

발전용 증기터빈 밸브 케이싱의 유한요소해석과 주조결함 평가 방법

이부윤† · 김원진* · 신현명*

(원고접수일 : 2005년 4월 27일, 심사완료일 : 2005년 5월 13일)

Finite Element Analysis and Evaluation of Casting Defects of Steam Turbine Valve Casings of Power Plants

Boo-Youn Lee† · Won-Jin Kim* · Hyun-Myung Shin*

Abstract : Stresses of main stop valve and control valve casings for the steam turbines of power plants are analyzed by the finite element method. The stress intensity is obtained to check the results on the basis of the design criteria of ASME boiler and pressure vessel code. To verify accuracy of the finite element analysis, analyzed stresses are compared with those measured during the hydrostatic pressure test. Stress category drawings, which play an important role in evaluating casting defects, are produced from the analysis results, and important points in casting of the valve casings are discussed in terms of the stress category.

Key words : Steam turbine(증기터빈), Valve casing(밸브 케이싱), Casting defect(주조결함), Stress category drawing(응력분류도)

1. 서 론

화력발전소는 보일러, 증기터빈, 발전기 및 이들을 연결하는 배관과 각종 부가 설비들로 이루어져 있다. 이 가운데 Fig. 1과 같은 대형 증기터빈용 주정지밸브(main stop valve)와 제어밸브(control valve)^[1]는 보일러에서 공급되는 증기를 터빈에 보내는 배관(piping)에 위치한다. 주정지밸브는 제어밸브 앞에서 주증기관(main steam pipe)과 연결되며 독립된 입구(inlet)와 출구(outlet)를 갖고 있다. 주정지밸브는 터빈 운

전 이상이 발생시에 최단 시간에 증기의 유입을 차단함으로써 제어밸브 케이싱, 터빈 로타(rotor), 터빈 케이싱(casing) 등이 과열되는 것을 방지하여 손상을 최소화한다. 제어밸브는 주정지밸브에서 유입되어 터빈으로 들어가는 증기의 압력을 일정하게 유지시키고 유량을 제어함으로써 터빈 출력을 제어하는 역할을 한다. Fig. 2에 표시된 바와 같이 주정지밸브 케이싱은 별도로 제작된 제어밸브 케이싱의 입구와 용접이음 구조로 조립된다. 이러한 밸브 케이싱은 고온, 고압 증기에 의한 가혹한 운전조건을 고려하여 ASME

† 책임저자(계명대학교 기계·자동차공학부), E-mail : bylee@kmu.ac.kr, Tel : 053)580-5922

* 계명대학교 기계·자동차공학부

(American Society of Mechanical Engineers) code⁽²⁾⁻⁽⁴⁾ 설계기준에 따라 설계되며, Cr-Mo-V 합금강의 재질을 사용하여 주조에 의해 제작된다. 주조 후에는 규정된 치수의 만족 여부와 비파괴검사를 수행하여 결함 여부를 판별하고, 필요시 결함 부위의 굴삭(excavation), 보수용접(repair weld) 및 열처리 등의 부가적인 작업을 수행한다. 또한 최종 제품을 대상으로 한 수압시험(hydrostatic pressure test)을 수행하여 안전성을 확인하는 과정을 거친다. 터빈 작동시 밸브의 손상은 발전소의 가동 중단을 유발하게 되므로 밸브 케이싱을 신뢰성 있게 설계하여 제작하는 것은 안정적인 발전소 운영을 위해 그 중요성이 매우 크다고 하겠다^{(1),(5)}. 밸브 케이싱에 관한 그간의 연구로 조 등⁽⁶⁾은 열전도 역문제 해석을 통하여 증기터빈 가동시의 밸브 케이싱 내의 열전달계수를 구하였으며, 하 등⁽⁷⁾은 화력발전용 증기터빈 밸브 케이싱의 피로수명 설계를 위한 최대허용온도차를 계산하는 방법을 제시하였다.

