

〈 기술논문 〉

# 포트홀 형상 변화를 고려한 Al 멀티셀 튜브 압출공정 해석

이정민\* · 김병민† · 김동환\*\* · 조형호\*\*\*  
(2005년 1월 27일 접수, 2005년 6월 30일 심사완료)

## FE Simulation of Extrusion Process for Al Multi Cell Tube According to the Changes of the Porthole Shape

Lee Jung Min, Kim Byung Min, Kim Dong Hwan and Jo Hyung Ho

**Key Words :** Porthole Die Extrusion(포트홀 다이 압출), Condenser Tube(컨덴서 튜브), Welding Pressure(접합압력), Mandrel Deflection(맨드릴 변형), Stress Analysis(강도해석)

### Abstract

Recently, multi cell tube which is used for a cooling system of automobiles is mainly manufactured by the conform extrusion but this method is inferior as compared with direct extrusion in productivity per the unit time and in the equipment investment. Therefore, it is essential for the conversion of direct extrusion with porthole die. The direct extrusion with porthole die can produce multi cell tube which has the competitive power in costs and qualities compared with the existing conform extrusion. This study is designed to evaluate metal flow, welding pressure, extrusion load, tendency of mandrel deflection that is affected by variation of porthole shape in porthole die. Estimation is carried out using finite element method under the non-steady state. Also this study was examined into the cause of mandrel fracture through investigating elastic deformation of mandrel during the extrusion.

### 1. 서론

멀티셀 튜브(Multi cell tube)는 보통 두께가 0.5 mm 이하이고, 단면 내부에 냉매의 유로를 가진 열교환기 핵심부품으로, 현재 국내에서는 컨폼 압출법(conform extrusion)에 의해 생산되고 있다. 그러나 직접압출방식에 비해 단위시간 당 생산성이 떨어지고 초기투자 비용이 많이 드는 단점을 가지고 있다. 그러므로 기존의 컨폼 압출보다 원가적, 품질적인 측면에서 경쟁력이 있고 저가, 고품질의 튜브를 생산할 수 있는 포트홀 다이를 이용한 직접압출로의 전환이 필수적이다.<sup>(1)</sup>

포트홀 다이압출은 브릿지(Bridge)를 가진 접합

실(Welding Chamber)방식으로, 맨드릴 길이에 상관없이 길이가 긴 제품을 연속적으로 생산할 수 있기 때문에 일반적인 증공형 제품 생산에 널리 사용되고 있다. 그러나 포트홀 다이를 이용한 멀티셀 튜브압출은 높은 단면 감소율과 접합실 형상에 의한 불 균일한 소재의 유동 때문에 실제 현장에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 멀티셀 튜브압출에서 가장 일반적인 결함은 접합실 내 소재 유동에 의한 맨드릴 양끝의 파손과 다이 변형으로 인한 멀티셀 튜브의 치수오차가 있다.<sup>(2)</sup>

일반적으로 멀티셀 튜브압출에 대한 연구는 압출소재의 압출성 향상 및 다이의 강성을 높이기 위한 연구와 포트홀 다이 형상 변화 및 압출 공정 제어를 통한 소재유동에 관한 연구로 나눌 수 있다. 특히 포트홀 다이구조에서, 포트홀은 컨테이너에서 분리된 소재를 접합실로 유입시키는 통로로 소재유동제어와 다이의 탄성변형에 크게 영향을 미치는 곳이다.

포트홀 다이 압출공정에 대한 해석적 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. J. Xie<sup>(3)</sup> 등은 상계해법을 근거로 에너지법을 이용하여 멀티 빌렛 압출을

† 책임저자, 회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소  
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3074 FAX : (051)514-7640

