

알루미늄 고정 스크롤 열간 단조공정의 금형 파괴 원인 및 실용적 대책

김영신¹ · 전만수[#]

Reason of Die Fracture in Hot Forging of an Aluminum Fixed Scroll and Its Practical Measures

Y. S. Kim, M. S. Joun

(Received March 6, 2017 / Revised April 25, 2017 / Accepted May 15, 2017)

Abstract

In this study, the reason of die fracture occurring in hot forging of an aluminum fixed scroll was studied, based on experiments and finite element predictions. The material is assumed to be rigid-viscoplastic, and the die is rigid for the finite element predictions. The stress in the tension at the wrap root is known to cause brittle fracture, and the increase in the tensile stress is owing to the unbalanced filling of material into the die cavities between both sides of the warp. Based on the empirical and numerical achievements, the effects of geometrical parameters of the material on the die fracture were examined to find practical measures for elongated die life. It has been shown from the parametric study that the material with the optimized trapezoidal cross-section, which can be easily made during cutting or the optimized cylindrical billet with its eccentric placement in the die cavity, can considerably reduce the magnitude of the tensile stress around the die corner fractured, indicating that economical manufacturing with reduced number of stages and elongated die life can be realized at once using the optimized practical initial material.

Key Words : Die Fracture, Fixed Scroll, Aluminum Hot Forging, Optimized Initial Material

1. 서론

차량용 에어컨은 자동차의 성능, 즉, 쾌적함, NVH 성능, 에너지 효율 등과 직결되어 있다. 따라서 엔진, ABS, 공기역학적 설계, 파워트레인 등과 함께 자동차 조립체로서 매우 중요한 위치를 점하고 있다. 에어컨의 성능은 쾌적함, 친환경성, 효율 등에 의하여 결정된다. 따라서 자동차 에어컨을 구성하는 응축기, 수액기, 증발기, 팽창기, 압축기 중에서 압축기가 전체 구성품의 가격에서 차지하는 비중이 매우 높다.

압축기에는 왕복식 (크랭크식, 사판식), 회전식 (스크롤식, 스크류식, 워블플레이트식, 로터리베인식) 등이 있다. 현재 사판식이 승용차용으로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 스크롤식이 왕복식에 비하여 효율이 상당히 높고, 오일리스이면서 소음이 작은 이점이 있기 때문에 차세대 압축기로써 그 적용이 확대되고 있다[1]. 스크롤의 실용화는 Kamino 등[2]의 연구에 힘입은 바가 크다. Yoshihara 등[3]은 폐쇄 다이세트 또는 전용 다이세트 등을 개발하여 스크롤 단조에 응용하였다.

스크롤 소재로 회전관성을 줄이고, 특히, 자동차의

1. 경상대학교 기계공학과

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering / Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

경우 중량을 줄이는 목적으로 Al 합금이 주로 사용되고 있다. 스크롤의 재료는 내마모성과 고강도가 요구된다. 제조 방법으로는 주조, 분말성형, 용접, 단조 등이 있으나, 열간단조 공법이 생산성과 강도의 양면에서 유리하다[1~3].

그러나 스크롤의 독특한 형상으로 인하여 단조가 용이하지 않다는 단점이 있다. 짧은 금형 수명과 겹침 결함 등의 치명적 문제를 안고 있다. 그 원인은 회오리 형상의 금형에 의하여 소재의 유동이 극단적으로 통제되기 때문이다. 이러한 점으로 인하여 그 중요성에도 불구하고 이 공정의 특성에 관한 연구결과가 매우 제한적이다. 이 기술을 확보한 선진업체에서 제조 기술 개방을 기피하는 점과 형상이 복잡하고 해석상으로도 다소 어려움이 따르기 때문으로 판단된다.

국내에서 2001년 스크롤의 열간단조 공법에 관한 연구가 Lee와 Lee[4]에 의하여 최초로 실시되었으며, 3D 유한요소해석법의 초기 적용 사례이므로 정성적으로 유의미한 결과를 제시하는데 그쳤다. Kim 등[5]은 회전스크롤의 배압단조 공정 중 발생한 금형 파손에 관한 연구를 실시하였으며, 개방형 배압 단조 공법에서 발생하는 랩(wrap) 하부에서 발생하는 금형 파손을 방지하기 위한 방안으로 밀폐형 배압 금형을 제안하였다. 그러나 전술한 연구에서 그 당시의 상용 단조 시뮬레이터의 기능 미흡으로 금형의 구조해석 결과에서 다소 정교함이 결여된 점이 발견된다.

