

원자력발전소용 안전등급 저압유도전동기의 기기검증

김 진, 이 인우, 허 익구, 최 병원  
(주)효성 중공업연구소

Equipment Qualification of Class 1E Safety-Related Random Wound  
NEMA Electric Motor for Nuclear Power Plants

J. Kim, I.W. Lee, I.G Hur and B.W. Choi  
Hyosung Co. Industrial Performance Group, R & D Institute

Abstract - 원자력발전소는 지진과 같은 자연재해나 극한 운전조건에서 방사능물질이 외부로 누출되는 것을 방지하도록 설계되어야 한다. 따라서 이와 관련된 안전등급 기기는 원전설비의 정상운전조건뿐 아니라 원전설계기준 사고조건(DBE, Design Basis Events)에서도 그 안전성 관련 기능이 검증되어야 한다. 본 연구에서는 국내 원자력 발전소의 다양한 환경조건을 만족하며 엄격한 기기검증요건에 따라 당사가 수행한 안전등급(Class 1E) 저압 유도전동기의 개발사례를 중심으로 방사능노출시험, 가속열노화해석 및 시험, 내진해석 및 시험으로 구성되는 기기검증의 절차와 방법을 제시하였다.

시험에 의한 검증을 하는 방법은 시간과 비용 측면에서 불합리한 방법이므로 전기종을 대표할 수 있는 기종(prototype)을 선정하여 형식시험(type test)을 수행하고, 나머지 기종에 대해서는 유사성해석(similarity analysis)을 통하여 입증하였다[1].

대표기종(prototype motor)은 절연시스템, 권선형식, 베어링, 실링 등의 기본설계부문을 검토하여 표 1.과 같이 선정하였다.

Table 1. Prototype Motors Description

Item	Test Specimen		Analysis Specimen	
	Unit1	Unit2	Unit3	Unit4
1. HP	7.5	50	250	250
2. Pole	4	4	4	4
3. Frame	213TD	326T	449TD	449T
4. Enclosure	TEAO	TEFC	TEAO	TEFC
5. S. F	1.15	1.15	1.15	1.15
6. V/φ/Hz	460/3/60	460/3/60	460/3/60	460/3/60
7. Design	NEMA B	NEMA B	NEMA B	NEMA B
8. Insulation System	Class H	Class H	Class H	Class H
9. Duty	Cont.	Cont.	Cont.	Cont.
10. Mounting	Flange	Foot	Flange	Foot

1. 서 론

우리 나라 원자력발전은 1978년 고리원전의 상업운전을 시작으로 현재 16기의 원전이 가동되고 있으며, 국내 총 발전량의 43%를 차지하는 주력에너지로서 국가경제발전의 원동력이 되고 있다.

그러나 원전설비의 안전에 관련된 저압유도전동기는 국내업체의 원자력 환경요건에 대한 이해부족과 기기검증기술의 취약으로 인하여 원전시장에 참여하지 못하고 있었으므로, 지금까지 안전관련 전동기는 전량 외국 선진 업체로부터 수입에 의존하여 왔다. 이에 당사는 수입 대체에 의한 외화낭비의 최소화과 국내 원전설비의 국산화를 위하여 안전 관련 저압유도전동기를 개발하게 되었다.

안전 관련 기기는 지진이나 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident), 주증기파관단사고(Main Steam Line Break) 등과 같은 원전의 설계기준사고(DBE) 이후에 원자로 냉각재 압력계계의 건전성을 유지하고, 원자로를 안전하게 정지시켜서 안전정지 상태로 유지하며, 방사선 피폭을 초래할 수 있는 사고를 방지하거나 사고결과를 완화시키기 위하여 작동되어야 하는 기기를 일컫는다. 따라서 안전 관련 저압유도전동기의 기능은 원자로의 비상정지, 격납건물 차폐, 원자로 노심냉각, 원자로 및 격납건물의 잔열 제거 또는 외부환경으로 방사선 물질의 누출을 막는데 필수적인 기기를 구동하는 것이다.

본 논문에서는 당사가 개발한 안전 관련 저압유도전동기에 대한 일련의 검증절차와 방법을 제시하였다.

