

## 순환수펌프의 작동수를 고려한 원전터빈 출력조정

### Decreasing the Turbine Power Based on the Number of Circulation Water Pumps in Nuclear Power Plants

진수환 · 명효형

한국수력원자력주식회사 울진원자력본부

진명길 · 김성준

강릉대학교 산업공학과

#### Abstract

복수기의 원활한 열교환에 필요한 냉각수를 공급하기 위해 순환수펌프는 해수를 끌어들이는 역할을 한다. 각종 해양생물이나 이물질 등으로 인해 순환수펌프의 작동이 멈추는 경우가 간헐적으로 발생하고 있는 데, 이렇게 되면 복수기 튜브 쪽으로 유입되는 순환수 유량은 정상상태보다 줄어들게 된다. 이를 무시하고 원전터빈을 계속 고출력으로 가동시키면 복수기 내부의 진공도가 악화되어 작동이 정지되는 상황을 맞을 수 있으므로 터빈출력을 적정한 수준으로 낮추는 작업이 필요하다. 본 연구는 순환수펌프의 작동수 및 해수온도를 고려하여 터빈의 적정출력을 산정하고 이를 도표화하여 제시하였다. 분석결과를 기존의 운전데이터와 비교검토한 결과 대체로 일치하고 있어 운전조건을 안정적으로 유지하는 데 도움이 될 전망이다.

#### 1. 서론

2001년 말 기준으로 국내 원자력 발전소는 1978년 고리 1호기가 운전 개시한 이래 현재 16기의 발전소가 상용 운전 중에 있으며 세계 10위권의 원자력 보유국이 되었다.

특히 2001년에는 원전 운전의 안전성과 효율성을 나타내는 지표로 사용되는 이용률과 불시정지 평균건수에서 각각 93.2%와 0.5건을 기록하여 국내 원전운영기술이 세계 최고의 수준임을 입증하였다. 원전 이용률 93.2% 달성은 국내 원전 운전 이후 역대 최고 기록이며 세계 평균 이용률 76.4%에 무려 16.8%나 높은 수치이다. 또한 불시정지 건수 0.5건(8회 불시정지/16기)은 세계 1위의 일본의 0.2건에 근접한 실적이며 미국(1.4건), 캐나다(1.9건), 프랑스(3.1)건에 비교하면 대단히 우수한 실적이다.[9, 12] 이와 같이 원전운영의 안전성을 최고 수준으로 유지시키기 위해서는 앞으로도 다각적인 노력이 지속되어야 할 전망이다.

그러나 울진 원자력 발전소 특히 1, 2호기의 경우, 발전소 기기의 고장이나 인적 실수가 아닌 자연적 현상 즉, 취수구 해양생물 유입에 따른 순환수펌프(Circulation Water Pump)의 작동정지로 인해 복수기(Steam Condenser)의 진공도가 저하되어 부득이하게 발전터빈 정지 및 출력감발 사례가 계속 발생하고 있다. 울진 3, 4호기의 경우는 1, 2호기에 비해 취수구 회전망 구조, 순환수펌프의 용량 및 취수구 구조물 위치 등의 차이로 인해 아직까지는 해양생

물 유입에 따른 출력감발 사례만 있었을 뿐 발전정지로 이어진 사례는 없다. 하지만 현재 건설 중인 울진 5, 6호기가 완공되어 발전을 개시할 경우 울진 3, 4호기 역시 취수구 해양생물 유입의 증가는 피할 수 없을 것으로 예상되고 있어 순환수펌프의 작동정지와 같은 비정상 사태에 대한 우려가 커지고 있다.

현재 울진 3, 4호기에는 취수구 해양생물 유입시 발생 가능한 비정상 사태 즉 복수기 진공도 악화나 순환수 및 취수구에 이상발생 시 이에 대처할 수 있도록 비정상 절차서(Abnormal Operation Procedure)가 구비되어 있다.[1, 2] 그러나 순환수펌프의 불시정지로 인한 복수기 진공도 저하시 터빈(Turbine) 출력을 얼마나 감발해야 하는지에 대해서는 실명이 없는 관계로 운전원의 경험에 의존해 출력감발이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 순환수펌프가 정지하더라도 불필요한 감발을 방지하고 일관성있는 운전을 통해 이용률을 극대화할 수 있도록 계량적인 절차서의 마련이 시급하다고 판단된다.

본 논문의 목적은, 순환수펌프의 작동정지로 인해 복수기 진공도가 저하될 때 요구되는 터빈/발전기 출력의 적정 감발량을 제시하는 데 있다. 이를 위해 해수온도, 복수기 진공도, 터빈출력, 작동 중인 순환수펌프의 갯수 등과 같은 운전파라미터 간의 상호관계를 고찰하고 이론적인 관계식에 의해 감발량을 결정하기 위한 절차를 제안한다. 아울러 운전원이 적정 감발량을 용이하게 결정할 수 있도록 해수온

도와 순환수펌프의 작동수에 따른 복수기 성능곡선을 제시하고자 한다.

