

# 차량용 충격흡수기의 설계변수 불확실성에 의한 감쇠력 특성 변화에 대한 연구

## A Study on the Damping Force Characteristic Variations of the Automotive Shock Absorber for the Uncertainty of Design Variables

이춘태\*†  
Choon-Tae Lee\*†

(Received 3 August 2020, Revision received 9 September 2020, Accepted 16 September 2020)

**Abstract** : The main functions of automotive suspension system are to support the body of car and provide reasonable riding comfort for the passenger. The performance of a shock absorber determines the characteristics of the suspension system. Especially, riding comfort and handling performance of a vehicle are mainly determined by the damping characteristic of the shock absorbers, but the uncertainty in design variable affects the performance of shock absorber strongly. The statistical computer simulations are the most common approach to study problems of uncertainty quantification. Since the automotive shock absorber also has uncertainty in design variables, it also needs statistical design approach. In this paper, the effects of design variable uncertainty for the performance of shock absorber was simulated with Latin hypercube sampling method.

**Key Words** : Automotive shock absorber, Latin hypercube sampling, Response surface, Damping force

### 1. 서 론

차량용 현가장치는 차체의 무게를 지지하고 차량의 진동을 흡수하여 승차감을 향상시키고 차륜과 지면과의 적절한 접지력을 유지하여 주행안정성을 확보하는 등 다양한 기능을 수행하며 차량의 각종 성능과 직접 관련된 매우 중요한 부분이다. 현가장치는 주로 충격흡수기, 코일 스프링, 각종 링크 등으로 구성되어 있으며, 이 중에서 특히 충격흡수기는 위에서 언급한 다양한 기능을 수행하는 가장 핵심적인 부품이다. 이와 같이 충격흡

수기가 차량에서 가지는 중요성 때문에 충격흡수기에 대한 정확한 수학적 모델링과 성능에 영향을 미치는 각종 파라미터들에 대한 연구는 지금까지도 꾸준히 연구<sup>1-5)</sup>되어 왔다. 그러나 일반적으로 충격흡수기를 포함한 기계부품에는 제조과정에서 제품의 성능을 좌우하는 주요 설계변수의 변동이 존재할 수 있다. 이러한 설계변수의 변동 즉 불확실성은 치수공차, 형상공차, 재질의 물성치 변화 등의 원인에 기인하며 제품의 성능에도 중요한 영향을 미칠 수 있다. 설계변수의 불확실성이 제품의 성능에 미치는 영향에 대한 연구는

\*† 이춘태(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4480-6199) : 교수, 신라대학교 지능형자동차공학부  
E-mail : charity@silla.ac.kr Tel : 051-999-5468

\*† Choon-Tae Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4480-6199) : Professor, Department of Intelligent Vehicle Engineering, Silla University.  
E-mail : charity@silla.ac.kr Tel : 051-999-5468

제품의 성능을 확률적으로 예측 가능하게 하여 제품 설계과정에서 설계의 신뢰성을 높일 수 있는 중요한 연구 분야이지만 현재까지는 아직 이러한 분야에 대한 연구<sup>6),7)</sup>가 부족한 실정이다. 본 연구는 차량용 충격흡수기를 대상으로 하여 설계 변수의 불확실성에 근거한 변동이 충격흡수기의 성능에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 통계적인 접근법을 이용하여 연구를 실시하였다.

## 2. 차량용 충격흡수기 해석모델

본 연구의 대상인 충격흡수기의 구조와 작동원리를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서와 같이 충격흡수기는 피스톤에 설치된 피스톤밸브 조립체(piston valve assembly)와 본체 아래 부분에 설치된 바디밸브 조립체(body valve assembly)에 감쇠력을 발생시키는 주요 밸브들이 설치되어 있다. 또한 충격흡수기는 인장실, 압축실 그리고 저장실과 같은 3개의 공간(chamber)으로 구분되어 있으며 피스톤의 왕복운동에 의한 각 챔버에서의 압력 변동에 따라 작동유체가 밸브들을 통과하여 이동하고 이때 적절한 감쇠력이 발생하도록 설계되어 있다. 이러한 유체 유동에 대한 작동원리와 이론식은 이전의 연구에서 제시되었다.<sup>8-9)</sup> 차량용 충격흡수기의 성능특성을 해석하기 위한 해석 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 해석모델은 지멘스사의 AMESim 소프트웨어를 사용하여 구성하였고 그림에 주요 설계변수를 표시하였다.

