

## LNG선박용 글로브 밸브 구조해석에 관한 연구

김동균\* · 김정환\*

(원고접수일 : 2007년 8월 9일, 심사완료일 : 2007년 11월 2일)

### A Study on Structural Analysis of Globe Valve for LNG Carrier

Dong-Kyoon Kim\* · Jeong-Hwan Kim\*

**Abstract** : This paper is about structural analysis of globe valve for controlling cryogenic LNG's flow or stop in normal temperature. The used valve is demanded safety resistance for inner pressure and temperature variation caused by using it in cryogenic, high pressure surrounding. This study evaluates for safety resistance for inner pressure and temperature variation by heat transfer analysis in cryogenic surrounding, heat stress analysis in temperature variation and deformation analysis in high pressure.

**Key words** : Globe valve(글로브밸브), Cryogenic(극저온), Structural analysis(구조해석)

#### 1. 서 론

현재 국내 조선 산업은 세계 시장점유율 1위의 부동의 수출 효자산업이라 할 수 있으며, 특히 2000년 이후부터 부가가치가 높은 LNG선과 컨테이너선이 주력건조선종으로 자리를 잡아가고 있다. 하지만 우리나라 조선 산업의 세계적 위상에도 불구하고 LNG선, LPG선, 해양구조물 등의 고부가가치 선박에 탑재되는 조선기자재의 국산화율은 극히 저조하여 대부분을 유럽, 일본 등지에서 수입에 의존하고 있는 실정이다<sup>(1)</sup>. 따라서 고부가가치선박 중의 하나인 LNG선에 대량으로 장착되는 극저온용 밸브를 국산화 개발하게 된다면 밸브시장에서도 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

글로브 밸브는 핸들을 회전시키면 밸브 스템

(valve stem)이 상하이동을 하면서 디스크(disc)를 아래로 밀어내려 작동유체 및 증기 등을 차단 혹은 통과 시켜주는 방식의 밸브로 주로 작은 직경의 파이프에 사용되는 것이다. 극저온 환경에서 사용되는 밸브에서 밸브 바디는 스테인리스 스틸로 제작되고, 작동부의 얼림을 방지하기 위하여 보닛(bonnet)과 스템(stem)이 일반밸브보다 긴 구조를 가지고 있는 것이 특징이다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서 해석하려는 LNG 선박용 글로브 밸브는 극저온, 고압 조건에서 사용되기 때문에 일반적인 밸브에 비해 내압과 온도차에 따른 안전성 연구가 필요하다고 판단된다. 그리고 본 연구에서는 내부 압력과 극저온 조건에 의하여 발생한 열변형에 대해 열전달 해석과 온도차에 따른 열응력해석, 고압에 따른 변형 해석을 수행하여 안전성평가의 기초자료로 제시하고자 한다.

† 교신저자(동명대학교 기계공학과), E-mail:kimdk@tu.ac.kr, Tel: 051)620-3339

\* (재)한국조선기자재연구원

## 2. 이론적 배경

유한요소해석에 있어 선형구조해석은 정적하중의 작용 하에서 구조물의 응답을 얻는 과정이다. 일반적인 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

$[M]$ : 질량 매트릭스,  $[C]$ : 댐핑 매트릭스

$[K]$ : 강성 매트릭스,  $\{x\}$ : 변위벡터,  $\{F\}$ : 하중벡터

정적해석에서는 시간을 고려한 항들이 무시되므로 다음 식(2)와 같게 된다.

$$[K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

위의 식 (2)는 다음과 같은 가정을 포함한다.

$[K]$ 는 강성 매트릭스로서 선형탄성재료거동과 소변형이 일어나는 것으로 가정한다.  $\{F\}$ 는 정적인 적용하중으로서 시간 변동하중은 고려되지 않으며, 관성의 영향(질량, 댐핑)은 무시된다.

열변형에 적용되는 일반적 열전달식은 식(3)과 같다.

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(t, T)\} \quad (3)$$

$t$ : 시간,  $[C]$ : 비열 매트릭스,  $[K]$ : 전도 매트릭스  
 $\{T\}$ : 온도,  $\{Q\}$ : heat flow rate load vector

정적해석에서 모든 시간의존성은 제거되므로 다음 식 (4)와 같게 된다.

$$[K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (4)$$

위 식 (4)는 다음과 같은 가정을 포함한다.

