

유한요소법을 이용한 FCEV용 체크밸브의 열간 단조 공정 해석

정동환*, 송현정*, 이창훈**, 이승범**, 김지훈***, 손근주***, 조해용****.#

*충북대학교 기계공학과, ** (주)UNICK, *** (주)선일다이파스, ****충북대학교 기계공학부

Analysis of Hot Forging Process of Check Valve in FCEV using Finite Element Method

Dong-Hwan Jung*, Hyun-Jung Song*, Chang-Hoon Lee**, Seung-Beom Lee**,
Ji-Hoon Kim***, Keun-Joo Shon***, Hae-Yong Cho****.#

*Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat' l Univ.,

UNICK corporation., *Sunildyfas corporation.,

****Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat' l Univ.

(Received 08 September 2021; received in revised form 17 September 2021; accepted 23 September 2021)

ABSTRACT

The use of new and renewable energy is essential to solve the problem of increasing fossil fuel use due to industrial development. The paradigm of the automobile industry has changed due to the strengthening of environmental regulations in developed countries, and the development of eco-friendly cars is underway. Fuel cell electric vehicles (FCEVs), which use hydrogen as fuel, require strict standards for fuel-related components. In particular, check valves for FCEV control high-pressure hydrogen and thus, must be sufficiently strong for the challenging environment caused by high-pressure hydrogen. Therefore, this study used DEFORM 3D, a regular finite element analysis program, to check the moldability of check valves for FCEV, design the process, verify reliability through single streamline analysis, tensile tests, and ANSYS simulations, and identify suitable materials for the high-pressure hydrogen environment.

Keywords : Fuel Cell Electric Vehicle(수소 연료전지 자동차), Check Valve(체크밸브), Hot Forging(열간 단조), Aluminum Forging(알루미늄 단조), Hydrogen(수소)

1. 서 론

산업 혁명 이후 산업 발전에 따라 화석연료의 사용이 매년 증가하여 왔다^[1]. 화석연료 사용과 고갈

로 발생한 대기오염, 기후변화 등과 같은 환경오염과 에너지 위기 등과 같은 문제의 해결을 위해서는 신재생에너지의 사용이 필수적이다. 또한, 최근 전 세계적으로 에너지 문제와 각국의 환경 규제 강화에 따라 에너지 다소비 분야인 자동차 산업의 패러다임이 변화하여 친환경 미래자동차 등의 하이브리드 자동차, 전기자동차, 수소 연료전지 자동차 등에 대

Hae Yong Cho : hycho@cbnu.ac.kr

Tel: +82-53-581-2239, Fax: +82-53-581-2295

한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[2-3] 그 중 수소를 연료로 하고 배기가스 없이 물만 배출하는 수소 연료전지 자동차(fuel cell electric vehicle, FCEV)는 향후 전기자동차와 함께 친환경 자동차 대표주자로 기술개발이 이루어지고 있다.^[4]

수소 연료 전지차의 연료관련 부품은 수소의 누설이 허용되지 않기 때문에 이를 방지할 수 있는 부품 설계가 필요하다. 수소는 확산성이 빠르고 입자가 작아 누설이 쉽다. 수소의 특성상 다른 차량에 비해 누설될 확률과 누설의 위험이 더 크므로 일반 내연기관 자동차의 연료 관련 부품에 비해 더 까다로운 기준 적용이 필요하다.^[5]

연료전지의 전기화학반응을 위해 수소연료탱크에서 연료전지 스택까지 수소를 공급해주는 장치로 레귤레이터, 솔레노이드 밸브와 블로어 등의 부품을 장착한다. FCEV용 체크밸브는 수소의 흐름을 조절하기 위하여 고압 레귤레이터와 스택의 압력을 조절하는 저압 레귤레이터 사이에 설치되며, 입·출력 흐름을 제어한다. 체크밸브는 이미 내연기관 차내에서 자동변속기 유압제어에 사용되고 있으나 FCEV에 적용 시 고압 수소를 제어해야하기 때문에 내연기관차에 적용했을 때보다 더 우수한 기계적 특성을 가져야 한다.