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 진주국제대학교 자동차공학부

\*\*\* 한국생산기술원 나노소재개발팀

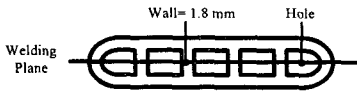


Fig. 1 Cross section of multi cell tube

채용한 튜브 성형공정을 해석하였고 이후 UBET와 UBA 모델을 이용한 두 가지 해석적 모델을 제안하였다. K. Park<sup>(4)</sup> 등은 영역분할에 의한 격자세분화기법을 이용한 포트홀 압출의 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. Yang<sup>(5,6)</sup> 등은 강점소성 유한요소해석 프로그램을 개발하였고 다양한 압출설계변수에 대한 영향을 조사하였다. Mooi<sup>(7)</sup> 등은 ALE 알고리즘에 근거한 2 차원 평면변형 해석기법을 통해 포트홀 다이 3 차원 열간 압출 및 다이의 강도해석을 수행하였다. 또한 Lof<sup>(8)</sup> 등은 ALE 코드를 이용한 유한요소해석을 통해 복잡하고 얇은 두께의 알루미늄 단면에 대한 3 차원 압출을 수행하였다. 그러나 이러한 연구의 대부분은 모두 정상상태 해석으로 실제 다이 형상 및 마찰에 의해 일어나는 소재 유동의 패턴은 확인하기 어려웠다. Inagaki<sup>(9)</sup> 등은 사각 중공형 단면에 대한 3 차원 비정상상태 성형해석을 수행하였으며, Kim<sup>(10)</sup> 등은 중공단면의 3 차원 비정상상태 압출해석을 통해 튜브의 접합강도 등을 평가하고 복잡한 멀티셀 튜브에 대한 3 차원 비정상상태 열간해석 및 다이 강도해석을 수행하였다.

이상의 연구 내용을 바탕으로 본 연구는 포트홀 형상 변화에 따른 맨드릴의 변형 양상에 대해 비교, 평가하는 것을 목적으로 고안되었다. 평가 방법은 멀티셀 튜브 직접압출에 대한 유한요소해석을 실시하여 포트홀 다이 각 부(포트홀, 접합실 등)의 소재 유동 양상 및 압출하중, 접합부의 접합강도 등을 파악하고, 금형의 강도해석을 통해 압출 과정 동안 맨드릴 및 다이 베어링의 탄성 변형량을 조사하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 직접압출공정 해석모델

본 연구에서 사용될 멀티셀 튜브 단면형상을 Fig. 1 에 나타내었다. 컨테이너 튜브는 열교환기의 핵심 부품으로 다공단면으로 이루어져 있으며 구멍을 통하여 냉매가 유동하게 된다. 본 연구에서는 5 개의 홀을 가지며 해석의 용이성을 위해 두께를 1.8 mm로 일정하게 하였다. 또한 상하좌우 모두 대칭으로 설계하였다.

Fig. 2 는 멀티셀 튜브 직접압출 공정해석을 위한 포트홀 다이 구조를 나타낸 것이다. Fig. 2 의 (a)는 포트홀 다이의 접합실과 포트홀 사이를 직선으로 유지하였고(이후 직선형), (b)는 포트홀 20 mm까지는 직선으로 유지하고 나머지 구간에 대해

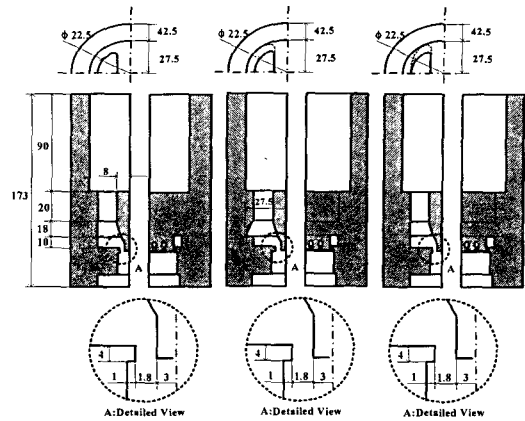


Fig. 2 Dimensions and constructions of each porthole die using FE analysis

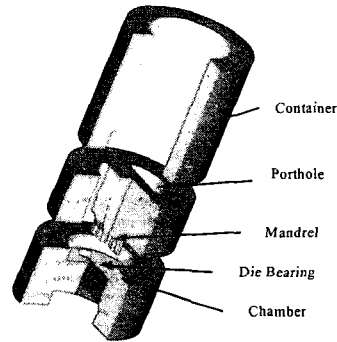


Fig. 3 3D model of the porthole die(straight type)

서는 접합실까지 컨테이너 직경과 동일하게 반경 방향으로 넓어지는 테이퍼형 구조를 가진다(이후 테이퍼형). (c)는 테이퍼형과 동일한 위치에서 테이퍼를 가지지만 타원의 장축은 컨테이너와 동일한 길이를 가지고 단축은 포트홀 직경과 같게 하였다(이후 타원형). 나머지 포트홀 다이 세부 치수는 모두 동일하게 설정하였다.

