

## 원자력 등급용 안전방출밸브 개발

김철성<sup>†</sup>·김강태<sup>†</sup>·김지현<sup>†</sup>·장기종<sup>†</sup>·홍기성<sup>\*</sup>

### The Development of Safety Relief Valve for Nuclear Service.

Chil-sung Kim, Kang-tae Kim, Ji-heon Kim, Ki-jong Jang and Kee-seong Hong

**Key Words:** Safety relief valve(안전방출밸브), Overpressure(과압), Set pressure(설정 압력), Spring load(스프링 하중), Lifting force(양력), Blowdown(분출차압)

#### Abstract

The purpose of this study is localization of safety relief valves for Nuclear Service through technical development with overall design, fabrication, inspection, capacity certification test and functional qualification test of safety relief valves in accordance with ASME Section III and KEPIC Code.

Safety relief valve is the important equipment used to protect the pressure vessel, the steam generator and the other pressure facility from overpressure by discharging the operating medium when the pressure of system is reaching the design pressure of the system. But we're depending on technology of the other country up to the present time. Because we don't have our own technologies, we have been spent the great time and money on installing and repairing safety relief valve at nuclear power plant.

Therefore we have to achieve the development of safety relief valves for Nuclear Service with our own technologies.

#### 1. 서 론

원자력등급용 안전방출밸브(safety relief valve)는 원자력발전소 계통 내의 압력용기, 증기 발생장치 그리고 배관 및 부속기기 등을 설계압력 이상의 과압(overpressure)으로부터 손상 또는 폭발에 따른 물리적·인적 재해를 예방하기 위한 안전관련 핵심설비요소이다. 안전방출밸브는 계통

의 설계압력 이상에서 개방되어 급속히 압력을 방출하다가 정상 운전압력이 되면 다시 닫히는 기능을 하는 단순한 기계장치이나, Fig. 1과 같이 밸브 몸체(body)와 보닛(Bonnet)의 구조적 안전성과 노즐(nozzle)과 디스크(disc) 등의 내부 트림 구조의 정확한 작동성과 정밀한 스프링 설계와 선정의 신뢰성이 요구되는 매우 세밀한 기기이다. 또한 어떠한 불가항력적인 상황에 의해 모든 전자 또는 전기적인 안전장치들이 작동하지 않을 경우라도 확실하게 작동해야 하는 최후의 기계적 압력방출장치가 바로 안전방출밸브이다.

특히, 원자력발전소에 설치되는 원자력등급용 안전방출밸브는 설계조건과 운전조건 그리고 환경조건에 따라 설계, 제조, 검사되고 제품에 대한 성능검증시험(functional qualification)과 용량인증시험(capacity certification test)을 통해 그 신뢰성

† 신우공업(주) 기술연구소

E-mail : kimcs@smartvalve.com

TEL : (031)983-2396 FAX : (031)983-2399

\* 한국수력원자력(주)

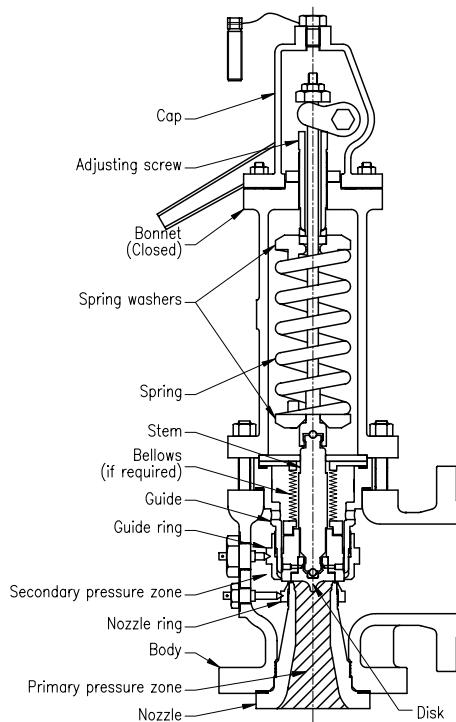


Fig. 1 안전방출밸브의 구조와 명칭

이 입증되어야 하는 매우 까다로운 밸브로 아직까지 국내에서는 설계나 제작에 대한 경험이 전혀 없으며 관련 자료나 기술력도 매우 취약한 실정이다.