따라서 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 알루미늄 합금의 열간 단조 공정 해석을 통해 성형성을 확인하고자 하였다. 체크밸브를 열간 단조 후 단류선의 분포를 분석하고, 각 방향에 대한 인장시험으로 강도 측정하여 이를 바탕으로 열간 단조 공정을 설계하고자 하였다. 또한, 금속 재료의 열화와 같은 고압 수소에 인하여 발생하는 문제에 대응할 수 있는 적합한 소재를 제시하고자 하였다.

2. 다단 열간 단조공정 설계

다단 열간 단조 금형 및 설계에 상용 설계프로그램인 CATIA를 사용하였으며, 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 다단 단조공정 해석은 설계를 기반으로 공정에서의 성형성, 금속유동, 성형하중을 분석하였다. 그리고

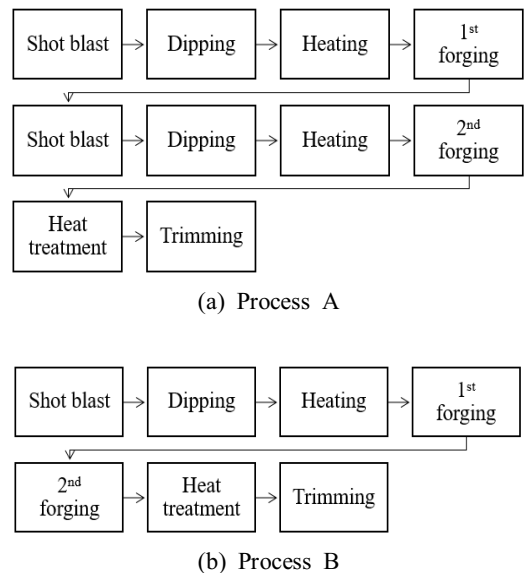


Fig. 1 Schematic diagram of manufacturing process

ANSYS를 이용하여 단조품의 구조적 안전성을 예측 및 분석하고, 강도 평가를 하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 비교하여 공정 설계의 수정 및 보완을 반복하였다. 다만 열간 단조공정 설계는 금형 설계, 소요하중 예측을 통한 프레스용량 결정, 소재의 유동분석 그리고 성형품 내면에 작용하는 압력을 적용하여 구조해석 결과 분석을 통하여 강도 평가로 이루어진다.

체크 밸브 성형의 경우 블로커 단조 후 재가열하여 피니셔 단조를 하는 두 단이 분리된 공정 A와 연속으로 가공하는 B를 비교 분석하였으며, 이를 통하여 강도가 높은 공정을 선정하고자 하였다. 다만 단조 공정 A와 B를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig.2의 빌렛은 가공 전 소재이고, 원기둥 소재인 예비 성형체의 상단부를 펀치로 가압하여 성형한다. 최종 단조 형상은 Fig.2에서의 피니셔와 같으며, Fig.3은 체크밸브 단조공정의 금형 및 성형과정을 나타낸 것이다. Fig.3의 1단계는 블로커 단조로 초기 형상을 만들고 2단계는 피니셔 단조로 프레스용량 그리고 전단과 업세팅을 조합하여 최종 형상을 가공하는 공정이다.

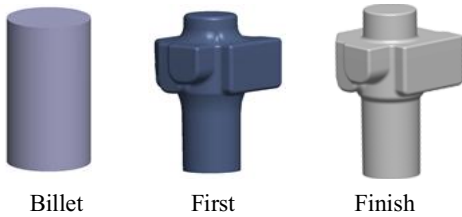


Fig. 2 Product by process

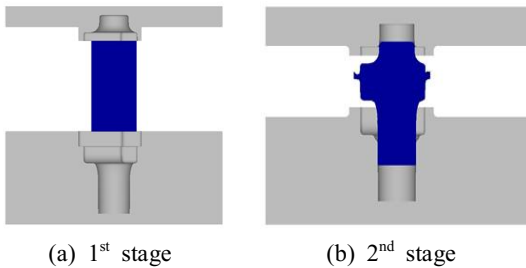


Fig. 3 Schematic illustration of multi-stage forging process

Table 1 Chemical composition of Al6061

Components	Amount[wt%]
Aluminum	96.85
Magnesium	0.9
Silicon	0.7
Iron	0.6
Copper	0.3
Zinc	0.2
Titanium	0.1
Manganese	0.05
Others	0.05