Fig. 3 은 유한요소격자 생성을 위해 포트홀 다이의 3D 모델링을 나타낸 것이다. 해석의 편의성과 강도해석 시 컨테이너와 포트홀 내부의 소재유동에 대한 영향을 고려하여 컨테이너, 포트홀, 접합실, 다이 베어링, 베커(Backer), 맨드릴 등은 모두 일체형으로 모델링 하였다. 다이의 3D 모델링은 I-DEAS 9.0 을 이용하였다.

### 2.2 유한요소해석 조건

직접압출공정의 성형해석을 위해 상용 강소성 유한요소해석 코드인 DEFORM 3D<sup>(11)</sup>를 사용하였다. 해석에 사용된 빌렛은 AI 1050 을 채택하였고, 컨테이너, 챔버와 펀치는 열간 공구강인 SKD 61 을 채택하였다.

다이의 초기 온도는 420°C로 설정하였고, 빌렛

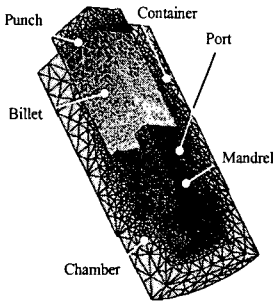


Fig. 4 Initial mesh system (straight type)

Table 1 Conditions of FE simulation

Extrusion conditions		Value
Billet material		Al1050
Tools material		SKD61
Initial temperature of billet(°C)		465
Initial temperature of tools(°C)		420
Extrusion velocity(mm/s)		833(exit velocity)
Reduction in area(%)	Bridge	75.36
	Exit	93.47
Dimension of billet(mm)		ψ 71×h200
Temperature of environment(°C)		20
Friction factor(m)		0.6

의 초기 온도는 450~510°C로 설정하였다. 펀치 속도는 다이 출구부에서 소재의 속도가 833 mm/s를 유지하도록 정의하였다. 해석은 컨테이너 튜브 단면의 대칭성을 고려하여 1/4 만 모델링 하였고 Al 소재는 열연성 모델로 다이 및 펀치는 강체로 정의하였다. 소재와 펀치, 소재와 다이 사이의 마찰상수(m)는 일반적인 무윤활 열간 압출공정에서 적용되는 0.6<sup>(10)</sup>으로 가정하였다.

Fig. 4는 성형해석을 위한 다이의 유한요소 격자를 나타내었다. Table 1에 전반적인 해석조건을 나타내었으며, 이러한 해석조건은 직선형, 테이퍼형, 타원형 모두 동일하게 적용하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 하중-스트로크 곡선

Fig. 5는 각각의 포트홀 다이에 대한 하중-스트로크 곡선 및 소재유동 양상을 나타낸 것이다. 압출하중의 상승경향은 동일하나 테이퍼형과 타원형이 직선형보다 포트홀이 넓으므로 접합단계의 상승경향이 다소 길게 나타난다. 최대하중은 성형단계 직전에서 테이퍼형과 타원형, 직선형이 각각 21.52, 21.24, 19.72ton으로 나타났다. 이러한 결과는 포트홀 전체의 체적이 커지면서 소재 유입량 많아져 소재와 다이의 마찰저항이 커지고, 또한 테이

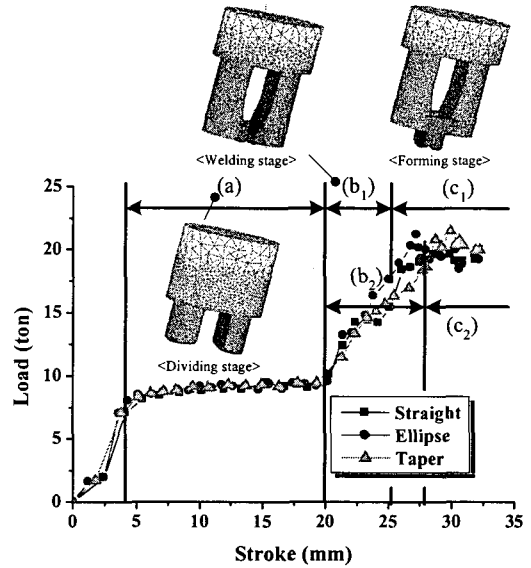


Fig. 5 Load-stroke curves and metal flow

퍼 부위에서 충전된 소재에서 응력 집중이 발생하고 약간의 데드메탈이 형성되기 때문이다.

