

# 성형 이력을 고려한 용융탄산염 연료전지용 쉴디드 슬롯 플레이트의 압축 및 굽힘 거동 분석

이창환<sup>1</sup> · 양동열<sup>#</sup> · 강동우<sup>2</sup> · 장인갑<sup>2</sup> · 이태원<sup>2</sup>

## Compressive and Bending Behaviors of the Shielded Slot Plate Considering Forming Effect for Fuel Cell Application

C. W. Lee, D. Y. Yang, D. W. Kang, I. G. Chang, T. W. Lee

(Received May 17, 2012 / Revised July 24, 2012 / Accepted July 30, 2012)

### Abstract

The metallic bipolar plates of the molten carbonate fuel cell(MCFC) are composed of shielded slot plates and a center-plate. The shielded slot plates support the center-plate and the membrane electrode assembly. Compressive forces are applied to the shielded slot plate in order to increase the contact area between shielded slot plates and the membrane electrode assembly (MEA). In the design of the shielded slot plate, it is necessary to predict the mechanical behavior of the shielded slot plate. The shielded slot plates are manufactured by a three-stage forming process consisting of slitting, preforming and the final forming process. The mechanical behavior of the shielded slot plate is largely affected by the forming process. In this study, the simulation of the three-stage forming process was used to predict the mechanical behavior of the shielded slot plate. The present simulation approach showed good agreements with the experimental results.

**Key Words** : MCFC, Shielded Slot Plate, Forming Effect

### 1. 서 론

용융탄산염 연료전지(molten Carbonate Fuel Cell)는 다른 형태의 연료전지와 함께 높은 열효율, 환경친화성, 모듈화 특성 및 열 병합 발전 등의 장점을 갖는 동시에, 650℃의 고온에서 운전되기 때문에 인산형 연료전지(phosphoric acid fuel cell) 또는 고분자 전해질 연료전지(proton exchange membrane fuel cell)와 같은 저온형 연료전지에서 기대할 수 없는 장점을 갖고 있다[1,2].

용융탄산염 연료전지의 금속 분리판은 센터플레이트(center-plate)와 쉴디드 슬롯 플레이트(shielded

slot plate)로 구성되어 있다. 쉴디드 슬롯 플레이트의 경우 사다리꼴 형상의 단위 구조가 반복되어 있는 금속판이다. 금속 분리판의 경우 전극과의 긴밀한 접촉을 위해 면압이 가해진다. 따라서 장기 운전성을 향상시키고 발전 효율을 향상시키기 위해, 고 강성 설계가 필요하다. 이를 위해 고온, 면압 상태에서 금속 분리판의 거동을 예측 및 분석할 수 있는 방법이 필요하다[3~5].

일반적인 박판 소재가 소성 가공에 의해 목적 형상으로 성형되는 경우, 성형 공정에서 발생한 소성 변형 및 잔류 응력이 제품의 기계적 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Dutton[6]은

1. 한국과학기술원 기계공학과  
2. 부산중공업 기술연구원 연료전지개발센터  
# 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과, dyyang@kaist.ac.kr

정수압 성형 된 사이드 레일 부품의 충격 특성 해석에 두께, 소성변형율, 잔류 응력을 적용하여, 성형 이력의 효과를 분석하였다. Lee[7]는 S-rail 형상 및 튜브에 성형 결과 발생한 두께 분포, 소성 변형율, 잔류응력을 매핑(mapping)하여 충격 특성을 분석 하였다. 또한 Huh[8]는 프런트 사이드 멤버를 포함한 일부 부품에 대해 제품의 성형 공정에서 발생한 소성 변형 및 잔류응력의 효과로 성형 이력을 고려한 충돌 해석을 진행하였다.

