

## 다공 AI 컨덴서 튜브의 압출공정 해석

배재호\* · 이정민\* · 김병민#

(2004년 8월 6일 접수)

### Extrusion Process Analysis for AI Condenser Tube with Multi Hole

J. H. Bae, J. M. Lee and B. M. Kim

#### Abstract

This paper describes the analysis of extrusion process and integrity for a condenser tube which is a component of the heat exchanger in automobile and air conditioning apparatus. Recently, according to the development of analysis method using the computer, the numerical simulation have been applied to the 3-dimensional hot extrusion process with complex section area of the non-steady state and then results of the analysis have been applied to optimal die design and process design. In this paper, firstly, the die design was performed for a condenser tube with a multi-hole section and the rigid-plasticity FE analysis performed of extrusion process. Secondly, we estimated metal flow of billet, extrusion load, welding pressure in chamber etc. and evaluated the pressure and elastic strain of the die land and mandrel tooth profile through a stress analysis of the die. Finally, the extrusion test was performed to estimate the validity of FE analysis. This paper confirmed that the designed extrusion die of the research is satisfactorily designed for integrity of condenser tube.

**Key Words :** Condenser Tube, Extrusion Process, Welding Pressure, Finite Element Method

#### 1. 서론

자동차 에어컨 시스템의 응축기 등에 이용되고 있는 신냉매용 컨덴서 튜브는 다공화, 편평화, 편미세화 등에 의한 형상개량으로 성능 향상을 꾀할 수 있지만 이는 중량의 증가로 경량화에 역행할 수 있다. 따라서 경량 박육 및 초소형화를 고려한 형상개량이 필요하다.

현재 국내에서 컨덴서 튜브의 경우 대부분 컨포움(Conform) 압출법에 의해 생산되고 있으나 이에 비해 생산성 및 원가적으로는 물론 품질적인 측면에서도 경쟁력이 있는 직접압출법으로의 전환이 필수적이다. 따라서 이에 따른 정밀직접 압출 기술 개발이 중요하다.<sup>(1)</sup>

압출가공은 한번의 공정으로 복잡한 제품형상을 만들 수 있고 기계다듬질 가공이 필요없는 매우 경제적인 가공법이다. 그러나 컨덴서 튜브와 같은 경우 성형하기 위한 가공 소요력이 크며 다이는 매우 높은 가압력을 받기 때문에 다이 출구의 각 부분에 변형이 발생한다. 이것은 제품 치수에 영향을 미치게 되므로 압출 가공시 어려움이 따른다.

알루미늄 압출에서 다이 설계는 매우 중요한 부분이다. 빌렛 유동을 적절히 제어하고 다이 출구부의 빌렛 유동 속도를 균일하게 내부 형상을 설계해야 한다. 그리고 초소형 단면의 경우 압출비를 낮추기 위해 다공압출(Multi hole)방식의 다이 제작이 불가피하다. 따라서 컨덴서 튜브를 생산하

\* 부산대학교 정밀기계공학과  
# 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

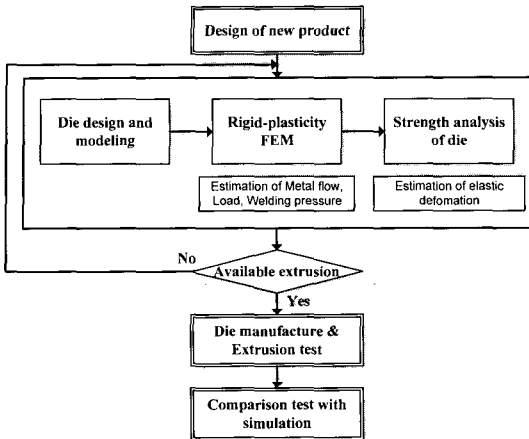


Fig. 1 A diagram showing the development process for condenser tube

기 위한 적절한 압출 다이 설계는 매우 어렵다. 다이 설계자의 시행착오(trial-and-error)를 줄이기 위해 유한요소해석을 이용한 방법이 현재 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(2-4)</sup> 근래에는 열간 압출 공정에도 비정상상태 유한요소 해석을 적용하여 압출비, 베어링 길이, 다이 반각, 홀 개수, 접합실 높이, 챔버 형상 등의 설계변수나 초기 빌렛온도, 압출속도 등의 공정변수에 따른 소재유동 및 다이의 변형예측까지 일부 수행되고 있다.<sup>(5-6)</sup>

본 연구에서는 다공 Al 컨덴서 튜브의 직접 압출공정에 대한 연구를 Fig. 1과 같은 과정으로 수행하였다. 먼저 일반적인 압출기 사양으로 작업 가능하며 다공 박막의 컨덴서 튜브를 생산할 수 있는 압출 다이를 설계하였다. 그리고 3차원 열간 압출 해석 및 다이 강도 해석을 통하여 빌렛의 유동 양상, 접합압력, 다이 탄성 변형량 등을 평가하였다. 최종적으로 다이의 제작 및 시압출을 수행하여 컨덴서 튜브의 건전성 평가 및 본 연구 방법의 유효성을 검증하였다.

