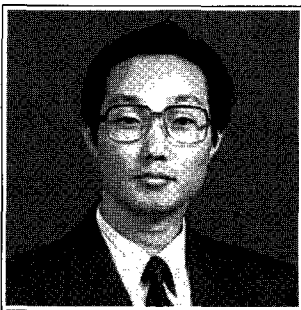


원전 잔열제거펌프 정지사고 예방기술 개발경위와 앞으로의 전망

박 윤 원

한국원자력안전기술원 기계설비그룹 책임연구원



한국원자력안전기술원은 최근 가압경수로형 원자로에서 발생하는 잔열제거펌프의 정지사고를 예방하는 방법을 개발하였다.

이 연구개발은 가압경수로형 원자로의 부분충수운전시 운전의 안전성을 위하여 냉각수의 최대 허용수위를 높이고 최저 요구수위를 낮출 수 있는 방안으로서, 우회유로를 이용한 획기적인 부분충수운전 개선방안이다.

한국원자력안전기술원은 이의 개발과 함께 미국 특허를 취득하였는데, 이는 외국의 기술을 받아들이면서 그의 문제점을 파악하여 해결책을 제시함으로써 국내 원전 관련 기술능력을 크게 제고시킨 것으로 평가된다.

가 압경수형 원자로에서는 증기발생기의 튜브 검사나 보수 또는 냉각재펌프의 밀봉(Seal)교체 등을 위해 원자로냉각재의 수위를 고온관의 중간 부분까지 낮추어 운전할 경우가 발생한다.

이 경우에 잔열제거계통을 이용하여 노심에서 핵연료의 붕괴로 인한 잔열을 제거하게 되는데, 노심냉각수는 고온관으로부터 잔열제거계통의 흡입배관을 통해 흡입되어, 잔열제거

프·열교환기를 거쳐 저온관을 지나 다시 노심으로 들어가게 된다.

이와 같은 운전상태에서 냉각재 수위를 너무 높이면 원자로계통의 개방된 부분을 통하여 냉각재가 넘쳐 흐르게 되고, 냉각재 수위를 너무 낮추면 잔열제거계통의 흡입구에서 와류현상으로 인하여 잔열제거펌프로 공기가 유입될 수 있다.

유입된 공기의 양이 많을 경우에는 잔열제거펌프를 완전히 정지시켜 잔

열제거계통의 상실을 일으킬 수가 있다.

이와 같은 운전을 부분충수운전이라고 하는데, 이 경우에 냉각재의 넘침을 방지하기 위한 최대 허용수위와 공기의 흡입을 방지하기 위한 최저 요구수위와의 간격, 즉 운전가능한 영역이 크지 않아 운전에 있어 매우 세심한 주의를 요하게 된다.

따라서 부분충수운전시 운전 안전성을 위하여 최대허용 수위를 높이고

최저 요구수위를 낮출 수 있는 방안이 다각도로 연구되고 있다.

이 글에서는 최저 요구수위를 낮출 수 있는 방안으로 연구된 우회유로를 이용한 부분충수운전 개선방안에 대해 살펴보고자 한다.

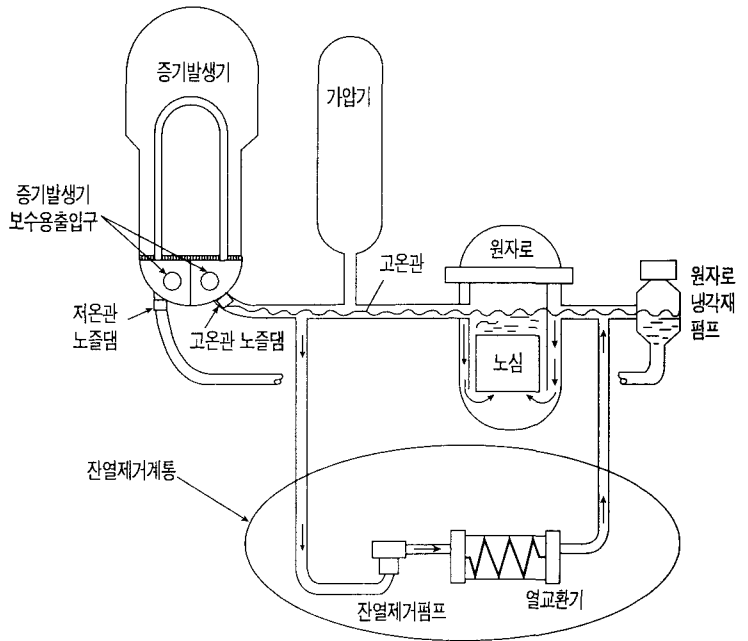
원전에서의 부분충수운전

1. 부분충수운전 개요

원자력발전소에서는 증기발생기의 튜브 검사나 보수, 냉각재펌프의 밀봉(Seal)교체, 또는 핵연료 재장전 수위 지시계 검사 등을 위해 원자로냉각재의 수위를 고온관 중심 지점까지 낮춘 후 운전할 필요가 생긴다(그림 1).

가장 대표적인 경우는 증기발생기의 세관검사를 위한 노즐담 설치를 위한 것이며, 이 때 원자로의 수위를 높이면 증기발생기의 맨웨이(Man-way)를 통하여 원자로냉각재가 원자로냉각재계통 외부로 넘쳐 나오게 되고, 수위를 너무 낮추면 고온관에 연결된 잔열제거펌프의 배관으로 공기가 과도하게 흡입되어 잔열제거펌프의 양정이 급격히 떨어지고 정지냉각계통이 상실된다.

그러므로 냉각재계통의 냉각재량을 줄여 고온 및 저온관 배관단면적 일부가 공기로 채워지고 나머지는 물로 채워지는, 즉 냉각재가 넘쳐 흐르지 않도록 최대허용 수위와 잔열제거계통(RHRS) 배관으로의 공기흡입을 방지할 수 있도록 하는 최소 요구수위



(그림 1) 부분충수운전(Mid-loop Operation) 개요

사이로 냉각재의 수위를 유지하며(이 수위가 대개는 고온관의 중심선 부근에 위치) 원자로에서 발생하는 잔열을 잔열제거계통으로 제거하는 운전이 필요하게 된다.

이것을 부분충수운전(Mid-loop Operation)이라 하는데, 이 경우에 노심냉각수는 고온관으로부터 잔열제거계통의 흡입배관을 통해 흡입되어 잔열제거펌프·열교환기를 거쳐 저온관을 지나 다시 노심으로 들어가게 된다.

