

포트홀 다이를 이용한 Al1050 컨덴서 튜브의 직접압출공정 기술 개발

이정민*, 김병민#, 강충길**, 조형호***

Development of Direct Extrusion Process on Al 1050 Condenser Tube by using Porthole Die

Jung Min Lee*, Byung Min Kim#, Chung Gil Kang**, Hyung Ho Jo***

ABSTRACT

Condenser tube which is used for a cooling system of automobiles is mainly manufactured by conform extrusion. However, direct extrusion using porthole die in comparison with conform extrusion has many advantages such as improvement of productivity, reduction of production cost etc. In general, the porthole die extrusion process is useful for manufacturing long tubes with hollow sections and consists of three stages(dividing, welding and forming stages). Especially, Porthole die for producing condenser tube is very complex. Thus, in order to obtain the detailed mechanics, to assist in the design of proper die shapes and sizes, and to improve the quality of products, porthole die extrusion should be analyzed in as non-steady state as possible. This paper describes FE analysis of non-steady state porthole die extrusion for producing condenser tube with multi-hole through 3D simulation in the non-steady state during the entire process to evaluate detailed metal flow, temperature distribution, welding pressure and extrusion load. Also to validate FE simulation of porthole die extrusion, a comparison of simulation and experiment results was presented in this paper.

Key Words : Porthole die extrusion (포트홀 다이 압출), Non-state analysis (비정상상태 해석), Welding pressure (접합압력), Stress analysis (강도해석)

기호설명

- T_1 = Thickness of inner shell of condenser tube
- T_2 = Thickness of outer shell of condenser tube
- W_1 = Thickness of inner teeth of mandrel
- W_2 = Thickness of outer teeth of mandrel

1. 서론

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

접수일: 2004년 1월 9일; 게재승인일: 2004년 4월 9일
 * 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
 # 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소(ERC for NSDM)
 E-mail bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3074
 ** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소(ERC for NSDM)
 *** 한국생산기술연구원

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 필요하다.¹ 그러므로 기존의 컨폼 압출보다 원가적, 품질적인 측면에서 경쟁력 있고 저가, 고품질의 튜브를 생산할 수 있는 포트홀 다이를 이용한 직접압출로의 전환이 필수적이다.

지금까지 포트홀 다이 압출 공정에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만 대부분의 연구들이 단순단면인 중공제 및 사각 중공제 제품에 대한 연구들이었다.²⁻⁵ 컨덴서 튜브 직접압출의 경우, 기본적인 소재 유동양상은 중공제 튜브 직접압출과 유사하지만, 최종 다이 출구 부 형상이 하모니카 모양의 복잡한 형상을 가지기 때문에 각각의 압출변수들에 대한 영향 평가는 중공제 직접압출과는 다르게 나타난다.⁶

따라서 본 연구에서는 다공의 복잡한 단면을 가진 컨덴서 튜브의 직접압출공정 개발에 대한 연구를 수행하였다. 연구 내용은 포트홀 다이 압출 공정에 대하여 비정상상태 유한요소 해석을 수행하여 복잡한 소재유동 및 접합영역에서의 접합압력(welding pressure), 압출하중, 다이 탄성변형량 등을 평가하였다. 또한 직접압출공정 해석의 유효성을 검증하기 위해 컨덴서 튜브 압출실험을 수행하여 해석결과와 비교하였다.

2. 컨덴서 튜브의 직접압출공정해석

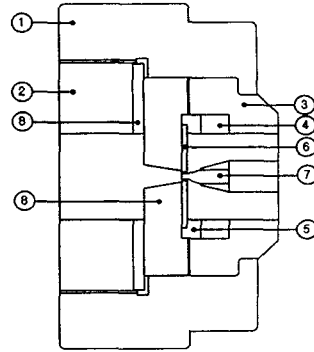
2.1 포트홀 압출 다이의 구조



Fig. 1 Schematic drawing of condenser tube

Fig. 1에서 보듯이, 컨덴서 튜브는 자동차 및 가전제품의 열교환기 부품으로 두께가 0.5mm 이하이고, 단면 내부에 냉매의 유로인 구멍을 가진 것이 특징이다. 냉방기기의 부품 특성상 알루미늄(Al), 동(Cu) 등과 같이 열효율이 우수한 소재가 사용된다. 일반적으로 열교환기 부품은 열효율 향상을 목적으로 전열면적을 향상시키기 위해 얇은 벽 두께

를 가진 다공 단면의 형태로 설계된다.



