

포트홀 다이 압출방식에 의한 Al7003 튜브의 접합강도예측

조형호*, 이상곤**, 이선봉**, 김병민***

Prediction of Welding Pressure in the Non Steady State Porthole Die Extrusion of Al7003 Tubes

Hyung Ho Jo*, Sang Gon Lee**, Seon Bong Lee**, Byung Min Kim***

ABSTRACT

Porthole die extrusion is profitable to manufacture long tube with hollow section. The material through portholes is gathered within chamber and welded under high pressure. This weldability which classifies the quality of tube product is affected by several variables and die shape. But, porthole die extrusion has been executed on the experience of experts due to the complicated die assembly and complexity of metal flow. Analytic approaches that are useful in profitable die design and in the improvement of productivity are inevitably demanded. Therefore, the objective of this study is respectively to analyze the behavior of metal flow and to determine welding pressure of hot extrusion product according to the various billet temperature, bearing length and tube thickness by FE analysis and its results are compared with tube expanding tests.

Key Words : Hot extrusion(열간 압출), Porthole die(포트홀 다이), Welding pressure(접합압력), Tube expanding test(튜브확관시험), Welding line (접합선)

1. 서론

최근에는 자동차 및 항공산업의 발달로 인해 경량화 추세가 증가하고 있는 실정이다. 자동차 중량 감소화로 인한 연비향상을 위해 다양한 경량 소재를 사용한 부품이 넓게 연구되고 있다⁽¹⁾. 항공기 및 자동차 부품 경량화의 한 방법으로 중공단면(Hollow section) 열간 압출공정을 이용한 Door impact beam, Seat side rail, Hood support 등과 같은 고력·고압출성 압출재의 생산이 크게 요구되고 있

다. 브릿지(brigde), 스파이더(spider), 포트홀(porthole) 다이를 가진 압출과정은 하나의 빌렛을 가지고 파이프나 중공품을 생산하기 위해 알루미늄 산업에서 널리 쓰이고 있다. 종래의 스템을 이용한 파이프생산에서는 맨드렐의 길이에 따라 파이프의 길이가 제한되지만 포트홀 다이 압출법을 이용하게 되면 맨드렐의 길이에 상관없이 길이가 긴 제품을 연속적으로 생산할 수 있게 된다⁽²⁾. 그러나 중공재 압출성형가공에 대한 연구보고 수가 적고, 소재의 변형거동과 다이 설계에 필요한 데이터가 적은 것

접수 2001년 3월 9일

* 한국생산기술연구원 주조공정개발팀

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

*** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

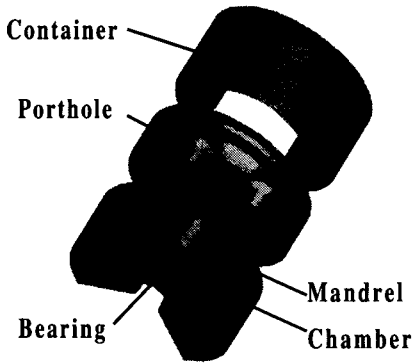


Fig. 1 Split tool assembly used in porthole die extrusion

이 현재의 실정이다. 금형구조와 재료유동의 복잡성 때문에 포트홀 다이 설계는 실험이나 경험자에 의해 주로 실행되어져 왔다. 포트홀 다이 설계에 있어서 가장 중요한 점은 챔버 내에서 소재가 접합될 때 발생하는 접합면의 압력을 최대화하여 우수한 접합강도를 가진 튜브를 생산할 수 있도록 하는 것이다.

접합압력(welding pressure)은 빌렛온도, 압출비, 압출속도, 챔버형상, 베어링 길이, 튜브두께 등 많은 성형인자들에 의해 영향을 받지만 이러한 인자와 접합압력 사이의 상호 관계에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다⁽³⁻⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 Mg함유량이 0.6과 1.0%의 두가지 Al7003합금 빌렛에 대하여 접합압력에 영향을 미치는 빌렛온도, 베어링 길이와 동일한 압출비를 가지는 튜브두께에 따른 챔버내에서의 접합강도를 유한요소해석을 통해서 계산하였다. 해석결과를 검증하기 위해 포트홀 다이 압출 실험을 수행하였고, 재료의 물성치를 파악하기 위해 열간압축 시험을 수행하였으며, 접합강도를 상대평가하기 위해 펀치확관시험(punch expanding test)을 수행하였다.

