

포트홀 다이에 의한 Al 튜브의 비정상상태 열간 압출 공정 해석

조형호* · 이상곤** · 박종남** · 김병민***

(2001년 3월 14일 접수)

Unsteady State Analysis of Al Tube Hot Extrusion by A Porthole Die

H. H. Jo, S. G. Lee, J. N. Par and B. M. Kim

Abstract

Porthole die extrusion has a great advantage in the forming of long hollow section tubes. It is difficult to produce long hollow section tubes with complicated section by the conventional extrusion process with a mandrel on the stem. Because of the limit of the length of mandrel and the complexity of cross section. Porthole die extrusion is affected by many parameters, such as extrusion ratio, extrusion speed, die geometry, porthole number, bearing length etc. Up to now, most of studies about porthole die extrusion have been investigated by experiments or steady state FE-analysis. However, in this paper, porthole die extrusion is analysed by the unsteady state 3D FE-simulation. And the result of unsteady state analysis is compared with the experimental result. Also, the surface state of extruded tubes are examined for the various process conditions.

Key Words : Al Hot Extrusion, Porthole Die, Welding Chamber, Extrusion Load, Surface Defect

1. 서론

브릿지(brigde)를 가진 접합실(welding chamber)방식의 압출은 튜브나 중공체를 생산하기 위해 널리 쓰이고 있는 압출 방식이다⁽¹⁾. 중공 단면을 가진 튜브제품은 접합실을 두고 스파이더 다이, 포트홀 다이, 브릿지 다이 등과 같은 특수 다이를 이용하여 압출할 수 있다. 포트홀 다이 압출은 스템에 맨드렐을 가진 재래식 방법으로

는 생산하기 어려운 복잡한 단면을 가진 생산품의 경우에 큰 장점을 가지고 있다. 종래의 스템을 이용한 파이프 생산에서는 맨드렐의 길이에 따라 파이프의 길이가 제한되지만 포트홀 다이 압출법을 이용하게 되면 맨드렐의 길이에 상관없이 길이가 긴 제품을 연속적으로 생산할 수 있게 된다.

지금까지 포트홀 다이 압출에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만 대부분의 연구들이 실험을 통한 빌렛의 유

* 한국생산기술연구원 주조공정개발팀
** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
*** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

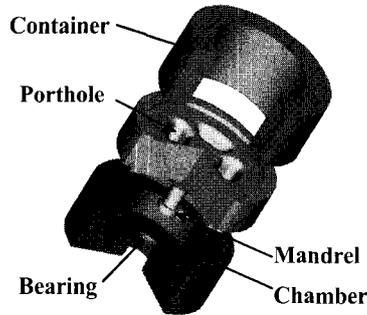


Fig. 1 Spilt tool assembly used in porthole die extrusion

동 및 압출하중에 관한 것들이며^(2~3), 해석관련 연구들도 대부분이 정상상태 해석에 국한되어 있다^(4~7). 따라서, 본 논문에서는 Mg함유량이 0.6과 1.0%의 두 가지 Al7003합금 빌렛의 포트홀 다이 압출 공정의 비정상상태 유한요소 해석을 통하여 초기 빌렛온도, 베어링 길이, 동일한 압출비를 가지는 튜브 두께와 압출비의 변화에 따른 압출하중 및 소재의 유동을 파악하였다. 해석결과를 검증하기 위해 포트홀 다이 압출실험을 수행하였으며, 또한 공정변수의 변화에 따른 튜브의 표면상태를 조사하였다.

