

원전 원자로 냉각재 계통의 가압기 밀림배관 열성층 온도 감시 시스템 개발

노재희, 권석근, 이운근, 김중선, 손창호  
 삼창기업(주) 제어기술연구소, 울산대, 부산대.

Development of temperature monitoring system of pressurizer surge line thermal stratification

Jae-Hee Ro, Seok-Geon Kwon, Un-Kun, Yi, Jung-Sun Kim, Chang-Ho Shon  
 SAMCHANG ENTERPRISE CO., LTD., Ulsan Univ., Pusan National Univ

**Abstract** - 본 연구는 원자력발전소 원자로 냉각재 계통의 가압기 밀림배관내에서 서로 다른 온도의 유체가 밀도차에 의해 분리된 채 존재하는 열성층의 온도를 감시할 수 있는 시스템을 개발한다. 개발된 온도 감시 시스템은 국내원자력발전소 중 가장 오래된 고리원자력발전소 1호기의 수명연장과 관련하여 가압기 밀림배관의 열성층 온도를 측정함으로써 열성층화에 따른 배관의 건성 여부를 평가하는데 사용한다.

1. 서 론

우리나라는 에너지의 안정적 수급을 위해 원자력발전 도입을 추진하여 1978년 4월 고리1호기가 첫 상업운전을 시작한 이래로 1999년 12월말 현재 우리나라의 원자력발전소는 16기 1,372만kW로서 전체 설비용량의 29.2%를 차지하고 있으며, 세계 9위의 원자력발전소 보유국으로 부상하였다. 또한 2000년 1월중에 산업자원부가 발표한 제 5차 장기전력수급계획에 따르면 우리나라는 영광 5, 6호기(2002년) 및 울진 5, 6호기(각각 2004, 2005년)를 비롯하여 2015년까지 총 12기의 원전을 신규로 건설하고 2기를 폐기할 것을 추진 중에 있다. 본 연구의 목적은 폐기대상인 고리 1호기의 수명연장과 관련하여 원자력발전소의 원자로 냉각재 계통의 가압기 밀림배관내에서 서로 다른 온도의 유체가 밀도차에 의해 분리된 채 존재하는 열성층의 온도를 감시할 수 있는 시스템을 개발하는데 있다. 온도를 측정하기 위해 온도센서인 열전쌍을 사용하여 가압기 밀림배관에 부착할 수 있도록 제작하였으며 열전대(Thermocouple)으로부터 입력되는 신호를 처리하여 컴퓨터에서 실시간 감시 및 저장하도록 하였다. 개발된 온도 감시 시스템은 고리 1호기에 설치되고, 취득된 온도데이터들은 가압기 밀림배관의 열성층화에 따른 건성 확인 및 수명평가에 이용된다.

2. 본 론

2.1 원자로 냉각재 계통

원자로 냉각재 계통은 터빈을 구동하는 증기를 생성하기 위하여 노심에서 생성된 열을 증기발생기로 수송한다. 원자로 냉각재 계통은 터빈과 급수 사이클을 통과하여 지나가는 증기 및 급수와 노심을 통과하여 지나가는 방사성 냉각재를 분리하는 경계 역할을 한다. 가압기는 또한 높은 운전온도를 유지하면서 생성된 열이 증기발생기로 좀 더 많이 전달될 수 있도록 냉각재의 압력을 유지한다. 고리 1호기의 원자로 냉각재 계통은 원자로 용기에 나란히 연결된 2개의 열전달 유로를 갖고 있다. 그림1은 원자로 냉각재 계통을 보여주고 있다. 각 유로에는 1대의 원자로 냉각재 펌프(Reactor coolant pump), 1대의 증기발생기(Steam generator)와 연결 배관이 있으며, 추가적으로 계통에는 가압기(Pressurizer), 압력방출

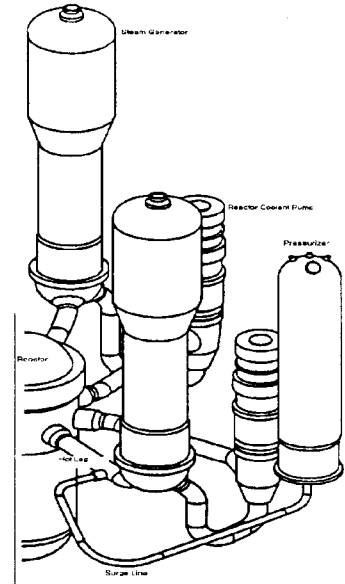


그림 1. 원자로 냉각재 계통  
 Figure 1. Reactor coolant system

밸브 및 안전밸브와 가압기 압력 방출 탱크 및 운전 제어에 필요한 계측 설비를 갖추고 있다. 또한 많은 보조 계통이 원자로 냉각재 계통에 연결되어 있다. 화학 및 체적제어 계통, 잔열 제거 계통 및 안전 주입 계통이 원자로 냉각재 계통에 연결되어 있다.

