

Al3003 12 셀 컨덴서 튜브의 압출을 위한 공정해석 및 금형설계

이상호*, 이정민*, 조형호**, 조 훈**, 김문배***, 김병민#

Process Analysis and Die Design for Al3003 Condenser Tube Extrusion with 12 Cell

Sang Ho Lee*, Jung Min Lee*, Hyung Ho Jo**, Hoon Jo **, Mun Bae Kim*** and Byung Min Kim#

ABSTRACT

Condenser tubes are mainly produced by precision extrusion with a porthole die and are used in the flow pass of refrigerant cooling systems in automobiles. The recent technical trend of condenser tube requires the tube to be of more multi cellizing, high strength and small size, and to increase the heat transfer area and heat efficiency. Hence, this paper is shown that the results of FE-simulation are in good agreement with the experimental ones. Finally, the extrusion die shape is proposed through analysis of FE-simulation and performance of trial extrusion. Chamber shape dimension and initial temperatures of die is adjusted analysis results. And the possibility of extrusion is estimated that forming load, welding pressure and stress analysis of die in this paper. The validity of simulated results was verified into extrusion experiments on the condenser tubes.

Key Words : Porthole die (포트홀 금형), Multi-cell condenser tube (다공형 컨덴서튜브), FE-simulation (FE-시뮬레이션), Mandrel (맨드렐), Welding pressure (접합 압력), Stress analysis (강도해석)

1. 서론

컨덴서 튜브는 자동차 에어컨의 응축기 등에 이용되는 부품으로 단면에 냉매의 유로인 소형셀을 가지고 있으며 일반적으로 다공 박막의 형태로 설계된다. 컨덴서 튜브는 폭 15mm 이하, 셀 수 15 이상인 다공형 컨덴서 튜브(Multi-cell condenser tube)로 발전할 것으로 예상된다.

컨덴서 튜브를 직접압출 방식으로 제조하기 위해서 압출성, 가공성, 내식성, 브레이징성 등의 기계적, 물리적 성능이 우수한 Al3000 계열 알루미늄 합금 빌렛이 사용된다.

기존의 금형 설계는 대부분 설계자의 경험에 의해 이루어지며 시작품 제작 및 시험을 거친 후 금형을 교정하는 방식으로 많은 시행착오 및 제작비 상승 등의 문제점을 안고 있다. 이에 따라서

접수일: 2006년 12월 12일; 게재승인일: 2007년 9월 10일

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 한국생산기술원 나노소재개발팀

*** ㈜유창금속 기술연구소

교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr Tel: (051) 510-3074

최근 금형을 제작할 때, 최적의 금형 설계 및 공정 변수를 얻기 위한 유한요소법 등의 수치해석방법으로 금형 설계에 필요한 구체적인 정보를 얻을 수 있게 되었다.^{1,2}

본 연구는 Al3003 빌렛을 사용하여 요구품질을 만족하는 컨덴서 튜브 생산을 위한 압출 금형을 개발하고자 한다. 그리고 Al3003 소재에 대하여 압출공정의 유한요소해석을 수행하여 가공소요력 및 데드메탈 영역(Dead metal zone)과 접합압력(Welding pressure) 등을 확인하였다. 또한 금형의 제작 및 Al3003 컨덴서 튜브의 압출실험을 수행하였다.

2. 압출 금형 설계

Fig. 1 은 본 연구 개발 제품인 컨덴서 튜브의 단면과 제품의 치수공차를 나타낸다. 튜브는 12 개의 셀을 가지고 있으며 크기는 14mm×1.2mm 이다. 목표 치수와 요구 공차를 만족하기 위하여 압출 금형을 설계하였다.

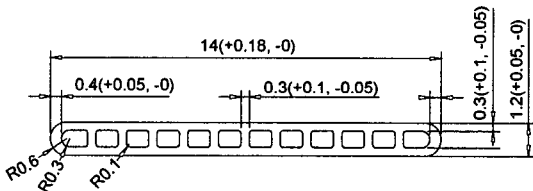
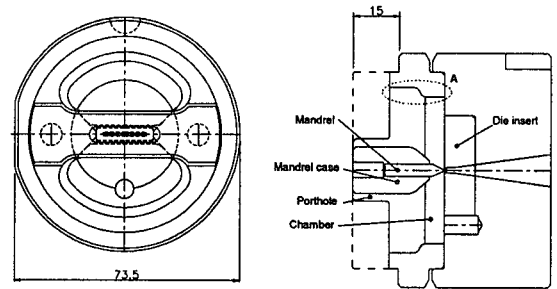


