

## 유한요소법을 이용한 박판 플랜지 형상 예측

김윤태<sup>1</sup>, 이상욱<sup>2</sup>, 전중환<sup>3</sup>, 임희천<sup>4</sup>

### Prediction of Springback Shape in the Flange Forming

Y. T. Kim, S. W. Lee, J. H. Jeon, H. C. Lim

#### Abstract

The stack, the core unit of the MCFC system, is composed of the three main parts which are the electrodes, the matrix keeping the electrolyte and the separator. Among these, the separator made of low carbon steel is manufactured by some sheet metal forming processes. The flatness of flange of the mask plate of the separator is crucial not only to enhance the stack performance but also to reduce the production cost.

This study has focused on the enhancement of flatness of the mask plate flange by controlling some process parameters like the punch and die corner radii, the blank holding force, the friction coefficient and so on. The springback phenomenon occurring in the flange drawing process has been studied first using the finite element method (FEM) in order to understand what causes the springback. The distribution pattern of local longitudinal stress in the flanged part has been revealed very important in predicting the final shape of the flange. This fact has been backed up by the experimental results carried out with the developed test dies.

**Key Words** : MCFC, Sheet metal forming, Mask plate flange, Process parameter, Finite element method, Springback

#### 1. 서 론

용융탄산염 연료전지(MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell)는 단위전지를 적층하여 하나의 스택을 구성한다. 단위전지는 크게 세부분으로 구성되어 있는데, 전극부, 매트릭스부 및 분리판부가 그것이다. 제작된 분리판의 편평도가 높으면 전극 및 매트릭스와 잘 밀착되어 전력 손실을 줄일 수 있고, 단위전지를 적층하였을 때 균등한 스택 높이를 보장받을 수 있다. 그러나 현재 제작되고 있는 분리판은 간이 금형으로 제작되고 있기 때문에 분리판 전체에 걸친 평균 편평도는 낮으며 이는 스택 제작 시 국부적인 집중응력 부위를 유발할 수 있다.[1]

분리판의 마스크판 플랜지(Mask plate flange) 성형은 일종의 박판 소성 가공으로 면적에 비해 두께가 상대적으로 얇은 박판을 이용하기 때문에 여러 가지 특성을 가지고 있다. 첫째는, 박판이 거의 전면에 걸쳐 다이(Die), 홀더(Holder) 및 펀치(Punch)와 같은 가공 금형과 접촉한다는 점이다. 여기에 마찰 현상까지 더하여 매우 복잡한 양상을 띄게 된다. 둘째는 성형이 끝난 후에도 내부 응력에 의해 스프링백(Springback)현상이 일어난다[2]는 것이 대표적 현상이라 할 수 있다.

스프링백은 탄소성 거동이 적용되는 굽힘 가공 후, 하중을 제거하게 되면 재료 내부에 복원능력이 발생하여 원래의 요구하는 형상에서 벗어나는 모양을 갖게 되는 것을 말한다. 분리판의 Mask

1. 경신공업(주) 중앙기술 연구소 부품설계팀  
2. 순천향대학교 기계공학과  
3. 포항산업과학연구원 기능소재 연구팀  
4. 한국전력연구원 신기술센터

plate flange 도 플랜징(flanging) 가공 후 스프링백 발생으로 인하여 분리판의 최종 형상뿐만 아니라 편평도에도 지대한 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 스프링백 발생 원인을 규명하고, 스프링백이 발생된 최종 형상을 예측하였다.

## 2. 이론

박판 소재의 가공은 굽힘 가공에 의해 이루어지며, 그 특성상 인장응력과 압축 응력이 동시에 발생한다. 이때 한 요소를 선정하여 가공 시간에 따른 위치변화를 살펴보면 그림 1.(a) 과 같다. 판재의 한 요소는 초기 위치에서 코너에 진입하여 코너를 돌아나오게 되며, 가공이 계속 진행되어 요소는 벽부를 따라간다.

