

## 접합실 높이에 따른 컨덴서 튜브 직접압출 공정 및 금형강도 해석

이정민\*, 김병민\*\*, 정영득\*\*\*, 조훈\*\*\*\*, 조형호\*\*\*\*

(2002년 12월 4일 접수)

### Die Stress and Process Analysis for Condenser Tube Extrusion according to Chamber Height

J. M. Lee, B. M. Kim, Y. D. Jung, H. Jo and H. H. Jo

#### Abstract

In the case of hollow cylinder extrusion using porthole die, the effects of extrusion parameters—temperature, the speed of extrusion, the shape of the die and mandrel—on metal flow in porthole die extrusion of aluminum have been investigated. There have been few studies about condenser tube extruded by porthole die. This study was designed to evaluate metal flow, welding pressure, extrusion load, tendency of mandrel deflection according to variation of chamber length in porthole die. The welding chamber height in condenser tube was calculated by using finite element method. Forming analysis results for condenser tube would provide useful information for the optimal design of porthole die.

**Key Words** : Porthole Die Extrusion, Condenser Tube, Welding Pressure, Welding Chamber Height, Stress Analysis

#### 1. 서론

포트홀 다이틀 이용한 중공형 튜브 직접압출의 경우, 포트홀에서 분할된 소재가 다시 접합실에서 접합되어 다시 베어링부를 통해 빠져 나오는 일련의 소재 유동 양상은 이미 많은 연구<sup>(1)</sup>가 보고되어 있다. 또한 다양한 압출 변수<sup>(2)</sup>(온도<sup>(3)</sup>, 압출속도, 접합실 높이<sup>(4)</sup>, 포트홀 형상, 맨드릴 형상 등)의 변화를 토대로 포트홀 및 접합실 내 소재의 변형지향 특성도 이미 일부 조사되었다.

그러나 컨덴서 튜브 직접압출에 있어서, 기본적인 소재 유동양상은 중공형 튜브 직접압출과 유사하지만, 최종 다이 출구부 형상이 다르므로써, 각각의 압출변수들에 대한 영향 평가는 다르게 나타난다. 한 예로 접합부 접합압력에 미치는 변수의 경우, 중공형 튜브 직접압출에서는 접합압력에 미치는 영향만을 고려하여도 무방하다. 하지만 컨덴서 튜브 직접압출에서는 접합부 접합압력이 커질 경우, 과도한 맨드릴 치형 변형에 의한 제품치수 정밀도에 직접적 영향을 미칠 수 있고 또한 맨드릴 파손을 야기시킬 수 있

\* 부산대 대학원 정밀기계공학과  
\*\* 부산대학교 기계공학부  
\*\*\* 부경대학교 기계공학부  
\*\*\*\* 한국생산기술연구원

기 때문에 접합압력과 함께 맨드릴 형상변화에 대한 연구는 매우 중요하다.

따라서 본 연구는 포트홀 다이틀 이용한 컨덴서 튜브 직접압출에서의 접합실 높이변화에 따른 포트홀 다이 각 부(포트홀, 접합실 등)의 소재 유동 양상을 파악하고, 압출하중 및 접합부의 접합압력, 금형의 탄성변형량을 평가하였다. 또한 압출 중 맨드릴의 변형양상을 조사하여 맨드릴 파손의 원인을 조사하였다.

## 2. 유한요소해석 방법

### 2.1 포트홀 다이 세트 및 해석모델

Fig. 1에서 보듯이, 컨덴서 튜브는 두께가 0.5mm 이하이고, 단면 내부에 냉매가 흐르는 미세홀을 가진 열교환기의 핵심부품이다.

본 연구에서의 컨덴서 튜브는 5개의 홀을 가지며, 해석의 용이성을 위해 벽 두께를 모두 1.8mm로 하였다. 또한 단면 형상은 좌우상하 모두 대칭으로 설계하였다.