Fig. 1 Shape of section area and required dimension

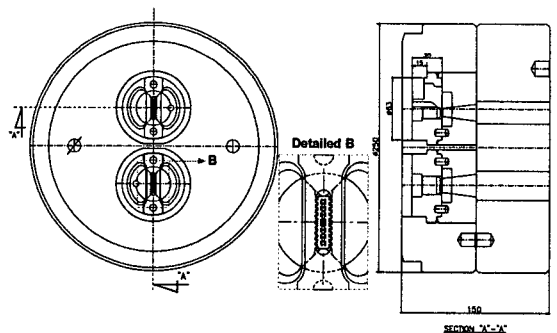
Fig. 2 에서는 본 연구에서 사용된 12 셀 압출 금형의 각 부품의 도면을 나타낸 것이다. 일반적으로 컨덴서 튜브 압출을 위한 포트홀 금형의 구조는 크게 다이 부분과 맨드릴 부분으로 나눌 수 있는데 특히 다이 베어링이 있는 다이 인서트와 튜브의 구멍을 결정하는 부분으로 포트홀 압출에서 가장 취약한 부위로 분리 설계되었다. 컨덴서 튜브의 내부 벽 두께와 셀의 크기가 미세함에 따라 압출 금형에서 압력과 관련하여 파손의 위험이 있는 곳은 맨드릴로 판단된다. 또한 압출 공정에서 발생하는 내부 압력에 의한 맨드릴의 변형은 각각의 부위에서의 치수 공차에도 밀접한 관련이 있다.

금형의 포트홀 개수 및 위치는 컨덴서 튜브의 좌우 대칭인 단면 형상을 고려하여 압출시 소재가 챔버내에서 베어링 부를 통과 할 때 접합면이 정 가운데 수평으로 위치하도록 설계하였다. 그리고

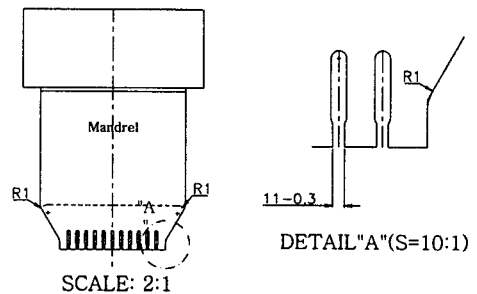
빌렛의 유동을 적절히 구속시키기 위해 Fig. 2(a)-A 에서 처럼 포트홀 내부에 단차를 두어 배치하였다. 챔버 높이는 5mm 로 설계 하였고, 챔버 바닥면은 챔버 내부를 채우는 빌렛의 유동을 좋게 하고 맨드릴 양 끝단의 빌렛이 마지막으로 맨드릴을 충전 하도록 하기 위해 반 리본형상으로 설계하였다. LIP 의 경우, 빌렛의 $\Phi 152\text{mm}$ (6 inch)과 컨테이너 직경 $\Phi 158\text{mm}$ 을 고려하여 외경을 $\Phi 250\text{mm}$, 길이는 75mm 로 결정하였다.



(a) Bridge and Die



(b) Backer and LIP



(c) Mandrel

Fig. 2 Construction of porthole die

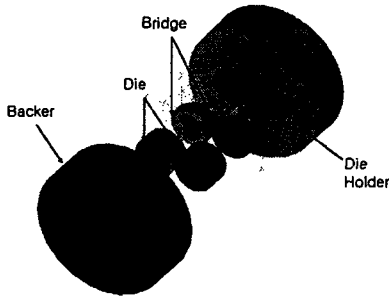


Fig. 3 Model of porthole die (I-DEAS 9.0)

Fig. 3 은 범용 해석 프로그램인 I-DEAS 9.0 을 이용하여 본 연구에 사용된 포트홀 금형의 3D 형상을 나타내는 그림이다.

3. 직접 압출 공정해석

3.1 압출 공정 조건

압출 공정해석은 강소성 유한요소 프로그램인 DEFORM 3D 을 사용하였다. Fig. 4 는 압출 성형 해석을 위하여 금형과 빌렛 형상을 유한요소격자를 나타낸다. 해석에 사용된 빌렛의 유한요소 격자는 총 80000 개이다.

