

원전용 보조급수 탱크 안전등급 저압용 안전밸브에 대한 연구

김기수*† · 장무경**

A Research on the Localization of Safety Related Safety Valves with Micro Pressure in Auxiliary Feed Water Tank of Nuclear Power Plant

Ki Su Kim*†, Moo Gyeong Jang**

Key Words : Safety Valve(안전밸브), Nuclear power plant(원자력발전소), Safety related(안전 등급), Auxiliary feed water tank(보조급수 탱크), Pressure Vessels(압력용기)

ABSTRACT

When excessive pressure is generated in the auxiliary feed water tank for the nuclear power plant, a safety valve shall be installed to discharge the pressure. This study is about the design, manufacture, and verification of the micro pressure safety related safety valves. A valve for the study was designed to have a natural frequency of more than 33 Hz and to satisfy the seismic coefficient for the installation location. In order to satisfy micro set pressure, a study has been conducted by optimizing the material and manufacturing of the valve seat. In addition, the operability and the capacity of the valve was verified by certification of ASME QME-1 and ASME NBBI, which are essential requirements for the safety related safety valves. It is expected that domestic nuclear power industry technology will develop through localization of micro set pressure safety related safety valves.

1. 서 론

발전소 및 기타 산업 현장에서 압력용기의 과압을 방지하기 위하여 많은 안전밸브가 사용되고 있다. 연구 대상 밸브는 원자력발전소의 보조 급수 탱크에 설치되는 안전밸브로 압력용기를 일정한 압력으로 유지하기 위하여 사용되는 밸브이다. 현재까지 해외사의 밸브를 사용하고 있었으나 높은 제작비용 및 AS 비용과 즉각적인 대응이 어려운 점으로 국산화의 필요성이 절실하였다.

일반적인 안전밸브는 사이즈 DN150 이하로 DN200 이상의 밸브는 직접적인 인증 시험이 아닌 DN150 이하의 동일한 설계에 대한 밸브를 통하여 인증을 수행하고 있다. Table 1에 나타난 조건과 같이 연구 대상 밸브는 아주 작은 압력 변화에도 작동될 수 있는 저압용 밸브로 국내에서 해당 조건과 같은 저압에 대하여 별도의 검증된 사례는 없는 것으로 확인

하였다.

본 연구는 원자력발전소의 보조 급수 탱크에 설치되는 연구 대상 밸브에 대한 성능 및 용량에 대한 실증시험을 수행하여, 별도 검증된 적이 없는 안전밸브에 대한 인증 시험을 수행하여 밸브의 건전성과 신뢰성을 확보하고자 하였다.

Table 1 Valve Description

Valve type	Safety valve
Class	150
Size (DN)	8 "(DN200)
Fluid	Water
Set Pressure	0.179 kg/cm ²
Accumulation	0.070 kg/cm ²
Blowdown	10 %

* (주)삼신(Samshin Ltd.) / 남서울대학교 대학원(The Graduate School of Namseoul University)

** 남서울대학교(Namseoul University)

† 교신저자, E-mail : kimks84@ssv.co.kr

2024 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2024년 7월 3일~7월 5일, 평창 알펜시아

The KFSM Journal of Fluid Machinery: Vol. 27, No. 5, October 2024, pp.47~52(Received 17 Jul. 2024; revised 20 Aug. 2024; accepted for publication 05 Sep. 2024)

한국유체기계학회 논문집: 제27권, 제5호, pp.47~52, 2024(논문접수일자: 2024.07.17, 논문수정일자: 2024.08.20, 심사완료일자: 2024.09.05)

또한, 연구 대상 밸브는 해외사의 밸브를 대신하여 사용할 수 있도록 새로이 설계된 설계안이다. 연구 대상 밸브는 미국기계학회(ASME, American Society of Mechanical Engineers) 요건에 따라 설계 및 제작, 검증 요건을 만족하여 안전 등급 밸브로 가동 중인 원자력발전소에서 사용될 수 있도록 국산화 연구를 수행하였다.

