속압쇼바 감쇠력 특성의 실험적 설계법 연구

Empirical Design Method for the Damping Force Characteristics of Shock Absorbers

백운경 · 김창민

W. K. Baek, C. M. Kim

(접수일 : 2010년 11월 03일, 수정일 : 2011년 05월 09일, 채택확정 : 2011년 05월 26일)

Key Words : Twin-tube Shock Absorber(복동형 감쇠기), Taguchi Method(다구치 방법), S/N Ratio(신호 대 잡음 비), Orthogonal Array Table(직교배열표), Multiple Regression Analysis(다중회귀분석), Design Variable(설계변수)

Abstract : A Shock absorber is one of the most important components in vehicle suspension systems. In general, many repeated analyses are required for the design of a shock absorber to satisfy the suspension characteristics of a specific automobile, like fluid flow analysis and mechanical analysis. The purpose of this study is to develop a fast design tool for shock absorber designers. One of the efficient solutions for this can be an empirical design method considering phenomenological effects from the shock absorber design variables. In order to extract the shock absorber's experimental characteristics, we used Taguchi method. This method showed that which design variables have major effects for the shock absorber's damping characteristics. This empirical design method also showed the direction of the design changes to satisfy the designer's intension.

1. 서 론

속압쇼바는 자동차의 현가부품으로서 자동차의 승차감과 주행안정성에 영향을 미치는 주요부품이다. 최근 완성차의 개발기간이 대폭 단축됨에 따라 부품업체에서도 이에 대응하여 신속한 설계능력이 요구되고 있다. 속압쇼바의 설계를 위해서는 개발차종의 다양한 동하중과 주행환경이 고려되어야 하므로 경험이 많은 설계자라 하더라도 오랜 설계시간이 요구되며 제작된 시제품에 대해서도 반복적인 실차시험을 통한 튜닝시간이 요구된다. 특히 속압쇼바는 피스톤의 위치에 따른 내부 유체의 유동과 피스톤을 구성하는 구성품의 설계변경에 따라 감쇠력 예측이 대단히 번거롭다. 따라서 속압쇼바의 감쇠력에 크게 영향을 미치는 주요인자들과 감쇠력에 대한 관계식을 실험적으로 도출하여 데이터베이스화하여 설계에 활용한다면 설계에 필요한 시간을 획기적으로 줄일 수

있다.

이러한 데이터베이스를 구축함에 있어서 전조합법, 일시일원법, Taguchi방법^{1,2)} 등과 같은 실험계획법들이 사용되어 질 수 있다. 먼저 전조합법의 경우 설계변수의 모든 경우를 데이터화하기 때문에 보다 정확한 값을 얻을 수 있겠지만 실험횟수가 방대하게 되어 현장에서 적용하기가 불편하다. 일시일원법의 실험횟수를 전조합법에 비해서 적어지지만 그 신뢰성이 전조합법에 미치지 못하기 때문에 현재는 잘 사용되지 않는 방법이다. 전조합법이 가지는 신뢰성을 유지하면서 실험횟수를 대폭 줄일 수 있는 Taguchi 방법은 이미 품질개선과 관련된 분야에서 널리 사용 중이다. 본 연구에서는 Taguchi방법을 속압쇼바의 감쇠력시험에 적용하여 인자의 감쇠력 영향도를 파악하고 실험결과를 데이터베이스화 및 공식화하여 완성차업체의 성능요구조건을 만족시키기 위한 속압쇼바의 신속한 설계방법을 제시하고자한다.

