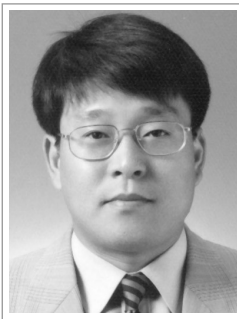


감육배관 관리 프로그램 개발 및 적용으로 원전 배관 기기 건전성 확보

이 성 호

한전전력연구원 원자력발전연구소 선임연구원



영남대 기계공학과 졸업

충남대 기계공학 석사

충북대 박사 졸업 예정 (안전공학)

한전 고리원자력본부 발전원

- 원자로조종감독자(Westinghouse 900MWe)

한전전력연구원 원자력발전연구소 선임연구원

- 배관감육 관리 기술 연구 개발 담당

너무도 과분한 제15회 원자력기술상 은상을 수상하게 되어 한없이 기쁘고 또 송구스럽다. 감사를 드려야 할 분은 너무도 많지만, 우선 저를 수상자로 지목해 주신 저명하신 심사위원님과 한국원자력산업회의에 깊은 감사를 드린다.

필자는 대학에서 기계공학을 전공하고 1989년 2월 한국전력공사에 입사하여 고리 원자력발전소 발전원으로 사회에 첫 발을 내딛었다.

5년간의 교대 근무를 통해 현장과 주 제어실의 운전 경험을 두루 갖추었고, 전력연구원에 부임하여 현장 적용 위주의 연구개발 업무에 10여년 이상 성실한 자세로 임하고 있다.

금번 한국원자력기술상 심사에서는 10년간의 감육배관 관리 프로그램 개발 및 적용과 관련한 공

적이 주로 평가 대상이 되었다고 사료된다.

아래는 필자의 한국원자력기술상 원자력연구분야 수상후보자 추천 사유이다.

“상기인은 1996년부터 '원전 탄소강배관 감육(減肉) 관리 분야'의 연구 개발 업무를 담당하고 있으며, '감육배관 관리 프로그램'을 개발하여('02) '감육배관 관리기술 최적화' 연구('04.12-현재)를 통해 국내 전 원전에 적용함으로써 동 분야 기술 수준을 국제적 수준으로 제고하였을 뿐만 아니라 '04년 8월 일본 미하마 원전에서의 인명 사고를 동반한 배관 파손 유사 사례의 국내 발생을 미연에 방지함으로써 원전 안전성 확보에 크게 기여하였음. 특히 해당 분야의 사업자 주도 연구개발을 통해 관련 산업·학술·규제 분야 기술발전