정적해석에서는 시간의 영향을 받지 않으며,  $[K]$ 와  $\{Q\}$ 는 상수이거나 온도의 함수가 된다.

## 3. 형상모델링

Fig. 1은 글로브 밸브에 대한 개략도를 나타낸 그림이다, 각 글로브 밸브에 대한 치수는 Table 1에 정리하였다. 본 연구에서는 해석 대상의 형상

모델링은 CATIA V5를 이용하였으며, 유한요소해석 프로그램인 ANSYS V11.0을 이용하여 구조해석과 열해석을 병행하여 수행하였다. 모델링과 해석의 편리성을 위해 3차원 모델링에 있어서 구조해석에 영향을 주지 않는 나사산 부분에 대해서는 단순하게 처리하였으며 단일재로 충전되는 부위에 대해서도 모델링을 생략하였다.

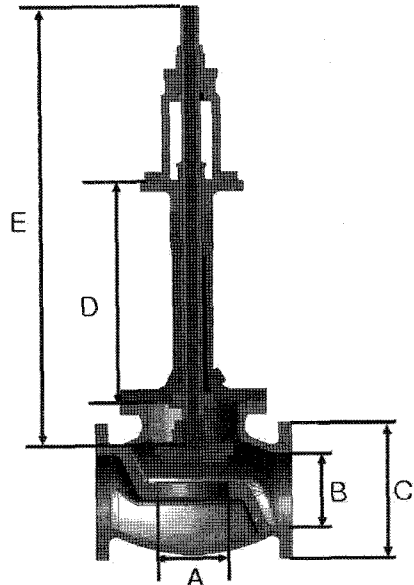


Fig. 1 Schematic of major dimension for valve

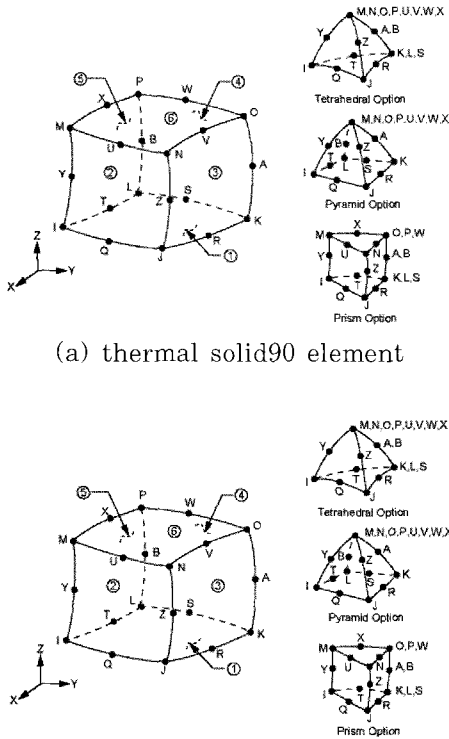
Table 1 Valve Major dimension (Unit mm)

	Valve	Remark
A	∅115	Hole diameter
B	∅102	Hole diameter
C	∅229	Flange diameter
D	397	Length of bonnet
E	784	Length of stem

## 4. 유한요소모델링 및 경계조건

극저온 LNG에 사용되는 글로브 밸브의 내압 및 열변형 해석을 하였다. 유한요소해석을 위한 요소의 형태는 열전달해석에서는 ANSYS element library의 90번을 사용하였으며, 구조해석에서는

ANSYS element library의 186번을 사용하였다<sup>[3], [4]</sup>. Fig. 2의 (a), (b)는 각각 Solid90, Solid186 요소 정보를 나타낸다.



(a) thermal solid90 element

(b) structural solid186 element

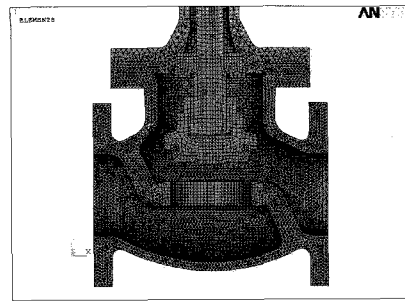
Fig. 2 Geometry of element

90번, 186번은 지원 요소의 형태가 같아 각각 열해석과 구조해석에 사용되며 연성해석시 완벽하게 호환된다.