이러한 제품개발 과정은 설계자가 다이설계 및 제작의 시행착오나 시작품의 가공시간, 제작비 등을 최소화 할 수 있으며 더 나아가 생산공정의 단축 및 제품의 질적 향상에 많은 기여를 할 것으로 사료된다.

## 2. 직접압출 공정해석

### 2.1 포트홀 다이 설계

Fig. 2는 본 연구에 사용된 컨덴서 튜브의 단면 형상을 나타낸 것이다. 단면은 냉매의 유로인 미세홀이 10 개이며 홀 사이의 벽 두께는 0.35mm, 양단 끝의 벽두께는 0.5mm 이다.

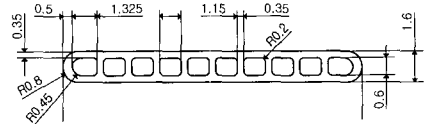


Fig. 2 Section of condenser tube

본 절에서는 빌렛 직경 152mm, 최대하중 1600 ton 인 단동압출기에서 작업이 가능하며 생산성이 우수한 제품을 생산하기 위해 다음과 같은 다이 내부설계를 수행하였다.

Fig. 3에 설계된 다이의 3D 모델링 형상을 나타내었다. 다이 설계는 컨덴서 튜브와 같이 중공의 제품을 생산하기 위해 포트홀 방식을 채택하였다. 포트홀 다이 압출은 스템에 맨드렐을 가진 재래식 방법으로는 생산하기 어려운 복잡한 단면을 가진 생산품의 경우에 큰 장점을 가지고 있으며 맨드렐의 길이에 상관없이 길이가 긴 제품을 연속적으로 생산할 수 있다. 또한 제품의 생산성은 높이고 압출비는 낮추기 위해 공정 시 두개의 튜브를 동시에 생산할 수 있는 2홀 압출방식을 사용하였다.

Fig. 4(a)의 다이 홀더는 빌렛의 직경  $\Phi 152\text{mm}$  (6 Inch) 과 컨테이너 직경  $\Phi 161\text{mm}$  을 고려하여 외경을  $\Phi 250\text{mm}$  로 결정하였다. 그리고 브릿지와 체결된 다이 2 개가 각각 삽입될 수 있도록 다이 홀더 내부를 설계하였다. 또한 포트홀 입구의 개수 및 위치는 컨덴서 튜브의 단면 형상을 고려하여 접합면이 정가운데 수평으로 위치하도록 홀더 내부를 설계하였다. Fig. 4(b)에 나타낸 압출 방향의 강도를 유지하는 베커는 다이 홀더와 체결되며 길이는 70mm 로 설정하였다. 따라서 컨테이너를 제외한 다이의 전 길이는 150mm 가 된다. Fig. 4(c)의 브릿지의 경우 빌렛의 유동을 구속시키기 위해 포트홀을 그림과 같이 다이 홀더의 포트홀 입구와 단차를 두어 배치하였다.

Fig. 4(d)의 다이의 경우 브릿지와 체결되며 총 접합실 높이를 9.5mm, 바닥면은 접합실 내부를 채우는 빌렛의 유동을 활발히 하기 위하여 반 리본형상으로 설계하였다. Fig. 4(e)의 맨드렐은 브릿지 내부에 삽입되며 치형을 충전하는 빌렛의 유

동을 고려하여 슬릿높이를 그림과 같이 각각 다르게 설정하였다.