블랭크에 요소의 두께 방향으로 7 개의 가우스 적분점을 주어 최상단 적분점에 대한 응력변화를 그림 1.(b)에 보였다. Step.2 에서는 굽힘력에 의한 bending 이 발생하였으나, Step.3 에서는 역굽힘력이 작용하여 unbending 이 발생되었다. 계속되는 가공으로 Step.4 에서는 relaxation 되어 최종값에 도달하며, 스프링백 발생 정도는 마지막 도달 지점의 크기에 영향을 받게 된다.

그 결과 이론상 응력분포도와 매우 유사하며, 최하단 적분점은 이론상 최상단 적분점과 반대로 압축력과 인장력의 순서로 힘을 받기 때문에 최하단 적분점의 그림 1.(b)와 x 축 거울 형상이 될 것으로 판단된다.

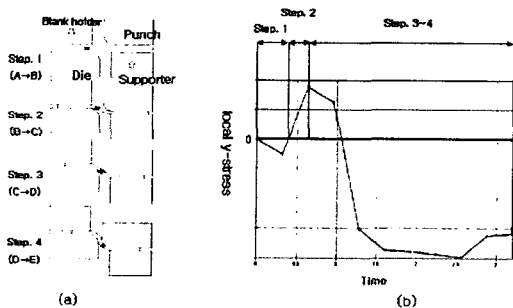


그림 1. 다이 코너를 지나는 한 요소의 시간에 따른 응력 변화도 (a) 4단계로 구분된 분리판의 플랜지 성형 (b) 벤딩, 언벤딩, relaxation을 거쳐 음의 값을 갖는 요소 한개의 응력 변화 그래프

## 2. 해석 및 실험

### 2.1 시편

SUS 316L 판재를 가지고 압연 방향에 대하여 0°, 45°, 90° 방향으로 인장시편을 제작하였다. 가공 완료된 인장 시편을 만능성형시험에 장착한 후, 길이방향 신장량 측정 게이지(Extensometer)와 폭게이지(width sensor)를 장착한다. 신장량과 폭방향 변형량은 100 msec 의 시간 간격을 가지고 기록하였다.

시험 속도는 규격에 따라 cross-head 속도를 2.0 mm/min 이하로 주었다. 실험이 진행되는 동안에는 stroke, 신장량, 힘, 폭변화량 순으로 기록된 데이터를 가공하여 전산 모사 해석시 사용될 수 있는 True stress-Plastic true strain 선도를 구했다. 판재의 3 가지 방향에 대한 결과를 표.1 에 나타내었다.

표 1. SUS 316L 의 물성치

Properties \ Rolling Directions	0°	45°	90°
Young's modulus(E)	196.847	179.754	179.095
Poisson's ratio( $\nu$ )	0.30	0.30	0.30
Lankford value(R)	1.266	2.145	1.666
Yield stress, $\sigma_y$ (MPa)	214.123	252.963	223.385
stress-strain curve: $\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$			
K (MPa)	1311.415	1243.254	1218.172
$\epsilon_0$	0.021994	0.023956	0.021808
n	0.4748	0.4267	0.4434

### 2.2 해석 방법

내연적 시간 적분법과 외연적 시간 적분법은 내부 알고리즘의 차이로 각각 특성에 맞는 해석대상이 존재한다. 간단하게 표현하면 내연적 시간 적분법은 축차(iteration)를 이용하여 (n+1)번째 상태에서의 내력(internal force)과 외력(external force)의 힘평형(force balance)을 맞추는 방법이고[3], 외연적 시간 적분법은 축차가 전혀 필요없으며 대신 내력과 외력간의 불균형(driving force)에 의해 (n+1)번째 상태를 구하는 방법이다.

따라서 내연적 및 외연적 시간 적분법은 그 장단점이 상호보완 관계에 있기 때문에 이를 플랜지 드로잉 공정에 적용할 때도 그 장단점에 맞게 선택하는 것이 중요하다. 즉, 복잡한 3 차원 형상과 접촉을 가진 성형 단계에서는 외연적 시간 적분법

을 사용하여 성형 형상을 얻고, 스프링백 해석시에는 금형을 완전 배제시킨 가운데 탄성회복의 한 스텝을 푸는데 효율적인 내연적 시간 적분법을 이용해야 하는 것이다. 해석을 위해 블랭크와 틀을 배치한 모습을 그림 2에 보였다. 실험에 사용된 실험 장치의 모습을 그림 3에 보였다. 표.2에는 해석과 실험에 사용된 조건을 나타내었다.

