

# 다구찌법을 이용한 ER 댐퍼의 강건 설계 Robust Design of an ER Damper using Taguchi Method

윤영민\*·배광식\*\*·김재환·최승복\*\*\*

Young-Min Yun, Kwang-Sik Bae, Jaehwan Kim and Seung-Bok Choi

Key Words : ER Fluid(ER 유체), ER Damper(ER 댐퍼), Damping Force(댐핑력), 다구찌법(Taguchi Method), 강건설계(Robust Design)

## ABSTRACT

This Paper presents a robust design of an Electro-rheological(ER) damper using Taguchi method. Taguchi method is a robust design method that determines control parameters in the presence of noise effect. Electrode length, electrode gap, base oil viscosity and the weight ratio of ER particles are chosen for the control parameters and the temperature is considered to be a noise factor. The sensitivity of each factor with signal-to-noise(S/N) ratio and analysis of variance are investigated. The analysis results show that the electrode length and base oil viscosity of the ER fluid mostly affect the damping force in the absence of electric field. On the other hand, when the voltage is applied to the ER damper, the electrode length and the weight ratio of ER fluid exhibit significant effect. Based on the Taguchi method, an optimal configuration was designed and the robustness of the designed ER damper was validated by comparing the analysis and experimental results.

## 1. 서론

ER(Electro-Rheological)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. 이러한 특성을 가진 ER 유체를 이용한 자동차용 ER 댐퍼 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국의 Petek 은 기존의 상용댐퍼와 같은 수준의 댐핑력을 발생시키는 단일 튜브 형태의 가변 ER 댐퍼를 제작하여 그 성능을 실험적으로 고찰하였다.<sup>(1)</sup> 그 결과, 전기장 증가에 따라 댐핑력이 증가됨을 입증하였고, 4W 이하의 낮은 전력 소모가 필요함을 고찰하였다. 또한, 가변 ER 댐퍼를 자동차 뒤쪽 현가장치에 장착하여 도로 노면시험과 범프(bump)시험시, 전기장 부하에 의해 진동절연 성능이 향상됨을 발표하였다. Sturk 등은 자동차 전원에서 작동이 가능한 가변 ER 댐퍼용 고전압공급장치를 제안하고, 이것의 실험가능성을 살펴보고자 실험실 수준의 가변 ER 댐퍼를 제작하고, 1/4 차량 모델의 현가장치에 적용하여

그 성능을 실험적으로 고찰하였다.<sup>(2)</sup> 한편, 국내에서도 ER 댐퍼에 관한 연구가 활발히 진행 중이며, 실시간 실험 모의실험(HILS)을 통하여 ER 댐퍼의 제어성능을 고찰하였다.<sup>(3, 4)</sup>

그러나, ER 유체를 사용하여 자동차의 현가장치 등의 응용 장치에 적용하기 위해서는 온도변화와의 관계성 등 ER 유체의 본질적인 특성과 응용시 ER 유체와 연계된 기구적 설계 변수에 대한 영향 등의 문제점이 나타나고 있다.

이러한 문제 중에 본 연구는 실제 중형차에 설치될 수 있는 댐퍼를 근거로 한 실린더형 ER 댐퍼가 실차에 응용되는 경우 온도변화에 따른 ER 댐퍼의 댐핑력 변화와 강건한 최적의 설계인자의 선정을 고찰하였다.

이처럼 ER 댐퍼의 댐핑력에 영향을 미치는 많은 관련 인자들을 변화시키면서 온도에 강건한 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.<sup>(5-9)</sup>

겐이찌 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 제어기 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

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

\*\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 인하대학교 기계공학과

(Larger-the-better)으로 정의 할 수 있다. 본 실험에서는 망대특성을 사용하였으며, 특성치는 온도변화에 강건하며 전기장 무부하 시와 전기장 부하 시(5 kV/mm) 발생하는 ER 댐퍼의 댐핑력이며, 통계 패키지로 Minitab 을 사용하여 특성치의 최적 조건에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 다구찌법을 적용한 ER 댐퍼 설계