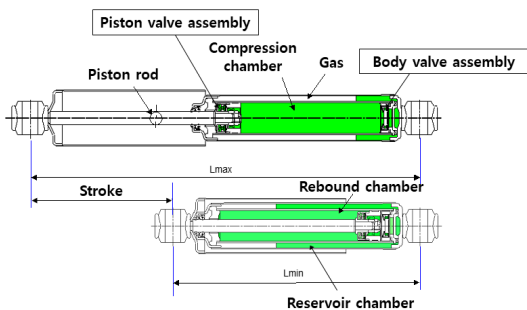


Fig. 1 Schematic diagram of automotive shock absorber

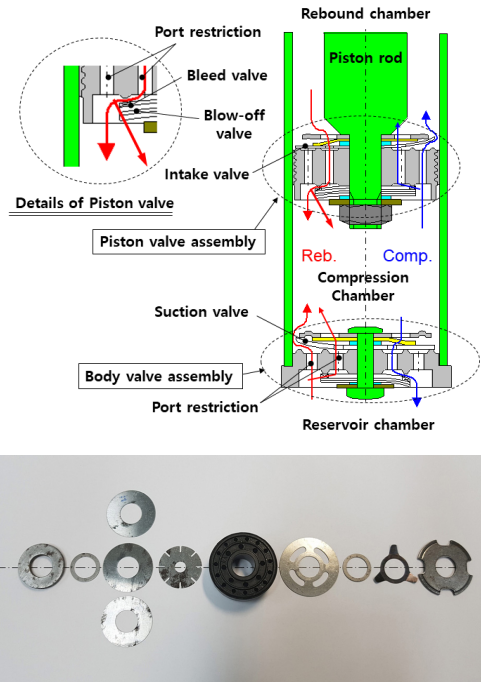


Fig. 2 Detailed configuration and piston valve assembly of automotive shock absorber

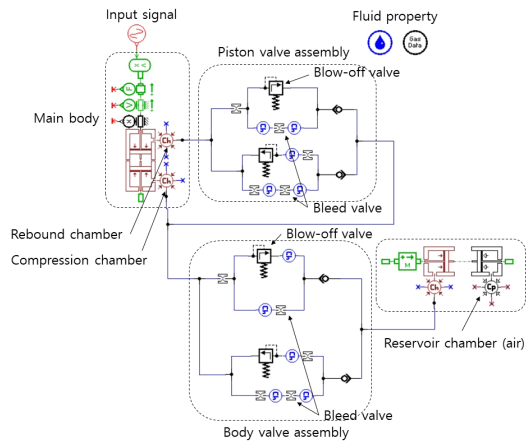
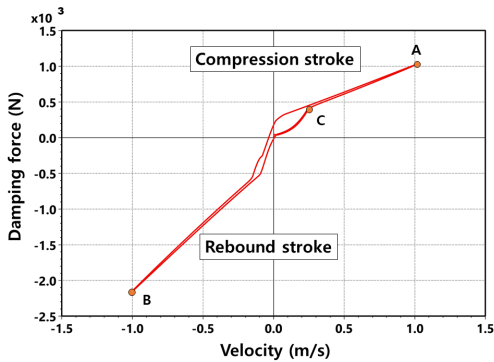


Fig. 3 Simulation model of shock absorber for the statistical design

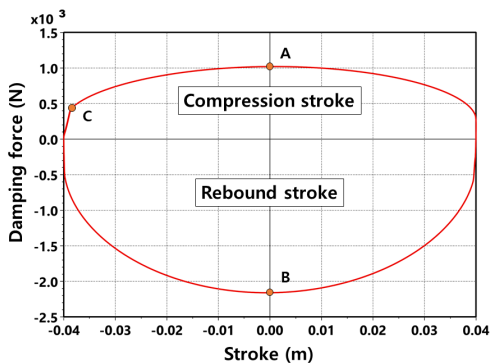
그림에서와 같이 시뮬레이션 모델은 본체, 피스톤밸브 조립체, 바디밸브 조립체, 압축실, 인장실, 저장실 등으로 구성되어 있고 본체에 sin파형의 변위 입력신호가 가해지는 구조로 되어 있다.

