

원자로 냉각재 펌프 밀봉 장치 건전성 진단 및 정비 기술

문 병 위

한국수력원자력(주) 안전기술처 R&D 팀장

정 진 태

한전기공(주) RCP 팀장

개발 배경

국내 전력 생산의 40.9%(2000년 말 기준)를 차지하고 있는 원자력 발전은 국내 전력 산업에서 차지하는 비중만큼이나 안전성 확보가 중요시되고 있다. 이를 위해 국내 원자력 산업계는 지금까지 원전의 안전성 확보를 위해 부단한 노력을 지속하여 왔다.

1990년 중반 원전 기술 자립 과정을 거쳐 현재는 원전 기술 고도화 달성을 위한 기술 개발에 정부 및 원전 산업계가 노력하고 있다.

원전 기술 고도화 사업은 2006년까지 원전 건설 및 운영 분야의 핵심 기술 개발을 통하여 국제 경쟁력 있는 독자 기술 능력 확보를 목표로 추진하는 사업으로 본 기술 개발도 원전 기술 고도화 사업의 일환으로 개발하였다.

본고에서는 RCP Seal 관련 핵심 기술을 개발하여 원전의 안전성 및

신뢰성 아울러 경제성을 향상하고자 한국수력원자력(주)와 한전기공(주)가 34개월에 걸쳐 공동 개발한

「RCP Seal 건전성 진단 및 정비 기술」에 대해 기술하고자 한다.

국내에서 운영중인 가압 경수로형 원자력발전소 1차 계통에는 원자로에서 발생한 열을 배관을 통해 증기발생기로 전달하는 원자로 냉각재 펌프가 설치되어 있다.

이 펌프에는 열 전달의 매개체인 고온·고압의 냉각재(물)가 펌프 회전체와 고정체 사이를 통해 외부로 누설되는 것을 방지하기 위해 밀봉장치(RCP Seal)가 3단으로 설치되어 있다(표 1).

원자력발전소에서 압력 경계 역할을 담당하는 설비 중 하나인 이 RCP Seal은 국내 생산이 안 되는 미(未)국산화 설비로서 현재 외국으로부터 전량 수입하고 있으며 그 수입액은 한 주기당(약 15~18개월) 72.6억원에 달한다.

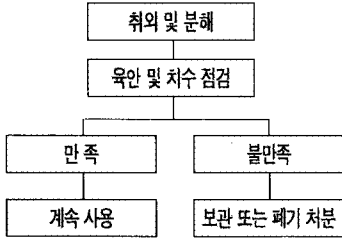
또한 외국의 기술 보유사들은 제

작 기술은 물론 정비 기술의 이전을 기피하고 있어 Seal의 폐기 처분량이 증가되고 있는 실정이다.

지금까지 RCP Seal의 정비는 제작사의 지침서에 요구된 점검 방법 및 정비 주기를 토대로 RCP Seal을 계획 예방 정비 기간 중 점검하여 필요한 부품이나 Seal 어셈블리를 교체하여 왔다(그림 1).

그러나 점검 방법에 있어 요구된 점검 기준을 만족시킬 수 있는 장비와 기술이 부족하고 점검자의 육안 점검에 따른 주관적인 판단에 의존하는 경우가 많았고 점검 결과를 객관적으로 입증하기가 어려웠다.

또한 RCP Seal을 정비하여 품질 보증을 위한 시험 및 절차를 수행한 후 이에 검증할 수 있는 기술과 장비가 확보되지 않아 폐기로 인한 고가의 RCP Seal 구입 비용의 증가와 폐기물 처리 비용이 증가됨은 물론, 사용된 Seal을 정비 후 계속 사용할 때 완벽한 검증을 할 수 없어 운전중에 기능 상실이나 비정상 상



〈그림1〉 RCP Seal 건전성 검증 방법

태 발생에 따른 안전성 및 경제적 손실을 감수할 수밖에 없었다.

또한 정비에 있어서도 높은 품질성과 신뢰성이 확보되어야만 하나 현재의 정비 방법은 제작사의 지침에 근거한 정비 기술자의 육안 점검에 의존하여 교체 정비를 수행되고 있어 정비의 품질성 및 신뢰성 확보가 어려울 뿐만 아니라 많은 비용이 소요되고 있다.

