

유체유동에 의한 유연한 파이프의 진동 저감을 위한 파이프 지지용 MR댐퍼의 설계 및 성능 평가

박우철¹, 이현창^{1*}
¹강원대학교 자동차공학과

Design and Performance Evaluation of MR Damper for the Reducing Vibration of a Flexible Pipe Conveying Fluid

Woo-Cheul Park¹ and Hyun-Chang Lee^{1*}

¹Dept. of Vehicle Eng. Kangwon National Univ.

요약 본 연구에서는 유체 유동에 의한 유연한 파이프의 진동 억제를 목적으로 하는 MR댐퍼를 포함한 새로운 형태의 파이프 지지대를 제안하고 평가하였다. 이를 위하여 파이프의 진동 특성에 적합한 새로운 형태의 MR댐퍼를 고안하였으며, MR댐퍼의 성능을 해석할 수 있는 수학적 모델을 구축하였다. 이를 이용해 MR댐퍼의 성능을 평가하였다. 또한, MR댐퍼를 갖는 파이프 지지대가 적용된 외팔보 형식의 파이프 시스템을 모델링하고, 이에 대하여 스카이훅 제어를 적용하여 진동 제어 성능에 대한 해석을 수행하였다.

Abstract This paper presents design and performance evaluation of MR damper for the reducing vibration of a flexible pipe conveying fluid. A novel type of MR damper which is suitable for pipe vibration characteristics is proposed and the MR damper is mathematically modeled and its damping force characteristics are evaluated. The vibration control performance of the MR damper associated with The cantilever pipe system is evaluated.

Key Words : MR damper, Vibration Control, Flexible Pipe, Conveying Fluid, Skyhook Control

1. 서론

파이프 속을 흐르는 유체의 유동 상태에 따라 파이프에는 진동이 발생한다. 유체가 흐르는 파이프는 유동 유체의 유속이 임계속도 이상으로 흐르는 경우와 안정된 속도로 유동하는 경우에도 파이프를 지지하는 방법에 따라 좌굴과 플러터(flutter) 형태의 불안정이 존재하여 진동하게 된다[1]. 파이프 내부의 유동유체에 의한 파이프 구조물의 진동과 동적 안정성에 관한 연구는 공학의 여러 분야에서 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 파이프에 대한 초기의 연구는 파이프에만 국한된 운동방정식의 유도나 임계유속을 구하는 수치 해석적 및 실험적 연구들이 대부분이었다[2,3]. 최근에는 파이프의 집중질량과 감쇠기

의 존재에 의한 파이프의 동적 안정성과 진동 현상에 대한 연구가 수행되었다[4,5].

이와 같이 파이프 내부의 유동 유체에 의한 파이프의 진동에 관한 연구는 진동 발생 메커니즘의 규명에 대한 연구와 파이프계의 형상과 부가적인 요소의 영향 등에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

파이프에서 발생한 진동은 파이프계의 안정성 및 수명에만 영향을 미치는 것이 아니라, 파이프 지지대를 통하여 그대로 구조물에도 진동을 전달되어 구조물의 변형이나 균열을 발생시켜 구조물의 안정성과 수명에도 영향을 준다. 또한, 작업자나 거주자의 생체적 기능에도 악영향을 줄 수 있다[6].

파이프 시스템의 진동 억제는 많은 산업시설에서 절실

*Corresponding Author : Hyun-Chang Lee(Kangwon National Univ.)

Tel: +82-33-570-6391 email: hyunlee@kangwon.ac.kr

Received March 4, 2013

Revised (1st March 25, 2013, 2nd April 2, 2013)

Accepted May 9, 2013

하게 요구되는 부분이기도 하지만, 해석의 복잡함과 진동을 유발하는 요인의 다양성, 그리고 파이프계의 다양성 등의 이유로 파이프계의 진동 억제를 목적으로 하는 제어에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

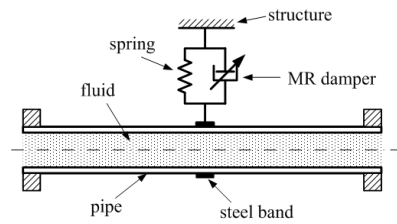
MR(magneto-rheological) 유체는 외부에서 부하되는 자기장의 강도에 따라 유체의 유변적 성질이 변하는 특성을 지닌 유체이며, 이러한 특성을 지닌 MR유체를 적용한 응용 장치들이 많은 분야에서 연구되고 있으며, 그 중 감쇠력을 제어하기 위하여 댐퍼에 적용하는 경우도 있으며, 이를 MR댐퍼라 한다.

