

## 원전의 자동기동 운전을 위한 냉각재 만수상태에서의 압력제어기 개발

박 재창

한국원자력연구소

오 병주

한남대학교 전자공학과

요 약

본 논문에서는 가압기에 기포가 형성되기전 원자로 냉각재계통의 압력을 자동으로 제어할 수 있는 원자로 냉각재 압력 제어기를 개발하여 원전 시뮬레이터를 통해 설계된 제어기의 성능시험을 수행하였다. 그 결과 냉각재의 압력변동을 주는 환경 요인 발생시에도 설정치에 안정된 압력 제어 특성을 보여주었다. 원전 기동시 압력제어에 본 논문에서 제안한 제어기를 적용할 경우 운전원의 운전부하를 줄여줄 것으로 예측된다.

### 1. 서 론

원자력발전소 운전형태를 가열운전, 원자로 기동운전, 출력운전 및 냉각운전으로 나눌 수 있다. 가열운전 시작전의 원자력발전소는 가압기를 포함한 1차 계통에 충수가 완료되어 있고, 정적배기(static vent)와 동적배기(dynamic vent)가 완료되어 상온상태의 물로 완전히 채워져 있게 된다. 이때 원자로 냉각재 온도는 약 50°C-70°C이고, 냉각재 압력은 24-27kg/cm<sup>2</sup>정도 된다. 가열운전에서 상온정지 운전은 냉각재 온도를 176°C까지 가열하고 가압기에 기포를 형성시키는 운전이다. 운전원은 냉각재 온도를 가열하기 위하여 원자로 냉각재 펌프를 기동하여 냉각재를 강제순환시켜 냉각재 루-프내의 구조물 내벽과 마찰열로 가열시키며, 가열 율이 기술지침서의 제한치를 초과하지 않도록 잔열제거 계통의 열 교환기를 통과하는 유량제어로 냉각율을 조절한다. 이때 냉각재 압력은 원자로 냉각재 계통이 과냉각 상태에서 냉각재 펌프의 유효 흡입수두를 확보하고, 잔열제거 계통의 흡입 측에 있는 압력 보호밸브가 열리지 않도록 하기 위해 화학체적제어 계통의 충전유량과 잔열제거 계통의 유출유량을 적절히 조절하여 가압기에 기포가 형성될 때까지 원자로 냉각재 압력을 약 24kg/cm<sup>2</sup>정도 유지시킨다.

가압기내의 전열기를 이용하여 충전 및 유출유량으로 유지되는 냉각재 계통의 압력에 대한 포화 온도까지 가압기내의 물을 가열함으로써 가압기에는 기포가 형성된다. 기포가 형성되면 가압기 수위가 감소하며, 이때부터 원자로 냉각재 압력은 가압기내 가열기와 살수에 의하여 수동으로 제어한다.

### 2. 상온정지운전에서의 운전특성

원자로 냉각재 압력제어에는 냉각재가 만수일 때와 가압기에 기포가 형성되어 포화상태로 유지될 때 각기 다른 제어 대상으로 압력을 제어한다. 원자로 냉각재가 만수상태일 때 압력변동의 원인으로서는 냉각재 재고량에 변화를 주는 유출유량과 충전유량, 순간 압력변동을 일으키는 원자로 냉각재 펌프 기동 및 정지, 그리고 원자로 냉각재 온도변화에 의한 체적변화 등을 들 수 있다. 원자로 냉각재가 만수상태일 때 압력제어는 충전유량 조절 밸브 FV-122와 원자로 냉각재가 저온 저압일 때 유출유량을 조절하는 밸브 HV-142를 수동으로 조절한다(그림 1 원자로 냉각재계통 계통도). 압력변동의 요인이 없는 경우는 충전유량과 유출유량에 원자로 냉각재 펌프 밀봉주입수의 일부를 합한 값과 같도록 함으로써 냉각재 재고량의 변동이 발생하지 않으며 원자로 냉각재 압력은 일정하게 유지된다. 그러나 원자로 냉각재 펌프를 기동시키거나 가압기의 전열기를 작동