가장 흔히 접하게 되는 부분충수운전은 핵연료 재장전시이며 이 경우, 부분충수운전은 대개 원자로 정지 후

5일 정도 후에나 가능하므로, 중성자 분열로 인한 열출력은 거의 없고 단지 핵분열생성물로 인한 붕괴열로부터 잔열만이 나오게 된다.

이러한 무출력운전시 붕괴열은 운전시의 열출력에 비해 그 양이 상대적으로 적다.

따라서 노심손상까지에는 상당한 시간적 여유가 있을 것으로 생각되어, 저수위운전 혹은 부분충수운전시의 노심손상 가능성은 그 중요성에 비추어 경시되어 왔다.

핵연료 재장전시에 수행되는 부분충수운전의 경우, 기존의 원자로 수위 계측은 통상 투명한 비닐호스(Tygon

Hose)를 한 쪽은 잔열제거계통 흡입구 탭에 연결시키고 다른 한쪽은 가압기의 상부 벤트(Vent) 부위에 연결하거나 충분한 높이에서 대기압 상태로 개방시켜, 투명 비닐호스를 통하여 수위를 육안으로 관찰하게 되어 있다.

따라서 부분충수운전 중에 운전원이 수시로 격납용기 내를 왕래하며 수위를 관찰하거나 주제어실과 전화 및 무선통신으로 연락해야 하는 불편이 있었다.

아울러 비닐호스를 통한 육안관찰은, 호스의 중간 부분에 공기가 잡혀 있는 경우나 가압기를 질소로 충전하여 가압기 상부와 호스 상부에 압력차가 존재하는 경우에는 수위계의 지시치와 실제 수위는 다르게 된다.

일반적으로 비닐호스를 운전중인 잔열제거계통의 흡입구측 탭에 연결해 놓으면 잔열제거계통 배관내의 유속으로 인해 약 15인치 정도가 실제보다 낮게 나타나게 되므로, 이를 피하기 위해 운전되지 않고 있는 트레인(Train)의 흡입구측에 연결하게 된다.

이 경우에 비닐호스의 표면장력으로 인해 수위지시에 약간의 오차가 발생할 수도 있으나, 이는 대략 0.1인치 미만으로 평가되어 무시할 수 있다고 하겠다.

또한 운전원 상호간의 의사소통의 착오 및 발전소 교대조의 부정확한 의사전달과 같은 인간공학적 오류 등으로 인하여 부분충수운전시 적절한 냉

각제 수위를 유지하지 못하므로, 정지냉각펌프의 흡입구측으로 공기가 유입됨으로써 정지냉각기능의 상실을 초래하게 된다.

2. 부분충수운전 관련 규제요건

부분충수운전시 정지냉각계통이 상실되면 원자로에서 발생하는 잔열을 제거하지 못하게 됨으로써, 원자로냉각계통은 수분 이내에 포화상태에 도달하게 되고 노심의 비등이 시작되며, 노심이 노출되어 결국에는 노심에 심각한 손상을 입히게 되는 사고가 유발된다.

이와 같은 노심의 손상을 방지하기 위해 잔열제거계통의 상실 가능성을 최소화하고, 잔열제거계통이 상실되었을 경우에는 다른 수단을 사용해서라도 노심의 잔열을 제거해야만 한다.

미국 NRC에서는 GL88-17을 통해 발전소 저수위운전시 사고방지 및 사고대응조치에 필요한 사항들을 크게 신속 조치사항과 단계적 조치사항으로 구분하여 요구하고 있으며(표 1), 이는 다음의 4개 항목으로 요약될 수 있다.

△ 원자로냉각계통 수위측정 설비의 신뢰도 증가
 △ 잔열제거계통 상실을 탐지할 수 있고 이와 같은 경우에 노심에서의 냉각제 거동을 확인할 수 있는 각종 계기의 설치
 △ 사고의 방지 및 수습을 위한 운전절차서의 개발
 △ 잔열제거계통 상실사고시 노심손상을 방지하거나 완화시킬 수 있는 대

〈표 1〉 저수위운전시 사고방지 및 사고대응조치에 필요한 사항

신속조치사항
수위감시설비의 다중화
온도감시설비의 다중화
사고에 대비한 격납용기 격리절차 수립
운전원에 대한 교육
부분충수운전시 원자로냉각계통(RCS) 교란방지절차 수립
잔열제거계통 이외에 추가 RCS 보충수단 확보
RCS Vent Path 확보전 고온관 차단방지
단계적 조치사항
계장설비의 설치
부분충수와 관련된 절차서 개발
기기 및 장비의 확보
자료에 대한 분석 및 분석결과의 반영
기술지침서 보완
RCS 교란방지책

책강구 등이다.

이와 같은 요구사항에 대해 국내에서의 이행상황을 점검한 결과, 부분충수운전시 그리고 잔열제거계통 상실사고시 노심상태를 적절하게 확인할 수 있는 계장설비들이 설치되어 있지 않으며, 부분충수운전 관련절차서의 개발도 미흡한 것으로 나타났다.

또한 이들 계장설비의 설치 및 관련절차서를 개발하기 위해서는 열수력분석이 필수적이거나 현재까지 거의 수행되지 않은 상태이며, 따라서 이의 분석자료를 토대로 마련되어야 하는 기술지침서의 보완, 원자로계통 운전에 교란을 줄 수 있는 모든 운전제한

및 행정적 보완도 적절히 이루어지지 않은 상태이다.

다음에서 소개되는 바와 같이 국내 원전에서도 부분충수운전시 잔열제거계통 상실사고가 발생한 사례가 있으므로 이에 대한 보완이 시급히 이루어져야 할 것이다.

3. 잔열제거계통 상실에 대한 분석

부분충수운전시 발생할 수 있는 잔열제거계통의 기능상실은 다음과 같이 몇 가지의 상황에 대해 분석하여 볼 수가 있다.

가. 증기발생기 이용가능시

잔열제거계통의 상실 후 증기발생기가 이용가능하다면 노심내에 발생되는 열을 제거하는 데 큰 역할을 수행할 수 있게 된다.

즉 증기발생기의 2차측이 물로 채워져 있다면 노심에서 발생한 증기가 증기발생기의 세관에서 2차측으로 열전달을 통해 냉각되므로 노심손상을 지연시킬 수 있게 된다.

예비평가된 결과에 따라 울진 3·4호기에 대해 계산된 자료에 의하면, 잔열제거계통의 상실 후 약 1시간 후에 RCS 압력이 32psig까지 증가하고 증기발생기 2차측에서의 비등이 발생하게 된다.

