

## 세레이션형 미세 멀티셀 튜브 압출 및 접합강도 평가

이정민\*, 김병민#, 조형호\*\*, 강충길\*\*\*

### FE analysis of Extrusion Process and Estimation of Welding strength for Micro Multi Cell Tube with Serration

Jung Min Lee\*, Byung Min Kim#, Hyung Ho Jo\*\* and Chung Gil Kang\*\*\*

#### ABSTRACT

This paper describes a development of the extrusion process and estimation of the weldability for multi cell tubes used to cooling system of automobiles. A study on extrusion process is performed through the 3D FE simulation in non-steady state and extrusion experimentation. Also, nano-indentation test is employed to estimate the weldability of tubes. Especially, An evaluation of the weldability using the nano-indentation is accomplished as compared with nano-hardness in welded part and in the others. Finally, the pattern of the mandrel deflection is investigated according to shapes of the porthole and/or chamber.

**Key Words :** Multi cell tube (멀티셀 튜브), Porthole die (포트홀 다이), nano-indentation test (나노 인덴테이션 실험), Weldability (접합성), Al hot extrusion (알루미늄 열간 압출)

#### 1. 서론

멀티셀 튜브(Multi cell tube)는 자동차 냉난방기 용 열교환기 부품으로써 보통 열효율이 우수한 Al 이나 Cu 계열의 합금이 사용되며, 챔버 타입의 다이를 이용한 열간압출에 의해 생산되고 있다. 특징으로는 단면 내부에 냉매 유로인 하모니카 형상의 미세한 홀을 가지며, 열교환 성능 및 열전달 면적을 향상시키기 위해 내부 홀의 개수는 증가시키면서 얇은 벽 두께를 가지는 형상으로 설계되고 있

다. 그러나 이러한 단면 형상은 압출시 높은 성형 압력으로 인해 소재의 미충전 및 접합불량, 다이 파손 등의 결함을 빈번히 발생시킨다. 또한 얇은 벽 두께로 인해 고압의 냉매가 홀 내부에 흐를 경우, 내압으로 인한 튜브의 강성이 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 튜브 형상 측면에서는 열효율과 강도를 만족하는 적절한 형상을 결정하는 것이 중요하고, 다이 설계 측면에서는 다이 내부에 균일한 소재유동을 가지면서 튜브의 양호한 접합 강도와 다이 강성을 확보하는 것이 중요하다.<sup>1</sup>

접수일: 2005 년 1 월 25 일; 게재승인일: 2005 년 7 월 8 일

\* 부산대학교 정밀기계공학과

# 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

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

\*\* 한국생산기술원 나노소재개발팀

\*\*\* 부산대학교 기계공학부

본 연구에서 적용된 포트홀 다이(Porthole die)의 경우 일련의 소재 유동 양상 및 다양한 압출변수(온도, 압출속도, 접합실 높이)에 대한 소재유동양상은 이미 선행 연구<sup>2,5</sup>를 통해 일부 조사되었다. 그러나 실제 현장에서 적용되고 있는 압출다이 설계는 동일한 제품 단면 형상에서도 보류 압출기의 사양과 설계자 및 수정자의 경험과 능력 등에 따라 다이 내부 형상은 다양하게 변화할 수 있다.

본 연구는 멀티셀 튜브 압출에서 포트홀 및 챔버 형상 변화에 따른 맨드릴 변형양상을 평가하기 위한 목적으로 고안된 것이다. 본 연구에서는 멀티셀 튜브의 압출 다이 설계 안에 대한 비정상상태 유한요소해석을 수행하여 압출하중 및 소재유동양상을 평가하였다. 또한 다이 재료에 따른 금형강도 해석과 다이 내부 형상에 따른 맨드릴 변형 양상을 조사하였다. 최종적으로 다이 제작 및 압출시험을 수행하고, 압출된 멀티셀 튜브의 접합성을 평가하기 위해 나노 인덴테이션(nano-indentation) 시험을 수행하여 접합면과 다른 부위의 경도값을 비교, 평가하였다.

## 2. 튜브 및 압출다이 설계

### 2.1 튜브 형상

Fig. 1은 본 연구에서 적용된 세레이션형 4 홀 멀티셀 튜브 단면형상을 나타낸 것이다. 단면 내부에는 4개의 냉매 홀을 가지며 열전달 면적을 향상시키기 위한 세레이션(Serration) 형상이 있는 것이 특징이다. 튜브 높이는 3.1 mm, 두께는 0.45 mm, 튜브 단면적은 22.24 mm<sup>2</sup>로 단면감소율은 99.9% 이상이다.

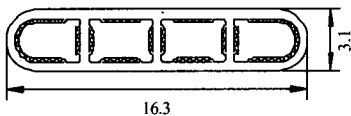


Fig. 1 Dimensions and section of the multi cell tube

### 2.2 압출다이 설계

Fig. 2는 본 연구에서 적용된 포트홀 다이의 치수 및 형상을 나타낸 것이다. 특징으로는 챔버 바닥형상이 원형이 아닌 리본 형상이고 또한 포트홀 외주 직경(Fig. 2(B))이 챔버 바닥의 외주 직경(Fig. 2(A))보다 크게 설계되었다. 이러한 형상은 앞선

연구결과<sup>6</sup>를 바탕으로 맨드릴의 변형을 최소화하기 위해 설계되었다.