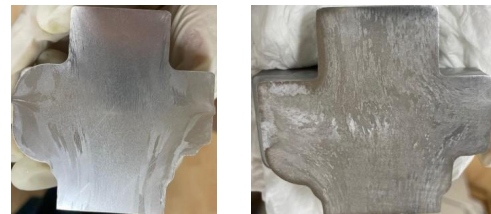
유한요소법으로 다단 열간 단조 공정을 해석하여 성형과 단조 하중을 예측하고, 프레스 설비 용량을 선정한다. 소재는 강도 등을 고려하여 T6 열처리가 가능한 알루미늄 합금 Al6061을 사용하였다. 알루미늄 합금 Al6061은 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 규소(Si)계 알루미늄 합금으로 가공이 용이하고 비교적 양호한 내식성을 가져 구조재료 널리 사용되고 있다. 알루미늄 합금 Al6061의 화학 성분은 Table 1에 나타내었다.

2.1 단류선 분석

열간 단조품의 경우 기계적 성질은 단류선 방향에 따라 달라지므로 단류선의 평가는 반드시 필요하다.^[5]

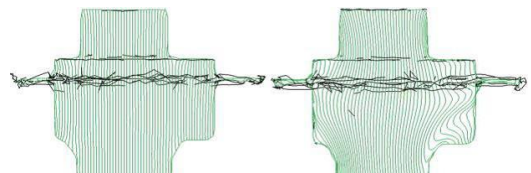
단류선 분석을 위하여 시편은 Fig.1에 나타난 A공정과 B공정으로 단조하였다. 각각의 공정으로 단조한 시편의 조직(Macro scoping structure)사진으로 단류선을 확인하고, 이를 Fig 4에 나타내었다. 또한 단조 공정의 피니셔 단류선에 대한 유한 요소해석 결과를 Fig.5에 나타내었다. 단조품의 시험시편과 시뮬레이션 단류선 결과를 비교하였으며, 비교 결과 금속의 유동 양상과 성형 형상이 일치하였다. 제품의 외형에 따라 단류선이 연속적으로 흐르는 것이 불연속적으로 흐르는 것보다 기계적 강도가 더 좋다. A공정의 경우 블로커 단조 후 냉각과 재가열로 인하여 피니셔 단조의 단류선만 존재하게 된다. 반면 B공정의 경우 냉각과 재가열 공정이 없으므로 단류선이 연속적으로 이어진다.

경도 측정은 HV 마이크로 비커스경도로 중심에서 2mm 간격으로 측정을 하였다. 결과 블로커 단조와 피니셔 단조사이에 열처리 없이 연속적으로 하는 단조품의 기계적 강도가 더 우수할 것으로 판단되었다.



(a) Process A (b) Process B

Fig. 4 Macro structure of posed specimens



(a) Process A (b) Process B

Fig. 5 Simulated results of metal flow of check valve

2.2 인장시험

Fig. 6과 같이 A공정과 B공정으로 성형된 단조품으로 각 A, B와 C, D의 방향으로 인장시편을 제작하였으며, Fig. 7과 같이 INSTRON@8801로 인장시험하였다. 인장시험을 통하여 측정된 결과인 인장강도, 항복강도 그리고 연신율을 Table 2에 정리하였고, Fig. 8에 인장시험 후의 시편을 나타내었다.

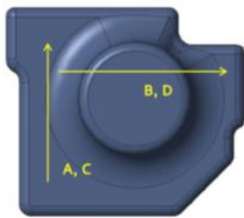


Fig. 6 Direction of tensile test specimen



Fig. 7 Photograph of tensile test(Al6061-T6)

