

(論 文)

원자력발전소 증기발생기 수위제어를 위한 퍼지제어기법의 현장 제어기계에의 적용

박기용* · 허우성* · 성풍현**

(1994년 5월 10일 접수)

Implementation of Fuzzy Control Algorithm for Nuclear Power Plant Steam Generator Level Control at Field Controller

Gee-Yong Park, Woo-Sung Huh and Poong-Hyun Seong

Key Words : Fuzzy Control Algorithm(퍼지 제어기법), Nuclear Power Plant(원자력발전소),
Steam Generator(증기발생기), Westinghouse Distributed Processing Family(웨스
팅하우스 분산처리장치), Narrow Range Level Control(협역수위제어)

Abstract

A fuzzy control algorithm of bell-type membership functions and 9 rules is constructed for narrow range level control of steam generators in nuclear power plants. It is implemented at a field digital distributed controller, a Westinghouse-made controller called Westinghouse Distributed Processing Family(WDPF). Performance for level control of the developed fuzzy controller is compared with that of conventional controller, both at the field controller. For these comparisons, both the fuzzy control algorithm and the conventional PI control algorithm were carefully tuned. Also the sampling time for optimal performance was investigated. The results show that the fuzzy control algorithm is not only better in performance than the conventional algorithm but also much easier to be tuned by operators in the field.

1. 서 론

퍼지이론은 1965년 Zadeh에 의해 제창되어, 70~80년대 공학자들의 주목을 받기 시작하여 지금은 응용학문의 여러 분야에서 활발히 연구되고 있는 이론이다. 퍼지이론의 적용은 여러분야에서 많이 행해지고 있지만, 그 중에서 가장 큰 성공과 진전이 있었던 분야는 제어분야에서이다. 일반적으로 퍼지이론의 처리방식은 인간의 의사결정(decision making) 방식과 유사하여 불확실하고 애매한 대상

이나 뜻밖의 상황에 대해서 기존의 개발된 제어기보다 매우 우수한 성능을 보여주고 있다. 실제적으로 퍼지제어 이론을 현장 기계에 적용하여 좋은 결과를 얻은 논문들이 이미 많이 발표되어 있다. 특히 원자력 분야에서는 일본의 Fugen 연구용 원자로의 제어에 퍼지제어기법을 적용한 바 있다.⁽¹⁾ 한편, 국내의 원자력 분야에 있어서의 퍼지제어와 같은 고등제어 알고리즘의 적용은 발전소 안전에 대한 깊은 관심에 기인한 보수성(conservative)과 현재 국내 원자력발전소(혹은 原電)가 60~70년대의 기술로 세워진 아날로그방식이라 새로운 제어기술을 적용할 수가 없다는 제약때문에 타 분야에 비해서 매우 미미한 편이다. 그러나 현재 국내 原電에

*한국과학기술원 원자력공학과

**정회원, 한국과학기술원 원자력공학과

도 아날로그 방식이 아닌, 새롭게 개발되고 있는 디지털방식으로 전환하고 있으며, 이에 따라 제어 방식 및 기법에 대해서도 큰 변화를 가져오고 있다. 제어방식에 있어서는 기존에는 발전소내 모든 정보를 한 곳에서 처리하여 응답하는 중앙집중식이었으나 그러한 방식의 비효율성과 문제점으로 인하여 디지털 분산제어(digital distributed control) 방식으로 바뀌고 있다. 이것은 마이크로 프로세서와 같은 디지털 기술의 혁신적인 개발로 가능하게 되었다. 이러한 디지털 분산제어 방식에 따라 기존의 쓰이던 PID 제어기와 같은 고전제어기법보다 우수한 지능제어기(intelligent controller)에 대한 연구가 활발히 행해지고 있다. 본 연구에서는 앞으로 건설될 신형 원자력발전소의 계측제어 부문에 가장 적합한 디지털 분산제어 시스템의 하나로써 웨스팅하우스의 분산처리장치(Westinghouse distributed process family; WDPF)를 선정하였고,⁽²⁾ 최신 제어기법인 퍼지제어기를 증기발생기(steam generator)의 협역수위 제어(narrow range level control)에 대해서 설계하여 이러한 현장 제어기에 직접 이식하여 原電에 대한 모사기(simulator)를 이용하여 실제 原電에 쓰이는 PI 제어기와 성능을 비교해 가면서 분산 시스템 및 퍼지제어기법의 원자력발전소의 적용성을 파악해 보았다. 2장에서는 증기발생기 및 퍼지제어기의 설계에 관하여 소개하였고, 3장에서는 분산제어기로서의 WDPF에 관한

기술이 있고, 4장에서는 실험절차 및 최적 sampling time에 대하여 설명하며, 마지막으로 5장에서는 이러한 실험을 통해 얻어진 결과 및 토의가 있다.

