

원전용 솔레노이드 밸브의 기기검증 절차 및 방법[§]

임병주* · 박창대* · 정경열*[†]

* 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

Procedure and Method of Equipment Qualification for Solenoid-Operated Valves Used in Nuclear Power Plants

Byung-Ju Lim*, Chang-Dae Park* and Kyung-Yul Chung*[†]

* Energy Plant Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received December 10, 2010 ; Revised March 23, 2011 ; Accepted March 24, 2011)

Key Words: Solenoid Operated Valve(솔레노이드 밸브), Equipment Qualification(기기검증), Power Operated Valve(동력구동밸브), Nuclear Power Plant(원자력발전소)

초록: 원자력발전소 용 솔레노이드 밸브의 국산화에 필수 과정인 기기검증 기술을 개발하기 위해 관련 규정을 분석하고, 시험절차 및 방법, 시험조건, 시험장치 및 허용기준 등을 구체화하였다. 솔레노이드 밸브의 기기검증 규격은 법규, 가이드, 규정 등의 순으로 계층화되어 있으며, 시험기와 시험항목에 따라 규정이 세분화되어 있다. 세부 규정인 IEEE를 분석한 결과 기기검증 시험은 크게 기능시험, 일반환경시험 및 사고시험으로 구분되어 있는데, 일반환경시험과 사고시험을 통해 발전소 환경과 동일한 조건에서 솔레노이드 밸브를 노화시킨 후 기능시험에서 노화된 밸브의 성능을 확인하는 방식으로 검증시험을 수행하도록 구성되어 있었다. 본 논문에서 제시한 솔레노이드 밸브의 기기검증 시험절차와 방법은 기기검증 수행자뿐만 아니라 밸브 제조사에게 매우 유용한 기술 자료가 될 것으로 판단된다.

Abstract: In order to develop technology for an equipment qualification (EQ) test, which is an important process in localizing solenoid-operated valves used in nuclear power plants, we analyzed related regulations, test procedures, conditions, equipment, and acceptance criteria. EQ regulations for the solenoid-operated valve are classified as law, guide, and standard, and are subdivided according to test specimens and contents. The EQ test is composed of functional, normal-, and accident- condition tests. The solenoid-operated valve is aged under normal and accident conditions, which are predicted in the design conditions of a nuclear power plant, and the performance of the valve is measured by a functional test. The test method and procedure analyzed in this paper might be very useful for manufacturers as well as EQ testers.

- 기호설명 -

- R : 재료의 화학반응률(#/s)
- A : pre-exponential 상수
- E_a : 활성화에너지(J)
- k : 볼츠만 상수(J/K#)
- T : 반응온도(K)
- t : 반응시간(s)

하첨자

- 0 : 일반환경조건
- 1 : 가속환경조건

1. 서론

원자력발전소에서 사용하는 모든 기기는 예상되는 최악의 환경조건 하에서도 발전소 설계수명 동안 요구되는 안전기능을 원활히 수행할 수 있는지를 확인하는 과정이 필요하며 이를 기기검증(Equipment Qualification, EQ)이라 한다. 기기검증 관련 규제요건은 원자력규제위원회에서 제시한 ‘10 CFR 50 Appendix A, 일반 설계기준’을 토대

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, kychung@kimm.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 점차 수정 및 보완되어 왔으며, 현재는 규제 지침인 Regulatory Guide와 검증 절차 및 방법을 제시한 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) 규정에서 기기검증에 대한 규제사항을 다루고 있다. 따라서 원자력발전소용 기기를 개발하거나 검증시험을 수행하기 위해서는 해당 기기에 대한 법, 지침 및 규정을 잘 분석하고 이해하는 과정이 필요하다. 그러나 가장 상세하게 기술된 규정에서 조차 검증요건이나 시험항목 등 일반적 기술 요건을 제시할 뿐 구체적인 시험장치, 시험방안, 기법, 허용기준 등에 대해서는 상세하게 기술되지 않아 검증기관에서 실제 기기검증을 수행하기 위해서는 대상기기 별 기기검증 기술 개발 및 경험이 반드시 필요하다.

국내의 기기검증은 2005년도 이전까지 시험 설비 구축 및 기술개발이 이루어지지 않아 대부분 외국에서 기기검증을 수행하였으나, 정부의 지원을 통해 검증 설비 구축 및 기술개발이 진행되어 현재 한국기계연구원 등 3개 정부 기관에서 기기검증을 수행할 수 있게 되었다. 이에 따라 RTD, 도장재, 케이블, 리미트스위치,⁽¹⁾ 동력구동밸브⁽²⁾(Power Operated Valve, POV), 모터⁽³⁻⁶⁾ 등 다양한 기기에 대한 검증 기술과 시험경험을 습득하게 되었지만, 아직도 일부 기기에 대해서는 기기검증 기술 개발이 이루어 지지 않고 있다.

