

원전 기자재의 내환경 검증의 특징



김 유 창

(KIMM 환경설비연구부)

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



김 재 형

(KIMM 환경설비연구부)

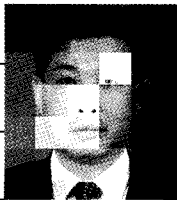
- '89 - '93 한국과학기술원 기계공학과(학사)
- '93 - '95 포항공과대학교 기계공학과(석사)
- '95 - 현재 한국기계연구원 연구원



김 병 덕

(KIMM 환경설비연구부)

- '75 한국해양대학교 기관학과(학사)
- '77 - '81 동지상선 1등 기관사
- '81 - '83 충남대학교 기계공학(석사)
- '94 한국해양대학교 시스템공학(박사)
- '81 - 현재 한국기계연구원 책임연구원



송 치 성

(KIMM 환경설비연구부)

- '79 - '83 한국해양대학교 기관학과(학사)
- '83 - '87 영국 Zodiac Maritime Co.(Engineer)
- '87 - '89 한국해양대학교 선박기계공학과(석사)
- '89 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

원자력 발전소는 구조물(structure), 계통(system), 기기(component)의 세 가지 기본 요소로 이루어지며 다량의 방사능 물질을 포함하고 있다. 따라서 주민의 건강 및 안전과 환경 보호를 위하여 원전의 안전 관련 시설 및 설비는 자연 환경이나 재해로부터 보호되고, 환경요인이나 가상적 사고조건(postulated accident condition)에서도 구조적 건전성을 유지하고, 동시에 안전 관련 기능을 충분히 수행할 수 있도록 법률적으로 요구하고 있다. 또한, 설계-제작-시공-시험 및 운전의 전반에 대하여 엄격한 품질 보증 요건과 각종 설계 및 기술 기준을 적용하도록 법적으로 규제되고 있다. 특히 원전의 안전 관련 기기는 정상 또는 비정상 환경 조건(normal/abnormal environmental condition)과 지진 발생과 같은 설계 기준 사고(DBA/DBE: Design Basis Accident/Event)조건에서도 그 기능이 유지될 수 있도록 설계되어야 하며 이러한 설계조건에 대한 기기 설계의 적합성이 입증되어야 한다.

다시 정리하면 기기검증이란 원자력 발전소의 안전과 관련한 중요기기 등에 미칠 수 있는 모든 환경조건(온도, 습도, 압력, 방사선, 전자기파, 진동 등)과 지진, 자연현상 및 가상의 사고에 의한 영향을 평가하여, 기기의 설계 및 제작시 이를 반영하므로써, 기기의 설치 수명 기간 중 어떠한 환경조건 아래에서도 기기가 손상됨이 없이 제기능을 하는 것을 입증할 수 있음을 증명하여 문서화하고 이를 유지하는 일련의 행위가

다. 이러한 일련의 입증과정을 각각 내진 검증(seismic qualification) 및 내환경 검증(environmental qualification)이라 하고 두 과정을 합하여 통상 기기 검증(equipment 또는 component qualification)이라 한다. 여기서는 내환경 검증에 관해 살펴보고자 한다.

2. 용어의 정의

내진 및 내환경 기기 검증에 적용되는 용어에 대하여 설명하면 다음과 같다.