## 2. 원전 복수기 및 순환수펌프 개요

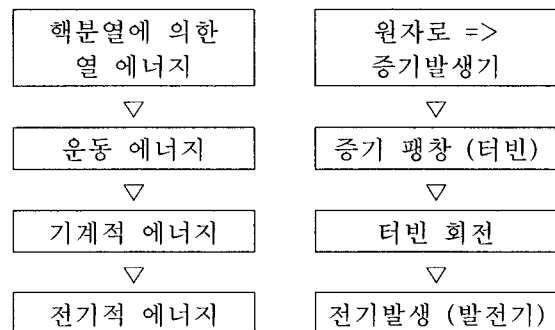
### 2.1 원전 개요 및 국내현황

Roentgen이 X-ray를 발견하면서 시작된 물질의 미시적 세계에 대한 해석은 20세기 들어 Einstein의 질량 에너지 등가 법칙이 규명되면서 비로소 가능해진다. 그 후 Chadwick은 중성자 발견과 함께 핵분열의 가능성을 밝혀냈고, 1942년에는 Fermi가 설계한 원자로 CP-1에서 최초의 핵분열 연쇄반응 실험이 성공적으로 이루어진다. 1956년에는 세계 최초로 영국에서 Calderhall 원전이 상업운전을 시작했고, 1957년에는 미국의 Shippingport 원전이 가동되었다. 우리나라는 1959년에 원자력원이 발족되면서 본격적인 연구가 수행되어, 1962년에는 연구용 원자로인 TRIGA MARK-II의 준공이 있었다. 이 후 1978년 4월 29일, 우리나라 최초의 원자력 발전소인 고리 1호기가 처음으로 가동되었다. 그로부터 24년이 지난 지금, 우리나라는 16기의 원자력발전소를 상업 운전하고 있는 세계 6위의 원자력 선진국으로 발돋움하였다.[12]

특히 울진 3, 4호기는 원전기술 자립을 위해 국내 자체 기술로 개발한 100만kW 급의 가압경수로 원전으로 한국표준형 원전이라고 부른다. 한국표준형 원전의 우수성은 안전성과 경제성에서 찾아볼 수 있다. 최신 설계기술 기준을 적용하여 안전성이 우수하다는 미국의 원전에 비해 고장 및 사고의 위험을 크게 줄였으며, 인간공학적 개념을 적극 도입하여 운전원의 작은 실수에 의한 사고발생율도 극소화시켰다. 또한 꾸준한 기술개발과 건설경험의 축적 등으로 건설비용 및 기간을 선진국 수준으로 단축시키는 데 성공하고 있다. 현재 한국표준형 원전으로는 울진 3, 4호기가 가동 중에 있고 울진 5, 6호기 및 영광 5, 6호기가 건설 중에 있다. 또한 신고리 1, 2호기와 신월성 1, 2호기도 한국표준형 원전으로 건설할 계획으로 있다.

자연에 존재하는 모든 물질은 아주 작은 원자의 집합체이다. 원자는 중심에 자리잡은 원자핵과 그 주위를 도는 전자로 구성되며, 원자핵은 양성자와 중성자로 이루어져 있다. 우라늄과 같은 무거운 원자핵은 외부에서 흡수하면 쪼개지는 성질이 있는데 이를 원자핵분열이라 한다. 핵분열이 일어날 때는 많은 에너지와 함께 2~3개의 중성자가 함께 나오게 되고, 이 중성자가 다른 원자핵에 흡수되면 또 다시 분열이 일어난다. 이렇게 연속적으로 원자핵분열이 일어나는 현상을 연쇄반응이라 한다. 원자력이란 바로 원자핵분열이 연쇄적으로 일어나면서 생기는 에너지를 말한다. 이때 연

쇄반응이 서서히 일어나도록 하면서 필요한 만큼의 에너지를 안전하게 뽑아 쓸 수 있게 하는 장치가 원자로이다. 이 원자로는 화력발전소의 보일러와 같은 역할을 하는 것으로 우라늄이 분열해 열에너지를 낼 수 있도록 만들어진 보일러라고 할 수 있다. 이렇게 원자로 내부에서 일어난 핵분열에 의해 얻어진 열에너지를 이용하여 증기발생기로 공급되는 급수를 열교환시켜서 증기를 얻는다. 이 증기를 이용하여 터빈을 구동하게 되는데 터빈은 증기발생기에서 공급되는 고온 고압의 증기를 팽창시켜 기계적 에너지로 변환하는 장치이다. 이 에너지로 발전기를 회전시켜 전기를 생산하는 것이다. 터빈을 구동하고 난 증기는 복수기로 유입되며 이 곳에서 냉각수에 의하여 다시 열교환이 이루어져 응축되며 이 응축된 물이 증기발생기로 공급되어 다시 터빈을 구동하게 되는 증기로 생산되는 재열 사이클을 이룬다. 다음 <그림 1>은 이 과정을 개념적으로 보여주고 있다.



<그림 1> 원전 에너지 변환 개념도

### 2.2 복수기의 역할 및 구조

증기를 작동 유체로 사용하는 증기기관이나 증기터빈은 원동기에서 일을 하고 나온 배출증기를 처음에는 대기로 버렸으나 1854년 Rankine이 증기기관의 기본 열 사이클을 제창한 후 배출 증기를 대기로 버리지 않고 냉각수로 응축시켜 열효율을 높이고 급수로 재사용하게 되었는데 이 응축 설비를 복수기라고 한다. 터빈 구동원으로 증기를 사용하고 있는 원전에서는 복수기 진공에 따라 출력이 증감하는 등 발전소 출력변화에 상당한 영향을 미치는 중요한 설비이며 그 역할은 다음과 같이 요약된다.[3, 11]

- 저압터빈을 구동하고 배출증기를 응축한다.
- 저압급수가열기 후기 응축수, 주급수펌프 구동증기 배기, SPE(Steam Packing Exhauster), SJAE(Steam Jet Air Ejector), 증기 발생기 취출수 및 각종 계통에서 방출되는 배수 및 배출 증기를 수집한다.
- 설계압력 유지로 저압터빈을 통과하는 증