현재까지의 원자력발전소에 사용하는 모든 안전방출밸브는 외국 제품들로서 수입으로 인한 외화 유출뿐만 아니라 지속적인 유지관리를 요하는 밸브의 특성상 밸브 진단 및 유지보수과정도 외국 기술에 의존함에 따라 발생하는 보수·유지비용

과 처리시간의 지연 등의 물질적, 시간적, 경제적 손실을 감수해야 하는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 ASME Code Sec. III, Div.1<sup>1</sup> 또는 KEPIC MN Code<sup>2</sup>와 울진 5&6호기 원자력발전소의 Tech. Specification<sup>8</sup>의 요건에 따라 안전방출밸브를 설계하고, 유한요소해석프로그램을 이용하여 주요 압력부품에 대한 구조해석과 진동해석을 수행하여 구조적 건전성을 입증하였고, 밸브의 노즐(nozzle)과 디스크(disk) 내부 유동에 대한 거동을 해석하여 유체가 디스크에 미치는 양력(Lifting force) 값을 설계에 반영하였고, table 1과 같은 사양의 실제 시작품을 제작하고 성능을 확인할 수 있는 시험설비를 직접 제작하여 성능시험을 수행 하였으며, 원자력 관련 코드에서 규정하는 성능검증시험과 용량인증시험을 해외의 검증기관과 인증기관을 통해 수행함으로써 원자력등급용 안전방출밸브를 국산화 개발하였다.

## 2. 설 계

### 2.1 주요 부품의 기능과 설계시 요구사항들

본 연구에서 개발하고자 하는 밸브는 spring loading 형태의 안전방출밸브로서 구조와 각 부품의 명칭은 fig. 1과 같다. 밸브와 부속품들은 technical specification<sup>8</sup>에서 지정한 모든 환경조건(온도, 습도, 방사선, 화학분사 그리고 지진하중)에 견디도록 설계되어야 하며 수명은 40년을 보장할 수 있도록 충분한 부식여유를 주어야 한다. Active 밸브는 사고 조건하에서도 고유의 작동성을 유지해야 하고 모든 밸브는 구동부를 포함한

Table 1 개발 제품의 주요 사양

|               |           |  |
|---------------|-----------|--|
| 개발제품의 명칭      |           | 안전방출밸브(safety relief valve), 주 증기(main steam)용 밸브 제외   |
| 용도            |           | 원자력발전소 계통에 사용되는 되닫힘 기능이 있는 압력방출장치                      |
| 성능<br>및<br>특성 | 품질등급      | Q, T, R  |
|               | 크기 및 압력등급 | 크기: 1/2" × 1" ~ 8" × 10", 압력등급: ANSI Class 150 ~ 1,500 |
|               | 적용유체      | Liquid, Steam, Gas, Air                                |
|               | Body 소재   | SA105, SA216 WCB, SA351 CF8M                           |
|               | 형식        | Conventional, Balanced Bellows, Open Bonnet            |
|               | 레버 형식     | Plain, Packed, None                                    |
| 적용 코드         |           | ASME B&PV Code Sec. III & VIII, KEPIC Code             |

fundamental natural frequency가 33hz 이상이어야 한다. 다음은 주요 부품들의 간략한 기능 설명과 구조적 건전성에 필요한 설계요건들이다.