2. 압출공정의 유한요소해석

2.1 포트홀 다이 압출의 금속유동

Fig. 1은 컨테이너, 포트홀 다이, 맨드렐 및 챔버로 구성되어 있는 다이 구조를 보여준다. Fig. 2는 포트홀로 유입된 재료가 베어링부에 도달한 후 제

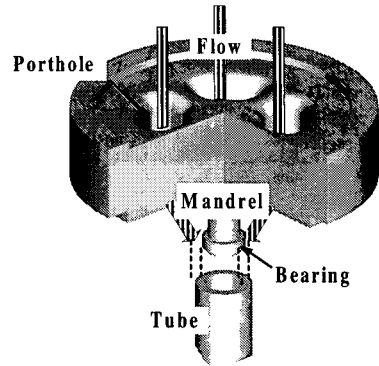


Fig. 2 Schematic diagram of metal flow in the porthole die

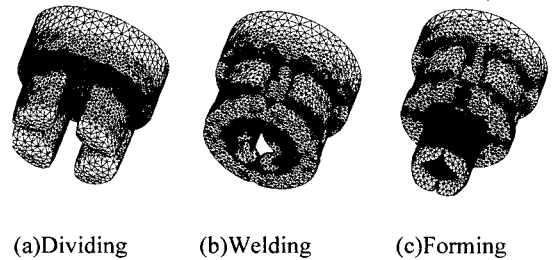


Fig. 3 Extrusion stages in porthole die

품이 성형되는 3차원 형상을 나타낸다.

Fig. 3은 램이 진전됨에 따라 튜브가 성형되는 포트홀 압출 과정을 유한요소해석을 통해 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 빌렛이 포트홀에서 네 부분으로 분리되는 분할단계(dividing stage)이고, Fig. 3(b)는 분할된 빌렛이 챔버 바닥에 도달한 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. 위와 같은 3단계의 성형절차를 통해 금형 내에 빌렛이 충전되고 튜브의 성형이 이루어지게 된다.

2.2 포트홀 다이 압출 공정의 유한요소모델

접합면의 압력은 다양한 인자들에 의해 복합적으로 영향을 받지만 본 연구에서는 주요인자인 빌렛온도, 베어링길이와 튜브두께 등의 변화가 압출하중, 접합면의 압력분포 및 재료의 유동에 미치는 영향을 알아보았다. 개량된 Al7003합금을 사용한

Table 1 Conditions of the extrusion process

Conditions	Values
Billet Diameter (mm)	74.0
Bridge Height (mm)	38.5
Chamber Height (mm)	20.0
Product Thickness (mm)	1.5, 1.7 at the same extrusion ratio 43
Extrusion Ratio	57
Extrusion Speed (mm/s)	1.0
Billet Temperature(°C)	400, 430, 460
Container/Die Temperature (°C)	400
Friction Coefficient	0.7

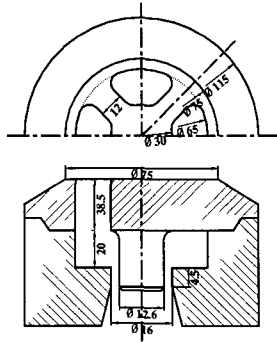


Fig. 4 Die geometry for process analysis

포트홀 다이 압출은 컨테이너 직경 75mm를 가진 직각다이를 통해 수행되었다.

유한요소해석과 실험을 위해 빌렛온도는 400, 430, 460°C, 베어링길이는 3, 4.5, 6mm, 튜브두께는 동일한 압출비 57에 대해서 1.5, 1.7mm를 각각 선택하였다. Table 1은 해석과 실험에 사용된 공정변수이다. DEFORM-3D⁽⁹⁾ 상용코드를 사용하여 해석을 수행하였으며, 컨테이너와 챔버는 강체로 두었으며, 대칭성을 고려해 1/8단면 해석을 수행하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 금형의 기하학적 형상을 나타낸 것이다.