- 설계 기준 사고(DBA/DBE) : 냉각재 상실사고(LOCA), 주중기관 파단(MSLB), 운전 기준 지진(OBE) 또는 안전 정지 지진(SSE) 등과 같은 원전의 가상사고중 기기 설계에 적용될 설계기준이 되는 사고
- 안전 관련 기능(safety-related function) : 원자로 냉각재 압력 경계의 건전성 유지, 원자로 안전 정지 및 유지, 10 CFR 100의 규정치 이상의 방사능 확산에 대한 예방 및 차단 등에 필요한 기능
- 안전 관련 기기(safety-related equipment) : 상기의 안전 관련 기능을 수행하는 기기
- 기기(equipment) : 특정 기능 수행을 위해 설계 제작된 부품의 집합체로서 전동기, 변압기, 밸브 구동기 및 계측제어장치 등
- 부품(component) : 저항, 콘덴서, 전선, 커넥터, 트랜지스터, 튜브, 스위치, 스프링 등과 같이 기기에 조립되어지는 품목
- 설계수명(design life) : 특정한 사용 조건하에서 만족할 만한 성능 수행이 예상되는 기간.
- 사용조건(service conditions) : 정상 운전 요건, 운전 요건상 예상되는 극한 상황(비정상) 및 발전소의 설계 기준 사고에 의해 가상적 조건의 결과로써 예상되는 환경 조건, 부하조건, 전력 조건 및 신호 조건
- 온화 환경(mild environment) : 정상 사용 조건 및 중대 설계 기준 사건으로는 지진만을 고려한 극한 상황(비정상)의 사용 조건 결과로 예상되는 환경
- 열악 환경(harsh environment) : 발전소의 설계 기준 사고 및 설계 기준 사고 이후에 가정되는 운전 조건의 결과로써 예상되는 환경. 열악환경은 격납용기내 냉각재 상실 사고(LOCA), 고에너지 배관 파단 사고(HELB) 및 격납용기 외부의 냉각재 상실 사고 이후의 고에너지 배관 파단사고 등의 결과
- 노화(aging) : 설계 기준 사고 또는 설계 기준 사고 모의 과정을 포함하지 않는 설계 기준 사고 시점까지의 기간 동안에 기기에 미치는 운전 조건, 환경 조건 및 계통 조건의 영향
- 여유도(margin) : 사용 조건과 기기 검증을 위해 사용되는 조건간의 차이
- 설치 수명(installed life) : 기기 또는 부품이 사용 조건 및 계통 요건 설계를 위해 고려될 수 있는 기간으로서 설치에서 제거까지의 시간 간격
- 검증 수명(qualified life) : 설계 기준 사건이 발생되기 이전까지 기기가 명시된 사용조건에서 설계 요건을 만족함이 입증된 기간.

3. 등급분류 및 적용

3.1 기기 분류

일반적으로 기기는 기계기기와 전기기기로 분류하며, 이들 기기는 안전 기능 기준에 따라 안전관련 기기와 비안전관련 기기로 분류한다. 안전관련 기계기기는 기능에 따라 크게 능동기기(active equipment)와 수동기기(passive equipment)로 구분하고, 수동기기중 안전관련 기능을 가진 압력용 기기는 ASME 기기와 NON-ASME기기로 나눈다. 안전관련 기능에 따라 전기기기 1급(Class 1E)기기와 비전기기기 1급(Non-Class 1E)기기로 나눈다.

표 1. 등급 분류

등급	분류
안전관련등급	안전 등급(Safety-Related), 비안전 등급(Non Safety-Related)
품질 등급	품질등급 A,B,C,D,G
안전 등급	안전등급 1, 2, 3(Safety Class 1,2,3)
ASME등급	Class 1,2,3
내진등급	내진등급 I, II, III (Seismic Category I, II, III)
전기기기등급	전기기기 1급(Class-1E), 비전기기기 1급(Non Class-1E)

3.2 등급 분류

등급분류는 표 1과 같다.

4. 내환경 검증

기기 검증의 전반적인 시행과정 중 내환경 검증은 광의의 의미에서는 내진 분야를 포함하나 통상 내환경 검증에서 내진 검증 분야를 독립된 과정으로 분리하여 적용한다. 다음 그림 1은 각각의 대상기기별 기기 검증 흐름도를 보여준 것이다.

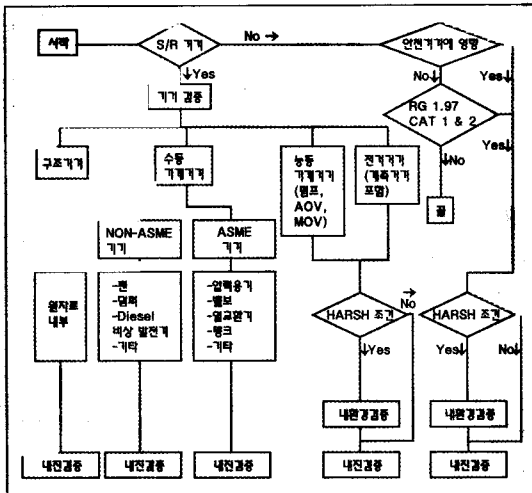


그림 1. 대상기기별 검증 흐름도

4.1 대상기기

내환경 검증 대상기기는 열악 환경 구역(harsh zone)에 위치하는 Class 1E 전기기기 및 기계기

기 중 능동기기(active equipment)의 비금속재료(non-metallic material)중에서 특히 유기물 재료(organic material)의 부품(component/part)에 대해 적용하고, 이외 비안전성 관련 기기 중 Reg. Guide 1.97에 따라 사고 후 감시 기기(post-accident monitoring equipment)나 안전관련 기기에 영향을 줄 수 있는 경우도 내진 검증을 포함한 내환경 검증의 대상이 된다. 성능 검증 대상 부품을 표 2에 나타내었다.