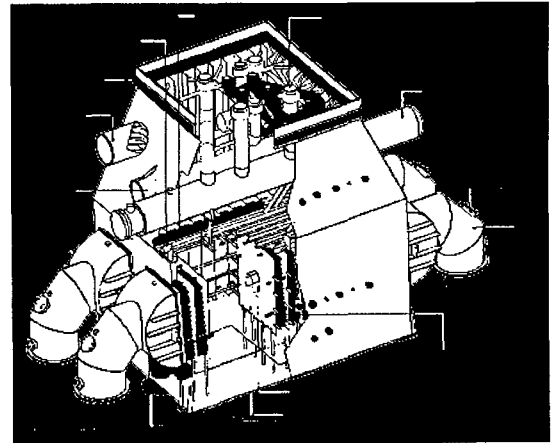
기의 열낙차 증대에 의해 터빈효율을 높인다.  
 ● 발전소 정지후 초기 냉각기간 중 터빈 우회계통을 통해 원자로 냉각재 계통의 잔열을 제거한다.

이와 같은 기능을 수행하기 위한 복수기의 설계기준은 다음과 같다.[4]

- 복수계통은 태풍, 홍수 및 지진 등과 같은 유해 환경사고가 계통의 안전기능을 저해하지 않도록 설계되어야 한다.
- 계통에 공급되는 소외 전원상실이 원자로의 안전 정지를 방해하지 않아야 한다.
- 복수계통은 수격 현상의 발생을 억제하고 그 영향을 감소시키도록 설계되어야 한다.
- 복수기는 저압터빈 배출증기, 급수펌프 터빈 배출증기 및 기타 사이클 배출 증기의 열 제거원 기능을 한다.
- 주복수기는 정격 주증기유량의 약 40%에 해당되는 주증기를 터빈우회계통을 통해 수용한다.
- 복수기의 온수조(Hotwell)는 복수 및 급수계통으로 5분간 최대 복수 유량을 공급하기에 충분한 용량을 갖는다.
- 응축되는 증기에서 발생된 비 응축성 기체는 복수기 진공계통을 통하여 복수기 외부로 방출된다. 비 응축성 기체의 제거는 2차계통의 침식과 부식을 최소화한다.
- 복수계통은 증기발생기 배수 혹은 건식 휴관 후 재충수를 포함한 모든 운전기간 중에 증기발생기에 요구되는 온도 및 압력으로 급수를 공급하도록 설계된다.
- 추기배관 및 저압 급수가열기는 터빈으로의 물의 유입 가능성을 최소화하고 추기 계통에 함유된 에너지에 의한 터빈 과속을 제한하도록 설계된다.

일반적으로 원자력 발전소에서 사용되고 있는 복수기는 단일 압력, 단일 유로, 표면 냉각식으로 3개의 셸로 구성된다. 각각의 셸로 각각의 저압터빈 아래에 위치하며 셸 내부 튜브의 방향은 터빈/발전기 축과 수직한다. 복수기 셸은 분할된 수실을 가지며 개략적인 구조는 다음 <그림 2>와 같다.[3]

- 배출증기 연결부(Extended Neck) : 복수기의 상부에 있으며, 저압 터빈하부에 있는 후드와 용접에 의해 연결되며 터빈에서 배출된 증기의 유입통로이다.
- 동체(Shell) : 터빈으로부터의 배출증기를 응축시켜 진공을 유지하는 용기로 동체 내부에 튜브 다발(Tube Bundle)이 설치되어 열교환이 이루어진다. 동체 중에서도 하부에 응축수를 모아 일정시간 저장하는 곳을 온수조라고 하며, 여기에 모인 물은 복수펌프에 의해서 급수계통으로 보내진다.



<그림 2> 복수기 구조[11]

- 복수기 튜브 (Condenser Tube) : 복수기 튜브 내부로 냉각수(해수)를 흐르게 하여 튜브 외벽의 증기와 대류(Convection)나 전도(Conduction)에 의해 열교환이 이루어지는 곳이다. 재질에는 동합금, 스테인레스 스틸, 티타늄 등이 있으나 해수를 냉각수로 쓰는 원자력 발전소에서는 내부식성 및 내마모성이 우수한 티타늄 재질을 사용하고 있다.
- 관판(Tube Sheet) : 복수기 튜브의 양끝을 고정하고 수실(Water Box)과 증기 축을 분리시키며 튜브의 배열을 지지하고 튜브를 밀봉하는 판으로 동체와 수실 사이에 설치된다. 냉각수에 의한 부식을 방지하기 위해 티타늄 복합 철판을 사용하거나 냉각수의 특성에 따라 비철 금속을 사용하기도 한다. 튜브를 관판에 밀봉시키는 방법으로 튜브를 확관하거나 확관한 후 용접하는 방법이 있다.
- 튜브 지지판(Tube Support Plate) : 관판과 관판 사이의 튜브의 전 길이에 따라 일정한 간격으로 설치되어 튜브를 지지하고 있는 판으로서 고속 증기가 튜브와 튜브 사이를 통과할 때 생기는 튜브의 진동을 방지한다.
- 수실 : 냉각수를 복수기 내부의 튜브에 송수하기 위한 방으로서, 냉각수의 통과 방식이 단류식일 경우 냉각수 입구 측에 입구수실이 설치된다. 복류식일 경우는 냉각수의 입, 출구 측에 입, 출구수실이 설치되고 반대측에는 냉각수가 돌아오는 귀환 수실(Reversing Water Box)이 설치된다. 냉각수를 해수로 사용하는 수실에 있어서는 내벽을 표면 처리 등을 실시하여 부식을 방지하고 있다. 수실에는 배기 및 배수노즐이 설치되며 수실 내부 또는 튜브의 검사 및 보수를 위해 작업자가 출입할 수 있도록 Man-way가 설치된다.
- Expansion Joint : 증기의 유입에 의해 발생하는 진동 및 터빈의 진동 등이 복수기로 전달되는 것을 차단시키며 터빈 및 복수기의 열 팽창량을 흡수하여 열변형을 방지하는 장

치로서, 통상적으로 배출증기 연결부와 배출증기 목(Transition) 사이에 설치된다.