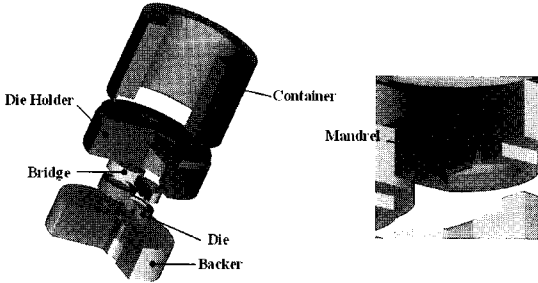


Fig. 3 3D model of porthole die

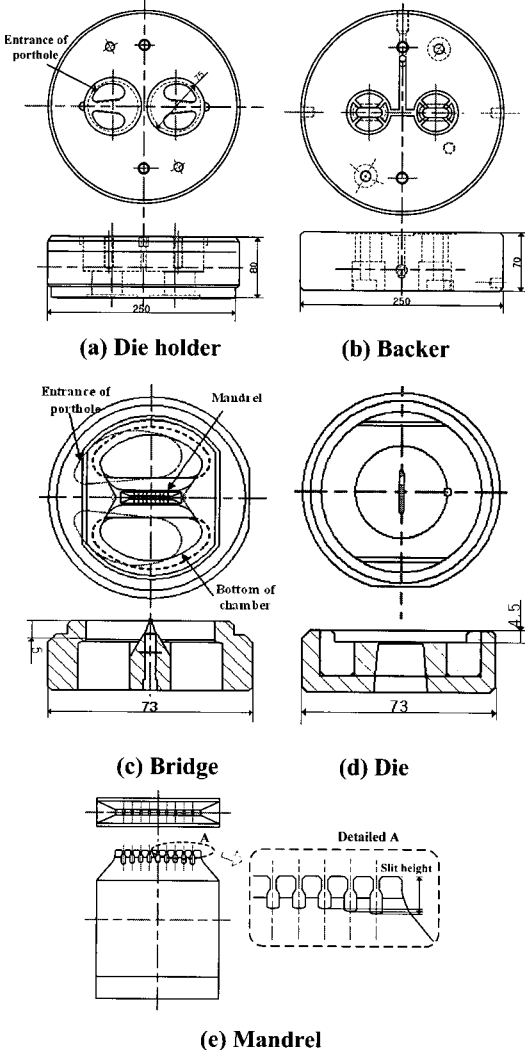


Fig. 4 Construction of porthole die

2.2 유한요소 해석

해석 코드는 소성 가공 전용 해석 프로그램인 DEFORM 3D<sup>7)</sup>를 이용하였다. 모델은 다이의 대칭성을 고려하여 1/4 형상만을 해석하였다. 2홀방식의 압출 공정이므로 제품의 경우 1/2 해석과 동일하다. 램 속도는 7mm/s, 초기온도는 빌렛은 480°C, 다이는 500°C 로 설정하였다. 빌렛과 다이의 재료는 각각 Al1100, AISI H13(STD61)을 사용하였다. 성형해석 시, 빌렛은 강소성체로, 다이는 변형을 수반하지 않는 강체로 가정하였다. 소재의 유동응력은 DEFORM DB 에 있는 Al1100의 유동응력 데이터를 사용하였다. 빌렛과 다이 사이의 마찰상수 (m)는 열간압출 공정시 일반적으로 적용하는 0.6 으로 가정하였다. Fig. 5에 직접압출 공정 해석을 위한 4면체 유한요소 격자를 나타내었으며 빌렛의 격자는 초기 60000개로 구성하였다. 해석 과정은 빌렛이 다이 베어링 부를 빠져 나오는 단계까지 수행하였다.

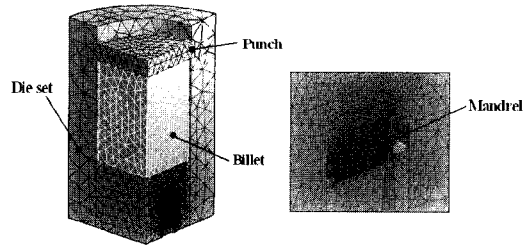


Fig. 5 Initial mesh system

Table 1 Conditions of simulation

Extrusion condition	value
Material of billet	Al1100
Material of tools	AISI H13(STD61)
Ram speed	7 mm/s
Initial Temperature of tools	500 °C
Initial Temperature of billet	480 °C
Friction factor (m)	0.6
Dimension of billet	φ 152 x h150 mm
Total Extrusion ratio	1243
Heat transfer coefficient	11

2.3 해석결과

2.3.1 소재유동 및 압출하중

Fig.6 은 해석결과 나타난 빌렛의 유동양상이다. Fig. 7 은 직접압출공정 해석의 결과로 나타난 압

출 과정 및 펀치가 받는 하중-스트로크 곡선을 나타낸 것이다. 포트홀 다이의 빌렛 유동양상은 다음과 같은 단계로 구분될 수 있다.

(1)은 빌렛이 램의 진행으로 컨테이너 내부에서 업세팅 되는 단계이다. (2)은 브릿지에 의해 분할된 빌렛이 포트홀 내부로 유입되는 분할단계이다. 그리고 (3)은 접합실 내부에 유입된 빌렛이 챔버 내부를 채워 나가며 접합면 상에서 서로 용접을 하는 접합단계이다. 최종적으로 (4)은 맨드릴을 통과하여 최종단면 형상을 이루며 다이 베어링을 빠져나오는 성형단계이다. 이후 압출과정은 정상 상태로 된다.<sup>(8-9)</sup> 본 해석 결과에 의해 컨테이너 튜브 성형시 필요한 가공 소요력은 약 300tons 정도임을 알 수 있다.