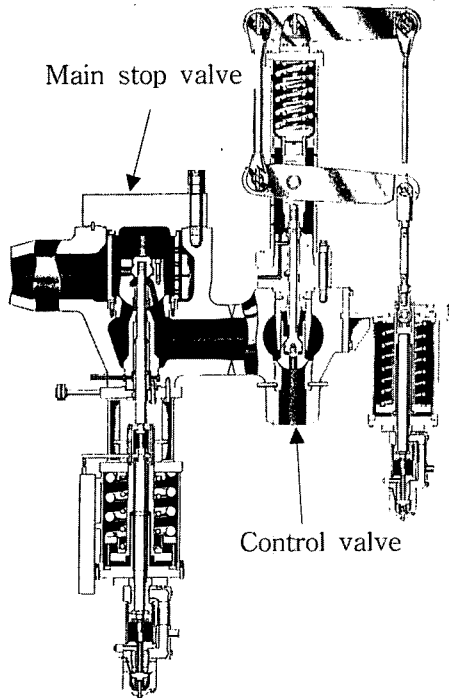


Fig. 1 Structure of typical valves for steam turbines of fossil power plants

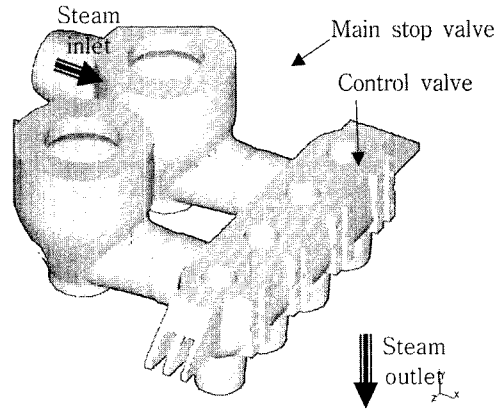


Fig. 2 Assembled valve casing

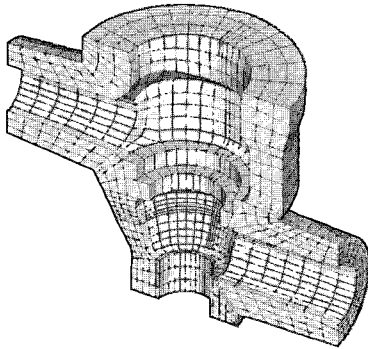
본 연구에서는 화력발전용 증기터빈의 주정지밸브와 제어밸브 케이싱의 설계조건(design condition)을 고려하여 유한요소해석 프로그램을 사용한 응력해석을 수행하고, 해석 결과로부터 ASME code에서 설계기준으로 규정하고 있는 응력강도(stress intensity) 분포를 구하였다. 그리고 유한요소해석의 정확성을 검증하기 위하여 설계증기압(design steam pressure)과 동일한 압력하에서 수압시험을 실시할 때 케이싱의 외벽에 스트레인게이지(strain gage)를 부착하여 응력을 측정하고 이를 해석 결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 또한 해석된 응력을 ASME code의 허용응력(allowable stress)에 따라 분류하고, 분류된 응력을 주조결함(casting defect) 발생시 결함 부위를 굴삭하는 크기와 관련하여 정량화한 후 주조결함의 평가 기준으로 사용되는 응력분류도(stress category drawing)를 작성하였다. 밸브 케이싱 제작시 주조결함 발생 부위는 본 연구에서 제시한 응력분류도 상의 위치에 따라 상세하고 정확한 조치를 수행하는데 사용할 수 있다.

2. 밸브 케이싱의 유한요소해석

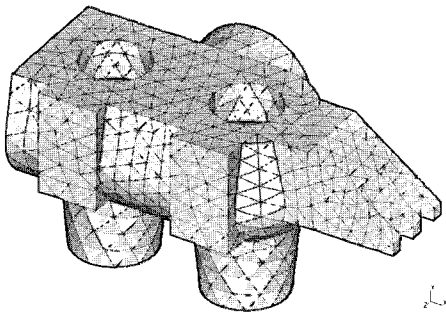
본 연구는 500 MW급 화력발전소에 사용되는 대형 증기터빈용 주정지밸브와 제어밸브의 케이싱을 대상으로 한다. 밸브를 거쳐서 고압 증기터빈

에 유입되는 증기의 온도는 534 °C(994 °F), 압력은 23.5 MPa(3409 psia), 유량은 1700 Ton/hr(3.75x10⁶ lb/hr)이다.