No.	Names	No.	Names
1	Housing	6	Die insert
2	Jaw	7	Mandrel insert
3	Mandrel case	8	Die case
4	Mandrel support	9	Slip retainer
5	Retainer		

Fig. 2 Constructions of dies for condenser tube

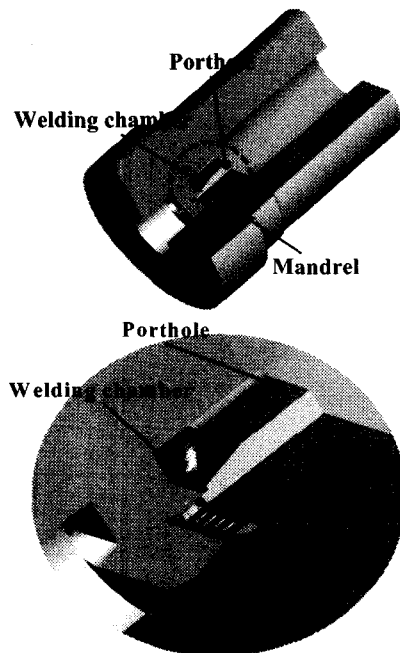


Fig. 3 Structure of porthole die for condenser tube

Fig. 2는 본 연구에 사용될 포트홀 다이의 구조를 나타낸 것이다. 일반적으로 컨덴서 튜브 압출을 위한 포트홀 다이의 구조는 크게 다이 부분과 맨드

릴 부분으로 나눌 수 있다. 특히 다이 베어링이 있는 다이 인서트와 튜브의 구멍을 결정하는 맨드릴 인서트는 컨덴서 튜브의 외형 및 치수를 결정하는 부분으로 포트홀 압출에서 가장 취약 지점으로 판단되어 분리형으로 설계되었다.

본 연구에서는 컨덴서 튜브 직접압출 공정해석에서 포트홀 다이 전체의 탄성변형이 맨드릴 탄성변형에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 3과 같이 분리형 구조를 일체형으로 3D 모델링 하였다. 3D 모델링된 다이는 크게 컨테이너, 포트홀(porthole) 그리고 맨드릴 및 접합실(welding chamber)로 구성되어 있다. 컨덴서 튜브 생산을 위한 포트홀 다이의 구조는 단순 중공제 생산을 위한 포트홀 다이보다 형상이 상당히 복잡하다. 특히 Fig. 1과 같은 다공 단면의 제품을 생산하기 위하여 Fig. 3에서 보듯이 하모니카 모양의 맨드릴을 가지고 있다.

2.2 직접압출공정 해석조건

본 연구에서는 컨덴서 튜브의 직접압출공의 가공소요력 및 접합압력, 압출하중을 평가하기 위해 대변형이 취급되는 강소성유한요소해석 코드인 DEFORM 3D⁷를 사용하였다. 해석에 사용된 빌렛은 컨덴서 튜브의 재료로 많이 이용되는 Al 1050을 채택하였고, 컨테이너, 챔버와 펀치는 열간 공구강인 STD 61을 채택하였다. 다이와 빌렛의 초기온도는 각각 450, 420℃로 설정하였다. 전반적인 해석조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Extrusion condition for condenser tube

Extrusion conditions		Value
Material of billet		Al1050
Material of tools		STD61
Initial temperature of billet(℃)		450
Initial temperature of tools(℃)		420
Extrusion velocity(mm/s)		833(exit velocity)
Reduction in area(%)	Bridge	75.36
	Exit	93.47
Dimension of billet(mm)		Φ71×h200
Temperature of environment(℃)		20
Friction factor(m)		0.6

해석모델은 컨덴서 튜브 단면의 대칭성을 고려하여 1/2 모델로 하고, Al소재는 열연성 모델로, 그 외 다이 및 펀치 등은 전부 변형을 수반하지 않는

강체로 정의하였다. 해석을 위한 빌렛과 다이의 유한요소격자 형상을 Fig. 4에 나타내었다.