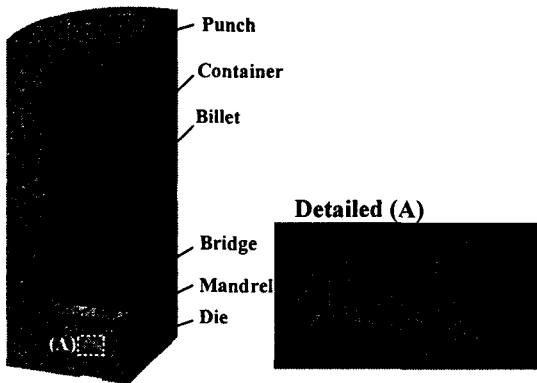


Fig. 4 Initial mesh system

압출 공정 해석 조건은 Table 1 에서 나타낸다. 압출 금형 및 제품의 형상을 고려하여 1/4 의 형상으로 유한 요소 해석을 수행하였다. 빌렛의 소재는 Al3003 합금을 사용하였고, 금형 소재는 맨드릴은 초경합금(WC)을 사용하였으며, 나머지 금형의 경우에는 열간 금형강인 AISI H-13 을 사용하였다. 초

기 금형의 온도와 빌렛의 온도는 450℃로 설정하였다.

압출 해석 시 빌렛은 열연성 모델로, 금형은 전부 변형을 수반하지 않는 강체로 설정하였다. 마찰상수(m)는 무윤활의 열간 압출 시 일반적으로 사용되는 0.6 으로 가정하였다.³

Fig. 5 는 맨드릴의 정면과 측면 부에서의 소재의 유동을 나타낸다. 초기 소재가 챔버를 채우고 난 이후 맨드릴과 베어링 부의 사이를 빠져 나와 제품이 생산된다. 따라서 본 연구에서의 해석은 빌렛이 다이-맨드릴 부를 빠져 나올 때까지 수행하였다. 즉, 브릿지 부와 챔버를 지나 맨드릴과 다이 베어링부에서 접합하기 전까지의 비정상상태를 지나 정상상태로 들어갈 때까지 수행하였다.^{4,6}

Table 1 Condition of FE-simulation

Extrusion condition	Value
Material of billet	Al3003
Material of tools	Mandrel-WC
	Others-AISI H13(STD61)
Ram speed	1 mm/s
Initial Temperature of tools and billet	450℃
Friction factor (m)	0.6
Dimension of billet	φ 152 x h150 mm
Reduction area(exit)	99.9%

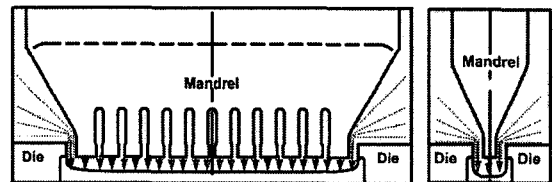


Fig. 5 Metal flow at mandrel section

3.2 해석 결과

Fig. 6 은 앞에서의 공정조건을 통하여 유한요소 해석을 수행한 결과로 압출 공정 해석의 하중을 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 압출하중은 최대 하중 1300 ton 으로 나타났다. 그러나 본 연구에 적용될 압출기 최대 하중값이 1250 ton 인 것을 생각해 볼 때 기존의 압출 금형에서 압출이 불가능

할 것으로 예상된다.

그리고 소재의 유동은 브릿지 부를 빠져 나와 챔버에서 맨드릴 양끝 치형의 측면에 닿게 되면 맨드릴에 의해 다시 압출방향으로 변하게 되고, 이때 맨드릴에 심한 압력이 작용하게 되어 맨드릴 변형을 일으키게 된다. 이러한 변형은 최종 제품의 치수정도에 영향을 미치게 된다.