최근 Kim 등[6]과 Kim 등[7, 8]은 1단 공정의 알루미늄 열간단조 중 발생한 파단 원인 분석[6]을 실시하였으며, 소재형상 및 금형의 형상 설계변수가 파단 원인에 미치는 영향을 실험적 및 해석적으로 연구하였다[7, 8].

이 논문에서는 선행연구[6~8]를 바탕으로 고정 스크롤의 경제적 생산 방안을 제시하고자 한다.

2. 문제의 정의 및 금형 파괴의 원인

Fig. 1은 이 논문에서 연구 대상으로 삼은 고정 스크롤 열간단조 중 발생한 파괴된 금형을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 F 지점에서 파단이 발생하였으며, 그 결과 스크롤 금형의 랩 부의 끝이 바깥으로 굽어 있다.

금형의 파괴 원인을 규명하기 위하여 금형을 장

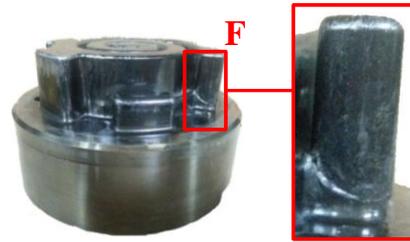


Fig. 1 Die and its fracture occurring in aluminum hot forging of a fixed scroll

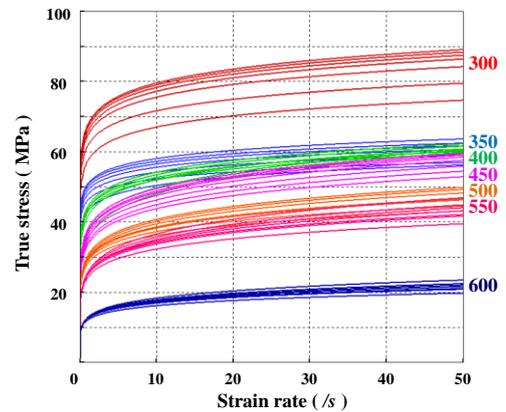
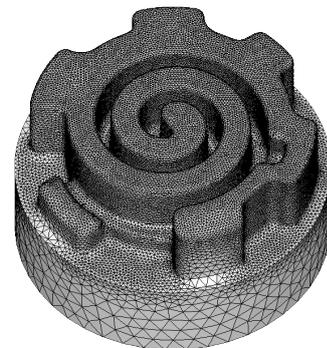


Fig. 2 Flow stress of the material



(a) Material at the final stroke



(b) Die

Fig. 3 Finite element mesh systems employed

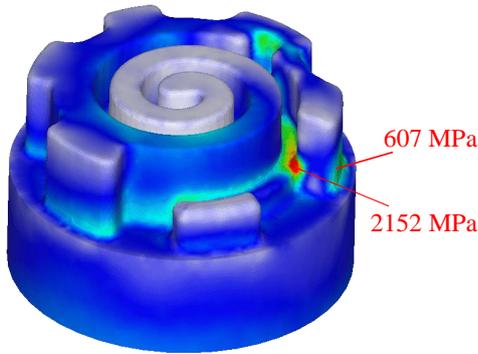


Fig. 4 Effective stress at the elapsed time of 0.065s

체로 가정한 상태에서 공정해석을 실시하였으며, 그 결과를 이용하여 금형의 구조해석을 실시하였다. 공정해석 목적으로 사용된 알루미늄의 유동응력 정보는 고온 압축시험에서 실험적으로 획득하였다. 이에 대한 정보를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)와 같이 소재와 금형의 유한요소해석을 위해 각각 약 15000개와 125000개의 사면체요소를 사용하였다. 금형의 속도는 -200mm/s로 일정하다고 가정하였으며, 마찰조건으로 0.2의 쿨롱마찰을 사용하였다. 금형의 탄성계수와 포아송 비는 각각 210.0MPa과 0.28으로 간주하였다. 설정한 좌표계를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 4는 0.065초 경과 시점에서 파단 부위에 작용하는 유효응력을 나타내고 있다. 이 시점에서 σ_{yy} 는 최대값을 기록한다. 최대의 σ_{yy} 는 1336 MPa이며, 랩이 끝나는 지점의 내면에서 나타난다. 이것이 랩 내측 뿌리에서 유효응력의 급격한 상승을 초래한다. Fig. 5는 행정의 경과에 따른 파단 지점 주위에서 기록한 최대응력의 변화를 나타낸다. 물론 양수의 응력은 인장상태를 의미한다. 이 그림에서 보는 바와 같이 0.065초 경과 시점에서 최대의 인장상태에 도달하고, 오히려 최종 행정에 이르면, 급격하게 압축상태로 변화된다. 따라서 금형의 취성적 특성상 최대 인장응력 시점에서 금형이 파단된 것으로 판단된다.

