

스톡브리지 댐퍼 설계 파라미터 선정

Determination of Design Parameters of Stockbridge Damper

김 찬 중[†]
Chan-Jung Kim

(Received August 22, 2016 ; Revised September 21, 2016 ; Accepted September 21, 2016)

Key Words : Design Parameter(설계 파라미터), Objective Function(목적 함수), Case Study of Eigenvalue(공진점 사례 연구), Resonance Frequency(공진점), Stockbridge Damper(스톡브리지 댐퍼)

ABSTRACT

The Stockbridge damper is used to control the aeolian vibration of a overhead transmission line due to the natural wind under a low velocity, between 1 m/s to 7 m/s. The damper model can be simply derived with several design parameters and the location of eigenvalues of design parameters are important to determine the efficiency of energy dissipation by excitation itself with two counterweights. First, the importance of resonance frequencies of Stockbridge damper was reviewed through the analysis of frequency response function of damper system. Then, the best selection of design parameters was investigated with the introduction of objected function that minimize the distance between the calculated eigenvalues and target frequency points. The best choice of design parameters was reviewed using the simulated results from the objective function and the effectiveness of selected design case was discussed at the point view of practical implementation.

1. 서 론

전력선에서 외부 바람에 의해 발생하는 진동은 낮은 주파수 영역의 갤로핑(galloping), wake-induced oscillations와 Aeolian 진동 등이 유발이 된다⁽¹⁻⁴⁾. 그 중 Aeolian 진동의 경우 다양한 진동들이 적용되어 진동을 저감시키고 있으나 특히 스톡브리지 댐퍼는 가장 활발하게 사용되는 효율적인 댐퍼 방식이다⁽⁵⁻⁹⁾.

스톡브리지 댐퍼는 단일 전력선에 대하여 미풍 1 m/s ~ 7 m/s 구간에서 공기유동과 관련된 vortex shedding 현상에 의해 바람과 직각 방향으로 진동이

발생되는 것을 저감하기 위해 고안되었다. 1920년대 미국의 스톡브리지에 의해 기본 구조가 제안되었으며 1960년대의 연구결과를 기반으로 댐퍼설계 기술과 위치 선정에 대한 연구가 본격적으로 진행되었다. 최근까지도 좌우가 대칭인 2R 댐퍼가 대부분 사용되다가 최근에는 공진점의 개수를 증가시켜 보다 넓은 대역에서 진동을 저감하기 위해 좌우가 비대칭인 4R 댐퍼 유형이 사용되고 있는 추세이다. 2R과 4R은 각각 댐퍼에서 유발되는 자체의 공진점의 개수를 말하는 것으로 대칭 구조에서는 균형추(counterweight)가 병진운동과 회전운동에 의해 중복되는 2개의 공진점이 나타나며, 비대칭 구조에서는 각각 다른 구조의 병진운동과 회전운동에 의해

[†] Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University
E-mail : cjkim@pknu.ac.kr

[#] A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Autumn Conference

[‡] Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

4개의 공진점이 나타난다^(6,7). 최근 연구에서는 제품 적용이 많이 되는 4R 타입 댐퍼가 전체 주파수 대역에서 유리함을 간단한 시뮬레이션을 통해 확인하였으며⁽¹⁰⁾, 댐퍼의 최적위치 선정⁽¹¹⁾이나 댐퍼 비선형 특성을 고려한 연구도 진행되고 있다⁽¹²⁾. 하지만 본 연구에서 중점을 두고 있는 공진점의 위치 선정과 관련하여 목적함수 등을 활용하여 최적화 설계전략을 수립한 사례는 없었다.

이 연구에서는 스톡브리지 댐퍼의 공진점의 중요성을 인지하고 원하는 위치에 공진점을 위치시키기 위해 목적함수를 도입하였다. 초기 임의의 설계 값을 설정한 다음 해당 파라미터의 값을 최대 ±30%의 범위에서 변화시키면서 목적함수의 값이 어떻게 변화되는지를 관찰하였다. 목적함수의 값을 이용하여 원하는 공진점을 최대한 만족시키는 설계 파라미터들의 조합을 찾아내었다. 해당하는 파라미터 조합들은 공진점의 위치에만 중점적으로 고려되었기 때문에 해당 설계 파라미터들이 설계 스펙으로 타당하지를 이후 논의하였다.