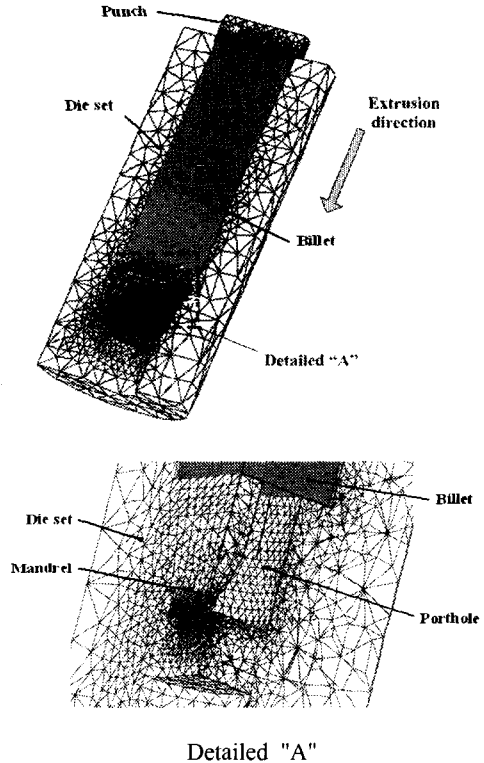


Fig. 4 Initial mesh system of porthole die extrusion

3. 직접압출공정 해석결과

3.1 빌렛의 소재유동

포트홀 다이 압출의 경우 초기 빌렛은 분할단계, 접합단계 그리고 성형 단계를 거쳐 제품을 형성하게 된다. Fig. 5에 각 단계를 나타내었다. Fig. 5(a)는 분할단계로 초기 빌렛이 포트홀에 의하여 나누어지는 단계이다. Fig. 5(b)의 접합단계는 포트홀에 의해 나누어진 소재가 접합실로 유입되면서 소재의 유동 구속에 의하여 서로 합쳐지는 단계이며, Fig. 5(c)는 접합된 소재가 다이의 베어링부를 빠져 나와 제품을 형성하는 성형단계를 나타낸 것이다. 이와 같은 3단계를 거쳐 최종 제품인 다공 단면의 컨덴서 튜브가 성형되어진다.

Fig. 6은 성형해석 결과, Fig. 5의 각 단계별 유효변형률 속도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대변형률 속도 분포는 접합단계(Fig.

6(c)에서 맨드릴 치형에 유입되는 소재 부분에 나타났다. 변형률 속도가 높다는 것은 그 부분의 소재의 유속이 빠르고 소재의 내부변형에 소요되는 에너지가 높다는 것을 의미한다. 결국 다이에 작용하는 소재의 성형압력도 타 부위보다 높아지기 때문에 컨덴서 튜브 압출에서 맨드릴이 가장 취약 부분이라는 것을 예측할 수 있다.

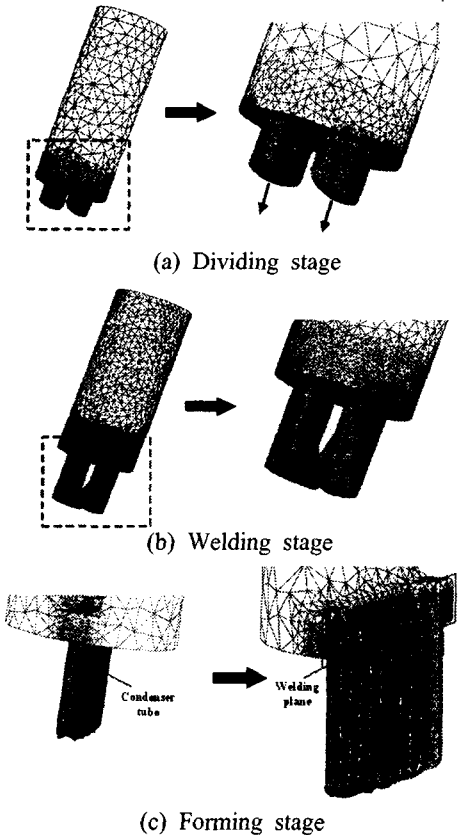


Fig. 5 Each stage of porthole die extrusion

Fig. 7은 하중이 정상상태일(Fig. 5(c))때 접합실 내에서의 소재 유동 양상을 압출방향에 수직한 단면으로 나타낸 것이다. 접합실로 유입된 소재가 압출 방향으로 구속되면서 반경방향으로 소재의 유동이 거의 일어나지 않는 데드메탈 영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 접합면에서 컨덴서 튜브가 성형되는 양끝 지점에서 국부적인 데드메탈이 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 미세한 데드메탈 형성이 컨덴서 튜브의 접합강도에 상당한 영향을 미치는 것으로 예측된다. Fig. 8은 컨덴서 튜브

의 압출 방향과 수평한 단면인 접합면에서 생성되는 데드메탈의 분포를 나타내었다. 접합면의 양쪽 모서리와 컨덴서 튜브 셀 위 부분에서 국부적인 데드메탈 영역이 생성됨을 알 수 있다.