2. 원자력발전소 증기발생기에 대한 퍼지제어기 설계

2.1 증기발생기 수위특성 및 모델

원자력발전소의 증기발생기는 원자로심(reactor core)에서 생성된 열을 가지고 전기를 생성하는 터빈을 돌리는데 필요한 증기를 생성하는 것으로, 이것은 원자로심의 열제거라는 原電구동에 중요한 역할을 하고있다. 이러한 증기발생기 및 원자력발전소 전체 구성에 관한 개략적인 그림이 Fig. 1에 나타나 있다. 증기발생기가 원만하게 작동하기 위해서는 증기발생기 내의 수위를 적절히 조절해 주어야 한다. 기존의 原電에서는 증기발생기의 수위 제어를 하는데 터빈의 총동단의 압력, 현재 수위, 및 급수와 증기유량을 이용하여 주급수 및 보조급수 밸브로 급수량을 조절하여 수위를 제어하는 3요소(3-element) PI-제어방식을 취하고 있다. 현재 이러한 제어기로는 원자로 정격출력의 30% 이상에서만 가능하고 30% 이하에서는 운전자의 수동운전에 의존하고 있다. 저출력시 증기발생기의 수위제어는 자동제어로는 어려운데, 이것은 계통의 상태

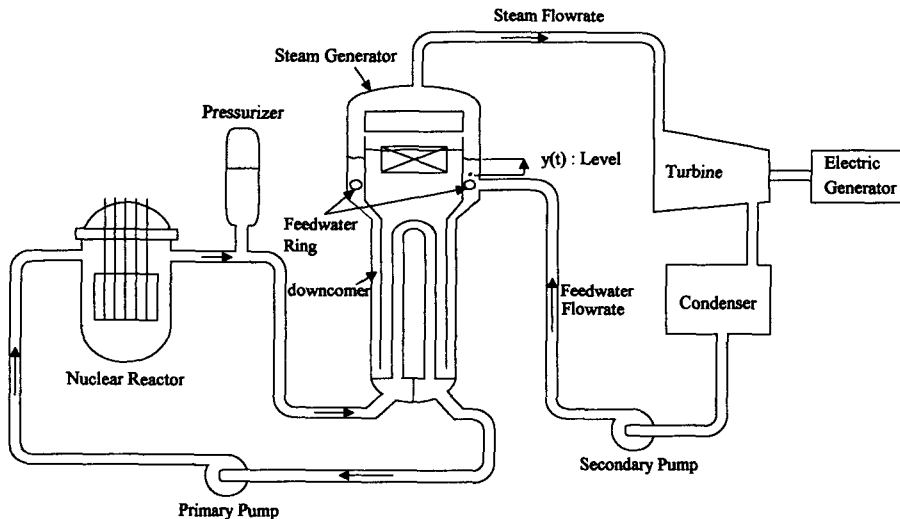


Fig. 1 Schematic diagram of steam generator and its environments of nuclear power plants(P.W.R type)

가 크게 변하는 것에도 기인할 뿐만 아니라 증기발생기의 수위는 비등지역의 기포분포의 비선형적 거동으로 인해 출력변화시 저출력에서 거동파악에 상당한 어려움을 주고 있다. 수위의 수축과 팽창(shrink and swelling)현상으로 알려진 이것은 증기유량의 변화와 급수유량의 변화에 대해 각기 다른 규모로 발생한다. 문제는 이러한 현상이 유량의 변화에 따른 증기발생기 전체의 내부 유체적(flow volume) 변화와 반대로 수위가 표현된다는 것에 있다. 즉 증기발생기 내의 증기를 뽑거나 급수를 덜 넣으면 유체적이 감소하여 당연히 수위가 떨어져야 하는데 오히려 수위의 팽창(swelling)현상이 발생하여 당분간 수위가 올라간다. 따라서 표면적인 측정으로만 급수유량을 제어하게 되면 오히려 급수를 더 적게 넣어 전체유량은 더욱 감소하게 되어 팽창현상이 사라진 이후에는 수위의 급격한 하강으로 제어실패를 초래하는 것이다. 마찬가지로 증기유량을 감소하거나 급수유량을 증가시키면 수위의 수축(shrink)현상으로 인해 제어실패를 초래한다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 증기발생기에 대한 Irving⁽³⁾의 선형 모델에 급수 및 증기유량을 증가

시켰을 경우 여러 출력단에 대한 수위의 수축과 팽창현상을 보여주고 있다. 증기발생기 수위의 수축 및 팽창현상이 출력이 낮아질수록 심화되는 것을 그림에서 볼 수 있다. Irving의 증기발생기 모델의 Laplace 전달함수는 다음과 같다.

$$y(s) = \left(\frac{G_1}{s} - \frac{G_2}{1 + \tau_2 s} \right) (W_{fw}(s) - W_{st}(s)) + \frac{G_3 s}{(s + \tau_1^{-1})^2 + (2\pi T^{-1})^2} W_{fw}(s) \quad (1)$$

여기서,

- y : 수위제어 (mm)
- W_{fw} : 급수유량 (kg/sec)
- W_{st} : 증기유량 (kg/sec)
- s : 복소변수

모델계수 $G_1, G_2, G_3, \tau_1, \tau_2$ 그리고 τ 는 원자로 출력, 주 냉각수의 압력변화, 그리고 급수유량의 온도변화의 함수이다. 다섯개의 출력단에 대한 이들 계수 값이 참고문헌(3)에 나타나 있다. 이러한 증기발생기 수위제어의 문제점을 극복하고, 전출력에 걸쳐서 자동제어를 하기위해 제어대상 모델에 의존하지 않고 애매한 정보에도 잘 작동하는 퍼지제어기를 설계하고자 한다. 퍼지제어기 설계 및 4장에서 언급할 최적 sampling time 연구에는 Irving의 선형모델을 이용하였고, 발전소 모사에는 비선형 모델⁽⁴⁾을 사용하였다.