쉴드 슬롯 플레이트의 경우, 사다리꼴 형상 성형 공정에서 발생한 소성 변형 및 잔류 응력이 기계적 거동에 큰 영향을 미침에도 불구하고, 성형 이력을 고려한 거동 분석 및 설계에 대한 연구가 진행되고 있지 않다. 본 연구에서는 쉴드 슬롯 플레이트 단위 형상의 성형 해석 결과를 직접 사용하는 방법으로 성형이력을 고려, 단위 형상의 압축, 굽힘 등의 기계적 거동을 분석하였다. 또한 해석 결과의 직접 적용이 어려운 대면적 변형 형상의 경우, 효율적 해석을 위해 단위 형상의 사다리꼴 변형 형상으로부터 전체 해석 형상을 모델링 하였다. 유효 소성 변형율은 효율적 해석을 위해, 유효 소성 변형율을 다항함수로 모사하여 반복형상의 특성을 사용하여 초기조건으로 부여하였다. 이를 대면적 시편에 적용하여 거동을 예측하였으며, 실험과 비교하였다.

## 2. 쉴드 슬롯 플레이트 구조 및 성형 공정

### 2.1 용융탄산염 연료전지의 구조

용융탄산염 연료전지의 금속 분리판은 Fig. 1 에서와 같이 센터플레이트와 쉴드 슬롯 플레이트, 전극으로 구성되어 있다. 쉴드 슬롯 플레이트는 Fig. 2 와 같이 개방형 사다리꼴 형상을 단위 구조가 반복되어 성형되어 있는 금속 판이다. 쉴드 슬롯 플레이트는 전극과 센터플레이트 사이에 위치하여 가스가 통과하며 전기 화학적 반응을 일으킬 수 있는 유로를 형성하며, 전극에서 발생한 전기의 통로가 된다.

MCFC 의 스택에는 구성요소와의 접촉 면적을 향상시키기 위해 면압이 가해지기 때문에, 쉴드 슬롯 플레이트의 기계적 거동이 설계에 있어 중요한 특성이 된다.

### 2.2 쉴드 슬롯 플레이트의 성형 공정

개방형 사다리꼴 구조의 단위 형상의 특성으로,

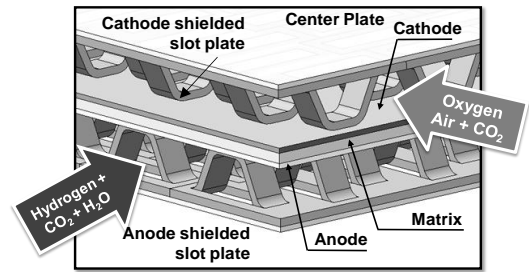


Fig. 1 Schematic figure of the MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell) metallic bipolar plate

### Shielded slot plate

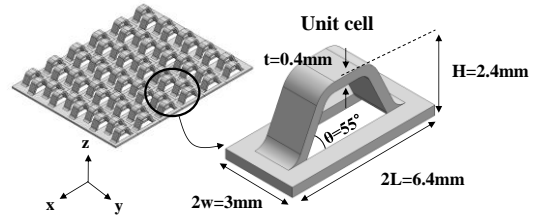


Fig. 2 Schematic figure of the shielded slot plate

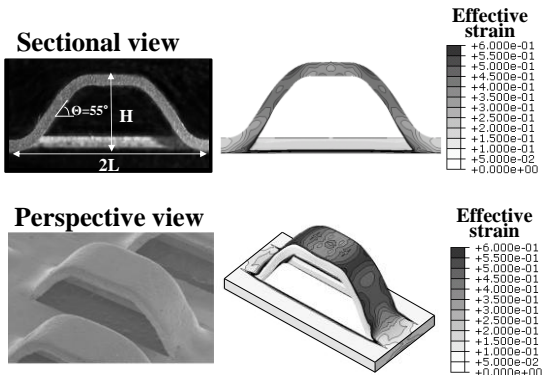


Fig. 3 Simulation results and the experimental results of the forming process of the shielded slot plate [9]

쉴드 슬롯 플레이트의 성형 공정은 소재의 전단 변형을 수반하는 슬리팅 공정을 포함한다. 슬리팅 공정 이후, 높은 종횡비(H/L)의 사다리꼴 형상을 성형하기 위한 중간 성형 공정, 최종 성형 공정이 포함된 3단 성형 공정이 적용 가능하다.

