

# 高溫高壓 流體試驗設備의 運轉制御에 대한 技術的 考察

金炳九 · 鄭長煥

<韓國에너지研究所 大德工學센터>

## 1. 서 론

원자력 발전소의 안전성, 신뢰성 및 가동률 등에 주요한 영향을 미치는 부품으로서는 핵연료 집합체(nuclear fuel assembly)를 위시한 원자로 노심부품들을 들 수 있다. 따라서 이들 부품은 실제 상태와 같은 조건, 즉, 열하중, 압력하중, 진동, 마찰 하에서 실증시험을 수행하여 그 성능을 확인한 후에 원자력발전소에 사용하여야 한다.

우리나라에는 현재 고리 및 월성에 건설된 원자력 발전소가 상업운전 중이며 수기의 발전소가 건설중인 상황에서 원자력발전소의 주요 부품들에 대한 안전성 및 진전성등을 시험평가할 수 있는 시험설비의 건설은 필수적인 과제가 되었다. 이에 따라 한국에너지연구소는 1982년 말 대덕공학센터 내에 이들 부품을 시험평가할 수 있는 “핵연료 로의시험시설”을 준공시키고 본격적인 시운전에 들어 갔다. 본 시험설비는 원자력발전소의 일차계통(primary system)의 조건, 즉, 온도, 압력, 유량 및 수질등을 모의하여 구조적, 열수력학적, 재료적인 면에서 핵연료집합체를 위시한 원자로 노심부품들의 품질 및 성능을 평가할 목적으로 건설된 국내 최초의 고온고압 유체시험 설비이다. 본 시험설비에서 수행되는 각종 시험마다 시험조건, 즉, 온도, 압력 및 유량등이 크게 다른뿐만 아니라, 고온고

압에 수반되는 제반 문제들이 뒤따름으로서 이들 변수의 측정 및 제어에 있어서는 특별한 어려움이 뒤따른다.

본 해설에서는 고온고압 유체시험설비에서 수행되는 각종 시험의 주요 변수가 되는 온도, 압력 및 유량등 시험변수의 측정 및 제어방법과 운전경험등을 기술코저 한다.

## 2. 설비의 개요

본 시험설비는 크게 주 순환계통(main loop system), 주입·배출 계통(feed and bleed system) 보충수 계통, 냉각수 계통 및 압축 공기 계통 등으로 구성되며, 이 설비의 주요 기술시방과 유량, 압력 및 온도등의 제어에 직접적인 관계가 있는 주 순환펌프(main pump), 가압펌프(pressurizing pump) 및 전기가열기(electric heater) 등의 주요기기의 시방은 표 1과 같다.

주 순환계통은 시험시에 필요한 온도압력의 유량을 시험대에 공급하는 계통이다. 이 계통은 그림 1과 같이 시험유체의 온도를 유지시키는 열원으로서의 전기가열기, 가동정지시 유체의 냉각을 위한 열교환기(cooler), 側管(bypass line), 시험대, 그리고 유량공급용 펌프로써 구성된다. 펌프에서 출발한 물은 메인헤더(main header)사이에 다른 기기들과 병렬로 설치된 시험대에 유량, 온도, 압력 및 수질등의 시험조건

표 1 기술시방

	설계값	운전값	충격 시험
압력 kg/cm <sup>2</sup>	175.8	120	106.22±1.43(kg/cm <sup>2</sup> )
온도 °C	343	300	289 ±1(°C)
유량 GPM	1,500		26.72±0.3(kg/sec)
사용 유체	Demin.—water		
주순환펌프	형식 : 원심펌프 용량 : 341m <sup>3</sup> /hr 수두 : 280m 모우터 동력 : 500kW		
가압펌프	형식 : 플렌저펌프 토출압력 : 309kg/cm <sup>2</sup>		
전기가열기	용량 : 675kW 제어방식 : SCR/step controller		

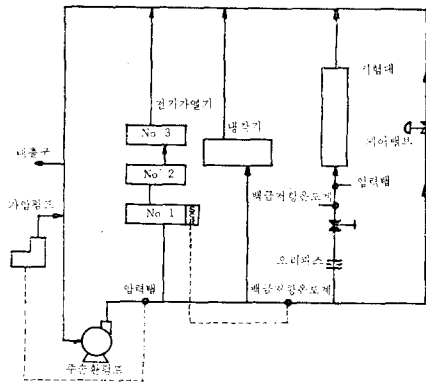


그림 1 주요기기의 계통도

을 만족하는 유량을 공급한후 펌프로 되돌아 온다.