시켜 냉각재에 열을 가하는 경우에는 유체의 온도증가로 인한 체적 팽창만큼의 유체를 유출계통의 수동 밸브를 통하여 유출시키므로써 압력을 일정하게 유지시킬 수 있다. 가열운전시 운전원은 가압기에 기포가 형성되기 전에는 항상 원자로 냉각재 압력을 주시하면서 유출유량 조절밸브를 수동으로 조절하여 냉각재 압력을 설정치로 유지시키는 운전을 한다. 또한 원자력발전소를 기동할 때 운전원은 가열 단계에 따라 운영기술지침서(technical specifications)에서 요구하는 정기점검과 시험을 할 수 있도록 운전 조건을 만들어야 하기 때문에 운전원의 업무 부하는 그 만큼 많아지게 된다. 그러므로 원자로 냉각재의 체적 팽창이나 수축, 냉각재의 유출이나 충전으로 인하여 원자로 냉각재의 압력이 상승하거나 감소하는 경우에 적절한 조치를 취하지 못할 수도 있다. 원자로 냉각재 계통이 저온 과압이 되면 원자로 냉각재 계통의 재질에 취성 파괴의 우려가 있으며, 잔열제거 계통의 흡입측 과압 보호밸브가 열림으로써 냉각재가 외부로 유출 될 가능성도 있다. 그리고 냉각재 과유출시 저압 상태가 되어 원자로 냉각재 펌프의 유효흡입수두를 상실하게 되는 문제점이 있다.

### 3. 압력 제어기설계

#### 가. 제어기 설계 요건

본 논문에서 설계된 제어기는 원자력 발전소를 기동할 때 가압기에 기포가 생성되어 원자로 냉각재 압력이 가압기의 살수와 전열기에 의하여 압력 조절이 될 수 있을 때까지 원자로 냉각재 압력을 설정값(setpoint)에 유지시키기 위한 제어기이다. 이때의 원자로 냉각재의 압력은 개(system)의 경계를 통한 냉각수 질량 이동(충전과 유출)에 의하여 제어된다. 원자로 냉각재는 비응축성 유체이므로 적은량의 충전과 유출에도 원자로 냉각재 압력은 민감하게 변화하게 되므로 제어기는 원자로 냉각재의 충전 혹은 유출로 야기되는 압력 변화를 제어할 수 있어야 한다.

상온정지 운전에서 원자로 냉각재 계통은 잔열제거 계통과 연결되어 운전되므로 원자로 냉각재의 과압으로 인해 잔열제거 펌프의 흡입측 과압보호밸브가 열림 설정치를 초과하지 않도록 제어되어야 하며, 저압으로 인한 원자로 냉각재 펌프의 유효흡입수두가 상실되지 않도록 해야 된다.

상온정지운전에서는 원자로 냉각재 펌프를 돌려 냉각재를 강제순환시켜므로써 마찰열에 의하여 원자로 냉각재를 가열시키게 되고, 잔열제거 계통의 열교환기에 의하여 가열열을 조절하게 되므로, 제어기는 유체의 내부에너지 변화로 발생하는 유체의 체적 변화에 의한 원자로 냉각재 압력 변화에 대응 할 수 있어야 한다. 그리고 원자로 냉각재펌프 기동 및 정지시 순간적으로 발생하는 펌프의 압력수두를 제어 할 수 있어야 한다.

#### 나. 압력제어 알고리즘

원전 현장에서 가장 널리 사용되는 제어 알고리즘은 PID제어이다. PID 제어는 시간영역에서는

$$Y = K(e + 1/T_i \int e dt + T_d de/dt) \quad (1)$$

전달함수 형태로는,

$$G_c = Y/E = K(1 + 1/T_i S + T_d S) \quad (2)$$

로 표시된다. 식(1)의 좌변의 첫 번째 항은 에러에 비례(Proportional)하는 출력을 주는 비례(P)동작이고, 두 번째 항은 에러의 적분(Integral)값에 해당하는 출력을 주는 (I)동작이며, 세 번째 항은 에러의 미분(Differential)값에 해당하는 출력을 주는 미분(D)동작이다.