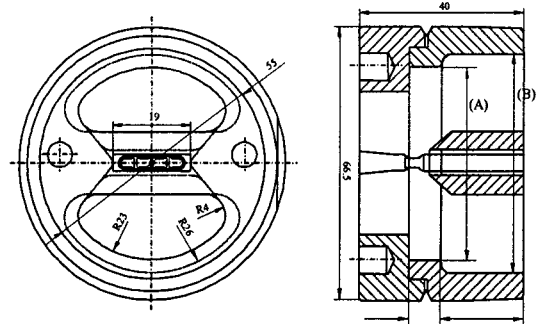
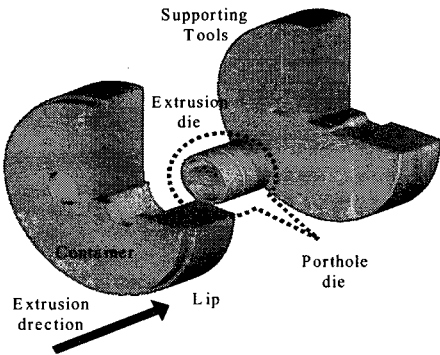
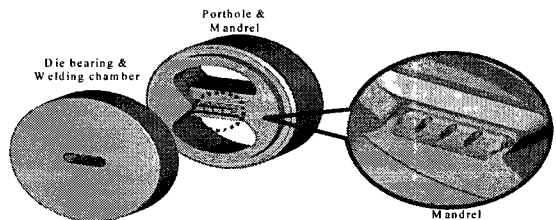


Fig. 2 Construction of porthole die

본 연구에서는 압출기 사양에 의해 전체 압출공구의 직경은  $\Phi 260$  mm로 결정하였다. 특히 생산성 향상 및 압출비를 감소하기 위해 2 홀 방식의 압출다이를 설계하였다. 다이 베커(Die baker)를 포함한 다이 전길이는 127 mm로 설정하였다.



(a) Die assembly



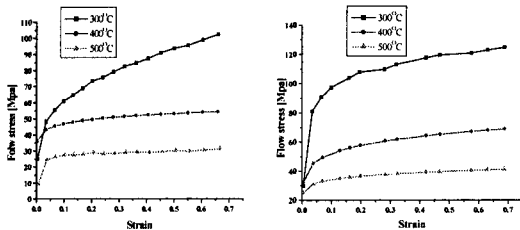
(b) Porthole die

Fig. 3 3D model of die set for FE simulation of extrusion process

멀티셀 튜브의 직접압출을 위한 압출다이는 컨테이너 바닥을 구성하고 포트홀 다이와 베커(Backer)가 삽입되는 립(Lip)과 튜브를 성형하는 포트홀 다이, 압출재의 압력과 포트홀 다이를 지지하는 베커, 압출다이 전체의 압력을 유지하는 볼스터(Bolster) 등으로 구성된다. Fig. 3 은 압출다이의 전체 조립도와 성형해석을 위한 3D 모델을 나타낸 것이다.

### 3. 직접압출공정 해석

#### 3.1 직접압출공정 해석조건



(a) Strain rate 0.1

(b) Strain rate 1

Fig. 4 Constitutive data for Al 1050 according to temperature changes

Table 1 Mechanical and thermal properties of Al 1050

Properties	Value
Tensile strength, ultimate	76 MPa
Tensile strength, yield	28 MPa
Modulus of elasticity	69 MPa
Poisson' ratio	0.33
Heat capacity	0.9J/g-°C
Thermal conductivity	231W/m-K
Melting point	647~657°C

3D 비정상상태 열간 압출공정 해석은 소재가 다이 베어링을 빠져 나오기 시작하는 단계까지 수행하였으며 튜브의 대칭성을 고려하여 다이의 1/4 단면만을 취하였다. 다이와 빌렛의 초기 온도는 각각 480°C와 500°C로 설정하였다. 빌렛의 재료는 Al 1050 을 적용하였고 다이는 열간 금형강인 STD 61 을 적용하였다. 성형해석 시 소재는 열연성모델이고, 다이는 변형을 수반하지 않는 강체로 설정하였

다. Table 1 은 본 연구에서 적용된 Al 1050 의 열적, 기계적 특성을 나타낸 것이다. Al 1050 의 열간 물성치(Fig. 4)는 온도구간 300, 400, 500°C에서 변형율 0.1 과 1 에 대해 압축시험을 통해 획득하였다.

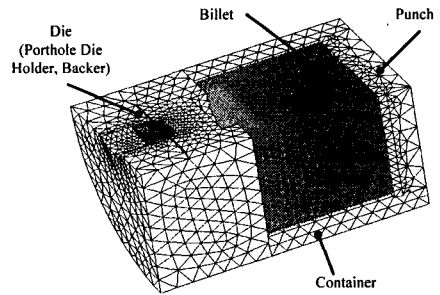


Fig. 5 Initial mesh system

Table 2 Conditions of FE simulation

Extrusion condition	value
Material of billet	Al 1050
Material of tool	STD61
Initial temperature of tools (°C)	480
Initial temperature of billet (°C)	500
Extrusion velocity (m/mm)	70 mm/s
Reduction area (exit)	99.9%
Room temperature (°C)	20°C
Friction factor (m)	0.3
Dimension of billet (mm)	φ 154.2× 80 mm

마찰상수(m)는 무윤활의 열간 압출 시 일반적으로 사용되는 값 0.6<sup>7</sup> 로 가정하였다. Fig. 5 에 압출공정 해석을 위한 빌렛과 다이의 유한요소 격자를 나타내었고 Table 2 에 전반적인 해석조건을 나타내었다. 유한요소해석은 상용 강소성 유한요소 해석 코드인 DEFORM 3D<sup>8</sup> 를 이용하였다.

### 3.2 직접압출공정해석 결과

#### 3.2.1 압출하중 및 소재유동

Fig. 6 은 본 성형해석 결과로 얻은 압출하중-스트로크 곡선 및 빌렛의 변형 과정을 나타낸 것이다. 하중 곡선의 상승 경향은 포트홀 다이 형상과 깊은 관련이 있다. A 구간(업세팅 구간:Upsetting stage)은 컨테이너 내의 빌렛이 컨테이너 사이를

채우는 단계로 압출하중은 완만하게 상승한다. B 구간(분할구간:Dividing stage)은 빌렛이 브릿지부에서 두개로 나뉘어져 포트홀로 유입되는 단계이다. C 구간은 두 개로 나누어진 빌렛이 챔버 바닥에 닿기 직전까지의 과정으로 압출하중의 상승 없이 일정하게 유지된다. D 구간(접합구간: Welding stage)은 빌렛이 챔버 바닥에 닿아 포트홀과 챔버 내를 완전히 채우는 단계이다. 이후 E 구간(성형구간:Forming stage)에서 멀티셀 튜브 형상을 최종적으로 성형하게 된다.

