

다구찌법을 이용한 소음저감용 ER 패널의 파라미터 설계 Parameter Design of an ER Panel for Noise Reduction using Taguchi Method

윤영민*·김재환**·최승복**

Young-Min Yun, Jaehwan Kim and Seung-Bok Choi

Key Words : ER Fluid(ER 유체), ER Panel(ER 패널), Taguchi Method(다구찌법), Parameter Design(파라미터설계), Transmission Loss(투과손실)

ABSTRACT

This paper presents a parameter design of an Electrorheological(ER) panel for noise reduction using Taguchi method. Taguchi method is a robust design method that determines control parameters in the presence of noise effect. Host structure thickness, spacer thickness, base oil viscosity and the weight ratio of ER particles are chosen for the control factors. A test setup in an SAE J1400 facility is used to analyze the sound transmission loss. The sensitivity of each factor with signal-to-noise(S/N) ratio and analysis of variance are investigated. The analysis results show that the weight ratio of ER particle and base oil viscosity of the ER fluid mostly affects the noise reduction in the presence of electric field. Based on the Taguchi method, an optimal configuration was designed and comparison is made with experimental result for the verification.

1. 서론

최근 들어 자동차나 항공산업분야의 발달로 실내용 유입되는 소음에 대한 관심이 커지면서 구조물의 진동에 의해 발생하는 소음을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 실내용 복사되는 소음을 제어하기 위해 수동적인 방법(passive method)과 능동적인 방법(active method)을 적용할 수 있다. 수동적인 방법으로서 소음원의 주위를 감싸므로써 소음이 전달되는 것을 차단하거나 흡음재를 이용하여 투과손실에 변화를 줄 수 있고 이러한 방법은 고주파수 대역에서는 큰 효과를 보여주지만 저주파수 대역에서는 거의 영향을 주지 못한다. 이에 반해 능동적인 방법은 제어기와 작동기를 이용하여 음장을 억제하는 방법으로 저주파 영역에서 매우 큰 효과를 발휘한다. 능동소음 제어 기법에는 스피커 등의 부가적인 음원을 이용하여 음장을 억제하는 방법(active noise control)과 소음의 원인이 되는 구조물에 직접 제어 입력을 가함으로써 구조물의 거동을 제어하여 음장을 억제하는 방법(active structural acoustic control)등이 있다^(1,2). 최근 지능 재료를 이용한 능동적인 방법을 이용하여 진동과 소음을 저감시키기 위한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다^(3,4). 지능재료는 주변 환경의 변화를 감지하고 필요한 응답을 구조물에 전달시켜주는 재료이다. 이 중 압전재료가 가장 많이 사용되며 이러한 재료로 구성된 압전지능구조물의 제어 성능은 가진기와 감지기의 위치와 크기에 큰 영향을 받는다.

본 연구에서는 지능구조물의 구성 매체로써 작동 능력을 보유하고 있는 ER(Electro-Rheological)유체를 이용

하였다. ER 유체는 부하 되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 말하며, 비전도성 용매에 전도성을 갖는 입자들을 분산시킨 콜로이드(colloidal) 용액이다. ER 유체는 전기장 무부하 시 랜덤구조를 갖고 있는 뉴토니안(newtonian)유체 특성을 갖지만, 전기장 부하 시 항복응력을 갖는 빙햄(bingham)유체로 변하게 된다. ER 유체는 액상이나 고상으로 빨리 변화하는 가역적인 유동성질을 가지고 있으며 전기장의 세기를 조절하여 항복응력을 연속적으로 변화시킬 수 있다. 따라서 이러한 특징을 이용하여 보나 평판과 같은 구조물에 삽입하면 구조물의 감쇠와 강성과 같은 동특성을 전기장에 따라 제어할 수 있어 유연 구조물의 진동제어 분야에 대한 연구가 수행되어 왔다^(5,6). 그러나 ER 유체를 이용한 소음제어에 대한 연구는 미비한 실정이다. 여기서 제안된 ER 패널은 샌드위치 형태로 전극인 알루미늄 박판 사이에 ER 유체를 채워 제작하였다. 이 처럼 ER 패널의 소음저감에 영향을 미치는 많은 관련 인자들을 변화시키면서 설계인자를 찾기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 이에 효율적인 통계 분석 방법인 다구찌법을 이용하면 적은 수의 실험으로 완전요인 실험과 같은 효과와 정확성을 보장 받게 된다.⁽⁷⁻⁹⁾

