Check for updates

동력시스템공학회지 제24권 제3호 pp. 82-89 2020년 6월 ISSN 2713-8429(Print) ISSN 2713-8437(Online)
Journal of Power System Engineering https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.3.082
Vol. 24, No. 3, pp. 82-89, June 2020

확률적 통계기법을 이용한 시트댐퍼의 성능특성에 대한 연구
Study on the Performance Characteristics of the Seat Damper Using Probability Statistics

이춘태*†
Choon-Tae Lee*†

(Received 11 May 2020, Revision received 8 June 2020, Accepted 9 June 2020)

Abstract : The presence of uncertainty in every aspect of engineering analysis and design has been under consideration over a long period of time. Uncertainty is associated with most of the analysis and design of interest to engineers. The presence of uncertainty cannot be completely eliminated, but with resonable efforts, its impact on the design can be appropriately managed. LHS is a stratified random procedure that provides an efficient way of sampling variables from their multivariate distributions. It was initially developed for the purpose of Monte-Carlo simulation, efficiently selecting input variables for computer models. LHS follows the idea of a Latin square where there is only one sample in each row and each column. Latin hypercube generalized this concept to an arbitrary number of dimensions. For the same reason which mentioned above, the automotive seat damper also needs statistical design approach because it has uncertainty in design variables such as dimensions of seat damper and working fluid property. In this paper, the torque characteristic of seat damper was simulated according to the design variable uncertainty such as the clearance between wall and vane, inner diameter of vane and the working-fluid properties.

Key Words : Seat damper, Latin hypercube sampling, Response surface, Torque characteristic

1. 서 론

자동차용 시트댐퍼(seat damper)는 시트의 좌석과 등받이의 연결부위에 장착되며 시트 등받이를 접을 때 시트의 자중과 시트 내부에 장착된 회전 스프링의 탄성에 의해 등받이가 너무 빠른 속도로 접혀서 소음과 충격이 발생하지 않도록 등받이 회전의 끝부분에서 속도를 늦추어 충격과 소음을 방지하는 장치이다. 이와 같은 시트댐퍼의 동작으로 시트의 고급스러운 접힘 동작이 가능하며, 이를 통하여 높은 수준으로 사용자의 감성을 만족시킬 뿐만 아니라 제품의 고급화가 가능하다. 이러한 시트댐퍼의 차량에서의 장착위치와 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 시트댐퍼 내부에는 고점성의 실리콘이 밀봉되어 있으며 등받이가 회전함에 따라 로터와 일체로 된 베인이 회전하게 된다. 베인이 회전함에 따라 진각실(advance chamber)에 있던 실리콘은 벽면 틈새와 별도로 설치된 오리

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

*† Choon-Tae Lee(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

피스를 통하여 지각실(retard chamber)로 이동하게 된다. 이때 오리피스 단면적은 회전의 끝부분으로 갈수록 점차적으로 작아지는 형상을 가지고 있어 회전의 끝부분에서 높은 감쇠력을 발생시켜 부드러운 접힘 동작이 가능하도록 한다.

자세한 시트댐퍼의 구조를 Fig. 2에 나타내었다. 그림과 같은 구조의 베인 회전에 의해 시트댐퍼에서 발생하는 토오크의 크기는 다음의 식으로 주어진다.[1-2)]

$$T=(P_a-P_r)\frac{L}{8}(d_{out}^2-d_{in}^2)n \quad (1)$$

여기서, Pa는 진각실 압력, Pr은 지각실 압력, L은 베인의 축방향 길이, dout은 베인 외경, din은 베인 내경, n은 베인의 총 개수를 나타낸다.

시트댐퍼의 진각실과 지각실 압력은 두 공간 사이에 설치된 오리피스와 벽면틈새를 통하여 흐르는 누설유량에 의해 결정되며 누설유량은 작동유체인 실리콘의 점성계수의 영향을 받는다. 따라서 시트댐퍼의 토오크 특성은 베인 내경, 베인 외경과 벽면사이의 틈새간격, 작동유의 점성계수 등의 변수에 의해 영향을 받는다. Table 1에 주어진 치수와 물성치에 의한 토오크 특성곡선의 계산결과를 Fig. 3에 나타내었다.

