

# 반응표면법을 이용한 이종재질의 접합 계면부 강도평가 및 접합특성에 관한 연구

이승현\*, 최성대#, 김기만\*\*, 이종형\*\*

## Study on the Bonding Property and Strength Evaluation in Bonding Interface Joints of Dissimilar Material using Response Surface Analysis

Seung-Hyun Lee\*, Seong-Dae Choi<sup>#</sup>, Gi-Man Kim\*\* and Jong-Hyung Lee\*\*  
(Received 27 April 2009; received in revised form 20 June 2009; accepted 07 July 2009)

### ABSTRACT

In this papers, Study on the Bonding property and Strength Evaluation in Bonding interface Joints of Dissimilar material using DOE. We found optimal condition that uses experimental design method (Response Surface Analysis, DOE) used temperature, pressure, time on experiment factor. And we could get bonding condition and strength that break and crack do not happen in mechanical processing about united dissimilar material. And progress 3 point bending tests and verified result.

**Key Words :** Dissimilar material(이종 재질), Ceramics dielectric material (세라믹 유전체), Response Surface Analysis, DOE(반응 표면법), Adhesive(접합제), Bonding Interface(접합 계면)

### 1. 서 론

자연계에 존재하는 물질 중에서 전자기적 특성을 갖는 대표적인 물질로 자기적 등방성 또는 이방성 성질을 갖는 페라이트라는 물질이 있다. 일반적으로 등방성 페라이트의 경우 가격 싸고 제작이 쉬워 많이 사용되고 있으나 자기 특성이 이방성

페라이트보다 떨어져 특수 부품에는 주로 이방성 페라이트가 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 이방성 소재는 등방성 소재와 달리 입자가 상, 하 또는 일정방향으로 배열되어 있으며 첨가물이 고온 합성되어 강자성 재질로 구분되고 있지만 취급 및 제작 방법이 어려운 단점이 있다. 일반적으로 페라이트는 그 특성상 단품으로 사용되기도 하지만 전기적 특성을 위해 금속 및 세라믹등과 결합하여 활용되어진다. 하지만 고유의 성질인 취성 때문에 가공성 및 성형성이 좋지 않아 일반적인 기계적 가공 및 접합 방법으로는 형상을 구현하기 어렵다. 세라믹 유전체의 특징으로는 전기장이 작용할 때 물체 내에서

\* 금오공과대학교 대학원 생산기계공학전공

# 교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : sdchoi@kumoh.ac.kr

\*\* 금오공과대학교 기계공학부

전기장을 상쇄시키는 방향으로 그것을 구성하는 분자들이 배열이 바뀌어 본래의 특성과 다른 성질을 띠게 된다. 즉, 물체 내의 분자들이 원래는 극성에 상관없이 무작위의 방향으로 배열되어 있다가 전기장을 가하게 되면 전기장의 + 쪽으로 분자의 - 극성인 곳이 끌리고 전기장의 - 쪽으로는 분자의 + 극성을 띠는 부분이 끌려가는 성질을 가진 물질이다.<sup>(2,3)</sup> 이 두 가지 물질은 일반적으로 소결 방식으로 제작되어 있어 외부에 충격 발생 시 깨지기 쉬운 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이종 재질인 페라이트와 세라믹 유전체에 대해 접합 후 기계적 가공 상에서도 깨짐 및 크랙이 발생 하지 않는 접합조건을 구하였고 접합계면의 강도의 특성을 알아보았다. 이와 같이 이종 재질에 대해 접합 할 수 있는 물질 및 방법에 대해 보다 체계적이고 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 실험계획법(DOE)의 반응 표면법 활용하여 결과 조건을 구하였다.<sup>(4,5,6)</sup>

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편 및 실험방법

이종 재질 페라이트(TT73-2205)와 세라믹 유전체의 접합강도에 대한 기준치는 페라이트와 유전체 각각의 기계적 물성 즉, 개별 굽힘 강도가 기준치 이상일 때 접합체가 안정적으로 판단할 수 있다. 하지만, 동일한 조건 및 환경에서 시험을 위해 시험편에 대해 동일한 형상으로 가야하는 어려움이 있다. 또한 세라믹 유전체와 페라이트의 경우 재질 특성이 달라 같은 형상으로 기계가공을 하기 힘들다. 본 시험에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 세라믹 가공에 적합한 센터리스 원통 연삭 가공을 적용하였다. 센터리스 원통연삭은 공작물을 center로 지지하지 않고 연삭 스톨차(grinding wheel)와 조정차(regulating wheel, regulating roller) 사이에 공작물을 삽입하고 지지대로 지지하면서 연삭하는 가공법으로 시험편을 따로 물리지 않고 일정한 지름으로 가공할 수 있는 장점이 있다.

