

## 포트홀 압출의 소성유동에 대한 이론 및 실험적 연구

한철호\* · 임현조\*\*

(2001년 7월 5일 접수)

### A Theoretical and Experimental Study on the Plastic Flow in Porthole Extrusion

C. H. Han and H. J. Lim

#### Abstract

The paper is concerned with plastic flow in the port and welding chamber of rectangular hollow section extrusion through the porthole die. The extrusion process is analyzed by numerical simulation and experiments in the unsteady state. The effects of types of inlet with and without taper on the flow and extrusion load are mainly discussed and compared by FEA and experiments. Experiments are carried out by using the plasticine as a model material at room temperature. To visualize the plastic flow in the extrusion process, some split dies and punches are designed and manufactured by EDM. The theoretical predictions by FEM are reasonable agreements with experimental results on the deformed configurations and welding lines.

**Key Words** : Porthole Die, Welding Line, Rectangular Hollow Section, Plastic Flow, Unsteady State

#### 1. 서론

튜브(tube)나 중공 단면 제품을 만들기 위해 사용되는 웰딩챔버 방식의 압출금형은 포트홀 금형, 스파이더 금형, 브리지 금형으로 분류할 수 있다. 이 웰딩 챔버 방식은 응용 영역이 넓고 특히 알루미늄 중공 단면 제품 생산에 많이 쓰인다.<sup>(1)</sup> Fig. 1은 포트홀 웰딩 챔버 방식 압출 과정의 개략도이다.

포트홀 웰딩 챔버(port hole welding chamber) 방식

은 3단계의 과정을 거쳐 최종 압출된다. 소재는 금형 입구부에서 웨브(web)에 의해 여러 개의 포트홀로 갈라져 웨브를 타고 포트홀로 압출되어 들어가며, 이 소재들이 웰딩챔버에서 다시 모여 고온고압에 의해 경계면에서 용접이 일어나며 다이 랜드(die land)와 맨드렐(mandrel) 사이로 제품 형상을 만들며 압출된다. 이 과정은 금속이 포트홀로 갈라져 들어가는 1차 압출과정과 웰딩 챔버에서 용접되어 다이 랜드와 맨드렐 사이에서 최종압출되는 2차 압출과정으로 나눌 수 있다.

\* 남오공과대학교 기계공학부

\*\* (주)후후

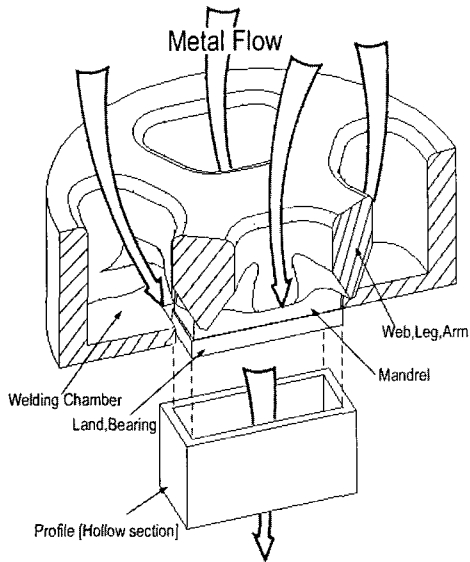


Fig. 1 Schematic description of a porthole die for the tube extrusion process

포트홀 금형 내부의 유동은 이와같이 매우 복잡한 양상으로 내부유동을 모르고는 최적의 금형을 설계할 수 없다. 산업 현장에서 포트홀 금형의 설계는 대개 기존의 경험에 근거하여 이루어지며 시작 금형제작후 시험에 의해 금형을 수정하는 방식이다. 이런 시행착오에 의한 방법은 한계가 있어 형상 및 치수 정밀도가 요구되는 제품의 설계에서는 적용하기 어렵다. 실금형을 만들기 전에 그 유동을 예측하여 설계에 반영한다면 설계를 좀더 쉽게하고 비용을 줄일 수 있을 것이다.

