

# 열간 배압 성형 기술을 이용한 Al - Si 합금 스크롤의 정형 제조 기술

이영선\* · 이정환\* · 이상용\* · 박영도\*\* · 이운섭\*\*\*  
(1999년 8월 31일 접수)

## Hot Precision Forging with a Back-pressure of Al-Si Alloy for Scroll Type Compressor Parts

Y.S.Lee, J.H.Lee, S.Y.Lee, Y.D.Park and W.S.Lee

### Abstract

Hot precision forging with a back pressure was investigated for manufacturing of compressor parts made of Al-Si alloy. Disk-shaped blank made of Al-Si alloy was hot forged, and ribs were formed by loading back pressure on their top. The influence of the back pressure and die temperature on forgeability and properties of parts made of Al-Si alloy were examined. Using the F.E.M. simulation, we found the optimum value of back-pressure. The prototypes of scroll parts were forged into the near-net shape and satisfied the required properties.

**Key Words** : Hot Forging, Scroll Part, Near-Net Shape, Back-Pressure, Al-Si Alloy

### 1. 서 론

최근 자동차 및 가정용 냉방기의 국제적인 추세는 냉각효율이 높고, 진동소음이 적은 스크롤 압축기(Scroll Compressor)의 적용이 증대되고 있다. 냉방기용 스크롤 압축기는 에너지 효율이 높고 진동소음이 적으며, 차세대 냉매인 HFC로 구동이 가능하고 압축기의 크기가 작아 냉방기의 부피를 줄일 수 있으며, 냉매가스 누설이 적고 토크 및 하중 변동이 적은 장점들을 갖고 있다.

스크롤 압축기는 고정 스크롤과 구동 스크롤의 편심 운동에 의해 압축되므로 이들 스크롤의 특성이 압축기 특성에 매우 중요한 부분을 차지한다.<sup>(1)</sup> 따라서, 최근 선진국에서는 스크롤을 기존의 주철재에서 경량의 Al합금으로 대체하여 관성 중량을 감소시켜 초기 전력감소, 에너지 효율 증대, 진동 소음의 감소 등을 꾀하고 있다. 이들 스크롤은 강도와 내마모 특성이 우수해야 하기 때문에 소재로는 고규소 Al합금이 적합하며, 제조공정으로는 요구 강도 측면에서 주조공정 보다는 열간단조 공정

\* 한국기계연구원 재료공정연구부  
\*\* 부경대학교 산업과학기술연구소  
\*\*\* LG전자 공조 Comp. OBU.

이 이용되고 있다.

그러나, 냉방기용 스크롤 압축 컴프레서의 가동 부품은 Fig. 1과 같은 형상을 가지고 있기 때문에 일반적인 열간 단조를 이용할 경우는 정형제조(Near Net Shape Manufacturing)가 매우 곤란하다. 따라서, 선진국의 경우는 분말 단조와 열간 단조 공정에 배압력을 작용시킬 수 있는 특수한 프레스를 개발하여 특성향상과 정형제조를 도모하고 있다.<sup>(2~5)</sup>

그러나, 본 연구에서는 고가의 특수 프레스를 이용하지 않고 부위별 속도제어가 가능한 배압 성형 시스템을 개발하고 유한요소해석을 이용하여 배압 성형의 공정조건을 선정한 후, 금형 설계·제조를 통해 스크롤 부품을 정형 제조한 사례와 개발된 배압 성형 기술의 장점을 소개하고자 한다.

## 2. 열간 단조에 의한 제조시 문제점

Fig. 2는 일반적인 열간 단조에 의해 제조된 구동 스크롤의 단면을 보여주는 사진으로 부위별 속도 차이에 의해 리브의 길이가 부위별로 상이하게 나타나고 있다. 이와같이 부위별 길이편차가 발생되면 후가공시 제거되는 소재량이 증가되므로 재료 회수율이 저하되며 부위별 속도 차이에 의해 금형에 가해지는 응력 또한 불균일해지기 때문에 금형 수명이 저하된다. 따라서 리브부 길이를 부위별로 균일하게 제조할 수 있는 단조기술이 필요하며 이를 위해서는 예비성형체를 이용할 수 있으나, 스크롤의 경우는 예비성형체를 최종형상으로 단조시 제품 위치 선정이 곤란하며 일정한 리브부의 길이를 얻는 것에도 한계가 있기 때문에 예비성형체를 이용하는 것 또한 곤란하다.

