

# 용융탄산염 연료전지용 금속분리판 굽힘 공정의 유한요소 해석을 통한 스프링백 분석

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

## FEM Analysis of spring back in bending process of center plate for molten carbonate fuel cell

C. H. Lee, S. M. Ryu, D. Y. Yang<sup>#</sup>, Y. J. Kim, D. W. Kang, I. G. Chang, T. W. Lee

### Abstract

Metallic bipolar plate for molten carbonate fuel cell(MCFC) is composed of the shielded slot plate and the center plate. Among these, the center plate plays an important role in gas sealing. Therefore, manufacturing of the center plate is considered one of the key issues in MCFC. The center plate is manufactured by bending process. In bending process, springback and recoiling are two main problems. By using the modified punch shape with 'step', springback and recoil are reduced. The aim of this article is to find the effect of modified punch shape. So, the bending stress along thickness direction and material direction were investigated using FEM.

**Key Words** : Molten Carbonate Fuel Cell, Finite element method, Bipolar Plate

### 1. 서론

용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell)은 다른 형태의 연료전지와 함께 높은 열효율, 높은 환경친화성, 모듈화 특성 등의 장점을 공유하는 동시에, 650℃의 고온에서 운전되기 때문에 인산형 또는 고분자 연료전지와 같은 저온형 연료전지에서 기대할 수 없는 장점들을 갖고 있다. [1].

하나의 분리판으로 이루어진 PEMFC와 다르게, MCFC의 금속 분리판은 Fig. 1에서와 같이 센터플레이트 (Center plate)와 쉴드드 슬롯 플레이트 (Shielded slot plate)로 구성된다. 금속 분리판은 셀 내에서 가스 유로의 공간을 확보하고 각 셀 사이의 가스 혼합을 방지하며 전극을 포함한 매트릭스를 지지하는 역할을 한다.[2]

센터플레이트 네 개의 모서리 상에서 'ㄷ' 모양의 형상의 안쪽으로 쉴드드 슬롯 플레이트가 삽입되며, 전해질 매트릭스를 지지하며, 단위전지의 스택킹 (stacking) 시 매니폴드, 가스켓과 연결되어 가스혼합을 방지하는 역할을 한다. 따라서 센터

플레이트의 'ㄷ' 형상의 치수정밀도 확보는 스택의 고밀폐성을 유지하기 위한 중요한 이슈이다.

현재, 센터플레이트의 고 정밀도 'ㄷ' 형상을 제작하기 위해서 굽힘 공정, 분리 성형 후 접합, 정수압 성형 등의 공정이 제안되어 왔다.[3] 여러 성형 공정중에서 굽힘에 의한 센터플레이트 성형 공정은 다른 성형공정과 달리 복잡한 형상의 트리밍이나 추가적인 접합 공정등이 필요하지 않아 가장 생산성이 높은 성형 공정이다. 그러나 일반적인 굽힘공정에서와 같은 국부적 솟아오름 (Recoiling), 스프링백(Springback)등의 요인에 의한 형상 정밀도 저하가 크다.

본 연구에서는 단(step) 형상을 가진 편치형상을 센터 플레이트의 굽힘 공정에서 유한요소 해석을 통해 이의 영향을 살펴보고자 한다. 또 두께 방향, 길이방향에 따른 굽힘 응력 분포 및 각 성형 변수에 따른 굽힘 응력 분석을 통해 각 변수에 의한 스프링백양을 분석하고 이에 대한 영향을 분석하여 성형 정밀도를 향상시킬 수 있는 방안에 대해 논의하고자 한다.

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. 두산 중공업

# 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과 dyang@kaist.ac.kr

## 2. 센터 플레이트의 성형 공정

### 2.1 센터 플레이트의 성형 공정

용융탄산염 연료전지는 650℃의 고온에서 작동하고 또한 고 부식성인 용융탄산염을 전해질로 사용하기 때문에 센터플레이트 소재로 내부식성이 강한 스테인리스 계열 박판을 사용한다. 이의 기계적 물성은 table 1 과 같다.

Fig 2.에서 볼 수 있듯이 ‘ㄷ’ 형상의 센터플레이트 모서리 부를 성형하기 위해서 2번의 굽힘 공정이 필요하다. 이는 ‘ㄴ’ 굽힘 공정과 ‘ㄷ’ 굽힘 공정으로 나눌 수 있다.