따라서 본 연구에서는 유체 유동에 의한 유연한 파이프의 진동 억제를 목적으로 하는 MR 댐퍼를 포함한 새로운 형태의 파이프 지지대를 제안하고 평가하고자 한다. 이를 위하여 파이프의 진동 특성에 적합한 새로운 형태의 MR댐퍼를 고안하였으며, MR댐퍼의 해석적 모델을 구축하고, 이를 이용해 MR댐퍼의 성능에 대한 해석을 수행하였다. 또한, 파이프 자유단의 진동을 제어하기 위한 스카이훅 제어기를 구성하고 이를 적용하여 파이프 지지대의 제어 성능에 대한 해석을 수행하였다.

2. 파이프 지지부

일반적으로 파이프를 지지하는 방법은 배관 시스템의 특성에 따라 달라진다. 순환펌프와 같은 유체 공급부와 직결되는 부분은 바닥에 지지되지만, 유체를 전송하는 부분은 공간의 활용도를 높이기 위하여 건축 구조물이나 플랜트의 천정에 부착하는 방식의 파이프 지지대를 이용하여 지지하는 경우가 많다. 천정에 부착하는 방식의 파이프 지지대는 일반적으로 파이프를 감싸는 밴드와 이와 연결되어 천정의 고정부와 직결되는 강철 봉 형태의 파이프 행거로 구성된다. 이러한 방식의 지지대는 파이프 진동이 강철봉의 행거를 통하여 천정의 고정 부위에 그대로 전달되어 구조물의 변형과 균열의 문제를 야기하게 된다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 파이프 지지대를 제안하였다. 파이프와 구조물을 연결하는 강철봉 사이에 스프링과 MR댐퍼를 병렬로 배치하였다. 자기장을 형성하기 위한 공급하는 전류량 제어에 의해 MR댐퍼의 감쇠력을 조절하여 내부 유체의 유동 특성의 변화에 의한 파이프의 진동 억제에 유연하게 대처할 수 있다.



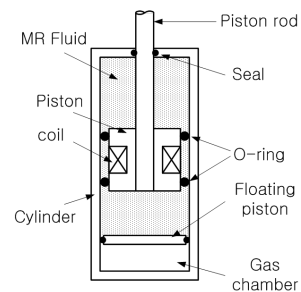
[Fig. 1] Schematic diagram of the pipe support system with MR damper

3. MR 댐퍼 모델링

일반적으로 MR댐퍼는 제어할 수 있는 감쇠력의 범위가 크기 때문에 고급 스포츠 카나 항공기의 현가장치에 적용되고 있다. 이러한 일반적으로 적용되는 MR댐퍼는 Fig. 2와 같이 피스톤 축과 피스톤 헤드, 실린더, 가스 챔버로 구성되어 있으며, MR유체의 누출을 막기 위해 실린더 상단의 실린더 캡에 실링을 포함하게 된다. 또한, 피스톤이 좌우 방향으로 흔들리는 것을 방지하기 위하여 피스톤 헤드와 실린더 사이에 오링을 사용한다. 이러한 실링과 오링들의 접촉부에서는 고체 마찰이 발생하며, 고체 마찰은 가진원의 움직임을 절연하고자 하는 대상으로 직접적으로 전달시키게 된다. 또한, MR유체를 활용한 응용 장치들은 MR효과를 크게 얻기 위하여 자기장이 형성되는 간극을 좁게 하는데, 이러한 좁은 간극에서는 유체의 점성에 의한 효과도 상대적으로 크게 나타나게 된다.

