

압축기용 구동스크롤의 밀폐형 배압 금형 개발

김용배¹ · 정기호¹ · 이상목¹ · 김응주¹ · 이종섭¹ · 최두순² · 이근안[#]

Development of a Closed-die Design with Backpressure to Forge Rotating Scrolls

Y. B. Kim, K. H. Jung, S. Lee, E. Kim, J. Lee, D. S. Choi, G. A. Lee

(Received March 21, 2013 / Revised June 10, 2013 / Accepted June 17, 2013)

Abstract

Scroll compressors are widely used in air conditioning systems and in automobiles due to their low pressure loss, minimal vibrations, and light-weight. Open-die forging with back pressure is used to forge the rotating scroll, and it requires special care since the forging die can be severely damaged at the fixed end of the spiral cavity similar to a fracture of a cantilever beam. To overcome the inevitable weakness of the forging die due to such damage, an innovative design is necessary. In this study, structural analysis using the finite element method was conducted to determine the reason for the fracture of the forging die. A novel design to avoid stress concentrations and vertical deflection, causing serious damage to the die, is suggested.

Key Words: Scroll, Die Design, Closed Die Forging, Backpressure, Finite Element Method

1. 서 론

스크롤 압축기는 자동차 및 소형건물의 공조시스템에 주로 사용되며 왕복동 압축기(Reciprocating compressor)에 비해 별도의 흡입/토출 밸브가 없고 연속적인 냉매의 흐름으로 토크변동이 작고, 압축 효율이 높으며, 진동 및 소음이 적다는 장점을 가진다[1].

스크롤 압축기의 핵심 부품인 구동스크롤은 제품의 복잡한 형상으로 주조 또는 분말단조[2, 3]로 제작되거나 나선부와 플레이트를 별도로 제작한 후 용접[4]하여 생산하는 방법이 제안되었다. 단조 공정은 상대적으로 생산성이 높으나 스크롤의 경우 Fig. 1(a)와 같이 복잡한 나선형상과 비대칭 구조로 인해 단조공정의 적용이 쉽지 않다.

특히 편치의 가압방향과 동일한 방향으로 압출되는 나선부의 경우 Fig. 1(b)와 같이 중심에서의 거리에 따라 나선형상의 높이 편차가 심하게 발생하므로 이러한 높이 편차를 해소할 목적으로 단조공정 중 스크롤의 나선부에 압출방향의 반대로 압력을 가하는 방법이 이용된다[5].

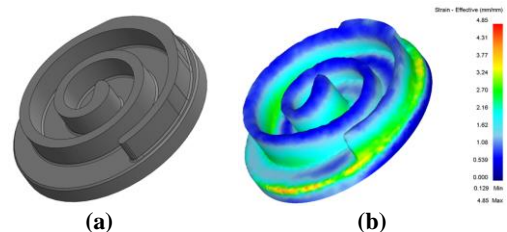


Fig. 1 (a) Orbiting scroll and (b) FE analysis of the orbiting scroll without backpressure

1. 한국생산기술연구원, 성형기술연구그룹

2. 인하공업전문대학교, 기계설계과

Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology, Metal Forming Technology R&D Group, E-mail: galee@kitech.re.kr

본 연구에서는 기존에 제안된 스크롤 성형을 위한 수직방향 관통형 구조를 갖는 금형[5~7]을 실제로 제작하여 실험을 통해 문제점을 파악하고, 금형 설계상의 문제점을 보완하고자 유한요소해석을 이용하여 밀폐형 배압 금형을 제시하고자 한다.

2. 해석을 위한 예비실험 및 결과

Fig. 2(a)에 개방형 배압 금형의 개략도를 나타내었다. 금형캐비티 하부에서 배압을 가하기 위한 다수의 핀에 일정한 압력을 가하여 배압패드를 밀어주어 나선부의 압출과정 중 높이 편차를 막고 결과적으로 일정한 높이로 성형되도록 구성된다. Fig. 2(a)의 개략도를 바탕으로 Fig. 2(b)와 같이

