

## 자동차용 컨트롤 암 알루미늄 열간 압출을 위한 포트홀 금형개발

조영준\*, 이상곤\*, 김병민#, 오개희\*\*, 박상우\*\*, 이우식\*\*\*, 장계원\*\*\*

### Development of Porthole Die on Aluminum Extrusion for the Automobile Control Arm

Young June Joe\*, Sang Kon Lee\*, Byung Min Kim#, Kae Hee Oh\*\*, Sang Woo Park\*\*  
Woo Sik Lee\*\*\* and Gae Won Jang\*\*\*

#### ABSTRACT

The characteristic properties of aluminum, high strength stiffness to weight ratio, good formability, good corrosion resistance, and recycling potential make it the ideal candidate to replace heavier materials in the car to respond to the weight reduction demand within the automotive industry. In this paper, FE simulation was carried out to design an appropriate extrusion die for the automobile control arm. Based on the FE simulation result, a new die design has been proposed for uniform material flow in the cross section of extruded product. And then the welding pressure, extrusion load, and the tendency of mandrel deflection were estimated to verify high quality. In the extrusion experiment, it was possible to produce sound product without defects.

**Key Words** : Aluminum Hot Extrusion (알루미늄 열간압출), Porthole-die (포트홀 다이), FE Simulation (유한요소 해석), Control Arm (컨트롤 암), Welding Pressure (접합압력), Stress Analysis (응력해석), Die Design (금형설계), Extrusion Experiment (압출실험)

#### 1. 서론

기후 변화에 관한 국제적인 환경 협약은 1992년 리우에서부터 지속적으로 체결되어 왔고, 더욱이 1997년 교토 의정서 채택 이후 이산화탄소, 메탄 등 온실가스 감축 의무 비율은 세계 각국의 에너지 절약을 부추기고 있다. 이런 시대적 상황은

자동차에 있어서도 배출가스의 저감을 요구하며 차량의 경량화를 촉진 시키고 있다.

알루미늄 합금 소재는 저비중, 고강도, 내부식성 등을 가지며 기존의 철강재료를 대체할 재료로 많이 연구되고 있다. 또한, 압출을 이용한 차량 부품은 고강도의 재료를 생산할 수 있으며, 공정수를 대폭 줄일 수 있는 장점으로 인해 그 실효성이

접수일: 2006년 9월 26일; 게재승인일: 2007년 2월 21일

\* 부산대학교 정밀기계공학과

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051)510-3074

\*\* 동양강철 기술연구소

\*\*\* 현대모비스 기술연구소

더욱 각광 받고 있다. 컨트롤 암은 타이어와 차대를 연결하는 부품으로 차량이 자운스(jounce)하거나 리바운드(rebound) 할 때 타이어의 운동경로를 제한 한다. 따라서 충분한 강성을 지녀야 하며 연비 저감을 위해 가벼워야 한다.

본 연구에서는 차량용 컨트롤 암 생산을 위한 포트홀 다이의 알루미늄 압출공정에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 먼저 현장경험에 의해 설계 및 제작된 1 차 금형에 대하여 압출실험을 실시하고 발견된 문제점에 대한 원인 분석을 위해 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 금형 형상을 재설계하였다. 재설계된 금형은 유한요소 해석을 통해 압출하중, 접합면의 접합압력, 소재의 유동속도를 평가하여 설계의 타당성을 검증하였으며, 최종적으로 압출실험을 수행하여 결함이 없는 건전한 압출품을 생산할 수 있었다. 위와 같은 일련의 과정들을 통한 압출제 개발은 금형 제작시간, 수정작업의 감소, 제품 품질 향상에 기여할 것으로 사료된다.

