

AA1070 알루미늄 합금의 사각형상 충격압출 성형에 미치는 공정 조건의 영향

조민기¹ · 안은솔² · 박인욱² · 송익성³ · 김화영³ · 김대용⁴ · 문영훈¹ · 김지훈[#]

Effect of Process Parameters on Rectangular Cup Impact Extrusion of an AA1070 Aluminum Alloy

M. K. Jo, E. An, I. W. Park, I. S. Song, H. Y. Kim, D. Kim, Y. H. Moon, J. H. Kim

(Received April 1, 2015 / Revised July 3, 2015 / Accepted July 13, 2015)

Abstract

Impact extrusion is an economical and productive process that can replace the multistage deep drawing process for producing deep rectangular cases. In the current work, a three-dimensional finite element analysis of the impact extrusion process of a commercial purity aluminum alloy (AA1070) was performed to predict loads, material flow, and deformed shapes using the Hansel-Spittel rheology law, which describes the flow stress at various temperatures and strain rates. The role of various process parameters such as friction, clearance between punch and die, aspect ratio and thickness of billet on the process and the shapes was analyzed.

Key Words : Impact Extrusion, Deep Rectangular Case, Friction, Clearance, Aspect Ratio, Thickness, Finite Element Analysis

1. 서 론

자동차 배출가스에 의한 공해문제가 국제적 문제로 부각되면서 친환경 자동차 개발에 박차가 가해지고 있다. 이러한 친환경 자동차에서 엔진을 제어하는 ECU(Engine Control Unit) 기술 개발은 상당한 수준에 도달해 있지만, ECU를 저장하는 저장용기의 생산, 설계 기술 및 패키징 기술 개발은 미흡한 현실이다. 외부에 의한 케이스 충격, 습기 유입 등으로 급발진 사고와 같은 전기 계통에 심각한 문제를 줄 수도 있게 된다. 이처럼 자동차 제어에 영향을 줄 수 있는 ECU 케이스 제작을 위한 기술 개발은 필수적이다.

사각 케이스 형상을 만드는 방법에는 딥드로잉 기술과 충격압출 기술이 있다. 사각 딥드로잉 기술은 친환경 자동차용 전지 케이스를 제작하는데 사용되는 등 활용이 많아지고 있지만[1], 현재의 사각 딥드로잉 제조는 다단성형에 기반하고 있으며, 다단계 공정을 거치는 복잡한 제조 과정과 이를 위한 막대한 투자비 지출로 인한 가격 경쟁력 약화가 단점이다[2].

충격압출 성형 기술은 이러한 단점들을 극복할 수 있는 방법 중 하나다. 충격압출 공정의 경우 다단계 딥드로잉에 비해 공정 수를 줄일 수 있어 고속생산이 가능하며, 금형 제작비용 및 자동화 설비 투자 비용이 낮고, 정확한 치수의 성형가공으로 트

1. 부산대학교 기계공학부

2. 한국생산기술연구원 동남지역본부

3. ㈜ 일광캔테크

4. 재료연구소

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: kimjh@pusan.ac.kr

리밍을 작게 할 수 있어 가격 경쟁력 측면에서 획기적이다[3].

사각형상 충격압출 성형공정에 성형결과에 영향을 주는 인자로는 금형과 소재간의 마찰, 펀치와 다이간 간격(clearance), 빌렛의 종횡비(aspect ratio), 빌렛의 두께 등이 있다. 본 연구에서는 사각형상의 충격 압출 공정에서 여러 가지 공정 변수들이 공정과 제품에 어떤 영향을 미치는지 유한요소해석을 통해 알아보았다. 마찰과 펀치와 다이간 간격의 영향에 대해서는 2015년도 한국소성가공학회 춘계학술대회에서 발표된 바 있다[4]. 본 연구에서는 앞선 연구 내용을 요약하고 빌렛의 종횡비(aspect ratio), 빌렛의 두께 등 최종 성형 형상, 변형률, 성형하중, 재료의 유동에 어떻게 영향을 주는지를 확인하였다.

2. 재료 특성

2.1 기계적 특성

본 연구에서는 AA1070 알루미늄 합금 빌렛을 사각 케이스 형상으로 제조하는 충격압출 공정을 연구하였다. 고속으로 진행되는 공정이기 때문에 재료의 온도는 약 100-200℃ 이상으로 높아진다. 이에 따라 AA1070의 다양한 온도 및 변형률 속도(strain rate) 조건에 따른 인장 시험을 실시하였다. 상온(25℃), 100℃, 200℃인 경우에 대해 변형률 속도를 0.001/s, 0.01/s, 0.1/s로 세분화하여 인장 시험을 실시하였으며, 시험장비는 R&B사의 500kg급 인장시험기를 사용하였다. 인장시험편의 경우 두께는 3mm이며, 표점 거리 25mm, 폭 6mm인 ASTM E8 subsize 규격에 따라 제작하여 시험하였다.