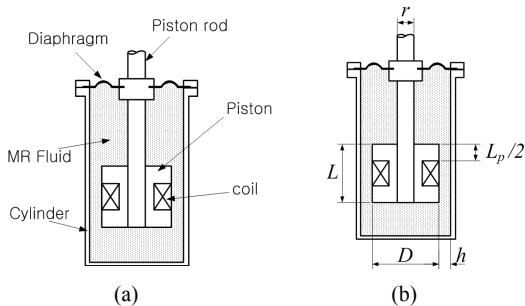
접촉부의 고체 마찰과 좁은 유로로 인한 감쇠력 증가는 피스톤 작동 속도에 대한 댐퍼의 감쇠력 증가율의 변화가 크게 나타난다. 이러한 현상은 급격한 충격이 유입되는 초기 반응 구간에 필요 이상의 감쇠력이 발생하여 제어에는 악역향을 미치게 된다.

본 연구에서는 고체마찰이 없고, 유체의 점성에 의한 영향보다는 MR효과에 의한 감쇠력이 지배적으로 나타나도록 새로운 형태의 MR댐퍼를 제안한다.



[Fig. 2] Configuration of the conventional MR damper.

Fig. 3은 새로이 제안된 MR 댐퍼의 개념도이다. 본 연구에서 제안된 파이프 제진용 MR 댐퍼는 진동 제어에 필요 없는 구간에서는 MR유체의 점성에 의해서만 감쇠가 이루어지고, 파이프 내부를 흐르는 유체 유동의 급격한 변동과 같은 외란에 의하여 파이프에 큰 변위의 진동이 발생한 경우에는 MR유체의 항복응력에 의해 큰 감쇠력을 얻을 수 있는 구조이다. 이러한 특성을 얻기 위하여 실린더 캡과 피스톤 로드 사이의 실링을 제거하고, 그 자리에 Fig. 3과 같이 다이어프램을 적용하였다. MR유체의 점성에 의한 효과를 줄이기 위해 피스톤과 실린더 사이의 간극은 크게 하고, 그 사이에 피스톤의 흔들림을 방지하기 위한 스페이서가 설치되도록 하였다.



[Fig. 3] Design parameters and configuration of the proposed MR damper for the isolation of pipes (a) configuration of the MR damper (b) design parameters of the MR damper

본 연구에서 제안한 MR댐퍼는 고체 마찰이 없는 형식이므로, MR댐퍼의 감쇠력은 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$F_d = k_e x_p + C_e \dot{x}_p + F_{MR} \quad (1)$$

여기서 x_p , \dot{x}_p 는 각각 피스톤의 변위와 속도이며, k_e 는 고무판의 탄성으로, 선형으로 가정하였다. 또한, C_e 는 유체의 감쇠 계수로 다음과 같이 표현할 수 있다[7].

$$C_e = \eta \left[\frac{3\pi D^3 L}{4h^3} \left(1 + \frac{2h}{D} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 η 는 MR유체의 점성계수이며, D 는 피스톤 직경, L 은 피스톤 길이, h 는 피스톤과 실린더 사이의 간극이다. 한편 공급되는 자기장에 따른 MR유체의 항복응력 변화에 따른 MR댐퍼의 감쇠력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{MR} = (A_p - A_r) P_{MR} \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3)$$

여기서 A_p 와 A_r 은 각각 피스톤과 피스톤 로드의 단면적을 나타낸다. P_{MR} 은 MR유체의 항복 응력 변화에 따른 압력 강하로, 자기장에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$P_{MR} = 2 \frac{c L_p}{h} \tau_y(H) \quad (4)$$

여기서 c 는 피스톤 내부에서 유동하는 유체의 속도와 관계된 계수이며, 일반적으로 2에서 3사이의 값으로 본 연구에서는 2.85를 사용하였다. L_p 는 자극의 길이를 나타내며, $\tau_y(H)$ 는 자기장(H)의 함수로 표현되는 항복응력을 나타낸다[8]. 본 연구에서는 Lord사의 MRF-132DG를 적용하였으며, 이의 항복응력을 자기장의 함수로 표현하면 다음과 같다[9].