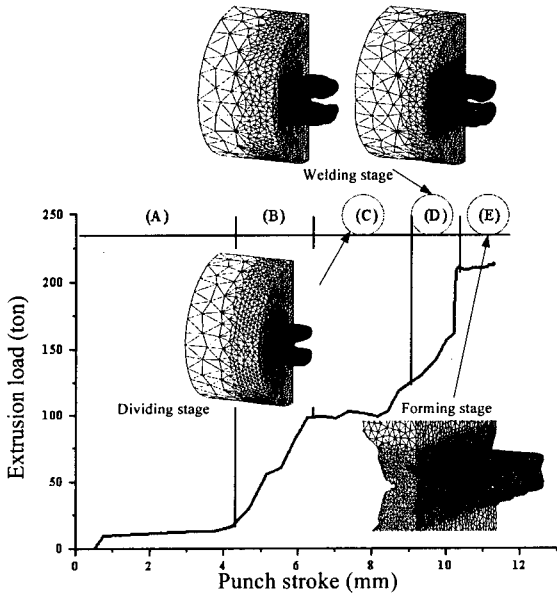


Fig. 6 Load-stroke curve and metal flow

Fig. 7 은 하중-스트로크의 각 구간별 소재의 변형과정을 변형률 속도 분포로 나타낸 것이다. 포트홀 외경이 챔버의 외경보다 크기 때문에 브릿지부에서 분할된 소재는 포트홀 유입시 포트홀 벽면과의 마찰이 거의 발생하지 않는다. 또한 소재가 챔버 바닥에 닿은 후 맨드릴에 닿지 않고 포트홀 내부를 다시 충전한다. 이러한 포트홀 형상은 압출 초기 하중을 감소시키며 챔버 내에서 맨드릴로 유입되는 소재유동을 균일하게 하는 역할을 하는 역할을 한다. 이와 같은 형상에서 가장 이상적인 경우는 챔버 바닥과 포트홀 입구가 테이퍼 형상을 갖는 것이라 생각되지만 본 연구에서는 가공의 어려움과 효율 측면에서 앞선 형상을 채택 하였다.

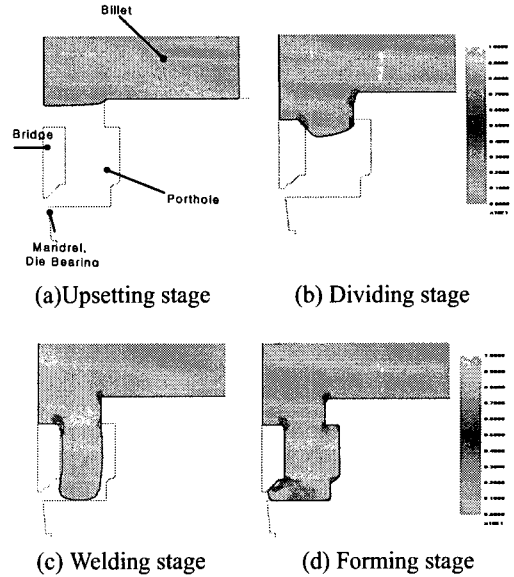


Fig. 7 Distributions of the strain rate of the material according to variations of ram stroke

### 3.2.2 맨드릴 내 소재 유동

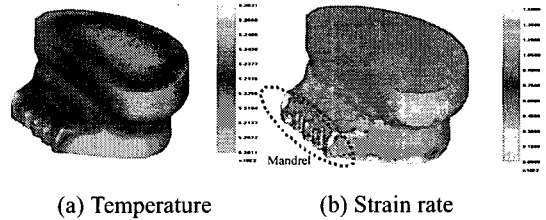


Fig. 8 Distributions of the temperature and strain rate of the material in mandrel

Fig. 8 은 접합구간에서 소재의 온도분포와 변형률 속도 분포를 나타낸 것이다. 튜브 셀 형성부위에서 변형률 속도 분포가 가장 높게 나타났다. 변형률 속도가 높다는 것은 상대적으로 그 부위에 소재의 유동속도가 빠르고 높은 변형저항을 가진다는 것을 의미한다. 그러나 이 경우 맨드릴 부의 변형률 속도가 타 부위보다 높기는 하지만 맨드릴 내에서는 일정한 분포를 가지므로 소재유동 측면에서는 상당히 양호한 것으로 판단된다. 온도 분포는 초기 다이의 온도가 소재 온도보다 낮기 때문에 다이와 접촉하는 소재의 부위는 온도가 낮아

지지만 전체적인 온도분포의 차는 6° 이하이므로 온도에 대한 영향은 미비할 것으로 사료된다.

Fig. 9 는 맨드릴 내에서 소재의 접합과정을 나타낸 것이다. 챔버에 충전된 소재는 맨드릴 가운데부터 충전되고 차츰 맨드릴 양 끝으로 이동한다. 그러나 맨드릴 양끝 경우 소재의 유동을 제한하는 것이 없으므로 접합면의 위치가 맨드릴 중간 보다 약간 압출 방향으로 전진해있다.