본 논문에서 이용한 원자로 냉각재 열 수리학 모델은 원자력연구소에 있는 시뮬레이터의 SMABRE 코드 모델을 이용하였다. 시뮬레이터의 모델은 대규모 분산모듈로 구성되어 있으며 각 모듈은 계통을 모델한 것이다. 원자로 냉각재계통의 특성은 비선형, 시간지연 성질을 갖고 있는

시스템이다. 따라서 제어를 설계하는데 어려움이 있다. 제어기는 원자력발전소 설비제어에 많이 사용하는 PI제어기법을 적용하여 설계 요건에 따라 설계하였다. 그러나 D동작은 잡음을 증폭시켜 기존의 신호를 파문하게 하므로 P와 I만을 사용하여 제어를 설계하였다.

그림 2는 PI제어기 개략도이다. 여기서 제어기 입력변수로 원자로 냉각재 압력 설정치 ( $24\text{kg/cm}^2$ )와 원자로 냉각재의 실제 압력과의 차압을 구한 다음 PI제어기 출력  $\Delta u$ 를 제어량으로 BHV-142을 제어하도록 하였다. 여기서 PPRZN은 시뮬레이터에서 사용하는 원자로 냉각재 압력 변수이고, BHV-142는 잔열제거계통에서 화학제적제어계통으로 냉각재 유출 조절 밸브이다.

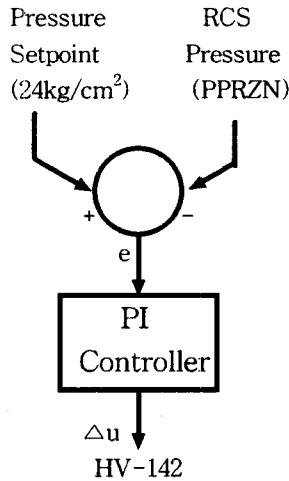


그림 2. PI 압력제어 알고리즘

#### 다. 제어기 동조

제어기의 동조는 Ziegler와 Nichols의 동조방법을 사용하였다. 먼저 그림 3과 같이 임펄스 압력 입력에 출력이 연속적으로 일정한 오실레이션이 일어날 때까지 이득을 증가시켜  $K_u = 120.5$ ,  $P_u = 22$ 을 얻었다. 표 1을 이용하여

$$K = 0.45 \times 120.5 = 54.225$$

$$T = 1/1.2 \times 22 = 18.333$$

을 구하였다. 이득을 조정한 임펄스압력 입력에 대한 출력은 그림 4와 같다.

표 1. Ziegler-Nichols의 최적이득 동조

Controller	K	Ti	Td
P	$K=0.5K_u$	.	.
PI	$K=0.45K_u$	$T_i=1/1.2P_u$	.
PID	$K=0.6K_u$	$T_i=0.5P_u$	$T_d=1/8P_u$

#### 4. 실험

본 실험은 원자력연구소 연수원에 있는 웨스팅하우스의 3 루-프 900MWe PWR 노형을 모델로한 시뮬레이터를 이용하였으며 시뮬레이터의 제어프로그램에서 HV-142를 처리하는 모듈이 본 논문에서 설계한 압력제어기 프로그램을 콜하도록 프로그램을 수정하였다. PI제어기의 프로그램에 필요한 입력 변수를 다음과 같이 설정하였다.