2. 설계 파라미터 선정 이론

2.1 스톡브리지 댐퍼 모델

스톡브리지 댐퍼는 2개의 균형추(counterweight)와 이를 지지하는 메신저 케이블로 비교적 간단한 구조를 가지고 있다. 하나의 균형추에 의해 2개의 공진이 발생하고 양쪽은 동일한 구조를 가지기 때문에 한쪽의 댐퍼 모델만으로도 전체 동적 거동을 예측하기에 충분하다. 스톡브리지 댐퍼의 질량은 오로지 균형추에만 있다고 가정하고 메신저 케이블은 강성과 감쇠 역할만 한다고 했을 때 Fig. 1의 자유물체도가 도출된다⁽⁹⁾.

여기서, m 과 $J(I_G + ml^2)$ 는 균형추의 질량 및

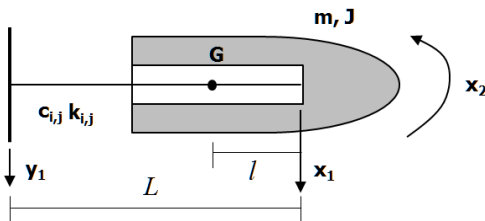


Fig. 1 Free-body diagram of half Stockbridge damper

균형추 연결부위 위치에서의 질량 모멘트를 각각 나타내며, L 과 l 은 각각 메신저 케이블의 길이와 질량 중심(G)과 균형추 연결부위 사이의 거리를 나타낸다. 상태변수는 균형추 연결부위 위치에서 병진운동과 회전운동에 대해 x_1 과 x_2 로 표시된다. 메신저의 특성은 강성과 감쇠 값으로 표현이 되는데 x_i 와 x_j 상태 변수들에 대해 k_{ij} 로 강성과 감쇠 계수 μ 를 활용하여 아래와 같이 표현이 된다^(5,6).

$$\begin{bmatrix} m & ml \\ ml & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = F(V) \tag{1}$$

여기서, \ddot{x} 와 \dot{x} 는 상태변수 x 의 가속도, 속도를 각각 나타내며, μ 와 $F(V)$ 는 감쇠계수와 바람속도(V)에 종속된 전력선의 힘이다. 메신저의 강성(k) 값은 참고문헌⁽⁵⁾ 등에서 실험적으로 구한 관계식을 그대로 활용하였으며 각각의 강성과는 식 (3)으로 관계된다. 이와 같은 상황에서 고유치 해석을 통해 공진점을 얻어내기 위해서는 비감쇠 조건($\mu=0$)과 재차함수($F(V)=0$) 조건에서 고유치(λ)는 아래 조건으로 얻어낼 수 있다.

$$\lambda^2 \begin{bmatrix} m & ml \\ ml & J \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = 0 \tag{2}$$

$$k_{11} = 4k, k_{12} = k_{21} = 2kL, k_{22} = \frac{4kL^2}{3} \tag{3}$$

식 (2)에 대해 2개의 공진점($\lambda_{1,2}$)은 아래와 같이 계산이 된다⁽⁶⁾.

$$\lambda_{1,2} = \left(\frac{ml^2}{I_G + ml^2} \right)^{0.5} \left(\frac{h \pm a}{2m} \right)^{0.5} \tag{4}$$

$$h = 4k \left(1 + \frac{I_G + ml^2}{ml^2} \right) + \frac{4kL^2}{3l^2} - \frac{4kL}{l} \tag{5}$$

$$a^2 = h^2 - \frac{16k^2L^2}{3l^4} \left(\frac{I_G + ml^2}{m} \right) \tag{6}$$

따라서 스톡브리지 댐퍼의 2개 공진점들은 Fig. 1의 모델에서 사용된 설계 파라미터인 m, l, I_G 그리고 L 에 의해 값이 결정된다. 그러므로 4개 설계 변

수들에 대한 합리적인 값을 선정하여 설계자가 원하는 위치에 공진점을 위치시키는 것이 바람직하다.