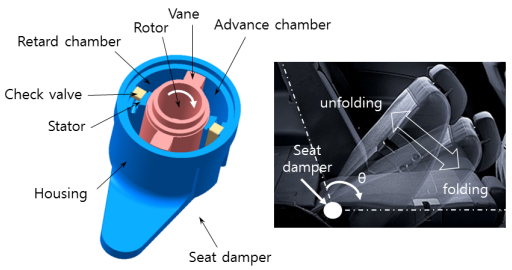


Fig. 1 Schematic and installation point of seat damper

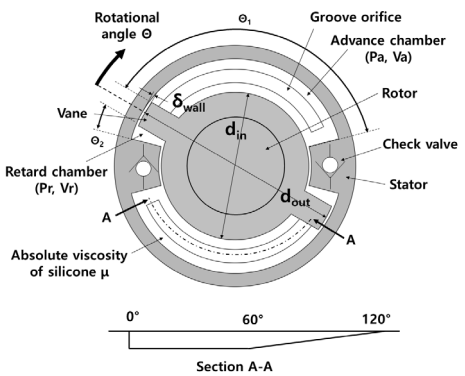


Fig. 2 Schematic of a seat damper

그러나 일반적으로 시트댐퍼를 포함한 자동차, 기계 부품류는 제품의 치수에 대하여 일정한 범위의 기계가공 공차가 존재하며, 유체로 작동하는 장치의 경우 작동유체의 물성치에 대해서도 어느 범위 내에서는 원재료의 물성치 값이 변동한다. 이와 같이 제품의 가공치수와 물성치에 존재하는 불확실성이 제품의 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 제품 성능의 확률적 예측을 가능하게 하여 제품설계의 신뢰성을 높일 수 있는 중요한 연구 분야이다. 본 연구에서는 자동차용 시트댐퍼를 대상으로 시트댐퍼의 주요 성능지표 중의 하나인 최대 토오크 변동에 중요한 영향을 미치는 3개의 설계변수를 선정하고, 이러한 설계변수의 불확실성이 출력변수인 최대 토오크의 변동에 미치는 영향에 대하여 확률적 관점에서 연구를 실시하였다.

Table 1 Simulation parameters

Parameter		value
Vane of rotor	Outer diameter	34 mm
	Inner diameter	22 mm
	Length	33 mm
Dead volume	Advance chamber	10 mm^3
	Retard chamber	10 mm^3
Angle width	Advance chamber θ_1	120 deg
	Retard chamber θ_2	0 deg
Groove orifice	Width	3 mm
	Maximum depth	1 mm
Clearance	Between wall and vane	0.3 mm
	Between cover and vane	0.1 mm
Oil	Type	Silicon oil
	Density	968kg/m^3
	Absolute viscosity	87,000 cP
	Bulk modulus of elasticity	10,500 bar

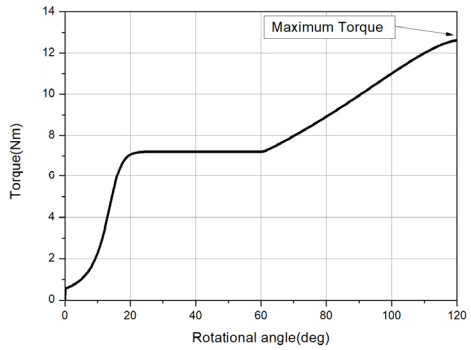


Fig. 3 Torque characteristic curve of a seat damper

2. 시트댐퍼 성능의 통계적 성능해석

2.1 설계변수의 선정 및 통계적 특성

Fig. 4에 자동차용 시트댐퍼의 통계적 성능해석을 위한 해석 과정을 나타내었다. 그림에서와 같이 먼저 통계적 성능해석을 위한 설계변수와 출력변수를 선정하고, 설계변수의 분포형태, 평균, 표준편차 등의 통계적 특성을 설정하였다.

