

## 중공 박판의 기계적 프레스 결합에 관한 해석

이세정<sup>1</sup>, 김민웅<sup>2</sup>, 이재원<sup>3</sup>, 이상욱<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 기계공학과, <sup>2</sup>(주)에이스테크놀로지, <sup>3</sup>(주)성안기계, <sup>4</sup>순천향대학교 기계공학과

### Numerical Analysis on the Mechanical Press Joining for the Sheet Metal with a Circular Hole

Se-Jung Lee<sup>1</sup>, Min-Woong Kim<sup>2</sup>, Jae-Won Lee<sup>3</sup> and Sang-Wook Lee<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mech. Eng., Hanyang Univ., <sup>2</sup>RF R&D Center, Acetechnologies Co.,

<sup>3</sup>R&D Center, Sung An Machinery Co., <sup>4</sup>Dept. of Mech. Eng., Soonchunyang Univ.

**요 약** 본 논문은 중공을 가진 판재 두 매를 결합하기 위하여 중공 주위를 따라 기존 레이저 용접법 대신 기계적 프레스 결합법을 적용하는 것에 관한 연구이다. 이를 통해 레이저 용접을 적용했을 때 불가피하게 발생하는 열 변형을 효과적으로 없앨 수 있다. 유한요소해석을 통하여 중공형 판재를 기계적으로 결합시킬 수 있는 금형 설계 방법을 제안하였다. 기계적 결합력을 최대화시키는 데 관련 있는 다섯 가지 설계인자를 선택하여 다꾸치 실험법을 적용한 결과 성형 깊이와 펀치모서리 반경이 가장 크게 영향을 미치는 인자로 나타났다.

**Abstract** This study is to apply the mechanical press joining method to join two kinds of sheet metals with circular holes by mechanical pressing instead of laser beam. Usage of the mechanical pressing avoids the thermal deformation of sheet metals which occurs inevitably in laser joining. A die design has been proposed to make the mechanical press joining applicable with finite element analysis. Five design factors related to the joining force have been selected and applied to the Taguchi method for optimization. Among five factors, 'Forming Depth' and 'Punch Corner Radius' have been revealed to be the most influential ones.

**Key Words** : Mechanical Press Joining, Taguchi Method, MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)

### 1. 서론

차세대 에너지원으로 각광받고 있는 용융탄산염 연료 전지 (MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell)의 주요 부품 중 하나인 스테인리스 분리판의 전개도를 그림 1에 보았다[1]. 현재 분리판 구성품 간의 결합에는 레이저용접이 사용되고 있다. 레이저용접은 겹쳐진 박판의 일부에 레이저 빔을 조사하여 재료표면의 온도를 급격히 상승시켜 표면을 용융시킴으로써 가공이 이루어지는 방법으로 열과 이에 따른 열 변형이 동반된다.

이와는 다르게 부가적인 열원을 필요로 하지 않는 기계적 결합이 있다. 기계적 결합에는 나사, 리벳, 볼트 등 부가적인 재료를 이용하여 결합하는 방법과, 결합될 소재를 소성 변형시켜 기하학적 구속을 발생시키는 방법이

있다[2-4]. 본 논문에서 기계적 프레스 결합이라는 용어는 후자와 관련되어 있다.

분리판은 여러 층으로 적층되어 사용되기 때문에 무엇보다 각 분리판의 편평도가 매우 중요하다. 레이저용접에 의한 결합은 원치 않게 열 변형이 동반되므로 편평도를 떨어뜨리는 요인이 된다. 이를 근본적으로 해결하기 위한 방법으로 기계적 프레스 결합법을 사용하여 분리판의 구성품을 결합하는 방법을 본 연구에서 제안하고자 한다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 분리판에는 많은 구멍이 존재한다. 구멍 주위에 프레스 결합을 적용하기 위하여 본 연구에서는 구멍을 가진 박판에서 구멍 주위를 따라 선 형태의 프레스 결합을 만들어내는 방법의 연구에 초점을 맞추고자 한다. 또한 기계적 프레스 결합의 결합력을 최대화하기 위한 금형 설계 인자를 파악하기 위하여 다꾸

