

# 원전기기 내진검증 기술



김 병 현(KIMM 구조시스템연구부)

- '74 - '78 서울대학교 조선공학과 (학사)
- '80 - '82 서울대학교 조선공학과 (석사)
- '88 - '93 서울대학교 조선해양 공학과 (박사)
- '78 - '80 코리아타코마 조선공업 (주)
- '82 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

## 1. 서론

원자력발전소(원전)에 사용되는 안전에 중요한 기기(Equipment Important to Safety)는 가상되는 최악의 환경조건하에서도 그 성능이 유지되어야만 원전의 안전성을 확보할 수 있다. 기기검증(Equipment Qualification)이란 안전에 중요한 기기를 선별하고, 지진등 자연현상 및 가상의 사고를 포함한 제반 환경조건이 이들 기기에 미치는 영향을 평가하여 기기의 설치수명 기간중 예상되는 여하한 환경조건하에서도 안전성 확보에 필요한 주어진 기능을 수행할 수 있음을 입증하여 문서화(Documentation)하고 이를 유지하는 일련의 행위이다. 원전은 어떠한 경우에도 주민과 환경의 보호를 위해 안전성확보를 최우선으로 하여야 하며 기기검증은 이를 위한 필수요건 중의 하나이다.

기기검증은 편의상 내진검증(Seismic Qualification)과 내환경검증(Environmental Qualification)으로 대별하고 있다. 내진검증은 가상되는 최대의 지진(Safety Shutdown Earthquake; SSE)발생중 및 후에도 안전에 중요한 기기들이 고유의 기능을 정상적으로 수행하여 원자로의 안전이 보장될 수 있도록 해석이나 시험을 통해 기기나 부품의 설계 또는 제작시 설계기준에서 요구되는 기기의 구조적 건전성 및 구동성을 입증하는 행위이다.

국내에서의 기기검증 현황은 시험시설의 미비와 관련 전문인력의 부족 등으로 국내원전용 기기에 대한 기기검증도 대부분 외국 전문회사에 의존하고 있는 실정이다. 최근 원전기기 국산

화개발에 많은 노력이 경주되고 있으나 기기검증의 국내 자립화가 이루어져 있지 못함으로 인하여 기기 국산화에 큰 장애 요인이 되고 있다. 기기검증의 국내 자립화는 자체 기술에 의한 원전의 안전성 확보와 더불어 원전기기 국산화에 중요한 선행조건이다.

본 고에서는 원전기기의 내진검증에 대한 일반적인 검증요건과 방법을 요약 설명하고 기기검증의 국내현황 소개와 자립화 방안에 대해 생각해 보았다.

## 2. 내진검증 요건과 방법

### 2.1 일반적 절차

내진검증은 일반적으로 다음과 같은 절차로 이루어 진다.

- 대상기기의 선정과 등급분류 및 기기의 안전성 관련기능의 명시
- 지진에 의한 입력하중의 결정 : 지진에 의한 기기가 받게되는 하중은 기기가 설치되는 위치, 설치방향, 설치형태 및 연결된 구조물 또는 시스템에 따라 달라진다. 입력 지진하중은 발전소 건물과 시스템에 대한 지진응답해석 또는 시험을 통하여 얻게되며 보통 응답스펙트럼으로 주어진다.
- 기기가 설치되는 조건과 동일한 조건에서의 검증
- 검증결과와 문서화

### 2.2 대상기기

검증되어야 하는 안전에 중요한 기기는 일반적으로 다음의 3가지 범주에 포함된다.

- 1) 안전성 관련 기기 : 다음의 안전성 관련 기능을 수행하는데 필요한 기기
  - 원자로 냉각재 압력경계의 건전성 유지 (Integrity of the Reactor Coolant Press-

ure Boundary)

- 원자로 안전정지 및 정지 상태 유지 (Capability to Shutdown the Reactor and Maintain it in a Safe Shutdown Condition)
- 10 CFR 100의 규정치 이상의 방사능 확산에 대한 예방 및 차단 (Capability to Prevent or Mitigate the Consequences of Accident that could Result in Potential Offsite Exposures Comparable to the 10 CFR Part 100 Guidelines)

※ Class 1E 기기 : 상기의 안전성 관련 기기에 속하는 전기기기

2) 일부 비안전성 관련 기기 : 기기 자체적으로는 안전성 관련 기능을 보유하고 있지 않으나 이것이 손상되는 경우 다른 안전성 관련 기기의 작동에 지장을 줄 수 있는 기기

3) 일부 사고후 감시기기

### 2.3 검증방법

내진검증방법으로는 해석(Analysis), 시험(Test), 시험과 해석의 혼용, 경험(Experience)에 의한 방법이 사용될 수 있다.