Fig. 6은 이 파단 추정시점에서 소재의 유동선도를 나타낸다. 이 그림으로부터 파단 시점에서 랩 좌우의 소재 충전 상태가 크게 다를 수 있다. 이러한 불균형 소재 충전은 소재가 랩을 중심에서 바깥으로 미는 힘을 발생시키며, 특히 랩이 끝나는 지점인 실제의 파단 지점에서 Fig. 4에서 보는 바와 같은 최대의 인장응력을 초래한다.

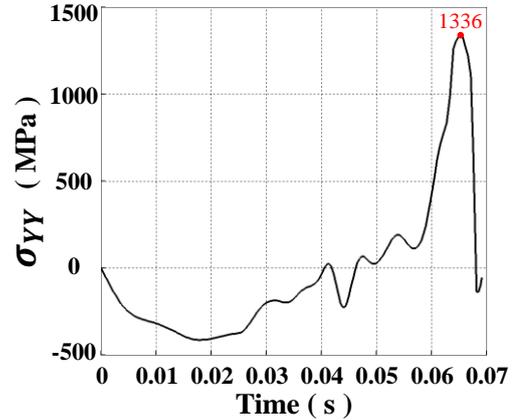
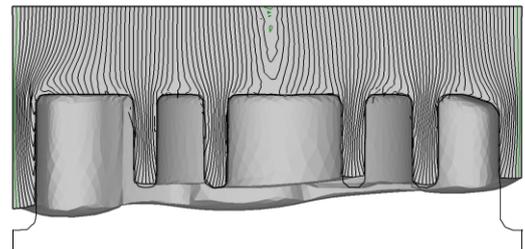
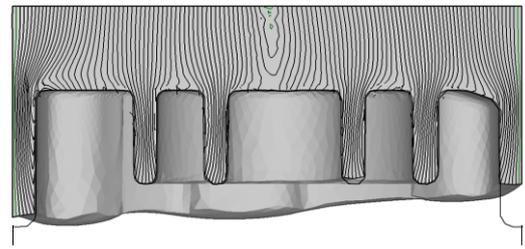


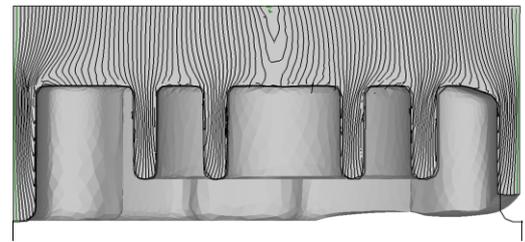
Fig. 5 Variation of σ_{yy} with elapsed time



(a) At 0.060s



(b) At 0.065s



(c) At 0.070s

Fig. 6 Metal flow lines with emphasis on the fractured stroke

3. 최적 및 실용적 소재 형상

2장에서 알루미늄 스크롤 열간단조 중 금형 파괴 원인을 규명하였다. 원인을 요약하면, 랩 좌우의 소재유동 불균형이 직접적인 원인이다. 여기서 강조해

야 할 점은 2장에서 연구한 공정이 1단 공정이라는 점이다. 전술한 금형의 파괴 문제는 단 수를 증가시켜 최적의 예비형상을 사용함으로써 쉽게 해결할 수 있다. 문제는 이 방법이 경제성 및 친환경성 측면에서 불리하다는 것이다.

선행연구[7]에서 다양한 형상변수가 금형 파단지점에서 응력에 미치는 영향을 분석하였다. 이 연구를 바탕으로 실현성이 높은 두 가지의 방안을 이장에서 제시하였다.