·Body(몸체) : 입구측은 압력용기나 계통 배관에, 출구측은 분출관에 연결되며 계통 내의 압력과 유체 토출시 반동력을 견딜 수 있도록 하는 압력유지 기능을 하고 내부품을 감싸는 역할을 한다. 밸브는 연결배관 보다 강하게 설계되어 지진하중과 반동력, 배관의 굽힘응력과 비틀림응력에 견뎌야 한다. 밸브 입출부위를 통과하는 유체에 수직인 금속면적과 단면계수는 연결된 배관의 단면적과 단면계수의 110%이상이어야 하고 밸브 몸체의 허용응력( $S_{valve}$ )이 배관의 허용응력( $S_{pipe}$ )보다 작으면 배관의 단면적과 단면계수에  $S_{pipe}/S_{valve}$ 를 곱한 값의 110% 이상이어야 한다<sup>1</sup>. 최소 벽두께는 1차 및 2차 압력구역의 범위와 압력조건을 고려하여 ANSI B16.34<sup>5</sup>를 적용하여 결정하고 운전응력, 원형이외의 다른 형상, 응력집중 그리고 밸브에 가해지는 굽힘응력과 설치응력을 고려하여 밸브 목 크로치(crotch)부의 금속 두께를 보장해야 한다.

·Nozzle(노즐) : 1차 압력을 받으며 분출시 분출 유체의 통로가 되고 디스크와 접촉하면서 시트기능을 한다. 노즐은 semi nozzle과 full nozzle 형태가 있는데 밸브에 작용하는 각종 하중들에 의한 변형에 영향이 적은 full nozzle 형태로 설계한다.

·Disc(디스크) : 정상운전상태에서는 스프링 하중을 받아 작동유체의 누설을 방지하는 시트 기능을 하고 과압시 급속한 열림으로 유체와 이물질의 충돌로 급격한 온도 변화가 생기는 핵심 부품으로 부식이나 침식에 강한 재질을 선택하여 설계한다. 디스크의 굽힘응력은 table 2의 A급 운전하중의 응력한계를 초과 할 수 없다.

·Guide(가이드) : 디스크가 원활하게 상하로 움직이도록 하는 역할을 한다.

·Guide ring(상부조절링) : 유체가 분출될 때 유동 방향을 아래로 향하게 하여 유동에 의한 반동력을 조절하는 장치로서 밸브가 열렸다가 다시 닫혔을 때의 압력을 조절하는 기능을 한다.

·Nozzle ring(하부조절링) : 밸브의 초기 구동력을 예민하게 조절하기 위한 장치이다.

·Spring(스프링) : 압축코일 스프링으로서 밸브를 닫아 주는 하중의 근원이다. 스프링의 강성이

나 눌림량 설계에 따라 밸브의 성능에 민감한 영향을 미치는 매우 중요한 부품이다. 스프링의 영구 변형량은 전장의 1.0%이고 스프링의 사용 눌림량은 밀착 변형량의 80% 이내로 설계한다.

·Stem(스텝) : 스프링의 하중을 디스크에 전달하는 기능을 하며 양 끝단에 압축하중을 받는 구조물이므로 좌굴현상이 일어나지 않도록 충분한 굽기로 설계한다. 스텝의 일반막응력은 table 2의 A급 운전하중의 응력한계를 초과할 수 없다.

·Adjusting screw(조절나사) : 스프링의 눌림량을 조절하여 밸브가 열리는 압력을 설정해 주는 기능을 한다. 조절나사는 ANSI B1.1<sup>4</sup>의 방법에 따라 응력해석하며 그 응력은 0.6S<sup>1</sup> 이하여야 한다.

·Bellows(벨로우즈) : Balanced type의 밸브<sup>6</sup>에만 있는 구조로 back pressure가 밸브 구동에 영향을 주지 않도록 하는 기능을 하며 벨로우즈는 얇은 금속 막으로 파손이 쉬워 분출 유체와 직접 충돌하지 않도록 설계한다.

안전방출밸브는 장시간 노출과 디스크가 눌린 상태에서 닫혔다가 위급 시 급속 개폐가 이루어지는 밸브이므로 시트를 포함하여 접촉되어 움직이는 금속 표면은 상대 경도차를 두어 금속간의 고착현상이 발생하는 것을 방지한다.