젠이찌 다구찌(Genichi Taguchi)에 의해 제안되어 제품, 공정설계 및 성능 개선에 적용되고 있는 다구찌법은 기존의 실험 계획법과는 달리 어떤 실험의 최적 조건을 결정하는 기준을 특성치의 산포로 정의하며 특성치의 산포가 적은 실험조건을 최적 조건으로 결정한다. 특성치의 산포는 제어가 어려운 잡음인자(noise factor)에 의해 발생하며 S/N(Signal to Noise ratio)값에 의해 산포의 정도를 알 수 있다. S/N 값은 특성치에 따라 일정한 목표값을 갖는 망목특성(Nominal-the-best), 작으면 작을수록 좋은 값인 망소특성(Smaller-the-better), 크면 클수록 좋은 값인 망대특성(Larger-the-better)으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 300~2,000Hz 대역에서의 전기장 무부하시와 1.0kV/mm 부하시 투과손실 overall value의 차를 특성값으로 하는 망대특성의 S/N 값으로 하였으며,

* 인하대학교 대학원 기계공학과
E-mail : yunym@hotnail.com
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

** 인하대학교 기계공학과

잔향실(reverberation chamber)과 반무향실 (semi anechoic chamber)로 구성된 SAE J1400⁽¹⁰⁾ 연구 설비를 이용하여 ER 패널의 성능을 나타내는 투과손실(TL, Transmission Loss)을 구하고, 통계적 분석 방법인 다구찌법(Taguchi method)을 이용하여 소음저감을 위한 ER 패널의 파라미터설계(parameter design)를 통계 패키지 Minitab⁽¹¹⁾을 이용하여 수행하였다. 또한 최적설계 된 ER 패널과 초기 설계된 ER 패널을 비교하여 고찰하였다.

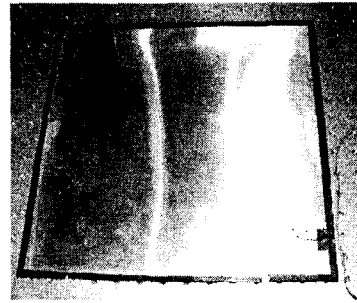


Fig. 1 Configuration of ER Panel

2. 다구찌법을 적용한 ER 패널의 설계

2.1 ER 패널의 구조

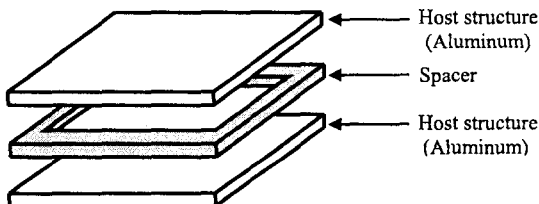
Fig. 1은 본 연구에서 사용된 ER 패널을 나타내고 있다. 350 X 350mm의 전극(electrode)인 두 개의 알루미늄(aluminum) 박판사이에 ER 유체를 삽입하기 위한 스페이서를 만들었으며 그 사이에 ER 유체를 삽입하였다. 초기 설계된 ER 패널은 Table 1과 같이 제작하였으며 ER 입자는 전분(starch)계 입자와 실리콘 오일을 사용하였다.

2.2 인자의 수준 결정

실험에 있어서 데이터 산포에 영향을 준다고 생각되는 무수히 존재하는 원인들 중에 실험에 직접 취급되는 요인을 인자(factor)라고 하며, 실험을 하기 위한 인자의 여러 가지 조건을 인자의 수준(level)이라고 한다. 본 실험에서는 ER 패널의 기구적인 인자와 ER 유체의 본질적인 특성에 대한 인자를 고려하여 음향투과손실에 영향을 미치는 제어인자를 선정하였다. 제어인자는 알루미늄 박판의 두께(A), 스페이서의 두께(B), ER 유체의 입자중량비(C), 오일점도(D)를 선정하였으며, 각 인자의 수준 수는 3 수준으로 하였다. Table 2는 실험에 사용된 인자와 각 인자의 수준을 나타내고 있다.