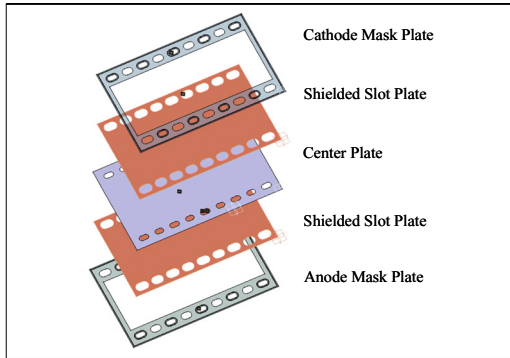
\*교신저자 : 이상욱(swlee@sch.ac.kr)

접수일 09년 03월 11일

수정일 09년 07월 06일

게재확정일 09년 07월 22일

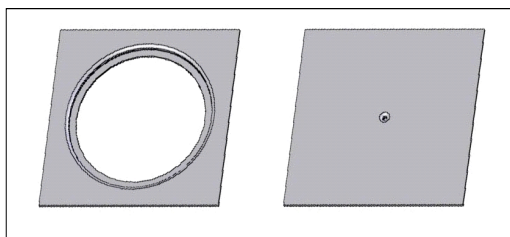
찌 실험법을 통해 영향 있는 주요 인자들 중 가장 큰 영향을 주는 설계인자를 선정하고자 한다.



[그림 1] MCFC용 분리판의 전개도

## 2. 본론

기존의 기계적 프레스 결합 방식은 모두 점 형태의 한 가지 모양에 국한되고 있다. 그림 2의 오른쪽이 그러한 공정의 전형적인 형태인 TOX 결합[5]을 보여주고 있다. 점 형태의 결합법으로는 중공 박판을 연속적으로 결합할 수 없으므로 그림 2의 왼쪽에 보인 바처럼 중공 부분의 외곽을 따라서 기계적 프레스 결합을 실시하고자 한다. 이를 통해 연료전지 분리판에 대해 새로운 기계적 결합 방법을 제안하고자 하는 것이다.

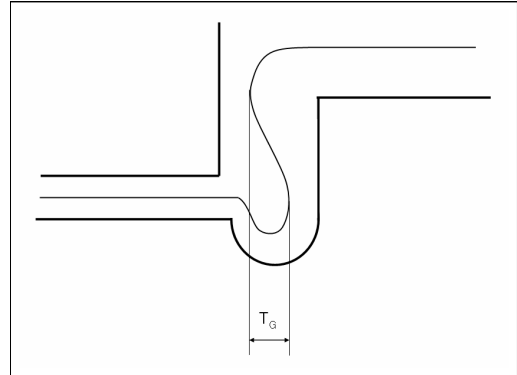


[그림 2] 중공 프레스 결합(좌)과 TOX 결합의 비교

두 개의 박판이 소성변형을 통해 서로 결합하는 원리는 그림 3에 보였다. 두 개의 박판을 겹친 후 펀치로 밀어 다이의 끝 부분에 위치한 오목한 부분에 재료를 밀어 넣으면 자연스럽게 두 개의 재료가 서로 중첩되는 부분( $T_G$ )이 나타난다. 이  $T_G$ 가 클수록 결합력이 강하다.

본 연구에서 정한 설계목표는 첫째, 중공-진원형 결합, 둘째, 실용 가능한 성형하중, 셋째, 일정 수준 이상의 결합력 등이다.

이러한 목표를 달성하기 위해 기계적 프레스 결합공정과 관련된 적절한 설계인자를 다수 선정하여 다구찌 실험법과 유한요소해석을 통해 최적의 설계안을 제시하고자 한다.