2.2 퍼지제어기 설계

일반적으로 퍼지제어기는 플랜트로부터 측정된 물리량을 퍼지값으로 전환해서 내부에 짜여진 규칙단(rule base)에 의거하여 Zadeh의 추론법칙⁽⁵⁾을 이용한 min-max연산을 거쳐 나오는 출력을 플랜트가 받아들일 수 있는 양으로 바꾸어서 제어출력을 준다. 이러한 퍼지제어의 기본구조는 Lee⁽⁶⁾가

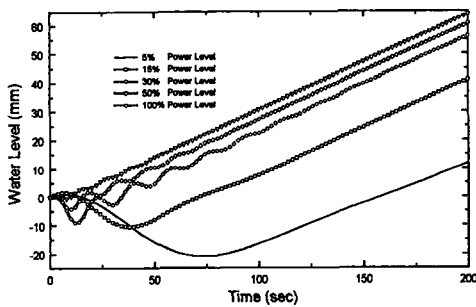


Fig. 2 Level responses of steam generator model to 74 kg/sec step increase of feedwater flowrate

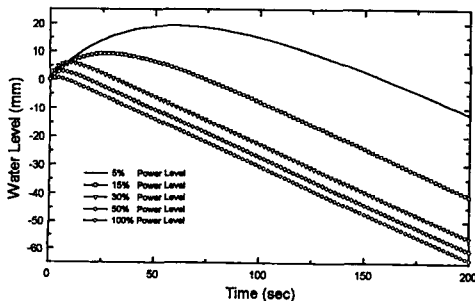


Fig. 3 Level responses of steam generator model to 74 kg/sec step increase of steam flowrate

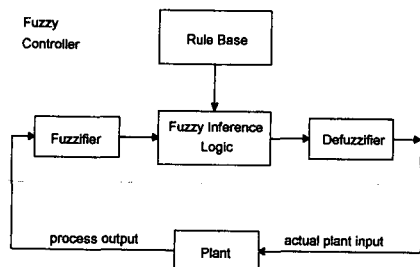


Fig. 4 Basic configuration of fuzzy logic controller

제시한 Fig. 4와 같은 구조를 하고 있다. 일반적인 값(crisp value)을 퍼지값으로 변환하는 것은 소속함수(membership function)를 통하여 이루어 지는데 일반적으로 소속함수나 제어규칙은 운전자나 전문가의 경험에 의해 작성된다. 증기발생기 제어입력 변수로서는 수위오차(level error ; level setpoint-measured level)와 유량오차(flow error ; steam flow-feedwater flow)가 사용되고 제어출력으로는, 실제적으로 밸브의 개폐증분이 되어야 하나 모사기에서 유량에 대한 밸브의 비선형 시간지연 효과를 고려하지 않고 밸브와 유량사이에는 선형관계식으로 근사시켰기 때문에, 유량증분으로 하였다. 현재 원자력발전소에서 저출력($P < 20\%$)에서는 급수유량 측정의 부정확성으로 인하여 유량오차를 쓸 수 없다. 그러나 이것은 다른 정보를 이용하여 유량오차에 등가한 정보⁽⁷⁾를 얻을 수 있다. 여기서는 퍼지제어기와 같은 고등제어 알고리즘의 원자력분야에서 디지털 현장 제어기에의 적용성 파악에 주된 관심이 있기때문에 이러한 유량오차에 대한 값이 저출력에서도 구해진다고 가정하였다. 사용된 퍼지제어 규칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{IF } LE \text{ is } NB \text{ and } FE \text{ is } NB, \\ & \text{THEN } \Delta W \text{ is } NB \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, LE : 수위오차

FE : 유량오차

ΔW : 유량증분

NB : 퍼지변수

수위오차와 유량오차에 대한 소속함수로는 식(3)으로 표현되는 종형(bell-type)으로 하였고 퍼지변수 개수는 Zero(ZO), Positive Big(PB), Negative Big(NB) 3개로 정하였다.

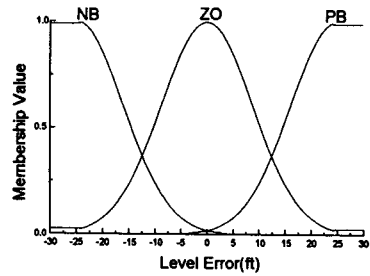
$$\begin{aligned} \mu^x(ZO) &= \exp(-x^2/\sigma^2) \\ \mu^x(NB) &= \exp(-(x/\sigma+2)^2) \\ \mu^x(PB) &= \exp(-(x/\sigma-2)^2) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, μ : 소속함수

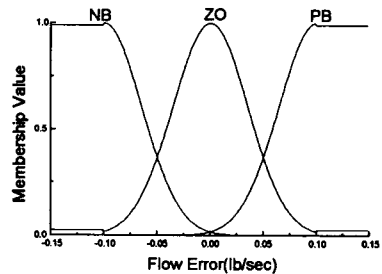
x : 제어입력 변수(LE, FE)

σ : 소속함수의 형태를 특징짓는 계수

σ 는 퍼지제어기 조정(tuning)시 사용되는 계수로 수위오차의 경우 $\sigma_L = 1000$ 이고 유량오차의 경우는 $\sigma_w = 0.5 \times W_{st} \times P_n$ 으로 증기유량과 정규화(normalized)된 출력(P_n)의 함수이다. 제어 입력단(LE와 FE)에 대한 소속함수 형태는 Fig. 5에



(a) For level error (level set point-measured level)



(b) For flow error (steam flow-feed water flow)

Fig. 5 Membership functions

나타나 있다. 제어출력인 유량증분에 대해서는 식(3)의 소속함수(σ 를 σ_{wfd} 로 대체)와 아래와 같은 소속함수 2개를 합쳐 총 다섯개의 퍼지변수로 이루어져 있다.