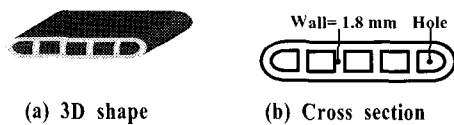


Fig. 1 Model of condenser tube

Fig. 2는 컨덴서 튜브 직접압출 공정해석을 위한 포트홀 다이의 치수를 나타낸 것이다. 포트홀 다이는 컨테이너, 포트홀, 맨드릴 및 접합실로 구성되어 있다. 이는 기본적으로 증공압출 포트홀 다이의 구조와 유사하지만 튜브 형상을 성형하기 위한 복잡한 하모니카 모양의 맨드릴을 가진 것이 특징이다.

본 연구에서는 동일한 출구형상을 가진 두 개의 포트홀 다이를 모델링하여, 하나는 접합실 높이를 10mm 포트홀 다이(이후 10mm)로, 나머지는 15mm 포트홀 다이(이후 15mm)로 하였다. 각각의 포트홀 다이는 접합실 높이를 제외한 모든 치수를 동일하게 설정하였다.

Fig. 3은 포트홀 다이의 3D 모델링을 나타낸 것이다. 모델링은 강도해석 시 컨테이너와 포트 내부의 소재유동에 대한 영향을 고려하여 컨테이너, 포트, 접합실, 다이 베어링, 베커, 맨드릴을 모두 일체형으로 하였다. 사용된 포트홀 다이는 앞선 연구<sup>(6)</sup>에서 사용된 포트홀 다이의 치수를 비례적으로 감소시켜 설계하였고, 포트홀 다이 3D 모델링은 I-deas7.0을 이용하였다.

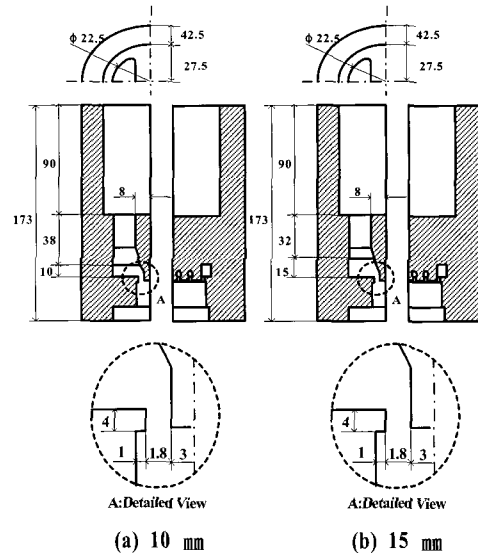


Fig. 2 Schematic illustration used in process analysis

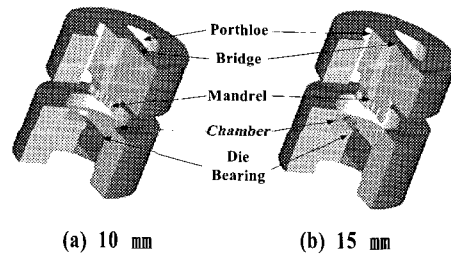


Fig. 3 Structure of porthole die for condenser tube

### 2.2 유한요소 해석 조건 및 설정

본 연구의 성형해석을 위해 강소성유한요소해석 코드인 DEFORM 3D<sup>(6)</sup>를 사용하였다. 해석에 사용된 빌렛은 실제 현장에서 사용하는 Al1050을 채택하였고, 컨테이너, 챔버와 펀치는 열간 공구강인 SKD 61을 채택하였다.

전반적으로 다이의 초기 온도는 420°C로 설정하였고, 빌렛의 초기 온도는 450~510°C로 설정하였다. 펀치속도는 포트홀 다이 제품 성형부에서 나오는 소재의 속도가 800mm/s를 유지하기 위해 소재의 단위시간당 소재량을 계산하여 정하였다. 빌렛과 펀치, 빌렛과 다이 접촉면 사이의 마찰상수(m)는 일반적인 무윤활 알루미늄 압출공정에서 적용하는 0.6으로 가정하였다.<sup>(7)</sup>

해석모델은 컨덴서 튜브 단면의 대칭성을 고려하여 1/4 모델로 하고, Al소재는 열연성 모델로, 그 외 다이 및 펀치 등은 강체로 정의하였다.