2.2 원자로 냉각재 배관

원자로 냉각재 배관은 계통 요구에 따라 가장 작은 크기로 제한되어 있다. 일반적으로 배관의 크기를 줄이기 위하여 높은 유체 속도가 이용되어 왔지만 유로 배관에서 비정상적인 부식이나 침식을 피하기 위하여 유체의 속도를 18.3m/sec(60 Ft/sec)까지 제한하고 있다. 이러한 설계 개념으로 원자로 출구관의 내부 직경이 73.7cm(29in)이고 원자로 입구관 내부 직경은 69.8cm(27.5in)이며 증기발생기와 원자로 냉각재 펌프사이의 배관은 압력 손실을 줄이고 펌프 흡입에 대한 유동 조건을 개선하기 위하여 78.7cm(31in)까지 크게 만들어져 있다. 원자로 냉각재 계통 배관에는 여러개의 보조계통관통관이 있는데 그 중 본 연구에서 측정대상인 가압기 밀림배관(Pressurizer surge line)은 외경35.6cm(14in)으로 된 스텐레스강으로 되어있으며, 원자로 냉각재 계통의 가압기와 고온관(Hot leg)을 연결하는 배관으로서 이 관내에서 가압기측의 고온 냉각재와 이에 비해 상대적으로

로 낮은 온도인 고온관측의 냉각재가 만나는 곳으로 배관의 상하부간에 온도차가 항상 상존하고 있다. 이는 가압기 밀림배관내에서 서로 다른 온도의 유체가 밀도차에 의해 분리된 채 존재하는 열성층이 발생하기 때문이며 본 연구에서는 이 열성층의 온도를 감시할 수 있는 온도 감시 시스템을 개발하였다.

### 2.3 온도 감시 시스템

#### 2.3.1 온도센서

본 연구에서 사용된 온도센서는 공업용 온도계로서 가장 널리 사용되고 있는 열전대 온도 센서를 사용하였다. 그림 2(a)와 같이 서로 다른 종류의 금속, A, B의 양끝을 접합해서 양 접합점에 온도차가 발생되면 그 사이에 기전력을 일으켜 회로에 열전류가 흐른다. 이 열전효과를 제벡(Seebeck)효과라고 한다. 열전류의 크기는 회로의 저항에 의해서도 변화하는데 그림 2(b)와 같이 절단하면 절단점에는 열기전력을 발생하고 그 크기는 2종의 금속종류와 양접점의 온도에 의해 정해지고 금속의 형상이나 치수, 도중의 온도 변화에는 영향을 받지 않는다. 따라서 2종의 금속 종류와 열기전력의 크기, 한쪽 접점의 온도를 알고 있으면 다른 쪽의 온도를 알 수 있다. 이것이 열전대의 원리이다. 그림 3은 본 연구에서 가압기 밀림배관 둘레에 설치하기 위해 제작된 열전대이다.

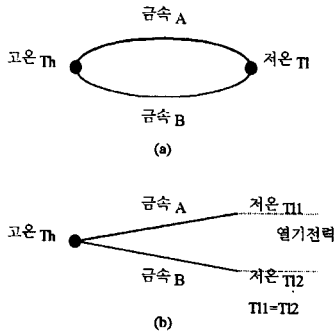


그림 2. 열전대의 원리  
Figure 2. Theory of Thermocouple

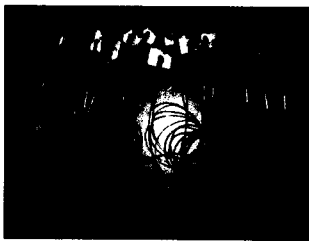


그림 3. 실제 사용된 열전대  
Figure 3. Used thermocouple

열전대의 구성 재료에는 여러종류가 있지만 본 연구에서 사용된 열전대는 K타입 열전쌍으로 +쪽에 Cr을 약 10% 포함한 Ni-Cr합금(Chromel)과 -쪽에 Al, Mn을 조금 포함한 Ni 합금(Alumel)을 사용한 열전대이다. 열전대의 열기전력은 앞에서 설명한 것과 같이 측온점점과 기준점점과의 온도차에 의해 정해지는데 열전대 단자(보상점)에서 기준점점까지는 거리가 떨어져 있는 것이 보통이다. 이런 경우 보상점점과 기준점점 사이의 온도변동을 보상하기 위해 열전대와 거의 같은 열기전력 특성을 가진 보상도선을 사용한다. 보상도선에는 열전대와 같은

재질을 사용한 익스텐션(Extension)형과 보상도선의 사용 온도 범위에서 열전대의 열기전력 특성과 거의 같다고 간주할 수 있는 대용합금을 사용한 콤펜세이션(Compensation)형이 있는데 본 연구에서는 가격이 저렴한 콤펜세이션형을 사용하였다.