Host structure thickness (mm)	0.5
Spacer thickness (mm)	2.0
Weight ratio (%)	30
Oil Viscosity (CS)	30

Table 1. Dimensions of the initial design



2.3 직교배열표의 작성

직교배열표는 실험계획법을 사용할 경우 인자의 수와 각 인자별 수준 수에 따라 적합한 실험횟수와 실험 조건을 배열한 표로서 적은 수의 실험으로 많은 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 사용하였으며 Table 3은 인자와 인자별 수준을 할당한 직교배열표를 나타내었다.

Factors		Levels		
		1	2	3
A	Host structure thickness (mm)	0.6	0.8	1.0
B	Spacer thickness (mm)	1.0	1.5	2.0
C	Weight ratio (%)	40	50	60
D	Oil Viscosity (CS)	10	30	50

Table 2. Factors and levels

Trial No.	Column No.			
	1	2	3	4
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

Table 3. Orthogonal array table of $L_9(3^4)$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 투과손실 실험장치

Fig. 2 는 본 연구에서 제안한 ER 패널의 소음저감의 성능향상 평가를 위해 사용된 투과손실 측정 장치의 개략도이다. 투과손실 측정 장치는 두 개의 인접한 잔향실과 무향실로 구성되어 있고, 잔향실의 한면에 ER 패널을 설치 할 수 있도록 하였다. 잔향실과 무향실은 각각 확산음장(diffused field)과 자유음장(free field)을 제한된 공간 내에 재현하기 위한 것이다. 잔향실 내부에는 3 개의 음원스피커를 두고 음을 방사하여 ER 패널에 난입사파가 되도록 하였다. ER 패널에 고전압 앰프로 1.0kV/mm 전기장을 부하하고 투과된 음압레벨(SPL, Sound Pressure Level)은 마이크로폰을 사용하여 측정 한다.

3.2 투과손실 측정 방법

본 연구에서는 SAE J1400 방법론을 이용하여 투과손실을 측정한다. 투과손실은 음원실에서의 전체파워와 수음실에서의 전체파워의 비로 나타낼 수 있다. 이것을 음압의 차이와 시편의 물성치로 나타내면 다음과 같다.

$$TL = MNR - 10 \log(A/S\alpha) \quad (1)$$

여기서, MNR 은 음원실과 수음실에서의 음압레벨(SPL)차, A 는 시편의 면적, $S\alpha$ 는 수음실의 전체 흡음률을 나타낸다. 식(1)에서 $10 \log(A/S\alpha)$ 은 같은 면적의 시편에 대해 항상 일정하기 때문에, 보정계수(Correction Factor)로 대체할 수 있다. 보정계수(CF)를 결정하기 위해 1.5mm 두께의 알루미늄 패널을 사용하였고, 질량 법칙에 의해 300~2,000Hz 에서의 투과손실을 식 (2)에 의해 이론적으로 계산한다.

$$TL(\text{reference}) = 20 \log_{10}^W + \log_{10} f - 47.2 \quad (2)$$

여기서, $TL(\text{reference})$ 은 1.5mm 두께 알루미늄 패널의 이론적 투과손실을, W 는 알루미늄 패널의 표면 밀도 (kg/m^2), f 는 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수를 나타낸다.

먼저 보정계수(CF)을 구하기 위해 1.5mm 알루미늄 패널을 부착하고, 300~2,000Hz 주파수 대역의 랜덤 노이즈를 사용하여, 음원실과 수음실의 음압레벨차(MNR)를 측정한다. 계산된 이론적 투과손실($TL_{\text{reference}}$)과 측정된 음압레벨차($MNR_{\text{reference}}$)을 이용하여 각 1/3 옥타브 밴드에 대한 보정계수를 구할 수 있다.

$$CF = MNR(\text{reference}) - TL(\text{reference}) \quad (3)$$

결론적으로, 보정계수와 ER 패널 시편의 음압레벨차를 측정하여 투과손실을 다음과 같이 계산 할수 있다.