나. 증기발생기 사용이 불가능시

부분충수운전시 잔열제거계통이 상실된 후 증기발생기를 통한 냉각이 불가능하고 RCS의 압력상승을 방지할 수 있는 충분한 Leak Path나

Vent Path가 없다면 노심에서의 비등은 훨씬 더 빠른 시간 내에 진행될 것이다.

예로서 이와 같은 경우, 울진 3·4호기에 대한 분석결과, RCS의 압력은 잔열제거계통의 상실사고 후 약 30분만에 385psig까지 상승하게 됨을 보여주고 있다.

특히 고온관측이 막혀 있고 저온관측에 큰 개구부가 존재하는 상황에서는 비등후 수분 내에 노심이 노출된다.

부분충수운전하에서 정지냉각기능 상실은 비록 노심노출상태까지 도달하지 않는다 하더라도, 원자로냉각재계통이 열려있는 상태에서 노심의 비등이 발생하면 격납용기내로 방사성원소의 누출이 수반된다.

이의 중요성을 인식하여 관련 직원을 충분히 교육·훈련해야 하고 관련 절차서의 정비, 필요부품의 개조 및 개선에 의해 이러한 사태발생의 사전방지와 사태 발생시 신속한 대응조치가 이루어져야 한다.

다. 잔열제거계통의 상실후 노심 노출

잔열제거계통의 상실 후 노심이 노출되기 전에 충분한 용량의 냉각재가 주입된다면 노심노출은 발생되지 않을 것이나, 그렇지 못할 경우, 노심노출은 부분충수운전 수위에서 노심 상부의 높이까지에 해당하는 물이 비등되는 시간을 계산하면 구할 수 있다.

울진 3·4호기에 대해 계산된 결과

에 따르면 약 2.17시간 후에 노심이 노출될 것으로 평가되었고, 고리 1호기는 약 1시간, 고리 3호기는 약 1.3시간 후면 노심 상부가 노출될 것으로 평가되었다.

잔열제거펌프의 정지사고 사례

국내외에서 정지 및 저출력운전시 잔열제거계통 상실과 관련한 운전경험을 검토·요약함으로써 현재 발전소에서 일어나는 잔열제거계통 관련 사건의 특징·문제점·개선사항들을 도출할 수 있을 것이다.

부분충수운전시 발생한 국내외의 잔열제거계통 상실사고는 여러 차례가 있었으며 그중 몇 가지 국내외의 사례를 소개하기로 한다.

1. 국외의 사고사례

가. Diablo Canyon 2(87. 4)

발전소는 정지후 7일이 경과되었으며 증기발생기에 노즐땀을 설치하기 위해 잔열제거계통을 사용하여 Mid-loop 운전을 하고 있었다.

주제어실 운전원은 임시 설치된 수위지시계통을 사용하여 원자로냉각재계통의 수위를 감시하고 있었다.

원자로냉각재펌프 밀봉회수관으로부터 화학체적탱크(VCT)로의 국부누설시험을 준비중이던 시험원이, 사전에 격리되어 있던 배관으로부터 물을 배수시키기 위해 배기밸브 및 배수밸브를 열고 격납용기를 떠났다.

배수도중 격리밸브 중 하나에서 누설이 발생하였고, 이 결과로 화학체적 탱크의 수량이 감소하게 되었다.

이 누설은 현장에서 발견되지 못하였고 이 작업의 시험원은 하루 전에 발급된 작업요청서에 의거하여 시험을 수행하였기 때문에, 이 시험의 시작 전에 시험개시 여부를 운전원에게 알리지 않았으며 따라서 운전원은 이를 모르고 있었다.

이후에 VCT의 수위저하가 주 제어실에서 확인되었고, 운전원은 이것이 Letdown Flow의 감소로 인한 것으로 판단하여 Letdown Flow를 증가시켰다.

이 결과로 원자로냉각재계의 수위는 서서히 감소하기 시작하였으며 이는 임시수위지시계통을 통해 확인되었다.

이어서 RHR 흡입배관에서 과도한 Vortex가 형성되고 공기가 흡입되었다.

원자로냉각재계의 수위저하가 발견되었을 때, 운전원은 Letdown Flow와 충전수를 차단하였다.

이 조치에 의해 Letdown으로 인한 유량감소는 멈추었으나, 여전히 배수 밸브가 열린 것은 발견되지 않았고 따라서 VCT의 수위는 계속 감소하였다.

RHR 펌프는 공기흡입으로 인해 정지되었고 노심의 붕괴열로 인해 원자로냉각재의 온도는 증가하기 시작하였다.

운전원은 이와 같은 원자로냉각재의 온도상승을 과소평가하였다.

노심 상층부위 노심열전대는 원자로헤드를 분리하기 위해 이미 단절되어 있었고, RTD에 의한 온도측정은 유량부족으로 신뢰할 수 없는 상태였으므로 운전원은 급격한 온도상승을 모르고 있었다.

증기발생기 맨웨이 개방작업중이던 작업자들의 안전을 위한 배려로 인해 원자로냉각재계통의 수위상승조치가 지연되어 수위복구에는 1시간 28분이 소요되었다.

냉각재는 87°F에서 220°F까지 상승되었고 압력은 10psig까지 증가하였다.

이러한 과정중에 증기는 원자로헤드의 벤트를 사용하여 격납용기 내로 방출되었는데 압력이 증가되면서 파열되고 말았다.

밀봉이 불완전한 증기발생기 맨웨이를 통해 물이 흘러 나왔으며 격납용기 내의 방사능준위가 높아져 격납건물 내 작업자의 대피가 필요하였다.

이 사건 이후에 이 발전소에서는 원자로냉각재계통의 배수를 위한 절차서를 개정하였고, 잔열제거유량에 관련된 주의사항 및 Vortex 형성에 의한 공기흡입을 방지하기 위한 주의사항을 만들었다.

이들 절차서에는 원자로냉각재 유량의 유지에 직간접으로 영향을 미칠 수 있는 모든 작업시 상호간의 연락에 필요한 사항들도 명기하였다.

운전중에 RHR 펌프의 상실을 고려하여 원자로냉각재 수위의 복구와 이후의 RHR 운전에 관한 RHR 상실에 대한 비상운전절차서를 개정하였다.

또한 Mid-loop 운전을 수행하기 전에 격납용기의 건전성을 확보하도록 하였다.

나. Waterford Unit 3(86. 6)

86년 6월 14일 1시 13분 RCP의 Seal Package 교체를 위해 RCS를 Mid-loop까지 배수시켰다.