## 2. 소재 고온 유동성 평가

### 2.1 적용 소재

재료에 대한 열간 가공의 기본 데이터면서 유한요소해석에 필요한 고온 유동 특성을 평가하기 위하여 압축시험을 수행하였다. 소재는 A6082를 사용하였으며, Table1 에 주요 성분을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of A6082

Comp	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
Wt(%)	0.7~1.3	0.5	0.1	0.4~1.0	0.6~1.2
Comp	Cr	Zn	Ti	Al	-
Wt(%)	0.25	0.2	0.1	Rem	-

### 2.2 시험 방법 및 결과

본 연구에서는 소재의 고온변형거동 관찰을 위한 장비 Thermo Master-Z 를 사용하여 압축시험을 수행하였다. 압축시편은  $\varnothing 8 \times h 12$  mm 로 가공하였으며 시편과 금형의 마찰을 최소화하기 위하여 고온 윤활제를 도포하고 운모판을 시편과 금형 사이에 넣고 실험하였다. 재료의 온도와 변형률속도에 대한 영향을 파악하기 위해 300℃, 400℃, 500℃ 온도

에서 변형률 속도 0.01, 0.1, 0.5, 3.0 sec<sup>-1</sup> 에 대하여 시험하였다. 시험결과 Fig. 1 과 같이 변형률 속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하였으며, 온도가 증가함에 따라 유동응력은 감소하였다.

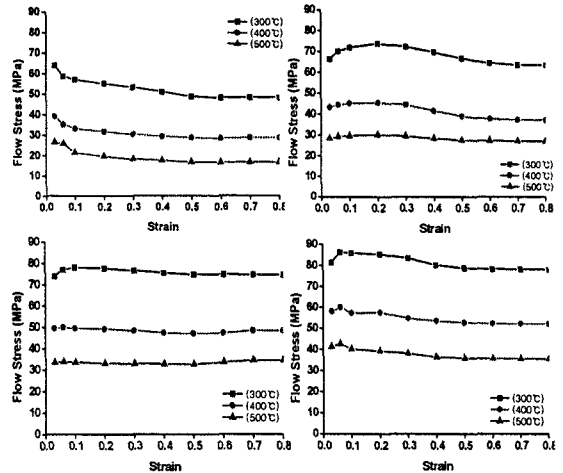


Fig. 1 Effective stress-strain curve of A6082

## 3. 포트홀 압출공정 및 해석모델

### 3.1 제품 형상 및 다이 구조

본 연구에서 사용될 컨트롤 암의 형상을 Fig. 2 에 나타내었다. 제품은 노면에서 전달되는 하중과 진동에 견딜 수 있는 형상을 가지고 있으며, 경량화를 위해 중공형상을 이루고 있으며 좌우 대칭으로 설계되었다.

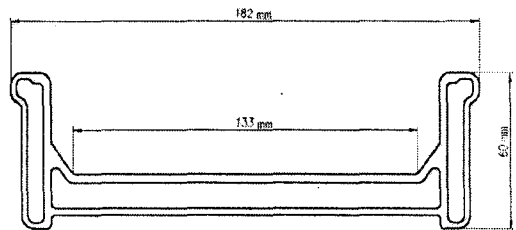


Fig. 2 Dimension and section of control arm

Fig. 3 은 컨트롤 암 압출을 위한 포트홀 다이 구조를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 A6082 소재의 빌렛은 직경이 279.4mm 이며 다이의 포트홀을 통과하면서 6 개로 분할 되었다가 챔버(chamber)에서 하나로 합쳐진다. 이 후 맨드릴(mandrel)을

통과한 소재는 Fig. 2 의 형상을 이루게 되며 베어링(bearing)의 길이는 소재의 유동을 고려하여 위치에 따라 차이를 두었다.

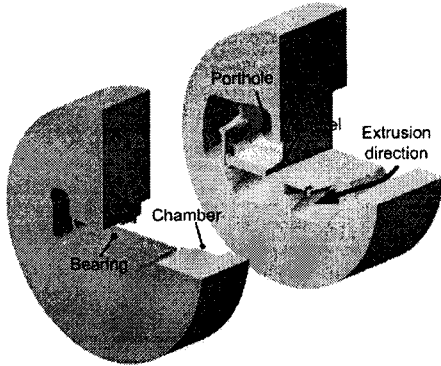


Fig. 3 Structure of porthole die for control arm

### 3.2 해석 모델

성형해석은 강소성 유한요소해석 상용코드인 DEFORM-3D 를 사용하였다. 해석모델은 좌우 대칭을 고려하여 1/2 단면을 대상으로 수행 하였다. 성형해석 시, 빌렛은 강소성체로 설정하고 금형은 변형을 수반하지 않는 강체로 설정하였다. Fig. 4 는 압출공정 해석을 위한 빌렛과 다이의 유한요소 격자를 나타낸 것이다. 빌렛의 유한요소 격자는 총 55000 개 이다.