● 추기배관(Steam Extraction Pipe) : 터빈의 추기를 급수 가열기 등에 유도하는 관으로서 복수기 내부에 설치되는 저압 급수 가열기까지, 그리고 복수기 내부를 통과하여 외부에 있는 다른 급수가열기 등으로 연결된다.

● 살수 배관(Spray Pipe) : 복수기 내부로 유입되는 고온, 고에너지의 유체로부터 내부 구조물(튜브 포함)을 보호하기 위하여 유체를 살수시켜준다.

### 2.3 순환수펌프의 역할 및 구조

한 호기당 16-2/3% 용량의 순환수펌프 6대가 설치되는 데 이 펌프는 전동기 구동 수직형 1단 원심펌프이다. 순환수펌프는 취수구조물에서 해수를 취수하며 복수기 튜브 측을 통과한 해수는 복수기와 연결된 배출 배관을 통하여 바다로 방출된다. 즉, 복수기 동체로는 터빈을 구동한 증기가 유입되고 튜브 측으로는 순환수펌프를 이용하여 냉각수인 해수를 공급하여 고온, 고압의 증기를 상대적으로 낮은 온도인 냉각수를 이용하여 열 교환을 시켜 증기를 응축시키는 역할을 하는 것이다. 따라서 순환수펌프의 고장으로 인해 복수기 튜브 측으로 유입되는 냉각수의 양이 줄어들게 되면 복수기 내에서 열 교환이 적절하게 이루어지지 못하여 복수기 진공이 저하되며 이로 인해 발전소 출력도 저하될 수 있다. 순환수펌프의 설계기준 및 운전사항은 다음과 같다.[4]

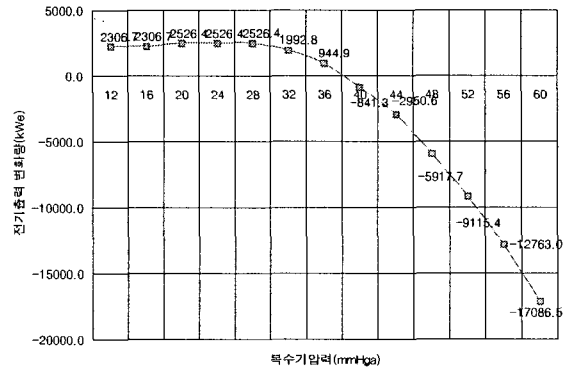
- 발전소의 모든 부하 조건 하에서 복수기의 폐열을 제거할 수 있도록 복수기 튜브 측에 충분한 유량을 공급한다.
- 복수기 배압을 설계 제한치 이내로 유지하도록 적정량의 해수를 복수기에 공급한다.
- 복수기 배수조로 많은 양의 해수가 유입되면 터빈건물의 범람을 막기 위해 순환수계통을 수동으로 차단한다.
- 해수 수위 변화를 고려하여 안전하고 신뢰도 있게 작동하도록 설계되어야 한다.
- 해수온도가 낮은 동절기에는 운전 펌프 개수를 줄여 전력을 절약하는 운전모드를 취할 수 있다.

## 3. 원전 터빈출력 감발

### 3.1 출력감발의 배경 및 필요성

복수기는 발전소에서 압력이 가장 낮게 유지되는 설비로 터빈을 구동하고 난 증기를 진공 영역으로 끌어들이며 응축하는 역할을 한다. 이렇게 응축된 물은 증기발생기로 보내져 터빈을 구동하는 증기로 다시 생산되는데, 복수기의 진공도가 저하된다면 응축 효과가 떨어

지므로 따라서 적정 진공도를 유지하기 위해서는 복수기로 유입되는 증기량을 줄여야 한다. 이는 곧 출력을 저하시킨다는 의미가 된다. 일반적으로 발전소 출력은 복수기 진공도에 비례적으로 변화한다. 다음은 복수기 압력에 따른 전기출력 변화량을 표시한 그래프로서 전기출력은 복수기 압력 38.1mmHga에서 1,054,645kW, 주증기 압력은 72.8kg/cm<sup>2</sup>, 엔탈피는 660.4kg/kcal를 기준으로 작성된 것이다.[5]