$$TL(\text{unknown}) = MNR(\text{unknown}) - CF \quad (4)$$

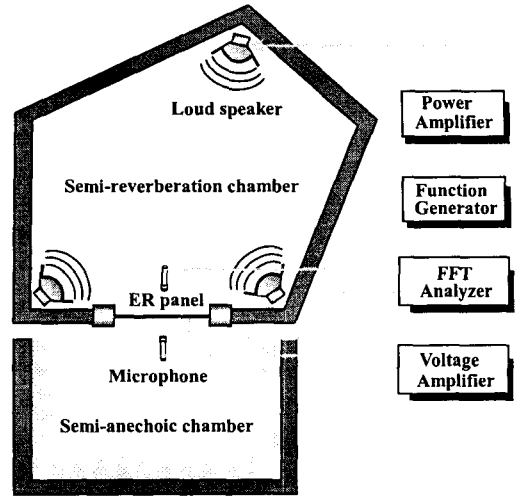


Fig. 2 Experimental apparatus for the Transmission loss of ER panel

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 SN 비

앞에서 언급된 직교배열표를 가지고 투과손실 시험을 수행하는데, 이때 제품의 특성을 나타내는 특성값은 전기장 무 부하시와 1.0kV/mm 부하시 투과손실의 overall value 의 차를 기준으로 하였다. 측정된 투과손실 값들의 결과를 Table 4 에 나타내었다. 망대특성의 S/N 값은 식(5)와 같이 정의하고 있다.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (5)$$

여기서 y_i 는 특성치이며 n 은 실험 반복수이다.

특성치의 산포는 S/N 값이 클수록 줄어들기 때문에 S/N 값이 가장 큰 실험 조건을 최적조건으로 정하게 된다. 그리고 망대특성의 경우 S/N 값이 가장 큰 조건이 산포가 가장 적을 뿐만 아니라 동시에 특성치 자체의 값도 가장 큰 경우가 되므로 효과적인 분석이 이루어지게 된다.

4.2 분산분석

분산분석(Analysis of variance)이란 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 인자 마다의 제곱합으로 분해 하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자를 찾아내는 방법이다. 분산분석에서 중요한 지수인 F 값은 각 인자의 자유도와 제곱합을 구하여 제곱합을 자유도로 나누어 제곱평균을 구한 후 오차의 제곱평균의 비를 각 인자의 F 값이라 한다. F 값이 다른 인자에 비해 현저히 작을 경우 이 인자를 오차로 분류하여 제곱평균에 포함시키는 것을 풀링(pooling)이라 하며, 이러한 과정을 통해 최종적인 F 값을 결정하게 된다. F 값이 클수록 오차의 분산에 비해서 인자가 크다는 것을 의미하여 이것은 각 인자의 중요도를 나타내고 있다. Table 5는 각 제어인자에 대한 분산분석을 나타내고 있으며, ER 유체의 입자중량비(C)가 가장 중요한 인자이다.

Trial No.	Column No.				Results	
	1	2	3	4	Means	SN ratio
1	1	1	1	1	0.61	-4.44
2	1	2	2	2	0.72	-2.97
3	1	3	3	3	0.81	-1.83
4	2	1	2	3	0.71	-2.97
5	2	2	3	1	0.77	-2.27
6	2	3	1	2	0.74	-2.62
7	3	1	3	2	0.8	-1.94
8	3	2	1	3	0.78	-2.16
9	3	3	2	1	0.73	-2.73

Table 4. Results of Means and SN ratio

Factor	S	Φ	V	F
A	0.07	2	0.035	11.66
B	0.05	2	0.025	8.3
C	0.13	2	0.065	21.6*
D	0.08	2	0.04	13.3
e	0.006	2	0.003	
T	0.33	8		

Table 5. ANOVA of control factors

4.3 최적 조건 결정

Minitab 을 이용하여 최적조건을 결정하였고 Table 6 과 Fig. 3 은 제어인자 및 수준별 기여율을 나타내고 있으며, Fig. 4 와 Fig. 5 로 도시하였다. S/N 값이 가장 큰 인자의 수준이 최적조건이며 전기장 1.0kV/mm 부하 시의 경우 알루미늄 박판의 두께(A₃) 1.0mm, 스페이서의 두께(B₃) 2.0mm, ER 유체의 입자중량비(C₃) 60%, 오일점도

(D₃) 50CS 로 결정되었으며 이 수준의 조합에서 투과손실이 가장 큰 동시에 그 산포가 가장 적은 최적조건으로 결정되었다.