포트홀 금형 압출에 대한 연구는 새쉬, 난방용 핀의 경금속 압출을 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있다. Xie<sup>(2)(3)</sup> 등은 포트홀 금형 압출을 통한 파이프 성형에서 금속 유동을 실험적으로 가시화하고 실험 결과를 통하여 연속 유동장을 가정하여 상계해석으로 다이 맨드렐과 다이 캡 (Die cap)의 각 파라미터(Parameter)에 관하여 무차원화된 값으로 하중을 나타냈다. Igor Duplanics<sup>(4)</sup>는 Al6063으로 금속유동(Metal flow)에 대한 웰딩 챔버와 포트의 레이아웃(Layout)과 포트 채널(Port channel)의 영향과 제품의 치수에 대한 영향을 연구하고, 금형의 변형을 연구하였다. Rafael Rodriguez<sup>(5)</sup> 등은 Hollow die의 강도와 수명에 영향이 큰 웨브를 유한요소를 이용해 해석하였다.

Skauvik<sup>(6)</sup> 등은 유한요소 코드를 사용하여 각각의 웨브 형상에 대하여 베어링(Bearing)부의 온도 해석을 행했다.

Rudolf<sup>(7)</sup>는 차지 웰딩(Charge welding)과 데드메탈존(Dead metal zone)이 제품치수 및 품질에 미치는 영향을 연구했다.

Takatsuji<sup>(8)</sup> 등은 Al6063과 플라스틱신으로 압출과정을 포트홀 내의 층간과정 (공정I), 챔버 내 층간·접합과정 (공정II), 압출정상과정 (공정III)의 3공정으로 정리했고 챔버 높이가 높으면 층간·접합압력 및 접합영역이 증가하여 양호한 접합성을 가진다는 것을 실험으로 보여주었다. 또, 챔버 높이가 낮아도 다이 반각을 부여하면 다이 면의 미끄럼 마찰길이가 증가하기 때문에 챔버 내의 층간·접합압력이 상승하여 접합성을 향상하는 것이 가능하다는 것과 포트홀 수가 많아짐에 따라 접합면까지의 유동 거리가 짧아 브릿지(Bridge) 하부의 유동이 좋아져 접합성이 향상된다는 것을 보여주었다.

Murakami<sup>(9)</sup> 등은 접합강도에 미치는 포트홀 수, 배치 및 위치의 영향, 접합 강도와 압출 압력과의 관계, 진원도에 미치는 포트홀 수 및 배치의 영향, 진원도에 미치는 챔버 높이의 영향, 진원도와 금속흐름의 대응 등을 알루미늄과 플라스틱신으로 보여주었다. 그의 후속 논문<sup>(10-11)</sup>에서는 직사각형 중공 압출재의 접합강도와 포트형상의 관계와 확관을, 직사각형 중공 압출재의 진원도와 포트형상과 위치의 영향과 정상상태의 유동해석을 시도하였다.

Mooi<sup>(12)</sup> 등은 ALE 알고리즘에 의한 열해석 FE 코드를 사용 알루미늄 유동의 분할과 다이 변형을 2D와 3D로 계산하였다. 박<sup>(13)</sup>은 적응적 격자세분화기법을 이용 2D, 3D 압출공정에 적용하여 포트홀다이 압출을 등온 정상상태로 가정하고 포트홀 설계에 따른 유동을 연구하였다. 박<sup>(14)</sup> 등은 철도차량 마루부재의 압출공정을 시뮬레이션하고 유한요소 해석 시스템을 개발하였다. 이<sup>(15)</sup> 등은 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 웰딩 챔버 내의 접합압력에 대한 다이 형상과 포트홀 개수의 영향을 보여주었다. 본 논문에서는 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 웨브의 형상 변화에 대한 챔버 내 유동을 비교하고 웰딩라인(용접선, welding lines)의 형상을 이론해석하고 플라스틱신 모사 실험을 통하여 검증하기로 한다.

FEM해석은 소성가공해석 전용 소프트웨어인 미국 SFTC의 DEFORM<sup>TM</sup>3D를 사용하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 해석 모델

본 연구에서의 해석 대상은 4개의 포트홀이 있는 직사

각형의 중공형재를 제조하는 포트홀 압출공정이며 금형의 주요 형상치수는 Fig. 2와 같다. 금형은 산업체에서 사용하고 있는 금형의 축소 모형을 선정하였다.

해석모델은 웨브경사의 영향을 비교 검토하기 위하여 Fig. 3과 같은 압출시 웨브에 경사가 없는 Type 1과 웨브에 경사가 있는 Type 2로 구분하였다. 그림은 금형의 형상에 대한 이해를 돕기위하여 포트홀 금형의 1/4만을 표현한 개략도이다.