#### 2.3.1 해석에 의한 검증

적정 정확도를 갖는 수학적 모델 구성이 가능한 경우 사용된다. 특히 구조적 건전성의 확보만으로도 의도된 기능발휘가 가능한 기기에 적용된다. 이에선 정적해석(Static Analysis), 단순동적해석(Simplified Dynamic Analysis 또는 Static Coefficient Analysis), 상세동적해석(Detailed Dynamic Analysis)등의 방법이 있다. 최근에는 잘 알려진 유한요소해석 프로그램을 이용하여 상세동적해석이 주로 사용되고 있다.

해석에 의해서 다수의 OBE(보통 5회)와 1회의 SSE에 의해 기기의 안전성 기능이 유지됨을 보여야 한다. 해석에서 사용되는 감쇠값은 적절한 방법으로 얻어진 값을 사용해야하며 NRC Regulatory Guide 1.61에 주어진 값이 하나의 지침이 될 수 있다. 만일 시험에 의해서 얻어진 감쇠값이 있으면 이를 사용한다. 각 방향별로 응답을 따로 계산하는 경우에는 최종응답크기는 각 방향별 응답을 Square Root of the Sum of Square(SRSS)방법으로 합성하여 얻는다.

1) 정적해석방법

정적해석방법은 대상기기의 최저차 고유진동수가 입력파의 주파수성분 보다 큰 경우(강성기기)에 적용할 수 있다. 기기의 각 부품에 작용하는 지진하중을 각 부품질량에 입력파의 최대가속도(RRS의 ZPA에 해당됨)를 곱해서 얻고 이에 대한 정적해석을 수행한다.

2) 단순동적해석

이 방법에서는 대상기기에 대한 고유진동 계산이 필요치 않다. 복수주파수 가진파 여러 모드가 응답에 기여하는 영향을 고려하기 위한 정적계수(Static Coefficient)를 도입하여 각부품에 작용하는 하중을 각 부품질량에 RRS의 최대값과 정적계수를 곱해서 얻고 이에 대한 정적해석을 수행한다. 정적계수는 보통 1.5로 한다.

3) 상세동적해석

보통 유한요소법에 의해 응답스펙트럼해석 또는 시간이력해석을 수행한다. 응답스펙트럼해석에서는 응답결과가 10%이상 차이가 나지 않도록 충분한 범위의 모드를 고려해야 하며 각 방향별 응답은 모드들이 인접해 있는 경우를 제외하고는 각 모드에 대한 모드응답(Modal Response)을 SRSS에 의해 계산하고 각 방향별 응답을 다시 SRSS방법으로 합성하여 최종응답크기를 계산한다. 시간이력해석에서 3방향에 서로 통계학적으로 독립인 입력시간이력을 동시에 입

력하여 계산한 경우에는 최종응답크기를 각 시간증분별 대수합으로 계산할 수 있다.

2.3.2 시험에 의한 검증

기기나 부품의 형상이 복잡하여 수학적 모델에 의해 구조적 건전성이나 구동성 해석이 어려운 경우에 시험에 의한 검증이 필요하다. 진동대(Shake Table)를 이용하여 기기가 받게되는 지진하중을 인공적으로 만들어 시험하는 방법으로 용도에 따라서 입증시험(Proof Test), 일반시험(Generic Test) 및 파괴한도시험(Fragility Test)으로 구분되며, 시험방법에 따라서 단일주파수시험과 복수주파수시험 그리고 단축시험과 복축시험으로 구분할 수 있다.

입증시험은 주어진 특정조건만에 대한 검증을 위해 수행되는 시험으로 사전에 요구조건이 명시된 상세시방서가 마련되어 있어야 한다. 이 시험에서는 임의로 기기의 한계를 넘는 경우가 생기지 않도록 주의하여야 한다. 일반시험은 입증시험의 특별한 경우라고 생각할 수 있으며 알려진 모든 조건을 고려하여 한 번의 시험으로 여러범위에 적용할 수 있음을 검증하는 시험이다. 따라서 RRS는 넓은 주파수대역과 큰 가속도값을 갖게된다. 파괴한도시험은 대상기기의 능력한도를 결정하기 위한 시험으로 이 결과는 나중에 주어진 요구조건이나 적용조건에 적절한가를 비교 증명하는데 사용된다.

