

## 실험계획법을 이용한 초소성 성형/확산접합의 공정설계

송재선<sup>1</sup> · 강영길<sup>2</sup> · 홍성석<sup>2</sup> · 권용남<sup>3</sup> · 이정환<sup>3</sup> · 김용환<sup>#</sup>

### Process Design of Superplastic Forming/Diffusion Bonding by Using Design of Experiment

J. S. Song, Y. K. Kang, S. S. Hong, Y. N. Kwon, J. H. Lee, Y. H. Kim

(Received December 27, 2006)

#### Abstract

The superplastic forming/diffusion bonding(SPF/DB) is widely used in the automotive and aerospace industry because it has great advantage to produce complex, light and strong parts. But the superplastic forming process requires much forming time and generates excessive thinning in the thickness distribution of formed part. It is necessary to minimize trial and error for SPF/DB process. Finite element analysis using  $L_{18}$  orthogonal array table of Taguchi method for 3-Sheet D/B process is carried out. Through the study, effect of process parameters, such as D/B region size, thickness and friction coefficient, is evaluated and the optimum condition is derived.

**Key Words:** Superplastic Forming/Diffusion Bonding(SPF/DB), Finite Element Analysis, Design Of Experiment(DOE), Taguchi Method, Orthogonal Array Table

#### 1. 서 론

초소성 성형은 초소성 재료가 가지는 특성(특정 조건에서 800% 이상의 연신율)을 이용하여 소재에 가스압력을 가함으로써 복잡한 형상을 쉽게 제조하는 특수 가공 공정으로 최근 들어 자동차, 항공우주 산업 등에 이용도가 높아 짐에 따라 활발한 연구가 진행되었다[1~2].

또한 초소성 성질과 함께 확산접합(diffusion bonding)의 성질을 이용하여 복잡한 형상의 다층 구조물을 단품일체화 시켜 제조하는 초소성 성형/확산접합의 공정은 기존의 성형방법으로는 한번에 제작이 불가능하던 복잡한 형상의 제품을 하나의 공정으로 쉽게 성형할 수 있어 생산효율의 증대뿐만 아니라 생산비 절감이라는 큰 장점을

가지고 있는 반면 제한된 재료, 낮은 변형률 속도 등의 단점을 가지고 있다[3~4].

초소성 성형을 위하여 최적 변형률 속도를 성형 공정 동안 유지하기 위한 압력-시간 선도의 예측과 최종 부품의 두께분포 예측은 매우 중요한 일이다. 수치해석을 통하여 이러한 압력-시간 선도, 성형 과정, 두께 분포 및 각 부분의 변형 등을 예측 할 수 있으므로 초소성 성형공정에서의 수치해석은 필수적이다[5].

또한 성형에 영향을 미치는 각각의 인자와 인자들간의 상호작용들을 평가하는 것도 중요하며, 인자들의 영향 및 인자들간의 상호작용을 효과적으로 분석하는 방법이 실험계획법이다.

실험계획법은 실험에 대한 계획방법으로 실험 및 데이터를 획득하고 통계적 방법으로 분석하여

1. 충남대학교 대학원, BK21 메카트로닉스사업단

2. 국방과학연구소

3. 한국기계연구원

# 교신저자: 충남대학교, BK21 메카트로닉스사업단,

E-mail: yonghkim@cnu.ac.kr

최소의 실험 횟수로부터 최대의 정보를 얻을 수 있도록 계획하는 것이다[6].

본 연구에서는 초소성 성형/확산접합에 대하여 3-Sheet 의 성형 공정에 실험계획법의 한 방법인 다구찌 법(Taguchi Method)을 적용하였다. 또한 다구찌 법의 직교배열표를 이용하여 효율적인 유한 요소 해석을 수행하였으며 접합부 크기, 소재의 두께, 마찰계수 등의 각 공정변수가 성형에 미치는 영향을 분석하고 최적의 성형조건을 예측하고자 한다.

## 2. 실험계획법

실험계획법은 제품의 다양한 기능성, 높은 품질, 경제적인 가격, 빠른 공급 등 낮은 비용으로 높은 품질의 제품을 생산하기 위하여 제조공정에서 생산시간을 단축시켜 생산원가를 최소화 하고 체계적인 품질관리를 통하여 품질의 안정성과 생산성을 향상시키기 위하여 도입되었다.

