

## 알루미늄 합금의 일정 곡률 압출공정 개발

조영준<sup>1</sup> · 이상곤<sup>1</sup> · 김병민<sup>#</sup> · 오개희<sup>2</sup> · 박상우<sup>2</sup>

### Process Development of Constant Curvature Extrusion for Aluminum Alloy

Y. J. Joe, S. K. Lee, B. M. Kim, K. H. Oh, S. W. Lee  
(Received August 1, 2007)

#### Abstract

This paper shows some achievements at bending of extruded aluminum profiles during the extrusion process. The conventional process for the production of bent profiles involves a successive extrusion, stretching, and bending of the profiles. Conventional bending methods can not meet demands for precision and cost-effective production in some cases, due to cross sectional deformation, irregular decrease of tube wall thickness and a complication of the process design. An estimation of spring-back required for precision of the bending radius can not always be achieved by the over bending of the profile. Since the profile is hot during the bending process, the spring-back phenomenon can be avoided. This means that an additional bending process is not necessary. Consequently, flexible bending can be achieved with cost reduction and quality improvement. Experimental tests were completed to study the relationship between curvature radius of profile and position of guide on the extrusion for vehicle bumper. A7108 is applied as a billet material in order to increase strength. The overall correlation between the experimental and numerical results is good. It is therefore concluded that the present method provides an efficient means for the constant curvature extrusion process.

**Key Words** : Constant Curvature, Aluminum Extrusion, FE simulation, Theoretical analysis

#### 1. 서론

최근 환경법규가 강화됨에 따라 보다 효율적이고 경제적인 자동차를 개발 하려는 노력들이 진행되고 있다. 이러한 노력의 한 방법으로 기존 철강 재료를 경량재료로 대체함으로써 부품의 중량을 줄이는 방법이 연구되고 있다. 최근 연구에 따르면 차량 중량이 약 10% 감소할 경우 연료소비는 약 5.5% 감소한다[1]. 알루미늄의 경우 철강의 약 1/3의 비중을 가지고 있고, 재활용율이 90%이상으로 철강을 대체하는 재료로 널리 활용되고 있으며 특

히, 알루미늄 압출은 복잡한 형상의 길이가 긴 제품 생산에 적합한 기술로 그 적용 범위가 확대되고 있다[2].

자동차 부품의 경우 고객의 안전성과 차량 성능의 개선을 위해 다양한 형상을 가지고 있다. 직선으로 압출된 알루미늄 제품은 요구되는 형상을 갖추기 위해 굽힘 성형을 거치고, 이어서 하이드로포밍 또는 열간 가스 성형 공정을 거치게 된다. 직선으로 압출된 제품을 굽힘 성형하기 위해서는 스트레치 굽힘, 롤러 굽힘, 금형을 이용한 굽힘 등의 방법이 활용되고 있으며, 최근에는 독일의

1. 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

2. (주)동양강철 기술연구소

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부,

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

Hexabender[3]와 일본의 CNC Tube Bender[4]와 같은 자유 굽힘(free-bend)방법이 연구되고 있다.

하지만, 이러한 성형은 냉간 상태에서 이루어지므로 굽힘 하중을 제거한 이후 발생하는 스프링백으로 인해 굽힘 후의 형상 예측에 어려움을 겪고 있는 실정이다[5].

이런 문제점은 열간 상태에서 성형함으로써 해결 될 수 있으나, 직선으로 압출된 제품을 재가열 해야 하므로 에너지 소비가 추가적으로 발생하고, 고가의 복잡한 설비가 요구됨으로써 경제적인 제품 생산이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 압출성형과 굽힘 성형이 동시에 가능한 방법을 제안하고 이를 차량용 범퍼에 적용함으로써 품질이 우수한 제품을 경제적으로 제조하고자 한다. 이를 위해 곡률압출 기술에 필요한 이론적인 체계를 정립하고, 이를 성형해석과 실험을 통해 검증하였다.