본 연구에서는 시트댐퍼의 주요 성능지표인 최대 토오크 T_{max}를 출력변수로 선정하였고, 설계변수로는 최대 토오크의 변동에 중요한 영향을 미

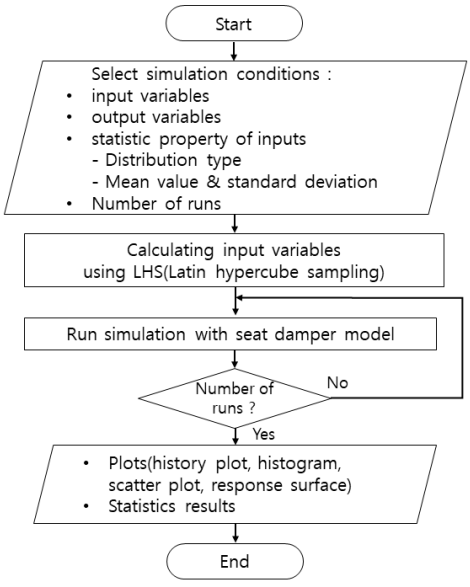


Fig. 4 Flowchart of simulation procedure

Table 2 Design variables and statistical properties

Design variables / Properties	Clearance between wall and vane δ_{wall}(mm)	Absolute viscosity μ(cP)	Inner dia. of vane d_{in}(mm)
Distribution	Gaussian	Gaussian	Gaussian
Mean(m)	0.3	87,000	22.0
Tolerance	±2.5%	±2.5%	±2%
Minimum	0.2925	84,825	21.56
Maximum	0.3075	89,175	22.44
Standard deviation(σ)	0.0025	725	0.1467

치는[2] 베인과 벽면 사이의 간격 δ_{wall}, 베인의 내경 치수 d_{in}, 실리콘 작동유의 점성계수 μ를 선정하였고, 베인과 벽면 사이의 틈새는 평균값 0.3 mm를 기준으로 ±2.5%의 가공공차를 가지며, 베인의 내경 치수는 22 mm를 기준으로 ±2%의 가공공차를 가지고, 실리콘 작동유 점성계수는 87,000 cP를 기준으로 ±2.5%의 공차범위를 가진다고 가정하였다. 또한 각 설계변수의 분포는 정규분포(gaussian distribution)를 이룬다고 가정하였다. 따라서 Table 2에서와 같이 허용공차를 고려한 설계변수의 최댓, 최솟값이 정규분포 확률밀도함수의 99.7% 범위 내에 위치하도록 평균 m과 표준편차 σ를 선정하였다.

2.2 라틴 하이퍼큐브 샘플링(LHS)을 이용한 설계변수 표본추출

통계적 방법을 적용한 설계 및 해석을 위해서는 설계변수의 통계적 표본을 추출해야 한다. 통계적 표본을 추출하는 방법에는 크게 확률적 방법과 비확률적 방법이 있으며, 확률적 방법은 설계변수의 발생확률을 확률분포함수로 가정하여 표본을 추출하는 방법으로써 무작위로 추출된 표본을 이용한 통계적 분석을 통하여 해석 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있다. 본 연구에서 사용한 라틴 하이퍼큐브 샘플링(LHS, Latin Hypercube Sampling)은 표본의 개수가 적어도 모집단의 통계적 특성을 잘 반영할 수 있고, 적은 수의 시뮬레이션으로도 높은 정확도를 나타내는 통계적 표본추출 방법으로 최근 다양한 연구에서 사용되고 있다.[3-6] LHS는 설계변수의 값들을 추출할 때 각

값들이 균등하게 추출될 수 있도록 설계변수의 범위를 n개의 표본구간으로 나누어 각 구간에서 한 개씩의 값을 추출하되 서로 중복되지 않도록 n개의 값을 추출하는 방법이다. Fig. 5에 LHS를 사용하여 2개의 확률변수가 각 표본구간에 대하여 중복되지 않도록 추출한 예를 나타내었다.

이와 같은 LHS 방법을 이용하여 추출한 설계변수들의 산포도(scatter plot)를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 설계변수의 추출값들은 각 설계변수의 평균을 중심으로 정규분포를 이루며 99.7%의 확률로 공차의 범위 내에서 균일하게 생성된 것을 확인할 수 있다.

