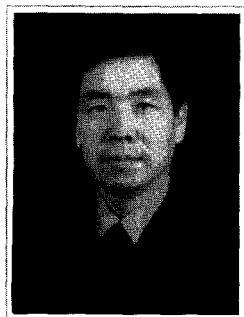


원자력 안전 등급 고압 유도 전동기 개발

허 익 구

(주)효성중공업연구소 수석연구원



원 자력발전소의 안전성 관련 기기들은 원자로 가동 및 원자로의 안전 운전에 관련된 설비로서 고장 또는 결함 발생시 일반인에게 방사선 장해를 미칠 수 있는 환경 조건에서 부여된 안전 기능을 수행하는 것이 중요한 책무이다.

따라서 이 기기들은 정상적으로 운전될 때의 환경뿐만 아니라 운전

중 예상되는 극한 상황 및 발전소의 설계 기준 사고로 인하여 발생될 수 있는 환경에서도 정상적으로 운전 가능함이 입증되어야 한다.

(주)효성중공업 연구소에서는 1997년 6월부터 1999년 3월까지 원자력 안전성 관련 품목인 고압대용량(300HP 4,0KV이상) 전동기를 국내에서 최초로 개발하였으며, 2000년 1월부터 7월까지 고리 원자력발전소의 AUXILIARY FEEDWATER PUMP 및 CONTAINMENT SPRAY PUMP용 전동기를 개발하여 납품하였다.

이어 동년 8월부터 12월까지 영광 원자력발전소 AUXILIARY FEEDWATER PUMP용 전동기를 개발 공급하고, 저압 NEMA 전동기를 2000년 12월에 개발 완료함으로써 NUCLEAR STEAM SUPPLY SYSTEM과 BALANCE OF

PLANT계통의 PUMP, FAN, AIR HANDLING UNIT를 구동하는 전동기를 국산화하게 되었다.

개발 배경 및 필요성

석탄·석유 등 화석 연료를 사용하는 화력발전소는 이산화탄소 등 화학적 공해 물질을 다량 배출하고 있으므로 환경 오염 방지 대책에 소요되는 막대한 비용과 발전 연료의 해외 의존도가 높아 경제적 부담을 가중시키고 있다. 따라서 환경 오염 방지 대책 비용과 화석 에너지의 고갈 문제를 해결하기 위한 수단으로서 원자력 에너지 이용은 유일한 현실적 대안으로 공감대가 다시 확산되어 가고 있다.

미국을 비롯한 원자력 에너지 이용 선진국과 후발 국가에서도 기존 원자력발전소 운전 기간의 연장, 신



규 원전 건설 수요가 증대하고 있다.

그런데 우리 나라는 현재 원자력 발전소 핵심 기기뿐만 아니라 부속 기기 분야도 많은 부분을 선진국에 의존하고 있기 때문에 원전 건설 투자비와 노후 설비의 교체 비용이 큰 부담으로 작용하고 있을 뿐만 아니라, 원전 안전 운전을 위한 정비 활동에 많은 비용과 장시간 소요로 어려움을 야기하고 있는 실정이다.

그 동안 우리 나라의 원자력 산업 분야에 국산화가 상당 기간 진전되어 왔으나, 아직도 NSSS와 BOP 계통의 건설, 기기 핵심 분야를 비롯한 많은 부분이 외국 기술에 의존하고 있다.

일반 산업용 대형 유도 전동기는 국내에서 설계·제작 기술에 관한 오랜 경험과 노하우를 보유하고 있음에도 불구하고 원자력발전소용 안전성 관련 전동기는 안전 운전 조건에 대한 이해와 기기 검증 시험 및 해석 기술이 취약하여 국산화되지 못하고 지금까지 기기 및 부품을 전량 수입해 왔다.

따라서 원자력 발전 설비의 안전 성 관련 기기의 국산화율 제고를 통하여 우리나라의 원자력 기술 자립과 더불어 수입 대체 효과를 실현하고 기업 차원에서는 제품의 국제 경쟁력을 획기적으로 향상시키기 위하여 원자력 안전 등급 고압 전동기의 국산화 개발 필요성이 크다고 할

수 있다.

