

실험계획법을 이용한 스피드럼의 시밍 최적조건 선정

김의수[†] · 이정민^{*} · 김병민^{**}

Selection of the Optimum Seaming Condition for Spin Drum Using Design of Experiment

Eui Soo Kim, Jung Min Lee and Byung Min Kim

Key Words : Design of Experiment (실험계획법), Optimum Condition (최적조건), Response Surface Method (반응표면법), Main Effect (주효과), Interaction Effect (교호효과)

Abstract

Because Seaming process of MPJ (Mechanical Press Joining) has various design factors such as thickness, bending radius, seaming width, caulking press width and the dynamic factor such as multistage plastic working, elastic recovery, residual stress, the optimum conditions can't be easily determined. Using a design of experiment based on the FEM, which has several advantages such as less computing, high accuracy performance and usefulness, this study was performed investigating the interaction effect between the various design factor as well as the main effect of the each design factor during drum MPJ and proposed optimum condition using center composition method among response surface derived from regression equation of simulation-based DOE.

기호설명

- P : 원심력에 의해 발생하는 면압력
- m : 세탁 부하
- r : 스피드럼의 반경
- ω : 회전 각속도
- l : 스피드럼의 길이
- σ : 원주방향의 응력
- t : 스피드럼의 두께
- Ft : 회전시 요구되는 접합력
- α : 언밸런스력에 대한 안전율

1. 서 론

최근 세탁기 사업에서는 환경 및 에너지에 대한 관심이 높아지면서 행금횟수를 줄여서 물의 사용량을 줄이고, 건조시간을 단축하여 전력

사용량을 줄이기 위한 목적으로 탈수속도를 고속화 하고 있다. 또한, 건강과 청결에 대한 관심이 높아지면서 매년 세탁시의 세탁량이 늘어나고, 이불빨래 등의 대형 세탁물에 대한 요구가 커짐에 따라 세탁기의 세탁용량을 대형화 하고 있다. 이와 같이 탈수속도가 고속화 되고 세탁용량이 대형화된 드럼세탁기를 개발하기 위해서는 여러가지 내부 부품들에 가해지는 하중이 증가함으로써 발생하는 부품의 파손등에 대한 강성설계가 중요한 항목으로 대두되고 있다. 특히 내부 구조물의 강도설계중 스피드럼 시밍부 접합강도 향상은 이론적으로 기존품의 단순한 개선이라기보다는 한계의 공정기술을 실현하기 위한 별도의 연구가 필요하며 이를 구현하지 못한다면 고속탈수 세탁기의 개발은 불가능한 실정이다. 용접에 비해 많은 장점을 가지고 있는 기계적 프레스 접합 기술은 가전사업에서 잠재적으로 확보해야 할 중요한 기술중의 하나이나 아직까지는 접합강도가 현저히 낮기 때문에 고속 운용시 요구되는 높은 접합강도를

[†] 책임저자, 회원, 국립과학수사연구소

E-mail : eui44013@lycos.co.kr

TEL : (02)2600-4985 FAX : (02)2600-4986

^{*} 부산대학교 대학원

^{**} 부산대학교 기계공학부

실현하는데 어려움이 있으며 다단 소성가공, 탄성회복, 잔류응력 등의 접합부 자체의 역학적 인자와 세탁운용시 외부 사용환경등이 상호작용하여 결정되는 복잡한 문제 특히 파손, 파괴가 일어나는 접합부는 구조적 불연속부가 되어 해석상 어려움이 많으므로 지금까지도 국내외를 막론하고 매우 제한적 연구가 진행된 상태이다.⁽¹⁻²⁾

이에 본 연구는 국내의 최초로 10Kg 대용량, 1800RPM 고속탈수용 세탁기를 개발할 수 있는 시밍 접합강도 향상을 위해 상용프로그램인 미니탭을 활용한 실험계획법과 유한요소법을 병행 사용하여 시밍 접합강도에 영향을 미치는 많은 설계변수중에서 목적함수에 큰 영향을 미치는 중요 설계변수를 상관분석을 통해서 쉽게 선정하고 선정된 설계변수를 입력값으로 통계학에 기초한 주효과, 교호효과, 잔차분석을 행한 후 입력과 출력의 상관관계인 회귀모형함수를 추정하여 이를 반응표면 최적화 루틴을 이용하여 최적의 가공조건을 제시한다.