정확한 실험을 위해 접합부의 단차 및 형상의 일체화를 위해 접합후 센터리스 가공하였으며, 세라믹 유전체와 페라이트 외경을 같은 지름으로 맞추어 시험하였다. 접착제는 접착력과 열안정성이 우수하며 마그네틱 접착에 유리한 에폭시 접착제 계열의 SM1534[2]을 선정하여 실험하였다. 접합방법은 이종재료 페라이트와 세라믹 유전체 사이에 에폭시 접착제 계열의 SM1534[2]을 바른 후 양쪽 또는 압착한 상태에서 열 건조하는 방법을 사용하였다. 또한 접합 후 상호 축이 정확하지 않을 수 있으므로 센터리스 원통 연삭 가공을 하여 상호 중심 축 및 외경 축에 대하여 정밀도를 갖도록 하였다. 초기 페라이트 및 세라믹 유전체 외곽치수는 외경치수  $\phi 7.6\text{mm}$ , 길이 50mm의 원기둥 형태로 센터리스 가공하였다. 접합방법은 정밀 제어 압축장치를 제작하여 고온 가열로 내에서도 중심에 일치시키며 굽힘/고정할 수 있도록 제작 하였다. 접합온도와 접합시간은 외부의 변수 없이 정확히 세팅되어지나 접합 압력은 접착제의 량에 따라 달라 지므로 정확한 데이터 값을 얻을 수 없다. 그래서 본 연구에서는 정밀 제어 압축장치를 이용하여 정확한 위치 제어를 할 수 있는 시스템을 개발하여 변위로 제어할 수 있도록 하였다. 접합 강도에 대한 압축 시험 방법으로는 ROD의 형상과 접합부에 정확한 하중을 인가해야 하는 점을 고려하여 원형 봉 형상의 시험편으로 3점 및 4점 굽힘 시험을 수행하였다. 시험조건은 온도 23℃, 상대습도 40 ± 3 % 이며, 시험 속도는 0.3mm/min 이다. 본 논문은 외경은  $\phi 7.6\text{mm}$ 의 페라이트 유전체 접합체를 활용하여 반응표면 분석법에 의해 각각의 변수를 배치하고 이에 대해 시험 하였다. 지지하는 점의 거리는 유전체 및 페라이트 형상을 고려하여 40mm로 일치시켰다. Fig. 1은 페라이트와 유전체의 접합 시험편에 대한 굽힘 시험에 대한 그림이다. 원소재인 페라이트와 유전체의 특성을 알아보기 위해 각각의 원 소재에 Fig.1과 같은 방법으로 5회씩 3점 굽힘 시험을 하여 평균 결과 값을 얻었다. 시험규격

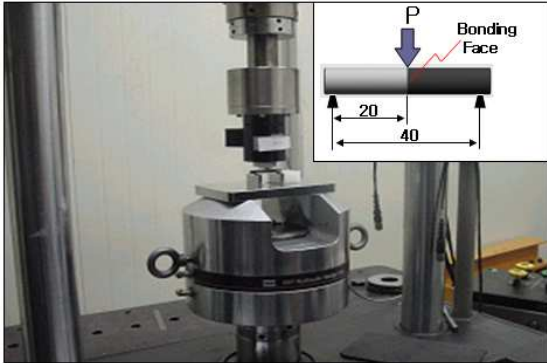


Fig. 1 Configuration of 3 points bending test

은 ASTM C158의 규격에 의거 시험 하였으며 시험결과 세라믹 유전체가 페라이트 보다 큰 강도 값을 나타냈다 세라믹 유전체 Rod의 값은 평균 780kgf/cm<sup>2</sup> 이었으며 페라이트 Rod의 경우 평균 586kgf/cm<sup>2</sup>임을 확인 하였다.

시험된 시험편 중에서 두 개의 시험편에서 550kgf/cm<sup>2</sup>의 강도 값이 나왔으며, 이 경우 파단면을 살펴본 결과 제품 표면에 기공성 불량 존재 하고 있었다. 이 data를 제외하고 나머지 결과를 바탕으로 평균값을 취했으며 페라이트 Rod와 유전체 접합에 대한 안전율 등을 감안하여 굽힘 시험 결과 값을 목표설정 값으로 약 600 ~ 650 kgf/cm<sup>2</sup>로 설정하여 실험하였다.