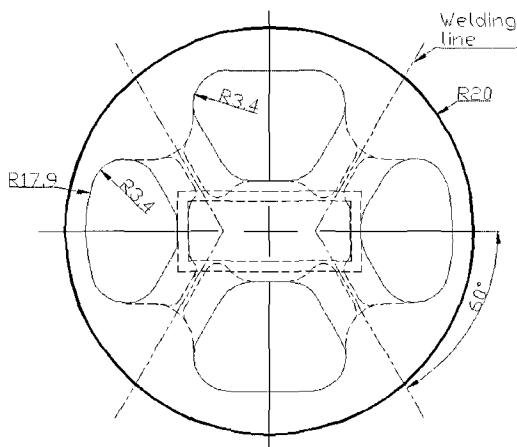


Fig. 2 A top view of porthole die

직사각형 중공재의 포트홀 다이 압출은 직교하는 2개의 대장축이 있는 대칭 형상이므로 1/4 형상만을 등온과정으로 해석하였으며 램 속도는 1.6mm/s로 하였다. 해석 대상 소재는 모사실험에 많이 이용되는 플라스틱신 (Peter Pan사 제조)을 선택하고 이형을 위해 베이비파우더를 사용하였으며 유동응력(flow stress)과 마찰상수(friction factor)는 재료시험과 마찰시험을 통해 얻은 다음과 같은 유동응력식과 마찰상수를 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = 0.15 \bar{\epsilon}^{0.097} (MPa) \quad (1)$$

$$m_f = 0.7 \quad (2)$$

소재는 강소성체로, 포트홀 다이, 펀치 및 컨테이너는 강체로 가정하였다. Fig. 4(a)는 해석대상의 모델이며 격자 구성은 Fig. 4(b)에 나타냈다. 격자는 표면격자를 4000 개 취하였다.

포트홀 다이 압출은 대부분 압출비가 크고 유동변화가 심하므로 스텝이 진행되면서 격자재구성(remesh)작업이 필요하다. 격자재구성은 자동재구성을 이용하였고 자동재구성이 어려운 단계에서는 수동으로 나누어서 진행하였다. 상기와 같은 조건으로 웰딩 챔버에서 용접이 이루어지기 전까지 비정상상태의 압출공정을 상용 DEFORM-3D 코드로 유한요소 해석하였다.

