

구조-유체 연성해석을 통한 수도용 감압밸브에서의 유체유발진동에 관한 연구

박우철^{1*}, 이종근², 김일겸³, 박용석⁴

¹강원대학교 자동차공학과, ²신우 ENC,
³첨단기공(주) 부설연구소, ⁴인하공업전문대학 기계과

Study on Vibration Induced by Fluid at a Water Pressure Reducing Valve through Structure-Fluid Coupled Analysis

Woo-Cheul Park^{1*}, Joong-Kuen Lee², Il-Gyoum Kim³ and Yong-Suk Park⁴

¹Dept. of Vehicle Eng. Kangwon National University

²ShinWoo ENC, ³ChomDan Mechanical Co. Ltd., R&D Center

⁴Dept. of Mechanical Eng. Inha Technical College

요약 본 논문에서는 수도용 감압밸브에서의 유체유발진동의 원인을 파악하기 위한 위하여 구조-유체 연성 해석을 수행하였다. 감압밸브의 소음을 측정된 결과 250Hz의 저주파 대역의 소음이 있음을 확인하였다. 상용 소프트웨어인 ANSYS/CFX를 사용하여 유체의 유동 해석을 수행한 결과, 감압밸브 내에서 노즐 효과에 의하여 40m/s 정도의 유속이 형성되고, 이에 따라 감압밸브 내에 부압이 발생하였다. 밸브 내에 형성된 유동에 의한 압력 분포를 하중 조건으로 구조해석을 한 결과, 유로를 막을 수 있을 정도의 고무 재질인 디스크의 변형이 발생하였다. 이러한 디스크의 변형이 반복적으로 일어남으로써 소음진동현상이 발생함을 확인하였다.

Abstract In this paper, the structure-fluid coupled analysis is carried out in order to examine the cause of the vibration induced by fluid in the pressure-reducing valves for water. It is confirmed that there is the noise at the area of low frequency of 250Hz by measuring noise at pressure reducing valve. The flow analysis is performed by the commercial software ANSYS/CFX. The flow velocity of about 40 m/s is formed by nozzle effect, and so negative pressure is happened in the pressure reducing valve. The structure analysis is carried out with the load condition of pressure distribution by flow formed in valve. The rubber material at disk is deformed to the extent of closing up flow passage. It is confirmed that the disc deformation which is occurred repeatedly is due to noise and vibration at the pressure reducing valve.

Key Words : Pressure Reducing Valve:PRV, Noise, Fluid Induced Vibration, Structure-Fluid Coupled Analysis, Cavitation

1. 서론

산업발달에 따른 인구의 도시 집중과 조밀화, 생활양식의 변화를 가져오고 있으며, 특히 주거 환경은 대규모의 아파트 단지화 뿐만 아니라 초고층화 되어가고 있는 추세이다.

아파트와 같은 공동주택의 쾌적한 주거환경을 저하시키는 것으로는 내부소음이 있으며, 이 중에는 바람 충격음과 함께 급배수 설비 소음이 중요한 위치를 차지하고 있다. 급배수 설비 소음은 유체의 운동에 의하여 발생하며, 직접 공기 중을 전파하여 가는 공기전달음과 배관, 배관 지지재료 및 구조체 등을 통해 재차 공기 중을 전파하

*Corresponding Author : Woo-Cheul Park

Tel: +82-10-3999-0594 email: wchpark@kangwon.ac.kr

접수일 12년 08월 28일 수정일 12년 09월 24일

게재확정일 12년 10월 11일

여 가는 구조전달음으로 구분된다. 이러한 공동주택 내의 급배수 설비 소음은 급수설비 및 배관 방식, 배관재의 종류, 배관 스페이스의 구조 및 위치 등에 따라 소음 레벨이 달라진다[1].