실험계획법은 최소의 실험횟수로부터 최대의 정보를 얻는 것 즉, 원하는 정보를 얻기 위하여 어떻게 하면 좋은가를 통계적으로 얻는 방법으로 실험의 횟수를 최소화 하여 시간과 경제적 비용을 줄이는 것이라 할 수 있다.

실험계획법의 대표적인 것으로 일본의 다구찌 겐이찌 박사에 의해 구현되어 기술의 최적화 및 제품의 품질개선 기법으로 사용된 다구찌 법은 설계 단계에서의 품질의 중요성을 강조하여 품질설계를 위한 실용적인 방법론을 제시한 것으로서 낮은 비용으로 높은 품질의 제품을 위한 연구개발 단계에서의 생산성 향상을 위한 공학적인 방법이라고 할 수 있다.

다구찌 법의 하나의 특징은 직교배열표를 이용한다는 것이다. 다루어야 할 많은 인자들의 주효과와 인자들간의 상호작용을 고려하여 실험횟수를 적게 할 수 있도록 실험계획의 인자들을 효율적으로 할당하여 만들어 놓은 표가 직교배열표이다. 직교배열표는 인자가 많은 경우에 실험의 횟수를 적게 하면서도 모든 인자를 포함하여 인자를 쉽게 배치 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 직교배열표를 이용한 실험계획법은 입력변수와 반응변수들간의 관계를 명확히 할 수 있고 반응변수들에 대한 영향을 확인할 수 있으며 중요인자들을 파악하고 효과적인 데이터를 얻을 수 있다.

다구찌 법은 인자의 영향으로부터 품질을 좋게 유지하기 위하여 SN 비(signal-to-noise ratio)를 사용하고, SN 비는 신호 대 잡음의 비율을 의미하며, 망목특성(nominal-the-best characteristics), 망소특성(smaller-the-best characteristics), 망대특성(larger-the-best characteristics)의 세가지로 분류된다.

- i) 망목특성: 특정한 목표치가 주어진 경우

$$SN = 10 \log \left( \frac{\bar{y}}{\sigma} \right) \quad (1)$$

- ii) 망소특성: 특성치가 작을수록 좋은 경우

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

- iii) 망대특성: 특성치가 클수록 좋은 경우

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

여기서  $\bar{y}$  는 데이터들의 평균,  $\sigma$  는 표준편차,  $y_i$  는 실험에서 얻어진 데이터,  $n$  은 실험횟수를 의미한다.

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 값을 특성치(characteristic value) 또는 반응치(response)라 하고, 실험에 직접 취급되는 것으로써 특성치에 영향을 주는 것을 인자(factor)라 하며, 실험을 위한 인자의 조건을 수준(level)이라 한다. 인자의 수준은 실험자가 생각하는 관심영역 즉, 인자수준이 변화할 수 있는 범위에서 수준을 결정한다.

또한 실험계획법은 주 효과(main effect)와 교호작용(interaction) 모두가 고려되는 것으로서 주 효과는 하나의 인자의 수준을 변경하였을 때 나타나는 특성치의 평균값의 차이를 나타내고, 교호작용은 한 인자의 효과가 다른 인자의 수준변화에 따라 변화하는 작용 즉, 인자들의 수준 조합에서 일어나는 효과이다.

실험계획 시에 적절한 인자 및 수준의 선택이 결과의 효율성에 큰 영향을 미치므로 적절한 수준을 선택하기 위해 일정기준을 가지고 선택해야 하며, 일반적인 실험계획법의 과정은 다음과 같다 [6~7].

- ① 적절한 인자와 인자의 수준 결정
- ② 인자들간의 수준 수와 교호작용을 고려하여 직교배열표 선정
- ③ 직교배열표에 인자 배치

- ④ 배치된 인자의 조건에 따라 반복 시행 후 결과 측정
- ⑤ 각 결과들을 SN 비로 환산
- ⑥ 결과 분석

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 실험계획법의 적용

생산성을 향상시키면서 동시에 품질을 개선 할 수 있는 기법이면서 최종제품의 특성치에 영향을 주는 인자의 설계 및 인자들의 최적수준을 정하기 위한 대표적인 실험계획법으로 다구찌 법(Taguchi Method)의 직교배열표를 이용하였다.