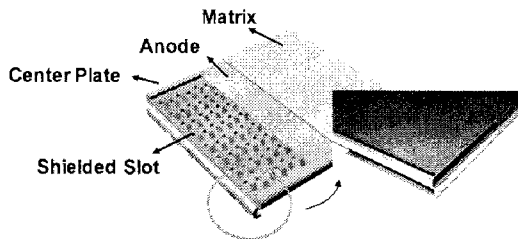


Fig. 1 MCFC unit cell (Anode side view)

Table 1 Mechanical properties of SUS

	Elastic Modulus(GPa)	Yield Stress(MPa)	Poisson's Ratio
Data	130~150	240~260	0.33

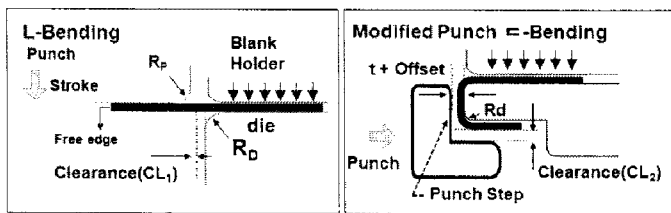


Fig. 2 Bending process of center plate

### 2.2 형상정밀도 향상을 위한 방안

굽힘 공정의 가장 중요한 요소인 스프링백에 가장 큰 요인을 미치는 것은 길이방향의 굽힘응력으로, 탄성복원 후 판의 곡률 외면 부에는 압축 잔류응력이, 이의 반대부분에는 인장 잔류응력이 남아있게 된다. 이와 같은 잔류응력에 의해 스프링백 양이 결정되게 된다. [4]

‘ㄷ’ 굽힘 공정에서는 펀치의 형상이 일반 굽힘 공정과 다르게 Fig. 2 에서와 같이 단(step)을 가진 형상을 되어 있다. 이는 fig. 3 에서와 같이 ‘ㄷ’ 굽힘 후 국부적으로 솟아오른 부분을 밀어주는 추

가적인 굽힘 성형을 통해, 스프링백 및 국부적 솟아오름을 줄여 형상 정밀도가 향상되는 효과가 있다.

기존 연구에서는 다구찌의 실험 계획법에 의해 최적성형조건을 구하였다.[5] 그러나 이에 대한 원인 분석이 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 중요 공정 조건에 대하여 스프링백 전, 후의 굽힘 응력을 비교함으로써 스프링백이 일어나는 정도에 대해 논의하고, 형상 정밀도를 향상시킬 수 있는 방안에 대해 논의하고자 한다.

## 3. 유한요소 해석을 통한 스프링백 분석

### 3.1 주요 공정 변수의 설정

공정 변수 중에서 펀치의 라운드 값,  $R_p$ 는 선해석 수행을 통해 형상에 영향을 미치지 않는다고 판단되어 변수에 추가하지 않았다. 그리하여, 다이의 라운드 값  $R_d$ , ‘ㄴ’ 굽힘 공정에서의 간극  $CL_1$ , ‘ㄷ’ 굽힘 공정에서의 간극  $CL_2$ , 펀치 이송량 Offset의 4가지 변수를 주요 공정 변수로 선택하였다. 여기에서 Offset은 Fig. 2 와 같이 펀치의 최종 위치에서 스텝과 다이 사이의 거리에서 소재의 두께,  $t$ 를 감한 값으로 정의하였다. 또한 스프링백 양은 Fig. 3에서와 같이 성형 후 플랜지 형상이 이루는 각도,  $\alpha$ 의 값으로 설정하였다.

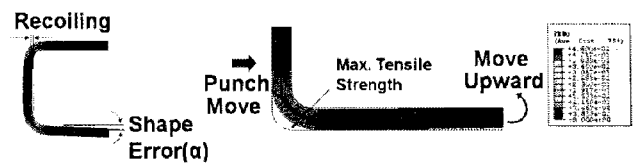


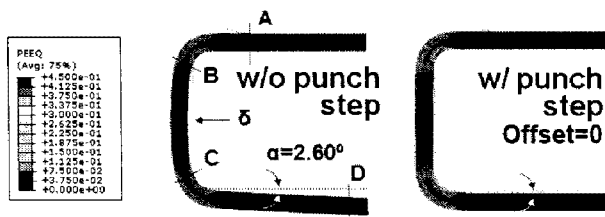
Fig. 3 Defect mode of center plate & deformation