Fig. 5에서 (a), (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>), (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)는 분할, 접합, 성형의 3단계 과정의 각 영역을 나타낸 것이다. 그중 (b<sub>1</sub>), (c<sub>1</sub>)은 직선형 다이의 접합, 성형단계의 영역을, (b<sub>2</sub>), (c<sub>2</sub>)는 테이퍼와 타원형 다이의 접합, 성형단계의 영역을 각각 나타낸다. 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<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>)] 그리고 맨드릴을 통과 한 후, 다이 베어링 부로 빠져 나와 최종형상을 성형하는 성형단계[Fig. 5(c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)]로 구분한다. 이후 하중은 정상상태로 접어들어 조금씩 완만하게 감소한다.<sup>(12)</sup>

Fig. 6은 각각의 포트홀 다이에 대해 컨테이너에서 최종 다이 출구로 압출되는 전 과정의 변형도를 변형률 속도분포로 나타낸 것이다. 직선형은 접합실 바닥과 다이 출구부 근처에서 변형률 속도 분포가 집중되는 반면, 테이퍼, 타원형은 테이퍼 포트홀 부위에도 변형률 속도분포가 집중됨을 알 수 있다. 이것은 전체적으로 다이에 작용하는 소재의 작용하중을 반경방향으로 작용시키는 역할을 한다.

#### 3.2 접합실 및 맨드릴 내에서의 소재유동

Fig. 7은 접합실 바닥 임의의 절단면에서, 펀치 스트로크에 따른 접합실 내 소재의 충전과정을 변형률 속도분포로 나타낸 것이다. 본 연구에 적용된 포트홀 다이 경우, 접합실 바닥 단면형상이 원형이므로, 소재는 맨드릴 중간에 가장 먼저 닿는