Table 1에 나타난 해석조건을 접합실 높이 10mm, 15mm 각각의 동일하게 적용하여 성형해석을 실시하였다.

Table 1 Extrusion condition for condenser tube

Extrusion conditions		Value
billet Material		A11050
tools Material		SKD61
Initial temperature of billet(°C)		420
Initial temperature of tools(°C)		465
Extrusion velocity(mm/s)		833(exit velocity)
Reduction in area(%)	Bridge	75.36
	Exit	93.47
Dimension of billet(mm)		Φ71×h200
Temperature of environment(°C)		20
Friction factor(0 ≤ m < 1)		0.6

3. 유한 요소 해석 결과

3.1 하중 - 스트로크 곡선

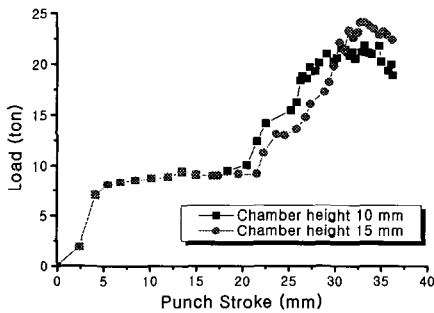


Fig. 4 Extrusion load - stroke curve

Fig. 4는 10mm · 15mm 포트홀 다이의 하중 스트로크 곡선을 나타낸 것이다. 압출하중의 상승경향은 동일하나 15mm가 접합실이 크므로 소재 충전에 있어 10mm보다 긴 스트로크가 요구된다. 최대하중은 15mm가 약 24.1 ton, 10mm가 약 21.8 ton으로 15mm가 더 높게 나타났다. 이는 15mm 포트홀 다이의 접합실 전체의 체적이 커지면서 접합실의 소재 유동량이 많아지고, 접합실 내벽이나 맨드릴 벽면에서 받는 소재의 마찰저항이 커지기 때문이다.

Fig. 5에서 A · B · C는 포트홀 압출에서 분할 · 접합 · 성형의 3단계 과정의 각 영역을 나타낸 것이다.

포트홀 다이 압출의 경우 소재유동에 따라 크게 세 가지 단계로 구분하는데, 초기 빌렛이 포트홀에서 나누어지는 분할 단계(Fig. 5(A)), 분할된 소재가 다시 접합실로 유입되어, 소재유동을 구속하여 서로 합쳐지는 접합단계(Fig. 5(B)), 그리고 맨드릴을 통과, 다이 베어링 부로 빠져 나와 최종형상을 성형하는 성형단계(Fig. 5(C))로 구분

한다. 이후 하중은 정상상태로 접어들어 조금씩 완만하게 감소한다. 이와 같은 3단계를 거쳐 최종제품인 다공 단면의 컨덴서 튜브가 성형되어진다. Fig. 6은 접합실 높이 15mm 포트홀 다이로, 빌렛이 최종 컨덴서 튜브를 성형하는 과정의 변형도를 나타낸 것이다.

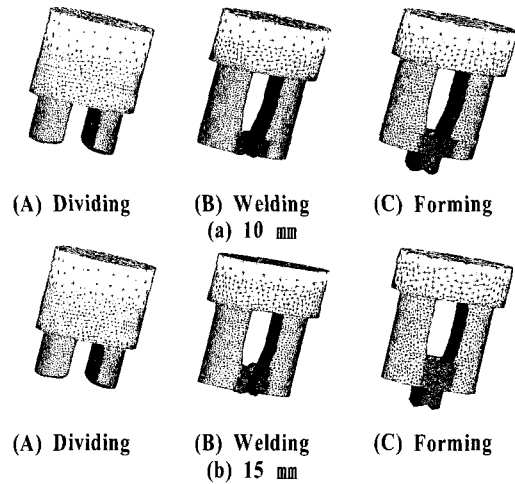


Fig. 5 Each stage of a porthole die extrusion

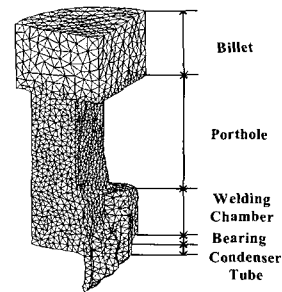


Fig. 6 Flow pattern at 15mm

3.2 접합압력

Fig. 7(a),(b)는 Fig. 5(C)의 접합단계에서 10mm · 15mm 포트홀 다이 접합면의 수직압력 분포를 나타낸 것이다. 유한요소해석에서는 소재의 수직압력이 소재의 항복강도 이상이면 양호한 접합압력을 가지는 것으로 판단한다.<sup>(8)</sup>