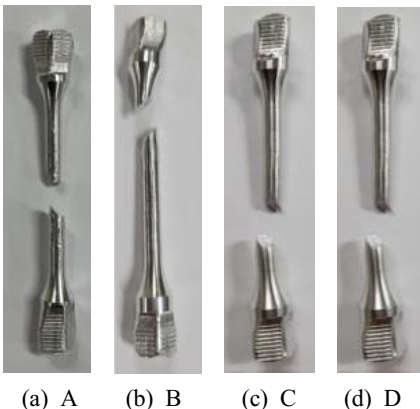


Fig. 8 Tensile tested specimens of Al6061-T6

Table 2 Experimental results of tension test

Al6061-T6	Process A		Process B	
	A	B	C	D
Ultimate tensile strength (MPa)	337.86	324.93	334.09	346.87
Yield strength (MPa)	215.18	270.52	247.02	268.51
Elongation(%)	10.23	6.73	10.61	9.97

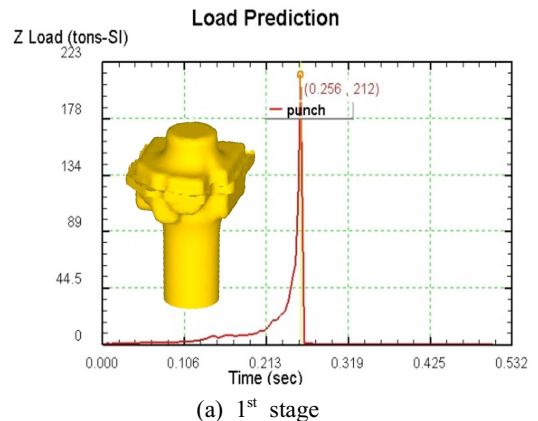
3. 유한요소해석

3.1 단조 공정의 경계조건

열간 공정으로 단조용 알루미늄 합금의 열간 단조 온도 범위 내인 450℃로 온도 설정을 하였으며,^[7] 소성 변형을 하는 동안 발생하는 열은 무시하였다. 단조 공정에서 시간당 스트로크와 총 스트로크는 실제 프레스와 같은 75SPM, 240mm이며, 마찰 상수는 0.3, 요소의 개수는 30,000개로 설정하였다.

3.2 단조 공정 해석

경계조건에 맞추어 다단 열간 단조 공정을 시뮬레이션 하였다. 하우징 단조품은 두 단계의 성형을 거치며 각 단계의 성형 후 형상과 펀치 하중 예측 결과를 Fig. 9에 나타내었다.



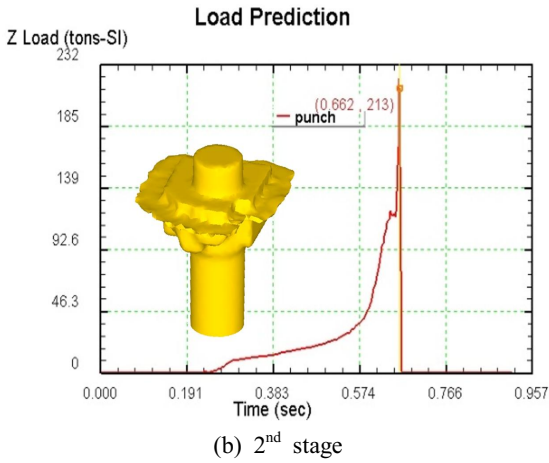


Fig. 9 Simulated results of forging process for check valve

1차 성형 펀치 하중은 2.16MN, 2차 성형 펀치 하중은 2.08MN의 수직하중이 작용하였으므로 하우징 단조품 성형 하중은 4.24MN으로 예측되었다. 일반적으로 프레스의 능력은 필요가압력에 대해서 15~20%의 여유를 가지도록 선정함으로 최소 5MN 이상의 능력을 가진 프레스를 선정하는 것이 바람직하다.^[8]

다단 열간 단조공정 설계는 금형설계, 소요하중 예측을 통한 프레스용량 결정, 소재의 유동분석 및 제품 내면에 작용하는 압력을 적용하고 분석을 통하여 강도 평가를 하였다.

블로커 단조와 피니셔 단조를 제거열 없이 연속으로 하는 B공정은 단류선이 A공정에 비해 연속적이다. 연속 다단 단조한 제품의 단류선이 외형에 따라 흐르게 되며, 연속 단조한 시험 시편의 조직 (Macro scoping structure)사진으로 유동 양상과 성형 형상 제품의 외형에 따라 단류선이 연속적으로 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 체크밸브의 구조해석

각각의 A, B 공정으로 제작된 시편의 인장시험결과를 재료의 기계적 성질 데이터로 입력하였다. FECV용 체크밸브의 모델링을 Fig. 10과 같이 하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 구조해석 하였다. 체크 밸브의 유로 내압은

최대압력 87.5MPa, 평균압력 70MPa이며, 다른 부품과의 결합부를 구속하였다.

