

원자력 발전소용 벨로우즈 글로브 밸브에 대한 구조 건전성 평가

정철섭^{1*}

The Evaluation of the Structural Integrity of Bellows Globe Valve for Nuclear Power Plant

Chul-Sup Chung^{1*}

요 약 본 논문은 내진등급 IIA 글로브 밸브의 지진하중에 대한 구조 건전성을 평가하였다. 밸브 구조물을 3차원 모델링하여 유한요소법을 사용하여 모달 해석 및 등가 정적 응력해석을 수행하였다. 모달 해석 결과 구조물은 충분히 강건하므로 지진 가속도 값을 사용한 등가 정적 응력해석이 가능하였다. 정적 응력 해석에서 구한 응력을 조합하여 원자력 규격집에 근거한 허용기준에 따라 밸브의 구조 건전성을 평가하였다. 지진하중에서 발생한 응력값이 허용값 아래에 분포하므로 글로브 밸브 구조물은 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 평가할 수 있다.

Abstract The purpose of this paper is to evaluate the structural integrity of the Class 1500 Bellows Seal 3 inch globe valve classified as seismic category IIA. The finite element analysis program, ANSYS, Version 10.0, is used to perform both a modal frequency analysis and an equivalent static stress analysis of the subject valve modeling. The modal frequency analysis results show the fundamental natural frequency is greater than 33 Hz. Therefore the equivalent static stress analysis is performed using the seismic acceleration values. The stresses resulted from various loadings and their combinations are evaluated based on the structural acceptance criteria of the ASME Code. The stresses in the globe valve due to the seismic loadings are within the allowable limits. It is concluded that the globe valve structure is maintaining the structural integrity for the seismic loading conditions.

Key words : globe valve, stress analysis, modal frequency analysis, ASME Code, FEA

1. 서 론

2002년 7월 23일 중국 무단장 남동쪽 약 115 Km 지역에 (위도 43.8°, 경도 130.7°) 리히터 규모 7.2의 강진이 발생하여 수천 명이 사망하고 많은 건물과 사회 기반시설이 파괴되는 지진재난이 발생하였고, 2005년 8월 16일 일본 미야기(宮城) 현 앞바다에서도 리히터 규모 7.2의 지진이 발생하는 등 우리나라 주변에서 지진 발생이 빈번하게 일어나고 있는 실정이다. 이에 따라 우리나라는 과연 지진으로부터 안전한지에 관심이 높아지고 있다. 기상청 자료에 따르면 우리나라는 1년에 19번 가량 지진이 발생하고 있으며 사람이 느낄 수 있는 리히터 규모 3.0 이상은 연평균 9번이다. 몇 년 전부터 학계 일부에서 경상도 일대에 활성단층

이 분포하고 있다는 주장이 제기돼 “우리나라도 지진의 피해로부터 안전하지 않다”는 우려가 나오고 있다. 1997년 6월 경주부근에서 일어난 규모 4.3의 지진이 양산단층의 영향 때문이었으며, 더구나 이 지역은 원자력 발전소와 포항, 울산지역 공업단지를 끼고 있어 대규모 지진이 일어날 경우 가공할 만한 피해가 우려된다. 최근 우리나라에서 원자력 발전의 의존도가 증가하는 만큼 원자력 발전소의 안전성에 대한 국민적 관심도 비례적으로 증대되고 있으므로 안전성을 확보하기 위해 원자력 관련 기기에 대하여 지진하중에 대한 구조 건전성을 확보하는 것이 중요하므로 정부에서도 원자력 안전 법규와 같은 관계 법령을 제정하여 이를 준수할 것을 요구하고 있다^[1]. 즉, 원자력 발전소의 시설과 기기는 지진과 같은 자연재해로부터 보호되고, 가상적 사고조건에서도 구조적 안전성을 유지하고 동시에 안전관련 기능을 충분히 수행할 수 있도록 법률적으로 요구된다. 원자력 발전소에서 냉각재

¹건양대학교 기계공학과

*교신저자: 정철섭(cschung@konyang.ac.kr)

를 이송해주는 배관 계통에 유체통로의 개폐를 통하여 유체흐름의 단속과 유량, 압력을 조절하기 위해 밸브가 반드시 필요하다. 벨로우즈 글로브 밸브는 작동이 확실하고 밸브의 개폐를 빨리 행할 수 있고 밸브와 밸브 시트와의 맞댐이 용이하여 배관계통에 널리 사용되고 있다. 만일, 원자력 발전소 배관계에 설치된 글로브 밸브가 지진하중에 취약하여 구조적 건전성을 상실하면 냉각재 누수와 같은 엄청난 피해를 초래할 수 있어 지진하중에 대한 구조 건전성의 확보가 중요하다.