개발의 내용

1. 모델 기종 설계·제작

본 전동기의 개발을 위해 1997년 6월부터 기초 선행 연구를 시작하였으며, 한국전력기술(주)의 자문 용역으로 원자력 Q-Class 대형 전동기 개발 과제를 수행하여 원자력 안전 등급 전동기의 품질·안전·신뢰성 요건에 관한 기초 DATA와 정보를 입수할 수 있었으며, 개발 검증에 관한 방안을 다각도로 검토했다.

이와 같은 과정에서 확보된 기술과 당사의 축적된 노하우 등을 활용하고, 부족한 기술은 국내외 연구 기관(한국원자력연구소, 한국전력 기술연구원 및 KIMM, 미국 Wyle Laboratories, Nuclear Logistics Incorp.)으로부터 기술 협조를 얻어 개발 업무를 본격적으로 추진하였다.

1998년 3월부터 울진 원자력 #5·6호기 Essential Service Water Pump와 Component Cooling Water Pump의 Model 기종(150HP 10P 4.0kV WPⅡ, Vertical Mounting, 300HP 6P 4.0kV WPⅡ -Horizontal Mounting)을 선정하였다.

국내 원전 지역의 최대 지진 조건(7.2g)과 방사능 오염도(1.0E7

rads)를 기준으로 동년 9월 개발 설계 및 도면 작성은 완료하고, 미국 Wyle Laboratories, KOPEC과 공동으로 절연 System Analysis, 실제 전동기와 모델 전동기의 구조적 유사성 검토를 동년 12월까지 마치고 최종 설계와 기기 검증 계획을 확정하여 시제품 제작을 착수하였다.

1999년 7월 제작을 완료하여 자체적으로 절연 내력 시험, 특성 시험, 온도 상승 시험 등 성능 확인 시험을 실시하고, 국내에서 시험이 불가능하였던 내방사능 시험과 Seismic Test를 국제 공인 기관인 미국 Wyle Laboratories에서 약 2개월간 실시하였다.

2. 개발 검증

기기 검증은 시험, 해석, 시험과 해석, 운전 경험에 의한 방법에 의해 수행할 수 있는데, 본 기기 검증은 대상 전동기의 과다한 무게와 치수를 고려하여 시험과 해석적 방법을 조합해서 수행하였다.

별도로 제작한 축소 모델 전동기에 대해서는 기기 검증 시험을 하였으며, 실제 검증 대상 전동기는 축소 모델 전동기와의 유사성 해석 후 기기 검증 해석을 수행하였다.

가. 개발 전동기 사양

시험용 축소 모델 전동기는 실제 검증 대상 전동기와 유사성을 확보 토록 하기 위해 구조·재질·베어

링 형식 등을 동일하게 하였으며, 동일한 제작 공정을 통해 제작을 하였다. <표 1>은 검증 및 시험 전동기의 사양을 나타낸 것이다.

기기 검증 문서에는 실제 검증 대상 전동기와 시험용 축소 모델의 유사성을 입증하는 이러한 사항들이 구체적으로 명시되어야 한다.

나. 운전 조건

기술 사양서에 제시된 ESWP 전동기의 운전 조건은 <표 2>와 같다.

본 검증에서 적용한 운전 조건은 원자력 안전성 관련 검증이 일반적으로 실제 조건보다 보수적으로 수행됨을 고려하여 <표 3>의 조건을 적용하였다.

다. 기기 검증 절차

기기 검증은 내환경 검증과 내진 검증으로 구성되어 있으며 각 시험에 따른 노화의 복합 상승 효과를 고려하기 위해 동일한 전동기로 <그림 2>에 주어진 절차에 따라 검증을 수행하였다.

라. 내진 검증

내진 검증은 IEEE-STD-344에 따라서 수행하였다.

① 내진 해석

내진 해석은 전동기가 설치된 위치에서 발생 가능한 최대 지진이 가해졌을 경우 전동기에서 발생하는 최대 응력이 전동기에 사용된 재질의 허용 응력을 초과하지 않음을 입증하는 해석으로서 검증 대상 전동기에 대해 해석을 수행하였다.

해석 수행 방법은 해석 대상이 강체 기기인가 유연 기기인가에 따라 정적 해석과 동적 해석으로 구분되며, 또 동적 해석은 보수적 해석 적용의 유무에 따라 단순 동적 해석과 상세 동적 해석으로 나뉘어진다.

