

접합실 바닥형상이 컨덴서 튜브 직접압출 공정 및 금형탄성변형에 미치는 영향

이정민*, 김병민#, 정영득**, 조훈***, 조형호***

The Effect of Chamber Bottom Shape on Die Elastic Deformation and Process in Condenser Tube Extrusion

Jung Min Lee*, Byung Min Kim #, Yeong Deug Jeong **, Hoon Jo*** and Hyung Ho Jo***

ABSTRACT

In 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. However, there have been few studies about condenser tube extruded by porthole die. Original metal flow of condenser tube by porthole die extrusion is similar to hollow cylinder extrusion but the estimation of metal flow for extrusion parameters is different. For example, variation of chamber length in hollow extrusion only affects the welding pressure, however, the welding chamber length in condenser tube extrusion influences to the welding pressure as well as the deflection of mandrel. This study was designed to evaluate metal flow, welding pressure, extrusion load, tendency of mandrel deflection according to angular variation in the bottom of chamber in porthole die. Estimation was carried out using finite element method in as non-steady state. Analytical results can provide useful information the optimal design of porthole die.

Key Words : Condenser Tube(컨덴서 튜브), Non-steady state analysis (비정상상태 해석), Porthole die extrusion (포트홀 다이 압출), Stress analysis (응력해석), Welding Chamber length (접합실 길이)

1. 서론

국내에서 냉방기기용 컨덴서 튜브는 대부분 컨폼압출(conform extrusion)에 의해 생산되고 있으나, 이는 직접압출(direct extrusion)에 비해 단위시간당 생산성이 떨어지고 초기 설비투자비가 많이 드는

단점을 가지고 있다. 더욱이 일부 자동차용 컨덴서 튜브의 국산화와 향후 막대한 시장으로 예상되는 가전용 냉방기기 시장에 적절히 대처하기 위해 고생산성, 고정도화 및 리드타임 단축을 실현할 수 있는 성형기술이 필요하다¹. 그러므로 기존의 컨폼압출보다 원가적, 품질적인 측면에서 경쟁력 있고

접수 2002년 12월 3일
* 부산대학교 정밀기계과 대학원
교신저자, 부산대학교 기계공학부
Email bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3074
** 부경대학교 기계공학부
*** 한국생산기술연구원

저가, 고품질의 튜브를 생산할 수 있는 포트홀 다이를 이용한 직접압출로의 전환이 필수적이다.

지금까지 포트홀 다이 압출 공정에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만 대부분의 연구들은 단순단면인 중공제² 및 사각 중공제 제품에 대한 연구들이다. 그러나 컨덴서 튜브 직접압출에서, 기본적인 소재 유동양상은 중공제 튜브 직접압출과 유사하지만, 최종 다이 출구 부 형상이 다르므로써, 각각의 압출변수들에 대한 영향 평가는 다르게 나타난다.

한 예로 접합부 접합압력에 미치는 변수의 경우, 중공 튜브 직접압출에서는 접합압력에 미치는 영향만을 고려하여도 무방하다. 하지만 컨덴서 튜브 직접압출에서는 접합부 접합압력이 커질 경우, 맨드릴 치형이 변형되어 미성형이 발생할 수 있고, 맨드릴 파손을 야기 시킬 수 있기 때문에 접합압력과 함께 맨드릴 형상변화에 대한 연구는 매우 중요하다.

따라서 본 연구는 포트홀 다이를 이용한 컨덴서 튜브 직접압출에서의 접합실 형상 변화에 따른 포트홀 다이 각 부(포트홀, 접합실 등)의 소재 유동양상을 파악하고, 압출하중 및 접합부의 접합압력, 금형의 탄성변형량을 평가하였다.

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 열교환기 핵심부품이다. 본 연구에서의 컨덴서 튜브는 5개의 홀을 가지며 벽 두께를 일괄적으로 모두 1.8mm로 하였다. 또한 단면 형상은 좌우 상하 모두 대칭으로 설계하였다.



Fig. 1 Model of condenser tube

Fig. 2는 컨덴서 튜브 직접압출 공정해석을 위한 평다이(Flat Die)와 경사다이(Conical Die) 다이의 구조를 나타낸 것이다. 형상은 경사다이의 접합실 바닥과 다이 베어링 사이만을 10°로 유지하였고 나머지는 평, 경사다이 모두 동일하게 설계하였다.