해석 모델을 만들기 위하여 두 케이싱을 각각 솔리드(solid)로 모델링하여 여러 개의 체적으로 분할한 후에 유한요소를 자동 생성하였다. 최종적인 3차원 유한요소모델은 Fig. 3과 같으며 6면체 및 4면체 형상의 2차 요소(quadratic element)로 구성하였다. 대칭성을 고려하여 전체 형상의 절반만 고려하였으며, 해석에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 케이싱 내부의 미소한 곡면들은 형상을 단순화하였다. 해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS⁽⁸⁾를 사용하였다. 밸브 케이싱의 설계조건에 대한 하중으로는 설계증기압을 고려하였는데, 통상적으로 설계증기압은 정상운전시에 고압터빈(high pressure turbine)에 유입되는 증기압의 1.5배를 사용한다.



(a)



(b)

Fig. 3 Finite element models (a)Main stop valve casing, (b)Control valve casing

밸브 케이싱이 실제로 설치되는 상황을 고려하여 적절하게 구속조건을 설정하여 경계조건으로 지정하였다. 주정지밸브 케이싱의 경우 먼저 대칭면에는 대칭조건을 부여하였고, 하단면에는 수직 방향의 변위를 구속하였다. 주정지밸브 케이싱의 출구는 제어밸브 케이싱의 입구와 용접되므로 식 (1)과 같이 평형을 고려하여 계산된 면압을 출구 단면에 가하였다.

$$p' = \frac{pd_i^2}{d_o^2 - d_i^2} \quad (1)$$

여기서 d_i 와 d_o 는 출구의 내경과 외경을 나타내고, p 는 설계증기압을 나타내며, p' 는 출구 단면에 작용하는 면압을 의미한다. 한편, 케이싱의 상부에는 원형의 덮개 판(upper head)이 나사 체결되어 증기의 누설을 방지하는 역할을 수행한다. 따라서 식 (1)을 사용하여 계산된 면압을 상부면에 가하였는데, 이 때에는 d_i 와 d_o 는 케이싱 상부면의 내경과 외경을 나타내고, p' 는 덮개와 체결되는 상부면에 작용하는 면압을 의미한다.

제어밸브 케이싱의 대칭면과 하단면의 경계조건은 주정지밸브와 동일하게 설정하였다. 제어밸브 케이싱의 입구 단면은 주정지밸브 케이싱 출구와의 용접 체결 조건을 고려하여 수직 방향의 변위를 구속하고, 상부면은 주정지밸브 케이싱과 유사하게 식 (1)을 사용하여 계산된 면압을 가하였다.

해석에 사용된 밸브 케이싱 재료의 화학 조성 및 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition and mechanical property

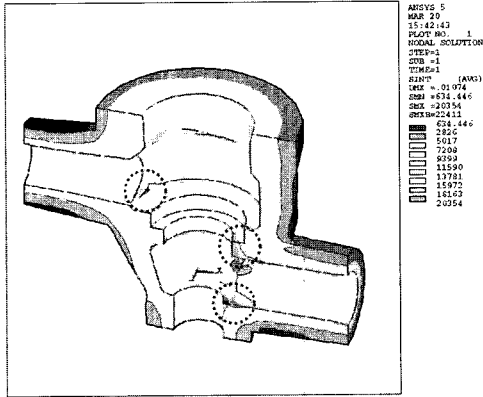
C	Mn	Si	Cr	Mo	V
0.12	0.50	0.20	1.00	0.90	0.20
~0.20%	~0.90%	~0.60%	~1.50%	~1.20%	~0.35%
Yield strength		Tensile strength		Elongation(%)	
413.4 MPa (60,000 psi)		551.2 MPa (80,000 psi)		50	

