 등통로각압축 공정이 가능한 범위 내에서 가능한 짧게 형성하는 것이 하중 감소에 유리하다. 또한, 전단변형통로 다음의 출구안내통로는 소재의 직진성을 유지시키고 소재와 금형 간의 마찰력을 감소시키는 역할을 하게 된다. 이는 출구통로에서 소재와 금형 간의 접촉에 의한 마찰이 성형하중을 증가시키기 때문이다.

소재의 직진성을 유지하기 위해서는 금형의 출구안내통로 단면의 두께를 전단변형통로에 비해 하부 방향으로만 증가시킨다. 이는 Fig. 7의 CAMPform 2D를 사용한 유한요소해석 결과에서 보듯이 전단변형통로를 통과한 소재가 출구안내통로에서 위로 휘어지는 것을 막아 소재의 직진성을 유지시키기 때문이다. 소재의 직진성을 유지시키는 것은 단단계 등통로각압축 공정을 용이하게 수행할 수 있도록 하기 위함이다.

Fig. 6에서 출구안내통로의 단면 폭은 전단변형통로의 단면 폭에 비하여 넓은 데, 이는 압출 중 소재와 금형의 폭 방향에서 발생하는 마찰력을 제거하여 하중을 감소시킨다. 또한, 전단변형통로를 통과한 소재가 출구안내통로 단면의 폭 방향으로 끼이는 것을 방지하여 각 단계의 공정을 마친 소재를 금형으로부터 용이하게 제거할 수도 있다.

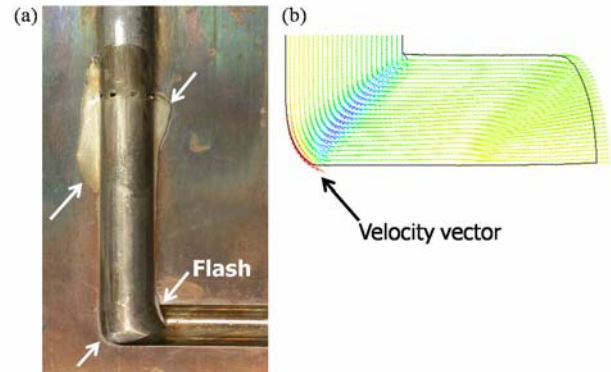


Fig. 8 (a) Generated flash, and (b) distributions of material flow velocity

3.2 분리면 설정

일체형 금형의 경우 파괴된 플런저 및 통로 사이에 끼인 소재를 제거하기 위해서는 방전가공 등이 수행되어야 하므로 금형의 수치 변화가 야기되고, 금형의 유지 및 보수에 어려움이 발생하게 된다. 새로 설계 제작된 분리형 금형의 사용은 위와 같은 문제를 해결 할 수 있을 뿐만 아니라, 사용자의 목적에 따라 추가시편을 사용하지 않고도 단단계 등통로각압축 공정을 수행할 수 있다.

이러한 유용성을 유지하기 위해서는 분리형 금형에서 분리면의 설정이 매우 중요하다. Fig. 8(b)에서 보듯 등통로각압축 공정 중 소재의 유동방향은 xy평면과 나란하게 된다. 즉, 금형의 분리면을 소재의 유동방향과 나란한 평면 상에 설정할 경우 전단변형영역 및 입구통로에서 Fig. 8(a)와 같이 소재가 금형의 분리면으로 침투하여 끼임 현상이 발생할 수 있다. 따라서 Fig. 6에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 분리형 금형의 분리면을 xz평면 상에 설정하였다.

분리면은 전단변형통로의 두께 방향의 중앙에 위치하게 된다. 이는 금형을 분리하였을 때 소재가 금형의 전단변형통로에 끼이는 영역을 최소화시켜 소재의 제거를 용이하도록 하기 위한 것이다. 또한 Mathieu 등⁽⁶⁾의 연구에 따르면 두 통로가 교차하는 안쪽 모서리와 그 모서리 주변에서 응력집중 현상이 발생하게 되므로 이를 피해 분리면을 설정하는 것이 바람직하다.

4. 등통로각압축 실험

본 연구에서는 다음과 같은 분리형 금형을 제작하고 등통로각압축 실험을 수행하였다.

앞서 보인 Fig. 6과 같이 설계된 분리형 금형의

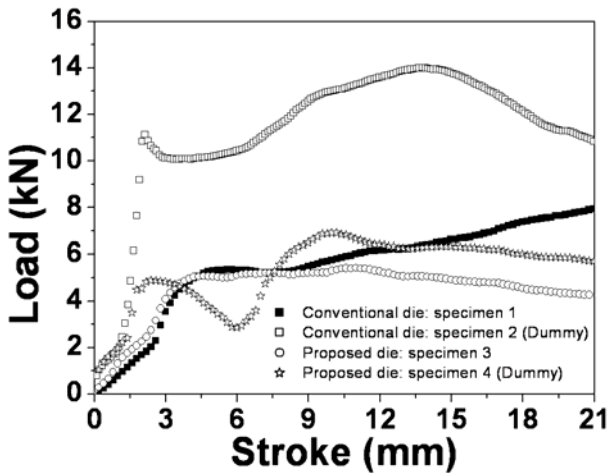


Fig. 9 Load stroke curves obtained from experiments using proposed split die

치수는 다음과 같다. 입구통로와 전단변형통로의 두께가 각각 5.2 mm와 5.1 mm이고, 폭은 5.1 mm로 동일하며, 각 통로의 모서리는 모두 필렛 (R0.2 mm)을 주어 가공하였다. 그리고, 분리형 금형의 통로 교차각은 90°이고, 외측 곡률 반지름을 1.5 mm로 가공하여, 교차영역의 외측 모서리각이 20°가 되도록 하였다.

