

다구찌 기법을 이용한 FCM 가스켓의 강건 설계에 관한 연구

정진은^{1*}, 안중규²

¹한국기술교육대학교 기계공학부, ²한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

A Study of Robust Design of FCM Gasket Using Taguchi Method

Jin-Eun Chung^{1*} and Jueng-Kyu Ahn²

¹School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology & Education

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University of Technology
& Education

요약 본 연구에서는 비석면 FCM(Fiber-elastomer Coated Metal) 가스켓의 강건 설계를 수행하였다. 이를 위하여 직교배열표를 사용한 실험계획법에 따라 전단력을 측정하는 실험을 수행하고 다구찌 기법을 사용하여 망대 SN비를 산출하여 영향을 미치는 제어인자를 파악하고 분산 분석을 수행하였다. 전단력에 영향을 미치는 제어인자로 온도, 압력, 시간 및 습도를 선택하였으며 각 제어인자에 대하여 3수준을 고려하여 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 작성하였고, 이에 근거하여 측정 실험을 수행하였다. 다구찌 기법을 사용하여 망대 SN비를 산출하고 델타 통계량을 계산하였다. 시간의 델타 통계량이 0.93으로, 시간이 전단력에 가장 큰 영향을 미치는 결과를 얻었다. 다음으로 온도, 압력, 습도 순으로 영향을 미쳤다. 또한 시간 80초, 온도 200 oC, 압력 90 kgf/cm², 습도 60 %RH의 조건에서 전단력이 최대가 됨을 보였다. 이에 대한 분산 분석을 수행한 결과 시간과 온도는 각각 p값 0.037, 0.098을 보여 신뢰수준 95%와 90%에서 유의함을 밝혔다.

Abstract This paper deals with the robust design of the non-asbestos FCM(Fiber-elastomer Coated Metal) gasket. In order to this, the measurement of the shear stress based on the design of experimet using the orthogonal table was carried out and the control factors for shear stress using the larger-the-better SN ratios with the Taguchi method were evaluated. In addition, the analysis of variance for SN ratios was conducted. The temperature, pressure, duration time and humidity were selected as the control factors. The orthogonal table $L_9(3^4)$ was made of 3 levels for each factor and the measurement of shear stress was acomplished on the base of the table. Delta statistics of time is the highest value 0.93 and therefore the time affect the largest effect on the shear stress of gasket. Also from the analysis, the shear stress shows maximun at the duration time 80 sec, temeratue 200 oC, pressure 90 kgf/cm², humidity 60 %RH. P values of duration time and temperature as a results of the analysis of variance are 0.037 and 0.098. Therefore the analysis has significant each with 95% and 90% confidence level.

Key Words : Robust Design, Fiber-elastomer Coated Metal Gasket, Taguchi Method

1. 서론

자동차 엔진은 하나의 블록으로 구성되어 있는 것이

아니라 수많은 부품들로 이루어져 있다. 또한 이 때 사용된 부품은 대부분 금속 재질로 만들어졌으며, 엔진과 같이 내부에 유체가 흐르는 장치의 경우 유체의 기밀이 엔

*Corresponding Author : Jin-Eun Chung(Korea University of Technology & Education)

Tel: +82-41-560-1152 email: jechung@koreatech.ac.kr

Received April 23, 2013

Revised (1st May 24, 2013, 2nd July 2, 2013)

Accepted July 11, 2013

진의 성능에 많은 영향을 미친다. 따라서 각 부품을 조립할 때 엔진의 기밀성을 향상시키기 위해 가스켓(gasket)을 사용해 왔다. 이러한 가스켓의 경우, 엔진 기술이 발전함에 따라 엔진의 작동 온도 및 압력이 높아졌으며, 따라서 가스켓에 사용되는 재질 또한 엔진의 작동영역에 맞추어 더불어 발전되어 왔다.

초기 가스켓을 만드는 재질의 경우 대부분 석면 재질로 만들어졌으며, 이러한 석면 재질로 가스켓을 만들 경우 생산 가격이 저렴하다는 이점은 있지만 석면 재질의 인체에 대한 유해성이 알려짐[1]에 따라 비석면 재질로 만들어진 가스켓의 사용이 꾸준히 늘고 있는 추세이다. 그러나 비석면 원자재만으로는 엔진의 고온·고압에서 가스켓이 엔진의 기밀성을 유지할 수 없어, 얇은 금속판 위에 고무층을 도포하는 형식인 고무 코팅 금속(RCM: rubber coated metal) 소재를 사용하고 있다. 이러한 고무 코팅 금속 소재의 경우 얇은 고무층이 금속 접촉면과 면 사이에 기밀(sealing)을 유지할 수 있도록 한다. 하지만 고무 코팅 금속 소재는 고무의 특성상 사용 온도에 제약을 받고 있으며, 금속판 위에 고무층을 높이는 데 한계가 있어, 상대 블록의 조도에 영향을 받을 수 있다.