설계조건에서의 응력해석의 결과로서, Fig. 4는 ASME code에서 설계기준으로 규정하고 있는 식

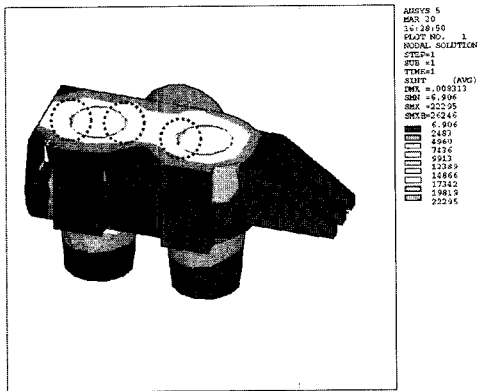
(2)와 같이 정의되는 응력강도 분포를 나타낸다.

$$S = \text{Max.}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \quad (2)$$

여기서, S는 응력강도를 나타내고, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 세 주응력을 나타낸다. Fig. 4에 표시된 바와 같이 해석 결과 응력이 높은 부위는 주정지밸브 케이싱의 경우에는 몸체와 입출구가 연결되는 부위의 내벽 모서리(Fig. 4(a)의 점선 원 위치)이며, 최대 응력강도는 140.2 MPa(20,354 psi)이다. 제어밸브 케이싱에서는 원통 형상 내벽의 상부 테두리(Fig. 4(b)의 점선 원 위치)의 응력이 높고, 최대 응력강도는 153.6 MPa(22,295 psi)이다.



(a)



(b)

Fig. 4 Stress intensity distribution at design condition (a)Main stop valve casing, (b)Control valve casing

두 케이싱 모두 최대 응력강도가 Table 1에 수록된 항복강도(yield strength) 413.4 MPa (60,000 psi)보다 매우 작으므로 설계증기압이 가해지는 조건에서 소성 변형이 일어나지 않는 것으로 판단된다. ASME code에 따르면 압력용기는 벽 단면에서의 막응력강도(membrane stress intensity) P_m 과 굽힘응력강도(bending stress intensity) P_b 가 소재의 허용응력보다 작아야 한다.

P_m 과 P_b 는 다음 식 (3), (4)와 같이 응력강도의 항을 벽 단면을 따라 적분하여 구할 수 있다.

$$P_m = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} S dx_s \quad (3)$$

$$P_b = \pm \frac{6}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} S x_s dx_s \quad (4)$$

여기서, S는 해석 결과 얻어진 응력강도를, t는 케이싱의 벽 두께를, x_s 는 벽 단면을 따라 설정된 좌표를 각각 나타낸다. 앞에서 기술한 바와 같이 두 케이싱에 대한 해석 결과로서 구해진 최대 응력강도가 항복강도에 비해 매우 작으므로, 막응력강도와 굽힘응력강도도 허용응력에 비하여 크게 작은 것으로 판단된다.

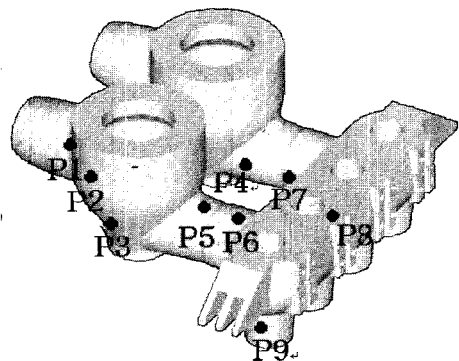


Fig. 5 Measurement locations

한편, 밸브 케이싱의 유한요소모델의 정확성을 평가하기 위하여 설계조건에 대한 응력해석의 결과를 동일한 조건으로 수압시험을 수행하여 측정된 결과와 비교하였다. 밸브 케이싱과 같이 발전