2. 포트홀 압출공정의 유한요소해석

2.1 포트홀 다이 압출의 금속유동

Fig. 1은 컨테이너, 포트홀 다이, 맨드릴 및 접합실로 구성되어 있는 다이 구조를 보여준다. Fig. 2는 빌렛이 베어링부로 빠져 나오기 시작하여 튜브가 생성되는 2차원 형상을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 빌렛이 포트홀에

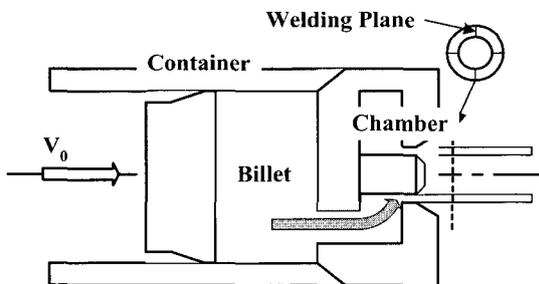


Fig. 2 2-D Schematic diagram of the charge welding

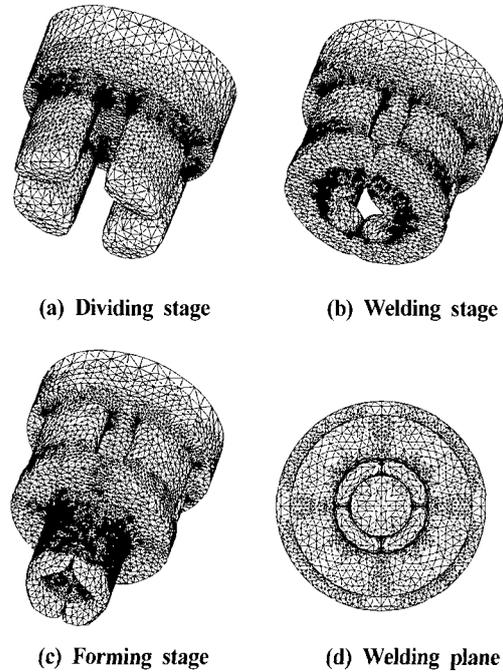


Fig. 3 Extrusion stages in porthole die

서 나누어지는 분할단계(dividing stage)이고, Fig. 3(b)는 분할된 빌렛이 접합실 바닥에 닿은 후 원주 방향으로 압출되어 서로 만나 접합이 되는 접합단계(welding stage)이다. Fig. 3(c)는 4곳에서 접합된 빌렛이 베어링부로 빠져 나오기 시작하는 성형단계(forming stage)이다. Fig. 3(d)는 접합된 단면형상을 나타낸 것이다. 위와같이 3단계의 성형단계를 통해서 금형 내에 빌렛이 충전되고 튜브가 성형되어진다^(2, 8~9)

2.2 포트홀 다이 압출 공정의 유한요소모델

압출하중의 크기는 다양한 인자들에 의해 복합적으로 영향을 받지만 본 연구에서는 초기 빌렛온도, 베어링길이, 튜브두께, 압출비 등의 변화가 압출하중, 재료의 유동 및 제품 표면상태에 미치는 영향을 알아보았다.

유한요소해석과 실험에서 초기 빌렛온도는 400, 430, 460°C, 베어링길이는 3, 4.5, 6mm, 튜브두께는 동일한 압출비 43에 대해서 1.5, 1.6, 1.7mm로 각각 선택되었다. 압출비의 변화는 37, 43, 50의 3가지 경우에 대해서 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 공정변수는 Table 1에 나타내었다. DEFORM-3D 상용 코드를 사용하여 해석을 수행하였고, 마찰상수(m)는 0.7로 가정하였

Table 1 Process variables for FE analysis

Conditions	Values
Billet Diameter(mm)	74
Bridge Height(mm)	38.5
Chamber Height(mm)	20
Product Thickness(mm)	1.5, 1.6, 1.7 at same extrusion ratio 43
Extrusion Ratio	37, 43, 50
Extrusion Speed(60mm/min)	60
Initial billet Temperature(°C)	400, 430, 460
Initial container/Chamber Temperature(°C)	400
Friction factor	0.7

