

유한요소법을 이용한 극저온 미니어쳐 글로브 밸브의 구조설계에 관한 연구

정호승* · 김영환† · 조종래†† · 김정환* · 김정렬** · 박재현††

(원고접수일 : 2007년 2월 23일, 심사완료일 : 2007년 5월 18일)

A Study on Structural Design of Cryogenic Miniature Globe Valve using Finite Element Method

Ho-Seung Jeong* · Young-Hwan Kim† · Jong-Rae Cho†† · Jeong-Hwan Kim* ·
Jung-Ryul Kim** · Jae-Hyoun Park††

Abstract : This cryogenic miniature globe valve is used to transfer the liquified natural gas which temperature is -169°C. supplied pressure is 30bar(3.0MPa). In the present work the temperature distribution and thermal deformation is calculated numerical the FE method is useful to predict the thermal matter of cryogenic miniature globe valve. For this reason, to optimum design of the cryogenic miniature globe valve, the analysis of the parameter about bonnet has been studied. It's used 3-D modeling to analyze cryogenic globe valve, which is 1/2". Numerical study used 3-D modeling makes a decision of efficient process of product before producing in the factory. A commercial software(ANSYS 10.0) is used in the structural analysis for cryogenic globe valve.

Key words : Cryogenic(극저온), Globe valve(글로브 밸브), Finite Element Method(유한요소해석), Thermal stress(열응력), Heat transfer(열전달)

1. 서 론

최근, 밸브는 유체의 압력, 온도 및 유체의 속도 즉, 유량을 조정하는데 사용되고 있다. 개폐용(ON-OFF제어)밸브에는 게이트 밸브, 글로브 밸브, 체크밸브 등이 있다. 게이트 밸브에 비해 글로브 밸브는 유체의 제어력 즉, 압력조절, 유량조절,

유로 차단 등이 우수하나 유로 차단용(SHUT OFF)으로 사용할 때는 밸브의 디스크 하부로부터 계통 압력이 작용함으로 닫힘에 요하는 힘이 게이트 밸브의 4~5배 이상에 이르며, 내부 구조가 복잡하여 온도가 변화하는 상태下에서는 열팽창의 비대칭성으로 변형이 생길 수 있다.^[1].

LNG용 글로브 밸브는 LNG(액화천연가스), 중

* 교신저자(한국해양대학교 기계공학과), E-mail:skan311@naver.com, Tel: 051)410-4972

** 한국조선기자재연구원 연구개발센터

†† 한국해양대학교 기관시스템공학부

††† 한국해양대학교 기계정보공학부

†††† 한국조선기자재연구원 연구개발센터

기(vapor) 등을 차단 혹은 통과시켜주는 기능을 가지며 LNG 터미널, LNG 선박 등에 사용된다. LNG용 글로브 밸브는 핸들을 회전시키면 밸브 스템(Valve stem)이 상하이동을 하면서 디스크(disc)를 아래로 밀어내려 LNG, 증기 등을 차단 혹은 통과 시켜주는 방식의 밸브로 주로 작은 직경의 파이프에 사용된다. 극저온 환경에서 사용되기 때문에 밸브의 소재는 열전도성이 낮고 부식에 강한 오스테나이트 계통의 스테인레스 스틸이 주로 사용된다. 또한 LNG용 글로브 밸브는 극저온의 LNG가 이송되므로, 극저온에서 안정된 성능을 유지해야 하며, 충분한 내구성을 갖추어야 한다.

글로브 밸브의 내압부는 다른 어떤 압력용기 보다도 구조적으로 매우 취약한 구조적인 불연속부를 가지고 있어 압력에 대한 복잡한 구조적인 거동으로 인한 국부 응력의 증가와 더불어 온도차에 의한 열변형이 생길 수 있다. 또한 구동부에 저온으로 인한 얼림 현상을 구동장치에 영향을 미치지 않도록 설계하기 위해서 본넷(Bonnet)과 스템(Stem)이 일반밸브보다 긴 구조를 가지고 있어야 한다.