#### 2.3.2 하드웨어

본 연구에서 측정을 위한 온도 범위는 0~400℃로 고온의 온도범위를 가진다. 열전대의 열기전력은 측온점점과 기준점점의 온도차로 정해지므로, 측온점점의 온도를 측정하는 데는 기준점점의 온도가 일정해야 한다. 기준점점의 온도가 0℃가 아닌 때는 등가적으로 0℃로 되도록 기준점점 온도에 상당한 열기전력을 보상하여야 한다. 일반적으로 측온 저항체나 다이오드 등으로 기준점점의 온도를 측정하고, 그 온도에 상당하는 전압을 열전대의 기전력에 가산하여 보상하는데 본 연구에서는 Cold Junction Compensator인 AC1226(Analog Device사)을 사용하여 온도를 보상하였다. 그리고 열전대의 열기전력은 극히 미소한 몇mV의 전압이므로 이 미소한 신호를 직접 연산하거나, 전송하는 것은 신호처리상 어려움이 있으므로 본 연구에서는 1B51(Analog Device사)와 OP07CJ(Analog Device사)를 이용하여 0~10V의 신호로 증폭하였다. 본 연구에서 설계한 신호처리부 블록다이아그램을 그림 4에서 보여주고 있다.

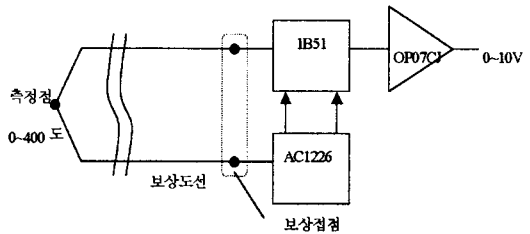


그림 4. 신호처리부 블록다이아그램  
Figure 4. Signal conditioning part diagram

증폭된 신호는 아날로그 신호이므로 4채널 A/D 컨버터를 거쳐 디지털 신호로 변환한 후 마이크로 프로세서에 저장된다. 본 연구에서 제작된 온도 취득 카드는 한 카드마다 4개의 열전대 입력을 받아들이고 측정점이 여러 개이므로 카드마다 일련 ID를 부여하여 컴퓨터에서 온도 취득 카드로 ID를 전송하면, 선택된 카드는 해당 ID와 온도 데이터를 전송하도록 마이크로 프로세서에 프로그래밍 하였다. 온도 감시 시스템은 온도 취득 카드가 설치된 패널의 위치와 온도를 감시하기 위한 컴퓨터와 거리가 1Km 이상이므로 그림 5와 같이 원거리 통신에 적합한 RS-485통신 방법을 채택하였다.

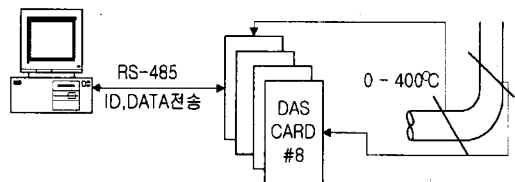


그림 5. 통신 프로토콜  
Figure 5. Communication protocol

온도 감시 시스템 전체 구성을 나타내면 그림 6과 같다.

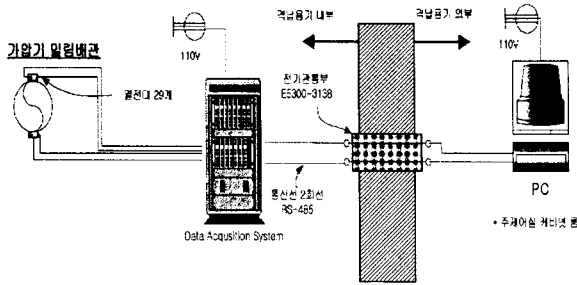


그림 6. 온도 감시 시스템 전체 구성도  
Figure 6. Construction of temperature monitoring system

온도 감시를 위한 컴퓨터는 원자력발전소의 주 제어실에 설치되고 온도 감시 시스템은 격납용기 내부에 견고하게 고정해서 설치하여 가압기 밀림배관의 온도를 측정한다. 가압기 밀림배관의 열전쌍 온도 센서는 11개 그룹으로 나뉘어서 배관둘레에 설치된다. 그림 7은 가압기 밀림배관에 설치된 온도 측정 위치를 나타내고 그림 8은 개발된 온도 감시 시스템을 나타내고 있다.