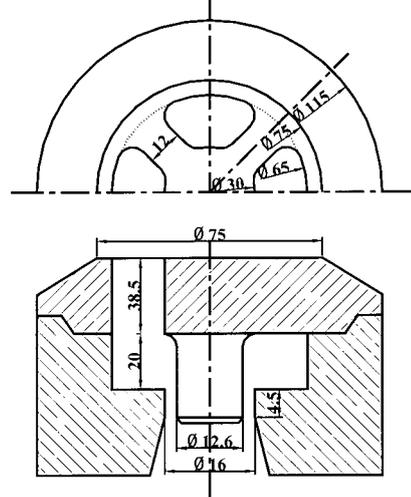


Fig. 4 Die geometry for the process analysis

Table 2 Thermal properties of the porthole extrusion process

	Material	Thermal conductivity [N/sec/°C]	Heat capacity [N/mm ² /°C]	Emissivity [N/sec/mm/C ⁴]	Interface heat coefficient [N/sec/mm/C]
Billet	Al7003	180	2.41	0.3	40
Container & Chamber	H13	28.6	3.57	0.3	40

Table 3 Composition of the improved Al7003 alloy[wt%]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Al
Al7003 [wt%]	0.3	0.1	0.15	0.2	0.6	0.1	6.0	0.15	Rem.
					1.0				

다⁽¹⁰⁾. 컨테이너와 접합실은 강제로 두었으며, 대칭성을 고려해 1/8단면 해석을 수행하였다.

Table 2는 유한요소해석을 위해 사용된 열간 물성치를 나타내었고, Table 3은 실험에 사용된 개량된 Al7003의 합금조성을 나타낸 것이다. 온도와 변형률 속도에 대한 소재의 유동응력은 열간압축시험을 통하여 구하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 금형의 기하학적 형상을 나타낸 것이다.

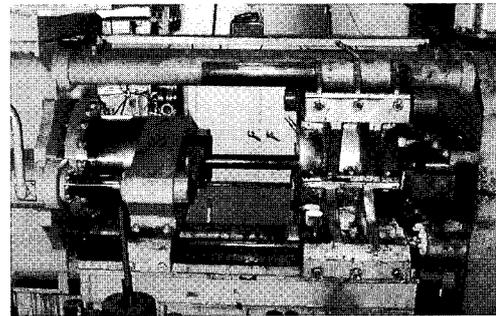


Fig. 5 Experimental apparatus for porthole extrusion

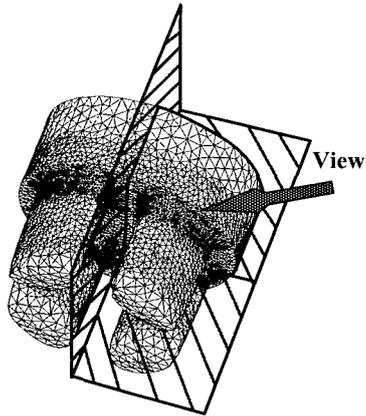
3. 압출 실험 및 유한요소해석 결과

Fig. 5는 포트홀 다이 압출에 사용된 실험 장치도이다. 각각의 공정에 대해서 램속도는 60mm/min이고 Mg0.6과 1.0wt%의 개량된 Al7003합금이 사용되었다. 공구의 온도는 금형예열기를 사용하여 초기 설정온도로 가열하여 실험을 수행하였다. 4개의 포트홀을 가진 직각다이를 사용하였고, 윤활제는 접합에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 무윤활로 압출을 수행하였다.

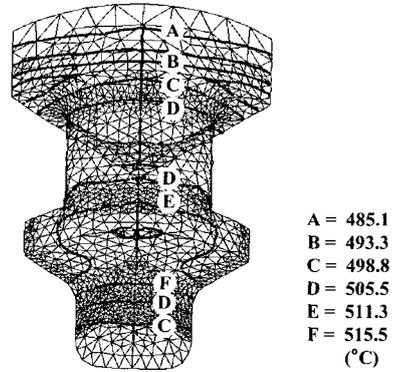
3.1 압출단계에 따른 온도 및 속도 분포

Fig. 6은 초기 빌렛온도 430°C, 튜브두께 1.5mm, 배어링길이 4.5mm, 압출비 50인 경우에 대하여 각 압출단계에 따른 빌렛의 1/4단면에 대한 온도분포를 나타내고 있

으며, 스트로크가 진행됨에 따라 변형 및 마찰에 의한 열발생량의 증가에 의해 소재 온도가 상승하고 있는 경향을 볼 수 있다.