2.2 유동 응력

충격압출 공정은 매우 빠른 속도로 진행되며, 변형률이 일반적인 인장 시험에 비해 매우 크게 나오기 때문에 실험범위를 넘는 조건에서의 유동응력은 식을 이용하여 외삽해서 유한요소 계산에 사용할 필요가 있다.

충격압출 공정이 진행됨에 따라 재료의 온도와 유동응력이 변하는 현상을 고려하기 위해 열-기계 상태(thermo-mechanical conditions)가 혼합된 Hansel-Spittel 유동식을 사용하였다.

$$\sigma_f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = A e^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} \dot{\varepsilon}^{m_8 T} \quad (1)$$

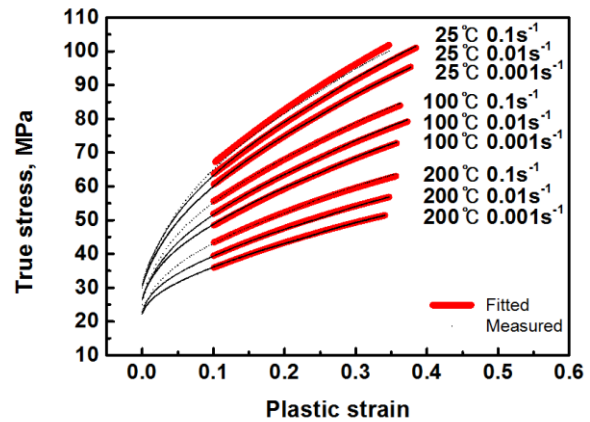


Fig. 1 Measured and fitted flow stress curves

Table 1 The model parameters of Hansel-Spittel rheology law for AA1070

	Value	Standard Error
A	176.44005	0.09117
m ₁	-0.00207	4.30484 E-6
m ₂	0.47186	6.23625 E-4
m ₃	0.01881	5.28843 E-5
m ₄	0.02217	1.23078 E-4
m ₅	-0.00158	1.13780 E-5
m ₈	1.1067 E-4	5.41380 E-7

여기서 σ_f 는 유동응력, ε 은 유효변형률, $\dot{\varepsilon}$ 은 유효 변형률 속도, T는 온도이며, A, m₁, m₂, m₃, m₄, m₅, m₈은 모델 상수이다.

측정된 유동응력을 식 (1)을 이용하여 Origin9™에서 최소제곱법에 의해 모델 상수를 구하였으며, 상수값과 상수값의 표준오차를 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 측정된 식 (1)에 의해 예측된 유동응력을 함께 도시한 것이다.

재료가 소성변형을 하면 가공열에 의해 재료의 온도가 올라간다. 변형속도가 매우 빠를 경우 단열 조건을 가정할 수 있으며, 온도변화량은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho C_p \Delta T = 0.9 \int_0^{\varepsilon} \sigma_f d\varepsilon \quad (2)$$

여기서 ρ 는 재료의 밀도, C_p는 비열, ΔT 는 온도 변화량이다. Fig. 2는 (1), (2)식을 계산한 단열조건에서의

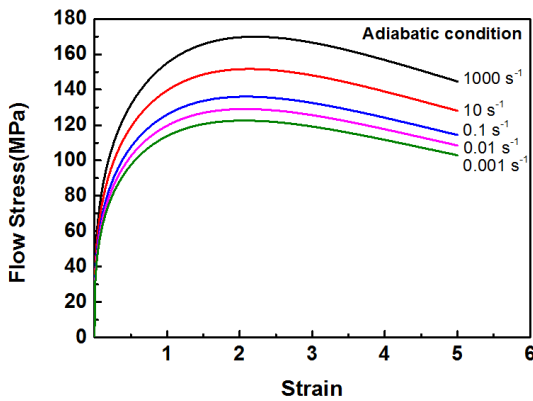


Fig. 2 Flow stress of AA1070 under adiabatic condition

유동응력 곡선이다. (1)식의 변수인 유효변형율, 유효 변형률 속도(strain rate), 온도를 통해 유동 응력을 구할 수 있다. 유효변형률 속도는 각각 0.001, 0.01, 0.1, 10, 1000/s 으로 설정하였으며, 초기 온도는 25℃로 설정하였다. 변형률 증분($\Delta\epsilon$)이 주어지면 이에 대한 유동 응력을 구한 후, 이를 (2)식에 대입하면 변형률 증분($\Delta\epsilon$)에 대한 온도 변화량(ΔT)을 알 수 있게 된다. 구한 온도를 다시 (1)식에 대입하면 다음 변형률 값에 대한 유동 응력을 구할 수 있게 된다. 이를 통한 계산으로 Fig. 2의 변형률에 대한 유동 응력 곡선을 얻을 수 있게 된다.