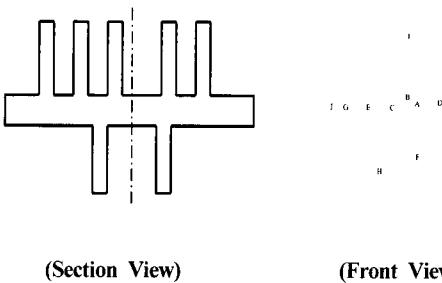


Fig. 1 The drawing of the scroll rotating part

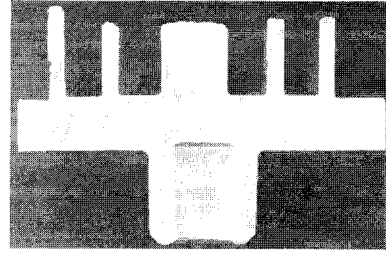


Fig. 2 The section of scroll rotating part manufactured by conventional hot forging

## 3. 열간 배압 성형 공정 설계

배압 성형 기술이란 공·유압, 우레탄 고무 등을 이용하여 발생시킨 압력을 성형품의 일부에 부하시켜 가공하는 공정을 말하며, 그 원리를 도식적으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 일반적인 압출형 단조에서는 주하중(Main Pressure)에 의한 일방향 압축시 압출부위(리브부)의 선단부는 자유 표면(Free Surface)에 놓이게 되므로 결합 발생 및 미충진의 결과를 초래할 수 있다. 그러나 성형 초기에 적절한 압력으로 배압(Back Pressure)을 가하면 리브부의 결합방지 및 소재 완전 충전의 효과를 얻을 수 있다. 또한 재료의 유동을 제어할 수 있으므로 1개 이상의 리브가 존재할 경우에도 부위별 길이가 균일한 제품을 제조할 수 있으며, 하중의 저감과 공정수의 삭감이 가능하게 되므로 재료 회수율 증대 및 가공 시간의 단축이 가능하게 된다.

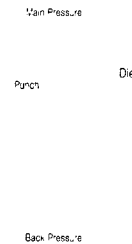
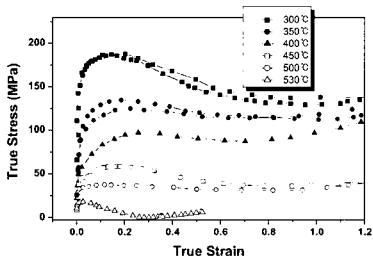