LNG용 글로브 밸브는 극저온, 고압 환경에서 사용되기 때문에 내압과 온도차에 따른 안전성 연구가 요구된다^{[2], [3]}. 내부 압력 및 열변형에 대한 안전성을 평가하기 위해선 극저온 환경하에 대한 열전달 해석과 온도차에 따른 열응력해석, 고압에 따른 변형 해석이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 LNG용 글로브 밸브의 열전달 해석과 변형해석을 통한 밸브 전체의 변형이 생기는 원인을 파악하고 본넷 부위의 길이와 두께에 대한 파라메타 해석을 통한 최적의 설계조건을 제시하고자 하였으며, 구조해석을 위해서 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 10을 사용하고 해석 대상에 대한 모델링 툴은 Unigraphics NX3를 이용하였다.

2. 극저온 글로브 밸브의 구조해석

2.1 밸브 구성 및 유한요소모델링

극저온 글로브 밸브는 바디, 본넷, 디스크, 락킹 너트, 패킹 그랜드 너트, 패킹 그랜드, 스템, 핸들

로 구성되며, Fig. 1는 NX3를 이용한 극저온 글로브 밸브의 외형과 1/2단면 형상을 보여주고 있다.

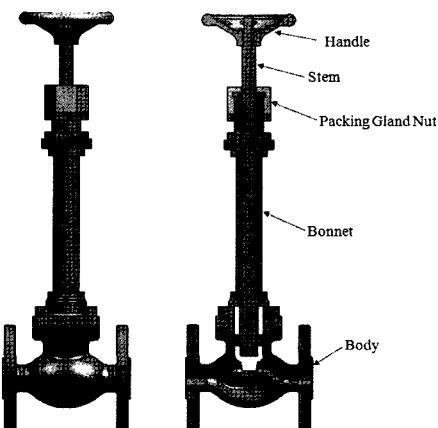


Fig. 1 3D modeling of globe valve

3D 모델링에 있어서 구조해석에 영향을 주지 않는 나사산 부분에 대해서는 심플하게 처리하였으며 바디와 본넷 하부는 렌치 볼트로 연결되도록 모델링하였다. 본넷 상부의 스템 패킹에 대해서는 모델링을 생략하였다.

유한요소해석을 위한 요소는 3D 솔리드 사면체 10절점, 육면체 20절점을 사용하였으며^[4], Fig. 2는 글로브 밸브해석을 하기 위한 유한요소모델을 나타낸다.

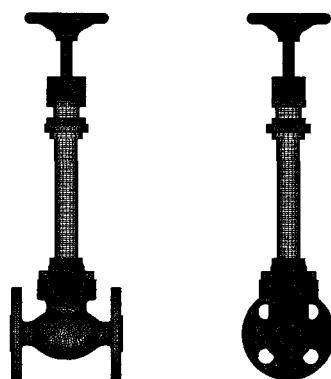


Fig. 2 FE mesh shape of a globe valve model

2.2 극저온 글로브 밸브의 열전달 해석

극저온 글로브밸브는 극저온 환경에서 사용되므로

로 구동부에 저온으로 인한 얼림 현상을 구동장치에 영향을 미치지 않도록 설계하기 위해서 본넷과 스템이 일반밸브보다 긴 구조를 가지고 있다. 그러므로 LNG용 글로브 밸브의 열전달 해석을 통해 본넷 부위의 길이와 두께에 따른 파라메타 해석을 통한 최적의 설계조건을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 본넷 부의 길이와 두께에 대한 파라메타 해석을 하였다. Table 1에서는 본넷의 길이, Table 2에서는 본넷의 두께를 나타내었다.

액화 LNG가 흐르는 글로브 밸브의 안쪽은 -169°C 를 적용하였으며, 대기와 접촉하는 바깥쪽은 상온 온도 20°C 를 사용하였으며 대류열전달계수는 대기와 접하는 부품의 외부에 일반적으로 사용되는 값인 $0.00001 (\text{W}/\text{mm}^2\text{C})$ 을 적용하였다^[5]. 본넷 안쪽과 스템 사이에는 LNG가스가 차있어서 열전달에 영향을 미치므로 LNG가스의 열전달계수를 적용하여 해석하였다. 밸브의 열전달 해석을 위해서는 열전도도, 열전달계수와 같은 물성치가 필요하다. 밸브 해석에 사용된 물성치는 Table 3과 같이 -200°C 에서 상온 30°C 까지의 물성치를 적용하였다^{[6],[7]}. 온도에 따른 물성치가 변하기 때문에 열전달해석은 비선형 해석으로 수행되었다.

