

원자력발전소 가혹환경용 안전관련 고압유도전동기의 기기검증

김진, 이인우, 오영진, 최원호
(주)효성 중공업연구소

Equipment Qualification of Class 1E Safety-Related Form Wound Electric Motor for Harsh Zone of Nuclear Power Plants

J. Kim, I.W. Lee, Y.J. Oh, W.H. Choi
Hyosung Co. Industrial Performance Group, R&D Institute

Abstract - 원자력발전소의 안전과 관련된 기기는 원전의 정상상태 운전조건뿐만 아니라 원전의 설계기준사고 조건에서도 기기의 안전관련 기능을 충분히 수행할 수 있음이 입증되어야만 한다. 아울러 기기의 설치 환경은 원전의 설계기준사고조건(DBE))으로서 지진만이 고려되는 온화한 환경(mild zone)과 냉각재상실사고(LOCA), 주증기관파단사고(MSLB) 등과 같이 고온, 고압 등의 환경요건이 급격히 변화하는 가혹한 환경(harsh zone)으로 구별되므로 안전관련 기기의 검증 또한 이러한 환경요건에 따라 수행되어야 한다. 본 연구에서는 당사가 개발한 가혹환경용 안전관련 고압전동기의 개발사례를 중심으로 가혹환경요건에 대한 기기의 검증절차와 방법을 제시하였다.

1. 서론

최근 고유가와 교토기후협약 등의 국제정세 속에서 각국은 에너지의 안정적 확보를 위하여 원자력발전소에 또다시 관심을 모으고 있다. 2005년 8월 기준으로 전 세계에서 운전 중인 원전은 총 440기인데 신규원전의 건설과 계획이 135기에 이른다. 중국, 인도를 비롯한 신흥 공업국과 함께 미국을 위시한 선진국들도 신규원전건설 붐의 대열에 참여하고 있는 실정이다. 우리나라의 원자력발전은 1978년 고리원전의 상업운전을 시작으로 현재 20기의 원전이 운영 중에 있으며, 국내 총 발전량의 약 40%를 담당하고 있다. 아울러 2015년까지 8기의 한국표준형원전을 더 신설할 계획이다.

그러나 원전설비 중 안전관련 유도전동기의 국산화가 이루어지기 시작한 것은 최근의 일이며 가혹환경용 고압 유도전동기는 아직도 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이에 당사는 온화환경용 안전관련 유도전동기의 개발경험을 바탕으로, 국내 원전설비의 국산화와 해외원전 기자재수출기반의 확대를 위하여 가혹환경용 안전관련 고압전동기를 개발하게 되었다. 이러한 안전관련 전동기의 기능은 원자로의 비상정지, 격납건물 차폐, 원자로의 노심냉각, 원자로 및 격납건물의 잔열제거 또는 외부환경으로 방사선 물질의 누출을 막는데 필수적인 기기를 구동하는 것이다.

본 논문에서는 당사가 개발한 가혹환경용 안전관련 고압전동기에 대한 검증절차와 방법을 제시하고자 한다.

2. 고압유도전동기의 기기검증

가혹환경용 안전관련 고압전동기의 검증 역시 내환경 부문과 내진부문으로 나뉜다. 이와 관련한 규격으로서, 내환경 검증부문과 내진검증부문은 각각 IEEE Std. 323 과 IEEE Std. 344를 참고하였으며, 연속운전 안전관련 전동기의 검증방법과 원리, 절차에 대한 기본적인 사항은 IEEE Std. 334를 적용하였다.

2.1 검증 및 대상기기

기기의 검증은 시험, 해석, 시험과 해석의 조합, 운전 경험의 방법으로 수행할 수 있는데 본 연구에서는 시험과 해석의 조합적 방법으로 수행하였다. 시험에 이용될 시험용 전동기는 실제 원전에 설치될 안전관련 전동기와 유사성을 갖도록 구조, 재질, 등의 기본적 설계와 제작공정을 동일하게 적용하였다[1]. Table 1.은 시험용 전동기의 사양을 나타낸 것이다.