최근에는 진동대시스템의 발달로 주어진 RRS를 사용하여 복수주파수 3축시험방법이 주로 사용되고 있다. 입력파가 건물이나 연결된 구조에 의해 필터링되어 한 주파수성분이 지배적일 경우에는 단일주파수시험을 사용할 수 있으며, 진동대 여건상 단축 또는 2축시험을 수행할 경우에는 타 방향의 영향을 고려하여야 한다. 복축(2축 및 3축)시험에서 각 축에 동시 입력되는 파형은 서로 통계학적으로 독립이어야 한다.

일반적으로 내진검증시험전에 시험방법의 결정이나 대상기기의 동특성을 파악하기 위해 공진탐색시험(Resonance Search Test 또는 Expl-

oratory Test)을 수행한다. 소인율(Sweep Rate)이 분당 2옥타브이하인 정현파소인(Sine Sweep)이나 랜덤파시험을 사용하며 입력가속도크기는 비선형 영향이 나타나거나 기기에 손상이 발생하지 않도록 비교적 작은값(보통 0.2g peak)으로 하며 지진파 주파수성분내의 공진주파수를 찾을 수 있도록 33Hz보다 큰 주파수까지를 고려해야 한다.

내진검증시험은 5회의 OBE시험과 이어서 1회의 SSE시험을 수행한다.

#### ■ 해석 및 시험에 의한 내진검증

시험하기에는 너무 큰 경우나 해석 가능한 부품을 포함한 경우, 또는 기기가 이미 설치 완료되어서 이동이 불가능한 경우에 사용된다. 독자적인 해석이나 시험만으로 기기에 대한 완전한 검증이 어렵거나, 이미 시험이 시행된 기기와 유사기기에 대해 해석을 통해 그 차이점과 특성을 분석하고 보완할 필요가 있는 경우에 이용된다.

#### ■ 경험에 의한 내진검증

경험에 의한 결과치를 사용할 수 있는 경우 시험이나 해석을 거치지 않고 내진검증을 할 수도 있다. 과거의 경험적인 자료, 즉 과거 기기 검증시 얻어진 자료나 지진등을 경험한 기기에 대한 자료 등에 의해 동적 특성의 유사성을 확인하여 검증하는 방법이다.

### 2.4 문서화(Documentation)

기기검증의 서류는 안전성 관련 기기의 성능요건 및 검증요건이 적정한 방법과 적용에 따라 요구된 수준을 만족하고 완료되었음을 보여줘야 한다. 또한 품질보증계획(Quality Assurance Program)에 따른 적법한 절차와 양식에 의해 검증중에 사용된 자료나 결과는 분류되고 정리되어 차후 인·허가에 관련된 규제기관의 감사(Audit)를 위해 문서화되어야 한다. 아울러 운용중 기

기의 유지·보수·감독을 위한 계획수립과 부품의 구매 등을 위하여 기기검증 서류가 이용 가능하도록 유지, 보관 및 관리되어야 한다.

일반적으로 기기검증 문서에 포함될 내용은 기기검증에 관련하여 발행된 메모 등의 서류, 목차, 요약, 점검표(Check List), 작성자의 판정(Justification)이나 관련 계산서, 기기분류표, 보충자료(도면, Data Sheet), 기기검증 부품의 유지보수 및 감독계획(Maintenance & Surveillance Schedule), Vendor Instruction Manual 등의 관련 정보자료, 기기검증 자료(Data) 및 참고자료 등이다. 기기검증 서류는 기기제작자와 모델번호 등에 따라 분류되어야 하고 또한 부품 유지 보수에 관련된 서류는 기기번호에 따라 분류되어야 한다.