4.2 내환경 검증 요건 및 적용

내환경 검증은 안전관련 기기가 정상 운전 조건 중의 환경인자에 노출된 후, 가상사고의 환경 조건하에서도, 사고기간(incident duration)동안 및 사고 후에도 안전기능을 충분히 수행할 수 있는 기기의 정상 운전 가능 시간인 기기 검증 수명(qualified life)을 결정하는 것이다. 따라서, 기기 검증에 필요한 환경 조건은 정상 조건(normal condition), 비정상 조건(abnormal condition), 사고 조건(incident condition)으로 크게 구분하며, 가상 사고는 내진 검증에는 OBE와 SSE조건을 적용하고 내환경 검증에는 LOCA, MSLB 또는 사고후(post-incident)로 인한 조건을 적용한다.

기기의 열화(degradation)현상에 따라 기기 검증 수명에 영향을 미치는 인자로는 기기와 기기 운전 특성에 따른 내부 인자와 온도, 압력, 습도, 방사선 및 기기 진동과 살포되는 화학제, 침수

표 2. 성능검증 대상부품

구 분	부 품 명
1. 전기 기기 마운트 (Electrical Equipment Mount)	패널 (Panels) 선반 또는 저장대 (Racks) 캐비닛 (Cabinets)
2. 전기 계측 기기 (Electrical Power Device)	신호전송기 (Transducers) 감지기 (Sensors) 스위치 (Switches) 논리회로기 (Logic Circuit Equipment)
3. 전력 기기 (Electrical Power Device)	차단기 (Switch gears) 전동기 (Motors) 변압기 (Transformers) 케이블 (Cable) 변환기 (Inverters) 비상 디젤 발전기 (Emergency Diesel Generators) 전기관통부 (Electrical Penetrations) 커넥터 (Connectors) 스플라이스 (Splices) 터미널 블록 (Terminal Blocks)
4. 밸브류 (Valves)	유량 조절 밸브류 (Flow Control Valves) 나비형 밸브 (Butterfly Valves) 게이트 밸브 (Gate Valves) Y-글로브 밸브 (Y-globe Valves) 방출밸브 (Relief Valves) 안전밸브 (Safety Valves) 체크밸브 (Check Valves) 리프트 체크 밸브 (Lift Check Valves) 스윙 체크 밸브 (Swing Check Valves) 계기용 밸브류 (Instrumentation Valves) 제어밸브 (Control Valves) 솔레노이드 밸브 (Solenoid Valves) 열동력밸브 (Thermodynamic Valves) 기타 밸브류 (Miscellaneous Valves) 격리밸브 (Isolation Valves) 다이하프램 밸브 (Diaphragm Valves)
5. 배관류 (Pipes)	대구경 배관 (ASME 코드 등급 배관). 소구경 배관 (ASME 코드 등급 배관). 매설 배관 (ASME 코드 등급 배관).
6. 펌프류 (Pumps)	원자로 냉각재 펌프 (Reactor Coolant Pump) 안전성 관련 펌프류 (Safety Related Pumps): 충전 펌프 (Charging Pump), 고압 및 저압 안전 주입 펌프 (HPSI & LPSI Pump), 정지 냉각 펌프 (Shutdown Cooling Pump), 원자로 배수 펌프 (Reactor Drain Pump), 붕산 보충 펌프 (Boric Acid Makeup Pump),

