

3차원 유한요소해석을 이용한 스크롤 로터의 단조 금형 설계

이영선*, 이정환*

The Forging Die Design of Scroll Rotor by using the 3-D FEM Analysis

Youngseon Lee*, Junghwan Lee*

Key Words: Hot Forging(열간단조), Die Strength(금형강도), FEM(유한요소법), Scroll Rotor(스크롤 로터), Die Design(금형 설계)

Abstract

The die design for hot forging was investigated for manufacturing precisely of scroll rotor made with Al-Si alloy. A scroll rotor is a non-symmetric 3-D shape part, having involute wraps. Disk-shaped billet of Al-Si alloy was extruded to wraps and boss simultaneously. Because the involute wraps is not axi-symmetric, the flow velocity and the stress of die is very much different at each portion. Moreover, the die in wraps portion is a cantilever beam and fractured. In this paper, the analysis of forming and die stress is investigated using the FEM tool, DEFORM-3D. The tensile strength of tool material is 250kg/mm^2 . From the analysis results, we can find the maximum principal stress of die is over the fracture strength and redesign the die. The prototype forged part is superior in net shaping and microstructure.

1. 서론

자동차 및 가정용 냉방기는 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.⁽¹⁾ 따라서, 최근 선진국에서는 스크롤을 기존의 주철재에서 경량의 Al합

금으로 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 열간 단조공정이 이용되고 있다.

그러나, 냉방기용 스크롤 압축 컴프레서의 가동 부품은 Fig. 1과 같은 형상을 가지고 있기 때문에 정밀 단조가 곤란하다. 특히, 비대칭 인벌루트(Involute) 형상을 갖는 Wrap 부는 특정한 위치에서 시작되어 특정 함수에 의해 연속적으로 변화되는 형상을 갖고 있다. 따라서, 열간 단조시 소재의 유동속도가 부위별로 많은 차이를 나타내어 정형으로 제품을 제조하기가 곤란하다. 또한 금형의 강도 차원에서도 부위별로 발생하는 응력의 차이가 크기 때문에 금형 강도 유지에 많은 어려움이 발생된다. 더욱이, Wrap 부위의 금형은 곡선으로 이루어진 외팔보 형태를 띄고 있어 보의 지지점에 해당되는 Wrap 시작 부위에서 응력 집중이 증대되어 파괴될 수 있다. 본 연구에서는 금형의 강도 유지할

* 한국기계연구원 재료공정연구부

수 있는 방법을 조사하기 위해 3차원 강점소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 스크롤 로타의 열간 단조 공정을 해석하고 금형의 부가 응력을 분석하였다. 또한, 금형의 파괴 원인을 분석하고 금형의 구조를 변경함으로써 AI합금을 이용한 정밀 열간 단조 기술을 개발하고자 하였다.



Fig. 1 The appearance of scroll rotor

2. 단조품의 부위별 유동 속도 및 금형의 응력 분포 분석

Fig. 2는 열간 단조에 의해 제조된 구동 스크롤의 단면을 보여주는 사진으로 부위별 속도 차이에 의해 리브의 길이가 부위별로 상이하게 나타나고 있다.

이와같이 부위별 길이편차가 발생되면 후 가공 시 제거되는 소재량이 증가되며 부위별 속도 차이에 의해 금형에 가해지는 응력 또한 불균일해지기 때문에 금형이 파손되거나 수명이 저하된다.

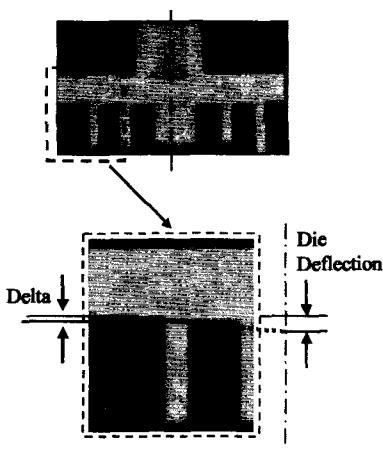


Fig. 2 The section of scroll rotating part manufactured by conventional hot forging