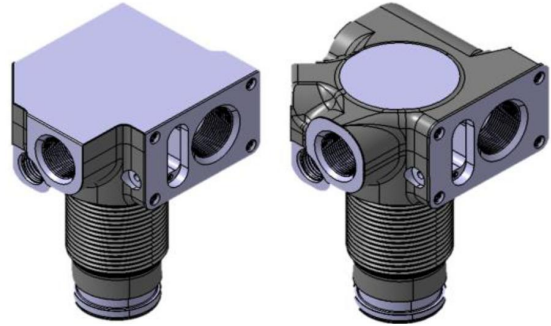
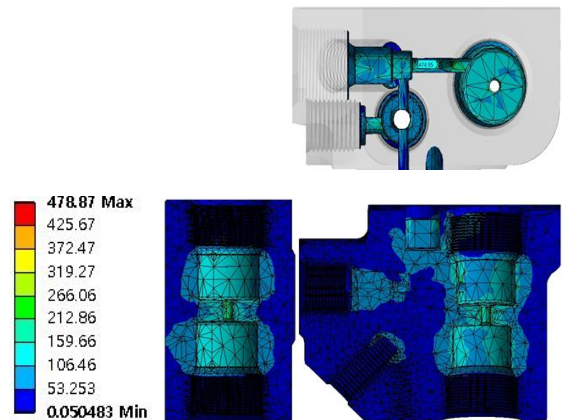
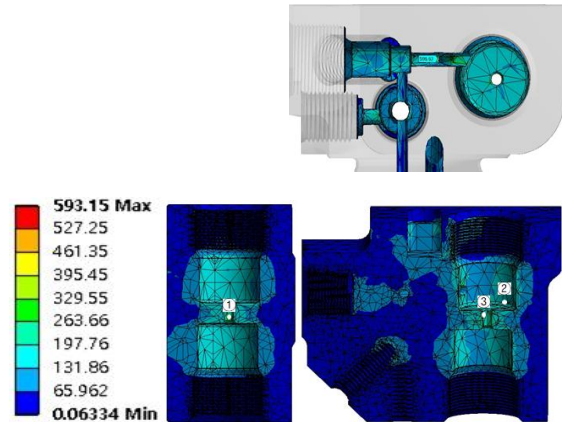
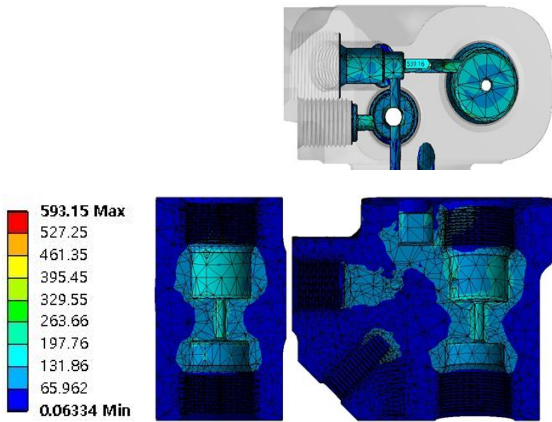
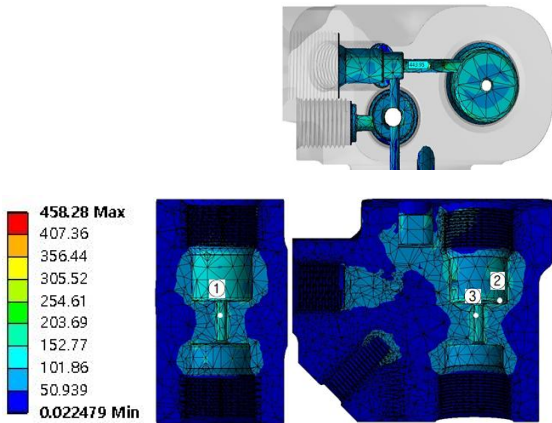