감압밸브(Pressure Reducing Valves, PRV)는 배관계통에 작용하는 높은 압력을 기구나 장비에 적합한 압력으로 낮추어 주는 역할을 하는 기구이다. 특히 급수나 급탕 배관에 사용되는 것을 물용 감압밸브(Water Pressure Reducing Valve)라고 하며, 상업용은 물론 아파트 등의 주거용 건물이 급격히 고층화 되면서 사용의 필요성이 절실했던 것이다[2].

수도용 감압밸브는 대규모 아파트 단지나 초고층 빌딩의 급수시스템에서 필수적인 배관요소이고, 각 세대마다 1개 이상 설치되는 제품이며, 시장규모도 상당히 크다. 최근에는 자동밸브 전문업체는 물론 상당히 많은 소규모 제조업체에서도 저가품을 출시하고 있는 실정이어서 제품 판매경쟁이 매우 치열하다. 그러나 사용 목적에 부합하는 유량 특성을 가진 제품의 선정, 정확한 Sizing, 적용 후의 결과가 설계 의도에 맞아 떨어지는지 등의 여부를 검증하지 못한 상태에서 제품을 설치하는 경우가 많아 급배수 소음 등의 문제가 발생하고 있다[3].

그러나 급수용 배관계통에 적용되는 감압밸브를 제작하는 업체들은 대부분 영세하여 급수배관용 감압밸브에 대한 체계적인 연구는 거의 전무한 실정이다. 또한, 감압밸브에 대한 연구는 주로 자동차용 현가장치에 적용하기 위한 연구가 주를 이루고 있으며, 연구의 제어기법에 관한 연구가 주를 이루고 있다[4-6].

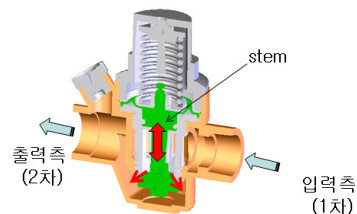
따라서 본 연구에서는 수도용 감압밸브에서 발생하는 소음과 진동의 원인을 규명하기 위하여 유체-구조 연성 해석을 수행하고, 분석된 결과를 근거로 해결책을 제시하고자 한다.

2. 감압밸브의 구조와 캐비테이션

감압밸브는 밸브 시트의 구조에 따라 싱글 시트형(single-seat type)과 더블 시트형(double-seat type)으로 나뉘며, 작용방식에 따라 직동식(direct-operate type)과 파이롯트식(pilot-operate type)으로 구분된다. 싱글 시트형은 오리피스 등의 요소에 의한 압력 손실을 크게 하여 감압하는 방식으로 유량이 적어지면, 밸브의 개도가 줄어들고 압력차도 없어져, 1차측과 2차측의 압력은 같아지게 되며, 유체 흐름이 정지되면 개도가 완전 차단되는 형태의 밸브이다. 더블 시트형은 직동식과 파이롯트식으로 구분되며, 유체 흐름이 정지되는 경우에도 밸브 개도가 완전

히 차단되지 않는다. 직동식은 1차측 압력 변동에 관계없이 최초로 설정된 2차 측 압력을 일정하게 유지하며, 유동 정지 중에도 감압기능을 유지하는 특징이 있다. 파이롯트식은 2차측 압력에 의하여 작동되는 소형의 직동식 감압밸브(pilot valve)에 의해 주밸브를 작동시켜 압력을 조정하는 형태의 밸브로 주로 대유량에 사용된다[2,3].

그림 1은 주거건물에 사용되는 single seat direct 방식 감압밸브의 작동원리를 나타낸 것이다. 2차측 압력을 설정해 놓으면 스프링이 누르는 힘과 2차측 설정압력이 미치는 다이어프램 하부 압력 사이에 균형이 이루어져 밸브는 닫힌 상태를 유지한다. 이때 물이 사용되면 2차측 압력은 낮아지게 되고, 다이어프램 하부에 작용하는 압력이 감소하게 된다. 그러면 스프링의 힘에 의해 밸브의 스템이 아래로 내려가며 밸브 시트는 열리게 된다. 물을 사용하는 동안에 다이어프램에 미치는 압력과 스프링의 힘이 균형을 이루어 2차측의 압력이 일정하게 유지된다.



