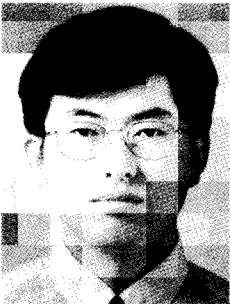


KIMM의 원자력 발전소 냉각재 상실사고 성능시험장치 현황(I)



김 재 형

(KIMM 환경설비연구부)

- '89 - '93 한국과학기술원 기계공학과(학사)
- '93 - '95 포항공과대학교 기계공학과(석사)
- '95 - 현재 한국기계연구원 연구원



김 유 창

(KIMM 환경설비연구부)

- '90 - '95 연세대학교 환경과학과(학사)
- '95 - '97 광주과학기술원 환경공학과(석사)
- '97 - 현재 한국기계연구원 연구원

1. 서 론

원자력 발전소 냉각재 상실사고(LOCA) 성능 시험은 원자력 발전소 냉각재 상실사고로 인한 설계기준사고의 환경조건에서 수행되는 기기성능 검증시험을 뜻한다. 이때의 환경조건이라 함은 압력, 온도, 습도, 화학물질 살수(Chemical Spray), 방사선 노출량 등을 말한다. 전형적인 시험이력곡선(Test Profile)은 IEEE Std. 323에 명시되어 있는데 각각의 장비에 따라 다르다. 실제 검증시험에서는 보수적인 관점에서 가혹한 조건에서 시험이 수행된다. 검증시험중에 시험품은 고온의 수증기 및 가스와 화학용액 살수에 노출된다. 아울러 시험중에서는 시험품의 성능을 실시간으로 조사해야 하며 시험이력곡선을 만족하기 위해 각종 밸브류 및 히터의 온도조절을 필요로 한다.

지금까지 설계기준사고의 환경시험시설이 확보되어 있지 않아 외국의 시험시설에 위탁하여 시험을 수행함에 따라 관련기업의 업무적인 불편과 막대한 외화가 지출될 뿐 아니라 원자력 발전소 주요기기들의 국산화에 막대한 지장을 초래했다. 이를 해결하기 위해 한국기계연구원(KIMM)에서는 과기부의 지원아래 LOCA, MSLB, HELB와 관련된 시험시설을 설치하고 있는 중이다. KIMM은 업무의 효율을 극대화하기 위해 캐나다의 AECL과 기술협력을 구축하였으며 미국의 Wyle Lab/Trentec Co., 캐나다의 Mu Sigma 등 관련해외업체를 방문하여 자료조사를 수행하였다. 현재 이러한 자료조사와 기존

의 엔지니어링 설계능력 및 설비를 가지고 KIMM에 시험시설을 구축하여 시험하고 있다. 현재 KIMM에 설치되어 있는 설비의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

여기서는 현재 KIMM에 준비되어 있는 LOCA 성능시험 관련 설비의 특징에 대해 소개하고자 한다.

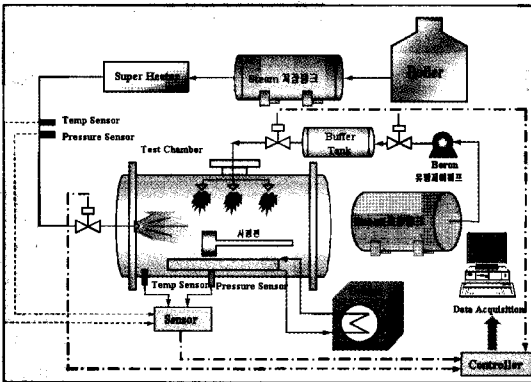


그림 1. LOCA 성능시험장치 개략도

2. 본 론

2.1 LOCA 성능시험 설비요소

LOCA 성능시험의 설비는 크게 13개의 요소 기술로 나누어지며 그림 2와 같이 나타내었다.

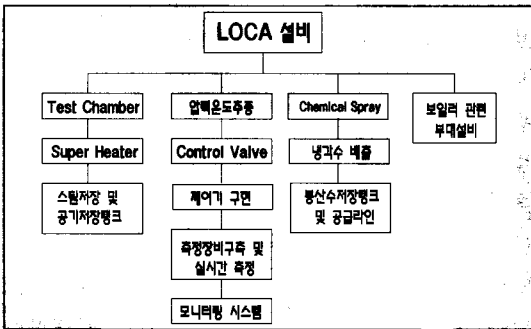


그림 2. LOCA 설비의 요소기술

2.2 Test Chamber

Test Chamber는 성능검증을 할 시험편이 설

치되어 주어진 환경조건이 구현되는 공간으로서 시험의 규모에 따라 다양한 크기를 가진다.