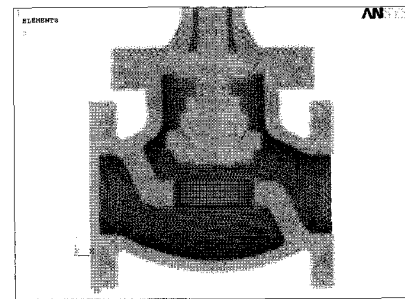
Fig. 3의 (a)는 유한요소해석을 위하여 작성한 3차원 유한요소모델과 격자를 나타낸다. 해석에 사용된 글로브 밸브는 크게 바디, 보닛, 디스크, 글랜드, 패킹 글랜드, 요크, 스템 등으로 구성되어 있다. Fig. 3의 (b)는 변위 경계조건을 보여준다. 해석대상의 글로브 밸브는 대칭 형상이므로 절반만 모델링하였으며 대칭경계 구속조건을 적용하였다. 대칭경계 구속조건을 부여하였기에 x축에 대해서는 자동적으로 반력에 의한 구속조건이 생성되었다. 좌우측 플랜지면에 y축 구속조건을 부여하였고, 플랜지 면에 각각 4개씩 나타난 볼트체결용 홀

에 z축에 대한 구속조건을 부여하였다.

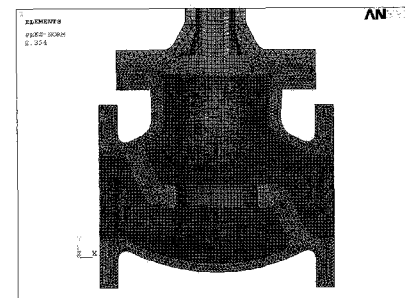
밸브에 작용하는 압력에 대한 안전성 평가를 위해 내압 변형해석을 하였다. 해석에서 사용한 압력은  $24 \text{ kgf/cm}^2 (2.35 \text{ MPa})$ 을 사용하였다. Fig. 3의 (c)는 밸브 바디 부에 적용된 압력 경계조건을 나타낸다. 밸브에 작용하는 온도차에 대한 열변형에 대한 안전성 평가를 위해 열응력해석을 하였다. Fig. 3의 (d)는 온도 경계조건을 적용한 그림이며 LNG보다 더 낮은 액화 질소의 온도를 적용하여