Fig. 2에서는 단조품의 하부 평면이 부위에 따라 다르게 형성되어 단차(Delta)가 발생되고 있음을 나타내고 있는데, 이는 금형에 가해지는 응력에 의해 금형이 외측에서 중심 축 방향으로 갈수록 보다 큰 처짐(Die Deflection)이 발생되었기 때문이다. 이때, 단조품은 금형이 치진 상태로 변형됨으로서 부정확한 치수를 나타내게 된다. 또한, Wrap부의 리브(Rib)는 부위별로 다른 길이로 성형되고 있어 정형 제조가 곤란함을 알 수 있다. 그림 3은 2차원 유한요소해석을 이용하여 각 리브의 길이가 부위별로 차이가 발생됨을 분석한 결과 그림으로 이론적 해석 결과에서도 유동속도의 차이에 의해 발생하는 문제점을 발견할 수 있다.

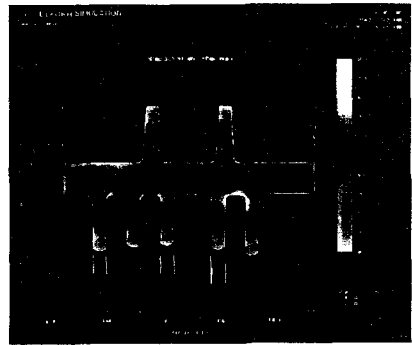
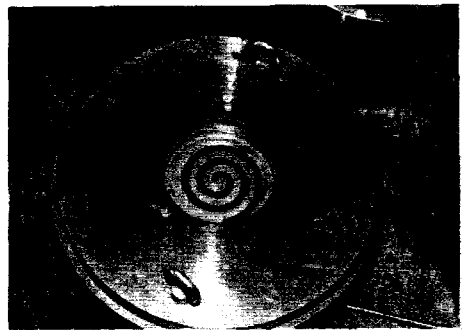
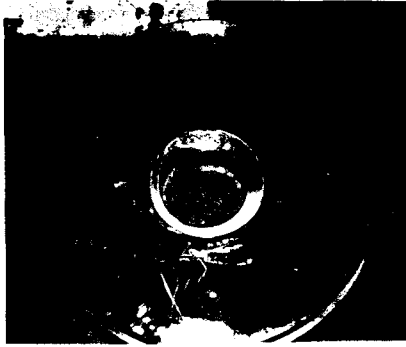


Fig. 3 The difference of rib height at each section

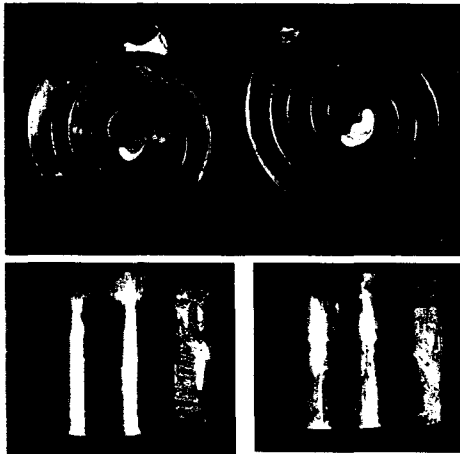
단조 소재의 유동속도 차이와 금형의 응력 분포 차이는 금형의 강도를 유지하지 못하게 하고 결국은 파손을 유발하게 된다. 그림 4는 단조 공정 동안 부가 응력을 견디지 못하고 파손된 Wrap부의 외관을 나타내는 사진이다.



(a) Hot forging die of scroll rotor (before fracture)



(b) Hot forging die of scroll rotor
(as fractured)



(c) Fractured section of forging die

Fig. 4 The appearance of fractured forging die of scroll rotor

3. 3차원 유한요소해석을 이용한 단조 공정 해석 및 금형 응력 해석

3.1 단조 공정 해석

스크롤 열간 단조용 금형은 부가 응력이 과대하여 파괴되는 현상이 발생되고 있어 발생 응력의 정량적인 분석과 개선방안을 찾고자 강점소성 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 단조 공정 해석 및 금형의 응력 분포를 분석하였다. Fig. 5는 스크롤의 열간 단조를 위해 금형과 소재를 모델링(Modelling) 한 상태를 나타내고 있다. 소재는 450℃로 가열되어 있고, 금형은

250℃로 예열된 상태로 가정하고, 열 전달 해석을 동시에 수행하였다.