접합압력은 맨드릴 양 끝 단에서 15mm 포트홀 다이가 32~65MPa, 10mm 포트홀 다이가 21~42MPa으로 15mm 포트홀 다이가 더 높게 나타났다. 이는 상대적으로 접합실이 크기 때문에 충전과 접합에 필요한 압력이 증가하게된다. 그러므로 늘어난 부피만큼 접합부 형성에 필요한 변형에너지가 커지기 때문에 접합강도가 향상<sup>(9)</sup>되는 것이라 판단된

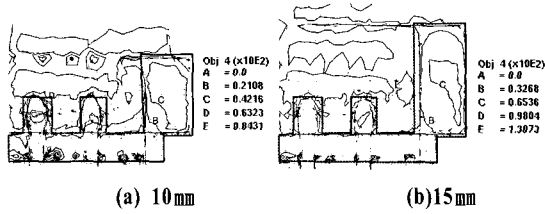


Fig. 7 Normal pressure at the welding plane

다. 또한 접합면 근처에서 마찰저항이 증가하는 것도 접합력 향상에 기여한다고 판단된다. 그러나 컨텐서 튜브 압출의 경우 과도한 접합압력은 맨드릴 변형을 증가시켜 맨드릴 파손 원인이 될 수 있다.

3.3 접합단계에서의 소재 충전 과정

Fig. 8은 접합실 바닥 임의의 절단면에서, 펀치 스트로크에 따른 접합실 내 소재의 충전과정을 변형을 속도분포로 나타낸 것이다. Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 위치에서 압출방향으로 맨드릴 내 소재의 충전과정을 나타낸 것이다.

본 연구의 포트홀 다이는 접합실 바닥이 원형이므로, 소재는 맨드릴 중간에서 가장 먼저 닿는다. 그러나 맨드릴을 충전하기 위한 변형에너지가 크므로, 맨드릴 중앙 부의 소재는 맨드릴을 충전하지 못하고, Fig. 8,9에서 보듯이 소재가 다이 베어링을 따라 압출 방향으로 빠져 나오거나 반경방향으로 유동한다. 이후 접합실 내의 소재는 변형에너지가 적게드는 맨드릴 양쪽 끝 접합면을 먼저 충전시킨다.<sup>(10)</sup> 소재는 다시 압출방향으로 유동하기 위해 맨드릴 양 끝에 심한 응력을 발생시키는데 이로 인해 맨드릴 양 끝이 안쪽으로 휘는 변형이 발생한다.

10·15mm 모두 접합실과 맨드릴 내 충전양상은 동일하지만 Fig. 8에서 보듯이 10mm가 15mm보다 맨드릴 주변의 변형을 속도분포가 높고 광범위하다. 이것은 Fig. 10에 보듯이 상대적으로 10mm가 접합실 높이가 작으므로 접합실 내에서 소재유동 양상이 급격하기 때문이다. 이는 10mm가 맨드릴 치형을 성형하기 위한 소재의 변형에너지가 더 높음을 의미한다. 그러므로 10mm가 맨드릴과 다이 베어링 부에 작용하는 응력이 높게 나타날 것임을 예측할 수 있다. Fig. 11에서 접합실 내의 소재 유동과 맨드릴의 변형을 가시적으로 표현하였다. Fig. 11의 (1),(2),(3)과 점선은 맨드릴 접합면에 닿는 소재의 충전순서와 소재 충전 순서에 따른 맨드릴 변형을 나타낸 것이다. 압출 초기 접합실 내의 소재(1)은 맨드릴 양끝을 안쪽으로 휘게 한다. 동시에 소재(2)는 가운데 맨드릴 치형을 밖으로 향하게 하면서 자연히 (3)의 맨드릴 치형 간격이 좁아진다. 이후 압출이 진