2. 스피드럼의 개요

2.1 스피드럼의 제작

세탁물이 담겨져 입력된 세탁프로그램에 따라 터브내에서 시계방향 혹은 시계반대방향으로 회전하는 원통형 스피드럼은 크게 드럼프론트(Drum front), 드럼WRAPPER(Drum wrapper), 드럼백(Drum back)으로 총 3 개의 파트로 구성되어 있다. 스피드럼 제작용 재료로 많이 활용되는 소재는 스텐인레스강 중에서 오스테나이트계 STS304 와 페라이트계 STS430 판재이다. 깊은 드로잉 성형 및 물과 항상 접촉해 있는 세탁기 특이환경을 고려했을 때 Ni 가 함유되어 내식성, 내열성이 뛰어나며 가공성 및 기계적 성질이 우수한 STS304 판재가 가장 적합한 사용 소재이나 재료비가 다소 높음으로 드로잉성이 나쁨에도 불구하고 가격이 오스테나이트계 보다 저렴하면서 양호한 내열성, 내식성을 가지고 있는 STS430 판재를 대부분의 제조사에서 채택하고 있다. 제작 과정을 Fig. 1 에서 상세히 살펴보면 드럼 프론트는 총 5 단계로 이루어지며 우선 원판재를 원형 형태로 블랭킹한 후 펀칭공정을 행하므로써 입구가 있는 프론트 형상의 기초작업을 수행하고 입구부분에는 컵링으로, 나머지 부분에는 드로잉으로 강성을 부여하고 마지

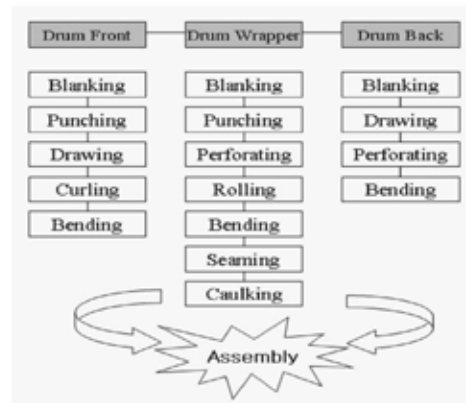


Fig. 1 Manufacture process of spin drum

막으로 드럼 웨퍼와의 시밍 작업을 위해 끝단을 벤딩한다. 드럼 백의 경우는 총 4 단계로 펀칭 대신 건조시 공기의 순환을 돕기 위해 다수의 구멍을 뚫는 퍼포레이팅 공정이 드럼 프론트 제작과정과는 차이가 있다. 드럼 웨퍼는 총 7 단계의 공정으로 이루어지며 블랭킹 후 리프트를 장착하기 위한 펀칭 공정, 터브내의 세탁수가 왕래하는 다수의 구멍을 형성하기 위한 퍼포레이팅, 원통형으로 제작하기 위한 예비 단계인 롤링과 벤딩 공정, 그리고 시밍 및 코킹으로 이루어진 기계적 프레스 접합에 의해 마무리된다. 이렇게 제작된 3 파트는 시밍작업에 의해 어셈블리 됨으로써 제작 작업이 완료되어 진다.

2.2 접합강도 계산

Fig. 2 에서 보듯이 드럼은 드럼프론트와 드럼WRAPPER, 드럼백과 드럼WRAPPER, 롤링후 드럼WRAPPER 끝단의 접합부를 가지며 세탁기가 고속으로 회전할 때 원심력과 언밸러스에 의해 가장 약한 부분이 먼저 파열되면서 나머지 접합부가 연속적으로 파열되는 형태를 지닌다. 내압을 받는 원통으로 간주될 수 있는 드럼의 강도설계는 드럼WRAPPER 원주방향의 응력이 최대치가 되므로 드럼WRAPPER의 시밍부

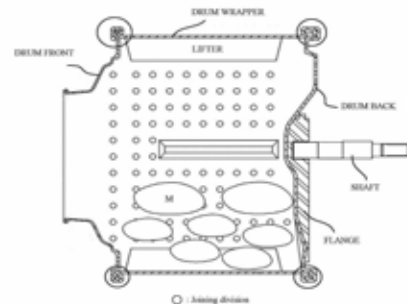


Fig. 2 Configuration of mechanical joining division

분이 가장 취약부분이 된다. 많은 정적, 동적 환경이 공존하는 고속회전시의 접합강도를 계산하는데는 상당한 지식과 시간이 필요함으로 본 항에서는 계산이 어려운 항목을 안전율 3 이상에 포함시켜 식 (1), (2), (3)을 근거로 요구되는 접합강도를 계산하였다.⁽³⁾

$$P = \frac{m \times r \times \omega^2}{2 \times \pi \times r \times l} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{P \times r}{t} \quad (2)$$

$$F_t = \alpha \times \sigma \times l \times t \quad (3)$$

이 식으로 계산된 10Kg, 1800Rpm 의 고속탈수용 대형세탁기의 요구 접합강도는 4120N 이다.