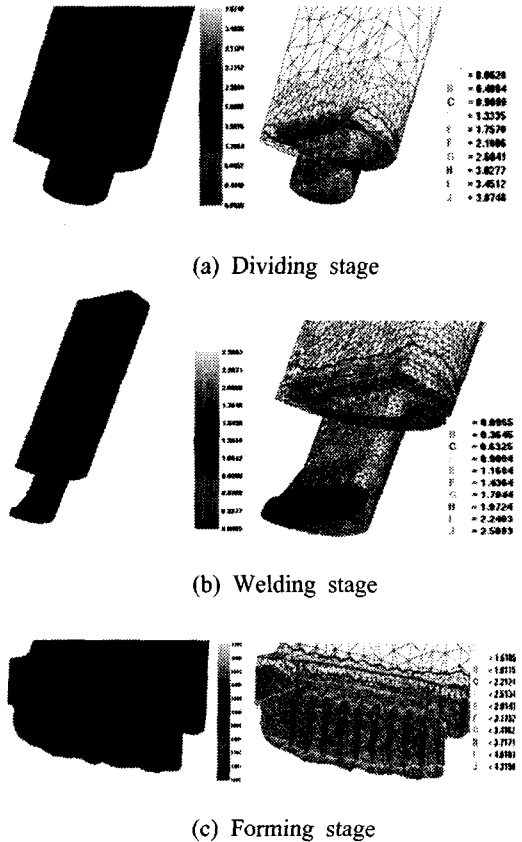


Fig. 6 Distributions of effective strain rate at each stages

Fig. 9는 접합실 내에서의 소재의 유동을 가지적으로 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보듯이 접합실 내로 유입된 소재가 접합실 바닥에 닿게 되면 압출 방향으로의 유동이 구속되면서 반경방향으로 급격하게 소재유동이 변하게 된다. 그리고 반경방향으로 유동하는 소재가 맨드릴의 치형부에 닿게 되면 역시 반경방향으로의 유동 또한 구속되면서 다이 베어링부를 빠져 나오게 된다. 이 때 소재가 좁은 다이의 베어링부를 빠져 나오면서 높은 압력을 가하게 되고, 이로 인하여 다이 베어링부에는 다른 부위보다 높은 응력이 발생하게 된다.

또한 맨드릴의 경우, 접합실의 반경방향으로 유

동하는 소재가 맨드릴 양끝 치형의 측면에 닿게 되면 맨드릴에 의해 소재의 유동이 다시 압출방향으로 변하게 되고, 이때 맨드릴에 심한 압력이 작용하게 되어 맨드릴 변형을 일으킨다. 이러한 변형과정이 최종 제품의 치수정도에 영향을 미치게 된다.

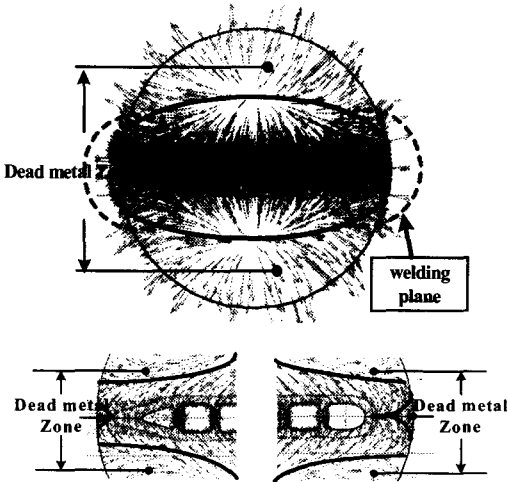


Fig. 7 Distributions of dead metal zone at welding chamber

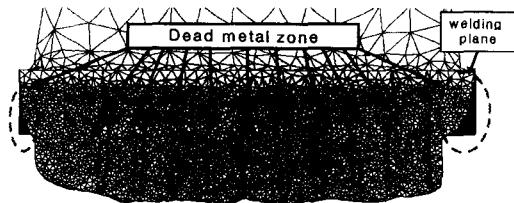


Fig. 8 Dead metal zone on welding plane

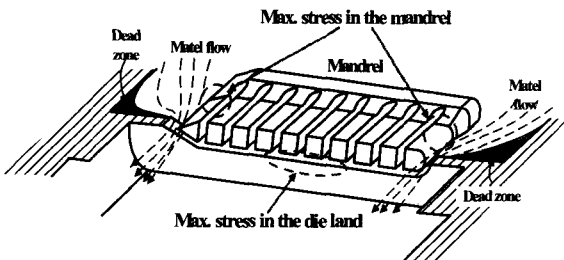


Fig. 9 Metal flow in mandrel and die bearing part

3.2 압출하중 및 접합압력

Fig. 10은 직접압출과정 해석결과로 얻은 하중과 스트로크 곡선이다. (A)는 압출의 초기 단계로

초기 소재가 컨테이너를 채우는 과정이다. (B)는 소재가 브릿지 부에서 분할되어 접합실 바닥에 닿기 직전으로 거의 균일한 하중변화를 나타낸다(Fig. 5 (a) dividing stage). (C)는 접합실로 유입된 소재가 접합실 내부를 채우면서 맨드릴과 다이 베어링부에서 접합하는 단계로 하중은 급격히 상승한다(Fig. 5(b) welding stage). (D)는 완전한 접합 후 소재가 다이 출구부로 빠져 나와 최종 컨테이너 튜브 형상을 성형하는 단계로 하중은 정상상태로 접어들어 조금씩 완만하게 감소한다(Fig.5(c) forming stage).