Lee[9]는 연성 파괴조건을 사용하여 개방형 사다리꼴의 성형 공정을 해석하였다. 해석 결과, Fig. 3 과 같이 사다리꼴 형상에 큰 소성 변형이 발생한다. 성형 공정에서 발생하는 잔류 응력 및 변형율의 영향에 의해 가공 경화가 발생한다. 따라서

쉘드 슬롯 플레이트의 거동분석에 성형 이력을 고려할 필요가 있다.

### 3. 성형 이력을 고려한 슬롯 플레이트 단위 형상의 기계적 거동 분석

#### 3.1 단위 형상의 압축 해석 결과

먼저 단위 형상의 압축 거동에 대해 해석 및 실험을 수행하였다. 성형 공정의 효과를 분석하기 위해, 성형 효과를 고려한 해석과 그렇지 않은 경우의 2 가지 해석을 진행 하여 실험과 비교 하였다. 성형 이력을 고려하지 않은 해석 모델은 성형 해석 후, 성형 형상만을 이용하여 압축 해석을 진행하였다. 성형 이력을 고려한 해석 모델의 경우, 성형 이력을 고려하기 위해 Fig. 4에서와 같이 단위 형상의 성형 해석 결과를 이용하였다. 성형 해석 결과를 직접 사용하여, ABAQUS standard v6.9의 user material subroutine UMAT[10]을 구성하여 단위 형상 압축 해석을 하였다. 소재의 특성은 준정적 상태의 1축 인장 실험을 통해 구할 수 있었고, 성형 공정해석에서 사용한 것과 같이 탄성 계수 132GPa, 항복응력 230MPa를 사용하였다. 또한 유동응력은 식 (1)과 같다[9].

$$\bar{\sigma}(MPa) = 1192.57(0.0314 + \bar{\epsilon})^{0.455} \quad (1)$$

유한요소 해석에서, 두 경우 모두 중심부에서 먼저 소성 좌굴(Plastic buckling)이 발생하였다. 그리고 이를 따라 빗변에서 소성 변형이 발생한다. 소성 좌굴이 발생한 중심부가 바닥의 다이에 접촉하면서부터 2 차 변형 모드가 시작된다. 실험 결과, 변형은 Fig. 5(a)에서와 같이 사다리꼴의 윗변이 먼저 붕괴 된 다음, 붕괴된 중심부가 바닥에 닿으면서 2 차 변형 모드가 시작 된다.

실험 및 성형 이력을 고려한 경우(w/ considering forming effect), Fig. 5(b)의 하중 변위 선도에서 볼 수 있듯이 변형 초기에 하중이 증가하다가 감소 하게 된다. 이는 사다리꼴의 상부에서 소성 좌굴이 발생하는 것으로써, 좌굴 발생 이후 하중이 감소한다. 그리고 사다리꼴의 상부가 다이와 접촉한 이후 하중이 급격하게 증가한다. 그러나 성형 이력을 고려하지 않은 경우(w/o considering forming effect) 초기의 하중 감소가 발생하지 않는다. 압축 변형 초기에 탄성 변형이 발생하다가, 소재의 가공 경화에 의해 하중이 다시 증가하게 된다.

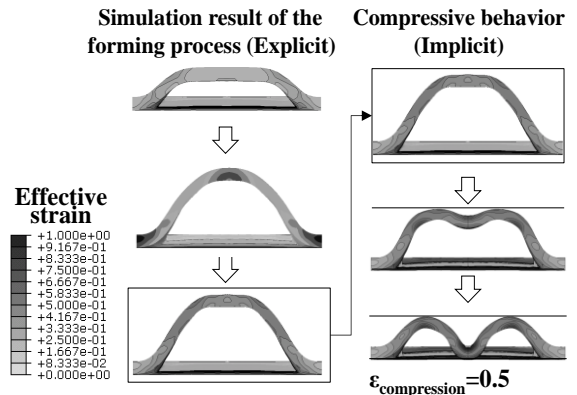
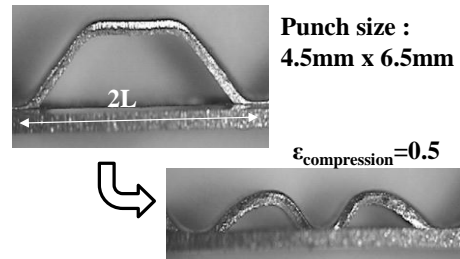
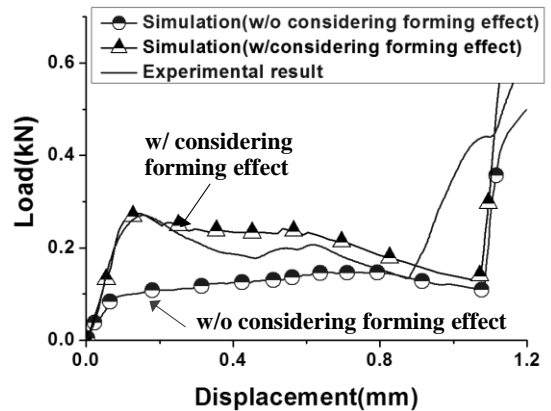