일반적으로 원자력 안전성 관련 기기 검증이 보수적으로 수행되는 점을 고려하여 보수적이면서 신속한 해석 방법인 단순 동적 해석 방법을 적용하였다.

해석에 사용된 지진 가속도는 전동기가 설치되는 장소의 FRS (Floor Response Spectrum) Curve를 포함하는 RRS(Required Response Spectrum) Curve의 값을 이용하였으며, 이 때 사용된 댐핑(Damping) 조건은 기술 사양서에 따라 OBE(Operating Basic Earthquake) 경우 2%, SSE(Safe ShutDown Earthquake) 경우 3%를 사용하였다.

지진 가속도 외에 전동기 자중과 운전 토오크에 의한 외력도 함께 고려를 하였으며, 각 방향 지진 가속도에 의한 응력의 조합은 SRSS (Square Root Sum of Square) 방법을 적용하였다.

해석에 사용한 유한 요소 해석 프로그램은 ANSYS Release 5.5이며 <그림 3>은 전동기의 유한 요소 모델, <그림 4>는 모드형상을 나타낸 것이다.

<그림 4>는 OBE 조건과 SSE 조

<표 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	F-class	F-class
Mounting	Vertical type	Vertical type
Bearing	Anti-Friction	Anti-Friction
Weight(kg)	6,000	1,800

<표 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 건물 바닥의 지진 가속도(생략)

<표 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, <그림 1>은 본 검증에 사용된 RRS Curves의 한 예를 나타낸 것이다.

전에 대한 전동기 응력 해석 결과를 요약한 것으로서, 여유(Margin)는



전동기에 사용된 재질의 허용 응력(Allowable Stress)이 하중 조건 하에서 전동기에 발생하는 최대 응력의 몇 배인가를 나타내는 것이며, 여유(Margin)가 1 이상이면 구조적으로 안전함을 의미한다.

<그림 4>의 여유(Margin) 값으로부터 전동기 각 부위와 전동기에 사용된 Bolt가 모두 안전함을 알 수 있다.

② 내진 시험

내진 시험의 목적은 지진 모의 시험 조건하에서 전동기의 운전성과 전동기 회전부의 이탈성(Missile)이 없음을 입증하는 것으로서, 미국의 기기 검증 전문 기관인 Wyle Laboratories에서 시험용으로 제작된 축소 모델에 대해 수행하였다.

시험은 3축 가진 테이블에 검증 전동기가 운전되는 실제 방식과 유사하게 시험용 전동기를 고정시켰다.

먼저 시험용 전동기의 고정을 위해 가진 테이블에 Rigid test fixture를 용접으로 고정한 후 전동기와 Rigid test fixture는 볼트로 고정을 시켰다. <그림 5>는 내진 시험을 위한 시험 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

시험은 무부하의 동작 상태에서 RRS (Required Response Spectrum) Curve에 10%의 여유를 더한 TRS(Test Required Spectrum) Curve에 따라 OBE(Operating Basis Earth

quake) 시험 5회, SSE(Safe ShutDown Earthquake) 시험 1회를 연속적으로 수행하였다.

시험 결과 지진 조건하에서도 전동기가 정상적으로 작동하였으며 전동기 회전부의 부품 이탈 현상이 발생되지 않았으며, 기본 성능 시험(절연저항, 고정자 권선 저항, 무부하 속도 시험)에서도 변화가 없음을 확인하였다.

마. 내환경 검증

내환경 검증은 IEEE-STD-323에 따라서 수행하였다.

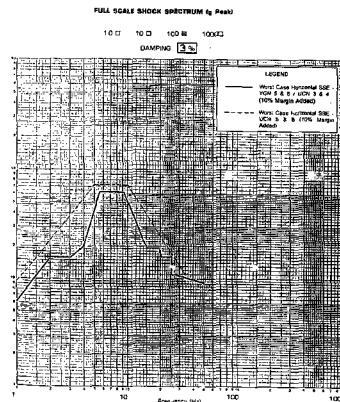
① 노화 해석

노화 해석의 목적은 전동기가 주어진 환경 조건에서 요구 수명 41년 동안 안전 관련 기능을 수행함을 입증하기 위하여, 전동기를 구성하는 재질 중에서 노화 메커니즘을 갖는 비금속 재질에 대하여 41년간의 수명을 입증하고, 41년 수명을 가지지 못하는 재질에 대하여 교체 주기를 확립하는 데 있다.