## 2.2 DOE에 의한 실험계획 배치

최종 접합강도에 영향을 주는 인자는 접합온도, 접합 압력, 접합시간에 의해 기계적 강도가 정의되어진다. 접합온도와 시간, 압력에 대한 변위를 주요인자 변수로 두고 이에 대해 시험하였다. Table 1은 시험을 위한 독립변수에 대해 제품의 사용 조건 및 작업 조건 등의 작업 한계 범위이다. 다음과 같이 접합강도에 영향을 주는 인자의 상호 작용에 대한 결과를 보다 정확한 값을 얻기 위해 수학적 통계방법 하나인 반응 표면법 으로 결과값을 구하였다. 반응 표면법은 관심 있는 반응치가 여러 설계변수들에 의해 영향을 받을 때 설계변수에 대해

여 반응표면을 근사모델링하고 해석하는 방법으로 반응표면 모형 설정 관련 식으로 독립변수  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  와 종속 변수  $\eta$ 간의 미지 함수를 '로 나타낼 수있다. 독립변수와 종속 변수의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있으며  $\eta = f(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3 \dots \epsilon_k)$  이를 다시 회귀 모델 2차항식으로 나타낼 경우 다음과 같다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \epsilon \quad \text{----- (1)}$$

따라서 독립변수 온도, 압력에 대한 범위 그리고 시간이 독립변수이므로 3개의 독립변수에 대해 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

Table 1 Factors and levels used in experiments.

	Low Level	High Level
Time	60 min	120 min
Temp.	100 °C	180 °C
Dim.	0.02mm	0.05mm

Table 2 Design Box-Behnken of the DOE.

Std Order	Run Order	Pt Type	Block	Temp	Time	Dim
4	1	2	1	180	120	0.035
2	2	2	1	180	60	0.035
6	3	2	1	180	90	0.02
7	4	2	1	100	90	0.05
15	5	0	1	140	90	0.05
5	6	2	1	100	90	0.02
9	7	2	1	140	60	0.02
13	8	0	1	140	90	0.05
1	9	2	1	100	60	0.035
10	10	2	1	140	120	0.02
11	11	2	1	140	60	0.05
12	12	2	1	140	120	0.05
3	13	2	1	100	120	0.035
8	14	2	1	180	90	0.05
14	15	0	1	140	90	0.035

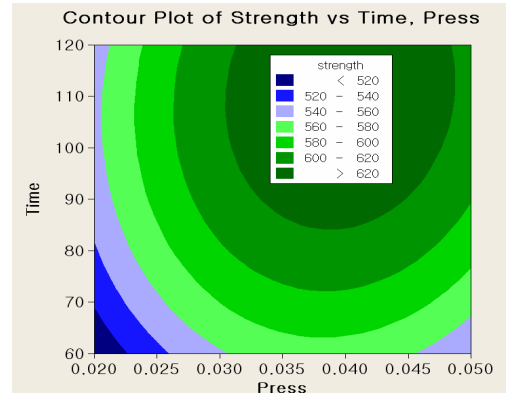
$$\begin{aligned} \hat{y} = & \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 \\ & + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{33} x_3^2 \\ & + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\hat{y}$  종속변수로서 본문에서는 페라이트 및 유전체의 고유 강도의 80%를 기준으로 설정 하였다. 독립변수는  $x_1, x_2, x_3$  은 각각 시간, 온도, 압력에 대한 변위로 두고 해석 하였으며 High Level과 Low Level에 대한 기준은 Table 1과 같다. 위 조건을 바탕으로 최적 설계기법인 반응 표면법을 사용하여 계획 배치하여 실험을 하였으며, 3개의 주요인자에 대해 검토한 결과를 바탕으로 Table 2에 Box-Behnken법으로 진행한 결과를 나타내었으며, 실험횟수는 총 15회이다. 결과 값에 대해 좀 더 신뢰성 있는 결과 값을 얻기 위해 곱힘 강도에 대해 5회 이상 시험하여 실험에 대한 오차를 최소화 할 수 있도록 하였다.<sup>(4,5)</sup>

