한국소성가공학회 2008년도 추계학술대회 논문집 pp. 345~348

용융탄산염 연료전지용 초정밀 금속분리판 제작을 위한 굽힘 공정 최적화

이창환[1] · 류승민[1] · 양동열#[1]

Optimization of Bending Process for the Fabrication of Ultra Precision Metallic Bipolar Plate for Molten Carbonate Fuel Cell

C. H. Lee, S. M. Ryu, D. Y. Yang#

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. The aim of this article is to optimize the bending process of the center plate regardless of springback and recoiling. To achieve this goal, we proposed the punch having step to reduce springback and recoiling. Using finite element method and L_9 orthogonal array, we determined the main factors in the center plate bending process. And we found the optimal bending process condition for the MCFC center plate.

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

1. 서 론

용융탄산염 연료전지 (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell)는 650 ℃에서 용융되는 용융탄산염을 전해질로 사용하여, 전기화학반응을 통해 발전함으로써 에너지 변환효율 및 환경오염 측면에서 주목 받는 발전방식으로 대두되고 있다[1].

MCFC의 금속 분리판은 센터플레이트 (Center plate)와 쉴디드 슬롯 플레이트 (Shielded slot plate)로 구성된다. 금속 분리판은 셀 내에서의 가스 유로의 공간을 확보하고 각 셀 사이의 가스 혼합을 방지하며 전극을 포함한 매트릭스를 지지하는 역할을 한다. 고효율 MCFC 스택을 제작하기 위해서는 초정밀 금속분리판 제작에 의한 고밀폐성 확보, 가스 분배의 균일성 확보 및 고집전 분리판 설계 및 성형공정 개발이 요구되고 있다. Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 센터플레이트 네 개의 모서리 상에서 'ㄷ' 모양의 형상은 쉴디드 슬롯 플레이트가 삽입되며, 전해질 매트릭스를 지지하며, 단위전지의 스택킹 (stacking) 시 가스혼합을 방지하는 역할을 한다. 따라서 센터 플레이트의 'ㄷ' 형상의 성형공정에서의 치수정밀도 확보는 스택의 고밀폐성을 유지하기 위한 중요한 이슈이다. 센터플레이트의 고 정밀도 'ㄷ' 형상을 제작하기 위해서 굽힘 공정, 분리 성형 후 접합, 정수압 성형 등의 공정이 제안되어 왔다 [2].

이 중에서 굽힘 공정에 의한 'ㄷ' 형상 제작은 복잡한 형상의 트리밍 공정이나 별도의 추가되는 용접공정 없이 센터 플레이트를 제작 가능하다는 장점이 있다. 그러나 박판금속의 굽힘 공정후의 국부적 솟아오름 (recoiling), 스프링백 (spring back) 등의 치수정밀도 저감인자에 대한 정확한 예측을 필요로 한다.

본 연구에서는 MCFC 금속 분리판의 센터 플레이트의 굽힘 공정에 있어서 유한요소법 및 다구찌 기법을 사용하여 각 중요 변수에 대한 요인분

1. 한국과학기술원 기계공학과
교신저자: 한국과학기술원 기계공학과 dyyang@kaist.ac.kr

석을 통해 실제 굽힘 공정에 필요한 제반 정보들을 도출하고 최적의 성형조건을 파악하고자 한다.

2. 센터 플레이트의 성형 공정

2.1 센터 플레이트의 성형 공정

센터 플레이트로 사용되는 재료로 내부식성이 좋은 0.3 mm 두께의 SUS310S를 사용하였으며 [3], 그 물성값은 Table 1 과 같다.

제작 공정은 Fig. 2 (a)로, 첫 번째 굽힘 공정은 'ㄴ'굽힘 공정이고 두 번째 공정은 'ㄷ'굽힘 공정이다. 이 때, 가장 중요한 문제점은 스프링백 및 국부적 솟아오름에 의한 형상 정밀도 저하이다.

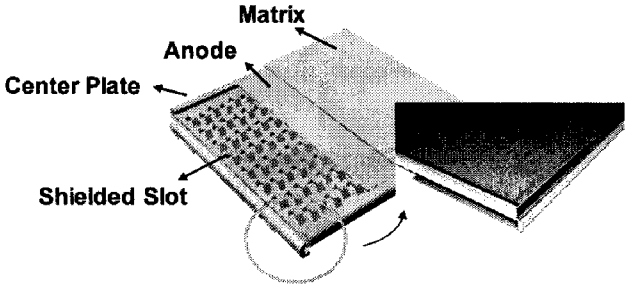


Fig. 1 MCFC unit cell (Anode side view)