2. 저압유도전동기의 기기검증

안전관련 전동기의 검증은 크게 내환경부문과 내진부문으로 구분할 수 있다. 이와 관련한 규격으로서, 내환경 검증 부문과 내진검증 부문은 각각 IEEE Std.323과 IEEE Std.344를 따랐으며, 연속운전 안전관련 전동기의 검증방법과 원리, 절차에 대한 기본적인 사항은 IEEE Std. 334를 적용하였다.

2.1 검증대상 기기

본 개발은 250HP 미만의 NEMA 3상 저압유도전동기 전체 기종에 대한 것이다. 그러나 NEMA 전기종에 대해

2.2 검증요건

Pump, Fan, Air Handling Unit 등 다양한 안전관련 기기의 구동원으로 사용될 수 있는 저압유도전동기를 포함 검증하기 위하여 Table 2.와 같은 환경조건을 선정하였다. 이는 국내 원전 보조기기건물(Balance of Plants) 전 지역의 환경조건을 포함하는 것이다.

Table 2. Applied Service Conditions

Item	Normal	Accident
1. Duration	40 years	365 days
2. Ambient Temperature	Max. 50°C	Max. 50°C
3. Pressure	Atmospheric	Atmospheric
4. Relative Humidity	90%	100%
5. Radiation	6.0E5 rads	TID* 1.0E7 rads
6. Seismic	Composite Required Response Spectrum(RRS)	

\* TID = Total Integrated Dose

요구응답스펙트럼(Required Response Spectrum)은 해당 기기가 설치되는 지역의 지진특성을 주파수대역으로 표시한 것으로서, 운전기준지진(OBE)과 안전기준지진(SSE)으로 구성되며 내진검증을 위한 기초자료가 된다. 본 검증에서는 영광원전 5&6호기, 울진원전 3 & 4호기와 울진원전 5&6호기의 가혹한 응답곡선을 조합하여 사용하였다. Fig. 1 은 본 검증에 사용된 RRS 곡선의 한 예를 나타낸다.

IEEE Std. 323에 따라 실제 검증시험은 보수적 검증을 위하여 상기의 환경조건(방사능, 요구응답스펙트럼)에 10% 여유(margin)를 더하여 검증요건으로 적용하였다 [2].

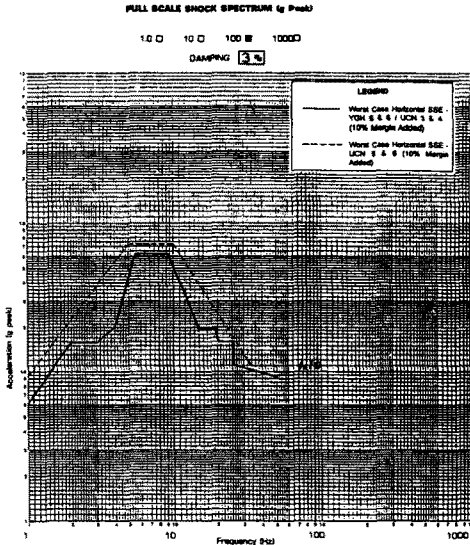


Fig. 1 Worst Case Horizontal SSE RRS Curves - YGN 5&6/UCN 3&4 and UCN 5&6

### 2.3 검증시험 및 해석

원자력발전소 환경요건과 내진요건을 만족시키기 위한 안전 관련 전동기의 검증절차는 크게 두 단계로 나뉘어진다. 첫째, 전동기의 검증수명 말기조건을 모의하기 위한 노화(aging)단계와 둘째, 지진과 같은 특정 설계기준 사고조건 하에서 기기의 구조적 건전성(structural integrity) 유지와 안전 관련 기능의 유지를 입증하는 설계기준사고검증(Design Basis Event Qualification)단계이다.