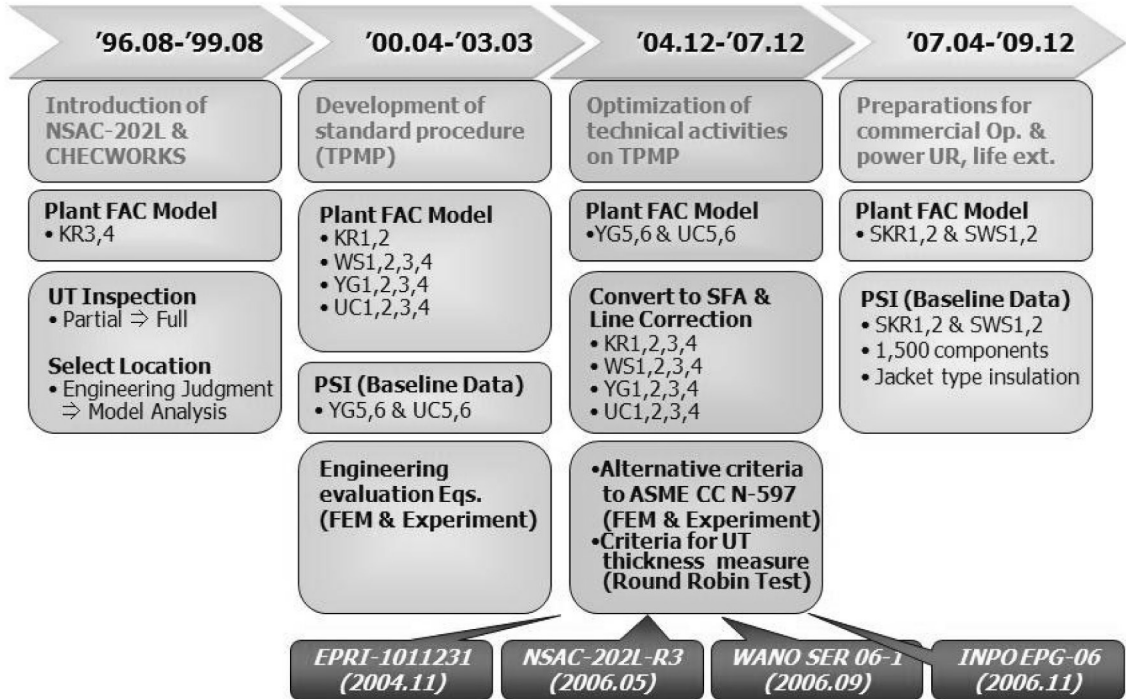


그림 1. 국내 원전 감육배관 관리 프로그램 개발 연혁

에 기여한 공을 인정하여 수상 후보자로 추천함.”

본 수상기는 금번 한국원자력기술상 수상과 관련하여 제출했던 공적 사항을 위주로 서술하였다.

1. 연구 개발

필자는 원전 탄소강 배관 감육 관리에 관한 연구를 주도적으로 수행하여 원전 2차측 배관계통 관리에 관련한 국내 기술기준을 개발하

고 전 원전에 적용함으로써 배관 계통 신뢰성을 향상시키는 데 기여했을 뿐 아니라 원전 수명 관리, 주기적안전성평가(PSR¹⁾), 중수로형 원전 공급자관 감육감시 기술 개발, 증기발생기 통합 성능 관리 체계 개발 등의 연구에도 참여하여 원전 기기 건전성 분야 기술 수준 제고에 기여하였다.

감육배관 관리 기술 개발을 통한 국내 원전 배관 기기건전성 확보 주도

1. 침부식에 의한 원전 배관 건전성 저해 해석 연구 ['96-'99]

EPRI NSAC-202L²⁾ 지침을 준수하고 EPRI CHECWORKS³⁾ 전산 프로그램을 활용하는 모델 해석에 기초한 체계적인 배관 관리 프로그램을 고리 3,4호기에 시범 적용함으로써 주기별 검사 대상을 과학적으로 선정, 점검할 수 있도록 하였으며 효과적으로 배관 교체 프로그램을 진행할 수 있어 배관 파