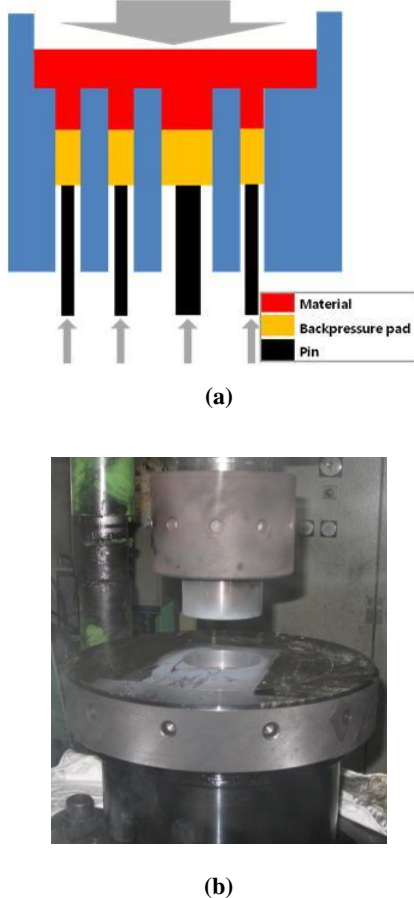


Fig. 2 Scroll forging experiment with open die (a: schematic of dies, b: experiment)

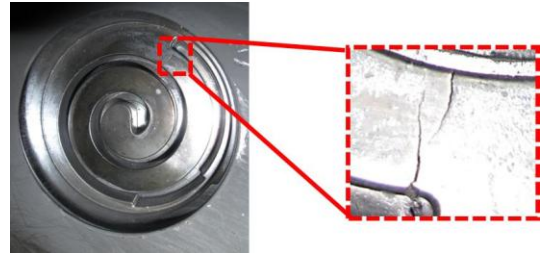


Fig. 3 Cracking of the die

실제 금형을 제작하여 소재의 온도 350℃, 금형 150℃로 가열 후에 실험을 수행할 때는 가열을 하지 않고, 스크롤 성형 실험을 수행한 3회 시 성형 후 Fig. 3과 같이 나선형 종단에서 금형의 크랙이 발견되었으며, 추가로 1회 성형 중 완전히 파단 되어 나선 성형부가 금형으로부터 분리되었다.

스크롤 성형 실험을 통해 나선형태의 금형 캐비티의 종단이 취약함을 확인하였고, 유한요소해석을 통해 분석하고자 하였다.

3. 개방형 배압 금형의 유한요소해석

스크롤 성형 중 금형의 구조적 취약점을 파악하고 그 원인을 찾기 위하여 Fig. 4와 같이 삼차원 유한요소해석 모델을 수립하였다. 유한요소해석은 상용 소프트웨어인 DEFORM 를 활용하였고, 하부 금형의 변형 및 응력상태를 극대화하기 위해 금형 하단의 원주면을 구속하였으며, 약 6만개의 4면체 메시를 사용하였다. 금형과 소재 사이의 마찰은 일정전단마찰계수 0.7로 가정하였고, 금형의 기계적 물성은 실험에 사용된 소재와 동일한 AISI13 (HRC45) machining 소재의 물성을 DEFORM의 데이터베이스에서 참고하였고, 해당 소재의 응력-변형률 선도는 Fig. 5에 보여지는 바와 같다.