$$\mu^x(NM) = \exp(-(x/\sigma_{wfd}+1)^2)$$

$$\mu^x(PM) = \exp(-(x/\sigma_{wfd}-1)^2)$$

여기서, $\sigma_{wfd} = 2 \times \sigma_w$ 이다. 제어 규칙단(rule base)에 사용될 제어 규칙(rule)수는 9개로 정하였고 이것은 Table 1에 나타나 있다. 이같이 제어규칙을 9개로 간단히 정한 것은 실제로 발전소 운전자가 증기발생기 수위제어를 할 때에는 많은 제어규칙을 정확히 가지고 하는 것이 아니라 단순히 몇개의 개

Table 1 Rule bases of fuzzy logic controller

FE \ LE	FE	PB	ZO	NB
PB	PB	PM	ZO	
ZO	PM	ZO	NM	
NB	ZO	NM	NB	

FE : Flow error

LE : Level error

넘적인 규칙을 가지고 제어를 수행한다. 이러한 취지에 입각해서 본 연구에서도 제어규칙수를 단순화시켰다. 만약 제어규칙수를 많이 늘린다면 보다 정교한 제어가 가능할 것이다. 그러나 실제로 운전자가 많은 수의 규칙을 표현하기에는 어려워 운전자로부터 규칙을 추출하는 것이 쉽지가 않고 또한 규칙을 세웠다 하더라도 조정(tuning)하는데 많은 시간을 필요로 할 것이다. 제어규칙과 Zadeh의 추론법칙을 통해 나온 결과는 다음과 같은 무게중심법에 의해 비퍼지화(defuzzification)되어 일반제어 출력으로 바뀐다.

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Delta w \cdot \max(\mu(\Delta w)) d(\Delta w)}{\int_{-\infty}^{\infty} \max(\mu(\Delta w)) d(\Delta w)} \quad (4)$$

여기서, w 는 유량을, Δw 는 유량증분을 의미한다. 위의 식(4)은 중형 멤버쉽함수를 사용했으므로 분자의 적분은 쉬우나 분모의 계산은 어렵다. 따라서 윗 식을 계산할 때는 식(5)과 같은 오차가 작고 빠른계산을 할 수 있는 Page⁽⁸⁾에 의한 근사식을 사용하고 있다.

$$\int_{-\infty}^x e^{(-\frac{1}{2}u^2)} du = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} (1 + \tanh(y)) \quad (5)$$

위의 식에서 $y = \sqrt{\frac{2}{\pi}}(x + 0.04482360x^2)$ 이다.

설계된 퍼지제어기를 조정(tuning)할 때는 여러 가지 방법이 있으나, 일반적으로 가장 많이 쓰이는 방법으로는 소속함수의 폭이나 형태를 변형시켜 가면서 제어기 성능을 개선하거나 제어규칙단의 규칙을 변화시켜 가면서 조정을 하는데 여기서는 제어규칙은 변화시키지 않고 단지 소속함수의 폭, 즉 식(3)에서 σ 값들을 일정한 비율로 변화시켜가면서 퍼지제어기의 조정(tuning)을 수행하였다.

3. 웨스팅하우스 분산처리장치

퍼지제어기법의 적용기기로써 웨스팅하우스 분산처리장치를(WDPF; westinghouse distributed processing family)를 선정하였는데, 이것은 본 연구팀이 차세대 원자력발전소에 적용될 디지털 분산 제어 시스템에 관한 연구를 하면서 원자력발전소 제어시스템으로써 갖추어야 할 요건 및 기본구조를 제시⁽²⁾하였는데 이 WDPF가 그러한 요건들을 가장 잘 갖추고 있는 제어기의 하나로 판명되었기 때문에 WDPF 기기들을 이용하였다. Fig. 6은 본 연구팀이 구축한 실험실 수준의 소규모 디지털 분산 제어 시스템으로서 digital control system 부분이 WDPF 기기들이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 WDPF 시스템은 운전자와의 접속부(interface)로써 엔지니어/운전자 스테이션(engineer/operator station), 실제 제어알고리즘을 가지고 제어기능을