다구찌 법의 직교배열표에 의한 실험계획법을 적용하기 위하여 먼저 인자들의 수준 및 직교배열표의 크기를 결정하여야 한다. Fig. 1 과 같은 형태의 금형과 초기 접합부의 크기를 갖는 3 장의 원형판재에 대하여 선해석 수행 후 성형공정에 영향을 미칠 수 있는 접합부(D/B 1, D/B 2)의 크기, 소재(Sheet 1, Sheet 2)의 두께 그리고 마찰계수의 5 개 인자를 선정하였다.

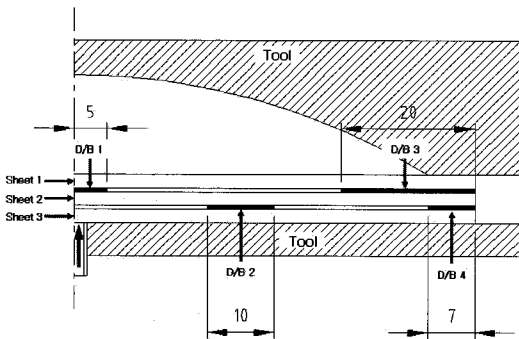


Fig. 1 Schematics of 3-sheet forming by diffusion bonding

참고문헌[8]의 조건을 바탕으로 접합부 크기는 크기에 따른 영향을 파악하고자 주어진 치수로부터 작은 경우와 큰 경우에 대하여 각각 3 수준으로 선정하였고, 성형시 가장 바깥 부분의 소재가 신장되는 정도가 내부 소재가 신장되는 것보다 빠르게 진행되어 최종 형상에서 문제를 야기할 수 있으므로 이를 고려하여 Sheet 1 과 Sheet 2 의 두께에 대한 수준을 선정하였다. Sheet 3 의 두께는 선해석 수행결과 성형에 영향을 미치지 않음을 확인하여 Sheet 1 과 Sheet 2 의 두께만을 인자로 선

Table 1 Factors and levels used in FEM

Factor	Unit	Level		
		1	2	3
A: Friction Coefficient		0.2	0.4	-
B: D/B 1 Region size	mm	3	5	7
C: D/B 1 Region size	mm	8	10	12
D: Sheet 1 Thickness	mm	1	2	3
E: Sheet 2 Thickness	mm	0.5	1	2

정하였으며, Sheet 1 의 두께는 주어진 두께보다 작은 경우와 큰 경우에 대하여 3 수준으로 결정하였고 Sheet 2 의 두께는 주어진 두께보다 작은 두 경우에 대하여 3 수준으로 결정하였다.

일반적으로 마찰계수는 제어 할 수 있는 변수는 아니지만 기존의 문헌을 바탕으로 0.2-0.4 의 범위에 있음을 확인하였고 2 수준으로 결정을 하였다. 각각의 인자에 대하여 결정된 수준을 Table 1 에 나타내었고 2 수준과 3 수준으로 혼합하여 구성된 혼합설계의 경우에 대하여  $L_{18} = (2^1 \times 3^4)$  의 혼합 직교배열표를 사용하였다.

$L_{18} (2^1 \times 3^4)$  의 혼합 직교배열표는 2 수준과 3 수준으로 구성된 혼합설계에 사용할 수 있는 것으로 각 수준에 사용할 수 있는 요인의 최소 개수와 최대개수를 의미하는 것이다. 즉, 2 수준의 인자 1 개와 3 수준의 인자를 4 개까지 사용할 수 있음을 나타낸 직교배열표로서 총 18 번의 해석을 수행하게 된다. 이  $L_{18}$  직교배열표는 교호작용은 배치하지 않고 주로 인자만을 배치하는 경우에 사용되며 Table 2 와 같이 효과적으로 인자들을 할당하였다.

#### 3.2 유한요소 해석

초기에 확산접합공정이 이루어지고 후에 초소성 성형이 이루어지는 공정으로 Table 2 의 직교배열표 각 조건을 ABAQUS 의 입력변수 조건으로 입력하여 18 번의 해석을 수행하였다.