주입·배출계통은 시험유체내에 용해되어 있는 가스나 crud 량이 탈기(deaeration) 및 필터레이션(filteration)에 의해 규정치를 넘지 않도록 함과 아울러 이 물을 다시 가압펌프를 통하여 주순환계통으로 공급하여 루우프내의 압력을 제어하는 역할도 한다. 또한 이 계통에는 시험유체의 수질, 즉 용존산소(dissolved oxygen), 혼탁도(turbidity) 및 PH 등을 모니터 할 수 있는 장비들도 부착되어 있다.

또한 일반 상수를 공급받아 이온교환수지, 필터, 진공탈기기(vacuum deaerator)등을 통과시켜 루우프내에 보충수를 공급하는 보충수계통, 각종 열교환기에 냉각수를 공급하는 냉각수계통, 제어밸브 및 공기운전기기 등에 공기를 공급하는 압축공기계통등이 있다.

### 3. 변수제어

본 시험설비에서 수행중인 시험으로서는 핵연료가 일차계통의 열수력특성 만족여부를 평가하기 위하여 유체의 조건을 바꾸어가며 핵연료사이의 압력차를 측정하는 압력강하시험, 냉각수의 흐름에 의해 발생하는 핵연료접합체에 대한 마찰시험, 유체의 흐름 및 기계구조물로부터 여기된 하중등에 의해 힘을 받는 핵연료접합체의 강도 및 동특성을 측정·해석하는 강도시험등이 있다. 이러한 시험조건은 시험종류에 따라 크게 바뀌나 표 1의 충격시험의 예와 같이 대부분 오차의 한계는 온도 ±1°C, 압력 ±1%FS, 유량 ±1%FS이므로 이들 변수의 정확한 측정 및 제어가 이루어 져야 한다.

#### 3.1. 유량제어

관내를 흐르는 유체의 유량은 여러가지 방법에 의해 측정될 수 있으나 일반적으로 널리 사용되고 있는 차압유량계의 일종인 오리피스 어셈블리(orifice assembly)를 이용하여 시험대(test rig)를 통과하는 유량을 측정하였다. 이때 유량은 오리피스와 시험대 사이에 설치된 글로브밸브(globe valve)와 측관상에 설치된 제어밸브에 의해 제어된다.

오리피스 어셈블리의 설계, 제작 및 설치는 ASME에 따랐고 유량 산출식은 식 1과 같다. 유량 측정계통도는 그림 2와 같으며 유체흐름으로 인해 오리피스양단에 발생하는 압력차는  $\frac{1}{4}$ " 튜우브를 통하여 차압변환기(D/P transmitter)에 전달되며, 차압변환기 다이어프램(diaphragm) 양단에 가해지는 압력차에 따라 전류가 발생된다. 다시 전압으로 바뀐 전류는 계수

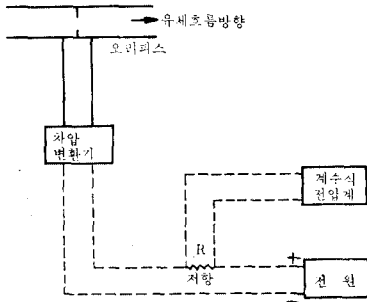


그림 2 유량측정 계통도

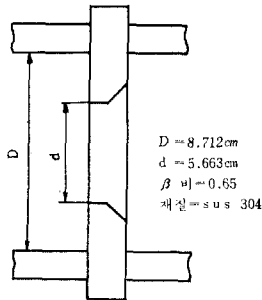


그림 3 오리피스 판

식전압계(D.V.M) 및 컴퓨터에 의해 측정·계산됨으로서 정확한 유량 산출이 가능하다.

