

스프링백 효과를 포함한 수소연료전지 분리판용 스탬핑 공정의 유한요소해석

윤석일*, 최종인* 권성욱**

*한밭대학교 산학협력단, **주식회사 넥스플러스
e-mail:mecha722@hanbat.ac.kr

Finite element analysis of stamping process for the hydrogen fuel cell bipolar plate including spring-back effect

Seok-Il Yoon*, Jong-In Choi*, Seong-Wook Kwon**

*Hanbat National University, **Nexplus Inc.

요약

본 연구는 친환경 미래자동차의 주력 기술인 수소연료전지의 핵심부품이 되는 분리판의 스탬핑 성형 공정의 최적화에 대한 연구이다. 수소연료전지 스택은 분리판, 막전극접합체, 기체 확산층, 전해질 막으로 구성되며, 이중 분리판은 전체 스택 셀 피치의 65퍼센트를 차지하는 두께를 갖고 있다. 스택의 소형화는 다양한 수소차 즉 승용차량, 스포츠유틸리티 차량, 트럭, 기차, 해양수송매체로의 확장성을 결정하는 가장 핵심적인 요소이다. 이를 위해 분리판의 두께 감소는 설계 상으로 가능하나, 제조 스탬핑 공정에서 분리판의 채널 미성형, 크랙 발생, 평탄도 불량 등의 품질적 이슈가 발생하므로, 제조 시뮬레이션 연계 설계가 중요하다. 대형 박판의 스탬핑 성형공정은 특히 스프링 백 현상이 발생되면서, 원하는 최종 제품 형상을 구현하기 난해하다. 본 연구에서는 분리판 스탬핑 성형 공정을 외연적 적분 방식의 유한요소법을 이용하여 공정 해석을 수행하였다. 특히 분리판으로 적용될 수 있는 금속계 재료의 탄소성 특성과 가공경화특성을 규명하기 위해 인장시험을 수행하였다. 금속계 재료의 탄소성 구성방정식을 적용한 유한요소모델을 분리판에 적용하여 스탬핑공정에서 제품의 성형성, 취약 위치와, 위치별 두께 감소율, 블랭크의 인플로우 현상을 살펴보았다. 스프링백 효과에 의해 편치 제거 후에 성형 형상과 특히 평탄도의 변화에 대해 고찰하였다. 본 연구에서 구성된 비선형 재료 다단계성형 유한요소모델링과 해석 결과들은 향후 다양한 분리판 성형 공정에 적용하여 상용화로 연계할 예정이다.

1. 서론

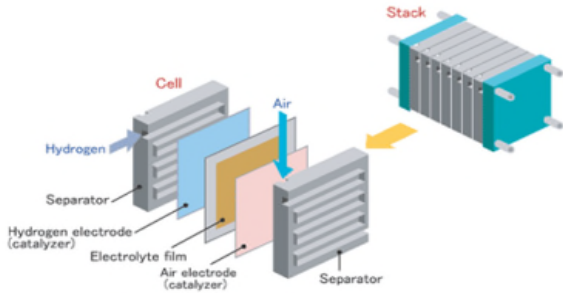
친환경 미래자동차의 주력 기술인 고분자전해질방식의 수소 연료 전지 기술이 날로 발전해 가고 있다. 국외에서는 2014년에 출시된 일본 도요타 미라이 연료전지차의 스택에 3D fine-mesh라는 새로운 분리판 기술을 적용하여, 기체 확산과 물 배출의 효율을 높이며, 스택 성능을 증가시킨 기술적 진보가 있었다. 국내는 현대자동차를 중심으로 한 기술 개발과 양산이 활발히 진행되고 있다.

수소 연료전지차에 대한 기술력은 한국 현대자동차, 일본 도요타가 선진 기술을 가지고 있는 상태이며, 국내 완성차 업체와 부품제조사에는 일본과의 격차를 벌리기 위해 정부 주도의 국책기술개발과 민간주도의 양산화 기술 확보에 혼신을 다하고 있다. 아울러 최근 몇년전부터 이슈화되는 일본 정부의 수출 규제가 가속화됨에 따라 기술 안보 및 국산 기술력 강화 차원에서 수소연료전지 스택의 국산화는 중요한 사안이다. 수소 연료전지 차량용 구동에는 약 100kW급 스택이 사용되며, 100kW급 스택은 약400개 이상의 연료전지 단위 스택이 1~2개 모듈 조합을 통해 구성된다.