Fig. 3은 포트홀 다이의 3D 모델링을 나타낸 것이다. 강도해석 시 컨테이너와 포트 내부의 소재유동에 대한 영향을 고려하여 컨테이너, 포트, 접합실, 다이 베어링, 베커, 맨드릴을 모두 일체형³으로 하였고 다이 3D모델링은 I-deas7.0을 이용하였다.

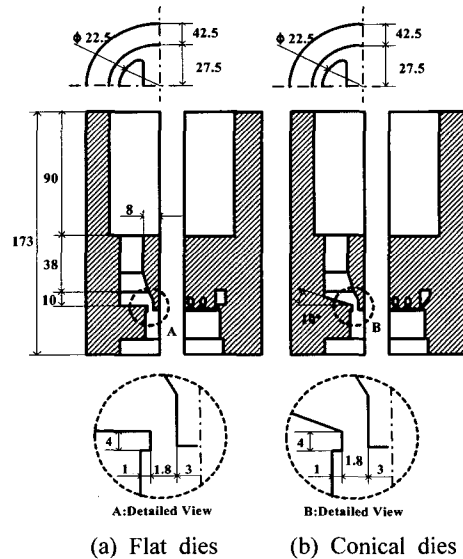


Fig. 2 Schematic illustration used in process analysis

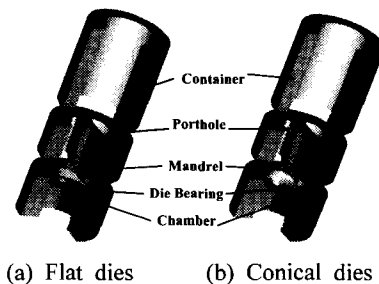


Fig. 3 Structure of porthole dies for condenser tube

2.2 유한요소해석 조건 및 설정

본 연구의 성형해석을 위해 강소성유한요소해석 코드인 DEFORM 3D⁴를 사용하였다. 해석에 사용된 빌렛은 A11050을 채택하였고, 컨테이너, 챔버와 펀치는 열간 공구강인 SKD 61을 채택하였다.

다이의 초기 온도는 420°C로 설정하였고, 빌렛의 초기 온도는 450~510°C로 설정하였다. 펀치속도는 포트홀 다이 제품 성형부에서 나오는 소재의 속도가 800m/s를 유지하기 위해 소재의 단위시간당 소

재량을 계산하여 정하였다. 빌렛과 펀치, 빌렛과 다이 접촉면 사이의 마찰상수(m)는 일반적인 무윤활 알루미늄 압출공정에서 적용하는 0.6⁵으로 가정하였다. 해석모델은 컨덴서 튜브 단면의 대칭성을 고려하여 1/4 모델로 하고, Al소재는 열연성 모델로, 그 외 다이 및 펀치 등은 강체로 정의하였다.

Table 1에 나타난 해석조건은 평, 경사다이 모두 동일하게 적용하였다.

Table 1 Extrusion condition for condenser tube

Extrusion conditions		Value
Billet material		A11050
Tools material		SKD61
Initial temperature of billet (°C)		465
Initial temperature of tool (°C)		420
Extrusion velocity(mm/s)		833(exit velocity)
Reduction in area(%)	Bridge	75.36
	Exit	93.47
Dimension of billet(mm)		φ 71 × h200
Temperature of environment (°C)		20
Friction factor(m)		0.6

3. 유한 요소 해석 결과

3.1 하중 - 스트로크 곡선

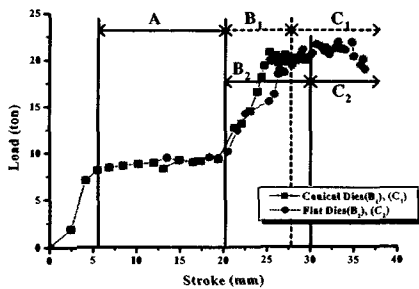
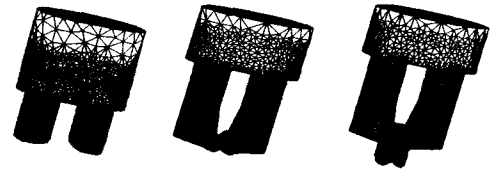