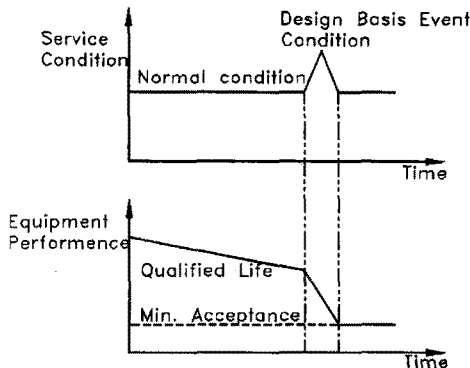


Fig. 2 Concept of Equipment Qualification

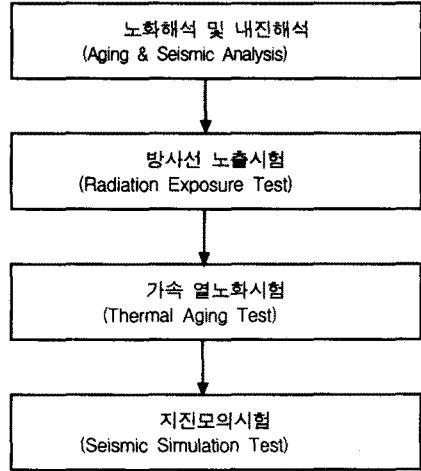


Fig. 3 Qualification Sequence

Fig. 3은 본 개발의 기기검증 절차를 간략화하여 나타낸 것이다. 전동기의 검증수명 말기조건을 모의하기 위하여 방사선 노출시험과 가속열노화시험을 수행하고, 설계기준사고검증을 위한 지진모의시험을 순차적으로 수행하였다.

각 검증시험 전, 후마다 전동기의 기본성능시험을 실시하여 안전 관련 기능 수행을 입증하였다. 기본성능시험 항목은 절연저항시험, 고정자 권선저항시험, 내전압시험, 무부하속도시험, 진동시험으로 구성하였다.

#### 2.3.1 노화해석

노화해석의 목적은 저압유도전동기를 구성하는 재질 중에서 노화메카니즘을 가지는 비금속재질에 대하여 요구수명 41년을 입증하고, 41년 수명을 만족하지 못하는 재질에 대하여 교체주기를 확립하는데 있다.

저압유도전동기의 수명에 영향을 미치는 여러 가지 노화메카니즘은 전동기의 운전조건을 검토하여 결정하였다. 저압유도전동기를 구성하는 비금속재질의 노화메카니즘에 영향을 미칠 수 있는 조건은 온도와 방사선으로서, 이 중 방사선은 시험에 의한 검증을 수행하므로 노화해석에서 제외시켰다.

시간-온도에 따른 노화해석을 수행하기 위해서는 각 비금속 재질의 온도에 따른 수명자료가 필요하지만, 현재 국내에는 이에 대한 자료가 부족하여 미국 Wyle Laboratories에서 수행하였다.

해석결과, 저압유도전동기의 절연물은 모두 요구수명을 만족하는 것으로 나타났으며, 그리스(grease)와 같이 요구수명 41년을 얻을 수 없는 비금속재질에 대해서는 교체 및 보충주기를 제시하였다[6].

#### 2.3.2 내진해석

2.2절에 언급된 지진환경요건하에서 당사 NEMA 전동기의 구조적 건전성을 보완평가하기 위하여 250HP (foot & flange mounting type) 전동기를 유한요소해석적 방법으로 내진해석을 수행하였다. 250HP (Fr.449) 전동기의 선정이유는 NEMA 저압유도전동기 중 무게와 구조적 측면에서 볼 때, 상대적으로 지진가속도에 취약하기 때문이다.

해석도구는 현재 상용 구조해석프로그램으로 널리 이용되고 있는 ANSYS release 5.6을 사용하였다. Fig. 4는 본 해석에 이용한 250HP, flanged mount type 전동기의 유한요소모델이다.