技術現況分析

구분	부품명
6. 펌프류(Pumps)	기기 냉각수 보충 펌프(CCW Makeup Pump), 필수 냉각수 펌프(Essential Chilled Water Pump), 예비 연료 오일 펌프(Standby Fuel Oil Pump), 예비 윤활 펌프(Prelubrication Pump), 디젤유 이송 펌프(Diesel Fuel Oil Transfer Pump), 안전성관련 원심 펌프(Safety Related Centrifugal Pump), 격납용기 살수 펌프(Containment Spray Pump), 격납용기 살수 첨가 펌프(Containment Spray Additive Pump), 필수 용수 펌프(Essential Service Water Pump), 필수 용수 스크린 세정 펌프(ESW Screen Wash Pump), 보조 급수 구동 펌프(Aux, Feed Water Driven Pump) 등.
7. 배관 관련 부품 (Pipe Related Components)	필터 및 스트레이너(Filter & Strainers)
	오리피스(Orifice)
	벤추리(Venturies)
	살수 노즐(Spray Nozzles)
	신축 이음부(Expansion Joints)
8. 주요 기기 (Main Equipment)	원자로 용기(Reactor Vessel)
	증기 발생기(Steam Generator)
	원자로 내부 구조물(Reactor Internal structures)
	제어봉 구동 장치(Control Rod Drive Mechanism)
9. 공기 조화 계통 (Air-Conditioning System)	공기 조절기(Air Handling Unit)
	공기 조화기(Air Conditioning Unit)
	구역 냉방기(Cubicle Coolers)
	댐퍼(Dampers)
	송풍기(Fans)
	가열기(Heaters)
10. 계통지지 장치 (System Support Facilities)	케이블 트레이(Cable Tray)
	핵연료 저장대(Fuel Storage Rack)
	방진기(Snubbers)
	격납건물 배관 관통부(Containment Piping Penetrations)
11. 배터리류(Batteries)	배터리(Batteries)
12. 기타 부품 (Miscellaneous Components)	탱크(Tank), 압력 용기(Pressure Vessels)
	핵연료 집합체(Fuel Assemblies), 열 교환기(Heat exchangers)
	습분 분리기(Moisture Separator)
	필수 냉각기(Essential Water Chiller)
	방열기(Radiator), 탈기(Gas Stripper)
	수소 재결합기(Hydrogen Recombiner), 압축기(Compressors)

(submergence) 등의 환경적 외부 인자가 있다. 또한 검증된 기기 수명이 발전소에 설계 수명 (design life: 통상 40년)을 초과할 경우에는 검

증이 완전히 이루어진 것으로 볼 수 있으나 그 이하일 경우에는 조건부적 검증이 이루어진 것이다. 그러므로 조건부적 검증의 기기나 부품은

발전소 운전중 유지 보수 및 감독(maintenance & surveillance)에 대한 계획에 따라 검증 수명 이전에 교체되어야 한다. 따라서 환경 검증이 수행될 조건은 대상 기기의 확인과 함께 기기가 노출되는 환경 인자와 정도, 그리고 사고 환경 조건 및 기기의 안전 관련 기능이 결정되어야 한다.

4.3 내환경 검증 방법 및 절차

IEEE-323에서 언급한 검증 방법으로는 유형 시험(Proto-Type Test), 해석(Analysis), 운전 경험(Operating Experience) 그리고 이들의 조합에 의한 검증이 사용된다.

4.3.1 유형 시험에 의한 방법

기기의 성능이 구매 사양서에 명시된 정상, 비정상, 설계 기준 사고 조건하에서 기기 성능 사양 요건을 만족하거나 초과함을 입증하기 위한 것이다. 만일 비금속 재질의 내환경 검증이 공급업자 업무 영역이 아니고 운전 경험 및 해석이 실현 가능성이 없을 때 문제의 유기체 재질에 대해 제한적인 유형 시험을 통해 성능을 검증할 수 있다. 사양서는 검증될 기기에 대한 특정 환경 및 기능적 검증 요건과 이력 곡선을 포함한다.

유형 시험(Proto-Type Test)은 주로 계측 제어 기기를 포함한 전기 기기를 대상으로 하며 시험 설비인 챔버를 이용하여 방사선(radiation), 열노화(thermal aging), LOCA 모의시험(simulation), 내진시험 등을 일정한 순서에 따라 실시하는 것으로 시험과 관련한 몇 가지 주요 사항을 살펴보면 다음과 같다.

