

LPI 차량용 연료필터 상부 하우징 냉간 단조 성형 공정에서 sink 현상 예측 및 개선

김준영, 박상민, 홍석무*
국립공주대학교 금형설계공학과

Prediction of Sink Phenomenon during Forging Process and Improvement of LPI Fuel Filter Housing Forging Product

Jun-Young Kim, Sang-Min Park, Seokmoo Hong*

Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University

요약 자동차에 사용되는 LPI 연료필터 하우징 제품은 기존 다이캐스팅 공정에서 냉간 단조 공정으로 개발하여 경량화 및 내구성을 향상하였다. 하지만 T자형 단조 형상이기 때문에 제품을 생산하였을 경우 제품의 싱크 문제가 발생하게 된다. 이로 인해 제품의 후처리 가공 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 성형 해석 시뮬레이션을 이용해 문제를 예측하고 개선방안에 대해 연구했다. 성형 해석 시뮬레이션을 이용하여 문제를 개선하기 위해 완전 성형이 가능한 최적 블랭크의 부피를 결정하였다. 그리고 최적의 블랭크 부피에 맞춰 성형 해석 시뮬레이션을 수행하였고 싱크 현상을 가시화했다. 싱크 현상을 개선하기 위해 냉간 단조 공정 진행 시 싱크 부 밑 부분에 패드를 받침으로 싱크 현상을 개선하였다. 적절한 패드력을 구하기 위해 파라미터 스터디를 진행하였고, 적절한 패드력으로 공정 진행 시 싱크 문제를 개선하였다. 그리고 실제 산업 현장에 적용하여 싱크 문제 개선에 대한 검증을 수행했다.

Abstract The LPI fuel filter housings used in automobiles were made from conventional die castings but have recently been developed by cold forging to improve the weight and durability. On the other hand, a sink may develop at the core of the forged product due to the resulting T-shape, which not only reduces the aesthetics, but also increases the post-processing cost of the product. Therefore, this research focused on methods to predict and mitigate sink development and progression during the T-shape forging process. Finite element analysis of the forging process was first performed to determine the optimal initial workpiece devoid of burrs and underfills. An accurate sink prediction was then obtained via metal flow analysis, which was a result of the finite element simulation. Through finite element analysis, it was confirmed that sink development is a product of the differences in nodal velocities arising from the T-shaped forging process. Consequently, a pad was inserted beneath the sink to minimize these velocity differences. The results yielded significant improvement with regard to the sink defect. This method was practically applied to an industrial site to validate the sink improvement.

Keywords : Cold Forging, LPI(Liquefied Petroleum Injection), Metal flow, Rigid Plastic Finite Element Method, Sink

1. 서론

최근 자동차 제조사들은 과도한 화석 연료 소비로 인한 자원 고갈 문제와 환경오염 문제를 해결하기 위해 새로운 연료를 사용하는 자동차 개발에 앞장서 왔다[1].

LPG(Liquefied Petroleum Gas, 액화 석유 가스) 연료는 자원 고갈 문제와 환경오염 문제를 해결할 수 있는 대체 연료로 각광받고 있다[2]. LPG 차량의 연료 공급 방법은 기화기 방식으로 충전 효율이 낮기 때문에 가솔린 엔진에 비해 배기가스 수준이 높게 결정되는 문제점이 있었

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Kongju Univ.)

Tel: +82-41-521-9291 email: smhong@kongju.ac.kr

Received March 2, 2017

Revised March 21, 2017

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

대[3]. 이러한 문제를 해결하기 위해 LPG 연료를 직접 분사하여 공급해주는 LPI(Liquefied Petroleum Injection) 방식이 개발되었다. Fig. 1과 같이 LPI 엔진에서 연료필터는 이물질 차단을 통해 인젝터의 손상을 방지하고 LPG 연료 공급 능력을 향상시키는 중요한 부품이다. LPI 연료필터는 냉간 단조 공정을 적용하여 생산되는데 그중, 연료필터 하우징 부품을 냉간 단조 공정으로 생산 시, 부품 중앙부에 싱크(sink) 현상이 나타나게 된다[4]. 불규칙한 싱크 현상으로 인해 후처리 과정 중, 홀 가공에서 문제가 발생할 수 있는 가능성이 있기 때문에 싱크 현상을 최소화하는 것이 매우 중요하다. 연료필터 하우징 제품에 관한 선행 연구로 Son 등[5]은 웨브(web) 두께/리브(rib) 폭 비를 변화시켜 T형단조 제품의 결합에 관한 연구를 진행하였고, Lee 등[6]은 LPI 연료필터 하우징 제품에 대한 성형 해석을 진행하여 금형 및 시제품을 제작하였다.