Fig. 4 Simulation of the compressive behavior of the unit cell considering the forming effect



(a) Experimental results of the compression test



(b) Load-Displacement curve of the compression test  
Fig. 5 Experimental results and load-displacement curve of the compression test

사다리꼴 형상의 단위 형상 압축 실험에서, 성형 이력을 고려하지 않은 해석 모델은 단위 형상의 거동을 정확히 예측할 수 없다. 그러나 성형

이력을 고려하여 단위 형상 압축 해석을 진행한 경우 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 초기의 탄성 거동과 이후 발생하는 소성 좌굴을 예측할 수 있었다. 따라서 쉘디드 슬롯 플레이트의 단위 형상 압축 해석에는 성형 이력을 고려해야 한다.

### 3.2 단위 형상의 굽힘 해석 결과

쉘디드 슬롯 플레이트의 굽힘 거동 역시 성형 이력에 큰 영향을 받는다. 이를 분석하기 위해 Fig. 6에서와 같이 성형 이력을 고려할 수 있는 해석 모델을 만들어 해석을 진행하였다. 단위 형상 압축 해석에서와 같이 성형 이력을 고려한 해석 모델과 성형이력을 고려하지 않은 해석 모델을 비교 하였다. 성형 이력을 고려한 모델의 경우 단위 형상 성형 해석 결과를 직접 사용하였다. 또한 해석의 단순화를 위하여 1/4 모델을 Z-축에 대하여 양의 방향(Positive direction)과 음의 방향(Negative direction)의 두 방향에 대해 굽힘 해석을 진행하였다.

해석 결과 양의 방향, 음의 방향의 모멘트-곡률 선도(Moment-curvature diagram)는 각각 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)와 같고, 변형 형상은 Fig. 7(c)와 같다. 음의 방향, 양의 방향 모두 탄성 영역에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 소성변형에서는 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 성형 이력을 고려하지 않은 경우 성형이력을 고려한 경우보다 더 낮은 곡률에서 소성 변형이 발생한다. 또한 곡률(curvature)이  $0.02\text{mm}^{-1}$ 인 부분에서의 모멘트는 음의 방향인 경우 44.5%의 차, 양의 방향인 경우 33.4%의 차이를 보인다. 이와 같은 소성 변형 영역에서의 굽힘 모멘트 차는 성형 공정 중 발생한 소성변형에 의해 소재의 항복응력이 상승했기 때문이다[6]. 단위 형상의 굽힘 변형에서도 확인할 수 있듯이, 쉘디드 슬롯 플레이트의 정확한 거동 예측을 위해서는 성형 이력의 고려가 필요하다.