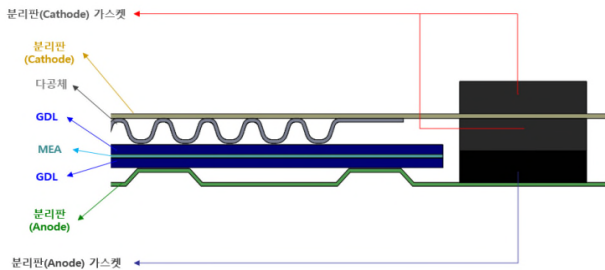
[그림 1] 현대자동차 수소전기차 넥쏘

그림 1에서와 같이 현대자동차 넥쏘는 220셀 정도를 한 모듈로 하여, 이를 2단구조로, 차량용 스택을 제작하여 세계 최초로 연료전지 차량 양산을 시작하였다. 차종 다양화 및 본격 양산을 대응하기 위해서 연료 전지의 원가 및 성능에서 가장 큰 비중을 차지하는 스택의 고성능화 및 소형화를 적극적으로 추진하고 있다. 그림 2에서와 같이 연료전지 스택구조는 전해질막, 전극, 분리판, 가스켓을 하나의 셀로, 220개로 적층 구성한다. 스택은 분리판, 막전극접합체, 기체 확산층, 전해질 막으로 구성되며, 이중 분리판은 전체 스택 셀 피치의 65퍼센트를 차지하는 두께를 갖고 있다.[1]



[그림 2] 연료전지 스택 구조

연료전지 스택의 상세 구조는 Anode Plate-GDL-MEA-GDL-Cathode Plate의 순서로 셀내부의 구조는 그림 3에서와 같이 부품구성이 이루어진다. 3차원 구조의 Anode분리판, Cathode분리판은 미세 구조로 설계되어, 연료전지 스택의 면압을 균일하게 유지하고, 반응 기체와 냉각수의 유동 특성을 결정짓는다. 설계된 유로 형상은 소성 가공 공정인 스탬핑 성형공정(Stamping process)를 통해 제조되어지며, 금형의 평탄도 확보와 스프링백특성을 고려한 성형 조건의 최적화가 제조의 핵심기술이 되며, 본 연구에서는 비선형 재료의 구성방정식을 갖는 대면적의 분리판 스탬핑 공정을 유한요소 해석을 통해 규명하며, 성형조건에 대한 연구를 수행하였다.



[그림 3] 연료전지 스택 단위 구조 분석

2. 연구 목표 및 연구 체계

2.1 연구 체계

본 연구를 위해 국립한밭대학교와 (주)넥스플러스, 한국자동차연구원의 산학협력체제로 긴밀한 협조 연구를 진행하였다.



[그림 4] 본 연구의 체계

3차원 구조의 분리판 기초 설계와 유한요소법을 이용한 분리판의 성형공정해석을 통한 균일도와 크랙 발생 안정성 확보, 특히 스프링백 현상을 고려한 복잡한 스탬핑 성형 해석은 한밭대학교에서 주도적인 역할을 수행하며, (주)넥스플러스는 연료전지 분리판과 다공체의 성형공정과 금형제

작기술을 독자적으로 개발하였으며[2,3], 분리판 소재의 표면처리 기술을 한국자동차연구원, 포스코와 같은 원재료 업체와 주도적으로 개발하고, 특히 분리판용 금형 제작과 스탬핑 공정 개발을 추진하였다.