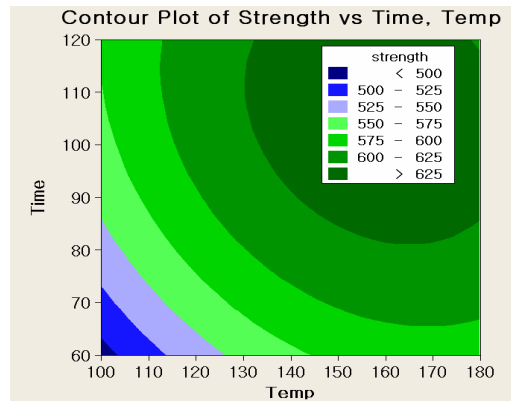
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험 계획 배치에 의한 결과

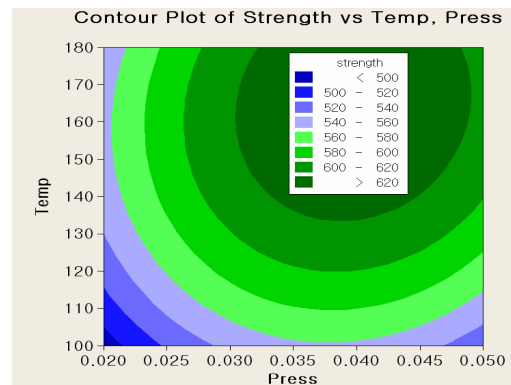
Table 2와 같이 설계결과를 가지고 각각 실제 실험을 하였으며 실험값에 대한 신뢰 각각 5회 시험하여 평균값을 실험 결과표에 배치하였다. 또한 그 인자 간의 상호작용에 의한 반응변수의 목표 값을 만족시키는 최적의 조합을 찾아내기 위해 Box-Behnken 배치에 의한 최적해를 구하는 Fig.2와 같이 구할 수 있었다. 유전체 ROD 및 페라이트 ROD의 접합 강도에 영향을 주는 요소에 대해 반응최적화(response optimizer) 기법을 사용하여 최적조건을 구하였다.<sup>(6,7)</sup> 제품의 접합 강도에 영향을 주는 3가지 인자에 대해 상호간에 반응 결과로 인자로는 접합력(거리), 온도, 시간 순으로 영향을 주는 인자였으며 특히 접합거리의 경우 다른 인자보다 더 변화에 대한 민감도, 즉, 기울기가 큼을 알 수 있다. 이는 접합 Bond가 고온 중에도 일정한 일정



(a) Relation between time and pressure



(b) Relation between time and temperature



(c) Relation between temperature and pressure

Fig. 2 Strength relation about temperature, pressure and time

온도와 접합거리가 유지 될 수 있도록 하는 것이 중요함을 알 수 있다. Fig. 3은 설계된 결과로 접합강도가 최상일 때 조건 일 때 조건 도를 높이기 위해 각 설계파라메타 실험 배치에 대해 살펴보면 시간은 106분, 온도의 경우 160분, 접합력에 필요한 거리는 0.0394mm 였으며, 접합 강도는 약 646kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 강도 값을 나타냄을 알 수 있었다. 하지만 제작에서 제품 완성까지 많은 시간이 소요됨으로 이를 줄이면서 처음 목표로 설정한 접합강도 600kgf/cm<sup>2</sup>을 기준으로 시간을 최소화 할 수 있도록 Optimizer 하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같이 다른 변수들은 그대로 두면서 시간을 85분 가량 수정 변경하여 실험하였다.

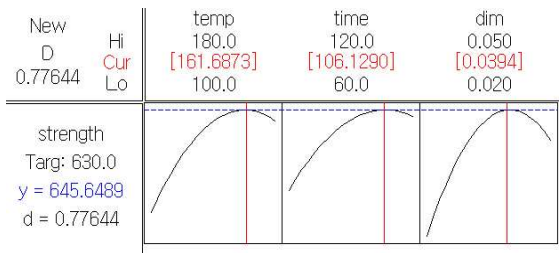


Fig. 3 Factors and levels used in experiments.

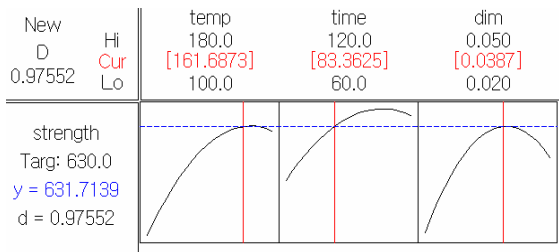


Fig. 4 Result in response variables to Optimizer by DOE.