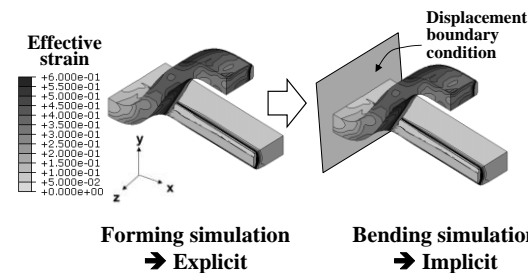
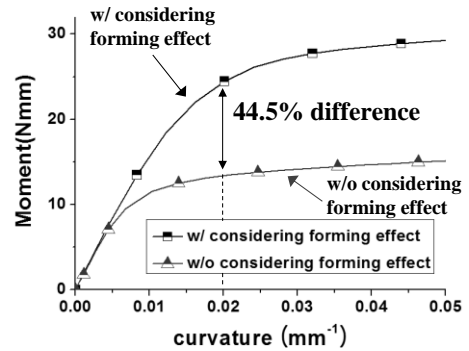
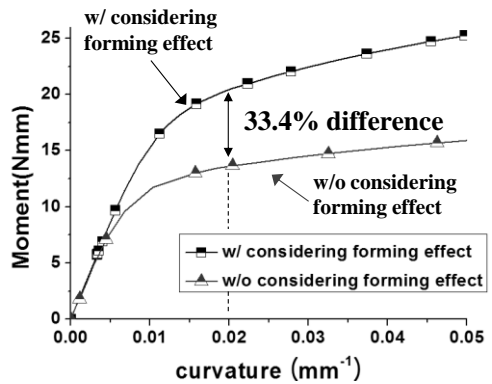


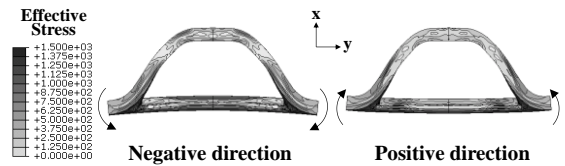
Fig. 6 Simulation of the bending behavior of the unit cell considering the forming effect



(a) Moment-curvature diagram (positive direction)



(b) Moment-curvature diagram (negative direction)



(c) Deformed shape of the unit cell after bending

Fig. 7 Simulation results of the positive and negative directional bending

## 4. 성형 이력을 고려한 대면적 쉘디드 슬롯 플레이트의 3점 굽힘 거동 분석

### 4.1 3점 굽힘 실험 결과

단위 형상의 거동과 마찬가지로, 대면적의 쉘디드 슬롯 플레이트의 기계적 거동을 해석하는데 있어서도 성형이력의 고려가 필요하다. 다양한 변형 형상 중 용융탄산염 연료전지는 굽힘 변형에 의한 전극 파손이 발생하기 쉽기 때문에 굽힘 변형을 예제로 선정하였다.

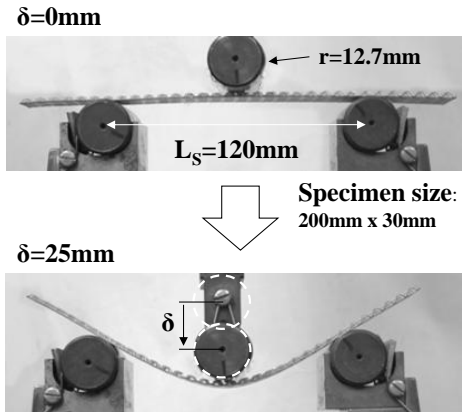


Fig. 8 Experimental set-up and results of the three-point bending

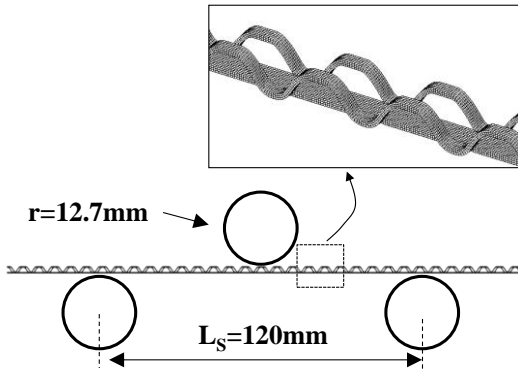
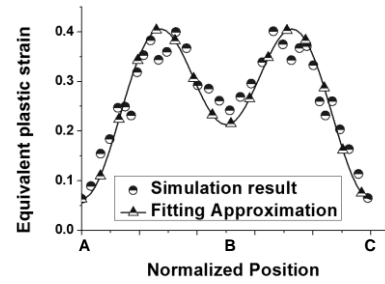