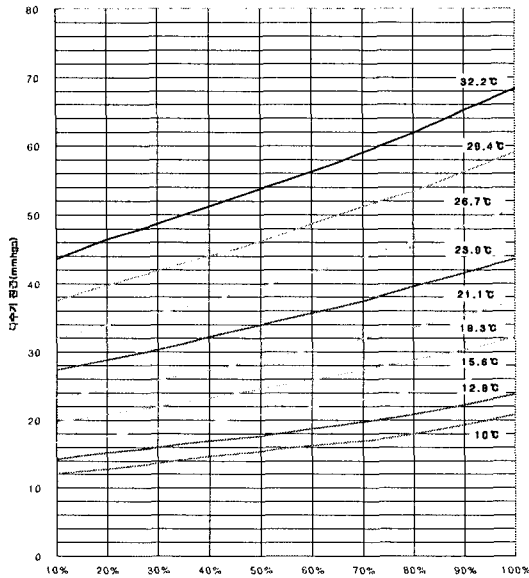
<그림 3> 복수기 압력 변화에 따른 발전소 출력 변화량

그림으로부터, 복수기 설계기준인 복수기 압력 38.1mmHga를 기준으로 전기출력 변화량이 (+), (-)로 구분되며, 복수기 압력 28mmHga 이하에서는 전기출력 변화량이 미미함을 알 수 있다. 또한 그래프는 복수기 압력 즉, 복수기 진공도 변화에 따라 설계기준 조건에서 전기출력이 증가하거나 감소함을 보여주는 데, 복수기 압력이 증가할수록 전기 출력은 감소하며 반대로 압력이 감소하면 전기 출력은 증가한다.

해수는 순환수펌프에 의해 복수기 튜브 측으로 유입되어 복수기 동체 측으로 유입되는 증기와 열교환을 이루고 증기를 물로 응축시키는 역할을 한다. 따라서 적절한 열교환을 위해서는 복수기 튜브 측으로 유입되는 해수의 온도가 적절한 범위를 유지해야 함은 당연하다. 그러나 복수기로 유입되는 해수의 온도는 동절기 또는 하절기에 따라 편차가 크며 이에 따라 정상운전 중에는 순환수펌프 운전 댓수를 조절하고 있다. 일반적으로 복수기 진공도는 해수온도에 비례적으로 변화한다. 다음 그래프는 해수온도와 터빈출력을 변수로 하여 복수기 진공도를 보여주는 복수기 성능곡선이다.[10] 해수온도 증가에 따라 복수기 압력 폭이 증가함을 알 수 있는 데, 예를 들어 출력 80% 이상에서는 복수기 압력 곡선의 기울기가 큰 폭으로 상승하고 있다.

원자력 발전소의 출력은 터빈에 공급되는 증기량과 비례하며 출력감발 및 출력증발을 한다는 말은 터빈에 공급되는 증기의 양을 작

게 하거나 많게 하는 것이다.



<그림 4> 복수기 성능곡선

복수기는 내부에 적절한 진공도를 유지하며 터빈을 구동하고 난 증기를 진공에 의해 빨아들여 응축하는 역할을 하는 데 본 논문에서 설명하고자 하는 해수온도의 상승 또는 순환수펌프의 운전갯수 감소 등으로 복수기 내부의 진공도가 저하된다면 터빈을 구동하고 난 증기가 복수기 내부로 유입되기 어려울 것이다. 이것은 복수기의 열효율이 저하되는 것을 말하며 계속 복수기 진공도가 저하된다면 복수기 진공도 저하에 의한 터빈 정지가 발생하며 복수기 내부로 유입되지 못한 고온, 고압의 증기에 의해 터빈이 손상되는 현상까지 일어나게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 복수기 진공도가 저하될 경우 출력을 감발하여, 즉 터빈으로 공급되는 증기량을 줄임으로써 복수기 진공도를 더 이상 저하되지 않도록 하는 것이다.

새우, 해파리, 멸치 등 해양생물이 대량으로 취수구에 유입될 경우 순환수펌프는 작동을 멈추게 되며 이로 인해 복수기 튜브 측으로의 해수공급이 원활하지 않게 된다. 이는 복수기 진공도를 저하시키게 되므로 출력감발 또는 발전정지로 이어질 수 있는데, 참고로 울진 1호기에 대한 1992년 이후 해양생물 유입에 의한 발전정지 및 출력감발 사례가 다음 표에 요약되어 있다.[7, 8]

이에 비하여 울진 3, 4호기는 1, 2호기 대비 순환수펌프의 작동이 안정적으로 이루어져 출력감발 사례만 1회 있었고 발전정지의 사례는 아직 없다. 하지만 향후 울진 5, 6호기가 운전을 개시하면 순환수펌프의 작동중지 사태가 이전보다 많이 발생할 것으로 예상되고 있

으므로 기존의 비정상 절차서 외에 출력감발 절차서의 마련이 시급한 실정이다.