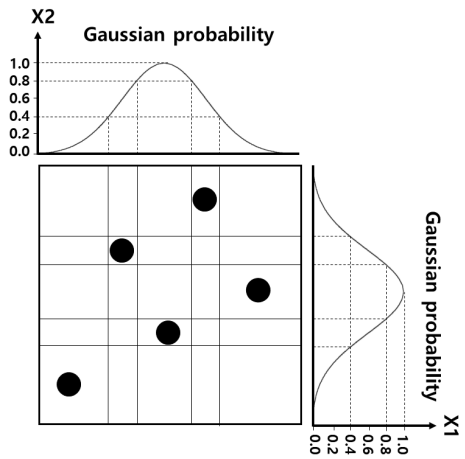
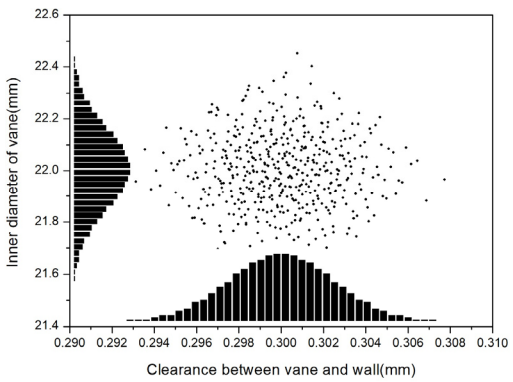
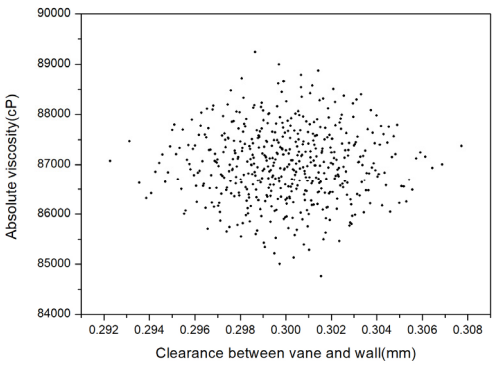


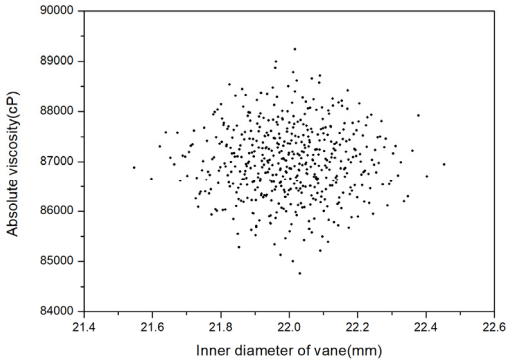
Fig. 5 Sampling example of the 2 design variables with 5 sampling points using LHS



(a) δ_{wall} vs. din



(b) δ_{wall} vs. μ



(c) d_{in} vs. μ

Fig. 6 Scatter plots between design variables

2.3 시트댐퍼 시뮬레이션

로터리 댐퍼의 토오크 특성 해석을 위해 사용한 시뮬레이션 모델을 Fig. 7에 나타내었다. 시뮬레이션 모델은 최근 유압의 해석, 설계 분야에서 많이 사용되고 있는 SIEMENS사의 AMESim을 사용하여 구성하였다. 시뮬레이션 모델은 베인을 포함한 로터리 댐퍼 본체, 각종 오리피스, 실리콘 작동유체의 물성치 등 시트댐퍼의 주요 부품에 대한 모델로 구성되어 있다. 특히, 베인의 회전각도에 따른 오리피스 개도를 데이터베이스로 저장한 모듈을 이용하여 그루브 오리피스를 통한 누설유량을 모델링하였고, 사각형 고정 오리피스 모듈을 이용하여 상하 커버와 베인 사이의 틈새를 통한 누설, 댐퍼 벽면과 베인 끝단 사이의 틈새를 통한 누설 등을 모델링하였다.[1-2)]

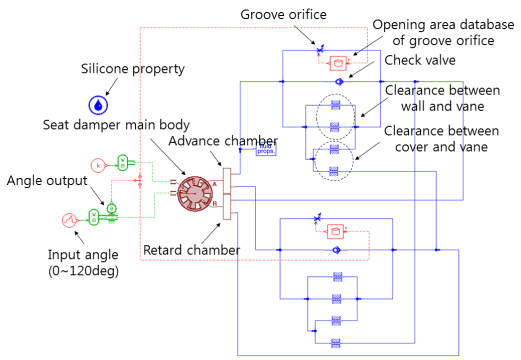


Fig. 7 AMESim model of seat damper

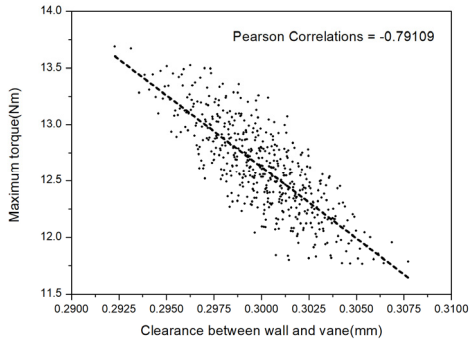
이상과 같은 시뮬레이션 모델에 LHS을 이용하여 생성한 설계변수들의 추출값을 시뮬레이션 모델의 입력값으로 사용하여 지정한 시뮬레이션 횟수만큼 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 횟수는 해석결과가 충분한 통계적 특성을 갖도록 1,000회를 선정하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