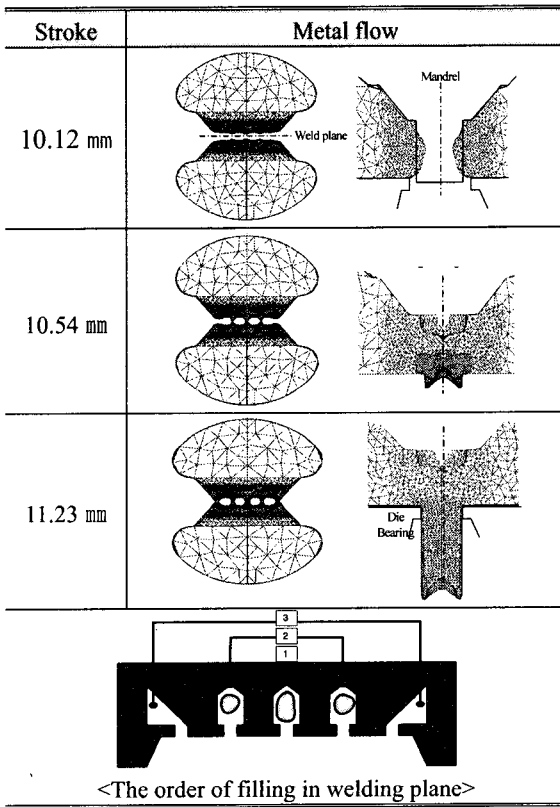


Fig. 9 Metal flow in mandrel

### 3.2.3 접합압력

Fig. 10 은 성형구간에서 소재 접합면과 다이 내부의 수직압력분포를 나타낸 것이다. 유한요소해석에서는 소재의 수직압력이 소재의 항복강도 이상이면 양호한 접합압력을 가지는 것으로 판단한다.<sup>6</sup> 맨드릴 양끝의 경우 최종 출구 부의 접합압력은 22~30 MPa로 나타났다. 그러나 이 경우 다이 출구 부근은 소재가 빠져 나온 상태이므로 성형압력이 거의 작용하지 않는 부분이다. 이에 반해 같은 접

합면 위치라도 다이 출구 이외의 부근에서는 50~60 MPa로 소재의 항복강도 이상의 값을 나타낸다. 일반적으로 접합면의 접합압력은 다이 출구부에서 가장 작고 다이 내부로 들어올수록 점점 커진다. 다이 내부에서는 데드메탈이 형성되는 부에서는 수직압력이 작고, 형상이 급격히 변하는 포트홀과 챔버의 경계부에서는 상대적으로 증가한다.

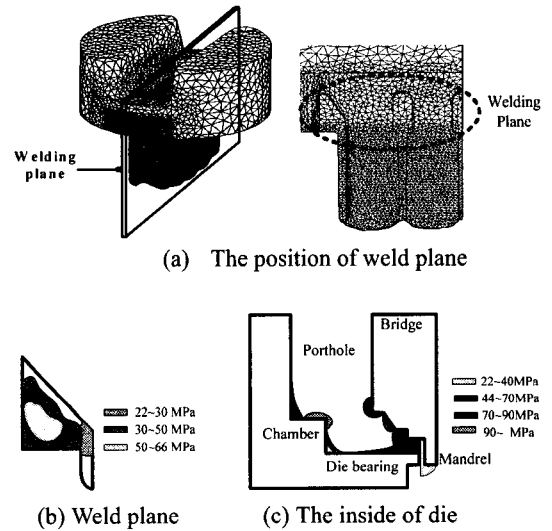


Fig. 10 Distributions of the normal pressure

## 4. 압출다이 강도해석

### 4.1 압출다이 강도해석 조건

강도해석은 상용 해석 프로그램인 ANSYS 5.5 를 이용하였다. Fig. 11 은 강도해석 시 다이의 경계 조건을 나타낸 것이다.

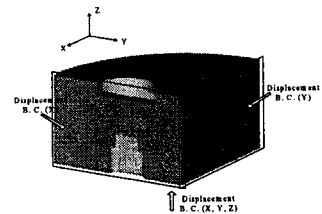


Fig. 11 Boundary conditions

해석은 소재가 맨드릴을 통과하기 직전 구간을 세 단계(Punch stroke: 10.12, 10.54, 11.23 mm)로 구

분하여 다이 재료가 열간 금형강(STD 61)과 초경 (Gti 50)일 때에 대해 각각 수행하였다. Table 3 에 강도해석 시 사용된 열간 금형강(STD 61)과 초경 (Gti 50)의 기계적 물성치를 나타내었다.

Table 3 Mechanical properties

Mechanical properties	STD61	Gti50
Poisson' ratio	0.3	0.23
Modulus of elasticity	210 GPa	500 GPa

### 4.2 강도해석 결과

강도해석은 접합구간을 세 구간으로 나누어 수행하였다. Fig. 12 는 스트로크 10.12 mm에서 열간 금형강일 때 다이의 탄성변형량과 유효응력분포를 나타낸 것이다. 최대탄성변형량은 포트홀 입구에서 0.038 mm로 나타났다. 이러한 결과는 소재가 포트홀로 유입되면서 포트홀 입구를 넓히는 작용을 하기 때문이라 판단된다. 따라서 기하학적으로 다이 전체가 일체형일 경우 맨드릴은 가운데로 모이는 변형을 하게 된다. 또한 소재가 챔버에 충전되면서 맨드릴과 브릿지를 압출 방향 반대쪽으로 들어 올리는 역할을 하는 것으로 판단된다. 이러한 변형 양상은 소재가 맨드릴에 닿지 않음에도 불구하고 맨드릴 양 끝 변형(0.02 mm)을 초래하는 결과를 나타낸다. Fig. 13 에 다이 및 맨드릴의 전체적인 변형 양상을 나타내었다.

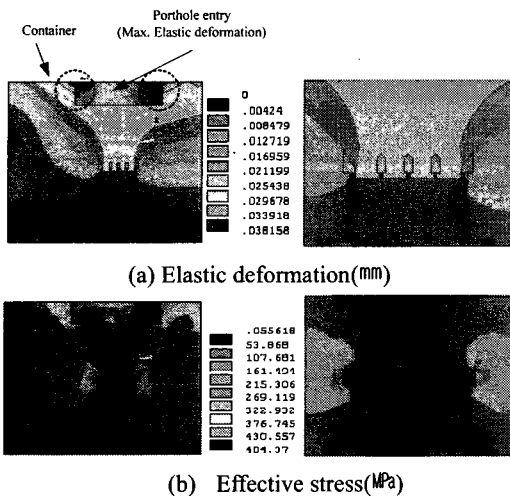


Fig. 12 The results of the stress analysis(stroke 10.12 mm)