Table 1. Test Specimen Motor Description

Item	Test Specimen Motor	Remark
1. Power(HP)	150	-
2. RPM	720	-
3. Voltage(V)	4000	-
4. Phase	3	-
5. Insulation System	Class F	-
6. Duty	Continuous	-
7. Mounting	Vertical type	-
8. Bearing	Anti-Friction	-
8. Weight(kg)	1,800	-

2.2. 검증요건

다양한 안전관련 기기의 구동원으로 사용될 수 있는 고압유도전동기를 포괄검증하기 위하여 Table 2.와 같은 환경조건을 검증요건으로 선정하였다.

Table 2. Applied Service Conditions

Item	Normal	Accident
1. Duration	40 years	365 days
2. Ambient Temperature	50°F ~ 122°F	122°F for 365 days Max. 340°F for 2 hr
3. Relative Humidity	0 ~ 95%	Max. 100%
4. Radiation	TID* 1.0E8 rads	
5. Seismic	Composite Required Response Spectrum(RRS)	

* TID = Total Integrated Dose

요구응답스펙트럼(Required Response Spectrum)은 해당기기가 설치되는 지역의 지진특성을 주파수대역으로 표시한 것으로서, 운전기준지진(OBE)과 안전정지기준지

진(SSE)으로 이루어지며 내진검중에 활용된다. 본 개발에서는 국내원전(영광원전 5&6호기, 울진원전 3&4호기, 5&6)의 가혹한 지진응답곡선을 조합한 것을 이용하였다. Fig. 1은 본 검중에 사용된 요구응답스펙트럼의 한 예를 나타낸다. 이 곡선은 IEEE Std. 323에 의거하여 10%의 여유(margin)가 포함된 것이다[2].

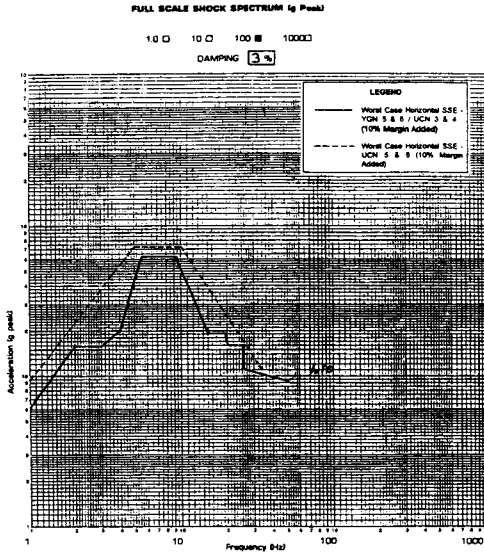


Fig. 1 Worst Case Horizontal SSE RRS Curves- YGN 5&6, UCN 3,4,5&6

2.3 검증시험 및 해석

안전관련 전동기의 검증절차는 두 단계로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 전동기의 검증수명 말기조건을 모의하기 위한 노화단계이며, 두 번째는 지진과 같은 특정 설계기준사고조건 하에서 해당 전동기의 구조적 건전성 유지와 전동기의 안전관련 기능의 유지를 입증하는 설계기준사고검증단계이다.

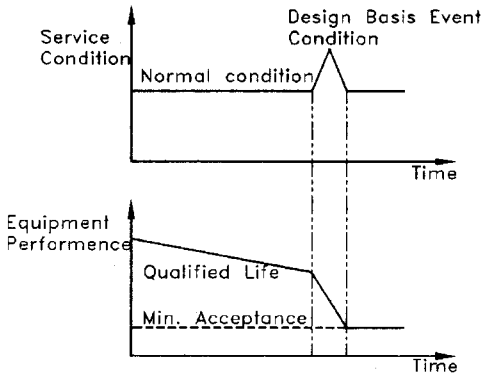


Fig. 2 Concept of Equipment Qualification

Fig. 2는 기기의 일반적 검증의 개념을 나타낸 것으로서 지진 등과 같은 설계기준사고검증단계를 기기의 수명 말기에 시행함으로써 보다 보수적인 검증결과를 얻을 수 있도록 한다. 본 개발에서도 전동기의 검증수명 말기조건을 모의하기 위하여 방사선 노출시험을 수행한 후, 지진모의시험과 가혹환경시험을 순차적으로 수행하였다.

Fig. 3은 본 개발의 검증절차를 간략화하여 나타낸 것이다.