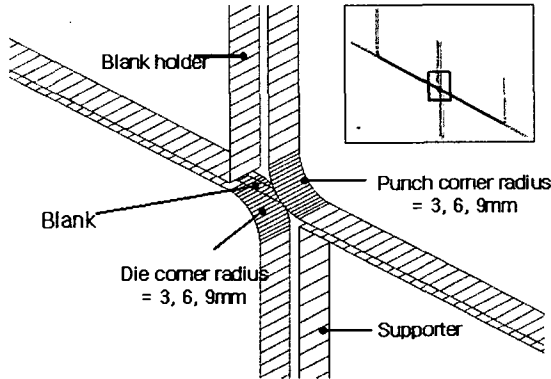


그림 2. 플랜지 성형 해석이 가능하도록 배치한 모습

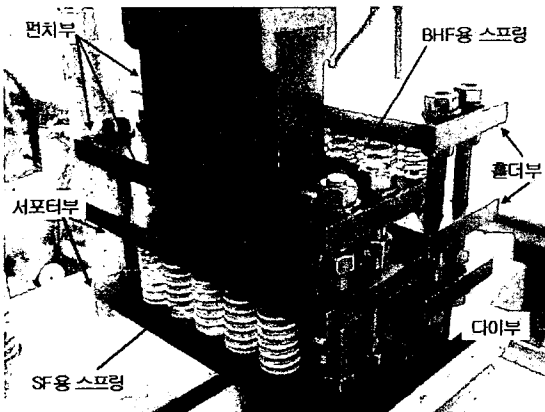


그림 3. 플랜지 성형 해석에 사용된 시험장치

표 2. 해석과 실험에 사용된 조건표

Process parameters	Value / Condition
Max. Punch stroke	30 mm
Punch velocity	1000 mm/sec (해석) 0.25 mm/sec (실험)
Blank holding force(total)	1.75 kN(단위폭당 50 N)
Supporter force(total)	3.5 kN(단위폭당 100 N) 7.0 kN(단위폭당 200 N)
Initial blank size	35.0 mm x 173 mm
Initial blank thickness	0.60 mm
Friction coefficient	0.10 (with Grease) 0.20 (without Grease)

### 3. 결과 및 분석

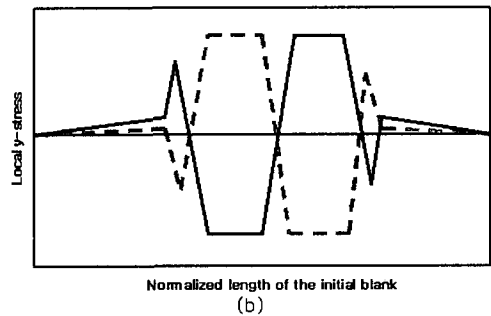
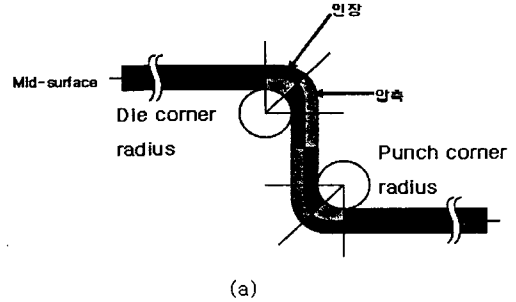


그림 4. PR=DR & BHF=SF (a)최외각 적분점들의 적분점들의 local y-stress 음양 예측 (b)최외각 적분점들에 적분점들의 local y-stress 대소 예측