## 2. 일정 곡률 압출 장치

### 2.1 일정 곡률 압출 시스템

압출과 동시에 곡률을 성형하는 공정은 Fig. 1 과 같이 구상하였다. 알루미늄 압출 금형 이후에 제품을 고정하는 지그를 두어 압출 제품을 직선으로 유지한다. 그립툴(grip tool)을 빠져나온 제품은 직선으로 왕복하는 가이드 롤의 롤(guide roll) 사이로 진입 한다. 제품의 곡률을 성형 하기 위해 가이드 롤은 압출방향의 직각 방향으로 직선 운동을 하게 되고, 일정한 거리에서 멈추게 된다. 이때 제품은 가이드의 이동에 의해 내측에 압축 응력이 발생하고 외측에서 인장응력이 발생한다. 또한, 가이드 위치에 따라 제품 내측과 외측의 압출 속도가 달라지게 되고 압출된 제품은 곡률을 형성하게 된다.

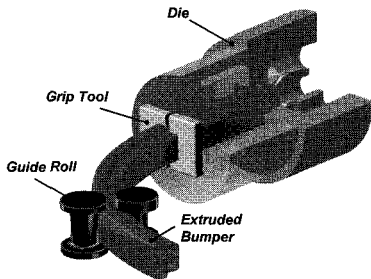


Fig. 1 Schematic description of constant curvature extrusion process

### 2.2 가이드 이송과 곡률의 관계

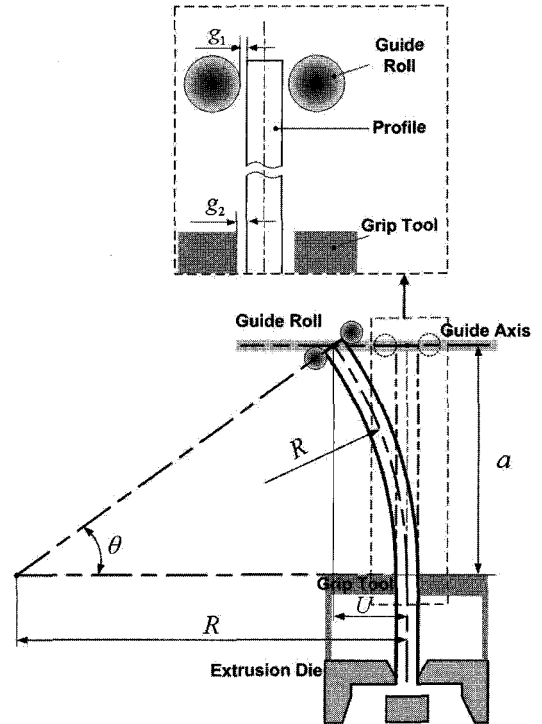


Fig. 2 The geometric relationship between curvature radius and guide movements

$$R = \frac{a^2 + U^2}{2U} \quad (1)$$

$$R = \frac{[a + f(U, g_2)]^2 + (U - g_1 - g_2)^2}{2(U - g_1 - g_2)} \quad (2)$$

$$R = \frac{\left[ a + A(g_2) \cdot \exp\left(-\frac{U}{B(g_2)}\right) + C(g_2) \right]^2 + (U - g_1 - g_2)^2}{2(U - g_1 - g_2)} \quad (3)$$

Fig. 2 와 같이 제품은 그립툴까지 직선을 형성하고 이후 가이드 롤의 이송에 의해 곡률을 이루게 된다. 이 때, 제품의 곡률(R)은 가이드 이송 거리(U), 고정 톨과 가이드 축 사이의 거리(a), 제품과 가이드 롤의 틈새(g<sub>1</sub>), 제품과 그립툴의 틈새(g<sub>2</sub>)에 의해 결정된다. 만약, 제품과 가이드 롤의 틈새(g<sub>1</sub>)와 제품과 그립툴의 틈새(g<sub>2</sub>)가 0 이면 제품의 곡률은 기하학적인 관계( $R^2 = a^2 + (R-U)^2$ )

로부터 식(1)로 표현된다. 그러나, 실제 장비의 경우 항상 제품과 가이드 툴 사이에 틈새가 존재하며, 이는 최종 제품의 곡률에 영향을 미치게 된다. 따라서, 이들 틈새를 고려할 경우 식(1)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 식(2)는 다시 식(3)으로 표현이 가능하며, 각항의 계수 A, B, C는 제품과 고정 툴의 틈새( $g_2$ )의 함수로 표현된다. 본 연구에서 성형해석을 통하여 각항의 계수 A, B, C를 구하였다.