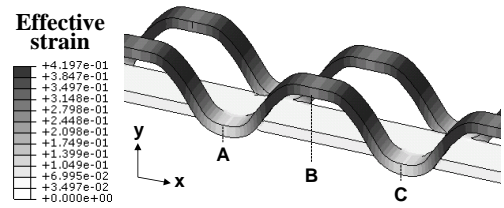
Fig. 9 Simulation model of the three-point bending test for the shielded slot plate

쉴드드 슬롯 플레이트의 3 점 굽힘 실험 및 해석은 Fig. 8 에서와 같이 스펠 거리( $L_S$ ) 120mm, 펀치 및 다이의 반지름( $r$ )은 12.7mm 로 수행하였다. 또한 시편은 가로 200mm 세로 30mm 의 시편을 사용하였으며, 3 점 굽힘의 유한요소 해석 모델은 Fig. 9 와 같다.

대면적 쉴드드 슬롯 플레이트의 경우 단위 형상 해석 결과를 육면체 요소로 재 구성, 반복과 대칭을 사용해 해석 모델을 만들 수 있다. 하지만 이와 같은 방법은 복잡하고 적용이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 해석 모델의 구성을 위해 단면 형상은 단위 형상 해석 결과만을 적용하였고 폭 방향의 길이는 단위 형상 해석 결과의 평균값을 사용하였다. 또한 성형 공정에서 발생한 전단면의 형상은 고려되지 않았으며, 폭 방향은 대칭 조건을 사용하였다.



(a) Approximation of the strain distribution



(b) Strain distribution of the shielded slot plate

Fig.10 Strain distribution of the shielded slot plate by fitting approximation of the strain distribution

성형 이력을 고려하지 않은 해석 모델은 소성 변형율을 고려하지 않았다. 이 때의 3 점 굽힘 해석 결과와 실험 결과를 비교 하였을 때, 펀치 변위( $\delta$ ) 25mm 에서 실험결과에 비해 하중이 42.3% 낮게 계산된다. 이와 같은 하중 차는 다양한 응력 상태에 노출될 수 있는 쉴드드 슬롯 플레이트의 거동 예측에 있어서 큰 문제로 작용한다. 따라서 성형이력을 효율적으로 고려할 수 있는 해석 방법이 필요하다.

#### 4.2 대면적 시편의 성형 이력 고려 방법

기존 연구[6~8]에서는 성형 해석 결과 두께 분포, 유효 소성변형율 등을 매핑(mapping)하여 성형 이력을 고려하였다. 대면적의 성형 공정 해석과 해석 결과를 사용한 거동 분석은 컴퓨터의 해석 시간, 메모리 등의 문제가 있다. 따라서 쉴드드 슬롯 플레이트의 성형 이력을 효율적으로 적용할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 효율적 해석을 위해 쉴드드 슬롯 플레이트의 경우 단위 형상이 반복되는 특성을 사용하여 성형이력을 간편하게 고려하였다. 또한 굽힘 변형에 가장 영향이 큰 유효 소성 변형율만을 고려 하였다.

유효 소성 변형율의 경우 단위 형상의 성형 결과에서 두께 방향 요소의 중심의 값을 사용하였



다. 반복되는 단위 형상에 적용하기 위해 식 (2)와 같이 단위 형상의 길이를 주기로 하는 삼각함수의 합으로 유효 소성 변형율을 모사 하였고, 그 결과를 ABAQUS 의 Analytic field 와 initial condition 옵션[10]을 사용하여 대면적 형상 전체에 초기 조건으로 유효 소성 변형율을 부여 하였고, 그 결과는 Fig. 10(a)와 같다.

$$0.15 \times \sin\left(\frac{\pi x}{6.2}\right)^4 + 0.3 \times \sin\left(\frac{\pi x}{6.2} \times 2\right)^2 + 0.063 \quad (2)$$

4.3 수정된 해석 모델을 적용한 해석 결과 쉴드 슬롯 플레이트의 3 점 굽힘 거동은 하중에 있어서 성형 이력을 고려하지 않은 경우 실험과 해석에서 큰 차이를 보인다. 따라서 Fig. 10(b)와 같이 소재의 위치에 따른 유효 소성 변형율을 적용하였다. 이 모델을 사용하여 3 점 굽힘을 해석하였고 이를 실험 결과와 비교하였다.