2.2 각 부품의 응력한계

안전방출밸브의 몸체, 보닛, 몸체와 보닛의 연결 볼트, 노즐, 디스크, 스텝, 조절나사, 스프링 시트는 각종 설계 및 운전하중에 대하여 구조적으로 안전성이 입증되어야 하는 주요 부품들로 운전하중과 응력한계는 table 2와 같다. table 2의 S 값은 ASME Sec.II, Part D, Sub.1 에 따른다.

( $\sigma_m$ :일반막응력,  $\sigma_L$ :국부응력,  $\sigma_b$ :굽힘응력)

Table 2 운전하중별 응력한계<sup>1</sup>

| 운전하중 | 응력한계   |
|------|--|
| A급   | $\sigma_m < 0S$<br>$(\sigma_m \text{ 또는 } \sigma_L) + \sigma_b \leq 5S$  |
| B급   | $\sigma_m < 1S$<br>$(\sigma_m \text{ 또는 } \sigma_L) + \sigma_b \leq 65S$ |
| C급   | $\sigma_m < 5S$<br>$(\sigma_m \text{ 또는 } \sigma_L) + \sigma_b \leq 8S$  |
| D급   | $\sigma_m < 0S$<br>$(\sigma_m \text{ 또는 } \sigma_L) + \sigma_b \leq 4S$  |

### 3. 해 석

#### 3.1 유동해석에 의한 양력계산

안전방출밸브의 정확한 작동성은 디스크를 열려는 양력(lifting force)과 디스크를 닫으려는 스프링 하중(spring load)의 상관관계에 달려있다. 유체가 디스크에 미치는 양력은 노즐, 디스크, 가이드, 조절링의 구조와 치수 비율에 영향을 받고 스프링 하중은 압축 스프링의 강성(spring constant)에 영향을 받는다. 안전방출밸브의 성능요건은 설정 압력 이상의 과압이 걸리면 정격양정까지 디스크가 열렸다가 정상 운전압력 이상에서 다시 닫혀야 하는 것으로 양력과 스프링 강성과의 관계가 적절하지 않으면 성능에 악영향을 미치게 된다.

따라서 본 연구에서는 전산유동해석 기법을 이용한 양력 계산방안을 마련하여 스프링 강성을 선정하는데 반영하였다. 유동해석에는 ANSYS™ FLOTRAN™ (Revision 5.5.1)<sup>9</sup> 모듈이 사용 되었으며 모델링 요소는 2차원 축대칭 요소인 fluid141을 사용하였다. Fig. 2, 3는 노즐, 디스크, 조절링에 대한 유로를 축대칭으로 모델링된 요소와 절점과 경계조건을 보여주는 그림이다.

