

원자력 발전소 안전등급 대형유도전동기의 기기검증

이형우*, 고우식**, 류정현#, 박노길*

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

Hyoung Woo Lee*, Woo Sik Ko**, Jeong Hyeon Ryu# and No Gill Park*

ABSTRACT

A safety-related equipment for the nuclear power plant should be needed an equipment qualification. In this paper, 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 were presented. The method of qualification is a combination of experimental test and analytic method, which is composed of radiation exposure test, seismic simulation test, thermal aging analysis for non-metallic materials, and seismic analysis. The results showed that the motor performed its safety function with no failure mechanism under postulated service conditions.

Key Words : Equipment Qualification (기기 검증), Large Induction Motor (대형유도전동기), Safety-related (안전성 관련), Nuclear Power Plants (원자력 발전소)

1. 서론

원자력발전소의 안전관련 기기들은 원자로 및 원자로의 안전에 관련된 시설로서 고장 또는 결함 발생시 외부로 방사선 장애를 야기할 수 있다. 따라서 이 기기들은 정상적으로 운전될 때의 환경뿐만 아니라 운전 중 예상되는 극한상황 및 발전소의 설계기준사고로 인하여 발생할 수 있는 환경하에서도 정상적으로 운전가능함이 입증되어야 한다.

현재 일반산업용 대형유도전동기는 국내에서 설계, 제작능력을 보유하고 있음에도 불구하고 원

자력 발전소용 안전성관련 전동기는 이 기기의 운전요건에 대한 이해와 기기검증 시험 및 해석기술이 취약하여 현재까지 기기 및 부품을 전량수입에 의존하고 있는 상황이다. 이로 인해 기존 발전소의 수명이 다된 전동기 교체 및 부품조달에 있어 과도한 시간과 비용이 낭비되고 있으며, 이는 12~18 개월마다 정기적으로 실시되고 있는 각 원자력 발전소의 계획예방정비(Overhaul Test) 기간의 단축을 저해하는 요인이 되고 있다.¹⁻⁸

본 연구에서는 원자력 발전소용 연속운전 전동기의 검증규격인 IEEE-STD-334⁹를 기초로 하여, 울진 원자력 발전소 5, 6 호기의 ESWP(Essential

☞ 접수일: 2006년 8월 8일; 게재승인일: 2007년 4월 9일

* 부산대학교 기계공학부

** ㈜효성중공업

부산대학교 기계기술연구소

E-mail: 8jhryu@gmail.com Tel. (051) 510-1475

Service Water Pump)용 전동기에 대해 기기검증을 수행하였으며, 이를 통해 대형유도전동기에 대한 기기검증 절차와 내용을 제시하였다.

2. 대형유도전동기 기기검증의 개요

원자력 발전소 연속운전 안전성에 관련된 전동기의 검증방법과 원리, 절차에 대해서는 IEEE-STD-334⁹ 제시되어 있으며, 이 기기검증은 크게 내환경 검증부문과 내진 검증부문으로 나뉘어져 있다. 내환경 검증은 온도, 압력, 습도, 방사선등의 환경조건에 대한 기기의 성능을 검증하고, 내진 검증은 지진부하에 대해 구조적 건전성, 내압력 건전성, 운전성에 대한 기기의 성능을 검증한다. 이들 각 부문의 수행방법은 IEEE-STD-323¹², IEEE-STD-344¹³ 에 그 내용이 제시되어 있으나 대인척 만을 제시하고 있기 때문에 구체적인 검증절차 및 방법은 규격을 근거로 하여 검증을 수행하는 기관에서 결정해야 한다. 이러한 이유로 해외의 기기검증 기관에서 수행한 검증내용들을 보면 각 기관별로 그 방향과 절차들에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

본 연구의 ESWP 전동기는 비상원자로 정지, 격납용기 격리, 원자로 노심 냉각, 격납용기와 원자로의 잔열 제거 지원 또는 주위에 방사선 물질 노출을 방지하는 역할을 수행하는 주요 기기이다. ESWP 전동기의 기기검증은 기기의 요구운전조건에서 제시된 주위온도, 압력, 상대습도, 방사선 노출, 원자력발전소 부지의 지진가속도 등에 대해 내환경검증과 내진검증으로 나누어 수행하였고¹⁴ 검증결과 일반적인 원자력발전소의 요구수명 40 년과 사고시 수명 1 년 동안 전동기가 정상적으로 작동함이 입증되었다.