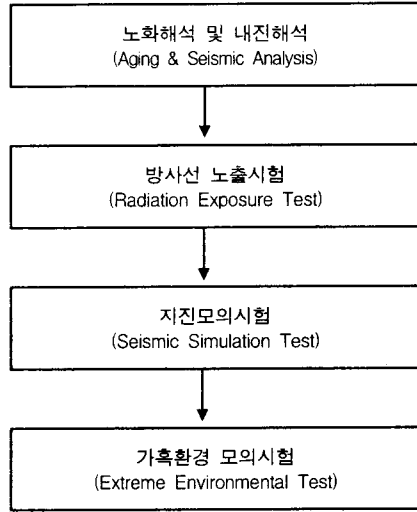


Fig. 3 Qualification Sequence

각 검증시험의 전, 후마다 전동기의 기본성능시험을 실시하여 안전관련 기능의 수행여부를 입증하였다. 전동기의 기본성능 시험항목은 절연저항시험, 고정자 권선저항시험, 무부하 속도시험으로 구성하였다.

2.3.1 노화해석

노화해석의 목적은 전동기를 구성하는 재질 중에서 노화메커니즘을 가지는 비금속재질에 대하여 요구수명 41년을 만족함을 입증하고, 41년 수명을 만족하지 못하는 재질의 구성품에 대해서는 교체주기를 확립하는데 있다. 전동기의 운전환경조건 중 방사선에 의한 노화메커니즘 영향은 별도의 시험을 통하여 입증하므로 해석상에서는 온도에 의한 노화해석을 실시하였다. 시간-온도의 노화해석을 수행하기 위해서는 각 비금속재질에 대한 기초 시험자료가 필요하지만, 당사에서는 이에 대한 자료가 부족하여 미국의 Wyle Laboratories에서 수행하였다.

해석결과, 고압유도전동기를 구성하는 절연물은 모두 요구수명 41년을 만족하였으며, 윤활제와 같이 현실적으로 요구수명 41년을 얻을 수 없는 재질에 대해서는 교체 및 보충주기를 제시하였다[5].

2.3.2 내진해석

주어진 지진환경요건에서 시험용전동기의 구조적 건전성을 보완평가하기위하여 해석적 방법에 의한 내진해석을 수행하였다. 해석에는 상용 구조해석프로그램인 ANSYS를 이용하였으며, Fig. 4에 본 해석에 이용된 시험용 전동기의 유한요소모델을 나타내었다.

내진해석의 방법은 해석대상기기의 강성에 따라 해석방법이 달라지는데, 본 해석대상인 시험용 전동기는 1차 고유진동수가 영주기가속도(zero period acceleration)에 해당하는 주파수(33Hz) 보다 큰 강성기기(rigid equipment)로 분류할 수 있으므로, 영주기 가속도(ZPA) 값을 가진력으로 이용하는 정적해석 방법을 사용하였다[3]. 지진사고조건에서도 전동기는 운전되어야 하므로 구조적 건전성 평가를 위하여 지진력과 운전하중인 전동기의 토오크, 회전자의 불평형력을 함께 고려하였다.

해석결과, 안전여유가 모두 1보다 크므로 시험용 전동기는 구조적으로 건전한 것으로 평가되었다. Table 3.에 해석결과를 요약하여 나타내었다.

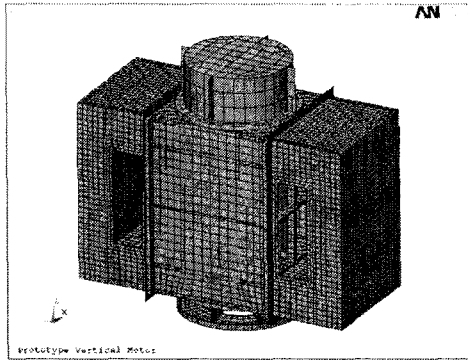


Fig. 4 Finite Element Model of Test Specimen Motor

해석에 이용된 모델은 육면체 요소망(brick mesh) 생성에 적합한 요소(SOLID45)가 주로 사용되었으며 전체 요소(element)의 개수는 14,711개, 노드(node)는 16,484개로 이루어져 있다.