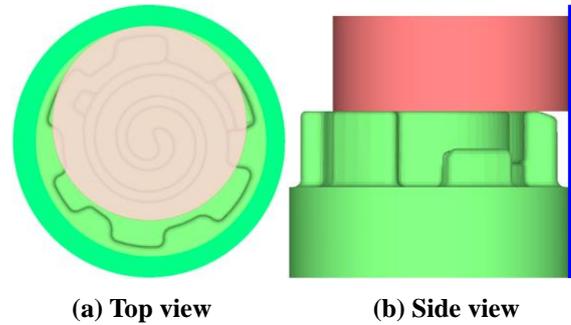


Fig. 7 Initial material and its placement

3.1 최적 실린더 소재 및 소재의 편심 투입

초기소재의 편심이 파손부위 F 지점의 최대인장응력에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 7과 같이 편심된 소재의 중심은 파손부위 F 지점의 벽에 접촉되게 하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 최대인장응력은 초기소재의 반경이 작아질수록 낮아진다. 소재의 반경을 52mm에서 61mm로 변화시켰을 때 평균 응력감소율은 약 34.5MPa/mm로 나타났다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 수치적으로 실험한 범위 내에서 최대 150MPa의 최대인장응력의 감소효과가 있다. 이것은 파단이론의 관점에서 효과적이라 할 수 있다.

이 방식은 소재의 겹침 결함을 야기할 수 있으므로 안정적인 소재 투입에 필요한 장치의 고안이 필요하다. 소재가 투입되면, 간단한 자동화 장치를 이용하여 소재를 일정 지점에 위치시킬 수가 있다. 따라서 적은 비용으로 금형의 수명 향상을 이루는 현실적인 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 사다리꼴 단면 소재

Fig. 6의 불균형 소성유동을 개선하는 방법으로 사다리꼴 단면의 원형 소재를 고려할 수 있다. Fig. 9는 제안된 소재의 형상을 나타내고 있다. 이 그림에서 소재는 상하 대칭이지만, 한 면만 경사진 경우에도 상하 대칭 소재와 유사한 결과를 나타낸다.

Fig. 10은 기존의 소재와 경사각이 5도인 소재에 의하여 발생한 파단지점의 단조방향 응력 성분을 비교하고 있다. 이 그림으로부터 경사각 5도의 소재는 201MPa의 최대인장응력의 감소 효과를 보였다. 이것은 금형의 수명 연장에 유의미한 것으로 사료된다. 이 그림에서 보는 바와 같이 소재의 형상은 최대 인장응력을 낮추고 있다. 이것은 최적화된 소재의 형상을 이용하여 랩의 안쪽의 소재 충진을 상

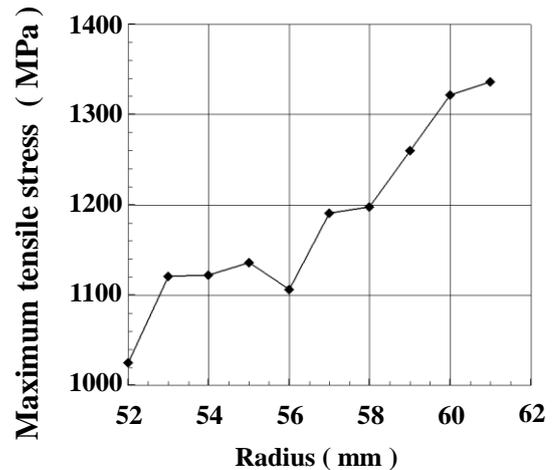


Fig. 8 Effect of eccentricity of initial material on tensile stress at the structurally weakest point

대적으로 늦춘 결과이다.

Fig. 11은 경사각 θ 가 상하 5도인 소재를 사용한 공정의 소성유동선도를 기존 공정과 비교하여 나타내고 있다. 앞서 Fig. 11의 최대 인장응력의 변화에서도 밝힌 바와 같이 적절히 경사진 소재는 랩 외부의 소재 충진을 촉진시키고 전체적으로 단조 방향의 인장응력을 낮추는 효과로 연결된다.