3. 기기검증

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

Table 1 Comparison between actual and prototype motors

Item	Actual motor	Prototype motor
Power (HP)	1,375	150
RPM	720	720
Voltage (KV)	4.0	4.0
Weight (Kg)	6,000	1,800
Insulation class	F-class	F-class
Mounting	Vertical type	Vertical type
Bearing	Anti-friction	Anti-friction

Table 2 Service Conditions

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

* 기기가 설치되는 건물바닥의 지진가속도

Table 3 Service Conditions

Item	Normal	Accident
Duration	40 years	365 days
Max. Ambient Temperature	104°F (40°C)	
Pressure	Atmospheric	
Relative Humidity	Max. 95%	
Radiation	1.0e7 rads	
Seismic	Required Response Spectra (RRS) Curves [*]	

* RRS Curves 는 FRS Curves 를 포함(envelope)하여야 하며, Fig. 1 은 본 검증에 사용한 RRS Curves 의 한 예를 나타낸 것이다.

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.

기기검증에서는 실제 검증대상 전동기와 시험용 축소모델의 유사성을 입증하는 이러한 사항들

이 구체적인 명시가 요구되어진다.

3.2 운전조건

기술사양서에 제시된 ESWP 전동기의 운전조건은 Table 2 와 같다. 그러나 본 검증에서는 원자력 안전성관련 검증이 일반적으로 실제 조건보다 보수적으로 수행됨을 고려하여 Table 3 의 강화된 조건을 적용하였다.¹⁰⁻¹¹

3.3 기기검증 절차

기기검증은 내환경검증과 내진검증으로 구성 되어 있으며 각 시험에 따른 노화의 복합상승 효과를 고려하기 위해 동일한 전동기로 Fig. 2 에 주어진 절차에 따라 검증을 수행하였다.

3.4 내진검증

내진검증은 IEEE-STD-344¹³ 에 따라서 수행하였다.

3.4.1 내진해석

내진해석은 전동기가 설치된 위치에서 발생가능한 최대 지진이 가해졌을 경우 전동기에서 발생하는 최대 응력이 전동기에 사용된 재질의 허용응력을 초과하지 않음을 입증한다. 해석수행 방법은 해석 대상이 강체기인가 유연기인가에 따라 정적해석과 동적해석으로 구분되며, 또 동적해석은 보수적 해석적용의 유무에 따라 단순동적해석과 상세동적해석으로 나뉘어 진다.

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

해석에 사용된 지진가속도는 전동기가 설치되는 장소의 건물 바닥이나 벽의 층 응답 곡선(FRS: Floor Response Spectrum)을 포함하는 요구 응답 곡선(RRS: Required Response Spectrum)의 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.