Fig. 4 Load - Stroke curve

Fig. 4는 평, 경사다이의 하중 스트로크 곡선을 나타낸 것이다. 최대하중은 평다이가 21.8 ton으로 경사다이의 20.1 ton 보다 약간 크게 나타났다. 이는 이론적으로 빌렛과 다이의 마찰보다 빌렛의 내부 전단마찰이 크다. 그러므로 평다이가 경사다이보다 접합실 내 데드 메탈 영역이 크기 때문에 내부 전단변형 영역이 커서 마찰 에너지가 훨씬 높게 나타난다⁶. 그러나 접합실 내 소성변형 영역이 경사

다이가 크므로 최대 하중은 큰 차이가 없다. 하중곡선은 경사다이가 평다이보다 빌렛이 접합실 바닥에 먼저 닿기 때문에 접합단계가 약간 빨리 진행된 다음 정상상태로 안정된다.

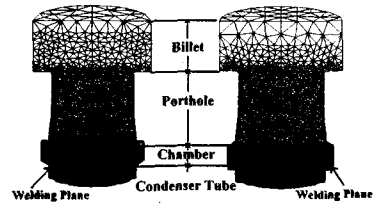


(A) Dividing (B₁) Welding (B₂) Forming (a) Flat dies



(A) Dividing (B₂) Welding (C₂) Forming (b) Conical dies

Fig. 5 Extrusion stages of porthole die



(a) Flat dies (b) Conical dies

Fig. 6 Flow pattern

Fig. 5는 Fig. 4의 분할(A)·접합(B₁), (B₂)·성형(C₁), (C₂) 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)(b)-(A)), 분할된 소재가 다시 접합실로 유입되어, 소재유동을 구속하여 서로 합쳐지는 접합단계(Fig. 5(a)(b)-(B₁), (B₂)), 그리고 맨드릴을 통과, 다이 베어링 부로 빠져 나와 최종 형상을 성형하는 성형단계(Fig. 5(a)(b)-(C₁), (C₂))로 구분한다. 이후 하중은 정상상태로 접어들어 조금씩 완만하게 감소한다. 이와 같은 3단계⁷를 거쳐 최

종제품인 다공 단면의 컨덴서 튜브가 성형되어진다. Fig. 6은 평, 경사다이에서 빌렛이 최종 컨덴서 튜브를 성형하는 과정의 변형도를 나타낸 것이다.

3.2 접합압력

Fig. 7(a),(b)는 Fig. 6의 접합단계에서 평다이 및 경사다이 접합면의 수직압력 분포와 속도분포를 나타낸 것이다. 유한요소해석에서는 소재의 수직압력이 소재의 항복강도 이상이면 양호한 접합압력을 가지는 것으로 판단한다⁸.