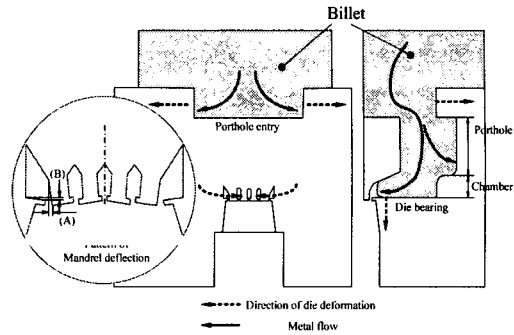


Fig. 13 Pattern of die and mandrel deflection

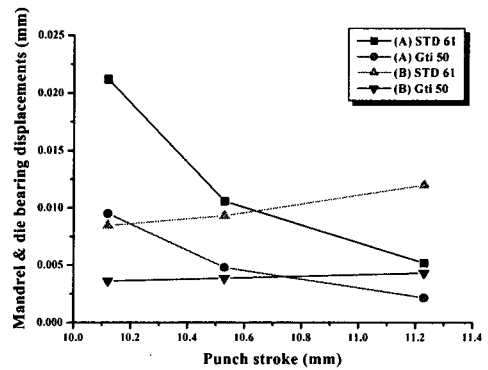


Fig. 14 Mandrel and die bearing deflection as function of punch stroke

Fig. 14 은 Fig. 13 에 표시한 맨드릴(A)과 다이 베어링(B)의 탄성변형량을 펀치 스트로크의 함수로써 나타낸 것이다. 맨드릴의 탄성변형량은 소재가 맨드릴에 닿지 않는 스트로크 10.12 mm에서 가장 크고 소재가 맨드릴에 충전되면서 차츰 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 앞서 언급했듯이 포트홀 외경과 챔버 바닥형상(리본형상)으로 인해 소재의 유동이 맨드릴과 브릿지 부를 들어올리는 결과를 초래하여 맨드릴 변형양상이 가운데로 모이는 것으로 사료된다. 이후 압출이 진행되면서 소재가 맨드릴에 충전되어 맨드릴을 바깥쪽으로 벌리는 작용을 하여 맨드릴 변형은 서로 상쇄된 것이라 판단된다. 이러한 결과는 기존의 연구결과<sup>6)</sup>(챔버 바닥형상(원형), 포트홀 외경과 챔버외경 동일)에서 소재의 성형압력으로 인해 맨드릴의 양 끝이 변형한다는 결과와는 상반된 결론이다. 다이 베어링의 경우, 압출이 진행되면서 초경 및 열간

금형강 모두 약간 증가하는 것으로 나타났다.

또한 동일한 조건에서 초경(Gti 50)을 적용한 경우, 열간 금형강 보다 맨드릴 및 다이 베어링 탄성 변형량이 1/2 정도로 감소한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 맨드릴 및 다이 베어링은 초경을 적용하는 것이 구조상 더 안전할 것으로 사료된다.

### 5. 압출 실험

#### 5.1 압출 실험 조건

해석의 유효성을 입증하고 제품의 건전성을 확인하기 위해 Fig. 2의 다이 형상에 대해 다이 제작 및 압출 실험을 수행하였다.<sup>9</sup>

##### 5.1.1 빌렛 제조 및 다이 제작

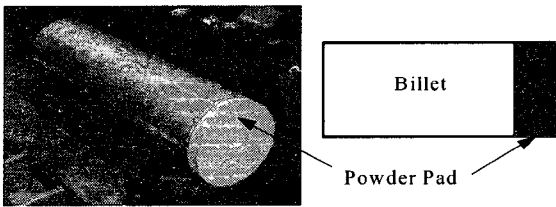


Fig. 15 Manufactured billet

빌렛은 에어슬립(Air Slip) 연주공법을 이용한 177.8 mm 직경으로 제조되었다. 압출초압을 줄이기 위해 빌렛의 전면에 이룬 밀도의 70%로 냉간 압분한 분말 압분체를 부착하였다.(Fig. 15)

Fig. 16은 제작된 포트홀 다이를 나타낸 것이다. 앞선 강도해석의 결과를 고려하여 다이 베어링과 맨드릴은 초경과 열간 공구강 두가지 재료에 대해 각각 제작되었다. 일반적인 압출 다이는 선반과 밀링, 레이디얼 머신 등을 사용하여 전체적인 내외각 형상을 가공한 후(1 차가공) 열처리를 수행하게 된다. 이후 방전가공과 마무리 연삭을 통해 제작된다. 맨드릴 및 다이 베어링 부의 경우 연삭, 프로파일링, 방전가공기, 래핑등의 순서로 가공한 후 다이 케이스에 열박음을 수행하여 조립된다.<sup>9</sup>

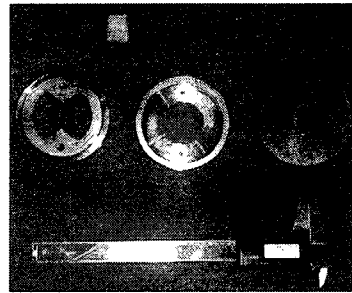
##### 5.1.2 압출장비 및 압출조건

Fig. 17은 압출실험에 사용된 장비를 나타낸 것이다. 압출기는 수평식 단동압출기로 최대용량은

1,250 tons이며,  $\Phi 180 \times h1,500$  mm의 컨테이너 크기를 가지고 있다. 압출기에는 예열된 빌렛의 컨테이너에도 가열 장치가 있으며 상시 일정온도를 유지하기 위해 등은 압출시스템(Isothermal Extrusion System)을 갖추고 있다.



(a) No application stress analysis(STD 61)



(b) Application stress analysis(Gti 50)

Fig. 16 Photographs of manufactured porthole die



(a) Extruder (b) Billet heater

Fig. 17 Equipment of hot Al extrusion

빌렛의 예열온도는 490℃, 다이의 예열온도는 470℃ 전후를 유지하였다. 압출온도는 다이가 450~480℃, 빌렛이 500℃로 설정되었고 압출속도는 앞선 해석 조건과 마찬가지로 70 mm/s 로 유지하였다. 압출방식은 열간 알루미늄 압출에 사용되

는 무윤활 직접압출방식을 채택하였다. 전반적인 압출실험조건을 Table 4 에 나타내었다.