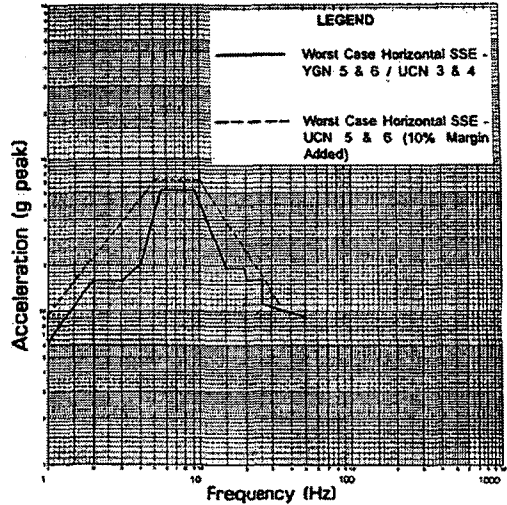


Fig. 1 Worst Case Horizontal SSE RRS Curves – YGN 5&6/UCN 3&4, and UCN 5&6

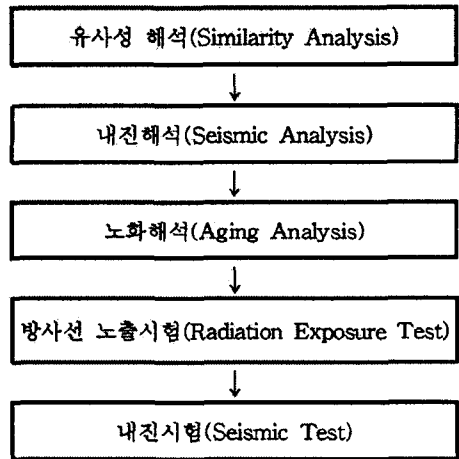


Fig. 2 Qualification Sequence

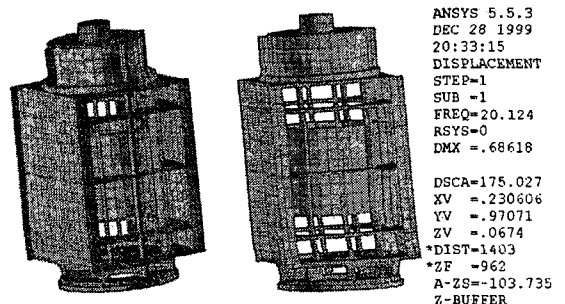


Fig. 3 FEM(left) and Mode Shape(right) of ESWP Motor

Table 4 Summary of Stress Margin

Item	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

해석과정에서 ANSYS 에 의해 유한요소해석을 수행하였고, Fig. 3 에 전동기의 유한요소모델, Fig. 4 에 모드형상을 나타내었다. Table 4 는 OBE 조건과 SSE 조건에 대한 전동기 응력해석 결과를 요약한 것으로서, 여유(Margin)는 전동기에 사용된 재질의 허용응력(Allowable Stress)¹⁴이 하중조건하에서 전동기에 발생하는 최대응력의 몇 배인가를 나타내는 것이며 여유(Margin)가 1 이상이면 구조적으로 안전함을 의미한다. Table 4 의 여유(Margin) 값으로부터 전동기 각 부위와 전동기에 사용된 Bolt 가 모두 안전함을 알 수 있다.

3.4.2 내진시험

내진시험의 목적은 지진 모의 시험조건하에서 전동기의 운전성과 전동기 회전부의 이탈성(Missile)이 없음을 입증하는 것으로서, 미국의 기기 검증 전문기관인 Wyle Laboratories 에서 시험용으로 제작된 축소모델에 대해 수행하였다.

시험은 3 축 가진테이블에 검증 전동기가 운전되는 실제 방식과 동일하게 시험용 전동기를 고정시켰다. 먼저 시험용 전동기의 고정을 위해 가진테이블에 Rigid test fixture 를 용접으로 고정한 후 전동기와 Rigid test fixture 는 볼트로 고정을 시켰다. Fig. 4 는 내진시험을 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험은 무부하의 동작상태에서 곡선에 10%의 여유를 더한 TRS(Test Required Spectrum) 곡선에 따라 OBE(Operating Basis Earthquake) 시험 5 회, SSE(Safe Shutdown Earthquake) 시험 1 회를 연속적으로 수행하였다.

시험결과 지진 조건하에서도 전동기가 정상적으로 작동하였으며 전동기 회전부의 부품 이탈현상이 발생되지 않았으며, 기본성능시험(절연저항, 고정자 권선저항, 무부하 속도시험)에서도 변화가 없음을 확인하였다.¹⁵

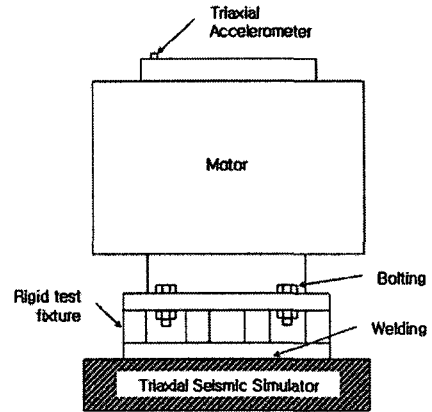


Fig. 4 Experiment Setup for the Seismic Simulation

3.5 내환경검증

내환경검증은 IEEE-STD-323¹² 에 따라서 수행하였다.

3.5.1 노화해석

노화해석의 목적은 전동기가 주어진 환경조건에서 요구수명 41 년(요구수명 40 년, 사고시 수명 1 년)동안 안전 관련 기능을 수행함을 입증하기 위하여, 전동기를 구성하는 재질 중에서 노화메카니즘을 갖는 비금속재질에 대하여 41 년간의 수명을 입증하고, 41 년 수명을 가지지 못하는 재질에 대하여 교체 주기를 확립하는데 있다.¹⁵

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 Laboratories 에서 수행하였다.

Table 5 는 운전조건하에서 주요 비금속재질에 대한 수명데이터이고, 본 연구의 해석결과 절연물과 같은 대부분의 비금속 재질이 요구수명을 만족하는 것으로 나타났으며, 요구수명 41 년을 얻을 수 없는 Grease 같은 기타 비금속 재질에 대해서는 교체 및 보충주기를 제시하였다.