이때 물은 저압안전주입펌프와 화학 및 체적제어계통을 통해서 RWST (Refueling Water Storage Tank)로 보내졌다.

배수완료 후 운전자는 절차서가 없기 때문에 저압안전주입측 밸브를 잠그는 것을 잊어 버렸고 RCS 냉각재는 RWST로 계속적으로 배수되었다.

이때 수위지시계인 Tygon Tube에 문제가 발생하였다.

배수량 만큼의 질소가 주입되고 있었으나 배수량을 보충해 주기에는 충분치 못해서, RCS에 부압력이 걸렸고 이로 인해 수위계측이 흔들렸으나 운전자가 이 계기를 믿지 않았다.

이후에 정확한 값을 알기 위해 RCS를 배기시켰다.

배기완료 후 수위가 고온관 이하로 떨어지므로 예방조치로 충수를 시작하여 저압안전주입펌프 B가 성공적으로 작동하였고 수위도 높게 나타났으므로 운전자는 수위지시계가 잘못되

었다고 판단하였다.

3시 17분 저압안전주입펌프 B가 요동하여 펌프를 멈추었으며, 이 때 야 두 밸브 SI-120B, SI-121B가 열려 있는 것을 알고 충수시켜 3시 51분에 고온관 바로 아래까지 도달하였다.

4시에 RCS의 온도는 223°F였다.

저압안전주입펌프 B를 가동하였으나 실패하였다.

펌프 급기동을 통해 6시 58분 저압안전주입펌프 A의 기동성공으로 잔열제거계통의 기능이 회복되었다.

2. 국내의 사례

국내에서는 웨스팅하우스형 발전소인 고리 2호기가 84년 6월 1일에, 고리 3호기가 87년 10월 2일에 Level Monitoring System의 부정확성으로 인하여 각각 40여분과 10여분 동안 RHR 계통 상실을 경험한 바 있다.

가. 고리 2호기(84. 6. 1)

핵연료재장전을 위해 RCS를 배수하여 고온관 중간에서 3cm 위로 수위를 유지하며 RHR 계통을 운전하고 있었다.

계기과에서 RWST 수위채널 교정을 위해 작업 중 계기도면상의 점점상태가 실제 상태와 일치하지 않아 기판(Card)을 삽입하는 순간, RWST 저저수위(Low-Low Level) 신호가 발생하고 격납건물 펌프에서 RHR 펌프 흡입부에 연결되어 있는 밸브가 개방됨으로써, RCS 냉각재가 격납건물

펌프로 배수되어 RCS의 수위가 낮아졌고 이어서 운전중인 RHR 펌프 'B'가 진동후 정지되었다.

이 사고는 작업전 운전원의 계통과 악 미흡이 주원인이다.

또한 사고 후 펌프의 재기동을 위해서는 충분한 유효수두가 확보되었는가, 공기가 계통내로 유입되지는 않았는지 확인한 후 펌프기동을 해야 하나 이를 잘 파악하지 못하였다.

따라서 부분충수운전시 RHR 계통에 영향을 줄 수 있는 보수작업이나 시험은 피해야 하며, 부득이할 경우에는 충분한 사전교육 내지는 준비가 선행되어야 한다.

또한 사고후 사고회복을 위한 조치에 대한 절차서의 개발 등이 매우 시급한 것으로 판단되었다.

나. 고리 3호기 (87. 10. 2)

원자로냉각재계통의 부분충수운전시 비닐호스로 RCS 수위를 읽으며, 116' 3"(정상적으로 SG ECT 배수 수위는 115' 9"임)까지 배수시키자 잔열제거계통으로 공기가 유입되어 RHR 펌프 'A'가 진동하면서 정지하였다.

이때 실제로 수위는 116' 이하까지 내려간 것으로 판단되며, 결국은 수위 측정설비가 정확한 수위를 나타내고 있지 않은 상태에서 이를 믿고 운전원이 운전을 계속함으로써 RHR 계통에 공기가 흡입되어 RHR 펌프가 정지된 것이었다.

○이후에 RHR 펌프 'B'를 가동시

켰으나 곧 정지하였고 RCS 내의 냉각재 온도는 95°C까지 상승하였다.

이 사고로 인하여 대략 40분간 잔열제거기능이 상실되었다.

이 사고는 증기발생기 노즐댐 설치를 위한 배수 및 부분충수운전시 수위가 너무 낮아져 공기가 흡입되지 않도록 원자로냉각재계통 수위에 대한 계측이 정확해야 한다는 점을 주지시켜 주었다.

또한 RHR 펌프가 상실되었을 경우, 다른 트레인의 펌프를 가동시킬 경우에도 충분한 수두가 확보되었는가와 계통 내의 공기가 배기되었는지를 확인해야만 한다.

개발경위

1. 개발동기

울진 3·4호기에 대한 건설허가 심사시, ABB-CE형의 발전소는 노즐댐을 설치하기 위한 부분충수운전시 최대·최소허용 수위의 범위가 고온관을 기준으로 약 4인치가 되는데, 이는 웨스팅하우스형의 발전소인 고리 3호기가 12인치 정도임에 비교할 때 매우 작은 점을 확인하였다.

따라서 부분충수운전시 잔열제거계통의 상실 가능성이 그만큼 높다고 할 수 있기 때문에, 한국원자력안전기술원에서는 주요 보완요구 사항으로 부분충수운전의 타당성 입증을 요구하였다.

보완요구 내용으로서는 △ 부분충

수운전을 위한 임계수위 실증시험을 수행하고 이에 따른 설계적합성 평가 자료의 제출 △ 부분충수운전을 위한 안전조치사항(GL88-17)을 충족시키는 운전 안전성 입증자료의 제출을 요구하였다.

이 과정에서 한국전력공사는 울진 3·4호기에서의 부분충수운전 가능성을 입증하기 위해 한국원자력연구소에 있는 시험루프를 사용하여 모의 시험을 하였으나, 이 실험을 통해 부분충수운전의 가능성보다는 오히려 부분충수운전으로 인한 잔열제거펌프의 상실 가능성이 매우 높다는 점을 확인하게 되었다.

이 시험을 통해 필자는 펌프의 안정성과 잔열제거계통 흡입구에서의 최대 유효수두의 확보를 동시에 얻을 수 있는 방법이 필요함을 알게 되었다.

이와 같은 방법으로 고려하기 시작한 것이 펌프를 통과하는 유량은 변화시키지 않되, 잔열제거계통의 흡입구에서 들어오는 냉각수의 양을 감소시켜 임계수위를 낮추는 방법이었다.