POV는 크게 공기구동밸브(Air Operated Valve, AOV), 모터구동밸브(Moter Operated Valve, MOV), 솔레노이드 밸브(Solenoid Operated Valve, SOV)로 구분되는데 이중 Fig. 1과 같은 솔레노이드 밸브의 경우 아직도 국산화되지 않아 ASCO와 같은 국외 업체에서 수입에 의존하고 있다. 또한 국내 업체에서 원전용 솔레노이드 밸브에 대한 개발이 이루어 지지 않아 기기검증 수요가 전무하여 검증 기술과 경험이 부족한 상황이다.

솔레노이드 밸브는 전자석의 힘을 이용하여 플런저를 움직이는 변환 밸브로서 전기신호로 작동되기 때문에 산업기계의 자동화에 가장 많이 사용되고 있다.⁽⁷⁾ 솔레노이드 밸브는 모터 및 공기구동 밸브에 비해 상대적으로 간단하고 고장이 없어 일반 산업뿐만 아니라 원자력발전소에서도 주요 계통 제어에 필요한 필수 기기이다. 향후 신규원전 건설과 2년 주기 교체 수요를 감안하면 원전용 솔레노이드 밸브에 대한 국산화 개발 노력이 절실하며, 이에 따른 기기검증 기술을 개발

해야 한다.

따라서 본 논문에서는 원전용 솔레노이드 밸브의 국산화 개발과정에 필수요건인 기기검증 기술을 개발하기 위해 관련 검증 규정과 시험절차를 면밀히 분석 정리하고, 상세한 시험항목, 조건 및 허용기준 등을 구체화하여 제시하고자 한다.

2. 기기검증 시험규정 분석

솔레노이드 밸브의 기기검증 시험은 원자력규제위원회의 CFR code와 Regulatory Guide, 전기전자기술자협회의 IEEE 등에서 다양한 법규, 지침, 규정 등을 제시하고 있는데 주요한 것들을 정리하면 Table 1과 같다. 기기검증의 가장 상위 개념의 법적 근거는 10 CFR 50.49로서 안전성 관련 전기 및 계측기기의 기기검증 프로그램에 대해 기술하고 있다.⁽⁸⁾ 본 법규의 내용을 뒷받침하는 Reg. 1.73, Reg 1.1 등의 지침이 있으며, 검증 대상 및 검증 시험 항목별로 세분화하여 기술한 IEEE 규정이 있다. IEEE Std 323의 경우 모든 안전등급 전기기기에 대한 기기검증 항목 및 요건

Table 1 Main code and standards for EQ of solenoid valve

Codes and Standards	Contents
10CFR50.49	A legal basis of EQ
REG. 1.73	Requirement of Valve EQ
REG. 1.1	Requirement of Seismic Qualification
IEEE Std 323-2003	Mother Standard of EQ
IEEE Std 382-2006	EQ of POV



(a) NP8316 (b) NP8320
Fig. 1 Solenoid Valve of ASCO Corp.

에 대해 제시하고 있어 IEEE 규정의 중에서도 가장 상위 개념으로 기기검증의 목적, 대상, 시험계획, 문서작성법 등이 기술되어 있다.⁽⁹⁾ 솔레노이드 밸브 기기검증에 대해 가장 구체적이고 명확한 내용을 제시한 규정은 IEEE Std 382로 시험항목, 시험내용, 시험절차 등을 제시한다.⁽¹⁰⁾ 따라서 솔레노이드 밸브 기기검증 시험의 대표 규정은 IEEE Std 323과 382라고 볼 수 있다.

IEEE Std 382 규정의 다양한 시험항목들은 IEEE의 다른 규정에 구체적인 내용과 방법을 제시하고 있다. Table 2와 같이 온도시험 관련 규정은 IEEE Std 1, 101, 775, 1205, 1310 등에, 사고시험 중 내진검증 시험에 대한 규정은 IEEE Std 344, 전압 및 절연시험에 대한 규정은 IEEE Std 4, 43, 가속열노화에 대한 규정은 IEEE Std 1407에 기술되어 있다.

3. 기기검증 시험절차 및 방법

기기검증 시험은 크게 기능시험, 일반환경시험, 사고환경시험으로 구분한다. 검증 대상기기에 따라 일반환경시험과 사고환경시험은 시험 항목이 대부분 서로 비슷하지만 기능시험의 경우 각 기기별로 차이가 있다. 기능시험은 대상기기가 검증시험 동안 허용기준에 적합한 성능을 유지하고 있는지를 판단하기 위해 실시한다. 기능시험은 각 환경시험 전후에 실시하며 가속열노화시험, 진동노화시험 및 사고환경시험의 경우 시험 수행중에도 실시한다.⁽¹⁰⁾ 일반환경시험은 원전 내에 대상기기가 설치되는 위치에서 설계수명 동안의 밸브가 노화되는 동일한 환경조건을 부여하는

시험으로 방사선, 열, 압력, 진동 등의 노화환경에서도 성능이 잘 유지하는지 확인한다. 사고환경시험은 설계수명이 완료된 시점에서 사고가 발생하더라도 기기가 안전성을 유지하는지를 확인하는 시험으로, 내진 및 설계기준사고(Design Basis Event, DBE) 등이 있다. 솔레노이드 밸브의 기기검증 절차에 대해 Fig. 2에 도식화하여 제시하였다.