2.2 목적함수

바람의 세기가 1 m/s에서 7 m/s 사이의 미풍 조건에서 전력선은 aeolian 진동을 유발하게 되고 주파수 대역은 대략적으로 5 Hz에서 50 Hz 사이에서 나타난다. 스톡브리지 댐퍼는 유발된 진동 에너지를 균형추를 통해 별도로 떨게 함으로써 진동 에너지를 저감시키게 된다. 따라서 공진점은 댐퍼의 진동저감 성능을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 2개의 공진점을 α Hz와 β Hz로 설정을 하면 아래와 같은 목적함수(J)를 구성할 수 있다.

$$J = \min_{m, I_G, L, l} [(\alpha - \lambda_1)^2 + (\beta - \lambda_2)^m] \quad (7)$$

여기서, 2개의 공진점 λ_1, λ_2 는 4개의 설계 파라미터를 통해 결정이 되며, m 은 2개 공진점에 대한 가중치를 나타내는 변수가 된다. 이 목적함수의 값이 가장 작은 값이 원하는 주파수 대역에 가장 근접한 값이 된다.

3. 최적 파라미터 선정

3.1 공진점 사례 연구

앞서 언급한 4가지 설계 파라미터를 사용하여 식 (2)에서 도출되는 2개의 공진점을 살펴보고자 한다. 각 설계 파라미터의 초기 값은 참고문헌 등을 고려하여 아래 Table 1과 같이 선정하였으며 초기 모델에서 도출되는 공진점도 같이 나타내었다.

이 조건을 초기 값으로 하여 모든 설계 파라미터들을 $\pm 30\%$ 변화시켜가면서 목적함수의 값을 계산하였다. 목적함수에 사용되는 2개의 목표 공진점은 초기 값을 기준으로 2개의 값을 선정하여 시뮬레이

션 과정에서 4개의 경우의 수를 가지도록 하였다. 또한 목적함수 가중치 m 은 2로 결정하여 2개 공진점의 기여도가 동일하게 적용되도록 하였으며, 설계 파라미터들은 Table 2의 범위 내에서 동일 간격으로 7개를 선정하였다. 가중치 값을 달리하는 경우와 파라미터의 선정 개수에 따라 최적 값이 달라질 가능성이 있으며, 이 연구의 주요 목적이 목적함수를 활용한 최적설계 조건이 효율적으로 도출되는지를 확인하는데 있었기 때문에 일부 시뮬레이션 조건에 대해서만 타당성을 확인하였다.

Table 2에 나타난 바와 같이 설계 파라미터들의 허용 범위를 기준 값을 중심으로 $\pm 30\%$ 까지 두어 비교적 큰 변화에 따른 공진점의 변화를 살펴보고자 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 개별 파라미터 값을 구간 내 7개 선정하였기 때문에 파라미터의 수가 4개라는 점을 고려할 때 사례 연구의 수는 2401개 ($=7 \times 7 \times 7 \times 7$)가 된다.

우선 식 (7)에서 제안된 목적함수가 선정된 2개의 공진점을 잘 추종하는지를 알아보기 위해 Table 1의 $\alpha = \lambda_1, \beta = \lambda_2$ 를 목표 선정 값으로 지정하여 사전 시뮬레이션을 하였다.

다소 근소하긴 하지만 시뮬레이션 결과 1201번째

Table 2 Default design parameters

Parameter	Simulation range	Eigenvalues
m	2.45 kg ~ 4.55 kg	$\alpha_1=5$ Hz $\alpha_2=12$ Hz $\beta_1=32$ Hz $\beta_2=40$ Hz
l	1.05 mm ~ 1.95 mm	
I_G	0.012 kg·m ² ~ 0.023 kg·m ²	
L	0.18 m ~ 0.34 m	
Case I : $\alpha_1 + \beta_1$, Case II : $\alpha_1 + \beta_2$ Case III : $\alpha_2 + \beta_1$, Case IV : $\alpha_2 + \beta_2$		

Table 1 Default design parameters

Parameter	Value	Eigenvalues
m	3.50 kg	$\lambda_1=8.50$ Hz $\lambda_2=35.90$ Hz
l	0.015 m	
I_G	0.018 kg·m ²	
L	0.26 m	