### 3.2 3점 굽힘 시험에 의한 결과

유전체 ROD 및 페라이트 ROD의 접합 강도에 대해 Fig. 4와 같이 반응최적화 한 결과를 가지고 결과 값의 검증을 위해 data을 기준으로 실제 반복 시험 했을 때 같은 결과를 갖는지 확인하기 위해 10개의 시험편을 제작한 후 3점 굽힘 시험을 하였

Table 3 Strength test result of Bonding-face about Dissimilar material

specimen	bending strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Fracture point	Remark
1	455.8	Bond face	X
2	625.2	ferrite	O
3	450.7	Bond face	X
4	638.4	ferrite	O
5	612.3	ferrite	O
6	644.5	ceramics	O
7	622.1	ferrite	O
8	680.2	ceramics	O

Table 4 Comparison with result of response optimizer and 3 points bending test.

Method	bending strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	specimen number	Test method	
Analysis	631.7	-	Response Surface Analysis	-
Experiment	637	6	3 points bending test	ASTM C158

다. 시험방법은 Fig. 1과 같은 방법으로 실시하였으며, 실험 결과는 Table 3과 같다. 8개의 시험편의 3점 굽힘 시험에 대한 평균값은 591.2kgf/cm<sup>2</sup>였으나 2개의 시료에서는 굽힘 강도가 약450kgf/cm<sup>2</sup>에서 파단 현상이 발생 하였다. 8개중 6개에 대한 실험 결과는 실제 실험 계획법에 의해 유추 하였던 시험 결과와 유사한 평균값을 가졌으나 나머지 2개의 시험 결과는 예측 시험결과와 다른 경향을 나타냈다. 그 원인을 살펴 본 결과 Fig. 5 과 같은 소재 결함을 발견할 수 있었다. 그러므로 2개의 소재를 제외한 나머지 6개를 의 평균 값을 살펴 보면 압축강도를 파괴 강도가 약 637kgf/cm<sup>2</sup> 에서 파괴현상이 나타남을 확인 할 수 있었다. 반응표면 시험계획에 의해 유추 하였던 결과 값 631.7

kgf/cm<sup>2</sup>과 유사한 결과 값을 나타냈다. Table 4는 실험 계획에 의해 유추한 결과에 대해 실제 시험했을 때 비교한 결과 값이다. 실제 6회의 반복시험했던 평균값과 반응 표면법에 의한 최적해 값이 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

### 3.3 표면 및 파면해석

파단부 표면에 대해 현미경을 통해 분석해 본 결과 시편2와 4의 경우 Fig. 5와 같이 접합면 부위에 미세한 결함을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 5은 시편4에서 발견한 결함으로 페라이트 부위에 약 18.25 $\mu$ m 정도의 크기를 발견할 수 있었다. 이와 같은 결함으로 인하여 낮은 강도에서 파손이 되었음을 예측할 수 있으며, 파손부위는 접합부위와 맞닿는 부위로 평면 연마 후 원통가공 즉, 센터리스 가공시 edge 부위에 발생된 것으로 예상된다.

유전체와 페라이트의 이종 접합으로 인하여 고유의 강도, 즉 세라믹 유전체 Rod의 값은 평균 강도 780kgf/cm<sup>2</sup> 와 페라이트 Rod의 평균 강도 586kgf/cm<sup>2</sup>과는 다른 값인 약 630kgf/cm<sup>2</sup>의 강도 값을 보였다. 이는 상호 접합으로 인하여 상호 보완적 관계를 보임을 확인할 수 있었다. Table 4의 결과값을 살펴보면 압축강도에 대한 한계 범위가 Fig.6 과 같이 페라이트 소재 가까이 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 페라이트의 소재의 미세한 결함이 접합 강도에 직접적인 영향을 줄을 알 수 있다.