3. 충격압출 해석

3.1 유한요소 모델 및 해석 조건

빌렛, 펀치, 다이가 기본적인 구성을 이루고 있으며, 빌렛에 길이 1mm의 사면체 요소(element) 4,198개, 상부 펀치에 2mm의 사면체 요소 5,100개, 하부 금형에 7mm의 사면체 요소 4,264개를 사용하였다. 소재와 금형의 초기 온도는 20℃로 설정하고, 금형과 소재 사이의 열전달 계수는 10kW/m·K로 가정하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 사각형상은 대칭(symmetry)의 형태를 가지므로 1/4로 나누어 해석을 진행하였다

펀치와 다이는 200 GPa의 탄성계수를 가지는 탄성체(deformable body)로 빌렛에 가해지는 힘에 따라 금형 또한 탄성 변형을 하게 된다. 강소성체(rigid body)보다 해석 시간이 더 오래 걸리는 단점이 있지만, 높은 압력이 걸리는 실험에서는 더욱 정확한 결과를 이끌어 낼 수 있어 결과의 신뢰성을 증대시킬 수 있다. 재료 물성은 AA1070의 온도, 변형률, 변형

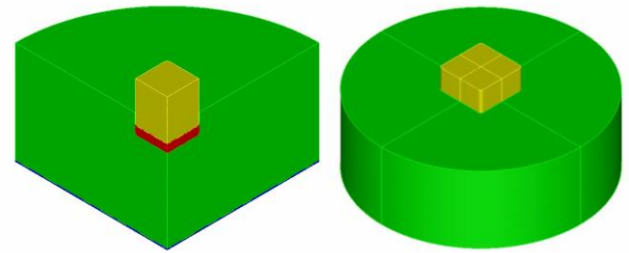


Fig. 3 Finite element analysis basic model

Table 2 Basic process conditions

Friction coefficient(μ)	0.05
Shear limit(m)	0.1
Clearance	0.68mm
Aspect ratio (Length)	1:1 (31.84 / 31.84mm)
Thickness	8mm
Punch velocity	350mm/s
Punch stroke	7mm

률 속도를 고려한 Hansel-Spittel 식을 적용하였다. 변형 해석 과정에서 각 요소의 과도한 변형을 억제하기 위해 FORGE2011™에서 제공하는 Remeshing on Deformation 기능을 적용하였다.

본 연구에서는 마찰, 펀치와 다이 간 간격(clearance), 사각 케이스의 종횡비(aspect ratio, 펀치 단면 사각형의 긴 변과 짧은 변의 길이비), 초기 빌렛 두께가 공정과 제품에 미치는 영향을 분석하였다. 유한요소 해석에서 사용한 마찰식은 아래와 같다.

$$\tau = \mu \sigma_n \quad \text{if } \mu \sigma_n \leq \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

$$\tau = m \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad \text{if } \mu \sigma_n \geq m \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

여기서 τ 는 전단응력(shear stress), σ_n 은 수직응력, μ 는 마찰계수(friction coefficient), m 은 전단 한계(shear limit)를 나타낸다.

유한요소 해석에 사용한 기본 공정 조건은 Table 2와 같다.

Fig. 4의 a 부분과 b 부분은 성형체의 면 부분을 나타내며, c 부분은 성형체의 높이 방향으로의 모서리를 나타낸다. 간격(clearance) 조건에 대해서는 a 부분 간격을 0.68mm로 고정하고, b 부분의 간격을

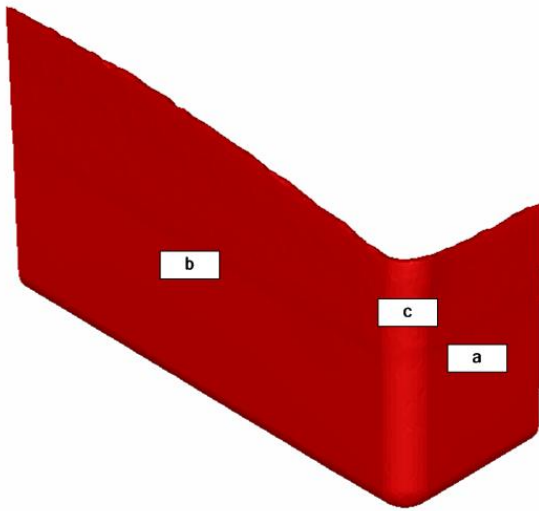


Fig. 4 Deformed shape of billet

Table 3 Friction conditions

Case	μ	m
F1	0.05	0.1
F2	0.05	0.3
F3	0.2	0.1
F4	0.2	0.3

0.68, 0.74, 0.84, 1.00mm로 조절하였다. 종횡비(aspect ratio) 조건에 대해서는 단면적을 일정하게 하여 a 부분과 b 부분의 길이를 1:1 / 1:3 / 1:6으로 나누어 해석을 진행하였다.