현재의 설비는 반경 1m이고 길이가 1m인 원통형으로써 양쪽이 플랜지 형태로 되어 있어 나중에 크기 변경이 가능하다. 즉 시험품의 양이 많거나 크기가 클 경우 Test Chamber를 크게 하고자 할 때 플랜지를 통해서 더 크게 할 수 있다. Test Chamber는 10kgf/cm², 250°C의 압력 및 온도를 고려하여 설계 및 제작하였다.

스팀의 입구는 상단부의 4곳에서 동시에 주입 되도록 하였으며 배출구는 2곳을 설치하였다. 스팀의 공급은 1개의 비례제어밸브와 1개의 On-Off 밸브를 사용하였고, 스팀의 배출은 1개의 비례제어밸브와 1개의 On-Off를 사용하였다. 또한 공기의 입력을 위해서 비례제어밸브 1개를 설치하였다.

Test Chamber는 시험편의 성능점검 및 각종 온도계를 비롯한 측정기기 전선의 출입을 원활히 하기 위해 프렌지를 원통벽면에 설치하였다. 상단부 프렌지는 Chemical Spray를 위해서 준비하였고 측면은 각각 시험편의 성능점검용 전선과 온도계를 설치할 수 있는 프렌지를 설치하였다. 아울러 Chemical Spray에 의해 생성되는 액체를 원활히 배출하기 위한 설비를 구축하였다.

Test Chamber는 외부가 복잡한 형태로 되어 있으나 단열재의 두께를 크게 하여 장기간의 시험 기간에 내부에서 외부로의 열전달을 적게 하였다.

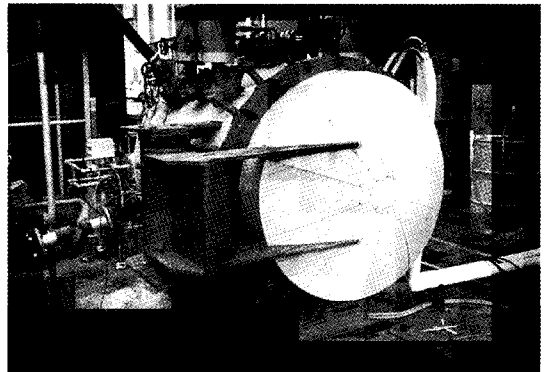


그림 3. Test Chamber

2.3 Super Heater

주어진 온도의 프로파일을 추종하도록 하기 위해서는 과열증기가 Test Chamber로 공급되어야 한다. Super Heater의 사양결정은 공급유량과 상승온도에 의해 결정이 된다. 상승온도는 스팀버퍼와 Test Chamber의 압력차에 의한 온도변화를 고려하여 결정하였고 유량은 압력조건에 따라 결정하였다. 현재의 설비는 10kgf/cm²의 포화증기의 온도를 최대 160℃ 상승시킬 수 있으며 0.37kg/sec로 공급되도록 설계하였다.

Super Heater의 전기코일은 파이프에 들어있어 압력에 견디도록 설치되어 있으며 과열방지가 설치되어 있어 안전사고에 대비하였다. 제어는 전압의 On-Off방식으로 하였으며 각각의 Super Heater는 전원이 독립적으로 주어진다. 현재 Super Heater는 70kWh 5개, 30kWh 1개, 27kW 1개로 구성되어 있고 각각 하단부에 응축수 배관이 있으며 온도센서로부터 피이드백된 온도정보가 제어기에서 사용된다. 아울러 온도설정을 외부에서 할 수 있도록 하였다. 단열을 하여 외부로의 열전달을 방지했으며 공급 전원선은 석면선을 사용하여 화재에 대비하였다. 5개의 70kWh Super Heater는 직렬 연결하여 상승온도를 충분히 크게 하였다. Super Heater의 소모전력이 커서 별도의 전기공사를 하였으며 440 볼트와 220볼트를 혼용해서 사용하였다.