고무층의 두께가 증가하면 초기 기밀성은 좋은 반면 시간이 지나면서 고무의 열화에 의해 점차 기밀성이 나빠지는 특성을 보임에 따라 고무층을 일정한 높이만큼 도포해야 한다. 이러한 문제점을 해결하고자 얇은 금속판 위에 고무 대신 고무에 고분자 섬유 탄성중합체(fiber elastomer)를 섞은 섬유 탄성중합체 코팅 금속(FCM: fiber-elastomer coated metal) 소재 가스켓을 개발하였다[2].

일반적으로 품질의 분산을 작게 하기 위하여 실험을 실시할 때 고려하여야 할 인자 수가 많다. 이때 많은 인자에 대하여 실험 횟수를 작게 하면서 실험 계획을 수립할 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교 배열표이다[3]. 직교 배열표를 이용한 실험 계획은 다음과 같은 장점이 있다. 기계적인 조작으로 이론을 잘 모르는 경우에도 일부실시법, 교차법, 분할법 등의 실험 배치를 수립할 수 있다. 또한 요인변동의 계산이 쉬우므로 분산분석표 작성이 용이하며, 실험의 수를 확대시키지 않고 많은 인자에 대한 실험을 수행할 수 있다.

다구찌 방법[4]은 품질 최적화 개념을 도입한 일본의 다구찌 겐이찌(田口玄一)에 의해 개발된, 직교 배열표를 이용한 실험 계획법이며 다양한 최적화 강건 설계[5,6]에 성공적으로 사용되었다.

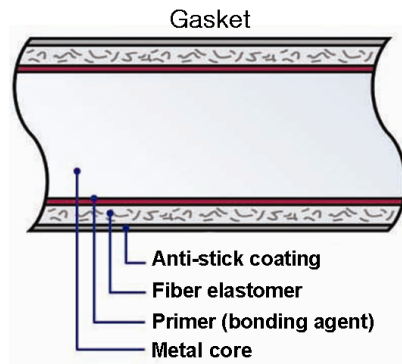
본 연구에 사용된 가스켓은 FCM을 사용한 것이며, 주로 자동차변속기의 밸브 가스켓으로 사용된다. 이러한 FCM 제조 시 접착조건에 따라 다른 물리적인 특성을 가

진다. 여러 가지 물리적 특성 중 가장 중요한 물리량은 전단력이다.

따라서 본 연구에서는 실험 계획법으로 FCM 가스켓의 전단력을 측정하고 다구찌 방법을 이용하여 실험 결과를 분석하여 FCM 가스켓의 최적 접합조건을 구하는 것이다.

2. FCM 가스켓의 구성

FCM 가스켓은 4개의 층으로, 제일 안쪽 면은 두께가 1.0mm인 스테인레스강(SUS301)으로 되어 있으며 그 다음으로 접착제(bonding agent) 섬유 탄성중합체(fiber elastomer), 코팅면(anti-stick coating surface)으로 구성되어 있다. 접착제는 일정량 이상의 열과 압력을 가해야지만 접착이 가능한 열경화성 접착제이며, 섬유 탄성중합체의 경우 고무에 고분자 섬유를 섞은 비석면 섬유질이다. Fig. 1에 가스켓의 단면구조를 나타내었다.



[Fig. 1] Construction of FCM gasket

3. 다구찌 강건 설계

다구찌 방법은 직교배열표를 이용한 실험계획법으로 유일한 해를 찾으려는 것보다는 품질과 비용의 최적해를 구하려는 의도에서 출발한 것으로, 제품 설계에서 가장 저렴한 비용으로 안정적이고 신뢰성이 높은 성능을 나타내는 인자의 조합을 찾는 데 이용된다[7].