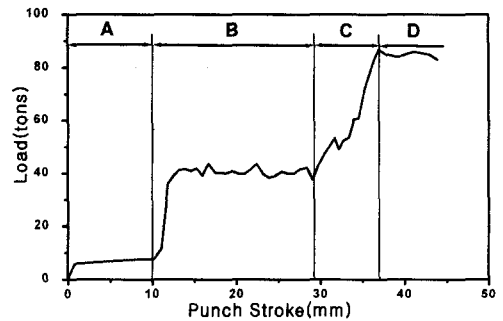
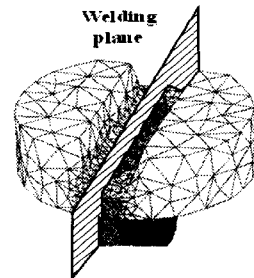
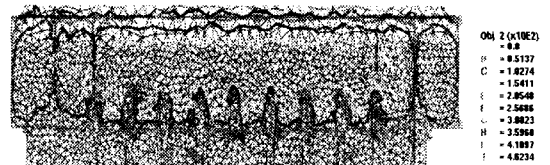


Fig. 10 Load-stroke curve



(a) Location of welding plane



(b) Normal pressure

Fig. 11 Normal pressure at welding plane

Fig. 11은 Fig. 5의 접합단계에서, 포트홀 다이 접합면에서 소재의 수직압력분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 유한요소해석에서는 소재의 수직압력이 소재의 항복강도 이상이면 양호한 접합압력을 가지는 것으로 판단한다.⁸

접합면의 접합압력은 맨드릴 양끝 단부에서 약 100~150MPa의 값을 나타내고 있고, 셀을 형성하는 부위에서의 접합압력은 약 50~100MPa로 맨드릴 양 끝 단부에서의 접합압력보다는 다소 낮은 값을 나타내고 있다. 이것은 맨드릴의 치형 내부보다는 치형 양끝 단부쪽으로 유동하는 소재의 양이 많고 셀을 형성하는 소재의 변형저항이 높기 때문이다.

4. 포트홀 다이의 강도 해석

강도해석은 컨덴서 튜브의 직접압출 공정해석 과정 중 소재유동이 정상상태일 때, 소재 성형압력을 포트홀 다이의 유한요소 격자의 각 절점(node)에 작용하중으로 보간하여 수행하였다. 강도해석 시 다이의 구속조건을 Fig. 12에 나타내었다.

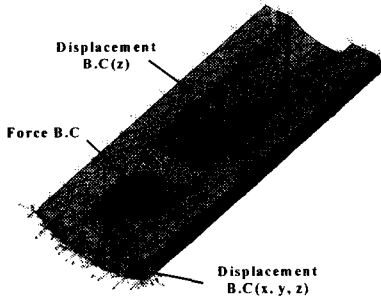
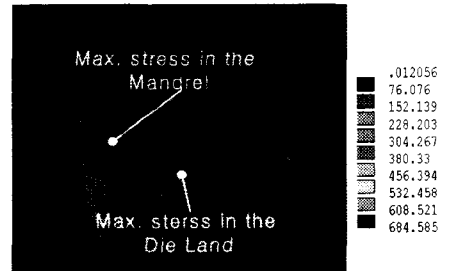


Fig. 12 Boundary conditions for die stress analysis

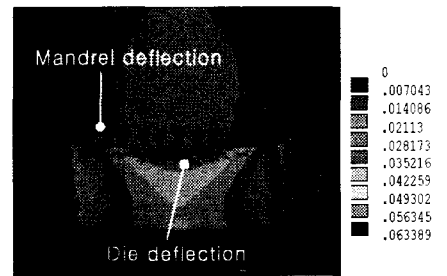
Fig. 13(a)는 포트홀 다이의 강도해석 결과, 최대 유효응력 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대유효응력은 접합된 소재가 다이 베어링을 빠져 나오기 직전 다이 베어링 부위에서 발생하였다. 또한 맨드릴의 치형 중 양 끝의 치형 부에서 가장 높은 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 응력 분포는 접합실의 소재유동에 기인하는 것으로 실제 컨덴서 튜브압출에서 다이의 파손이 발생한다면, 다이 베어링부 및 맨드릴 치형 양 끝에서 파손 및 변형이 발생할 가능성이 가장 높음을 강도해석의 결과로 예상할 수 있다.