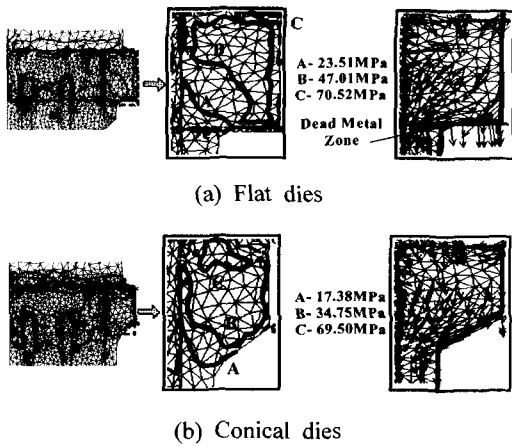


Fig. 7 Normal Pressure and nodal velocity at the welding plane

접합압력은 맨드릴 양 끝 단에서 평다이가 23~47MPa, 경사다이가 17~34MPa으로 평다이가 더 높게 나타났다. Fig. 7의 속도분포에서 알 수 있듯이, 경사다이는 접합실 바닥의 경사에 의해 다이 베어링을 빠져 나오는 빌렛 유동이 다소 완만하고 대부분 압축변형을 받는다. 그러나 평다이의 경우, 맨드릴 양 끝 접합면에서 약간의 데드 메탈 영역⁹이 형성시키며 다이 베어링을 빠져 나온다. 이러한 데드 메탈 형성은 빌렛의 유동이 맨드릴 양 끝 접합면에서 먼저 접촉한 후 접합압력에 의해 다이 베어링으로 밀려 나오는 것을 의미한다. 이에 반해 경사다이는 빌렛이 맨드릴 양끝에 먼저 접촉되기는 하지만 접촉 후 데드 메탈에 의한 전단영역 없이 압축변형으로 바로 압출되기 때문에 상대적으로 접합압력은 더 낮게 나타난다. 또한 평다이가 경사다이보다 맨드릴 양 끝 접합면에 닿는 빌렛의 양이 많기 때문에 더 높은 접합압력을 나타낸다¹⁰.

접합압력의 분포는 접합면 중앙부에서 가장 높게 나타나고 다이 베어링 부로 갈수록 작아진다. 실제 접합되는 부분은 다이 베어링으로 빠져 나오기 직전이지만 접합면 중앙부에 접합력이 높을수록 다이 베어링부 접합력이 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 맨드릴 양 끝 접합력이 높아지면 맨드릴 양 끝에 가하는 압력이 높아지므로 적절한 접합력의 선택이 요구된다.

4. 접합단계에서의 소재 충전 과정

Fig. 8은 압출방향으로 펀치 스트로크에 따른 맨드릴 내 소재의 충전과정을 나타낸 것이다. Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 위치에서 접합실 바닥 임의의 절단면에서 맨드릴 내 소재의 충전과정을 변형을 속도분포로 나타낸 것이다. 펀치의 위치는 Fig. 4의 하중 - 스트로크가 정상화되기 직전, 접합단계(B₁), (B₂)에서 임의의 내 부분으로 설정하였다.

stroke	Flat	stroke	Conical
26.3		24.95	
27.54		26.99	
28.04		27.69	
30.07		28	

Fig. 8 Comparison of filling stages in the welding plane

본 연구에 이용된 포트홀 다이는 접합실 바닥 형상이 원형이므로, 빌렛이 맨드릴 중간에서 가장 먼저 닿고 차츰 가장자리로 이동한다. 그러나 맨드릴 치형을 충전하기 위한 변형에너지가 크므로, 맨드릴 중앙부의 빌렛은 맨드릴을 충전하지 못하고, Fig. 8, 9에서 보듯이 소재가 접합면에 닿지 않고

다이 베어링을 따라 압출 방향으로 빠져 나오거나 반경방향으로 유동한다. 이후 접합실 내의 소재는 상대적으로 변형에너지가 적게드는 맨드릴 양쪽 끝 접합면을 먼저 충전시킨다.

Fig. 9에서 보듯이 경사다이는 접합실 바닥 경사로 인해 평다이보다 접합단계와 성형단계가 먼저 발생한다. 또한 접합실 바닥의 변형을 속도의 분포가 평다이는 다이 베어링과 맨드릴 부에 한정된데 반해 경사다이는 다이베어링 뿐만 아니라 접합실 반경으로도 고르게 분포되어 있다. 이는 Fig. 7의 속도분포처럼 접합실내에서 다이 베어링으로 향하는 빌렛 유동이 상대적으로 평다이보다 더 활발하고 데드 메탈 영역이 적음¹¹⁾을 의미한다. 빌렛의 유동성 측면에서는 경사다이가 평다이보다 우수하다.