### 2.3.2 접합실 내부유동

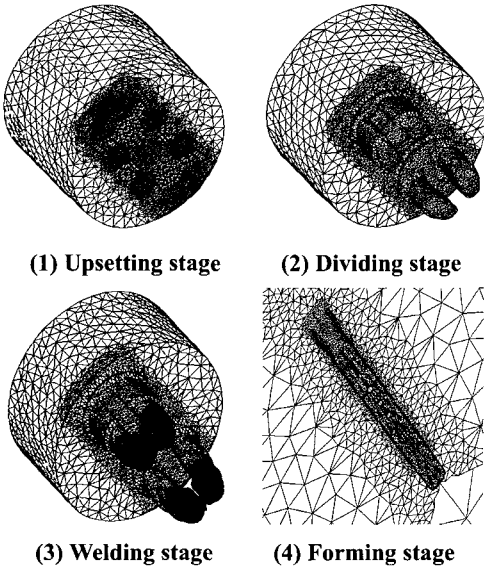


Fig. 6 Metal flow according to variations of stroke

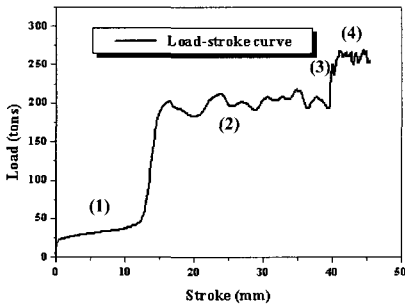


Fig. 7 Load-stroke curve

Fig. 8은 접합실 바닥면에서 빌렛이 맨드릴을 충전하는 과정을 램 스트로크에 따라 나타낸 것이며 Fig. 9는 빌렛의 속도 분포 및 맨드릴 충전 순서를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 속도 분포가 전반적으로 고르며 소재의 유동이 원활함을 알 수 있다. 그러나 접합실 바닥이나 포트홀 형상의 비 대칭성(Fig. 4(c))으로 인해 유동 속도가 0.05mm/s 이하의 데드메탈 영역이 챔버 바닥 좌측의 아래위 끝단면에(A)에 형성되었고 빌렛은 맨드릴을 동시에 충전하지 못한다. 접합실을 다 채운 빌렛은 왼쪽 끝단의 맨드릴 치형을 가장 먼저 충전하고, 치형은 충전된 빌렛의 유동을 제한시켜 밸런스를 맞추게 된다. 이는 웰드라인(Weld line), 웨이브(Wave), 트위스트(Twist)등의 압출재 결함성을 유발하는 원인이 된다.

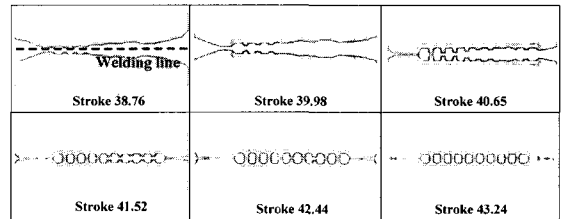


Fig. 8 Filling stages in the bottom of chamber

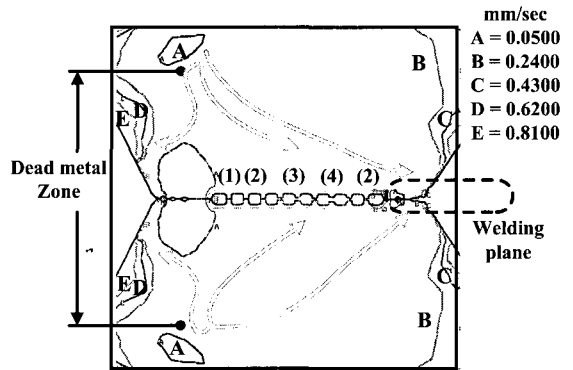


Fig. 9 Distribution of velocity in the bottom of chamber

### 2.3.3 접합압력

포트홀 금형의 압출성형에서 접합상태의 평가는 매우 중요한 사항이다. 접합단계에서 접합면상의 수직압력을 Fig. 9에 나타내었다. 유한요소 해석에서 접합압력은 소재의 항복강도와 비교하여 판단한다.<sup>(8-9)</sup> 접합시 높은 접합압력은 접합면의

조직을 치밀하게 하여 웰드라인등 압출재 결합 가능성을 줄일 수 있다. 맨드렐 양끝단에서 최종 출구부의 접합압력은 53~80MPa 나타났으며 그 이외의 부근에서는 80~93MPa, 그리고 각 치형부위에선 53MPa 로 소재 항복강도보다 2~3배 이상의 접합압력 분포가 나타났다. 따라서 본 압출공정 해석의 결과들을 고려하여 볼 때 생산되는 컨테이너 튜브의 건전성은 전반적으로 우수하다고 판단된다.