## 3. 국내 현황과 자립화 방안

### 3.1 관련법규 및 기술기준

현재 국내의 원전관련 법규로는 원자력법, 원자력법 시행령, 원자력법 시행규칙, 과학기술처 고시 등이 있다. 이들 법규는 '78년 고리 1호기의 가동이후 원전건설 운동등 새로운 여건 변화에 따라 원자력 개발과 안전규제에 대한 기본법 틀로서 제정 및 개정되어 시행되어 왔으나 내용상 원자력발전소 건설 및 운용에 대한 인·허가를 위한 기본적인 기술지침일 뿐 기기검증의 법적 규제요건이나 세부적인 기술사항은 정립되어 있지 않아 원자력발전소 도입국의 기술기준을 준용하고 있는 실정이다. 따라서 현재 국내의 가동중인 원전들은 외국의 설계회사인 미국, 캐나다, 프랑스의 적용 기술기준에 따라 설계 운용되어 왔는데, 프랑스와 캐나다는 미국의 법규나 기술기준을 모체로 자국실정에 맞게 표준화된 기술기준을 적용하고 있으므로 국내의 원전은 거의 미국의 법적으로건 및 기술기준을 따르고 있는 실정이다. 최근 원자력법이 개정 공포되

있고(94. 12. 공포) 이 개정 원자력 법에 성능검증업의 허가조항이 신설되었으며, 이에따라 시행령 및 시행규칙과 과학기술처 고시를 통하여 성능검증업 허가 기준 및 요건을 마련함으로써 국내에서도 기기검증 수행에 대한 법적근거가 마련되었다고 볼 수 있다. 또한 한전기술(주)(KOPEC)와 전기학회를 중심으로 전력산업 기술기준 개발 연구가 추진되어 최근 1차 완성을 보게 되었다. 이것은 비록 미국의 기술기준을 번안 한 것이기는 하지만 최초로 우리 실정을 감안하여 체계적으로 정리하려고 노력하였다는 점에서 매우 큰 의미가 있다고 할 수 있으며, 향후 관련 실무에 많은 도움은 물론 관련 기술개발에도 하나의 토대가 될 수 있을 것으로 여겨진다. 여기서 기기검증 관련부분은 KEPIC-END1000(검증 일반 사항, IEEE 323에 해당)과 KEPIC-END2000(전기 1급 기기 내진검

증, IEEE 344에 해당) 및 KEPIC-END3000(설비 및 기기 검증)이다.

현재 미국의 기술기준은 크게 세가지로 구분할 수 있다. 법령인 10CFR(Code of Federal Regulations)과 법적 구속력은 없으나 10CFR을 보조하기 위한 규제지침서인 R.G.(Regulatory Guide), NUREG, SRP(Standard Review Plan) 등 NRC가 발행하는 문서와 산업계, 민간단체에서 표준기술 지침서로 발간하는 Code와 Standard (예 : ANSI, ASME, IEEE, ASCE, NEMA, NFPA 등)가 있다. 이러한 기기검증과 관련되는 미국의 법규 및 대표적인 기술기준 체계는 그림2.와 같다. 내진검증에 대한 기본적인 방법과 개념은 IEEE344에 잘 기술되어 있으며 전기기기의 내진검증은 이에따라 수행되며 기계기기도 이에 준한다.