1) Periodic Safety Review

2) Recommendations for an Effective Flow Accelerated Corrosion Program

3) Chaxal-Horowitz Engineering Corrosion WORKStation

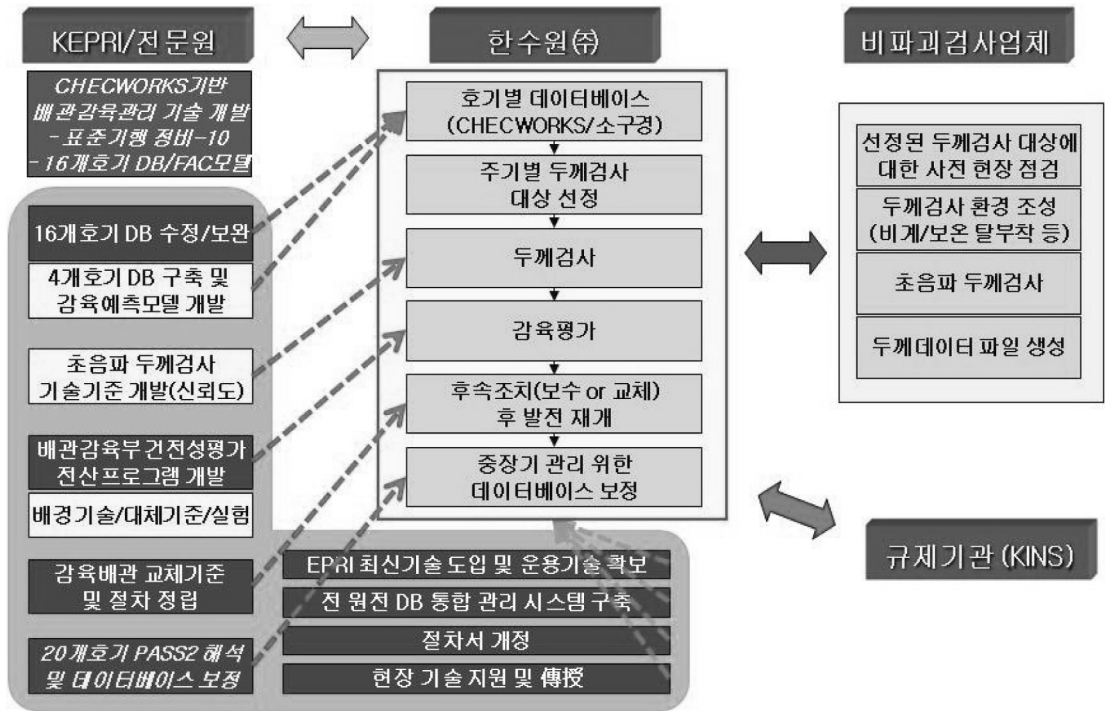


그림 2. 감육배관 관리기술 최적화

열 가능성을 최소화 할 수 있음을 입증하였다.

2. 원전 이차계통 감육배관 관리 표준기술체계 개발 [’00-’03]

선행 과제를 통해 입증한 체계적 배관 관리 프로그램의 적절성에 기초하여 기존 발전소에서 적용하고 있던 비파괴검사 부서의 두께 검사 관련 절차를 대신하는 원전 운영 주체인 한수원(주)의 감육배관 관리 절차서(표준기술행정절차서 정비-10, 탄소강배관 감육 관리)를 개발함으로써 한수원(주) 배관 관

리 담당 부서 및 감독자 주관으로 비파괴검사 부서 두께 검사 실무자의 협조하에 감육배관 관리 업무를 원활히 수행할 수 있도록 하였다.

본 절차서에 입각하여 국내 원전 14개 호기에 대한 2차측 배관 계통 데이터베이스를 신규로 구축하고 CHECWORKS 전산 프로그램을 활용한 호기별·배관기기별 예측 감육 속도 및 잔여 수명을 도출하였으며 계통별·라인별·배관 기기별 감육 관리 우선 순위를 설정하여 선정된 배관 기기에 대한 두께검사 및 감육 평가를 수행하였다.

최초 검사에서 설계·운전 이력에 따라 발전소별, 호기별 매우 상이한 감육 평가 결과가 도출됨을 본 연구를 통해 확인하였으며, 해당 발전소의 특성에 맞는 감육 배관 관리 전략을 제시하였다.

또한 '원전 탄소강배관 감육 관리 지침' 외 4건의 기술보고서를 발간하여 표준기술행정절차서의 원활한 운용에 필요한 각종 기술기준을 제시하였으며 현재 전 원전에서 감육 배관 관리 업무에 활용하고 있다.

3. 감육배관 관리 기술 최적화 및 적용 연구 [’04-’07]

선행 시범 적용 및 탄소강배관 감육 관리 절차서의 개발에 이어 '04년 12월부터 영광/울진 5,6호기에 대한 데이터베이스 구축 및 감육 예측, 기존 원전에 대한 증장기 감육배관 관리 기술의 최적화 등을 목표로 하는 연구를 수행하였으며 사업자 주도의 감육배관 관리를 실행할 수 있도록 하였다.