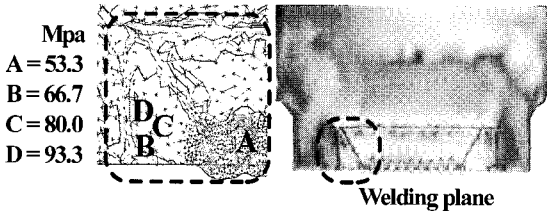


Fig. 10 Normal pressure at welding plane

### 3. 다이 강도 해석

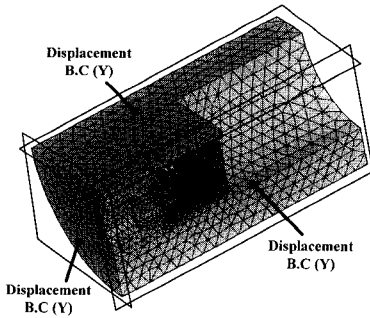


Fig. 11 Boundary conditions of strength analysis

압출 다이의 파손에 영향을 미치는 여러 인자 중 제일 중요한 것은 다이 내부 형상과 다이 재료의 강도적인 내구성이다. 다이의 수명은 제품의 치수나 경제성에 큰 영향을 미치므로 강도해석을 통한 응력 분포나 탄성 변형량 평가는 필수적이다.

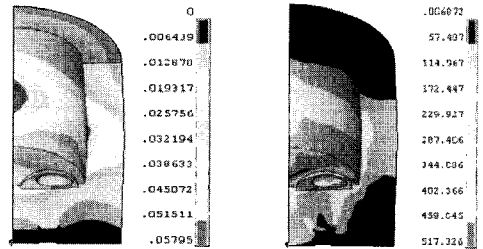
앞서의 직접압출 시 분할, 접합, 그리고 성형단계에서 빌렛이 받는 응력은 다이에 작용하는 힘으로 보간될 수 있다. 강도해석은 이들 각 단계마다 실시하였다. 해석코드는 Ansys 5.5를 사용하였으며 Fig. 11에 해석 시 사용된 경계조건을 나타내었다.

### 3.1 강도해석 결과

#### 3.1.1 분할 및 접합단계

Fig. 12 은 분할단계에서의 강도해석 결과, 변형 및 유효응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 12(a)의 최대 변형량은 컨테이너 내벽 중앙 부위와 포트홀 입구 부위에서 0.058mm 로 나타났다. 그리고 Fig. 11(b)의 유효응력은 포트홀 입구부위에서 최대값 517.326MPa 을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

접합 단계의 해석 결과 탄성변형량은 포트홀 입구에서 0.05mm 로 최대값을 나타내었다. 분할단계와 비교해 볼 때 컨테이너 외벽의 변형량은 줄어들었지만 포트홀 입구 주위는 더욱 많은 변형량(0.062mm)을 보였다. 이는 빌렛이 분할하는 과정에서 발생하는 압력으로 인한 다이의 구조적인 변형으로 이는 맨드렐의 휨을 유발하는 한 원인이 된다 이부위의 응력값은 약 600MPa 로 나타났으며 이는 컨테이너 튜브의 압출공정 중 다이가 받는 최대값으로 확인되었다.



(a) Displacement (mm) (b) Effective stress (MPa)  
Fig. 12 Results of strength analysis at dividing stage

#### 3.1.2 성형단계

Fig. 13 은 성형단계에서의 맨드렐 및 다이 베어링 부의 응력분포 및 변형량을 나타낸 것이다. 일반적으로 컨테이너 튜브의 압출 시 다이 베어링 부나 맨드렐 치형 양 끝단부의 변형량이 많아 맨드렐의 파손 가능성이나 제품치수 불량등을 유발한다.<sup>(10)</sup> 그러나 본 해석에서는 다이 베어링 부의 경우 어느 정도의 압력을 받는 것으로 나타났지만 맨드렐 치형에 미치는 응력값은 전반적으로 낮게 (44.5MPa) 나타났다. 이는 빌렛이 맨드렐을 충전하는 과정은 좌측에서부터 순서를 가지지만 충전되는 빌렛량을 고려한 슬릿 체적의 적절한 설계로 인해 모든 치형이 고른 응력분포를 나타내기 때문이다. 그림에서 x, y 방향으로의 맨드렐 변형량을 각각 확인한 결과 맨드렐은 전체적으로 우

측으로 변형하였음을 알 수 있다. 최대 x 축 변형량은 0.006mm 정도로 양호한 상태이다. y 축방향으로는 맨드렐의 변형은 거의 없으며 다이 베어링이 튜브의 중앙위치로 0.003mm 정도 변형하였음을 알 수 있었다.