기존의 방법과 다른 점은 실험 계획에 수반되는 이론과 노력이 상당히 단순화되며 경제적인 방법으로 많은 인자들을 고려할 수 있는 직접적인 방법이다. 또한 교호작용이 상대적으로 크지 않은 경우에는 주 효과 분석만으로도 최적 조건과 우수한 재현성이 보장된다. 기존의

실험계획은 실험실에서 잡음인자를 고정하고 실험한 결과를 사용했다. 이런 결과는 실험실에서는 정확하지만, 현장에서 사용할 때는 잡음조건이 바뀌어 성능이 떨어진다. 그러나 다구찌 방법에서는 실험할 때 실제 사용하는 조건과 똑같이 잡음조건을 바꾸어 가면서 실험하여 최적 조건을 찾는데, 이 점이 기존의 실험 계획법과 커다란 차이점이대[7]. 어떤 인자가 품질특성의 분산에 영향을 미치는지를 결정함으로써 분산을 줄일 수 있는 통계 가능한 인자에 대한 조건을 설정할 수 있으며, 품질 특성이 통제 불가능한 인자의 변화에 대해서는 둔감하도록 할 수 있다. 이런 조건의 제조공정에서는 보다 일관성 있는 제품을 생산해 낼 수 있고, 제품 역시도 일관성 있는 성능을 발휘할 수 있다. 그리고 품질 특성의 목표 값을 유지하면서, 분산을 줄이는 인자에 대해 설정값을 추출할 수 있다.

따라서 다구찌 방법은 제어 가능하고 영향력이 강한 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하고 제어할 수 없는 잡음의 영향력을 최소로 하는 강건 설계(robust design)를 할 수 있다.

다구찌 방법에서 개선을 위한 정도를 나타내는 측정치로 SN비(ratio of signal to noise)를 사용한다. SN비는 잡음에 대한 제어 인자의 비를 나타내며 식 (1)과 같이 정의된다[7].

$$SN비 = \frac{\text{신호가 산출물에 전달한 힘}}{\text{잡음이 산출물에 전달한 힘}} \quad (1)$$

$$= \frac{\text{모평균 제곱의 추정값}}{\text{분산의 추정값}}$$

본 연구에서 사용한 가스켓은 전단력의 크기가 크면 클수록 좋기 때문에 망대특성(larger-the-better characteristics)을 이용했다. 망대특성은 인장, 전단력 등과 같이 특성치가 크면 클수록 좋은 경우에 사용된다. 망대 특성을 갖는 전단력에 대한 SN비는 식 (2)와 같다[7].

$$\text{망대 특성 } SN비 = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

다구찌 방법에서 제어인자(control factor)는 최적 설계 조건 또는 최적 공정조건을 찾기 위하여 사용되는 인자로서 온도, 압력 등과 같이 가장 영향이 큰 모수 인자로 분산을 줄이기 위해 비용을 크게 상승시키지 않고 품질 개선을 할 수 있는 인자다.

제어인자가 설정되면 다음엔 수준을 결정한다. 수준은 각 인자별로 기술적으로 의미가 있는 최대의 폭으로 수준간의 간격을 설정해서 좋은 결과와 나쁜 결과를 명확하게 비교되게 하고 개선할 수 있도록 폭을 넓힌다. 수준 간격을 크게 취하게 하는 것이 다구찌 방법의 특성으로 수준간격이 클수록 출력에 큰 변화를 줄 수 있기 때문이다.

잡음인자(noise factor)는 특성치에 영향을 주고 있으나 그 요인의 상태를 파악할 수 없으며, 이유는 알 수 없으나 품질 분산에 나쁜 영향을 주는 인자다.

신호인자(signal factor)는 주어진 목표를 달성하기 위하여 신호 형태로 취급되는 모수 인자이며 동특성에서만 사용한다.

4개의 제어인자에 대한 3수준계 표준형 직교배열표 $L_9(3^4)$ 는 위의 Table 1과 같다.

[Table 1] $L_9(3^4)$ orthogonal array

NO.	Inner array				Outer array	
	C1	C2	C3	C4	R1	R2
1	1	1	1	1		
2	1	2	2	2		
3	1	3	3	3		
4	2	1	2	3		
5	2	2	3	1		
6	2	3	1	2		
7	3	1	3	2		
8	3	2	1	3		
9	3	3	2	1		

직교배열표 선정은 제어인자의 수, 제어인자의 수준 수, 교호작용의 존재 여부를 고려한다.

내측배열은 제어인자와 각 수준을 보여주고 있고, 외측배열은 신호인자, 잡음인자 등의 조합으로 전체 실험의 반복수를 나타낸다. 동특성에서는 신호인자와 잡음인자를 같이 고려하고, 정특성에서는 신호인자를 고려하지 않는다.