Fig. 13(b)는 포트홀 다이의 탄성 변형량을 나타낸 것이다. 최종 제품의 모양을 형성하는 다이 베어링 부와 맨드릴 양 끝단에서 최대 탄성 변형량이 나타났다. 이러한 원인은 접합실 내 소재의 불균일한 유동양상으로 인해 발생한다. Fig. 9에서 보듯이 포트홀에서 접합실로 유입된 소재의 유동이 반경방향으로 바뀌면서 맨드릴 치형 부에 닿게 되고, 이

때 맨드릴 양 끝으로 유입되는 소재의 양이 셀을 형성하는 부위보다 많게 된다. 이때 맨드릴 중앙부 치형보다 상대적으로 맨드릴 양 끝단의 치형 부에 높은 압력이 작용하여 탄성 변형량이 높아지게 된다. 이러한 치형의 변형은 최종제품의 치수 정도에 영향을 미치고, 금형의 파손을 불러올 수 있다. 특히 이러한 결과는 컨덴서 튜브 압출 금형 설계시 가장 중요하게 고려해야 할 사항이다.



(a) Distribution of von-mises stress in the die



(b) Distribution of displacement in the die

Fig. 13 Result of stress analysis in the die

5. 컨덴서 튜브 압출 실험

일반적인 알루미늄압출의 공정 개략도를 Fig. 14에 나타내었다.

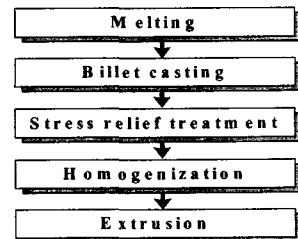


Fig. 14 Processes of Al extrusion

5.1 빌렛 제조 및 압출 장비

먼저 시험용 용해주조설비를 이용하여 알루미늄 합금의 용해, 주조를 실시하였다. 빌렛은 직접공정해석과 동일한 Al 1050을 사용하였다. 빌렛 제조는 용해 후 탈가스 처리를 하고 $\phi 73 \times 200\text{mmL}$ 의 금형에 주입한 후 응고시켜 제작하였다. 이후, 480°C 에서 8시간동안 균질화처리를 하였고, 예열온도 420°C 에서 1시간 soaking 후에 압출실험에 사용되었다. 사용된 Al 1050의 합금 조성을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Chemical Compositions of Al 1050

Comp.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
%	0.25	0.4	0.05	0.05	0.05
Comp.	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
%	0	0.05	0.03	0	99.12



Fig. 15 Equipment of extrusion

Table 3 Specification of equipment

Capacity	400ton Extrusion press	
Type	Horizontal type	
Container size	$70\phi \times 400\text{ mm}$	
Container heating part	Heating element	Firmax
	Setting temp.	Type370~480 $^\circ\text{C}$
	Electric capacity	12EA \times 2.0Kw=24Kw
Control	P.C.B control panel	
Main cylinder part	Closing	11.8mm/sec
	Stroke	1,100mm/sec
	Working pressure	210kg/cm 2

Fig. 15는 컨테이너 튜브 압출실험에 사용된 압출장비를 나타낸 것이다. 압출에 사용된 장비는 수평

타입(horizontal type)으로 압출 최대용량은 400ton이며, $\phi 70 \times 400\text{mm}$ 의 컨테이너 크기를 가지고 있다. 전반적인 압출기 사양을 Table 3에 나타내었다.

5.2 압출실험 공정조건

빌렛의 예열온도는 450°C , 다이의 예열온도는 350°C 전후를 유지하였다. 압출온도는 430°C 로 설정하였고 압출속도는 앞선 유한요소 해석과 동일하게 설정하기위해 다이 출구부의 단위 시간당 소재유량을 계산하여 램 속도를 9.45mm/s 로 하였다. 압출방식은 일반적으로 컨테이너 튜브압출에 사용되는 무윤활 직접압출방식을 채택하였고, 전반적인 압출실험조건을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Experimental condition of extrusion

Extrusion conditions	Value
Ram speed	9.45 mm/s
Extrusion temp.	430°C
Preheating temp. of billet	450°C
Preheating temp. of die	350°C

5.3 포트홀 다이 제작

일반적인 압출 다이는 압출 시 심한 압력과 마찰로 인해 다이 베어링은 거칠어지고 또한 마모가 심하다. 이를 방지하기위해 다이 출부의 표면 강화를 목적으로 질화처리(nitriding)를 한다.