Table 1 Mechanical properties of SUS310S

	Elastic Modulus(GPa)	Yield Stress(MPa)	Poisson's Ratio
Data	141	236	0.33

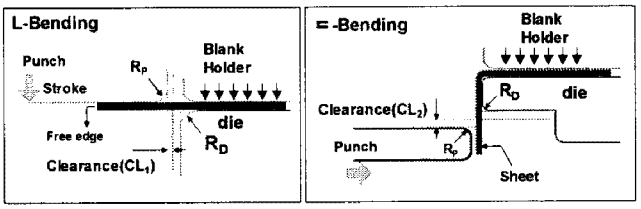
2.2 형상정밀도 향상을 위한 방안

일반적인 굽힘공정에서 치수정밀도를 저감하기 위해서 과도굽힘, 회전 굽힘 및 신장 굽힘 등의 방법이 사용된다[4]. 본 연구에서는 펀치의 기하학적 형상 변화를 통해 국부적 솟아오름이 일어난 부분을 추가 변형시키고, 다이의 라운드 값과 각 공정에서 펀치와 다이 간극, 펀치 이송량 등의 공정 변수 조합 에 의한 굽힘 형상 변화를 관찰하여 중요 공정 변수를 설정하고, 이를 통해 스프링백 및 국부적 솟아오름에 대한 효과를 최소화 하는 굽힘 공정 최적화를 진행 하고자 한다.

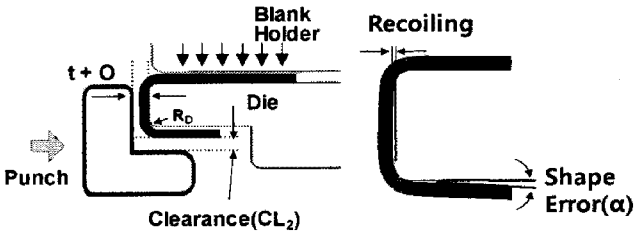
3. 다구찌 기법을 이용한 공정변수 분석

3.1 주요 공정 변수의 설정

소재 두께 t=0.3mm 에 대하여 공정 변수 중에서 펀치의 라운드 값, R_P는 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 Offset, O의 4가지 변수를 주요 공정 변수로 선택하였다. 여기에서 O는 Fig. 2 (b)와 같이 펀치의 최종 위치에서 스텝과 다이 사이의 거리에서 소재의 두께, t를 감한 값으로 정의하였다.



(a) Conventional 2 step bending process for center plate



(b) Using modified punch shape process **(c) Defect mode of center plate**

Fig. 2 Bending process of center plate and defect mode

Table 2 Variables for L_9 orthogonal array

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
R_D	0.3	0.4	0.5
CL_1	0.03	0.06	0.09
CL_2	0.03	0.06	0.09
O	0	0.01	0.02

4가지 공정 변수에 대해 Table 2 에 3수준을 설정하였고, Table 3에서 공정변수에 대하여 3수준 직교 배열표 (Orthogonal Array, L_9)를 구성하였다. 이를 바탕으로 굽힘 해석을 진행하였으며, 공정변수의 영향은 Fig. 2 (c) 와 같이 스프링백 후 평판과 다이가 이루는 각, α로 평가하였다. 또한 x 방향 성형 하중 F_x, y 방향 성형 하중 F_y는 펀치 스텝 부분과 소재가 접촉하는 부분에서 측정된 다

이에서의 최대 반력값, 접촉 후 발생하는 절대값의 최대값으로 설정하였다.

3.2 다구찌 기법을 이용한 해석 및 결과

공정변수에 대한 민감도 및 최적 조건을 찾아내기 위하여 직교 배열표의 9가지 경우에 대하여 ABAQUS 6.4 Implicit을 통하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용한 요소는 일반 2D 평면 변형률 조건의 4절점 요소인 CPE4R를 사용하였다. 그리고 해석의 정확도를 높이고 수행 시간을 절감하기 위하여 굽힘 공정이 일어나는 부분에서는 요소 밀도를 증가시켰다. 평면 변형률 조건의 두께는 실제와 비슷한 1000mm로 설정하였다. 또한 다이, 펀치, 블랭크 홀더는 Rigid로 고려하였다.