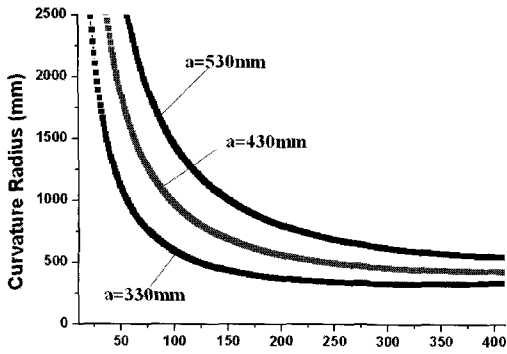


Fig. 3 Variation of curvature radius as a function of guide offset with the distance between grip tool and guide(a)

Fig. 3 은 그림툴과 가이드 축의 거리가 각각 330mm, 430mm, 530mm 일 때 가이드 이송에 따른 곡률의 변화를 보여준다. 가이드의 이송거리가 길어질수록 제품의 곡률은 작아지며, 한계값에 이르게 되면 제품의 곡률은 더 이상 작아지지 않고 수렴하게 된다. 이러한 수렴 값은 그림툴과 가이드 축의 거리가 줄어들수록 작아진다.

### 3. 일정 곡률 압출의 성형해석

#### 3.1 적용 소재

본 연구에서는 고강성의 범퍼를 제작하기 위해 A7108 소재를 사용하였으며, Table 1에 주요 성분을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of A7108

| Comp. | Si      | Fe        | Cu   | Mn   | Mg      |
|-------|---------|-----------|------|------|---------|
| Wt(%) | 0.1     | 0.2       | 0.05 | 0.05 | 0.7~1.4 |
| Comp. | Zn      | Zr        | Ti   | Al   | -       |
| Wt(%) | 4.4~5.5 | 0.12~0.25 | 0.05 | Rem  | -       |

### 3.2 고온 유동성 평가

소재의 고온변형거동을 관찰하기 위해 만능재료시험기(Thermac Master-Z)를 사용하여 압축시험을 수행하였다. 압축시편은  $\varnothing 8 \times h 12 \text{mm}$  로 가공하였으며 시편과 금형의 마찰을 최소화하기 위하여 고온윤활제를 도포하였다. 재료의 온도와 변형률 속도에 대한 영향을 파악하기 위해 400°C, 450°C, 500°C, 550°C 온도에서 변형률 속도 0.01, 0.1, 1.0, 10.0  $\text{sec}^{-1}$ 에 대하여 시험 하였다. 시험 결과 Fig. 4와 같이 변형률 속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하였으며, 온도가 증가함에 따라 유동응력이 감소하였다. Fig. 5에 응력-변형률 선도로부터 구한 강도상수(C)와 변형률 속도 민감 지수(m)를 나타내었다.