본 연구에서는 봉재 형태의 상용 순수 알루미늄 합금, AA1050을 사용하여 등통로각압축 공정을 수행하였다. 공정에 사용된 소재는 AA1050으로 시편제작을 위해 봉재를 높이와 두께가 각각 5×5 mm²이고, 길이가 25 mm인 사각단면을 가지는 형상으로 가공하였다. 가공된 소재를 345℃에서 5 시간 동안 풀림 처리하였다.

금형을 용량이 10 ton인 MTS에 장착하고, 공정 중 플런저의 속도를 0.5 mm/s로 일정하게 유지시키며 가압하였다. 이 때, 등통로각압축 공정 중 변위 및 하중 데이터는 MTS와 연결된 PC를 사용하여 실시간으로 측정하였다. 공정 중 발생하는 마찰에 의한 하중을 감소시키기 위해 윤활제로서 그리스를 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작된 분리형 금형을 사용하여 1 단계 등통로각압축 공정을 수행하고, 공정 중 측정된 하중과 Fig. 4(a)의 결과를 Fig. 9에 동시에 나타내었다. 이 때, 각 금형간의 출구통로 형상에 따른 하중 변화를 알아보기 위해 개선된 분리형 금형에서도 제 3 시편 가압 후 제 4 시편 (추가시편)을 삽입하여 가압하였다.

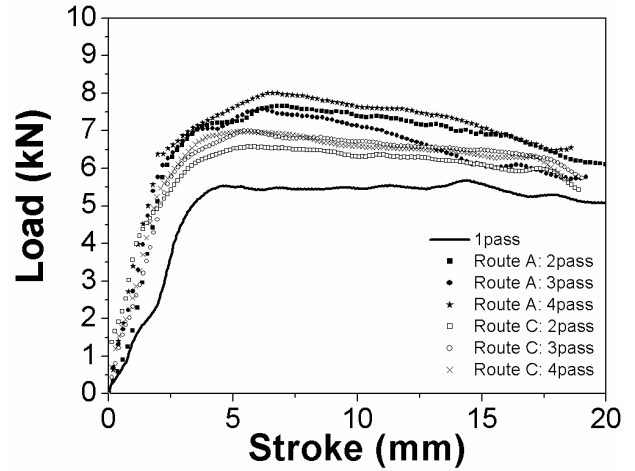


Fig. 10 Load stroke curves up to 4 passes obtained from experiments using proposed split die

본 연구에서 제작된 분리형 금형을 사용한 제 3 시편의 결과는 제 1 시편과 달리 점진적인 하중의 증가를 유발하는 요소, 즉 출구안내영역에서의 마찰력이 제거되어 변위가 5 mm를 통과한 이후 하중이 점차 감소하는 것을 알 수 있었다.

또한, 제 2 시편을 추가적으로 삽입하여 가압할 경우 최대하중이 약 2배 가량 증가하지만, 본 연구에서 제작된 분리형 금형을 사용할 경우 제 4 시편에 의한 최대하중의 증가는 약 2 kN으로써, 기존 반복공정을 위한 최대하중의 약 50% 밖에 되지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 다단계 공정의 변위-하중 선도를 나타낸다. 이 때, 등통로각압축 공정은 경로 A와 C에 대해 4 단계까지 수행되었다. 각 단계의 등통로각압축 공정을 마친 후 금형을 결합시키는 볼트를 풀어 분리면을 경계로 금형을 분리하고 소재를 출구통로로부터 제거하였다. 이 때, 모든 등통로각압축 공정 실험은 상온에서 수행되었다.

일체형 금형과 달리 분리형 금형을 사용하여 금형을 분리하여 다단계 공정을 수행할 경우 추가시편에 의한 하중의 증가를 제거할 수 있었고, 이는 최대하중 감소로 이어짐을 알 수 있었다. 또한, 시편 간의 접촉에 의한 영향이 없어, 공정 중 소재의 유동에 의한 하중의 변화를 명확하게 관찰할 수 있음을 알 수 있었다.