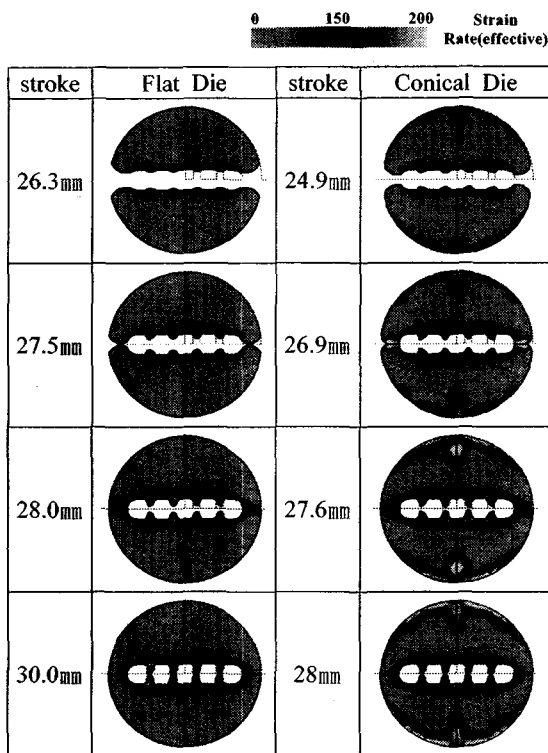


Fig. 9 Comparison of filling stages in the bottom of chamber

5. 포트홀 다이의 강도 해석

강도해석은 Fig. 8,9의 접합단계와 압출하중이

정상상태 일 때에 대해 각각 실시하였다. 해석은 구조해석용 상용유한요소 해석코드인 Ansys 5.5를 이용하였다.

Fig. 10은 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 경계 조건은 성형해석에서 구한 소재의 성형압력을 금형의 각 격자점에 부여되는 힘으로 보간하여 해석을 수행하였다.

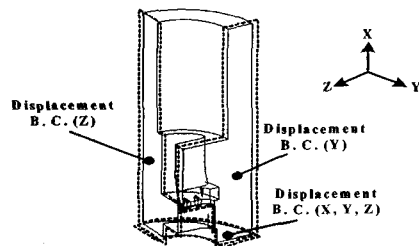


Fig. 10 Boundary condition for stress analysis of dies

5.1 맨드릴 변형 및 강도해석 결과

Fig. 11은 강도해석 결과, 압출하중이 정상상태 일 때 다이의 유효응력이 50~200MPa를 가지는 위치를 나타낸 것이다. 평다이의 경우 최대유효응력이 접합실 바닥과 다이 베어링, 브릿지 부에 고르게 분포되어있는데 반해, 경사다이는 접합실 바닥 모서리 부근에만 국한되어 있다. 최대유효응력은 평, 경사다이모두 다이 베어링부를 따라 나타났다. 이는 접합실 바닥에 작용하는 압력분포가 접합실 반경방향으로 갈수록 커지지만 다이 구조상 다이 베어링에서 가장 높은 응력이 발생한다¹²⁾.

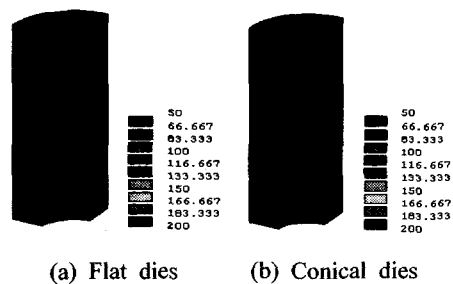


Fig. 11 Distribution of effective stress in the porthole die

Fig. 13은 Fig. 12의 맨드릴 양 끝(A)지점의 변위량을 펀치 스트로크에 대해 나타낸 것이다. 변위 위치는 맨드릴변형이 0일 때를 기준으로 하여 맨드릴 양끝이 반경방향으로 향하면 '+', 가운데로 모이면 '-'로 정하였다. 최대변위는 모두 압출하중이 정상상태로 접어들기 직전에서 맨드릴이 가운데로 모이는 변형양상으로 나타났다. 평다이는 펀치 스트로크 29.045mm에서 -0.00219mm, 경사다이는 펀치 스트로크 28.8mm에서 -0.00258mm로, 맨드릴의 최대변위량은 경사다이가 약간 크게 나타났다. 이는 Fig. 7에서 알 수 있듯이, 맨드릴 양 끝 접합면에서의 빌렛 유동이 평다이는 데드 메탈 영역을 형성한 후 전단 변형을 통해 빠져 나오지만, 이에 반해 경사다이는 빌렛의 압축변형을 통해 맨드릴 양끝을 빠져 나온다. 그러나 상대적으로 이웃한 맨드릴 치형(Fig. 12(C))을 성형하기 위한 빌렛의 변형에너지가 작기 때문에 오히려 맨드릴 양끝의 변형은 커지는 것으로 사료된다.