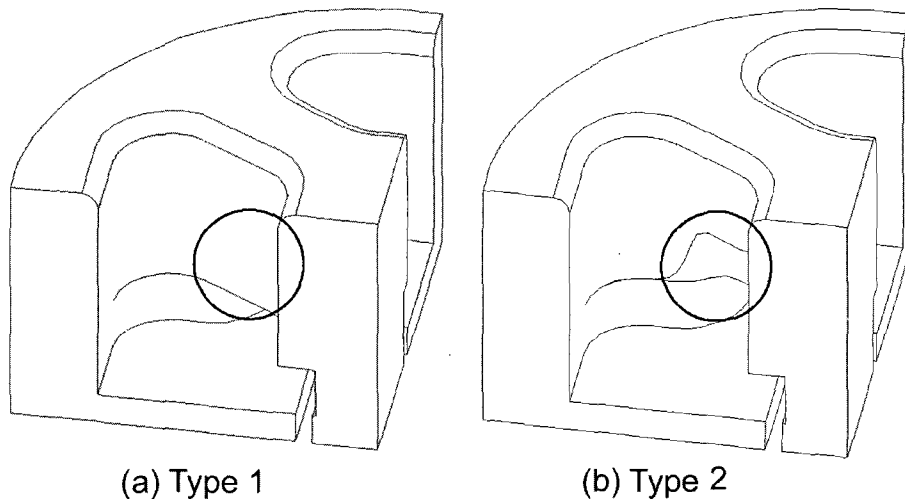


Fig. 3 A quarter section of 3D model of porthole die

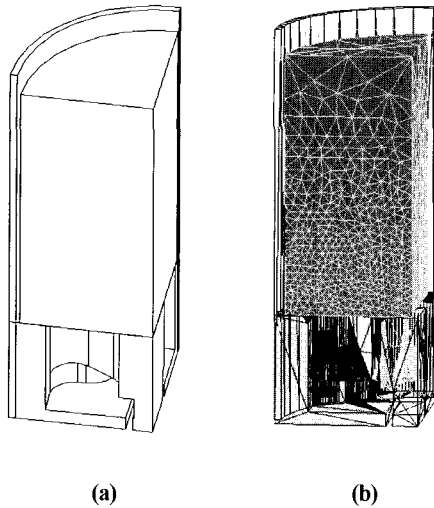


Fig. 4 A quarter section of 3D model of porthole die extrusion process

Table 1 Condition of simulation

Condition	Value
Billet size	$\phi 39.5 \times H40 \text{ mm}$
Ram speed	1.6 mm/s
1st ext. ratio	2.74
2nd ext. ratio	9.62
Total ext. ratio	26.35
Product size	18×7.9×1.0 mm
Mesh no.	Surface 4000 mesh
Mesh type	Tetrahedral mesh

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치

본 실험에 사용되는 압출기의 개략도를 Fig. 5에 나타냈다.

#### 3.2 실험 재료

실험재료는 소성유동 모델링 재료로 널리 쓰이는 플라스틱인을 사용하였으며, 플라스틱인은 열간 상태에서의 소성유동 및 변형 특성을 상온에서 쉽게 예측하는 것으로 적당하다. 유동을 보기 위하여 그리드 시편과 디스크 셀 시편을 제작하였다. 실험 조건은 Table 2와 같다.

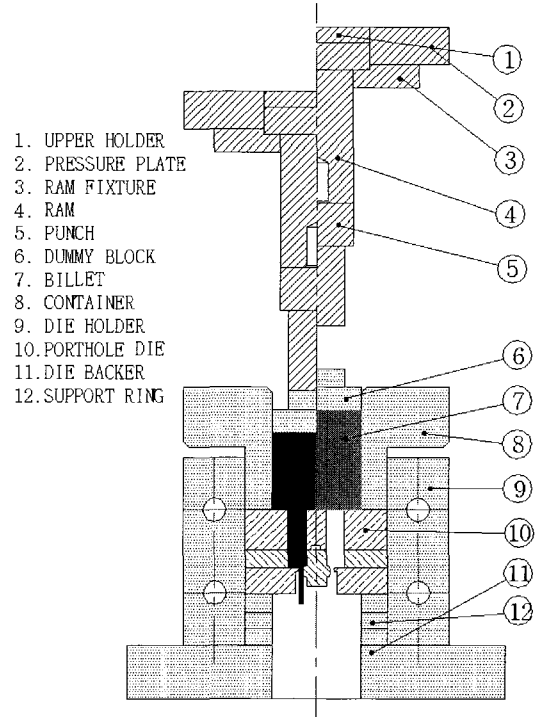


Fig. 5 Experimental apparatus for extrusion

Table 2 Extrusion condition

Term	Condition
Billet material	Plasticine( $\phi 39.5 \times H40 \text{ mm}$ )
Temperature.	$20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
Ram speed	1.6 mm/s

### 4. 결과

본 연구의 FEM 해석결과와 하중-변위 곡선을 Fig. 6에 보였다. Type 2의 경우가 챔버 바닥에 닿은 후 Type 1보다 하중이 작게 나타남을 볼 수 있다. 포트홀을 통과한 재료가 챔버 바닥면에 닿아 다이 출구 쪽으로 향할 때 Type 2의 유동이 Type 1에 비하여 급격하지 않기 때문에 하중이 작게 나타난다.

한편 Fig. 7에 있는 그리드 시편 실험에서 보면 Type 1의 그리드의 찌그러짐이 작은 것을 볼 수 있으며 이것이 압출하중의 증가 요인임을 알 수 있다.

그리드의 변형을 보면 Type 1과 Type 2의 경우 포트홀로 들어가는 부위까지는 금형형상이 같기 때문에 그리드의 변형이 거의 같으나 웰딩챔버로 들어가는 부분에서