2.3 스피드럼의 프레스 접합

일반적으로 기계적 프레스 접합에는 두가지 기초적인 방법이 있다. 첫번째 방법인 절개구속 또는 크린치드(clinched)방법은 위쪽 부재를 아래쪽 부재에 있는 틈새까지 관통하도록 금속판을 잘라낸 후, 엮어하여 접합하는 방법으로 두 부재의 두께가 상당히 두껍거나 연신을 차가 심할 때 또는 취성 알루미늄이나 스테인레스강 등에 사용된다. 두번째 방법인 버튼 또는 라운드 크린치(Round clinched) 접합이라 불리는 방법은 두 판재를 관통하지 않고 양쪽 판재의 변형으로 아래쪽 판재가 위쪽 판재 주위를 구속하도록 하는 방법이다.⁽⁴⁾ 스피드럼의 기계적 프레스 접합은 두 판재를 관통하지 않고 두 장의 금속 판재를 다이쪽으로 밀어 붙이고 이 때 편치에 부가압력이 위쪽 판재를 아래쪽 판재 안쪽으로 소성변형시켜 상하 재료가 맞물리게 후자 방법의 일종이나 제작공정상 특이점으로 인해 상이한 방법을 사용한다. Fig. 3 에서 접합공정의 특이점을 살펴보면 롤 포밍한 판재의 끝단을 V 자 또는 U 자 벤딩처리 한 후 롤 형상을 X-Y-Z 방향 모두 구속하기 위해 평면

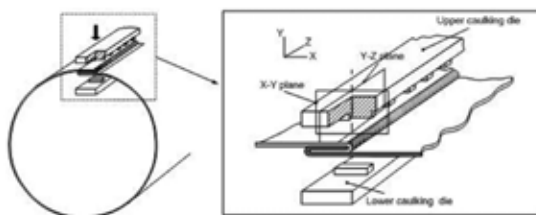


Fig. 3 Mechanical press-joining of spin drum

3. 실험계획법을 이용한 최적조건

3.1 목적함수의 정의와 설계변수 선정

실험계획법은 우선 특성치를 선택해서 인자와 수준을 결정하고 접합강도에 영향을 미치는 각각의 설계변수들을 조합을 통해 많은 수의 설계모델들을 만들고 실제로 제작하여 하나씩 검증하여야 한다. 그러나 이 방법은 엄청난 설계 비용과 함께 긴 설계 시간이 요구되어 실제로는 이용이 불가능한 방법이다. 또한 설계변수들의 조합으로 나오는 각각의 설계 모델들을 실제 제작하여 실험하는 대신 컴퓨터를 이용한 수치해석으로 모의실험하는 방법 역시 설계변수들의 개수가 많아져 계산해야 할 설계모델의 개수가 많아지면 상당한 설계시간과 비용이 소요되는 단점을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 실험계획법과 유한요소법을 병행 사용하는 방법을 통하여 해석해야 할 설계모델들의 개수들을 최대한 줄이면서 목적하고자 하는 설계모델을 찾는 방법을 제안, 검토하였다.⁽⁶⁾ 설계변수에 대한 접합강도의 영향을 예상하기 어려우므로 유한요소법을 이용하여 각 설계인자에 따른 접합력의 변화를 해석하여 상관분석, 회귀분석을 통해 접합강도에 미치는 영향이 적거나 없는 설계변수는 무시, 제외하고 영향을 많이 미칠 것으로 예상되는 인자에 대해 주효과 및 교호효과를 분석한 후 반응 표면 루틴으로 최적의 설계값을 제시하고자 한다. 설정된 설계변수와 사용기호는 Fig. 4 와 같다.