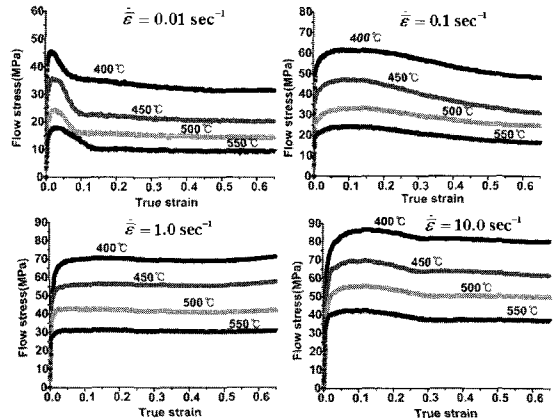


Fig. 4 True stress-true strain curve of A7108

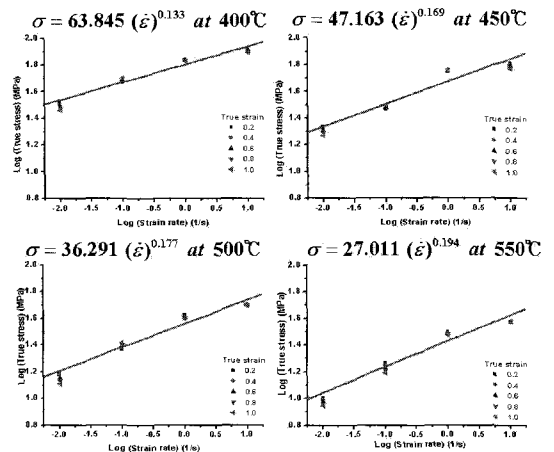


Fig. 5 Log(stress)-log(strain) curve of A7108

### 3.3 포트홀 압출 공정해석

#### 3.3.1 제품 형상 및 해석 모델

제품은 압출공정을 거치면서 단면적이 크게 감소하므로 높은 온도와 변형률 상태에서 곡률 성형 단계로 진입한다. 때문에 압출 공정에 대한 성형해석이 선행되어야 한다. 곡률 압출 공정은 자동차 범퍼를 대상으로 실험하였으며, 그 형상은 Fig. 6 과 같다. Fig. 7 은 범퍼 압출을 위한 포트홀 다이 구조를 나타낸 것이다.

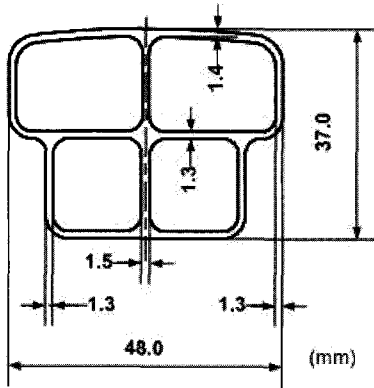


Fig. 6 Dimension and section of bumper

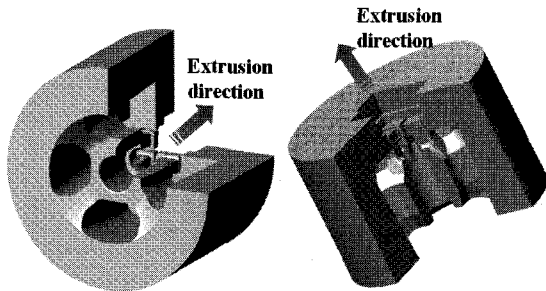


Fig. 7 Structure of porthole die for bumper

압출초기 빌렛직경은 279.4mm 이며, 다이의 포트홀을 통과하면서 5 개로 분할된 소재는 챔버에서 하나로 합쳐진다. 이 후 맨드렐을 통과하면서 범퍼형상을 이루게 된다. 성형해석은 강소성 유한요소해석 S/W 인 DEFORM-3D 를 사용하였다. 해석모델은 좌우 대칭을 고려하여 1/2 단면을 대상으로 수행하였으며, 빌렛의 유한요소 격자는 총 68740 개 이다. 빌렛의 초기온도는 480℃, 금형의 초기온도는 460℃로 설정하였다. 이 때, 압출비는

50.9, 램속도는 1mm/s, 분위기 온도는 25℃로 설정하였다. Table 2 는 포트홀 압출공정의 해석조건을 나타낸 것이다[6~7].

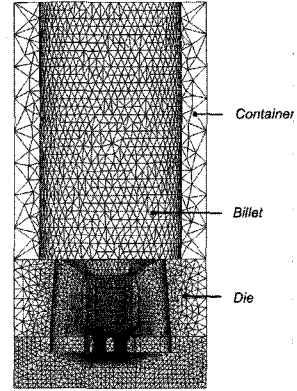


Fig. 8 Mesh system for porthole die extrusion

Table 2 Conditions of FE simulation for porthole die extrusion

| Extrusion conditions             | Values          |
|----------------------------------|-----------------|
| Material of billet               | A7108           |
| Material of tools                | AISI-H13        |
| Initial temperature of billet(℃) | 480             |
| Initial temperature of tools(℃)  | 460             |
| Punch speed (mm/s)               | 1.0             |
| Dimension of billet (mm)         | Ø 279.4 × h 700 |
| Room temperature (℃)             | 25              |

#### 3.3.2 압출공정 해석결과

5 개의 포트홀을 빠져나온 제품은 8 개의 접합면을 형성하고 이때, 포트홀을 거치면서 약 1.4~3.0 의 변형률을 나타내며, 제품의 온도 분포는 약 480~510℃ 이다. 소재의 고상선 온도(solidus temperature)는 약 610℃ 이므로 부분적인 용융은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