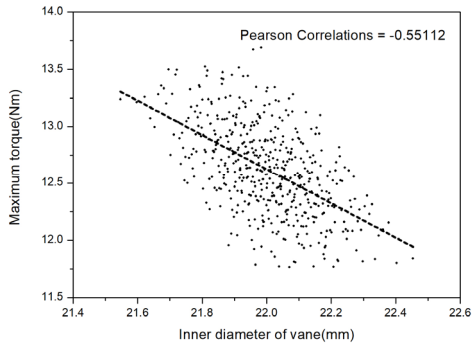
이상과 같은 해석 과정을 거친 시뮬레이션 결과를 분석하기 위하여 변수들 간의 상관계수를 검토하였다. 상관계수(coefficient of correlation)는 두 변수 간의 관계가 얼마나 강한지를 나타내는 지표로, 1에 가까울수록 양의 상관관계가 강하다고 하고, -1에 가까울수록 음의 상관관계가 강하다고 한다. 양의 상관계수는 하나의 변수가 증가할수록 다른 변수도 증가하는 경우를 의미하며 음의 상관계수는 반대의 의미이다. 또한 0에 가까울수록 두 변수는 독립적이고 상관관계가 없다고 정의한다. 이러한 상관관계를 나타내는 식으로서 다음과 같은 상관계수 r을 사용한다.

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

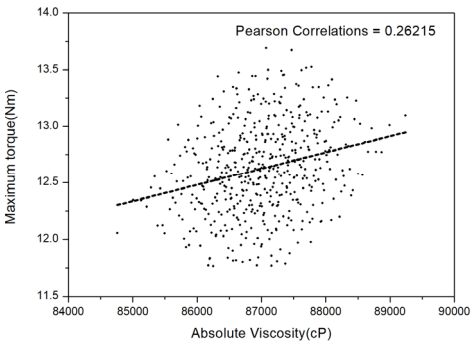
여기서, $\bar{x}$와 $\bar{y}$는 표본평균을 나타내고 $x-\bar{x}$와 $y-\bar{y}$는 표본평균으로부터의 편차를 나타낸다. Fig. 8에 설계변수와 출력변수 간의 상관관계 해석결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 베인과 벽면사이 간격 δ_{wall}과 최대 토오크의 상관계수는 -0.79로서 강한 음의 상관관계를 나타내었고, d_{in}와 최대 토오크의 상관계수는 -0.55로서 중간정도의 음의 상관관계를 나타내었다. 반면 점성계수 μ와 최대 토오크는 +0.26으로 약한 양의 상관관계를 나타냄을 알 수 있다.



(a) δ_{wall} vs. T_{max}



(b) d_{in} vs. T_{max}



(c) μ vs. T_{max}

Fig. 8 Correlation between design variables and output variable

다음으로 반응표면(response surface)을 생성하여 통계적으로 추출한 설계변수 변동에 의한 출력변수의 변동을 확인하였다. 반응표면법은 통계적 기법에 의해 생성된 설계변수 값들을 계산하고자 하는 유한요소 또는 동적모델에 입력하여 계산한 결과를 표면과 같은 형식으로 표시한 것으로, 설계변수의 변동에 대한 출력변수의 변동을 근사적인 평면함수의 형태로 표시한 함수이다. 이러한 반응표면은 주로 회귀모델(regression model)로 나타내며 회귀모델은 최소자승법을 이용하여 구해진다. 이러한 반응표면은 최적화 계산을 위한 메타모델(meta model)의 근사모델로도 사용된다. 회귀모델 식은 다음과 같이 주어진다.[7-10)]

$$Y=\beta X+\varepsilon \tag{3}$$

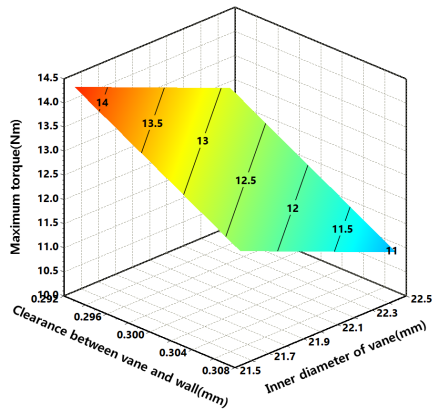
여기서, Y는 추정된 평면함수 값 또는 출력변수, X는 입력 또는 설계변수, β는 회귀계수, ε는 오차를 의미한다. 추정된 평면의 오차를 최소화하기 위해서는 최소자승법을 이용하여 아래와 같이 회귀계수를 결정한다.