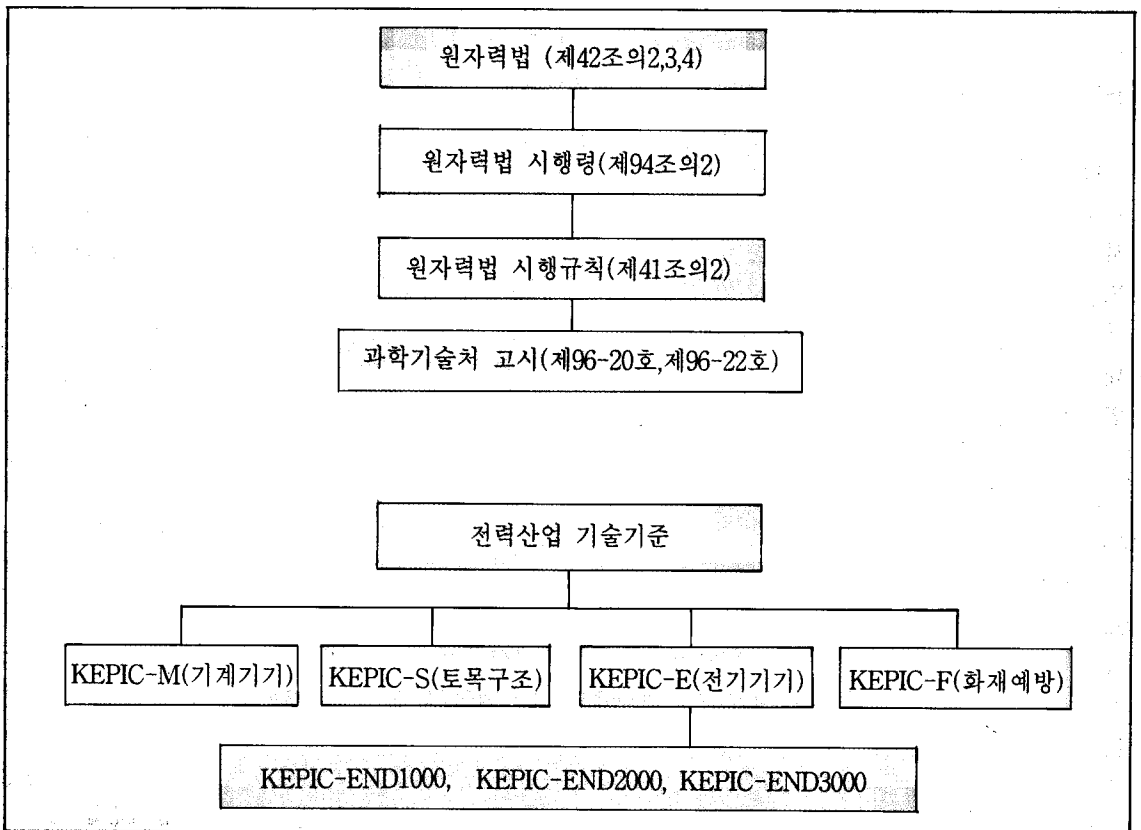


그림 1. 국내 기기검증 관련법규 및 전력산업 기술기준 체계

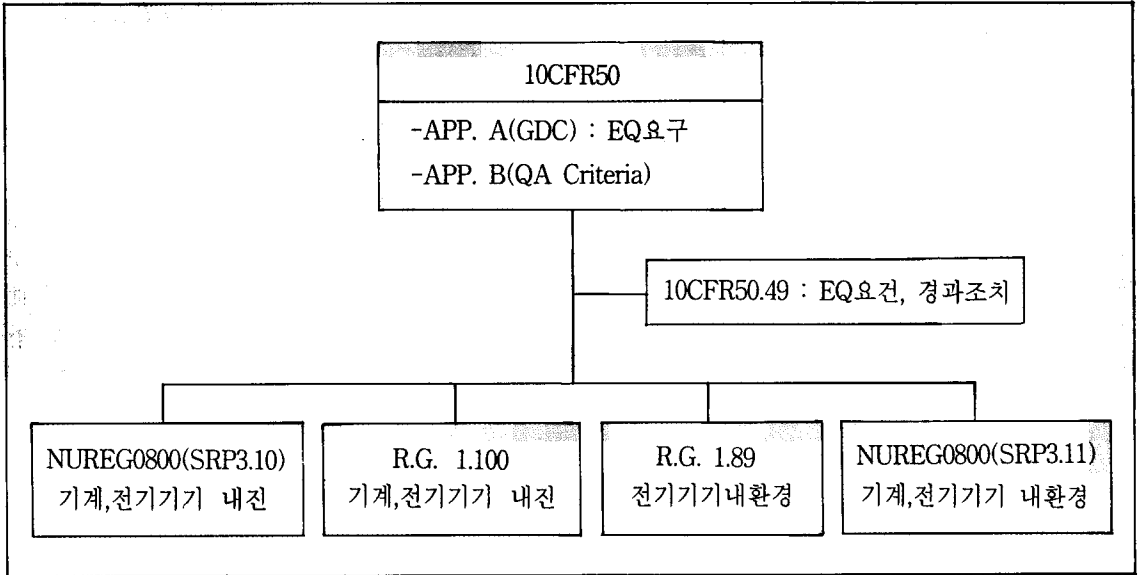


그림 2. 미국의 기기검증 대표적 관련법규 및 기술기준

### 3.2 내진검증 시험시설

현재 국내에서 내진검증을 수행할 수 있는 시험시설로는 한국기계연구원이 보유하고 있는 대형 6 D.O.F. Seismic Simulator가 유일하다. 이 대형 6 D.O.F. Seismic Simulator는 표 1.에서 보는 바와 같이 최대 30톤의 시험체를 4m×4m 크기의 진동대에 설치한 후, 최대 1.5g까지의 가속도를 받도록 가진할 수 있으며, 가진과 동시에 56개의 진동신호를 계측·기록할 수 있다. 조화파형, 랜덤파형 및 각종 지진파와 실제 계측된 진동파형등 임의의 파형을 재생, 구현할 수 있으며 시험체의 진동응답을 동시에 계측하고 기록함으로써, 시험체가 놓여지는 환경과 동일한 상황에서의 특성을 예측, 분석할 수 있다. 이 시설은 원전기기의 내진검증 뿐만 아니라 기계, 건축, 토목, 선박, 해양구조물 등에 대한 진동시험 및 전자, 전기기기의 진동시험 등 각종 분야에 광범위하게 활용되고 있다.

표 1. 6 D.O.F. Seismic Simulator 주요성능

Specification	Performance
최대 적재하중	30 Ton
진동대규모	4.0m × 4.0m
진동방향	3축병진, 3축회전
최대변위(mm)	H=±100, V=±67
최대속도(cm/s)	H=±75, V=±50
최대가속도(g)	H=±1.5, V=±1.0
최대허용편심(m)	H=±0.5, V=±2.5
최대진동주파수	50 Hz
구동방식	Electrohydraulic Servo
제어방식	Analog/Digital Control
동시계측/분석능력	56 Ch

### 3.3 내진검증 수행현황

현재까지 국내 원전기기의 검증절차는 전반적으로 미국의 절차를 준용하고 있기는 하지만 아

직 체계적이고 일관성 있는 기기검증의 수행과 규제 및 관리가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 내진검증은 일련의 기기검증분야 중에 하나의 분야이므로 타 분야와 완전히 독립적일 수 없고 타 분야의 현황에 영향을 받게 된다. 국내에서는 유일하지만 한국기계연구원이 비교적 좋은 내진시험시설을 보유하고 있고 이를 활용하여 내진검증을 수행해 오고 있기는 하지만 타 분야에 대한 시설의 미비로 전 분야의 기기검증을 일관되게 수행할 수 없음으로 인하여 내진검증을 수행하는데도 많은 제약이 있다. 지난 6년