### 2.1 ER 댐퍼의 구조

본 실험에서 제안된 실린더형 ER 댐퍼의 구조를 Fig. 1 에 도시하였다. ER 댐퍼는 외측 실린더, 내측 실린더 그리고 피스톤으로 구분 할 수 있으며, 내외측 실린더 사이에는 ER 유체가 유동하도록 덕트(duct)로 구성되었다. 내측 실린더와 외측 실린더는 각각 (+), (-) 전원이 연결되어 전극사이를 유동하는 ER 유체에 전기장을 부하 하는 전극판의 역할을 한다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부챔버, 아래쪽을 하부챔버로 정의하였고, 이 두 챔버에 ER 유체가 충전 되어 있다. 외부 가진에 의하여 피스톤로드(piston rod)와 피스톤은 상하 운동을 하게 되어 한쪽 챔버의 유체는 내외측 실린더 사이에 구성된 원형 덕트를 통하여 다른 쪽의 챔버로 유동하게 된다. 하부챔버는 크게 두 부분, 즉 댐퍼 내부의 피스톤 하부와 댐퍼 외부의 가스챔버로 구성된다. 가스챔버는 급격한 피스톤로드의 운동으로 하부챔버로 전해지는 급격한 압력변화를 흡수하고 이 때 발생될 수 있는 기포 등의 영향을 방지하는 역할과 열팽창에 따른 유체부피를 수용하는 축압기(accumulator)로 작동하게 된다.

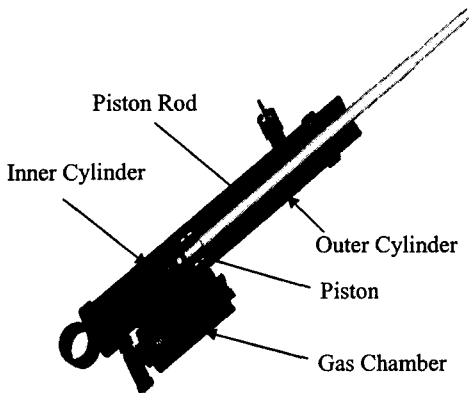


Fig. 1 Configuration of ER Damper

### 2.2 인자와 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 댐퍼의 구조적인 인자와 ER 유체의 본질적인 특성에 대한 인자를 고려하여 ER 댐퍼의 댐핑력에 영향을 미치는 제어인자를 선정하였다. 제어인자는 전극길이(A), 전극간극(B), ER 유체의 입자중량비(C), 오일점도(D)를 선정하였으며, 각 인자의 수준 수는 3 수준으로 하였다. 잡음인자로 ER 유체의 온도변화를 선정하였으며, 수준 수는 2 수준으로 하였다. Table 1 은 실험에 사용한 인자와 각 인자의 수준을 나타내고 있다.

Factors			Levels		
			1	2	3
Control	A	Electrode Length (mm)	170	200	230
	B	Electrode Gap (mm)	0.75	1	1.25
	C	Weight ratio (%)	20	30	40
	D	Oil Viscosity (CS)	10	30	50
Noise	Temperature (°C)		10	30	

Table 1. Factors and levels

### 2.3 직교배열표의 작성

직교배열표는 실험계획법을 사용할 경우 인자의 수와 각 인자별 수준 수에 따라 적합한 실험횟수와 실험조건을 배열한 표로서 적은 수의 실험으로 많은 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는  $L_9(3^4)$  직교배열표를 사용하였으며 Table 2 는 인자와 인자별 수준을 할당한 직교배열표를 나타내었다.

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

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

ER 댐퍼의 댐핑력을 측정하기 위해 Fig. 2 와 같이 유압서보밸브로 구동 되는 댐퍼시험기를 구성하였다. 댐핑력의 크기를 알아보기위해 Load Cell 을 이용했으며 자동차의 공진주파수인 1.4 Hz 의 정현파로 하고 크기는  $\pm 0.02$  m 로 주었다. 가진기의 가진변위는 LVDT 로 측정되며 A/D 컨버터를 통하여 마이크로프로세서로 저장된다. 댐퍼에 가해지는 전기장은 마이크로프로세서에서 D/A 컨버터를 통하여 내보내는 전압을 고전압 앰프로 1000 배 증폭하여 0 kV/mm, 5 kV/mm 로 전기장을 부하 하고 그에따른 댐핑력을 측정했다.

