

곡률을 가진 쉴드슬롯판의 편평도 향상 연구

우동욱*, 이상욱#

A Study on the Enhancement of Flatness for the Shield Slot Plate with Curvature

Dong-Uk Woo*, Sang-Wook Lee#

ABSTRACT

The focus of this study is placed on the enhancement of flatness for the shielded slot plate, one of main components of the MCFC stack. The shielded slot plate is to get curvature during manufacturing process since it is produced by forming operation from only one side of it. Therefore, a correction die is proposed to place just after the main die to apply unbending on the curved plate to get almost flat product. In the design for the correction die, four kinds of design factors are selected to study which factor is the most influencing one affecting the flatness of the plate. From the experimental results using Taguchi method, it has been revealed that the Young's modulus of urethane die is the most critical factor.

Key Words : Shield Slot Plate with Curvature(곡률을 가진 판재), Taguchi Method(다구치법), Flatness(편평도), MCFC(연료전지)

1. 서 론

용융탄산염 연료 전지(MCFC; Molten Carbonate Fuel Cell)는 무공해 발전이 가능한 시스템으로 친환경적 발전 장치로 부각되어 상용화를 목표로 개발 중에 있으며, 단위전지를 적층하여 스택을 구성한다.^[1] 단위전지는 크게 세 부분, 즉 전극부, 매트릭스부 및 분리판부로 구성되어 있다. Fig. 1은 분리판의 전개도를 보여주고 있다. 분리판부의 구성 요소 중에서 쉴드슬롯판(Shielded Slot Plate)에는 가스의 흐름을 원

활하게 할 목적으로 Fig. 2와 같이 브릿지 형상의 미세 구조물을 프레스 가공법으로 성형시키는데, 이 때 한 쪽 방향으로만 성형시키기 때문에 쉴드슬롯판이 완만한 곡률을 가지게 된다. 이 때 발생한 곡률은 다음 공정인 레이저 용접시 확실한 고정을 방해하는 문제점을 야기하고 있다. 이는 차후 대량생산시 문제점이 될 수 있기 때문에 쉴드슬롯판의 편평도를 향상시키기 위한 연구가 필요하다.

판재의 편평도 향상에 관한 지금까지의 연구 성과를 살펴보면 남경오 등^[3]이 롤러의 중심축을 서로 엇갈리게 배치하여 가공하는 교차압연 해석을 통해 편평도를 향상시키기 위한 방안을 제시하였고, 이영선 등^[4]은 물성이 다른 3종류의 판재로부터 탄성회복량에 대한 예측정밀도를 향상시키고자 하는 연구를 하

* 순천향대학교 대학원 기계공학과

교신저자 : 순천향대학교 기계공학과

E-mail : swlee@sch.ac.kr

여 판재 성형 공정을 향상시켰다. 또 안인혁 등^[5]은 선형다이 성형 및 스프링백 모사에 대해 해석을 수행하여 수치 인자들의 영향도를 연구하였고, 김윤태^[6]는 스프링백에 관여하는 공정 파라미터를 선정하고 해석을 수행하여 공정 파라미터들의 스프링백 발생에 대한 기여도를 연구하였다.