본 논문에서는 글로브 밸브 구조물의 건전성을 검토하기 위해 밸브를 3차원 모델러인 솔리드웍스(Solid Works) 2005를 이용하여 실물에 가깝게 그림 1과 같이 모델링하여 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모달 해석을 통해 강건한 구조물임을 확인한 후 2가지 경우의 지진하중에 대한 정적 해석을 수행하여 밸브 구조물중 위험단면에서의 막 응력과 굽힘 응력을 구하여 각 하중조합에 대해 코드에서 규정하고 있는 허용값과 비교하여 글로브 밸브 구조물의 구조적 건전성을 평가하였다.^[2] 본 논문에서는 지진 하중에 대한 밸브 구조물에 대한 정적 응력해석과 각 지진방향에 대한 응력을 조합하여 코드 요건에 따라 건전성을 평가하였다. 하중조건은 설계조건에 따르며 해석에 사용된 밸브 구조물은 작동 유체와 동일한 설계온도(38°C)를 사용하며, 압력 조건으로는 설계압력(18.8 MPa)을 사용하였다.

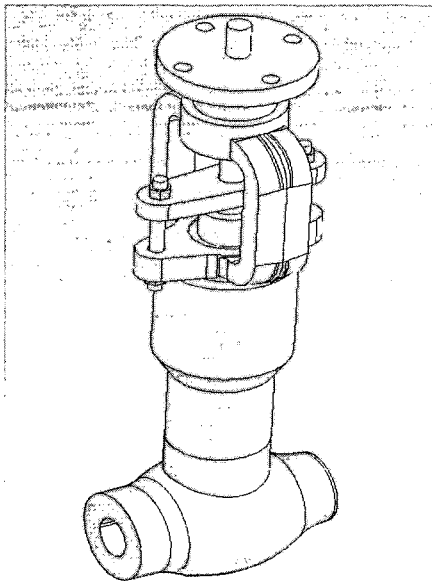


그림 1. 솔리드 워크스 글로브 밸브모델

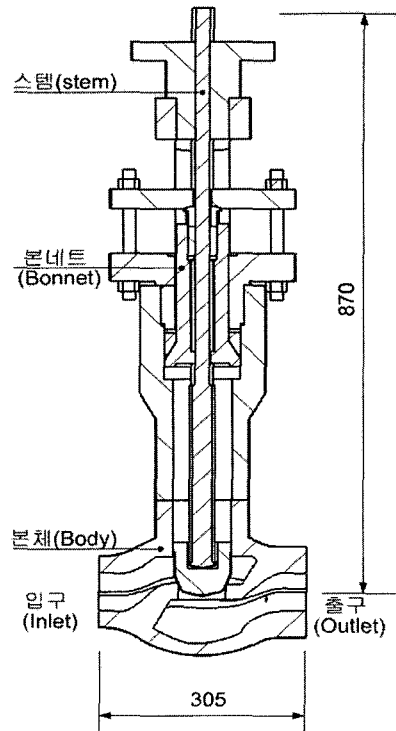


그림 2. 밸브의 치수

2. 밸브 내진해석

2.1 해석모델

해석하려는 벨로우즈 글로브밸브는 ASME 내진등급 IIA 밸브이며, 압력경계 기기(pressure boundary component)인 밸브 본체, 밸브 본네트(valve bonnet), 밸브 본체 및 본네트 체결 볼트와 주요 기기인 밸브 스텝(stem)과 밸브 디스크(disc)로 구성되어 있다. 밸브의 설계 온도 및 압력은 38 °C , 18.86 MPa 이며, 운전 토크는 845 Nm 이며 냉각재가 포함된 밸브의 질량은 79 Kg이다. 밸브 구조물 구성품에 대한 재질, 재료상수 및 각 재질에 대한 허용응력은 표 1과 같다.^{[3],[4]} 밸브 구조물을 나타내기 위하여 3-D 구조물 유한요소인 "SOLID 185" 와 8 절점 면과 면 접촉 요소인 "CONTACT 174"를 사용하였으며 절점수 및 유한 요소는 각각 32,458개, 15,298개 이다.^[5] 유한요소 모델의 전체 질량은 81.97 Kg으로서 실제 밸브 구조물의 질량과 오차 범위 내에서 일치하므로 유한 요소 모델은 모달 해석 및 정적 구조 해석에 적합하다고 판단할 수 있다. 밸브 구조물에 대한 유한요소 모델은 그림 3과 같다.