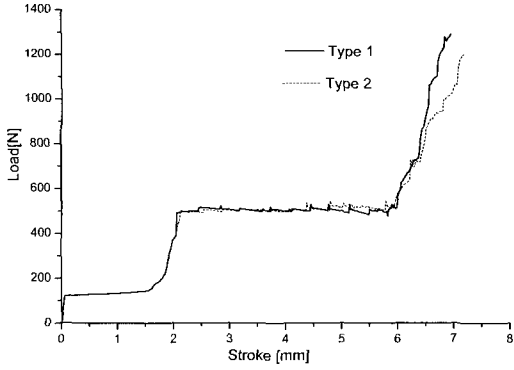


Fig. 6 Load curve of FEM analysis

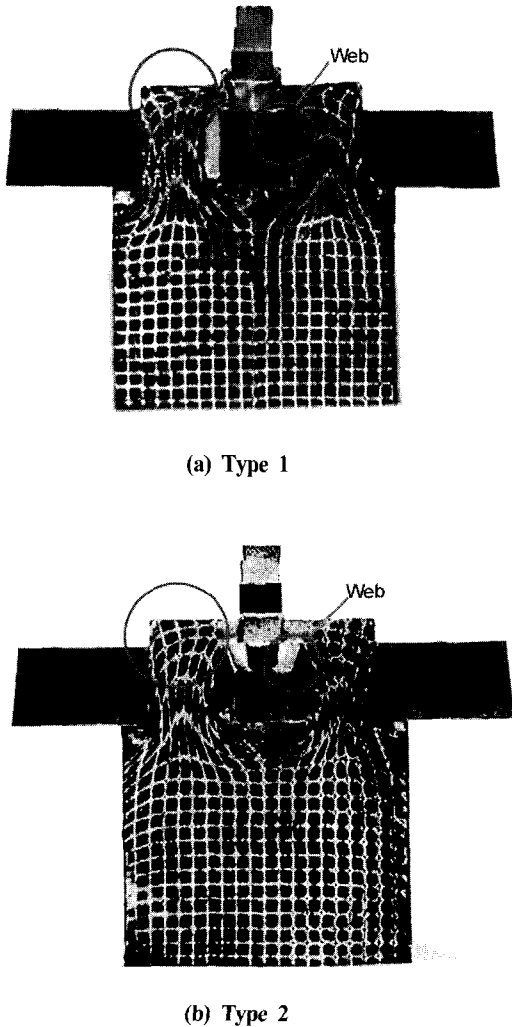


Fig. 7 Experimental grid distortion

는 웨브의 경사가 있고 없음에 따라 변형양상이 크게 달라지고 있음을 보여 주고 있다.

웨브에 경사가 없는 직각형은 심한 소성변형을 초래하며 압출하중의 증가와 온도상승의 원인이 될 수 있으며 Skauvik<sup>(6)</sup> 와 Xie<sup>(2)</sup> 등의 연구논문에서도 유사한 경향을 보이고 있다.

본 연구에서는 웨브의 형상을 달리하여 그 영향을 보았다. 웨브는 맨드렐을 지지해주고 있는 부위로 직접적인 압출 하중을 받기 때문에 웨브의 설계가 중요한 것이 사실이다.

웨브에 경사를 주어 가공하는 것은 강도 면에서 불리하나 소성유동에서는 유리함으로 제품의 표면 품질향상에 기여하게 된다.

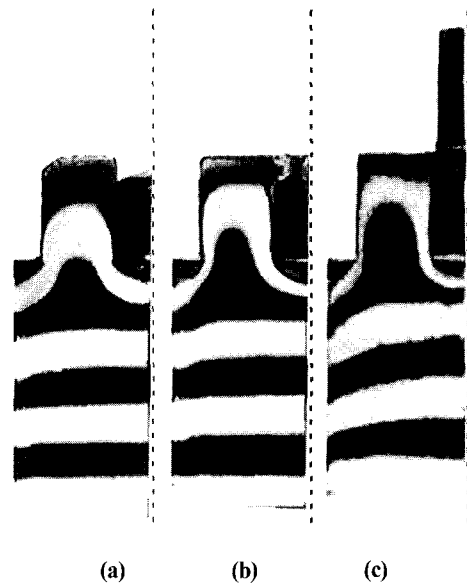


Fig. 8 Plastic flow by experiments

Fig. 8은 셀 시편 실험 결과이다. 셀 시편 실험은 흰색, 검은색 각각의 플라스틱을 5mm 두께로 적층한 시편을 사용했다. 같은 방향의 단계별 사진을 보여 주고 있다. (a)는 챔버 바닥에 막 닿는 순간이고 (b)는 챔버를 채우는 순간이고 (c)는 압출 직후 정상 상태에 이르는 시점이다. 급형 코너 부위와 중앙 부위에 데드 메탈 영역이 생성됨을 볼 수 있다.

점선으로 보이는 중심선으로부터 외부로 가면서 유동 속도차를 볼 수 있다.