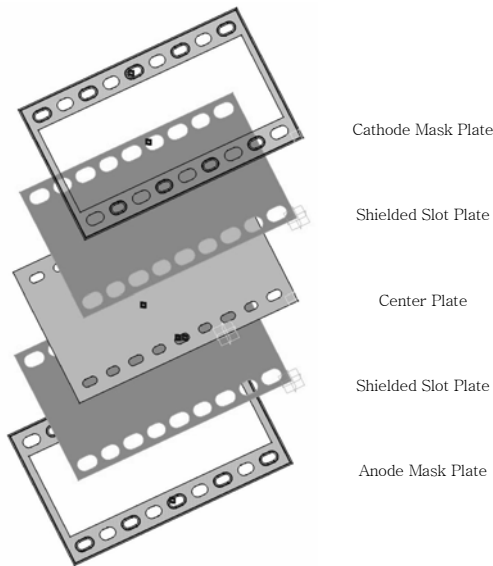


Fig. 1 Exploded view of MCFC separator

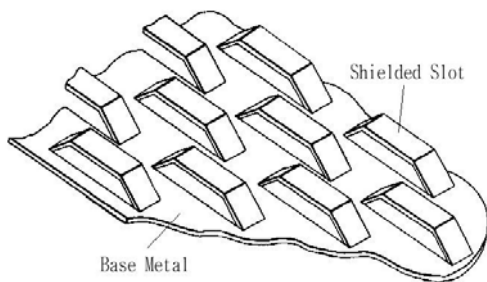


Fig. 2 Shielded slots on the base metal

본 논문에서는 쉴드슬롯판의 편평도를 향상시키기 위해 역굽힘 다이를 성형용 다이 뒤쪽에 설치하는 방법을 채택하였다. 이 때 곡률을 가진 쉴드슬롯 원판의 편평도 향상에 영향을 주는 인자를 선정하고 다구치법의 적용을 통해 편평도 향상에 가장 영향력 있는 인자를 찾아내었다.

2. 실험 준비

쉴드슬롯판은 일정한 형상을 가진 상판과 하판에 의해 프레스 가공으로 성형되어진다. 쉴드슬롯 원판은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 실선화살표 방향으로 진행하여 성형되지만, 하판이 펀치 역할을 하여 성형이 진행 될수록 점선화살표 방향처럼 하판을 감싸는 듯한 곡률을 가지게 된다.^[7] 성형된 쉴드슬롯판이 갖는 등가물성치에 대해서는 참고문헌 [8]을 참고할 수 있다.

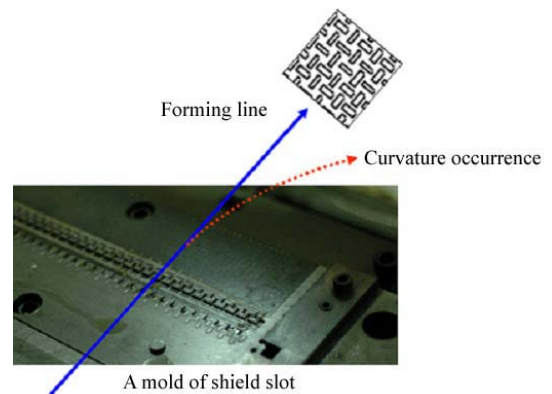


Fig. 3 Forming process of the shield slot plate

곡률을 가진 쉴드슬롯 원판의 크기는 1400mm×800mm×1.7mm (L×W×t)로 매우 커서 편평도 향상 실험을 실험실 내에서 직접 수행 할 수가 없기에 60 mm 폭을 가진 띠 형태로 레이저 절단하였다. 비록 띠 형태로 절단되었다 하더라도, 그 폭이 두께에 비해 매우 크므로 원판에서와 마찬가지로 평면변형(plane strain) 조건이 그대로 유지된다고 간주할 수 있다. 쉴드슬롯 원판에는 쉴드슬롯을 등간격으로 일정하게 진행시킬 수 있도록 판재의 양 끝에 9mm 간격으로 과일롯 홀이 가공되어 있다. 이를 실험에 그대로 반영하기 위하여 1클릭에 9 mm 씩 쉴드슬롯 띠가 진행할 수 있도록 하는 피더(feeder)를 설계, 제작하였다. Fig. 4는 쉴드슬롯 원판으로부터 채취한 쉴드슬롯판과 프레스공정에서 등간격으로 성형하기위해 가공된 과일롯 홀을 보여주고 있다.