표 1. 밸브 구조물의 재료 상수 및 허용 응력

Part	Material	E (GPa)	ν	Allowable stress (MPa)
• BODY • BONNET	A182-F22	210	0.3	103
• GLAND Flange	A105	203	0.3	121
• STEM	A564-TP630	200	0.3	232
• GLAND	A276-316	200	0.3	121
• WEDGE (DISC)	A217 CA15	200	0.3	155
• BONNET BOLT	A193 B7	200	0.3	172

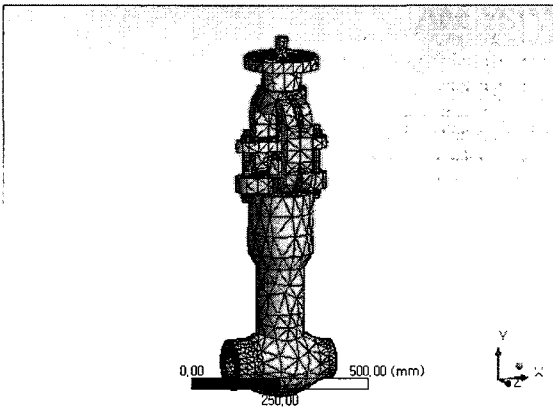


그림 3. 글로브 밸브의 해석 모델

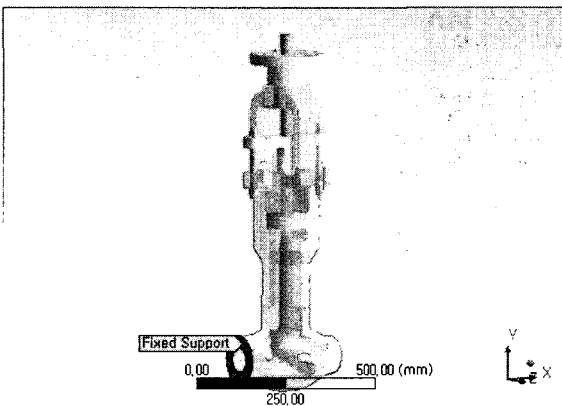


그림 4. 해석 모델의 경계조건

2.2 경계조건

해석을 효율적으로 수행하기 위해 각 부품간 상태를 단순화 시켰다. 스템과 디스크는 일체 부품으로 가

정하였고, 밸브 본체와 본네프트는 접촉 상태, 본네프트와 스템은 미끄럼이 허용되는 접촉 경계조건을 사용하였다. 강체운동을 방지하기 위해 밸브 본체의 입구 쪽 (inlet)은 모든 병진변위 및 회전변위가 구속되는 앵커 (anchor)로 하였고, 출구 쪽(outlet)은 모든 병진변위 및 회전변위가 허용되는 자유단으로 하였다. 경계조건이 표시된 밸브 구조물 해석 모델은 그림 4와 같다.

2.3 모달해석(Modal Analysis)

모달해석은 선형 탄성 구조물의 고유진동수와 모드형상을 계산하는데 사용된다. 감쇠효과를 무시하고, 일단 고정 타단 자유인 경계 조건을 가질 때 비감쇠 자유진동에 대한 지배방정식은 (1)과 같다.

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (1)$$

여기서, [M],[K]는 각각 질량 행렬 및 강성도 행렬이며, {u}는 변위 벡터이다 [6],[7].