2. 안전밸브 설계 및 제작

2.1 안전 밸브 설계

안전밸브는 Fig. 1과 같이 디스크 하단에 작용하는 유체의 압력에 대한 힙과 디스크 상부에서 작용하는 스프링의 힘을 통하여 설정 압력을 설정하고, 이에 안전밸브가 두 가지 힘의 차이를 이용하여 정해진 압력에서 유체를 방출할 수 있도록 하는 작동 원리를 가진다.

안전밸브는 ASME BPVC Sec.III⁽¹⁾ ND 및 ASME B16.34⁽²⁾ 코드 요건에 따라 설계하여 과압 방지를 위한 정확한 설정 압력 범위에서 작동되어야 하고, Chattering 없이 정해진 밸브 Lift 까지 작동해야 한다. 또한, 시방 요건에서 필요로 하

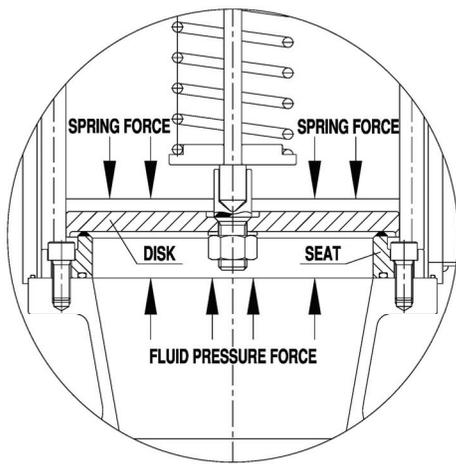


Fig. 1 Safety Valve Design

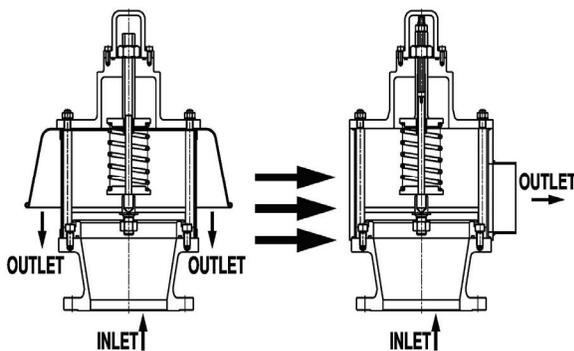


Fig. 2 Safety Valve Design development

는 유체의 유량을 분출하고 정해진 Blowdown 조건 내에서 다시 닫힐 수 있도록 설계되어야 한다.

2.1.1 안전밸브 설계안

기존 해외사의 밸브는 Fig. 2의 좌측에 표시된 바와 같은 설계안으로 밸브 출구 측이 사방으로 개방되어 있어 방출된 유체에 대한 운전원의 안전을 보장할 수 없는 구조로 되어 있었다. 이는 안전등급 안전밸브의 필수 요건인 미국 국제 보일러 및 압력용기 감사원협회인 NBBI (National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors)로부터 인증을 받을 수 없는 구조로 기본적인 설계 구조 개선이 필요한 상황이었다.

기존의 설계된 배관 및 설비와의 간섭을 최소화하기 위하여 해외사 밸브의 대략적인 부피 및 중량을 유사하게 설계하였다. Fig. 2 우측의 설계안처럼 출구 측을 별도로 구성하고 출구 측을 제외한 방향으로 유체가 방출되지 않도록 폐쇄적인 구조로 설계 개선을 하여 방출되는 유체에 대한 안전성을 높일 수 있도록 하였다.

2.1.2 내진설계

원자력발전소에 설치되는 안전등급 밸브는 내진설계를 수행하도록 하고 있다. 기본적으로 국내 상용되는 원전의 시방 요건으로 밸브의 고유 진동수를 33 Hz (Hertz) 가 넘도록 하고 있다. 그리고, 정적 해석을 통하여 밸브의 압력 유지부품 Body, Bonnet, Disk 등 주요 부품에 대한 건전성을 확인하도록 하고 있다.

미국전기전자학회 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer) 에서는 IEEE-344⁽³⁾ 요건에 따라 시험을 통하여 내진 설계를 하도록 하고 있고, 밸브의 고유 진동수가 33 Hz 가 넘을 경우 해석적인 방법으로 내진 설계를 수행할 수 있도록 하고 있다.