이러한 RCP Seal 정비 기술이 갖는 문제점을 보완·개선함으로써 발전소의 안정적인 운영은 물론 경제성을 제고하고자 「RCP Seal 건전성 진단 및 정비 기술」을 개발하게 되었으며, 개발 착수 전 미국 전력연구소 원자력정비센터(EPRI NMAC) 자료 등 해외 기술 정보를 수집하는 등 해외 기술 선진국의 정비 현황 및 동향을 파악하여 RCP Seal 정비 기술 개발의 타당성을 확인하였다.

기술 개발 목표

「RCP Seal 건전성 진단 및 정비

〈표 1〉 RCP Seal의 일반 사양

| 구분 | WH형 Seal | | ABB-CE형 Seal | |
|-------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|------------------|
| | 일반형 | 카트리지형 | | |
| 호기 | 고리 1·2 | 고리 3·4/영광 1·2/울진 1·2 | 영광 3·4/울진 3·4 | |
| 제작사 | WH | WH/JI(울진) | KSB | |
| 펌프(대수) | 각 2대 | 각 3대 | 각 4대 | |
| Seal의 구성 | 펌프당 3개의 Seal로 각 Seal당 회전체 및 고정체로 구성 | | | |
| 재질 | #1 | 회전체 | 세라믹(Si ₃ N ₄) | Carbon |
| | | 고정체 | 세라믹(Si ₃ N ₄) | Tungsten Carbide |
| | #2, 3 | 회전체 | S/S에 Chrome-Carbide 코팅 | Carbon |
| | | 고정체 | Carbon-Graphite | Tungsten Carbide |
| 설치 수량 (set) | 66 | | 48 | |

기술」은 RCP Seal 정비 비용을 줄이면서 정비 품질성·신뢰성을 제고시키고 정비 기술 자립 및 향후 RCP Seal 국산화의 기반을 확보하는 것을 그 최종적인 목적으로 하며 이를 위해 세부적으로 추진중인 목표는 다음과 같다.

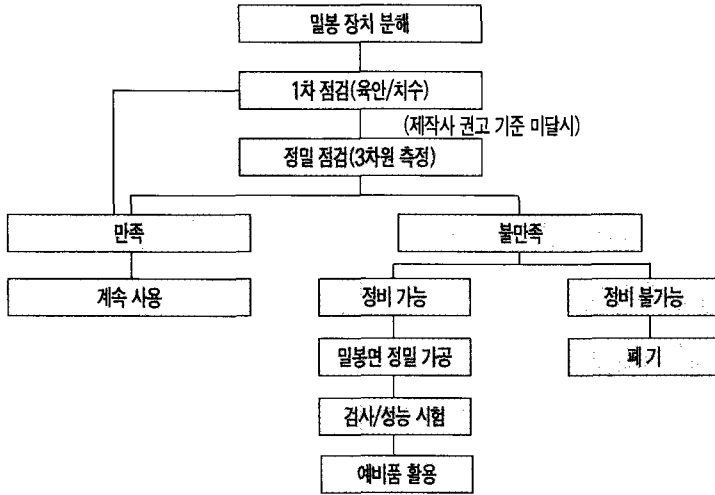
- ① 정밀 점검 기술 개발
 - 정밀 점검 기술 개발 후 현장 적용을 위한 절차서 개발
 - 정밀 점검 장비 확보 후 현장 적용을 위한 절차서 개발
- ② 가공정비 기술 개발
 - 수막 밀봉 방식 Seal 및 면접촉 밀봉 방식 Seal에 대한 가공 정비 기술 개발 및 현장 적용을 위한 절차서 개발
 - 면접촉 밀봉 방식 Seal용 가공 정비 장비 확보
- ③ Requalification 기술 개발
 - Requalification 기술 개발 후 현장 적용을 위한 절차서 개발
 - WH형 No.1 Seal Leak

Tester 구매, 확보

- WH형 No.2,3 Seal Leak Tester 국내 개발(자체 설계·제작·검증)
- ABB-CE형 Seal Leak Tester 국내 개발(자체 설계·제작·검증)
- ④ RCP Seal 모니터링 기술 개발
 - 운전 변수 및 이력 조사 후 Seal의 건전성 확인 추적 관리 체계 구축
 - 운전중인 RCP Seal의 건전성 진단 기술 개발 후 현장 적용을 위한 절차서 개발