Table 1 Dimension of bonnet length for various analysis[mm]

Item	Case 1	Case 2	Case 3
Length[mm]	99	123	147

Table 2 Dimension of bonnet thickness for various analysis[mm]

Item	Case A	Case B	Case C	Case D
Thickness[mm]	3	2.1	1.5	1

Table 3 Thermal properties of valve material [$\text{W}/\text{mm}^2\text{C}$]

Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	-200	-150	-100	-50	30
STS 316 ($\times 10^{-3}$)	7.5	11	13	14	16
LNG vapor ($\times 10^{-6}$)	-	7.6	13	19	33

2.3 내압 및 열변형 해석

밸브에 작용하는 압력 및 온도차에 의해 변형이 발생한다. 그러므로 안전성 평가를 위해 내압 및 열변형 해석이 요구된다. 특히 본넷 부위가 취약하므로 이에 대한 내압 해석이 필요하다. 본넷 부위의 두께에 따른 파라메타 해석을 통한 최적의 설계 조건을 제시하고자 본 연구에서는 앞에서 제시한 Table 2와 같은 본넷의 두께에 대한 파라메타 해석을 수행하였다.

내압은 액화LNG가 흐르는 밸브 바디의 내부와 기체LNG로 채워지는 본넷 내부에 적용하였으며, 사용된 압력은 최대설계압력인 30bar를 적용하였다. 글로브 밸브가 설치된 조건을 구현하기 위해 바디의 양 쪽 입구에 유로 방향으로 커플링 구속조건을 적용하였다.

밸브의 내압 및 열변형 해석을 위해서는 온도에 따른 탄성계수, 선팽창계수와 같은 물성치가 필요하다. 밸브 해석에 사용된 물성치는 Table 4와 같이 -200°C 에서 상온 30°C 까지의 물성치를 적용하였다. 포아송비는 0.3을 적용하였다. 먼저 열전달 해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 열변형 해석을 수행한다. 또한 온도에 따라 탄성계수가 변하도록 온도에 따른 물성치를 적용하여 해석을 수행하였다.

Table 4 Material property of SUS 316

Temperature	-200°C	-150°C	-100°C	-50°C	30°C
Modulus of elasticity	209 (GPa)	206 (GPa)	203 (GPa)	199 (GPa)	195 (GPa)
Thermal expansion coefficient	$1.26e-5 (1/\text{C})$	$1.38e-5 (1/\text{C})$	$1.45e-5 (1/\text{C})$	$1.51e-5 (1/\text{C})$	$1.72e-5 (1/\text{C})$

3. 구조해석 결과

3.1 열전달 해석 결과

글로브 밸브에 작용하는 내·외부의 온도차에 대한 안전성 평가를 위해 열전달 해석을 수행하였다. Fig. 3은 열전달에 의한 온도 분포를 나타낸다. 바

디 내부에서는 -169°C 를 나타내며 바디와 멀어질 수록 온도가 상승하며 핸들부위는 상온을 나타낸다. 스템 부위는 -169°C 의 액화 LNG와 20°C 외부 대기와 연결되었기 때문에 온도차가 심하게 나타남을 알 수 있었다. 스템 상부는 상온과 대류 열전달이 되고 있어서 상온을 유지하고 있다. 온도분포를 평가하기 위해서 부분적으로 경로를 적용하여 온도분포를 확인하고자 한다. Fig. 4는 본넷 상부의 온도 분포를 평가하기 위해서 Path 경로를 나타내고 있다. Fig. 5는 각 밸브의 본넷 길이와 두께에 따른 스템 상부의 온도 분포를 나타낸 것이다. 본넷의 길이에 대해서 상대적으로 길이가 짧은 Case 1은 Point A에서 영하의 온도를 나타내는 반면, Case 2, Case 3은 영상을 나타내는 것을 알 수 있다. 본넷의 두께에 대해서는 상대적으로 두께가 얇은 Case A, Case B는 Point A에서 영하의 온도를 나타내는 반면, Case C, Case D는 영상을 나타내는 것을 알 수 있다.