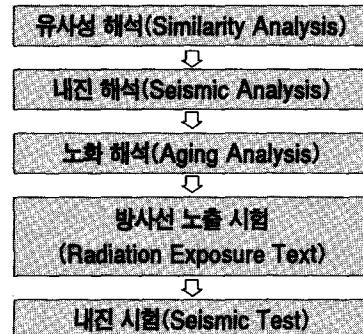
전동기 수명에 영향을 미칠 수 있는 여러 노화 메커니즘은 전동기가 검증되어야 하는 운전 조건을 검토하여 결정하였다.

ESWP 전동기의 운전 조건 중 노화 메커니즘에 영향을 미칠 수 있는 조건은 온도와 방사선으로서, 이 중 방사선은 별도 노출 시험에 의해 검증을 수행하기 때문에 노화 해석에서 제외시켰다.

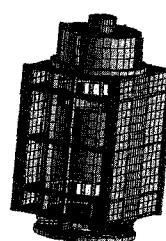
온도에 따른 노화 해석을 수행하



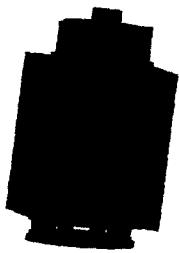
<그림 1> Worst Case Horizontal SSE RRS Curves
-YGN 5 & 6
UCN 3 & 4
and UCN 5 & 6



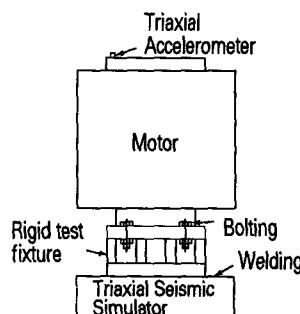
<그림 2> Qualification Sequence



<그림 3> FEM of ESWP Motor



〈그림 4〉 Mode Shape of ESWP Motor



〈그림 5〉 Experiment Setup for the Seismic Simulation

〈표 4〉 Summary of the Stress Margin

항목	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

기 위해서는 각 비금속 재질의 온도에 따른 수명 자료가 필요한데, 현재 국내에는 이에 대한 자료가 부족

하여 미국 Wyle Laboratories에서 수행하였다.

해석 결과 절연물과 같은 대부분의 비금속 재질이 요구 수명을 만족하는 것으로 나타났으며, 요구 수명 41년을 얻을 수 없는 Grease 같은 기타 비금속 재질에 대해서는 교체 및 보충 주기를 제시하였다.

② 방사선 노출 시험

방사선 노출 시험은 방사선에 의한 비금속 재질의 영향을 파악하기 위한 시험으로써, 시험 전·후의 전동기 기본 성능 시험을 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 더 했다. 그러므로 실제 시험에 적용한 방사선 요건은 $1.1E7$ rads TID이다.

방사선원은 Cobalt-60을 사용하였으며, 시간당 발생률이 $1.0E6$ rads를 넘지 않도록 노출시켰다. 또한 노출 시험 동안 시험용 전동기를 회전시킴으로써 전동기 전체에 방사선이 골고루 피폭되도록 하였다.

방사선 노출 시험 후 실시한 전동기 기본 성능 시험 결과, 전동기 운전에 이상이 없음을 확인하였다.

개발 성과 및 의의

1. 원자력 안전 등급 고압 유도 전동기의 국산화 실현 및 안전성 검증 기술 기반 확보

지금까지 전량 수입에 의존해왔던 안전 등급 고압 전동기를 국산화 시켜 한국전력공사에 안전성 관련 기기 공급자로 정식 등록됨으로써 가동 원전의 수명 연장과 KEDO, 신월성, 신고리 건설 원전 기기를 국산 대체할 수 있게 되었다.

BOP 및 NSSS 계통의 안전성 관련 전동기를 설계·제작·검증을 자체적으로 수행할 수 있는 기반을 갖추게 되었다.

2. 원자력 설비의 유지 보수 기간 단축과 보수성 향상에 기여

외국으로부터 공급 설치되어 있는 다양한 메이커의 안전 등급 전동기를 국산으로 대체함으로써 교체 기간의 단축과 보수성을 높일 수 있어 원전 가동률 향상에 기여할 수 있게 되었다.