본 연구 밸브는 내진 해석 결과 고유 진동수가 77.6 Hz로 시방 요건을 만족하였고, 모든 주요 밸브 부품들도 시방 요건을 만족함을 내진검증보고서 (SQRA-21-HU1002)⁽⁴⁾ 를 발행하여 내진 설계가 제대로 수행되었음을 확인하였다.

2.2 안전 밸브 제작

본 연구 밸브는 일반적인 안전밸브와 달리 저압 조건의 설정 압력 (0.179 kg/cm²)에서 요구되는 기능을 수행하는 밸브로 기존의 안전밸브와는 차별화될 수 있는 제작 기준이 필요하였다.

저압 조건에서 시트와 디스크가 접촉하여 설정 압력이 도달하기 전까지 유체의 누설이 발생하지 않도록 하고, 설정 압력 이상에서는 유체가 방출되어야 하므로, 시트 면의 가공이 매우 중요한 사항이라고 볼 수 있다.

Table 2 Fabrication Standard

Item	Disk Seat	Body Seat
Straightness(직진도)	3/1000	3/1000
Oblateness(편평도)	2/1000	2/1000
Surface roughness(조도)	0.001	0.001

시트에 대한 최적의 재질을 확인하기 위하여 비금속 재질을 포함한 적용 가능한 재질에 대한 확인 작업을 수행하였고, ASME BPVC Sec.II⁽⁵⁾에 등재된 스테인레스 단조 재질인 SA182 GRADE F316에 Hardfacing 표면경화용성용접을 수행하여 시트면에 대한 건전성을 확보하였다.

연구 밸브의 시트와 디스크를 반복적으로 가공하고 개선하여 밸브 및 피팅 산업의 제조업체 표준화 연구회 MSS(The Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fitting Industry) SP-61⁽⁶⁾ 시트 누설 시험을 통하여 밸브의 누설량을 확인하였고, 시트면에 대한 최적의 직진도와 편평도, 조도를 Table 2와 같이 연구 대상 밸브 제작에 대한 기준을 수립하여 안정적인 기능을 수행할 수 있도록 하였다.

3. 연구 방법

3.1 ASME QME-1 성능검증

능동형 기계 장비의 품질검증 ASME QME-1⁽⁷⁾ 성능검증(Qualification of Active Mechanical Equipment in a Nuclear Facilities)은 원자력발전소 설치되는 밸브 중에 사고 조건시 정해진 역할을 수행해야 하는 밸브에 대하여 "Active Valve"로 정하고, 이에 대한 성능검증을 Table 3항목 및 순서에 따라서 수행하도록 하고 있다.

3.1.1 Pretest Inspection Test (Baseline)

Pretest Inspection Test는 시험 밸브의 기준 값을 설정하기 위한 시험으로 육안 검사를 포함하고, 검증 계획에 따라서 수행된다.

3.1.2 Performance and leakage

Performance and leakage는 시험 밸브의 시트 누설 및 작동성을 확인하기 위한 시험으로 Pretest Inspection Test와 같이 초기 기준 값을 설정하기 위하여 수행된다.

3.1.3 Fundamental frequency determination

Fundamental frequency determination는 시험 밸브의 고유 진동수를 확인하기 위한 시험으로 시방 요건을 만족함을 보여주기 위하여 수행된다.

Table 3 ASME QME-1 Qualification Test

No.	Test Sequence
1	Pretest Inspection (ASME QME-1, QVP-7331.3)
2	Performance and leakage (baseline) (ASME QME-1, QVP-7363.3)
3	Fundamental frequency determination (ASME QME-1, QVP-7340.3)
4	Seismic Test (ASME QME-1, QVP-7380.3)
5	End-Loading Test (Discharge-pipe and reaction-loading qualification test) (ASME QME-1, QVP-7370.3)
6	Combined seismic and end-loading test (ASME QME-1, QVP-7383.3)
7	External Environmental Effects Test (ASME QME-1, QVP-7393.3)
8	Thermal Effects Test (ASME QME-1, QVP-7394.3)
9	Performance and leakage (final) (ASME QME-1, QVP-7363.3)



Fig. 3 Seismic Test

3.1.4 Seismic Test

Seismic Test는 시방서에 언급된 지진하중에 대하여 시험 밸브에 적용했을 때, 시험 밸브의 작동성을 확인할 수 있는 시험이다.