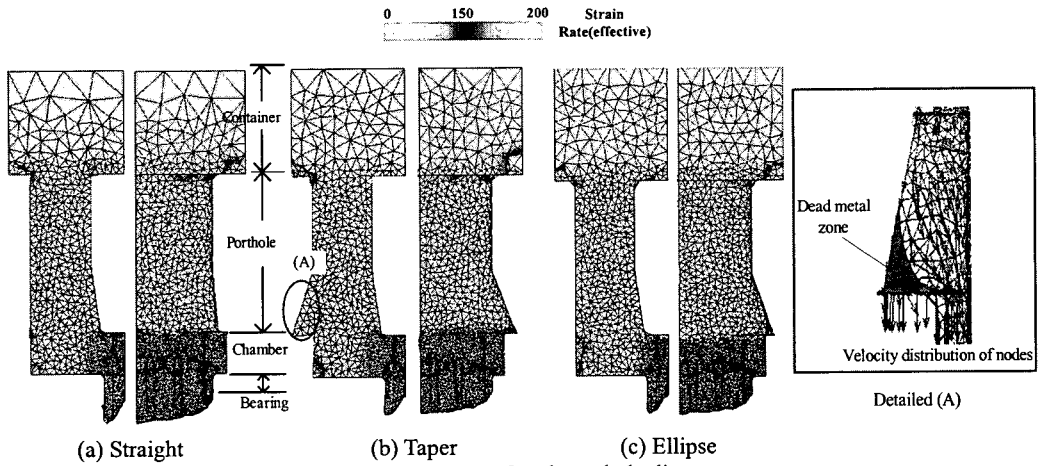


Fig. 6 Flow pattern of each porthole die type

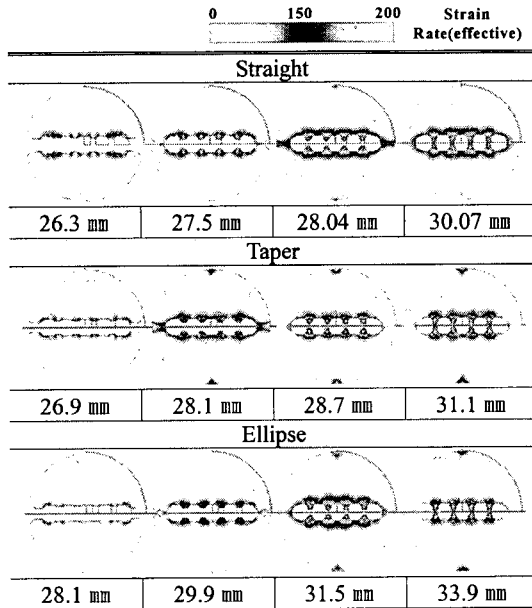


Fig. 7 Comparisons of filling stages in the bottom of the chamber according to the punch stroke(mm)

다. 그러나 맨드릴을 충전하기 위한 변형 에너지가 크므로, 맨드릴 중앙부의 소재는 맨드릴을 충전하지 못하고 다이 베어링을 타고 압출방향으로 빠져 나오거나 반경방향으로 유동한다. 이후 접합실 내 소재는 변형 에너지가 적게 드는 맨드릴 양 끝 접합면을 먼저 충전시킨다. 이후 양 끝의 소재는 다시 다이 베어링을 타고 압출방향으로 유동하는데 이때 맨드릴 양 끝에 심한 성형압력을 가하기 때문에 맨드릴 양 끝이 가운데로 휘는 변형이 발생할 것으로 예측된다.

### 3.3 접합실 및 맨드릴 내에서의 소재유동

Fig. 7은 접합실 바닥 임의의 절단면에서, 펀치

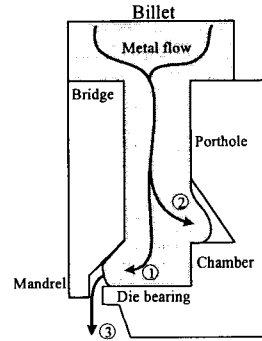


Fig. 8 The order of the filling of the material in inside of the die(Taper and ellipse type)

스트로크에 따른 접합실 내 소재의 충전과정을 변형을 속도분포로 나타낸 것이다. 본 연구에 적용된 포트홀 다이 경우, 접합실 바닥 단면형상이 원형이므로, 소재는 맨드릴 중간에 가장 먼저 닿는다. 그러나 맨드릴을 충전하기 위한 변형 에너지가 크므로, 맨드릴 중앙부의 소재는 맨드릴을 충전하지 못하고 다이 베어링을 타고 압출방향으로 빠져 나오거나 반경방향으로 유동한다. 이후 접합실 내 소재는 변형 에너지가 적게 드는 맨드릴 양 끝 접합면을 먼저 충전시킨다. 이후 양 끝의 소재는 다시 다이 베어링을 타고 압출방향으로 유동하는데 이때 맨드릴 양 끝에 심한 성형압력을 가하기 때문에 맨드릴 양 끝이 가운데로 휘는 변형이 발생한다.

직선형, 테이퍼, 타원형 모두 접합실 내 소재의 유동양상은 동일하지만 소재가 접합면에 모두 접촉한 상태(스트로크 30.07 mm)에서는 직선형이 맨드릴 주위에 가장 높은 변형률 속도 분포를 가진다. 이러한 결과는 다이 내부의 소재 충전순서 차이에 의해 발생하는 것으로 사료된다. Fig. 8에서와 같이 테이퍼나 타원형 경우, 포트홀로 유입된

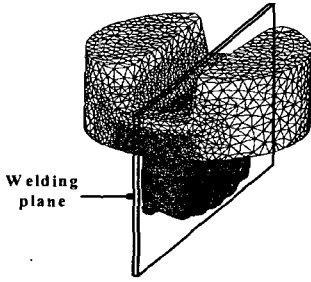


Fig. 9 Position of welding plane

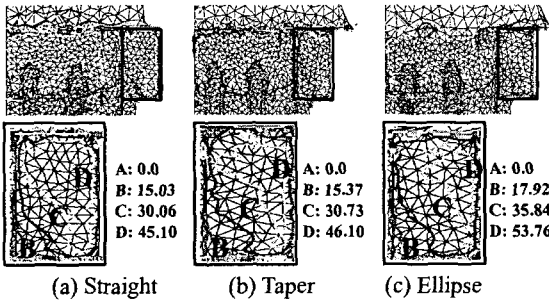


Fig. 10 Normal Pressure in welding plane(Unit: MPa)