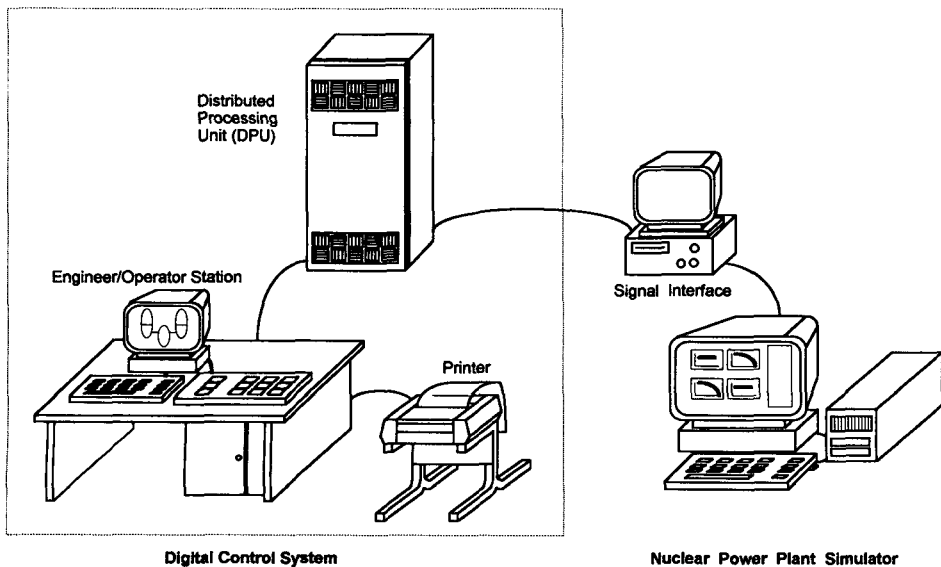


Fig. 6 Schematic diagram of small-scale distributed control system

담당하는 분산처리장치(distributed processing unit; DPU), 필요한 정보를 출력할 수도 있고 경보기능도 수행하는 프린터로 구성되어 있고, 이 기기들은 서로간에 정보를 주고 받을 수 있게 해주는 Westnet II라는 데이터 하이웨이로 연결되어 있다. 이 Westnet II를 통하여 제어장치인 DPU를 최대 254개까지 연결할 수 있으며 최장 40 Km까지 DPU들을 분산시킬 수 있다. DPU는 Westinghouse사에서 제공하는 표준제어 알고리즘들을 담고 있으며 이것으로 거의 모든 공정(process)에 대해서 제어를 수행할 수 있다. 그러나 특수한 목적에 맞게 사용자가 제어 알고리즘을 짜서 DPU에 넣을 수도 있다.

4. 실험절차 및 최적 Sampling Time에 대한 연구

4.1 실험절차

앞장에서 설명한 분산제어기, 즉 DPU에는 Westinghouse사에서 제공하는 다양한 제어 알고리즘이 DPU내부의 PROM에 들어 있다. 그러나 필요에 따라서는 사용자가 제어목적에 맞게 짠 최신 제어기법을 DPU가 수행하도록 PROM상에 첨가시킬 수 있다. 따라서 2장에서 개발한 퍼지제어 알고리즘을 분산제어기에 이식하여 기존의 제어 알고리즘과 성능을 비교해 보기 위하여 Fig. 6과 같은 소규모 분산제어 시스템 실험장치를 구성하였다. Fig. 6의 nuclear power plant simulator부분은 고리 2호기 원자력발전소를 모사한 FISA/2-WS^(9,10)이라고 명명한 한국전력공사 지원하에 한국과학기술원 원자력공학과에서 개발한 모사기이다. 제어목적은 고리 2호기 원자력발전소의 증기발생기 협역수위제어이다. Fig. 6에서 보면 signal interface라

는 PC가 있는데 이것은 모사기에서 나오는 디지털 신호를 WDPF시스템에 맞는 아날로그신호로 변환시켜주고, 또한 WDPF 시스템에서 나오는 제어출력을 scaling해 보내는 변환장치이다. 고리 2호기 원자력발전소는 하나의 원자로와 2개의 냉각수 순환 loop로 이루어져 있고 각 loop당 하나의 증기발생기가 있다. Loop 1의 증기발생기 협역수위는 PI 제어기로 제어를 하고 loop 2의 증기발생기 협역수위는 퍼지제어기로 제어를 하게끔 구성하였다. PI 제어기의 경우 제어 알고리즘은 DPU 상에 내장되어 있어서 새로 작성할 필요가 없었고, 다만 Fig. 7과 같은 현재 실재 고리 2호기 원자력발전소에 쓰이는 형태대로 구성을 하였다. 퍼지제어기를 구축하기 위해서 설계된 퍼지제어 알고리즘을 Pascal 언어로 작성한 다음 이것의 목적(object)화일을 DPU의 PROM에 이식하였다. 분산제어기 DPU에는 4종류의 sampling time(0.01, 0.1, 0.5, 1초)과 3종류의 입력카드로부터의 신호를 갱신하는 신호갱신(signal update) 시간대(0.1, 1초와 null point)가 있다. 본 실험에서는 4.2절에서 기술될 증기 발생기 협역수위제어에 대한 최적 sampling time 연구결과에 따라서 sampling time과 신호갱신 시간을 1초로 정하였다.⁽¹¹⁾

4.2 최적 Sampling Time 연구

디지털 제어기를 구성하는 데에 있어서 sampling time은 디지털 제어기의 안전 및 성능에 중요한 영향을 끼친다. 따라서 원자력발전소 증기발생기의 협역수위제어에 대한 최적 sampling time의 파악은 필요하다. 이를 위하여 증기발생기로는 Irving의 선형 모델을 이용하고 연속시간(continuous time)에서 PI 제어기를 설계한 다음 이산시간(discrete time)으로 변환하여 MATLAB을 이용

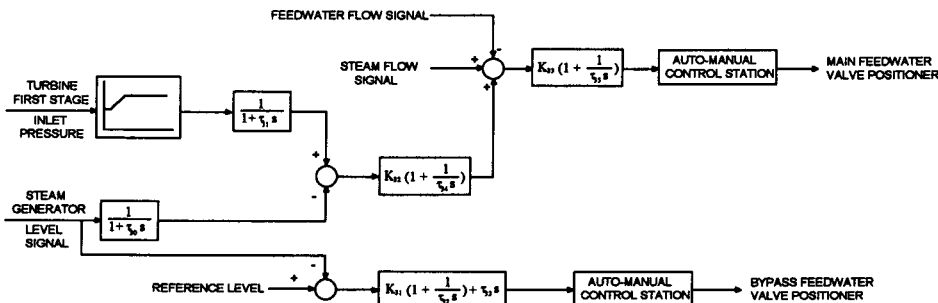


Fig. 7 Functional block diagram of steam generator level control system for kori unit 2