Fig. 7 은 챔버 바닥부에서의 충전 과정을 보여주는 그림이다. 중심부를 먼저 채우고 난 이후 중

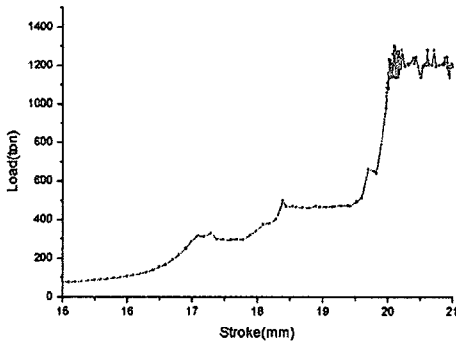


Fig. 6 Load-stroke curve

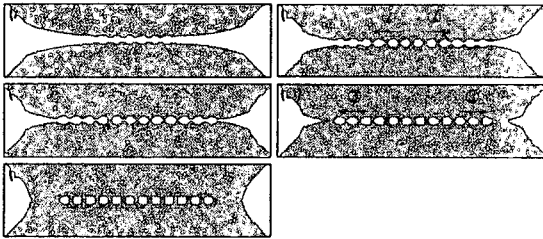


Fig. 7 Filling in the bottom of chamber

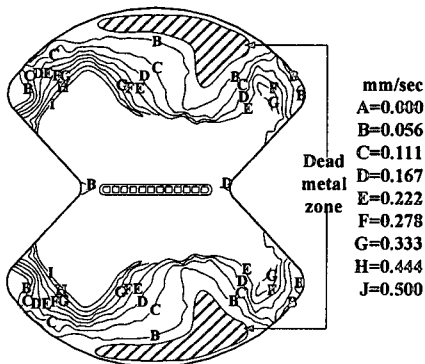


Fig. 8 Distribution of velocity in the bottom of chamber

심에서 순차적으로 베어링 부까지 채우는 것으로 나타났다. (충진 순서 ①→②→③) 소재가 맨드릴 치형부에서 거의 동시에 채워지게 되어 치형부의 변형은 크게 없을 것으로 예상된다. 그리고 이는 강도해석을 통하여 확인하였다.

그리고 압출 공정에서 데드메탈 영역은 챔버 내에 소재가 충전된 이후 맨드릴을 통하여 베어링 부를 빠져 나올 때 소재의 유동이 거의 없는 부분을 나타낸다. 데드메탈 영역은 너무 넓게 분포하는 것은 압출 제품의 결함과 높은 하중을 발생 시킨다. 그러나 반대로 너무 적은 데드메탈 영역은 중공형 압출 제품에서의 접합 시 양호한 접합 압력을 가질 수 없으므로 접합면에서 충분한 접합이 이루어지지 않는다. Fig. 8 은 챔버 바닥부 소재의 속도 분포를 나타내는 그림이다. 맨드릴 치형부에서 소재의 유동이 가장 빠르게 나타났으며, 2 홀 구조의 금형 형상으로 인하여 그림의 왼쪽의 점선 부위는 빌렛의 중심부와 가까워 오른쪽보다 유동이 빠른 것을 확인할 수 있다. 2 홀의 경우 왼쪽에서 데드메탈 영역이 매우 작게 분포함으로 접합압력이 낮을 것으로 예상된다.

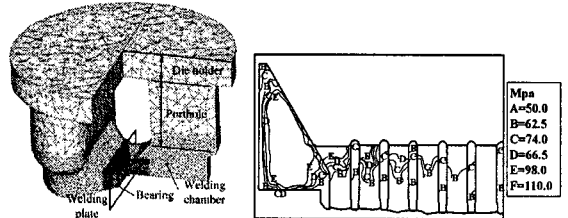


Fig. 9 Normal pressure at welding plane

초기 빌렛이 포트홀을 통과하여 나누어지고 챔버내에서 접합이 이루어져 맨드릴과 베어링 부를 통과할 때 중공형 제품을 생산할 수 있게 된다. Fig. 9 는 접합면에서의 수직 면압을 나타내는 그림이다. 접합부위는 그림에서 나타나는 접합면 (Welding plane)에서 소재의 접합이 이루어진다고 가정하였다. 접합 부위의 수직면압을 통하여 접합력을 평가하였다. 중공형 압출제품에 있어서 접합압력이 너무 작은 경우 접합 부위에서 결함으로 나타난다. 본 연구에서의 소재 접합압력은 62~110 Mpa 분포로 소재의 항복강도(41.4 MPa)의 1.49 ~ 2.66 배 이상의 분포를 보였다. 베어링 부에서 소재의 항복강도의 2.66~5 배 가량으로 비교적 높게

나타났으나 중심부에서 소재의 항복강도의 1.49 ~ 1.8 배로 베어링 부 보다 낮은 접합 압력 분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. 해석 결과에서 접합 압력은 소재 항복강도보다 1.5 배 이상으로 양호하나 국부적으로 낮은 부위에서 결함이 예상된다.⁷