3. 경제적 효과

고리·월성·울진·영광의 4개 가동 원전 및 건설 원전 안전 등급 전동기를 국산화 대체함으로써 약

1,000억원 이상의 수입 대체 효과를 기대할 수 있다.

수상 소감

국가 기간 산업인 한국전력공사와 일반 산업의 전력 기기 생산을 주력 사업으로 하고 있는 (주)효성 중공업 PERFORMANCE GROUP에 1977년도에 입사하여 오늘에 이르기까지 출곧 전력 산업용 전동기 개발, 설계 및 생산 기술 분야에 근무해오면서 가장 어려웠던 시기가 지난 1997년 말부터 시작된 IMF 시기가 아니었던가 생각된다.

그 당시 대부분의 국내 기업이 그리하였듯이 우리 회사도 한 치 앞을 내다볼 수 없는 어려운 경영 환경에 놓여 경영 합리화를 위한 개혁 활동과 구조 조정이 강도 높게 추진되기 시작하였다.

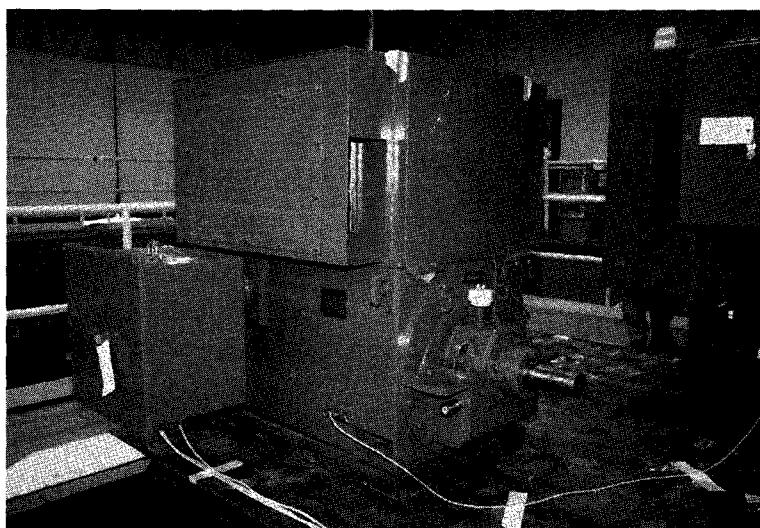
국내외 경기가 전반적으로 급격하게 둔화되면서 사업 규모가 한 달이 다르게 축소되어 가고 있음을 피부로 느끼던 시기였다.

호황기에 주력했던 제품에서 탈피하여 새로운 제품 개발과 신규 사업 분야를 개척해야 할 필요성이 크게 대두되면서 그 동안 접근하지 못했던 원자력 기기 국산화 대상 품목을 찾아 연구 개발에 착수하게 되었다.

본인이 제8회 한국원자력기술상을 받게 된 영광은 경영 여건이 가



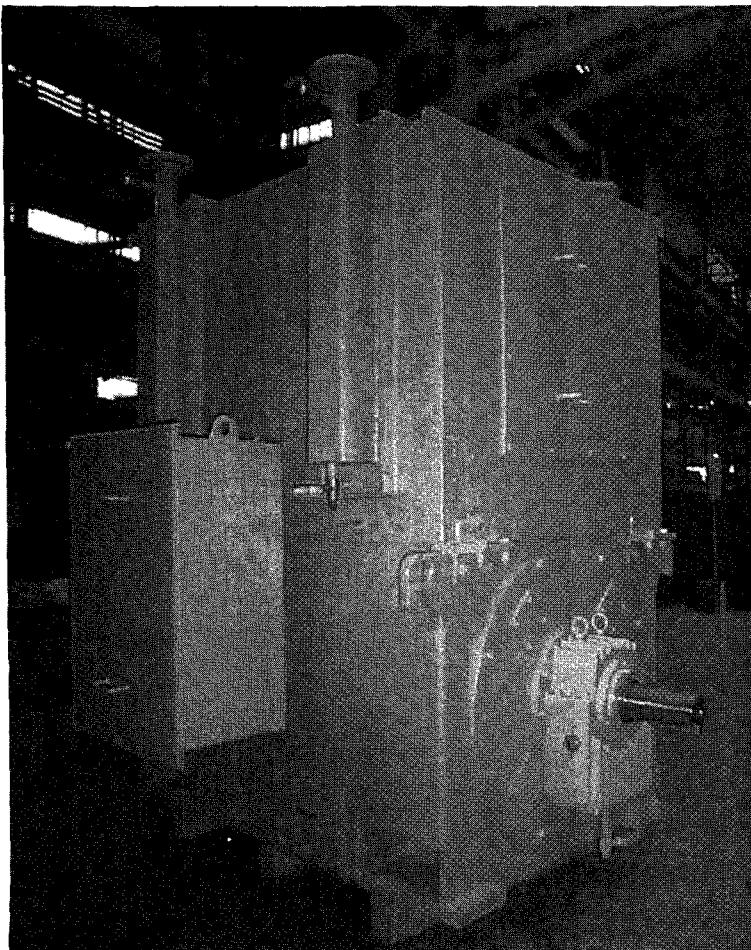
Essential Service Water Pump Motor 축소 모델 (150HP, 10P, 4.0kV)



