

원자력발전소 안전등급 대형유도전동기의 기기검증

°고우식*· 김진*· 허익구*· 최병원*

Equipment Qualification of a Safety-related Large Induction Motor for Nuclear Power Plants

W.S. Ko, J. Kim, I.G. Hur and B.W. Choi

Key Words: Equipment Qualification(기기검증), Large Induction Motor(대형유도전동기), Safety-related(안전성관련), Nuclear Power Plants(원자력발전소)

Abstract

A safety-related equipment for use in Nuclear Power Plant should be needed an Equipment Qualification. This paper presents the approach, methods, philosophies, and procedures for qualifying the large squirrel-cage induction electric pump motors for use in ULCHIN 5&6 Nuclear Power Plants. In this paper, the method of qualification is a combination of type test and analysis method, which is composed of Radiation exposure test, Seismic simulation test, Thermal aging analysis for non-metallic materials and Seismic analysis. It is found that the motor performs its safety function with no failure mechanism under postulated service conditions.

1. 서론

원자력발전소의 안전관련 기기들은 원자로 및 원자로의 안전에 관련된 시설로서 고장 또는 결함 발생시 일반인에게 방사선 장해를 미칠 수 있다. 따라서 이 기기들은 정상적으로 운전될 때의 환경뿐만 아니라 운전 중 예상되는 극한상황 및 발전소의 설계기준사고로 인하여 발생할 수 있는 환경 하에서도 정상적으로 운전 가능성이 입증되어야 한다.

현재 일반 산업용 대형유도전동기는 국내에서 설계·제작능력을 보유하고 있음에도 불구하고 원자력발전소용 안전성관련 전동기는 이 기기의 운전요건에 대한 이해와 기기검증 시험 및 해석 기술이 취약하여 지금까지 기기 및 부품을 전량 수입에 의존하고 있는 상황이다. 이로 인해 기존

발전소의 수명이 다된 전동기 교체 및 부품조달에 있어 과도한 시간과 비용이 낭비되고 있으며, 이는 12~18개월마다 정기적으로 실시되고 있는 각 원자력발전소의 계획예방정비(Overhaul Test) 기간단축을 저해하는 요인이 되고 있다.

본 연구에서는 원자력발전소용 연속운전 전동기의 검증규격인 IEEE-STD-334[1]를 기초로 하여, 현재 건설중인 울진 원자력발전소 5&6호기 ESWP(Essential Service Water Pump)용 전동기에 대해 기기검증을 수행하였으며, 이를 통해 대형유도전동기에 대한 기기검증 절차와 내용을 제시하였다.

2. 대형유도전동기 기기검증의 개요

원자력발전소 연속운전 안전성 관련 전동기에 대한 검증방법과 원리, 절차에 대해서는 IEEE-STD-334[1]에 제시되어 있으며, 이 기기검

* (주)효성 중공업연구소

증은 크게 내환경 검증부문과 내진 검증부문으로 나뉘어져 있다. 이들 각 부문의 수행방법은 IEEE-STD-323[2]과 IEEE-STD-344[3]에 제시되어 있다. 기기검증과 관련하여 이와 같이 규격에서 그 내용을 제시하고는 있지만 대원칙 만을 제시하고 있기 때문에 구체적인 검증절차 및 방법은 규격을 근거로 하여 검증을 수행하는 기관에서 결정해야 한다. 이 때문에 해외의 기기검증 기관에서 수행한 검증내용들을 보면 각 기관별로 그 방향과 절차들에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 대상으로 한 ESWP 전동기는 비상원자로 정지, 격납용기 격리, 원자로 노심 냉각, 격납용기와 원자로의 잔열제거 지원 또는 주위에 방사선 물질 노출을 방지하는 역할을 수행하는 주요기기이다.

ESWP 전동기의 기기검증은 기기의 요구운전 조건에서 제시된 주위온도, 압력, 상대습도, 방사선 노출, 원자력발전소 부지의 지진가속도 등에 대해 내환경검증과 내진검증으로 나누어 수행하였다. 검증결과 일반적인 원자력발전소의 요구수명 40년과 사고시 수명 1년 동안 전동기가 정상적으로 작동함이 입증되었다.

3. 기기검증

기기검증은 시험, 해석, 시험과 해석, 운전경험에 의한 방법에 의해 수행할 수 있는데, 본 기기검증은 대상 전동기의 과다한 무게와 치수를 고려하여 시험과 해석적 방법을 조합해서 수행하였다. 별도로 제작한 축소모델 전동기에 대해서는 기기검증 시험을 하였으며 실제 검증대상 전동기는 축소모델 전동기와 유사성 해석 후 기기검증 해석을 수행하였다.