(a) mesh shape of a globe valve model

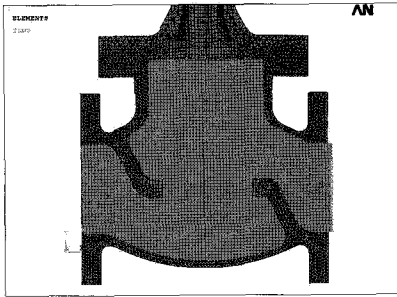


(b) a displacement boundary condition

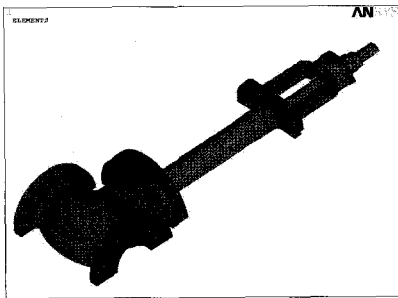


(c) a pressure boundary condition

Fig. 3 Model and boundary conditions of globe valve



(d) a temperature boundary condition

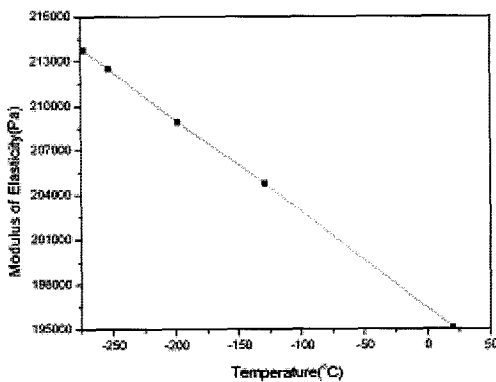


(e) a convection boundary condition

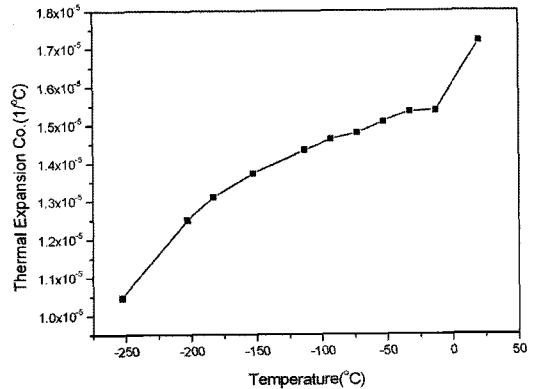
Fig. 3 To be continued

밸브의 안쪽(body)은  $-196^{\circ}\text{C}$ 를 적용하였다. Fig. 3의 (e)는 온도와 대류 경계조건을 적용한 그림이며 글로브 밸브의 바깥쪽은 상온온도  $20^{\circ}\text{C}$ 와 열전달계수를 적용하였다.

밸브 해석에 사용된 물성치는 Fig. 4와 같이  $-196^{\circ}\text{C}$ 에서 상온  $20^{\circ}\text{C}$ 까지의 물성치를 적용하였다. 포아송비는 0.3, 열전달계수는 대기와 접하는



(a) STS modulus of elasticity(Pa)



(b) STS thermal expansion coefficient(1/°C)

Fig. 4 Structural and thermal properties of valve material(stainless steel)

바디, 보닛, 스템 상부, 글랜드, 패킹 글랜드, 요크 등의 외부에 적용하였다. 열전달 및 구조해석은 온도에 따라 물성치가 변하기 때문에 비선형 해석을 수행하였다.

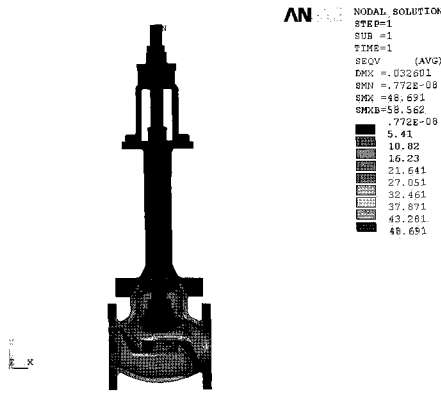
### 5. 극저온 글로브밸브 구조해석결과

#### 5.1 내부 압력에 의한 변형 해석

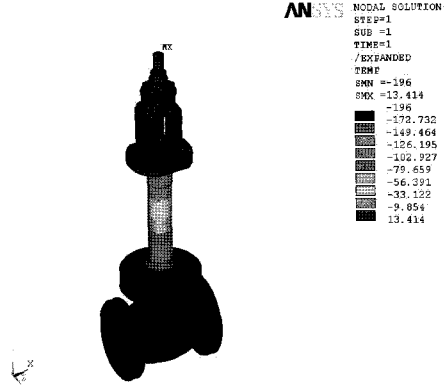
글로브 밸브에 작용하는 압력에 대한 안전성 평가를 위해 변형해석을 하였다. 해석에서 사용한 압력은  $24 \text{ kgf/cm}^2(2.35 \text{ MPa})$ 을 사용하였다. Fig. 5의 (a)는 von Mises 응력분포를 나타낸다. 글로브 밸브의 바디에서 최대 응력을 나타내며 글로브 밸브에서의 최대 응력값은 Table 2에 나타내었다. Fig. 5의 (b)는 변위를 나타내며 글로브 밸브에서의 최대변위는 Table 2에 나타내었다. 압력에 의한 내부 변형은 거의 없음을 알 수 있다.

Table 2 Result for inner pressure condition

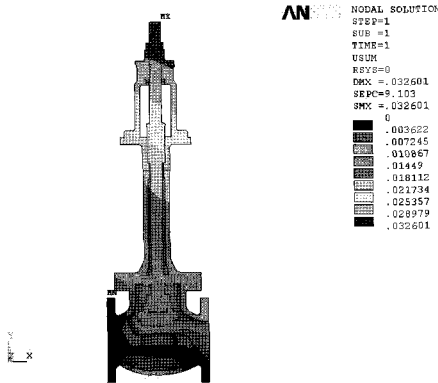
	Maximum Value
von Mises stress result for inner pressure condition	48.691 MPa
displacement result for inner pressure condition	0.0326 mm