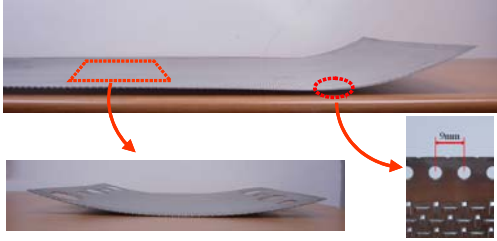


Fig. 4 A small size plate cut off from the original size plate

Fig. 5는 실제 제작된 피더와 각 부의 명칭을 보여주고 있다. 피더는 크게 몸체부와 롤러부로 구성된다. 몸체부는 시편의 폭을 고려하여 설계되어 시편이 롤러 사이에 수평으로 진입할 수 있게 한다. 롤러부는 탄성과 마찰력이 우수한 우레탄으로 코팅된 롤러와 롤러의 축을 눌러 주도록 설계된 스프링으로 구성되어 있어서 미끄럼 없이 시편을 피딩시킬 수 있도록 되어있다. 노브(knob)에는 볼 플런저가 설치되어 있어서 시편이 정확하게 1피치(9 mm)씩 진행될 수 있도록 하였다.

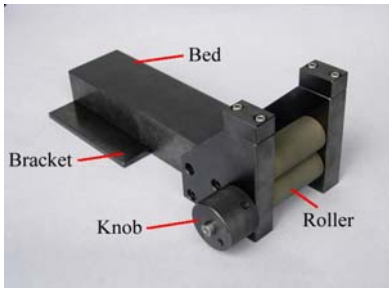


Fig. 5 Feeder for the experiment

역급힘을 가하기 위한 둥근 펀치와 우레탄 다이를 Fig. 6에 보였다. 이때 우레탄 다이를 사용한 것은 펀치가 가진 다양한 크기의 곡률 반경에 대응할 수 있을 뿐 아니라, 펀치의 가압 깊이에 따라 유연하게 대응하는 장점을 가지고 있기 때문이다.

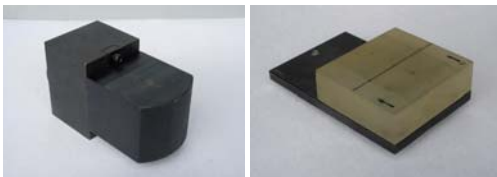


Fig. 6 Round punch and urethane die

3. 공정 인자의 선정

실험계획법(Design of experiment)은 실험 결과에 영향을 미치는 요인들을 조사하기 위하여 실험의 배치와 실시, 그리고 얻어진 데이터를 통계적 방법으로 분석하여 최소한의 노력과 비용으로 최대의 정보, 즉 최적 실험조건을 찾아내는 기법이다.^[9]

실험계획법 중 하나인 다구치 기법은 일본의 다구치(Taguchi)가 구현한 제품 최적화 기법으로, 실험 계획서를 작성하여 안정적이고 신뢰성이 높은 인자들의 조합을 찾아 최소한의 실험만으로 원하는 결과 값을 도출할 수 있다는 장점이 있다.^[10] 다구치 기법에서 소개된 직교배열표는 각 열이 직교가 되게 만들어 놓은 표로서 어떤 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 같은 횡수씩 나타나도록 구성되어 있다. 인자가 많을 경우 일반 요인배치법으로는 모든 실험을 할 수 없기 때문에 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 만들어진 표이다.

본 논문에서는 교호작용이 없는 3수준계의 직교배열표 중 $L_9(3^4)$ 형 직교배열표를 사용하였다. 편평도 향상에 영향을 미치는 여러 가지 요인들 중 실제 작업장에서 조절이 가능한 인자들을 우선순위로 하여 4가지 인자(Factor)를 3수준(Level)으로 선정하였다. Table 1은 인자와 그에 따른 수준을 나타낸다. 각 인자별 수준 선정에 대해서는 다음에 자세히 기술 하였다.