시험 밸브의 고유 진동수가 33 Hz보다 높을 경우 해당 시험을 정적인 방법으로 수행 가능하고, 33 Hz 이하일 경우에는 동적인 방법으로 수행하여야 한다.

3.1.5 End-Loading Test

End-Loading Test은 안전밸브에 대하여 Discharge-Pipe and Reaction-Loading Qualification Test 라고 칭하며 압력이 배출되는 배관 반력 하중을 받을 경우 작동성을 확인하기 위하여 수행된다.

3.1.6 Combined Seismic and End-Loading Test

Combined Seismic and End-Loading Test 는 내진 및 단부 하중에 대한 밸브의 누설을 확인하는 시험이지만 밸브 출구에 직접 연결되는 배관이 없는 설치조건으로 인해 연구 대상 밸브는 해당 시험은 수행하지 않아도 된다.

3.1.7 External Environment Effects Test

밸브에 대하여 외부 환경의 유효성을 확인하기 위한 항목으로 외부 환경이 미미한 조건으로 해당 항목은 별도로 검증하지 않아도 된다.

3.1.8 Thermal Effects Test

고온 조건에서 사용되는 밸브는 Thermal Effects Test을 수행하여야 하지만 연구 대상 밸브는 상온 조건에서 사용되므로 해당 시험은 수행하지 않아도 된다.

3.1.9 Pretest Inspection Test (Final)

Pretest Inspection Test 는 시험 밸브의 최종 성능과 누설을 확인하기 위하여 수행된다.

3.1.10 Post Inspection

ASME QME-1 정해진 항목을 모두 수행하고 시험 밸브를 분해하여 손상 여부에 대하여 사진 등을 통하여 기록하고 확인해야 한다.

3.2 연구용 밸브의 ASME NBBI 인증

안전밸브는 구조적 건전성 요건만이 기술된 ASME Boiler & Pressure Vessel Code 중 유일하게 성능과 용량 인증 요건을 규정하여 압력기기의 과압 보호 기능을 수행할 수 있도록 하고 있다.

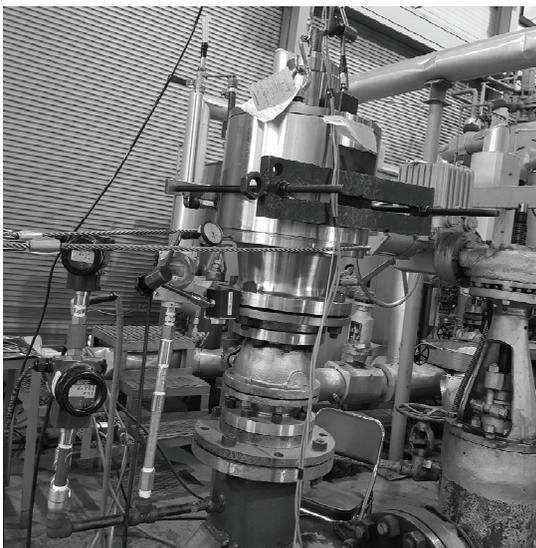


Fig. 4 End-Loading Test

록 하고 있다. 성능과 용량 인증 시험은 공인입회인의 입회 하에 인증된 시험 장소에서 수행 가능하다.

3.2.1 ASME NBBI 용량 인증

ASME NBBI 용량 인증은 세 가지 방법을 통하여 수행할 수 있다. 동일한 설계안에 대하여 단일 사이즈와 설정 압력을 위한 Single Valve Method와 단일 입구 사이즈와 전체 설정 압력을 위한 Slope Method, 그리고 단일 설계안에 대한 모델의 전체 사이즈와 설정 압력을 위한 Coefficient Discharge Method 방법이 있다. 연구 대상 밸브는 Single Valve Method를 통하여 인증 시험을 수행하였다. 인증 용량은 시험 결과의 평균값의 90 %를 초과할 수 없도록 하고 있다.