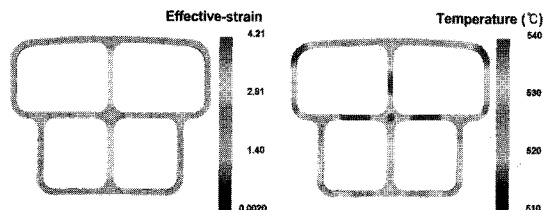


Fig. 9 Simulation results of porthole die extrusion

### 3.4 곡률성형 공정해석

#### 3.4.1 해석 모델

압출공정의 변형 이력을 고려하여 Fig.10 과 같은 곡률 성형 모델을 설정하였다. 압출 금형 출구부에서 그립툴까지 거리는 1300mm 이고, 여기서는 압출제와 대기의 대류효과만 고려하였다. 그립툴과 가이드 롤 사이의 거리는 310mm 이고 가이드 롤은 제품의 중심에서부터 20mm, 40mm, 60mm 이송한 후 멈춘다. 가이드 롤은 이동 시 제품의 진행방향과 수직을 이루며, 본 해석에서는 이를 고려하여 두 가이드 롤 사이의 중심에 대해 회전속도를 부여하여 가이드 롤이 이동할 때 제품단면과 수직이 되도록 하였다. 이 후 압출된 제품은 가이드를 통과하면서 곡률을 형성하게 된다. 해석은 상하 대칭을 고려하여 1/2 단면에 대해 수행하였고 유한요소격자는 4320 개 이다. 해석 조건은 Table 3 과 같다.

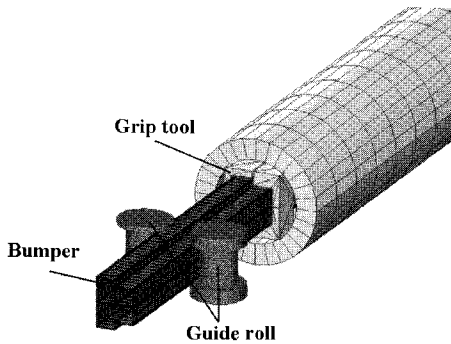


Fig. 10 Finite element model of curvature extrusion

Table 3 Conditions of FE simulation for curvature extrusion

| Extrusion conditions                      | Values     |
|---|------------|
| Extrusion velocity at die exit (mm/s)     | 50.9       |
| Distance between grip tool and guide (mm) | 310        |
| Distance between die and grip tool (mm)   | 1300       |
| Guide offset (mm)                         | 20, 40, 60 |

#### 3.4.2 곡률성형 해석결과

압출 금형을 빠져나온 압출품은 가이드 롤에

이를 때까지 대류에 의해 온도가 약 470℃로 떨어진다. Fig. 11은 곡률 성형 시 온도 분포를 나타낸 것이다. 해석결과 가이드 이송 거리를 20mm, 40mm, 60mm 로 변화 시켰을 때 제품의 곡률은 각각 R6182mm, R2060mm, R1205mm 였다.

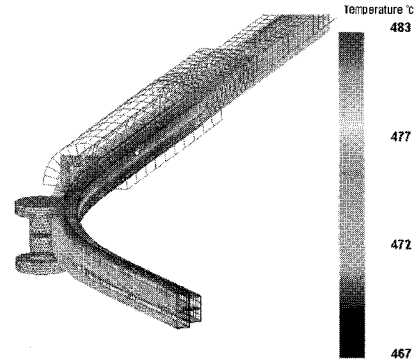


Fig. 11 Temperature distribution during curvature extrusion

## 4. 곡률압출실험

곡률 압출 실험은 해석 조건을 바탕으로 최대 허용 하중이 3500ton 인 압출기에서 수행하였다. 빌렛의 예열온도를 480℃, 금형의 예열온도를 460℃로 설정하고 램속도는 1mm/s 로 설정하였다. 압출된 제품은 그립툴로 고정하고 Fig. 12 와 같이 가이드를 이송하였다. 이때 가이드 이송거리는 20mm, 40mm, 60mm 로 변화 시켰다.