2. 속압쇼바의 설계변수와 감쇠력 시험

속압쇼바에서 감쇠력에 영향을 미치는 변수는 매

백운경(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : baekwk@pknu.ac.kr Tel : 051-629-6164
김창민 : 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과

우 많기 때문에, 이를 모두 고려하게 된다면 제품개발에 따른 시간과 비용이 비효율적이므로 감쇠력에 큰 영향을 미치는 몇 개의 주요인자 만을 고려하는 것이 적절하다. 본 연구에서는 실제 속압쇼바의 감쇠력특성연구를 수행하고 있는 전문엔지니어와의 협의를 통해 연구의 대상이 되는 속압쇼바에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되어지는 Piston valve와 Base valve를 설계대상으로 선정하였다^{3),4)}. 설계대상의 Slot 수량, Disc 수량, Hole 수량의 3가지를 설계변수로 선택하여 각각의 인자가 가지는 수준수를 결정하였다. 이에 따른 시험절차는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1 Experiment procedure

Fig. 2 Shock absorber test equipment (MTS)

Fig. 2와 같은 시험장치를 사용하여 stroke가 ± 75 mm인 상용화된 속압쇼바의 감쇠력 시험을 행하였다.

Fig. 3 과 Fig. 4는 각각 속압쇼바의 피스톤 밸브와 베이스 밸브의 전개도를 보여주고 있다.

Fig. 3 Exploded view of the piston valve

Fig. 4 Exploded view of the base valve

또한 속압쇼바의 각 설계변수 수준수를 5수준으로 하여 시험하였으며 설계변수인 Slot, Disc, Hole은 Table 1과 같은 설계범위를 가지고 있다.

Table 1 Design variable specifications

(unit : mm)

Disc	Base valve	$\Phi 22$, t0.15
	Piston valve	$\Phi 20$, t0.15
Hole		$\Phi 2.0$
Slot		w1.0, t0.15

설계대상인 twin tube shock absorber⁵⁾는 인장과 압축과정 모두에서 감쇠력을 발생한다. 감쇠력은 속도의 함수이며 이때의 속도는 Piston valve와 Base valve를 통과하는 유체의 유속과 관련이 있다. 이 때 두 밸브는 동시에 작동하지 않으며 하나의 밸브가 개방시에 다른 밸브는 닫히게 되는 방식으로 단방향의 흐름만 허용한다. Piston valve와 Base valve는 함께 작동하지 않기 때문에 두 밸브사이의 교호작용이 적다고 가정하여 실험계획을 세우면, 한 번의 실험으로 인장과 압축시 두 밸브의 영향도를 동시에

측정할 수 있다.

Piston valve와 Base valve사이의 교호작용을 무시하고 설계변수의 수준수를 모두 5수준으로 나타내면 Table 2와 같다. Table 2의 수준수는 현장의 엔지니어와의 협의에 의해 가장 많이 사용하고 있는 수준수의 범위 내에서 결정한 것이다.

Table 2 Design variable Level

D. V. Level	Slot (개)	Disc (장)	Hole (개)
1	10	2	6
2	8	3	7
3	6	4	8
4	4	5	9
5	2	6	10

이러한 수준수 범위내에서 Slot, Disc, Hole의 설계변수와 각각의 설계변수가 가지는 수준이 5이기 때문에 3인자 5수준에 대한 Table 3과 같은 직교배열표를 작성할 수 있다.

Table 3 Orthogonal array table

NO.	Slot(w1.0)(개)	Disc(t0.15)(장)	Hole(Φ2.0)(개)
1	10	2	6
2	10	3	7
3	10	4	8
4	10	5	9
5	10	6	10
6	8	2	7
7	8	3	8
8	8	4	9
9	8	5	10
10	8	6	6
11	6	2	8
12	6	3	9
13	6	4	10
14	6	5	6
15	6	6	7
16	4	2	9
17	4	3	10
18	4	4	6
19	4	5	7
20	4	6	8
21	2	2	10
22	2	3	6
23	2	4	7
24	2	5	8
25	2	6	9

Suction valve와 Intake valve는 속압쇼바의 감쇠력에 큰 영향을 미치는 요소이지만, 본 연구에서는 Suction valve와 Intake valve가 만족할만한 감쇠력을 가진다는 조건하에서 실험을 실시하였기 때문에 이에 대해서는 고려하지 않았다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 S/N비를 이용한 평가

설계변수들의 특성을 수치적으로 평가하기 위해 S/N비 중 망대특성⁶⁾의 분석에 준하여 연구를 실행하였다.