기술 개발 내용

본 기술개발을 통해 현재 육안 점검에 의존하여 작업자의 주관적 판단에 의해 수행되던 Seal의 점검은 〈그림 2〉에서 보는 바와 같이 3차원 측정기 등 정밀 점검 장비를 활용하여 정밀 점검을 수행하여 가공



〈그림 2〉 기술 개발 후 RCP Seal 정비 절차

정비 가능 기준 범위 내 손상된 Seal을 Lapping 장비를 이용 밀봉면을 정밀 가공하고 계통에 설치 전 성능 시험 장비를 이용한 시험 및 평가를 통하여 건전성을 입증할 수 있었다.

1. 정밀 점검 기술 개발

회전 기기인 원자로 냉각재 펌프에 있어 Seal의 기능은 정지체인 펌프 케이싱과 회전체인 축 사이에서 원자로 냉각재가 외부로 누설되지 않도록 축 밀봉 기능을 수행한다.

이 기능을 유지하기 위해 발전소 정상 운전시 감압 및 냉각이 수반되며, 원자로 냉각재가 누설되는 밀봉 기능 상실시 발전소의 안전을 위협할 수 있고 복구에도 많은 비용이 소요된다.

또한 발전소 종사자 및 정비 인력의 방사선 조임이 발생하는 이유로 밀봉 기능의 신뢰성 확보를 위해 단단(單段)이 아닌 다단(多段)의 밀봉 장치가 직렬로 설치된다.

이와 같은 이유로 정밀 점검 기술은 RCP Seal의 운전 환경, 밀봉 원리, 설계 특성, 운전 이력, 정비 이력을 반영하여 점검 당시의 RCP Seal이 갖고 있는 상태에 대한 정확한 진단이 필요하다.

이에 따라 WH형 및 ABB-CE형 RCP Seal에 대한 운전 변수 조사·검토 및 분석과 설계 특성 및 밀봉 원리에 대한 검토 및 분석, 그리고 RCP Seal 모든 부품에 대한 실시수 측정 후 도면화 하였다.

또한 정밀 점검용 장비를 확보하였고 정밀 점검 과정을 절차화 하였

으며, 교육과 훈련을 통한 정비 기술자를 양성하였다.

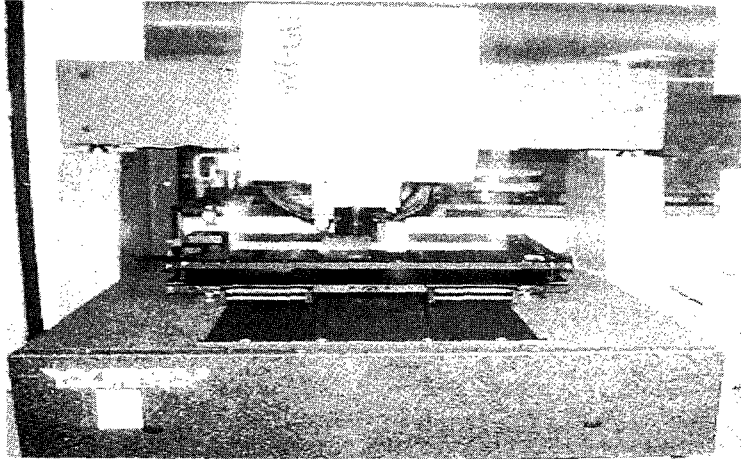
그 결과 마이크론 단위의 RCP Seal 밀봉면 또는 각 점검 부위를 육안 점검하고 재사용 여부를 판정함에서 발생하는 기존의 검사 방법이 갖는 객관성 결여, 기록의 유지 관리 부족 등의 문제점을 해결하고 RCP Seal의 건전성에 대한 정밀 검사, 가공 정비 가능성 및 Seal의 향후 사용 가능 수명을 진단할 수 있게 되었다.