$$L=\sum \varepsilon^{2_i}=\varepsilon^T\varepsilon=(Y-\beta X)^T(Y-\beta X) \tag{4}$$

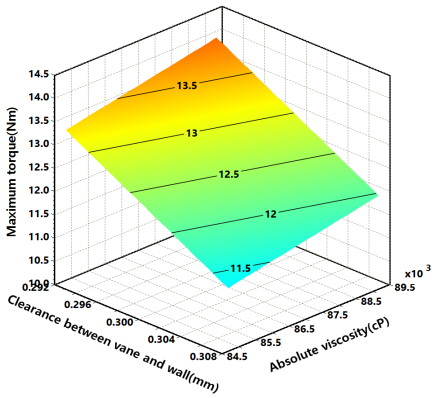
$$\left.\frac{\partial L}{\partial \beta}\right|_{\hat{\beta}}=-2X^TY+2X^TX\hat{\beta}=0 \tag{5}$$

$$\hat{\beta}=(X^TX)^{-1}X^TY \tag{6}$$

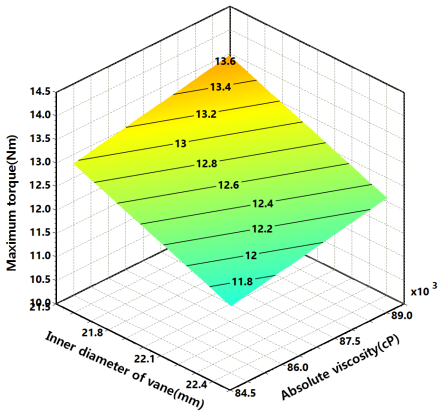
반응표면법을 이용하여 추정한 반응표면 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)에서와 같이 베인과 벽면의 간격 δ_{wall}와 베인 내경 d_{in}가 감소할수록 최대 토오크는 감소하는 경향을 보임을 알 수 있고 이러한 결과는 Fig. 8과 일치함을 알 수 있다. Fig. 9(b)와 (c)에서도 Fig. 8과 일치하는 결과를 보임을 알 수 있다. 또한 시뮬레이션 횟수에 따른 시뮬레이션 결과의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 시뮬레이션 횟수를 100, 300, 500, 1,000회로 증가시켜 시뮬레이션을 실시한 결과, 시뮬레이션 횟수가 증가할수록 출력값의 통계적 특성이 정규분포에 가깝게 나타남을 알 수 있다. 그림에서와 같이 1,000회 시뮬레이션을 실시한 경우 평균 12.63, 표준편차 0.401, 편포도(skewness) 0.08, 첨도(kurtosis) －0.41의 통계적 특성을 나타내었다.



(a) δ_{wall}, d_{in} and T_{max}



(b) δ_{wall}, μ and T_{max}



(c) d_{in}, μ and T_{max}

Fig. 9 Surface response for the design variables and output variable

따라서 최대 토오크는 99.7%의 신뢰구간 안에서 12.63 Nm를 평균값으로 ±1.203 Nm의 변동을 보임을 알 수 있다. 이것은 최대 토오크의 변동이 평균값을 기준으로 ±9.5%의 범위에 있다는 것을 의미한다.