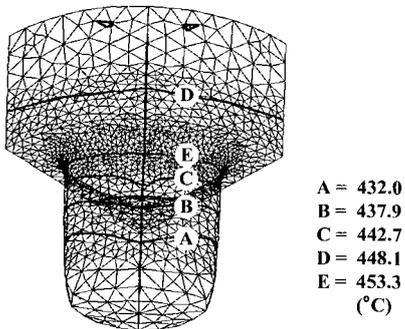


< 1/4 section >

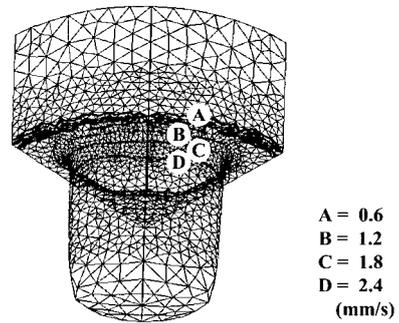


(c) Forming stage

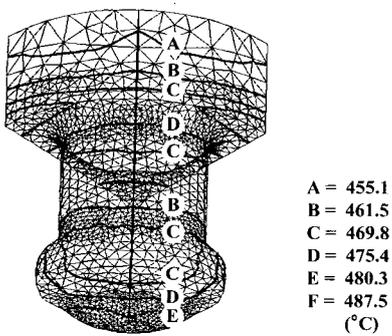
Fig. 6 Distribution of temperature at each stage when billet temperature 400°C, bearing length 4.5mm tube thickness 1.5mm and extrusion ratio 50



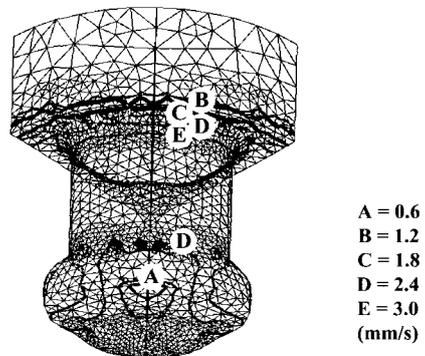
(a) Dividing stage



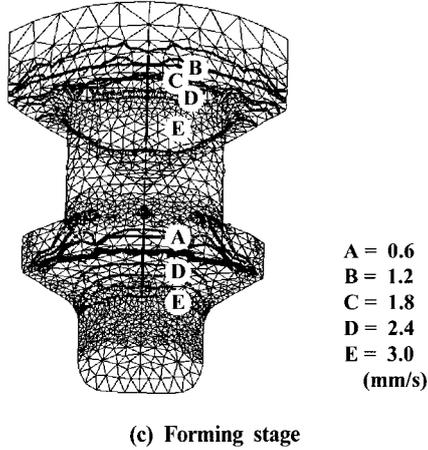
(a) Dividing stage



(b) Welding stage



(b) Welding stage



(c) Forming stage

Fig. 7 Distribution of velocity at each stage when billet temperature 400°C, bearing length 4.5mm, tube thickness 1.5mm and extrusion ratio 50

Fig. 7은 각 단계별 속도분포를 나타낸 것으로, 빌렛이 컨테이너에서 포트홀로 유입되는 단계에서 단면감소로 인하여 압출방향으로 속도가 증가함을 알 수 있고, 포트홀을 빠져나온 빌렛이 접합실을 채우는 동안에는 반경방향으로의 소재의 유동으로 인하여 압출방향으로의 속도는 감소한다. 마지막으로 빌렛이 접합실을 모두 채우고 난 후 접합되어진 빌렛이 다이 랜드부를 빠져나올 때 다시 단면감소로 인하여 압출속도가 증가함을 알 수 있다.