본 연구에서는 정특성 실험을 수행하였고 FCM 가스켓의 성능을 결정하는 가장 중요한 물리량은 전단력이며 이것에 영향을 주는 제어 인자로 가스켓 성형 시에 설정하는 온도, 압력, 시간 및 습도를 선택하였으며, 각 제어 인자에 대한 수준은 3 으로 하여 Table 2와 같이 설정하였다[8].

[Table 2] Levels of the control factors

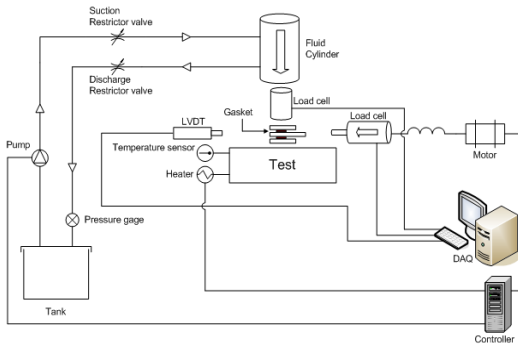
Control Factor	Level		
Temperature (°C)	190	200	210
Duration Time (sec)	70	80	90
Pressure (kgf/cm ²)	70	80	90
Humidity (%RH)	40	50	60

4. 실험 결과 및 분석

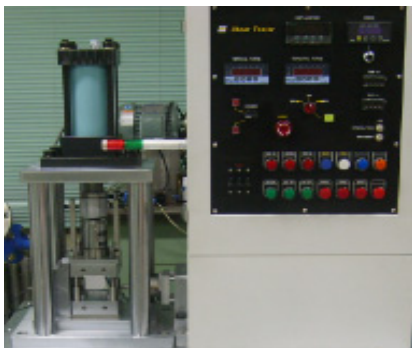
4.1 실험 장치의 구성

FCM 가스켓의 전단력을 측정하기 위하여 실험 장치를 설계하고 제작하였다.

본 실험 장치는 가스켓에 수직력을 가하는 유압펌프와 수직력의 상하 방향을 조절하기 위한 유압 실린더와 유압 밸브, 수직력을 측정하기 위한 로드 셀(Load cell)로 구성되어 있다. 또한 블록을 수평으로 이동시켜 전단력을 발생시키기 위한 서보 모터와 이를 측정하기 위해 로드 셀(Load cell), 전단력에 따른 변위를 측정하기 위해 LVDT(Linear variable differential transformer)를 설치하였으며 Labview 8.5를 이용하여 데이터를 취득하였다.



[Fig. 2] Configuration of shear test bench



[Fig. 3] Photo of the shear tester

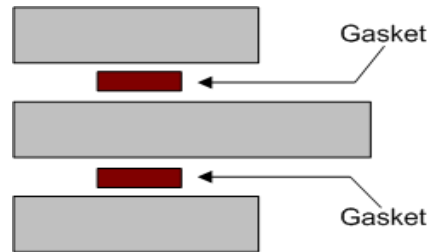
실험 장치 구성도와 장치 사진은 Fig. 2와 Fig. 3과 같고, 구성품의 상세 제원을 Table 3에 나타내었다.

[Table 3] Specifications of shear tester

Components	Model	Specifications
Electric motor		2HP-AC220/380V-4P-Ø3-60Hz
Servo motor	HC-KFS43	400W, 1.3N
Vane pump		Pmax:45kg/cm ² , Qmax:20L/min
Load cell	YK43-5T	5tonf, 1.0039mv/v, 0.5%
Load cell	YC60-2T	2tonf, 2.0024mv/v, 0.1%
LVDT	DP-10	0-10mm, Ø8
Temperature sensor	RTD	Pt-100, 3-wire, Tmax:150°C
Cylinder	DHH-S-FC	100×100mm (D×Stroke)

4.2 실험 방법

전단력 측정 실험은 GM PSA 시험 방법[9]에 따라 Fig. 4과 같이 일정한 크기의 블록 사이에 가스켓을 위치시킨다. 가스켓의 크기는 가로, 세로, 높이 15.88 × 15.88 × 1.25 mm 며 수직력은 35.58 kN (8,000 lbf) 정도 가하며 실험 시의 블록의 온도는 60 °C로 설정하였다. 수평 방향으로 가운데 블록을 밀어주는 모터의 속도는 56 rpm으로 설정하였으며 변위가 2 mm 밀릴 때까지 전단력을 측정하였다.