원전 수명 관리 및 주기적 안전성 평가를 통한 기기 건전성 평가 기술 제고

1. 원전 수명 관리 연구(II) 참여 ['98-'01]

가압경수로 원전의 수명 관리 과제에 참여하여, 2차측 배관에 관련된 평가 기술을 고리 1호기에 적용하여 주요 기기의 수명을 평가하였다.

기기별 수명 평가 결과를 바탕으로 발전소 계속운전과 성능 개선에 필요한 권고 사항을 제시하고 노화 관리 방안을 수립하였다.

특히 고리 1호기 주급수 및 주증기 배관에서의 실측 데이터를 확보하여 발전소 주배관계통의 교체 현황과 두께 감소 추이를 분석하였고 실측 데이터에 근거한 잔여 수명을 평가하였으며 긴급한 감육 관리가 필요한 배관 계통을 선별함으로써 전산 프로그램 해석 결과와 더불어 단·중기적 집중 관리 필요 배관을 제시하였다.

2. 주기적 안전성 평가 참여 ['01-'03]

감육배관 관리 기술 개발 연구 과제의 결과를 바탕으로 월성 1호기 및 고리 1호기 주기적 안전성 평가(PSR) 연구에 참여하여 해당 발전소 배관 계통의 건전성 확보와 계속운전에 필수적인 안전성 평가를 수행함으로써 2차측 탄소강배관의 감육에 따른 배관 누설 또는 파단 가능성의 저감과 원전 이용을 저하 예방을 위한 관리 방안을 제시하였다.

기기 건전성 연구 과제 참여를 통한 배관 두께 관리 기술 확산

1. 중수로 원전의 Feeder배관 감육 감시 기술 개발에 기여 ['99-'02]

중수로 원전 공급자관은 배관 내부가 유동 가속 부식 현상으로 감육되고 있어 자관에 대한 주기적인 검사 및 분석을 통하여 감육률, 잔여 두께 등을 사전에 예측하여 취약 자관 교체 계획 수립 등 장기 관리대책을 수립해야 하는데 본 연구를 통해 유체 가속 부식으로 인한 두께 측정 대상 자관 수, 측정 부위 및 주기 선정, 허용치 기준 등 검사 절차를 개선시켰고 향후 종합적인 관리 대책을 제시하였다.

2. 증기발생기 통합 성능 관리 체계 개발에 참여 ['02-'08]

증기발생기 통합 성능 관리체계 개발 연구 과제 1단계('02-'03) 및

2단계('03-'05)에 참여하여 증기발생기 통합 지침서 개발에 기여하였으며, 3단계('05-'08) 연구 참여를 통해 증기발생기 2차측 건전성 확보와 배관 계통 감육 저감을 연계한 기반 기술을 개발하고 있다.

3. 가압경수로 배관 열성층화 영향 분석 연구 참여 ['95-'97]

고리 4호기 가압기 밀림배관에 서 발생하는 열성층 온도 데이터를 취득하였으며, 이에 기초하여 ANSYS 프로그램을 이용하여 설계 조건 및 가열·냉각조건, 고온 대기 조건에서의 응력 해석을 위한 모멘트를 구하였다.

이를 ASME Section III NB-3600의 배관에 대한 건전성 유지 여부 판단 기준에 의거 계산을 수행하였으며, 그 결과가 공식에서의 요구조건을 만족할 수 있는지의 여부를 분석하였으며, 각 과도 상태의 누적 피로 계수에 대한 기여도 분석을 수행하였다.

종합적으로 가압기 밀림배관에서의 열성층화 현상 발생이 건전성에 미치는 영향은 미미하여 우려할 필요가 없다는 결과를 제시하였다.