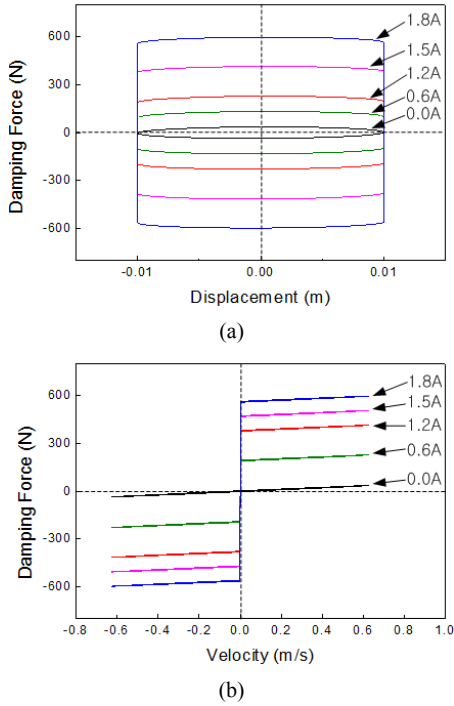
$$\tau_y = Y_0 + A_1 e^{(-H/R1)} \quad (5)$$

본 연구에서 제안한 댐퍼의 전체 길이는 150mm, 실린더의 외경은 66mm, 간극(h)은 3mm로 하였다. 자기장을 형성하기 위한 피스톤 헤드의 코일부는 $\phi 0.7$ 의 에나멜선으로 230회 감는 것으로 하였다. 제안된 MR댐퍼의 성능을 해석하기 위한 MR댐퍼의 주요 설계 인자는 Fig. 3의 (b)와 같으며, 해석에 사용된 나머지 설계변수는 Table 1과 같다.

Fig. 4는 식(1)로 표현되는 MR댐퍼 모델로부터 해석한 MR댐퍼의 감쇠력 성능 그래프이다. 일반적인 댐퍼의 특성곡선과 유사하게 속도가 증가함에 따라 감쇠력이 증가하고 있다. 또한, 공급하는 전류에 의해 발생하는 자기장이 증가함에 따라 감쇠력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4의 (b)에 나타난 바와 같이 작동 속도의 증가에 따른 감쇠력의 증가비율은 작게 나타나고 있다.

[Table 1] Design variables of the MR damper.

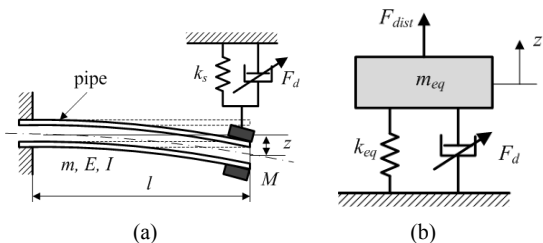
Design variable	Value
A_p	0.002 m ²
A_r	0.0000503 m ²
k_e	280 kg/s ²
η	0.098 Pas
L_p	0.016 m
L	0.03 m
h	0.003 m



[Fig. 4] Damping force characteristics of MR damper. (a) Damping force vs. displacement (b) Damping force vs. velocity

4. 파이프의 진동 제어

제안된 MR댐퍼를 적용한 파이프 진동 절연 시스템의 가능성을 살펴보기 위한 MR댐퍼가 적용된 파이프계의 개략도는 Fig. 5와 같다. 한쪽은 고정되어 있고, 다른 한쪽은 자유단인 파이프계로 고려하였다. 파이프의 강성에 비하여 유체의 질량은 작다고 가정하여 파이프 내부의 유동은 무시하였으며, 파이프 지지부의 구조 특성을 고려하여 파이프의 횡방향에 대하여만 고려하였다.



[Fig. 5] Mechanical model of the vibration isolation system of pipe with the MR Damper. (a) The vibration isolation system of pipe (b) The mechanical model

주어진 파이프의 횡방향 진동을 제어하기 위한 시스템을 해석하기 위하여 Fig. 5의 (b)와 같이 단순한 1자유도 시스템의 모델을 수립하였다. 이와 같은 모델은 다음과 같은 상태 공간 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{sys}\mathbf{x} + \mathbf{B}_{sys}u + \mathbf{L}_{sys}F_{dist} \quad (6)$$