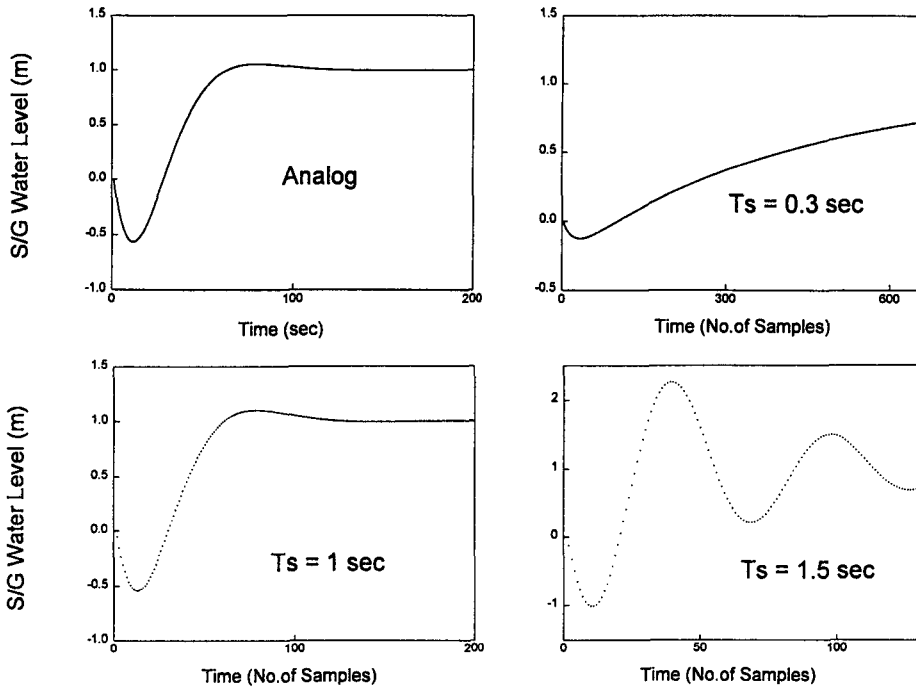


Fig. 8(a) Comparison of the time responses of the digital control system with various sampling periods at 30% power

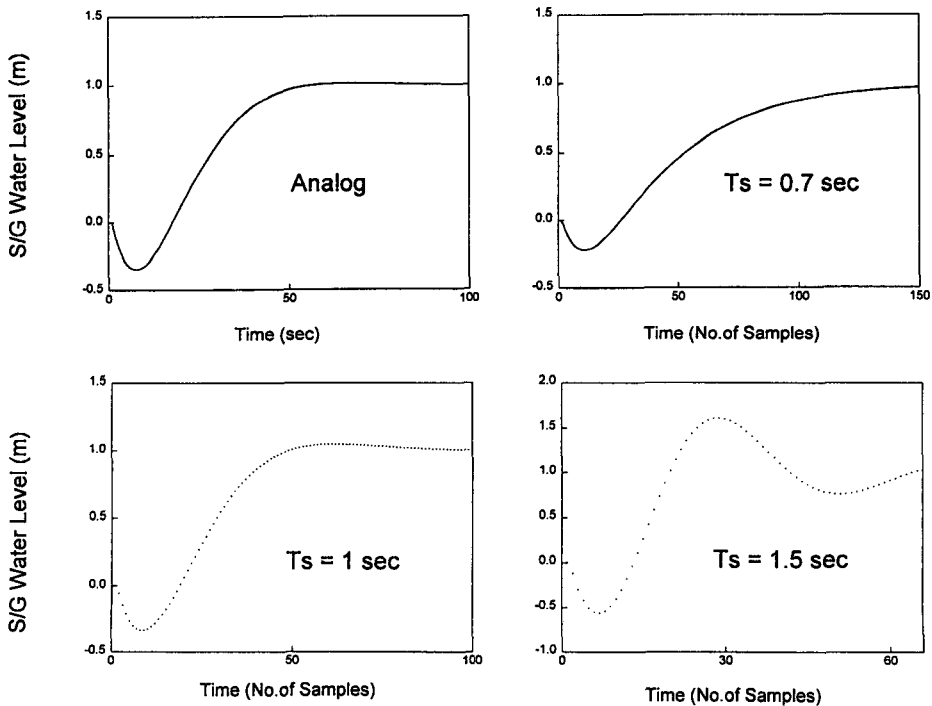


Fig. 8(b) Comparison of the time responses of the digital control system with various sampling periods at 50% power