시험 계획(Test Plan)은 대부분 시험기관에 의해 작성되고, 여기에는 기기의 설명, 시험될 기기의 수, 설치 및 연결 조건, 노화 모의시험 절차, 시험 환경 조건, 측정할 환경 인자 및 기기 성능, 시험 설비 조건 및 정밀도, 허용 성능 한계치 및 시험 시간 계획이 포함된다. 실제 설치 조건과

동일하게 대상 시험 기기를 설치하고 전선 등 필요 부위를 연결하며 시험 중에도 점검한다. 만일 실제와 동일하지 않을 경우에는 해석을 통해 기기 성능에 영향을 주지 않음을 입증하여야 한다. 시험중 모든 시험 조건과 기기 성능을 일정 시간 동안 측정하고 관찰하여야 한다. 측정 기기나 시험 기기는 필히 교정(calibration)되고 문서로 기록되어야 한다. 시험 중 시험 조건 과정은 실제와의 차이와 시험 오차를 고려하여 각 환경 인자(environmental parameter)에 일정 여유도(margin)를 준다. IEEE-323에는 가장 엄격한 조건(사고조건)에 대한 여유도가 제시되고 있고 정상 조건에 대해서는 경험과 판단에 의해 결정된다. (예 : 온도 +15°F 또는 +8°C, 압력 +10%, 방사선 +10%, 전압 ±10%, 주파수±5%, 시간 +10%, 진동 +10% 등) 시험 순서는 가장 엄격한 조건에 준하여 시행되어야 하며, 일반적인 순서는 최초검사 → 성능 시험 → 열노화(Thermal Aging) → 방사선(Radiation Aging) → 성능 시험 → 진동에 의한 노화(Vibration Aging) → 설계 기준 사고 시험(DBE Test): LOCA/MSLB 시험 → 설계 기준 사고 후 시험(Post-DBE Test) → 기기 분해 및 검사의 순으로 시행된다. 만일 방사선에 의한 노화가 열노화에 영향을 줄 경우에는 열노화 시험에 앞서 시행되며, 운전에 의한 노화 시험(operational aging)이 필요한 경우에는 진동에 의한 노화에 앞서 시행될 수 있다. 또한 습도에 의한 노화(humidity aging)에 대한 영향은 거의 알려져 있지 않으나 만일 시행될 경우는 임의대로 가능하며 예를 들어, 열노화 현상이 100°C이하인 경우에는 규정 조건 이상으로 습도를 유지하여 열노화 시험을 시행한다. 설계 기준 사고 시험(DBE Test)은 먼저 방사선에 대한 조건이 정확히 결정되어야 하며 다음으로 온도 분포, 압력 분포 및 화학제 살포 조건이 명시되어야 한다.

노화 시험에 있어 가속 노화(accelerated aging)는 환경 인자와 시험 시간과의 함수 관계

를 이용하며, 실험적 경험과 수학적 방법에 의해 인위적인 가속 노화와 시험 시간을 결정할 수 있고 시험 결과를 이용하여 해석 방법에 의해 기기 검증 수명을 계산해 낼 수 있다. 주로 열노화에 있어 IEEE-101에 명시한 퇴화 곡선(Regression Line)과 EPRI 보고서 NP-1558에 명시된 아레니우스 공식(Arrhenius Equation)을 이용한다. 또한 시험에 있어 각 환경인자에 의한 혼합 상승 효과(synergistic effect)를 항상 고려하여야 하며 이에 대한 실험적 자료는 거의 없으나 영향은 매우 작은 것으로 알려져 있다. 그러나 방사선에 의한 상승 효과가 기계적 응력이나 기타 기능상에 영향을 줄 수 있음이 실험적으로 알려져 있으며, 이런 경우 시험순서상 다른 노화시험에 앞서 시행되어야 함을 유의해야 한다.