Stroke	Chamber 10mm	Stroke	Chamber 15mm
26.3mm		25.4mm	
27.54mm		26.9mm	
28.04mm		29.5mm	
30.07mm		31.7mm	

Fig. 8 Comparison of filling stages in the bottom of chamber

Stroke	Chamber 10mm	Stroke	Chamber 15mm
26.3mm		25.4mm	
27.54mm		26.9mm	
28.04mm		29.5mm	
30.07mm		31.7mm	

Fig. 9 Comparison of filling stages on the welding plane

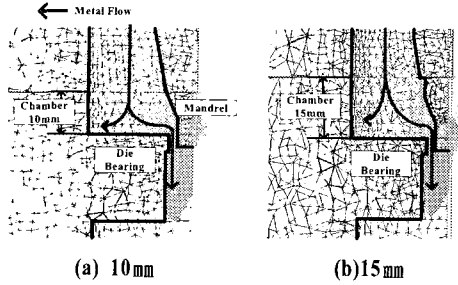


Fig. 10 Maximum of metal flow in welding chamber

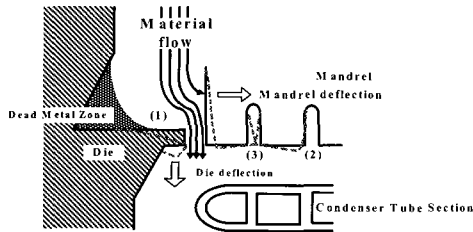


Fig. 11 Maximum elastic deformation of die and mandrel

행되면서 소재(2)가 충전되어 맨드릴 간격이 어느 정도 완화될 수 있지만, 아울러 (1),(2)의 성형압력도 같이 증가하면서 맨드릴 양끝의 파손과 미성형을 발생시킬 수 있다.

#### 4. 포트홀 다이의 강도 해석

강도해석은 Fig. 5의 분할·접합단계·성형단계일 때 각각에 대해 실시하였다. 해석은 구조해석용 상용유한요소 해석코드인 Ansys 5.5를 이용하였다.

Fig. 12는 다이 강도해석 시 경계조건을 나타낸 것이다. 실제 압출공정을 고려하여 금형의 하단부는 변위가 없는 것으로 가정하여 X, Y, Z축 모두 구속시켰으며 역시 축대칭을 고려하여 1/4대칭 단면에는 수직방향의 변위를 구속시켰다. 하중 경계조건은 성형해석에서 구한 소재의 성형압력을 금형의 각 격자점에 부여되는 하중으로 보간하여 해석을 수행하였다.

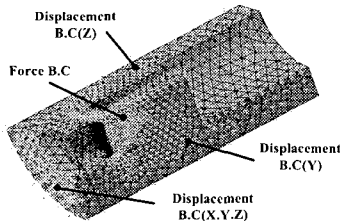


Fig. 12 Boundary condition for stress analysis of dies

#### 4.1 맨드릴 변형 및 강도해석

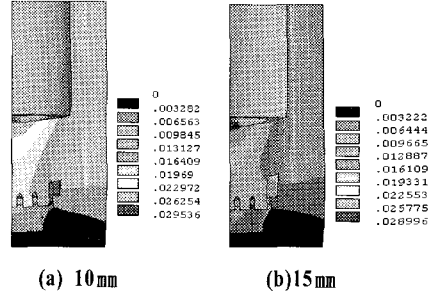


Fig. 13 Distribution of displacement in the porthole die

Fig. 13은 Fig. 5의 분할단계에서 포트홀다이 강도해석 결과, 변위분포를 나타낸 것이다. 최대변위는 10·15mm 모두 브릿지 부에서 0.028~0.029mm의 분포로 나타났다. 또한 맨드릴의 양끝 부분의 경우 10·15mm 모두 0.012~0.016mm 밖으로 향하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 5의 성형단계에서 맨드릴 강도해석 결과, 유효응력의 분포를 나타낸 것이다. 최대유효응력은 10·15mm 모두 컨덴서 튜브 벽이 성형되는 맨드릴 치형에서 각각 120.683MPa, 102.274MPa로 나타났다. 이는 10mm 포트홀 다이 접합실에서 소재유동 변화가 15mm포트홀 다이보다 급격하게 변하기 때문에 맨드릴에서 소재의 변형 저항이 크게 나타난다.