소 가동중에 내부 작동유체를 갖는 압력용기 형태의 제품은 일반적으로 제작 후 출하하기 전에 수압시험을 거치게 된다. 본 연구에서는 밸브 케이싱의 수압시험시에 Fig. 5에 표시된 P1~P9의 총 9 개의 외면 위치에 스트레인게이지를 부착하고 수압을 서서히 증가시켜 설계압에 이르렀을 때 압력을 일정하게 유지시키면서 변형률을 측정하였고, 측정 변형률을 응력으로 변환하여 해석 결과와 상호 비교하였다.

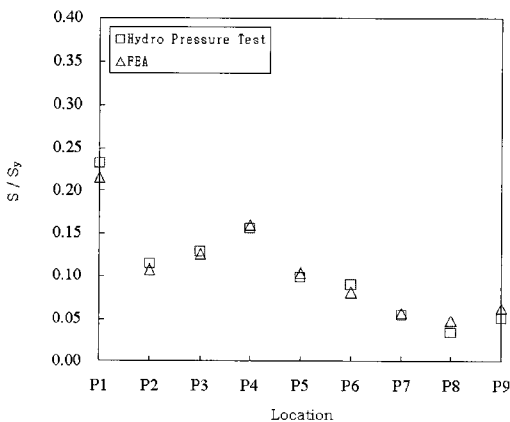


Fig. 6 Comparison of analyzed stress with measured stress from the hydrostatic pressure test

Fig. 6은 유한요소해석과 수압시험의 결과의 응력강도 S 를 밸브 케이싱 재질의 항복강도 S_y 로 나누어 무차원화하여 비교한 것으로, 해석값과 측정값의 최대 오차가 약 15% 정도의 수준으로 만족할만한 결과를 보였다. 이 같은 결과로부터 본 연구에서 제시한 밸브 케이싱 유한요소모델의 정확성과 해석 결과의 신뢰성을 확인할 수 있다.

3. 밸브 케이싱의 주조결함 평가

발전용 증기터빈의 밸브 케이싱은 주조에 의해 제작하게 되는데, 일반적으로 주조후 냉각되면서 수축하는 과정에서 주조결함이 발생할 수 있다. 밸브 케이싱의 주조결함은 주조품을 대상으로 자기검사(magnetic test), 광선검사(ray test) 등의 비파괴검사를 수행하여 찾아낸다. 대형 밸브

케이싱에서 발생한 주조결함은 결함 위치와 결함 크기를 고려한 기술적 검토를 거쳐 굴삭, 보수용접, 열처리 등에 의하여 사용 가능하게 만들거나 혹은 불가피한 경우에는 불량품으로 판단하여 폐기하게 된다. 밸브 케이싱의 주조결함의 기술적 검토시에 매우 요긴하게 사용되는 자료가 각 위치에서의 응력강도의 수준을 나타내는 응력분류도이다. 설계증기압 조건에서 밸브 케이싱의 각 위치에서 발생하는 응력강도의 수준이 네 가지로 구분되어 이 응력분류도에 표시된다. 본 장에서는 밸브 케이싱 주조결함의 기술적 검토 방법을 요약 기술하고, 유한요소해석 결과를 이용하여 500 MW급 주정지밸브와 제어밸브 케이싱의 응력분류도를 구하고 평가하고자 한다.

앞 장에서 기술된 바와 같은 설계증기압 조건의 응력해석 결과로부터 Table 2와 같이 응력강도의 수준(level)을 허용응력과 파열강도의 항으로 정의할 수 있다^{(9),(10)}. Table 2에서 구분된 Level I, II, III, IV는 주조결함이 발생한 위치의 응력강도를 고려하여 결함의 사후처리를 위한 평가에 활용된다. Level I은 설계조건에서 발생하는 응력강도가 허용응력의 50% 이하인 수준을, Level II는 허용응력의 50%보다 크고 허용응력 이하인 수준을, Level III은 허용응력보다 크고 파열강도의 90% 이하인 수준을, Level IV는 파열강도의 90% 이상인 수준을 각각 나타낸다.