Lee 등이 수행한 차량용 연료필터 하우징 개발 연구를 토대로 제품을 생산하였을 때, 불규칙한 싱크 현상이 나타나게 된다. 이에 본 연구에서는 LPI 연료필터 하우징 부품의 싱크 현상을 최소화하기 위해 냉간 단조 공정 시 제품 밑 부분에 패드 금형을 공정에 추가하여 싱크 현상을 방지하고자 한다.



fig. 1. LPI fuel filter housing

2. 본론

2.1 최적 블랭크

싱크 문제를 성형 해석 시뮬레이션을 이용하여 개선하기 위해서 우선 제품을 완전 성형할 수 있는 블랭크 사이즈(blank size)가 필요하다. Fig. 2와 같이 블랭크 사이즈가 클 경우 단조 공정 진행 시 과성형(overflow)이 발생하여 제품 형상의 목표 치수를 초과하게 되고, 블랭크

사이즈가 작을 경우 미성형(underfill)이 발생하게 되어 불량 제품이 발생하게 된다. 따라서 적절한 블랭크 사이즈를 찾기 위해 파라미터 스터디(parameter study)를 수행했다. 그 결과 공정 중, 소재가 유입되는 과정에서 웨브 부분에 있던 소재가 리브 방향으로 유입이 되면서 싱크 현상이 발생하기 시작한다. 금형을 보면 외형에서 6각 볼트 형상을 성형하기 위해 다이에 홀이 뚫려있다. 이 형상이 만들어지는 과정에서 Fig. 3의 금속 유동선을 확인해 보았을 때, 펀치가 위에서 누르는 과정이 진행되면서 홀 부위 영역(A)의 변형률 속도가 금형과 접촉된 부위(B) 소재의 상대속도 차이로 인해 싱크 현상이 더욱 가속화되는 것으로 판단된다. 이러한 원인은 소재의 유입을 조절해 주는 장치가 없기 때문에 싱크 현상이 발생된다고 판단된다[7].

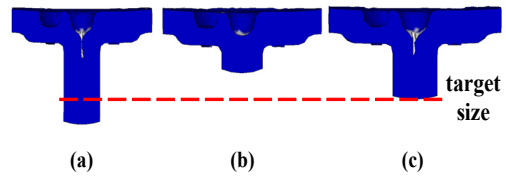


Fig. 2. Comparison of target size between excessive and insufficient and appropriate material

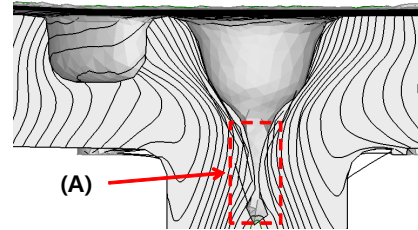


Fig. 3. Sink phenomenon and metal flow line

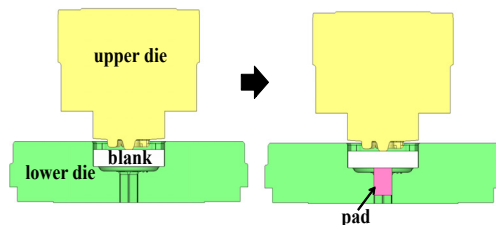


Fig. 4. Finite element modeling

2.2 유한 요소 모델

본 연구에서는 냉간 단조 공정으로 성형되는 LPI 연료필터 상부 하우징 제품의 유한 요소 해석을 수행하기

위해 상용 해석 s/w인 AFDX_16R01[8]을 사용하였다. 단조 해석에서 필요한 패드력(pad force)을 찾기 위해 Fig. 4와 같이 해석 모델링을 실시하였고, 상부 금형(upper die), 하부 금형(lower die), 소재(blank), 패드(pad)로 구성하였다. 본 공정은 냉간 단조 공정임을 감안하여 강소성 유한 요소법 해석을 진행하였으며[9] 소재의 유동 해석을 진행하였다. 소재는 Al 6061-0을 사용하였다. 해석에 사용된 물성치는 AFDX_16R01 프로그램의 material database를 활용하였고 Table. 1에 나타내었다. 유동 응력 곡선은 Ludwik 식을 변형하여 항복응력을 고려할 수 있도록 식(1)과 같이 정의하였다[10].