II. 기술 지원 및 전수

필자는 원전에서 발생하는 감육 배관 관리 현안에 대해 연구 결과와 연계한 기술 지원과 탄소강배관 감육 관리 기술 교류회 운영, 세미나 및 기술 전수 교육 등을 통해 현

장 및 유관 기관과의 기술적 유대를 지속하여 왔는데 그 실적을 요약하면 다음과 같다.

1. 일본 미하마 원전 배관 파열 사고 관련 지원

2004년 8월 일본 미하마 원전 배관 파열 사고에 관련하여 국내 감육배관 관리 프로그램에 대한 기술적 배경, 국내 원전 관리 현황, 유사 지점에 대한 두께 검사 및 건전성 평가 등을 지원함으로써 국내 원전에서의 유사 사고 발생 가능성을 제로(zero)화 하기 위한 노력이 있어 왔음을 보여주었다. 또한 본 기술 지원을 통해 감육배관 관리 프로그램에 대한 원전의 안전을 책임지고 있는 과기부, 운영을 담당하고 있는 한수원(주), 그리고 원전에 대한 부정적 시각의 국민들로부터 관련 분야 신뢰성을 구축하는데 일조하였다.

2. 기존 원전에 대한 두께검사 대상 선정, 감육평가, 후속 조치 지원

고리 1~4호기, 월성 1~4호기, 영광 1~4호기 및 울진 1~4호기에 대한 주기별 두께검사 대상 선정, 감육 평가 및 후속 조치 사항 결정, ASME Code Case N-597을 적용한 상세 평가 등의 기술 지원을 통해 탄소강배관 감육 관리 프로그램이 원활히 정착될 수 있도록 지원하였다.

3. 최신 원전에 대한 가동전 두께 검사 지원

영광 5,6호기 및 울진 5,6호기의 가동전 두께 검사 관련 기술 지원을 통해 탄소강배관 감육 관리 프로그램의 적용을 대비한 두께 검사가 될 수 있도록 하였으며, 이는 해당 호기 베이스라인 두께 데이터를 취득한 것으로써 전 수명 기간 동안 배관 관리에 활용될 중요한 기초 자료로 활용토록 하였다.

4. 증기발생기 급수링 감육 관련 기술 지원

영광 2호기 및 영광 3,4호기 증기발생기 급수링 감육 관련 건전성 평가, 정비, 후속 관리 방안 제시 등의 기술 지원을 통해 효율적으로 대상 기기의 건전성을 유지 및 감시할 수 있도록 지원하였다.

5. 기술교류회 운영

전력연구원, 발전소 현장의 실무자로 구성된 탄소강배관 감육 관리 기술교류회를 구성하여 현재까지 총 6회에 걸친 기술교류회를 개최하였다.

특히 2007년도에 개최한 제6회 기술교류회에서는 기존 회원뿐만 아니라 한국원자력안전기술원, 서울대학교, 한수원(주)의 엔지니어링실, 한국전력기술(주), 한전기공(주) 등 유관기관 관계자 40여명이 참석하여 관련 기관들 간에 기

술 교류할 수 있는 기회를 제공하였다.

6. 원자력교육원 출강

원자력교육원에 개설된 원자력 기계 설비 실무반, 엔지니어링 설비 수명 관리 과정 등에 출강하여 국내 감육배관 관리에 관련한 기술을 전수하였다.

특히 중국 친산원전 운전 및 정비 분야 교육 훈련 과정에 출강하여 해외 기술진에게 국내 원전 운영 기술을 전수하였다.

7. 사외 기술 전수 및 세미나

국내 원전 2차측 배관 계통 데이터베이스 구축에 참여한 한기(주) 실무자 대상의 원전 2차 계통 감육 배관 관리 기술 세미나 및 CHEC-WORKS 전산프로그램 활용 관련 기술 전수 교육, 울진 5호기 가동전 두께검사에 참여한 (주)카이텍 실무자 대상의 배관 감육에 관한 세미나, 원자력 규제 기관인 한국원자력안전기술원 금속재료실 검사원 대상의 국내 원전 감육배관 관리 프로그램에 관한 세미나 등을 개최함으로써 유관 기관의 기술 수준 제고 및 기관별 역할 분담에 대한 공감대 형성에 기여하였다.