4. 금형 강도 해석

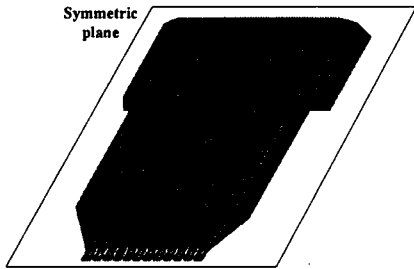


Fig. 10 Boundary conditions of strength analysis

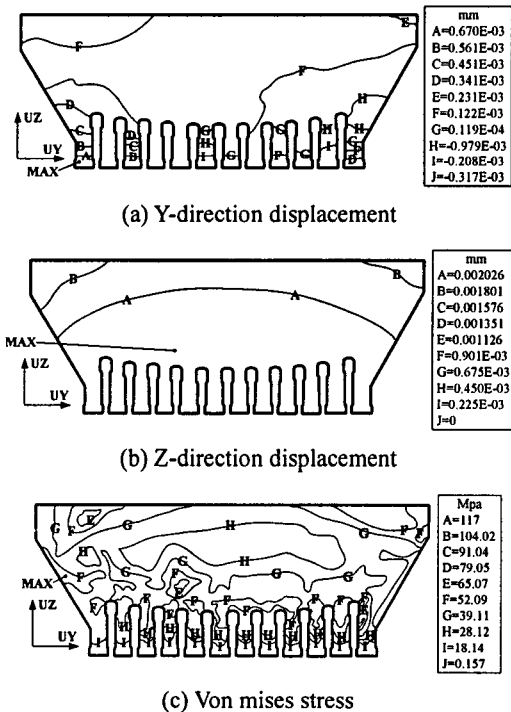


Fig. 11 Results of stress analysis (Mandrel)

압출 금형의 파손에 영향을 미치는 여러 인자 중 제일 중요한 것은 금형 내부 형상과 금형 재료의 강도적인 내구성이다. 금형의 수명은 제품의 치

수나 경제성에 큰 영향을 미치므로 강도해석을 통한 응력 분포나 탄성 변형량 평가는 필수적이다.

본 연구에서는 제품의 치수정밀도에 큰 영향을 주는 맨드릴에 대하여 강도해석을 수행하였다. Fig. 10 은 맨드릴 부의 강도해석을 위한 경계조건을 나타내는 그림이다. 금형의 형상을 고려하여 대칭면(Symmetric plane)을 설정하였다.

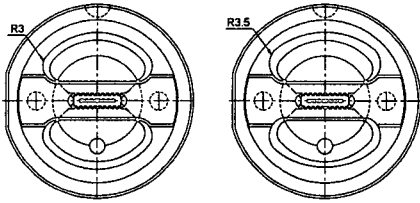
4.1 해석 결과

Fig. 11 은 맨드릴의 강도해석 결과이다. 맨드릴 치형부는 소재의 압력을 가장 많이 받는 부위로 최대 변형량은 0.002mm 정도로 압출방향으로 발생하였다. 맨드릴의 재료인 초경합금(WC)의 압축 항복강도는 2680Mpa 으로 크지만, 인장항복강도는 344Mpa 로 작다. Fig. 11(b)에서 Z 방향으로 맨드릴 치형부에서 인장이 발생하고 이때의 응력값이 117Mpa(Fig. 11(c))이 발생하였다. 이는 초경합금의 인장항복강도에 미치지 못하여 맨드릴은 강도적으로 양호한 것으로 판단된다. 그러나 연속공정에 있어서 치형의 양끝 단 부의 응력이 최대가 되는 곳에서 파손이 예상된다. 맨드릴 중앙부보다 상대적으로 맨드릴 양끝에서 유입되는 소재의 유동량이 많아 맨드릴 양끝에서 높은 압력이 작용하기 때문이다.⁸

5. 금형 설계 개선

폭 14mm 컨덴서 튜브의 압출에서 기존의 포트홀 금형의 형상으로 압출할 경우 맨드릴이 소성 변형은 없는 것으로 나타났으나, 하중이 1300 ton 으로 나타나 적용될 압출기의 용량 1250 ton 에 초과하는 수치로 압출이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 금형 형상 수정으로 인하여 금형의 소성변형은 일으키지 않고 1250 ton 용량의 압출기에서 압출이 가능한 공정 조건을 찾고 이 때의 금형의 강도해석을 수행하였다. Fig. 12 는 기존의 금형과 재설계된 금형의 챔버 바닥 도면을 나타낸 그림이다. 소재의 유동을 높여 낮은 접합압력을 높이고 압출하중을 낮추기 위하여 기존의 금형의 챔버 바닥부 곡률반경을 3 인 것을 3.5 로 수정하였다. Table 2 는 챔버 곡률과 램 속도(Ram speed)에 따른 출구부 온도, 접합압력 그리고 압출하중을 나타낸다. 결과에서 나타났듯이 Case 2 에서 920 ton, Case 4 에서 990ton 으로 압출기 용량 1250ton

을 초과 하지 않는 압출하중이 나타났으며 이때의 접합압력도 양호한 것으로 나타났다.