[그림 1] 감압밸브의 작동원리
[Fig. 1] The working principle of pressure reducing valves

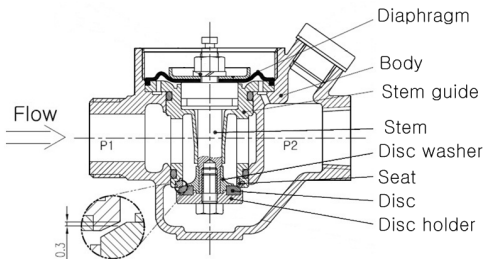
감압밸브를 통해서 흐르는 유량이 많아질수록 2차측의 압력이 설정압력보다 낮아져 밸브가 더 열리고, 낮은 2차측 압력이 다이어프램 하부에 미치는 압력은 설정압력일 때 미치는 압력보다 작아진다. 이때 감압밸브를 통해 흐르는 유량이 일정해지면 2차측의 압력이 안정화되어 일정한 값을 유지한다.

캐비테이션은 액체의 압력이 급격히 낮아질 때 생성되는 현상으로 이때 생성된 기포가 금속을 침식시키거나 진동으로 인한 소음을 일으킨다. 감압밸브의 고압측과 저압측의 차압이 과도한 경우에는 캐비테이션이 발생할 수 있다[7].

1차측 압력과 2차측 설정압력이 캐비테이션 발생 조건이 아니더라도 감압밸브가 설정압력을 유지하지 못한다면 캐비테이션이 발생할 수 있다. 즉, 2차측 압력이 설정압력보다 감소하여 캐비테이션 발생영역 안으로 들어가는 경우에는 캐비테이션이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다[8,9].

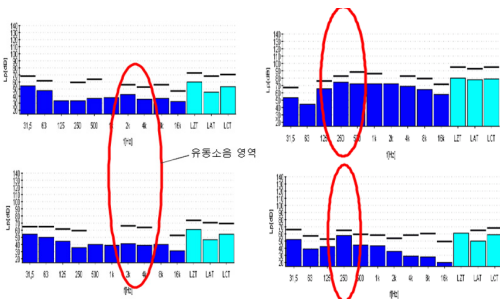
3. 감압밸브의 소음 측정

본 연구에 사용된 감압 밸브의 구조를 개략적으로 나타내면 그림 2와 같다. 감압밸브는 body, stem, stem guide, 시트, 디스크로 구성되어 있으며, 시트와 디스크 사이에 형성된 틈새가 유체의 유동이 발생하는 유로의 역할을 하며, 이 틈새의 간극은 스프링력에 의하여 조절된다.



[그림 2] 감압밸브의 내부 구조도
[Fig. 2] The internal structure of the PRV.

수도용 감압밸브의 소음과 진동을 정확히 파악하기 위하여 감압밸브의 소음이 유발되는 실제의 아파트에서 소음을 측정하였다. 실험대상 건물은 오산시에 위치한 **아파트이며, 측정 대상 세대는 과다 소음과 심한 배관 진동 증상을 제기한 세대에서 측정하였다.



(a) 정상상태 (b) 소음 발생 상태
[그림 3] 아파트의 감압밸브 배관에 대한 음압 측정 결과
[Fig. 3] Results of noise measurements of piping system including the PRV in a apartment.

그림 3의 (a)는 정상적인 밸브의 소음을 측정된 결과를 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 배관 내 유체의 유동에 의한 소음 영역인 2,000Hz에서 약 46dB(A) 정도의 소음을 나타내고 나머지 영역에서는 그 이하의 음압이 분포하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 그림 3의 (b)와 같이 배관계의 과다 소음 증상을 제기한 아파트 세

대에서 소음을 측정된 결과에서는 유체의 유동 소음 영역이 아닌 250Hz 부근의 저주파 영역에서 50dB(A) 이상의 음압이 존재하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 감압밸브에서 발생하는 소음은 감압밸브 배부에서의 물의 유동 변화와 감압밸브 내부의 구조 문제가 혼합되어 나타나는 것으로 생각된다.