다구찌의 실험계획법에 따라 각각의 변수에 대해 요인분석을 수행한 결과, 스프링백 및 국부적 솟아오름에 대해  $R_d$ ,  $CL_2$ , Offset은 망소 특성을  $CL_1$ 에 대해서는 망대특성을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다. 또한  $R_d = 0.03mm$ ,  $CL_1 = 0.09mm$ ,  $CL_2 = 0.03mm$ , Offset=0 조건에서 해석을 수행하였을 경우  $\alpha = 0.05^\circ$ , recoil=0.028mm 의 치수 정밀도를 확보할 수 있었다. 이중 가장 큰 영향을 미치는 변수가  $CL_1$ 과 Offset이기 때문에 이 두 가지 변수에 대해 유한요소 해석을 수행하여 두께방향 굽힘 응력을 계산하여 각각의 조건에 대해 스프링백이 감소하는 이유와 형상정밀도를 향상시키는 방안에 대해 살펴볼 것이다.

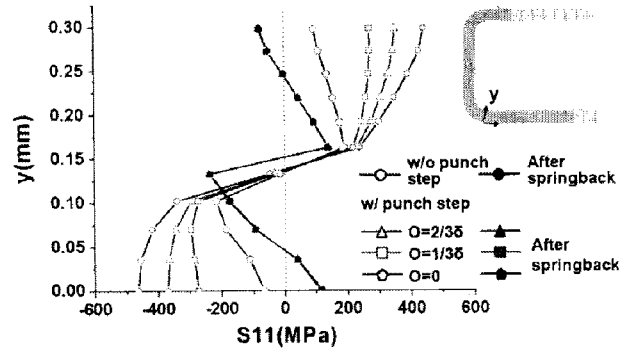
### 3.2 유한요소 해석을 통한 스프링백 분석

두께방향에 대한 굽힘응력 분포를 알아내기 위해 ABAQUS 6.7 Implicit을 통하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용한 요소는 일반 2D 평면 변형률 조건의 4절점 요소인 CPE4R를 사용하였다. 평면 변형률 조건의 두께는 실제와 비슷한 1000mm로 설정하였고, 또한 다이, 펀치, 블랭크 홀더는 Rigid로 고려하였다. 또한 두 번째 굽힘 공정에서 발생하는 두께방향 응력 분포는 Fig. 3에서와 같이 최대 인장응력 발생 지점으로 선정하였다.

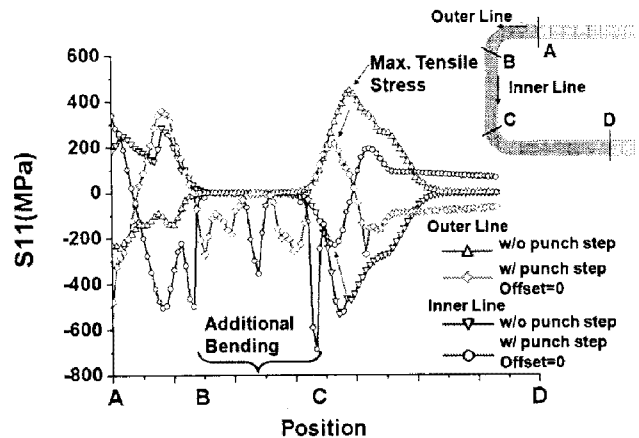
가장 큰 공정 변수가 ‘ $\delta$ ’ 굽힘 공정에서의 Punch Move, 곧 Offset값이기 때문에 이에 대한 응력분포를 조사하였다. 소재와 펀치의 단 형상이 접촉하기 전의 Offset= $\delta$ 라 하자. 그리고 Offset 값을  $\delta$ 를 3등분 하여 Offset에 대한 응력 분포 및 스프링백은 Fig. 4와 같다. 이때, 다른 공정 변수는  $R_D = 0.03\text{mm}$ ,  $CL1 = 0.09\text{mm}$ ,  $CL2 = 0.03\text{mm}$ 와 같다. 이때, 스프링백 이후의 두께 별 굽힘 응력은 각 경우에 같은 분포를 보인다. 그러나 ‘ $\delta$ ’ 굽힘 공정에서의 펀치 이송량에 따라 큰 차이를 보인다. 또한 단이 없는 펀치 형상일 경우,  $S11=442.48\text{MPa}$ ,  $\alpha=2.60^\circ$ , Offset=0인 경우,  $S11=94.48\text{MPa}$ ,  $\alpha=0.05^\circ$ 로 응력 및 스프링백양이 큰 차이를 보인다. 이는 펀치의 이송량이 증가함에 S11이 감소하기 때문에 스프링백 양이 감소한다 할 수 있다. 또한 Fig. 4 (c)는 변형되지 않았을 때의 좌표를 기준으로 한 Point A에서 D까지의 S11분포 그래프이다. Offset=0일 때 아래쪽 굽힘부의 최대 인장응력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Offset=0인 경우에 최대 인장, 압축 응력이 발생하는 주변에 기존의 응력상태와 다른 방향의 응력이 발생한다. 또한 펀치의 단과 소재가 접하는 부분에서도 추가적인 변형이 일어나 형상정밀도를 향상시킬 수 있다.