2. 부분충수운전의 경제적 효과

일반적으로 원전에서는 핵연료 재장전 기간 동안 증기발생기 세관검사, 원자로냉각재펌프의 밀봉교체 등 중

요한 보수작업을 하게 되는데, 이 경우에 부분충수운전을 수행할 수 있을 경우와 이를 수행하지 못할 경우, 전반적인 보수공정에는 상당한 차이가 있게 된다.

〈그림 2〉에서 보는 바와 같이 핵연료재장전시 부분충수운전을 할 수 있을 경우에는 원자로 정지 후 4일 정도 후에 증기발생기 맨웨이를 개방하고 노즐담을 설치하여 증기발생기 세관검사를 수행할 수 있으나, 그렇지 못할 경우에는 핵연료를 완전히 인출한 후 즉 원자로 정지 후, 약 16일 정도 후에나 증기발생기의 맨웨이를 개방하고 노즐담을 설치한 후 증기발생기 세관검사를 할 수 있게 된다.

즉 공정상으로 약 12일 정도의 단

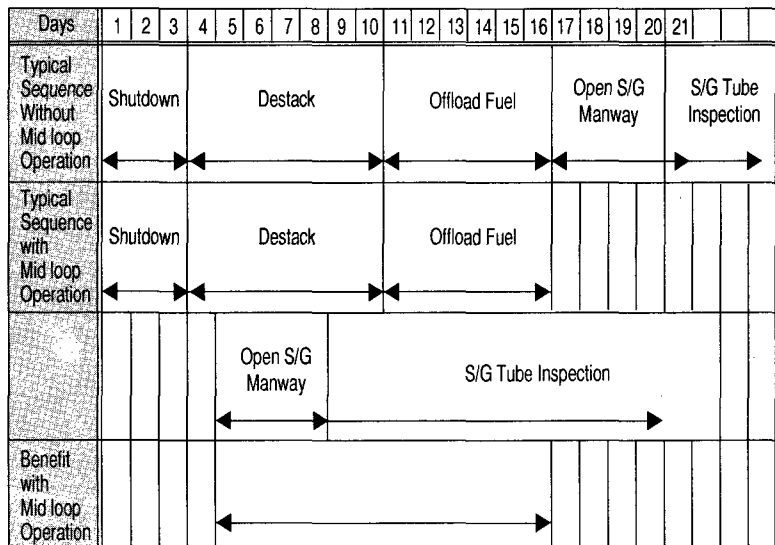
축효과를 얻을 수 있기 때문에 부분충수운전을 수행할 수 있으나 여부는 사업자의 측면에서 본다면 경제적으로 매우 큰 차이가 있게 되는 것이다.

3. 개발과정

부분충수운전시 잔열제거계통의 상실을 방지할 수 있는 방법은 GL88-17에서 요구하고 있는 바와 같이 여러 가지 방법을 고려할 수 있으나, 궁극적으로는 잔열제거계통으로의 공기 흡입을 막는 것이 가장 중요한 것이라 할 수 있다.

이를 위해서는 최대허용 수위를 높이는 방법과 임계수위를 최대한 낮출 수 있는 방법이 강구되어야 한다.

웨스팅하우스형의 원전이 ABB-



〈그림 2〉 핵연료재장전시 부분충수운전을 할 경우에 대한 공정상의 효과

CE형의 원전에 비해 운전여유도가 큰 이유는, 고온관이 증기발생기의 노즐과 연결되는 부위에서 위로 더 많이 구부러져 있어 최대허용 수위가 상대적으로 높기 때문이다.

영광 3·4호기나 울진 3·4호기의 경우, 이미 설치완료된 상태이기 때문에 이와 같은 최대 허용수위를 변경시킬 수 있는 가능성은 없다고 하겠다.

따라서 고려할 수 있는 방법은 잔열 제거계통으로 공기가 흡입되지 않도록 하되 임계수위를 최대한 낮추는 것이다.

본 실험의 모델이 된 울진 3·4호기의 경우 잔열제거펌프의 용량은 5,000GPM(18,900 l/분)으로서, 부분충수운전이 필요한 시점인 원자로 정지 후 3일 후부터는 노심에서 발생하는 열은 노심의 붕괴열 뿐이기 때문에, 이의 냉각을 위한 유량은 잔열제거펌프의 정격용량이 모두 필요한 것은 아니다.

따라서 원자로를 정지한 1일 후에 4,000GPM의 유량이 필요하다면, 그 이후는 노심의 냉각에 필요한 유량이 급격히 감소하게 되고 5일 정도 후에는 약 2,500GPM 정도면 노심냉각은 충분하다.

따라서 이 필요한 만큼의 유량만을 공급해준다면 노심의 냉각에는 문제가 없는 것이다.

단지 이 경우에 봉산의 성층화를 방지할 수 있는 정도의 유량은 계속 유지되어야 하기 때문에, 과연 어느 정

도까지 유량을 감소시킬 것인가 하는 문제가 발생한다.

미국의 사업자들이 수행한 실험결과 2,000GPM 이하에서도 봉산의 성층화는 문제가 되지 않는 것으로 평가되었다.

따라서 노심의 냉각에 문제만 없다면 2,000GPM까지의 냉각유량 허용이 가능하다고 판단된다.

이 경우에 순환유량을 줄이면 그만큼 흡입관으로의 공기흡입 가능성은 감소할 것이나 펌프의 안정성에 문제가 생길 수 있고, 저유량에서는 펌프의 안정성이 자유표면 유동의 안정성에 지대한 영향을 미치게 되므로 펌프의 안정성을 유지하는 것이 중요하다.

이와 같은 관점에서 펌프를 통과하는 유량은 일정하게 유지하고 단지 냉각수량만을 감소시킴으로써, 흡입관을 통과하는 유량을 감소시켜 공기의

흡입 가능성을 최대한 낮출 수 있는 방안으로 연구된 것이 바로 우회유량을 사용하는 것이다.

원자로 정지 후 노심의 붕괴열을 제거하기 위한 냉각유량과 우회유량과의 관계는 <그림 3>에 보는 바와 같다.