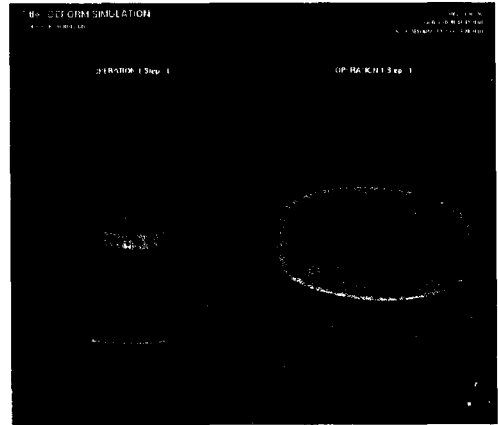


Fig. 5 The model of hot forging for scroll rotor

해석에 사용된 소재의 물성치는 Lee 등이 2차원 해석을 위해 열간 압축시험기에서 직접 측정된 물성치를 이용하였으며, 기계식 링크(Link)프레스에서 단조하는 것을 기준으로 램의 진행 속도는 200mm/sec.로 가정하였다.

그림 6은 성형이 진행됨에 따라 변화되는 재료의 흐름을 보여주는 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 보스(Boss)부로의 유동이 Wrap부로의 유동 보다 변형 속도가 빠르게 진행되고 있다. 이는 후방 압출이 전방 압출 보다 마찰저항이 적기 때문으로 일반적인 경우와 동일한 양상이다. 이때 변형은 보스(Boss)부와 Wrap부로 동시에 압출이 이루어지고 단면 형상이 부위별로 다르기 때문에 부위별로 변형속도의 차이가 발생되어 보스부와 Wrap부 모두 변형된 리브 길이에 편차가 점점 더 심화되게 된다.

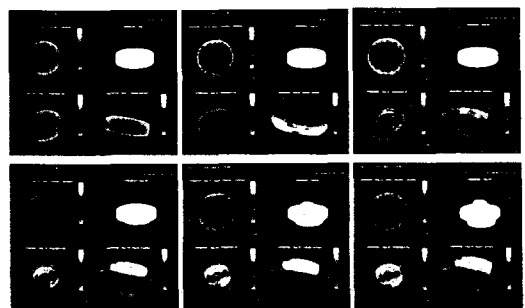


Fig. 6 The deformation pattern of hot forging for scroll rotor

최종 단계에서의 리브 길이의 편차는 최대 9.6mm까지 증가되며, 가장 길이가 작게 성형되는 부위는 Wrap부 인벌류트(Involute)형상의 원점인 축의 중심에 해당된다. 그림 7은 단조품의 입의 위치에서의 단면을 나타내는 결과로 부위별 길이 편차가 발생됨을 잘 나타내고 있다.

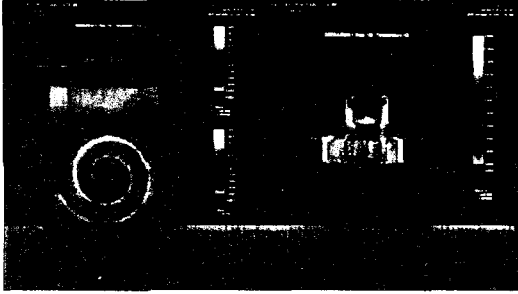


Fig. 7 The difference of rib length at each section in final forging stage

단조품의 부위별 온도는 결정립에 영향을 미쳐 단조품의 품질을 좌우하므로 공정 설계에 중요한 변수이다. 초기에 450°C로 가열된 단조 소재는 단조가 이루어지는 동안 변형량에 따라 가공 발생에 의해 온도가 상승되므로 스크롤 로터와 같이 웨브(Web)부는 전형 변형이 없는 경우는 부위별로 온도차이가 극심하게 된다. 그림 8은 단조품의 부위별 온도 분포를 나타내는 것으로 웨브의 표면은 410°C, 내부는 460°C, 리브 부위는 보스부와 Wrap 부 모두 평균 520°C, 압출이 시작되는 웨브와 리브의 코너부는 550°C까지 상승됨을 알 수 있다.