선행연구[7]에 따르면, 한 면만 경사진 소재도 인장응력 감소 측면에서 효과적이다. 그러나 소재를 자르는 장치 측면에서는 상하 대칭 소재가 유리할 수 있다. 최종적으로는 소재 투입의 안정성 등이 고려되어야 한다. Fig. 12은 소재를 자르는 개념도이다. 톱은 소재가 진행되는 방향과 일정한 각도를 유지하거나 기준 각도에서 약간 조절될 수도 있으며, 소재는 이동하면서 180도 회전을 한다. 따라서 만약 톱이 일정 각도를 유지하면, 소재는 상하가 대칭의 형상을 갖게 된다. 한편, 절단과 함께, 소재의 높이가 가장 크거나 가장 작은 부위에 표시를 할 수 있으

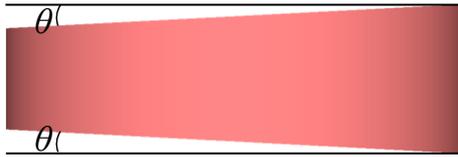


Fig. 9 Definition of shape of material

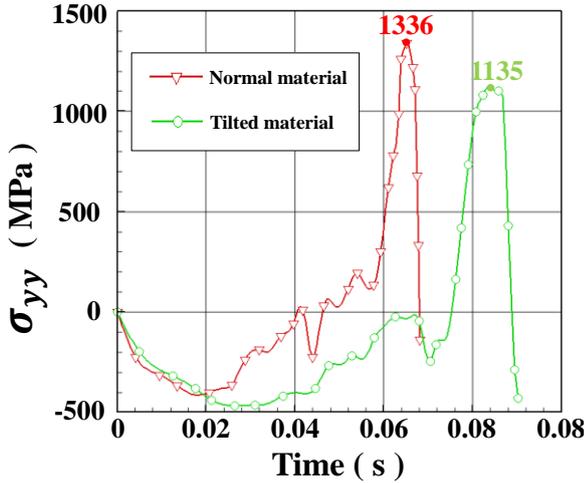


Fig.10 Stress component σ_{yy}

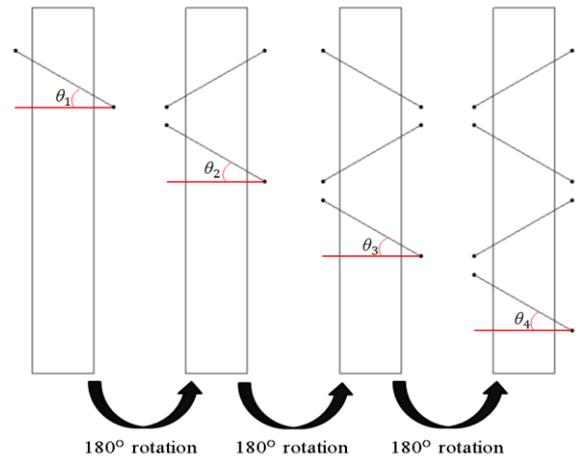


Fig.12 Conceptual diagram of cutting bar material for the optimized billets

므로 이를 이용한다면, 자동장치 및 수동 작업 시에 안정적인 품질을 얻는데 도움을 받을 수 있다.

4. 결론

이 논문에서는 알루미늄 스크롤의 1단 열간단조 공정 중 발생한 금형 파괴 현상을 규명하였으며, 그 결과를 이용하여 두 개의 실용적인 대처 방안을 제안하였다.

스크롤 단조공정의 특성상 소성유동이 크게 제한을 받는다. 경제적 생산을 목적으로 개발된 1단 공정에서는 금형 파괴가 공정 개발 과정에서 빈번히 발생하므로 공정개발이 난해한 문제이다. 금형의 구조적 취약성으로 랩이 끝나는 부분에서 랩 좌우의 소재 채움의 차이가 랩에 축력을 가하게 되며, 이것이 랩 뿌리 부위에 인장 응력을 발생시킨다. 이 인장 응력이 이 논문에서 연구 대상으로 삼은 공정에서 발생한 금형 파괴의 직접적 원인이다.

따라서 이 공정에서 발생한 금형 파괴를 완화시키는 방법은 기본적으로 랩이 끝나는 지점에서 랩 좌우의 소재 채움의 불균형을 최소화시키는 것이다. 기본적으로 경제성 및 친환경성 측면에서 유리한 1단 공정을 전제로 하였을 때, 초기 소재의 형상을 최적화하는 것이 답이다. 물론 소재를 준비하고 이를 취급하는데 있어 현실성이 있어야 한다. 이러한 점을 충족시키는 두 가지의 방안이 제안되었다.