3.1 검증 및 시험전동기 사양

시험용 축소모델 전동기는 실제 검증대상 전동기와 유사성을 확보토록 하기 위해 구조, 재질, 베어링 형식 등을 동일하게 하였으며, 동일한 제작공정을 통해 제작을 하였다. Table 1.은 검증 및 시험전동기의 사양을 나타낸 것이다.

기기검증 문서에는 실제 검증대상 전동기와 시

험용 축소모델의 유사성을 입증하는 이러한 사항들이 구체적으로 명시되어야 한다.

Table 1. Comparison between Actual and Prototype Motors

Item	Actual Motor	Prototype Motor
Power(HP)	1375	150
RPM	720	720
Voltage(kV)	4.0	4.0
Insulation Class	F-class	F-class
Mounting	Vertical type	Vertical type
Bearing	Anti-Friction	Anti-Friction
Weight(kg)	6,000	1,800

3.2 운전조건

기술사양서에 제시된 ESWP 전동기의 운전조건은 Table 2.와 같다.

Table 2. Service Conditions

Item	Normal	Accident
Duration	40 years	365 days
Ambient Temp.(Max.)	104°F(40°C)	104°F(40°C)
Pressure	Atmospheric	Atmospheric
Relative Humidity	Max. 90%	Max. 90%
Radiation	Negligible	Negligible
Seismic	Floor Response Spectra(FRS) Curves*	

※기기가 설치되는 건물바닥의 지진가속도(생략)

본 검증에서 적용한 운전조건은 원자력 안전성 관련 검증이 일반적으로 실제 조건보다 보수적으로 수행됨을 고려하여 Table 3.의 조건을 적용하

였다.

Table 3. Applied Service Conditions

Item	Normal	Accident
Duration	40 years	365 days
Ambient Temp.(Max.)	104°F(40°C)	104°F(40°C)
Pressure	Atmospheric	Atmospheric
Relative Humidity	Max. 95%	Max. 95%
Radiation	1.0E7 rads	1.0E7 rads
Seismic	Required Response Spectra (RRS) Curves*	

* RRS Curves는 FRS Curves를 포락(envelope)하여야 하며, Fig 1.은 본 검증에 사용된 RRS Curves의 한 예를 나타낸 것이다.

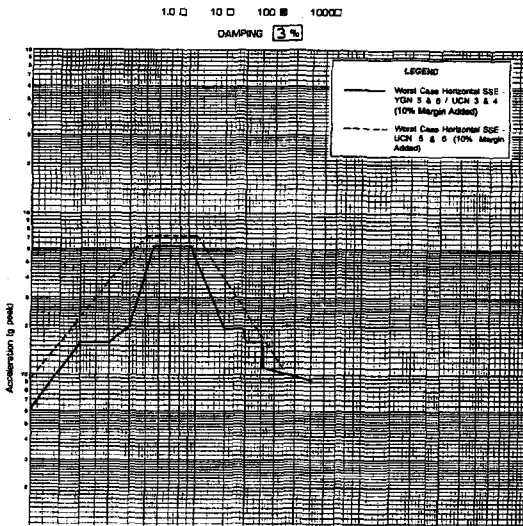


Fig 1. Worst Case Horizontal SSE RRS Curves - YGN 5&6/UCN 3&4, and UCN 5&6

3.3 기기검증 절차

기기검증은 내환경검증과 내진검증으로 구성되어 있으며 각 시험에 따른 노화의 복합상승 효과

를 고려하기 위해 동일한 전동기로 Fig 2.에 주어진 절차에 따라 검증을 수행하였다.

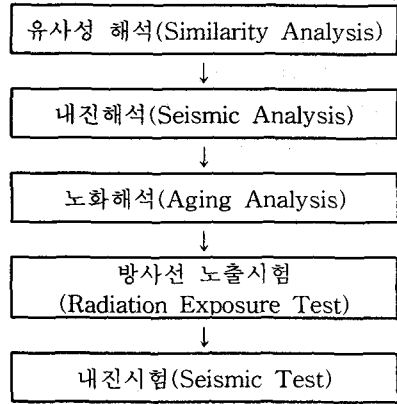


Fig 2. Qualification Sequence

3.4 내진검증

내진검증은 IEEE-STD-344[3]에 따라서 수행하였다.

3.4.1 내진해석

내진해석은 전동기가 설치된 위치에서 발생가능한 최대 지진이 가해졌을 경우 전동기에서 발생하는 최대 응력이 전동기에 사용된 재료의 허용응력을 초과하지 않음을 입증하는 해석으로서 검증대상 전동기에 대해 해석을 수행을 하였다. 해석수행 방법은 해석 대상이 강체기인가 유연기기인가에 따라 정적해석과 동적해석으로 구분되며, 또 동적해석은 보수적 해석적용의 유무에 따라 단순동적해석과 상세동적해석으로 나뉘어진다.