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 r은 측정값의 수, y_i 는 측정된 특성값이다. Fig. 5와 Fig. 6의 그래프를 통해서 0.065, 0.13, 0.26, 0.39, 0.52, 1.04, 1.56 m/s의 구간에서 속도의 변화에 따른 설계변수의 영향도를 확인 할 수 있다. Slot의 기울기는 속도가 증가함에 따라 감소하는데, Fig. 5 (c) 0.26 m/s의 속도에서부터 Fig. 5 (g) 1.56 m/s까지는 속도가 증가함에 따라 기울기가 크게 달라지지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Slot에 의한 감쇠력영향이 망대특성의 관점으로 볼 때 0.26 m/s이상

Fig. 5 S/N ratio in the compression process

의 구간에서는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다. 마찬가지로 Disc의 경우 Fig. 5 (a)의 기울기를 제외한 Fig. 5 (b) ~ (g)의 전 속도구간에서 가장 큰 기울기를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 전 속도구간에서 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다. Hole의 경우는 Fig. 5 (a) ~ (g)의 측정 속도구간에서 기울기가 거의 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Hole에 의한 감쇠력영향이 측정 속도구간에서 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 인장시 설계변수의 특성을 측정 속도구간에 대해서 나타낸 것이다. 실험에 의한 결과값이 Fig. 5의 인장시 설계변수 특성과 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 6 S/N ratio in the expansion process

인장과 압축시 각 속도구간에서 각 설계변수의 영향도 순위는 Table 4와 같다.

Table 4 Order of the design variable effect

Velocity (m/s)	Slot (w1.0) (개)	Disc (t0.15) (장)	Hole (Φ2.0) (개)
Com. (0.065)	1	2	3
Com. (0.13)	1	2	3
Com. (0.26)	2	1	3
Com. (0.39)	2	1	3
Com. (0.52)	2	1	3
Com. (1.04)	2	1	3
Com. (1.56)	3	1	2
Exp. (0.065)	1	2	3
Exp. (0.13)	2	1	3
Exp. (0.26)	2	1	3
Exp. (0.39)	2	1	3
Exp. (0.52)	2	1	3
Exp. (1.04)	3	1	2
Exp. (1.56)	3	1	2

3.2 설계변수의 영향 검증

망대특성의 해석기법을 적용한 S/N비를 검증하기 위하여 직교배열표에 포함되지 않은 설계변수의 임의수준수를 조합하여 그 결과를 비교·검증하였다. 이때 검증하고자 하는 설계변수의 수준수는 달리하고 나머지 설계변수의 수준수는 동일하게 실험을 실시하여 다음과 같이 F-V⁷⁾선도로 나타내었다.

3.2.1 Slot의 영향 검증

Table 4의 결과를 바탕으로 Slot은 압축과정시에 0.065 m/s와 0.13 m/s구간에서 영향도가 가장 큰 것으로 나타났다. 유사하게 인장과정시에도 0.065 m/s와 0.13 m/s구간에서 그 영향도가 다른 속도구간에 비해서 큰 것으로 나타난다. 이와 같은 결과를 검증하기 위해 Slot을 제외한 나머지 설계변수의 수준수는 동일하게 하여 시험을 실시하였다.

3.2.2 Disc의 영향 검증

Table 4의 결과값을 바탕으로 Disc는 압축과정시 저속구간인 0.065 m/s에서는 감쇠력에 큰 영향을 미치지 않지만 0.26 m/s 이상의 구간에서 S/N비의 망대특성에 준하는 해석기법에 따라 감쇠력에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 압축과정의 결과와 유사하게 나타나며, 인장

Fig. 7 Verification of the Slot effect

Fig. 8 Verification of the Disc effect

과정시의 Disc의 영향은 0.13 m/s 이상의 구간에서부터 가장 영향이 큰 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 속도가 증가함에 따라 Disc에 의한

영향이 증가하고 있다는 것으로 판단 할 수 있다. 결과값을 검증하기 위해 Disc를 제외한 나머지 설계변수의 수준수는 동일하게 하여 2회에 걸쳐 임의 조합 실험을 실시하였다.