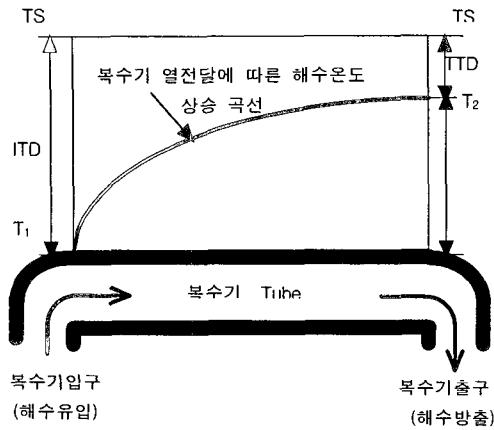
<표 1> 울진 1호기 출력감발 및 정지 사례

번호	발생일시	도 달 출 력		발 생 원 인	비 고
		원자 로 (%)	발전기 (MWe)		
1	'92.12.30 10:15 - 10:45	100 → 72	990 → 700	취수구에 다량의 멸치때 유입으로 순환수펌프 1대 정지 (수동 감발)	
2	'96. 9.14 00:53 ~ 01:20	100 → 71	992 → 685	취수구에 다량의 해파리 유입으로 순환수펌프 2대가 교대로 정지 (수동 감발)	2호기 동일
3	'96. 9.15 09:08 - 09:40	100 → 60	998 → 560	취수구에 다량의 해파리 유입으로 순환수펌프 2대가 교대로 정지 (수동 감발)	
4	'96. 9.18 22:34 - 23:40	100 → 70	986 → 680	취수구에 다량의 해파리 유입으로 순환수펌프 2대가 교대로 정지 (수동 감발)	2호기 동일
5	'97. 2. 1 01:53	100 → 정지	990 → 정지	취수구에 다량의 새우때 유입으로 순환수펌프 2대 정지 (수동 정지)	2호기 정지
6	'97. 4.24 06:00	100 → 정지	995 → 정지	취수구에 다량의 새우때 유입으로 순환수펌프 2대 정지 (자동 정지)	2호기 O/H착수
7	'97. 5. 2 19:11 ~ 19:30	100 → 70	992 → 690	취수구에 다량의 새우때 유입으로 순환수펌프 1대 정지 (수동 감발)	
8	'97. 7.10 04:16 ~ 04:35	100 → 72	993 → 710	취수구에 다량의 멸치때 유입으로 순환수펌프 1대 정지 (수동 감발)	
9	'97.12.28 01:42	100 → 정지	992 → 정지	취수구에 다량의 새우때 유입으로 순환수펌프 2대 정지 (수동 정지)	2호기 동일
10	'98. 8. 1 12:22 ~ 12:39	100 → 60	990 → 600	취수구에 다량의 해파리 유입으로 감발 운전 (수동 감발)	2호기 동일
11	'01. 4.30 22:05 ~ 22:23	100 → 75	990 → 750	취수구에 다량의 새우때 유입으로 순환수펌프 1대 정지	
12	'01. 5. 1 01:40 ~	83 → 0	800 → 0	취수구에 다량의 새우때 유입으로 순환수펌프 2대 정지	

### 3.2 출력감발을 위한 관계식

복수기 설계자료를 이용하면 복수기 성능 곡선의 작성을 위한 이론적 관계식을 얻을 수 있다. 먼저, 복수기 내부의 열전달에 따른 온도변화를 <그림 5>와 같이 나타낸다.[13]

증기온도  $T_s$ 에 의해 복수기 진공도가 결정되고 다시 터빈의 적정출력이 결정되므로,  $T_s$ 를 추정할 수 있는 관계식을 유도해야 한다. 미국 열교환협회(HEI, Heat Exchange Institute)에서 발간한 Standard를 참조하면  $T_s$ 를 구하는 절차는 다음과 같이 요약된다.[13]



$T_1$  : Inlet Cooling Water Temperature  
 $T_2$  : Exit Cooling Water Temperature  
 $T_s$  : Steam Temperature  
 $TR$  : Temperature Rise ( $T_2 - T_1$ )  
 $ITD$  : Initial Temp. Difference ( $T_s - T_1$ )  
 $TTD$  : Terminal Temp. Difference ( $T_s - T_2$ )

<그림 5> 복수기 내부의 열전달 개념도

① 복수기부하(HR)를 계산한다. 출력 100%에서 HR의 설계기준치는  $6.286 \times 10^9$  BTU/hr이므로 다음 식을 이용한다.

$$HR = 6.286 \times 10^9 \times \frac{PWR}{100\%}$$

단 PWR은 터빈의 해당출력치를 뜻한다.

② 순환수 유량( $Q_{cw}$ )을 계산한다. 순환수펌프 6대 기준으로 한 설계기준치는 788,484gpm이므로, 작동 중인 순환수펌프의 개수를 N이라 하면  $Q_{cw}$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Q_{cw} = 788,484 \times N/6$$

③ 복수기 튜브의 청결도  $F_c$ 는 설계기준치인 0.95를 적용한다.

④ 온도상승폭 TR을 다음 식으로 구한다.

$$TR = \frac{HR}{Q_{cw} \times 500}$$

⑤ 튜브 유속 즉 해수가 튜브를 통과하는 속도를 구한다.

$$V_{Tube} = \frac{Q_{cw}}{788,484} \times V_{Design}$$

단  $V_{Design}$ 은 설계기준치로서 6.0ft/sec이다.

⑥ 복수기 튜브에 관한 보정계수를 구한다. 즉

$$K = \frac{L \cdot NP \cdot a \cdot b \cdot f \cdot F_c}{\sqrt{V_{tube}}}$$

단  $L=60.2292$ ft(Tube Length),  $NP=1$  (Number of Passes),  $a=0.0734$ (튜브외경관련상수),  $b=0.87$ (튜브재질관련상수)이며  $f$ 는 순환수 입구측 온도에 따른 보정값으로 매뉴얼을 참조한다.

⑦ 초기온도차 ITD를 구한다.

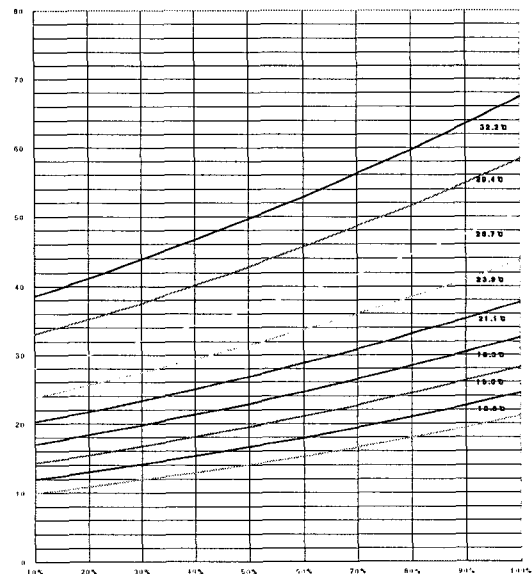
$$ITD = TR/R$$

단,  $R = 1 - e^{-K}$ .