초소성 재료는 변형률 속도, 변형률 그리고 재료의 결정립 크기에 영향을 받지만 실험적인 관찰에 근거를 두어 사용되는 가장 일반적인 멱급수 형태는 가공경화 및 결정립 성장의 영향을 무시한  $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$  의 형태가 된다. 이에 본 연구에서 사용된 재료는 Ti-6Al-4V ELI 소재로 응력 및 변형률 속도의 관계는 식(4)와 같이 하였고, 최적의 변형률 속도 값은  $\dot{\epsilon}_{opt} = 0.001 / s$  으로 하였다[8].

$$\bar{\sigma} = 450\bar{\epsilon}^{0.4} \quad (MPa) \quad (4)$$

Table 2 L<sub>18</sub> orthogonal array table

Factor \ Case	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	1	2
5	1	2	2	2	3
6	1	2	3	3	1
7	1	3	1	2	1
8	1	3	2	3	2
9	1	3	3	1	3
10	2	1	1	3	3
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	2
13	2	2	1	2	3
14	2	2	2	3	1
15	2	2	3	1	2
16	2	3	1	3	2
17	2	3	2	1	3
18	2	3	3	2	1

선행해석 수행결과 Sheet 3는 성형에 영향을 미치지 않으므로 Sheet 1과 Sheet 2의 상부 2장에 대하여 축대칭 요소(CAX4R)를 이용하여 직교배열표에 따라 해석을 수행하였고, Sheet 2와 Sheet 3의 접합부는 경계조건으로 표현하였다.

Fig. 2는 Case 별로 수행된 해석 결과로써 각 인자들의 조합에 따라 변형형상이 각각 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 특히 Sheet 2의 두께가 Sheet 1의 두께보다 두꺼운 경우 성형성이 상당히 좋지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 실험계획법에 의한 영향인자 분석

본 연구에서는 성형에 영향을 미치는 인자들을 파악하고 최적의 성형조건을 예측하는데 그 목적이 있다. 영향인자의 개수를 많게 하고 직교배열표의 크기를 크게 할수록 좀더 정확한 결과를 구할 수 있으나 시간절약 및 작업의 효율적 측면에서 L<sub>18</sub> (2<sup>1</sup>×3<sup>4</sup>) 혼합직교배열표를 사용하여 18번의 해석을 수행하였다.

해석 결과로부터 성형에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해 Fig. 3과 같이 중심부에서의 소재와 금형과의 거리 차를 특성치로 하였으며, 각

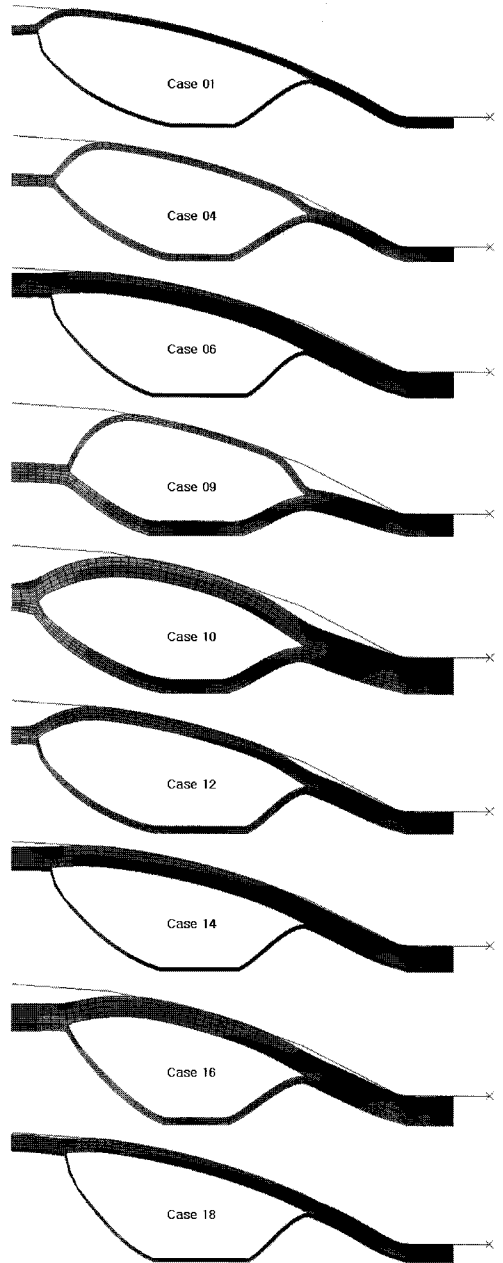


Fig. 2 Deformed shape of each case

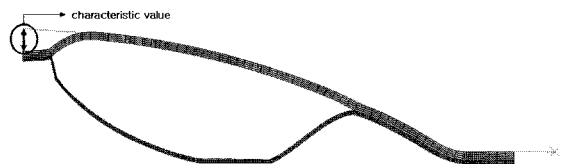


Fig. 3 Deviation at the center (tool and blank)