유량측정에 사용된 오리피스판(orifice plate)(그림 3)은 고온에서 크게 발생하는 부식등을 고려하여 304 스테인레스강으로 제작하였고 파이프 내경과 오리피스 구경비인  $\beta$ 비는 오리피스 양단에 발생하는 압력의 차, 에너지의 손실, 유량 측정상의 정밀도 및 차압변환기의 종류등을 고려하여 선정하였다.

$$m = 0.034783 KY d^2 F_a \sqrt{\Delta p \rho} \quad (1)$$

$m$  = 질량유량(kg<sub>m</sub>/sec)

$Y$  = 팽창인자

$d$  = 오리피스판의 직경(cm)

$F_a$  = 열팽창인자

$\rho$  = 유체의 밀도(gm<sub>m</sub>/cm<sup>3</sup>)

$\Delta p$  = 차압(gm<sub>m</sub>/cm<sup>2</sup>)

$K$  = 유량계수

유량은 식 1에 의해 계산될 수 있으나, 측정시의 온도 및 압력 변화에 따른 오리피스판의 열팽창과 측정유체의 밀도변화를 고려하고 또한

관내를 흐르는 유체의 레이놀즈수(Rd) 변화에 따른 실질 유량에 대한 계수로 주어지는 유량계수  $K$  값이 정확해야만 정밀한 유량을 산출할 수 있다. 일반적으로 유량눈금이 새겨진 인디케이터(indicator)를 사용할 경우 정해진 조건(온도, 압력)하에서는 유량을 정확하게 측정할 수 있으나, 본 시험설비와 같이 유체조건의 변화폭이 넓은 경우에는 반드시 온도 및 압력등의 영향을 고려하여야만 각 조건하에서의 유량이 정확하게 계산된다.

유량계산시  $K$  값은 실제유량에 대한 측정값의 계수로서 주어지나 ASME에서는 관내를 흐르는 유체의 Rd를 변수로 하는 실험식으로 산출하였다. 식 2의  $K$  값은 Rd의 함수이며  $K_0$  값은 Rd가 무한히 크질경우 관내경 및  $\beta$ 비에 따라 정해지는 복잡한 실험식으로 표시된다.

$$K = K_0 \left( 1 + \frac{A}{Rd} \right) \quad (2)$$

$K$  = flow coefficient corresponding to any specific set of values of  $D, \beta$  and  $Rd$

$K_0$  = the limiting value of  $K$  for any specific values of  $D$  and  $\beta$  when  $Rd$  becomes infinitely large

$Rd$  = Reynolds number based on  $d$

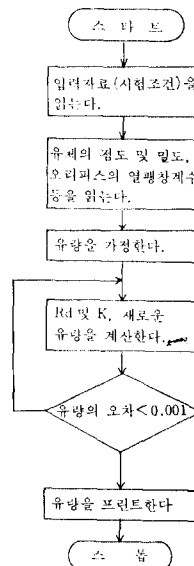


그림 4 Flocal 프로그램의 흐름도

◆ 解 說

상기 식 1, 2에서  $K$  값과 유량은 상호 변수가 됨으로 유량을 먼저 가정하여 가정한 유량에 대한  $Rd$  및  $K$  값을 산출한 후 가정한 유량과  $K$  값에 의해 새로이 계산한 유량을 비교한다. 이때 두 유량 사이의 오차가 측정오차 범위내에 들때까지 새로운 유량을 반복계산한다. 본 시험 시설에서는 각 온도 압력에 대한  $K$  값은 그림 4의 흐름도와 같이 컴퓨터를 이용한 iteration에 의하여 온도 압력의 변화에 따른 유체의 밀도, 유속 및 오리피스판의 열팽창등이 고려된 값으로 구해지므로 보다 정확한 유량이 계산된다. 그림 5는 온도의 영향을 무시하였을 때 유량 인디케이터에서 읽을 수 있는 값과 유량측정에 미치는 인자들을 고려하여 컴퓨터로서 계산된 유량을 비교한 것으로서,  $270^{\circ}\text{C}$ 에 조정된 인디케이터로써 관내를 흐르는  $30^{\circ}\text{C}$ 의 물의 유량을 읽었을때 약 13%의 오차가 발생함을 알 수 있다.