3. 접합압력의 결정

Fig. 5는 챔버내에서 소재가 접합이 되어질 때 발생하는 평균유동응력(Y)에 대한 무차원 수직압력분포(P_{θ}), 즉 접합압력을 유한요소해석을 통해

서 나타낸 것이다. Fig 5(a), (b), (c)로부터 튜브 두께 1.7mm, 베어링 길이 4.5mm에 대해 초기 빌렛 온도를 400, 430 및 460°C로 하였을 경우로써, 초기 빌렛온도가 높을 수록 접합압력이 증가함을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 초기 빌렛온도가 400°C, 베어링 길이 6mm인 경우로써, 베어링 길이가 길수록 접합압력의 증가가 더욱 현저함을 나타내고 있다. 포트홀을 통해 나누어진 소재들은 접합실에서 서로 만나 높은 압력으로 접합이 이루어지고 베어링 부로 빠져 나오게 된다. 실제적으로 접합이 이루어 질 때 베어링 근처의 협소한 영역에서 최대 압력이 발생함을 알 수 있다. 공정조건에 따른 해석을 통해서 구한 최대접합압력을 근거로 편치확관 시험을 통하여 그 접합강도를 상대평가하였다.

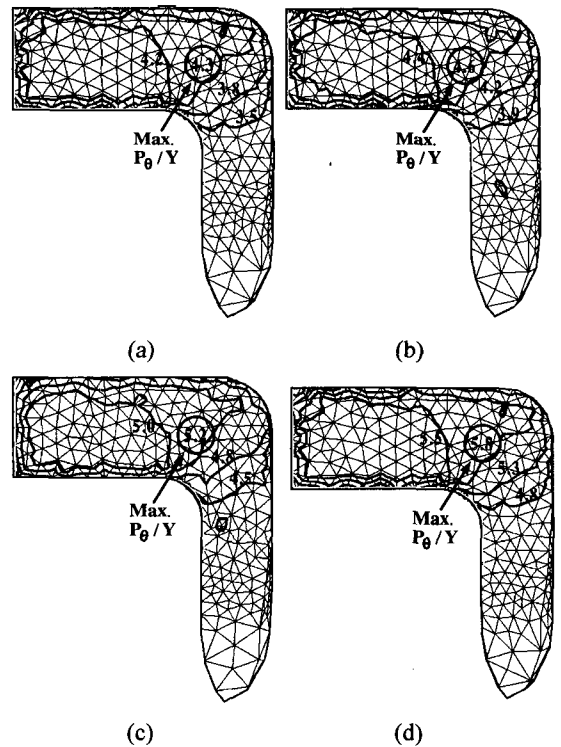


Fig. 5 Distribution of normal pressure in the welding plane

- (a)~(c) When billet temperature is respectively 400°C, 430°C, 460°C, bearing length is 4.5mm and tube thickness is 1.7mm
- (d) When billet temperature is 400°C, bearing length is 6mm and tube thickness is 1.7mm

4. 실험 및 해석결과

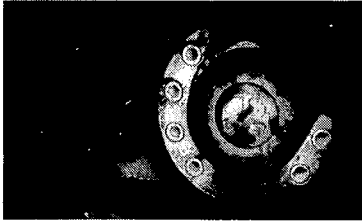


Fig. 6 Experimental apparatus for porthole extrusion

Table 2 Composition of improved Al7003 alloy[wt%]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Al
Improved Al7003	0.3	0.1	0.15	0.2	0.6	0.1	6.0	0.15	Rem.
					1.0				

Table 3 Maximum extrusion load according to each process variables(Mg1.0wt%)

Billet Temp. (°C)	Bearing Length (mm)	Tube Thick. (mm)	Max. Extrusion Load(ton)		
			Experiment		FE
			Mg0.6	Mg1.0	Mg1.0
400	4.5	1.7	510	510	530
430	4.5	1.7	500	506	520
460	4.5	1.7	429	457	480
400	3	1.7	507	508	512
400	4.5	1.7	510	511	515
400	6	1.7	511	513	516
400	4.5	1.5	500	502	510
400	4.5	1.7	500	501	508

Table 2는 개량된 Al7003합금조성을 나타낸 것이다. 여러 가지 온도와 변형률 속도에 대한 유동 응력을 얻기 위해 열간압축시험을 수행하였다. 유압식 25ton MTS(material testing system)를 이용하였으며 압축시험은 직경 10mm, 높이 5mm로 가공하였다. 고온 압축중에 발생하는 산화를 방지하기 위하여 B-N 코팅처리를 하였다.