Fig. 13의 맨드릴 변형 양상은 빌렛의 유동과정과 밀접한 관련이 있다. Fig. 8에서 보듯이 접합단계 초기, 빌렛이 맨드릴 치형 부에 먼저 충전되면서 맨드릴 양끝을 접합실 반경방향으로 향하는 변형을 가한다. 그러나 빌렛은 높은 변형 에너지가 소요되는 맨드릴 치형을 충전하지 못하고 맨드릴 양 끝으로 유입된다¹³. 이후 맨드릴 양끝 변형은 급격히 가운데로 향하다가 차츰 하중이 정상상태에 접어들면서 맨드릴 치형에 빌렛이 유입되어 완화된 양상을 나타낸다. 만약 맨드릴 양끝이 파손될 경우, 접합단계초기부터 하중이 정상상태 적전까지의 맨드릴의 극단적인 변형양상으로 인해 파손될 것이다.

Fig. 14는 Fig. 12의 다이 베어링(B) 변위량을 펀치 스트로크에 대해 나타낸 것이다. 최대변위량은 평다이가 펀치 스트로크 32.1mm에서 0.01214mm, 경사다이가 펀치 스트로크 26.19mm에서 0.0059mm로 평다이가 크게 나타났다. Fig. 8에서 보듯이 경사다이의 접합실 바닥에 변형을 분포가 평다이보다 더 광범위하게 분포되어있다. 이는 경사다이가 평다이보다 데드 메탈영역이 적고 소성변형영역은 더 크다는 것을 의미한다.¹⁴ 실제 경사다이는 접합실 바닥에서 빌렛의 소성변형으로 다이 베어링 부에 작용하는 압력은 감소되고, 또한 접합실 바닥 경사로 인해 다이 베어링과 접합실 전체의 체적이 증가하기 때문에 다이 베어링의 변형량은 오히려 더 작아진다.

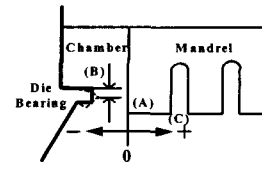


Fig. 12 Schematic illustration of mandrel and die bearing

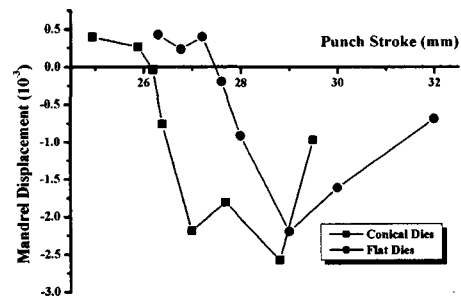


Fig. 13 Displacements of mandrel

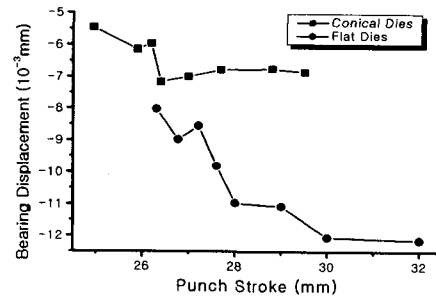


Fig. 14 Displacements of die bearing

다이 베어링 변형 양상은 경사다이 경우, 빌렛의 성형이 평다이보다 빠르기 때문에 접합단계 초기에 최대 변형을 나타내고 이후 안정상태로 접어든다. 그러나 평다이는 접합실에서 다이 베어링까지의 빌렛의 유동이 급격히 변하므로 하중이 정상상태에 접어든 후에야 안정이 된다.

6. 결론

본 연구에서는 접합실 바닥 각도 변화에 따른 컨테이너 튜브 직접압출을 위한 포트홀 다이 압출의 비정상상태 유한요소해석을 수행하여, 가공소요력 및 소재유동, 접합압력 등을 비교하였다. 또한 포트

홀 다이 강도해석을 분할, 접합, 성형단계 모두 수행하여 응력분포와 탄성변형을 비교 및 평가하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 압출하중은 접합실 바닥의 경사가 클수록 접합실 내에서 빌렛 내부의 전단영역이 작으므로 적게 나타났다.

(2) 접합실 바닥 경사가 낮을 수록 맨드릴 양 끝 접합면에서 테드메탈을 형성하면서 압출되기 때문에 접합압력은 상대적으로 커진다.