Table 1 Simulation parameters

No	Parameter		Value
1	Piston valve assembly	Blow-off valve	Cracking pressure 10bar P-Q gradient 0.9L/min/bar
		Bleed valve	Diameter of orifice 1.5mm
	Body valve assembly	Blow-off valve	Cracking pressure 10bar P-Q gradient 0.9L/min/bar
Bleed valve		Diameter of orifice 1.0mm	
3	Diameter of piston		32mm
4	Diameter of piston rod		18mm
5	Diameter of inner tube		36mm
6	Diameter of outer tube		47mm
7	Initial volume of rebound chamber		70e+3mm <sup>3</sup>
8	Initial volume of compression chamber		100e+3mm <sup>3</sup>
9	Initial volume of reservoir chamber		120e+3mm <sup>3</sup>
10	Sinusoid input signal		±40mm, 4Hz
11	Hydraulic oil density		850kg/m <sup>3</sup>
12	Hydraulic oil bulk modulus		17,000bar



(a) F-V curve



(b) F-S curve

Fig. 4 Simulation results of F-V and F-S curve

특히, 저장실은 공기를 포함하는 공간이므로 공압 모델을 이용하여 모델링하였다. 이와 같은 시

물레이션 모델의 설계변수들을 Table 1에 나타내었고 Fig. 4에 Table 1의 설계변수를 이용한 충격흡수기의 성능지표인 감쇠력-속도 및 감쇠력-변위 선도(F-V, F-S curve)의 계산 결과를 나타내었다. 그림에서 A, B 그리고 C점은 각각 압축행정에서의 최대감쇠력, 인장행정에서의 최대감쇠력, 블로오프 포인트(blow-off point)에서의 감쇠력으로 충격흡수기의 성능특성을 나타내는 주요한 성능지표이다.

### 3. 충격 흡수기의 통계적 성능해석

#### 3.1 설계변수 선정 및 통계적 특성

Fig. 5에 차량용 충격흡수기의 설계변수 변동이 주요성능에 미치는 영향을 통계적 접근법으로 연구하기 위한 해석 순서를 나타내었다. 그림에서와 같이 해석 과정은 설계변수와 출력변수의 선정, 설계변수의 통계적 특성 선정(분포형태, 평균, 표준편차), 설계변수 표본추출(sampling), 해석모델을 이용한 시뮬레이션, 출력 결과의 처리과정 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 설계변수와 출력변수는 Table 2에 나타내었다. 표에서와 같이 설계변수는 피스톤밸브 및 바디밸브 조립체의 블로오프 밸브 크래킹압력(cracking pressure)과 유량-압력 기울기값 그리고 피스톤밸브 및 바디밸브 조립체의 블리드 밸브의 직경 등 6개의 변수를 선정하였다. 설계변수는 Table 2에서와 같이 정규분포(gaussian distribution)를 이룬다고 가정하였고 평균을 기준으로 10%의 표준편차를 가진다고 가정하였다. 그리고 출력변수는 충격흡수기의 성능지표로 사용되고 있는 인장과 압축행정에서의 최대감쇠력과 블로오프 포인트에서의 감쇠력을 선정하였다. 출력변수는 Fig. 4에서 A, B 그리고 C점으로 표시되어 있다.

#### 3.2 라틴 하이퍼큐브 샘플링을 이용한 설계변수 표본추출

통계적 방법을 이용한 설계 및 해석을 위해서는 설계변수의 표본이 통계적 계산에 적합하도록 확률적으로 추출되어야 한다.

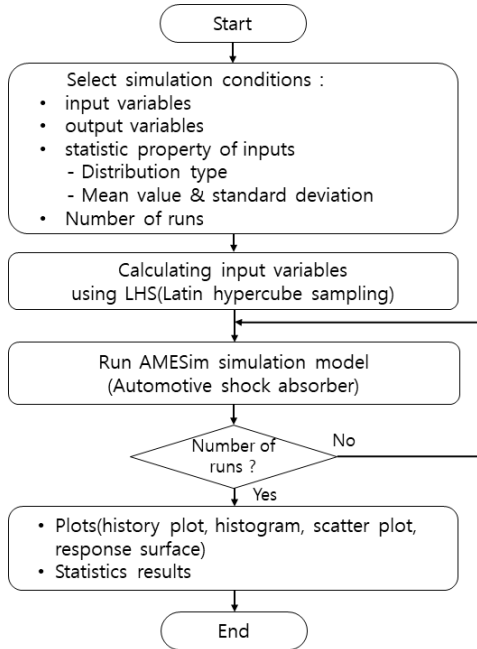


Fig. 5 Simulation procedure of statistical analysis for the automotive shock absorber