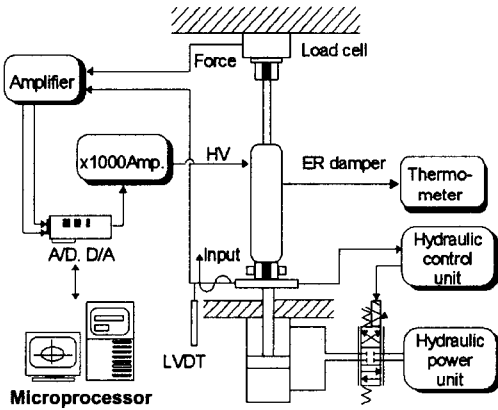


Fig. 2 Experimental apparatus for the damping force measurement

#### 3.2 실험방법

실험에 사용 된 ER 댐퍼는 중형급 승용차에 적용할 수 있도록, 외측실린더의 외경은 45 mm, 내경은 37 mm, 길이는 282 mm 로 설계하였으며, ER 입자는 스타치(starch)계 입자와 실리콘 오일을 사용하였으며, 또한 실험순서에 따른 오차를 최소화하기 위해 Table 2 의 실험조건에 대해서 실험순서를 랜덤 하게 선정하였으며 각 실험조건에 대해 2 번의 실험을 반복 수행하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

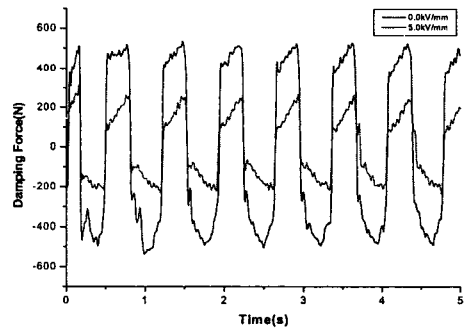
#### 4.1 SN 비

Fig. 3 은 실험번호 5 번의 조건, 전극길이 200 mm, 전극간극 1 mm, 입자중량비 40 %, 오일점도 10 CS 로 실험한 결과를 나타내고 있으며 이와 같은 방법으로 직교배열법에 대해 실험한 결과를 Table 3 와 Table 4 에 나타내었다. 망대특성의 SN 값은 다음과 같이 정의하고 있다.

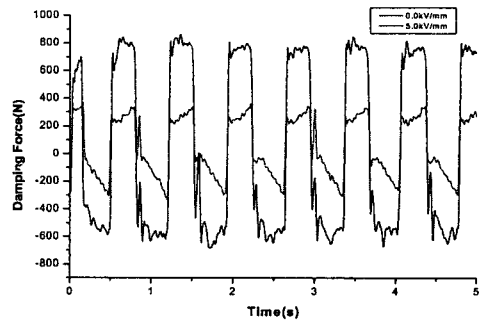
$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

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.



(a) 10°C



(b) 30°C

Fig. 3 Damping force of Trial No. 5

Trial No.	M1 (10°C)		M2 (30°C)		Means	SN ratio
1	186.76	186.78	170.18	242.84	196.64	45.65
2	185.59	198.39	286.13	309.60	244.93	47.15
3	253.34	257.77	264.90	287.62	265.90	48.46
4	436.08	463.97	443.85	430.31	443.55	52.93
5	245.80	255.53	341.02	315.86	289.55	48.99
6	231.43	238.49	361.87	307.71	284.87	48.66
7	308.66	263.19	455.43	363.50	347.69	50.30
8	284.78	273.33	421.94	386.22	341.57	50.22
9	229.53	268.80	393.66	388.13	320.03	49.40