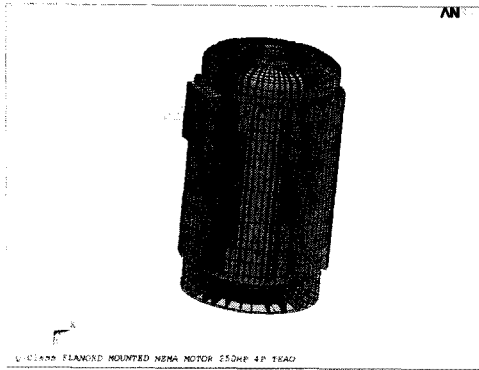


Fig. 4 Finite Element Model of 250HP Flanged mount Motor

내진해석의 방법은 해석 대상기기가 유연성 기기 (flexible equipment)일 경우에는 동적해석을 사용하며, 강성 기기(rigid equipment)일 경우는 정적해석을 적용한다[3][4]. 유연성 기기와 강성 기기의 구분은 기기의 1차 고유진동수가 영주기가속도(zero period acceleration)에 해당하는 주파수를 -통상 33Hz- 기준으로 이보다 큰 경우는 강성 기기로 분류하며 작을 경우는 유연성 기기로 간주한다.

본 해석에 사용된 250HP, flange type 전동기는 93.2Hz의 1차 고유진동수를 가지는 강성기기(rigid equipment)로서 영주기 가속도(ZPA) 값을 가진력으로 이용하는 정적해석 방법을 사용하였다.

올바른 강도평가를 위해서는 지진응력에다 전동기의 동작응력을 더해야 하는데, 본 해석에서는 전동기 토오크와 회전자의 불평형력에 따른 동작응력을 함께 고려하였다.

해석결과 250HP flange type 전동기와 foot type 전동기 모두 구조적으로 건전한 것으로 평가되었다. 표 3.은 가혹한 지진조건인 안전정지지진(SSE)에 대한 해석결과를 요약한 것이다.

Table 3. Results of Seismic Analysis for SSE(Safe Shutdown Earthquake)

Component	250HP Flange type (Unit 3)			250HP Foot type (Unit 4)		
	Result	Allow-able	Margin	Result	Allow-able	Margin
Motor Frame	33.3 (N/mm <sup>2</sup> )	114 (N/mm <sup>2</sup> )	3.42	52.5 (N/mm <sup>2</sup> )	114 (N/mm <sup>2</sup> )	2.17
Main Mounting Bolt	38.5 (N/mm <sup>2</sup> )	293 (N/mm <sup>2</sup> )	7.61	20.9 (N/mm <sup>2</sup> )	298 (N/mm <sup>2</sup> )	14.2
Conduit Box Bolt	34.8 (N/mm <sup>2</sup> )	295 (N/mm <sup>2</sup> )	8.47	35.9 (N/mm <sup>2</sup> )	294 (N/mm <sup>2</sup> )	8.19
Rotor Deflection	0.059 (mm)	0.7185 (mm)	12.18	0.027 (mm)	0.7185 (mm)	26.61

### 2.3.3 방사선 노출시험

이 시험은 방사선에 의하여 유도전동기를 구성하는 비 금속재료의 노화영향을 파악하기 위한 것이다.

방사선 노출량은 요구환경조건 1.0E7 rad에 10% 여유 (margin)를 더한 1.1E7 rad이다. 방사선원으로서 Cobalt-60을 사용하였으며, 시간당 발생률을 1.0E6 rad 를 넘지 않도록 하여 19.3시간동안 노출하였다. 노출시험

동안 시험용 전동기를 회전시키므로써 전동기 전체에 방사선이 골고루 피폭되도록 하였다.

방사선 노출시험 후 수행한 기본성능시험을 통하여 방사선 노출에 따른 전동기 성능에 이상이 없음을 확인하였다[7].

### 2.3.4 가속 열노화시험

가속 열노화시험은 원전수명 41년 동안 주위온도 50℃에서 전동기가 안전기능을 수행함을 입증하는 시험이다.

이러한 조건을 모의하기 위하여 주위온도 200℃(+5℃, -0℃)에서 1,365시간(56.9일) 동안 전동기를 가속 열노화시켰다.

열노화 후 요구되는 전동기 안전기능수행평가는 기본 성능시험을 통하여 이상 없음을 확인하였다[7].

### 2.3.5 지진모의시험

원전의 지진사고시에 전동기의 구조적 건전성과 회전자의 이탈성, 안전 기능수행여부를 평가하기 위하여 5회의 운전기준지진(OBE)과 1회의 안전정지지진(SSE)을 모의하였다.