Table 4 Al Hot extrusion conditions

Extrusion capacity	1250 ton
Extrusion velocity	70 mm/s
Initial Temperature of tools	500 °C
Initial Temperature of billet	480 °C
Pad length	20 mm
Taper heating	70 °C
Temp. of container	410~430 °C

5.2 압출실험 결과

압출 실험결과, 열간 금형강으로 제작한 다이는 압출기 안전압 270kg/cm<sup>2</sup> 이상의 압출압력이 걸리고, 초경으로 제작한 다이는 압출압력 221kg/cm<sup>2</sup>으로 상당히 낮은 압출압력을 나타내었다.

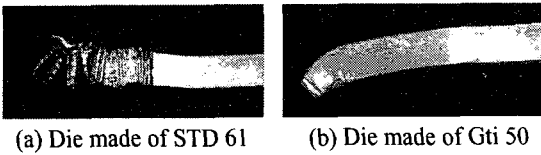


Fig. 18 Extruded multi cell tubes

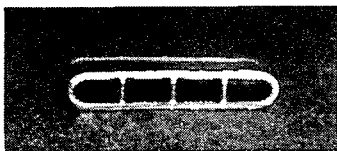


Fig. 19 Cross-sectioned shape of multi cell tube

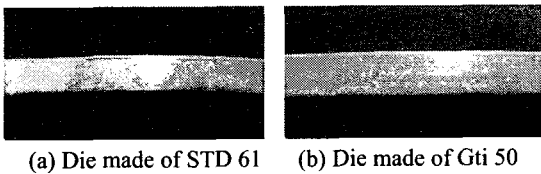


Fig. 20 Surface of multi cell tubes

Fig. 18 는 압출된 멀티셀 튜브를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 열간 금형강을 적용한 경

우, 다이에 높은 압력을 받게 설계됨에 따라 빌렛의 압분체가 다이 베어링을 통과할 때 튜브 선단부가 뭉쳐있는 형상이 나타났다. 이에 반해 초경을 사용한 경우 양호한 형상의 압출이 이루어진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 19 는 압출된 튜브의 단면을 나타낸 것이고 Fig. 20 은 압분체가 다이를 통과 후 표면형상을 나타낸 것이다. 열간 금형강을 적용한 경우, 튜브의 평탄도 및 직진도를 유지하지 못하고 상당히 휘어진 것을 알 수 있다. 이에 반해 초경을 적용한 경우는 평탄도 및 직진도는 유지하면서 원활한 형상의 압출이 이루어진 것을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 강도해석의 결과와 상당히 일치하는 것으로 볼 수 있다.

6. 나노 인덴테이션 실험

6.1 나노 인덴테이션 실험 조건

멀티셀 튜브와 같이 초소형 단면을 가진 제품의 기계적 성능을 평가하는 것은 쉬운 일이 아니다. 본 연구에 사용된 멀티셀 튜브의 경우 제품 두께가 0.45 mm 미만이며 특히 접합면 두께는 최대 11 μm정도이므로 비커스 경도와 같은 일반적인 경도 시험은 불가능하다.

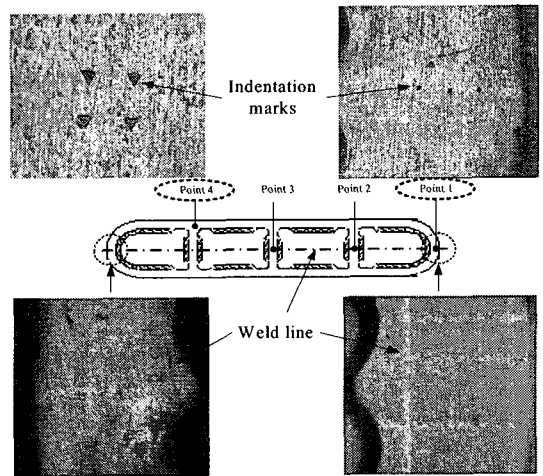


Fig. 21 Positions of indentation test and indentation mark

직접압출 공정 시 포트홀 다이 내부에서의 접합은 일종의 고상용접이다. 따라서 강한 압력의



작용으로 강제적으로 결합된 소재의 표면은 자유 전자의 이동이 가능한 원자 이하의 간격을 유지하기 때문에 경도값이 다른 부위보다 높다.<sup>10</sup> 따라서 본 연구에서는 Al 1050 멀티셀 튜브의 접합성 평가를 위해 단면내의 접합면과 일반 부위에 나노 경도시험을 수행하여 그 값을 비교하였다. 시험 위치는 접합면상의 세 지점과(Point 1, 2, 3) 일반적인 단면 부위(Point 4)를 선정하였으며 그 위치는 Fig. 21에 나타내었다.

나노 인덴터는 정밀하게 가공된 다이아몬드 압자를 시험편 표면에 눌러 생기는 반발력과 압입깊이를 측정해서 압흔 면적을 계산하고, 이로부터 시험편의 탄성계수 및 경도를 측정할 수 있다.<sup>11</sup> 본 시험에 사용된 나노인덴터(MTS. Nanoindenter XP)를 이용하였다.<sup>12</sup>

### 6.2 나노 인덴테이션 실험 결과

기존의 접합강도 시험은 인덴터 및 아르곤 가스를 통한 튜브 확장성 시험을 통해 이루어진다. 그러나 튜브의 단면이 미세하고 복잡한 경우, 이러한 시험들을 수행하기에는 많은 제약이 따른다. 이 경우, 앞서 설명했듯이 고상접합으로 인해 타 부위보다 접합부위의 소재 항복강도는 증가하고 소재의 표면경도 또한 증가할 것이라는 예측에 실험을 수행하였다

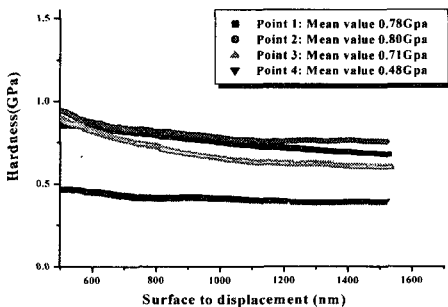


Fig. 22 Comparison of nano-hardness

Fig. 22 는 나노 인덴터 시험 수행 결과 측정된 최대하중과 나노 경도값을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 나노 경도값의 정확도를 높이기 위해 500nm 이하의 노이즈가 포함된 측정치는 제거하고 노이즈가 없는 부분의 값만 취하여 경도값의 평균

을 구하였다. 결과는 접합부위인 포인트 1, 2, 3 지점의 경우 (0.78~0.80GPa)가 4 지점(0.48GPa)보다 높게 나타났다. 결과적으로 접합면상의 높은 경도값으로 미루어 볼 때 Al 1050 멀티셀 튜브의 접합성은 양호하다고 판단된다.