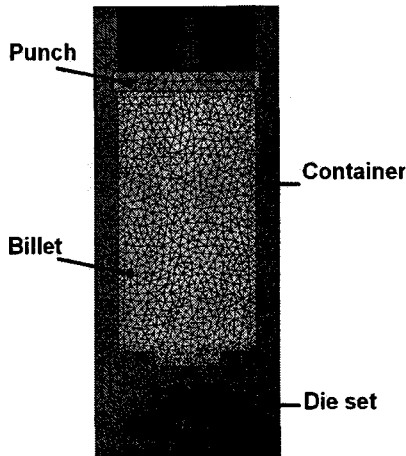


Fig. 4 Mesh system of porthole die extrusion

소재와 금형의 초기 온도는 460℃로 설정하였고 금형의 소재는 SKD 61 이다. 마찰상수( $\mu$ )는 무

운할 열간 압출시 일반적으로 적용되는 0.6 으로 설정하였다. 이때 램속도는 3mm/s 이며 분위기 온도는 25℃로 설정하였다. Table 2 와 Table 3 은 해석 조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Condition of FE simulation

Extrusion condition	Value
Material of billet	A6082
Material of tools	SKD61
Initial temperature of billet(℃)	460
Initial temperature of tools(℃)	460
Punch speed (mm/s)	3
Friction factor ( $\mu$ )	0.6
Dimension of billet (mm)	$\varnothing 279.4 \times h 700$

Table 3 Condition of heat transfer

Material	A6082	SKD 61
Heat capacity N/(mm <sup>2</sup> ·℃)	2.43	4.0
Thermal conductivity N/(sec·℃)	160	24
Interface heat transfer coefficient N/(sec·mm·℃)	11	11
Emissivity	0.3	0.7
Convection Coefficient N/(sec·mm·℃)	0.02	0.02
Room temperature(℃)	25	

## 4. 초기 금형 문제점 및 금형 재설

### 4.1 압출실험 및 해석결과

압출 실험에 사용된 설비는 수평식 압출기로 최대용량 3310 ton 이다. 여기에 기존 제작된 금형 Fig. 5 를 압출기에 장착하고 압출 방법은 무윤활 직접압출방식을 채택하였다. 소재와 금형의 예열 온도를 460℃로 설정하였다. 램속도 3mm/s 로 압출실험하여 Fig. 7 과 같은 제품을 압출하였으며 압출된 제품의 외측이 제품의 중심부 방향으로 약 10mm 휘어지는 결과를 보였다. 이와 같은 현상의 원인을 분석하고자 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 소재가 포트홀을 통과하여 최종 다이 랜드 부를 빠져나온 후 정상상태 까지 수행하였으며 정

상상태 이후의 압출속도 분포를 관찰하였다.<sup>2</sup> Fig. 6 은 해석 모델을 표현한 것이며, 유한요소 격자는 총 35000 개 이다. 강소성체로 설정한 빌렛의 물성은 압축시험 결과를 이용하였다.