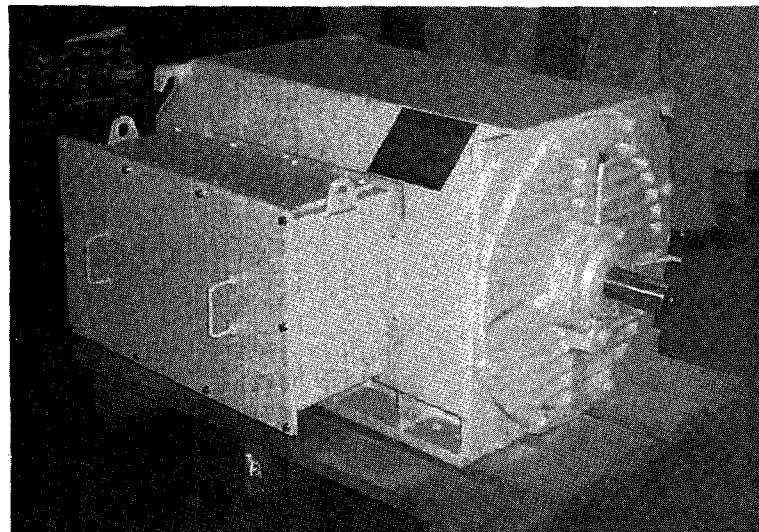
Component Cooling Water Pump Motor 축소 모델 (300HP, 6P, 4.0kV)

장 어려웠던 시기에 원자력 기기 국산화 개발 사업의 중책을 맡겨 주시고 격려해주신 사장님과 경영진, 한국전력공사, 한국전력기술(주), 한

국전기공업협동조합 및 한국원자력 연구소의 관계자 여러분들과 어렵고 힘들었던 그 긴 시간 동안 연구 개발 업무를 함께 하신 모든 분들의



고리 원전 Auxiliary Feedwater Pump Motor(600HP, 2P, 6.6kV)



고리 원전 Containment Spray Pump Motor(250HP, 2P, 460V)

덕분이라고 믿으며, 아직 완수하지 못한 분야의 원자력 기기 국산화를 하루빨리 완결하라는 채찍으로 생각하고 회사와 국가 발전을 위한 새로운 기술 개발과 신규 사업을 발굴·개척하기 위해 진력할 것을 다짐한다.

21세기에 접어들면서 원자력에너지의 이용 확대 움직임이 원전 선진국인 미국을 위시하여 다시 일어나고 있으며, 가동 원전의 수명 연장과 동남아를 비롯한 후발 원전 국가의 원전 건설 수요가 점차 증대하고 있으므로 원전 기기 수요 시장의 전망은 밝다고 생각된다.

따라서 당사의 주력 사업 관련 품목에 대한 원자력 기자재 완전 국산화를 조기에 실현하여 국제적인 경쟁력을 갖추어 수출 산업에 참여할 수 있는 기반을 확보함으로써 원전 기술 선진국으로의 이미지를 심어나가는 데 크게 기여할 것이라고 확신한다.

끝으로 오늘의 영광이 있기까지 그 동안 격려와 배려를 아끼지 않으신 회사 경영진과 한국의 밝은 미래 건설을 위하여 원자력 분야에서 묵묵히 근무하고 계시는 선·후배 전문가 여러분들에게 다시 한번 감사의 말씀을 드리며 오늘의 영광을 함께 나누고 싶다. ☺