2.2 연구의 목표

① Anode Plate/Cathode Plate용 비선형 재료 평가

수소연료전지 스택용 분리판으로 다양한 메탈재료, 고분자재료가 사용될 수 있으나, 제조 공정을 감안한 SUS 계열이 선호되며, 본 재료의 인장시험을 통해 비선형 특성에 대한 데이터를 확보가 필요하다. 특히 3차원 형상의 연료전지 수소와 물의 반응면적에서의 부식현상의 발생으로 접촉저항을 낮추기 위한 고내식성 소재 및 표면처리 기술의 연구가 절실히 요구된다.

② 스탬핑 성형 공정의 유한요소 모델링 연구

스택 셀을 구성하는 요소 부품중 가장 큰 부피와 두께를 차지하는 분리판의 경우 박판의 성형 공정 기술이 필요하며, 박판화에 따른 무게와 부피절감에 의한 스택모듈의 컴팩트화를 달성할 수 있으나, 셀 내 기밀 및 셀 간 기밀 유지를 위한 분리판의 평탄도가 확보되어야 한다.

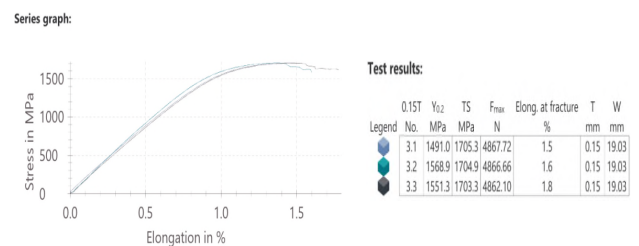
③ 분리판 스프링백 특성을 고려한 유한요소 해석

분리판의 박판화에 따른 스프링백 효과를 유한요소법을 통한 현상학적 검증과 이에 따른 최종품에서의 품질적 지수에 대한 연구가 필요하다.[4,5]

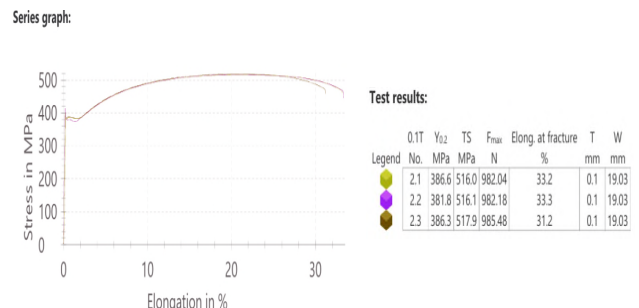
3. 연구 결과

3.1 분리판 재료의 물성 평가 Constitutive model

분리판의 Anode, Cathode에 적합한 금속재료중 SUS 계열에 대한 기계적 물성 실험을 진행하였다. 이 재료는 특정한 탄성한계를 가지면 소성변형에서 가공경화가 나타나며, 탄소성 특성을 갖는 재료의 특성상 스탬핑 성형에서 스프링백 효과가 나타날 수 있다. 비선형 물성에 대한 Constitutive Equation을 유한요소 해석에 반영하여 ABAQUS Material 모델로 구동 처리하였다.