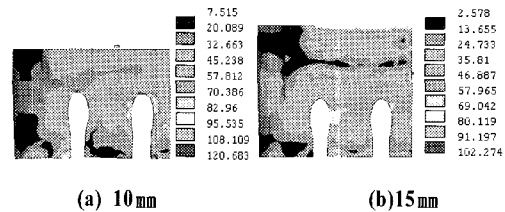


Fig. 14 Distribution of effective stress in the mandrel

Fig. 15는 Fig. 8,9 접합단계에서의 강도해석 결과, 맨드릴 양 끝의 변위량을 펀치스트로크에 대해 나타낸 것이다. 변위위치는 Fig. 18의 (B)의 위치를 맨드릴변형이 0일 때를 기준으로 하여 맨드릴 양끝이 반경방향으로 향하면 '+', 가운데로 모이면 '-'로 정하였다. 최대변위량은 10·15mm 모두 압출 하중이 안정화되기 직전에서, 각각 -0.00219mm, -0.002769mm로 15mm가 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 크게 세 가지의 원인으로 판단할 수 있다. 첫째는 15mm의 접합실 높이가 높으므로 맨드릴 양 끝 접합면에 소재의 유동량이 많아서, 접합력도 높고 맨드릴 변위량도 증가하

기 때문이다. 두 번째는 상대적으로 맨드릴 치형을 성형하기 위한 변형에너지가 10mm가 더 높으므로 Fig. 11에서와 같이 맨드릴 치형(2)지점에 작용하는 응력이 커지기 때문에 맨드릴 양 끝에 작용하는 응력이 높다 하여도 변위가 서로 상쇄된다. 세 번째는 15mm가 맨드릴 구조상 상대적으로 10mm보다 길이가 길기 때문에 맨드릴 양 끝 변위가 더 높기 때문이다.

맨드릴 변형양상은 10·15mm 모두 접합단계 초기 맨드릴 양 끝은 반경 방향(+)으로 향하다가 압출이 진행되면서 차츰 맨드릴 가운데(-)로 향한다. 이러한 양상은 앞서 설명한 Fig. 8의 소재 충전과정과 밀접한 관련이 있다.

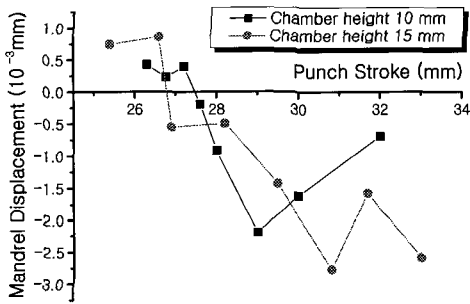


Fig. 15 Displacement of the mandrel

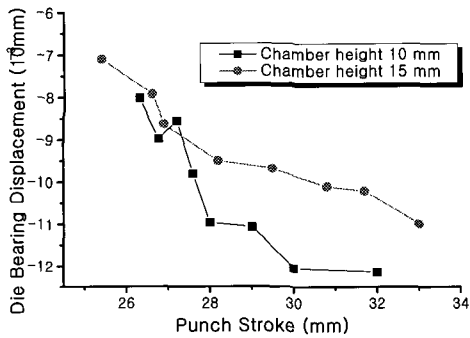


Fig. 16 Displacement of the mandrel

Fig. 16은 접합단계에서 다이 베어링의 변위를 펀치 스트로크에 대해 나타낸 것이다. 최대변위량은 10·15mm 압출하중이 안정화되는 지점에서, 각각 0.01214mm, 0.01099mm로 10mm가 높게 나타났다. 이는 Fig. 10에서 알 수 있듯이 10mm가 15mm보다 맨드릴과 다이 베어링 부근의 소재유동이 급격하기 때문이다.