그림 4는 PR과 DR이 동일하고 BHF와 SF역시 동일한 상태일 때의 블랭크의 내부 응력상태를 예측한 그림이다. 블랭크 중심선(mid-surface)을 기준으로 위쪽은 최상단 적분점의 응력값으로, 아래쪽은 최하단 적분점의 응력값으로 나타내었다. 먼저 양쪽이 동일한 조건에서 성형이 이루어지기 때문에 다이코너와 편치코너를 거쳐 편치와 다이 벽부로 유입되는 블랭크 양은 동일할 것이다. 최상단 적분점은 다이와 편치 코너에 진입하여 일정 각도까지 (+)bending이 발생하고, 성형이 계속 진행되면서 코너를 빠져나와 (-)unbending이 발생된다. 이와 반대로 최하단 적분점은 다이와 편치 코너에 진입하여 일정 각도까지 (-)bending이 발생하고, 성형이 계속 진행되면서 코너를 빠져나와 (+)unbending이 발생된다. 벽부의 가운데 지점에서 부호가 바뀔 것으로 예상된다.

실제 해석을 통해 표준화된 길이에 맞춰진 local y-stress 분포도를 그림 5에 나타내었다. 왼쪽 상단에 그려진 예측값과 실제 해석 결과와

동일함을 알 수 있었다. 오른쪽 상단 그림은 금형이 제거된 후 스프링백이 일어난 후의 최종 형상이다.

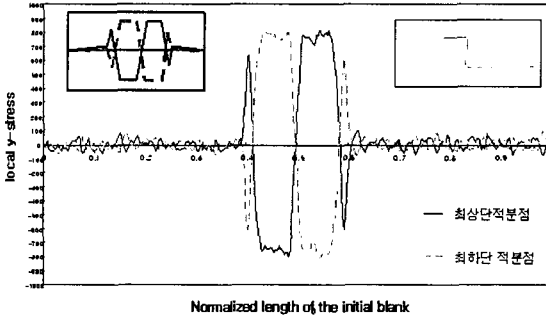


그림 5. PR=DR & BHF=SF 일때 블랭크 길이에 따른 local y-stress 분포(FEM)

그림 6은 PR과 DR이 동일하고 BHF가 SF보다 더 큰 경우이다. 약한 서포터력으로 펀치쪽 블랭크가 상대적으로 유입되면서 최종 형상이 얻어진다. 즉, 펀치 코너를 지나는 요소의 수가 다이 코너를 지나는 요소의 수에 비해서 많기 때문에 이 같이 예상된다. 펀치 코너를 지나온 요소들은 계속된 가공으로 인하여 최종 응력 상태에 도달한 것들이 많다. 해석을 통해 표준화된 길이에 맞춰진 local y-stress 분포도를 그림 7에 나타내었다. 예측했던 것처럼 펀치를 지나는 많은 요소들이 최종 응력 상태에 도달한 것을 알 수 있었다. 이때의 스프링백의 형상은 우측 상단 그림과 같고 플랜지부가 위쪽으로 많이 올라간 모습을 볼 수 있다.

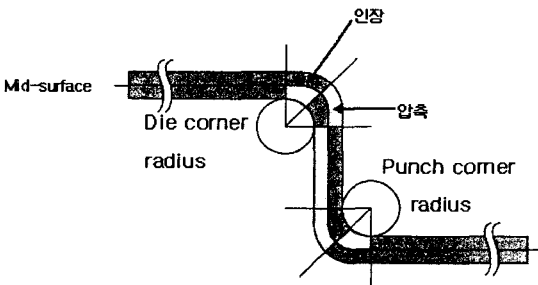


그림 6. PR=DR & BHF>SF 에서 최외각 적분점들의 local y-stress 음양 예측

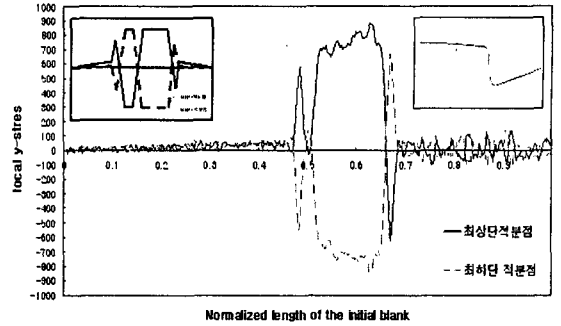


그림 7. PR=DR & BHF>SF 일때 블랭크 길이에 따른 local y-stress 분포(FEM)