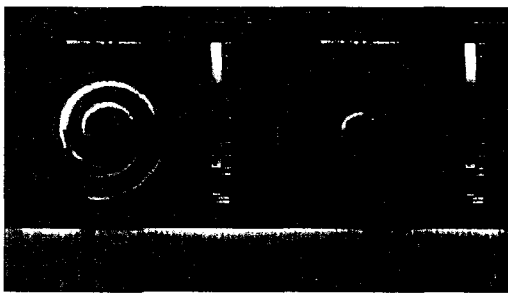


Fig. 8 The temperature distribution of hot forged scroll rotor

해석결과 단조 하중은 약 620톤이 소요되는 것으로 예측되며 실제 시제품 제조 시 측정결과인 570~680톤과 좋은 일치를 보이고 있다. 실제 단조 시에 성형하중이

변화가 나타나는 것은 가열된 단조 소재가 가열 로(F'ce)에서 금형으로 이송되는 동안 온도가 하강되는데, 자동화된 라인에서 작업이 이루어지지 않으므로 인한 온도 하강의 차이 때문에 발생하는 현상이다. 그림 9는 해석에서 얻은 단조 소요 하중 그래프로 "A"시점은 소재가 웨브에서 리브로 압출이 이루어지는 시작시점이며 약 500톤이 필요하며, "B"시점은 재료가 웨브와 리브의 연결 코너 부를 완전히 통과하는 시점을 나타내고 있다.

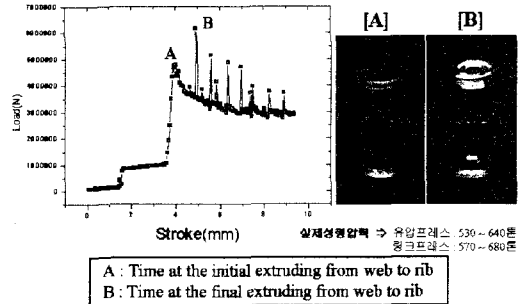


Fig. 9 The applied forging load of hot forging for scroll rotor

3.2 금형 응력 해석

스크롤 열간 정밀단조용 금형은 그림 4에서 설명한바와 같이 단조 중 파손되는 결과를 나타내었다. 이에대한 원인 분석을 위해 수행한 FEM해석은 3.1절에서 기술 바와 같이 소재의 열간 변형 해석을 수행한 다음 금형에 대한 응력을 분석하게 된다. 간략히 금형의 응력 해석에 대한 절차를 설명하면 다음과 같다. 단조가 이루어지는 동안 금형은 소재의 변형저항으로 인해 하중이 부가된다. 해석에서도 동일한 절차를 거치는 것으로 말할 수 있는데, 우선 소재의 변형에 대한 해석을 수행한다. 그 다음 소재의 변형에 의해 발생하는 하중을 금형에 부가(Interpolate)하게 되며 이때 금형은 탄성체로 가정을 변경하게 된다. 변경된 탄성체의 금형에 실제 상황과 동일하게 각 부분에 변위와 운동 모드에 대한 경계조건을 입력한 후 탄성해석을 수행한다. 그림 10은 탄성해석에 의해 얻은 금형(핀치, 다이)의 최대 주 응력을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 핀치는 최대 주 응력은 압축 응력으로 최대 503.56Mpa, 인장 응력으로는 최대 943.82Mpa를 나타내고 있어 안정적인 상태를 유지할 것으로 판단된다. 그러나, 다이에는 최대 주 응력이 압축 응력으로 115,501.54Mpa, 압축 응력으로 1,122,715.75Mpa의 과도한 응력 상태를 나타

내었다. 열간 단조용 금형 강으로 주로 사용되는 AISI H-13소재는 인장 응력이 2,500Mpa에 해당되므로 다이는 금형강의 인장강도를 훨씬 넘었으며, 곧 파손이 될 것임을 판단할 수 있다. 그림 11은 금형이 응력에 변형된 상태와 파손 부위에서의 최대 주 응력의 평균값을 나타내고 있다. 다이의 최대 주 응력의 평균값은 인장 응력으로 3,660 ~ 100,500Mpa 범위로 평균값의 최소값조차도 금형 강 of 인장강도를 넘어서 있는 상태이다. 이로서, 스크롤 열간 단조 금형의 파손 원인은 단조 하중에 의한 부가 응력이 과도함이 그 원인임을 알 수 있었으며, 문제의 해결을 위해서는 금형의 구조를 변경하여 반력을 증가시켜야 함을 할 수 있었다.