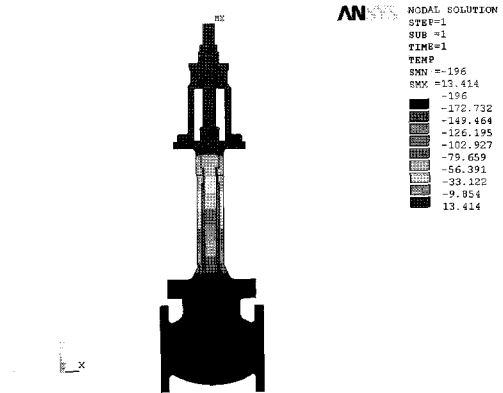
(a) a von Mises stress distribution for close section



(a) a temperature distribution for outside



(b) a total displacement distribution for close section



(b) a temperature distribution for close section  
 Fig. 6 FE analysis results for valve applied to heat transfer

Fig. 5 FE analysis results for valve applied to inner pressure

5.2 열전달 해석

글로브 밸브에 작용하는 내·외부의 온도차에 대한 안전성 평가를 위해 열전달 해석을 수행한 후 열팽창에 의한 변형 해석을 수행하였다. Fig. 6의 (a),(b)는 열전달에 의한 온도 분포를 나타낸다. 바디 내부에서는  $-196^{\circ}\text{C}$ 를 나타내며 외부 대기는 상온을 나타낸다. 스템 부위는  $-196^{\circ}\text{C}$ 의 액화 LNG와  $20^{\circ}\text{C}$  외부 대기와 연결되었기 때문에 온도차가 심하게 나타남을 알 수 있었다. 스템 상부는 상온과 대류 열전달이 되고 있어서 상온을 유지하고 있다.

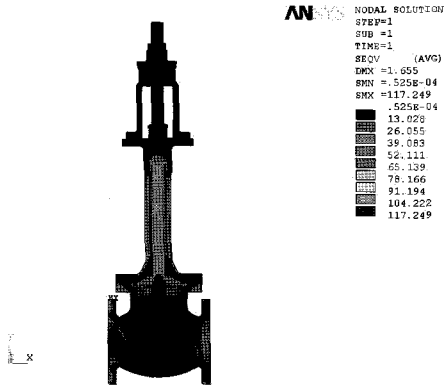
5.3 열팽창에 의한 변형 해석

Fig. 7의 (a)는 열팽창에 의한 변형에 대한 von Mises 응력분포를 나타내며 글로브 밸브에서의 최대 응력값은 Table 3에 나타내었다.

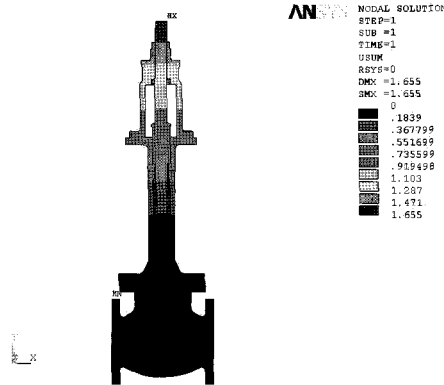
Table 3 Result for inner pressure condition

	Maximum Value
von Mises stress result for thermal expansion condition	117.25 MPa
displacement result for thermal expansion condition	1.655 mm

Fig. 7의 (b)는 변위를 나타내며 글로브 밸브에서의 최대변위는 Table 3에 나타내었다. 보닛의 길이가 길고 바디와 외부 대기의 온도차가 심하기 때문에 열변형에 의해서 변형이 크게 나타남을 알 수 있다.



(a) a von Mises stress distribution for close section



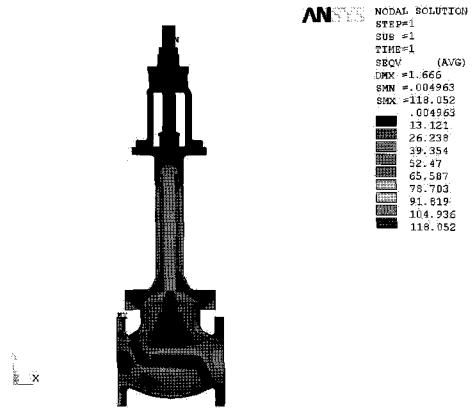
(b) a total displacement distribution for close section