3.2 마찰조건에 따른 유한요소 해석

3.2.1 해석 조건 설정

모든 공정에서 소재와 금형간의 마찰은 (3),(4)식의 쿨롬 마찰법칙(Coulomb friction law)과 전단 마찰 법칙(shear friction law)이 결합된 형태를 사용하였고, 마찰력은 마찰계수(μ)값과 전단 한계(m)에 의해 결정된다.

충격압출 공정에서 마찰계수 및 전단 한계가 응력, 변형률, 하중에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 3과 같이 기본 설정값 이외에 수치를 조정하여 유한요소 해석을 진행하였다.

3.2.2 마찰조건에 따른 영향도 분석

Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 소재의 평균 유효 변형률의 경우, 시간이 흐를수록 계속해서 증가하였다.

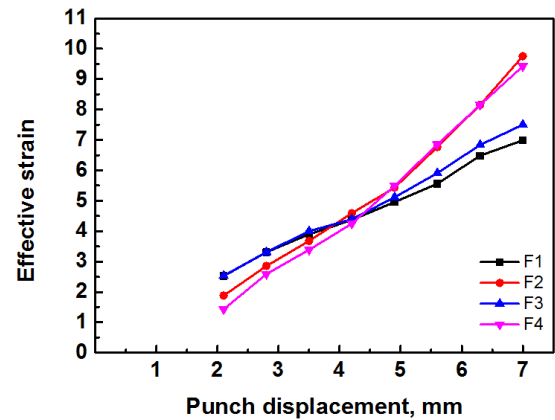


Fig. 5 Effective strain of billet depending on friction factor

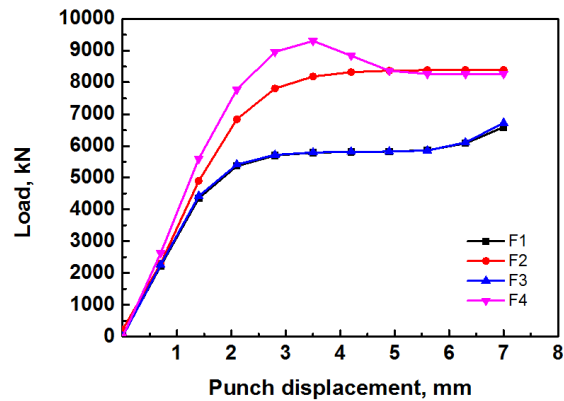


Fig. 6 Load of punch depending on friction factor

펀치가 3.5mm 내려갈 때까지는 빌렛의 a, b 부분 안쪽에서 변형이 크게 일어났다. 그 후 빌렛의 두께가 어느 정도 얇아진 펀치 스트로크 3.5mm 이후부터는 c 부분 바깥쪽에서 변형률이 크게 나타남을 확인할 수 있었다. m 값이 같은 F1 조건과 F3 조건은 평균 유효변형률에서 큰 차이가 없다. 그러나 m 값의 변화가 있는 F1, F2 와 F3, F4 를 비교했을 때 펀치가 4.2mm 내려간 시점부터 차이를 보이고 있다.

이러한 차이점은 성형하중에서도 확인할 수가 있다. Fig. 6 은 각 조건에 대한 펀치에 걸리는 하중이다. 마찬가지로 m 값이 같은 F1 조건과 F3 조건은 하중에서 큰 차이가 없으며, m 값이 다를 때 성형하중에서 큰 차이를 보인다.

3.3 다이/펀치 간 간격(clearance)에 따른 유한요소 해석

3.3.1 해석 조건 설정

Table 4 Clearance conditions

Case	Clearance (mm)
	a / b
C1	0.68 / 0.68
C2	0.68 / 0.76
C3	0.68 / 0.84
C4	0.68 / 1.00

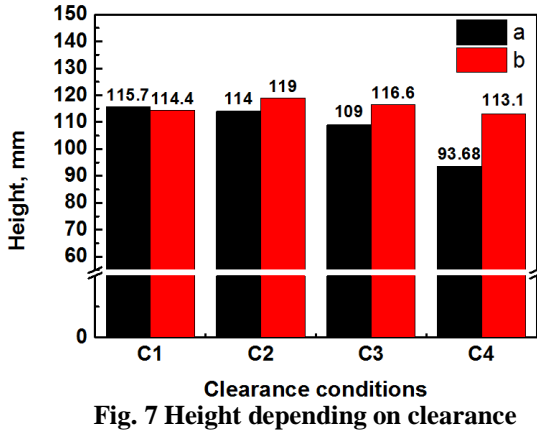
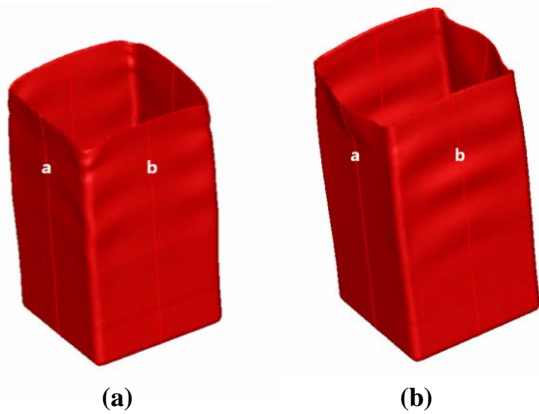
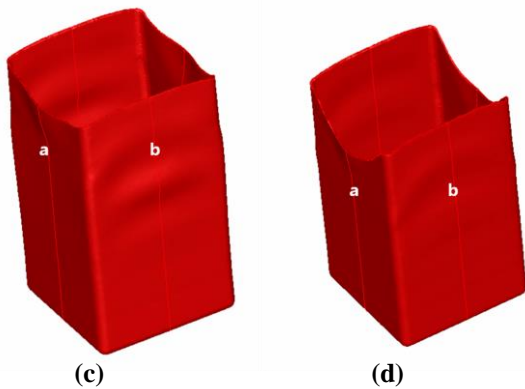