3.1 기능시험

기기검증 대상이 되는 전기 기기별로 고유 기능과 성능변수가 다르기 때문에 기기 성능 측정을 위한 기능시험의 시험 항목은 서로 다르다. Table 3에 기기검증 대상기기 별 주요 IEEE 기준과 기능시험 항목을 제시하였다. 솔레노이드 밸브의 경우 IEEE Std 382에서는 기능시험 항목으로 작동전압시험, 작동압력시험, 누설시험, 반응속도시험 등 네 가지를 제시한다. 작동전압시험과 작동압력시험은 각 환경시험 전후 반복해서 수행하지만 누설시험과 반응속도시험은 기기검증 시험 전 그리고 시험 후 두 번 수행해도 무방하다.⁽¹⁰⁾ 각 기능시험 항목별 구체적인 시험내용과 장치는 다음 항에서 자세히 기술하였다.

3.1.1 작동전압시험

작동전압시험은 특정압력에서 솔레노이드부의 플런저가 움직이기 시작할 때 그리고 플런저가 다시 닫힐 때의 전압을 측정하는 시험이다. 전자의 경우 취출전압(Pull-in Voltage)시험, 후자의 경

Table 2 Sub-standards for EQ of solenoid valve

Standards	Contents
IEEE Std 1	Temperature testing
IEEE Std 4	High-voltage testing
IEEE Std 43	Insulation resistance testing
IEEE Std 101	Thermal life test
IEEE Std 344	Seismic Qualification
IEEE Std 775	Multi-stress aging test
IEEE Std 1205	Thermal aging testing
IEEE Std 1310	Thermal cycle testing
IEEE Std 1407	Accelerated aging test

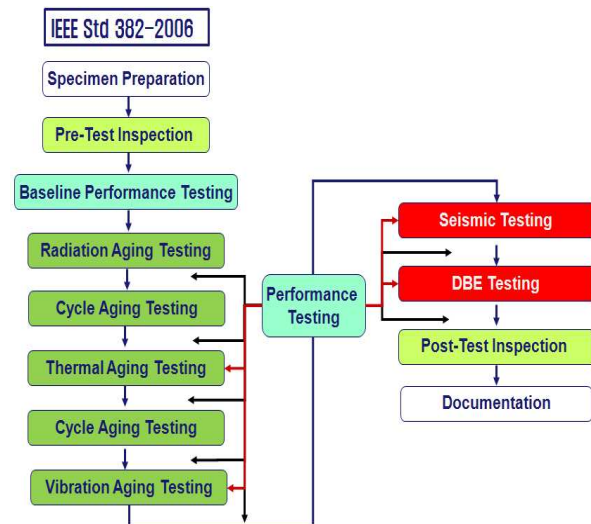


Fig. 2 EQ test procedure

Table 3 Functional test contents of EQ equipment

Equipment	IEEE Standard No.	Functional Test
POV	SOV	<ul style="list-style-type: none"> • Operating time test • Operating voltage test • Operating pressure test • Leakage test
	AOV & MO V	<ul style="list-style-type: none"> • Output speed test • Operating time test • Output torque or thrust characteristics test • Seat leakage test
Motor	43, 112, 117, 334	<ul style="list-style-type: none"> • Insulation resistance test • Winding resistance test • No load test • Temperature test
Cable	383	<ul style="list-style-type: none"> • Insulation resistance test • Dielectric strength test
Limit Switch	572	<ul style="list-style-type: none"> • Insulation resistance test • Dielectric strength test • Conductor continuity test

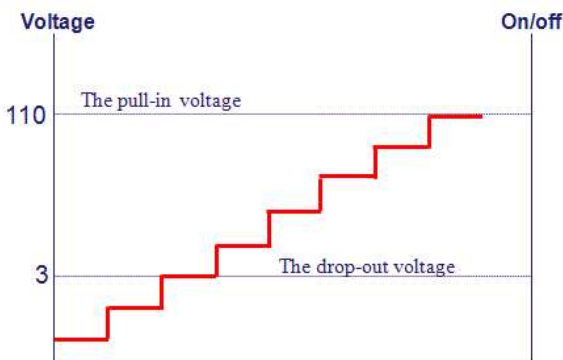


Fig. 3 DC operation voltage test

우 낙하전압(Drop-out Voltage)시험이라 한다. 취출전압시험은 최대 작동압력 조건에서 플런저가 움직이는 최소 전압을 측정한다. 낙하전압시험은 밸브의 최대 차압과 무압력 조건에서 최대 전압을 측정한다. 직류전압을 사용하는 솔레노이드 밸브 기기의 경우 시험 시 Fig. 3에서 제시한 바와 같이 단계적으로 전압을 올리거나 낮추면서 플런저가 움직이는 압력을 측정한다.