[그림 3] 소성변형으로 두 판재가 결합되는 원리와 그 결합력을 결정하는 파라미터인  $T_G$

### 2.1 특성 파라미터 선정

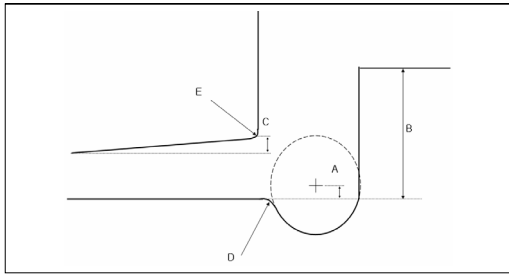
기계적 결합 공정에서 요구되는 가장 중요한 평가특성은 결합강도로서 여기에 직접적으로 영향을 주는 인자는 기하학적 구속의 크기이다. 따라서 기계적 프레스 결합공정의 특성 파라미터로서 그림 3의 상판과 하판이 중첩된 기하학적 구속의 크기 ( $T_G$ )를 선택하였다.

### 2.2 설계인자의 선정 및 직교 배열

#### 2.2.1 설계인자의 선정

기계적 프레스 결합 공정에서 설계인자로 고려될 수 있는 것들은 크게 금형설계 치수와 성형공정 조건으로 나눌 수 있다. 금형설계 시 설계인자로 생각할 수 있는 것은 다이 오목부의 깊이, 다이와 펀치의 폭 및 코너 반경, 펀치의 경사각, 결합되어 접합하는 부분의 길이, 성형 깊이 등이 있으며 성형조건에 대한 설계변수로는 펀치의 압하량, 분리판 사이의 마찰계수 등을 들 수 있다.[6-8] 그러나 앞에서 거론된 설계인자 모두를 고려하는 것은 비효율적이다. 따라서 결합강도에 밀접한 영향을 주는 인자를 선별하는 것이 중요하다.

선정된 인자를 그림 4에 표시하였다. 또한 각 인자별 수준을 표 1에 나타내었다. 인자별 각 수준은 예비 해석을 통해서 실제 성형이 가능한 범위를 찾아낸 후 이를 통해 선정되었다.



[그림 4] 다섯 가지 설계 인자의 위치

[표 1] 다섯 가지 설계 인자의 명칭과 그 수준

인자		수준 (mm)		
		1	2	3
A	오목부 중심 옵셋거리	0.1	0.12	0.14
B	성형 깊이	1.7	1.8	1.9
C	펀치 바닥부 경사각	0.2	0.3	0.4
D	다이부 반경	0.22	0.25	0.28
E	펀치 모서리 반경	0.2	0.3	0.4

각 인자별 의미는 다음과 같다.

- 1) 오목부 중심 옵셋거리 (A): 결합형상의 완만함을 결정함.
- 2) 성형 깊이 (B): 기하학적 형상을 최종 결정하는 데 기여함.
- 3) 펀치 바닥부 경사각 (C): 성형 중 중공형 방향으로 재료의 유동을 조절하는 역할을 함.
- 4) 다이부 반경 (D): 오목부 부분에서 원활한 형상이 나올 수 있도록 함.
- 5) 펀치 모서리 반경 (E): 위쪽 판재의 접촉면에서 원활한 형상이 나올 수 있도록 함.