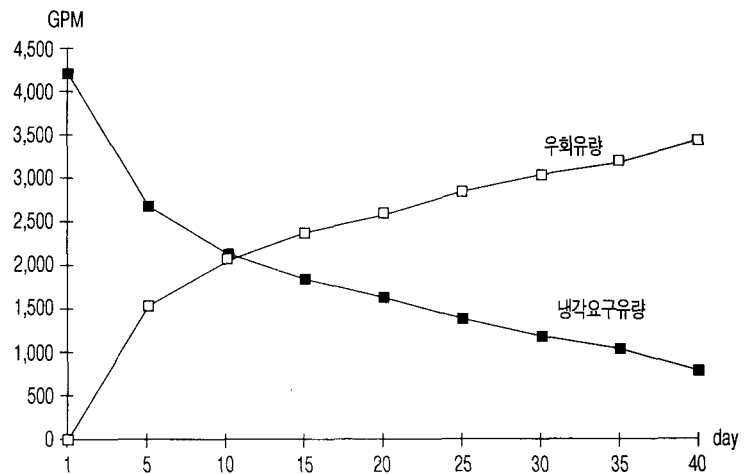
우회유로를 사용하는 방법의 타당성을 확인하기 위한 상사모의실험이 다음과 같이 수행되었다.

가. 실험을 위한 상사법칙

자유수면을 가지는 유동에 대한 이론적 해석은 많이 연구되어 왔으나, 유체유동 특성의 복잡성과 경계조건에 복잡한 비선형성 때문에 실제 상황에 근접하게 해석하는 데에는 많은 어려움이 따른다.

따라서 대부분의 연구는 상사모의 실험을 통해 접근하고 있다.

그 동안의 연구결과를 종합하여 보



(그림 3) 원자로정지 후 노심냉각에 필요한 유량

면 자유수면을 가지는 유동에서 공기 흡입현상을 유발시키는 주요 요소들은 중력·표면장력·관성력 등이라고 알려져 있으며, 이와 관련된 무차원변수들은 Froude수, Reynolds수 및 Weber수이다.

이중에서 Reynolds(Re)수는 점성력에 대한 관성력의 비로서 $Re = \rho Vd/\mu$ 로 정의되며, Re값이 5×10^4 이상일 경우에는 와동에 미치는 점성의 효과는 거의 무시할 수 있다고 알려져 있다.

실제 원전에서는 Re값이 약 10^6 이상이 되기 때문에 점성에 의한 영향은 무시할 수 있다고 하겠다.

Weber(We)수는 표면장력에 대한 관성력의 비로 $\rho V^2 We = \rho V^2 d / \sigma$ 로 정의되며 $120 < We < 3.4 \times 10^4$ 범위에서는 그 영향을 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다.

원전의 경우, We는 10^3 정도의 값을 가지고 있으므로 이의 영향도 고려할 필요가 없다고 하겠다.

한편, Froude(Fr)수는 $Fr = V/\sqrt{gd}$ 으로 정의되며, 이는 중력에 대한 관성력의 비를 나타내는 것으로서, 이것은 자유표면의 와동을 지배하는 가장 중요한 변수로 알려져 있다.

따라서 실험은 Fr값을 기본으로 하여, 실제 발전소와 시험모델의 Fr값이 동일하게 하여 수행되었다.

나. 실증실험

부분충수운전시의 잔열제거계통 상실에 대한 우려는 올진 3·4호기 건

설허가 심사에서 도출되었다.

앞서 언급한 바와 같이 ABB-CE형의 원전이 잔열제거계통의 상실 가능성이 더 크기 때문에 실증시험은 올진 3·4호기를 모델로 하여 수행되었으며, 시험설비는 1/4의 규모로 축소된 것이었다.

실험장치는 지름 60cm, 높이 100cm의 수조탱크, 원전의 고온관을 모사한 내경 23.5cm의 투명 아크릴관 및 이에 연결된 흡입배관 그리고 순환펌프로 구성되었다.

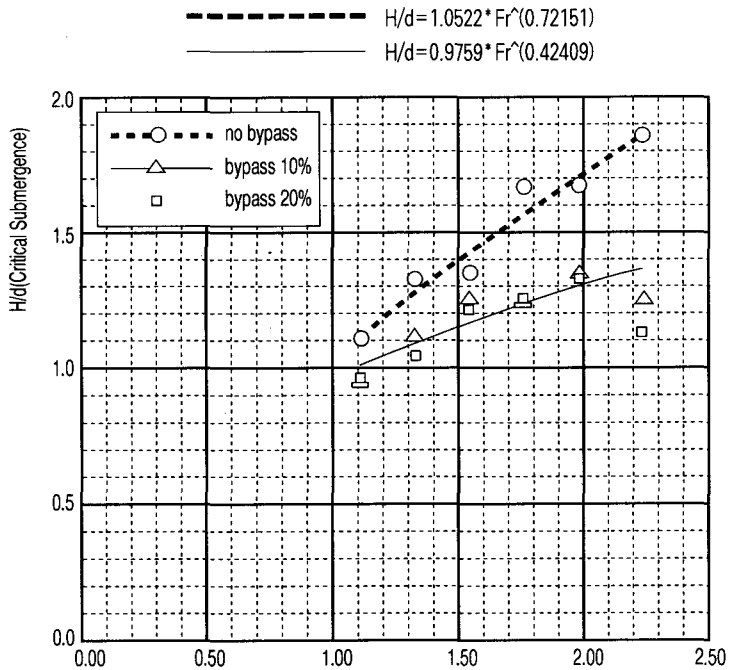
우회유로를 제공하기 위해 우회유로가 설치되었고, 기타 계측에 필요한 설비들로 구성되었다.

우회유로를 잠근 상태에서 유량의 변화에 따른 공기흡입수위를 확인하기 위한 실험이 수행되었고, 이어서 우회유로를 통한 유량을 점점 증가시키면서 흡입구에서의 공기흡입수위를 측정하였다.

시험결과 우회유로가 있을 경우는 우회유로가 없을 경우보다 임계수위나 유동정지수위를 더 낮출 수 있는 것으로 나타났다.

즉 동일한 유량이 흡입구로 들어올 경우에도 우회유로가 있을 경우는 우회유로가 없을 경우에 비해 유리한 것으로 나타났다.

이것은 그 이유를 명확히 알 수는



(그림 4) 동일한 유량이 잔열제거계통의 흡입구를 통과할 때 우회유량의 유무에 따른 임계수위(실험결과)

없지만 우회유량이 10%에서 50%까지 매 10%마다 측정된 결과, 실험적으로는 우회유로 없이 동일한 유량이 흡입구를 통과할 때에 비해 우회유량이 있게 되면 임계수위가 더 낮아지는 것으로 나타났다(그림 4).

또한 펌프를 흐르는 유량을 일정하게 정해 놓고 우회유량을 점점 증가시키면 결국 흡입구에서의 유량은 점점 감소하게 되는데, 이 경우에는 당연히 임계수위가 낮아지게 된다.