(3) 접합실 바닥 경사가 낮을수록 빌렛의 급격한 유동으로 인해 다이 베어링 부 최대변위량 및 최대유효응력은 높게 나타났다.

(4) 맨드릴 양끝변형은 접합실 바닥의 경사가 높을수록 맨드릴 양끝 빌렛의 소성변형으로 인해 크게 나타났다.

(5) 빌렛은 접합실 내에서 맨드릴 중앙부에 가장 먼저 접촉하지만 접합면의 충전은 맨드릴 양끝에서 먼저 시작하기 때문에 맨드릴 중앙부는 벌어지고 양끝은 가운데로 모이는 변형양상이 나타났다.

(6) 포트홀 다이 압출과정 중 맨드릴 양끝의 최대변형이 발생하는 곳은 성형되기 직전 접합단계에서 발생한다.

후 기

본 논문은 2003년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- Inagaki Toshiyuki, Murakami Gatoshi, "Effect of Entry Porthole Shape of Extrusion Pressure and Dimensional Accuracy of Extruded Pipes at Hollow Die Extrusion," Journal of the JSTP, Vol. 42, No. 482, 2001.
- Satoshi Murakami, Mistuyuki Isogai, Toshiyuki Inagaki, "Simulation of Rectangular Extruded Pipe by Porthole die," Journal of the JSTP, Vol. 38, No. 435, pp. 79-83, 1997.
- Lee Jung Min, Lee Sang Gon, Kim Byung Min, Jo Hyung Ho, Jo Hoon, "Die Stress and Process Analysis for Condenser Tube Extrusion by using Porthole Die," Proceedings of 2002 Spring Symposium of the KSPE, pp. 1030-1033, 2002.
- "DEFORMTM-3D," SFTC, 1995.
- Kobayashi, S., Oh, S. I., Altan, T., "Metal forming and The Finite-Element Method," Oxford Univ. Press., 1989.
- Murakami Satoshi, Takatsuji Norio, Tokizawa Mitsugu, Murotani Kazuo, Matsuki Kenji and Hashimoto Kiyoharu, "Inside Diameter Accuracy of Extruded Pipes by Porthole Die," Journal of the JSTP, Vol. 37 No. 423, 1996.
- Jo Hyung Ho, Lee Sang Gon, Lee Sun Bong, Kim Byung Min, "Prediction of Welding Pressure in the Non Steady State Porthole Die Al7003 Tubes," Journal of the KSPE, Vol. 18, No. 7, pp. 179-185, 2001.
- Jung, C. S., "3-D Finite Element Analysis of Porthole Die Extrusion Process for Hollow Section Tubes," M.S. Dissertation Univ. of Pusan, 2001.
- Kim, Young-Tae, Ikeda Keisuke, Murakami Tadasu, "Metal flow in porthole die extrusion of aluminium," Journal of Materials processing Technology 121, 2002
- Tadatsuji Noris, Tokiawa Mitsugu, Murakami Satoshi, "Effects of Shapes on Welding Strength of Extruded Pipe by Porthole Die," Journal of the JSTP, Vol. 37, No. 428, 1996.
- Mori Tsutomu, Takatsuji Norio, Matsuki Kenji, Aida Tesuo, Murotani Kazuo and Kouich, "Measurement of Pressure Distribution on Die Surface in Hot Extrusion of Pure Aluminum Rod," Journal of JSTP, Vol. 42, No. 489, pp. 98-102, 2001.
- Xie Jianxin, Murakami Tadasu and Takahashi Hiroo, "Metal Flow in the Forming of Hollow Cylinder by Four-Billet Extrusion," Journal of the JSTP, Vol. 31, No. 351, 1990.
- Kojima, F., Takenouchi, S., Kobayashi, H., "A Tendency of Metal Forming for Heatchanger," Journal of JSTP, Vol. 42, No. 488, pp. 2-6, 2001.
- Inagaki Toshiyuki, Murakami Satoshi, Takatsuji Noroo, "Aplication of Simulation of the Nonsteady State for Aluminum Rectangular Extruded Pipe," Journal of the JSTP, Vol. 42, No. 488, pp. 2-6, 2001.