해석에 사용된 다이 재료인 AISI H13(STD61)의 항복강도는 1650MPa 이다. 따라서 본 연구에서 설계된 포트홀 다이는 강도적으로 양호한 것으로 판단된다.

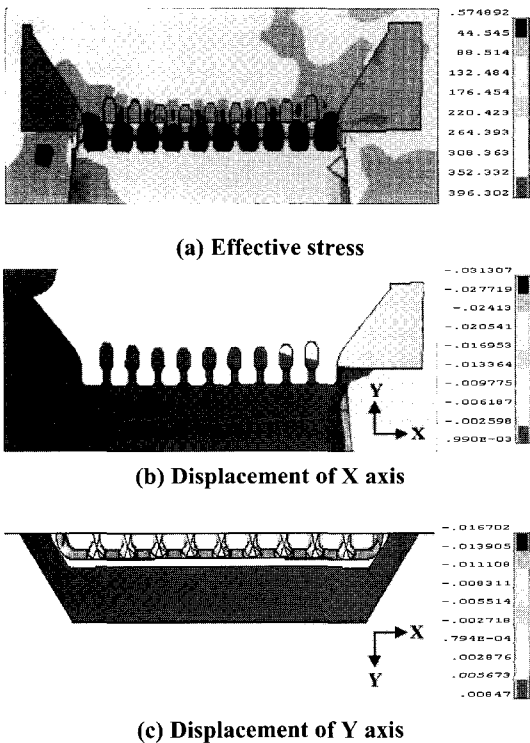


Fig. 13 Results of stress analysis at forming stage

#### 4. 컨덴서 튜브 압출실험

##### 4.1 다이 제작

이전의 직접압출공정 해석 결과 맨드렐 부위에서 소재의 충전과정이 불균일하나 포트홀 및 접합실 바닥면의 유동성이나 충분한 접합압력, 그리고 강도해석 결과 맨드렐 및 다이 베어링 부위의 변형량을 고려하여 볼 때 컨덴서 튜브의 압출생산에 적합하다고 판단하였다. 따라서 설계된 도면을 이용하여 다이 제작 및 압출 실험을 수행하였다.

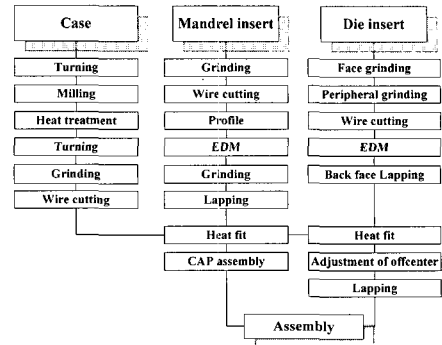


Fig. 14 Manufacturing process of porthole die

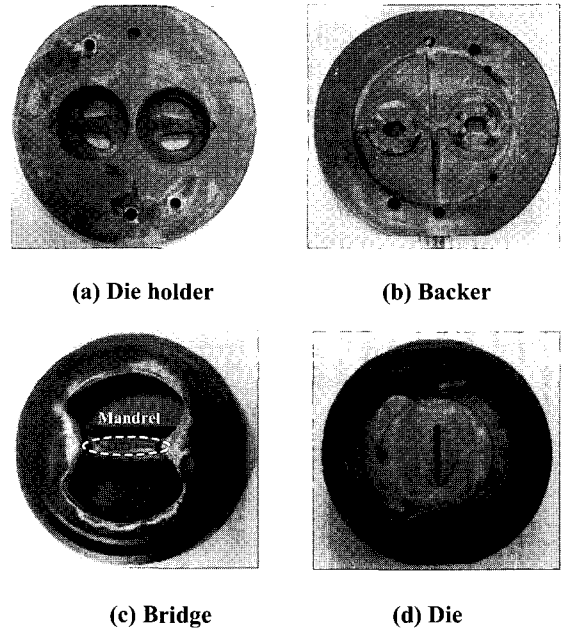


Fig. 15 Photographs of manufactured porthole die

Fig. 14은 본 실험에 사용된 다이의 제작 공정을 나타낸 것이다. 다이 케이스의 경우 먼저 선반과 밀링, 레이디얼 머신 등을 사용하여 전체적인 내외곽 형상을 가공한 후 열처리를 수행하였다. 이후 방전 가공과 마무리 연삭을 통해 제작하였다. 그리고 맨드렐 및 다이 인서트 경우 연삭, 프로파일, 방전 가공, 래핑등의 순서로 가공한 후 다이 케이스에 열박음을 수행하여 조립하였다. Fig. 15는 제작된 포트홀 다이의 부품형상을 각각 나타낸 것이다. 포트홀 다이 치수 및 형상은 앞선 직접압출 공정해석에 사용된 Fig. 3의 포트홀 다이 치수와 동일하다.