Table 5 Aging Matrix

Material	Criteria (year)	Heat rise (°C)	Radiation threshold (rads)	Expected life (year)
Polyamide Imide Enameled Wire	123	64	1.0E7	5.39E+03
Glass Yarn	123	64	1.0E8	UNK
Epoxy Insulation Varnish	123	64	2.0E8	3.41E+03
Kapton Tape	123	64	1.5E8	2.77E+06
Mica Tape		NOT AGE SENSITIVE		
Epoxy Glass Laminate	123	64	2.5E9	4.46E+03
Solventless Epoxy Resin Varnish	123	64	2.0E8	7.51E+06

* 습도는 절연시스템 파괴에 있어 2 차적 역할(갈라진 틈새를 통해 전기적 경로 제공)만 하고 노화 메커니즘에 영향을 미치지 않기 때문에 절연물 수명평가에 영향을 주지 않는다.

Table 6 Function Tests

Item	Acceptance criteria	Baseline function test	Post-Radiation function test	Result
Insulation resistance (ohms)	greater than 1.0E6	3.5E10	7.6E10	Pass
Stator winding resistance (ohms)	A-B	7.093	7.108	Pass
	B-C	within $\pm 10\%$	7.096	
	C-A		7.095	
No load speed (RPM)	within $\pm 10\%$	719.8	720.2	Pass

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 Specification¹⁶에 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-3232에 따라 적용 방사선 요건에 10%의 여유(margin)를 더했다. 그러므로, 실제 시험에 적용한 방사선 요건은 1.1E7 rads TID이다. 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, Table 6에 나타난 바와 같이 허용기준을 만족함을 확인하였다.

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 사례제시와 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.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. "Regulatory Guide 1.92, Combination of modes and Spatial Components in Seismic Response Analysis, U.S.," Atomic Energy Commission, 1974.
2. Teemu, R. and Pia, O., "Assessing the maintenance unit of a nuclear power plant – identifying the cultural conceptions concerning the maintenance work and the maintenance organization," Safety Science, Vol. 44, pp. 821-850, 2006.
3. Serhat, S., Emine, A. and Erding, T., "Elman's recurrent neural network applications to condition monitoring in nuclear power plant and rotating machinery," Engineering Application of Artificial intelligence, Vol. 16, pp. 647-656, 2003.
4. Roos, E., Herter, K. H. and Schuler, X., "Lifetime management for mechanical systems, structures and components in nuclear power plants," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 83, pp. 756-766, 2006.
5. Baxter, F., "The dangers of bypassing thermal overload relays in nuclear-power plant motor operated valve circuits," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 99, pp. 2287-2291, 1980.
6. Yeager, K., Willis, J., Bloethe, W., Deeb, N. and Shah, S., "Modeling of emergency diesel generators in an 800-megawatt nuclear-power-plant," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, pp. 433-441, 1993.
7. Mukhopadhyay, S. and Chaudhuri, S., "A feature-based approach to monitor-operated valves used in nuclear power plants," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 42, pp. 2209-2220, 1995.
8. Lindenmeyer, D., Mosherf, A., Schaeffer, C. and Benge, A., "Simulation of the start-up of a hydro power plant for the emergency power supply of a nuclear power station," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, pp. 163-169, 2001.
9. "IEEE Std. 334, Standard for Qualifying Continuous Duty Class 1E Motors for Nuclear Power Generating Stations," IEEE Standard, 1994.
10. Bohm, G. J., "Present and future of equipment qualification for dynamic loads," Nuclear engineering and design, Vol. 59, No. 1, pp. 143-148, 1980.
11. Antaki, G. A. and Eder, S. J., "Use of Seismic Experience Data in National Codes and Standards for Equipment Qualification," Current issues related to nuclear power plant structures, equipment and piping, NCSU, pp. VIII-4, 1994.
12. "IEEE Std. 323, Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," IEEE Standard, 1974.
13. "IEEE Std. 344, Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," IEEE Standard, 1987.
14. Schiff, A. J. and Kempner, L., "Issues and Guidance for Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 693 Equipment Qualification Tests," Lifeline earthquake engineering, ASCE, pp. 607-616, 2003.
15. Gunther, W. E., Higgins, J. C. and Aggarwal, S. K., "The effect of plant aging on equipment qualification and human performance issues related to license renewal," Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, pp. 1419-1423, 1991.
16. KEPCO(Korea Electric Power Corporation) Technical Specification No. 9-132-N201, "Essential Service Water Pumps and Screen Wash Pumps," for ULCHIN 5&6.