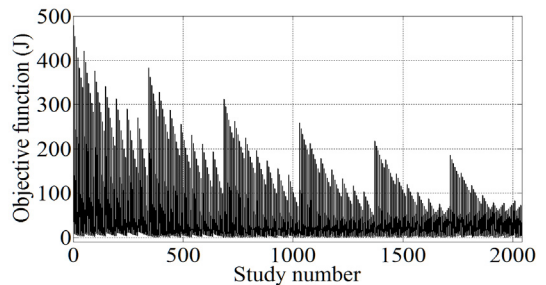


Fig. 2 Case study for default parameter condition

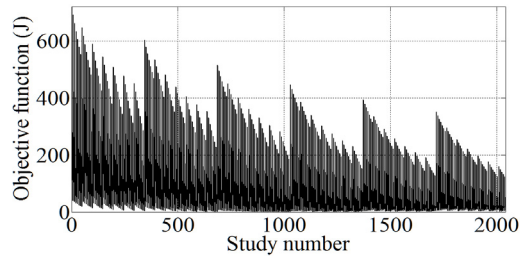
에서 가장 최소의 목적함수 값이 도출되었으며, 이 값에 해당하는 파라미터들의 값은 정확하게 Table 1의 파라미터 값과 일치한다. 하지만, Fig. 2에 나타난 바와 같이 2401개의 사례 연구에서 유사한 결과를 보여주는 경우가 다수 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 이를 확인하기 위해 목적함수의 값을 순서대로 정리하여 근소한 최소값을 가지는 다른 2개의 경우에 대해서도 Table 3에 같이 비교하였다.

첫 번째(No.1)와 비교하여 나머지 2개 경우에 대해서도 목적함수 값은 거의 0에 근접하였기 때문에 3가지 경우 모두 유사한 결과를 도출한 것이다. 하지만 균형추의 질량이나 메신저 길이 등은 상당한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

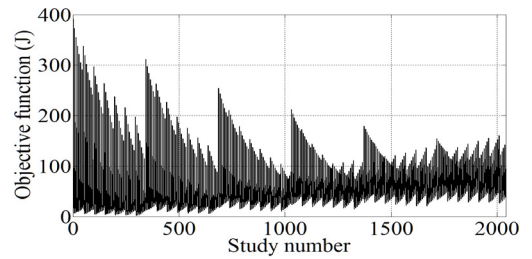
위에서 도출한 3가지 설계후보들은 공진점 측면에서는 매우 유사하지만 서로 다른 설계 사양을 가지고 있기 때문에 댐퍼의 중요한 성능 혹은 내구 측면에서 차이가 있을 가능성이 크다. 따라서 공진점만으로 구성된 현재의 목적함수는 한계를 가지고 있으며 다른 설계요소를 고려한 수정이 필요함을 알 수 있다. 참고문헌(6)에 의하면 스톡브리지 댐퍼의 진동에너지(D)는 식 (8) 같이 표현이 가능하다.

$$D = \frac{\mu}{\omega} \left[k_{11}(\dot{x}_1 - \dot{y}_1)^2 + 2k_{12}x_2(\dot{x}_1 - \dot{y}_1) + k_{22}\dot{x}_2^2 \right] \quad (8)$$

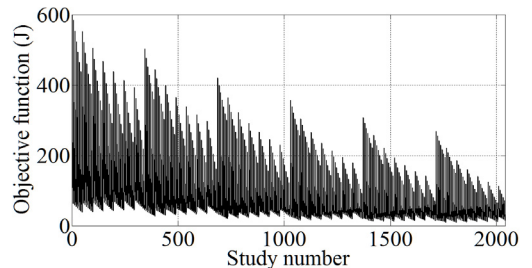
식 (8)에서 댐퍼의 구조적인 인자와 관계된 변수는 k_{ij} 로 표현되는 메신저 강성 성분들임을 알 수 있으며, 식 (3)에 의해 해당 변수들은 L^{-3} 에 비례하게 된다(7). 메신저 케이블의 감쇠 인자(μ)의 경우 물성



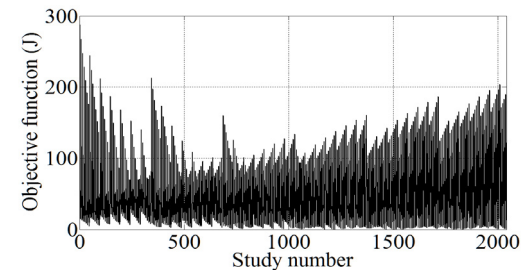
(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III