주요 기술 개발 성과물은 WH형/ABB-CE형 RCP Seal 육안 점검 수행 보고서, WH형/ABB-CE형 RCP Seal 정밀 점검 수행 보고서, WH형/ABB-CE형 RCP Seal 정밀 점검 절차서 등이 있으며 정밀 점검 장비로는 3차원 측정기(사진) 및 옵티컬 플랫폼 등이 있다.

2. 가공 정비 기술 개발

가공 정비 기술은 RCP Seal 점검 결과 미세한 손상이 있어 가공 정비 후 계속 사용이 가능한 것으로 판정되고, 그 가공 정비가 제작사의 설계 개념 및 안전성 기준을 위반하지 않는 것으로 판단되는 RCP Seal의 사용 수명을 연장하기 위한 기술로서 가공 정비용 장비 및 자재를 확보하였고, 가공 정비 과정을 절차화하였으며 교육 및 훈련을 통하여 정비 기술자를 양성하였다.

가공 정비 기술은 수막 밀봉 방식



3차원 측정기



Lapping 장비

을 채용하고 있는 WH형 No.1 Seal 가공 정비 기술과 면 마찰 밀봉 방식을 채택하고 있는 WH형 No.2,3 Seal과 ABB-CE형 No.1,2,3 Seal에 대한 가공 정비 기술로 세분하여 개발하였다. WH형 No.1 Seal 어셈블리는 완전

분해 점검 및 가공 정비 기술이 자립되었으며, 그 결과 Seal을 어셈블리 형태로 교체하여 온 정비 방법이 소모성 부품의 교체 후 계속 사용이 가능하게 되었다.

WH형 No.2,3 Seal 어셈블리의 경우는 Seal Ring 및 Runner 표

면에 대한 가공 정비를 통해 마모 및 손상을 지연시켜 그 사용 수명을 연장시키는 것은 물론, 기존의 점검 및 교체에서 점검 및 가공 정비 후 계속 사용이 가능하게 되었다.

ABB-CE형 No.1,2,3 Seal 어셈블리는 Carrier Ring과 Rotating Ring에 대한 가공 정비 기술을 확보하여 기존의 정비 방법과 같이 정비의 수행 없이 계속 사용함에서 발생하는 사용 수명 단축을 예방하고 제작사에서 보장하는 점검 기준 범위 내에서 정비 후 계속 사용이 가능하게 되었다.

주요 기술 개발 성과물은 가공 정비 기술 개발을 위한 RCP Seal Lapping 시험 보고서, 가공 정비 기술 개발 보고서, WH형/ABB-CE형 RCP Seal 가공 정비 절차서 등이 있으며 가공 정비 장비로는 Lapping 장비(사진) 및 컴포지션 정반, 수정반, 측정용 정반 등이 있다.

3. Requalification 기술 개발

Requalification 기술은 앞서 기술한 정밀 점검 기술과 가공 정비 기술을 활용하여 점검 및 정비된 Seal을 RCP Seal Tester 시험을 통한 검증 후 RCP에 설치, 사용토록 하고 RCP Seal에 관련된 운전 변수의 조사로부터 최종 성능 확인 시험까지의 점검·정비 및 시험 과정을 체계적으로 관리하는 기술이다.

본 기술 개발을 통해 Seal의 제품 자체는 물론 정비에 대한 품질성과 신뢰성 제고 및 인적 실수를 줄일 수 있게 되었다.

주요 기술 개발 성과물로는 WH형/ABB-CE형 RCP Seal AUTO-CAD 도면, WH형 No.1 Seal Leak Tester 구매 사양 검토 및 분석 보고서, WH형 No.2,3/ABB-CE형 Seal Leak Tester 설계 도면 및 사양서, ABB-CE형 Seal Leak Tester 시운전 보고서, ABB-CE형 Seal 누설 시험 보고서 등이 있으며, 검증 시험 장비는 WH형 No.1 Seal Leak Tester, WH형 No. 2,3 Seal Leak Tester, ABB-CE형 Seal Leak Tester(사진)의 3가지 시험 장비를 구매 또는 개발하였다.