Fig. 7 Height depending on clearance



(a)

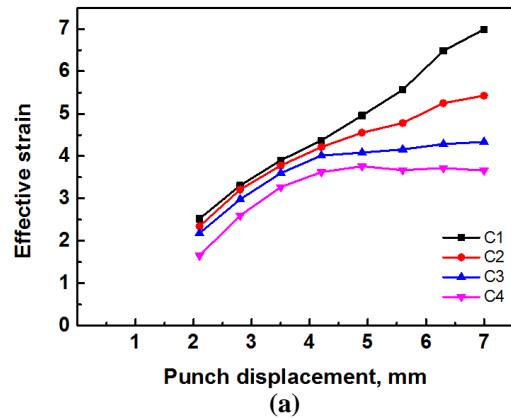
(b)



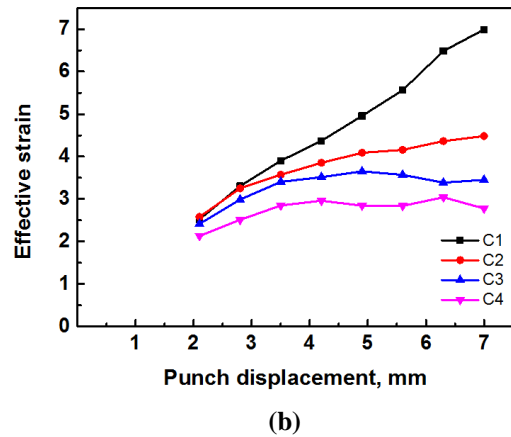
(c)

(d)

Fig. 8 Deformed shapes depending on clearance for cases (a) C1, (b) C2, (c) C3, and (d) C4



(a)



(b)

Fig. 9 Effective strain of billet depending on clearance
(a) at region a, (b) at region b

꼭지점을 기준으로 각 면에 대한 간격(clearance)을 Table 4와 같이 설정하였으며, 이런 조건들이 변형률, 성형하중, 높이변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 유한요소 해석을 진행하였다.

3.3.2 다이/펀치 간 간격(clearance)에 따른 영향도 분석

Fig. 7 은 간격별 높이를 도시한 것이고, Fig. 8 은 조건별 최종 성형 형상을 나타낸 것이다. C1 조건과 C2 조건을 비교하면 재료의 유동이 간격이 넓은 곳으로 이동되기 때문에 a 부분에서 높이가 낮아지고, b 부분에서 높이가 높아진다. 하지만 C2 조건과 C3 조건을 비교해 보면 b 부분의 높이도 또한 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 부피는 한정되어 있지만 간격이 넓어지면서 높이가 상대적으로 낮아지는 것으로 예상된다. C4 조건에서도 이러한 현상을 확인할 수 있다.

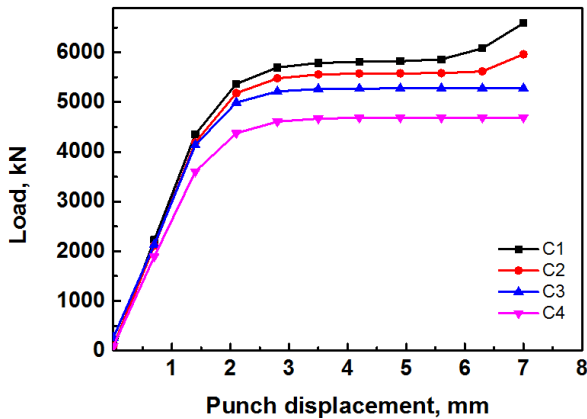


Fig.10 Load of punch depending on clearance

Fig. 9는 조건에 대한 재료의 평균 유효 변형률을 a 부분, b 부분에 따라 도시한 것이다. C1 조건을 제외한 조건들의 a 부분 변형률이 b 부분 변형률 보다 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 간격 차이에 따라 변형률 차이가 있으며, 간격 차이가 없는 C1 조건에서 가장 높은 변형률을 보이며, 간격 차이가 가장 큰 C4 조건에서 가장 낮은 변형률 값을 보인다. 성형 하중에 있어서도 간격 차이가 커질수록 낮은 값을 나타냈으며 이를 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