1 단계 공정을 마친 소재의 강도가 증가하였을 뿐만 아니라 2 단계 공정에서 가공경화가 발생하여 각 경로 모두에 대해 전체적으로 하중이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 때 경로 C의 경우 소재가 2 단계 공정을 거치는 동안 일정량의 연화현상으로 인해 경로 A의 하중이 경로 C에 비해

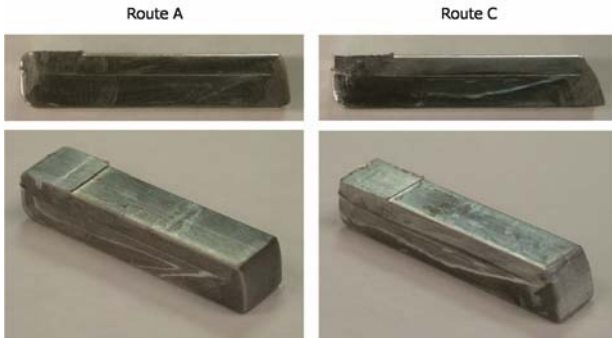


Fig. 11 Deformed specimens obtained from experiments using proposed split die

1kN 가량 높음을 명확히 알 수 있었다.

본 연구에서는 금형을 분리하여 각 단계를 마치고 소재를 제거한 후 다음 단계에 사용함으로써 Yoon 등⁽⁸⁾의 연구에서 보인 소재의 초기형상에 따른 하중의 변화를 1 단계 공정에서뿐만 아니라 다단계 공정의 각 단계에서 확인할 수 있었다. 즉, 2 단계 이후의 공정에서는 1 단계 공정을 마친 소재를 사용하므로 소재의 앞면이 초기형상을 가지게 되고 1 단계 공정에 비해 2 단계 이후의 경로에 따라 초기 하중이 증가하는 경향이 달라지게 되는 것이다.

Fig. 10에 의하면 2 단계 공정 이후에는 하중의 증가가 크지 않음을 알 수 있다. 하지만 여전히 경로 A와 경로 C 사이에는 하중의 크기에 차이가 있다는 것을 알 수 있었다.

분리형 금형을 사용하여 4 단계 등통로각압축 공정을 거친 소재의 변형형상을 Fig. 11에 나타내었다. 추가시편을 사용한 경우와 달리 소재의 앞면과 뒷면의 심하게 찌그러진 영역이 사라졌음을 알 수 있다. 이러한 결과는 분리형 금형을 사용하여 경로 A와 C에 대해 다단계 등통로각압축 공정을 수행할 경우 추가시편에 의한 영향을 제거할 수 있기 때문이다. 즉, 분리형 금형을 사용하였을 경우 소재의 심한 찌그러짐을 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 사각형 통로의 분리형 등통로각압축 금형을 설계 및 제작하였고, 분리형 금형을 사용하여 상용 순수 알루미늄합금을 경로 A 및 경로 C에 대해 4 단계까지 등통로각압축 가공하였다. 이상의 연구로부터 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 설계 및 제작된 등통로각압축

공정용 분리형 금형은 기존의 추가시편을 사용하는 일체형 금형 혹은 분리형 금형에 비해 낮은 하중으로도 반복공정이 가능하였다.

(2) 분리형 금형에서 분리면의 위치를 적절히 설정함으로써 공정 중 플래시의 발생을 없앨 수 있었다.

(3) 또한, 다단계 공정 중 소재의 심한 찌그러짐을 방지할 수 있었다.

(4) 이와 같은 금형을 이용한 경우 나노벌크재의 생산성 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2006년도 정부 (과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임 (No. R0A-2006-000-10240-0).

참고문헌

- (1) Segal, V. M., Reznikov, V. I., Drobyshevskiy, A. E. and Kopylov, V. I., 1981, "Plastic Working of Metals by Simple Shear," *Russ. Metall. (Metally)*, Vol. 1, pp. 99~105.
- (2) Segal, V. M., 1995, "Materials Processing by Simple Shear," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 197, pp. 157~164.
- (3) Son, I. H., Jin, Y. G., Im, Y. T., Chon, S. H. and Park, J. K., 2007, "Sensitivity of Friction Condition in Finite Element Investigations of Equal Channel Angular Extrusion," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 445~446, pp. 676~685.
- (4) Lee, J. H., Son, I. H. and Im, Y. T., 2004, "Finite Element Investigation of Equal Channel Angular Extrusion Process," *Materials Transactions*, Vol. 45, No. 7, pp. 2165~2171.
- (5) Segal, V. M., et al, 1995, US Patent 54,006,33A.
- (6) Mathieu, J. P., Suwas, S., Eberhardt, A., Toth, L. S. and Moll, P., 2006, "A New Design for Equal Channel Angular Extrusion," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 173, pp. 29~33.
- (7) Kim, Y. S., Shin, D. H., Park, K. T. and Kim, B. C., 2004, Korea Patent, 10-0415346-0000.
- (8) Yoon, S. C., Seo, M. H. and Kim, H. S., 2006, "Preform Effect on the Plastic Deformation Behavior of Workpieces in Equal Channel Angular Pressing," *Scripta Mater.*, Vol. 55, pp. 159~162.
- (9) Lee, C. H. and Kobayashi, S., 1973, "New Solutions to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 95, No. 3, pp. 865~893.
- (10) Kwak, D. Y., Cheon, J. S., Kim, S. Y., Lee, G. A. and Im, Y. T., 2000, "Development of PC-based Simulation System for Metal Forming," *Trans. Mater. Process.*, Vol. 9, No. 3, pp. 233~241.