Table 2 Design and response variables

■ Design variables

Variables		Distribution	Mean	Standard deviation
Blow-off valve cracking pressure of piston valve(bar)	X1	Gaussian	10	1
Blow-off valve P-Q gradient of piston valve(L/min/bar)	X2	Gaussian	0.9	0.09
Blow-off valve cracking pressure of body valve(bar)	X3	Gaussian	10	1
Blow-off valve P-Q gradient of body valve(L/min/bar)	X4	Gaussian	0.9	0.09
Bleed valve equivalent diameter of piston valve(mm)	X5	Gaussian	1.5	0.15
Bleed valve equivalent diameter of body valve(mm)	X6	Gaussian	1	0.1

■ Response variables

Description	
Maximum damping force at compression stroke(N)	R1
Maximum damping force at rebound stroke(N)	R2
Damping force at blow-off point(N)	R3

확률적 표본추출 방법은 설계변수의 발생확률을 확률분포함수로 가정하여 표본을 추출하는 방법으로서 무작위로 추출된 표본을 이용한 통계적 분석을 통하여 해석 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있다. 본 연구에서 사용한 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling, LHS)은 표본과 시뮬레이션 횟수가 적어도 높은 정확도를 나타내는 통계적 표본추출 방법으로 최근 다양한 연구 10-12)에서 많이 사용되고 있다. LHS 방법은 1979년 McKay가 제안하였으며, 몬테카를로에 의해 제안된 랜덤 표본추출 방법보다 추출된 표본의 분포가 골고루 배치되도록 충진 성능을 향상시킨 표본추출 방법이다. 이러한 LHS 방법은 표본 값을 추출할 때 각 값들이 균등하게 추출될 수 있도록 표본구간을 n개로 나누어 각 구간에서 한 개씩의 값을 추출하되 중복되지 않도록 추출하는 방법을 사용한다. Fig. 6에 LHS 방법에 의한 표본추출 예를 나타내었다. 특히, 전체 표본공간에 걸쳐 완전히 균등하게 분포된 경우를 직교 라틴 하이퍼큐브(Orthogonal Latin Hypercube, OLH)라고 한다. Fig. 7에 LHS 방법에 의하여 추출한 300개의 표본을 가진 설계변수들의 산포도(scatter plot)를 확률밀도함도와 함께 나타내었다. 그림에서와 같이 LHS 방법에 의해 추출된 설계변수의 값들은 평균을 중심으로 정규분포의 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있고 전체 표본영역에 걸쳐 균일하게 분포된 것을 확인할 수 있다. Table 3에 LHS 방법에 의해 추출한 표본의 통계적 특성을 나타내었다.

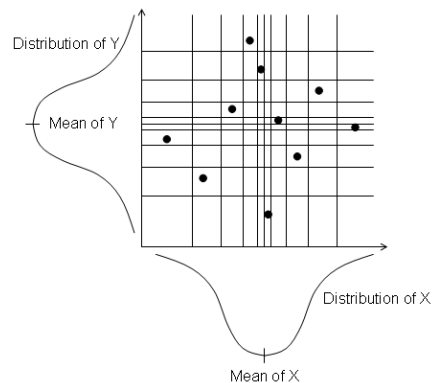


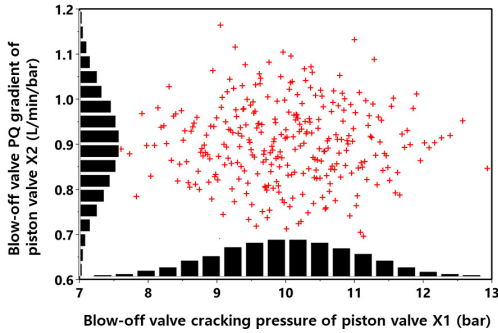
Fig. 6 Latin Hypercube Sampling method

### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

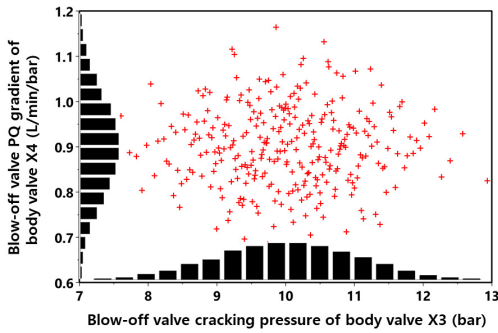
설계변수의 불확실성에 의한 출력변수의 영향을 통계적 기법에 의하여 연구하기 위하여 Fig. 7과 같이 LHS에 의해 추출된 설계변수를 Fig. 3의 시뮬레이션 모델에 입력하여 300회의 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 과정을 거친 시뮬레이션 결과를 분석하기 위하여 변수들 간의 상관계수를 검토하였다. 상관계수(coefficient of correlation)는 변수 간의 관계의 강도를 수치로 표시한 것으로 -1에서 1의 범위를 가진다. 여기서 상관계수가 1에 가까울수록 양의 상관관계가 강하다고 하고, -1에 가까울수록 음의 상관관계가 강하다고 한다. 이때 음의 값은 한 변수가 증가할 때 다른 변수는 감소함을 의미하고 양의 값은 한 변수가 증가할 때 다른 변수도 같이 증가함을 의미한다. 또한 0에 가까운 값은 두 변수 사이에 상관관계가 거의 없음을 의미한다. 상관계수는 다음과 같은 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 사용하였다.