하중-변위 선도에서도 Fig. 11 에서와 같이 성형 이력을 고려하지 않은 경우, 변위 25mm 에서 하중이 42.3% 낮게 계산된다. 하지만, 성형 이력을 고려한 해석 모델의 경우 실험의 하중 변위 선도와 유사하고 변위 25mm 에서 하중 차는 2.8% 로 성형 이력을 고려하지 않은 경우에 비해 오차가 현저히 감소하였다. 성형 이력을 고려하지 않은 경우에는 소성 변형이 낮은 응력 상태에서 발생하게 된다. 그러나 소성변형을 고려한 경우 소성 변형이 큰 변위 값에서 발생한다. 이는 성형 효과로 인해 초기 항복응력이 높아져 소성변형이 발생하기까지 더 많은 변형이 필요하기 때문이다.

Fig. 12 은 3 점 굽힘 실험 결과와 성형 이력을 고려한 해석 결과를 비교한 그림으로, 변형 형상에 있어서는 두 경우 모두 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 중심부의 소성 변형이 발생한 부분을 제외한 직선 부의 각도는 실험에서는 33°, 성형 이력을 고려한 해석의 결과 34°로 실험 결과와 1° 미만의 오차로, 해석을 통해 변형 형상 및 굽힘 하중을 예측할 수 있었다.

실험 결과와의 하중 및 형상 비교를 통해 제안한 해석 모델이 반복 구조의 특징을 갖는 쉴드 슬롯 플레이트의 거동 해석에 적용 가능함을 검증할 수 있었다. 성형이력을 고려한 거동 분석은 상온에서와 마찬가지로, 용융탄산염 연료전지의 작동온도(650°C)에서의 거동 해석에도 적용할 수 있다. 전극 등의 구성요소의 상온 및 작동온도에서

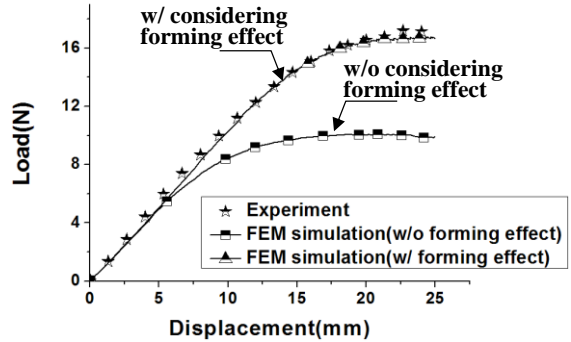


Fig.11 Comparison of the three-point bending between experiment and simulation considering forming effect

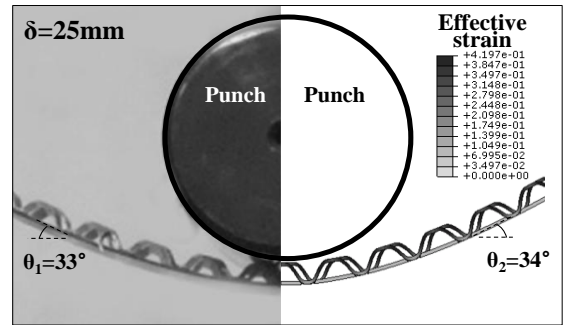


Fig.12 Simulation result and experimental result of the three-point bending of the shielded slot plate

의 기계적 특성에 대한 연구가 진행된다면, MCFC의 작동 중 내부의 응력상태 및 변형에 대한 예측이 가능할 것이다. 더욱 정확한 해석 결과를 위해서는 단위 형상의 성형 결과를 대면적 반복 구조에 적용할 수 있는 성형이력 매핑 방법 및 전 단면을 고려할 수 있는 육면체 요소 재구성에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 쉴드 슬롯 플레이트의 성형 결과를 직접 사용하여 단위 형상의 압축 거동, 굽힘 거동을 통해 성형 이력 고려의 필요성을 설명하였다. 이를 통해 쉴드 슬롯 플레이트의 거동 특성을 정확히 분석하기 위해 성형 이력이 반드시 고려되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 사다리꼴 단위 형상의 반복 구조로 이루어진 쉴

디드 슬롯 플레이트의 기계적 거동을 예측하기 위해 효율적으로 성형이력을 고려하는 해석 방법을 제시 하였다. 3 점 굽힘 실험과의 비교를 통해 본 연구에서 제시한 해석 모델이 쉘디드 슬롯 플레이트의 거동을 예측할 수 있는 것을 확인하였다.