Table 1 Factors and levels used in the experiment

Factors	Unit	Levels		
		1	2	3
A. Radius of Punch (r)	mm	60	140	950
B. Young's modulus of Urethane Die (E)	MPa	11.37	18.03	44.50
C. Forming Depth (δ)	mm	1.0	1.5	2.0
D. Feeding Dist. (f)	mm	9	18	27

펀치의 곡률 반경 (r)

둥근 펀치의 곡률 반경은 예비실험의 경험을 바탕으로 설정된 곡률 반경 140 mm를 기준으로 호의 길

이 $S=40$ mm로 부터 $1/2S$, $2S$ 를 각각 적용한 후 계산된 다음의 수준으로 선정하였다.

$$r_1=60 \text{ mm}, r_2=140 \text{ mm}, r_3=950 \text{ mm}$$

Fig. 7은 각각의 둥근 펀치의 형상을 보여주고 있다.



Fig. 7 Three kinds of round punches

이 때 S 는 식 (1)과 같이 유도되며 여기서 δ 는 성형 깊이를 나타낸다. (Fig. 8 참조)

$$S = 2r \cos^{-1} \left(\frac{r - \delta}{r} \right) \quad (1)$$

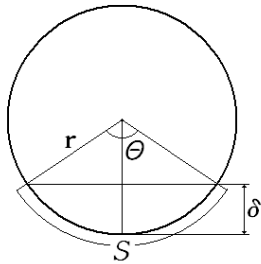


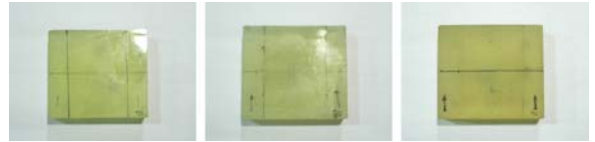
Fig. 8 Sector of circle

우레탄 다이의 영률 (E)

다이의 재질은 시중에서 가장 보편적으로 쓰이는 경도 90을 가진 우레탄과 그보다 연한 재질을 가지는 경도 70, 80의 우레탄을 선정하고, 압축시험을 통해 각각의 우레탄 다이의 영률 E_1 , E_2 , E_3 을 다음과 같이 구하였다.

$$E_1=11.37 \text{ MPa}, E_2=18.03 \text{ MPa}, E_3=44.50 \text{ MPa}$$

Fig. 9는 각각의 우레탄 다이를 보여주고 있다.



(a) (b) (c)

Fig. 9 Three kinds of urethane dies : hardness is (a) 70, (b) 80 and (c) 90

압축시험 시 시편의 크기는 ASTM 규격에 있는 봉재 압축시험편(ASTM E-9)의 중주시험편 규격을 원용하였다.^[11]

성형 깊이 (δ)

성형 깊이는 예비 실험에서 나온 데이터를 통해 구해진 1.5 mm를 기준으로 0.5 mm만큼 알고, 깊이는 1.0 mm와 2.0 mm의 세 가지 수준으로 선정하였다.

$$\delta_1=1.0 \text{ mm}, \delta_2=1.5 \text{ mm}, \delta_3=2.0 \text{ mm}$$

Fig. 10은 펀치와 다이에 의해 성형되어지는 성형 깊이(δ)를 보여준다.

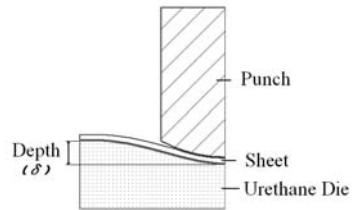


Fig. 10 Schematic drawing for the forming depth

피딩 길이 (f)

피딩 길이는 쉘드슬롯 피가 진행되는 길이로서 쉘드슬롯 원판의 파일럿 홀의 간격과 같은 9 mm를 1 피치로 하여 인자를 다음과 같이 선정하였다.

$$f_1=9 \text{ mm}, f_2=18 \text{ mm}, f_3=27 \text{ mm}$$

Fig. 11은 둥근 펀치와 우레탄 다이, 피더를 만능시험기에 장착하고, 편평도 향상 실험을 하는 모습을 보여준다.