첫 번째는 기존의 단순 실린더 소재를 사용하되, 소재의 금형 투입 시에 중심 위치를 파단이 발생한

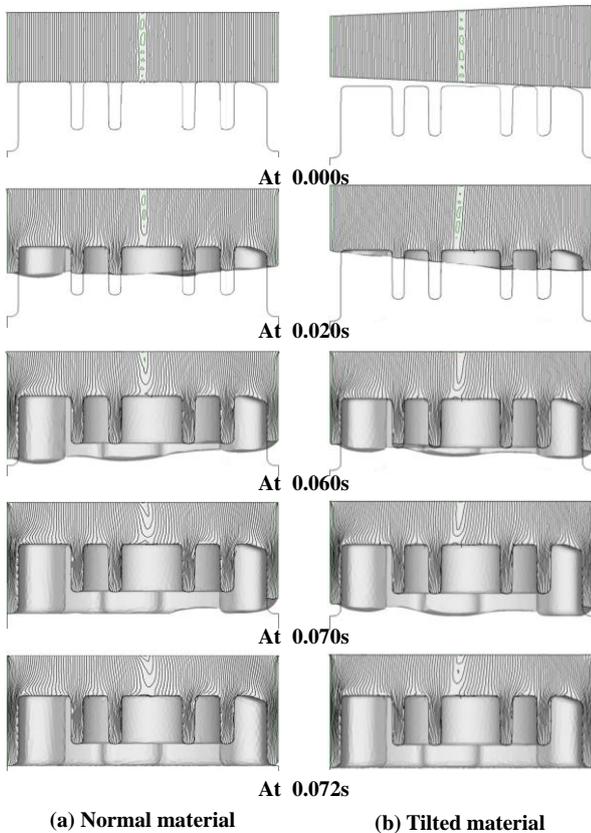


Fig.11 Comparison of metal flow lines

지점으로 이동시키는 것이다. 중심 이동량은 소재의 반경의 변경으로 조절될 수 있다. 두 번째 방안은 단면이 사다리꼴인 환봉을 사용하는 것이다.

이 두 방법에서는 간단한 장치의 사용으로 소재의 절단 및 투입 문제가 해결될 수 있다. 제한된 두 방법은 11~15%의 최대 인장응력 감소 효과를 보였다. 제시한 방안과 함께 펀치의 미세한 각도 조절 등에 의한 소성유동의 제어를 통하여 임계 상태에서 행해지는 스크롤 열간단조 공정에서 금형 수명 연장 효과는 클 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 WC 300 연구과제 및 2014년도 경상대학교 연구년제연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- [1] K. H. Lee, 1998, Scroll Compressors for Air Conditioning, J. Fluid Mach., Vol. 1, No.1, pp. 121~128.
- [2] H. Kamino, T. Tamada, S. Katsumata, H. Hosono, M. Suzuki, 1997, Manufacturing Technology of Aluminum Scrolls by Hot Forging, Light Metals, J. Jpn. Inst. Light Met., Vol. 47, No. 2, pp. 114~122.
- [3] H. Yoshimura, K. Tanaka, 2000, Precision Forging of Aluminum and Steel, J. Mater. Process. Technol., Vol. 98, No. 2, pp. 196~204.
- [4] Y. S. Lee, J. H. Lee, 2001, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. Spring Conf.(editor: B. M. Kwak), Kor. Soc. Mech. Eng., Seoul, Korea, pp. 111~115.
- [5] Y. B. Kim, K. H. Jung, S. Lee, E. Kim, J. Lee, D. S. Choi, G. A. Lee, 2013, Development of a Closed-die Design with Backpressure to Forge Rotating Scrolls, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 4, pp. 183~188.
- [6] S. W. Jeong, W. B. Woo, J. G. Lim, M. S. Joun, 2014, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf.(editor: J. H. Lee), Seoul, Korea, pp. 162~165.
- [7] Y. S. Kim, S. W. Jeong, J. G. Lim, M. S. Joun, 2015, Proc. 13th Asian Symposium on Precision Forging (ASPF2015)(editor: M. S. Joun), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 85~87.
- [8] Y. S. Kim, J. G. Lim, M. S. Joun, 2016, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf.(editor: I. S. Kim), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 158~161.