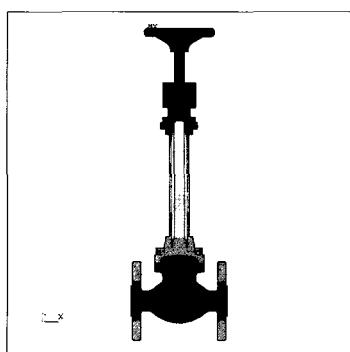


Fig. 3 Temperature distribution of globe valve

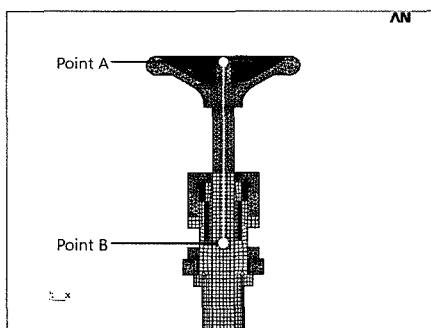
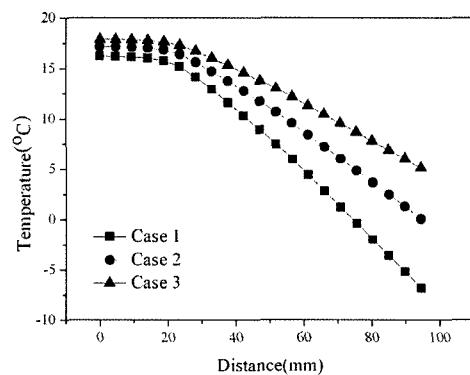
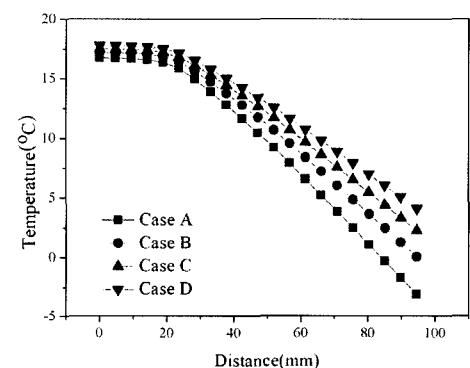


Fig. 4 Schematic for A-B path line



(a) Temperature distribution depending on the length of bonnet



(b) Temperature distribution depending on the thickness of bonnet

Fig. 5 Comparison of temperature distribution at A-B path region

Point A 지점은 핸들부위이며, Point B 지점은 본넷에 차여져 있는 LNG가스의 누출을 막기 위한 스템 패킹이 위치하는데, 이 부위 온도가 영하로 내려가거나 분위기 온도와의 편차가 심할 경우 구동장치에 악영향을 미칠 수 있다. 그러므로 길이에 대해서는 Case 2, Case 3이 적합한 본넷의 길이이며, 두께에 대해서는 Case B, Case C, Case D가 적합함을 알 수 있다.

3.2 내압 및 열변형 해석 결과

밸브에 작용하는 압력에 의한 본넷 부의 변형에 대한 안전성 평가를 위해 내압 해석을 하였다.

Fig. 6은 내압에 의한 본넷 부에 대한 Von Mises 응력분포를 나타낸다. 본넷 두께별 각 Case에 대한 글로브 밸브의 본넷 부 최대 응력값은 Table 5에 정리하였다. 본넷부의 응력은 본넷의 두께가 두꺼워질수록 작아지는 것을 알 수 있었다.

밸브에 작용하는 내·외부의 온도차에 의한 본넷 부의 안전성 평가를 위해 열팽창에 의한 열변형 해석을 수행하였다. Fig. 7은 열팽창으로 인한 변형에 대한 본넷 부의 Von Mises 응력분포를 나타내며, 본넷 두께별 각 Case에 대한 글로브 밸브의 본넷부 최대 응력값은 Table 6에 정리하였다. 본넷의 형상은 일반적으로 단순하고 형상이 대칭이므로 열응력에 대한 응력은 거의 없음을 알 수 있었다. 하지만 본넷과 바디가 연결되는 부위에서는 본넷의 두께가 얇아질수록 응력이 많이 발생함을 알 수 있었다. Fig. 8은 열응력과 내압에 대한 Von Mises 응력분포를 나타낸다. 바디 부위에서 압력에 대한 내부 변형은 거의 없지만 열변형에 의한 열응력이 발생하였다. 이는 비대칭적 복잡한 형상을 가지고 있기 때문으로 사료된다.