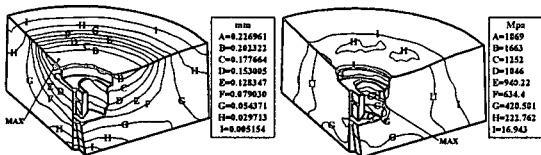


(a) Existing die (b) Redesigned die

Fig. 12 Camber shape of dies

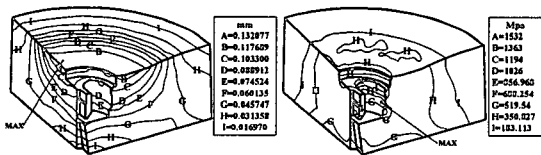
Table 2 Result of FE-simulation

Case	Radius of chamber	Initial temp.($^{\circ}$ C)		Ram speed (mm/s)	Outer temp. ($^{\circ}$ C)	Normal pressure (Mpa)	Load (ton)
		Billet	Die				
1	3	510	500	1.0	520	190~285	1600
2				1.0	420	100~200	920
3	3.5	510	500	0.1	410	94~206	1400
4				0.2	445	111~222	990



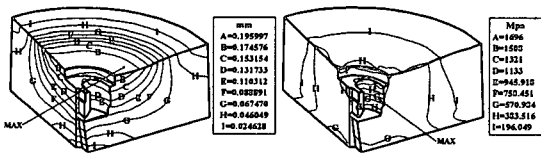
Displacement von Mises stress

(a) Case 1



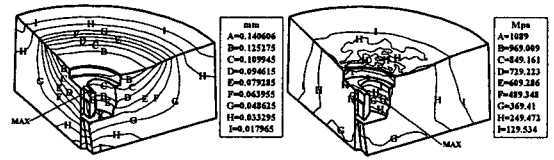
Displacement von Mises stress

(b) Case 2



Displacement von Mises stress

(c) Case 3



Displacement von Mises stress

(d) Case 4

Fig. 13 Result of die strength analysis

금형의 소재는 열간 금형강인 AISI H13 으로 항복응력값이 1400 Mpa 을 가진다. Fig. 13 은 각각의 금형 강도 해석결과인 변형량과 유효응력의 분포를 나타낸다. 결과에서 나타나듯이 (d) Case 4 가 금형의 항복강도 1400 Mpa 이하의 값이 분포함으로 강도적으로 양호하다 할 수 있다.

Case 4 를 제외한 나머지 Case 에서 금형의 항복응력 이상의 값을 가지므로 소성변형이 예상된다. 따라서 성형 해석을 통하여 압출기의 용량에 적합한 하중을 가지는 Case 를 찾고 금형의 강도 해석을 통하여 금형의 소성변형여부를 판단하였다. Case 4 의 조건 챔버 바닥부 곡률반경 3.5, 소재 온도 510 $^{\circ}$ C, 금형온도 500 $^{\circ}$ C, 램속도 0.2mm/s 에서 압출기 용량을 만족하면서 금형의 소성변형을 유발하지 않는다고 판단된다.

6. 압출 실험

6.1 압출 실험 조건

Table 3 Experimental condition of extrusion

Extrusion conditions	Value
Ram speed	0.2mm/sec
Extrusion temp.	450 $^{\circ}$ C
Reheating temp. of Billet	510 $^{\circ}$ C
Reheating temp. of Die	500 $^{\circ}$ C

Table 3 은 실험 조건을 나타낸다. 빌렛의 예열 온도는 510 $^{\circ}$ C, 금형의 예열온도는 500 $^{\circ}$ C로 유지하고 압출온도는 450 $^{\circ}$ C로 설정하였고 압출속도는 앞선 유한요소 해석과 동일한 0.2mm/s 로 설정하였다. 압출방식은 무윤활 직접압출방식을 사용하였다. Fig. 14 는 실험에 사용된 압출장비와 포트홀 금형을 나타내는 그림이다. 압출에 사용된 장비는

수평형 타입으로 최대 압출용량은 1250 ton 이다. Fig. 15 는 컨덴서 튜브를 생산하는 것을 보여주는 그림이다. 압출은 2 홀 방식으로 생산된다.