3.2.3 Hole의 영향 검증

Table 4의 결과를 바탕으로 실험을 실시한 측정 속도구간에서 다른 설계변수에 비해 감쇠력에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타나고 있다. 하지만 인장과 압축 과정 모두에서 0.26 m/s이하의 속도구간을 제외한 측정 속도구간에서는 속도가 증가함에 따라 그 영향의 정도가 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. 압축시 1.56 m/s의 구간에서 Slot보다 큰 영향을 미치고 있으며, 인장시에는 1.04 m/s의 속도구간 이상에서 Slot보다 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 측정 속도구간에서 전체적인 값에는 큰 영향을 미치지 못한다.

Fig. 9 Verification of the Hole effect

4. 감쇠력 설계모델

4.1 감쇠력 특성식 도출

직교배열표에 의한 실험값을 바탕으로 설계변수의 조합에 따른 감쇠력을 예측하는 실험적 함수식을 구할 수 있다. 감쇠력 특성식 도출을 위해 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)⁸⁾을 이용하였다. 다중회귀분석은 독립변수와 종속변수 사이의 인과관계

에 따른 수학적 모델인 선형적 관계식을 구하여 어떤 독립변수가 주어졌을 때 이에 따른 종속변수를 예측하는 분석방법이다.

Table 5 Empirical function for the expansion stage

Velocity(m/s)	Damping Force Empirical Function
0.065	$391-32.8*Slot+28.9*Disc-4.56*Hole$
0.13	$322-15.4*Slot+55.1*Disc-4.04*Hole$
0.26	$321-7.33*slot+76.4*Disc-2.33*Hole$
0.39	$415-6.70*Slot+88.5*Disc-4.61*Hole$
0.52	$508-5.92*Slot+99.4*Disc-5.06*Hole$
1.04	$1197-9.00*Slot+127*Disc-16.8*Hole$
1.56	$2007-6.99*Slot+171*Disc-39.3*Hole$

Table 6 Empirical function for the compression stage

Velocity(m/s)	Damping Force Empirical Function
0.065	$278-17.2*Slot+10.3*Disc-1.22*Hole$
0.13	$308-11.5*Slot+20.7*Disc-2.41*Hole$
0.26	$326-6.13*Slot+31.4*Disc-0.66*Hole$
0.39	$392-5.66*Slot+35.8*Disc-1.26*Hole$
0.52	$455-5.57*Slot+40.3*Disc-1.9*Hole$
1.04	$774-6.95*Slot+56.3*Disc-8.77*Hole$
1.56	$1103-8*Slot+71.9*Disc-16.8*Hole$

다중회귀분석에 의한 각 속도구간별 선형적 감쇠력 특성식은 Table 5 - 6과 같다. 여기서 변수는 단일이 아닌 다중독립변수로서 Slot, Disc, Hole이며, 종속변수는 감쇠력이다. 감쇠력 특성식은 Minitab⁹⁾의 다중회귀분석 모듈을 사용하여 인장과 압축에 대한 특성식을 도출하였다.

4.2 감쇠력 특성식의 검증

감쇠력 특성식이 다른 수준의 임의 조합에 대해 신뢰성을 갖는지 검증하기 위한 실험을 실시하였다. 실험방법으로 감쇠력 특성식을 도출하는데 관여하지 않은 임의의 설계변수 수준수를 조합하여 감쇠력 측정실험을 실시한 후 감쇠력 결과값을 비교하였다. Fig. 9는 특성식값과 실제 결과값의 비교그래프이다.