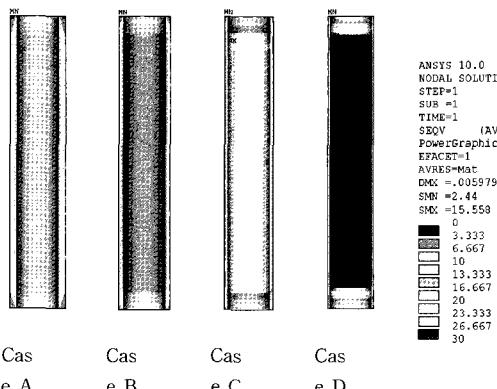


Fig. 6 Von Mises stress distribution by applied pressure condition

Table 5 Von Mises stress from applied pressure analysis result[MPa]

Name	Case A	Case B	Case C	Case D
von Mises stress	13.67	15.56	20.13	28.45

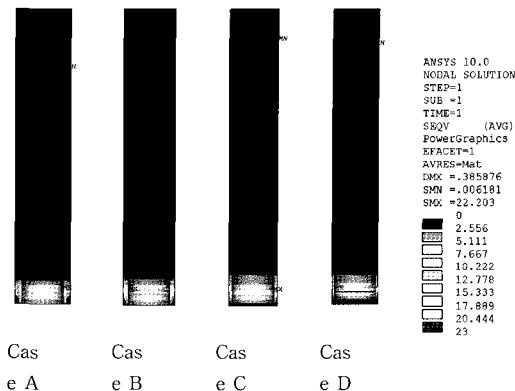


Fig. 7 Von Mises stress distribution by thermal stress condition

Table 6 Von Mises stress from thermal stress analysis result[MPa]

	Case A	Case B	Case C	Case D
Von Mises stress	8.746	13.60	18.92	22.20

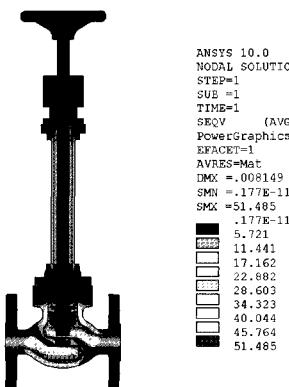


Fig. 8 Von Mises stress distribution by thermal stress and pressure stress

4. 실험

글로브 밸브 크기 1/2"에 대한 열전달 해석을 통한 최적의 본넷 길이를 제시를 하였으며, 이의 검증을 위해서 -196°C의 액화질소를 이용한 실험을 수행 하였다. 본넷 길이가 다른 두 개의 글로브 밸브를 이용하여 실험하였으며, 오른쪽은 일반적인

환경에서 사용되는 글로브 밸브이며, 원쪽은 앞의 해석결과를 바탕으로 개발된 극저온 글로브 밸브이다. 개발된 글로브 밸브는 길이 123mm, 두께 2.1mm의 본넷을 사용하였다. 액화 질소가 흐르는 글로브 밸브의 안쪽은 -196°C를 적용하였으며, 대기와 접촉하는 부품의 외부에 대류열전달계수는 0.00001(W/mm²°C)과 실험당시의 분위기 온도인 27°C를 적용하여 열전달 해석을 하였다. Fig. 9은 극저온 글로브 밸브의 -196°C의 액화 질소를 주입한 후 2시간이 경과한 후 실험사진이다.

밸브의 온도는 열전대를 이용하여 측정하였으며, 온도 측정부위는 Fig. 10에 나타내었다. Table 7은 실험 측정 및 열전달 해석에 의한 각 부위의 온도를 나타내고 있으며, 해석 결과와 측정된 결과는 약간의 오차가 발생하였지만 비교적 잘 일치하였다.

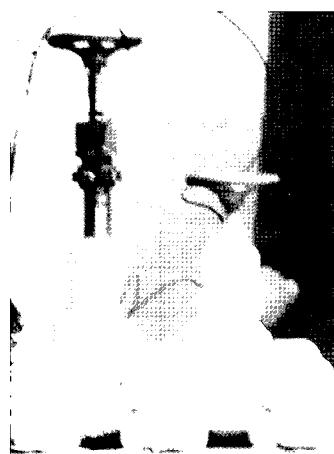


Fig. 9 Temperature test for extended bonnet globe valve

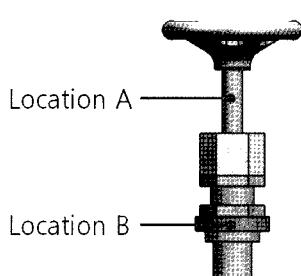


Fig. 10 Schematic of location of measured temperature

Table 7 Measured temperature data from LN2 experiment[°C]

Item	Measured temperature	Analysis temperature
Location A	21	22
Location B	17	16

5. 결 론

LNG용 글로브 밸브는 극저온, 고압 환경에서 사용되기 때문에 내압과 온도차에 따른 안전성 연구가 요구된다. 밸브 직경 1/2" 글로브 밸브에 대하여 해석을 하였다.