3.1.2 작동압력시험

작동압력시험은 정격전압이 인가된 상태에서

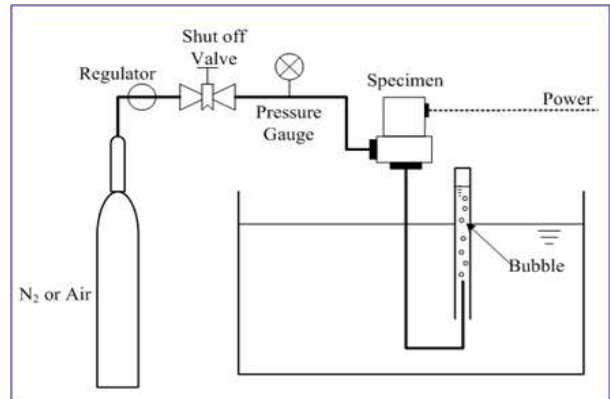


Fig. 4 Schematic of internal leakage test equipment

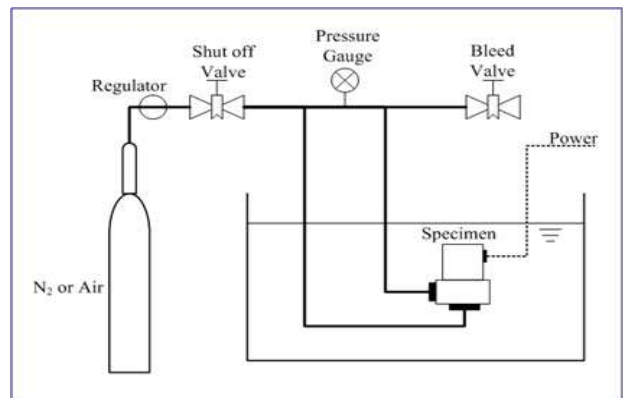


Fig. 5 Schematic of external leakage test equipment

솔레노이드 밸브가 작동할 수 있는 최소 압력을 측정하는 시험이다. 시험방법은 작동전압시험과 유사하며 압력을 단계적으로 변화시키면서 플런저가 움직이기 시작하는 압력을 측정한다.

3.1.3 누설시험

누설시험은 밸브의 기밀성을 확인하는 시험으로 시트의 누설을 확인하는 내부 누설시험과 밸브 본체의 누설을 확인하는 외부 누설시험이 있다. 내부 누설시험은 Fig. 4와 같이 출구측 배관을 수조의 물에 잠기도록 설치하고 입구측에 질소나 공기로 일정압력을 인가하여, 출구측 배관에서 공기방울이 발생하는지를 조사한다. 외부누설시험은 Fig. 5와 같이 솔레노이드 본체를 물속에 넣고 내부에 정격압력의 1.5배를 인가하여 본체 외부에서 공기방울이 발생하는지를 확인한다. 누설량을 정확히 측정하기 위해 공기나 질소 대신 헬륨을 사용하여 가스 누설 탐지기로 누설을 측정하는 방법을 사용하기도 한다.

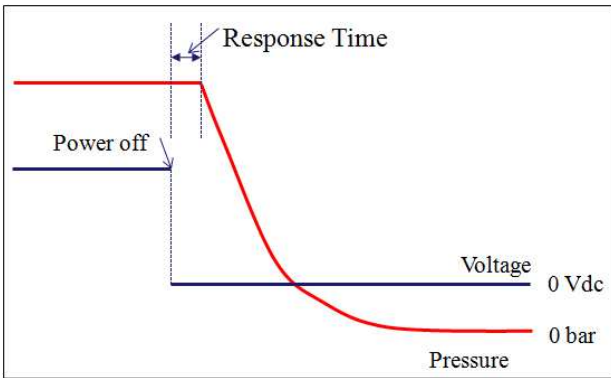


Fig. 6 Graph for response time

3.1.4 반응속도시험

솔레노이드 밸브의 반응속도란 Fig. 6과 같이 솔레노이드 밸브에 전원 공급을 중단했을 때의 시간과 밸브 내 압력이 감소하기 시작하는 시간과의 차이를 의미한다. 반응속도는 직류 전압보다 교류 전압을 사용하는 밸브가 약 2배 정도 빠르다. 일반적으로 솔레노이드 밸브의 반응속도는 수 내지 수십 ms정도이므로 본 시험을 위해서는 정밀한 위치센서와 고속으로 시험 데이터를 수집하고 저장 가능한 기기가 필요하다. 앞에서 언급한바와 같이본 시험은 누설시험과 함께 기기검증 시험 전후에 두 번만 수행한다.