Fig. 17(a)는 Fig. 5의 분할단계와 접합단계 초기의 맨드

릴의 변형을 가시적으로 나타낸 것이다. 분할단계에서 소재가 접합실에 닿지 않았음에도 불구하고 컨테이너에서 소재가 분할되는 과정에서 브릿지의 변형으로 전체적인 맨드릴 형상은 부채꼴 형상을 유지한다. 또한 접합단계 초기 Fig. 8의 소재 충전과정에서도 Fig. 17(a)의 (C),(D)에 소재가 먼저 충전하면서 부채꼴형상을 더 가중시킨다. 그러나 압출이 진행되면서 접합면의 소재유입이 대부분 맨드릴 양끝에 집중된다. 이때 맨드릴 양끝은 가운데로 향하며 최대변형이 발생한다. 이후 Fig. 17(b)의 (C),(D)에 소재가 마저 유입되어 맨드릴 양끝 변형을 완화시키지만 압출 최종단계에서의 맨드릴 변형은 가운데로 향하는 형상을 유지한다. Fig. 17(b)은 접합·성형단계에서의 맨드릴 변형 형상을 나타낸 것이다.

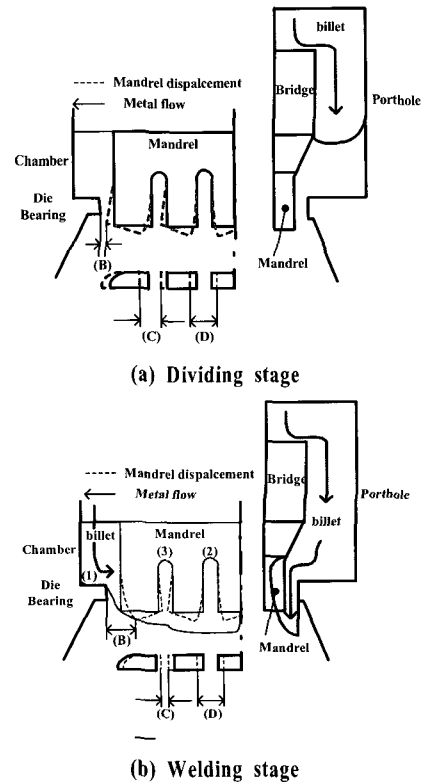


Fig. 17 Displacement of mandrel at the welding stage

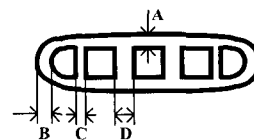


Fig. 18 The shape of final condenser tube

일반적인 포트홀 압출 시 맨드릴 양 끝 파손의 원인은 접합실에서 맨드릴 양끝에 접촉하는 소재의 유동량이 많기 때문이라고 생각하였다<sup>(11)</sup>. 그러나 본 연구 결과, 소재 유동량뿐만 아니라 접합실 바닥형상에 따른 소재 충전순서와 압출 초기 브릿지의 변형에 의해 맨드릴 양끝(B)이 급격하게 변형하기 때문이라고 판단할 수 있다.

Fig. 18은 압출 이후, 다이 베어링과 맨드릴 변형을 고려한 최종 컨테이너 튜브의 형상이다. 본 연구의 컨테이너 튜브 벽 두께가 1.8mm임을 고려할 때, 분할단계에서 (C)·(D)간격은 1.8mm보다 커지고 (B)의 간격은 1.8mm보다 작아진다. 이후 접합단계에서는 (B)의 간격은 오히려 반대로 1.8mm보다 커지고, (C)는 반대로 1.8mm보다 작아진다. (D)는 소재가 충전되면서 간격이 더 넓어진다.