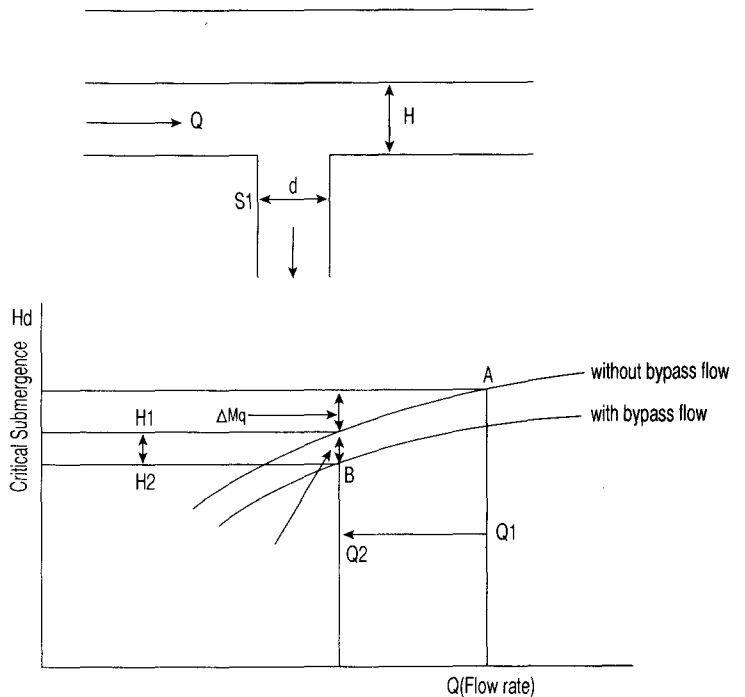
시험결과를 분석한다면, 동일한 유량이 흡입구를 통과하도록 하고 우회유량을 증가시킬 경우, 펌프를 통과하는 유량은 우회유량만큼 증가하게 된다.

즉 동일한 양의 공기가 흡입되었다 할 때, 우회유량이 있게 되면 그만큼 펌프를 통과하는 유량은 증가하게 됨으로써, 펌프를 통과하는 전체 유량에 비해 공기의 비율이 상대적으로 감소되는 효과가 있게 되기 때문에, 펌프의 기능상실을 그만큼 막아주는 효과가 있다고 판단된다.

이에 대한 정량적인 실험은 어느 곳에서도 수행된 것이 없기 때문에 지금으로서는 정성적으로 평가하는 수밖에 없다고 하겠다.

노심냉각에 필요한 유량의 감소와 우회유량의 증가로 인한 임계수위 감소효과를 동시에 나타내면 (그림 5)에 표시된 바와 같다.

즉 노심냉각유량 Q1에서 Q2로 감소시킴으로써 얻는 임계수위 여유도



〈그림 5〉 우회유량을 이용하여 냉각유량을 조절할 경우에 얻을 수 있는 효과에 대한 분석

는 ΔM_b 이고, 유량 Q2에서 우회유량이 있으므로 해서 얻게 되는 임계수위 여유도는 ΔM_b 로 표시될 수 있으므로, 냉각유량의 우회유량을 사용하여 냉각유량을 조절함으로써 얻을 수 있는 임계수위 여유도는 결국 $\Delta M_b + \Delta M_a$ 가 됨을 알 수 있다.

실험에 의하면 우회유량이 20% 정도일 경우, ΔM_b 는 실제 원전에서의 조건으로 환산하면 약 4인치 정도가 된다.

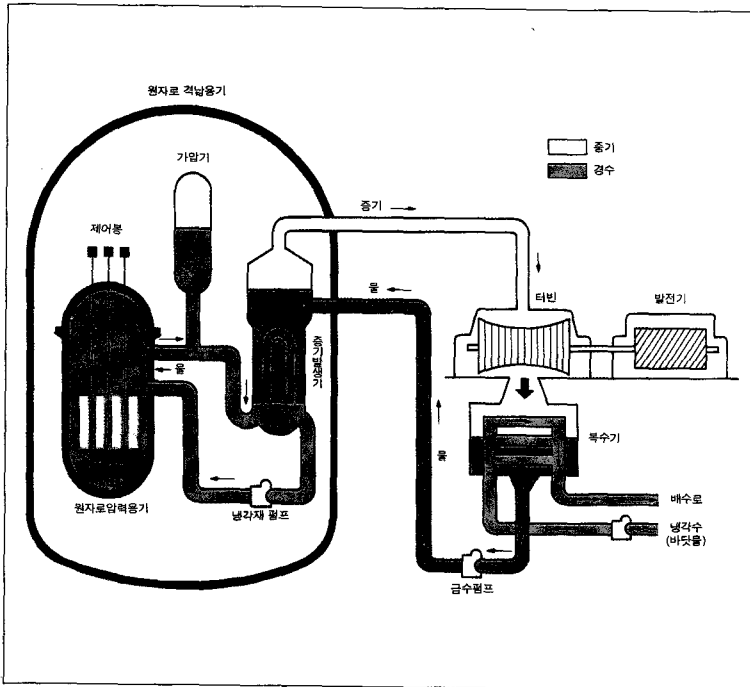
이는 ABB-CE사가 제안하고 있는 Single Nozzle Dam을 사용할 경우, 얻을 수 있는 여유가 3인치에 비교

해 볼 때 상당한 효과가 있다고 판단 된다.

영광 3·4호기에 적용된 운영기술 지침서를 참고하면, 운전모드 5, 즉 상온정상상태에서 잔열제거시스템의 유량을 4,000GPM(15,200LPM) 이상으로 유지할 것을 요구하고 있다.

〈표 2〉는 울진 3·4호기에 대해 계산된 잔열제거시스템의 유량과 임계수위의 관계이다.

이 표에서 보는 바와 같이 4,000 GPM의 유량이 순환될 경우에 비해 유량을 2,500GPM으로 감소시키면 1.3인치 정도의 임계수위 여유를 가



가압경수형 원자력발전소 계통도

〈표 2〉 울진 3·4호기 잔열제거계통 유량과 임계수위의 관계

잔열제거계통 유량(GPM)	임계수위(inch)
2,360	20.8
2,500	21.0
3,000	21.5
3,500	21.9
4,000	22.3
4,500	22.7
5,000	23.0

질 수 있게 된다.

결국 본 연구에서 의도한 바와 같이 우회유량을 이용하여 노심의 잔열을 제거하는 데 필요한 정도의 유량만 순환시키고 나머지는 노심을 우회시킨

다면, 임계수위에서 실제적으로 약 5인치 이상의 여유도를 추가로 확보할 수 있게 되어 잔열제거계통으로의 공기흡입가능성이 크게 줄어들게 되고 결과적으로 잔열제거계통의 상실 가능성을 크게 감

소시킬 수 있을 것이다.