3.1.5 추가 기능시험-절연특성시험

솔레노이드 밸브는 전기기기이므로 기능시험 항목으로 IEEE Std 382에서 제시한 네 가지 시험 외에도 절연특성을 측정하는 항목은 반드시 포함되어야 한다. 솔레노이드 밸브는 코일의 전기적 절연 특성이 성능에 직접적으로 영향이 있으므로 매우 중요한 환경변수이다. 모터의 기기검증 시험에서는 기능시험 항목으로 코일의 절연특성시험이 포함되어 있다.⁽¹¹⁾

절연특성시험의 항목으로 내전압시험과 절연저항시험이 있다. 내전압시험은 전원케이블과 밸브 본체 간에 1분간 2500 Vac의 고전압을 인가하여 누설전류가 있는지를 확인하며, 절연저항시험은 같은 위치에서 저항이 정해진 값 이상을 유지하는지 확인한다.⁽¹²⁾ 일반적으로 500 Vdc 이상의 전압을 인가하여 1 GΩ이상의 저항 값이 나왔을 때 이상이 없는 것으로 판정한다.

3.2 일반환경시험

솔레노이드 밸브의 기능시험을 최초로 한번 수

행한 후 일반환경시험을 수행한다. 일반환경시험은 가속열노화시험, 방사선노화시험, 주기적작동시험, 진동노화시험 등이 있으며 각 시험전후에 기능시험을 수행한다. 일반환경시험에 대한 구체적인 시험내용과 절차를 다음 항에 자세히 기술하였다.

3.2.1 가속열노화시험

가속열노화시험은 솔레노이드 밸브가 발전소 설계수명 만큼 열적으로 노화되는 동안 안전기능을 제대로 수행하는지를 확인하는 시험이다. 발전소별 설계수명은 고리 1호기, 월성 원전의 경우 30년 그리고 고리 2,3,4 호기, 영광, 울진 및 신고리 원전의 경우 40년 이다. 그러나 실제 열적 노화시험을 위해 30년 또는 40년에 달하는 긴 설계수명 동안의 시험을 수행할 수 없기 때문에 재료의 반응속도와 온도, 활성화에너지 간의 관계를 나타내는 아레니우스 공식을 사용하여 시험 시간을 단축한다.⁽¹³⁾

$$R = Ae^{\left(-\frac{E_a}{kT}\right)} \quad (1)$$

식 (1)은 아레니우스 공식을 나타내는 것으로 재료의 반응속도는 재료의 온도가 높을수록, 활성화에너지가 낮을수록 높아짐을 알 수 있다. 이 식에서 양변에 역수를 취하면 좌변의 반응속도는 반응시간이 되고, 이를 로그를 취하면,

$$\ln t = \frac{E_a}{kT} - \ln A \quad (2)$$

와 같이 되며, 식 (2)를 일반환경조건과 가속환경 조건과의 관계로 변형하여 나타내면,

$$\ln \frac{t_1}{t_0} = \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (3)$$

이 된다. 일반환경온도(T_0) 값은 발전소의 환경 온도에서 솔레노이드 밸브의 발열로 인한 온도상승분을 더한 값을 사용한다. 발전소의 일반환경 온도 조건은 기기가 설치되는 각 구역별로 이미 설정되어 있기 때문에 시험시 가속할 온도(T_1)와 시간(t_1)을 정할 수 있다.

활성화에너지는 재료의 고유 값으로 기존에 구축되어 있는 데이터베이스나 UTM, TGA와 같은 실험을 통해 얻을 수 있다.⁽¹⁴⁾ 활성화에너지 값은 솔레노이드 밸브에 사용된 모든 비금속재료의 활성화에너지 값을 조사하여 가장 작은 값을 사용

하여야 한다. 그 이유는 활성화에너지 값이 작을수록 가속노화시간은 더 길어지는데 신뢰성을 중요시하는 원자력발전소에서는 가장 보수적인 환경에서 기기검증 실험을 요구하기 때문이다.

가속환경 시험시간과 온도는 시험자가 유연하게 조정할 수 있다. 시험온도를 높일수록 시험시간은 짧아지지만 솔레노이드 밸브 내 모든 비금속재료의 녹는점보다 낮은 온도에서 시험해야 하며, IEEE 323 규정에서는 가속열노화시험을 100시간 이상⁹⁾ 수행하도록 요구하고 있으므로 시험조건 계산 시 두 가지 사항에 유의해야 한다.

3.2.2 방사선노화시험

방사선노화시험은 원전 설계수명인 40년 동안의 일반환경조건의 방사선 조사량과 사고환경에서 노출되는 조사량에 해당하는 방사선량을 솔레노이드 밸브에 조사시키는 시험이다. 방사선 조사선원으로는 감마선을 방출하는 Co-60을 사용한다. 신고리 원전용 솔레노이드 밸브의 경우 방사선조사량은 약 2×10^6 Gy이며, 발전소의 설치 위치별로 조사량은 조금씩 차이가 있다. 같은 방사선 조사량일지라도 방사선조사율이 낮을수록 비금속재료의 노화는 더 심해지므로 IEEE Std 383에는 방사선조사율을 10^4 Gy/h 이하로 규정하고 있다.¹⁵⁾

3.2.3 주기적작동시험

주기적작동시험은 솔레노이드 밸브가 40년 동안 예상되는 작동횟수 만큼을 가속열노화시험 전후 두 번에 걸쳐 수행하는 시험이다. 각 시험 시 총 작동 횟수의 반을 작동 시험한다. 작동시험시 솔레노이드 밸브는 정격 압력을 인가한 상태로 반복 동작시킨다. 주기적작동시험에 대한 장치개략도를 Fig. 7에 제시하였다.