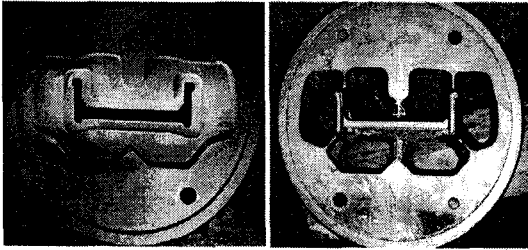


Fig. 5 Shapes of existing die

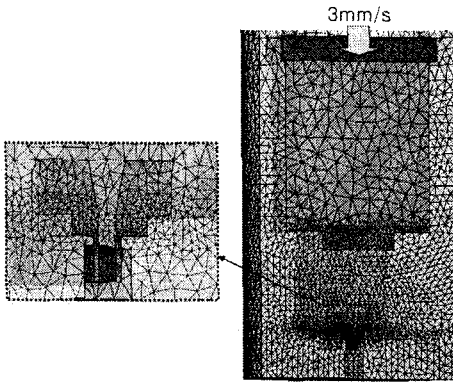


Fig. 6 Mesh system of extrusion for steady-state

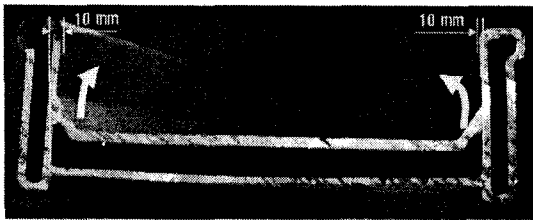


Fig. 7 The shape of extruded control arm using the existing die

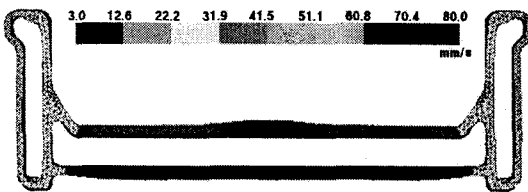
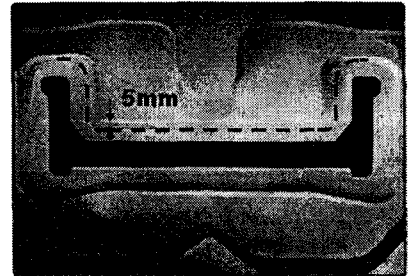


Fig. 8 Velocity at the exit of the existing die

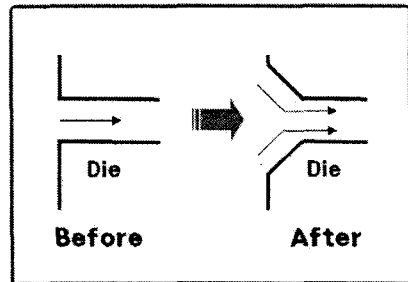
Fig. 8 은 해석결과를 나타난 압출속도 분포이다. 금형 중심부의 속도가 제품 외측에 비해 약 2 배 빠름을 알 수 있다. 해석 결과로 살펴보면 속도가 상대적으로 느린 제품 외측이 속도가 빠른 중심부 방향으로 휘어진 것으로 판단된다.

#### 4.2 금형 재설계

제품 단면의 속도가 불균일한 현상을 보일 시에는 일반적으로 금형과 소재가 접촉하는 베어링길이를 달리하여 소재의 속도를 제어하게 된다. 베어링 길이의 변화로 소재의 유동을 제어하기에 어려운 경우 챔버의 형상을 함께 변화시켜 그 효과를 더욱 키운다. 본 연구에서는 해석결과에서 나타난 문제점을 해결하기 위해 Fig. 9 와 같이 금형을 재설계 하였다. Fig. 9 (a)에서 보듯이 챔버 중심부를 5mm 확대하여 소재가 중심부에서 머무는 시간을 길게 하였으며, Fig. 9 (b)과 같이 속도가 빠른 부분의 베어링에 초크를 주어 마찰길이를 증가시키는 효과를 유도하여 소재의 속도를 늦추었다.



(a) The shape of expanded chamber



(b) Change of bearing shape

Fig. 9 Modification of die

#### 5. 금형 재설계 후 해석 및 실험

### 5.1 압출 속도

재설계된 금형을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 10 은 재설계된 금형에 대한 압출속도 분포를 나타낸 것이다. 압출 속도는 이전 금형과 달리 제품 외측의 속도가 상대적으로 빨라져 전체적으로 고른 분포를 보였다.

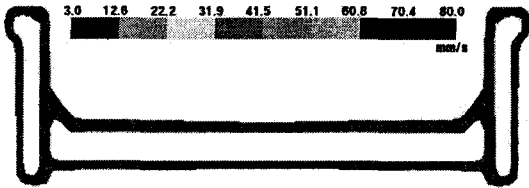


Fig. 10 Velocity at the exit of the redesigned die

### 5.2 압출 하중

Fig. 11 은 재설계된 금형에 대한 압출공정해석 결과로 얻은 펀치 스트로크에 대한 압출하중을 나타낸 것이다.