3.2 유한요소 해석 및 결과

각 인자에 따른 접합력의 변화를 알아보기 위해 FEM (Finite Element Method)를 이용하여 소성가공 공정을 분석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램으로서, 현재 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 소성가공 공정해석용 소프트웨어인 Deform 을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 적용된 소재의 물성치는 STS304 재질로써 Table 1 에 시뮬공정에 대한 인자별 해석조건과 그 외 고정조건을 나

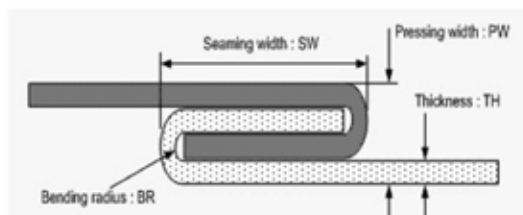


Fig. 4 Design factor and nomenclature

Table 1 Analysis condition according to design factor

Factor	Changed condition	Unit	Fixed condition
TH	0.6t, 0.7t, 0.8t, 0.9t, 1.0t	mm	BR : R0.5, SW: 6.0, PW : 2.4
BR	R0.5, R0.6, R0.7, R0.8, R0.9	mm	TH : 0.6t, SW: 6.0, PW : 2.4
SW	6.0, 6.3, 6.6, 6.9, 7.2	mm	TH : 0.6t, BR: R0.5, PW : 2.4
PW	2.4, 2.3, 2.2, 2.1, 2.0	mm	TH : 0.6t, BR: R0.5, SW: 6.0

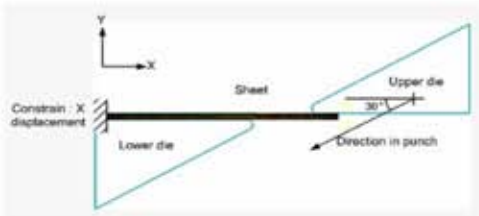


Fig. 5 F.E model and boundary condition of bending

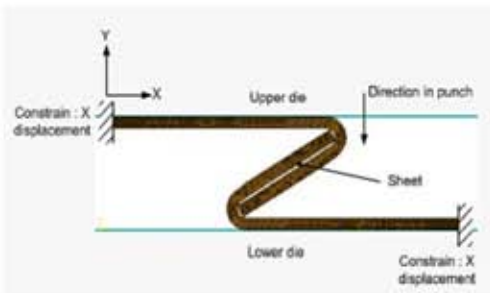


Fig. 6 F.E model and boundary condition of pressing

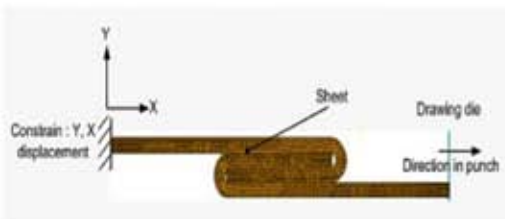


Fig. 7 F.E model and boundary condition of tensile

Table 2 Result of joining force according to TH

Step	TH Val.	0.6t	0.7t	0.8t	0.9t	1.0t
Bending	σ_{von}	1130	1140	1150	1170	1210
Pressing	σ_{von}	1240	1230	1220	1240	1240
Tensile	force	86.4	104.3	120.8	132.1	150

Table 3 Result of joining force according to BR

Step	BR Val.	R0.5	R0.6	R0.7	R0.8	R0.9
Bending	σ_{von}	1130	1120	1090	1100	1110
Pressing	σ_{von}	1240	1240	1250	1260	1250
Tensile	force	86.4	106.1	87.4	75.32	85.78

Table 4 Result of joining force according to SW

Step	SW Val.	6.0	6.3	6.6	6.9	7.2
Bending	σ_{von}	1130	1100	1120	1110	1110
Pressing	σ_{von}	1240	1260	1260	1250	1260
Tensile	force	86.4	85.5	95.4	97.1	96.5

Table 5 Result of joining force according to PW

Step	PW Val.	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
Bending	σ_{von}	1130	1130	1130	1130	1130
Pressing	σ_{von}	1240	1260	1270	1300	1320
Tensile	force	86.4	107.6	131.2	151.9	138

타내었고, 공정순서에 따른 유한요소모델 및 경계 조건을 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에 나타내었다. 시밍공정에 대한 각 인자별 유한요소 해석은 벤딩→압착→인장의 세부 3 단계로 구성되어 있으며 Plane strain으로 설정이 가능하므로 2D tool로 시뮬레이션을 수행하였다. 각 단계에 대해 좀더 상세히 살펴보면 판재를 여러가지 조건의 벤딩부 반지름에 따라 U자 또는 V자 벤딩하고 롤링부 끝단 구축을 위해 압착 작업을 한 후 접합력을 파악하기 위해 X축으로 인장하여 그 값을 얻었다. 각 인자별 변화에 따른 접합력의 해석결과를 Table 2, Table 3, Table 4, Table 5에서 정리하여 보여준다. 응력의 단위는 MPa이며, 접합력은 N으로 표시하였다.