⑧ 최종적으로 증기온도를 구한다.

$$T_s = T_1 + ITD \quad (1)$$

이제 매뉴얼로부터  $T_s$ 에 해당하는 포화압력을 타점하면 복수기 성능곡선을 얻을 수 있다. 다음 <그림 6>은 순환수펌프가 6개 모두 정상작동하고 있을 때의 성능곡선을 식 (1)을 이용하여 나타낸 것이다. 매뉴얼에서 제시하고 있는 성능곡선인 <그림 4>와는 다소 차이가 있으나 현실적인 운전범위인 출력 60% 이상에서는 거의 근사하고 있음을 알 수 있다.



<그림 6> 복수기 성능곡선: N=6

### 3.3 순환수펌프 정지를 고려한 복수기 성능곡선의 개발

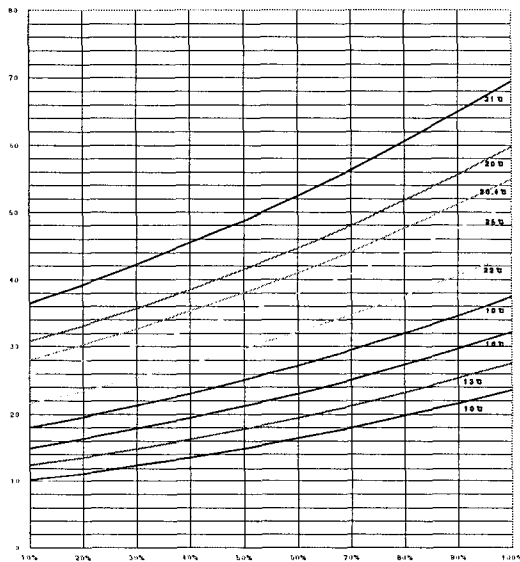
앞에서도 지적한 바와 같이 순환수펌프가 정지하는 경우가 간헐적으로 발생하므로 복수기 진공도가 악화되지 않도록 터빈출력을 적절히 감발해 주는 대책이 필요하다. 터빈출력의 적정수준을 해수온도와 순환수펌프 작동수의 함수로 결정할 수 있도록, 식 (1)을 이용하여 포화압력을 계산한 후 이를 성능곡선으로 제시한다.

### 3.4 논의

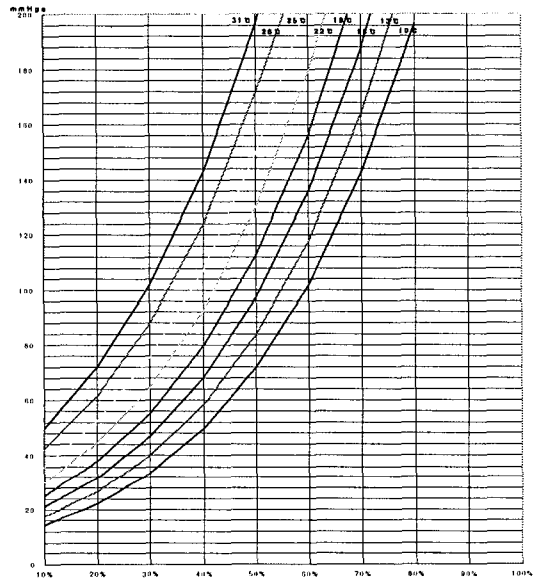
3.2절에서도 지적했듯이 이론식으로 얻어진 복수기 진공도에는 다소 오차가 존재하는 것으로 보인다.

그림 4와 6을 비교해 보면, 터빈출력이 60% 이상일 때는 오차가  $\pm 1\text{mmHg}$ 를 벗어나지 않지만 출력이 60% 미만일 때는 최대  $5\text{mmHg}$  오차가 발생하고 있다. 따라서 출력이 60% 이상으로 유지될 수 있는 경우에는 계산결과를 그대로 따르고 다만 출력이 60% 미만일 때에는  $5\text{mmHg}$  정도 보정하여 감발량을 결정하는 시나리오를 생각할 수 있다.

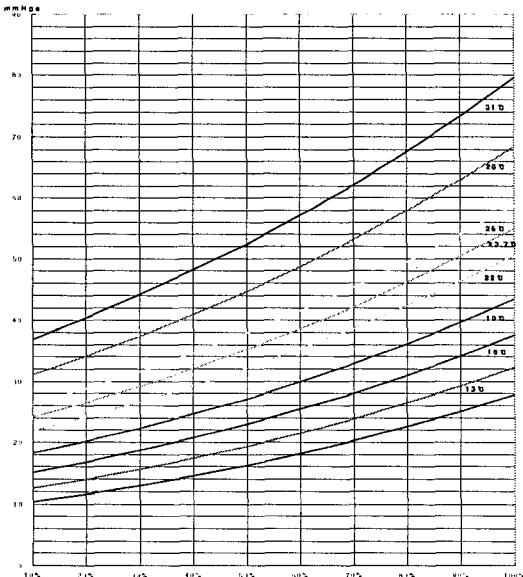
계산 결과가 실제로 얼마나 차이가 나는지 과거 6개월 간의 운전데이터와 비교하여 보았다. <그림 11>은 취수구 해양생물이 많이 유입되는 시기인 3월에서 9월 사이의 운전데이터[14]와 비교한 결과로서 계산에 의한 복수기 진공도를 함께 보여주고 있다.