마지막으로 그림 8은 BHF와 SF를 동일하게 주고, PR을 DR에 비해 더 크게 준 경우이다. 펀치 코너 반경이 더 큰 쪽이 저항이 적어 작은 다이 반경쪽 보다 블랭크 유입량이 많을 것이라고 예상하였다. 하지만 펀치 코너 반경이 크기 때문에 펀치 코너 반경에 걸쳐있는 요소의 수가 많아지게 된다. 따라서 펀치코너 반경에 의해 발생하는 벤딩 영역이 넓어지리라 예상된다. 그림 9를 보면 예상했던 그림과 실제 해석 결과가 상당히 유사함을 알 수 있었다. 또한 스프링백 결과는 그림 9의 오른쪽 상단과 같다.

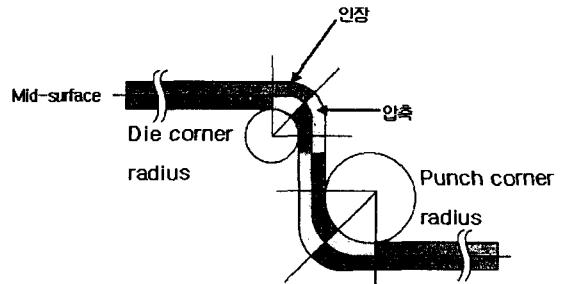


그림 8. PR>DR & BHF=SF 에서 최외각 적분점들의 local y-stress 음양 예측

이상의 몇가지 조합을 토대로 플랜지 드로잉 공정에서 스프링백에 관여하는 공정파라미터에 대해 생각해보는 계기를 마련하였고, local y-stress 분포도로 스프링백 결과를 예측할 수 있었다. 또 스프링백이 발생하여도 편평도가 유지되는 블랭크의 local y-stress 분포도를 알았다. 즉, 블랭크 벽부의 가운데 지점을 중심축으로 하여 양쪽이 점대칭

을 이루는 응력분포를 가져야 한다. 아래에 그림 10 과 그림 11 에 해석과 실제 실험장치를 이용하여 얻은 최종 형상을 비교하여 나타내었다.

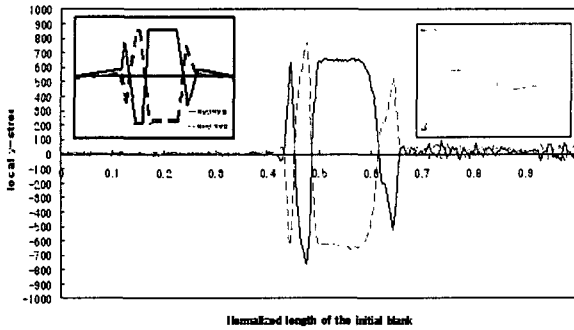


그림 9. PR>DR & BHF=SF 일때 블랭크 길이에 따른 local y-stress 분포(FEM)

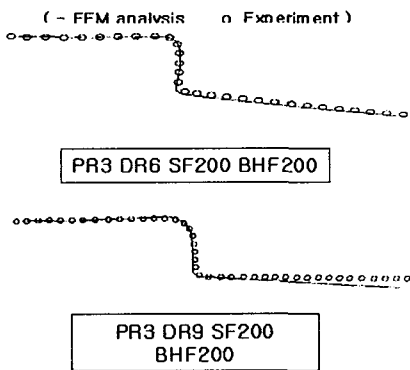


그림 10. PR≠DR 일 때 해석과 실험의 최종형상 비교

그림 12 에는 BHF 와 SF 가 동일하고 PR 과 DR 이 동일한 상태에서 마찰계수 또한 동일한 경우에 생성되는 결과물을 보였다. 마찰계수를 동일하게 주기 위한 방법으로 테프론 그리스를 이용하여 윤활[4]하였다. 이같은 결과물을 실제 성형으로 얻기 위해서는 더욱 고정밀화된 성형 기술이 확립되어야만 할 것이다. 성형시 양쪽 응력 상태를 동등하게만 만들어 줄 수 있다면 스프링백이 발생하여도 편평도가 유지되는 형상을 얻을 수 있을 것이다.