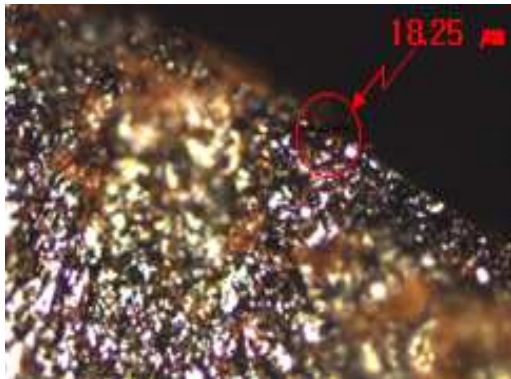


Fig.5 Defect for ferrite ROD damage region

그 이유로 시편 6과 시편 8과 같은 시험 현상이 예라 할 수 있다. 일반적으로 강도가 취약한 페라이트에서 파단이 일어나야 하지만 이와 다른 세라믹 유전체에서도 파괴가 나타남을 볼 수 있다. 이는 소재 내부에 존재하는 미세 크랙이나 이물질 또는 표면 가공 시 발생할 수 있는 가공결함 등이 원인이라 생각된다.

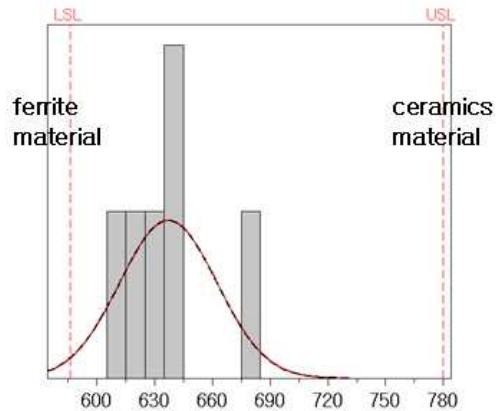


Fig.6 Distribution of results about 3 point bending tests.

## 4. 결론

유전체 ROD와 페라이트 ROD의 접합에 있어 중요한 변수, 온도, 압력, 시간에 대한 최적의 조건을 Box-Behnken 실험법으로 검증하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 유전체 ROD 및 페라이트 ROD의 접합 강도에 영향을 가장 주는 인자로는 접합력(거리), 온도, 시간 순으로 영향을 주는 인자였으며 접합강도에 가장 크게 영향을 주는 실험인자로 접합 거리였고 고온 경화 일정한 거리가 유지되어야 됨을 밝혔다.
- 2) 유전체 ROD와 페라이트 ROD의 접합조건으로 접합 지그에서 일정한 압력(압력거리)은 0.04mm, 가열온도는 160 $^{\circ}$ C, 시간은 100분 정도로 경화시켜 접합했을 때 안정적인 특성을 확인할 수 있었다.

- 3) 고온접합 시간을 약 20 분 줄임으로써 접합 강도에 미치는 영향을 최소화 할 수 있었으며 작업시간을 줄일 수 있었다.
- 4) 접합 계면에 결함이 있을 시 접합강도에 직접적인 영향을 주고 있으므로 이를 최소화하기 위해서는 접합 계면부의 가공정밀도 및 표면 상태를 관리해야 하며 특히 페라이트 소재에 집중 관리해야 함을 알 수 있었다.

## 후기

본 논문은 금오공과대학교와 구미전자정보기술원에서 지원한 과제입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Shiban Koul and Barathi Bhat, "Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters Voulume I", Artech House, 1991.
2. Charles R. Boyd, Jr., "The Joy of Designing Ferrite Phase Shifters", Microwave Applications Group, 1998
3. Jens Bornemann and Vladimir A. Labby, "Ridge Waveguide Polarizer with Finite and Stepped-Thickness Septum", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techinques, Vol. 43, No. 8. Aug. 1995.
4. 현대 실험계획법 " 박성현(민영사, 1996)
5. "MINITAB Usuide #1 : Data, Graphics, and Macros". Minitab Inc., 2000
6. "MINITAB Usuide #2 : Data Analysis and Quality Tools" Minitab Inc., 2000
7. 홍경진, 전광기, 조영석, 최동훈, 1999, "최적 설계를 위한 반응표면의 생성에 관한 연구," 한양대학교
8. Pyo Lim, GyunEui Yang, "Optimization of finish cutting condition of impeller with five-axis machine by Response Surface Method", pp.924-933 09. 2007 대한기계학회지
9. Young-Kug Hwang, In-Ung Eun, Choon-Man Lee, "Shape Optimal Design of Moving Table with Linear Motors using Response Surface Method" 대한기계학회 2006년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, 2006. 6
10. Soo-Keun Kang, Nak-sam Hhoi, "Analysis of Interfacial Shear Strength of Fiber/Epoxy Composites by Microbond Test and Finite Element Method" 제19권, 2006, 한국복합재료학회지