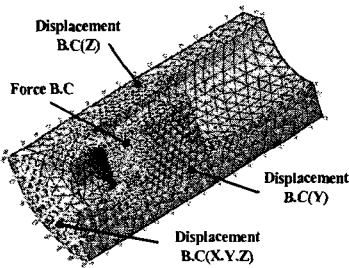


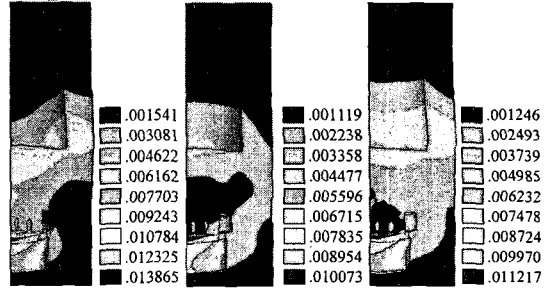
Fig. 11 Boundary condition for stress analysis

소재는 접합실 바닥에 가장 먼저 닿고 난 후(Fig. 8①) 여분의 포트홀 부분(Fig. 8②)을 충전한다. 이 과정에서 맨드릴로 유입되는 소재 유동이 안정화 및 균일화되는 것으로 판단된다.

3.4 접합압력

Fig. 9는 접합면의 위치를 나타낸 것이고 Fig. 10 (a),(b),(c)는 각각의 포트홀 다이에 대한 접합면의 수직압력 분포를 나타낸 것이다. 유한요소해석에서 소재의 수직압력이 소재의 항복강도 이상이면 양호한 접합압력을 가지는 것으로 판단한다.<sup>(12)</sup>

접합면에서 접합압력은 직선형이 15~45 MPa, 테이퍼형이 15~46 MPa, 타원형이 17~53 MPa로, 타원형이 가장 크게 나타났다. 접합압력은 소재의 유동양상과 밀접한 관련이 있다. 그러나 이 경우, 접합면의 면적이 모두 같고 이미 하중곡선이 안정화된 상태이므로 접합압력의 차이는 그리 크지 않았다.



(a) Straight (b) Taper (c) Ellipse

Fig. 12 Elastic displacements of porthole dies

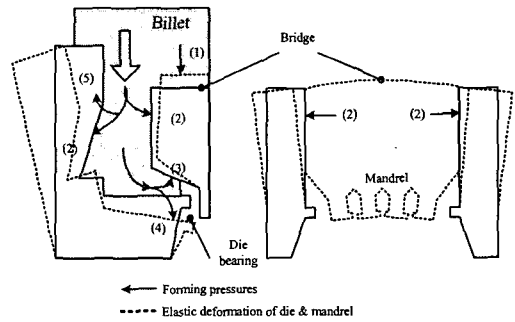


Fig. 13 Pattern of die deflections (Taper type)

4. 강도 해석

강도해석은 구조해석 상용유한요소 해석코드인 Ansys 5.5를 이용하였다. Fig. 11은 강도해석 시 경계조건을 나타낸 것이다. 실제 압출공정을 고려하여 금형의 하단부는 변위가 없는 것으로 가정하여 X, Y, Z 축 모두 구속시켰다. 하중 경계조건은 성형해석에서 구한 소재의 성형압력을 금형의 각 격자점에 부여되는 하중으로 보간하여 해석을 수행하였다.

Fig. 12는 Fig. 5의 접합단계에서 강도해석결과, 탄성 변위분포를 나타낸 것이다. 최대변위량은 직선, 테이퍼, 타원형 포트홀 다이, 모두 다이 베어링 부위에서, 0.013, 0.01, 0.011 mm로 나타났다. 테이퍼형과 타원형이 직선형에 비해 상대적으로 적은 변위량을 나타내었다. 테이퍼형 포트홀 경우, 소재가 테이퍼 부위에 충전되면서 포트홀 내부에 반경 방향으로 힘이 상당부분 작용하여 접합실 바닥 및 다이 베어링을 압출 반대방향으로 들어올리는 역할하기 때문에 직선형보다 적은 변위량을 나타내는 것으로 판단된다.