4.4 예측값의 결정 및 확인

위에서 구한 최적 조건에서의 전기장 무부하시와 전기장 1.0kV/mm 부하 시 투과손실의 차를 Minitab 으로 예측하였으며, 실제로 최적조건에서 확인한 실험을 Fig 6 에 나타내었다. 전기장 무부하시와 1.0kV/mm 부하시 1.2 dB 소음저감 성능을 나타내고 있으며, 또한 초기에 설계한 ER 패널과 비교하였다. 초기 설계보다 다구찌법을 이용해서 얻은 최적설계 된 ER 패널의 투과손실 overall value 가 약 2 dB 소음저감됨을 보였다(Fig 7). 이것으로 다구찌법을 적용함으로써 산포의 감소와 ER 패널의 소음저감 성능의 향상을 가져올 수 있음을 보여주고 있다.

Level	Factor				Total
	A	B	C	D	
1	-3.08	-3.12	-3.07	-3.15	-7.98
2	-2.62	-2.47	-2.89	-2.51	
3	-2.28	-2.39	-2.01	-2.32	
Delta	0.8	0.72	1.06	0.83	3.41
Contribution ratio (%)	23.58	21.21	31.00	24.21	100

Table 6. Responses and main effects for the S/N

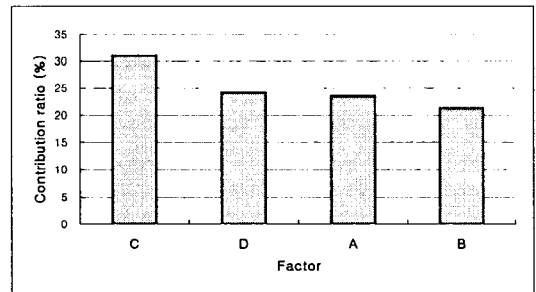


Fig. 3 Pareto chart for experimental factors

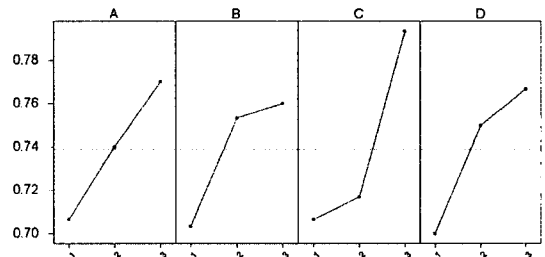


Fig. 4 Main effects plot for Means

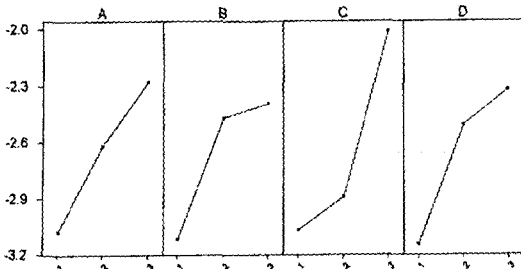


Fig. 5 Main effects plot for SN ratio

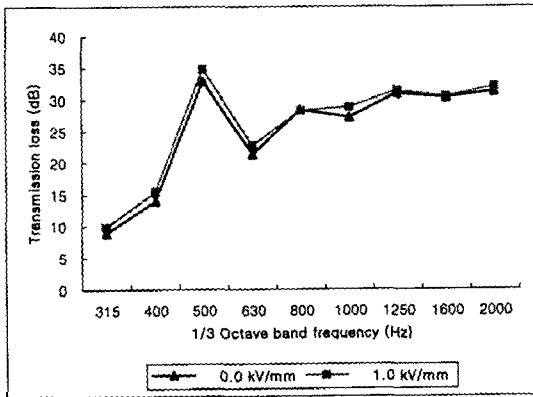


Fig. 6 Transmission loss results for optimal design with no voltage and 1.0kV/mm voltage applied