4. 감압밸브의 진동 및 유동해석

감압 밸브의 각 부품별 진동해석을 통하여 현장에서 파악된 소음과의 상관관계를 살펴보았다.

감압 밸브를 결합 상태와 운동조건으로 고려하여 몸체(body), 스템(stem), 스템 가이드(stem guide)는 단품으로 형태만 고려하였으며, 유체의 유동과 연관성이 높은 부분은 스템과 디스크만으로 구성된 어셈블(어셈블1)과 스템, 가이드 그리고 디스크로 구성된 어셈블(어셈블2)로 구성하여 유한요소법에 이용하여 모드해석을 수행하였다. 해석에는 상용 소프트웨어인 ANSYS workbench를 사용하였다.

해석을 수행한 결과를 표 1에 나타내었다. 단일부품들인 몸체, 스템, 스템 가이드의 모드별 고유진동수는 높은 고주파 영역에서 분포하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 조합된 형태의 구성품인 어셈블1과 어셈블2에서는 현장에서 측정된 밸브의 소음과 근접한 낮은 주파수 영역의 진동 모드를 가지고 있는 것을 알 수 있다.

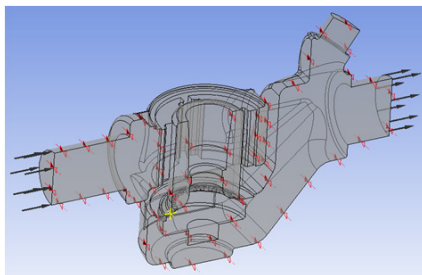
[표 1] 감압밸브 구성품의 고유진동수
[Table 1] Natural frequencies of the components of the PRV.

Part	Material	Result	
		Mode	Frequency
Body	Brass	1	4726
		2	5696
		3	5868
Stem	C3604 BE	1	1844
		2	1845
		3	4367
Stem Guide	ACETAL COPOLYMER	1	3792
		2	3812
		3	7218
Assembly 1	-	1	3.13
		2	344
		3	349
Assembly 2	-	1	428
		2	448
		3	451

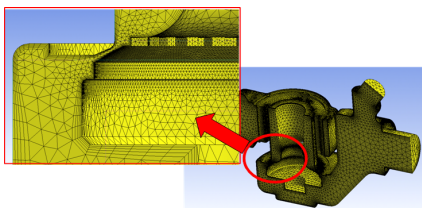
감압 밸브의 운전조건에서 유체의 유동에 의한 밸브 내의 압력 분포에 의해 밸브 부품에 가해지는 힘을 계산하여 구조물의 변형을 예측하고, 소음과 진동과의 연관성을 살펴보기 위하여 상용코드인 ANSYS사의 CFX를 이용하여 유동 해석을 수행하였다.

입구와 출구의 경계조건은 수도용 감압밸브의 정상 동작 조건과 유사하게 하기 위하여 1차측 압력(P_1)은 7kg/cm^2 , 2차측 압력(P_2)는 2.5kg/cm^2 로 하였다. 주어진 1차측 압력과 1차측 압력의 차압에서는 캐비테이션이 발생하지 않는 영역에 해당된다[7]. 작동 물체는 물로 하였으며, 모든 벽면에는 점착조건(no-slip)과, 단열조건을 적용하였으며, 유동해석 형상 중심면을 기준으로 유동혼합이 없는 대칭조건(symmetry)을 주었다. 난류모델은 k- ϵ 모델을 사용하였다[10]. 1차측 압력과 2차측 압력 차이에 유체의 유동이 발생하기 위해서는 시트와 디스크 사이의 간극이 존재하여야만 한다. 해석을 수행하기 위하여 시트와 디스크 사이의 간극은 0.3mm 로 가정하였다.