3.2.4 진동노화시험

플랜트 설비의 경우 회전 기기류 및 유체에 의한 진동이 발생하기 때문에 발전소가 운전되는 동안 진동 환경에 노출된다. 진동노화시험은 진동대에 설치하고 일정한 진동 조건에서 기기가 성능을 유지하는지를 확인한다. 진동 시험조건은 각 축당 0.75 g 가속도에서 90분간 시험한다. 진동 주파수는 2 Octave/min 씩 5 Hz에서 100 Hz까지 증가시킨 후 다시 100 Hz에서 5 Hz로 감소시

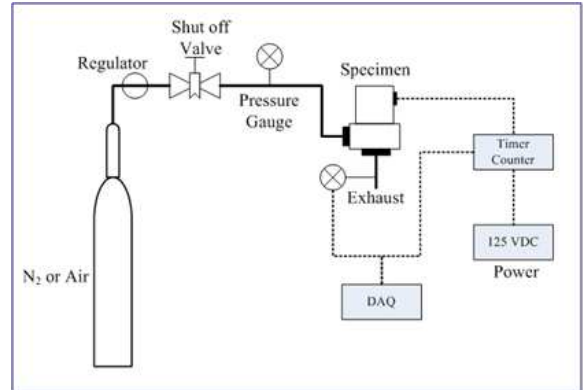


Fig. 7 Cycle aging test schematic

킨다.

3.3 사고환경시험

3.3.1 내진시험

내진시험은 크게 작동기준지진시험과 안전정지 지진시험 두 가지로 구분한다. 작동기준지진시험은 지진이 발생하더라도 모든 기기가 안전 기능을 유지하면서 작동할 수 있어야 하며, 안전정지 지진 시험은 발전소가 안전하게 정지할 때까지 기기가 작동하여야 한다. 내진시험은 작동기준지진 시험 5회와 안정정지지진 시험 1회를 수행한다.

작동기준지진시험은 발전소 설계시 요구되는 내진가속도 조건의 2/3 수준에서 진동실험을 수행한다. 시험시 주파수는 각 축당 1 Octave/min 씩 2 Hz에서 35 Hz까지 상승시킨 후 35 Hz에서 21 Hz로 다시 감소시킨다.

안전정지지진시험은 배관에 장착되는 배관장착기기와 구조물에서 장착되는 설비장착기기로 시험 항목이 구분된다. 배관장착기기의 경우 단일 주파수에서 15초 이상 사인 진동파를 시편에 인가하는데, 주파수는 2 Hz 에서 32 Hz 까지 1/3 Octave/min씩 증가시키면서 실험한다. 설비장착기기의 경우 반드시 양축 또는 3축에 진동을 인가하는 복합주파수 실험을 수행해야한다. 양축 시험을 할 때는 X-Y, Y-Z, Z-X 방향으로 3번을 시험해야 한다. 시험 프로파일은 발전소에서 제공되는 환경 프로파일을 적용하며 시험시간은 30초 이상 유지한다. 솔레노이드 밸브의 경우 배관장착기기이지만 다양한 적용성을 고려하여 둘 다 수행하는 것이 좋다.

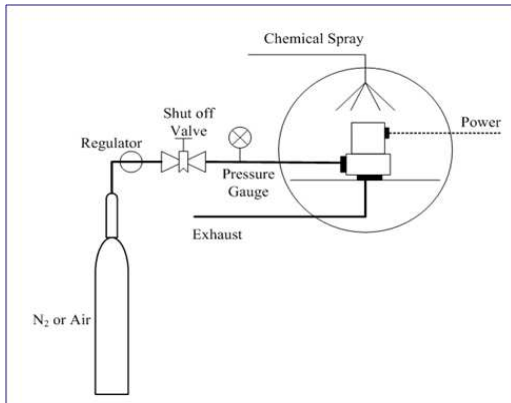


Fig. 8 Schematic for operating test during Loss of Coolant Accident test

3.3.2 설계기준사고시험

설계기준사고시험은 냉각재상실사고 시험, 고에너지관파단 시험, 주증기관파단 시험으로 구분하는데, 기기검증 전체 시험항목 중 가장 열악한 환경조건이 바로 냉각재상실사고 시험이다. 이 시험은 고온, 고압의 냉각수가 격납건물 내에서 누출되었을 때의 사고를 가정하여 동일한 사고환경조건을 시험에 인가하는 시험이다. 우선 냉각수가 누출되면 격납건물은 고온/고압의 증기로 꽉 차게 되는데, 증기의 에너지를 낮추고 방사선량을 줄이기 위해 격납건물 상부에 부착된 노즐에서 화학용액을 분무한다. 따라서 설계기준사고 시험 중 솔레노이드 밸브는 고온/고압의 증기 환경과 화학용액이 분무되는 환경 조건에 놓인다. 관련 시험설비의 개략도는 Fig. 8에 제시하였다. 신고리 원자력발전소의 경우 냉각재상실사고의 환경 프로파일은 Fig. 9와 같다.