### 4.2 압출 실험

제작된 다이를 압출기에 장착하여 압출실험을 수행하였다. 압출에 사용된 장비는 수평식 단동압출기로 최대 용량은 1600ton 이며,  $\phi$  161 x h1500 mm 의 컨테이너 크기를 가지고 있다. 압출기에는 예열된 빌렛 외 컨테이너에도 가열 장치가 있으며 상시 일정 온도를 유지하기 위해 등은 압출 시스템(Isothermal Extrusion System)을 갖추고 있다. 그 외 2개의 튜브를 동시에 인출 시키고 적재하는 풀러(Puller) 및 런-아웃 테이블(Runout table), 압출재의 휨을 교정하는 스트레처(Straighter)등이 있다.

실험에 사용된 소재는 Alcan 사에서 제조된 Al 1100빌렛을 사용하였으며 빌렛의 사이즈는 ( $\phi$  152 x h500mm) 이다. 직접압출공정 해석시와 마찬가지로 빌렛의 예열온도는 480℃, 다이의 예열온도는 500℃로 유지하였다. 그리고 압출 초압을 줄이기 위해 첫번째 빌렛의 경우 예열 온도는 510℃로 약간 높이고 길이는 250mm 인 빌렛을 사용하였다. 압출방식은 일반적으로 열간 알루미늄 압출에 사용되는 무윤활 직접압출방식을 사용하였다. Table 2에 본 실험시 사용된 빌렛의 성분을 나타내었고 Table 3에 전반적인 압출실험 조건을 나타내었다.

**Table 2 Chemical compositions of Al1100**

Comp.	Al	Cu	Mn
%	99	0.05 - 0.2	Max 0.05
Comp.	Si+Fe	Zn	Other, total
%	Max 0.95	0.1	Max 0.15

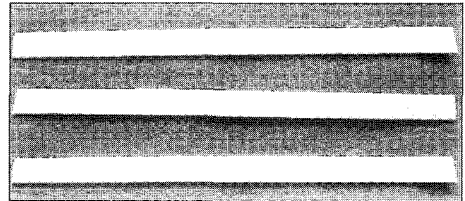
**Table 3 Extrusion conditions**

Main pressure	1600ton
Material of billet	Al1100
Material of tools	AISI H13(STD61)
Ram speed	7 mm/s
Preheating temperature of die	500 °C
Preheating temperature of billet	480 °C
Temperature of container	450°C

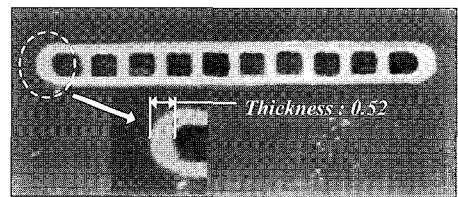
### 4.3 결과

시압출은 수회에 걸쳐 수행되었다. Fig. 16 은 압출된 컨덴서 튜브의 제품 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 외관 형상이 결함없이

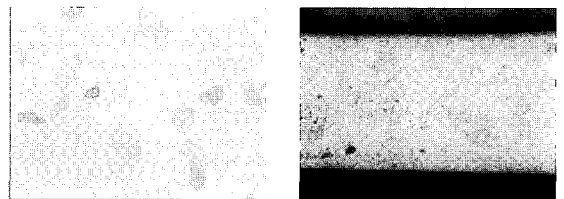
양호한 컨덴서 튜브 제품을 얻을 수 있었다. Fig. 17에 단면형상을 나타내었다. 냉매의 유로인 10개의 홀 모두 형상을 바르게 유지하고 있었으며 튜브의 좌측 끝단 부의 벽두께가 다른 부위보다 더 두꺼운 것을 알 수 있다. 이는 이전 직접압출 및 다이 강도해석 결과와 동일한 것이다. 그러나 본 실험에서 압출된 컨덴서 튜브의 경우 정밀오차범위(+0.10,-0.05) 이내에 있으므로 형상 및 치수정도는 만족함을 알 수 있다.