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

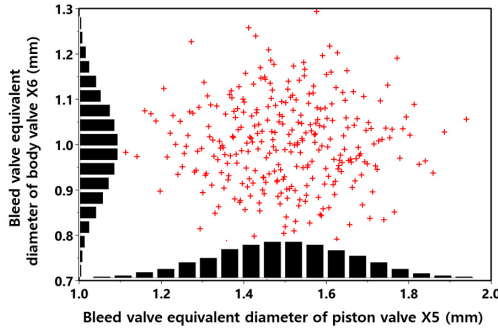
여기서  $\bar{x}$ 와  $\bar{y}$ 는 표본평균을 나타내고,  $x - \bar{x}$ 와  $y - \bar{y}$ 는 평균과의 편차를 나타낸다. Fig. 8에 피어슨의 상관계수의 원리를 이용한 설계변수와 출력변수 간의 상관관계 해석 결과를 나타내었다. 이러한 상관관계 해석을 통하여 설계변수가 출력변수에 미치는 영향을 전체적이고 체계적으로 파악할 수 있음을 그림을 통하여 확인할 수 있다. 그림에서와 같이 압축행정에서의 최대감쇠력 R1에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 X4로서 상관계수는 -0.774를 나타내어 강한 음의 상관관계를 나타냄을 알 수 있다. 또한 인장행정에서의 최대감쇠력 R2는 X2, 그리고 블로오프 포인트에서의 감쇠력 R3은 X3과 가장 큰 상관관계를 가지며 각각의 상관계수는 -0.838과 0.985를 나타내었다.



(a) X1 vs. X2



(b) X3 vs. X4



(c) X5 vs. X6

Fig. 7 Scatter plots between design variables

Table 3 Statistical results of design variables

design variables	Mean	Standard deviation	Skewness	Kurtosis
X1	10	0.997	-2.026e-14	-0.072
X2	0.9	0.0898	-1.198e-14	-0.062
X3	10	0.997	1.12e-15	-0.070
X4	0.9	0.089	-2.31e-14	-0.061
X5	1.5	0.149	-5.793e-15	-0.071
X6	1	0.099	-1.393e-14	-0.072