Table 3. Results of Seismic Analysis for Test Specimen Motor

Component	Test Specimen Motor		
	Result Stress	Allowable Stress	Margin
Motor Frame	43.4 (N/mm ²)	223 (N/mm ²)	5.1
Air Chamber	5.54 (N/mm ²)	233 (N/mm ²)	42.0
Assembly	31.9 (N/mm ²)	233 (N/mm ²)	7.2

2.3.3 방사능 노출시험

방사선에 의한 전동기의 비금속재료의 노화영향을 평가하기 위하여 Table 2의 방사선환경조건에서 노출시험을 실시하였다. 방사선 노출량은 요구환경조건 1.0E8 rad에 10%의 여유(margin)를 더한 1.1E8 rad이며, 시간당 발생량을 1.0E6 rad를 넘지 않도록 하였다. 방사선원은 코발트(Cobalt-60)를 사용하였으며 방사선의 실제 평균발생량은 2.59E5 rad/hr이며 노출시간은 457.5 시간이다. 방사선이 전동기 전체에 골고루 피폭되도록 하기 위하여 시험용 전동기를 회전시키도록 하였다.

방사선 노출시험 후, 수행한 전동기의 기본성능시험을 통하여 전동기의 성능에 이상이 없음을 확인하였다[5].

2.3.4 지진모의시험

지진사고시 전동기의 구조적 건전성과 회전자의 이탈성, 전동기의 안전기능 수행여부를 평가하기 위하여 5회의 운전기준지진(OBE)과 1회의 안전정지지진(SSE)을 모의시험하였다. 실제 전동기의 설치조건과 동일하게 모의하기 위하여 고정용 지그(jig)를 전동기와 볼트로 고정시키고 다시 고정용 지그(jig)는 가진시험 테이블에 용접하여 고정시켰다.

모의시험도중에 전동기의 안전기능 수행여부를 입증하기 위하여 4kV, 3상, 60Hz 전원을 공급하여 운전시키고 각 상(phase)의 전압과 전류를 측정하여 기록하였다.

지진을 모의하기 위한 3축 임의 가진시험(Triaxial Random Multifrequency Tests)은 수평 2방향, 수직 1방향으로 각각 독립적인 성분을 동시에 가진하였다. 지진 모의 시험도중에 기록된 전기적 모니터링 데이터와 모의

시험 후 실시한 전동기 기본성능시험 및 안전관련 기능에 영향을 미치는 주요 부품의 파손유무를 확인한 결과 시험용전동기의 구조적 건전성과 안전관련 기능수행에 이상이 없음을 확인하였다[5].

Fig 5.는 가진시험 테이블 위에 시험용전동기를 설치한 전경이다.

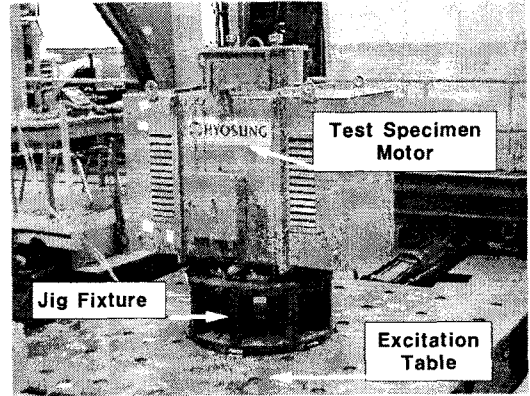
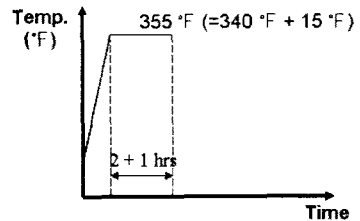


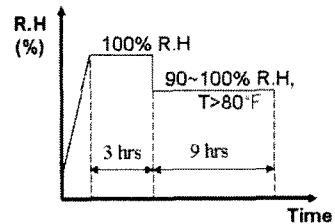
Fig. 5. Seismic Test Set-up

2.3.5 가혹환경모의시험

가혹환경모의시험은 고온환경시험과 상대습도환경시험으로 나누어 수행하였다. Fig. 6은 모의시험 프로파일을 나타낸 것으로서 가혹환경조건에 여유(margin)를 더한 것이다. 온도는 최고치 340°F에 15°F를, 시간은 고온유지 2시간에 1시간을 여유(margin)로 더하였다.