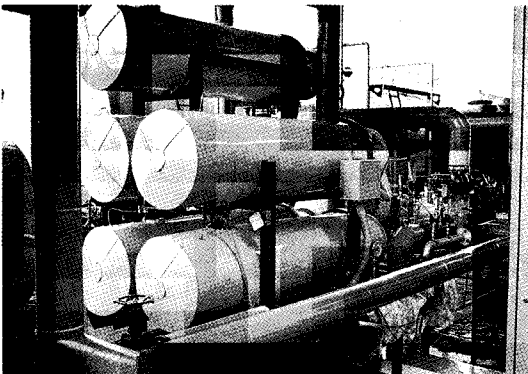


그림 4. Super Heater

2.4 냉각수 배출

Chemical Spray에서 생성되는 냉각수를 원활히 배출하기 위한 설비를 구축하였다. Chemical Spray에 의해 온도가 급강하되면서 일부는 증기가 되어 Test Chamber 외부로 배출되고 일부는 액체로 고이게 된다. 이때 빨리 액체를 배출시켜 주어야 시험품에 영향을 주지않고 올바르게 시험을 할 수 있게 된다. 이를 위해 액체를 외부로 배출하는 설비를 3가지의 형태로 하였다. 첫째는 펌프에 의해 강제배출로 Test Chamber의 측면에 설치되어 있는 전자식 수위 측정 센서를 통해 제어된다. 이것은 Test Chamber에 압력이 없을 때 주로 작동하게 되어 있다. 둘째는 수위측정센서를 통해 밸브를 열고 닫도록 되어 있다. 이것은 압력이 약간이라도 있을 때 배출능력을 크게 하기 위해 설치하였다. 셋째는 스팀트랩을 통해 배출하고 있는데 압력이 있을 때 주로 작동된다. 내부에 액체가 잠기면 시험편에 영향을 미치게 되므로 액체 배출이 원활히 되도록 하였다. 배출되는 액체는 탱크에 저장된 후 별도의 보조탱크에 저장하도록 하였다.

냉각수 배출의 기능이외에 배관에 Super Heater 27kW 1개를 설치하여 장시간의 온도조절용으로 사용하였다. 이를 위해 냉각수 배출배관의 수위조절을 함께 하였다.

2.5 Control Valve

Control Valve는 공급되고 배출되는 과열증기 및 공기의 양을 조절하는 밸브이다. 현재 비례제어밸브와 On-Off 밸브가 사용되고 있으며 액츄에이터는 개폐시간이 작은 공압식이다. 이를 위해 별도의 에어공급탱크를 설치하였다. 비례제어밸브는 미세조정이 가능한 equal percentage type의 밸브를 사용하였다. 밸브의 궤도는 4-20mA의 전기신호로 조정이 되며 모두 E/P Positioner가 설치되어 있다. 밸브궤도의 크기는

유량계수에 의해 결정이 된다. 유량계수 Kv값은 밸브 양단의 압력 및 온도를 측정하여 계산하며 밸브의 특성곡선을 이용하여 밸브개도가 결정된다. Control Valve의 크기는 스팀버퍼탱크의 압력에 따라 결정하였다. 스팀공급용으로 1개의 비례제어 밸브와 1개의 On-Off 밸브를 설치하였고 스팀배출용으로 2개의 비례제어밸브를 설치하였다. 그리고 공기 공급용 비례제어밸브 1개를 설치하였다. 모든 밸브는 PCD에서 공급되는 4-20mA에 의해 제어된다.

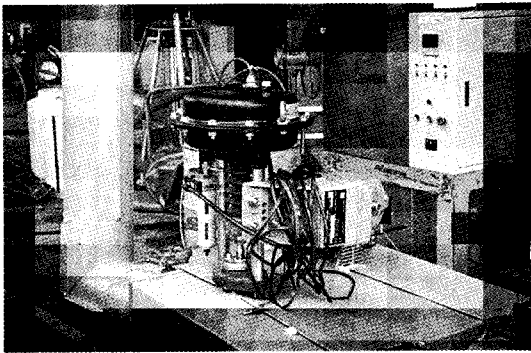


그림 5. Control Valve

2.6 압력온도추종

압력온도 프로파일은 크게 변화가 큰 과도기와 변화가 없는 정상상태로 나누어진다. 그러므로 과도기에는 스팀의 조절을 제어밸브로 하여 시간과 압력, 시간과 온도의 관계를 충족시킨다. 그러나 정상상태는 변화가 없으므로 압력의 변화와 온도의 변화를 공기조절밸브와 냉각관 내의 Super Heater를 통해 유지한다. 과도한 압력은 외부로 스팀을 배출하여 맞추어주고 온도가 작으면 과열증기를 내부로 유입하여 온도를 상승시킨다. 온도가 급강하하는 부분은 내부에서 수행되는 Chemical Spray를 할 때 이루어진다. 이때 냉각수가 Test Chamber에 쌓이지 않도록 원할히 배출시켜주어야 한다. 압력과 온도의 추종은 보수적인 관점에서 가혹한 조건에서 행해져서 시험이 신뢰성을 갖도록 하였다.