또한 측정시 정확도에 미치는 중요한 인자로서 측정계기의 오차를 들 수 있다. 모든 계기는 자체의 정밀도를 가지고 있으므로 유량계산시 이들 개개의 값을 찾아서 이용할 수 있으나 측정에 사용되는 모든 계기를 연결한 후 이 측정

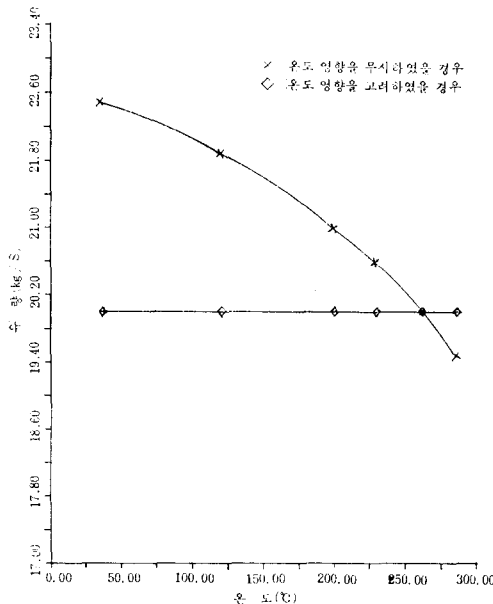


그림 5 유량에 미치는 온도의 영향 비교

표 2 교정검사결과

1. 교정자료

표준기의 압력 단위  $\text{mmH}_2\text{O}$

지시값 단위 volt

표준기의 압력	시험기기의 지시압력	
	Up	Down
0	1.00	1.00
1398.90	1.56	1.57
2000.73	1.81	1.81
3001.11	2.21	2.22
4000.26	2.62	2.62
5000.64	3.02	3.02
5997.91	3.43	3.43
6998.29	3.83	3.83
7997.44	4.23	4.24
8997.82	4.64	4.64
9996.27	5.04	5.04

2. 교정곡선식

$$y = 2471.82x - 2467.3 \text{ (mmH}_2\text{O)}$$

$$3. \text{ STD(편차)} = 25.05 \text{ (mmH}_2\text{O)}$$

단, 윗식에서  $y$ 는 표준기의 지시압력이고,  
 $x$ 는 시험기기의 지시값이다.

계통에 대한 정밀도를 찾아냄으로서 보다 정확한 유량을 산출할 수 있다. 상기 유량측정에서는 측정기를 표준기(정밀도 0.015% 공기 분동식 압력계)를 사용하여 비교측정법에 의하여 시스템보정(system calibration)을 하였다. 표 2는 한국표준연구소 검교정센터에서 교정한 차압변환기의 교정결과로서 이 교정에서 찾아낸 교정곡선식을 유량계산에 이용하였다.

3.2. 온도제어

루우프내의 순환수는 메인헤더 사이에 직렬로 연결된 3개의 전기가열기에 의해 가열된다. 이 가열기의 가열요소(heating element)는 12개의 회로(circuit)로 나누어지며 그중 3개의 회로는 S.C.R에 의해 제어되며 나머지 9개의 회로는 스템 컨트롤러에 의해 제어된다. 온도제어회로는 그림 6과 같이 시험대 전단에 설치된 백금 저항온도계(platinum resistance temperature

detector)로서 측정된 온도와 콘트로올러에 설정된 온도와 비교하여 차이값은 전기가열기의 제어회로(control circuit)로 입력되어 전기 가열기는 제어된다.

온도제어방법은 그림 7과 같이 제어온도가 설정되면 먼저 가열기의 출력이 일차적으로 변화되므로 미세한 온도의 제어가 가능한 S.C.R에 의해 제어되는 회로에 전원이 공급되며, S.C.R의 출력이 100%가 되었을때 스텝콘트로올러가 차례로 작동된다. 스텝콘트로올러에 전원이 차례로 공급되어 측정온도가 설정치를 상회하게 되면 이때부터 S.C.R이 작동하게 되어서 정밀한 온도제어가 가능하게 된다. 각 스텝콘트로올러 혹은 S.C.R 사이의 작동에 있어서는 적절한 지체시간(time delay)을 둬므로써 가열기에서 가열된 물이 측정점에서 온도가 감지될때까지의 시간을 보상하게 된다.