Table 3 L_9 Orthogonal array

Case	R_D	CL_1	CL_2	O
1	0.3	0.03	0.03	0
2	0.3	0.06	0.06	0.01
3	0.3	0.09	0.09	0.02
4	0.4	0.03	0.06	0.02
5	0.4	0.06	0.09	0
6	0.4	0.09	0.03	0.01
7	0.5	0.03	0.09	0.01
8	0.5	0.06	0.03	0.02
9	0.5	0.09	0.06	0

Case 1에 대하여 펀치에 스텝 형상이 없는 경우의 해석 결과는 Fig. 4의 (a), (b)와 같다. 일반 펀치 형상의 경우 α=2.49°, recoil=0.58mm, 스텝 형상이 있는 경우 α=0.717° recoil=0.07mm 로 스텝이 있는 펀치의 경우 α가 71%, recoil은 87% 감소하였다. 따라서 Fig. 2(b)와 같이 펀치의 형상을 변경하는 것이 형상 정밀도를 향상 시키는데 유리하다. 이는 펀치의 스텝부분이 국부적 솟아오름이 발생한 부분과 접촉 하면서 이 부분을 밀어주게 되어, Fig. 3 과 같이 아랫부분의 펀치 형상이 지렛대의 역할을 하여 소재에 추가적인 굽힘을 일어나게 하여 α, recoil을 감소 시킨다. 하지만 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 펀치 스텝이 접촉하는 순간 성형 하중이 X방향으로 188.8kN, Y방향으로 15.6kN 증가하였다. 따라서 펀치 형상을 변경하는 경우 성형 하중에 대한 고려가 필요하다고 할 수 있다.

4가지 공정변수에 대한 직교 배열표의 해석 결과인 Table 4를 바탕으로 Fig. 6 과 같은 S/N Curve를 그릴 수 있다. α는 R_D, CL_2, O 값이 작을수록, CL_1이 클 수록 작아지는데, 이것은 위와 같은 조건일 때, Fig. 3 과 같은 추가적인 굽힘이 더 많이 진행됨으로써 가능하다.

Table 4 Characteristic values

Case	F_x (kN)	F_y (kN)	α (°)
1	-195.7	36.8	0.717
2	-112.4	41.3	0.981
3	-95.0	47.8	1.573
4	-79.8	44.3	3.219
5	-180.2	50.7	2.113
6	-109.3	58.6	1.236
7	-97.3	42.6	3.864
8	-86.5	47.7	2.936
9	-139.7	51.2	2.206

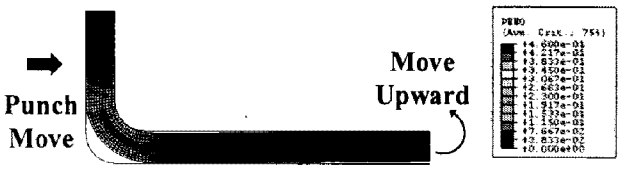
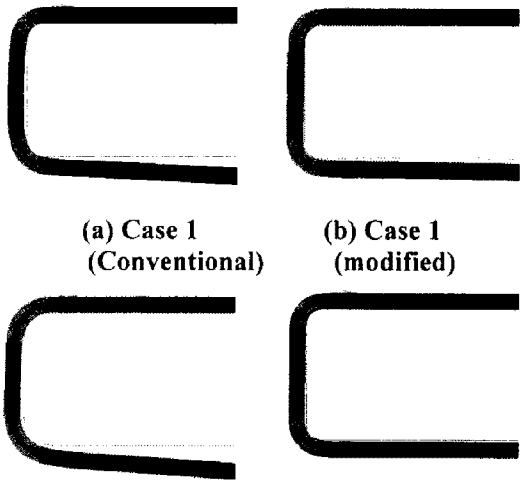


Fig. 3 Movement of sheet end(Case 1)



(a) Case 1 (Conventional) **(b) Case 1 (modified)**

(c) Case 7 **(d) DOE result**

Fig. 4 FEM result

성형 하중에 대한 S/N curve는 Fig. 6과 같다. Y 방향에 대해서는 큰 편차가 없는 것을 볼 수 있지만, X 방향에 대해서는 Punch Offset, O 값에 편차가 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 형상 정밀도를 향상시키기 위해 O 값을 작게 하는 경우 X 방향으로 성형 하중이 급격하게 증가하게 되어 다이에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 실제

공정에서 펀치의 형상을 변화하는 경우 펀치의 이송에 대한 정밀한 제어가 필요하다.

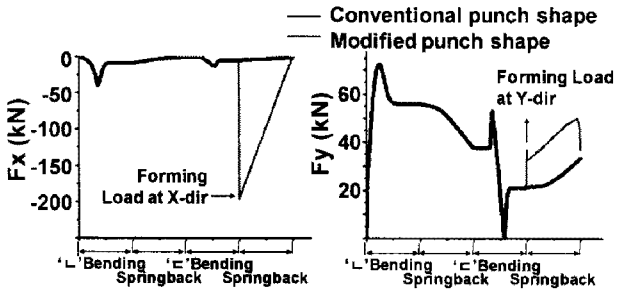


Fig. 5 Forming Load at X-dir. and Y-dir.(Case 1)