4.3.2 해석에 의한 방법

구매사양서 내에 환경인자가 명시되지 않고, 비금속 재질의 퇴화가 기기의 안전 기능 수행 능력에 영향을 미치게 될 때 해석을 통해 검증을 수행한다. 이러한 해석은 검증된 재질과 검증되지 않는 재질 사이의 유사성 및 이들의 기능들을 입증하고 또는 아레니우스 계산과 같은 노화 해석 또는 다른 적절한 방법을 통해 재질의 적합성을 보여준다. 해석결과는 검증 문서철의 일부로 포함될 것이다. 주로 환경 인자의 노화 시험 요건 결정이나 파손 기구(failuremechanism)와 Mode의 설정 및 시험 결과의 판정을 위해 사용된다. 또한 시험결과와 외삽법(extrapolation)과 이의 판정을 위해 사용되기도 한다. 해석에 의한 검증시 일반적 재료 시험의 자료, 발전소의 특성에 따른 정보 자료 및 경험적 자료를 이용하며 시험과 병행하여 수행될 수 있다. 해석에 의한 검증은 검증될 기기의 논리적 평가 또는 타당한 수학적 모델이 필요하다. 만일 검증을 위한 일차적인 방법으로서 해석이 적용된다면 해석적인 가정과 최종 결론을 지원할 수 있도록 부분적인 유형 시험 자료가 제공되어야 한다.

개스킷, O형링, 밀봉체 등은 일반적으로 교체 가능하기 때문에 재질 해석을 통한 이들 구성 부품의 검증은 기기의 수명을 획기적으로 연장시킬 수 있다. 이 해석은 문제의 비금속 기기에 대한 검증 수명 계산도 포함한다. 검증 수명은 문제의 재질 사용 온도, 재질 특성, 노화 인자에 의해 결정된다. 개스킷, O형링, 밀봉체 등의 검증 수명은 일반적으로 발전소 수명보다 짧다. 따라서 이들 부품들은 검증 수명에 의해 지정된 시간 이내에 일부 시점과 발전소 휴지기간 동안에 교체된다. 따라서 이들 부품을 포함하고 있는 기기는 체계적인 검사/유지 보수 프로그램을 통해 관리된다.

4.3.3 운전 경험에 의한 방법

알려진 사용 조건하에서 성공적으로 운전되고 있는 유사한 기기로부터 데이터는 동일하거나 보다 덜 가혹한 사용 조건하의 다른 기기 검증의 근거로 사용될 수 있다. 이 검증 방법의 타당성은 과거 사용 조건, 기기 성능, 보수, 그리고 검증될 기기와 운전 경험이 있는 기간의 유사성을 입증하는 문서의 적절성에 달려 있다.

인위적인 가속 노화와 달리 동일 유형의 기기에 대해 유사 환경 조건에서 노화에 관한 운전 경험을 이용하는 방법으로 경험 기록 및 자료 등을 이용하여 성능 및 환경 조건 등의 비교 검토 및 해석을 통해 성능 검증을 수행하며, 해석 및 시험 등과 병행하여 사용된다.

운전경험을 통한 기기검증은 과거 성능 이력과 운전 조건을 갖고 있는 검증될 기기 유형의 사용 조건 사이의 상호관계와 검증될 기기의 성능 특성이 기기 사양서 요건을 만족하거나 초과함을 입증함으로써 이루어질 것이다. 이 평가는 문제의 기기 환경보다 가혹하거나 동등한 운전환경에서 성공적인 운전 이력을 갖는 유사 재질을 사용한다. 검증의 한 수단으로서 운전 경험의 타당성은 운전 조건 및 기기 성능과 이용 가능한 보조 문서의 양과 유형에 따라 결정된다. 이같은 접근

이 정상 환경에 대한 기기만을 검증하기 때문에 설계기준사고 조건에 대해 기기를 검증하기 위해 추가적인 재질 퇴화 해석이 수행된다. 이러한 정보는 내환경 검증 문서철에 포함된다.

4.3.4 조합에 의한 방법

기기는 형식 시험, 해석 및 운전 경험 등의 조합에 의해서 검증될 수 있다. 예로써 크기, 적용, 시간 또는 기타 제한 사항 때문에 완전한 기기 집합체에 대한 형식 시험이 사용될 수 없을 경우, 해석에 의해 보완되는 부품의 형식 시험이 검증 과정에서 사용된다.

4.4 환경 조건 및 영향

격납건물내에서 가상 환경 조건에 노출되는 안전 관련 기기는 일반적으로 짧은 시간동안 고온, 고압, 높은 습도 및 높은 방사선 조건에 노출된 후 같은 환경 인자에 대해 상대적으로 더 낮거나 온화한 상태가 장시간 동안 지속된다. 가상 사고 영향을 감시 또는 완화하기 위해 이처럼 높은 응력하에서 기기 운전이 요구될 수 있다. 또한 환경 조건에 노출되는 정도는 특정 부품 또는 기기의 위치에 의해 영향을 받는다. 예를들면 격납 건물 내부에 설치되는 기기의 경우 장시간 동안 온화한 온도, 습도, 방사선에 노출되고 나서 냉각재 상실사고(LOCA) 또는 주증기관/주급수관 파단(MSLB/MFLB)으로 인한 고온, 고압, 고습, 고방사선, 화학 살수 등과 같은 가혹 환경 하에서도 안전 기능 수행이 요구된다.