여기서

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} z \\ \dot{z} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{sys} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{eq}}{m_{eq}} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{sys} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m_{eq}} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{L}_{sys} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_{eq}} \end{Bmatrix}$$

$$u = F_d$$

여기서 k_{eq} 는 파이프 자중에 의한 영향과 끝단의 부가 질량에 의한 영향을 고려한 파이프 자체의 스프링 상수와 상부 구조물과 연결된 스프링의 스프링을 고려한 등가 스프링 상수이다. m_{eq} 는 파이프의 자중과 파이프 끝단의 부가질량을 고려한 등가질량이다. F_d 는 MR댐퍼에서 발생하는 감쇠력이다. 파이프 지지대는 파이프 자체의 진동 억제뿐만 아니라 구조물로 전달되는 진동 억제를 목적으로 하기 때문에 유체의 유동에 의해 발생하는 외부 가진력은 수직방향의 성분만을 고려하였으며, F_{dist} 로 나타내었다. z 는 파이프 자유단의 수직방향 변위이다.

이 연구에서는 단순하지만 매우 효과적이고 실제 환경에 쉽게 적용할 수 있는 스카이훅(skyhook) 제어를 적용하여 MR댐퍼에 부하하는 전류를 제어하였다. 스카이훅 제어기의 제어 입력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u = C_{sky}\dot{z} \quad (7)$$

여기서 C_{sky} 는 제어 입력으로써, 물리적으로는 감쇠 계수를 의미한다. 한편 MR댐퍼는 반능동 제어기이므로 다음과 같은 반능동 조건을 부여하여야 한다.

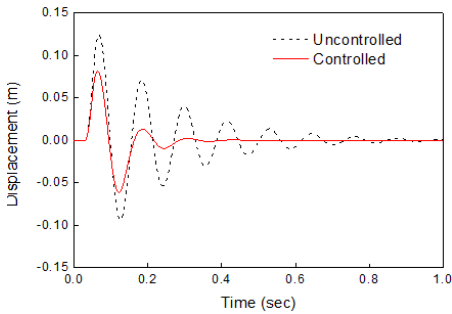
$$u = \begin{cases} u & \text{for } u \cdot \dot{z} > 0 \\ 0 & \text{for } u \cdot \dot{z} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

진동 제어의 해석을 위해 사용된 변수들은 Table 2와 같다.

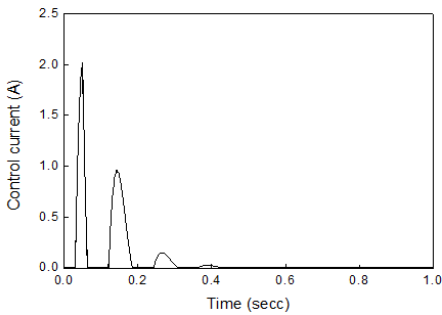
[Table 2] Variables for simulation of the vibration control

Variable	Value
I	$2.8429 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
E	$2.9 \times 10^9 \text{ Pa}$
M	5 kg
m_{eq}	0.8312 kg
l	0.8 m
k_s	500 N/m

파이프에 수격현상과 같은 급격한 유체 유동의 변화가 발생한 경우의 진동제어 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 급격한 유동 변화에 의한 가진과 유사하게 하기 위하여 0.02초 동안 가해지는 임펄스 입력의 형태로 하였으며, 시스템에 가해지는 힘의 크기는 $F_{dist} = \rho A V^2$ 로 계산하였다. 유동 유체는 물을 기준으로 하였으며, A 는 파이프의 안쪽 단면적으로 0.0013m^2 이며, V 는 유체의 유속으로 40m/s로 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 MR댐퍼에 제어 입력을 인가하였을 경우, 제어를 하지 않은 경우에 비해 진동이 빠르게 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이때 제어 입력값은 Fig. 6의 (b)에 도시하였다.



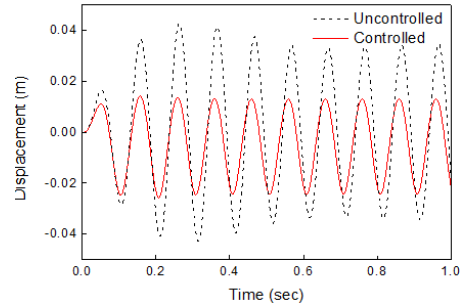
(a)