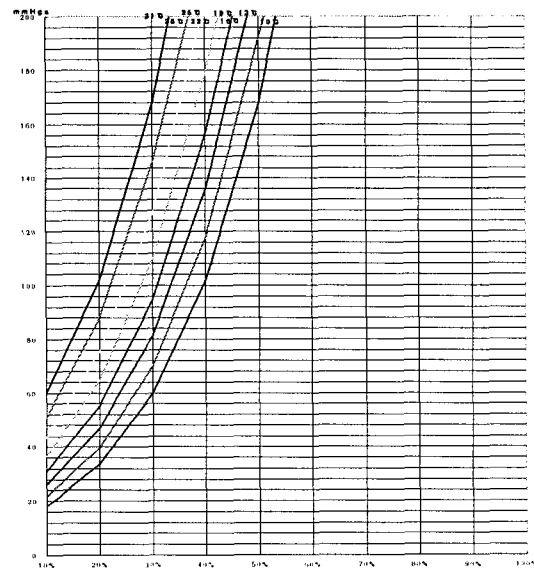
<그림 7> 복수기 성능곡선: N=5



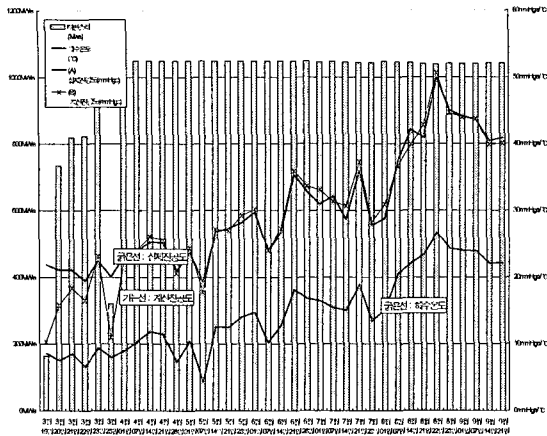
<그림 9> 복수기 성능곡선: N=3



<그림 8> 복수기 성능곡선: N=4



<그림 10> 복수기 성능곡선: N=2



<그림 11> 운전데이터와 계산결과의 비교

출력이 낮고 해수 온도가 약 5~8°C인 경우 실제 복수기 진공도는 19~20mmHg로 수렴하는데 비해, 계산식으로 산출된 복수기 진공도는 이보다 낮게 얻어졌다. 그러나 출력이 충분히 높을 경우 실제 측정치 대비 계산치는 최대 2mmHg 정도의 편차로 거의 유사한 것으로 나타났다. 따라서 이론식에 의한 계산결과로도 출력감발의 적정 기준치를 충분히 제공할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 논문은 순환수펌프의 작동수와 해수 온도를 고려하여 증기온도 및 포화압력을 구하는 이론적 관계를 고찰하였으며 이를 근거로 복수기 성능곡선을 제시하였다. 현재 순환수펌프가 고장났을 경우 터빈출력의 적정수준을 결정하는 체계적인 절차가 마련되어 있지 않다는 점에서, 본 논문의 결과는 운전원이 출력감발작업을 효과적으로 수행하고 원전을 보다 안정적으로 운전하는 데에 기여할 수 있으리라 전망된다.

본 논문에서는 출력감발의 적정 기준치는 제시하고 있으나 과연 이렇게 결정된 값이 적절한지는 확실치 않은 것이 사실이다. 따라서 원전운전의 경제성 및 안전성을 종합적으로 고려하여 최적 감발량을 구할 수 있는 방안이 요구된다고 하겠다. 또한 감발량 결정을 위해 그래프에 의존하고 있는 현재의 방식을 개선할 수 있도록 사용하기 쉬운 전산프로그램을 개발할 필요가 있다. 특히 감발량을 결정하는 과정은 운전원 모두가 일상적으로 다루어야 하는 사항이므로, 원전훈련센터의 시뮬레이터로도 이를 구현해 놓는다면 훈련 및 활용 효과가 극대화될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 두뇌한국21 지역

대학육성사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] 정상절차서-복수기 진공 저하, KHNP 울진원자력 3, 4호기, 2001.
- [2] 비정상절차서-취수구 상태 비정상, KHNP 울진원자력 3, 4호기, 2001.
- [3] System Functional Description, Vol. 1, KHNP 울진원자력 3, 4호기, 1995.
- [4] Other features of steam and power conversion system, Final Safety Analysis Report 10.4, KHNP 울진원자력 3, 4호기, 1995.
- [5] 인수성능시험 보고서, KHNP 울진원자력 3, 4호기, 1999.
- [6] 인수성능시험 보고서, KHNP 영광원자력 3, 4호기, 1996.
- [7] 원전 사건 정보, KHNP 인터넷 공개 자료.
- [8] 원전 사고·고장 정보 내역, 과학기술부 인터넷 공개 자료.
- [9] 이 달의 원자력 - 2001년도 원전 운영실적, 원자력문화재단, 2002.
- [10] O/M Manual for Surface Condenser, KHIC 울진원자력 3, 4호기, 1992.
- [11] 건설 실무반 교재, KEPSCO 중앙교육원, 2000.
- [12] 2001 원자력에너지, KHNP 대외협력실 홍보팀, 2001.
- [13] HEI-95 Standards, 9th Ed., Heat Exchange Institute, 1995.
- [14] 운전변수 Data 로그시트, 울진원자력 3, 4호기, 2001년 3월 - 2001년 9월.