$$RIN = RCS \text{ setpoint}(24\text{kg/cm}^2) - PPRZN(\text{압력})$$

$$RINLML = -1 \quad : \text{입력 최소값}$$

$$RUTLML = -1.0 \quad : \text{출력 최소값}$$

$$RINTEG = 18.333$$

$$RINLMH = 29.0 \quad : \text{입력 최대값}$$

$$RUTLMH = 1.0 \quad : \text{출력 최대값}$$

$$RGAIN = 54.225$$

$$RDT = 0.2 \quad : \text{컴퓨터 사이클}$$

RATE = 0 : 수동조작시 이득	IMODE = 0 (수동:1, 자동:0)
RICHANG = 1 (수동:0, 자동:1)	RIOUTD(t-1) = 과거 제어기 출력의 적분성분
RIOUT = 현재 제어기 출력의 적분성분	ROUT(t-1) = 과거 제어기 출력
ROUT(t) = 현재 제어기 출력	

여기에서 RIN은 압력편차이며, RGAIN은 PI제어기의 이득이고, RINTEG는 제어기의 시정수이다. 실험은 원자로 냉각재가 만수상태에서 냉각재 압력이 5kg/cm<sup>2</sup>, 20kg/cm<sup>2</sup>, 29kg/cm<sup>2</sup>일 때의 압력 제어곡선은 그림 5, 6, 7과 같으며 그림 8은 원자로냉각재 압력이 24kg/cm<sup>2</sup>에 안정 상태에서 냉각재 펌프를 기동하였을 경우 압력변화에 대한 제어기의 성능을 나타낸다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 운전원의 부하를 줄이기 위하여 가압기에 기포가 형성되기 전까지 냉각재 압력을 자동으로 제어할 수 있는 제어기를 설계하였다. 시뮬레이터를 이용하여 제어기 성능을 실험한 결과 냉각재 압력변화를 주는 모든 요인들에 대하여 설정치에 안정되는 결과를 보여주었다. 설계된 제어기의 실용화를 위해서는 정지냉각계통에서 화학체적계통으로 유출되는 파이프 및 HV-142 밸브의 크기에 대한 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. *Advanced Compact Nuclear Simulator Textbook*, Korea Atomic Energy Reserch Institute, Taejon, 1990.
2. Ricardo J. Mantz and Eugenio J. Tacconi, "Complementary rules to Ziegler and Nichols' rules for a regulating and tracking controller," *Int. J control*, vol. 49, no. 5, pp. 1465-1471, 1989.
3. *Systems Manual Pressurized Water Reactors*, Inspection and Enforcement Training Center, 1979.
4. G.F, Franklin el, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 3rd Ed, Addison Wesley, 1994.
5. "고리 3&4 종합운전 및 계통운전 절차서", KEPCO, 1988.
6. "고리 3&4 "기술지침서", KEPCO, 1988.