6.2 압출 실험 결과

기존의 압출공정에서 유한 요소 해석을 통하여 공정해석을 수행하지 않은 상태에서 금형을 설계 하고 제품을 생산할 때, 연속 압출공정에서 맨드릴의 치형부의 파손을 가져온다. Fig. 16 은 파손된 금형을 나타낸 그림이다. 맨드릴 강도해석에서 예측했듯이 양 끝단부의 최대 응력이 발생하는 부위에서 파손이 일어났다. 제품형상 또한 Fig. 17 과 같이 치수공차에 크게 벗어나는 형상을 가지고 있으며 표면 또한 압출에 의한 라인(Line)이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

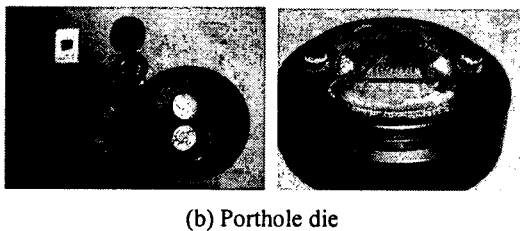
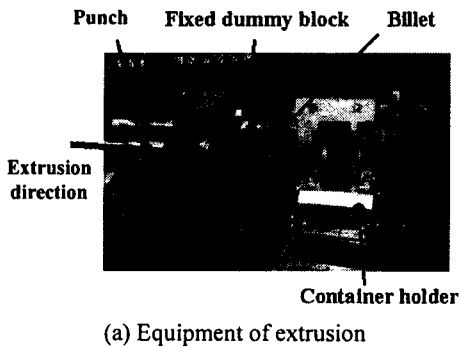


Fig. 14 Photographs of extruder and manufactured porthole die



Fig. 15 Production of condenser tube

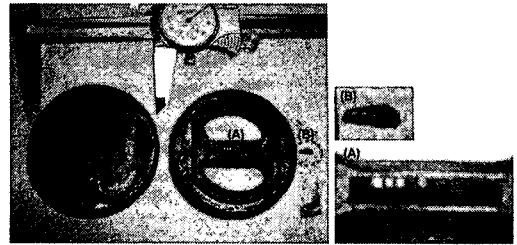


Fig. 16 Fracture of the extrusion die after extrusion

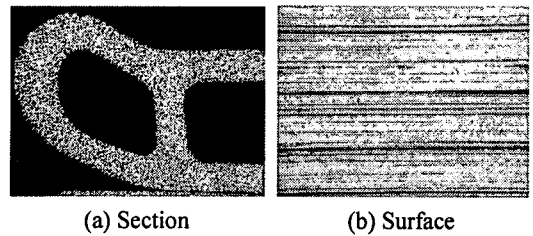


Fig. 17 Extruded condenser tube before stress analysis

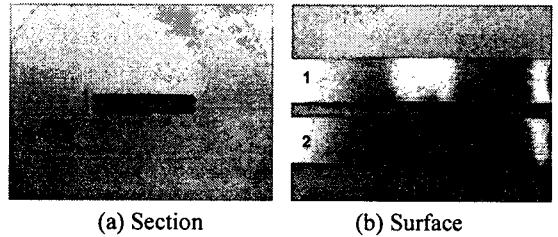


Fig. 18 Shape of extruded Al3003 Condenser tube

그리하여 위의 결과와 같이 챔버 바닥부 곡률을 변경하여 다공형 컨덴서 튜브용 압출 금형을 다시 제작하였다. 재설계된 금형을 통하여 압출공정을 수행한 결과, 금형의 파손을 수반하지 않고 Fig. 18 과 같이 양호한 단면 및 표면의 상태를 가지는 Al3003 컨덴서 튜브를 생산할 수 있었다.