4. RCP Seal 모니터링 기술 개발

모니터링 기술은 현재 발전소의 계통에 설치되어 운전되는 RCP Seal 관련 각종 운전 변수를 과학적으로 연속 추적 관리·분석함으로써 현재 운전되는 Seal의 정확한 운전 상태 진단 및 수명을 예측하며, 차기 예방 정비 계획 수립을 위한 중요한 기초 자료로 활용하기 위한 추적 관리하는 기술로서, 본 기술 개발을 통하여 추적 관리된 데이터는 Seal 관련 이상 상태 발생시 정확한 원인을 파악하여 근본적인

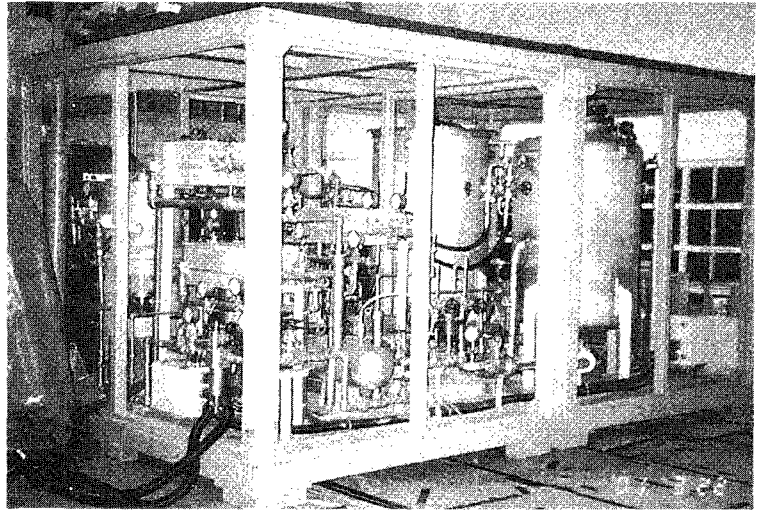


ABB-CE형 Seal Leak Tester

대책을 수립하기 위한 고장 진단에 활용이 가능하다.

주요 기술 개발 성과물은 WH형/ABB-CE형 RCP Seal 운전 변수 조사 및 분석 보고서, WH형/ABB-CE형 RCP Seal 설계 특성 검토 및 분석 보고서, 어떠한 운전 변수에 변화 또는 비정상적인 상황 발생시에 그 운전 변수가 의미하는 내용이 무엇이며 운전자나 정비자가 취해야 할 조치 사항 및 향후 변화 추이를 예측하기 위한 기술 절차서가 있다.

기대 효과

RCP Seal 건전성 진단 및 정비 기술 확보에 따른 경제적·기술적인 효과뿐만 아니라 Seal의 국산화

개발에도 이용 가능하여 파급 효과가 클 것으로 기대된다.

먼저 경제적인 효과를 살펴보면, 국내 가동중인 가압 경수형 원전 12호기를 기준하여 수입 비용이 가동 주기당 72.6억원이 소요되고 있으며 본 기술의 30% 정비율(Seal을 정밀 점검하고, 가공 정비한 후 성능 시험을 거쳐 Seal의 건전성이 입증될 수 있는 최소 정비 비율을 말함)을 감안하면 21.8억원의 수입 대체 효과가 기대되며, 현재 건설중인 발전소에 적용하면 수입 대체 비용은 크게 증가 될 것이다.

추가적으로 지금까지 사용한 Seal 중 보관 상태가 양호한 Seal 123 set에 본 기술을 적용하여 예비품으로 활용할 경우, 79억원(정비 비율 50% 기준)의 경비 절감 효과

가 있을 것으로 판단된다.

또한 RCP Seal 설치 전 신뢰성 확보를 통하여 기동시 운전 정지를 방지에 따른 전력 생산 손실이 줄어들 것으로 기대된다.