3.2.2 ASME NBBI 성능 인증

성능 인증 시험은 설정 압력, 운전성, Full Lift, Blowdown 항목을 확인하는 시험으로, 3회 반복 시험을 수행하여 시험 결과가 지정된 오차 범위 $\pm 5\%$ 이내이어야 한다. 시험 결과가 만족하지 못할 경우 밸브 제작자는 시험 현장에서 밸브를 조절하여 시험을 추가로 수행하여 성능 인증을 추가로 수행할 수 있도록 하고 있다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 ASME QME-1 성능검증 결과

ASME QME-1 요건에 따라 모든 시험을 수행하였고, 모든 성능검증 항목이 만족함을 확인하여 시험 밸브의 건전성을 확인할 수 있었다.

PNS No. : J237B-TR-A01-02 Rev.2
Report No. : SQRT-21-HAN-002 Rev.2

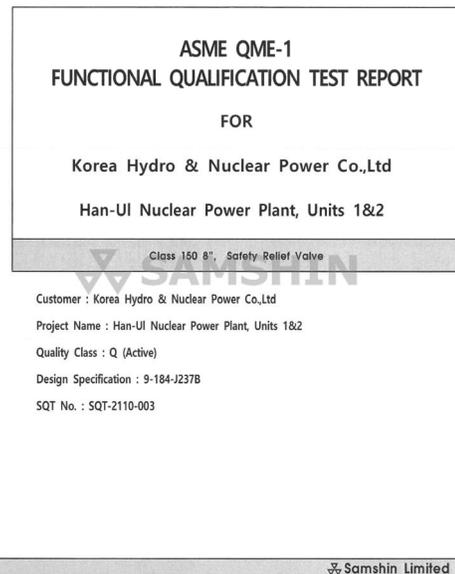


Fig. 5 Functional Qualification Test Report

이는 원자력 안전재단의 인증 절차에 따라 Fig. 5 성능시험보고서 (SQRT-21-HAN-002)⁽⁸⁾로 발행하여 고객에 제출하여 검토 및 승인 작업을 수행하였다.

4.2 연구용 밸브의 ASME NBBI 인증 결과

연구 대상 밸브는 미국 오하이오주 콜롬버스에 위치한 NBBI 공식 시험장에서 요구되는 인증 절차 및 공인입회인의 가이드에 따라 수행되었다. 시험용 밸브는 납품되는 밸브 수량을 고려하여 NBBI의 요청에 따라 2대를 제작하였다.

연구 대상 밸브는 공인입회인이 밸브의 Lift 를 외부에서 확인할 수 있도록 Indicator 를 추가하였고, 시험 중 설정 압력 및 밸브 Lift를 조절할 수 있도록 추가적인 설계 보완 작업을 수행하였다.

4.2.1 ASME NBBI 용량 인증

연구 대상 밸브는 Single Valve Method를 통해 2대의 시험 밸브에 대한 인증 시험을 수행하였다.

초기 연구 밸브의 Lift를 3.6 mm로 설정하여 ASME NBBI에 시험의뢰를 하였고, 용량 인증 시험을 수행하였으나 요구되는 용량 350 GPM (Gallons per Minute) 에 못 미치는 219.3 GPM 결과를 얻게 되었다. 이는 기존 출구 측이 모두 개방된 구조에서 별도로 출구를 추가한 구조로 개선되는 과정에서 유체의 흐름이 원활하지 않아 예상했던 용량이 나오지 않은 것으로 확인하였다.

추가적으로 밸브의 Lift 를 7.0 mm로 수정한 후 용량 인증 시험을 수행하여 요구 용량 350 GPM 보다 높은 약 400 GPM 용량이 나타남을 확인하였으나, NBBI 의 시험 설비로는 정상적인 유체 흐름을 구현되지 않아 불안정한 유체에 대한 상태로는 시험이 불가능하다는 판정을 받게 되었다. 또한, NBBI 의 인증된 시험 설비를 가진 업체에 시험 의뢰를 하였지만 모두 밸브 사이즈 DN150 이하만 수행 가능하거나 시험이 불가함을 확인하였다.