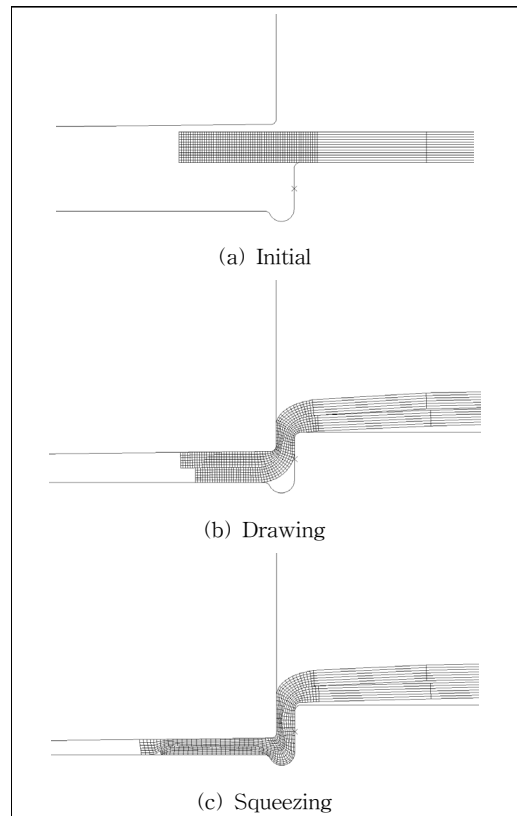
### 2.2.2 직교 배열표

선정된 다섯 가지 인자를 직교 배열표  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 에 배치하여 18가지 설계 조합을 설정하였다.  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  직교 배열표는 2수준을 가지는 1개의 변수와 3수준을 가지는 7개의 변수들을 18가지 경우의 직교배열로 조합한 것을 의미한다[9-11].

각 인자별 수준에 따른 평가 특성치를 구하고 요인에 대한 효과분석을 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 위한 판재의 물성치 조건은 표 2와 같다.

[표 2] 판재의 물성치 및 공정 변수값

응력-변형률 식	$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$ $K = 1,216 \text{ MPa}$ $\epsilon_0 = 0.03926$ $n = 0.5138$
영율	182,168.3 MPa
프와송비	0.3
마찰계수	0.15
펀치 속도	1.0 m/s
다이/펀치 모델	강체 (rigid body)



[그림 5] 해석 결과의 예 (좌측 기준 축대칭 모델)

그림 5는 유한요소해석의 한 가지 결과를 보여주고 있다. 판재는 축대칭 요소를 사용하였고, 다이 및 펀치는 요소가 필요없는 강체로 모델링하였다. 전체 요소 수는 744개, 절점 수는 819개이다. 하부 다이가 고정된 가운데 상부 펀치를 성형이 완료되는 깊이까지 진입시키는 방법으로 해석을 수행하였다. 그림 5에서 (a)는 펀치와 다이 사이에 판재가 놓여 있는 상태이다. (b)는 펀치의 하강력에

의해 판재에 변형이 이루어지고 있는 상태이다. (c)는 두 판재가 다이 오목부 사이에 충분히 들어가 판재 간의 결합이 이루어진 상태이다.

직교 배열표의 18가지 조합에 대하여 해석된 기하학적 구속의 크기를 표 3에 나타내었다.

[표 3] 18가지 조합에 따른 기하학적 구속의 크기

No.	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	구속의 크기 (mm)
1	0.10	1.7	0.42	0.22	0.2	0.11800
2	0.10	1.8	0.64	0.25	0.3	0.09968
3	0.10	1.9	0.85	0.28	0.4	0.12582
4	0.12	1.7	0.42	0.25	0.3	0.08733
5	0.12	1.8	0.64	0.28	0.4	0.08412
6	0.12	1.9	0.85	0.22	0.2	0.13359
7	0.14	1.7	0.64	0.22	0.4	0.09351
8	0.14	1.8	0.85	0.25	0.2	0.11272
9	0.14	1.9	0.42	0.28	0.3	0.11683
10	0.10	1.7	0.85	0.28	0.3	0.09004
11	0.10	1.8	0.42	0.22	0.4	0.10254
12	0.10	1.9	0.64	0.25	0.2	0.12604
13	0.12	1.7	0.64	0.28	0.2	0.13043
14	0.12	1.8	0.85	0.22	0.3	0.10554
15	0.12	1.9	0.42	0.25	0.4	0.10710
16	0.14	1.7	0.85	0.25	0.4	0.07695
17	0.14	1.8	0.42	0.28	0.2	0.09445
18	0.14	1.9	0.64	0.22	0.3	0.10838
평균 ( $\bar{T}$ )						0.10629

18가지 경우에 대하여 기하학적 구속 값을 결정할 때 편치력의 최대치를 2,200 kN으로 제한하였다. 이는 실제 적용 가능한 범위 내에서 기계적 프레스 결합을 달성하는 것이 매우 중요하다고 판단하였기 때문이다.