냉각재상실사고 시험 중 온도와 압력 환경조건이 가장 높을 때 솔레노이드 밸브의 기능시험을 수행하고 그 후 시험이 끝날 때 까지 주기적으로 계속 기능시험을 수행한다. 시험 시 시편이 시험 챔버 내에 위치하고 있기 때문에 기능시험은 작동성 시험으로 대체된다. 작동성 시험은 Fig. 8과 같이 솔레노이드 밸브의 전원 케이블과 배관을 챔버 외부로 연결하여 밸브에 전원과 압력을 인가하였을 때 솔레노이드 밸브가 정상적으로 동작하는지를 확인하는 것이다.

냉각재상실사고 시험시 화학용액 분무는 온도와 압력이 최고점에 도달했을 때 시작한다. 신고리 원전 기준으로 화학용액 분무 시작 후 4시간

Table 4 Acceptance Criteria contents of direct acting SOV

Test contents		Acceptance Criteria
Leakage Test	External @ 1.5 times	pass
	Internal @ rated pressure	pass
DC operating voltage test	Pull-in voltage test @ maximum specified operating pressure drop	< 3 Vdc
	Drop-out voltage test @ maximum specified differential pressure and zero pressure	> 110 Vdc
Dielectric Strength test		Pass
Insulation Resistance test		> 10 ⁹ Ω
Response Time Test		< 10 msec

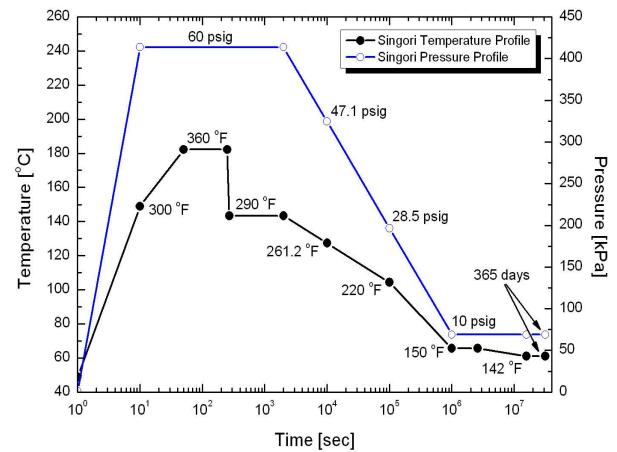


Fig. 9 Loss of Coolant Accident test profile

이 경과할 때까지 화학용액의 산도를 4~10 범위로 조정하는데 보론 4,400 ppm에 해당하는 H₃BO₃와 N₂H₄ 혼합용액을 이용한다. 4시간 이후에는 H₃BO₃ 용액에 알칼리성인 TSP를 첨가하여 산도를 7~8.5로 유지한다. 화학용액 분무 유량은 고리의 경우 14.25 l/(min · m²), 영광 및 울진의 경우 25.27 l/(min · m²), 신고리의 경우 25.59 l/(min · m²)이다.⁽¹⁶⁾

4. 허용기준

허용기준은 기기시험에서 기기가 검증되었는지 여부를 판정하는 기준으로 모든 시험 종료 후 기

기의 성능이 허용기준을 모두 만족하면 검증되었다고 볼 수 있다. 따라서 기기검증 시험 계획시 기기의 성능 적합성을 판별하는 근거가 되는 허용기준을 정하여 시험 완료 후 모든 기능시험 데이터와 비교한다. 허용기준은 일반적으로 기기검증 시험 최초 수행한 기능시험 데이터 값과의 차이 또는 특정 한계치를 근거로 정량적으로 비교하는데, 솔레노이드 밸브의 경우 누설시험과 내전압시험은 이상 여부, 작동전압시험, 절연저항시험 그리고 반응속도 시험은 한계치로 허용기준이 정해진다. Table 4에 ASCO에서 개발한 125 Vdc 솔레노이드 밸브의 기기검증 결과보고서⁽¹⁷⁾에 기록된 허용기준 항목과 그 값을 제시하였다.

허용기준은 대상 각 원자력발전소에서 요구하는 솔레노이드 밸브의 사양, 제조사에서 개발한 제품사양에 따라 바뀌게 된다.

5. 결 론

본 연구를 통해 원자력발전소용 솔레노이드 밸브의 기기검증에 대한 시험규정 및 절차를 분석하고, 각 시험항목에 대한 상세 수행내용과 방법 그리고 시험장비 등을 구체화하였다.