3.3 요인설계 및 분석

Table 6에 실험계획을 위한 설계인자와 그 인자들의 수준을 나타내었고, Table 7는 실험 순서에 따른 각각의 실험조건을 직교배열표로 나타내었다. 짜여진 배열표에 설정된 조건으로 유한요소 해석을 수행한 후 각각의 설계인자가 서로 상호작용을 가지고 있는지, 접합력에 가장 영향을 미치는 인자는 무엇인지, 영향을 미친다면 어느 정도의 영향을 미치는지를 파악하기 위해 요인분석을 수행하였다. 이는 중요설계인자를 도출하고 최적설계시 고려해야 하지 않을 인자를 제거함으로써 보다 정밀하고 정확한 최적의 설계값을 제시하는 데 필수조건이라 할 수 있다. Fig. 8, Fig. 9는 요인분석 결과를 나타내고 TH, SW, PW은 낮은수준에서 높

Table 6 Design factor and level

(mm)	TH	BR	SW	PW
-1	0.6	0.5	6	2
+1	0.8	0.9	7.2	2.4

Table 7 Orthogonal arrays

Experiment No.	TH	BR	SW	PW
1	0.6	0.5	6	2
2	0.8	0.5	6	2
3	0.6	0.9	6	2
4	0.8	0.9	6	2
5	0.6	0.5	7.2	2
6	0.8	0.5	7.2	2
7	0.6	0.9	7.2	2
8	0.8	0.9	7.2	2
9	0.6	0.5	6	2.4
10	0.8	0.5	6	2.4
11	0.6	0.9	6	2.4
12	0.8	0.9	6	2.4
13	0.6	0.5	7.2	2.4
14	0.8	0.5	7.2	2.4
15	0.6	0.9	7.2	2.4
16	0.8	0.9	7.2	2.4

은 수준으로 이동함에 따라 접합력이 증가하는 경향을 가지며, BR 은 그 반대의 경향을 보였다. BR 과 SW, BR 과 PW, SW 와 PW 간의 교호작용은 크게 존재 하며 그 외 인자간 교호작용은 미비하게 존재함을 알 수 있다.

3.4 최적설계

분석된 내용을 통해 MINITAB 에서 지원하는 반응표면설계 중 박스-벤켄(Box-Behnken)법을 사용하여 최적의 설계값을 제시하였다. 박스-벤켄법은 1, 2 차항을 효율적으로 추정하고자 할 모든 실험이 안정된 공정 영역에서 이루어진다고 확신할 때 활용하며 중심합성법보다 실험횟수가 적도 실험이 너무 비용이 많이 들거나 현실적으로 실험이 불가능 할 경우에 유리하게 사용할 수 있다. 본 연구에서는 유의하지 않는 인자와 교호작용들을 제외하고 실험데이터와 가장 적합한 축소회귀모델을 찾기 위해 다수의 항에 몇 차례 재적합시키는 과정을 반복하였으며 그 결과 회귀모델에 의해 얻어진 최적 요인 수준을 Fig. 10 에 나타내었다. 유의한 교호작용이 하나 이상 존재하므로 이를 포함하