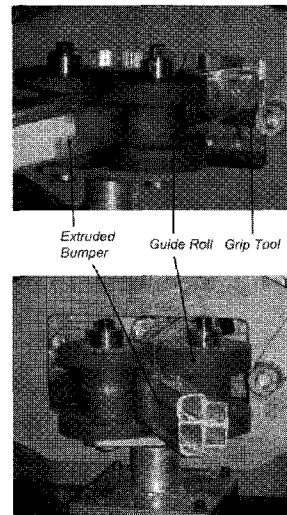


Fig. 12 Photography of curvature extrusion

Fig. 13 은 일정한 곡률로 성형된 제품과 유한 요소해석 결과를 나타낸 것이며, 곡률 측정값은 오차범위 2.7%이내였다. 제품의 곡률을 측정 한 후 이론 및 유한요소해석 결과와 비교 하였을 때 Fig. 14 와 같이 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

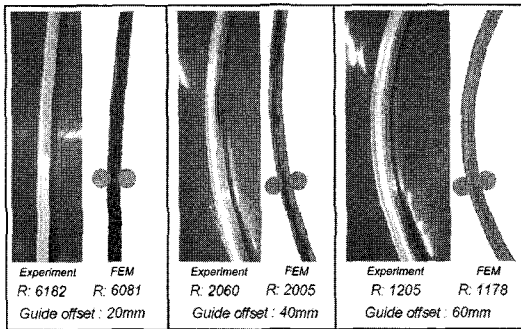


Fig. 13 Experimental results of curvature extrusion

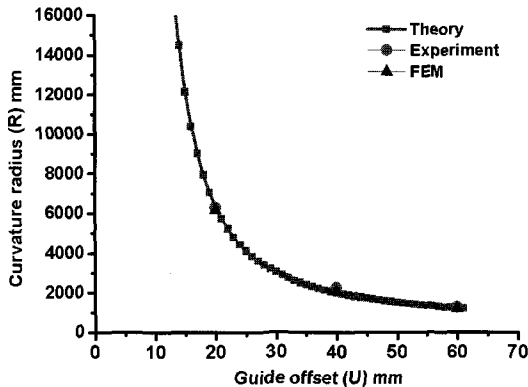


Fig. 14 Comparison of curvature radii

### 5. 결 론

본 연구에서는 자동차 범퍼의 일정 곡률 압출공정을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가이드와 그립틀 사이의 거리(a), 가이드 이송거리(U), 제품과 가이드의 틈새( $g_1$ ), 제품과 그립틀의 틈새( $g_2$ )로 표현하는 곡률 예측 모델을 제안하였다.

(2) 가이드 이송거리(U)가 증가할수록 제품의 곡률반경(R)은 작아지며, 한계값에 이르게 되면

제품의 곡률은 더 이상 작아지지 않고 수렴하게 된다. 이 수렴값은 그립틀과 가이드축의 거리(a)가 줄어들수록 작아진다.

(3) 곡률 압출 실험을 통해 얻어진 압출제의 곡률은 곡률 예측 모델의 결과와 잘 일치하였다.

### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술비(2년)에 의해 연구되었으며, 압출 실험을 지원해주신 (주) 동양강철 관계자 분들께 감사를 표합니다.

### 참 고 문 헌

- [1] W.S. Miller, L. Zhuang, A.J. Wittebrood, 2000, Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, Materials Science and Engineering, Vol.280, pp.37-49.
- [2] O. Reiso, 2004, Extrusion of AlMgSi alloys, Material forum, Vol.28, pp.32-46.
- [3] R. Neugebauer, W.G. Drossel, U. Lorenz, N. Luetz, 2002, Hexabend-A new concept for 3D-free-form bending of tubes and profiles to preform hydroforming parts and endform space-frame-components, Advanced Technology of Plasticity, Vol.2, pp.1465-1470.
- [4] M. Murata, Y. Aoki, 2006, Analysis of circular tube bending by MOS bending method, Advanced Technology of Plasticity 1996, Proc. of the 5th Int. Conference on Technology of Plasticity, Vol.1, pp.505 - 508.
- [5] K. Muller, Buntoro, 2003, Concurrent extrusion and bending of aluminum profiles, Light Metal Age, Vol.61, pp.8-12.
- [6] 이정민, 강충길, 김병민, 2004, 방열판 직접 압출 공정의 성형성 향상에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 13 권, 제 5 호, pp. 422-428.
- [7] 조형호, 이상곤, 박종남, 김병민, 2001, 포트홀 다이에 의한 Al 튜브의 비정상상태 열간 압출 공정 해석, 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 4 호, pp.311-318.