2.7 제어기 구현

밸브제어, 수위제어, Chemical Spray제어, Super Heater 온도제어 등 모든 제어는 PCD에서 프로그램하여 RAM에 다운로드되어 CPU에 의해 수행된다. PCD에서는 아날로그 입출력을 통해 온도, 압력의 신호를 전류 또는 전압의 형태로 주고받는다. 그리고 제어에 사용되는 각종 스위치는 전기식 릴레이를 사용하고 PCD의 프로그램에 의해 조절이 된다.

밸브의 개도가 압력온도의 추종에 적합하도록 설정되기 위해 유량계수 계산 함수를 PCD에서 만들었다. 압력온도 프로파일도 시간에 따라 함수의 형태로 주어졌고 Chemical Spray의 시기도 함수의 형태로 주어졌다. 각각의 밸브의 유량특성도 유량계수 Kv값에 따른 함수로 내부에 만들었다. Test Chamber 내부의 열역학적 상태를 알기 위해 스팀테이블을 fitting한 함수를 PCD에서 구현하였다.

PCD의 운전상황은 외부에서 RS232C를 통해 볼 수 있고 수동운전과 자동운전으로 전환하는 함수를 통해 수정도 가능하다.

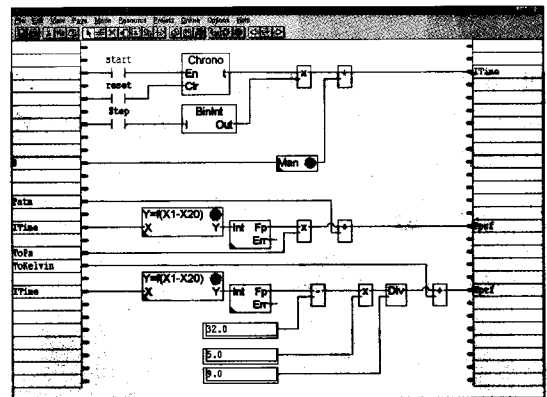


그림 6. PCD Program

2.8 모니터링 시스템

Test Chamber 내부의 압력과 온도는 실시간으로 모니터링 할 수 있게 하였다. 제어와 모니

터링이 함께 수행되면 오류시 수정이 복잡해지므로 모니터링 기능을 제어와 독립시켰다.

모니터링은 크게 2단계로 나누어진다. 1단계에서는 압력과 온도신호를 파일로 저장하면서 동적 메모리에 데이터를 전달하여 서버의 역할을 하였다. 1단계에서는 안정적으로 신호를 파일로 저장하지만 프로파일과의 비교는 이루어지지 않고 있다. 그러나 언제나 신호를 동적메모리에 주고 있으므로 외부에서 접근하여 데이터를 2차 가공할 수 있게 된다. 2단계에서는 클라이언트 역할을 하여 1단계의 동적 메모리에 접근하여 압력과 온도신호를 받아 역셀의 워크시트에 보내어 그래프 형태로 나타내거나 또는 다른 형태로 표시하게 된다. 이때 2단계의 프로그램은 1단계의 작동여부에 영향을 줄 수 없고 단지 데이터만 받을 수 있어 수행도중 중지하여도 된다. 이러한 2단계에 걸친 모니터링은 정확한 데이터의 기록과 함께 운전상황을 외부에서 실시간으로 보기 위함이다.