8. 기술보고서 발간

'EPRI CHECWORKS 활용 지침서', '감육 배관 기기에 대한 두께

검사 기술기준', '원전 탄소강배관 감육 관리 지침', '직관 배관의 두께 기준 감육 건전성 평가식 개발', '엘보우 배관의 감육 건전성 평가식 개발' 등 5건의 기술보고서를 발간하여 발전소 감육배관 관리 실무자 뿐만 아니라 유관 기관의 관련 업무 기술기준으로 활용할 수 있도록 하였다.

III. 해외 기술 교류 및 기술 정보 확보

필자는 1995년부터 현재까지 미국 전력연구소 주관의 CHECWORKS 사용자 그룹 (EPRI CHUG)⁴⁾에 가입, 회원사 활동을 하고 있으며, 사용자 그룹 회의 참가를 통한 기술 교류 및 개설된 기술 교육 참석을 통해 해당 분야 기술 수준의 국제화에 부응하고 있고 습득한 기술을 국내에 전수하였는데 그 실적은 아래와 같다.

1. EPRI CHUG 회원사 활동

1995년부터 현재까지 CHUG에 가입, 회원사 활동을 하고 있으며 5회에 걸친 회의 참석과 사용자 기술 교육을 수강함으로써 관련 분야 기술 수준의 제고에 활용하였다.

'00년 6월에는 국내 원전 탄소강배관 감육 관리 프로그램 개발 단계에서 CHECWORKS 전산 프로그램 운용 기술에 대한 검증을

받은 결과, 전반적으로 운영 상태가 양호하다는 평을 받은 바 있으며, 미국 Diablo Canyon 원전에 대한 벤치마킹을 통해 관련 기술을 교류하였다.

특히 '06년 및 '07년 회의에서는 '한국 원전 감육배관 관리 프로그램', '급침하중 조건하에서의 국부 감육 엘보 실증실험 결과' 등을 각각 발표함으로써 상당한 주목을 받았다.

2. 전문가 초청 세미나

1998년에는 EPRI 담당자를 초청하여 종합 배관 관리 기술 개발에 관한 기술 자문 및 세미나를 개최하였으며, 1997년 8월에는 일본 도마리 원전 담당자의 내방을 받고 EPRI CHECWORKS 전산 프로그램의 국내 적용 현황과 일본의 배관 관리 현황에 대한 세미나를 개최하였다. 2007년에는 미국 EPRI 전문가 방문 및 기술설명회와 배관 감육 관리 실무자 기술 세미나를 동시에 개최하였다.

3. 세미나 참석 및 발표

증기발생기 통합 성능 관리체계 개발 연구 과제 및 탄소강배관 감육 관리 프로그램과 연계하여 2002년 2월 EPRI가 주관하는 증기발생기 2차측 수화학 컨퍼런스에 참석하여 한국 원전 호기별 감

육 해석 모델의 증기발생기 관리 프로그램에의 활용 방안에 대해 발표하였고 두 가지 분야를 통합하려는 시도에 대해 상당한 주목을 받았다.

또한 한국의 서울대학교와 일본의 교토대학교 등이 주축으로 운영 중인 Core University Program에서 개최하는 세미나와 여름학교 등에 초청받아 산업계에서 이루어지고 있는 기술 개발 현황을 발표하였다.

4. 해외 기술 정보 확보

EPRI CHUG 회원사 활동을 통해 선형 배관 관리 지침서인 'Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program' 및 'CHECWORKS 전산 프로그램'을 확보하여 국내 감육배관 관리 프로그램에 응용하였으며, 'Plant Experience Database Instances of Pipe Wall Thinning, Leaks, and Ruptures Caused by Flow-Accelerated Corrosion in Nuclear Power Piping Systems' 등의 관련 자료와 문서를 확보하여 관련 연구에 활용하였다.