간 한국기계연구원에서 수행된 내진검증 실적은 10여건에 불과하다. 참고로 수행된 내진검증 관련실적을 표 2.에 보였다. 한편 기기 제작업체는 기기검증에 대한 기본적인 절차 및 방법을 이해하고 있지 못하고 있어서 내진검증을 포함한 기기검증을 Wyle Laboratories 등 외국의 전문업체에 전적으로 위임하는 경우가 대부분이며, 수요가 많지 않다는 점도 있지만 기기검증문제 때문에 기기의 국산화 개발에 적극적이지 않고 검증된 기기를 수입에 의존하려는 경향이 있다.

표 2. 내진검증 관련 수행실적(한국기계연구원)

번호	연구 제목	위탁처	기간
1	PC아파트의 내진설계규준제정을 위한 시험연구	대한주택공사	91.10
2	Class 1E 축전지 내진시험평가	세방전지	91.11
3	배관지지구조물의 내진실증시험	한국원자력기술연구원	91.12
4	현대 PC아파트 모형의 내진시험	현대건설	92.7
5	다목적연구로 안전등급판넬 내진시험평가	한국원자력연구소	92.10
6	다목적연구로 축전지 내진시험평가	세방전지	92.11
7	유체저장탱크의 내진시험평가	한국전력	92.11
8	다목적연구로 UPS System의 내진시험평가	KONEL,이화전기	93.10
9	대우 TDX 교환기의 내진시험	대우통신	93.12
10	고리원전1호기 비상정지반의 공진탐색시험	TEIN	94.5
11	핵연료 면진저장조의 내진시험	한국전력,서울대	94.10
12	월성원전2,3,4호기 등기구 내진검증시험	금오전기	95.9
13	울진원전 3,4호기 AUX/LOCAL Control Panel 내진검증시험	LG산전	95.10
14	월성원전2,3,4호기 2차 분전반부품 내진검증시험	현대중공업	95.11
15	울진원전3,4호기 축전지 내진검증	세방전지	95.12
16	월성원전2,3,4호기 Instrument Rack 내진검증	LG산전	96.3
17	월성원전2,3,4호기 MCC 내진검증	LG산전	96.5

### 3.4 기기검증 자립화 방안

내진검증 기술의 발전방향을 생각하는데 있어서 내진검증분야만을 독립적으로 다루는 것은 별 의미가 없고 기기검증 전체적인 관점에서 종합적으로 다루어져야 한다.