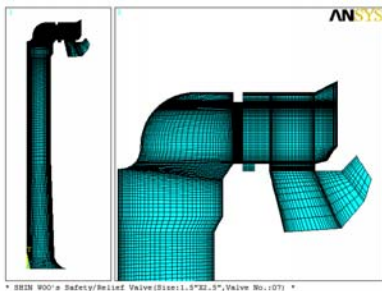


Fig. 2 축대칭 요소들

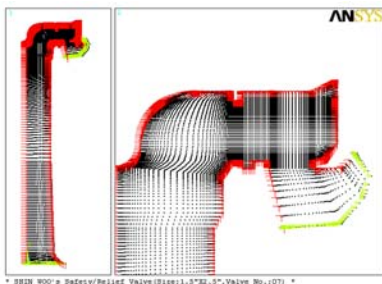


Fig. 3 절점들과 경계조건

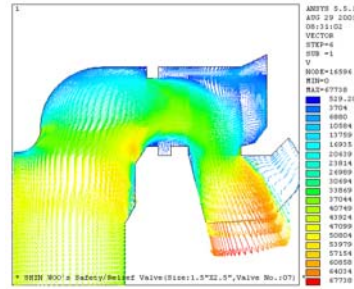


Fig. 4 속도분포

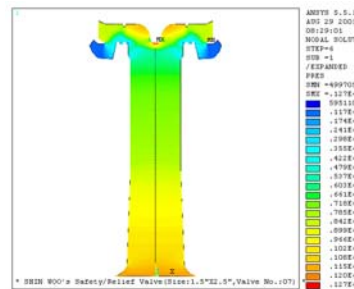


Fig. 5 압력분포

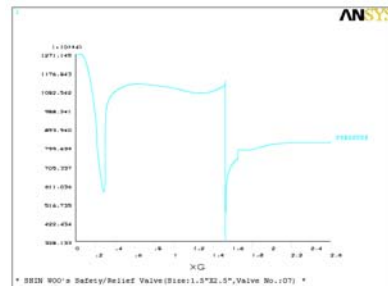


Fig. 6 디스크 하부의 압력

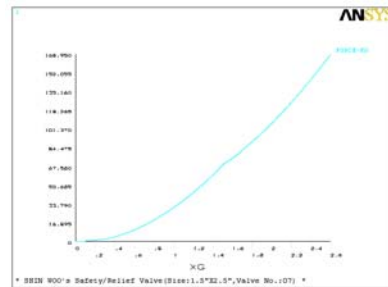


Fig. 7 양력 그래프

유동해석결과 fig. 4와 같은 유로 내의 속도분포와 fig. 5과 같은 압력분포를 얻었고 디스크 하부면의 node에서의 압력 값은 fig. 6의 그래프와 같고 이때 디스크에 미치는 유체의 힘은 fig. 7과 같이 구할 수 있었다.

3.2 주요 부품에 대한 구조해석

본 연구에서는 ANSYS™ 프로그램을 이용한 유한요소해석을 통하여 설계된 밸브의 노즐, 디스크, 스템, 스프링 시트, 몸체와 보닛에 대해 설계하중과 운전하중에 대한 구조해석을 수행하여 계산된 응력 값이 table 2의 응력한계를 초과하지 않는다는 것을 보여 밸브 설계에 대한 구조적 건전성을 입증하였다.

3.3 모달해석과 지진해석

안전방출밸브의 동특성(dynamic characteristics)을 파악하고 technical specification에서 요구하는 DBE(design basis event) 조건하에서 밸브의 건전성을 입증하기 위하여 본 연구에서는 ANSYS™ 프로그램을 이용한 모달해석과 지진해석을 수행하였다.

해석을 위한 가정과 경계조건은 다음과 같다.

1) 내부의 작은 부품, 너트, 레버와 같은 부품들은 Lump masses로 처리하였고, 2) 밸브 입구측 배관 플랜지와 체결되는 볼트 자리의 절점에 UX, UY, UZ=0로 구속조건을 주었고, 3) 밸브 출구측 플랜지 방향이 X축방향이고, 4) 해석의 시간과 노력을 줄이기 위하여 보수적인 해석으로써 faulted condition 하중 조건<sup>8</sup>을 가하고 응력한계 값은 service level A값으로 비교하여 건전성을 입증하였고, 5) Fig. 10과 같이 밸브의 fundamental natural frequency가 33Hz이상이므로 static analysis 방식으로 지진해석을 수행하였다.