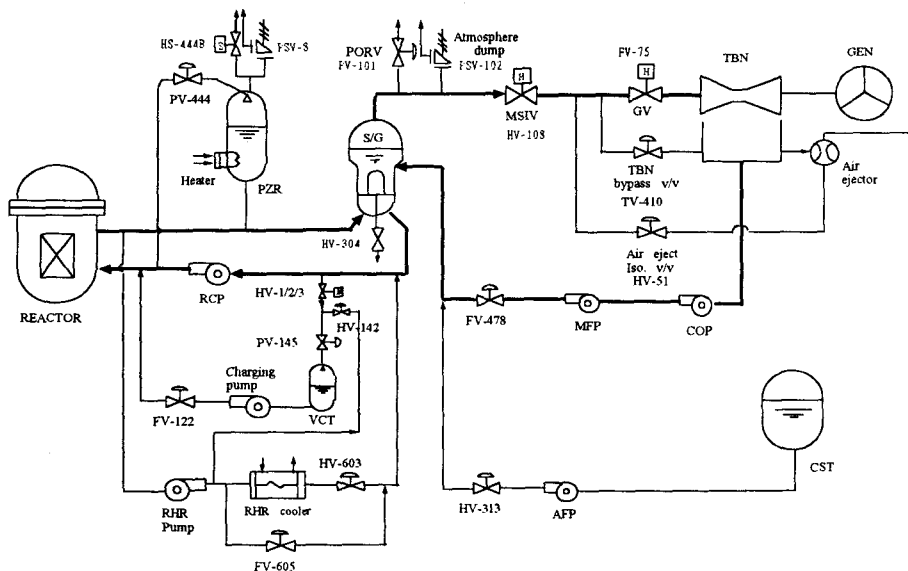


그림 1. 원자로 냉각재계통 계통도

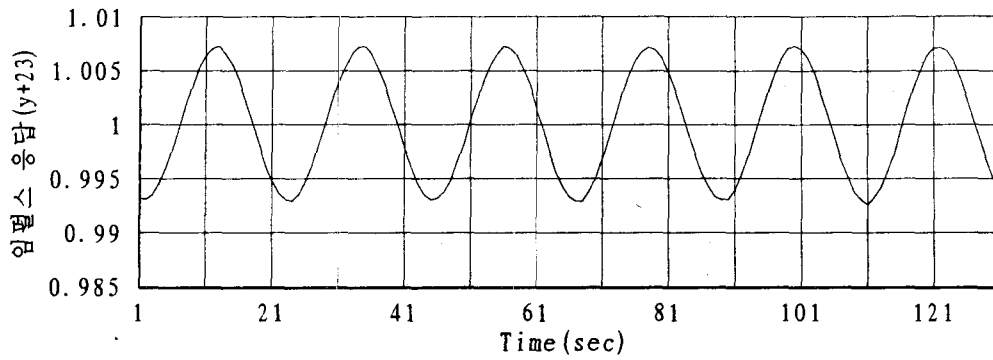


그림 3. 임펄스 입력에 대한 응답곡선

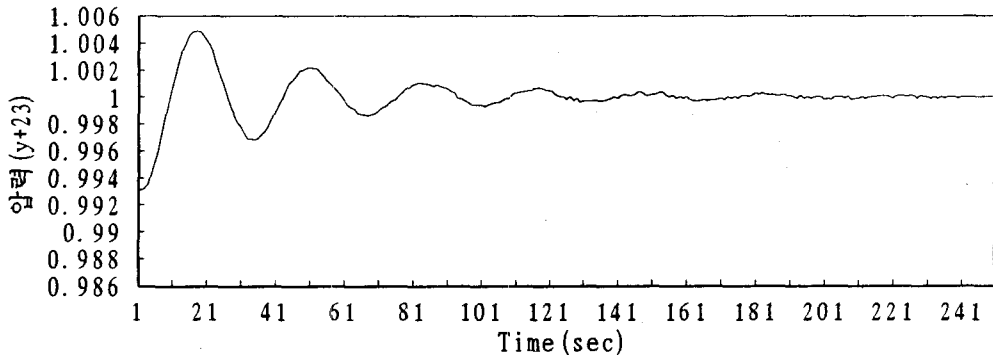


그림 4. 계단압력 변동에 대한 설정치의 응답곡선

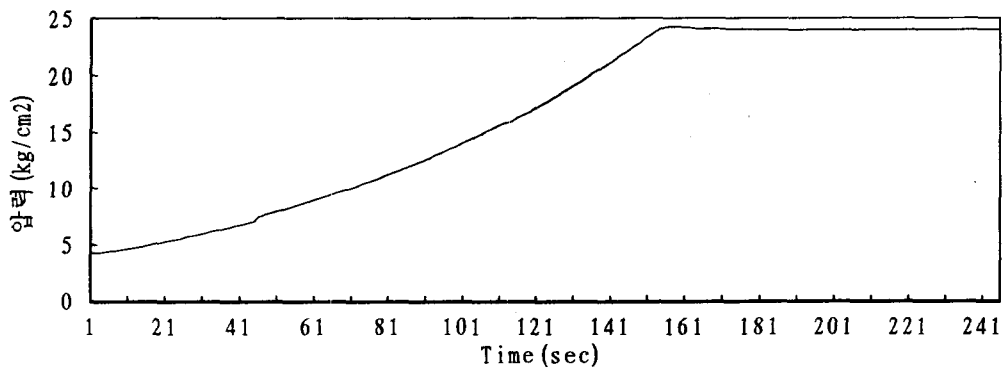