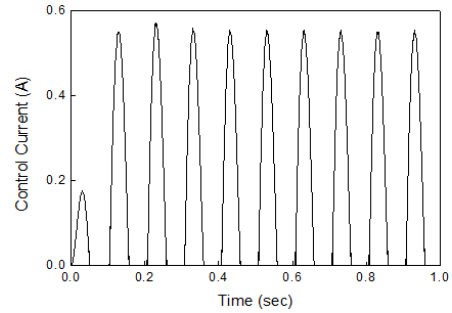
(b)

[Fig. 6] Control performances under impulse input. (a) Displcement vs. time (b) Control current

Fig. 7은 펌프 작동에 의한 맥동 압력과 같은 조화함수의 입력 가진이 가해진 경우에 대한 제어 성능을 도시한 것이다. 제어입력을 가하지 않은 경우에 비하여 제어한 경우의 파이프 진폭이 작게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이때의 제어 입력을 Fig. 7의 (b)에 도시하였다.



(a)



(b)

[Fig. 7] Control performances under harmonic excitation input. (a) Displacement vs. time (b) Control Current

5. 결론

본 연구에서 유체 유동에 의한 유연한 파이프의 진동 억제를 목적으로 하는 MR댐퍼를 포함한 새로운 형태의 파이프 지지대를 제안하고 성능에 대한 해석을 수행하였으며, 결과는 다음과 같다.

1. 파이프의 진동 특성에 적합한 새로운 형태의 MR댐퍼를 고안하였으며, MR댐퍼의 성능을 해석할 수 있는 해석적 모델을 구축하고, 이를 이용해 MR댐퍼의 성능에 대한 해석을 수행하였다.
2. 파이프 자유단의 진동을 제어하기 위한 스카이훅 제어기를 구성하고, 제안된 제어기에 의하여 임펄스

스 형태와 조화함수 형태의 가진의 입력에 대하여 제어가 이루어짐을 확인하였다.

향후 실험을 통한 성능 고찰을 수행할 예정이다.

References

- [1] C. H. Pak, S. C. Hong, W. Jung, "Chaotic Vibration of a Straight Pipe Conveying Oscillatory Flow", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration engineering*, Vol. 6, No. 2, pp.233~244, 1996
- [2] D. H. Seok, "Analysis & Solution for Piping Vibration of Plant", *Daewoo Engineering Technical Research*, Vol. 24, No. 1, pp.90~104, October, 2008
- [3] I. S. Son, H. I. Yoon, D. J. Kim, "Effect of Crack on Stability of Cantilever Pipe Conveying Fluid", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 1119~1126, 2007
- [4] B. J. Ryu, S. H. Jung, J. W. Lee, "Dynamic Stability of a Vertical Cantilevered Pipe Conveying Fluid with Additional Spring Support", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration engineering*, Vol. 12, No. 12, pp.979~985, 2002
DOI: <http://dx.doi.org/10.5050/KSNVN.2002.12.12.979>
- [5] H. J. Kim, B. J. Ryu, S. H. Jung, "Effect of External Damping and Tip Mass on Dynamic Stability of Pipes Conveying Fluid", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration engineering*, Vol. 19, No. 6, pp.569~574, 2009
- [6] B. S. Kim, B. K. Choi, "Vibration Diagnosis of Building caused by Structural Resonance of the Fixing Beam for the Pipes", *J. Ins. Marine Industry*, Vol 21, pp.103~109, 2008.
- [7] Singiresu S. Rao, *Mechanical Vibrations*, pp.67~69, Pearson Education Korea, 2004
- [8] W. C. Park, H. C. Lee, "Study on design of the magnetic pole used in the dashpot type MR fluid mount", *J. of the Korea Academia-Industrial cooperational Society*, Vol. 10, No.3, March 2009
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.3.482>
- [9] Load Corporation, Load technical data, [http://www.lord.com/Products-and-Solutions/Magneto-Rheological-\(MR\)](http://www.lord.com/Products-and-Solutions/Magneto-Rheological-(MR))

이 현 창(Hyun-Chang Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 5월 : Univ. of Maryland 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 5월 : Old Dominion Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 자동차공학과 교수

<관심분야>

System ID, 시스템 설계, 진동 및 소음 제어, 구조해석, FEM

박 우 철(Woo-Cheul Park)

[정회원]



- 1987년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 자동차공학과 교수

<관심분야>

지능형 구조물, 시스템설계 및 정밀제어, 진동 및 소음제어, 친환경 기계설비