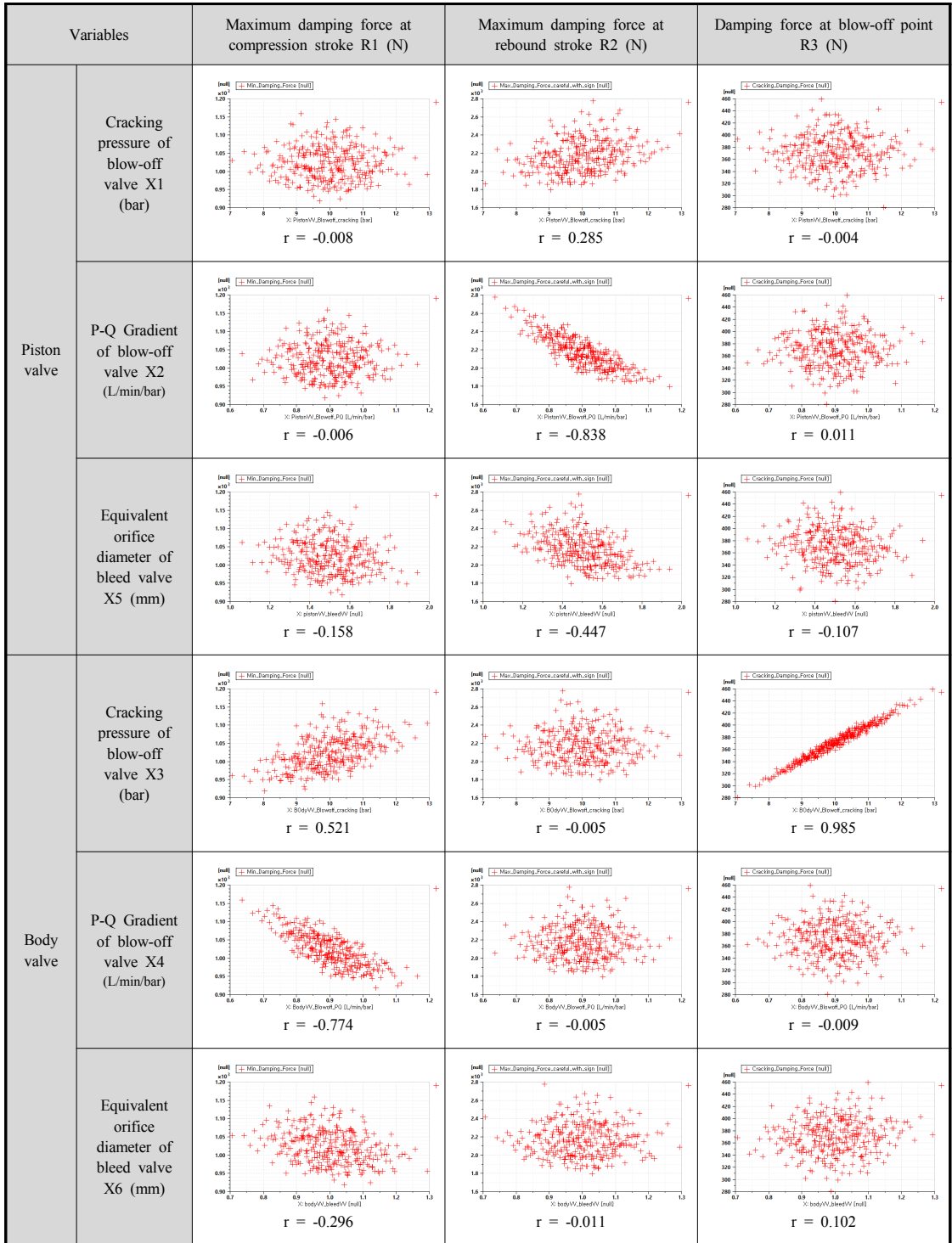


Fig. 8 Correlation between design and response variables

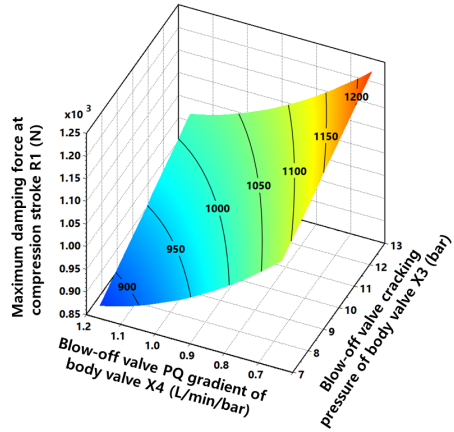
다음으로 반응표면(response surface)법을 이용하여 통계적으로 추출한 설계변수 변동이 출력변수의 변동에 미치는 영향을 확인하였다. 반응표면법<sup>13)</sup>은 통계적 기법에 의해 추출된 값들을 유한요소 모델이나 AMESim과 같은 동적 해석모델에 입력하여 계산결과를 3차원 표면의 형식으로 표시한 것으로, 설계변수의 변동에 대한 출력변수의 변동을 근사적인 평면함수로 표시한 것이다. 반응표면은 최소자승법을 이용하여 회귀모델(regression model)로 나타내어진다. 이러한 반응표면은 최적화 계산 등에서 계산의 간략화를 위한 근사모델로도 사용된다. 이와 같은 반응표면법을 적용하기 위하여 Fig. 8의 상관계수 해석 결과를 참조하여 출력변수 R1, R2, R3에 가장 큰 영향을 미치는 변수들을 선정하였고 반응표면법으로 추정한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)에서와 같이 압축행정에서의 최대감쇠력 R1은 설계변수 X3에 의해 증가하는 경향을 보이고 X4에 의해 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이것은 Fig. 8의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 9(b)와 (c)에서도 Fig. 8과 일치하는 결과를 보임을 알 수 있다. 반응표면법에 의한 Fig. 9(a)의 응답을 나타내는 결과 식을 식 (2)에 나타내었다.