[Fig. 4] Gasket specimen with blocks

4.3 실험 결과 및 분석

직교배열표에 근거한 실험계획법에 따라 Fig. 2와 같은 실험장치를 이용하고 GM PSA 실험방법으로 실험을 수행하였다.

Table 4와 같은 4개 제어인자에 대한 3수준의 직교배열표 $L_9(3^4)$ 을 사용하였으며, 교호작용이 없다는 전제 하에 실험의 배열을 지정하였다.

[Table 4] Orthogonal array with control factors and levels

NO.	Inner array			
	Temperature (°C)	Pressure (kgf/cm ²)	Time (sec)	Humidity (%RH)
1	190	70	70	40
2	190	80	80	50
3	190	90	90	60
4	200	70	80	60
5	200	80	90	40
6	200	90	70	50
7	210	70	90	50
8	210	80	70	60
9	210	90	80	40

Table 5의 외측배열 R1, R2은 2회 반복하여 측정된 전 단력이며 이 측정 자료와 통계분석용 소프트웨어 Minitab의 실험계획법-다구찌 설계[10]를 이용하여 산출된 망대 특성 SN 비를 보여주고 있다.

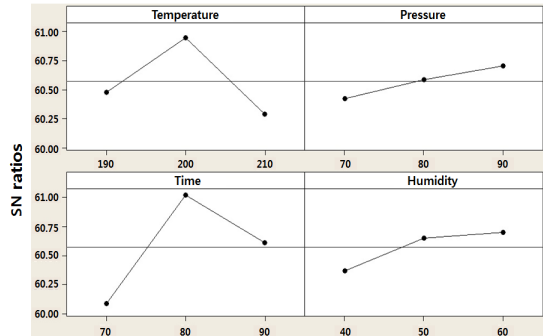
[Table 5] Values of shear force and SN ratio

NO.	Outer array : Shear Force(kgf)		SN ratio
	R1	R2	
1	960	960	59.6454
2	1119	1130	61.0189
3	1259	980	60.7776
4	1230	1120	61.3722
5	1169	1035	60.7954
6	1148	1023	60.6694
7	1046	1015	60.2580
8	980	1010	59.9535
9	1058	1102	60.6631

Table 6은 4개 제어인자에 대한 SN비의 반응 표이며 효과의 상대적인 크기를 비교하여 델타 통계량을 기준으로 순위를 표시하였다. 델타 통계량은 각각의 인자로부터 가장 큰 평균값과 각각의 인자로부터 가장 작은 평균값의 차이이다. 순위는 델타 값을 기준으로 정한다. 델타 값이 가장 큰 것을 순위 1로 정하고, 델타 값이 2번째 큰 값을 순위 2로 정하였다. 이러한 관점에서 전단력의 SN 비에는 시간이 가장 큰 영향을 주는 인자이며, 온도가 그 다음, 그리고 습도가 그 다음 영향을 주는 인자이다. 마지막으로 압력이 가장 작은 영향을 주는 인자이다. Fig. 5는 이러한 결과를 그림으로 보여준다.

[Table 6] Response of the SN ratios

Level	Temperature	Pressure	Time	Humidity
1	60.48	60.43	60.09	60.37
2	60.95	60.59	61.02	60.65
3	60.29	60.70	60.61	60.70
Delta	0.65	0.28	0.93	0.33
Rank	2	4	1	3

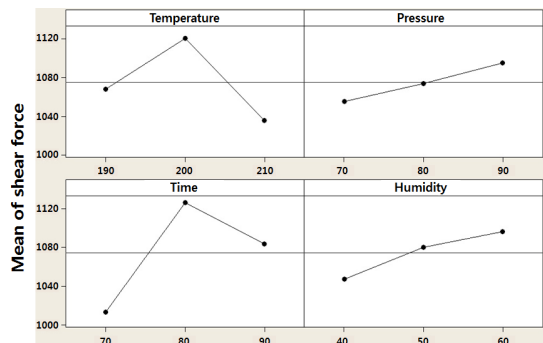


[Fig. 5] Response of the SN ratios for temperature, pressure, time and humidity

Table 7은 전단력 평균에 대한 반응 표로서 델타 통계량을 사용하여 순위를 나타내었다. 여기서도 시간이 가장 큰 영향을 주는 인자이며, 압력이 가장 작은 영향을 주는 인자이다. 이러한 결과는 Table 6과 동일하다. Fig. 6은 Table 7의 결과를 그림으로 보여준다.