(a) FEM result( $CL1=0.09\text{mm}$ ,  $CL2=0.03\text{mm}$ )



(b) S11 distribution along thickness dir.

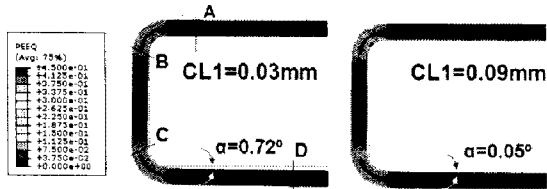


(c) S11 Distribution along material dir.

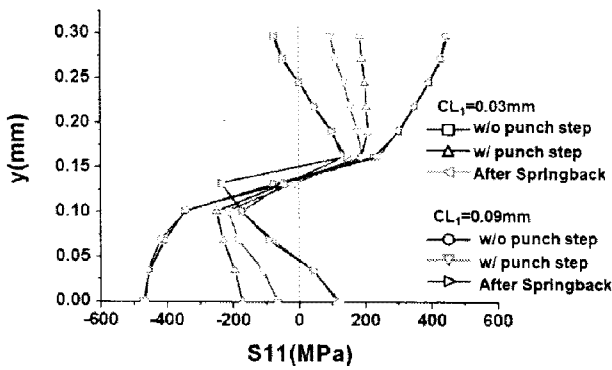
Fig. 4 Bending Stress distribution & result of different Offset

$CL1$ 이 스프링백에 미치는 영향을 조사하기 위해  $CL1$ 에 대한 스프링백양 및 굽힘 응력분포를 조사하였다. Fig. 5 (b)는  $CL1=0.03\text{mm}$ ,  $CL1=0.09\text{mm}$ 일 때의 두께별 굽힘응력 분포를 나타낸 그래프이다. 이때, 다른 공정 변수는  $R_D=0.03\text{mm}$ , Offset=0,  $CL2 = 0.03\text{mm}$ 와 같다. Step 2-1의 응력 분포, 스프링백 후의 두께방향 응력분포 같은 양상을 보인다. 그러나 Step 2-1이 끝난 뒤, 스프링백이 발생하기 이전의 응력 분포는 판이하게 다르다. 결국 이 응력 분포의 차이가 스프링백의 양을 결정하게 된다.  $CL1=0.09\text{mm}$ 일 경우  $S11=94.48\text{MPa}$ ,  $CL1=0.03\text{mm}$ 인 경우  $S11=183.18\text{MPa}$ 의 값을 가져,  $CL1=0.09\text{mm}$ 인 경우에 48% 감소된 값을 갖는다. 이는 형상 정밀도에 있어서  $CL1=0.09\text{mm}$ 인 경우에  $\alpha=0.05^\circ$ 로 스프링백이 거의 발생하지 않는다고 할 수 있다. Fig. 5 (c)는 변형되지 않았을 때의 위치를 기준으로 한 굽힘응력 분포이다.  $CL1=0.03\text{mm}$ ,  $CL2=0.09\text{mm}$ 인 경우 비슷한 경향을 보이지만, 응력 분포에 있어서 값의 차이를 보인다.