향후 전망

국내의 가압경수형 원전은 크게 웨

스팅하우스형, 프라마툼형 및 ABB-CE형으로 구분될 수 있을 것이다.

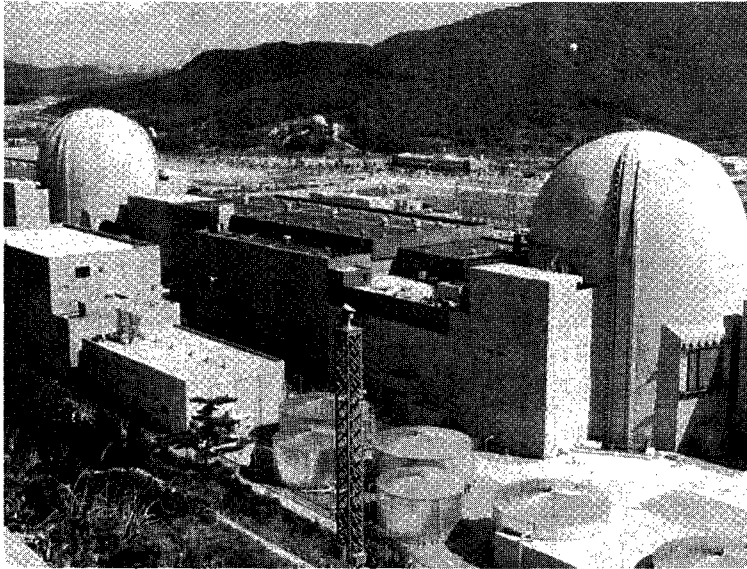
잔열제거계통의 운전관점에서 이중 프라마툼형의 원전은 웨스팅하우스형과 큰 차이가 없으므로 결국은 두 가지로 대별될 수 있을 것이다.

앞서 언급한 바와 같이 웨스팅하우스형의 원전은 부분충수운전시 임계수위에 대한 여유도가 10인치 이상이 되어 부분충수운전 중 잔열제거계통 내로 공기가 흡입되어 잔열제거계통 펌프의 상실을 초래할 확률이 상대적으로 낮다고 할 수 있으나, 영광 3호기부터 건설운전되고 있는 ABB-CE형의 원전은 그 여유도가 불과 4인치 정도로서 부분충수운전시 잔열제거계통의 상실 가능성이 훨씬 높다고 하겠다.

본 연구의 동기가 울진 3·4호기의 인허가 심사과정에서 도출된 것이고, 또한 부분충수운전시의 잔열제거계통 상실 가능성이 ABB-CE형 원전이 더 큰만큼, 본 연구의 주된 대상은 ABB-CE형 원전이 된다고 할 수 있다.

국내 영광 3·4호기의 선행모델이라고 할 수 있는 미국의 팔로버디(Palo Verde) 원전의 경우, 상업운전당시에 미국 NRC로부터 부분충수운전을 인가받았음에도 불구하고, 부분충수운전시의 위험성으로 인해 한동안 부분충수운전을 하지 못하다가 최근에서야 부분충수운전을 시작한 것으로 알려져 있다.

부분충수운전시 임계수위의 여유도를 늘리기 위해 ABB-CE사가 새로이




가압경수형 원자력발전소인 영광 3·4호기의 모습

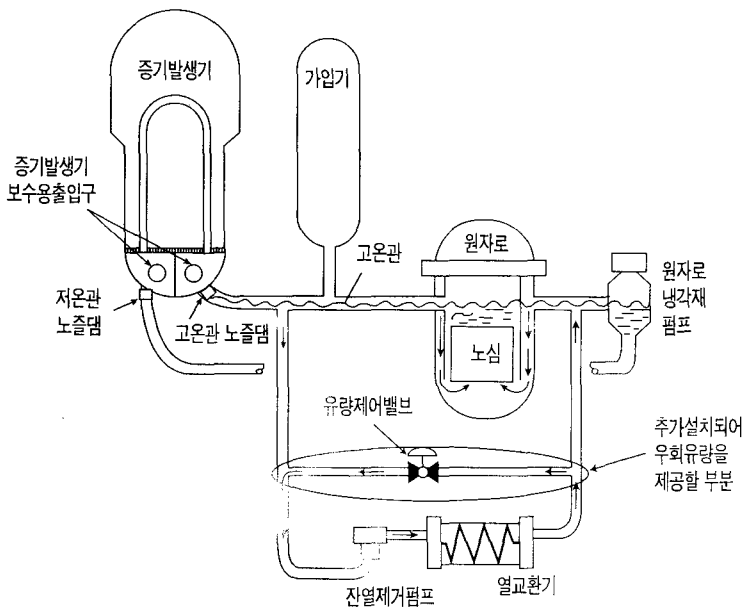
개발한 것이, 일반적으로 사용되고 있는 Double Nozzle Dam 대신에 Single Nozzle Dam을 사용하는 것이며 이를 사용할 경우, 약 3인치 정도의 여유도를 더 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구의 결과로 얻어진 우회유로를 이용하는 방법은, 현재의 발전소 설비를 크게 변경시킬 필요없이 <그림 6>과 같이 잔열제거펌프 Return Line에 유량제어밸브를 하나 추가 설치하고 운전절차서를 보완함으로써 적용이 가능하며 실험결과, 5인치 정도의 임계수위 여유도를 더 얻을 수 있을 것으로 평가되었다.

앞서 언급한 바와 같이 부분충수운전시의 사고 가능성을 낮추기 위한 규제요건 GL88-17의 내용은 ABB-CE형이나 웨스팅하우스형이나 모두 만족시켜야 한다.

단, 부분충수운전시 ABB-CE형 원전이 가지고 있는 임계수위의 여유도가 적은 것을 보완할 수 있는 방법으로서 본 연구결과가 적용될 수 있을 것이며, 본 연구결과는 95년 11월 25일 미국에 특허등록되었다.

이것은 그 동안 외국의 기술을 그대로 받아들여 오기만 했던 점에 비추어 원전의 근본적인 문제점을 파악하여 해결책을 제시하였을 뿐 아니라, 원전 기술을 전수한 당사국인 미국에서의 특허획득으로 원자력에서의 국내 기술능력이 과거에 비해 크게 향상되었음을 입증하는 것이라 하겠다. 



<그림 6> 우회유로를 위해 추가로 설치해야 하는 부분