$$\sigma_f = Y_0 \left(1 + \frac{\varepsilon}{b}\right)^a \quad (1)$$

여기서 a 는 변형률 경화 지수[-], b 는 변형률 감소비[-], Y_0 는 최소 항복 강도[MPa]를 의미한다. 성형 해석 시간을 단축하고자 1/2 model을 적용하였으며, 3차원 밀폐 조건을 사용하였다. 마찰 조건은 쿨롱 마찰을 적용하였고, 마찰 계수는 0.15로 가정하여 해석을 진행하였다. 본 해석에서는 요소 수를 10000개로 고정하였다. 금형 해석에 사용된 조건들은 Table. 2에 나타내었다. 본 연구에서 유한 요소 해석의 목적은 금형에 패드를 받침으로서 제품에 발생하는 싱크 현상을 최소화시키기 위함이었다. 따라서 하부 금형에 속도 조절용 패드를 모델링 하여 추가하였고, 적절한 패드력을 구하기 위해서 파라미터 스터디를 수행하였다.

Table 1. Mechanical properties of Al 6061-0

Parameter	Al 6061
Y_0 (MPa)	100.034
a (-)	0.1203
b (-)	0.00257
Young's modulus(GPa)	71.38

Table 2. Forging parameter used in FEM

symmetric	1/2
No. mesh	10000
Poisson's ratio(ν)	0.3
Friction coefficient(-)	0.15

2.3 유한 요소 해석 결과

냉간 단조로 성형되는 LPI 상부 하우징 제품을 유한 요소 해석을 진행하기 위해 우선 완전 성형되는 최적의

블랭크 사이즈를 결정하였다. 결정한 블랭크 사이즈를 통해 유한 요소 해석 진행 결과 싱크 현상이 발생되는데, 이는 2.1절에 언급한 대로 소재의 상대 절점 속도(relative nodal velocity)가 크기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 상대 절점 속도를 제어하기 위해 하부 금형에 패드를 도입하였다. Fig. 5는 펀치 스트로크(stroke)가 10mm 일 때, Fig. 5(a)는 공정에 패드를 적용하지 않았을 때의 결과이고 Fig. 5(b)는 공정에 패드를 적용하여 해석을 진행한 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 Fig. 5(a)에서 공정에 패드를 적용하지 않았을 때에는 싱크 현상이 발생하기 시작하고 Fig. 5(b)에서는 싱크 현상이 발생하지 않음을 보여준다. 이 결과를 토대로 소재 유입 속도를 조절하여 싱크 현상을 제어할 수 있는 가장 중요한 요인이 패드력임을 확인하였다. 절점의 상대 속도를 최소화하는 패드력을 찾기 위해서 파라미터 스터디를 수행하였다. 그 결과 적절한 패드력은 18kN임을 확인하였다. 정확한 비교를 위해 Fig. 6의 그림과 같이 Fig. 6(a)는 패드력이 미미한 조건으로 성형 해석을 진행한 결과이며, Fig. 6(b)는 18kN의 패드력을 적용하여 성형 해석을 수행한 결과이다. 미미한 패드력을 적용하여 해석을 진행한 결과, 제품 6각 볼트 형상의 목표 치수(19mm)를 2mm 초과하였고 싱크 현상이 감소하기는 하였으나, 완벽하게 제어되지 않았다. 이는 소재 유입 속도를 제어해주는 패드력이 부족하여 소재 유입 속도가 빠르기 때문으로 판단된다. 반면 18kN의 패드력을 적용하여 해석을 진행한 결과에서는 소재 유입 속도를 완전히 제어하여 싱크 현상이 발생하지 않았으며 6각 볼트 형상의 길이도 19mm로 목표 치수를 만족하였다. 싱크 현상을 방지하기 위한 가장 중요한 요인으로 패드력을 제시하였고, 패드의 유무에 따라 정확한 비교를 위해 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7(a)는 패드를 받치지 않은 상태에서 공정을 진행한 결과이며, Fig. 6에서의 싱크 상태에서 점차적으로 진행되어 싱크 현상이 더욱 심해진 것을 보여준다. Fig. 7(b)는 적절한 패드력을 적용하여 공정을 진행한 결과로 싱크 현상이 방지될 뿐만 아니라 제품의 목표치수를 만족하였다.