Fig. 10 Modeling of check valve





(c) Max pressure of process B



(d) Normal pressure of process B

Fig. 11 Simulation results of forging process

Table 3 von-Mises stress under max and normal pressure of Al6061-T6

		1	2	3
Process A (MPa)	Max	331.8	233.3	237.6
	Normal	260.2	174.9	186.9
Process B (MPa)	Max	238.3	210.6	190.2
	Normal	176.3	191.2	158.9

Table 4 Mechanical properties of Al6066-T6

Al6066-T6	Process B	
	A	B
Ultimate tensile strength (MPa)	448.07	445.43
Yield strength (MPa)	323.08	339.723
Elongation(%)	108	4.1

체크밸브의 유로부와 상부 응력 결과를 Fig. 11에 나타내었고, Table 3에 정리하였다. Table 2와 같이 A공정 시편의 항복강도 215MPa과 비슷하거나 그 이상의 응력이 작용하여 파손 발생 가능성이 있을 것으로 판단된다. B공정 시편의 항복강도 247MPa과 비슷한 수준의 응력이 예측된다. 따라서 체크밸브의 고압 수소 환경에서 안정적인 강도 위해서는 재료의 변경이 필요하다.

유한요소해석 프로그램인 ANSYS 해석결과 수소 고압 환경에서 Al6061은 체크밸브의 소재로 적합하지 않다고 판단되었다. 알루미늄 60 계열 합금 중 강도가 가장 큰 Al6066-T6과 Al6061-T6의 응력에 대하여 비교 분석하여 재료를 재선정하였다.

Al6061-T6의 해석과 동일한 경계조건으로 구속과 압력을 적용하였다. 그리고 Table 4와 같이 인장 시험한 결과를 재료의 물성치로 입력하고 해석하였다. B공정으로 단조한 FCEV용 체크밸브의 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었으며, 응력을 Table 5에 정리하였다.

그 결과 최대 내압, 평균 내압 조건에서 B공정 인장 시편의 항복강도인 323MPa이하로 내부의 응력분포를 확인할 수 있었다. 따라서 소재 Al6061을 적용하여 계산된 Fig. 11과 Table 3과 비교 분석한 결과 소재를 Al6066으로 변경하는 것이 바람직하다고 판단되었다. 초기 선정된 소재는 강도 등을 고려하여 T6 열처리가 가능한 알루미늄 합금 Al6061을 사용하였다. 알루미늄 합금 Al6061은 가공이 용이하고 비교적 양호한 내식성을 가져 구조재로 널리 사용되고 있다.