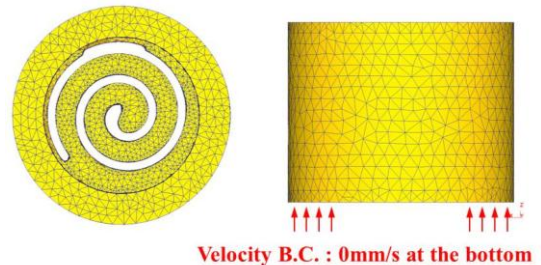


Fig. 4 Open die modeling for FE analysis

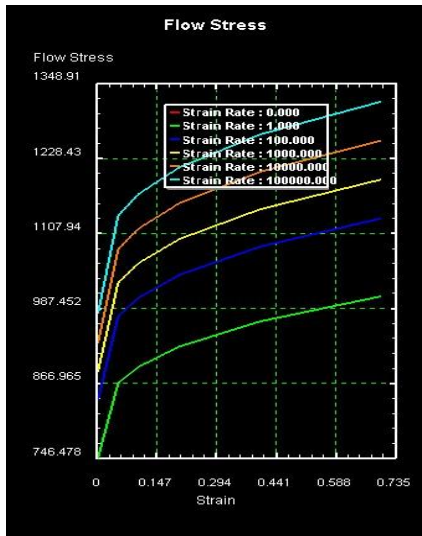


Fig. 5 Stress-strain curves of AISI H13 (HRC45) machining

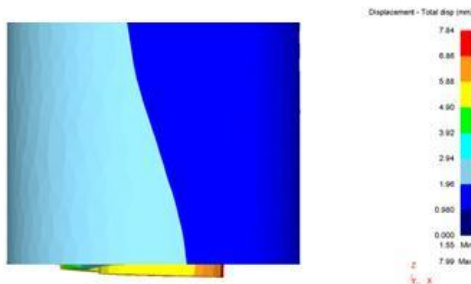
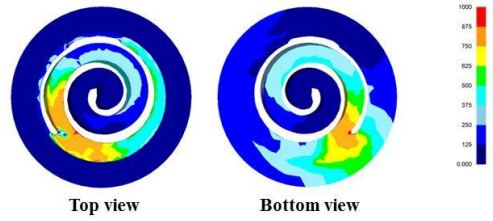


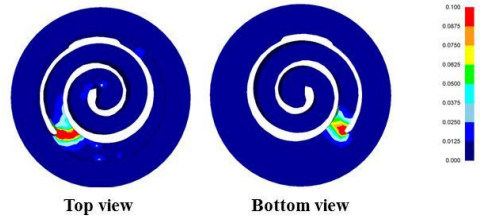
Fig. 6 Displacement of open die

유한요소해석으로 예측된 개방형 배압 금형의 변형량 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 스크롤 성형부가 수직하중을 견디지 못하고 최대 7mm 가량 처지는 현상을 확인하였고, 나선 성형부의 고정단에서 비틀림이 발생함을 확인하였다.

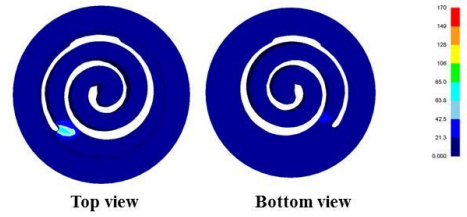
또한 Fig. 7에서와 같이 금형의 유효응력, 유효변형율이 나선형으로 감겨있는 형상을 띄는 켈틸레버 보의 고정단에 유효응력, 유효변형율이 집중되는 것을 관찰하였고, Cockcroft-Latham criterion을 이용한 damage value의 집중 분포가 Fig. 3의 실제 크랙 부위와 일치하는 것을 확인하였다. 이를 통해 나선형 캐비티가 상하로 관통된 금형 설계시 나선 성형부가 감겨있는 켈틸레버 보의 구조를 지니므로 성형 중 고정단이 수직하중을 견디지 못하고 결과적으로 비대칭 하중에 의한 비틀림으



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 FE Analysis of open die (a: effective stress, b: effective strain, c: damage value)

로 크랙의 발생 및 파단을 피할 수 없다는 것을 확인하였다.

4. 밀폐형 배압 금형의 제안 및 검증

4.1 문제점 개선을 위한 새로운 금형 제안 앞서 기술한 바와 같이 개방형 배압 금형의 문제점은 켈틸레버 보와 유사한 형태를 지닌 나선 성형부의 구조적 취약점으로 인한 응력 집중 및 처짐 현상이므로 이를 해결하기 위해 금형의 높이를 단순히 증가시키는 것은 취약점을 개선하는데 있어 매우 비효율적인 접근방법이라 판단되었고, 고강도 소재의 적용은 금형의 인성 부족 및 제작 비용의 증가를 초래하기 때문에 다른 접근 방안을 모색하고자 하였다.