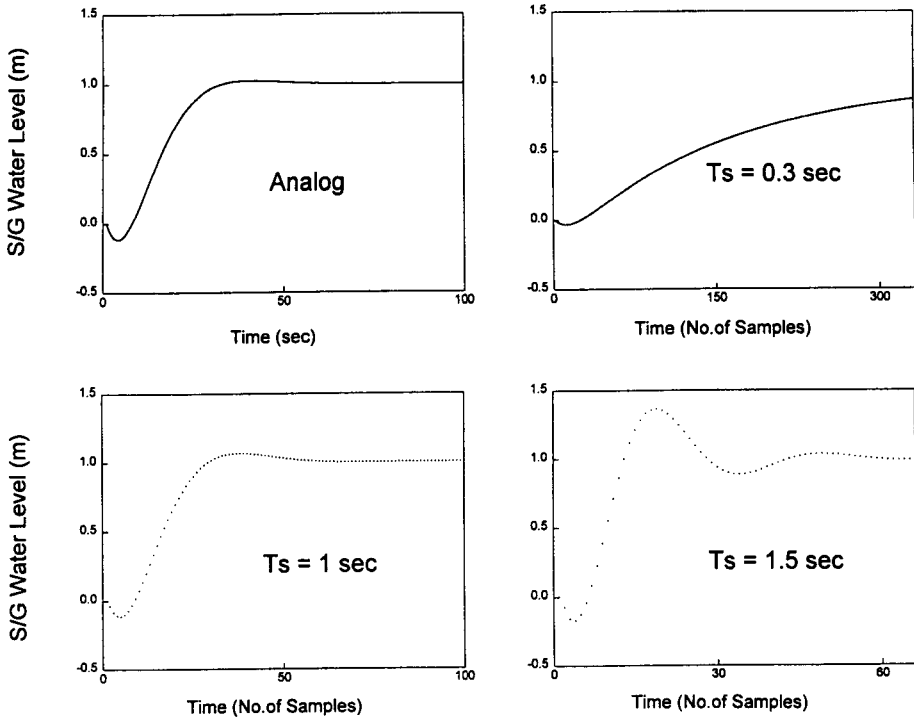


Fig. 8(c) Comparison of the time responses of the digital control system with various sampling periods at 100% power

하여 여러 sampling time에 대하여 제어성능을 분석해 보았다.⁽¹¹⁾ 원자로 정격출력의 30%, 50% 및 100%에서 여러 sampling time에 대한 수위제어 거동은 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8에서 보듯이 sampling time을 1초로 하는 것이 가장 적합한 것으로 판단된다. 그 외 다른 출력에서의 거동도 위의 Fig. 8에 있는 결과와 비슷한 추세를 보여주고 있다.⁽¹¹⁾ 따라서 WDPF 제어기의 sampling time은 1초로 하였고, 신호갱신 주기는 제어기 sampling time과 같이 직접적인 영향이 없기 때문에 sampling time과 같은 1초로 정하였다.

5. 결과 및 토의

이상에서 기술한 실험장치로 PI 제어기와 퍼지 제어기와의 협역수위제어 성능을 비교하였다. Fig. 9는 정격출력의 80%에서 갑자기 출력부하를 10% 계단(step) 상승시켰을 경우 증기발생기 협역수위 제어성능을 보여주고 있다. 증기발생기 수위는 어떤 출력변동이나 외란에서도 협역수위가 항상 50%로 일정하게 유지되어야 한다. Fig. 9를 보면 두

제어기의 성능이 비슷하나 퍼지제어기가 조금 더 나은 성능을 보여주고 있다. Fig. 10은 이때 제어기에서 나오는 제어출력, 즉 유량증분을 보여주고 있다. Fig. 11는 정격출력의 40%에서 출력부하를 10%로 계단상승시켰을 경우 수위거동을 보여준다. Fig. 11에서 시간이 지나면서 수위진동이 있는데 이것은 모사기가 저출력에서 갑자기 출력을 5% 이상 증가시키면 원자로출력이 진동하기 시작하는데 이것에 기인하여 수위에 진동이 발생한다. Fig. 12에서는 40%에서 50%로 정격출력을 상승시킬 때 각 제어기에서 나오는 유량증분을 보여주고 있다. 수위 및 유량증분에 대한 결과를 보면 퍼지제어기가 좀 더 나은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 위의 실험을 수행하면서 모사기에서 발전소를 정지(trip)시키고 다시 가동(start-up)시키는 경우나 그와 비슷한 경우에, 발전소를 가동하기에 PI 제어기의 출력단의 값들을 재조정(reset)시켜야 하는 불편함이 있었다. 이는 PI 제어기의 적분기능에 기인하는 것으로써 만약 PI 제어기의 출력단을 재조정하지 않으면 가동초기 PI 제어기 부분에서 잔여값에 의한 비정상상태를 보이게 될 것이며 이때

MAINSCREEN: 1251 VER: 100 SUBSCREEN: 31 VER: 100 WINDOW: 0 VER: 0
 DATE: 01/22/94 TIME: 13:32:39

22/JAN/94 10 MINUTE TREND 13:32:39
 X1: NRLEVEL1 NARROW RANGE LEVEL OF SG LOOP1 X2:
 Y1: NRLEVEL2 NARROW RANGE LEVEL OF SG LOOP2 Y2:

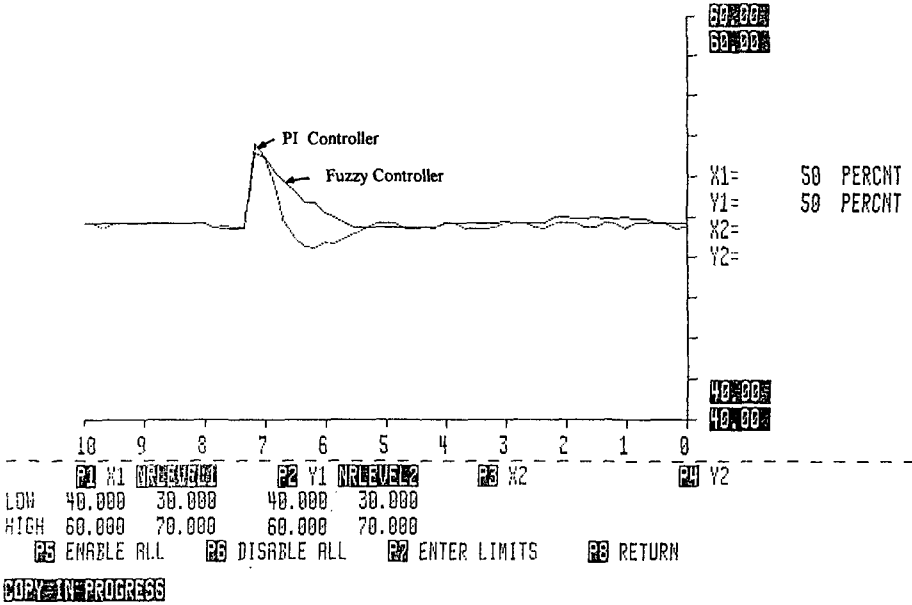


Fig. 9 Performance of level control of steam generator at 80% → 90% step increase of turbine load