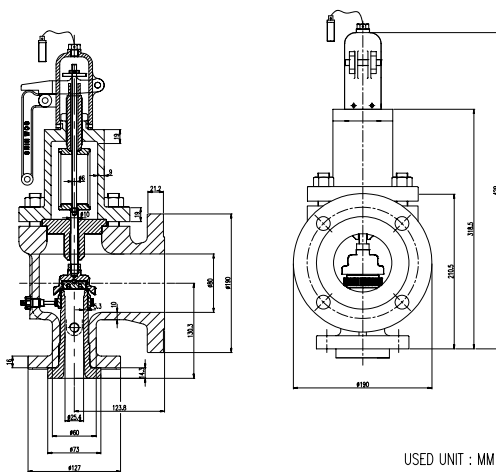


Fig. 8 모델링을 위한 제품의 대략도

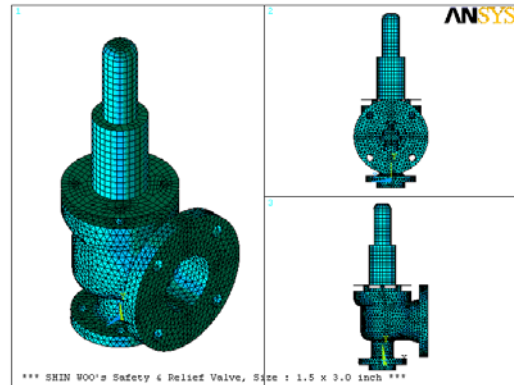


Fig. 9 The finite element mesh

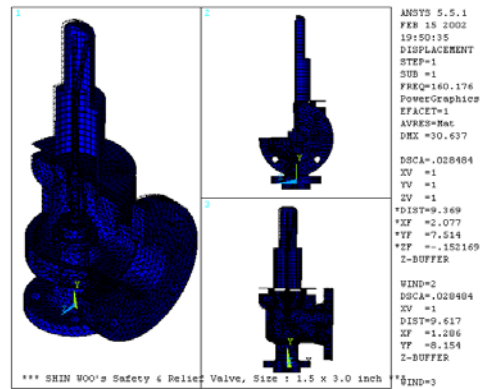


Fig. 10 First Mode Shape

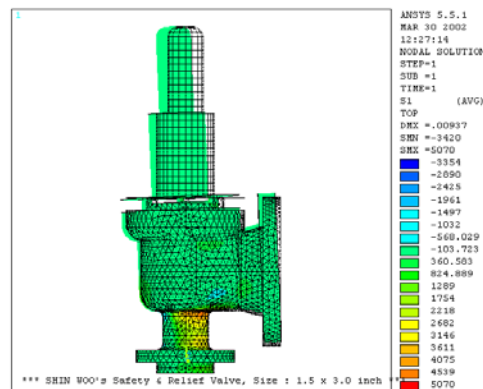


Fig. 11 Static analysis - 응력분포도

해석 결과 전체 밸브의 고유진동수가 33Hz 보다 크다는 것과 계산된 최대응력값이 응력한계 이내에 있으므로 밸브는 지진하중을 포함한 운전하중에 대하여 구조적으로 안전하다는 것을 입증하였고, moving part인 스템의 변형량이 설계 공차 내에 있으므로 밸브의 안전관련 작동성도 해석적으로 입증할 수 있었다.

### 4. 시험

#### 4.1 시험요건

압력용기나 압력계통이 운전 중 노출될 수 있는 최대의 압력을 design pressure(DP)이라 하고, 대개의 경우 이 압력을 최대허용사용압력(Maximum Allowable Working Pressure, MAWP)<sup>6</sup>이라 한다. 안전방출밸브의 set pressure(SP)는 DP or MAWP를 초과할 수 없다.

안전방출밸브는 되단힘 기능을 갖는 장치로서, 밸브의 개방압력을 set pressure라 하고 되단힘압력을 reseal pressure라 하며 set pressure와 reseal pressure의 차를 blowdown pressure라 한다.

Table 3은 ASME Code에서 요구하는 set pressure tolerance을 보여준다.

Blowdown에 대하여 특별한 요건이 없으나 용량인증시험을 할 때 압축성 유체를 사용하는 밸브는 set pressure의 5% 이내로 blowdown 값을 맞추고 용량시험을 해야하는 요건이 있다.

밸브는 작동할 때 chattering이나 fluttering과 같은 불안정한 작동이 없어야 하고 사용유체가 압축성인 밸브는 포핑(popping)하면서 열려야 한다. 작동시험은 3회 이상 수행한다.