3.2 압출비의 변화에 따른 압출하중

Fig. 8은 압출비(Extrusion Ratio(ER) : 접합실 단면적/튜브 단면적)가 각각 37, 43, 50일 때 유한요소해석으로 구한 펀치-스트로크에 따른 압출하중을 나타낸 것이다. 곡선은 3가지의 단계로 나누어지는데 A는 분할단계, B는 접합단계, C는 성형단계이다. 초기 빌렛온도는 460°C,

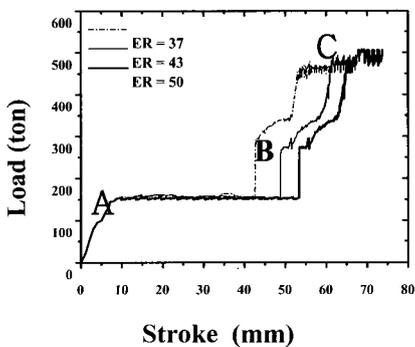


Fig. 8 Load-stroke curve for extrusion ratio

베어링 길이는 6mm, 튜브두께는 1.7mm로 고정시켰다. 압출비가 커질 수록 최대 압출하중은 증가함을 알 수 있다.

Table 4는 압출비에 따른 유한요소해석으로부터 얻은 각각의 최대 하중, 재료 및 금형의 온도 등을 나타내고 있다.

Table 4 Maximum extrusion loads when billet temperature is 460°C and bearing length is 6mm and tube thickness is 1.7mm

Extrusion Ratio	Max. Load (ton)	Max. Billet Temp(°C)	Max. Mandrel Temp(°C)	Max. Chamber Temp(°C)
37	465.4	518.2	416.5	428.0
43	482.2	530.3	420.7	434.3
50	505.7	538.8	429.2	442.7

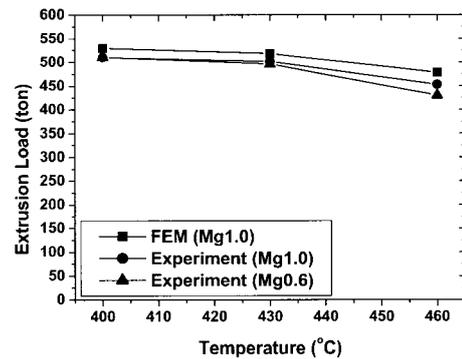


Fig. 9 Extrusion loads for billet temperature

3.3 초기 빌렛온도의 변화에 따른 압출하중

유한요소해석은 Mg1.0wt%에 따른 기계적 성질⁽¹¹⁾을 바탕으로 유한요소해석을 수행하였고, 압출실험은 Mg0.6과 1.0wt%에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 9는 초기 빌렛온도가 각각 400, 430, 460°C 일 때 유한요소해석과 실험에서의 최대 압출하중을 나타내고있다. 베어링길이는 4.5mm, 튜브두께는 1.7mm로 고정시켰다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 압출하중은 초기 빌렛온도가 증가할 수록 빌렛의 유동응력 저하로 인하여 점차 감소하는 경향을 나타내며, 초기 빌렛온도가 400°C인 경우가 460°C인 경우보다 약 50ton정도 높게 나타났다. 위의 결과로부터 유한요소해석 결과는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 5에 유한요소해석으로부터 얻은 초기 빌렛온도에 대한 각각의 최대 하중 및 금형온도 등을 나타내었다.

Table 5 Maximum extrusion loads when bearing length is 4.5mm and tube thickness is 1.7mm

Initial Billet Temp(°C)	Max. Load (ton)	Max. Billet Temp(°C)	Max. Mandrel Temp(°C)	Max. Chamber Temp(°C)
400	529.3	507.2	413.4	421.8
430	518.2	515.4	418.5	426.1
460	477.6	534.8	425.7	435.8

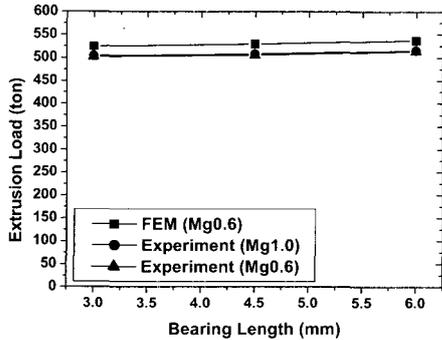


Fig. 10 Extrusion loads for bearing length

Table 6 Maximum extrusion loads when billet temperature is 400°C and tube thickness is 1.7mm