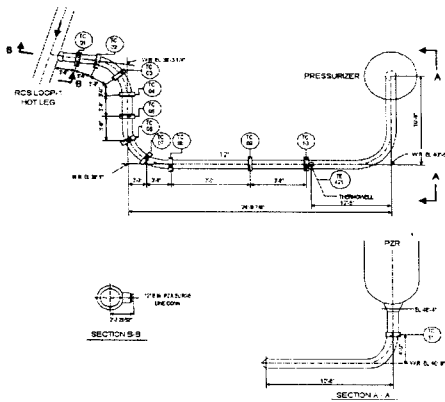


그림 7. 가압기 밀림배관 온도 측정 위치  
Figure 7. Temperature measurement position of Pressurizer surge line

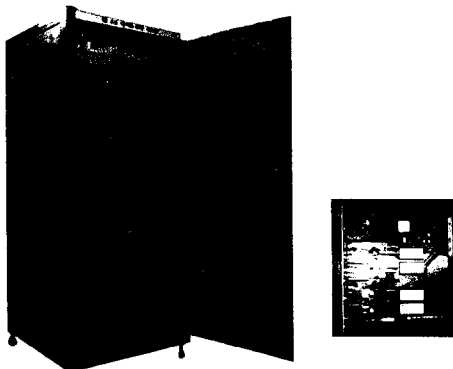


그림 8. 온도 감시 시스템과 카드  
Figure 8. Temperature monitoring system and card

### 2.3.3 소프트웨어

원자력발전소 주 제어실에 설치되어 있는 컴퓨터는 가압기 밀림배관에 설치되어 있는 온도를 감시할 수 있도록 온도 감시 프로그램을 설계하였다. 그림 9는 온도 감시 프로그램을 보여주고 있다.

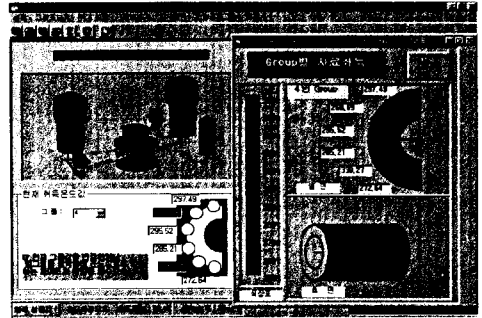


그림 9. 온도 감시 프로그램  
Figure 9. Temperature monitoring program

화면상의 왼쪽에 해당되는 가압기 밀림배관 열성층 감시 시스템은 그룹별로 센서의 온도값을 실시간으로 나타내고 온도값은 동일 그룹상에 가장 높은 온도값은 붉은색으로 표시되고, 가장 낮은 온도값은 푸른색으로 표시된다. 만약 사용자가 보다 쉽게 온도값을 감시하고자 할 경우 원하는 그룹을 선택하면 선택한 그룹의 온도값이 온도차에 의한 색상으로 표시되어 출력된다. 이 온도값은 컴퓨터 하드디스크에 저장된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소 원자로 냉각재 계통의 가압기 밀림배관내에서 서로 다른 온도의 유체가 밀도차에 의해 분리된 채 존재하는 열성층의 온도를 감시할 수 있는 온도 감시 시스템을 개발하였다. 개발된 온도 감시 시스템은 1999년 9월 O/H기간 동안 현장에 적용되어 고리원자력발전소 1호기의 수명연장과 관련하여 가압기 밀림배관의 열성층화에 따른 배관의 건정성 여부를 평가하기 위해 가압기 밀림배관의 열성층 온도를 측정하여 온도데이터를 현재 수집중에 있다.

본 연구에서 개발된 온도 감시 시스템은 원자력발전소의 가압기 밀림배관의 열성층 온도를 측정하기 위해 이용되었지만 신규로 건설중인 원자력발전소 및 이와 유사한 온도 데이터 취득을 위한 시스템에 설치하여 수년간의 온도 데이터를 데이터베이스화하고 분석하는데 이용할 수 있으리라 본다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 전력연구원 "고리1호기 원자로 냉각재계통 압력경계밸브 누설감시 시스템 개발", 1999.5
- [2] 삼창기업(주), "원전수명관리연구(II)" 분기보고서, 1999.1
- [3] Analog Device, "Special linear reference manual", 10-7