안전방출밸브에 대한 누설시험 요건은 API 527<sup>7</sup>을 따른다. API 527에 따라 사용유체가 증기인 경우 누설량 기준은 no visible이고, 물의 경우 밸브의 inlet size가 NPS 1in 이상일 때는 10cc/hr/in of nominal inlet이고, NPS 1in 이하일 때는 10cc/hr이며, 공기인 경우는 fig. 12와 같이 orifice size와 set press.에 따라 누설 허용량이 주어진다.

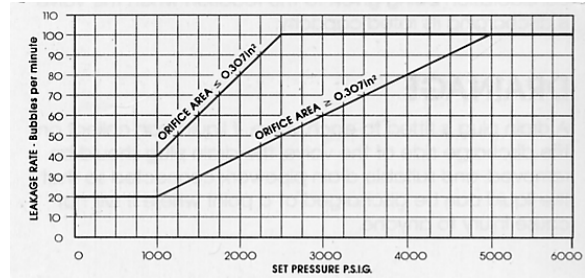


Fig. 12 공기의 누설 허용량

Accumulated pressure<sup>6</sup>는 압력용기에 과압이 작용하여 압력방출장치(밸브)로부터 유체가 배출될 때 design pressure or maximum allowable working pressure 보다 높은 압력을 허용하는 것으로 안전방출밸브는 accumulated pressure(밸브의 측면에서는 overpressure)이내에서 충분한 양의 유체를 배출하여야 하는데, 안전방출밸브는 ASME에서 시험기관으로 인정하는 시험 기관으로부터 밸브에 대한 용량인증시험(capacity certification test)<sup>1</sup>을 수행하고 그 분출량을 인증 받아야 한다.

또한 안전관련기능을 하는 active valve는 tech. spec.의 운전요건에 따라 DBE(design basis event)가 진행 중과 발생 후에도 안전관련 기능을 유지한다는 것을 ASME QME-1<sup>3</sup>에 따라 성능검증시험(functional qualification test)을 통해 입증하여야 한다.

#### 4.2 자체성능시험

본 연구에서는 안전방출밸브의 작동시험과 시트부에서의 누설시험을 수행할 수 있는 시험설비를 자체 제작하여 개발된 밸브에 대한 성능시험을 자체적으로 수행하였다.

Table 3 Set pressure tolerance

| Application        | ALLOWABLE ACCUMULATED PRESSURE | SPECIFIED SET PRESSURE | SET PRESSURE TOLERANCE WITH RESPECT TO SET PRESSURE  |  |
|--------------------|--------------------------------|------------------------|--|--|
|                    |                                |                        | SAFETY   | SAFETY RELIEF  |
| ASME Code Sec. III | 10% above the design pressure  | ≤ DP*                  | ±2psi for pressure up to and including 70<br>±3% for pressure above 70psi up to and including 300psi<br>±10psi for pressure above 70psi up to and including 300psi<br>±1% for pressure above 1000psi | ±2psi for pressure up to and including 70psi<br>±3% for pressure above 70psi |

\* 대부분의 경우 Design Pressure와 Maximum Allowable Working Pressure는 동일함.

다음의 그림들은 자체 제작된 시험설비와 시험 장면을 보여주는 것들이다. 자체성능시험을 통해 밸브의 set pressure와 reseal pressure 그리고 시트 부 누설량을 측정하였고 밸브의 작동성-fluttering, chattering 발생여부-을 확인한 결과 모두 성능요건에 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 13 steam & high press. gas test line