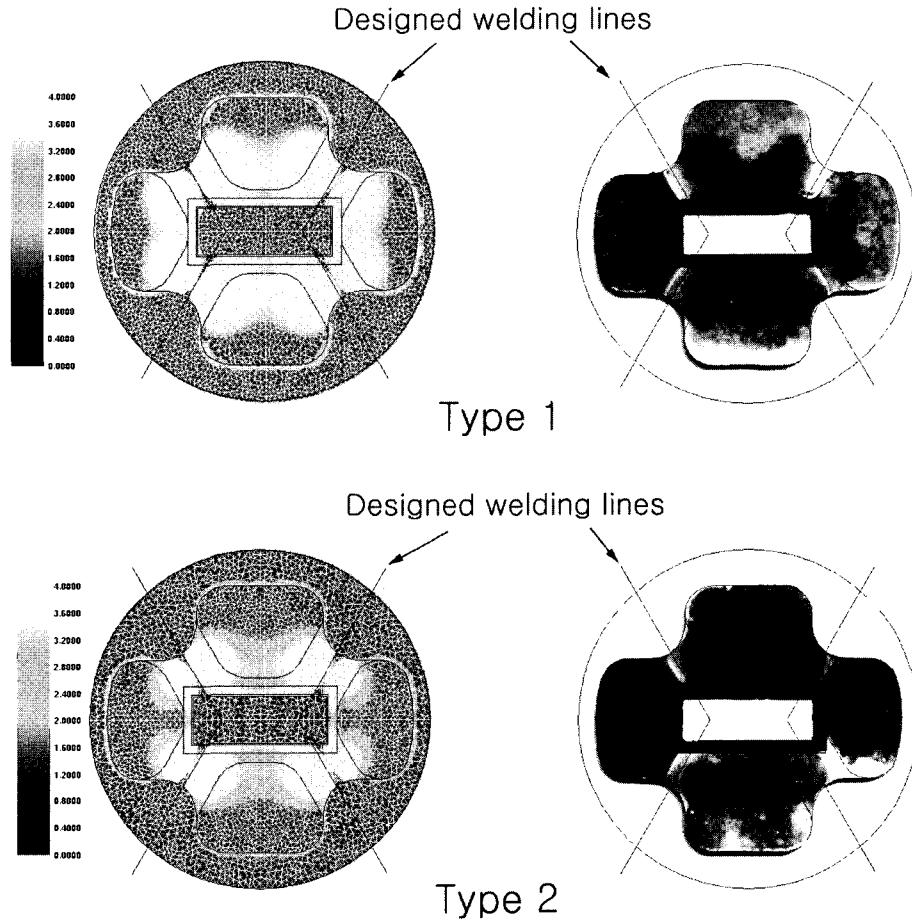


Fig. 9 Welding lines and velocity distribution in welding chamber by FEM and experiment

Fig. 9의 좌측은 챔버내에 소재가 최초로 채워질 때 바닥면에서의 이론해석 속도분포(mm/s)이며 우측은 실험 결과의 바닥면을 절단한 것으로 백색선 부분이 실험에서 사용한 파우더가 모인 부분으로 웰딩라인에 해당하고 이는 인접소재가 맞 닿는 경계면에서 뚜렷하게 나타나며 이론결과는 실험결과와 비교적 양호하게 일치하고 있다.

웰딩 라인은 포트홀 설계에서 기준이 되는 선으로 아주 중요한 요소 중에 하나다. 이런 웰딩 라인을 결정하는 것은 포트홀의 배치와 관계가 있다. 여기 실험 및 해석에서는 포트홀 모양과 배치는 같고 웨브의 모양이 다른 경우이기 때문에 Type 별 웰딩 라인의 차이는 크지 않으나 웨브에 경사가 있는 경우가 좁은 단면쪽으로 치우치는 경향이 있다.

또한 Type 1과 Type 2의 이론해석 결과를 비교해보면 실험에서의 마찬가지로 웨브 형태에 따라 속도 분포가

다르며 웨브 형태가 달라지면서 절대속도가 작은 데드 메탈 영역도 변하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 경사가 없는 모델과 경사가 있는 모델 두 경우에 대해 포트를 통과한 소재가 웰딩챔버 바닥면에 닿기 직전 상태와 챔버를 채운 상태까지의 공정 진행에 따른 단계별 유효변형률과 유효응력을 나타낸다.