시뮬레이션 결과로 Fig. 8과 같이 공정에 패드를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우의 제품 하단부 절점 속도를 비교하였다. Fig. 8(a)는 패드를 적용하지 않은 결과로 약 10700mm/s의 절점 속도가 발생하였고 Fig. 8(b)는 패드를 적용한 결과로 약 8200mm/s의 절점 속도가

발생하였다. 이는 절점 속도가 약 23% 감소한 것으로 소재의 유입 속도를 패드를 통해 조절하여 싱크 현상이 제어됨을 확인하였다.

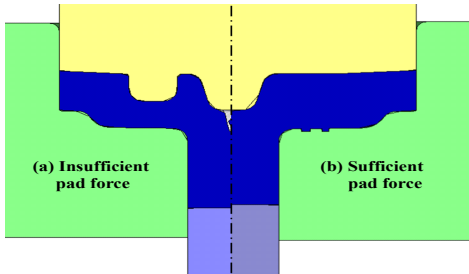


Fig. 5. Comparison of deformed shape between insufficient pad force and sufficient pad force

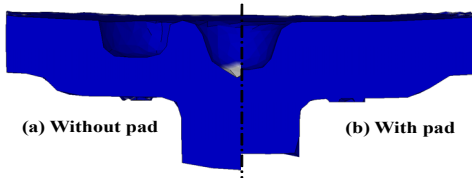


Fig. 6. Comparison of deformed shape between without pad and with pad in die at the punch stroke of 10mm

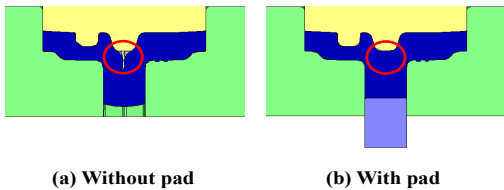


Fig. 7. Comparison of deformed shape between with/without pad

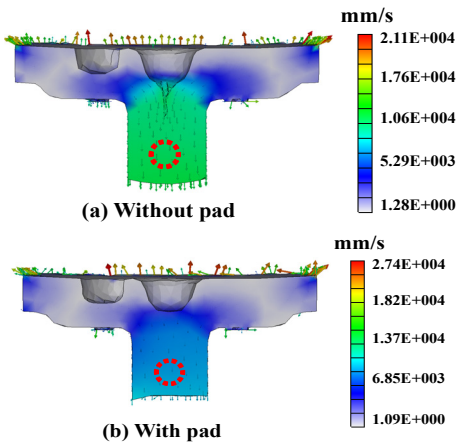


Fig. 8. Comparison of nodal velocity between with/without pad

2.4 성형 해석 결과 검증

성형 해석 결과 검증을 위해 사용된 해석 조건들을 Table. 3에 나타내었다. 패드를 받치고 성형 해석을 진행한 결과 싱크 현상을 방지할 수 있었다. 이 결과를 검증하기 위해서 해석에 사용한 공정 조건대로 실제 양산 금형에 적용하여 제품을 생산하였다. 수정된 금형으로 제품을 생산할 경우 싱크 불량률이 제거되었고, Fig. 9에서 보이는 바와 같이 제품 상단부 목표 높이 19mm를 만족하였다.