일반적으로 밀폐단조는 성형하중 및 금형캐비티

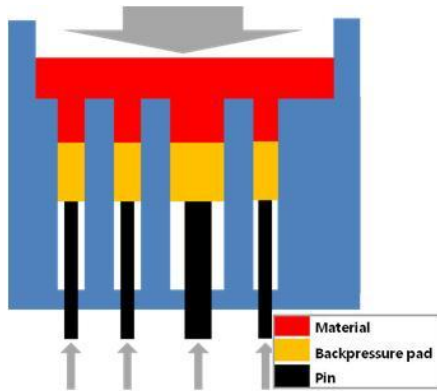


Fig. 8 Closed die forging with backpressure

내부의 압력 증가를 수반하는데, 스크롤 제품의 경우 나선부가 전방 압출되는 초기 단계부터 균일하게 압출되도록 하지 못하면 최종 단계에서 이미 발생한 높이 편차를 제거하는데 상당한 압력을 필요로 하게 되므로 나선형 캐비티의 처짐을 막으면서 동시에 배압을 부여할 수 있는 구조를 고안하고자 하였다.

본 연구에서는 Fig. 8과 같이 나선형 쉘레버 보의 수직방향 처짐을 막기 위해 금형의 구조를 개방형에서 밀폐형 구조로 변경하고 배압을 가하는 다수의 핀이 동시에 배압패드를 지지할 수 있도록 설계하였다. 즉, 금형의 밀면을 폐쇄시켜 나선 성형부를 일체형으로 제작된 바닥 면이 지지하도록 하여 쉘레버 보의 고정단에 응력이 집중되는 것을 방지하는 반면 배압패드의 수직 이동 범위는 상/하한을 두도록 하는 구조를 고안하였다.

고안된 밀폐형 배압 금형을 기존의 개방형 배압 금형과 비교하여 구조적 취약점의 해결여부를 유한요소해석을 통해 예측하고자 하였다.

4.2 해석조건 및 결과

밀폐형 배압 금형을 모델링 하여 앞서 기술한 개방형 배압 금형의 해석 조건과 동일하게 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 9에 제안된 밀폐형 배압 금형의 변형량을 유한요소해석을 통해 예측한 결과이며, 앞서 개방형 배압 금형과 달리 스크롤 성형부의 수직 하중에 의한 최대 변형량이 1.1mm까지 현저히 감소된 것을 알 수 있다.

Fig. 7의 개방형 배압 금형과 Fig. 10의 밀폐형 배압 금형의 유한요소해석 결과를 비교하였을 때

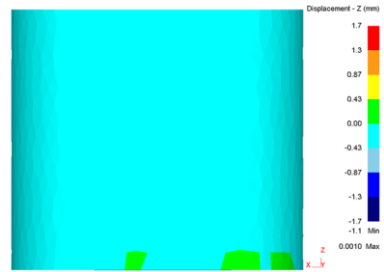


Fig. 9 Displacement of closed die

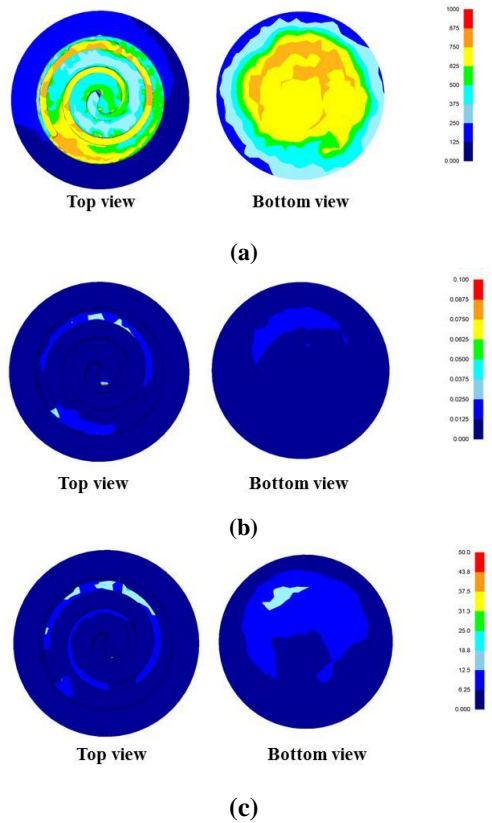


Fig.10 FE Analysis of closed die (a: effective stress, b: effective strain, c: damage value)

밀폐형 배압 금형에서 유효응력, 유효변형을 및 damage value가 상대적으로 균일하게 분포함을 확인하였다.