본 연구에서는 그림 4의 (a)에서와 같이 계산시간의 단축과 수렴성의 향상을 위해 유로의 형상을 단순화하였고, 유동해석형상의 대칭성을 이용하여 유동해석 형상 중심면에 대칭조건을 주어 계산을 할 수 있도록 형상을 설계하였다. 그림 4의 (b)는 유동 해석 방법의 결과와 난류 모델 설정 및 해석결과의 타당성을 검증하기 위해 제작된 유동형상의 계산 격자점을 나타내고 있다. 격자계는 Tetra/Prism 격자로 구성하였으며, 총 격자수는 총 120만 개이다.



(a) 경계 조건

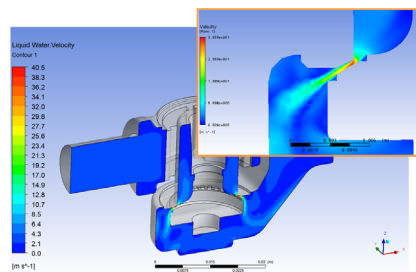


(b) 격자 모델

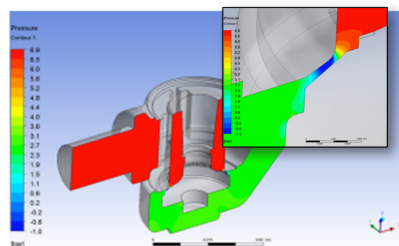
[그림 4] 유동 해석에 사용된 경계조건과 격자모델
[Fig. 4] Boundary conditions and the meshed model

캐비테이션을 정확하게 해석하기 위해서는 cavitation model로 적용하여야 하지만, 본 연구에서는 캐비테이션의 형상과 분포에 대한 집중적인 연구가 아니므로 포화압력을 이용하여 분석하였다. 물의 포화압력을 3547Pa 로 하였다[10].

그림 5는 밸브 내부의 유체의 속도와 압력분포를 나타낸 것이다. 분석한 결과, 시트와 디스크 사이에 형성된 간극의 전후의 급격한 형상 변화로 인한 노즐 효과로 인하여 간극 사이에 형성된 유로에서는 최대 약 40 m/s 의 유체 속도가 형성되며, 그 이외의 영역에서는 5m/s 의 속도를 나타내고 있다. 그림 5의 (b)는 감압밸브 내의 압력을 나타낸 것이다. 시트와 디스크 사이에 형성된 유로를 지나면서 급격하게 압력이 떨어져 약 -1.0 bar 의 부압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 시트와 디스크 사이의 유로에 발생된 이 압력은 고무재질의 디스크의 변형을 가중시키는 힘으로 작용될 수 있다고 판단된다.



(a) velocity result

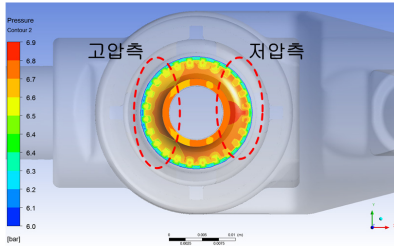


(b) pressure result

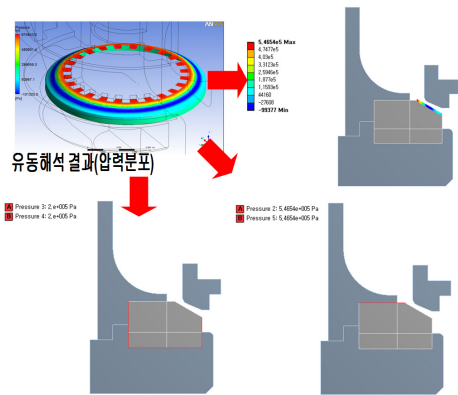
[그림 5] 감압 밸브 내부의 유동 속도와 압력 분포
[Fig. 5] the result of the flow velocity and the pressure for the inside of the PRV. (0.3mm gap)