## 7. 고찰

본 연구에서 적용된 포트홀 다이의 경우, 맨드릴이 가운데로 변형하는 원인은 맨드릴 양 끝단에 소재의 유동량이 많아서가 아니라<sup>6</sup> 오히려 챔버 내에서 브릿지 및 맨드릴을 압출 반대 방향으로 들어올리는 힘이 크게 작용하기 때문이다. 또한 맨드릴 셀 부에 소재의 충전 후 오히려 맨드릴의 방향은 바깥으로 벌어지는 변형을 나타내는데 이는 가운데로 향하는 변형과 서로 상쇄되어 맨드릴 변형을 감소시키는 것으로 나타났다.

### 7.1 포트홀 형상에 따른 맨드릴의 변형

Fig. 23 은 본 연구에 적용된 포트홀 다이를 포트홀 입구와 챔버 사이를 직선 형태로 재설계한 후 성형해석을 수행한 결과로 소재의 유효응력 분포를 나타낸 것이다. 포트홀 외경이 챔버 외경보다 큰 경우 소재 내부의 작용하는 응력 분포는 유동이 변하는 곳에서 상당히 크게 나타나지만 포트홀이 거의 직선인 경우에는 응력분포의 차이는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 24 는 Fig. 23 과 동일한 위치에서 재설계된 다이의 강도해석결과를 나타낸 것이다. 포트홀이 챔버 직경보다 큰 경우 맨드릴은 가운데 모이는 반면, 포트홀 외경이 챔버 외경과 유사한 경우는 바깥으로 벌어지는 변형이 발생하였다.

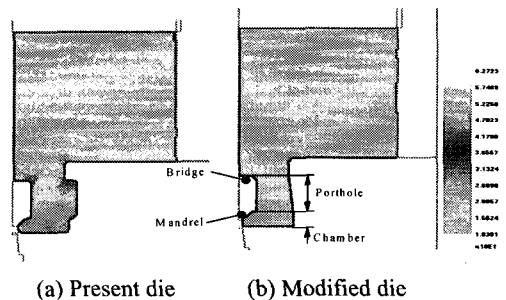


Fig. 23 Distributions of effective stress

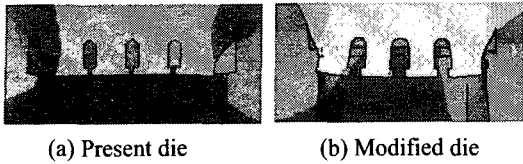


Fig. 24 Results of stress analysis

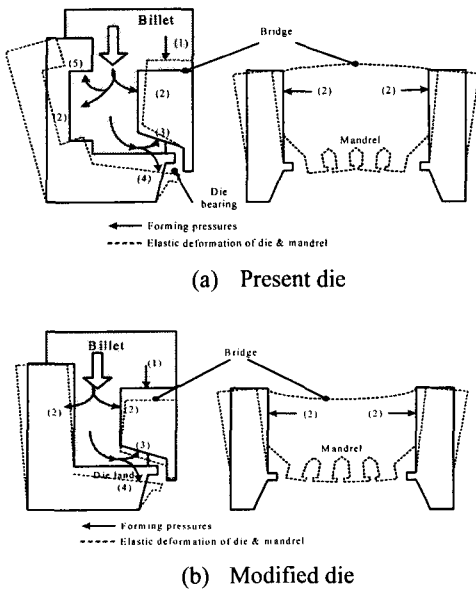


Fig. 25 Patterns of die and mandrel by forming pressure

이러한 결과는 Fig. 25 와 같이 포트홀 외경이 챔버 외경보다 큰 경우 포트홀 내부에 소재유입량이 증가하여 반경방향으로 가하는 성형압력이 증가하기 때문이다. 이러한 성형압력은 다이 변형양상을 전체적으로 베럴형상(barrel)으로 만들 것으로 판단된다. 이와 더불어 브릿지 및 맨드릴을 압출 반대방향으로 들어올리는 성형압력 또한 상대적으로 크게 작용하게 된다. 이에 반해 포트홀 외경이 챔버 외경과 유사한 경우, 포트홀 내 반경방향으로 작용하는 성형압력이 작고 브릿지 및 맨드릴을 들어 올리는 성형압력이 브릿지를 누르는 성형압력보다 작기 때문에 맨드릴 변형양상이 전체적으로 바깥으로 벌어지게 된다. Fig. 25 에 각각 타입에 대한 변형양상을 개략적으로 나타내었다.

결국 포트홀 형상을 어떻게 가져가느냐에 따라 초기 맨드릴 변형 양상에 큰 영향을 미치고 또한

전체적인 멀티 셀 튜브 직접압출의 성패와도 직결된다 할 수 있다.

## 7.2 챔버 형상에 따른 맨드릴의 변형

Fig. 26 은 챔버 바닥 형상이 원형과 리본형사일 때의 각각 맨드릴내 소재의 충전과정도를식으로 나타낸 것이다.