### 2.3 분산분석

교호작용 (인자 간 간섭효과)이 없는  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 형 직교 배열표의 각 요인과 유한요소해석 후 얻은 결과값 (표 3)을 반영하여 영향도가 가장 큰 인자를 알아보기 위하여 SPSS를 이용한 분산분석을 실시하였다. 분산분석의 결과를 표 4에 나타내었다.

분산분석을 통하여 기하학적 구속의 크기는 성형 깊이 (B) > 편치 모서리 반경(E) > 오목부 중심 읍셋거리(A) > 다이부 반경(D) > 편치 바닥부 경사각(C)의 순서로 영

향을 받는다는 것을 확인하였다.

특히 성형 깊이 (B)와 편치 모서리 반경 (E)은 상대적으로 결합력에 매우 큰 영향을 주는 인자임을 표 4에서 알 수 있다.

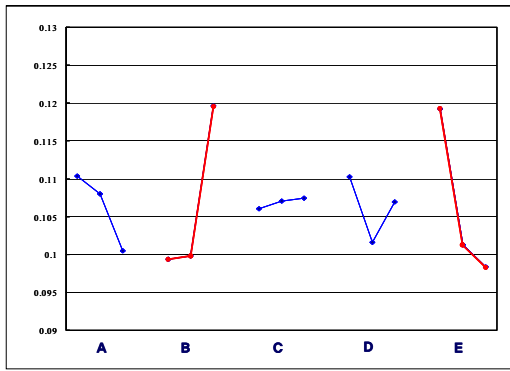
[표 4] 분산분석 결과

소스	제III유형 제공합	자유 도	평균 제공	F	유의확률
수정 모형	0.004	10	0.000	2.552	0.113
절편	0.203	1	0.203	1397.203	0.000
A	0.000	2	0.000	1.099	0.384
B	0.002	2	0.001	5.509	0.037
C	$3.3 \times 10^{-5}$	2	$1.7 \times 10^{-5}$	0.114	0.894
D	0.000	2	0.000	0.780	0.494
E	0.002	2	0.001	5.225	0.040
오차	0.001	7	0.000		
합계	0.208	18			
수정 합계	0.005	17			

### 2.4 평균치 분석

분산분석을 통해 주요 인자로 결정된 설계 인자가 합리적으로 실제 성형공정에 적용될 수 있는지의 여부를 확인하기 위하여 평균치 분석을 통한 확인 실험을 실시하였다. 평균치 분석은 인자들 중 영향도가 가장 큰 요인들만을 고려하여 얻은 추정치로써 합리적인 인자인지를 가능할 수 있는 기준이 된다.

그림 6과 같이 각 인자의 각 수준별 기하학적 구속의 크기에 대한 평균값의 변화를 살펴보면 역시 성형 깊이 (B)와 편치 모서리 반경 (E)이 가장 크게 나타났다. 표 5에 두 인자의 평균치 분석 결과를 자세하게 나타내었다. 표 5에 음영 처리된 조건 즉, 성형 깊이 1.9mm, 편치 모서리 반경이 0.2mm인 경우가 18가지 유한요소해석의 경우에서 6번과 12번에 해당되므로 이로부터 계산되는 평균값과 확인 실험으로부터 계산되는 추정치를 서로 비교해 봄으로써 이들이 합리적 인자인지를 추가로 판단할 수 있다.



[그림 6] 설계 인자의 평균치 변화 (세로축: 기하학적 구속의 크기, mm)

[표 5] 평균치 분석 결과

성형 깊이 (B)	평균	표준오차	95% 신뢰구간	
			하한값	상한값
1.7	0.099	0.005	0.088	0.111
1.8	0.100	0.005	0.088	0.111
1.9	0.120 ( $\bar{B}$ )	0.005	0.108	0.131
펀치 모서리 반경 (E)	평균	표준오차	95% 신뢰구간	
			하한값	상한값
0.2	0.119 ( $\bar{E}$ )	0.005	0.108	0.131
0.3	0.101	0.005	0.090	0.113
0.4	0.098	0.005	0.087	0.001

표 6에 6번, 12번의 평균값과 성형 깊이 (B)와 펀치 모서리 반경 (E) 두 주요 인자에 의한 추정치를 서로 비교하여 나타내었다. 표에서 평균값과 추정치의 크기 차이가 0.0029 mm (평균값 대비 2.2 %)에 불과할 정도로 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 분산분석을 통해 얻은 결합력에 가장 많이 영향을 주는 인자로 선정된 성형 깊이와 펀치 모서리 반경이 설계에 있어서 매우 중요한 인자임을 검증할 수 있었다.