Table 2 Stress category criterion

Level	Stress value
I	≤ 50% of allowable stress
II	50% of allowable stress ~ 100% of allowable stress
III	100% of allowable stress ~ 90% of rupture strength
IV	≥ 90% of rupture strength

한편, 주조결함의 크기는 결함의 측정 깊이, 폭, 길이에 근거하고 결함 위치에서 케이싱의 벽 두께, 벽 길이, 벽 곡률반경을 고려하여 소형(small), 중형(medium), 대형(large)으로 분류할 수 있다. 이와 같이 응력강도 수준과 주조결함 크기가 정

해지면, Table 3과 같이 결함 위치에서의 응력강도의 수준 및 결함 크기에 따라 사후처리 방법을 구분할 수 있다.

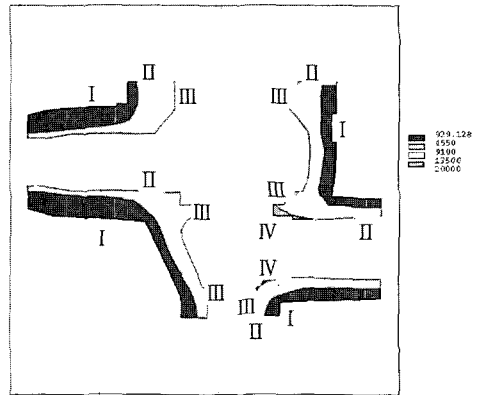
Table 3 Repair method of casting defect

Level	Size of casting defect		
	Small	Medium	Large
I	Blend	Repair weld Stress relieve	Repair weld Stress relieve
II	Blend	Repair weld Stress relieve	Repair weld Normalize Temper
III	Blend	Repair weld Normalize Temper	Detail design review
IV	Detail design review		

Table 3에서 볼 수 있듯이 결함 발생 위치에서 응력강도 수준이 Level I, II, III인 소형 결함은 결함 부위를 굴삭한 후 근방을 가공하여 표면 형상을 부드럽게 처리하는 블렌딩(blending) 방법으로 해결한다. Level I, II, III의 중형 결함과 Level I, II의 대형 결함은 결함 부위를 굴삭한 후 보수용접, 응력이완(stress relieving) 또는 추가적으로 불림(normalizing) 열처리, 뜨임(tempering) 열처리 방법으로 해결한다. 응력강도 수준이 높고 대형 결함인 경우, 즉 Level III의 대형 결함과 Level IV의 모든 결함은 세밀한 설계 검토를 거쳐 폐기 여부를 판단하게 된다.

앞 장의 Fig. 4에 제시된 설계중기압 조건의 응력 해석 결과는 응력강도 분포선도의 등고선 수준을 Table 2의 응력분류 기준에 따라 설정하면 Fig. 7과 같이 응력분류도로 나타낼 수 있다. 전체적으로 두 밸브 케이싱에서 공통적으로 내벽의 응력 수준은 높고 외벽의 응력 수준은 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 그러므로 밸브 케이싱의 구조시 외벽보다는 내벽에서의 구조결함 방지가 더욱 요구되는 것으로 판단된다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 주정지밸브 케이싱의 경우는 외벽은 전체적으로 Level I로 낮고 내벽은 Level II 이상의 수준으로 나타났다. Level III은 케이싱 본체의 내벽에서만 나타나고 출구부 내벽 모서리에서

의 응력 수준이 Level IV로 가장 높게 나타났다. Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 제어밸브 케이싱의 경우는 내벽은 대체적으로 Level II, III의 수준이며, Level IV는 원형 덮개 판과 접하는 상부 내벽 모서리의 국소 부위에서만 나타났다.