Bearing Length (mm)	Max. Load (ton)	Max. Billet Temp(°C)	Max. Mandrel Temp(°C)	Max. Chamber Temp(°C)
3	524.6	506.1	411.2	419.7
4.5	529.3	507.2	413.4	421.8
6	536.8	509.8	418.6	425.9

3.4 베어링 길이의 변화에 따른 압출하중

Fig. 10은 베어링 길이의 변화에 따른 실험과 유한요소해석의 최대 압출하중을 나타내었다. 초기 빌렛온도는 400°C, 튜브두께는 1.7mm로 고정시켰다. 베어링 길이가 증가할 수록 최대 압출하중이 점차적으로 증가함을 알 수 있다.

Table 6은 유한요소해석으로부터 얻은 베어링 길이에 대한 각각의 최대 하중, 금형온도 등을 나타내었다.

3.5 튜브 두께의 변화에 따른 압출하중

Fig. 11에서는 튜브두께가 1.5, 1.6, 1.7mm일 때 실험 및 유한요소해석을 통해 구한 최대 압출하중을 나타내었다. 압출비를 동일하게 유지하기 위해 튜브두께가 1.5mm일 때 제품의 내·외경은 각각 14.8, 17.8mm, 1.6mm일 때는 각각 13.8mm, 17mm, 1.7mm일 때는 각각 12.6, 16mm로 두었고, 초기 빌렛온도는 400°C, 베어링 길이는 4.5mm로 고정시켰다. 동일한 압출비 43에 대해 튜브두께가 다를 경우의 최대 압출하중은 거의 일정한 함을 알 수 있었다.

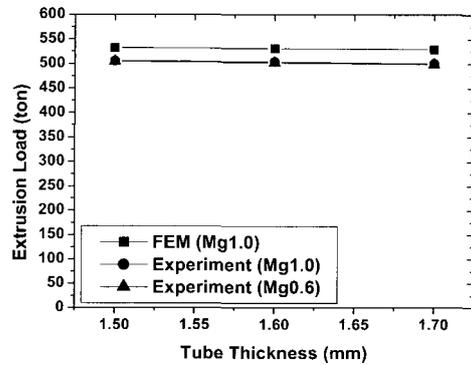


Fig. 11 Extrusion loads for tube thickness

Table 7은 유한요소해석으로부터 얻은 튜브두께에 대한 각각의 최대 하중, 온도 등을 나타내었다.

Table 7 Maximum extrusion loads when billet temperature is 400°C and bearing length is 4.5mm

Tube Thick. (mm)	Max. Load (ton)	Max. Billet Temp(°C)	Max. Mandrel Temp(°C)	Max. Chamber Temp(°C)
1.5	532.1	514.5	417.7	424.2
1.6	530.7	512.3	415.6	422.9
1.7	529.3	507.2	413.4	421.8

3.6 접합실 내의 재료유동

Fig. 12는 초기 빌렛온도 400°C, 베어링길이 4.5mm, 튜브두께 1.7mm에 대해 유한요소해석을 통해 얻어진 속도분포로부터 접합실 내에서 데드메탈의 형성모습을 개략적으로 나타낸 것이다. Fig. 13은 대칭면 A, B의 속도 분포를 유한요소해석을 통해서 나타낸 것이다. 대칭면 A는 나누어진 소재들끼리 접합이 발생하는 면이고, 대칭면 B는 4개의 포트홀이 위치한 곳이며 대칭면 A와 45°