ASME NBBI 와 협의 후 용량 인증을 수행하기 위하여 Scale Model를 제작하여 동일한 설계안이 적용된 밸브 DN25, DN50, DN100 사이즈의 밸브를 추가 제작하였다.

Scale Model 에 대한 용량 인증 시험은 Table 4와 같은 조건으로 수행 하였고, 이는 Scale Model에 대한 밸브 정격 계수가 일정한지 확인하기 위하여 수행되었다.

Scale Model 시험 결과 밸브 정격 계수가 Fig. 6에서의 상부 범위와 하부 범위 사이의 범위 내에 모두 위치함을 확인할 수 있었고, 이에 대한 연구 밸브에 대한 용량은 411 GPM으로 최종 인증 용량을 확인할 수 있었다.

Table 4 ASME NBBI Scale Model Test Result

Test Valve Size.	DN25	DN50	DN100
Set Pressure(kg.cm ²)	0.141	0.141	0.246
	0.281	0.211	0.281
	0.422	0.281	0.422
Full Lift(mm)	0.039	0.083	0.165
	0.039	0.083	0.165
	0.039	0.083	0.165

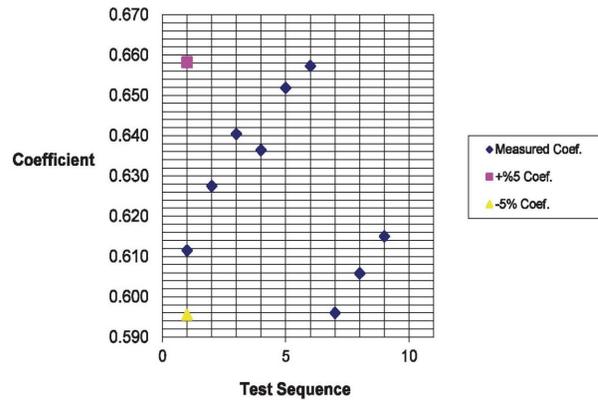


Fig. 6 Scale Model Test Valve Rated Coefficient

Table 5 ASME NBBI Result

Test Valve No.	150SRV08-1	150SRV08-2
Set Pressure(kg.cm ²)	0.190	0.183
Full Lift(mm)	8.4	8.3
Reseat Pressure(kg.cm ²)	0.183	0.183

4.2.2 ASME NBBI 성능 인증

ASME NBBI 의 시험 설비로는 연구 밸브 사이즈인 DN200의 3.6 mm 까지 시험이 가능하지만, Lift 7.0 mm 조건은 시험이 불가함을 용량 인증 시험을 통해 확인되어 성능 인증 시험은 삼신에서 ASME NBBI 담당자 입회하에 수행되었다.

시험 결과 두 개의 시험 밸브는 정해진 시험 절차에 따라 수행되었고, Table 5에 나타난 바와 같이 요구되는 설정 압력 및 Full Lift, Blowdown 조건을 만족하였다.

4.2.3 ASME NBBI 인증서

ASME NBBI 인증 시험에 대한 결과 하여 Fig. 6과 같이 ASME NBBI 용량 및 성능 인증서 NB Cap Cert. No.: SAL-M58070) 로 발행되었다. 연구 밸브는 Single Method 방법으로 인증된 안전밸브로 인증용 밸브 2대에 대한 인증 범위만을 인정하고 추후 추가 납품 밸브 및 다른 발전소에 납품되는 밸브에 대해서는 추가로 인증을 받아야 한다는 조건을 확인하였다.



THE NATIONAL BOARD
OF BOILER AND PRESSURE VESSEL INSPECTORS

SCOPE OF CERTIFICATION

Valve Type: 150SRV08-1, 150SRV08-2

Organization Type: Manufacturer

Certified Rating Value: Capacity = 411 GPM

Size: 8 x 6

Set Pressure: 2.54 psig

Blowdown Characteristic: Fixed

Certification Expiration Date: Upon Shipment of Production Valves

Sincerely,

Thomas P. Beime, P. E.
Technical Manager, Pressure Relief Laboratory

Reference Test Numbers: NB Test Lab: 60064W through 60070W, 60096W and 60097W.