[Table 7] Response of the mean values of shear force

Level	Temperature	Pressure	Time	Humidity
1	1068	1055	1014	1047
2	1121	1074	1127	1080
3	1035	1095	1084	1097
Delta	86	40	113	49
Rank	2	4	1	3



[Fig. 6] Response of the mean values of shear force for temperature, pressure, time and humidity

Table 8은 전단력의 SN비에 대한 분산 분석의 결과이다. Minitab의 분산 분석 중 일반선형모형을 사용하였다. 분산 분석표에서 변동이 작은 압력과 습도의 변동을 오차 변동으로 처리하였다. F 검정의 결과, 온도와 시간의 F₀ 값이 각각 4.39, 8.39이다. 그리고 온도와 시간의 p값이 각각 0.098, 0.037이다. 따라서 온도는 90% 신뢰수준에서, 그리고 시간은 95% 신뢰수준에서 유의함을 보여주고 있다.

[Table 8] Analysis of variance for SN ratio

Source	DF	SS	MS	F ₀	P
Temperature	2	0.67992	0.33996	4.39	0.098
Time	2	1.29990	0.64995	8.39	0.037
Error	4	0.30986	0.07746		
Total	8	2.28968			

5. 결론

기계 부품 사이의 누설을 방지하기 위하여 사용되는 비석면 FCM 가스켓 설계에 다구찌 기법을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 가스켓 전단력 측정장치를 설계·제작하고 통계 소프트웨어를 사용하여 실험계획법을 적용한 가스켓 설계 시스템을 구축하였다.
2. 직교배열표를 이용하는 실험계획법에 근거하여 실험을 수행하고 다구찌 기법에 따라 망대 SN비를 산출하여 시간과 온도가 전단력에 큰 영향을 미치며, 압력과 습도는 상대적으로 작은 영향을 미치는 것을 밝혔다.
3. 망대 SN비에 대하여 분산분석을 수행하여 시간과 온도는 신뢰수준 95%와 90%에서 유의한 결과를 보이고 있음을 보였다.
4. 이러한 직교배열표를 이용한 실험계획법과 다구찌 기법을 사용하여 실험 횟수를 줄이고 전단력이 최대대로 되는 가스켓의 강건 설계가 가능함을 보였다.

References

[1] H. K. Chung, "Hazard of asbestos and effects on the human body", Journal of Industrial Safety, Vol. 72, pp. 84-87, 1990.

[2] D. E. Czernik, Gaskets Design, Slection, and Testing, pp.153-187, McGraw-Hill, 1996

[3] S. Banerji, "Orthonal Array Approach for Test Case Optimization," Int. Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 1, Issue 9, 2012

[4] G. S. Peace, Taguchi Methods, Addison-Wesley Publishing Co., pp.1-5, 1993.

[5] H. Y. Yoo, "A Study on the Forming Conditions of a Forging Piston by using the Finite Element Simulation and the Taguchi Method," Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 5, pp.1990-1995, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.5.1990>

[6] J. C. Park, K. M. Kim, K. H. Kim, " Minimization of Warpage in Plastic Injection-Molded Parts Based on the 'Pick-the-Winner' Rule and Design Space Reduction Method," Journal of Korea Cooperation Society, Vol. 11, No. 4, pp.1171-1177, 2010
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.4.1171>ww

[7] G. Taguchi, Introduction to Quality Engineering, Kraus International Publications, pp.104-105, 1986

[8] J. M. Yang, D. Y. Jeong, J. E. Chung, "Optimization of Bonding Conditions of Fiber Elastomer Coating Matter using Design of Experiments," Journal of Korea University of Technology and Education, Vol. 15, No. 1, pp. 40-48, 2008

[9] GMNA(General Motors North America) 9985912, GM Factory Fill, 2004

[10] S. B Lee, Application of Taguchi Method using the MINITAB, Eretec Publishing Co., pp.30-32, 2009

정진은(Jin-Eun Chung)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 대학원 기계공학과 (공학사)
- 1990년 8월 : 서울대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1991년 2월 : 한국과학기술연구원 연구원
- 1992년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

열유체 시스템, 동력장치, 시스템 신뢰성

안 중 규(Jueng-Kyu Ahn)

[정회원]



- 2012년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과 석사과정

<관심분야>

열유체 시스템, HEV, 시스템 제어