**Table 3 Value of deviation at the center**

Case No.	Deviation	Case No.	Deviation
1	2.72750	10	5.19900
2	3.53830	11	2.76150
3	5.27380	12	3.58000
4	5.13580	13	6.36310
5	6.56040	14	0.81520
6	1.75520	15	5.29110
7	0.14730	16	2.66420
8	2.54400	17	7.74570
9	8.00359	18	0.23750

(unit: mm)

Case 별 결과의 특성치를 측정하여 Table 3에 나타내었고 인자들의 수준 조합에 따라 각 인자가 성형에 미치는 영향을 분석하였다.

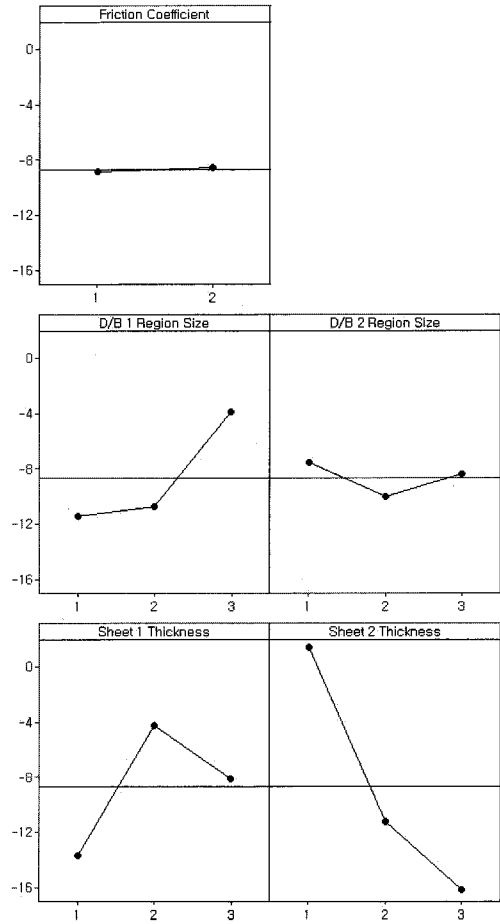
이 특성치의 값은 작을수록 좋은 경우 즉, 망소 특성에 해당되고 SN 비는 식 (2)에 의해서 계산이 된다. 특성치 데이터에 대하여 분산분석으로 직접 분석을 하지 않고 이들로부터 계산된 SN 비를 계산하여 이를 새로운 특성치로 삼아 분석을 하였다. SN 비에 유의한 영향을 주는 인자의 최적수준은 SN 비를 최대로 하는 수준이며, SN 비의 수준별 요인 효과도는 Fig. 4와 같다.

수준의 변화에 따라 변동의 폭이 심한 Sheet 2의 두께가 성형에 가장 큰 영향을 미치고 두께가 두꺼워질수록 성형성이 좋지 않음을 알 수 있다.

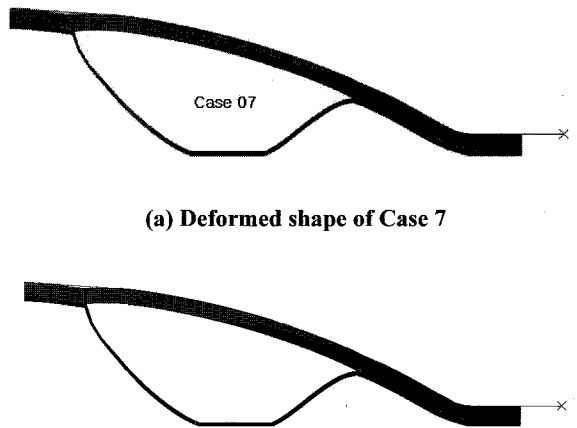
Fig. 4에서 인자들의 영향을 검토해보면 Sheet 2의 두께(E)가 가장 큰 영향을 주고 그 다음은 Sheet 1의 두께(D), D/B 1의 크기(B), D/B 2의 크기(C)이며 마찰계수(A)는 SN 비에 유의한 차이가 없다.