Table 3. Results of No voltage applied (0 kV/mm)

Trial No.	M1 (10°C)		M2 (30°C)		Means	SN ratio
1	234.38	254.29	371.00	429.96	322.40	49.36
2	296.98	307.35	549.37	588.06	435.44	51.53
3	377.57	317.76	545.63	542.87	445.96	52.27
4	601.96	602.41	850.34	848.89	725.90	56.84
5	525.12	521.30	822.05	807.63	669.02	55.88
6	276.66	295.23	463.98	493.65	382.38	50.79
7	823.29	785.08	1439.49	1366.36	1103.56	59.88
8	510.28	491.28	888.91	853.63	686.03	55.76
9	452.26	472.91	620.00	705.21	562.60	54.57

Table 4. Results of Voltage applied (5 kV/mm)

#### 4.2 분산분석

분산분석(Analysis of variance)이란 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 인자마다의 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 비해 인자가 크다는 것을 의미하여 이것은 각 인자의 중요도를 나타내고 있다. Table 5와 Table 6은 전기장 무부하 시와 5 kV/mm 부하 시에 대한 분산분석을 나타내고 있다.

Factor	S	Φ	V	F
A	2.00	2	1.00	14.28*
B	0.15	2	-	
C	0.47	2	0.23	3.29
D	1.13	2	0.57	8.14
e	0.15	2	0.07	
T	3.75	8		

Table 5. ANOVA of No voltage applied (0 kV/mm)

Factor	S	Φ	V	F
A	5.44	2	2.72	11.34*
B	1.36	2	0.68	2.84
C	2.38	2	1.19	4.96
D	0.48	2	-	
e	0.48	2	0.24	
T	9.66	8		

Table 6. ANOVA of Voltage applied (5 kV/mm)

전기장 무 부하 시의 경우, 전극길기와 오일점도가 ER 댐퍼 내의 ER 유체의 온도 변화에 강건하며 특성치에 영향을 많이 미치는 인자임을 알 수 있으며 전기장 부하 시에는 전극길이, 입자중량비, 전극간극의 순으로 영향을 미치고 있다. 상대적으로 무 부하 시에 영향을 많이 미친 오일점도는 전기장 부하 시에는 영향이 아주 작음을 보여주고 있다.

#### 4.3 최적 조건의 결정

Minitab<sup>(10)</sup>을 이용하여 최적조건을 결정하였고 Table 7과 Table 8은 제어인자 및 수준별 기여율을 나타내고 있으며, Fig. 4와 Fig. 5로 도시하였다. S/N 값이 가장 큰 인자의 수준이 최적조건이며 전기장 무 부하 시의 경우 전극길이 200 mm, 전극간극 0.75 mm, 입자중량비 30 %, 오일점도 50 CS로 결정되었으며 이 수준의 조합에서 댐핑력이 가장 큰 동시에 그 산포가 가장 적으며 온도변화에 영향을 받지 않는다는 것을 보여주고 있다. 전기장 부하 시에는 230 mm, 전극간극 0.75 mm, 입자중량비 40 %, 오일점도 50 CS가 최적조건으로 결정되었다.

Level	Factor				Total
	A	B	C	D	
1	47.09	49.63	48.18	48.02	147.26
2	50.19	48.79	49.83	48.70	
3	49.98	48.84	49.25	50.54	
Delta	3.10	0.84	1.65	2.52	8.11
Contribution ratio (%)	38.22	10.36	20.35	31.07	100

Table 6. Responses and main effects for the S/N of No voltage applied (0 kV/mm)

Level	Factor				Total
	A	B	C	D	
1	51.06	55.36	51.97	53.27	162.3
2	54.51	54.39	54.31	54.07	
3	56.73	52.55	56.01	54.96	
Delta	5.67	2.81	4.04	1.69	14.17
Contribution ratio (%)	40.0	19.7	28.5	11.8	100

Table 7. Responses and main effects for the S/N of voltage applied (5 kV/mm)