$$\text{Response} = V^T Q V \quad (2)$$

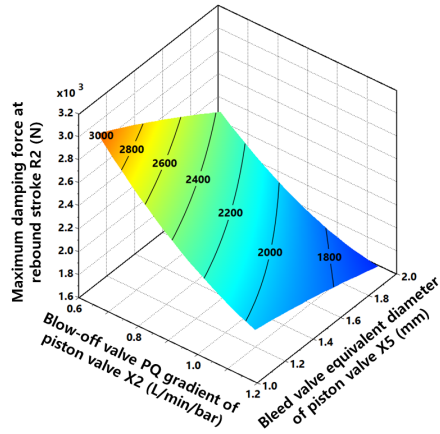
$$Q = \begin{bmatrix} 1808.15 & -1.11 & -6.43 & 12.02 & -694.4 & -7.40 & -94.48 \\ -1.11 & 0.06 & 0.12 & 0.006 & 0.47 & -0.08 & 0.003 \\ -6.43 & 0.12 & 5.99 & 0.08 & -0.19 & 0.73 & -2.06 \\ 12.02 & 0.006 & 0.08 & 0.06 & 0.67 & -0.02 & -1.33 \\ -694.4 & 0.47 & -0.19 & 0.67 & 435.6 & -2.87 & 98.38 \\ -7.40 & -0.08 & 0.73 & -0.02 & -2.87 & -8.10 & -0.62 \\ -94.48 & 0.03 & -2.06 & -1.33 & 98.38 & -0.62 & -46.541 \end{bmatrix}$$

$$V = [1 \ X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6]$$

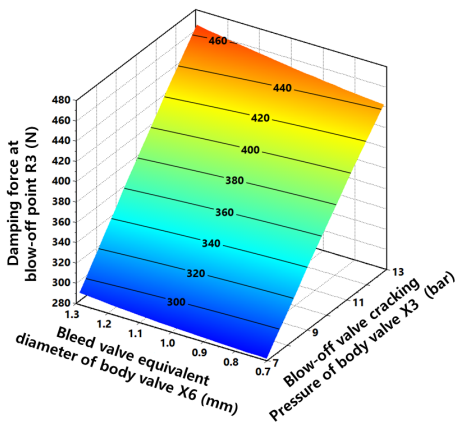
또한 Fig. 10과 Table 4에 출력변수들의 확률밀도 그래프와 통계적 특성을 나타내었다. Table 4를 참조하면 압축행정에서의 최대감쇠력 R1은 932N에서 1,114N의 범위, 인장행정에서의 최대감쇠력 R2는 1,816N에서 2,526N의 범위, 블로오프포인트에서의 감쇠력 R3은 312N에서 429N의 범위에 95.4%의 신뢰수준으로 분포하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) X3, X4 vs. R1



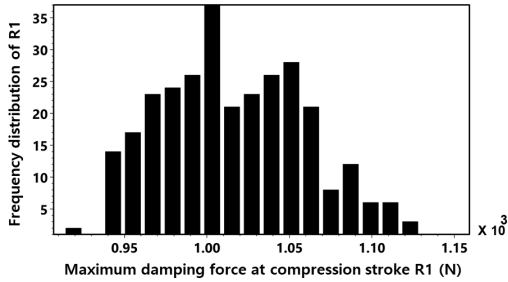
(b) X2, X5 vs. R2



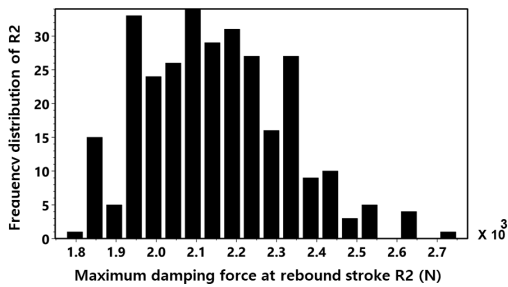
(c) X3, X6 vs. R3

Fig. 9 Simulation results of surface response

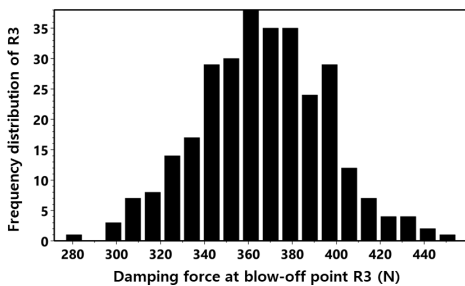
또한 편포도(skewness)는 인장행정에서의 최대 감쇠력 R2가 가장 크게 나타남을 알 수 있어 Fig. 10(b)에서와 같이 히스토그램이 평균을 중심으로 오른쪽으로 가장 많이 편향되어 있음을 알 수 있다.