챔버바닥이 원형일 경우<sup>6</sup>, 챔버내 소재는 맨드릴 중간에서 가장 먼저 닿고 차츰 가장자리로 이동한다. 그러나 맨드릴 치형을 충전하기 위한 변형에너지가 크므로, 맨드릴 중앙 부의 빌렛은 맨드릴을 완전히 충전하지 못하고, 다이 베어링을 따라 압출 방향으로 빠져 나오거나 반경방향으로 유동한다. 이후 접합실 내의 소재는 상대적으로 변형에너지가 적게 드는 맨드릴 양쪽 끝 접합면을 먼저 충전시킨다. 이와 같은 소재 유동의 차이는 스트로크가 진행됨에 따라 맨드릴 양끝 변형을 가중시킬 것으로 판단된다.

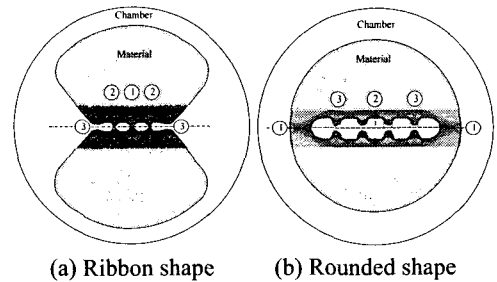


Fig. 26 The order of material filling in welding plane according to chamber shapes

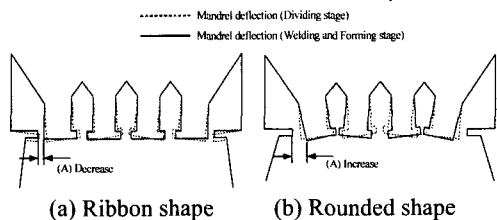


Fig. 27 The order of material filling in welding plane according to chamber shapes

이에 반해 챔버 바닥이 리본형일 경우, 맨드릴과 접합면에 닿는 소재 충전순서가 일치한다. 이

러한 소재유동은 앞서 강도해석에서 확인했듯이 맨드릴이 가운데로 향하는 변형 양상을 맨드릴 내 소재가 충전되면서 중앙에서부터 차례로 밖으로 향하는 변형을 가하여 Mandrel 의 변형이 감소시키는 역할을 한다. 결과적으로 Fig. 27 과 같이 맨드릴 양 끝 변형(Fig. 27 (a))이 리본형일 경우, 압출이 진행되면서 감소하고 원형일 경우(Fig. 27 (b))는 증가할 것으로 판단된다.

## 8. 결론

이상의 일련의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 챔버 바닥형상이 리본형상일 경우, 맨드릴 및 다이 베어링으로 유입되는 소재 유동을 균일하게 만든다.

(2) 맨드릴 내 유입되는 소재는 접합면 가운데부터 먼저 닿고 차츰 맨드릴 양끝으로 이동한다. 이것은 맨드릴의 탄성변형을 감소시키는 역할을 한다.

(3) 접합압력은 다이 출구부에서 가장 작고 다이 내부로 들어올수록 점점 커진다.

(4) 포트홀 외경이 챔버 외경보다 크고 챔버 바닥형상이 리본형상일 경우, 챔버 내에서 브릿지 및 맨드릴을 압출 반대 방향으로 들어올리는 힘에 의해 맨드릴은 가운데로 향하는 변형을 한다.

(5) 맨드릴 셀 부에 소재의 충전 후 맨드릴의 방향은 바깥으로 벌어지는 변형을 나타내고 이는 가운데로 향하는 변형과 서로 상쇄되어 맨드릴 변형을 감소한다

(6) 다이가 초경일 때, 열간 금형강일 때보다 탄성변형량은 약 1/2 로 감소하였으며 멀티 셀 튜브 압출 실험을 통해 증명하였다.

(7) 맨드릴 양끝 변형 및 파손을 방지하기 위해서는 맨드릴과 접합면에 도달하는 소재의 유동 순서를 일치시켜야 한다.

## 후 기

본 연구는 한국산업기술재단(KOTEF)에서 지원하는 지역혁신 인력양성사업 연구과제인 “고기능, 고정도 판재성형 및 금형설계 기술개발 인력양성” (TS-32)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Lee, Jung min, Kim, Byung Min, Kang, Chung Gil, "Effects of chamber shapes of porthole die on elastic deformation and extrusion process in condenser tube extrusion," Material & Design, available online, 2004.
2. Kojima, F., Takenouchi, S., Kobayashi, H., "A Tendency of Metal Forming for Heat-changer," J. of JSTP, Vol. 42, No. 488, pp 2-6. 2001.
3. Murakami, S., Isogai, M., Inagaki, T., Takatsuji, N, Tokizawa, M., Murotani, K., "Simulation of Retangular Extruded Pipes by porthole Die," J. of the JSTP, Vol. 38, No. 36, pp. 517-521, 1997.
4. Murakami, T., Xie, J., Takahashi, H., "Multi-Billet Extrusion and Load in Forming of Circular Tube from Four Billets," J. of the JSTP, Vol. 31, No. 351, pp. 495-501, 1990.
5. Kim, Y. T., Ikeda, K., Murakami, T., "Measurement of Pressure Distribution on Dies in Porthole Die Extrusion," J. of JILM, Vol. 49, pp. 296-301, 1999.
6. Lee, J. M., Kim, B. M., Jeong, Y. D., Jo, H., Jo, H. H., "The effect of chamber bottom shape on die elastic deformation and process in condenser tube extrusion," J. of KSPE, Vol. 20, No. 5, pp. 66-72, 2003.
7. Jo, H. H., Lee, J. M., Kim, B. M., "Prediction of Welding Pressure in the Non Steady State Porthole Die Extrusion of Al7003 Tubes," International J. of KSTP, Vol. 4, No. 3, pp.36-41, 2003.
8. DEFORM 3DTM, SFTC, 1995.
9. Kurt, Laue, Helmut, Stenger, Extrusion, American Society for metals, 1976.
10. Hsiang, S.H., Liao, C.S., "Study on Hot Extrusion of Tubes," J. of Materials Processing Technology, Vol. 63, pp. 254-259, 1997.
11. MTS Systems Corporations, Nano-indenter XP Manual, 2002.
12. Oliver, W. C., Pharr, G. M., "An Improved Technique for Determinating Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," J. of Mater. Res., Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583, 1992.