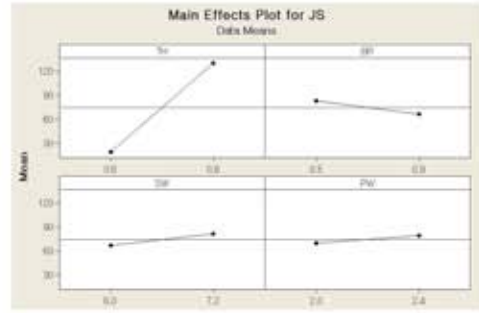


Fig. 8 Main effect plot for JS

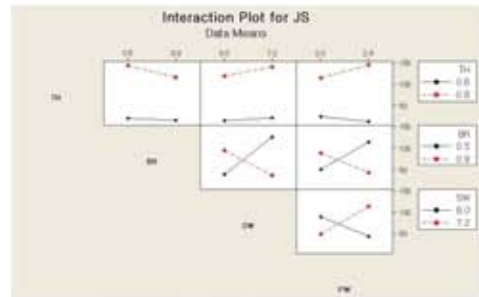


Fig. 9 Interaction effect plot for JS

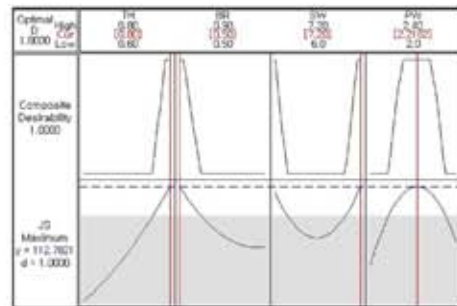


Fig. 10 Result of response surface optimize

Table 8 Optimum design values of seaming process

Result	TH (mm)	BR (mm)	SW (mm)	PW (mm)	JS (N/mm)
Value	0.8	0.5	7.2	2.22	112.8
Eq.	$Y=40.220+24.613*TH-13.015*BR+1.263*SW+4.979*PW+4.458TH*TH+8.060*BR*BR+20.937*SW*SW-28.720*PW*PW$				

는 완전 2 차항으로 반응표면 모델을 축소시켰고 그 결과 반응 값의 호감도 d 가 모두 1 인 적합한 모델을 찾을 수 있었다. Table 8 은 신뢰도 95%일 경우 스피드립의 시밍최적조건 결과를 정리해서

보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용프로그램인 MINITAB 을 활용한 실험계획법과 유한요소법을 병행 사용하여 시밍 조건의 설계변수 중에서 접합강도에 큰 영향을 미치는 중요설계변수와 영향도를 파악하고 회귀모형함수를 추정하여 이를 반응표면 최적화 루틴을 이용하여 최적의 시밍 조건을 제시하였다. 이는 통계적 해석을 통해 조건 결정에 대한 자유도가 많아 예측이 어려울 때 설계에 대한 기준값을 설정하는데 매우 유용하며, 더 나아가 복잡한 공정에 대한 가공 조건을 통계적으로 쉽게 접근할 수 있는 기틀을 마련하였다고 생각된다. 차후 박스-벤젠법이 가지고 있는 단점에 대한 보완방법과 실제 결정된 최적값으로 금형을 제작하여 실험값이 뒷받침 되어 진다면 아주 효과적인 공정설계방법으로, 적은 시간과 비용으로 요구하는 가공조건을 선정하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Lee, M. J., 2002, "An Experimental Study on the Fatigue Strength Evaluation of Adhesive Bonded and Mechanical Press Joints," *Uni. of SNT Master's thesis*.
- (2) Hanns, P. L., Jan, B. and Rainer, B., 1984, "Connecting Sheet Metal by Press Joining," *Bänder Bleche Rohre*, Vol. 25, No. 9, pp. 240 – 244.
- (3) Kim, E. S. and Kim, B. M., 2007, "Study of Design and Evaluation of Drum Assembly for High Speed Dehydration in Washing Machine," *Key Engineering Materials*, Vols. 340-341, No. 2, pp. 1297 – 1302.
- (4) Lim, D. W., 2002, "An Experimental Study on the Fatigue Strength Evaluation of Mechanical Press Joints," *Uni. of SNT Master's thesis*, pp. 4 – 18.
- (5) Lee, S. B., 2005, Design of experiment on the center of example, *ERETEC INC*, pp. 13 - 14, pp. 185-221.
- (6) Ha, D. Y., 2002, "The Optimum Design of Vacuum Interrupter with Axial Magnetic Field by using FEM and Design of Experiment," *Uni. of HY Doctor's thesis*.
- (7) Kim, J. S., Park, C. J., Park, T. W., 1996, "Suspension Parameter Design Using a Design of Experiments," *KSAE*, Vol. 4, No. 1, pp. 16 – 27.
- (8) Lee, S. G., Won, S. H., Lee, H. W., Lee, J., 2005, "Optimal design of High Precision Maglev system using Finite Element Method and Design Of

Experiments," *Summer conference of KIEE*.

- (9) Song, C. S., Kim, J. H., Kim, J. H., 2003, "Selection of Optimum Machining Condition of Dry Turning Using Taguchi Method," *Autumn conference of KSMTE*, pp. 19 – 24.