본 연구에서는 일반적으로 원자력 안전성 관련 기기검증이 보수적으로 수행되는 점을 고려하여 보수적이면서 신속한 해석방법인 단순동적해석 방법을 적용하였다.

해석에 사용된 지진가속도는 전동기가 설치되는 장소의 FRS(Floor Response Spectrum) Curve를 포함하는 RRS(Required Response Spectrum) Curve의 값을 이용하였으며, 이때 사용된 댐핑(Damping) 조건은 기술사양서에 따라 OBE(Operating Basic Earthquake) 경우 2%,

SSE(Safe ShutDown Earthquake) 경우 3%를 사용하였다.

지진가속도 외에 전동기 자중과 운전토크에 의한 외력도 함께 고려를 하였으며, 각 방향 지진가속도에 의한 응력의 조합은 SRSS(Square Root Sum of Square) 방법을 적용하였다.

해석에 사용한 유한요소해석 프로그램은 ANSYS Release 5.5이며 Fig 3.은 전동기의 유한요소모델, Fig 4.는 모드형상을 나타낸 것이다.

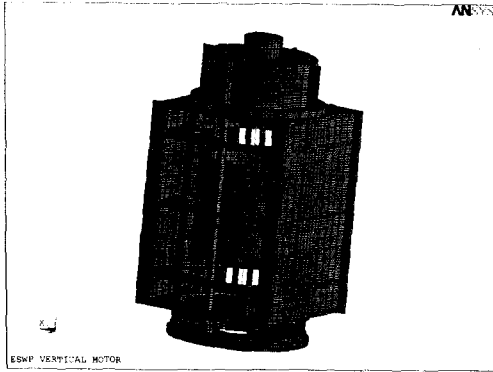


Fig 3. FEM of ESWP Motor

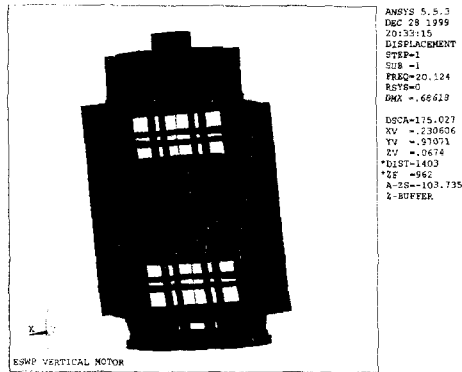


Fig 4. Mode Shape of ESWP Motor

Table 4.는 OBE조건과 SSE조건에 대한 전동기 응력해석 결과를 요약한 것으로서, 여유(Margin)는 전동기에 사용된 재료의 허용응력(Allowable Stress)[5]이 하중조건하에서 전동기에 발생하는 최대응력의 몇 배인가를 나타내는

것이며 여유(Margin)가 1이상이면 구조적으로 안전함을 의미한다. Table 4.의 여유(Margin) 값으로부터 전동기 각 부위와 전동기에 사용된 Bolt가 모두 안전함을 알 수 있다.

Table 4. Summary of the Stress Margin

항 목	Margin	
	OBE	SSE
Motor Frame	3.10	3.79
Air Chamber	5.69	6.84
Main Base Mounting Bolts	1.88	1.36
Air Chamber Mounting Bolts	10.6	8.12
Main Terminal Box Mounting Bolts	3.12	2.58

3.4.2 내진시험

내진시험의 목적은 지진모의 시험조건하에서 전동기의 운전성과 전동기 회전부의 이탈성(Missile)이 없음을 입증하는 것으로서, 미국의 기기검증 전문기관인 Wyle Laboratories에서 시험용으로 제작된 축소모델에 대해 수행하였다.

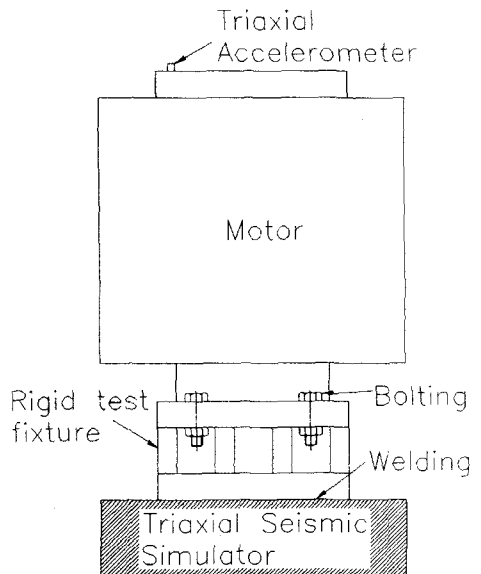


Fig 5. Experiment Setup for the Seismic Simulation

시험은 3축 가진테이블에 검증 전동기가 운전되는 실제 방식과 유사하게 시험용 전동기를 고정시켰다. 먼저 시험용 전동기의 고정을 위해 가진테이블에 Rigid test fixture를 용접으로 고정한 후 전동기와 Rigid test fixture는 볼트로 고정을 시켰다. Fig 5는 내진시험을 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

시험은 무부하의 동작상태에서 RRS (Required Response Spectrum) Curve에 10%의 여유를 더한 TRS(Test Required Spectrum) Curve에 따라 OBE(Operating Basis Earthquake) 시험 5회, SSE(Safe ShutDown Earthquake) 시험 1회를 연속적으로 수행하였다.