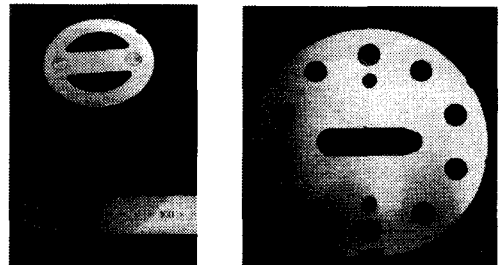


Fig. 16 Photographs of manufactured porthole die

그러나 본 실험에 사용된 포트홀 다이는 직접압출공정해석의 결과에서도 알 수 있듯이 맨드릴과 다이 베어링 부위가 가장 취약한 것으로 나타났다. 따라서 다이의 강도 측면을 고려하여 다이 인서트와 맨드릴 인서트는 초경으로 제작하고 그 외 부분은 열간 금형강인 STD 61로 제작하였다

Fig. 16은 본 압출실험에 사용된 포트홀 다이 형

상을 나타낸 것이다. 포트홀 다이의 치수 및 형상은 앞선 직접압출공정해석에서 사용된 Fig. 3의 포트홀 다이 3D모델과 동일하다.

5.4 압출실험결과

압출실험은 컨덴서 튜브가 약 15mm 정도 압출되었을 때 맨드릴 한쪽 끝의 파손으로 중단되었다. Fig. 17은 포트홀 다이의 맨드릴 파손부위를 나타낸 것이다. 이러한 맨드릴 파손의 결과는 Fig. 13의 앞선 강도 해석결과와 일치하는 것으로 맨드릴 중앙부보다 상대적으로 맨드릴 양끝에서 유입되는 소재의 유동량이 많아 맨드릴 양끝에서 높은 압력이 작용하기 때문이다.

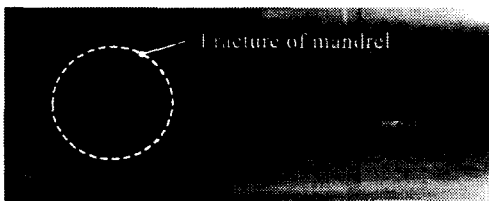


Fig. 17 Fracture of mandrel after extrusion



(a) A section of condenser tube



(b) A surface of condenser tube

Fig. 18 Shapes of extruded condenser tube

Fig. 18(a)는 압출된 컨덴서 튜브의 단면 형상을 나타낸 것이다. Fig. 18(a)에서 보듯이 포트홀 튜브 양끝 바로 옆의 벽두께(B)가 상대적으로 양끝 벽두께(A)와 맨드릴 중앙부 벽두께(C)보다 얇은 것을 확인할 수 있다. 이것은 맨드릴 양끝의 소재유입량 증가로 인해 맨드릴 양끝이 변형되었다는 것을 의미한다. 이러한 맨드릴 변형 양상은 압출동안

점진적으로 가중되어 결국 맨드릴을 파손에 이르게 하다는 것을 해석뿐만 아니라 실험결과에서도 확인할 수 있다.

Fig. 18(b)는 압출된 컨덴서 튜브의 표면형상으로, 일반적인 압출결합 중 하나인 주름(wave)가 발생한 것을 확인할 수 있다. 주름은 주로 두께가 얇은 제품 표면에 발생하며 그 원인은 다이 베어링 부위에서 압출되어 나오는 소재유동의 온도분포가 불균일할 경우 발생한다. 이에 대한 대책으로, 압출기 측면에서는 압출프레스의 축 중심을 다이 및 컨테이너 중심과 일치시키고, 다이 및 생산측면에서는 다이 베어링 길이를 수정하거나 압출속도를 낮춤으로써 주름을 방지할 수 있다.

6. 포트홀 다이설계 개선방향

앞선 유한요소해석과 실험결과를 비교해 볼 때 해석이 실제 포트홀 압출의 신뢰성을 평가하는데 상당히 유용한 도구임이 증명되었다. 특히 강도해석을 통해 맨드릴 양끝의 파손 예측이 정확히 실험결과와 일치함으로써, 향후 컨덴서 튜브 압출을 위한 포트홀 다이설계 시, 유한요소해석을 통해 설계의 적절성과 설계변수에 대한 평가가 가능함을 알 수 있다.