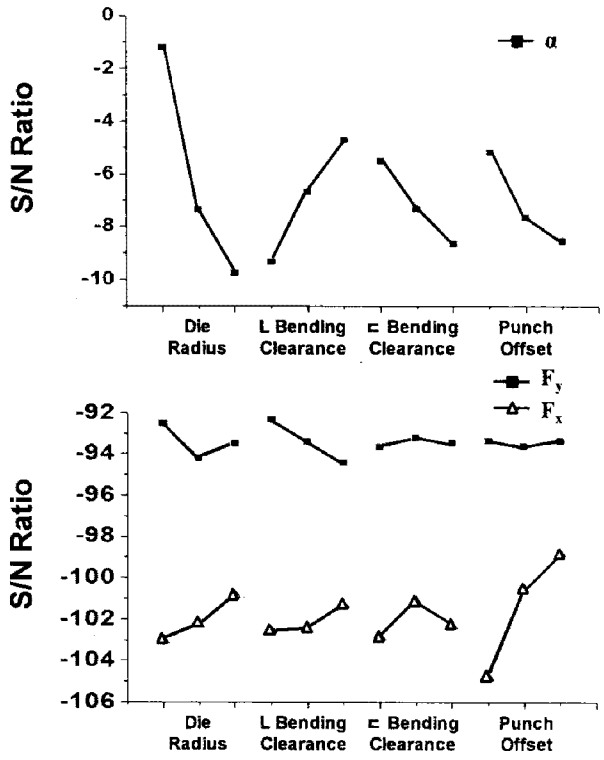


Fig. 6 S/N ratio of modified punch shape

Fig 6의 S/N 분석을 통해 형상 정밀도가 가장 높은 최적 공정 조건은 R_D =0.03mm, CL1 = 0.09mm, CL2 = 0.03mm, O=0mm 임을 예측할 수 있다. 이에 대하여 해석을 수행한 결과는 Fig. 5(d) 로 성형 후 스프링백이 일어남에도 불구하고 α=0.05°, recoil=0.028mm 인 것을 유한 요소 해석을 통해 확인할 수 있다. 이 때, 성형 하중은 F_x= -211kN, F_y= 72.9kN 이다.

실제 성형 공정에서 사용하는 다이 금형인 STD11의 Endurance Stress, S_e는 680MPa이다[5]. 성형 하중이 작용하는 부분을 다이와 소재가 접촉하는 부분이라 하고, 다이의 변형, R값에 의한 영향, 전단응력을 무시하면, σ_x=-87.9MPa, σ_y=2.6MPa 이다. 이는 S_e의 1/7 수준으로 다이에 영향이 없다고 할 수 있다. 하지만 실제 다이는 탄성 및 소성 변형의 가능성, R값에 의한 응력 집중 현상 등이 존재하므로, 다이의 수명 및 파단의 가능성에 대해서는 다이에 대한 변형을 고려한 상세한 예측이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 용융탄산염 연료전지의 금속분리판 중 하나인 센터플레이트의 굽힘 공정에 대하여, 다구찌 기법중의 하나인 직교배열법을 통한 유한요소법으로 효율적인 요인분석을 실행하고 최적 성형조건을 찾아냈다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

(1) 다구찌 기법의 직교 배열법을 통해 적절한 변수를 설정하여 성형에 영향을 미치는 주요 변수로 R_D, CL_1, CL_2, O 를 설정하였다.

(2) 스텝이 있는 펀치를 사용한 경우 일반 플랫 펀치에 비해 α는 71%, recoil은 87% 감소하였다. 하지만 성형 하중은 X방향에 대해 188kN 증가하였다.

(3) 4가지 공정 변수에 대하여 S/N Ratio를 통한 분석 결과 형상에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 R_D이고, 성형 하중에서는 O이다. 또한 O에 의한 성형 하중의 편차가 급격하기 때문에 이에 대한 정밀한 제어가 필요하다.

(4) R_D =0.03mm, CL1 = 0.09mm, CL2 = 0.03mm, O=0mm 조건에서 α=0.05°, recoil=0.028mm 로 정밀한 치수 정밀도를 확보할 수 있다. 또한 성형 하중은 F_x= -211kN, F_y= 72.9kN로 이에 대한 다이의 수명 및 파단을 예측하기 위해서는 다이의 변형을 고려한 예측이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] Ryan O'Hayre, 2006, Fuel Cell fundamentals, Wiley

[2] Fuel Cell Energy, Inc., Bipolar separator plate with improved wet seals, US Patent 6,372,374

[3] C. Yuh, 2006, Carbonate Fuel Cell Materials, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol 15(4), pp. 457~462

[4] 김낙수, 김형종, 2002, 소성가공과 해석, 문운당,

[5] the Society of Materials Science(Japan), 1996, "Data book on fatigue strength of metallic materials"