Table 3. Forging parameter used in verification FEM

Upper die velocity(mm/s)	1/2
No. mesh	10000
Poisson's ratio(v)	0.3
Friction coefficient(-)	0.15
Pad force(kN)	18

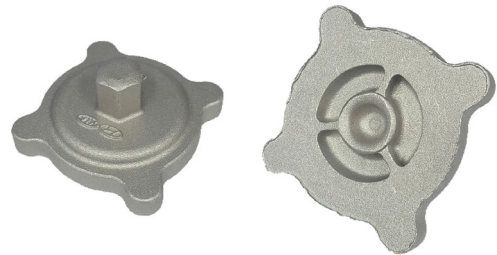


Fig. 9. Verification of modified die design to preventing sink phenomenon

3. 결론

LPI 연료필터 상부 하우징 제품 성형 과정에서 발생하는 싱크 현상을 유한 요소 해석을 통해 파악하고 패드를 추가하여 해석을 진행하여 싱크 현상을 개선하기 위해 본 연구를 수행했다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 유한 요소 해석을 진행하여 제품의 중앙부의 싱크 현상을 가시화하였고, 제품 불량 원인 중 하나임을 확인하였다.
2. T형상 단조에서 싱크 현상의 주된 원인은 소재의 상대 절점 속도 차이이며, 이를 개선하기 위해 하부 금형에 패드를 추가하였다. 2.4절에 언급한 대

로 성형 조건을 표기하였고 유한 요소 해석 결과, 싱크 현상이 개선되는 효과를 얻었고 적절한 패드력은 18kN으로 결정되었다.

- 연구를 통해 얻은 패드력을 실제 금형에 적용하여 제품을 생산하고, 해석 결과와 비교하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

References

- I. K. Lee, S. H. Cho, H. G. Kim, S. C. Kim, "Study for Failure Examples of Injector, Idle Speed Actuator and Gasket in LPi System Vehicle", *J. Kor. Inst. Gas*, Vol. 16, No. 3, pp. 48-53, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7842/kigas.2012.16.6.48>
- M. C. Lim, S. W. Choi, C. L. Myung, S. S. Park, J. N. Park, S. K. Kim, "The study of performance and engine application characteristic of turbine type LPi fuel pump with LPG composition rate", *Proc. Kor. Soc. Automot. Eng. Spring Conf*, pp. 1891-1896, 2006.
- M. E. Payne, J. S. Segal, M. Newkirk, L. R. Smith, "Use of Butane as an Alternative Fuel-Emissions form a Conversion Vehicle Using Various Blends", *SAE Int. J. Fuels Lubr*, 952496, 1995.
DOI: <http://doi.org/10.4271/952496>
- S. W. Lee, W. S. Byeon, S. R. Cha, B. S. Kim, M. S. Joun, "Case study on major defects in cold forging by finite element method(2) - Shape defect", *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf*, pp. 228-231, 2011.
- K. H. Son, Y. H. Kim, Y. S. Suh, "A Study on the Defect of T type Forging Products", *Proc. Kor. Soc. Precis. Eng. Spring Conf*, pp. 952-956, 1997.
- B. H. Lee, S. Y. Park, "Development of LPI Vehicle Fuel Filter Housing", *J. KAIS*, Vol. 15, No. 2, pp. 653-659, 2014.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.2.653>
- M. C. Kim, S. W. Lee, M. C. Lee, M. S. Joun, "Case study on major defects in cold forging by finite element method(3) - Fracture and metal flow line defect", *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Korea*, pp. 232-236, 2011.
- AFDEX User manual, 2015.
- H. S. Byun, "Finite Element Analysis for the Forging Process Design of a Blind Rivet", *J. KAIS*, Vol. 10, No. 10, pp. 2577-2582, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2009.10.10.2577>
- J. H. Kim, S. M. Hong, "Process and Die Design of Square Cup Drawing for Wall Thickening", *J. KAIS*, Vol. 16, No. 9, pp. 5789-5794, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2015.16.9.5789>

김 준 영(Junyong Kim)

[정회원]



•2012년 3월 ~ 현재 : 국립공주대
금형설계공학과 재학중

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조성형 해석

박 상 민(Sangmin Park)

[정회원]



•2014년 3월 ~ 현재 : 국립공주대
금형설계공학과 재학중

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조성형 해석

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[종신회원]



•1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (학사)
•2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (석사)
•2007년 8월 : Technical University of Munich 기계공학과 (박사)

•2007년 4월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자, 수석연구원

•2015년 3월 ~ 현재 : 공주대 금형설계공학과 교수

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조, 하이드로포밍, 유한요소해석, 최적설계