Fig. 14 water test line



Fig. 15 자체성능시험 전경

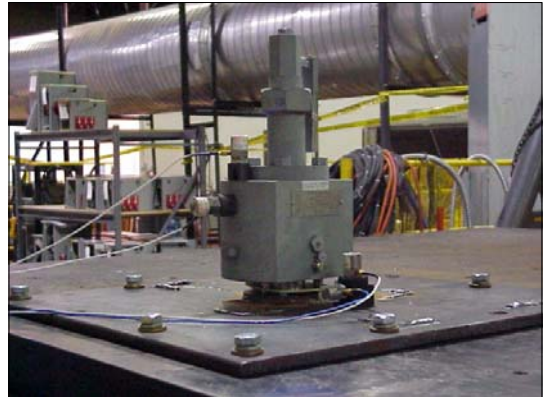


Fig. 16 성능검증시험 전경

#### 4.3 Active valve에 대한 성능검증시험

본 연구에서 active valve(압력방출밸브 3/4" x1" , 진공방출밸브 2" x2" )에 대한 성능검증시험 (functional qualification test)을 ASME QME-1에 따라 미국의 시험기관인 Nuclear Logistics Inc.에서 수행한 결과 모든 운전조건에 대해서 설계된 밸브 성능이 적합하다는 것을 입증하였다.

다음은 성능검증시험 항목과 순서이다.

- i. Group 1
  - Pretest inspection
  - Baseline functional test
- ii. Group 2
  - Fundamental frequency determination (Resonance search test)
  - Seismic test
  - Discharge-pipe and reaction-loading qualification test
  - Combined seismic and loading test
- iii. Group 3
  - Final performance test
  - Post test inspection

#### 4.4 용량인증시험

본 연구에서는 개발된 제품의 분출용량을 측정하기 위하여 ASME에서 지정한 용량인증기관인 NBBI(National Board of Boiler & Pressure Vessel Inspectors)으로부터 성능시험과 용량인증시험을 수행한 결과 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.



Fig. 17 용량인증시험 전경

이상의 시험결과들로부터 안전방출밸브에 대한 성능의 안정성과 구조의 건전성을 입증하였고 앞서 설명하였던 설계와 해석들이 타당함을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 원자력등급용 안전방출밸브를 연구한 결과 다음과 같은 성과를 얻었을 수 있었다.

1. 원자력등급용 안전방출밸브에 관한 ASME B&PV Code 또는 KEPIC Code와 technical spec. 그리고 기타 적용 Code와 Standard.에 부합하는 설계, 제조, 검사, 시험과정을 구축하였다.
2. 전산유동해석기법(CFD : computational fluid dynamics)을 통해 유체의 유동이 디스크에 미치는 힘(양력:lifting force)을 계산하여 스프링 설계에 반영하였다.
3. 유한요소해석프로그램을 이용한 구조해석, modal or seismic analysis를 수행하여 Code와 Spec.의 설계의 타당성을 입증하였다.
4. 시제품들을 제작하고 성능시험설비를 구축하여 자체성능시험한 결과 모두 성능요건에 만족하였다.
5. Active 밸브에 대한 성능검증시험으로부터 안전관련 기능을 증명하였고 ASME의 용량인증 시험 기관으로부터 용량을 인증 받았다.

## 후 기

본 연구는 2000년 12월부터 2002년 6월까지 한 국수력원자력과 협력연구개발과제 수행한 국산화 개발과제로서, 한수원측 관계자 여러분께 감사드

리고, 과제가 종료될 때까지 전 과정을 살피시며 지도해 주신 황종근 박사님께 감사드리며, 신우(주)가 원자력등급용 안전방출밸브 제조자 허가 업체로 지정될 때까지 많은 수고를 아끼지 않으신 대한전기협회 관계자분들께 감사를 표합니다.

## 참고문헌

1. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, 1995 Edition with 1995 through 1997 Addenda.
2. KEPIC MN Code, 1998 Edition with 1998 through 2000 Addenda.
3. ASME QME-1-1994, "Qualification of Active Mechanical Equipment Used in Nuclear Power Plants."
4. ANSI B1.1, "Unified Inch Screw Threads (UN and UNR Thread Form)", 1982 Edition
5. ANSI B16.34, "Valve-Flanged, Threaded, and Welding End", 1995 Edition
6. API Recommended Practice 520, "Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refiners", 1993
7. API Standard 527, "Seat Tightness of Pressure Relief Valves", 1991
8. KEPCO Design Specification 9-184-J237, Revision 0
9. ANSYS, "Ansys User's Manual for Revision 5.5.1" Swanson Analysis System Inc.