솔레노이드 밸브에 대한 기기검증 규격은 법규, 가이드, 규정 순으로 계층적으로 분류되어 있으며, 시험기와 시험항목에 따라 시험규정이 세분화되어 있었다. 기기검증 법규와 가이드는 원자력규제위원회의 CFR code와 Regulatory Guide 그리고 규정은 전기전자기술자협회의 IEEE에 제시되어 있다. 솔레노이드 밸브에 대한 주요 관련 규정은 IEEE Std 323과 382이지만 두 규정에서 제시된 온도시험, 내진검증시험, 전압 및 절연시험, 가속열노화시험 등은 다른 IEEE 규정에서 더 상세히 기술되어 있었다. 따라서 주요규정과 시험항목에 대한 세부기준을 함께 고려하여 검증시험에 적용해야 한다.

기기검증 시험의 항목은 크게 기능시험, 일반환경시험, 사고환경시험으로 구분되어 있다. 일반환경시험과 사고환경시험은 기기별 공통으로 적용되지만 기능시험은 기기의 기능과 성능특성에 따라 기능시험 항목에 차이가 있다. 솔레노이드 밸브의 경우 IEEE Std 382에서 기능시험으로 작동전압시험, 작동압력시험, 누설시험, 반응속도시험 등 네 가지 항목을 제시하였으며, 추가적으로

코일의 전열능력을 평가하는 절연특성시험이 포함된다. 일반환경시험에서는 가속열노화시험, 방사선노화시험, 주기적작동시험, 진동노화시험을 수행하고, 사고환경시험은 설계기준사고 시험과 내진검증시험을 수행한다. 기기검증 시험 완료 후 기기가 검증되었가는 기기의 성능이 허용기준을 만족했는지 여부로 판단한다.

솔레노이드 밸브 제조사의 경우 기기검증 시험 항목과 조건을 고려하여 개발시 부품과 재료를 선정하여 설계하며, 기기검증 시험기관의 경우 규정된 시험항목과 조건에 따라 검증시험을 수행한 절차와 내용이 규제기관에서 통과되어야 한다. 따라서 본 연구를 통해 분석한 솔레노이드 밸브 기기검증에 대한 기술은 국산화 개발을 위해 매우 유용한 기술 자료로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 2010T100100537)

참고문헌

- (1) Lim, B. J., Park, C. D. and Chung, K. Y., 2010, "Study for Environmental Performance test of Limit Switch," *The Korean Society of Marine Engineering*, pp. 205~206.
- (2) Kim, Y. B., Kwon, K. J., Yoon, I. S., Choi, J. K., Hwang, J. H., Son, K. C. and Kim, S. Y., 2009, "Equipment Qualification of Air Operated Valve Actuator for Nuclear Power Plants," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 1140~1144.
- (3) Ko, W. S., Kim, J., Hur, I. G. and Choi, B. W., 2000, "Equipment Qualification of a Safety-related Large Induction Motor for Nuclear Power Plants," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol 2. pp. 103~112.
- (4) Kim, J., Lee, I. W., Hur, I. G. and Choi, B. W., 2001, "Equipment Qualification of Class 1E Safety-Related Random Wound NEMA Electric Motor for Nuclear Power Plants," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 63~66.

- (5) Lee, H. W., Ko, W. S., Ryu, J. H. and Park, N. G., 2005, "Equipment Qualification of a Safety-related Large Induction Motor for Nuclear power Plants," *Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24(195), pp. 72~77.
- (6) Kim, J., Lee, I. W., Oh, Y. J. and Choi, W. H. 2005, "Equipment Qualification of Class 1E Safety-Related Form Wound Electric Motor for Harsh Zone of Nuclear Power Plants," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 13~16.
- (7) Technical Report, 2009, "Technical Report of Solenoid Valve."
- (8) 10 CFR 50.49, "Environmental Qualification of Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants," *Nuclear Regulatory Commission*
- (9) IEEE Std 323, 2003, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations."
- (10) IEEE Std 382, 2006, "Qualification of Actuators for Power-Operated Valve Assemblies with Safety-Related Functions for Nuclear Power Plants."
- (11) IEEE Std 334, 2006, "IEEE Standard for Qualifying Continuous Duty Class 1E Motors for Nuclear Power Generating Stations."
- (12) IEEE Std 43, 2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery."
- (13) Park, C. D., Lim, B. J. and Song, C. S., 2006, "Methodology for Modification of LOCA Environmental Test Profile," *NTHAS5*.
- (14) Lim, B. J., Song, C. S., Park C. D., KIM S. Y., Roh, H. B. and Lee, H. S., 2005 "LOCA Test of Class 1E Cables Using Modified LOCA Profile," *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*.
- (15) IEEE Std 383, 1974, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations."
- (16) Song, C. S., Park, C. D., Song, C. H. and Lim, B. J., 2008, "Equipment Qualification Program for Limit Switch with Electric Conductor Sealing Assembly Manufactured by Yongsung Electric Co., Ltd.," *EQ Test Program KIMM-QP08-04*.
- (17) Shank, J. R., "Report on Qualification of Automatic Switch Co.(ASCO) Catalog NP-1 Solenoid Valves for Safety-Related Applications in Nuclear Power Generating Stations," *Test Report No. AQR-67368*.