Fig. 3 The concept of back-pressure forming

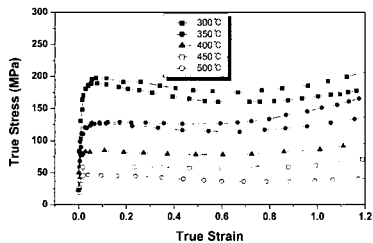
### 3.1 Al-Si합금의 유동응력

본 연구에서는 기체 가압 주조법(Hot Top 주조법)에 의해 제조된 후 압출된 Al-12Si-Fe-Cu 빌렛을 사용하

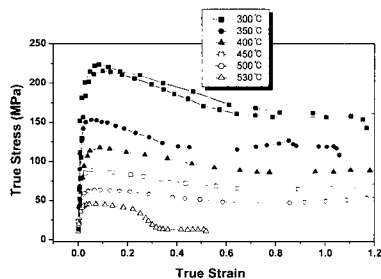
였다. 유한요소해석을 위한 유동응력을 구하기 위해 30 0°C~530°C 범위와 10<sup>-1</sup>~10<sup>1</sup>/sec의 변형률 속도 범위에서 열간 압축시험(Thermecmastor-Z)을 수행하였다. Fig. 4-a,b,c는 변형률속도를 일정하게 해주었을 때 일정한 변형률속도와 온도가 응력-변형률 곡선에 미치는 영향을 나타내었다. 변형률 속도가 10<sup>-1</sup>/sec일 때(Fig. 4-a) 300°C 및 350°C에서는 실험데이터의 검증을 위해 2회의 실험결과로부터 얻은 응력-변형률곡선을 함께 나타내었는데 유사한 응력-변형률 곡선을 보이고 있음을 알 수 있다. 최대 응력(Peak Stress)이 나타나는 변형률은 약 0.3이내이며 온도가 낮을수록 점차적인 감소를 보이고 있다. 온도가 증가할수록 최대 응력값은 감소하고 동시에 최대 응력에 도달 후 지속적인 변형에서 유동 응력이 최대 응력의 수준에서 거의 일정하게 유지되고 있음을 볼 수 있다.



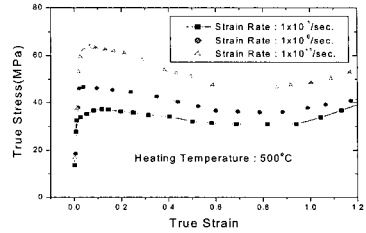
(a)  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-1}/\text{sec}$



(b)  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^0/\text{sec}$



(c)  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{1}/\text{sec}$



(d) T = 500°C

Fig. 4 The flow stress of Al-Si alloy used in experiment

일정한 온도에서(Fig. 4-d) 변형속도의 영향은 변형속도가 감소할수록 온도가 증가하는 효과와 같은 영향을 응력-변형률 곡선의 양상에서 볼 수 있었다.

낮은 온도영역에서 나타나는 최대 응력 이후의 변형에서 유동 응력이 변형량에 따라 감소하는 것은 동적 재결정으로 인한 연화 현상으로 해석할 수도 있으나 미세 조직 측면에서의 동적 재결정 현상은 명확히 입증할 수가 없었다. 분명한 것은 온도가 증가할수록 동적 회복으로 인해 가공경화가 일어나는 변형량과 최대 응력값이 감소하고 500°C 이상의 고온에서는 항복이 일어난 직후의 변형에서 최대 응력값에 도달하고 지속적인 변형에서 유동 응력 값은 거의 변화하지 않는 양상을 보인다는 것이다. 변형률이 1.0 정도에서 유동 응력이 증가하는 것은 소재의 조직변화와 같은 변형기구에 기인하기 보다는 압축시험편의 두께가 크게 감소하고 다이와 소재 표면간의 상하 접촉면에서의 마찰에 따르는 외적 요인의 영향으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 최대 응력(Peak Stress)을 온도와 변형속도가 변형거동에 미치는 영향을 비교하는 기준 값으로 하여 변형 속도 민감도(Strain Rate Sensitivity)를 측정하였다.(표 1)

변형 속도 민감도는 300°C에서 약 0.12에서 온도가 높아질수록 증가하여 500°C에서는 약 0.25~0.26의 값을 나타내고 있으며 이는 일반적인 Al 합금의 고온에서의 변형기구가 파워 로(Power Law)에 따르는 경향과 같은 양상을 보이고 있음을 말해주고 있다.

### 3.2 배압력에 따른 영향

길이를 균일화할 수 있는 최소 배압력의 선정에 있다. 배압력의 크기는 소재의 각 부위별 유동속도를 변화시키므로 적정 배압이 작용될 경우, 성형하중 및 금형에 가해지는 응력을 최소화시킬 수 있다.