D/B 1의 크기는 클수록 Sheet 2의 두께는 얇을수록 성형이 잘되며 D/B 2의 크기와 Sheet 1의 두께는 수준 2에서 성형성이 가장 좋게 나타났다. 특히 상부 소재의 두께가 상대적으로 두꺼울 경우 성형성이 떨어짐을 확인 할 수 있다. 따라서, Sheet 2의 두께가 성형에 가장 큰 영향을 미치지 만 Sheet 1과의 적절한 두께 비, 접합부의 크기를 적절히 결정하는 것 또한 완벽한 성형을 위해서는 반드시 필요하다.

Fig. 4의 특성치 분석으로부터 성형성이 가장 좋게 나타난 최적 공정 조건은 A2, B3, C1, D2, E3임을 알 수 있다. 최적 공정조건인 마찰계수 0.4,



**Fig. 4 Plot of main effect of SN ratio**



**(a) Deformed shape of Case 7**

**(b) Deformed shape of DOE result**

**Fig. 5 Comparison of deformed shape**

D/B 1의 크기 7mm, D/B 2의 크기 8mm, Sheet 1의 두께 2mm 그리고 Sheet 2의 두께를 0.5mm로 하여 해석을 수행하여 그 결과를 18번의 해석을 통해 얻은 결과 중 하나인 Case 7과 비교를 하여 Fig. 5에 나타내었다. Case 7과 다른 조건은 마찰계수이며 이 둘은 차이가 없음을 알 수 있고 마찰계수가 성형에 큰 영향을 주지 않음을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다구찌 법의  $L_{18}(2^1 \times 3^4)$  혼합직교배열표를 이용하여 효율적인 인자배치를 통하여 해석을 수행하였으며, 초소성 성형/확산접합의 공정에 각 인자들이 미치는 영향을 분석하고 최적 성형조건을 예측하는 것으로 결론은 다음과 같다.

(1) 실험계획법에 적용하기 위한 적절한 수치 변수를 선정하여 다구찌 법의 직교배열표를 이용하여 3-Sheet의 공정해석에 적용하였다.

(2) 성형공정에 영향을 미치는 인자는 Sheet 2의 두께(E)-Sheet 1의 두께(D)-D/B 1의 크기(B)-D/B 2의 크기(C)- 마찰계수(A)의 순서로 나타났다.

(3) 소재의 두께와 접합부의 크기가 성형에 큰 영향을 미쳤으며, Sheet 1의 두께가 Sheet 2의 두께보다 두꺼울 경우에 성형이 잘되고, D/B 1의 크기는 클수록 성형이 잘되었으며 적절한 두께 비와 접합부의 크기 선정이 완벽한 성형을 위해서 반드시 필요하다.

(4) 직교배열표를 이용한 효율적인 인자 배치를 통하여 해석을 수행함으로써 해석의 횟수를 줄여 시간의 절감 효과 및 각 인자들 간의 영향을 빠르게 검토하였다.

#### 후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 과제로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 이정민, 홍성석, 김용환, 1998, 초소성 성형공정 최적화, 한국소성가공학회지, 제 7 권, 제 3 호, pp. 207~214.
- [2] 이정환, 김현철, 이영선, 이상용, 신평우, 1998, 초소성 블로우 성형품의 두께분포 균일화 연구, 한국소성가공학회지, 제 7 권, 제 6 호, pp. 610~619.
- [3] 홍성석, 김용환, 1996, 초소성 성형/확산접합공정의 유한요소해석, 한국소성가공학회지, 제 5 권, 제 1 호, pp. 37~46.
- [4] K. S. Lee, H. Huh, 1999, Simulation of superplastic forming/diffusion bonding with finite-element analysis using the convective coordinate system, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 89-90, pp. 92~98.
- [5] Javier Bonet, Antonio Gil, Richard D. Wood, Rajab Said, Richard V. Curtis, 2006, Simulating superplastic forming, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 195, Issues 48-49, pp. 6580~6630.
- [6] Douglas C. Montgomery, 1991, Design and Analysis of Experiment, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons.
- [7] 박성현, 2006, 현대실험계획법, 민영사.
- [8] Jong-Hoon Yoon, Ho-Sung Lee, Yeong-Moo Yi, Young-Soon Jang, 2007, Finite element analysis in superplastic blow forming of Ti-6Al-4V multi-sheet, Materials Science Forum, Vol. 546-549, pp. 1361~1366.