Fig. 6은 압출실험에 사용된 포트홀 다이의 형상이다. 각각의 공정에 대해서 램속도는 1.0mm/s이

고 Mg함유량이 0.6과 1.0wt%의 개량된 Al7003합금이 사용되었다. 윤활제는 접합이 이루어질 때 방해작용을 할 수 있기 때문에 무윤활로 압출을 수행하였다.

포트홀의 길이는 38.5mm이며, 분할된 소재가 채워지는 챔버의 높이는 20mm이다. 챔버의 직경은 포트홀 외접원의 직경 65mm로 같게 두고 실험을 수행하였다. 다이 출구의 형상은 튜브의 두께가 1.5mm일 때 내경은 14.8mm, 외경은 17.8mm이고, 두께가 1.7mm일 때는 각각 12.6, 16mm로 설정하였다.

4.1 공정변수의 변화에 따른 압출하중

유한요소해석은 Mg1.0wt%에 대해서 해석을 수행하였고, 압출실험은 Mg0.6과 1.0wt%에 대해서 각각을 수행하였다.

Table 3에 각각의 공정조건에 대한 최대 압출하중을 나타내었다. 압출하중은 온도가 증가할 수록 점차 감소하는 경향을 나타내었고, 베어링길이가 증가할 수록 최대 압출하중이 약간 증가함을 알 수 있었다. 압출비를 동일하게 두고 튜브의 두께를 변화시킨 경우에는 압출하중의 차이가 거의 나타나지 않았다.

4.2 편치확관시험과 유한요소해석비교

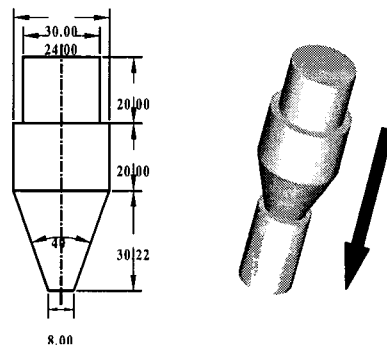


Fig. 7 Expanding test for extruded tubes

Fig. 7은 실험에 사용된 편치와 편치 압입후의 시편의 형상을 나타낸다. 원추형편치를 시험시편에 크랙이 발생할 때까지 압입하여 튜브의 접합 상태를 조사하였다. 튜브의 접합성은 확관률 $\phi = d_{max}/d_0$ 로 평가하였다. 여기서 d_{max} 는 크랙이 발생

하였을 때 시편의 외경이고 d_0 는 튜브의 초기 외경이다^(10~11).

Table 4에는 베어링 부근에서 접합이 이루어질 때 최대 접합압력(P_0)을 평균유동응력(Y)으로 나누어 무차원화 시킨 값과 실험에서 얻어진 확관률을 나타내었다.

Table 4 Appearance of tubes after expanding test

Tube Thick. (mm)	Billet Temp. (°C)	Bearing Length (mm)	Extruded specimen		Expanding ratio (ψ)		P_0/Y
			Mg0.6	Mg1.0	0.6	1.0	
1.5	400	4.5	Fig.8(a)	(b)	1.062	1.022	4.5
1.7	400	4.5	(c)	(d)	1.056	1.018	4.3
1.7	430	4.5	(e)	(f)	1.069	1.025	4.6
1.7	460	4.5	(g)	(h)	1.075	1.050	5.2
1.7	400	3	(i)	(j)	1.019	1.019	3.5
1.7	400	6	(k)	(l)	1.075	1.050	5.8