4. 결 론

본 연구에서는 500 MW급 화력발전소용 증기터빈의 주정지밸브 및 제어밸브 케이싱에 대하여 설계증기압 조건에서의 응력해석을 유한요소법을 사용하여 수행하였다. 제작된 밸브 케이싱에 대하여 수압시험을 실시하여 설계증기압과 동일한 수압조건에서 케이싱의 외벽에 스트레인 게이지를 부착하여 측정된 응력을 해석 결과와 비교함으로써 해석 결과의 신뢰성을 입증하였다. 해석 결과로부터 케이싱의 응력강도를 케이싱 재료의 허용응력과 파단응력의 향으로 분류하고, 분류된 응력을 구조결합 발생 위치의 굴삭 크기와 연관하여 정량화하였다. 유한요소해석 결과로부터 밸브 케이싱 구조결합의 평가 기준으로 사용되는 응력분류도를 작성하였다. 두 케이싱에서 내벽의 응력강도 수준이 높은 것으로 나타나서, 외벽보다는 내벽에서의 구조결합을 방지하는 것이 필요한 것으로 나타났다. 응력강도 수준이 가장 높은 주정지밸브 케이싱의 출구부 내벽 모서리와 제어밸브 케이싱의 덮개 판 체결부 내벽 모서리에서는 구조결합이 발생하지 않도록 특별히 유의해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 방법은 발전용 대형 증기터빈 밸브 케이싱을 신뢰성 있게 설계하고 제작하기 위하여 효율적으로 활용할 수 있다.

참고문헌

- [1] A. Leyzerovich, Large Power Steam Turbines: Design and Operation, Vol. 1, Pennwell Publishing Co., Tulsa, Oklahoma, 1997.
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section I, Rules for Construction of Power Boilers, 1996.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Rules for Construction of Pressure Vessel, 1996.
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, Rules

for Construction of Pressure Vessel - Alternative Rules, 1996.

- [5] R. L. Carson, "Design and Experience With Steam Valves for Utility Steam Turbines", Technical Report, General Electric Company, 1985.
- [6] 조종래, 배원병, 이부윤, "정상상태의 열전달 계수 예측을 위한 최적화 기법의 열전도도 역문제에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제 21권, 제 5호, pp. 87-94, 1997.
- [7] 하준욱, 김태완, 이부윤, "화력발전용 증기터빈 밸브 케이싱의 수명 설계를 위한 최대허용온도차 계산", 한국정밀공학회지, 제 16권, 제 8호, pp. 46-52, 1999.
- [8] ANSYS Theory Reference, Release 5.3, SAS IP Inc., 1994.
- [9] J. M. Blanchard, "Valve Casing Defect Repair", Technical Report, General Electric Company, 1969.
- [10] J. Polacek, "Instruction for the Repair of Cast and Fabricated Turbine Valve Casings and Valve Casing Attachments", Technical Report, General Electric Company, 1978.

저 자 소 개



이부윤 (李富潤)

1957년 1월생. 1981년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업. 1984년 2월 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1991년 8월 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사). 1984년 3월~1998년 2월 한국중공업(주) 기술연구원 선임연구원. 1998년 3월~현재 계명대학교 기계자동차공학부 부교수.



김원진 (金元鎭)

1964년 12월생. 1987년 2월 부산대학교 정밀기계공학과 졸업. 1989년 2월 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1993년 8월 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사). 1990년 7월~1997년 2월 삼성중공업(주) 기계전자연구소 선임연구원. 1997년 3월~현재 계명대학교 기계자동차공학부 부교수.



신현명 (申鉉明)

1953년 9월생. 1979년 2월 서울대학교 농공학과 졸업. 1983년 6월 오하이오주립대학교 산업 및 시스템공학과 졸업(공학석사). 1988년 12월 오하이오주립대학교 산업 및 시스템공학과 졸업(공학박사). 1987년 9월~1991년 6월 웨인주립대학교 제조 및 산업공학과 조교수. 1991년 7월~1992년 8월 두산기술원 공정개발부문 책임연구원. 1992년 9월~현재 계명대학교 기계자동차공학부 부교수.