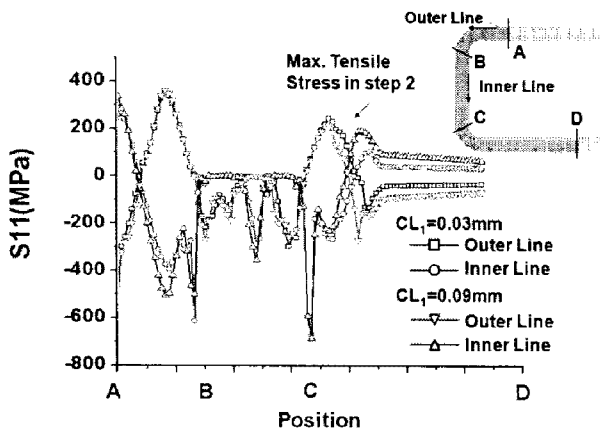
다. 특히 그래프에 표시된 step 2에서 최대 인장응력이 발생한 부분의 응력 분포가 낮은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 CL1이 큰 경우에 ‘ㄷ’ 굽힘 공정에서 펀치의 Step 형상과 접촉하여 2차적으로 성형되는 양이 증가하여 S11이 감소하여 결국 스프링백 양이 감소한다고 할 수 있다.



(a) FEM result(CL2=0.03mm, Offset=0)



(b) S11 distribution along thickness dir.



(c) S11 Distribution along material dir.

Fig. 5 Bending Stress distribution & result of CL<sub>1</sub>=0.03mm & CL<sub>2</sub>=0.09mm

#### 4. 결론

본 연구에서는 용융탄산염 연료전지의 금속분리판 중 하나인 센터플레이트의 굽힘 공정에 대하여, 실험계획법을 통해 얻은 결과에 대해 그 원인을 분석하였다. 기존의 일반 펀치 형상과 달리 단 형상을 가진 펀치 형상을 ‘ㄷ’ 굽힘 공정에 삽

입함으로써 응력 분포가 기존의 굽힘 응력 분포와 달라지고, 펀치의 단 형상을 가지는 부분과 접촉함에 변형 거동이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. Offset이 성형 정밀도를 향상시키는데 있어서가 중요한 것을 파악할 수 있다.

(1) ‘ㄷ’ 굽힘 공정에서 R<sub>D</sub>=0.03mm, CL<sub>1</sub>=0.09mm, CL<sub>2</sub>=0.03mm, Offset=0mm일 때 α=0.05°의 값을 얻을 수 있었다. 또한 스프링백은 R<sub>D</sub>, CL<sub>2</sub>, O에 대해서는 망소 특성, CL<sub>1</sub>에 대해서는 망대특성을 갖는다.

(2) 이에 대한 원인을 분석하기 위하여 CL<sub>1</sub>, Offset에 대해 값을 바꿔가며 두께별 응력 분포, 변형 전 좌표를 기준으로 한 굽힘 응력 분포를 조사하였다. ‘ㄷ’ 굽힘공정에서 펀치의 단 형상과 접촉하기 이전의 굽아오름 양을 δ라 했을 때, Offset=0인 경우 Offset=δ인 경우에 비해 외곽의 굽힘응력이 78%감소하였다. CL<sub>1</sub>=0.09mm인 경우 CL<sub>1</sub>=0.03mm인 경우에 비해 굽힘응력이 48%감소하였다. 이는 곧 스프링백의 감소와 연관이 된다.

(3) Offset이 0에 가까워짐에 따라 소재 전체의 굽힘 응력 분포가 일반 굽힘 응력분포와 큰 차이를 보이게 된다. 특히 펀치의 단 형상과 접촉하는 부분에 있어서 추가적인 변형을 발생시킨다. 또한 ‘ㄷ’형상의 아래쪽에서 인장 및 압축이 변형이 발생하여 역 스프링백이 발생하여 스프링백양이 감소한다.

#### 후기

본 연구는 신재생에너지 프로젝트형 기술개발 사업의 “MCFC 초정밀 금속분리판 성형공정 개발” 과제의 일환으로 진행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] Ryan O'Hayre, 2006, “Fuel Cell fundamentals”, Wiley
- [2] C. Yuh, 2006, “Carbonate Fuel Cell Materials, Journal of Materials Engineering and Performance”, Vol 15(4), pp. 457~462
- [3] Fuel Cell Energy, Inc., “Bipolar separator plate with improved wet seals”, US Patent 6,372,374
- [4] 이창환, 류승민, 양동열, 김영진, 강동우, 장인갑, 이태원, “용융탄산염 연료전지용 초정밀 금속분리판 제작을 위한 굽힘 공정 최적화, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문”집, 2008. 10
- [5] 김낙수, 김형중, 2002, “소성가공과 해석”, 문운당,