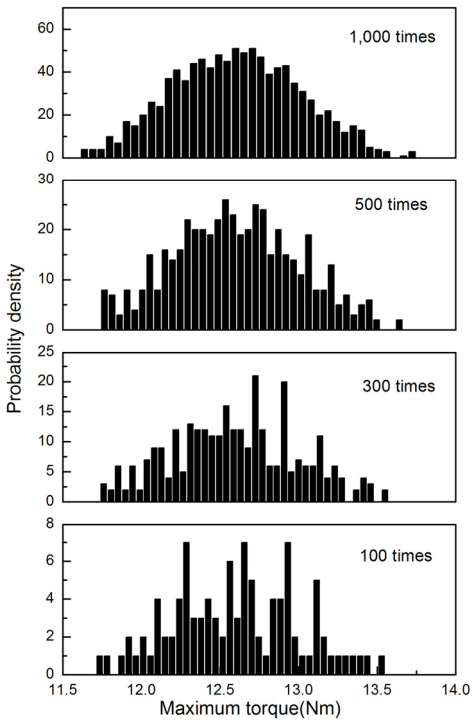


Fig. 10 Comparison between probability density of output variable with number of runs

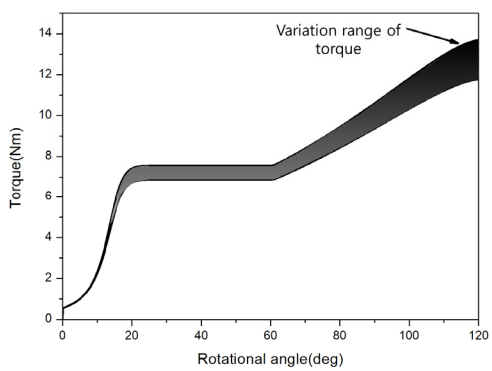


Fig. 11 Simulation result of torque variation caused by uncertainty of design variables

이상과 같은 설계변수들의 불확실성에 따른 출력변수의 변동 범위를 Fig. 11에서와 같이 시트댐퍼의 토오크 특성곡선에 나타내었다. 그림에서와 같이 설계변수의 불확실성에 기인한 설계변수 값의 변동에 대한 최종적인 출력변수의 변동 범위를 확인할 수 있다. 이와 같이 통계적 해석기법을 이용하여 설계변수의 불확실성에 의한 출력변수의 변동을 예측하면 어떤 설계변수가 제품의 성능에 어떠한 악영향을 미치는지를 미리 예측할 수 있고 품질의 저하를 미리 막을 수 있다.

4. 결 론

이상과 같은 확률적 통계기법을 이용한 자동차용 시트댐퍼의 성능특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) LHS 방법에 의해 설계변수의 표본추출을 실시 한 결과, 설계변수 간에 상관관계를 무시할 수 있고 정규분포를 이루는 표본의 추출이 가능하였고 이를 이용하여 설계 대상의 통계적 특성을 파악할 수 있음을 확인하였다.

2) 설계변수들 간의 상관관계를 해석한 결과, 베인과 벽면사이 간격은 최대 토오크와 강한 음의 상관관계를 나타내었고, 베인의 내경은 중간 정도의 음의 상관관계를 나타내었다. 그리고 점성계수는 약한 양의 상관관계를 나타냄을 확인할 수 있었다.

3) 반응표면법에 의하여 출력변수의 변동을 회귀모델의 형태로 표시할 수 있었고, 이러한 회귀모델의 특성은 상관관계 해석결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

4) 이상과 같은 통계적 기법에 의한 설계 과정을 통하여 설계변수의 불확실성에 기인한 출력변수의 변동을 통계적으로 예측할 수 있었고, 설계변수가 미치는 악영향을 최소화할 수 있는 다양한 정보를 제공함을 확인할 수 있었다.

References

1. C. T. Lee, 2019, "A Study on the Torque

Characteristics of Rotary Dampers", Journal of Drive and Control, Vol. 16, No. 4, pp. 87-92. (http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2019.16.4.087)

2. C. T. Lee, 2016, "Study on the Damping Mechanism of an Hydraulic Type Automotive Seat Damper", Journal of Drive and Control, Vol. 13, No. 4, pp. 1-6.
3. H. S. Shin, 2006, "Sensitivity Analysis for the Stability Problem of Thin Wall Structure", Report of Reseat.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. J. H. Choi and N. C. Kang, 2015, "Run-flat Tire Optimization Using Response Surface Method and Genetic Algorithm", Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., Vol. 25, No. 4, pp. 247-254.
8. J. S. Lee, S. J. Park, 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.
9. K. W. Nam, S. D. Cho, S. J. Kim and S. H. Ahn, 2017, "A Study on Weibull Probability Statistics Characteristics for Vickers Hardness of Degraded Stainless Steel", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 79-85.
10. P. Samui, D. T. Bui, S. Chakraborty and R. C. Deo, 2020, "Handbook of Probabilistic Models", Elsevier Butterworth-Heinemann.