(d) Case IV

Fig. 3 Case study for different simulation cases

Table 3 Optimal design parameters for default objective function

Parameter	No.1	No.2	No.3
$m(\text{kg})$	3.50	4.55	2.45
$l(\text{m})$	0.015	0.011	0.012
$I_G(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.018	0.021	0.015
$L(\text{m})$	0.26	0.24	0.29
Objective function	0.00001	0.0005	0.011

Table 4 Optimal design parameters for modified objective function

Parameter	No.1	No.2	No.3
$m(\text{kg})$	2.45	2.80	2.45
$l(\text{m})$	0.012	0.017	0.011
$I_G(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.018	0.016	0.018
$L(\text{m})$	0.29	0.29	0.29
Objective function	0.41	0.46	0.49

Table 5 Optimal design parameters for Case I

Parameter	No.1	No.2	No.3
$m(\text{kg})$	4.55	4.55	4.55
$l(\text{m})$	0.014	0.015	0.020
$I_G(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.016	0.016	0.014
$L(\text{m})$	0.34	0.34	0.34
Objective function	0.34	0.38	0.40

Table 6 Optimal design parameters for Case II

Parameter	No.1	No.2	No.3
$m(\text{kg})$	4.55	4.55	4.20
$l(\text{m})$	0.011	0.012	0.011
$I_G(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.012	0.012	0.012
$L(\text{m})$	0.29	0.29	0.31
Objective function	2.98	3.25	3.53

Table 7 Optimal design parameters for Case III

Parameter	No.1	No.2	No.3
$m(\text{kg})$	2.45	2.80	3.50
$l(\text{m})$	0.020	0.020	0.020
$I_G(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.023	0.023	0.023
$L(\text{m})$	0.26	0.26	0.24
Objective function	7.62	8.62	8.69

Table 8 Optimal design parameters for Case IV

Parameter	No.1	No.2	No.3
$m(\text{kg})$	3.15	2.80	2.80
$l(\text{m})$	0.018	0.014	0.017
$I_G(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.019	0.023	0.021
$L(\text{m})$	0.21	0.21	0.21
Objective function	0.78	0.80	0.82

치에 해당하기 때문에 목적함수 수정에서는 관련성이 낮다. 따라서 초기의 목적함수는 메신저의 길이 정보(L)를 고려하여 댐퍼의 진동에너지 특성인자를 추가한 목적함수 수정식 (9)가 도출되었다.

$$J = \min_{m, I_G, L, l} \left[(\alpha - \lambda_1)^2 + (\beta - \lambda_2)^m + \left(\frac{L_{min}}{L} \right)^n \right] \quad (9)$$

여기서, L_{min} 은 기준 대비 30% 짧은 메신저 길이를 나타내며, n 은 메신저 길이에 대한 항목의 가중치이다. 앞서 수행된 사례 연구와 마찬가지로 메신저 길이에 대한 가중치도 동일하게 '2'로 설정한 후 모든 설계 파라미터 조건에 대해 사례 연구를 진행하였으며 최적 설계안은 Table 4와 같다.

시뮬레이션 결과 기존 목적함수의 결과와 다른 최적 안이 도출됨을 알 수 있으며 메신저 길이에 대한 요소가 큰 영향을 주었기 때문이다. 따라서 댐퍼의 진동에너지 저감 등을 고려할 때 수정된 목적함수를 통해 획득한 설계 파라미터의 정보들이 현실적으로 더 유용함을 알 수 있다.

이번에는 Table 2에서 제시된 서로 다른 4가지 시뮬레이션 케이스에 대해 수정된 목적함수를 이용하여 사례 연구를 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 획득한 각 케이스의 목적함수 값들을 Fig. 3에 도시하였다.

4가지 케이스에 대한 사례 연구를 통해 목적함수가 가장 최소의 경우를 Fig. 3에서 도출된 목적함수들의 값의 비교를 통해 얻어내었다. 수정된 목적함수 조건에서 4가지 케이스에 대한 최적 값의 조합을 찾아 Table 5에서 Table 8까지 정리하였다. 각 경우에 대해 3가지 설계 파라미터 정보들을 살펴보면 목적함수의 값의 차이가 크게 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 공진점의 일치 정도에 대해서는 가급적 목표하는 값으로 선정되면 좋으나 엄밀함을 요구하지는 않는다. 따라서 설계자는 댐퍼의 다른 특성을 고려하여 첫 번째 경우를 반드시 선택해야 할 필요는 없다.