그림에서 볼 수 있듯이 소성변형은 포트홀 근방에서 일어나며 입구 코너에 응력이 집중되어 포트홀 웨브 부위에 부하가 크게 걸리고 있음을 알 수 있다.

Type 1과 Type 2 모두 전영역에 걸쳐 웰딩챔버 접촉전의 유효응력보다 접촉후 챔버를 채우는 순간의 응력이 커지고 있으며 공정 진행에 따라 포트홀내의 응력이 증가한다. 또한 채우는 과정에서 동일 위치에서 고응력 영역이 Type 1이 더 넓은 변형저항이 증가한 때문이며 이것은 앞의 실험 결과와도 잘 부합되고 있다.

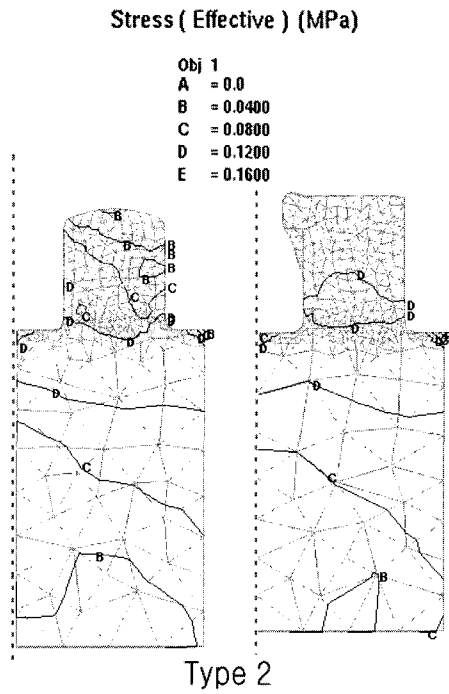
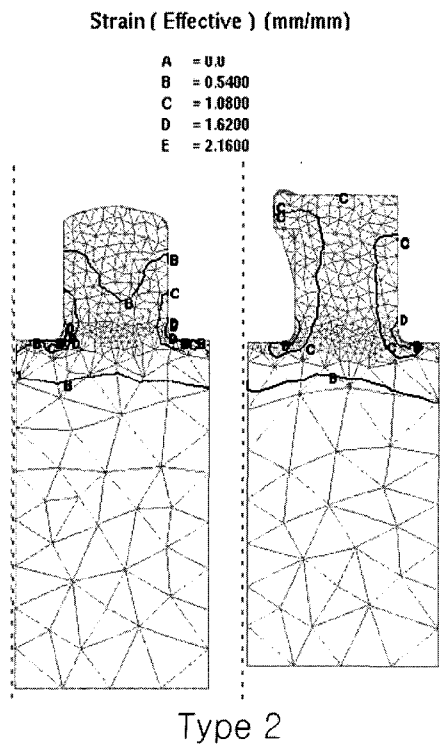
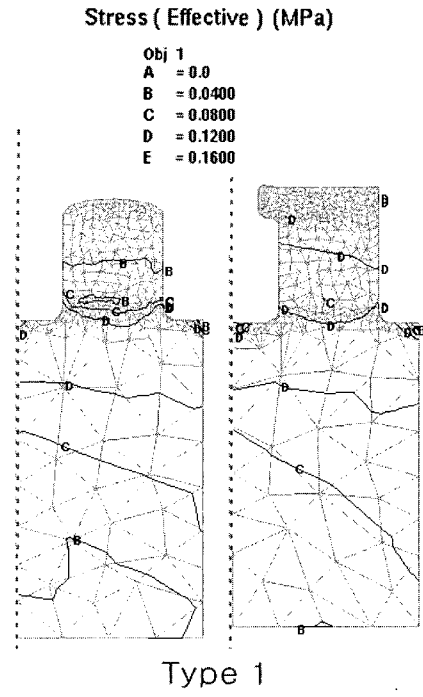
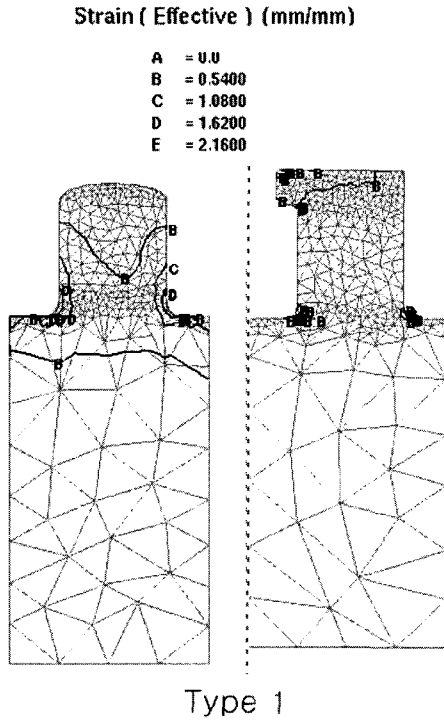