정량적인 비교를 위하여 Fig. 11과 같이 개방형 배압 금형과 밀폐형 배압 금형의 유효응력의 분포를 나타내었다. 800MPa 이상의 유효응력을 갖는 요소의 비율은 밀폐형 배압 금형에서 다소 높은 반면 200-800MPa 범위의 유효응력을 갖는 요소의

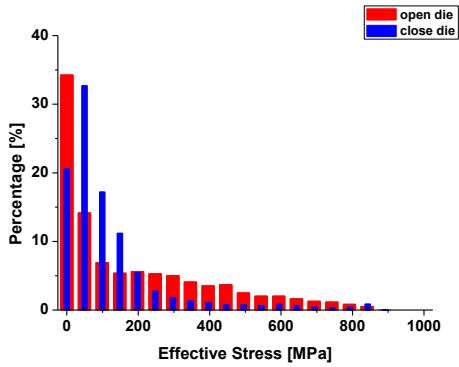
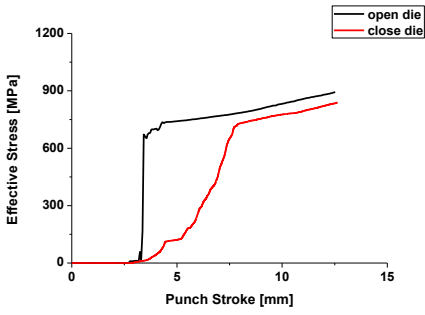
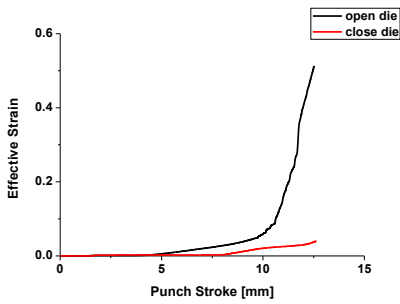


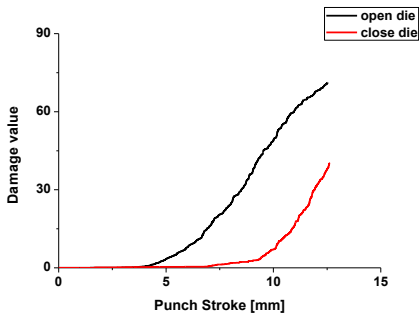
Fig.11 Distribution of effective stress



(a)

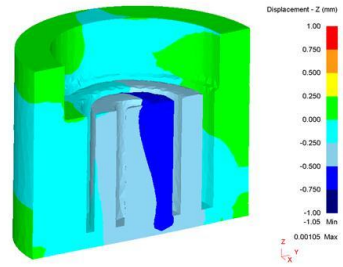


(b)

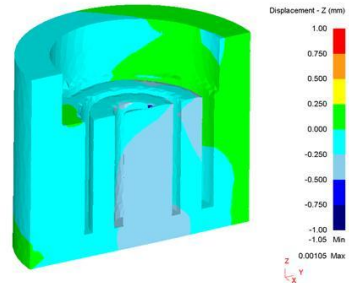


(c)

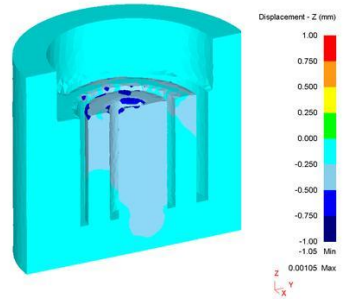
Fig.12 FE Analysis of dies (a: effective stress, b: effective strain, c: damage value)



(a)



(b)



(c)

Fig.13 Displacement depending on the bottom thickness of the closed die with backpressure(a: 10mm, b: 15mm, c: 25mm)

분율은 개방형 배압 금형에서 현저히 높은 것을 확인하였고, 밀폐형 배압 금형에서는 200MPa이하의 분율이 상대적으로 높은 것을 확인하였다.

Fig. 12는 펀치 변위에 따른 나선형 캐비티의 고정단에서의 유효응력, 유효변형률 및 damage value의 변화를 비교하여 보여주고 있다.