2.9 측정장비 구축 및 실시간 측정

모든 측정장비는 NIST에 소급성을 가지는 표준연구원에서 교정을 받았다. 온도센서는 RTD와 열전대를 사용하며 압력센서는 고온에 견디는 센서를 사용하였다. 데이터 수집장치는 HP, Kethely 등의 장비를 구입하여 전압, 전류, 2선식 저항측정, 4선식 저항측정이 모두 가능하게 하였다. 그리고 저항값을 전류값으로 바꾸는 변환기를 사용하여 온도값을 직접 전류값으로 볼 수 있게 하였다. 유량계의 신호는 전압, 전류, 주파수로 변환될 수 있게 하였다. 기기의 절연저항의 측정은 고임피던스 메타를 이용하고 있다. 아울러 온도교정용 Bath와 정밀온도측정장비를 구비하여 온도계의 교정 및 기기의 성능검증에 사용하고 있다.

교정한 결과를 이용하여 실제적인 물리량으로 바꾸는 것은 프로그램을 통해 이루어진다. 모든

측정은 실시간으로 이루어지며 동시에 통신을 통해 컴퓨터에 데이터가 이송되어 하드디스크에 파일의 형태로 기록된다.

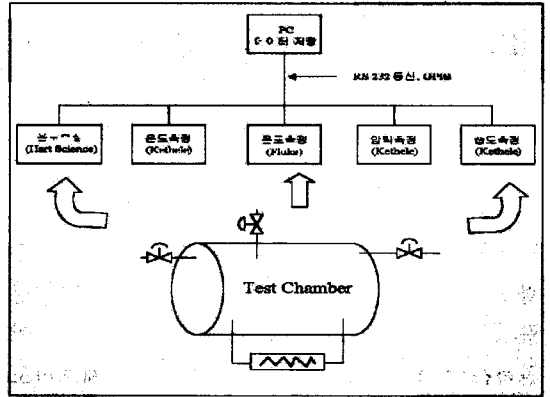


그림 7. 측정장비의 개략도

2.10 Chemical Spray 시스템

Chemical Spray를 위해 노즐, 펌프, 분배기 등을 설계하였다. 분배기는 노즐에 압력이 골고루 작용하게 하기 위해 크기 선정에 유의하였고 펌프는 시험중의 고장을 생각해서 2개를 설치하였다. 노즐은 제작업체에서 주는 데이터가 정확하지 않아서 노즐특성을 별도의 실험장치를 통해 검사하였다. 각각의 노즐의 특성을 노즐과 분사 표면적사이의 거리에 따른 단위면적당의 유량으로 구한 후, 원하는 단위면적당 유량이 나오도록 노즐의 위치와 개수를 정하였다.

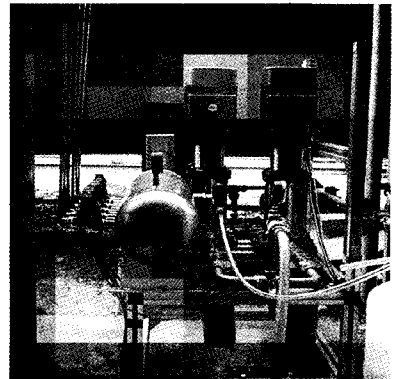


그림 8. Chemical Spray장치

현재는 노즐이 0.1~0.2 GPM/ft²을 만족하도록 설치하였다. 공급펌프의 속도는 인버터로 조절을 하여 더 정밀하게 제어할 수 있게 하였다.

2.11 붕산수 저장탱크와 공급라인

붕산수 저장탱크는 Chemical Spray에 사용되는 화학약품을 저장하는 탱크로서 2톤 탱크 2개와 1톤 탱크 2개를 준비하였다. 붕산수의 제조는 붕산을 외부에서 필터를 통과한 물에 녹인 후 펌프를 통해 탱크에 유입된다. 그리고 약품의 정량주입을 위한 펌프와 pH 메타도 함께 준비하여 원하는 시험조건에 만족하는 붕산수를 제조하도록 하였다. 붕산수 내부에서 석출되는 현상을 막기 위해 펌프를 이용하여 교반하였으며 외부단열을 통해 적정온도를 유지하도록 하였다. 그리고 냉각수를 회수할 수 있게 하기 위해 보조탱크로 유입되는 배관라인을 구성하였다.