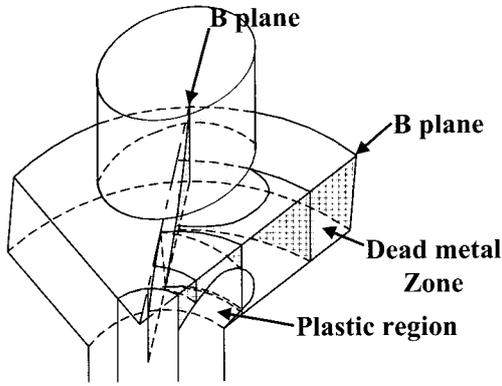


Fig. 12 Dead metal zone in the welding chamber

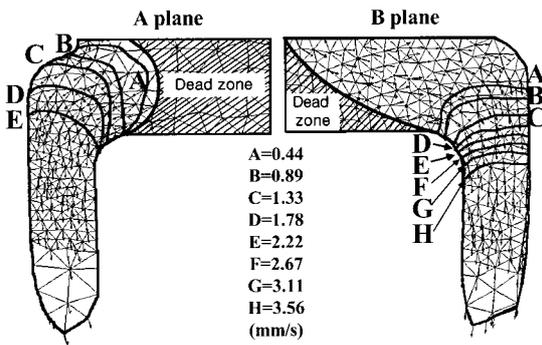


Fig. 13 Distribution of normalized velocities and flow line on plane A and B when billet temperature is 400°C, bearing length is 4.5mm and tube thickness is 1.7mm

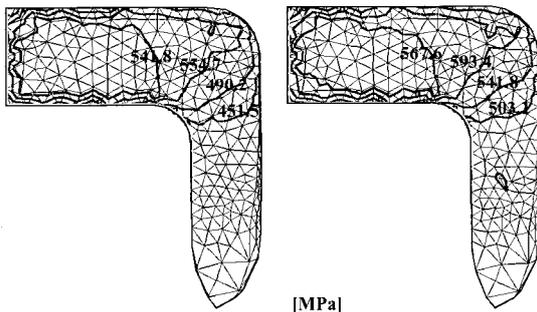


Fig. 14 Distribution of pressure on plane A when billet temperature is 400°C and 430°C, bearing length is 4.5mm and tube thickness is 1.7mm

각도를 이루고 있다. 대칭면 A는 베어링부근의 영역에서만 소성영역이 나타나 있고, 대칭면 B는 접합실 둘레의 모서리영역에서 데드메탈영역이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 소재가 접합되는 대칭면 A에서의 접합 압력분포를 나타내었다. 실제적으로 접합이 이루어질 때 베어링 근처의 협소한 영역에서 최대 압력이 발생함을 알 수 있다.

3.7 튜브의 표면상태

Table 8은 각각의 공정변수들에 대해서 튜브의 표면을 나타내고 있다. 온도가 높아질 수록 제품의 표면 상태는 더욱 나빠짐을 알 수 있었다. 초기 빌렛온도가 400°C일 때 표면은 광택이 나고 결함이 발생하지 않으나, 430, 460°C에서는 부분적으로 길이방향으로 줄무늬가 발생하였으며 표면상태가 나빠짐을 알 수 있었다⁽¹²⁾.

베어링 길이가 3mm일 때 길이방향으로 표면결함이 나타났으며, 4.5, 6mm일 때 양호한 표면을 얻을 수 있었다.

Table 8 Surface states of extruded products for each condition

Tube Thick.(mm)	Initial billet Temp.(°C)	Bearing Length(mm)	Surface states	Surface roughness
1.5	400	4.5		0.315
1.7	400	4.5		0.313
1.7	400	4.5		0.313
1.7	430	4.5		0.502
1.7	460	4.5		0.478
1.7	400	3		0.453
1.7	400	4.5		0.313
1.7	400	6		0.307

튜브두께는 큰 영향을 미치지 않았으며, 초기 빌렛온도가 400°C이고, 베어링 길이가 6mm인 경우와 같이 초기 빌렛온도가 낮고 제품치수 조정역할을 하는 베어링부 길이가 길수록 양호한 표면을 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 비정상상태 포트홀 다이 압출에 대한 실험 및 유한요소해석을 수행하였다. 압출하중 및 표면

상태에 영향을 미치는 초기 빌렛온도, 베어링길이, 튜브 두께와 압출비 등이 각각 조사되었으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 스트로크에 따른 압출하중은 분할단계에서는 단면적의 감소와 더불어 급격히 상승하고, 접합단계에서는 접합실로 유입된 빌렛끼리 서로 만나서 맨드렐에 접촉하게 되면 하중은 다시 급격히 상승하고, 성형단계에서는 베어링 출구로 빠져 나오기 시작하면서 스트로크가 증가함에 따라 마찰면적이 감소하게 되어 서서히 감소하게 되면서 압출은 정상상태에 도달하게 된다.