[그림 5] 분리판 SUS 재료#1 물성 평가

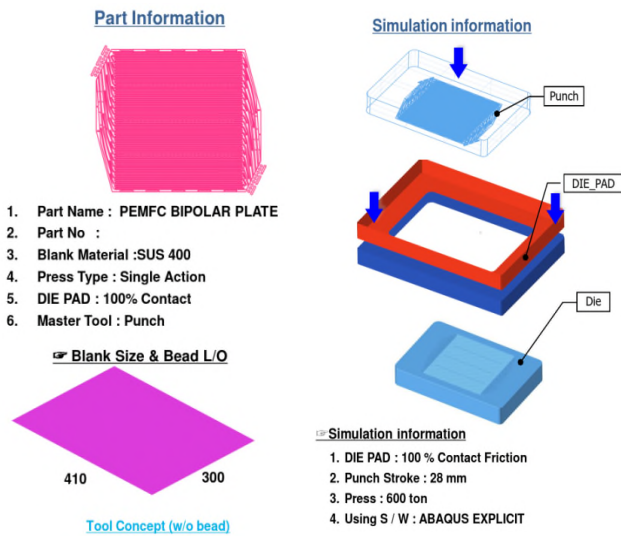


[그림 6] 분리판 SUS 재료#2 물성 평가

3.2 스탬핑 성형 공정의 유한요소 모델링 연구

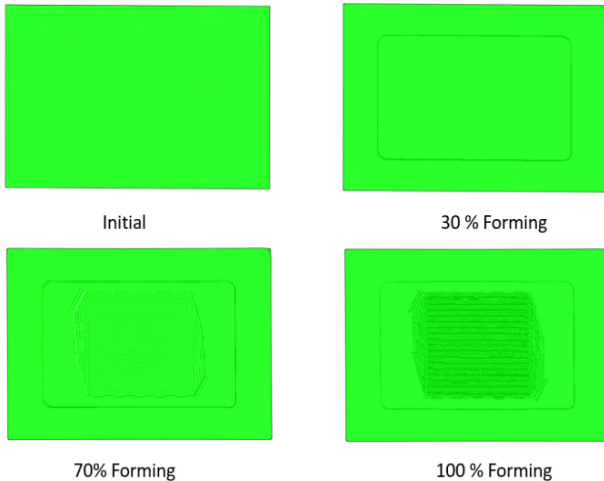
수소연료전지스택용 분리판의 설계 및 스탬핑 성형해석은 HYPERWORK CAE TOOL과 비선형전문해석용 S/W ABAQUS 를 기반으로[6-8]

- ① Stamping Process Modeling 확보
 - ② 외연적 적분 (Explicit integration scheme) 공정 해석
 - ③ 스프링백효과(Spring back effect)를 고려한
- 다단 프레스 공정 모델 구축등을 수행하였다.



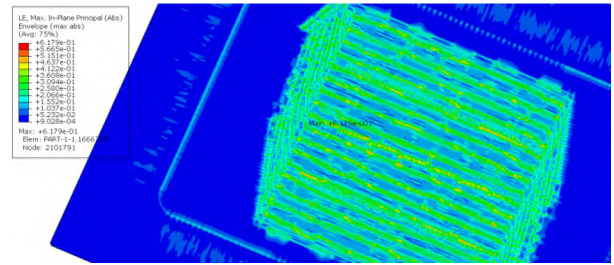
[그림 7] 스탬핑 성형 해석 기초 정보

구축한 유한요소모델을 통해 스탬핑 해석을 수행하여, 각 공정 시간별 성형 형상을 그림 8에 제시하였다. 공정상 펀치의 스트로크는 28mm이며, 다이패드와 대응되는 블랭크 홀딩파트는 28+mm로 스트로크가 구성되었다.



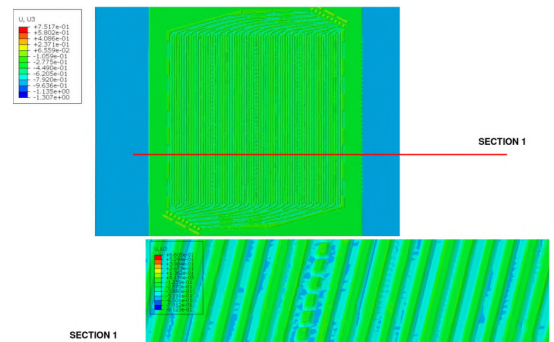
[그림 8] Stamping time step별 forming형상

최종 성형시의 성형성을 예측하기 위해 Crack이 발생 될 수 있는 취약부를 등가진변형율(Equivalent true strain)으로 그림 9에 제시하였다. 성형 시 발생하는 이 수치는 언급된 재료의 인장시험의 한계 변형율과 비교하여 성형성을 검증할 수 있다.