그림 6은 시트와 디스크 사이에 형성되는 유로에 접하는 디스크 상부 표면의 압력 분포를 나타낸 것이다. 디스크 상부 표면 중 입구에 해당되는 고압측과 출구에 해당되는 저압측 압력차는 약 0.1bar 로 나타나고 있다. 물의 유동에 의해 발생되는 이 압력차는 감압밸브의 스템을 고압측과 저압측으로 밀어내는 힘으로 작용하고, 감압밸브의 특성상 압력의 평형이 이루어진 상태에서는 원래의

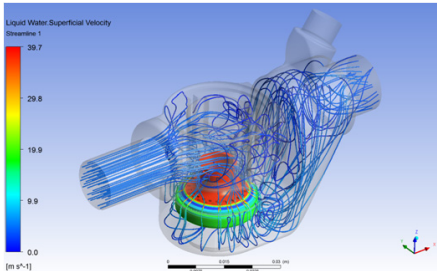
위치로 복원될 것이다. 이러한 현상이 반복적으로 이루어진다면 진동시킬 수 있는 힘으로 작용될 수 있다고 생각된다.



[그림 6] 디스크 상부 표면에서의 압력 분포
[Fig. 6] The pressure result in the upper surface of the disk



[그림 8] 구조 해석을 위한 하중 조건
[Fig. 8] Load conditions for the structural analysis

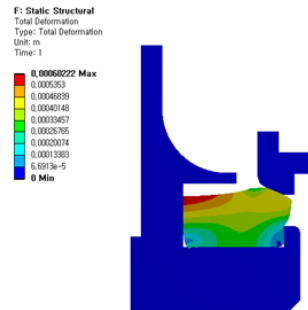


[그림 7] 감압 밸브 내부의 유동 패턴
[Fig. 7] The flow pattern of the pressure reducing valves

그림 7은 감압 밸브 내부의 유동 패턴을 나타낸 것이다. 시트와 디스크 사이에 형성된 간극 부위를 제외하고는 급격한 속도의 변화와 유체가 유체가 정체되는 병목 구간과 와류 현상이 발생하지 않는 것으로 나타나고 있다. 따라서 감압밸브의 시트와 디스크 사이의 유로 부위가 문제를 발생시키는 주요 원인이라고 분석되었다.

밸브표면에서의 압력분포는 밸브 갭을 지나면서 급격하게 변하므로 밸브 표면의 유동 특성을 반영한 구조적인 검토가 필요하다. 따라서 유동 해석의 결과를 가지고 디스크를 구조해석 하여 디스크의 변형 형태를 분석하였다.

디스크부의 구조해석을 위하여 필요 없는 부분은 생략하고 2D 축대칭으로 모델링 하였다. 앞서 수행한 유동 해석 결과를 바탕으로 그림 8과 같이 하중 조건을 부여하였다. 디스크의 하단부에 고정되는 부분은 200,000Pa의 압력이 작용하는 것으로 하였고, 디스크의 위 표면에는 546,540Pa의 압력이 작용하는 것으로 하였다. 그리고 유로의 역할을 하는 부분은 앞서의 해석 결과를 대입하였다.



[그림 9] 구조 해석 결과
[Fig. 9] The result of the structural analysis.

디스크 구조해석 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 디스크와 시트 사이의 유로에서의 빠른 유속에 의해 발생하는 부압이 디스크를 시트 쪽으로 잡아 당겨 고무 재질의 디스크에 변형이 발생하는 것으로 나타나고 있으며, 이 변형의 크기는 유로를 유로의 간극인 0.3mm를 넘어서는 값으로 나타나고 있어, 급격한 단면 변화에 의한 유속의 변화가 유로를 차단할 수 있는 충분한 힘으로 작용한다는 결론을 얻었다. 디스크의 변형은 일시적으로 유로를 막게 되고, 유로가 일시적으로 막히게 되면 유체의 유속이 떨어지고, 디스크에 미치는 부압이 해소되어 변형되었던 디스크는 원 위치 되어 유로가 다시 열리게 된다. 이상의 일련의 작용은 반복적으로 발생하여 소음과 진동이 유발되는 것으로 판단된다.