내부 압력 및 열변형에 대한 구조설계를 하기 위해선 극저온 조건에 대한 열전달 해석과 온도차에 따른 열응력해석, 고압에 따른 변형 해석을 하였다. 또한 온도와 압력이 본넷 부위의 길이와 두께에 미치는 영향을 파악하였다.

- 1) 본넷의 길이와 두께에 따른 열전달 해석을 하였으며 본넷의 길이가 길수록 실링부의 온도가 외부온도와 가까워짐을 확인할 수 있었다. 본넷의 두께가 얇아질수록 내부와 외부의 열전달이 잘되어서 실링부의 온도가 외부온도와 가까워짐을 확인할 수 있었다.
- 2) 본넷의 두께에 따른 내압 및 열변형 해석을 하였다. 본넷의 두께가 두꺼워질수록 본넷부의 응력이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 본넷의 길이가 길고 얇아질수록 실링부의 온도가 외부온도와 가까워지지만 내압 및 열변형에 의한 응력은 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 바디 부위에서 압력에 대한 내부 변형은 거의 없지만 열변형에 의한 열응력이 발생하였다. 이는 비대칭적 복잡한 형상을 가지고 있기 때문이다. 본넷과 스템 부위에서 열변형이 크게 나타났다. 이것은 본넷과 스템의 길이가 길고 바디와 외부 대기의 온도차가 심하기 때문에 변형이 크게 나타남을 알 수 있었지만 열응력은 많이 발생하지 않았다.
- 4) 글로브 밸브의 직경 1/2", 본넷 길이 123mm, 두께 2.1mm에 대하여 실험을 하였으며 해석

결과와 측정된 결과는 약간의 오차가 발생하였지만 비교적 잘 일치하였다.

참고문헌

- [1] 민경화, 벨브의 알파와 오메가, 동국대 표준화 센터, 2005
- [2] 김동수, 배상규, 김현섭, “고압 초저온 볼밸브의 열응력 해석에 관한 연구”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 3411-3416, 2006.
- [3] 박재현, 김정환, 김정렬, 정호승 “액체 수소 운반용 글로브 벨브에 관한 수치해석적 연구”, 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp. 253-254, 2006.
- [4] ANSYS 10 manual
- [5] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Introduction to Heat Transfer, WILLY, 2001
- [6] ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE Part D, 2004
- [7] J.R. Davis, Alloy Sourcebook stainless steels, ASM International, 2000.

저자 소개



정호승(鄭互勝)

1972년 04월생, 1999년 한국해양대학교 기계공학과 졸업(학사), 2001년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 2005년 동대학원 기계공학과 졸업(박사), 2006년~2007년 한국조선기자재연구원 연구개발센터 연구원, 2007년~현재 부산대학교 대학기술센터 연구원



김영환(金映煥)

1982년생, 2006년 한국해양대학교 기계시스템공학과 졸업, 2006~현재 한국해양대학교 대학원 기계공학과 재학중



조종래(趙琮來)

1959년 3월생, 1982년 부산대학교 기계공학 졸업(학사), 1984년 한국과학기술원 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1993년 한국과학기술원 대학원 정밀공학과 졸업(박사), 1984년 1995년 한국중공업 기술연구소, 1999년 Post-Doc. (영국-Birmingham Univ.), 1995년~현재 한국해양대학교 기계정보공학부



김정환(金貞奐)

1968년생, 1998년 부경대학교 기계공학과 졸업, 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2003년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2003년 九州工業大學 기계공학과 특별연구원, 현재 한국조선기자재 연구원 연구개발센터 팀장



김정렬(金正烈)

1961년 9월, 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(공학석사). 1998년 일본 나고야대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1988년 8월~1993년 2월 현대중공업 엔진사업부 근무. 1993년 3월~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 부교수.



박재현(朴宰賢)

1973년 8월생, 2000 동아대학교 기계공학과 공학사, 2002 동아대학교 기계공학과 공학석사, 2007 동아대학교 기계공학과 공학박사, 2006~현재 (재)한국조선기자재연구원 연구개발센터 연구원