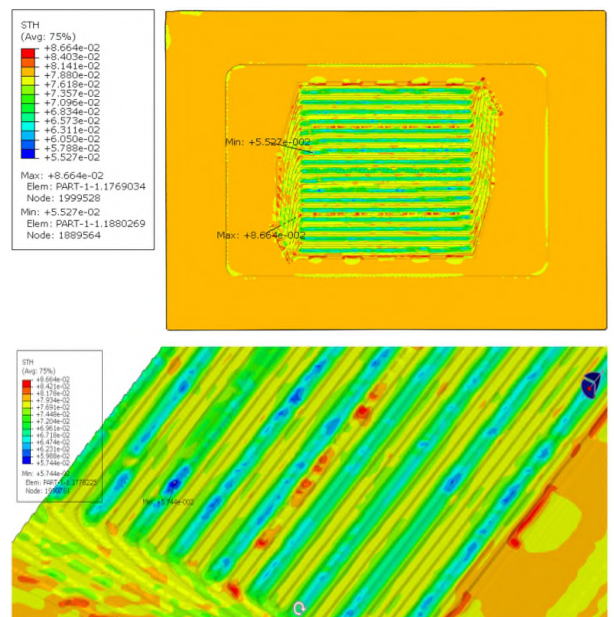
[그림 9] Formability (weak position estimation)

분리판의 유로채널은 반응 기체와 냉각수의 물배출의 유동 및 차압을 안정적으로 유지하기 위한 필수사항으로 분리판의 채널 형상은 매우 중요하다. 스탬핑공정에서 채널의 미성형이나 채널 높이의 불균일성을 검증하기 위해 단면 컷을 통해서 채널 높이의 검증을 그림 10에서 도시하였다.



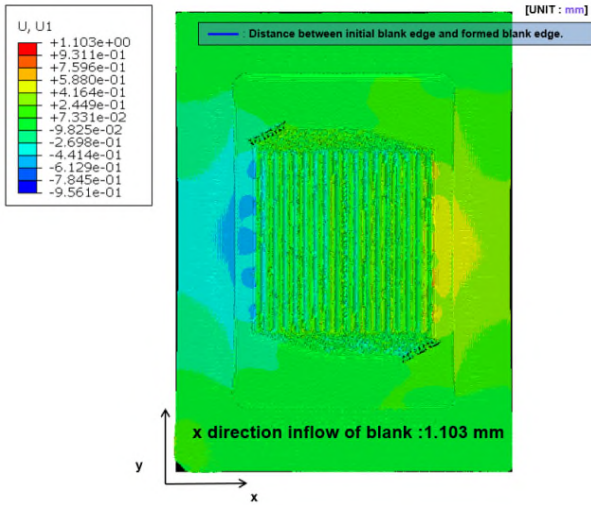
[그림 10] Forming section (Detail view of section)

분리판은 스탬핑 성형 후 스택으로 체결 시 기밀유지를 위한 고무성형공정과 압착공정등을 거치게 되므로, 단품상태에서의 제품의 두께 균일도 확보는 매우 중요하다. 스탬핑 시의 응력집중은 특정 위치에서 두께 감소(thinning)가 발생하게 되며, 이의 사전 검증은 매우 중요하다. 본 연구를 통해 공정 상 발생하게 되는 두께감소를 그림 11에 도시하였다.



[그림 11] Thickness distribution after stamping process completed (thinning contour)

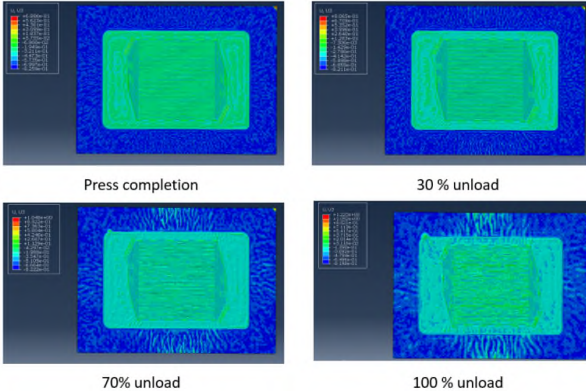
그림 12에서는 스탬핑 공정에 투입되는 원재료의 최적 사이스를 결정하기 위한 Inflow양에 대해 도시하였다.