[표 6] 평균값과 확인 실험 추정치와의 비교

구분	Case 6, 12의 평균값	추정치* ( $\hat{\mu}_{opt}$ )	오차
기하학적 구속의 크기 (mm)	0.12982	0.13272	0.0029 (2.2 %)

$$* \hat{\mu}_{opt} = (\bar{B} - \bar{T}) + (\bar{E} - \bar{T}) + \bar{T} \quad [10]$$

### 3. 결론

본 연구로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 중공을 가진 두 개의 판재를 기계적 프레스 결합법으로 결합시키는 방법을 제안하고 그 가능성을 유한요소해석을 통해 확인하였다.
- (2) 제안된 방법은 기존의 점 형태의 결합법과는 다르게 선 형태의 기계적 결합법에 관한 것으로 많은 분야에 응용될 가능성이 크다고 판단된다.
- (3) 제안된 방법을 최적화하기 위해 다섯 가지의 설계 인자를 정하여 다구찌 설계법을 적용하였고 이를 통해 결합력에 가장 큰 영향을 주는 인자로서 성형 깊이와 펀치 모서리 반경 인자를 선정하였다.
- (4) 도출된 결과는 다양한 기계적 선형 결합을 위한 치구 제작과 효과적인 공정설계에 기여할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- [1] 우동욱, 이상욱, “곡물을 가진 쉴드슬롯판의 편평도 향상 연구”, 한국기계가공학회지, 제5권, 제3호, pp. 23-28, 2006.
- [2] 이용복, 정진성, 김태운, 차백순, “Clinch Joining의 접합강도 향상을 위한 최적화에 관한 연구”, 대한기계학회 학술대회논문집, 제2권 제1호, pp. 244-249, 1998.
- [3] V. Hamel, J. M. Roelandt, J. N. Gacel, F. Schmit, “Finite element modeling of clinch forming with automatic remeshing”, Computers and Structures, Vol. 77, pp. 185-200, 2000.
- [4] 정창균, 김태정, 양동열, “중첩된 박판간의 결합을 위한 접착-성형공정”, 한국소성가공학회지, 제13권, 제4호, pp. 342-349, 2004.
- [5] <http://www.tox.co.kr>
- [6] 오구리 후기오, “표준 기계설계도표편람 제5판”, 대광서림, 2005.
- [7] 김세환, “프레스 금형 설계공학”, 대광서림, 2006.
- [8] 유시형, “형설계 핸드북”, 성안당, 2005.
- [9] 이상복, “알기쉬운 다구찌기법”, 창조사, 2000.
- [10] Shin Taguchi, “Daewoo Motor Co. 4-day Robust Design Seminar”, Daewoo Motor Co., 1995.
- [11] G. Taguchi and S. Konishi, “Orthogonal Arrays and Linear Graphs”, ASI Press, 1987.

**이 세 정(Se-Jung Lee)**

[정회원]



- 2007년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학사)
- 2009년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>  
개념설계, 최적설계 등

**이 재 원(Jae-Won Lee)**

[정회원]



- 2007년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 성안기계(주) 부설연구소

<관심분야>  
기계설계 등

**김 민 웅(Min-Woong Kim)**

[정회원]



- 2007년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : (주)에이스 테크놀로지 RF연구소

<관심분야>  
기계설계 등

**이 상 욱(Sang-Wook Lee)**

[정회원]



- 1986년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>  
소성가공, 전산역학, 연료전지 등