비금속 재질의 두 가지 형태는 유기체 및 비유기체로 분류된다. 비유기체 비금속 재질은 열 및 방사선에 잘 견디며 일반 원자력 발전소 환경에서 상대적으로 영향을 받지 않는다. 이러한 재질은 석면 개스킷, 패킹, 플렉시텔릭 개스킷, 탄소 마모링, 그래포일 패킹 등이 있다. 유기체 재질(탄성 개스킷, O형링, 다이아프램 등)상의 방사선에 의한 지속적인 효과는 일반적으로 재

질의 화학적 반응에 관련된다. 이들 화학적 변화 중 가장 중요한 것은 분자 절단과 교차결합이다. 교차결합은 방사선에 노출된 탄성체가 영향을 주게 되는 일차적인 화학적 매커니즘이다. 유기체 재질의 가속 열 노화를 시키기 위해 아레니우스 모델이 사용된다. 이 모델은 열노화가 단일 화학 반응(산화-온도에 따른 반응 속도)을 일으킴을 가정한다.

4.4.1 방사선

개스킷, O형링, 밀봉체 등과 같은 비금속 중요 부품들은 금속성으로 된 부품보다 상대적으로 약한 화학적 결합을 가진 재질로 만들어져 있다. 따라서 이들 재질은 방사선에 대한 저항성이 더 떨어지고 기기의 수명이 방사선 노출로 인해 제한될 수 있다. EPRI 문서 NP-3877에서는 탄소와 석면으로 된 개스킷과 밀봉체가 107Gys와 같거나 높은 문턱값(Thresholds)을 가질 수 있다고 언급하고 있다. 만일 총 환경 집적 선량이 문턱값보다 낮으면 기기의 수명은 방사선에 의해 제한 받지 않을 것이다.

4.4.2 마모(Wear)

운전으로 인한 마모의 영향은 유량, 누설 및 유연성과 같은 요소를 감시하여 검사 시험 프로그램을 통해 설명될 수 있다. 마모는 전적으로 반복횟수와 운전 기간에 영향을 받기 때문에 시험조건이 기기 설계 조건과 완전히 다르지 않는 한 주기적 검사 시험은 마모에 심각한 영향을 미치지 않는다. 일반적으로 시험 조건은 최소한 사고나 또는 지진 동안에 일어날 수 있는 조건만큼 마모의 심각성이 유지될 것이다.

탄성중합체 O형링에 대해 감시될 인자는 밀봉능력의 감소를 가져올 수 있는 탄성의 상실인 있는 압축 고정재(Compression Set)가 있다. 만일 이러한 손실이 기기의 안전 기능을 달성하기 위한 기기의 능력을 저하시킬 경우 마모는 기기의 수명 제한 요소가 될 수 있다.

4.4.3 화학물

화학물을 포함한 일부 계통 공정 유체는 비금속 부품에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 공정 유체는 산소포착제(Scavenger)인 하이드라진(Hydrazine)을 포함할 수도 있다. 이 화학물은 유기체 재질을 손상시킨다. 따라서 계통에 포함된 공정 유체의 형태는 유기체 재질을 내환경 검증할 때 고려되어야 한다. 어떤 경우 개스킷이 비안전성 관련으로 분류될 지라도 GE SIL No. 399, Rev.1에서 권장한 바와 같이 최고 200ppm까지 염화물의 농도를 제한할 수 있도록 하는 요건을 구매 문서에 반영시키는 것이 권장되고 있다.

4.4.4 압력 및 상대 습도

비금속 중요 부분에 대한 압력 및 상대습도는 설계 기준 사고 모의 시험 하에서 평가된다. 이 재질은 압력에 대하여 일반적으로 실제 지역 인자 보다 높은 사양서 요건에 따라 검증된다.