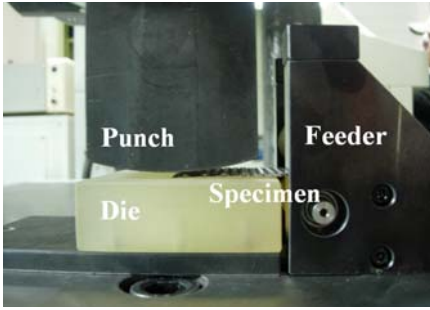


Fig. 11 Test set-up for the experiment

4. 분석 결과 및 고찰

실험은 임의의 순서로 9회 실시하였다. 시편은 폭 60mm, 길이 260mm이며 시편의 초기 곡률 반경은 520mm이다. Fig. 12는 시편 9번의 편평도 향상 실험의 전, 후 모습을 보여준다.

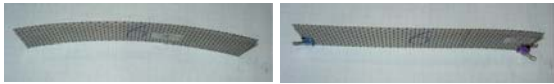


Fig. 12 Comparison of flatness before and after experiment (case 9)

결과 값은 편평도 실험 후에 나타난 곡률 반경의 역수, 즉 곡률이며 0에 가까울수록 편평하다고 할 수 있다. 단, 실험 후 편평함을 지나쳐서 반대 방향으로 굽힘이 발생한 실험의 결과 값은 음수로 표현하였다.

Table 2 Orthogonal array table of $L_9(3^4)$ and results of the experiment

CaseNo.	Factors				Data
	A(r)	B(E)	C(δ)	D(f)	($1/\rho \times 10^3$)
1	60	11.37	1.0	9	1.507727
2	60	18.03	1.5	18	0.452567
3	60	44.50	2.0	27	-2.385723
4	140	11.37	1.5	27	1.410020
5	140	18.03	2.0	9	1.769724
6	140	44.50	1.0	18	-1.971414
7	950	11.37	2.0	18	-0.214762
8	950	18.03	1.0	27	0.998442
9	950	44.50	1.5	9	-0.246216

Table 2는 3수준계의 $L_9(3^4)$ 형 직교배열표에 의해 적용된 각 인자와 수준을 나타내며, 편평도 향상 실험에 따른 결과 값을 보여준다.

Fig. 13에 각 인자의 각 수준별에 따른 평균값의 변화를 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 편치의 곡률 반경은 수준별 차이가 가장 작게 나타났다. 반면에 우레탄 다이는 수준에 따라 차이가 가장 크게 나타나는 것으로 나타났다. 따라서 각 인자별 편평도 향상에 대한 민감도를 평가해 보면 우레탄 다이의 영률이 가장 민감도가 크고, 편치의 곡률 반경이 가장 민감도가 작은 것을 알 수 있다. 편치의 곡률반경의 민감도가 가장 작게 나온 것은 성형 깊이가 얇기 때문인 것으로 판단된다.

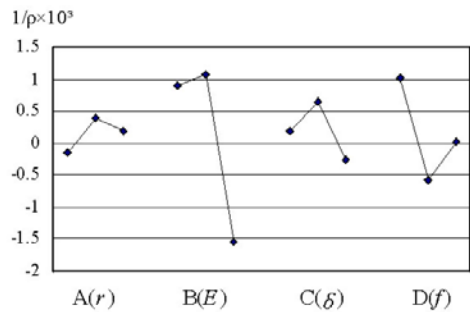


Fig. 13 Result of average analysis

민감도가 가장 작게 나타난 편치의 곡률 반경 인자를 오차향으로 풀링(Pooling)시켜 분산분석을 실시하였다. Table 3은 분산분석의 결과를 보여주고 있다.