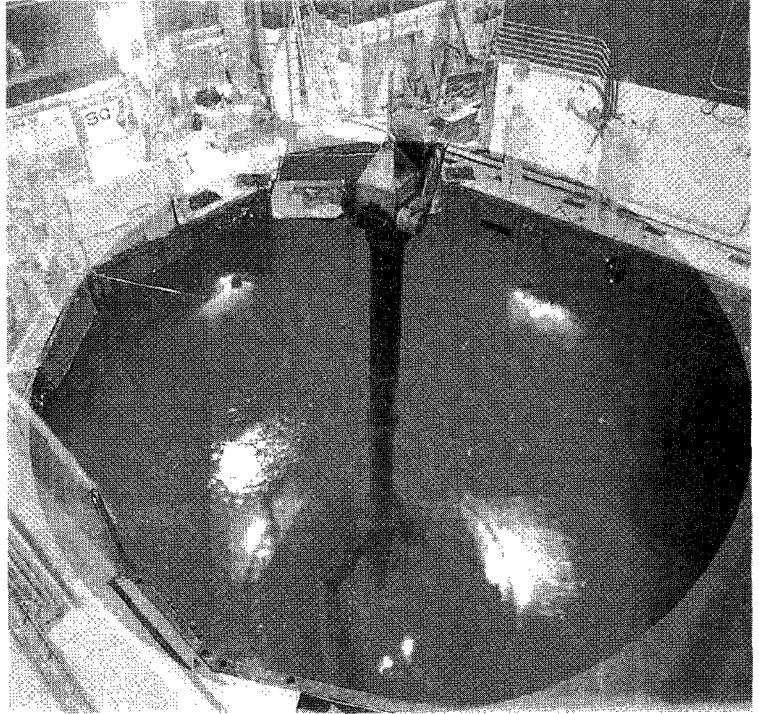
기술적인 효과를 살펴보면, 정비의 품질성 및 신뢰성 제고로 발전소의 안정성이 증대되며, 기술 자립에 의한 기술 경쟁력 확보로 기술의 수출 및 RCP Seal 설비의 국산화도 기대된다.

아울러 설비 장착 전 신뢰성의 입증으로 인한 운전시 고장의 감소로 발전소 종사자의 방사선 쏘임량 저감이 예상되는 등 ICRP 60 도입에 따른 현안 사항 해결에 기여할 것이며 기타 타산업에도 파급되는 효과가 클 것이다.

맺는글

「RCP Seal 건전성 진단 및 정비 기술」은 현재 수행중인 RCP Seal 정비 방법을 보완하고 개선하여 과학적이고 체계적인 정비 체계와 품질 보증 체계를 확립하여 정비 품질과 신뢰성을 극대화시키면서 고가인 Seal의 사용 수명을 연장시켜 경제성을 제고하는 것을 목적으로 개발되었다.

자원 빈국인 우리 나라에서 발전 연료 비중이 상대적으로 저렴한 원자력발전소 건설이 계속 증가할 것으로 예상됨에 따라 RCP Seal의



원자로 용기. 「RCP Seal 건전성 진단 및 정비 기술」은 현재 수행중인 RCP Seal 정비 방법을 보완하고 개선하여 과학적이고 체계적인 정비 체계와 품질 보증 체계를 확립하여 정비 품질과 신뢰성을 극대화시키면서 고가인 Seal의 사용 수명을 연장시켜 경제성을 제고하는 것을 목적으로 개발되었다.

수요도 증가될 것으로 전망된다.

RCP Seal은 이상 발생시 발전소 건전성 상실의 우려가 있어 높은 품질성·신뢰성 및 안전성이 요구되며, 가격 또한 고가에 전량 수입에 의존하여 막대한 외화가 지출되는 실정이었다.

RCP Seal의 점검 및 정비는 제작사 혹은 공급사에 의해 제시된 지침을 준수하면서 수행하여 왔으나, 관련 장비 및 기술의 미확보 또는 미자립에 기인, RCP Seal의 상태에 대한 정확한 진단 기술 및 정비를 통한 수명 연장 기술이 도입되지 못하여 고가의 제품을 지속적으로 수입하여 교체하여 왔으며, 당연히

정비 비용의 지출이 많은 문제점을 안고 있었다.

또한 RCP Seal의 자체적인 품질이나 정비 품질에 대한 검증 기술이 미자립되어 적절히 적용되지 못하여 정비 비용이 높으면서도 정비 품질이 만족스럽지 못하였다.

이러한 문제점 해결 방안의 일환으로 출발하게 된 본 기술 개발의 성공적인 결과로 RCP Seal의 품질성과 신뢰성은 해외 제작사와 동등한 수준으로 유지·관리될 것으로 확신하며, 정비 비용의 절감에 의한 경제성 또한 크게 제고될 것으로 확신한다. ☞