Table 1 The flow stress of Al-Si alloy

| T<br>(°C) | E<br>(GPa) | Strain                   |                 |                 |                 |
|-----------|------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|           |            | Peak Stress<br>& m       | 10 <sup>1</sup> | 10 <sup>2</sup> | 10 <sup>3</sup> |
| 300       | 75         | Peak Stress ( $\sigma$ ) | 186.79          | 197.76          | 223.44          |
|           |            | ln( $\sigma$ )           | 5.23            | 5.29            | 5.41            |
|           |            | Strain Rate Sensitivity  |                 | 0.121           | 0.120           |
| 350       | 70         | Peak Stress ( $\sigma$ ) | 124.85          | 129.07          | 153.17          |
|           |            | ln( $\sigma$ )           | 4.83            | 4.86            | 5.03            |
|           |            | Strain Rate Sensitivity  |                 | 0.154           | 0.137           |
| 400       | 66         | Peak Stress ( $\sigma$ ) | 84.67           | 96.92           | 117.70          |
|           |            | ln( $\sigma$ )           | 4.44            | 4.57            | 4.77            |
|           |            | Strain Rate Sensitivity  |                 | 0.189           | 0.163           |
| 450       | 62         | Peak Stress ( $\sigma$ ) | 58.60           | 60.07           | 90.45           |
|           |            | ln( $\sigma$ )           | 4.07            | 4.10            | 4.50            |
|           |            | Strain Rate Sensitivity  |                 | 0.241           | 0.212           |
| 500       | 58         | Peak Stress ( $\sigma$ ) | 37.34           | 46.75           | 63.60           |
|           |            | ln( $\sigma$ )           | 3.62            | 3.84            | 4.15            |
|           |            | Strain Rate Sensitivity  |                 | 0.265           | 0.250           |
| 530       |            | Peak Stress ( $\sigma$ ) | 17.84           |                 | 45.28           |
|           |            | ln( $\sigma$ )           | 2.88            |                 | 3.81            |
|           |            | Strain Rate Sensitivity  |                 | 0.280           |                 |

배압 성형 공정에서 가장 중요한 변수는 리브 길이를 균일화할 수 있는 최소 배압력의 선정에 있다. 배압력의 크기는 소재의 각 부위별 유동속도를 변화시키므로 적정 배압이 작용될 경우, 성형하중 및 급형에 가해지는 응력을 최소화시킬 수 있다.

배압력에 따른 리브부의 성형양상에 대한 분석을 위해 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM -2D를 이용하였다. 제품 형상이 비대칭이므로 3차원 해석을 수행해야 하지만, 적정 배압력의 선정을 위해서는 수회의 해석을 수행해야 하기 때문에 효과적인 해석을 위해 임의 단면의 단면을 고려하여 2차원 평면 변형률, 비등온 해석을 수행하였다. 선 연구자의 경우는 비대칭 형상의 스크롤을 3개의 원으로 상사시켜 2차원 축대칭 해석을 수행하여 실제 실험과 비교하였으나 유동속도의 과도한 차이에 의해 실제 실험 결과보다도 리브 길이의 편차가 더 크게 나타나고 있다.<sup>6)</sup> 따라서, 본 연구에서는 임의의 단면에서 가장 많이 나타나고 있는 형상으로 단면을 선정하여 평면 변형률 해석을 수행하였다. Fig. 5는 해석에 사용된 초기 모델을 나타내고 있다. 배압력은 하부 펀치 인서트(Insert)에 압력(배압력) 경계조건을 작용시킨 배압력의 작용효과를 고려할 수 있다. 배압 성형에서 배압력은 단조 행정(Stroke)동안 항상 동일한 압력을 작용하고 있는 형태이므로 해석시에도 하부 펀치 인서트에 배압력에 해당되는 압력(또는 하중)이 해석초기부터

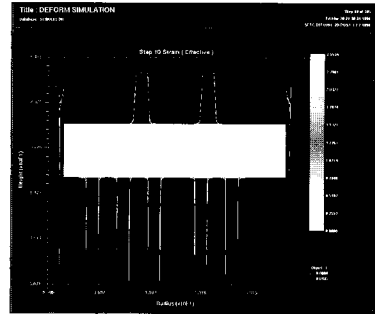
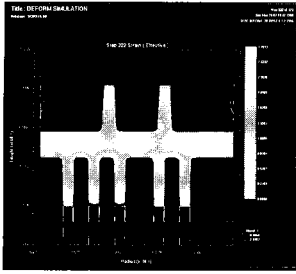