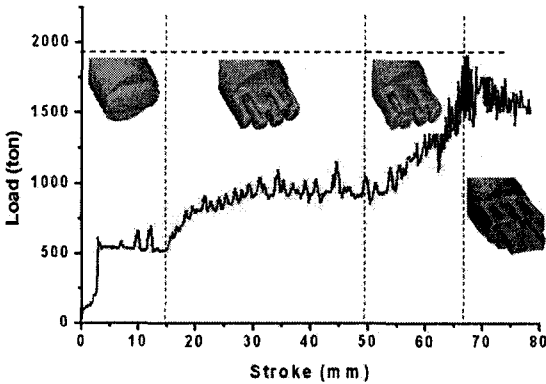


Fig. 11 Extrusion load-stroke curve

본 연구에서 사용된 압출기의 사양은 최대 용량 3310 ton 이다. 해석결과 압출하중은 최대 1850 ton 을 나타내었고, 이는 허용 최대 하중의 약 56% 이다. 따라서 압출기 용량 내에서 압출이 가능하다.

### 5.3 접합 압력

포트홀에 의해 6 부분으로 나누어진 소재는 웰딩 챔버를 지나며 Fig. 12 와 같이 8 곳에서 접합면이 형성된다. 이 때, 베어링 부근의 협소한 영역에서 매우 높은 압력으로 소재의 접합이 이루어진다. 기존 연구에서는 이 때의 압력이 소재의 유동응력

이상일 경우 접합면의 강도가 충분하다고 판단 하였으며 이는 기존 연구에서 실험을 통해 검증 되었다.<sup>3,5,6</sup>

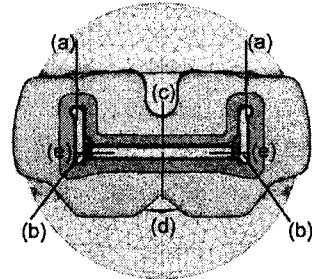


Fig. 12 Position of welding plane

Fig. 13 은 해석 결과 나타난 접합면의 압력분포이다. 접합면 부근의 온도는 약 475℃이고, 변형률 속도는 약 3.0sec<sup>-1</sup> 이다. 이 경우 소재의 평균 유동응력은 45MPa 이다. 소재유동응력(Y)에 대한 접합압력(P<sub>θ</sub>)의 비는 최소 2.0 에서 최대 5.1 에 이른다. 따라서 압출되는 제품은 충분한 접합강도를 가진다고 판단된다

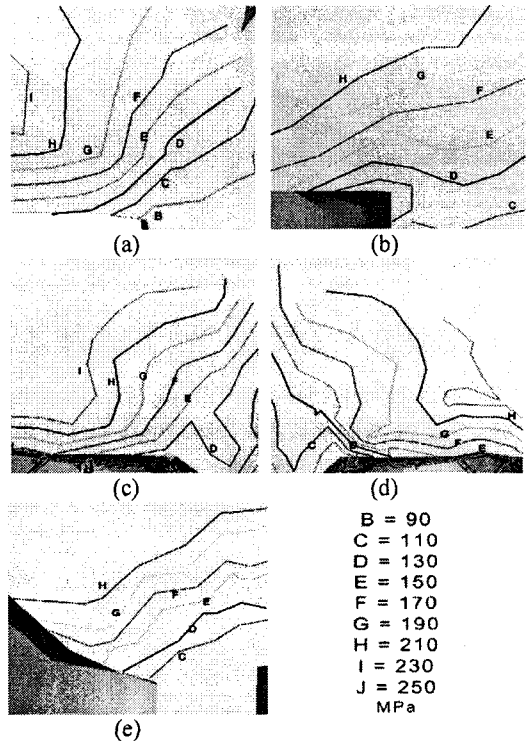


Fig. 13 Normal pressure at welding plane

### 5.4 금형의 강도

강도해석은 상용 해석 프로그램인 ANSYS 9.0 을 이용하였다. 성형해석의 최대압출하중이 작용하는 시점에서 금형에 작용하는 하중의 영향을 탄성 해석을 통해 평가하였다. Fig. 14 는 해석을 위한 금형의 경계조건을 나타낸 것 이다. 이 때, 금형의 물성치는 Table 4 와 같다.