### 3.3. 입력제어

주 순환계통내에 순환되는 시험유체는 수질 조절 목적으로 일정한 량의 물을 주입·배출계통으로 보내야 한다. 따라서 계통내의 압력을 일정하게 유지하기 위해서는 적절한 량의 물을 계통내로 주입하여야 한다. 본 시험시설에서는 이러

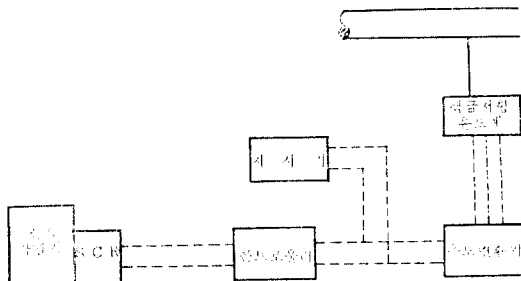


그림 6 온도제어 계통도

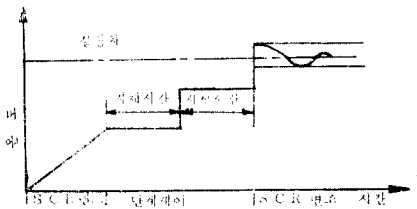


그림 7 온도제어방법

한 계통상의 특성을 이용하여 배출되는 량에 대한 주입되는 물의 량을 결정함으로써 계통내의 압력을 제어하고 있다.

그림 8과 같이 메인헤더에 설치된 압력탭(pressure tap)에서 압력을 감지하여 압력변환기에서 전류 신호로 바꾼후 이 값을 콘트로올러의 설정압력과 비교하여 가압펌프를 구동하는 모터에 직결된 변속커플링(V.S. coupling)의 회전수를 조절함으로써 압력제어는 가능하다. 즉 이송 및 배출계통으로 배출되는 량과 계통으로 부터 외부로 누설되는 량의 합이 가압펌프에 의해 주입되는 량과 같을 때 계통내의 압력은 일정하게 된다. 만일 계통내의 압력이 낮아지면 압력변환기로 부터 이 변화량에 상응하는 신호를 받아 압력이 설정치와 같게 되게끔 가압펌프의 회전수를 증가시킨다.

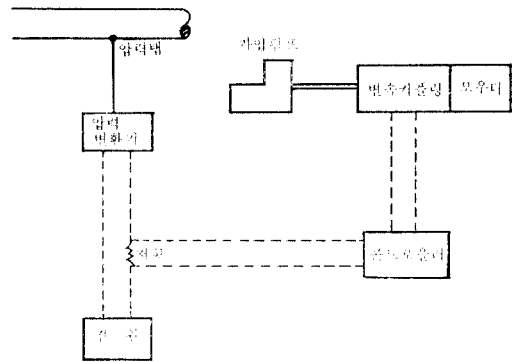


그림 8 압력제어 계통도

## 4. 결 론

이상에서 한국에너지연구소에 건설된 “KAERI Out-Reactor Hot Test Loop Facility”의 개략과 시험변수의 측정 및 제어방법에 대하여 기술하였다. 특히 온도, 압력 및 유량등의 측정변수 폭이 넓은 본 시험시설에서는 운전기기 및 측정계기의 적절한 선택, 측정계통의 교정, 운전설비에 대한 철저한 파악 및 컴퓨터의 이용등을 통하여 계통의 제어 및 시험변수의 측정등에 정밀도를 향상 시킬수 있었다.

참 고 문 헌

1. Fluid Meters Their Theory and Application, Report of ASME Research Committee on Fluid Meters, 6th ed, 1971
2. R.P. Bendict, Fundamental of Temperature, Pressure and Flow Measurements, Wiley-Interscience, 1972.
3. Tenny Lode, Error Analysis with Applications to Platinum Resistance Temperature Sensors, Rosemount Engineering Company
4. 이태희 외 5명, 원자력공학 시험평가단계넘설계, 한국에너지연구소, 1979.
5. 김 병구의 외 8명, 월성로형 핵연료로외실증시험 계획, 한국에너지연구소, 1981.
6. 한 필순의 다수, 월성로형 핵연료국산화 기술개발, 한국에너지연구소, 1982.

(359 페이지에서 계속)

參 考 文 獻

- (1) J. S. Bendat, et al.; "Eng Application of Correlation and Spectral Analysis" (1980)
- (2) Halvorsen, et al.; "Sound and Vibration", Vol. 9, No. 8, pp.15~24 (1975)
- (3) 城戶外 2名; "日應用情報研究年報" Vol. 6, No. 1, pp.111~121 (1980)
- (4) J. E. OH.; Doctor of Eng. Thesis, Tokyo Institute of Technology (1983)
- (5) Smith, C. C. and Y. K. Kwak.; "Trans. of the ASME", Jr. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 100. March 1978, pp.42~49.
- (6) Y.K. Kwak and C.C. Smith; "Trans. of the ASME, Jr. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 102. June 1980, pp.85~83.