4. 결 론

스톡브리지 댐퍼의 공진점 설계의 효율성을 높이기 위해 간단한 댐퍼 모델의 설계 파라미터들을 활용한 목적함수를 도입하였다. 목표 공진점들에 대한 일치도만을 고려한 초기 목적함수의 단점을 보였으며, 유사한 목적함수 값을 배제하기 위해 댐퍼 진동 에너지 값을 고려한 수정된 목적함수를 통해 다양한 설계 케이스에 대한 최적의 설계 파라미터 사양들을 도출하였다. 도출된 사양은 목표 공진점과 메신저

길이에 대한 가중치를 동시에 고려하고 있으며 가중치 인자들을 변경함에 따라 설계자의 선택 자유도가 높다. 향후 댐퍼 설계에서 고려해야 할 내구성능 등을 고려한 목적함수의 수식 개선이 수행되면 보다 넓은 범위의 설계 과정에 본 목적함수가 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 부경대학교에서 지원하는 신입교수연구비로 지원되었습니다.

References

(1) Davall, P. W., Gupta, M. M. and Ukrainetz, P. R., 1977, Mathematical Analysis of Transmission Line Vibration Data, Electric Power Systems Research, Vol. 1, pp. 269~282.

(2) Wang, J. and Lilien, J. L., 1998, Overhead Electrical Transmission Line Galloping - A Full Multi-Span 3-DOF Model, Some Applications and Design Recommendations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3. pp. 909~915.

(3) Kim, Y. D., 2003, Vibration Phenomenon with Weight Change of 6 Bundle Boltless Spacer Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 9, pp. 671~678.

(4) Lee, J. Y., Kim, M. Y., Lim, J. Y., Kim, C. H. and Yim, H. J., 2015, Dynamic Stiffness Design of Inspection Robot Frame Using Multi-body Dynamics Simulation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 169~175.

(5) Claren, R. and Diana, G., 1969, Mathematical Analysis of Transmission Line Vibration, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 2, pp. 1741~1771.

(6) Wagner, H., Ramamurti, V., Sastry, R. V. R. and Hartmann, K., 1973, Dynamics of Stockbridge Dampers,

Journal of Sound and Vibration, Vol. 30, No. 2, pp. 207~229.

(7) Dhotarad, M. S., Ganesan, N. and Rao, B. V. A., 1978, Transmission Line Vibration with Dampers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 60, No. 4, pp. 604~606.

(8) Hagedorn, P., 1982, On the Computation of Damped Wind-excited Vibrations of Transmission Lines, Journal of Sound and Vibration, Vol. 83, No. 2 pp. 253~271.

(9) Bang, M. K., Kim, S. J. and Kim, H. K., 2015, Mitigation Effect of Vortex-induced Vibration of Hangers with Stockbridge Dampers, Proceedings of the KSCE Annual Conference, pp. 49~50.

(10) Kim, C. J., Sohn, J. H. and Kang, I. P., 2016, Key Design Parameter for Stockbridge Damper, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 16~17.

(11) Vecchiarelli, J., Currie, I. G. and Havard, D. G., 2000, Computational Analysis of Aeolian Conductor Vibration with a Stockbridge-type Damper, Journal of Fluids and Structures, Vol. 14, pp. 489~509.

(12) Carpineto, D., Lacarbonara, W. and Vestroni, F., 2014, Hysteretic Tuned Mass Dampers for Structural Vibration Mitigation, Journal of Sound and Vibration, Vol. 333, pp. 1302~1318.



Chan-Jung, Kim received Ph.D. degree from Seoul National University in 2011. He was senior researcher at Korea Automotive Technology Institute over 12 years(2003-2015). Since 2015, he has been joined as the faculty of

Pukyong National university, where he is assistant professor of Mechanical Design Engineering. His research interests are in the area of the vibration fatigue, noise and vibration issue of mechanical systems.