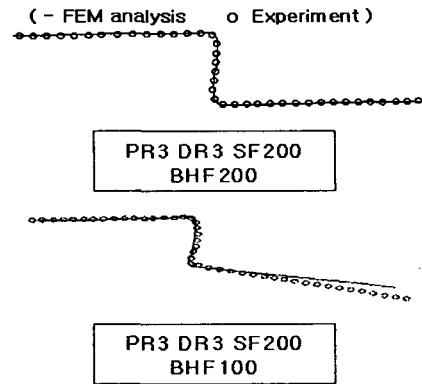


그림 11. SF≠BHF 해석과 실험의 최종 형상 비교

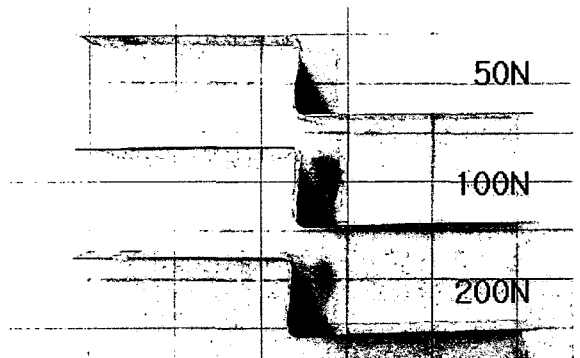


그림 12. PR=DR & BHF=SF 일때의 편평도가 개선된 성형 형상

#### 4. 결론

용융탄산염 연료전지 Mask plate flange 부의 편평도 개선을 위해 플랜지 드로잉에 대한 해석 및 실험을 실시하였다. 우선, 플랜지 성형시 영향력이 크다고 판단되는 공정 파라미터를 마찰계수, 다이 코너 반경, 펀치코너 반경, 블랭크 홀딩력, 서포터력으로 예상하였다. 공정 파라미터에 양적 변화를 주어 해석한 결과, 최종 형상에 차이가 나는 것을 알게되었고 실험을 통해 확인하였다.

또 블랭크 요소들의 local y-stress 분포를 이용하여 스프링백 형상을 예측 할 수 있다는 사실도 알아냈다. 따라서 작업자는 생산 조건을 정확

하게 파악함으로써 성형 후 나타나는 스프링백 현상을 개략적으로 파악할 수 있다고 판단된다.

PR=DR & BHF=SF 의 조건에서 스프링백이 발생한 후에도 플랜지의 편평도가 유지되는 사실도 알았었다. 하지만 벽부의 가운데 부분에서 변곡점을 중심으로 S 자형을 띄게되어 벽부의 편평도에 영향을 주는 사실을 알았다.

마지막으로 해석과 실험 결과를 금형 설계에 적용하기 위해서는 다이와 편치 양쪽이 유사한 응력상태가 되도록 만들어 주면 성형 기술이 필요하다. 이같은 방법을 이용하면 스프링백이 발생하지만 플랜지부의 편평도는 향상되리라 판단된다.

### 후기

본 연구는 RIST 와 한국전력 연구원의 연구비 지원(100kW 급 MCFC 연구)으로 수행되었으며,

관계자 분들의 관심과 적극적인 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 이상욱, 강성군, 신정철, “용융탄산염 연료전지용 분리판 설계기술 및 내식피복 연구중간보고서(3 차년도)”, 포항산업과학 연구원, 2004
- [2] 이상욱, 윤정환, 양동열, “외연적 시간적분법을 이용한 박판성형 및 내연적 스프링백 해석”, 대한기계학회 1996 년도 춘계학술대회 논문집 A, pp.647-652, 1996
- [3] "An Introduction to ABAQUS/Explicit", Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1991
- [4]이원표, “프레스 가공에 사용되는 소성 가공유”, 월간프레스기술 2002.08, 프레스 가공기술 (33), pp.76-83, 2002