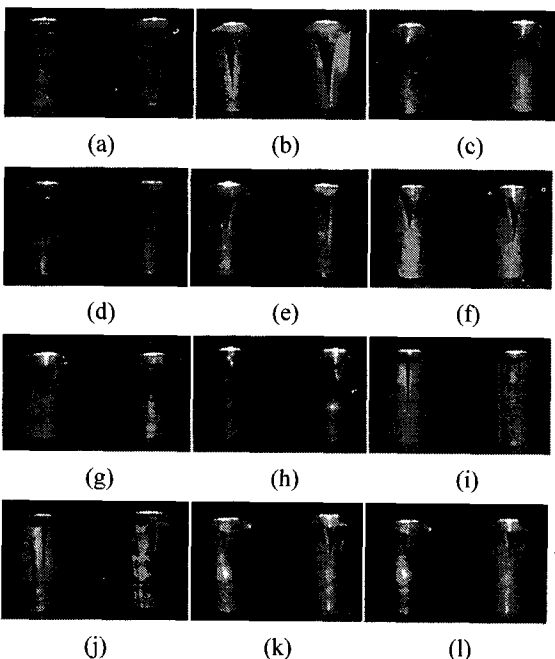


Fig. 8 Extruded tubes by expanding test

Table 4에서 보듯이 빌렛온도가 증가할 수록

확관률이 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 베어링 길이가 3mm일 때는 상대적으로 매우 낮은 확관율을 나타내었는데 이러한 현상은 접합이 되고 난 후 베어링부를 빠져 나올 때 접합부가 안정화가 되기도 전에 베어링 끝단부를 빠져 나와 제품이 성형되기 때문이라고 예상할 수 있다. 튜브두께에 따라서는 동일한 압출비를 가지고 있기 때문에 확관율은 커다란 차이를 나타내지 않았다.

Mg함유량이 적을 수록 소재의 취성이 감소하기 때문에 확관율이 약간 크게 나타났다.

마찬가지로 유한요소해석으로부터 구한 접합면의 접합압력도 확관율과 같은 경향이 나타남을 알 수 있었다. Fig. 8은 펀치확관시험을 통해 얻어진 확관된 튜브를 나타낸 것이다. 이와 같은 사실을 고려해 볼 때 우수한 접합강도를 가진 튜브를 생산하기 위해서는 확관율과 유한요소해석으로부터 구한 접합압력을 통한 적절한 공정변수의 선택을 할 수 있다⁽¹²⁾.

5. 접합선의 관찰결과

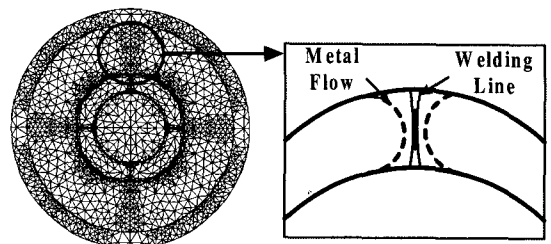


Fig. 9 Observed part for extruded tubes



Fig. 10 Formation of welding line in transverse view of extruded tube

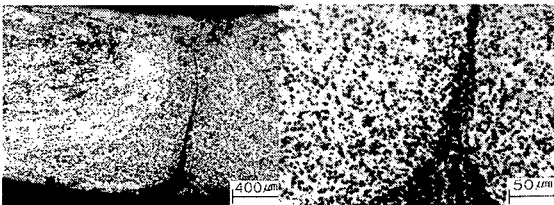
접합되어진 부분의 마이크로 조직을 관찰하여 접합선(welding line) 부근의 재료의 유동을 관찰하였다. Fig. 9은 압출된 제품을 절단하여 미세조직을

관찰한 부위를 나타낸 것이다.

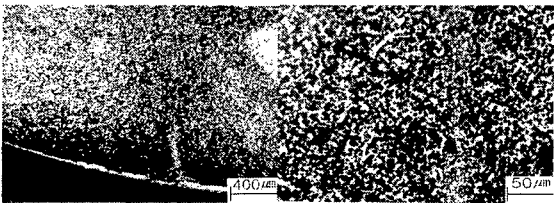
Fig. 10은 압출재의 횡방향 단면에 나타난 접합선을 관찰한 것이다. 원의 중심에서 접합선으로 반지름만큼 선을 그은 후 두선이 이루는 각도를 측정하였다. 공정변수의 변화에 따른 접합선의 형성각은 변하지 않았고, 90° 마다 형성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 11(a)는 접합선의 형성이 뚜렷하게 나타나는 경우이고, (b)는 접합선이 거의 나타나지 않은 경우이다. 베어링 길이가 길 수록 접합선의 형성이 짧아져 접합성이 양호해짐을 알 수 있다.

베어링 길이가 길 수록 접합강도의 증가에 더욱 효과적이고 접합선과 같은 유동결합의 발생 가능성이 줄어들음을 알 수 있었다.