(a) Frequency distribution of R1



(b) Frequency distribution of R2



(c) Frequency distribution of R3

Fig. 10 Histogram of response variables

Table 4 Statistical result of response variables

response variables	Mean	Standard deviation	Skewness	Kurtosis
R1	1023.14	45.67	0.294	-0.386
R2	2171.53	177.44	0.424	-0.049
R3	370.75	29.13	-0.030	0.007

## 5. 결론

이상과 같이 통계적인 해석 방법을 이용한 차량용 충격흡수기의 성능 특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) LHS 방법에 의한 설계변수의 표본추출 방법을 통하여 정규분포를 이루는 설계변수 표본을 추출하였고 이를 이용하여 충격흡수기 설계의 핵심지표인 F-V와 F-S 특성에 대한 통계적 특성을 파악할 수 있었다.

2) 설계변수에 대한 출력변수의 상관관계를 분석한 결과, 압축행정에서의 최대감쇠력 R1에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 바디밸브 조립체의 블로오프 밸브 유량-압력 기울기 X4로서 상관계수 -0.774의 강한 음의 상관관계를 나타내었다. 또한 인장행정에서의 최대감쇠력 R2는 피스톤밸브 조립체의 블로오프밸브 유량-압력 기울기 특성 X2, 그리고 블로오프 포인트에서의 감쇠력 R3은 바디밸브 조립체의 블로오프밸브 크래킹 압력 특성 X3에 의해 가장 큰 영향을 받음을 알았고 각각의 상관계수는 -0.838과 0.985를 나타내었다.

3) 반응표면법에 의하여 출력변수의 변동을 회귀모델의 형태로 표시한 결과, 상관관계 해석결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

## Reference

1. F. Herr, T. Malin, J. Lane and S. Roth, 1999, "A Shock Absorber Model Using CFD Analysis and Easy5", SAE International Congress and Exposition, 1999-01-1322. (<https://doi.org/10.4271/1999-01-1322>)
2. K. Reybrouck, 1994, "A Nonlinear Parametric Model of an Automotive Shock Absorber", SAE 940869. (<https://doi.org/10.4271/940869>)
3. S. W. Duym, R. Stiens, G. V. Baron and K. G. Reybrouck, 1997, "Physical Modeling of the Hysteretic Behaviour of Automotive Shock Absorbers", SAE 970101. (<https://doi.org/10.4271/970101>)



4. S. Guo, Y. Liu, L. Xu, X. Guo and L. Zuo, 2016, "Performance Evaluation and Parameter Sensitivity of Energy-Harvesting Shock Absorbers on Different Vehicles", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 54, No. 7, pp. 918-942. (<http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2016.1174276>)
5. J. A. Calvo, B. L. Boada, J. L. S. Roma'n, and A. Gauchí'a, 2009, "Influence of a Shock Absorber Model on Vehicle Dynamic Simulation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 223, pp. 189-202. (<https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544070JAUTO990>)
6. S. U. Kim, B. H. Jang, S. J. Kim and K. H. Lee, 2020, "Application Examples of Robust Optimization Using Approximate Model for Automotive Parts", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 47-57. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.1.047>)
7. C. T. Lee, 2020, "Study on the Performance Characteristics of the Seat Damper Using Probability Statistics", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 82-89. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.3.082>)
8. C. T. Lee and J. K. Lee, 2003, "A Study on the Influence of Design Parameters on the Automotive Shock Absorber Performance", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 167-177.
9. H. H. Lang, 1977, "A Study of the Characteristics of Automotive Hydraulic Dampers at High Stroking Frequencies", Ph. D. dissertation, University of Michigan, pp. 1-231.
10. S. W. Kang and S. J. Lee, 2018, "Study on Optimization of Design Parameters for Offshore Mooring System Using Sampling Method", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 32, No. 4, pp. 215-221. (<https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.6.32.4.215>)
11. J. W. Huh, H. W. Jung, J. H. Ahn and S. W. An, 2015, "Probabilistic Risk Assessment of Coastal Structures Using LHS-based Reliability Analysis Method", *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 19, No. 6 pp. 72-79. (<https://doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.6.072>)
12. B. Minasny and A. B. McBratney, 2006, "A Conditioned Latin Hypercube Method for Sampling in the Presence of Ancillary Information", *Computers & Geosciences*, Vol. 32, pp. 1378-1388. (<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009>)
13. J. S. Lee, S. J. Park and J. O. Kim, 2017, "Optimizing Coagulation Conditions of Magnetic Based Ballast Using Response Surface Methodology", *Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 39, No. 12, pp. 689-697. (<https://doi.org/10.4491/KSEE.2017.39.12.689>)