3.4 종횡비(aspect ratio)에 따른 유한요소 해석

3.4.1 해석 조건 설정

초기 빌렛의 부피를 일정하게 가정한 후, 빌렛의 종횡비가 공정에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 Table 5 와 같이 세가지 종횡비 조건에 대해서 각각 마찰이 작은 경우와 큰 경우로 나누어 유한요소 해석을 진행하였다. 3.2 절의 결과로부터 마찰계수(μ)는 결과에 큰 영향이 없다는 것을 알 수 있기 때문에, 전단한계(m)가 0.1 인 경우와 0.3 인 경우에 대해서 해석하였다.

3.4.2 종횡비(aspect ratio)에 따른 영향도 분석

모든 조건에서 가장 큰 변형은 다이의 꼭지점에서 높이 방향으로 올라오는 c 바깥쪽 부분에서 가장 크게 일어났다. 그 중에서 유효변형률은 크기는 A3 조건에서 가장 낮게 나타났고 A1 조건에서 가장 높게 나타나는 것을 Fig. 11 에서 확인할 수 있다.

Table 5 Aspect ratio and shear limit conditions

Shear limit (m)	0.1	0.3
Aspect ratio		
1 : 1 (31.84 mm : 31.84mm)	A1	A1'
1 : 3 (18.38 mm : 55.14 mm)	A2	A2'
1 : 6 (13 mm : 78 mm)	A3	A3'

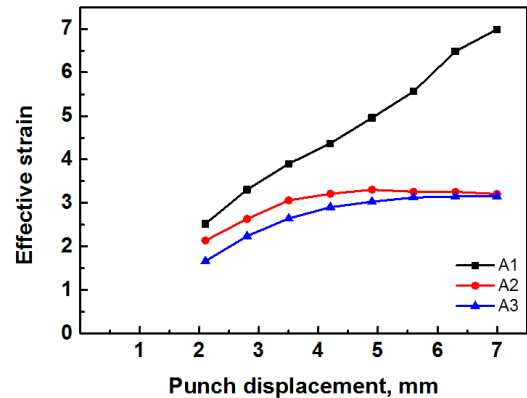


Fig.11 Effective strain of billet depending on aspect ratio

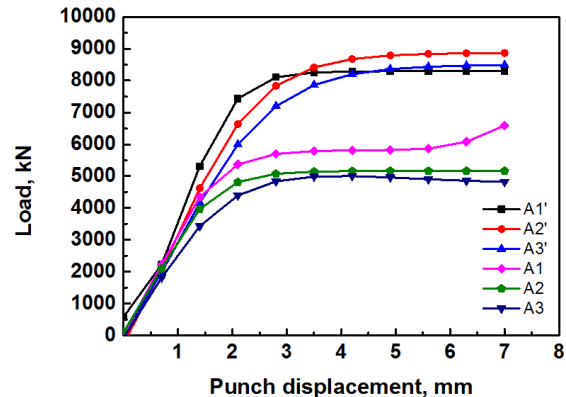


Fig.12 Load of punch depending on aspect ratio

성형 하중의 경우 Fig. 12 에서 볼 수 있듯이 A3 조건에서 낮은 하중을 보이며, A1 조건에서 높은 하중을 보인다. 이와는 다르게 마찰 전단 한계 (m)를 높였을 때는 A1' 조건이 펀치 스트로크가 3.5mm 인 시점부터 다른 조건에 비해 낮은 하중을 보인다. 이 시점부터 변형에 의한 저항보다 펀치와 다이의 사이의 마찰이 큰 영향을 미치는 것으로 예상되며, 둘레가 최소인 A1' 조건에서 마찰의 영향을 가장 적게 받아 하중이 가장 적게 예측되었다.

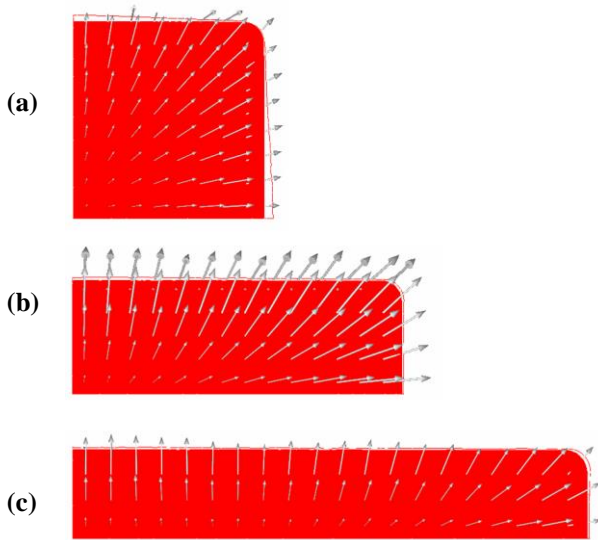


Fig.13 Velocity vectors on middle point of billet at 40% for cases (a) A1, (b) A2, and (c) A3