[그림 12] Inflow of blank after stamping process completed

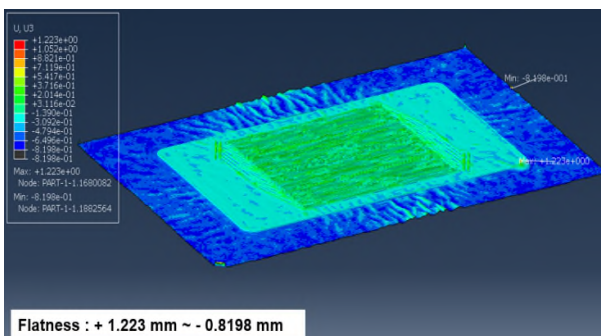
3.3 스프링백 특성 및 이를 반영한 유한요소 해석

탄소성특성의 재료 구성방정식과 펀치, 다이, 다이패드의 독립적 구성과 작동으로 스프링백 현상을 고려한 스탬핑 성형해석을 수행하였다. 펀치의 스트로크는 28mm이며, 다이패드와 대응되는 블랭크홀딩파트는 28+mm로 스트로크가 구성되었으며, 100% 성형 후 언로드 후 분리판의 성형 현상을 규명하였다.



[그림 13] Stamping analysis including spring back effect

그림 13에서는 스탬핑성형 해석 후 스프링백 효과에 의해 탄성회복에 의한 제품 형상을 도시하였다.



[그림 14] Flatness evaluation (Z direction-after forming)

그림 14에서는 스프링백 효과에 의해 발생하는 분리판의 평탄도를 검증하기 위해 두께 방향의 변위를 도시하였다.

4. 연구 결과 고찰 및 결론

수소연료전지 분리판개발을 위한스탬핑 공정의 유한요소 해석 연구를 통해 하기의 결과를 도출할 수 있다.

① Anode Plate/Cathode Plate용 비선형 재료 평가

수소연료전지 스택용 분리판의 제조 공정을 감안한 SUS 계열에 대한 인장시험을 통해 비선형 특성에 대한 데이터를 확보하였고, 이와 같은 데이터를 유한요소모델링에 재료 구성방정식으로 적용하는 기법을 정립하였다.

② 스탬핑 성형 공정의 유한요소 모델링 연구

분리판의 스탬핑 성형 공정은 다단공정으로 이루어지며, 이를 유한요소해석을 전산모사하기 위해 펀치, 다이, 다이패드, 블랭크홀딩등의 복잡한 모델링을 성공적으로 구축하였으며, 실제 분리판에 적용하여 성형성과 크랙 예측, 유로채널의 성형 치수, 두께 감소율, 블랭크 최적 사이즈를 위한 인플로우양을 예측하였다. 향후 이는 분리판 성형공정의 최적화에 다양한 모델, 다양한 실험에 적용 될 수 있다.

③ 분리판 스프링백 특성을 고려한 유한요소 해석

분리판의 박판화에 따른 스프링백 효과를 유한요소법을 통한 현상학적 검증과 이에 따른 최종품에서의 성형성과 예상 문제점을 예측하였으며, 이와 같은 유한요소해석은 수소연료전지용 분리판 개발과 양산공정에 적절히 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] Seok-Il Yoon, Jong-In Choi, Myong-Hwan Kim, Joon-Hyeon Cho, "Process analysis of bipolar plate for improving the compact stack module of proton exchange membrane fuel cell", 한국산학기술학회 춘계학술발표논문집, pp 5-8, 2020
- [2] 이동호, 김성기, 윤석일 "다공체 제조방법", 대한민국특허공개, 2020-0073173, 2020
- [3] 이동호, 김성기, 윤석일 "다공체 제조장치", 대한민국특허공개, 2020-0072790, 2020
- [4] 이재호, 김도우, 손성만, 이문용, 문영훈, "박판재의 스프링백 해석-해석모델의 실험적 검증", 한국소성가공학회지, 제16권, 제 7호, pp516-520, 2007
- [5] 박세계, 백응률, 박노근, "590MPa급 고강도강의 성형시 스프링백 예측 정확도에 미치는 판재이방성의 영향", 대한금속-재료학회지, Vol. 56, No.3, pp 210-220, 2018
- [6] ABAQUS, Theory Manual
- [7] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, "The finite element method", Vol.1&2, 1989
- [8] HYPERWORK, User Manual