선형 구조물에 대하여 변위 벡터가 아래 식(2)와 같은 조화함수라고 가정하고,

$$\{u\} = \{u_0\} \cos(\omega t - \phi) \quad (2)$$

지배방정식 (1)에 대입하면 행렬 형태의 고유치 방정식 (3)을 얻는다.

$$([K] - \omega^2 [M]) \{u_0\} = \{0\} \quad (3)$$

영(zero) 벡터가 아닌 해를 얻으려면 계수행렬의 행렬식이 0이 되어야하므로 n차의 다항식 (4)를 얻는다. 따라서 고유치 계산은 n차 다항식을 반복법을 사용하여 구한다.

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (4)$$

본 해석에서는 처음 5개의 고유치만 구할 것이며 그 결과는 표 2와 같다. 모달해석에 의해 산정된 밸브 구조물의 기본 고유진동수는 112 Hz이며, 이는 강건한 (rigid) 범위의 하한 값인 33 Hz를 초과하므로 밸브 구조물을 강건한 (rigid) 기기로 분류할 수 있어 지진하중에 대해 정적 응력 해석이 가능하다. 1차 모드는 beam 모드이나 고차 모드에서는 쉘 모드가 나타난다. 모드에 대한 모드형상은 그림 5-8과 같다.

표 2. 모드별 고유진동수

Mode	Frequency. Hz
1	112
2	117
3	421
4	537
5	578

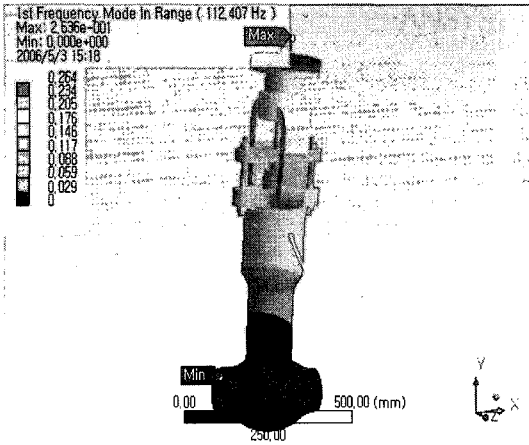


그림 5. 1차 모드 형상

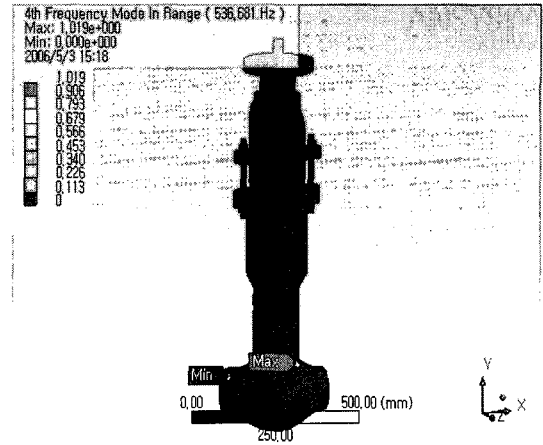


그림 8. 4차 모드 형상

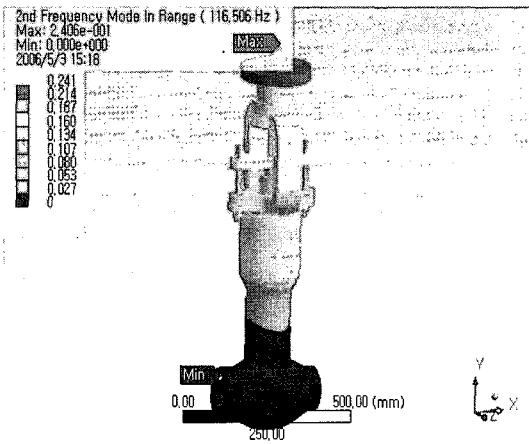


그림 6. 2차 모드 형상

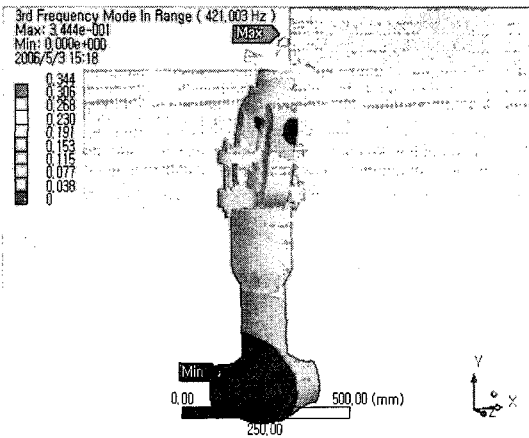


그림 7. 3차 모드 형상

2.4 등가 정적 응력해석 (Equivalent Static Stress Analysis)

설계지진으로 표시되는 설계 가진에 따라 반응하는 구조물의 동적 응답을 구하기 위해 내진 해석이 사용된다. 구하려는 응답은 변위, 응력, 하중 및 모멘트이다. 이들 지진하중에 의한 응력은 지속하중에 의한 응력과 조합되며 허용응력과 비교한다.