(1) 단위 형상의 경우, 단위 형상 성형 해석 결과를 직접 사용하는 방법으로 성형이력을 고려하였다. 성형 이력을 고려 하지 않는 경우, 잔류 응력 및 소성 변형율에 의해 단위 형상의 압축 변형, 굽힘 변형에서 하중-변위선도의 큰 차이를 보인다. 쉘디드 슬롯 플레이트의 거동 해석에 있어서 성형 이력이 반드시 고려되어야 한다.

(2) 단위 형상의 해석 결과 단면형상을 바탕으로 대면적 형상을 모델링 하였다. 그리고 소성 변형의 경우 반복 구조의 특성을 사용하여, 단위 형상의 길이를 주기로 갖는 삼각함수의 다항식으로 효율적으로 모사할 수 있었다. 이를 적용해 3 점 굽힘 해석을 진행하였다. 해석 결과 성형 이력을 고려하지 않은 경우 편치 변위 25mm 에서 42.3%의 하중차를 보이는데 반해 제한한 방법으로 성형 이력을 고려하는 경우 2.8%의 차를 보인다. 이를 통해 제안한 해석 모델이 대면적 쉘디드 슬롯 플레이트의 거동을 예측할 수 있는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(2008-N-FC12-J-04-2100).

## 참 고 문 헌

[1] R. O' Hyare, S. W. Cha, W. Collela, F. B. Prinz,

2006, Fuel Cells - Fundamentals, John Wiley & Sons, New York, pp. 235~249.

- [2] X. Li, 2006, Principles of Fuel Cells, Taylor & Francis Group, New York, pp. 431~475.
- [3] S. G. Kim, S. P. Yoon, J. H. Han, S. W. Nam, T. H. Lim, I. H. Oh, S. A. Hong, 2002, Mechanical Strength of Porous Nickel Plates Containing Lithium and Their Performance as the Cathode for MCFC, J. Power Sources, Vol. 110, No. 1, pp. 80~85.
- [4] C. Yuh, J. Colpetzer, K. Dickson, M. Farooque and G. Xu, 2006, Carbonate Fuel Cell Materials, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 15, No. 4, pp. 457~462.
- [5] M. Farooque, H. C. Maru, 2006, Carbonate Fuel Cells: Milliwatts to Megawatts, J. Power Sources, Vol. 160, No. 2, pp. 827~834.
- [6] T. Dutton, S. Iregbu, R. Sturt, A. Kellicut, B. Cowell, K. Kavikondala, 1999, The Effect of Forming on the Crashworthiness of Vehicles with Hydroformed Frame Siderails, SAE paper 1999-01-3208.
- [7] S. H. Lee, C. S. Han, S. I. Oh, P. Wrigglers, 2001, Comparative Crash Simulations Incorporating the Results of Sheet Forming Analyses, Eng. Comput., Vol. 18, No. 5~6, pp. 744~758.
- [8] H. Huh, K. P. Kim, S. H. Kim, J. H. Song, H. S. Kim, S. K. Hong, 2003, Crashworthiness Assessment of Front Side Members in an Auto-Body Considering the Fabrication Histories, Int. J. Mech. Sci., Vol. 45, No. 10, pp. 1645~1660.
- [9] C. W. Lee, D. Y. Yang, S. R. Lee, I. G. Chang, T. W. Lee, 2011, Proc. NUMISHEET2011(K. S. Chung), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 911~918.
- [10] ABAQUS Version 6.9, User's manual, 2009, Dassault Systèmes, Providence RI.