(a) Temperature Profile



(b) Relative Humidity Profile

Fig. 6 Required Profile for Extreme Environmental Test

가혹환경모의시험 동안 전동기의 안전기능 수행여부를 입증하기 위하여 전원을 공급하여 시험용 전동기를 무부하 운전시켰으며 각 상(phase)의 전류를 시험기간 동안 모니터링 하였다. 아울러 모의시험 후 시험용전동기의 기본성능시험을 실시하여 전동기의 기능여부를 평가하였다. 평가결과 시험도중과 전후에 전동기의 안전기능에 이상이 없음을 입증하였다[5].

Fig 7은 고온환경모의시험 동안 측정된 시간-온도, 압력을 나타낸 그래프이다.

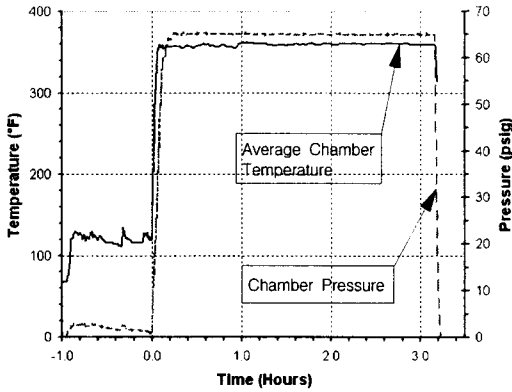


Fig. 7 Test Profile of High Temperature Test

Fig. 8은 상대습도시험 시 챔버(chamber)내의 상대습도를 측정된 그래프이다. 보수적 검증을 위하여 1시간의 여유(margin)가 포함된 것이며 12시간 동안 상대습도 100%를 유지하였다.

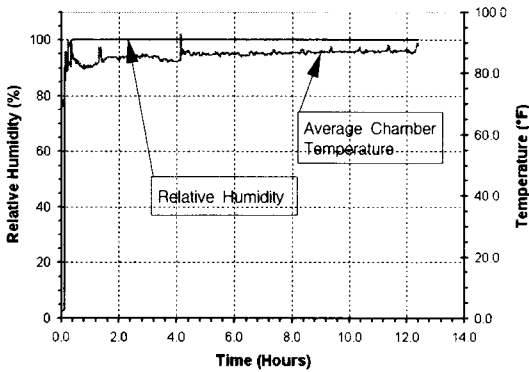


Fig. 8 Test Profile of Relative Humidity Test

3. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소의 가혹환경에 사용되는 안전관련 고압전동기의 기기검증절차와 방법을 소개하였다. 본 연구를 통하여 당사가 개발한 안전관련 고압유도전동기는 주어진 가혹환경요건에서도 안전관련 기능을 충분히 수행함을 입증하였으며, 이로써 당사는 온화환경뿐만 아니라 가혹환경용 안전관련 고압전동기 개발을 완료하게 되었다.

우리나라는 운영중인 20기의 원전 중 6기를 한국표준형원전으로 건설, 운영함에 따라 이러한 경험축적을 바탕으로 동남아 지역을 중심으로 해외 신규원전시장으로 진출 기반을 넓히고 있다.

본 국산화의 개발이 향후 우리나라에 건설될 신규원전 기자재의 국산화를 높일 수 있을 뿐 아니라 원전기자재의 해외수출에도 이바지 할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구(논문)은 한국과학재단의 지원으로 수행된 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

- [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 Continuous Duty 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] AISC "Manual of Steel Construction Allowable Stress Design", ninth edition, 1989.
- [5] Wyle Laboratories, "Qualification Test Report for Class 1E Safety Related Vertically Mounted Safeguard Pump Motor", No.51180TR05, 2005.
- [6] 김진, 이인우, 허익구, 최병원, "원자력발전소용 안전등급 저압유도전동기의 기기검증", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.63~66, 2001.
- [7] 고우식, 김진, 허익구, 최병원, "원자력발전소 안전등급 대형 유도전동기의 기기검증", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp.498~503, 2000.