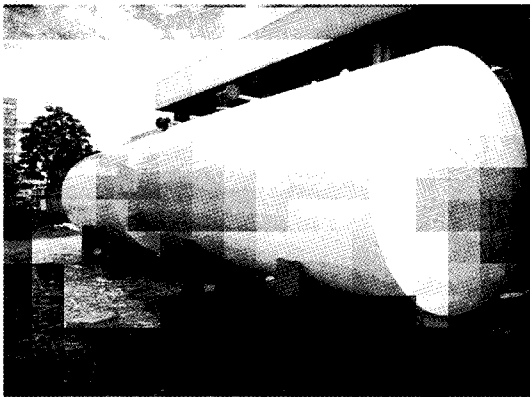


그림 9. 붕산수 저장탱크

2.12 스팀저장 및 공기저장탱크

Test Chamber에 공급되는 스팀의 양이 짧은 시간에 많이 소모되므로 별도의 스팀저장탱크가 필요하게 된다. 현재는 10kgf/cm², 3톤의 저장탱크가 설치되어 있고 프렌지 형태로 되어 있어서 같은 크기의 저장탱크를 연결하여 설치하는 것이 가능하다.

그리고 공기저장탱크를 설치하여 각종 밸브의 공기 공급 및 Test Chamber의 압력조정을 위해 사용되는 공기의 공급을 원활히 하였다. 공기저장탱크에 공기를 공급하기 위해서 에어컴프레서를 별도로 설치하였다.

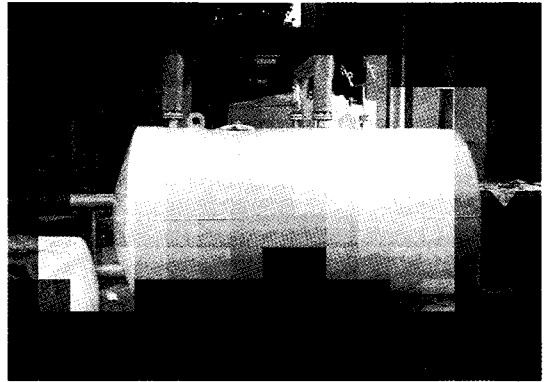


그림 10. 스팀 저장탱크

2.13 보일러 관련설비 및 부대설비

스팀을 공급하는 보일러의 원활한 작동을 위해 경수를 연수로 바꾸는 연수기와 스팀과 물을 분리하는 기수분리기를 별도로 설치하였다.

2.14 향후계획

시험대상의 크기, 종류와 특성에 따른 다양한 형태의 성능시험이 요구됨에 따라 기기의 보완 및 추가 설비 구축이 필요하다. 30kgf/cm² 급 보일러, 대형 스팀저장탱크, 다양한 종류의 Test Chamber, Super Heater, 제어기기, 각종 밸브류 등이 필요로 하게 되며, 이를 위해 계속적인 노력이 요구된다.

3. 결 론

- (1) LOCA 성능시험을 해외에 위탁을 주지 않고 한국기계연구원에서 수행할 수 있는 설비를 구축함에 따라 원자력 관련 주변

기기의 국산화 뿐 아니라 외화유출을 막을 수 있게 되었다.

- (2) 한국기계연구원에서 구축하고 있는 LOCA 성능시험 설비의 특징에 대해 요소 기술별로 설명하였다.
- (3) 향후 다양한 품목의 시험편을 대상으로 LOCA 성능시험을 하기 위해서 설비를 보완해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE 323-1974/1983, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations."
- [2] IEEE 344-1987, "IEEE Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations."
- [3] Southwest Research Institute, Document No.06-8680-TP, "Nuclear Component Qualification Test Plan for the Generic qualification of Weed Instrument Company Temperature Sensor Assemblies," May 23, 1986.
- [4] Southwest Research Institute, Document No. 06-8680-003 Revision 1, "Nuclear Component Qualification Test Report for the Generic Qualification of Weed Instrument Company Temperature Sensor Assemblies," June 1987.
- [5] H.M. Hashemian, "Aging of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors," June 1990,
- [6] Regulatory Guide 1.100, Revision 02, "Seismic Qualification of Electric and Mechanical Equipment for Nuclear Power Plants," June 1988.
- [7] Weed Instrument "Installation Manual (Revision 1)" -Installation/Instruction /Operation Manual(for RTD Type temperature sensors)
- [8] NSSS Engineering & Development, Korea Power Engineering Company, Inc., N0594-IC-DS870, Revision 03, Design Data Status 1, "Design Specification For Process Instrumentation Equipment For Yonggwang Nuclear Power Plant Units 5 and 6,"
- [9] Korea Institute of Machinery and Materials, Document No. QAM-01, revision 0, "Quality Assurance Manual", 1997.