Fig. 10의 그래프에 나타난 결과값을 바탕으로 임의의 설계변수조합 실험값과 감쇠력 특성식에 의한

결과값이 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해서 주어진 초기 제품의 사양이 같고, 단지 실험에 고려된 설계변수의 수준수만 달라질 경우 수준수의 변화에 따라 실험을 실시하지 않고도 감쇠력 특성식을 통해서 그 감쇠력값을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. F-V선도에서 나타난 실제 감쇠력과 특성식에 의한 감쇠력 사이의 유용성을 보이기 위해 실제값과 특성식값의 오차를 각각 비교 후 그 결과값을 평균하여 인장과 압축과정시의 각 속도구간에 대하여 Table 7에 나타내었다. Table 7의 값을 바탕으로 인장시 0.065 m/s 구간의 3% 오차를 제외한 전 속도구간에서 특성식과 실제값과의 오차가 1% 전후로 나타나고 있음을 확인 할 수 있다. 이러한 결과는 상당히 신뢰할만한 수준의 특성식임을 증명한다.

Fig. 10 Verification of the Empirical Function

Table 7 Damping force error rate (unit: %)

	Expansion error rate	Compression error rate
0.065(m/s)	3.438	1.277
0.13(m/s)	0.622	1.578
0.26(m/s)	0.009	1.622
0.39(m/s)	0.246	1.471
0.52(m/s)	0.254	1.064
1.04(m/s)	0.942	1.004
1.56(m/s)	0.339	0.113

5. 결 론

본 연구에서는 Taguchi법에 실험계획된 속압쇼바의 시험결과를 망대특성의 해석기법을 이용하여 각 속도구간별 영향을 미치는 요소를 밝히고, 다중회귀분석을 이용하여 속도구간별 선형적인 감쇠력 특성식을 도출할 수 있었다. 도출된 감쇠력 특성식을 이용하여 실제 실험에 의한 결과값과 비교하여 함수식의 유효성을 증명하였고, 실험하지 않은 설계변수의 수준수를 달리했을 경우 감쇠력을 예측할 수 있는 실험식임을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 실제 속압쇼바에서 감쇠력을 충족하는 설계변수 조합을 함수식으로 예측하였다. 또한 이 함수식을 사용하여 주어진 설계변수를 활용한 속압쇼바의 신속한 설계방법을 제시하였다.

후 기

본 연구는 수송기계 안전편의 융합부품소재 인재양성센터 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Phillip J. Ross, 1996, "Taguchi Techniques for Quality Engineering", McGraw-Hill, New York, pp. 23- 72.
2. 이종원, 1989, "다구치 방법에 의한 실험계획법", 한국자동차공학회지 제11권 제6호, pp. 3-16.
3. John C. Dixon, 1999, "The Shock Absorber Handbook", SAE, U.S.A., pp. 225-276.
4. Jae-Woo Park, Jong-Heon Lee and Jin-Wook Kim, 2003, "Matematical Model of Shock

Absorber for Performance Prediction of Automobile", Journal of the Korean Society of Marine Engineers. Vol.27. No.4 pp. 467-478.

5. Stefaan Duym, Randy Stiens and Koenraad Reybrouck, 1997, "Evaluation of Shock Absrober Models", Vehicle System Dynamics 27(1997), pp.109-127.
6. Phillip J. Ross, 1996, "Taguchi Techniques for Quality Engineering", McGraw-Hill, New York, pp. 208 -209.
7. Changcheng Zhou, Yuanyi Liu and C. Yanhui Cai, 2008, "Characteristic Simulation of Telescopic Shock Absorber", IEEE.
8. 김해경, 윤진희, 2004, "확률과 통계-이론적 기초", 경문사, 서울, pp. 329-345.
9. 이상복, 2002, "MINITAB을 활용한 예제 중심의 실험계획법", 이레테크, pp. 150-196.