**Fig. 16 shapes of extrude condenser tube**



**Fig. 17 shapes of extrude condenser tube**



**(a) Front view (b) Side view**

**Fig. 18 SEM observations (x200)**

표면결합 여부를 확인하기 위해 제품의 정면 및 측면부위에 SEM 조직촬영을 수행한 결과를 Fig. 18 에 나타내었다. 확인 결과 압출재에서 흔히 나타나는 결정립 조대화 및 불순물 유입흔적이 나타나지 않고 비교적 양호한 표면조직 상태를 나타내었다. 접합 부위에 대한 평가는 보통 육안관찰을 통해 접합부 표면에 결함이 발생하지 않고 이음부가 관찰되지 않을 경우 대부분 양호한 접합상태를 가지는 것으로 판단되지만 좀 더 세밀한 관찰을 위해 향 후 접합강도 실험을 통한

접합성 평가가 요구된다.

## 참 고 문 헌

### 5. 결 론

본 논문에서는 냉방기용 컨덴서에 사용되는 다공 단면의 컨덴서 튜브 직접 압출 공정을 위한 성형 해석을 수행하여 압출하중, 유동양상, 그리고 접합압력등을 확인하였다. 또한 금형 강도해석을 수행하여 설계된 다이의 강성을 평가하였다.

그리고 다이 제작과 압출실험을 수행하여 해석 결과의 타당성 및 제품의 건전성을 평가하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 초소형 단면의 컨덴서 튜브를 생산하기 위해 각각의 접합실을 가진 2 홀 방식의 다이 설계를 수행하여 일반 단동압출기에서 작업 가능하며 생산성이 우수한 압출 다이를 개발하였다.

(2) 소재의 접합압력을 확인 한 결과 맨드렐 양 끝단에서 최종출구부의 접합압력은 53~80MPa 나타났으며 그 이외의 부근에서는 80~93MPa, 그리고 각 치형부위에선 53MPa 로 충분한 항복강도 이상의 접합압력을 나타내었다. 따라서 직접압출법으로 생산되는 컨덴서 튜브의 건전성은 전반적으로 양호함을 예측할 수 있다.

(3) 본 연구에서 설계된 포트홀 금형의 경우 맨드렐이나 다이 랜드부의 응력 집중현상이 나타나지 않고 변형도 거의 없는 것으로 나타나 강도적으로 매우 양호함을 알 수 있었다

(4) 다이의 제작 및 압출 실험을 통해 형상이 양호한 컨덴서 튜브 제품을 성형하였으며 표면 결함도 없는 것으로 나타났다.

(5) 실험결과를 앞서의 해석결과의 대부분 일치하여 본 연구에 사용된 시뮬레이션 기법 및 연구 방법의 유효성을 입증하였으며 일련의 연구과정을 통해 압출다이 제작 시간의 단축, 압출제품 질 향상, 생산 공정의 단축 등의 전반적인 생산환경의 향상에 기여하였다.

- (1) “알루미늄 기술사전,” 한림원, 1997.
- (2) H. Takahasi, T. Murakami, J.X. Xie, 1990, “Multi-Billet Extrusion and Forming of Circular Pipe from Four Billets”, *Advanced Technology of Plasticity of Plasticity*, Vol. 1, pp 323~328.
- (3) J. Xie, T. Murakami, H. Takahasi, 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) T. Yoneyama, K. Takatsuka, M. Kitagawa, Y. Hatamura, 1995, “Measurement of the Contact Pressure in Aluminum Hot Extrusion”, *Journal of the JSPT*, Vol. 36, No. 419, pp 1397~1402.
- (5) Xinjian Duan, X. Velay and T. Sheppard, 2004, “Application of finite element method in the hot extrusion of aluminium alloys”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 369, pp 66~75.
- (6) J. Zhou, L. Li and J. Duszczkyk, 2004, “Computer simulated and experimentally verified isothermal extrusion of 7075 aluminium through continuous ram speed variation”, *JMPT*, Vol. 146, pp 203~212.
- (7) “DEFORM™-3D,” SFTC, 1995.
- (8) J. M. Lee, B. M. Kim, Y. D. Jeong, H. Jo, H. H. Jo, 2003, “The effect of chamber bottom shape on die elastic deformation and process in condenser tube extrusion,” *KSPE*, Vol. 20, No. 5, pp. 66~72.
- (9) Jo hyung Ho, Lee Sang Gon, Lee Sun Bong, Kim Byung Min, 2001, “Prediction of Welding Pressure in the Non Steady State Porthole Die Al7009 Tubes,” *Journal of the KSPE*, Vol. 18, No. 7, pp.179~185.
- (10) 이정민, 김병민, 정영득, 조훈, 조형호, 2003, “접합실 높이에 따른 컨덴서 튜브 강도해석 및 금형강도 해석,” *한국소성가공학회지*, Vol. 12, No. 3, pp.214~220.