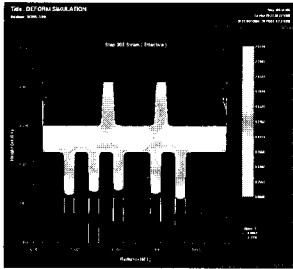
Fig. 5 The initial mesh system of back-pressure forging simulation

종료시까지 동일하게 작용하는 것으로 모델링하면, 단조 하중이 배압력보다 증가되는 시점부터 하부펀치 인서트는 동일한 배압력을 작용하면서 하부로 이동하게 된다. Fig. 6은 배압력에 따른 성형양상을 나타내고 있다. 해석 결과 부위별 길이의 균일화를 위한 최소 배압력은 약 4.9 MPa로 나타났으며, 최소 배압 이하에서는 배압을 작용하지 않고 하부펀치를 고정시키는 경우 보다 부위별 길이가 더 불균일하게 나타나기도 하였다. Fig. 7 (a)는 배압력에 따른 부위별 길이 편차를 나타내고 있는 그래프로 최적의 배압 조건에서는 부위별 길이 편차가 발생되지 않고 있다. Fig. 7(b)는 적정 배압력이 가해지지 않을 경우의 부위별 변형 속도를 나타내는 Fig. 8으로 부위별로 유동속도에 많은 차이를 나타냄을 알 수 있으며, 유동속도의 차이에 의해 리브 길이가 부위별로 많은 차이가 발생하는 것과 적정 배압력에 의해 유동속도와 길이편차를 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

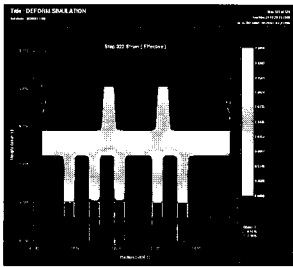
Fig. 8에는 배압 성형 조건에 따른 성형 하중의 변화를 나타내었다. Fig. 8에서 A는 상·하 리브(Rib)로 압출이 시작됨에 따라 증가되는 하중을 보여주며, B는 하부 펀치에 배압이 작용되는 시점을, C는 상부 리브 부위로 압출이 시작되는 시점을, D는 무배압 성형시 하부 펀치에 소재가 접촉되는 시점을 나타내고 있다. 배압력을 작용하지 않는 PI의 경우는 리브로 압출이 시작되는 A 부위에서 일시적인 하중증가가 일어난 후 정상상태의 압출이 이루어지면서 하중 증가가 거의 없으며 하부 펀치에 소재가 접촉하는 시점인 D부위에서 급격한 하중 증가를 나타내고 있다. 반면에 부위별 리브 길이를 균일화 할 수 있는 최소 배압력인 4.9 MPa에서는 하부 펀치에 배압이 작용되는 시점인 B 부위에서 작용 배압력의 크기만큼 하중이 증가된 후 상부 리브 부위로 압출이 시작되는 시점인 C 부위에 도달하기까지 다시 정상 상태



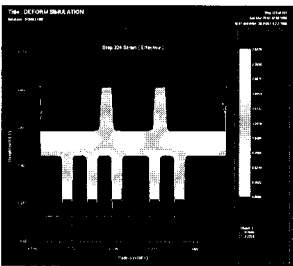
(a)



(b)

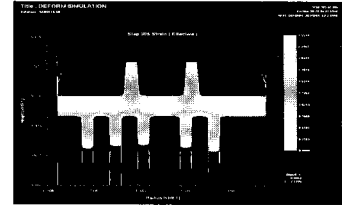


(c)

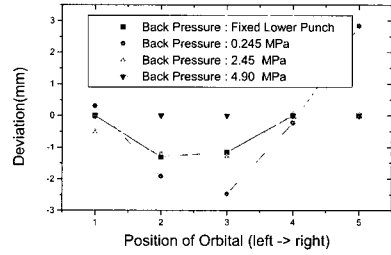


(d)