Fig. 7 FE analysis results for valve applied to thermal expansion

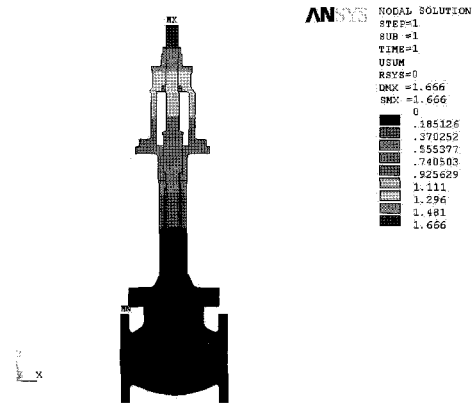
5.4 내부 압력과 열팽창에 의한 변형 해석

글로브 밸브에 작용하는 내압과 내·외부의 온도 차에 대한 변형에 대한 안전성 평가를 위해 변형 해석을 하였다. Fig. 8의 (a)는 von Mises 응력분포를 나타낸다. 바디와 보닛에서 최대 응력을 나타

내며 글로브 밸브에서의 최대 응력값은 Table 4에 나타내었다.



(a) a von Mises stress distribution for close section



(b) a total displacement distribution for close section

Fig. 8 FE analysis results for valve applied to thermal expansion & inner pressure

Fig. 8의 (b)는 변위를 나타내며 글로브 밸브에서의 최대변위는 Table 4에 나타내었다.

ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE Part D(2004)<sup>(5)</sup>에서의 STS 304, 316, CF8M의 상온에서 항복강도는 30ksi(210MPa)이다. 내압 및 열팽창에 대한 구조해석 결과 항복 강도보다 낮거나 비슷하게 발생함을 알 수 있다.

**Table 4 Result for inner pressure condition**

	Maximum Value
von Mises stress of inner pressure plus thermal expansion condition	118.052 MPa
displacement of inner pressure plus thermal expansion condition	1.666 mm

## 6. 결 론

본 연구에서는 LNG 운반에 사용되는 극저온 글로브 밸브를 내부압력 및 열변형에 대한 안전성을 평가하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 극저온 글로브 밸브에 작용하는 내압 및 온도차에 대한 안전성 평가를 위해 내부 압력에 의한 변형 해석, 열팽창에 의한 변형 해석, 내부 압력과 열팽창에 의한 변형 해석에 대한 구조해석 및 열해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 바디 내부에서는  $-196^{\circ}\text{C}$  액화질소가 흐름을 가정하였으며 밸브 외부는 상온임을 가정하였다. 온도 해석 결과 스템 부위는  $-196^{\circ}\text{C}$ 의 액화질소와 상온상태인 외부 대기와 접하기 때문에 온도차가 심하게 나타남을 알 수 있다. 또한 스템 상부는 상온과 대류 열전달이 되고 있어서 상온을 유지하고 있다.

2. 바디 부위에서 압력에 대한 내부 변형이 미세하게 발생함을 알 수 있었다. 이것은 내압에 대한 충분한 강도를 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 보닛과 스템 상부에서 열변형이 크게 나타났다. 이것은 보닛의 길이가 길고 바디와 외부 대기의 온도차가 심하기 때문에 열변형에 의해서 변형이 크게 나타남을 알 수 있었다.

## 참고문헌

[1] 최길선, "한국의 조선산업-성장과 과제", 한국조선협회, 2005.

- [2] Philp. L Skousen, "Valve Handbook", McGraw-Hill press, pp. 1248-125, 2006.  
 [3] 김지용, "ANSYS 예제모음집", (주)태성스앤이, 2005.  
 [4] 고재용, "ANSYS 와 유한요소법"시그마프레스, 2003.  
 [5] "ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE Part D", 2004.  
 [6] "ANSYS를 이용한 구조 및 열해석", (주)DNDE 교육용자료, 2007.

## 저 자 소 개



### 김동균(金東均)

1970년생. 2001년 동아대학교 기계공학과 대학원 졸업(공학박사). 현재 동명대학교 기계공학과 전임강사



### 김정환(金貞煥)

1968년생. 2003년 8월, 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 (재)조선기자재연구원 연구개발팀 근무