Table 4 Mechanical properties of die

Mechanical Properties	Value
Young's modulus (GPa) at 500 °C	165
Poisson ratio	0.3
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7700

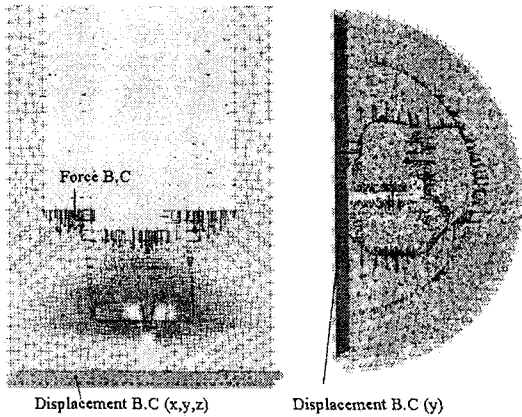


Fig. 14 Boundary condition

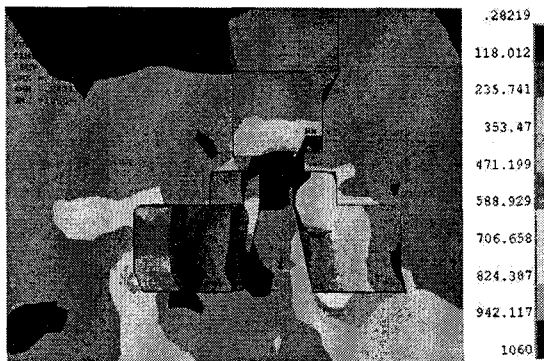


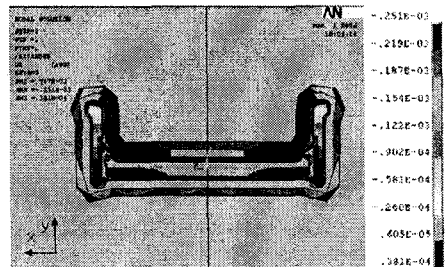
Fig. 15 Effective stress of die

Fig. 15 는 유효응력분포를 나타낸 것이다. 최대 유효응력이 발생한 곳은 멘드렐과 브릿지의 연결 부위로서 압출공정 중 균열이 빈번히 일어나는 부

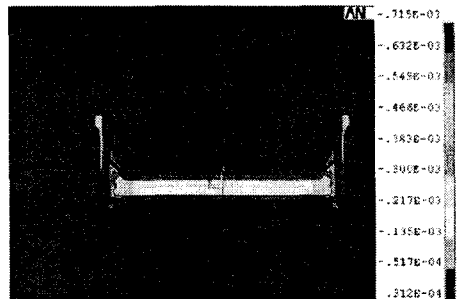
분이다. SKD61 금형강의 항복강도는 1470MPa 이다.<sup>4</sup> 해석결과 최대유효응력값은 1060MPa 을 나타내므로 소성변형이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

### 5.5 금형의 탄성변형량

본 제품의 압출시 멘드렐 주위에 형성되는 압력으로 인해 멘드렐의 탄성변형을 예상할 수 있다. 멘드렐의 변형은 압출되는 제품의 정밀도와 연관되므로 그 변위를 평가하여 제품의 건전성을 확보하고자 한다. Fig. 16 는 다이와 멘드렐의 변형양상을 나타낸 것이다. X 축 변위량은 최소  $-2.51 \times 10^{-4}$  mm, 최대  $0.38 \times 10^{-4}$  mm 를 보였다. 이를 고려할 때 제품출구부의 X 축 최대변형량은  $2.89 \times 10^{-4}$  mm 이다. 또, Y 축 변위량은 최소  $-7.15 \times 10^{-4}$  mm, 최대  $0.31 \times 10^{-4}$  mm 를 나타내며 최대변형량은  $7.46 \times 10^{-4}$  mm 이다. 위와 같은 해석 결과 멘드렐의 탄성변형량은 매우 작으므로 제품의 정밀도에 영향을 미치지 못한다.