(2) 최대압출하중은 초기빌렛온도가 증가할 수록 감소하고 베어링길이 3~6mm 사이에서는 커다란 차이가 나타나지 않았다. Mg함유량이 1.0일 때가 0.6wt%보다 더 큰 하중을 나타냈다.

(3) 초기 빌렛온도는 제품의 표면상태에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 초기 빌렛온도가 낮을 수록 양호한 표면을 얻을 수 있었고, 베어링길이 6mm일 때 표면이 가장 우수하였다.

(4) 접합이 발생하는 면에서는 베어링부의 출구부근 영역에서만 소성변형이 발생하였으며, 포트홀에 위치한 접합면과 45°의 각을 이루는 면은 접합실 둘레의 모서리 부근에서 데드메탈영역이 나타남을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터의 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) H. Yamaguchi, M. Isogai, S. Murakami, 1991, "Development and application of aluminum extrusion for automotive parts, mainly bumper reinforcement," *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 41, No. 2, pp.126~135.
- (2) T. Murakami, J. Xie, H. Takahashi, 1990, "Multi-Billet Extrusion and Load in Forming of Circular Tube from Four Billets," *Journal of the JSTP*, Vol. 31, No. 351, pp.495~501.
- (3) J. Xie, T. Murakami, H. Takahashi, 1990, "Metal Flow in the Forming of Hollow Cylinder by Four-Billet Extrusion," *Journal of the JSPT*, Vol. 31, No. 351, pp. 502~508.
- (4) S. Murakami, M. Isogai, T. Inagaki, N. Takatsuji, M. Tokizawa, K. Murotani, 1997, "Simulation of Rectangular Extruded Pipes by Prothole Die," *Journal of the JSTP*, Vol. 38, No. 435, pp.79~83.
- (5) Y. Yamashita, Y. T. Kim, T. Murakami, K. Ikeda, 2000, "Metal Flow in Porthole Die Extrusion," *Journal of the JSTP*, Vol. 41, No. 476, pp.29~33.
- (6) K. Park, Y.K. Lee, D.Y. Yang, D.H. Lee, 2000, "Three-Dimensional Finite Element Analysis for Hollow Section Extrusion of the Underframe of a Railroad Vehicle," *J. KSTP*, Vol. 9, No. 4 pp.362~371.
- (7) 조종래, 이성열, 최일동, 2000, "콘텐서 튜브용 알루미늄 소재와 압출공정 개발," 제3회 압출 및 인발 심포지엄, 한국소성가공학회, pp.72~81.
- (8) J. Xie, T. Murakami, H. Takahashi, 1990, "Influence of Number and Location of Container Holes in Forming of Circular Tube by Multi-Billet Extrusion", *Journal of the JSTP*, Vol. 31, No. 352, pp.625~631.
- (9) M. Kiuchi, M. Hoshino, 1991, "Numerical Simulation of Forward Extrusion of Pipes through Bridge Die," *Journal of the JSTP*, Vol. 32, No. 361, pp. 174~181.
- (10) S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan, 1989, "Metal Forming and The Finite-Element Method." Oxford University Press.
- (11) 함현욱, 김병민, 조훈, 조형호, 1999, "Mg, Zn, Si 성분이 7xxx계 알루미늄 합금의 압출성에 미치는 영향," *한국정밀공학회지*, 제16권, 제11호, pp.148~157.
- (12) T. Sheppard, 1989, "Special Feature of Process Defects in Aluminum alloy Extrusions", *Proceedings of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar*, Vol. 2, pp.227~233.