Fig. 10 Effective strain distribtion [mm/mm]

Fig. 11 Effective stress distribution [MPa]

## 5. 결론

(1) 포트홀 압출의 소성유동을 가시화하는 이론 및 실험방법을 제안하였으며 비정상상태에서 해석방법의 유효성을 입증하였다.

(2) 웨브의 형상은 소성 유동 및 테드 메탈 영역의 변화를 주며 경사형이 유동을 향상시키며 압출하중을 감소시킨다.

(3) 직사각형 중공재 압출에서 웨브의 경사는 웰딩 라인을 더욱 좁은 단면쪽으로 치우치게 한다.

(4) 제안된 해석과정 및 실험방법은 포트홀 금형설계 및 실험연구에 기초자료로 활용 가능하다.

## 참고 문헌

- (1) Laue, K., 1981, "Extrusion-Processes, Machinery, Tooling", ASM.
- (2) Xie, J. X. et al., 1995 "Experimental Simulation of Meta Flow in Portholedie Extrusion". J. Materials Processing Tech. Vol. 49, pp. 1~11.
- (3) Xie, J. X. et al., 1995, "UBA analysis of process of Pipe Extrusion through Porthole-die" J. Materials Processing Tech. Vol. 49, pp. 371~385.
- (4) Duplancic, I., 1996, "Design of Hollow Dies for Manufacturing Thin-walled Hollow Sections, 6th International Aluminum Extrusion Technology Seminar", Profiles of Change Vol. II, pp.169~177.
- (5) Rodriguez, R. et al., 1996, "Analysis of the Deformations that are Active on the Webs of Hollow Dies during the Extrusion Cycle. Analysis Conducted by Finite Elements", 6th Int. Al Extrusion Tech. Seminar, Profiles of Change Vol. II, pp. 179~181.
- (6) Skauvik, I. et. al, 1996 "Numerical Simulation in Extrusion Die Design", 6th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Profiles of Change Vol. II, pp. 79~82.
- (7) Akeret, R., 1995, "Extrusion Weld Quality Aspects are Now Center Stage", 5th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Commitment to Excellence, Vol. I, pp. 319~335.
- (8) Takatsuji, N. et al. 1995, "Effects of Die Shapes on Welding Strength of Extruded Pipes by Porthole Die -Improvement in Quality of Hollow Extrusion I", JSTP Vol. 36, No. 414, pp. 731~736.
- (9) Murakami, S. et al., 1996, "Inside Diameter Accuracy of Extruded Pipes by Porthole Die -Study on Improvement in Quality of Hollow Extrusion II", JSTP Vol. 37, No. 423, pp.403~408.
- (10) Murakami, S. et al. 1996, "Dimensional Accuracy of Rectangular Pipes by 4 Portholes Die - Study on Improvement in Quality of Hollow Extrusions III", JSTP Vol.37, No. 428, pp. 938~944.
- (11) Murakami, S. et al. 1997, "Simulation of Rectangular Extruded Pipes by Porthole Die-Study on Improvement in Quality of Hollow Extrusions IV", JSTP Vol.38 No. 436, pp.79~83.
- (12) Mooi, H. G. et al. 1999, "An Effective Split of Flow and Die Deformation Calculations of aluminum Extrusion", JMPT 88, pp. 67~76.
- (13) 박근, 1998, "영역분할에 의한 격자세분화기법을 사용한 3차원 압출공정의 유한요소해석", KAIST 박사학위논문.
- (14) 박근, 이영규, 양동열, 이동현, 1999, "철도차량 마루부재 압출공정의 3차원 유한요소해석", '99 압출 및 인발 심포지엄논문집, 한국소성가공학회, pp. 5~9.
- (15) 이상근, 정충식, 김병민, 조형호, 1999, "포트홀 다이를 이용한 중공재의 압출공정해석", 한국정밀공학회 '99 추계학술대회논문집, pp. 1036~1039.