Attachment: Provisional test summary

File: 231018 SAL-M58070 Proypass

Fig. 7 ASME NBBI Capacity Certification

5. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소 보조급수 탱크의 과압 방지 기능을 하는 저압용 안전밸브에 대한 기술을 연구하고 검증하였고, 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 본 연구는 원자력발전소에 사용 가능하도록 고객의 설계시방서 9-184-J237B Rev.0 (Add.6)⁽⁹⁾ 요건을 만족하도록 설계 및 제작, 시험을 수행하였다. 해당 요건에 따라 저압용 안전밸브를 안정적으로 제작하기 위하여 필요한 인자가 무엇인지를 확인하여 요구되는 제작 기준 직진도 3/1000 mm, 편평도 2/1000 mm, 조도 0.001 mm를 정하고 이를 확정하였다.
- 2) 저압용 안전밸브의 건전성을 확인하기 위하여 ASME QME-1 시험을 원자력 안전재단에서 요구하는 절차에 따라 수행하였고, 이에 대한 시험보고서를 문서화하여 고객의 승인을 받게 하였다. 또한, 안전밸브의 용량 및 성능을 확인하기 위하여 ASME NBBI의 인증 절차에 따라 인증시험을 수행하였다. 요구되는 용량 350 GPM 을 만족하는 411 GPM 의 결과를 얻었고, 성능 측면에서도 밸브 2대에 대한 3회 시험 조건에서 설정 압력 및 Full Lift 확인 결과 허용된 오차 범위 ±5 % 이내임을 확인하여 공인된 인증서를 취득하였다.
- 3) 원자력발전소의 보조 급수 탱크에 설치되는 저압용 안

전밸브에 대하여 기존의 해외사 밸브보다 개선된 설계안을 적용하였다. 또한, 국내에서 유일하게 저압용 안전밸브에 대한 ASME NBBI 용량인증 실증시험을 수행하여 밸브의 건전성과 신뢰성을 확보하였다.

후 기

바쁜 회사 업무에도 연구가 원활하게 진행될 수 있도록 밸브 설계부터 제작, 시험 및 검증에 도움을 주신 삼신밸브 회사 선배, 후배 님들 및 동료들과 논문이 잘 완성될 수 있도록 지도해 주신 남서울대학교 대학원 교수님들께 고마움을 표합니다. 어려운 시기 원자력 분야에 종사하시는 관련 업체 관련자 모두 전문 지식 및 경험을 쌓아 사회 발전에 이바지할 수 있도록 더욱 노력하고자 합니다.

References

- (1) ASME BPVC Sec.III, 1998 Edition through 2000 addenda, "Rules for Constructions of Nuclear Facility Components" American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (2) ASME B16.34, 1996 Edition, "Valves - Flanged, Threaded, and Welding End", American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (3) IEEE 344, 2009, "IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", IEEE Power Engineering Society.
- (4) Samshin R&D Department, Dynamic Qualification Report (Class 150 8" Safety valve), SQRA-21-HU1002 Rev.3, Sashin limited.
- (5) ASME BPVC Sec.II, 1998 Edition through 2000 addenda, "Materials" American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (6) MSS SP-61, 2009, "Pressure Testing of Valves", Standard Practice Developed and Approved by the Manufactures Standardization Society of the Valve and Fittings Industry, Inc.
- (7) ASME QME-1 2000 Edition, "Qualification of Active Mechanical Equipment Used in Nuclear Power Plants" American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (8) Samshin R&D Department, ASME QME-1 Functional Qualification Test Report (Class 150 8" Safety valve), SQRT-21-HAN-002 Rev.2, Sashin limited.
- (10) KEPCO Engineering & Construction co. inc., Technical Specification (Safety / Relief valves), 9-184-J237B Rev.0 (Add.6), Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.