IV. 주요 논문 발표

필자는 원전 감육배관 관리, 두께 검사, 감육 평가, Feeder 감육,

4) CHECWORKS Users Group

증기발생기 2차측 건전성 확보 등 감육 관리 분야에 대한 연구 개발, 기술 지원, 기술교류회 등을 수행하고 그 결과를 국내외 학술지에 게재하고 학술 발표하였는데 그 실적을 요약하면 다음과 같다.

1. 해외 논문지 게재

○ Key Engineering Materials Vols. 270-273 (2004) pp. 2204-2209, Criteria of UT Thickness Measurement on Thinned Pipe Management Program

2. 해외 학술지 게재 및 발표

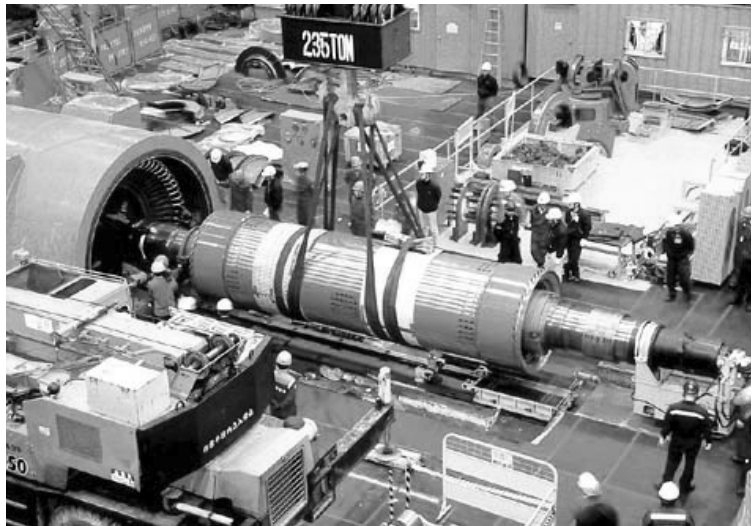
○ WCOGI 2007, Failure Test of Elbow Pipes with Local Wall Thinning under In-Plane Bending and Pressure, April 2007 외 5건

3. 해외 컨퍼런스 게재 및 발표

○ 37th EPRI CHUG Meeting, Failure Test of Elbows with Local Wall Thinning under In-Plane Bending, Jun 2007 외 5건

4. 국내 논문지 게재

○ 한국압력기기공학회 논문집, 제3권 제1호 2007년 3월 pp.



74-80, 내압 및 면내 굽힘하중 작용 시 감육 엘보의 원주방향 감육 폭과 감육 위치에 따른 손상 거동 외 9건

5. 국내 학술지 게재 및 발표

○ 대한기계학회, 감육배관의 구조건전성 및 안전여유도 평가 기술, 2004.04 외 11건

6. 국내 워크숍 및 심포지엄 게재 및 발표

○ 제10회 원전 기기 건전성 심포지엄, Relationship between Thinned Pipe Management Program and Sludge Reduction Program, 2003.05 외 8건

이상과 같이 수상 공적을 나열하다 보니 자신이 부끄럽기까지 하지만 필자가 수상자로 선정되기까지 동고동락하신 전력연구원 원자력발전연구소 연구원분과 추천해주신 주위 여러분께 조금이나마 보답하는 길은 항상 낮은 곳에서 보이지 않게 원전의 안전성 제고를 위해 맡은 바 연구 업무에 최선을 다하는 모습을 보여 드리는 것뿐이라 여겨지며 무한한 책임을 느낀다.

이번에 수상한 한국원자력기술상 은상의 의미는 앞으로 잘하라는 원자력계의 격려로 받아들이고 원전 배관 기기 건전성 확보에 더욱 더 매진할 것을 다짐해 본다. ☺