등가 정적 응력해석은 비교적 간단한 구조물에 지진하중이 작용하며, 고유진동 해석에서 구한 기본 고유진동수가 33 Hz 이상인 경우 구조 건전성을 평가하는데 사용한다. 본 해석에서는 지진하중이 수평방향으로 6.6 g, 수직방향으로 7.6 g의 가속도로 전 밸브 구조물에 걸쳐 작용한다고 가정하였다. 표 3은 각 운전조건에 적용하는 지진하중을 가속도 g의 배수로 표현하였다. 여기서 SSE는 발생확률이 매우 작은 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake)을 나타내며, E-W, N-S는 수평방향, V-S는 수직 방향을 나타낸다. 등가응력으로 식 (5)로 표현되는 미세스(Von Mises) 응력을 사용하여 허용 응력과 비교하게 된다.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (5)$$

여기서 σ_1 , σ_2 및 σ_3 은 주응력이다. 각 운전 조건에 따른 표 4와 같은 하중조합에 대한 정적 응력 해석 결과로부터 얻은 각 부품별 등가 응력은 표 5와 같다. 각 부품에서 발생하는 최대 등가응력이 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다. 여기서 운전하중(Operating Load)은 운전 토크 845 Nm 이며 지진하중은 운전 조건에 따른 표 3의 가속도 값(g)을 사용하였다.

표 3. 지진하중 (g-level)

Operating Condition	Direction	Applied g Level
Normal	E-W	0
	V-S	1
	N-S	0
SSE	E-W	6.6
	V-S	1+6.6
	N-S	6.6

표 4. 하중조합

Operating Condition	Load Combination
Normal	Weight+(1.0×Pressure)+ Operating Load
SSE	Weight+(1.1×Pressure)+ Operating Load+ Seismic Load

표 5. 밸브 부품별 최대 등가 응력

Operating Condition	Item	Von Mises Stress(MPa)	Allowable Stress Limit(MPa)
Normal	Body	100.9	103
	Bonnet	37.2	103
	Valve Stem	91.3	232
	Disc	90.9	155
	Bolt	3.6	172
SSE	Body	99.9	103
	Bonnet	36.9	103
	Valve Stem	94.0	232
	Disc	95.3	152
	Bolt	5.3	172

3. 건전성 평가기준

구조물에 대한 응력해석의 목적은 설계요건, 설계 보고서 및 설계 명세서에 기술된 하중조건에 의해 밸브 구조물이 과응력(overstressed)상태에 도달하지 않음을 보여주는 데 있다. 이러한 목적은 ASME ND 3500 요건에 따라 표 4와 같은 하중조합에 대하여 구한 등가응력이 허용 값 이내에 있음을 입증해야 한다. 밸브 구조물을 강건한 (rigid) 기기로 분류할 수 있어 지진 하중에 대해 정적 해석이 가능하려면 구조물의 기본 고유 진동수가 33 Hz를 초과해야 한다.

4. 건전성 평가결과

밸브 구조물에 대한 응력해석을 수행하여 원자력 규격에서 제시한 허용응력 값과 비교한 결과 응력 수준이 모두 허용응력 이내에서 만족하고 있으므로 각 운전조건 및 지진하중에 대하여 충분히 구조적으로 건전성이 유지됨을 알 수 있었으며, 결과는 표 5와 같다. 정상 지진조건 및 안전정지 지진조건에서 최대 응력이 발생하는 부위는 밸브 본체 이었으며 미세스 응력 값은 각각 100.9 MPa , 99.9 MPa 이었다. 허용 값은 103 MPa 이므로 허용값 이내에 있음을 알 수 있다. 보수적인 설계를 위해 안전 정지지진조건에서의 허용값은 정상조건에 비해 동일하게 사용하였다. 각 운전조건에 대한 등가응력 등고선은 그림 9, 10과 같다.