Table 3 Result of analysis of variance (ANOVA)

Factor	Sum of Squares	DOF	Mean Square	F	Sig.
Model	17.637	6	2.939	13.074	0.073
B(E)	12.763	2	6.381	28.382	0.034
C(δ)	1.003	2	0.501	2.231	0.309
D(f)	3.871	2	1.936	8.610	0.104
Error	0.450	2	0.225		
Total	18.086	8			

분석 결과 전체 모델이 전체 변동분의 97.52 %를 설명하는 것으로 나타남으로서 모델이 매우 잘 설계되었음을 알 수 있다.

또한 우레탄 다이의 영률 > 피딩 길이 > 성형 깊이 > 편치의 곡률 반경 순으로 편평도 향상에 영향을 미치게 되며, 이 중 우레탄 다이의 영률이 유의수준 0.1에서 의미를 갖는 가장 큰 영향력을 가진 인자임을 알 수 있었다.

5. 결 론

쉘드슬롯판이 성형 직후 곡률을 가지는 것은 한쪽 방향으로만 성형이 이루어지는 특성이 반영된 결과이다. 이 곡률은 금형의 정밀도를 높이는 등의 여러 방법으로 줄일 수는 있지만 완전히 없애지는 못한다. 곡률을 제거하기 위한 방법으로 역굽힘 다이를 성형 다이 뒤쪽에 설치하여 역굽힘을 추가로 가하는 방법을 채택하였다. 편평도 향상에 영향을 주는 인자들 중 조정 가능한 인자 즉, 편치의 곡률 반경, 우레탄 다이의 영률, 성형 깊이, 피딩 길이를 선정하여 다구치 분석을 실시하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실험데이터를 산출 후 분산분석 결과 우레탄 다이의 영률 > 피딩 길이 > 성형 깊이 > 편치의 곡률 반경 순으로 쉘드슬롯판의 편평도 향상에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
2. 우레탄 다이의 영률이 유의수준 0.1에서 의미를 갖는 가장 큰 영향력을 가진 인자임을 알 수 있었다.
3. 편치의 곡률 반경은 영향도가 가장 작게 나타났는데 이는 성형 깊이가 얇기 때문인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 포항산업과학연구원(RIST)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

또한 실험을 진행하는데 크게 도움을 준 김정현님, 김지영님께도 감사드립니다.

참고 문헌

1. 심언태, 우동욱, 이경수, 김지영, 곡률을 가진 판재의 편평도향상을 위한 연구, 순천향대학교, 학사학위 논문, 2005.
2. 이상욱, 심언태, 이경수, 우동욱, 김정현, 미세 구조물이 성형된 쉘드슬롯판의 자중 처짐 해석, 산학기술학회 출간중, 2006.
3. 남경오, 서기석, 노병래, 홍성인, 판재의 편평도 향상을 위한 교차압연에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제14권 제1호, pp. 43-48, 2005.
4. 이영선, 김민철, 권용남, 이정환, 판재 성형품의 탄성회복예측 정밀도 향상을 위한 실험 및 해석, 한국소성가공학회지, 제13권 제6호, pp. 490-496, 2004.
5. 안인혁, 안병찬, 권성오, 최오영, 후공정 및 스프링백에 대한 수치 인자들의 영향도 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, p. 342, 2005.
6. 김윤태, 박판 플랜지 성형에서의 편평도 향상에 관한 연구, 순천향대학교, 석사학위 논문, 2004.
7. 분리판 고온변형 해석 및 강성조절 기술 개발(중간보고서, 1차년도), 포항산업과학연구원, 2005.
8. 심언태, 이상욱, 이경수, 우동욱, 김지영, 김정현, 연료전지용 쉘드슬롯판의 자중처짐해석, 한국소성가공학회 추계학술대회논문집, pp. 472-475, 2005.
9. 박동규, 최신 실험 계획법, 기전연구사, 1999.
10. 이상복, 알기쉬운 다구찌기법, 상조사, 1990.
11. 이창희, 지무성, 최신재료실험법, 선학출판사, 2004.