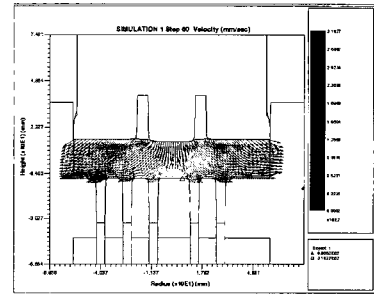
Fig. 6 The comparisons of deformation according to the amount of back-pressure  
 (a)fixed lower punch  
 (b)back-pressure : 0.245 MPa  
 (c)back-pressure : 2.45 MPa  
 (d)back-pressure : 4.90 MPa



1 2 3 4 5



(a)



(b)

Fig. 7 The variations of rib length according to the amount of back-pressure

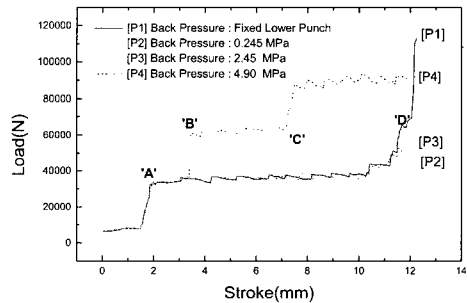


Fig. 8 The comparisons of applied load according to the amount of back-pressure

압출이 이루어진 후 최종 제품으로 성형이 이루어진다. 또한, 최대 성형 하중은 최소 배압력이 작용되는 P4의

경우가 배압을 작용하지 않는 P1의 경우 보다 약 20% 정도 감소됨을 알 수 있다.

#### 4. 열간 배압을 이용한 비대칭 회전부품 정형 제조

Fig. 9는 열간 배압 성형기술을 이용하여 제조된 비대칭 스크롤 단조품의 외관사진을 나타내고 있다. 유한요소해석을 이용하여 선정된 배압력을 이용하여 제조된 제품으로 부위별 길이가 균일한 정형의 제품을 제조할 수 있었다.

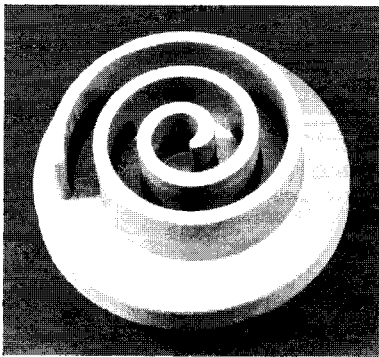
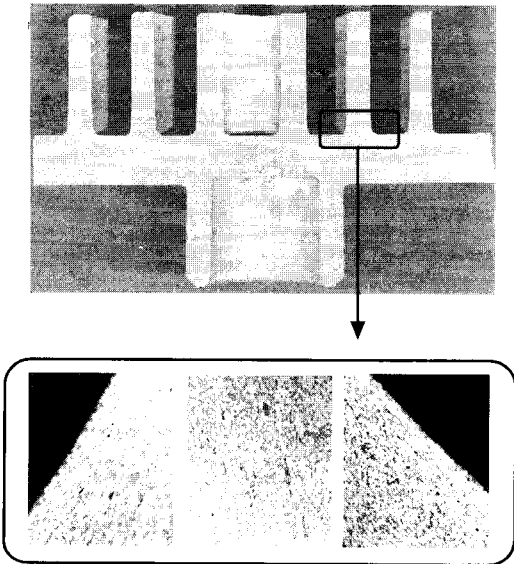
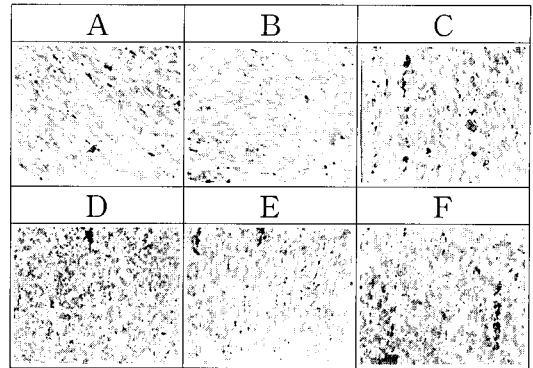