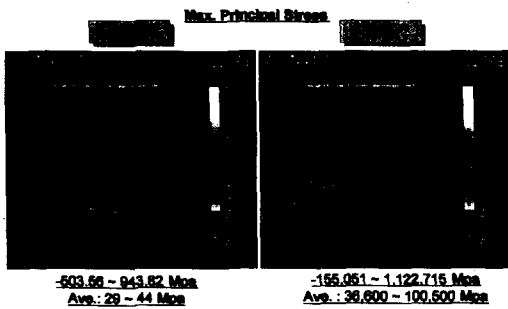


Fig. 10 The maximum principal stress of hot forging dies for scroll rotor

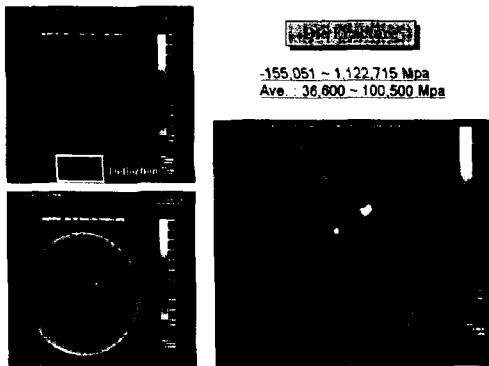


Fig. 11 The maximum principal stress of hot forging dies for scroll rotor

4. 결론

에너지 효율 증가와 소음 감소 등 환경보호 차원에서 각광을 받고 있는 스크롤 압축기의 핵심 부품인 스크롤 로터를 Al합금으로 정밀단조하기 위한 금형 설계를 위해 수행한 3차원 유한요소해석의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 스크롤 로터를 열간 단조로 제조하기 위해 소재를 450℃로 가열하고 금형은 250℃로 예열한 상태에서 3차원 유한요소해석을 수행한 결과 단조품은 부위별 온도가 많은 차이를 나타내어 웨브의 표면은 410℃, 내부는 460℃, 리브 부위는 보스 부와 Wrap 부 모두 평균 520℃, 압축이 시작되는 웨브와 리브의 코너 부는 550℃까지 상승됨을 알 수 있었다.
2. 단조 하중은 약 620톤이 소요되는 것으로 예측되었으며 소재가 웨브에서 리브로 압축이 이루어지는 시작 시점에서 첫 번째로 하중이 약 500톤까지 증가되었으며 재료가 웨브와 리브의 연결 코너 부를 완전히 통과하는 시점에서 최대 하중을 나타내었다.
3. 금형의 응력은 최대 주 응력이 편치의 경우는 압축 응력으로 최대 503.56Mpa, 인장응력으로는 최대 943.82Mpa를 나타내고 있어 안정적이었으나, 다이는 최대 주 응력이 압축 응력으로 115,501.54Mpa, 압축 응력으로 1,122,715.75Mpa의 과도한 응력 상태를 나타내어 파손의 원인이 됨을 알 수 있었다

참고문헌

- (1) 이영선, 이정환, 이상용, 박영도, 이운섭, 2000, "열간배압 성형 기술을 이용한 Al-Si합금 스크롤의 정형 제조 기술", 한국소성가공학회지, Vol.9, No.1, pp.52~58.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Yusuke Odani, 1994, "Powder forged Al alloy to challenge ferrous metals", Elsevier Science Ltd, pp. 36~41.
- (5) 澤口弘志, 1993, "가동스크롤의 제조법", 미쯔비시경금속, 일본 특허#5-171212
- (6) 小林政春, 1994, "스크롤 우근(羽根)의 제조법", 일본 특허# 6-114489