Fig. 12(a)와 같이 펀치의 변위가 7.5mm를 넘어서면 개방형 배압 금형과 밀폐형 배압 금형의 고정단에서 유효응력은 큰 차이가 없었으나 Fig. 12(b)와 같이 유효변형률은 매우 큰 차이를 보였

다. 따라서 유효응력의 차이보다는 유효변형율의 차이로 인해 Fig. 12(c)와 같이 damage value가 개방형 배압 금형에서 높은 것을 확인하였다. 결과적으로 파단이 일어나기 쉬운 나선형 캐비티의 고정단의 damage value가 낮은 밀폐형 금형 구조가 금형의 수명 확보에 있어 분명한 효과가 있을 것으로 예측되었다.

4.4 바닥면 두께에 따른 비교

밀폐형 배압 금형의 안전하고 경제적인 바닥면 두께를 도출하기 위해 Fig. 13과 같이 바닥면의 두께를 10, 15, 25mm로 변화시켜 유한요소해석을 실시하고 변형량 분포를 관찰하였다.

바닥면 두께의 증가에 따라 스크롤 성형부의 처짐량은 감소하는 경향을 보였으며, Fig. 13(a)의 두께가 가장 얇은 10mm의 경우 나선형 캐비티의 중심부가 비대칭적으로 수직하중을 부담하는 반면에 Fig. 13(c)의 두께가 가장 큰 25mm의 경우 스크롤이 전방 압출되는 필렛 부위의 손상이 발생할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 밀폐형 배압 금형에서 나선 성형부와 바닥 면이 적절하게 수직하중을 부담할 수 있는 15mm의 두께가 적절하다고 판단되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 여러 문헌을 통해 제시되었던 개방형 금형을 직접 제작하고, 성형 실험을 통해 쉘레버 보의 구조와 유사한 나선형 캐비티의 고정단에서 심각한 파단이 발생함을 확인하였고, 유한요소해석을 통해 구조적 취약점에 의한 응력, 변형률 및 damage value이 고정단에 집중되는 것이 금형 파단의 원인을 파악하였다. 이러한 구조적 취약점을 해결하면서 동시에 성형 중 배압을 부여할 수 있는 구조인 밀폐형 배압 금형을 고안하여 유한요소해석을 통해 기존의 개방형 배압 금형 대비 스크롤 성형부의 처짐을 해결하고, 상대적으로 균일한 변형률 및 damage value의 분포를 갖는 것을 확인하였다. 또한, 정량적인 비교를 통해 밀폐형 배압 금형의 나선형 캐비티 고정

단에서의 유효응력보다는 상대적으로 낮은 유효 변형률로 인해 damage value가 현저히 낮아지므로 본 연구에서 고안된 밀폐형 구조가 스크롤 성형을 위한 금형의 수명 확보에 도움이 될 수 있음을 확인하였으며, 추가적으로 바닥면 두께에 따른 금형 단면의 변형률을 관찰하여 적절한 두께 값을 제시하였다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회 협동연구사업(B551179-11-02-00)의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] C. M. Chen, C. C. Yang, C. G. Chao, 2005, A Novel Method for Net-shape Forming of Hypereutectic Al-Si Alloys by Thixocasting with Powder Preforms, J. Mater. Process. Technol., Vol. 167, No. 1, pp. 103~109.
- [2] H. Ando, I. Matsumoto, 1988, Method of Manufacturing Scroll Members for use in a Rotary Compressor, Patent US 4720889 A.
- [3] T. Tokuoka, T. Kaji, T. Nishioka, A. Ikegaya, 2006, Development of High-Strength, Heat-Resistant Aluminum Alloy Made by Powder Forging Process, SEI Tech. Rev., No. 61, pp. 70~76.
- [4] M. Chikano, K. Sakurai, M. Matsunaga, 2011, Scroll Compressor, Patent US 20110103990 A1.
- [5] M. Sato, F. Ohmi, Y. Ogura, 2004, Forged Scroll Part and Production Process Thereof, Patent US 6702907 B2.
- [6] J. H. Lee, Y. S. Lee, S. H. Choi, S. Y. Lee, S. H. Han, 2001, A Heat Back Pressing Machine for Heat Forging of Al alloyed Scroll Rotor and Method Thereof, Patent KR 100461282.
- [7] K. Osakada, T. Nakamura, 2005, Research and Development of Precision Forging in Japan, Proceeding of ITCP (VIII), Verona.