그림 5. 냉각재 5kg/cm<sup>2</sup>에서 압력제어 곡선

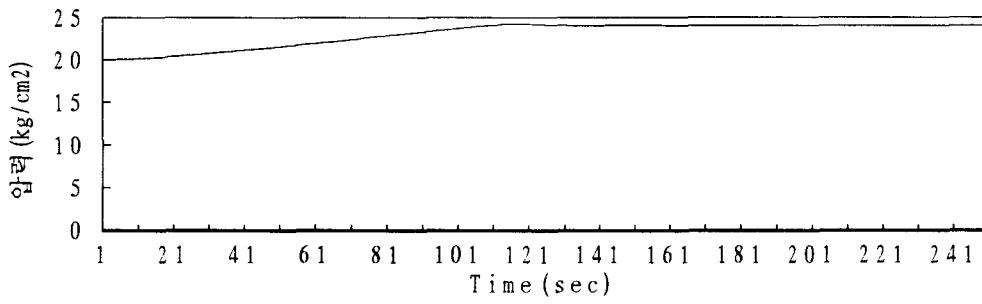


그림 6. 냉각재 압력 20kg/cm<sup>2</sup>에서 압력제어 곡선

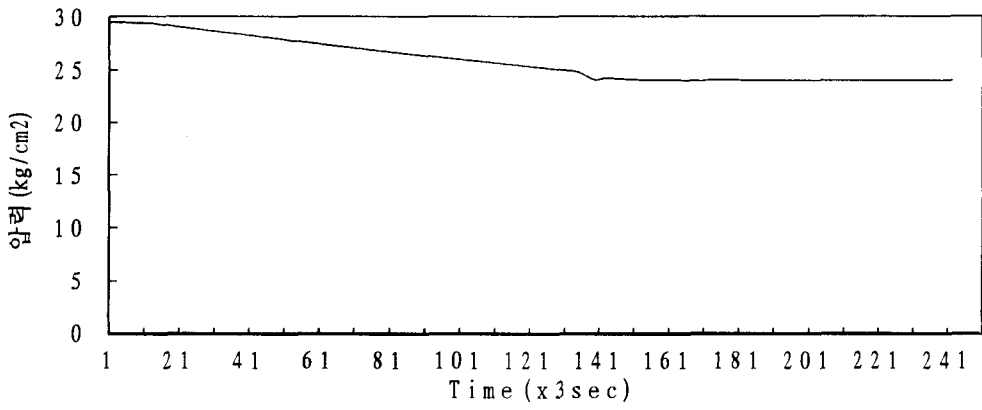


그림 7. 냉각재 압력 29kg/cm<sup>2</sup>에서 압력제어 곡선

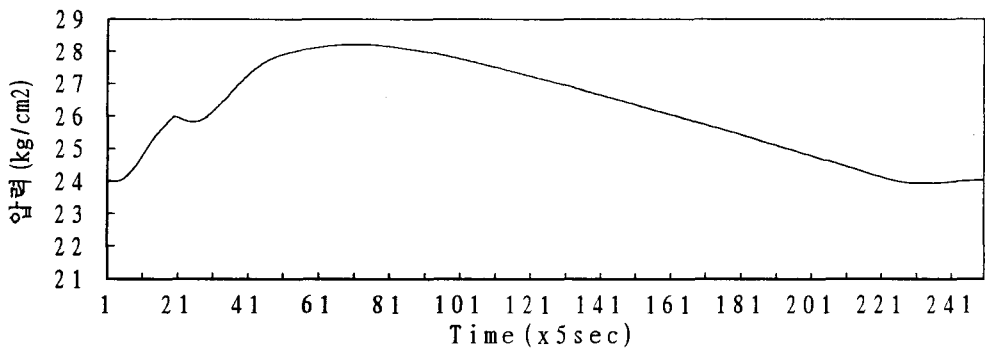


그림 8. 냉각재펌프 기동시 압력제어 곡선