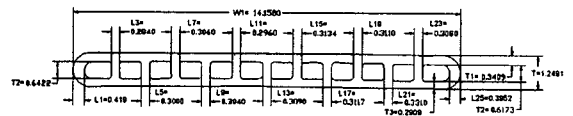


Fig. 19 Dimensions of extruded condenser tube

Fig. 19 는 완성된 컨덴서 튜브의 치수공차를 나타낸다. 압출된 제품은 폭(W, 14(+0.18, -0)), 높이(H, 1.2(+0.05, -0)), 곡면부 벽두께(T1, 0.4(+0.05, -0)), 나머지 벽두께(T2, 0.3(+0.1, -0.05))의 치수공차를

만족하였다. 그리고 미세 조직 관찰 결과를 Fig. 20에 나타내었다. 조직(Grain)이 미세화된 것을 확인할 수 있다.

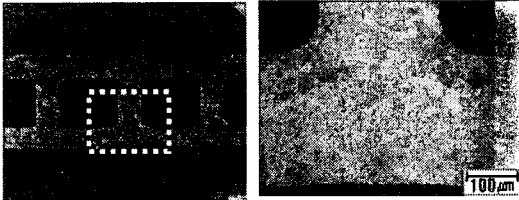


Fig. 20 Microstructures of condenser tube (x100)

7. 결 론

본 연구에서는 Al3003 컨덴서 튜브 압출 금형 개발을 위해 우선 직접 압출 공정을 위한 성형 및 금형 강도해석을 수행하였으며, 압출실험을 통하여 검증하였다. 이상의 개발 과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수정 전 금형의 압출 가공소요력이 1300ton 으로 압출기 용량을 초과하여 압출이 불가능할 것으로 예상되어 챔버 바닥 곡률 6° 에서 7° 로 수정하여 압출 가공소요력 990ton 으로 예상되어 압출 가능한 조건을 예측할 수 있었다.
- (2) 포트홀 압출에서 소재의 접합부위의 수직압력 분포가 소재의 항복강도 41.4Mpa 의 1.49~2.66 배에 이른다. 따라서 압출제품은 충분한 접합 강도를 가질 것으로 예상된다.
- (3) 맨드릴 치형부의 강도해석결과, 초기 압출시 변형이 거의 없는 것으로 나타나 강도적으로 안전하지만 연속공정에 있어서 맨드릴 치형부의 파손의 위험이 예상된다.
- (4) 기존의 압출금형을 챔버 바닥부 곡률반경을 3에서 3.5로 재설계하였을 경우, 성형해석 후 금형강도해석을 수행한 결과, 빌렛 초기온도 510℃ 금형 초기온도 500℃, 램 속도 0.2mm/s가 가장 양호한 것으로 나타났다.
- (5) 압출실험을 수행한 결과 기존의 금형으로 연속공정을 수행할 경우 맨드릴 치형부의 파손이 발행하는 것을 확인하였으며, 챔버 바닥부 곡률반경을 3.5로 수정하였을 경우, 치수공차를 만족하는 압출제품을 생산할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-03003-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Xie, J., Murakami, T. and Takahasi, H., "Metal Flow in the forming of Hollow Cylinder by Four-Billet Extrusion," Journal of the JSPT, Vol. 31, No. 351, pp. 502-508, 1990.
2. Kim, B. M., Bea, J. H. and Lee, J. M., "A Study of Extrusion Process for Al3003 Condenser Tube," J. KSME, Vol. 29, No. 8, pp. 1043-1050, 2005.
3. SFTC, "DEFORMTM-3D," SFTC Inc., 1995.
4. Hsiang, S. H. and Liao, C. S., "Study on Hot Extrusion of Tubes," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 63, Issues 1-3, pp. 254-259, 1997.
5. Lee, E. H., Mallet, R. L. and Yang, W. H., "Stress and deformation analysis of the metal extrusion process," Comp. Meth. In Appl. Mech. Eng., Vol. 10, Issue 3, pp. 339-353, 1997.
6. Lee, J. M., Kim, B. M., Jeong, Y. D., Jo, H. and Jo, H. H., "The effect of chamber bottom shape on die elastic deformation and process in condenser tube extrusion," J. KSPE, Vol. 20, No. 5, pp. 66-72, 2003.
7. Xie, J., Murakami, T. and Takahasi, H., "Measurement of Pressure Distribution in Forming of Pipe by Four Billet Extrusion," Journal of the JSPT, Vol. 31, No. 359, pp. 1469-1474, 1990.
8. Lee, J. M., Kim, B. M., Kang, C. G. and Jo, H. H., "Development of Direct Extrusion Process on Al1050 Condenser Tube by using Porthole Die," J. KSPE, Vol. 21, No. 7, pp. 53-61, 2004.