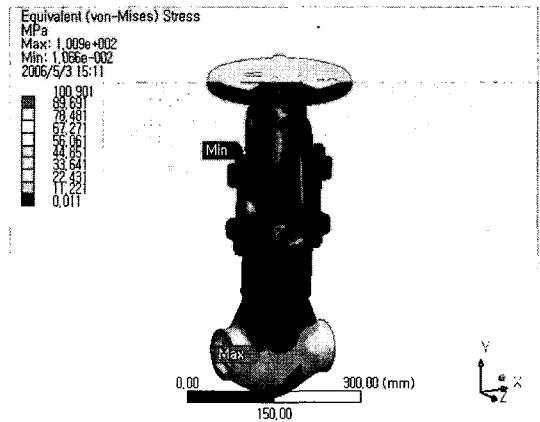


그림 9. 정상조건에서의 응력 등고선

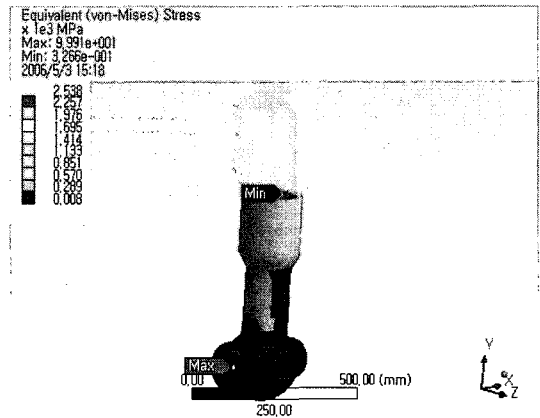


그림 10. 안전정지지진 조건에서의 응력 등고선

5. 결론

본 연구에서는 벨로우즈 글로브밸브 구조물에 대하여 모달해석 및 정적 응력해석을 수행하고 이를 바탕으로 원자력 규격 설계요건인 ASME ND-3500에 따른 기준을 적용하여 지진하중에 대한 구조건전성 평가를 하였다.

- (1) 모달해석에 의해 산정된 밸브 구조물의 기본 고유진동수는 112 Hz이며, 이는 강건한(rigid) 범위의 하한 값인 33 Hz를 초과하므로 밸브 구조물을 강건한 기기로 분류할 수 있어 지진 하중에 대해 등가 정적 응력해석이 가능하였다.
- (2) 지진하중에 의해 밸브 구조물에 발생하는 응력 수준은 코드에 규정한 허용값 이내에 있으므로 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 평가할 수 있다.
- (3) 유한요소법을 바탕으로 원자력 규격에 따른 기준을 정립하였다. 이러한 해석 및 기준은 지진 하중을 받는 원자력 부품에 대하여 구조 건전성을 평가할 수 있으므로 내진실험을 대체할 수 있는 수단으로 사용이 가능하다.

참고문헌

- [1] 정철섭, "일차 냉각계통 스트레이너에 대한 내진 건전성 평가", 한국전산구조공학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 295-304, 2000. 9.
- [2] ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 1, Subsection ND Class 3 Components", ASME, pp. 126-135, 1998

- [3] ASME, "ASME B16.34 Valves, Flanged and Butt-welding End, Steel, Nickel Alloys, and Other Special Alloys," ASME, pp. 2-100, 1998
- [4] ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II, Materials, Part D Properties," ASME, pp. 2-169, 1998.
- [5] ANSYS Release 10, "ANSYS Manual", Swanson Analysis Inc., 2005.
- [6] Clough, R. W. and Joshph, P., "Dynamics of Structure", McGraw Hill, pp. 52-58, 1975.
- [7] Cook, R.D., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, pp. 178-198, 1998.

정철섭(Chul-Sup Chung)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 기계설계과 (공학사)
- 1986년 6월 : 루이지애나 주립대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1990년 6월 : 노스캐롤라이나 주립대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1990년 10월 ~ 1995년 2월 : 한국원자력연구소 선임연구원
- 1995년 3월 ~ 현재 : 건양대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

모델링&시뮬레이션, 기계설계, 전산계산역학, 구조해석