Table 6 Thickness conditions

Case	Thickness (mm)
T1	6
T2	8
T3	10

Fig. 13 은 펀치가 2.8mm 내려갔을 때 각 조건에 따라 빌렛 중심면의 속도 벡터를 나타낸다. 이 속도 벡터를 통해 재료 유동의 방향 및 크기를 확인할 수 있다. Fig. 13(a)와 같은 경우 중심부의 재료가 이동해야 할 거리가 어느 쪽으로라도 길다면 재료 유동에서 어려움을 겪지만, Fig. 13(b), Fig. 13(c)와 같은 경우에 재료가 한쪽으로 쉽게 빠져 나갈 수 있다면 하중이 줄어들며, 재료의 극심한 변형을 줄일 수 있는 것으로 보인다.

3.5 빌렛 두께에 따른 유한요소 해석

3.5.1 해석 조건 설정

펀치와 다이간 간격을 일정하게 한 후 빌렛의 두께를 Table 6 과 같이 설정하였다. 펀치의 속도는 350 mm/s 로 일정하게 하여 최종 바닥면 두께가 1mm 가 될 때까지 해석을 진행하였으며 T1 의 경우 펀치 이동거리가 5mm, T2 의 경우 7mm, T3 의 경우 9mm 이다. 이러한 조건들이 변형률, 성형하중에 미치는 영향을 알아보기 위하여 유한요소 해석을 진행하였다.

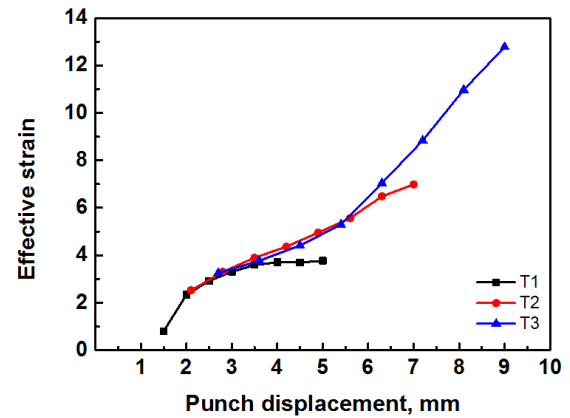


Fig. 14 Effective strain of billet depending on thickness

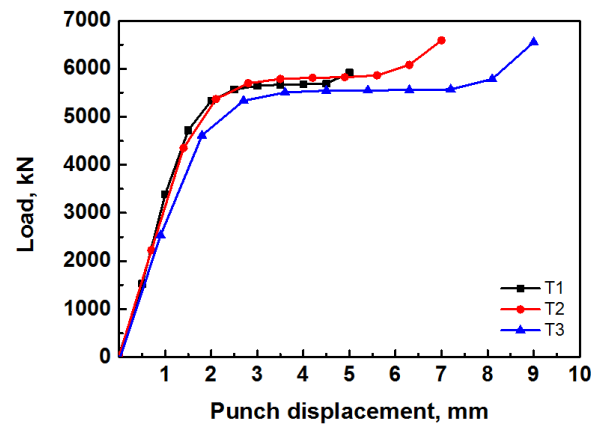


Fig. 15 Load of punch depending on thickness

3.5.2 두께에 따른 영향도 분석

Fig. 14 는 조건에 대한 시간별 소재의 평균 유효 변형률을 도시한 것이다. 두께에 따라 유효변형률의 차이가 없으며, 두께가 두꺼울수록 성형 시간이 늘어남에 따라 유효 변형률의 증가가 계속해서 이어졌다. T1 의 경우 빌렛의 두께가 2.5mm 남을 때 변형률의 증가가 줄어들었으며, T2 의 경우 빌렛의 두께가 2.4mm 남을 때 변형률의 증가가 줄어들었다. 이를 금형과 펀치의 간격(clearance)에 비교해 보면 남은 빌렛의 두께가 간격의 약 3.6 배부터 변형률 증가량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 즉, 간격의 약 3.6 배 만큼의 빌렛 두께가 압출 변형에 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