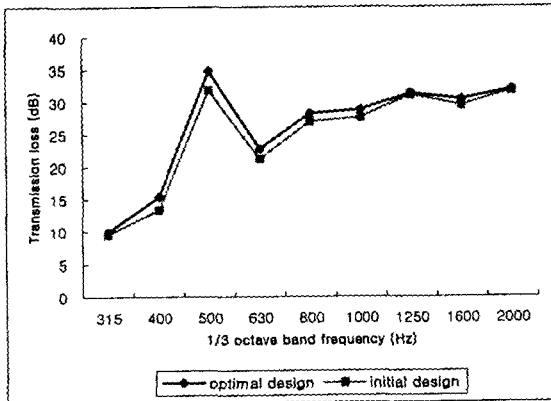


Fig. 7 Transmission loss results with optimal design and initial design

5. 결론

본 연구에서는 소음저감용 ER 패널의 파라미터 설계를 하기 위해 다구찌법을 적용하였다. ER 패널의 기구적인 인자와 ER 유체의 본질적인 특성에 대한 인자를 고

려하여 ER 패널의 투과손실에 영향을 미치는 인자를 선정하였으며, $L_9(3^4)$ 직교배열법을 이용하여 최소한의 반복 실험을 통해 분산분석을 행하여 각 인자들이 투과손실에 영향을 주는 정도를 정확히 판별할 수 있었다. 투과손실의 측정방법은 SAE J1400 을 이용하여 측정하였으며, 전기장 1.0kV/mm 부하 시에 ER 유체의 입자증량비와 오일점도가 ER 패널의 투과손실에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

다구찌법을 적용함으로써 투과손실이 가장 크고 동시에 산포가 가장 적은 조건을 구할 수 있었으며, Minitab 을 통해 예측하였으며 실험을 통해 검증하였다. 또한 초기에 설계한 ER 패널과 비교하였으며, 초기 설계보다 다구찌법을 이용해서 얻은 최적설계 된 ER 패널의 투과손실 overall value 가 약 2 dB 증가됨으로써 다구찌법의 타당성을 확인 할 수 있었다.

후기

본 연구는 국가지정연구실(National Research Laboratory : NRL) 프로그램의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) J. Kim, B. KO, J. Lee and M. Nam, 1998, "Optimal design of Piezoelectric smart structures for active cabin noise control", 5th Annual Symp. On Smart Structures and Materials(SPIE), Vol. 3323, pp. 228-223, San Diego CA, USA.
- (2) 김재환, 1996, "압전 지능 구조물의 원리와 소음 제어에의 응용", 한국소음진동공학회지, Vol. 6, No. 3, pp. 267-273.
- (3) N. W. Hagood, A. von Flotow, 1991, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks", Journal of Sound and Vibration, Vol. 146, No. 2, pp. 243-268.
- (4) J. P. Coulter, T. G. Duclos, and D. N. Acker, 1989, "The Usage of Electrorheological Materials in Viscoelastic Layer Damping Application", Proceedings of damping, Palm Beach, Florida.
- (5) S.B. Choi, Y. K. Park, and J. D. Kim, 1993, "Vibration of characteristics of a Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-Rheological Fluid", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 35, No. 9, pp. 757-768.
- (6) Y. Choi, A. F. Spencher, and H. Conrad, 1992, "Response of Electro-Rheological Fluid Filled Laminated Composites to Forced Vibration", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 3, pp. 17-29.
- (7) 김명업, 이두호, 1999, "다구찌 직교배열을 이용한 승용차의 실내소음 분석 및 개선", 한국소음진동공학회, 제 9 권, 제 5 호, pp. 998-1004.
- (8) 박성현, 1982, 현대실험계획법, 민영사.
- (9) Phadke, M. S., 1989, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice-Hall.
- (10) SAE Standards, Document Number J1400 1990. Laboratory measurements of the airborne sound barrier performance of automotive materials and assemblies.
- (11) 이상복, 2001, MINITAB 을 이용한 다구찌 기법 활용, 이태테크.