기기검증 기술자립은

- 원전 안전성 확보기술 자립화
- 여하한 사고시에도 일반대중이 안전하게 보호되고 있다는 확신을 줌으로서 원전 안전성에 대한 대국민 신뢰성 제고
- 외국의 전문기관에 의존하는데 따른 외화 절감
- 원전기기의 국산화 개발 촉진 및 더 나아가 해외 원전에 국산기기 수출 터전 마련

이라는 점에서 그 필요성이 있으며 원자력 발전국인 우리나라 입장에서는 시급히 이룩해야 할 과제이다. 현재 국내 현황을 감안하면 기기검증 기술의 자립화를 위해서는 다음과 같은 과제가 선결되어야 할 것으로 생각된다.

1) 기기검증시설 완비와 기기검증기관의 육성  
한 기기에 대하여 내진검증과 여러 가지 내환경검증이 필요하며 대부분 시험에 의한 검증이 요구된다. 그러나 국내에는 아직 기기검증 모든 분야에 대한 시험시설이 갖추어져 있지 못한 실정이다. 따라서 무엇보다도 기기검증 시설의 완

비가 가장 시급한 과제이다. 기기검증은 잘 알려진 기술을 이용하여 수행하는 것이므로 방법 기술 자체는 그리 어렵지 않다. 따라서 검증시설이 완비된다면 국내에서 요구되는 기기검증 대부분을 바로 자체 수행이 가능할 것으로 판단된다. 현재 국내에서 기기검증을 수행하고 있거나 관심을 갖고 있으면서 관련 시험시설을 일부 보유하고 있는 곳으로는 정부출연연구기관인 한국기계연구원과 한국원자력연구소, 기업체인 새한산업(주) 정도이다. 기기검증 분야별 이들의 시설 보유현황은 표 3.과 같다. 이들 기보유시설 중에서 대부분은 본격적인 기기검증을 수행하기 위해서 많은 보완이 필요하다.

기기검증시설을 갖추는데는 많은 비용이 소요되며 반면에 기기검증은 사업적인 측면에서는 현재로는 소요비용에 비해 수익성이 없다고 할 수 있다. 따라서 기기검증 전문분야에 대해서 전문업체들이 자연발생적으로 생겨나는 것을 기대하기는 어렵다. 따라서 기기검증 전문기관을 정책적으로 육성해야 할 필요가 있다. 이 전문기관을 통하여 국내 소요 기기검증의 수행은 물론 다음과 같은 역할을 기대 할 수 있다.

- 기술기준개발 등 관련기술 개발
- 기기 국산화 개발 지원 등 산업체 기술지원
- 전문인력 양성
- 관련 기술정보 생산 및 배포 등 조사 및 정책지원

표 3. 분야별 시설 보유 현황

기기검증분야	시설 보유 기관	비고
1. 내진검증	기계(연)	검증업허가 신청
2. 내환경검증		
- 열적열화	기계(연), 새한, 원자력(연) 검증업허가(새한)	
- 진동열화	검증업허가 신청예정(기계연)	
- 동적하중	기계(연)검증업허가 신청예정	
- 방사선열화	기계(연)검증업허가 신청예정	
- 전자기파 내성	원자력(연)	
3. 사고검증	기계(연)검증업허가 신청예정	
4. 밸브시험	없음	
	없음	



2) 기기검증 업무절차 정립 및 협력체제 구축  
기기검증은 규제기관, 전력회사, 기기제작사, 검증기관이 서로 관련된 업무이며, 현 상황에서는 모든 검증분야를 한 검증기관에서 수행할 수 없으므로 몇 개의 기관이 분담 협력하여 수행되어야 한다. 따라서 관련기관들이 협의와 협력을 통하여 관련기관 간의 역할을 고려한 국내 나름의 표준화된 기기검증 업무절차를 재정립하고, 점차적으로 관련기술 및 정책개발을 추진해 나가는 것이 바람직하다.

## 참 고 문 헌

- [1] 원전 내환경부품 성능검증에 관한 연구, 한국기계연구원 자체사업 연구보고서, 1995. 10.
- [2] IEEE344-1987, IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.