## 5. 결론

본 연구에서는 접합실높이 변화에 따른 컨테이너 튜브 직 접압출을 위한 포트홀 다이 압출의 비정상상태 유한요소 해석을 수행하여, 가공요소력 및 소재유동, 접합압력 등을 비교하였다. 또한 포트홀 다이 강도해석을 분할, 접합, 성형단계 모두 수행하여 응력분포와 탄성변형을 비교 및 평가하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 압출하중은 접합실 높이가 높을 수록 접합실 내부의 마찰저항이 크고 소재의 유동량이 많기 때문에 높게 나타났다.

(2) 접합실의 높이가 높을 수록 맨드릴 양끝에 소재의 유동량이 많으므로 변형에 필요한 에너지가 높아 접합압력은 증가한다.

(3) 접합실 높이가 낮을 수록 접합실 내 소재의 급격한 유동으로 다이 베어링 최대변위량 및 최대유효응력은 높게 나타났다.

(4) 포트홀 압출 시 소재의 분할단계에서 이미 브릿지의 변형으로 맨드릴은 부채꼴 형상으로 변형한다.

(5) 맨드릴 길이가 상대적으로 길고, 접합실 높이가 높을수록 접합실 내 소재의 증가에 의해 맨드릴 양끝의 변위는 높게 나타났다.

(6) 맨드릴 양끝의 최대변위가 발생하는 곳은 성형되기 직전 접합단계에서 발생한다.

(7) 맨드릴 양끝의 파손원인 중 한가지는 분할단계에서 맨드릴 양끝 치형이 밖으로 향하다가 접합단계에서 반대로 안쪽으로 향하는 급격한 변형 때문이다.

## 참고 문헌

- (1) J. X. Xie, T. Murakami, K. Ikeda, H. Takahashi, "Experimental simulation of metal flow in porthole -die extrusion", Journal of Material Processing Technoogy 49, 1-11, 1995.
- (2) C. H. Lee, D. Y. Yang, "The Analytical Consideration for Several Design Parameters of Flat-Die Extrusion Process", Transaction of Material Processing Vol. 10, No. 7, pp. 551~557, 2001
- (3) Kim. Y. T, Ikeda. K, Murakami. T, "Measurement of Pressure Distribution on Dies in Porthole Die Extrusion," Journal of JILM, Vol. 49, pp. 296~301, 1999.
- (4) Ikeda. K, Xie. J, Murakami. T, Kakaku. K, Takahashi. H, "Welding State of 7475 Aluminum Alloy Pipes Formed by Hot Multi-Billet Extrusion Method," Journal of JSTP, Vol. 43, No. 2, pp. 76~81, 1993.
- (5) 이정민, 이상곤, 김병민, 조형호, 조훈 " 포트홀다이를 이용한 컨테이너 튜브 직접압출 공정해석 및 금형강도해석", 한국정밀공학회 학술대회논문집, pp. 1030~1033, 2002.
- (6) "DEFORM<sup>TM</sup>-3D," SFTC, 1995.
- (7) Toshiyuki Inagaki, Satoshi Murakami, Noroo Takatsuji, Kenji Matsuki, Mitsuyuki Isogai and Jun Sobo, "アルミ短形中空押出しの非定常プロセスへのシミュレーションの適用", Journal of JSTP, Vol. 42, No. 488(2001), pp. 2~6.
- (8) C. S. Jung, 3-D Finite Element Analysis of Porthole Die Extrusion Process for Hollow Section Tubes, M.S. Dissertation Univ. of Pusan, 2001.
- (9) Noris Tadatsuji, Mitsugu Tokiawa, Satoshi Murakami, kazuo Murotani, Kenji Matsuki and kazuhiko Yuasa, "Effects of Shapes on Welding Strength of Extruded Pipe by Porthole Die", Journal of the JSTP, Vol. 37, No. 428, 1996.
- (10) 조형호, 이상곤, 이선봉, 김병민, "포트홀 다이 압출방식에 의한 Al7003 튜브의 접합강도예측," 한국정밀공학회지, 제18권, 제7호, pp. 179~185, 2001.
- (11) Kojima. F, Takenouchi. S, Kobayashi. H, "熱交換器におかる塑性加功技術の動向," Journal of JSTP, Vol. 42, No. 488, pp. 2~6. 2001.