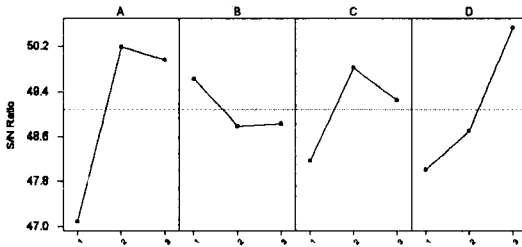


Fig. 4 Main effects plot for SN ratio of No Voltage applied (0 kV/mm)

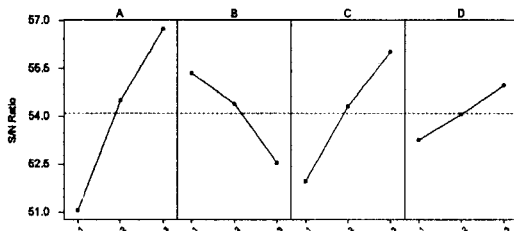


Fig. 5 Main effects plot for SN ratio of Voltage applied (5 kV/mm)

#### 4.4 예측값의 결정 및 확인

위에서 구한 최적 조건에서의 전기장 무부하 시와 전기장 부하 시의 S/N 값을 예측하였다. 전기장 무부하 시에서의 최적조건에서의 예측값은 52.93 으로 평균값 49.08 보다 7.48% 향상되었으며, 전기장 부하 시의 경우도 평균값 54.09 에서 60.76 으로 12.33%의 향상이 예측되었다. 이것으로 다구찌법을 적용함으로써 산포의 감소와 댐핑력의 향상을 가져올 수 있음을 보여주고 있다.

실제로 최적조건에서의 확인 실험결과 S/N 값이 전기장 무부하 시는 53.45, 전기장 부하 시는 62.41 로 나타나 다구찌법을 통한 분석이 타당함을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 중형급 승용차용 ER 댐퍼의 온도변화에 강건한 설계를 하기 위해 다구찌법을 적용하였다. ER 댐퍼의 기구적인 인자와 ER 유체의 본질적인 특성에 대한 인자를 고려하여 ER 댐퍼의 댐핑력에 영향을 미치는 인자를 선정하였으며  $L_9(3^4)$  직교배열법을 이용하여 최소한의 반복 실험을 통해 분산분석을 행하여 각 인자들이 댐핑력에 영향을 주는 정도를 정확히 판별할 수 있었다. 전기장 무부하 시에는 전극길이와 오일점도가, 전기장 부하 시에는 전극길이와 입자중량비가 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

다구찌법을 적용함으로써 댐핑력이 가장 크고 동시에 산포가 가장 적은 조건을 구할 수 있었으며, 전기장 무부하 시와 전기장 부하 시에 S/N 값이 7.48 %와 12.33 %의 향상이 예측되었으며 실제 실험을 통해 검증함으로써 다구찌법의 타당성을 확인 할 수 있었다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

- (1) Petek., N. K., 1992, "An Electronically Controlled Shock Absorber as an Application of Electro-rheological Fluid", SAE Technical Paper Series No. 920275.

(2) M. Sturk, X. M. Wu and J. Y. Wong, 1995, "Development and Evaluation of High Voltage Supply Unit for Electrorheological Fluid Dampers", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 24, pp. 101-121.

(3) 안창섭, 최영태, 최승복, 1998, "HILS 를 통한 ER 현가장치의 성능평가", *대한기계학회논문집*, 제 22 권, 제 11 호, pp. 2061-2071.

(4) Choi, S. B., Choi, Y. T., and D. W. Park, 2000, "A Sliding Mode Control of a Full-Car Electrorheological Suspension System Via Hardware in-the-loop Simulation", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 114-121.

(5) Phillip J. Ross, 1996, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill.

(6) Ranjit K. Roy, 1990, *A Primer on the Taguchi Method*, Van Nostrand Reinhold, New York.

(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) 이상복, 2001, *MINITAB 을 이용한 다구찌 기법 활용*, 이레테크