탄성 변위량은 테이퍼형이 가장 크게 나타났다. 이것은 앞서 설명했듯이 포트홀과 접합실, 다이 출구부 전체를 하단 모서리에 출구가 존재하는 실린더 형상으로 가정해보면, 실린더 내부에서 반경

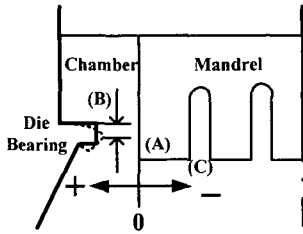


Fig. 14 Positions of measurements (Fig. 15 and 16)

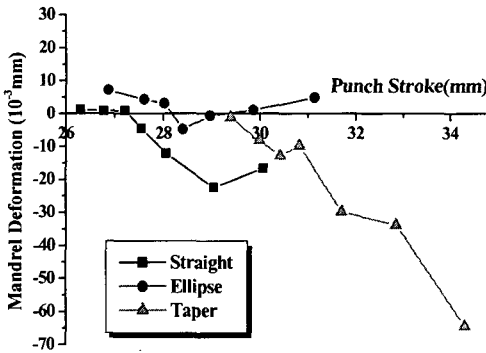


Fig. 15 Mandrel deflection as the function of stroke

방향으로 힘이 커질 때, 실린더는 배럴형상(Barrel)으로 변하게 되고 모서리 입구는 좁아지게 된다. 이와 같이 포트홀 다이 압출에서도 포트홀 내 반경방향의 힘이 증가할 경우, 다이 베어링의 변형은 감소하고, 맨드릴 변형은 입구가 좁아지는 형상을 유지하기 위해 가운데로 향하는 변형을 나타낸다. 이에 반해 타원형인 경우, 반경방향의 힘은 크게 증가시키지 않으면서 맨드릴 양끝 접합면에 닿는 소재의 유동량을 초기에 어느 정도 완화시키는 역할을 하여 맨드릴의 변형을 감소시키는 것으로 판단된다. 전반적인 테이퍼 다이의 변형양상은 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 15는 Fig. 14(A)의 위치에서 압출 스트로크에 따른 맨드릴의 변위량을 나타낸 것이다. Fig. 14에서와 같이 맨드릴 양끝이 가운데로 중심을 향할 경우 (+), 반경방향으로 향할 경우 (-)로 하였다. 전체적인 맨드릴 양 끝 변형 양상은 소재가 맨드릴에 닿는 순간에는 맨드릴이 바깥으로(+방향) 향하다가 맨드릴 양끝에 소재가 유입되면서부터 가운데로(-방향) 모이는 변형을 갖는다. 이러한 급격한 변형 양상이 맨드릴 파손 및 튜브 치수 불량량을 초래하는 것으로 사료된다. 특히 테이퍼형의 경우는 소재가 맨드릴에 닿기 전부터 맨드릴이 가운데로 모이는 변형을 하는 것으로 나타나 맨드릴 양 끝의 변형에는 악영향을 미치는 것으로 나타났다.