성형 하중에 있어서는 두께에 따라 큰 차이가 없는 것을 Fig. 15 에서 확인할 수 있었으며, 성형이 진행됨에 따라 하중이 계속 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 AA1070 알루미늄 사각형상에 대한 충격압출 공정 유한요소 성형해석을 수행하였다. Hansel-Spittel 유동식을 이용하여 AA1070 소재가 온도, 변형률 속도에 따라 큰 변형을 겪을 때, 재료의 유동 응력이 어떻게 작용하는지를 확인하였고, 유한요소 해석에 적용하였다. 해석 프로그램은 FORGE2011TM을 사용하였고, 금형과 소재 모두 탄성체로 적용함으로써 결과에 신뢰성을 높였다. 이를 통해 마찰, 편치/다이 간 간격(clearance), 종횡비(aspect ratio)와 같은 매개 변수들을 변형시킴으로써 금형에 가해지는 재료의 유효 변형률, 그리고 성형하중, 성형 형상을 예측하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 마찰과 관련된 인자들은 마찰계수(μ), 전단 한계(m)로 나타낼 수 있다. 이에 따라 유한요소 해석을 통해 마찰과 관련된 인자들이 충격압출에 어떠한 영향을 주는지를 확인하였다. 소재와 금형 간의 전단 한계를 증가시켰을 때, 재료의 변형률과 성형하중이 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 그에 반해 마찰계수를 증가시켰을 때, 재료의 변형률, 성형하중이 증가하긴 하였지만 그 효과는 전단 한계의 증가 효과보다 미미하였다.

(2) 편치와 다이 사이의 간격(clearance) 또한 충격압출에 영향을 주는 인자이다. 간격이 커질수록 변형률 및 성형하중이 줄어들었으며, 최종 형상에서는 간격이 넓은 면으로 재료의 유동이 쉬워져 간격이 좁은 면과의 높이 차이가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 간격차이가 커짐에 따라 계속해서 최종 높이가 증가하지는 않았는데, 이 이유는 간격이 증가함에 따라 재료의 유동이 쉬워졌지만 유입되는 부피가 한정되기 때문에 높이에서의 손실이 있는 것으로 보인다.

(3) 종횡비(aspect ratio)가 다른 정사각형 조건과 직사각형 조건을 비교했을 때 변형률 및 하중에서 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 정사각형 조건일 때는 재료 중심 부분의 유동이 직사각형 조건에 비해 어렵기 때문에 큰 하중을 나타낸다. 하지만 마찰이 클 때는 직사각형 조건에서 큰 하중을 보이는데, 이는 직사각형 조건이 정사각형 조건에 비해 긴 둘레를 가져 마찰의 영향이 더 크게 작용하기 때문이다.

(4) 두께는 편치의 속도가 조건마다 일정할 때, 유효변형률과 하중에 큰 영향을 미치지 않고 일정한 것으로 확인하였다. 단지 성형이 끝나지 않고 계속해서 진행됨으로써 변형률은 증가하였고, 하중은 최대에서 유지되었다. 또한 다이와 편치간 간격의 약 3.6배 만큼의 빌렛 내부가 압출 변형에 크게 작용한다는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2014년 산업통상자원부 재원의 첨단하이브리드 가공기술 고도화 및 실용화 사업(M0000529) 및 한국연구재단 선도연구센터(ERC)(#2012R1A5A1048294)의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] S. W. Chung, S. H. Park, S. H. Kim, K. Z. Cho, 2003, A Sensitivity Analysis on Frictional Effect of Backward Impact Extrusion for Rectangular Section Container, Trans. Mater. Process., Vol. 12, No. 8, pp. 693~701.
- [2] S. H. Kim, S. W. Chung, S. Padmanaban, 2006, Investigation of Lubrication Effect on the Backward Extrusion of Thin-walled Rectangular Aluminum Case with Large Aspect Ratio, J. Mater. Process. Technol., Vol. 180, No. 1-3, pp. 185~192.
- [3] S. W. Chung, Y. H. Jung, G. H. Kim, K. Z. Cho, 2002, A Study on FE Analysis for Improvement of Backward Impact Extrusion Process, Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 10, pp. 641~645.
- [4] M. K. Jo, E. An, I. W. Park, I. S. Song, H. Y. Kim, D. Kim, Y. H. Moon, J. H. Kim, 2015, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 33~36.
- [5] T. W. Ku, B. S. Kang, 2013, Numerical Evaluation of Backward Extrusion and Head Nosing for Producing a 6.75L Small Seamless AA6061 Liner, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 4, pp. 204~215.
- [6] Y. T. Im, S. H. Kang, J. S. Cheon, J. H. Lee, 2004, Finite Element Simulation of Tip Test with an

- Aluminum Alloy, J. Mater. Process. Technol., Vol. 157-158, pp. 171~176.
- [7] S. H. Hosseini, K. Abrinia, G. Faraji, 2015, Applicability of a Modified Backward Extrusion Process on Commercially Pure Aluminum, Mater. Des., Vol. 65, pp. 521~528.
- [8] K. H. Jung, H. C. Lee, D. K. Kim, S. H. Kang, Y. T. Im, 2012, Friction Measurement by the Tip Test for Cold Forging, Wear, Vol. 286-287, pp. 19~26