(a) X-axis displacement



(b) Y-axis displacement

Fig. 16 Elastic displacement of die

### 5.6 압출 실험 및 결과

해석결과 제품의 건전성과 압출공정에 이상이 없음을 확인한 후 재설계된 금형을 최대용량

3310ton 의 수평식 압출기에 장착한 후 압출 실험을 실시하였다. 빌렛과 금형의 예열온도는 460℃로 설정 하였으며 압출실험 결과 Fig. 17 과 같은 양호한 제품을 얻을 수 있었다.

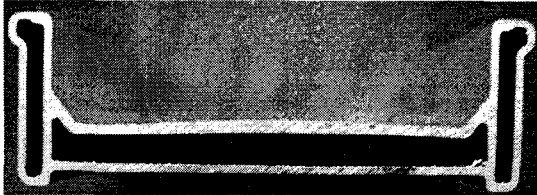


Fig. 17 The shape of extruded control arm using the redesigned die

## 6. 결론

본 연구에서는 자동차 컨트롤 암 생산을 위한 포트홀 다이 압출공정에 대한 성형해석 및 압출 실험을 수행하여 다음의 결론을 도출 하였다.

- (1) 1 차 금형의 유한요소해석 결과 제품 중심부의 압출속도가 외측에 비해 상대적으로 빠름을 알 수 있었다.
- (2) 금형의 챔버와 베어링부를 재설계함으로써 압출속도의 균일화를 유도하였다.
- (3) 재설계된 금형에 대한 성형 해석 결과 압출제 단면의 속도 분포는 균일하였다.
- (4) 재설계된 금형에 대한 성형 해석 결과 최대 압출하중은 1850 ton 으로 압출기 최대허용량의 약 56%이므로 압출 가능하였다.
- (5) 접합단계에서 모두 8 곳의 접합면이 형성되며, 이때 접합압력은 소재 평균유동응력의 2.0~5.1 배로 충분한 접합강도를 나타내었다.
- (6) 금형에 발생하는 최대유효응력은 금형재료의 항복강도 이하이다
- (7) 재설계된 금형을 이용하여 압출 실험한 결과 결함이 없는 건전한 제품을 얻을 수 있었다.

## 후기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Xie, J. X., Murakami, T., Takahashi, H. and Ikeda, K., "Theoretical Analysis in Fabrication Process of Pipe by Multi-Billet Extrusion," Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.34, No.390, pp. 823-829, 1993.
2. Patrick, U., "Extrusion die design for flow balance using FE and optimization method," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, No.2, pp. 319-341, 2002.
3. Lee, J. M., Kim, B. M., Kang, C. G. and Jo, H. H., "Development of Direct Extrusion Process on Al 1050 Condenser Tube by using Porthole Die," Journal of the Korean society of Precision Engineering, Vol. 21, No.7, pp. 53-61, 2004.
4. America Society for Metals, "Tool steel dies for the cold forging of steel," Source Book on Cold Forming, pp.289, 1977.
5. Lee, J. M., Kim, B. M., Kang, C. G. and Jo, H. H., "FE analysis of Extrusion Process and Estimation of Welding strength for Micro Multi Cell Tube with Serration," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No.9, pp. 49-59, 2005.
6. Xie, J., Murakami, T. and Takahashi, H., "Influence of Number and Location of Container Holes on forming of Circular Tube by Multi-Billet Extrusion," Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.31, No.352, pp.625-631, 1990.
7. Hsiang, S. H. and Liao, C. S., "Study on Hot Extrusion of Tubes," Journal of Materials Processing Technology, Vol.63, No.1-3, pp.254-259, 1997.
8. Takatsuji, N., "Effects of Die Shapes on Welding Shapes on Welding Strength of Extrusion Pipes by Porthole Die-Improvement in Quality of Hollow Extrusion I," International Journal of Mechanical Sciences, Vol.36, No. 414, pp. 731-736, 1995.
9. Onuh, S. O., Ekoja, M. and Adeyemi, M. B., "Effects of die geometry and extrusion speed on the cold extrusion of aluminium and lead alloys," Journal of Material Processing Technology, Vol.132, No.1-3, pp. 274-285, 2003.