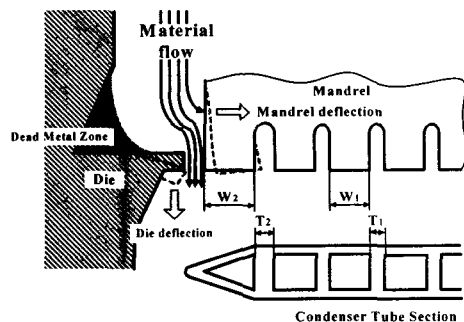


Fig. 19 Result of stress analysis and experiment in the die

Fig. 19는 해석과 실험결과에서 나타난 맨드릴의 탄성변형을 가지적으로 나타낸 것이다. 맨드릴 치형이 안쪽으로 휘는 변형은 다이의 파손 및 최종 제품 형상의 치수정도에도 크게 영향을 미친다. 따라서 실제 컨덴서 튜브를 위한 포트홀 압출 설계 시에는 맨드릴 및 다이변형을 염두에 두고 설계를

수행하여야 한다.

본 연구에서 사용된 포트홀 다이의 경우, 다이의 파손으로 인해 적절한 컨덴서 튜브 압출이 불가능함을 유한요소해석 및 실험 결과를 통해 확인하였다. 그러므로 Fig. 19와 같이 맨드릴의 치형 폭(W1)을 안쪽 치형 폭(W2)보다 크게 하고, 또한 제품의 첫번째 셀 두께(T2)보다 다른 셀 두께(T1)를 크게 설계함으로써, 맨드릴의 치형부의 강성을 높이고 변형량을 보정할 수 있을 것으로 사료된다. 수정된 다이에 대한 정량적인 평가는 향후 연구에서 계속될 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 컨덴서 튜브의 직접압출을 위한 포트홀 다이 압출의 비정상상태 유한요소해석을 수행하고, 또한 컨덴서 튜브 압출실험을 수행하여 직접압출공정 해석결과의 타당성을 검증하였다. 이상의 연구결과로 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

- (1)소재의 유동해석을 통해, 맨드릴 양끝에서 접합실의 반경방향으로 유동하는 소재에 의해 양 끝 치형이 안쪽으로 변형한다는 것을 예측할 수 있었다.
- (2)컨덴서 튜브를 형성하기 위한 소재의 접합은 접합실내의 맨드릴 양끝 치형 바깥쪽과 맨드릴 치형 내부의 좁은 틈에서 일어나며, 해석결과 맨드릴 치형 양끝 단부에서의 접합압력이 맨드릴 치형 내부에서 발생하는 접합압력보다는 다소 높게 평가되었다.
- (3)금형의 강도해석 결과, 다이 베어링부에서 탄성 변형량이 가장 크게 나타났고, 맨드릴 양끝에서 탄성 변형량이 가장 큰 것으로 나타났다.
- (4)압출실험 결과, 튜브가 15mm 정도 압출되었을 때 맨드릴 한쪽 끝이 파손되었다. 이는 해석결과와 일치하는 것으로 유한요소해석의 타당함을 실험으로 증명하였다. 또한 본 포트홀 다이는 컨덴서 튜브를 성형하기에 부적절한 것으로 판명되었다.

참고문헌

1. Kojima, F., Takenouchi, S., Kobayashi, H., "A Tendency of Metal Forming for Heat-changer," Journal of JSTP, Vol. 42, No. 488, pp 2-6, 2001.
2. Murakami, S., Isogai, M., Inagaki, T., Takatsuji, N., Tokizawa, M., Murotani, K., "Simulation of Retangular Extruded Pipes by porthole Die," Journal of the JSTP, Vol. 38, No. 36, pp. 517-521, 1997.
3. Murakami, T., Xie, J., Takahashi, H., "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.
4. Xie, J., Murakami, T., Takahashi, H., "Influence of Number and Location of Container Holes in Forming of Circular Tube by Multi-Billet Extrusion," Journal of JSTP, Vol. 31, No. 352, pp. 625-631, 1990.
5. Kim, Y. T., Ikeda, K., Murakami, T., "Measurement of Pressure Distribution on Dies in Porthole Die Extrusion," Journal of JILM, Vol. 49, pp. 296-301, 1999.
6. Lee, J. M., Kim, B. M., Jeong, Y. D., Jo, H., Jo, H. H., "The Effect of Chamber Bottom Shape on Die Elastic Deformation and Process for Condenser Tube Extrusion," Journal of KSTP, Vol. 20, No. 5, pp. 66-72, 2003.
7. "DEFORM 3D™," SFTC, 1995.
8. Jo, H. H., "Prediction of Welding Pressure in the Non Steady State Porthole Die Extrusion of Al7003 Tubes," International Journal of KSTP, Vol. 4, No. 3, pp.36-41, 2003.