시험용 전동기는 실제 원전에서의 설치 조건과 동일하도록 모의하기 위하여 고정 지그(jig)와 볼트(bolt)로 고정시키고, 고정 지그는 다시 시험 테이블(test table)에 용접으로 고정시켰다.

지진사고 상황에서 전동기의 안전 관련 기능을 입증하기 위하여 지진모의시험도중 528 VAC (480 VAC + 10% margin), 60Hz의 3상 전원을 공급하여 전동기를 부하 운전시키고 각 상(phase)의 전압과 전류를 모니터링 하였다. 7.5HP 전동기에 발전기(generator)를, 50HP 전동기에 펌프(pump)를 각각 부하기로 사용하였다.

지진을 모의하기 위한 3축 임의 가진시험(Triaxial Random Multifrequency Tests)은 전후, 좌우, 수직 3방향으로 각각 독립적인 성분을 동시에 가진하였다.

시험 횟수는 운전기준지진(OBE) 모의시험을 5회 실시한 후, 안전정지지진(SSE) 모의를 1회 실시하였다.

지진모의시험 도중에 기록된 전기적 모니터링 데이터와 모의시험 후 실시한 기본성능시험 및 안전관련 기능에 영향을 미치는 주요 부품 파손의 유무를 확인한 결과, 7.5HP 전동기와 50HP 전동기 모두 안전 관련 기능(safety-related function) 수행과 구조적 건전성(structural integrity)에 관한 요건을 만족하는 결과를 보였다.

Fig 5.는 3축 가진 시험테이블 위에 50HP 시험용 전동기가 부하기와 함께 설치된 시험전경이다.

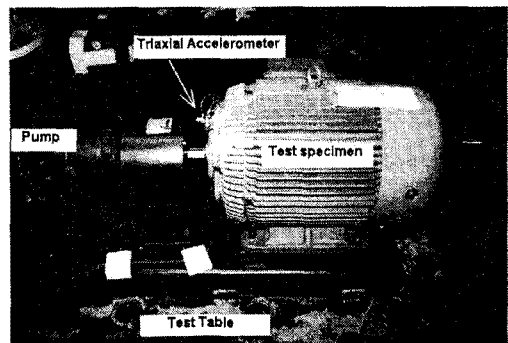


Fig. 5 Seismic Test Set-up for 50HP Motor

### 3. 결 론

본 논문은 원자력발전소에 사용되는 안전관련 저압유도전동기의 기기검증절차와 방법을 소개하였다. 당사는 본 연구를 통하여 개발한 안전 관련 저압유도전동기가 국내 원전의 다양한 환경요건에서 구조적으로 건전함과 동시에 그 기능을 충분히 수행함을 입증하였다.

현재 우리 나라는 2015년까지 한국표준형원전을 포함한 8기의 신규원전건설이 계획되어 있고, 동남아지역을 대상으로 해외시장진출을 위한 적극적인 정책을 전개하고 있다.

본 국산화개발의 의미와 중요성이 원전사업관련 업체 및 기관에 널리 인식되어 원전기기 국산화율을 높이고 전동기산업의 국제적 경쟁력확보에 큰 도움이 되기를 기대한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] IEEE Std. 334-1994, "Standard for Qualifying Continuous Duty Class 1E Motors for Nuclear Power Generating Stations"
- [2] IEEE Std. 323-1974, "Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations"
- [3] IEEE Std. 344-1987, "Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations"
- [4] KEPCO Technical Specification, Appendix 4I "Dynamic Qualification Criteria for Safety Related Equipment"
- [5] AISC "Manual of Steel Construction Allowable Stress Design", ninth edition, 1989.
- [6] Wyle Laboratories, "Qualification Plan for Class 1E Safety-Related Random Wound Electric Motors(up to 250HP)", No.43137P99, 1999.
- [7] Wyle Laboratories, "Qualification Test Report for Class 1E Safety-Related Random Wound Electric Motors(up to 250HP)", No.43137R01, 2001.
- [8] 고우식, 김 진, 허익구, 최병원, "원자력발전소 안전등급 대형유도전동기의 기기검증", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp.498~503, 2000.