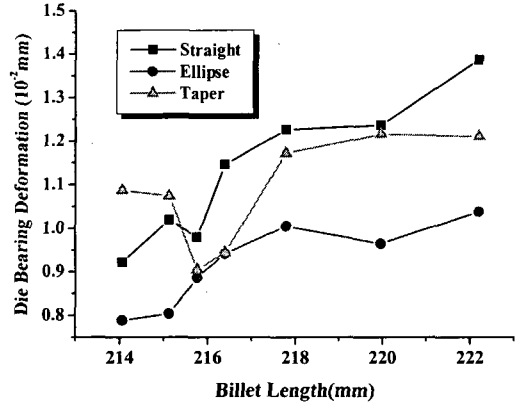


Fig. 16 Deflection of die bearing as the function of stroke

그러나 이러한 결과는 접합실 바닥 단면형상이 원형이고, 접합실 내 소재가 맨드릴 중앙부에 가장 먼저 닿지만 접합면에서는 맨드릴 양 끝이 먼저 충전되는 유동양상(Fig. 7) 때문이라 판단된다. 만약 맨드릴 내에서 접합면에 닿는 소재유동을 중앙에 가장 먼저 닿고 양 끝으로 이동할 수 있다면 최종 맨드릴 양 끝 변형은 상당부분 감소시킬 있다고 판단된다. 이것은 챔버 바닥의 형상변화를 통해 달성할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 16은 다이 베어링의 변위량을 압출 스트로크의 함수로써 나타낸 것이다. 앞서 설명했듯이 직선형이 테이퍼 및 타원형에 비해 상대적으로 높은 변형량을 가지는 것으로 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에서는 포트홀 형상 변화에 따른 압출 공정해석 및 강도해석을 수행하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

- (1) 압출하중은 포트홀 체적이 커질수록 내부 마찰증가와 포트홀 내 데드메탈 생성으로 증가한다.
- (2) 접합면의 접합압력은 포트홀 형상변화에 따른 영향을 크게 받지 않는다.
- (3) 포트홀 체적이 커질수록 맨드릴로 유입되는 소재유동 패턴은 균일해진다.
- (4) 다이 베어링의 탄성변형량은 포트홀 형상이 접합실 반경보다 커질 수록(테이퍼 형, 타원형), 포트홀 내부에 반경방향으로 힘이 작용하여 감소한다.
- (5) 맨드릴 양끝 탄성변형량은 포트홀 형상이 접합실 반경보다 커질 수록(테이퍼 형) 증가한다, 그러나 타원형일 경우, 포트홀 내에서 맨드릴 양

끝 방향으로만 힘이 작용하기 때문에 직선형에 비해 맨드릴 양끝 변형은 오히려 감소한다.

### 참고문헌

- (1) Kurt Laue and Helmut Stenger, 1976, Extrusion, American Society for metals, pp. 297~337.
- (2) Lee Jung Min, Kim Byung Min and Kang Chung Gil, 2004, "Effects of Chamber Shapes of Porthole Die on Elastic Deformation and Extrusion Process in Condenser Tube Extrusion," *Material & Design*, available online.
- (3) Xie. X. J., Murakami T., Takahashi H. and Ikeda K., 1993, "Theoretical Analysis on Fabrication Process of Pipe by Multi-Billet Extrusion," *J. of the JSTP*, Vol. 34, No. 390, pp. 823~829.
- (4) Park K., Lee Y. K., Yang D. Y. and Lee D. H., 2000, "Three-Dimensional Finite Element Analysis for Hollow Section Extrusion of the Underframe of a Railroad Vehicle," *J. of KSTP*, Vol. 9, No. 4, pp. 362~371.
- (5) Kim K. J., Lee C. H. and Yang D. Y., 2002, "Investigation into the Improvement of Welding Strength in Three-Dimensional Extrusion of Tubes Using Porthole Dies," *J. of Material Processing Technology*, Vol. 130~131, pp. 426~431.
- (6) Yang D. Y., Oh B. S. and Lee J. H., 1985, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Axisymmetric Forward Extrusion," *J. of KSME*, Vol. 9, No. 4, pp. 452~462.
- (7) Mooi H. G., Koenis P. T. G. and Huetink J., 1999, "An Effective Split of Flow and Die Deformation Calculations of Aluminium Extrusion," *J. of Material Processing Technology*, Vol. 88, pp. 67~76.
- (8) Lof J. and Blokhuis Y., 2002, "FEM Simulations of the Extrusion of Complex Thin-Walled Aluminium Sections," *J. of Material Processing Technology*, Vol. 122, pp. 344~354.
- (9) Inagaki T., Murakami S., Takatsuji N., Matsuki K., Isogai M. and Syobo N., 2001, "Application of Simulation of the Nonsteady State for Aluminium Rectangular Extruded Pipe," *J. of JSTP*, Vol. 42, No. 490, pp. 62~66.
- (10) Lee J. M., Kim B. M., Jeong Y. D., Jo H. and Jo H. H., 2003, "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.
- (11) DEFORMTM-3D, 1995, SFTC.
- (12) Jo H. H., Lee J. M., Lee S. B. and Kim B. M., 2003, "Prediction of Welding Pressure in the non Steady State Porthole Die Extrusion of A17003 Tubes," *International J. of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 4, No. 3.