Fig. 9 The scroll rotating part manufactured by back-pressure forming



(a)



(b)

Fig. 10 The scroll rotating part manufactured by back-pressure forming

Table 2 The mechanical properties of Al forged scroll part

| Mechanical Properties  | Al Forged Part | Cast Iron Counterpart |
|------------------------|----------------|-----------------------|
| Tensile Strength (MPa) | 420 ~ 440      | 400 ~ 420             |
| Elongation (%)         | 3~3.5          | 3~6                   |
| Fatigue Strength (MPa) | 210            | 200                   |

Fig. 10은 단조품의 단면 조직을 보여주는 사진으로 균일한 급속 유동과 부위별 미세 조직을 나타내고 있다. 변형량이 서로 다른 부위에서도 Si입자들의 분포양상이 미세하고 균일하며, 불균일한 성장이 나타나지 않고 있다. 제조된 제품에서 채취하여 평가한 기계적 성질은 표 2와 같이 인장강도, 연신율, 피로강도 모두 기존의 주철 소재에 비해 동등이상의 특성을 나타내었다.

#### 5. 결 론

리브-웹 형상 제품을 정밀단조하기 위해서는 리브의 부위별 속도를 균일하게 제어해야 하며 본 연구에서는 유동 속도 제어를 위해 배압 성형 기술을 이용하였으며 구동 스크롤의 정형 제조를 통해 그 적용 가능성을 확인하였다.

(1) 구동 스크롤의 정형 제조를 위해 배압 성형 기술은 부위별 유동속도를 제어하므로써 부위별 성형량을 제어할 수 있으며, 유한요소해석을 이용하여 부위별 길이

편차를 제거할 수 있는 최소 배압력을 선정할 수 있다.

(2) 강소성 유한요소해석을 이용하여 배압 성형 해석을 수행하였으며, 그 결과 리브 길이를 균일화 할 수 있는 최소 배압력은 약 4.9 MPa로 나타났다.

(3) 유한요소해석 결과, 적정 배압 조건을 사용하지 않을 경우는 배압 성형을 이용하지 않는 경우 보다 부위별 길이가 더 불균일하게 나타나기도 하였으며 최대 단조하중 또한 더 증가되기도 하였다. 따라서, 최소 배압력의 선정이 매우 중요함을 알 수 있었다.

(4) 배압 성형을 이용하여 제조된 제품은 Si입자의 성장이 발생되지 않고 균일한 크기와 분포를 나타내므로써 제품에 요구되는 기계적 성질을 만족하였다.

(5) 배압 성형은 1개 이상의 Rib가 존재하는 비대칭 단조품의 정형제조에 효과적인 성형기술임을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 LG전자 공조 Comp. OBU의 연구비 지원으로 수행된 연구로서, 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Hajime Kamio, Toru Yamada, Sumio Katsumata, Hirotugu Hosono, Minoru Suzuki, 1997, "Manufacturing technology of aluminium scrolls by hot forging", 輕金屬, Vol.47, No.2, pp.114~122.
- (2) T. Kaji, K. Takeuchi, Y. Takeda, 1993, "Multi-Level Powder Forging and Powder Compaction Using Multi-axis Hydraulic Press", Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress, pp.891~894.
- (3) Yusuke Odani, 1994, "Powder forged Al alloy to challenge ferrous metals", Elsevier Science Ltd. pp.36~41.
- (4) 澤口弘志, 1993, "가동스크롤의 제조법", 미쯔비시경 금속, 일본 특허#5-171212.
- (5) 小林政春, 1994, "스크롤 우근(羽根)의 제조법", 일본 특허#6-114489.
- (6) 제6회 분말야금개발사례강연회 강연자료, July, 1993, PM'93Kyoto, p.193.