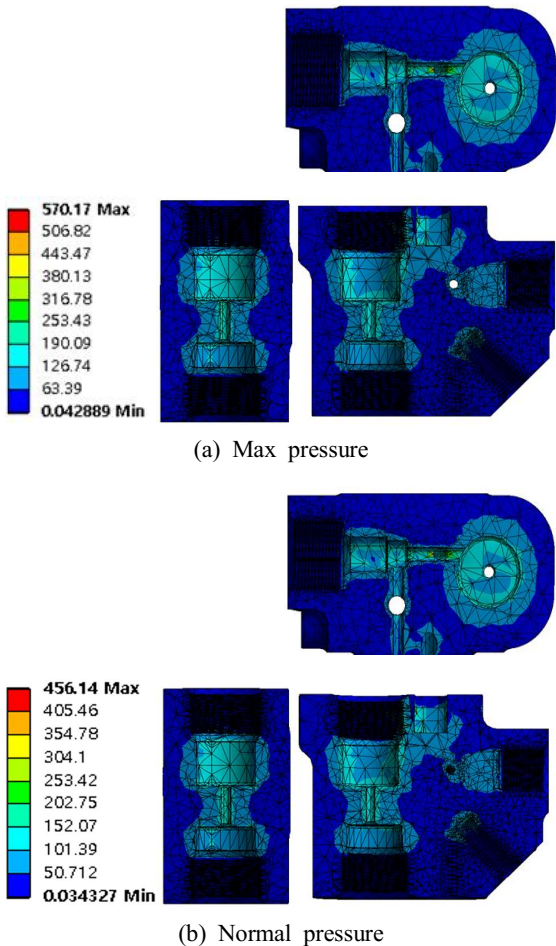


Fig. 12 Simulation results of forging process B

Table 5 von-Mises stress under max and normal pressure of Al6066-T6

	1	2	3
Max (MPa)	267.1	195.3	203.5
Normal (MPa)	210.0	157.0	163.6

그러나 해석 결과 A공정은 항복강도와 비슷하거나 그 이상의 응력이 작용하여 파손 발생 가능성이 있을 것으로 판단되었으며, B공정은 B공정 시편의 항복강도와 비슷한 수준의 응력이 예측되었다. 따

라서 FCEV용 체크밸브의 구조해석 결과 Al6066-T6 로 소재의 변경이 필요하였다.

4. 결론

본 연구에서는 FCEV용 체크 밸브의 열간 단조를 설계하고 고압 환경에 적합한 소재를 제시하였다. 이를 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 성형성을 확인하고, 단조 성형의 하중을 예측하였다. 또한, 단류선 분석과 인장시험 그리고 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 고압에 대한 구조적 안정성을 판단하였다. 해석 결과와 시험 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DEFORM-3D로 블로커 단조와 피니셔 단조 사이에 열처리가 없는 연속 조건의 단조가 우수한 기계적 특성을 가짐을 확인하였고, 해석으로 예측한 체크밸브의 단조 공정결과를 비교하였을 때 단류선은 실제 실험 소재와 동일한 경향으로 나타났다. 따라서 체크 밸브의 가공은 연속 단조 방법을 적용하는 것이 바람직하다.
2. 단조 공정에서 소요되는 총 하중을 유한요소해석을 하여 예측할 수 있었다. 체크밸브의 다단 열간 단조 시, 최소 5MN이상의 용량을 가진 프레스를 선정하는 것이 적절하다.
3. 구조해석을 통하여 Al6061의 항복강도와 비슷한 수준의 응력이 예측되므로 재료의 변경이 필요하였다. 따라서 응력 예측을 통하여 단조 공정의 소재 선정의 기준을 정할 수 있었다.
4. 체크밸브의 열간 단조는 Al6066으로 재료를 변경하고 가공 공정을 연속적으로 하는 것이 바람직하다. 본 연구는 결과적으로 프레스 선정과 소재를 선정하는 기준이 될 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Park, K. T., Yeo, K. M., Park, T. J., Kang, B. R., "Flow Analysis of Check Valve for Hydrogen Vehicle Refueling Line," The Korean Society for New and Renewable Energy, pp. 565~568, 2007.
2. Lee, Y. R., Jang, S. G., Lee, J. H., "A Study on

- Check Valve Chattering of Fuel Supply System using Numerical Analysis," The Korean Society of Automotive Engineers, pp. 91~92, 2017.
3. Park, J. W., Choi, J. W., Hwang, J. H., Seo, J. H., Kang, M. C., "A6000 Aluminum Cold Forging Upsetting and Extrusion Molding Evaluation," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 285~285, 2021.
 4. Park, J. S., Chon, M. S., Lee, H. W., Kim, H. C., Yang, K. J., and Ro, E., "Flow Characteristics of Solenoid Valve in FCEV," Korean Society for Fluid Machinery, pp. 347~348, 2018.
 5. Lee, J. H., Han, H. C., Kim, H. C., Kim, G. H., Kim, J. K., "Numerical Study for Durability and Noise Improvement of Check Valve in FCEV," The Korean Society of Automotive Engineers, pp. 165, 2019.
 6. Kim, K. W., Kim, Y. T., Kim, W. J., Cho, H. Y., "Finite Element Analysis for Multi-stage Forging Process Design of Bolt with Nonaxisymmetric Washer Cam," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 585~595, 2008.
 7. The Japan Society of Mechanical Engineers, the great encyclopedia of mechanical engineering, First ED., KOREA DICTIONARY RESEARCH PUBLISHING, pp. B2-101, 1996.
 8. The Japan Society of Mechanical Engineers, the great encyclopedia of mechanical engineering, First ED., KOREA DICTIONARY RESEARCH PUBLISHING, pp. B2-183, 1996.