시험결과 지진 조건하에서도 전동기가 정상적으로 작동하였으며 전동기 회전부의 부품 이탈현상이 발생되지 않았으며, 기본성능시험(절연저항, 고전자 권선저항, 무부하 속도시험)에서도 변화가 없음을 확인하였다[8].

3.5 내환경검증

내환경검증은 IEEE-STD-323[2]에 따라서 수행하였다.

3.5.1 노화해석

노화해석의 목적은 전동기가 주어진 환경조건에서 요구수명 41년 동안 안전 관련 기능을 수행함을 입증하기 위하여, 전동기를 구성하는 재질 중에서 노화메카니즘을 갖는 비금속재질에 대하여 41년간의 수명을 입증하고, 41년 수명을 가지지 못하는 재질에 대하여 교체 주기를 확립하는데 있다.

전동기 수명에 영향을 미칠 수 있는 여러 노화메카니즘은 전동기가 검증되어야 하는 운전조건을 검토하여 결정하였다. ESWP 전동기의 운전조건 중 노화메카니즘에 영향을 미칠 수 있는 조건은 온도와 방사선으로서, 이중 방사선은 별도 노출시험에 의해 검증을 수행하기 때문에 노화해석에서 제외시켰다.

온도에 따른 노화해석을 수행하기 위해서는 각 비금속 재질의 온도에 따른 수명 자료가 필요한데, 현재 국내에는 이에 대한 자료가 부족하여 미국 Wyle Laboratories에서 수행하였다.

해석결과 절연물과 같은 대부분의 비금속 재질

이 요구수명을 만족하는 것으로 나타났으며[7], 요구수명 41년을 얻을 수 없는 Grease 같은 기타 비금속 재질에 대해서는 교체 및 보충주기를 제시하였다.

3.5.2 방사선 노출시험

방사선 노출시험은 방사선에 의한 비금속 재질의 영향을 파악하기 위한 시험으로써, 시험 전, 후의 전동기 기본성능시험을 통하여 방사선 노출에 따른 전동기의 이상 유무를 확인한다.

KEPCO Technical Specification[6]에 의하면 ESWP 전동기에 대한 방사선 노출량의 영향은 무시해도 되지만 보다 일반적인 검증을 위해 방사선 노출량 요건을 1.0E7 rads TID(Total Integrated Dose)로 적용했다. 보수적 검증을 위해 IEEE-STD-323[2]에 따라 적용 방사선 요건에 10%의 여유(margin)를 더했다. 그러므로, 실제 시험에 적용한 방사선 요건은 1.1E7 rads TID 이다. 방사선원은 Cobalt-60을 사용하였으며, 시간당 발생율이 1.0E6 rads를 넘지 않도록 노출시켰다. 또한, 노출시험 동안 시험용 전동기를 회전시킴으로써 전동기 전체에 방사선이 골고루 피폭되도록 하였다.

방사선 노출시험 후 실시한 전동기 기본성능 시험결과, 전동기 운전에 이상이 없음을 확인하였다[8].

4. 결론

국내 원자력발전소의 상용발전 역사가 20년을 넘어섬에 따라 기존 안전성관련 전동기에 대한 보수와 교체에 대한 수요가 매년 꾸준히 발생하고 있는 실정이다. 본 연구는 이러한 안전성관련 대형유도전동기의 개발에 필수적인 기기검증 사례 제시와 안전성관련 대형유도전동기의 국산화를 위해 수행되었다.

이제까지 외국에서 수입해 온 원자력발전소 안전성관련 기기들을 국산화하는데 큰 어려움이 되었던 기기검증에 대하여 본 논문에서 제시한 기기검증의 절차와 사례가 관련분야에 도움이 될 것으로 기대한다.

참고문헌

- (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) U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC Regulatory Guide 1.100, Seismic Qualification of Electric and Mechanical Equipment for Nuclear Power Plants
- (5) AISC Manual of Steel Construction Allowable Stress Design, ninth edition
- (6) KEPCO Technical Specification No. 9-132-N201, "Essential Service Water Pumps and Screen Wash Pumps" for ULCHIN 5&6
- (7) Wyle Laboratories Aging Analysis Report No. 41813A99
- (8) Wyle Laboratories Test Report No. 41813ESWP99