5. 결론

수도용 감압밸브의 소음과 진동문제에 대한 근본적인

원인을 분석하고자, 감압밸브의 유동해석과 구조해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 시트와 디스크 사이에 형성된 간극의 전후의 유로에서는 최대 약 40 m/s의 유체 속도가 형성되며, 유로를 지난 후에 약 -1.0 bar의 부압이 발생한다.
- 2) 디스크의 표면에 0.1bar의 압력차이가 발생하며, 디스크와 시트 사이의 유로에서의 빠른 유속에 의해 발생하는 부압이 디스크를 시트 쪽으로 잡아당기는 형태의 변형을 유발하였으며, 그 크기는 0.3mm이상의 값을 나타냈다.
- 3) 디스크의 변형은 감압밸브의 구조상 반복적으로 발생할 수밖에 없으며, 이러한 반복적인 디스크의 변형이 소음과 진동이 유발되는 것으로 판단된다.

References

- [1] S. W. Park, "Water Pressure Reducing Valve - Structure and Characteristic of Application", Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering of Korea, Vol. 24, No. 5, pp.530-538, Oct., 1995.
- [2] K. Ch. An, "Principle of pressure reducing in cold water piping system", opinion article in the academic lectures of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering of Korea, pp.1-6, May, 2001.
- [3] H. Y. Kim, "The characteristic applications of water pressure reducing valves", opinion article in the academic lectures of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering of Korea, pp.53-67, May, 2001.
- [4] K.U. Yang and I. Y. Lee, "A modeling of Proportional Control Valve and its Control", J. of the Korea Society For Power System Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 71~77, Aug., 2002.
- [5] S. N. Yun, Y. B. Ham and J. D. Jo, "Pressure Control Characteristics of Proportional Pressure Reducing Valve", J. of the Korea Society For Power System Engineering, Transactions of the KSAE, Vol. 7, No. 1, pp.68~73, Feb. 2003.
- [6] Y. S. Hong, S. B. Ryu, Y. S. Kim, "Development of a Direct-Operated Proportional Pressure Reducing Valve for Low-Band Type Active Suspension Control", Vol. 2, No. 3, pp.75~84, 1994.
- [7] Park J. H., Rhee K. N., Cha M. C., Yeo M. S., Kim K. W., "A Study on the Prevention of Cavitation for Pressure Reducing Valves in Residential Buildings",

Proc. of the Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems Spring conference, pp. 260-264, March, 2010.

- [8] A. T. An, K. Y. Kim, "Analysis of Flow through High Pressure Bypass Valve in Power, Plant", J. of Fluid Machinery, No. 45, pp.17-23, December, 2007.
- [9] H. W. U, G. M. Hwan, Y. B. Seog, "Cavitation Condition Monitoring of Butterfly Valve Using Support Vector Machine", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.14, No.2, pp.119~127, 2004.
- [10] J. W. Seo, "CFX Practice Guide for Cavitation", ANZINE, 2011/2012 Winter pp.52~53, 2012.

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 소음 제어, 친환경 기계설비

이 중 근(Joong-Kuen Leek)

[정회원]



- 1994년 8월 : 인하대학교 산업대학원 생산공학과 (공학석사)
- 2000년 8월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2003년 8월 ~ 2005년 1월 : (주) 넥시즈 기술연구소 소장
- 2005년 3월 ~ 현재 : 신우ENC 대표

<관심분야>

교통소음 및 진동, 기계설계 및 해석

김 일 겸(II-Gyoum Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 인하대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 2010년 10월 : 강남필터(주) 부설연구소 소장
- 2012년 1월 ~ 현재 : 첨단기공(주) 부설연구소 소장

<관심분야>

열유체 시스템설계 및 제어, 공기질 관련 설비, 산업기계 설비, CFD

박 용 석(Yong-Suk Park)

[정회원]



- 1986년 2월 : 인하대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 2004년 2월 : 대전대학교 부교수

- 2004년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과 교수

<관심분야>

회전체 동역학, 진동 및 구조해석