(a) When billet temperature is 430°C, bearing length is 3mm and tube thickness is 1.7mm



(b) When billet temperature is 400°C, bearing length is 6mm and tube thickness is 1.7mm

Fig. 11 Micro-structure of welding line

- (a) In case that welding line is appeared
- (b) In case that welding line is not appeared

6. 결론

본 논문에서는 튜브 생산에 있어서 공정변수(빌렛온도, 베어링길이, 튜브두께) 등에 따른 압출하중 및 재료의 유동을 조사하기 위해 실제 현장에서 쓰이는 포트홀 다이를 바탕으로 실험을 수행하였고, 실험과 같은 조건으로 비정상상태 유한요소해석을

수행하였으며, 압출된 튜브에 대한 접합강도를 예측하기 위해 펀치확관실험을 수행하여 각각의 공정변수들에 대한 최적의 조건을 구하였다. 튜브 접합선의 미세조직을 관찰하였다. 이상의 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소해석에 의한 접합면의 접합압력은 빌렛온도 460°C, 베어링길이가 6mm에서 가장 크게 나타났다. 최대 접합압력은 대략적으로 평균유동응력의 3.5~5.8배였다.

(2) 접합압력은 빌렛온도가 높을수록 점차적으로 증가하였으며, 베어링길이가 3mm일 때, 즉 베어링 길이가 작을 수록 가장 낮은 확관율을 가짐을 알 수 있었다.

(3) 빌렛온도와 튜브두께의 변화는 접합압력에 크게 영향을 미치지 못하였고, 베어링길이의 증가가 접합강도의 향상에 큰 영향을 주었다.

(4) 접합된 부분의 미세조직을 관찰해 본 결과 빌렛온도가 높아질 수록 접합선의 두께가 약간씩 증가하였고, 특히 베어링길이가 길 수록 접합선이 나타나지 않을 정도로 완전한 접합이 이루어 졌음을 알 수 있었다.

(5) 유한요소해석을 통해서 구한 접합면의 수직압력분포와 펀치확관실험을 통한 확관율을 상대평가함으로써 우수한 접합강도를 가진 튜브를 생산할 수 있는 공정변수를 찾아 낼 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. K.R. Brown, M.S. Venie, R.A. Woods, "The Increasing Use of Aluminum in Automotive Applications," JOM, Vol. 47, Issue 7, pp. 20-23, 1995.
2. S. Kalpakjian, "Manufacturing Processes for Engineering Materials," Illinois Institute of Technology, Second Edition, pp. 374-376, 1991.
3. S. Murakami, M. Isogai, T. Inagaki, N. Takatsuji, M. Tokizawa, K. Murotani, "Simulation of

- Rectangular Extruded Pipes by porthole Die," Journal of the JSTP, Vol. 38, No. 436, pp. 79-83, 1997.
4. T. Murakami, J. Xie, H. Takahashi, "Multi-Billet Extrusion and Load in Forming of Circular Tube from Four Billets," Journal of the JSTP, Vol. 31, No. 351, pp. 495-501, 1990.
 5. N. Takatsuji, M. Tokizawa, K. Murotani, K. Matsuki, T. Yamabayashi, "Effects of Die Angle on Pressure Distribution at Internal Surface of Die Block and Extrudability of Billet in Hot Extrusion," Journal of the JSTP, Vol. 29, No. 325, pp. 159-165, 1988.
 6. J. Xie, T. Murakami, H. Takahashi, "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, 1990.
 7. Y. T. Kim, K. Ikeda, T. Murakami, "Measurement of Pressure Distribution on Dies in Porthole Die Extrusion," Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, pp. 296-301, 1999.
 8. K. Park, Y.K. Lee, D.Y. Yang, D.H. Lee "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, 2000.
 9. "DEFORMTM-3D," SFTC, 1995.
 10. T. Murakami, J. Xie, H. Takahashi, "Forming of A7475 and A5056 Tubes by Hot Multi-Billets Extrusion," Journal of the JSTP, Vol. 33, No. 380, pp. 1045-1050, 1992.
 11. K. Ikeda, J.X. Xie, T. Murakami, K. Kakaku, H. Takahashi, "Welding state of 7475 aluminum alloy pipes formed by hot multi-billet extrusion method," Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 43, No. 2, pp 76-81, 1993.
 12. M. Kiuchi, M. Hoshino, "Numerical Simulation of Forward Extrusion of Tubes through Bridge Die," Journal of the JSTP, Vol. 32, No. 361, pp. 174-181, 1991.