4.4.5 온도

열화(Thermal Degradation)는 일반적으로 유기체 재질의 수명에 영향을 주는 주요 요소중의 하나로 고려된다. 열화 정도 및 속도는 노출 시간에 따라 결정된다. 중합체 재질로 만들어진 개스킷, O형링 및 밀봉체에 대해 단지 고온으로 유도된 분자 결합의 분해 또는 절단이 공기가 없을 때 발생할 수 있기 때문에 일반적으로 고온의 영향은 공기중의 같은 온도-시간 조건보다 활성화 대기에서 덜 심각하다. 이에 반해 공기가 존재하는 경우에는 중합체(Polymer)는 산화 및 열분해 열화(Degradation) 모두를 겪게 될 것이다. 고온으로 인해 중합체가 가질 수 있는 다른 영향으로는 인장강도, 굽힘강도 등과 같은 속성의 변화와 휘발성분 발생으로 인한 기공이 생기는 것이다.

비금속 중요 부품을 포함하고 있는 기기의 노출 온도는 주변 온도로만 제한되지 않을 수도

있다. 예를 들어, 만일 펌프 또는 밸브속의 공정 유체의 온도가 주변 온도보다 훨씬 클 경우 비금속 중요 부품에 대한 검증 수명을 계산하는데 사용된 온도는 공정 유체로 인한 온도 상승을 포함하게 될 것이다. 기기의 성능과 관련하여 시간관점에서 온도의 영향을 결정하기 위하여 여러 가지 수학적 모델이 개발되어 왔다. 이러한 모델 중에 하나가 아레니우스 모델(Arrhenius Model)이다.

4.4.6 복합인자

원자력 발전소의 기기는 두가지 또는 그이상의 응력을 동시에 받는다. 이러한 복합 환경으로 인한 영향을 “복합 상승 효과(Synergistic Effects)”라 한다. 중합체의 화학적 배합은 가능한 반응 메커니즘을 산정하게 하고 환경 조건은 이들 가능한 반응중 어떤 것이 발생할 것인지와 얼마의 속도로 일어날지를 결정하게 한다. 복합 상승 효과는 심각할 경우를 제외하고 좀처럼 산업 학술계에 보고되지 않는다. 상호 영향의 대부분은 1차적인 영향에 비교하면 더 적게 나타나고 따라서 복합 상승 효과를 결정하기 위한 고려할 만한 실험 자료가 요구된다.

5. 향후전망

국내에서 원자력 관련 검증이 본격적으로 시작된 지는 불과 2, 3 년밖에 되지 않아 전반적으로 검증경험, 수행실적 및 기술인력 측면에서 국내 검증기관이 외국 검증기관보다 낮은 수준이다. 하지만 기기 검증을 수행하는 국내검증기관들이 보유하고 있는 검증시험설비는 특수시험설비를 제외하고는 외국의 경우와 대등한 성능의 장비를 보유하고 있다. 또한 특수시험설비인 LOCA 시험설비도 한국기계연구원에서 제작중이다. 그리고 검증기술과 관련하여 국내의 독자적인 기기검증 기술개발과 체제 구축이 되고 있어 향후 검증경험, 수행실적 및 기술인력 측면도

외국의 검증기관에 필적할 만한 수준으로 올라설 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 10 CFR 50.49, "Environmental qualification of electric equipment important to safety for nuclear power plants".
- [2] IEEE 323-1974/1983, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations."
- [3] IEEE 344-1987, "IEEE Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations."
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] H.M. Hashemian, "Aging of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors," June 1990.
- [7] Regulatory Guide 1.100, Revision 02, "Seismic Qualification of Electric and Mechanical Equipment for Nuclear Power Plants," June 1988.
- [8] NUREG-0588, Rev-1, "Interim Staff Position on Environmental Qualification of Safety-Related Electrical Equipment" Published July 1981.
- [9] NUREG-0800, Section 3.11, "Environmental Qualification of Mechanical and Electrical Equipment."
- [10] Regulatory Guide 1.89, Rev. 1 June 1984, "Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants."
- [11] Title 50, Code of Federal Regulation, Part 50
- [12] NRC document, "Guidelines for Environmental Qualification of Mechanical Equipment", Provided on July 7-10, 1981 at the EQ Meeting
- [13] GE SIL No. 399, "Service Information Letter on Nonmetallic Materials."