MAINSCREEN: 1251 VER: 100 SUBSCREEN: 10 VER: 101 WINDOW: 0 VER: 0
 DATE: 01/22/94 TIME: 13:45:18

22/JAN/94 10 MINUTE TREND 13:45:18
 X1: MFVP1 MAIN FEEDWATER VALVE POSITION1 X2:
 Y1: MFVP2 MAIN FEEDWATER VALVE POSITION2 Y2:

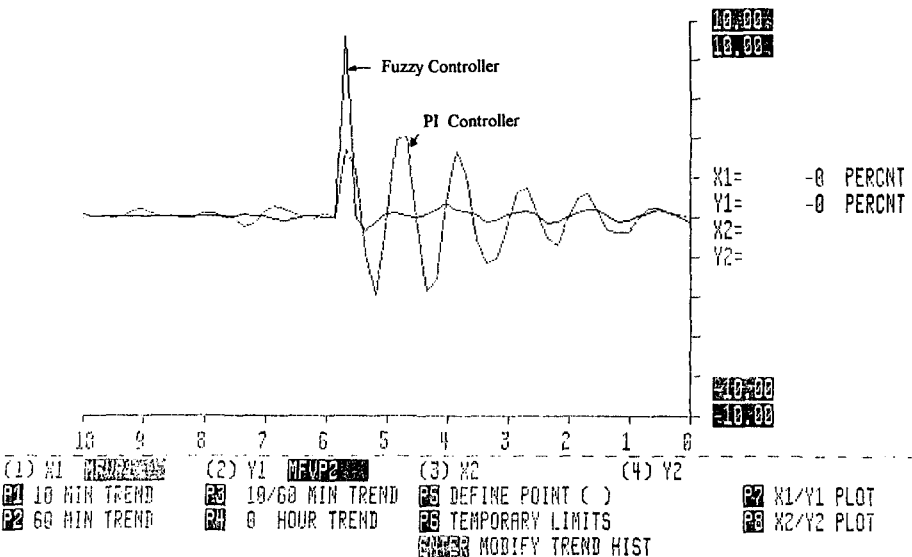


Fig. 10 Behavior of control outputs at 80% → 90% step increase of turbine load

MAINSCREEN: 1251 VER: 100 SUBSCREEN: 31 VER: 100 WINDOW: 0 VER: 0
DATE: 02/15/94 TIME: 22:21:30

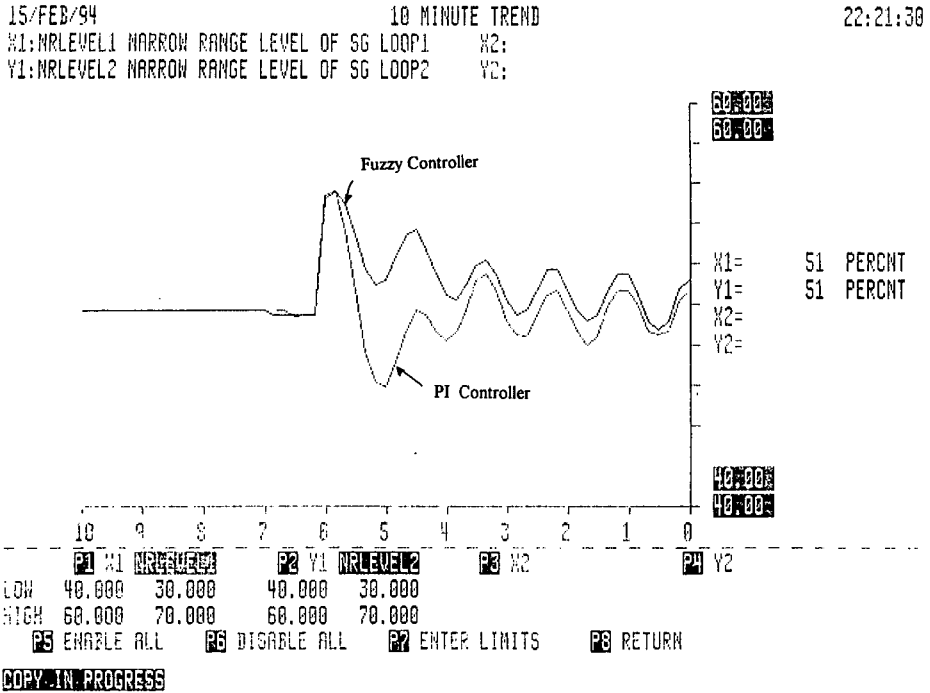


Fig. 11 Performance of level control of steam generator at 40% → 50% step increase of turbine load

MAINSCREEN: 1251 VER: 100 SUBSCREEN: 31 VER: 100 WINDOW: 0 VER: 0
DATE: 02/15/94 TIME: 22:22:36

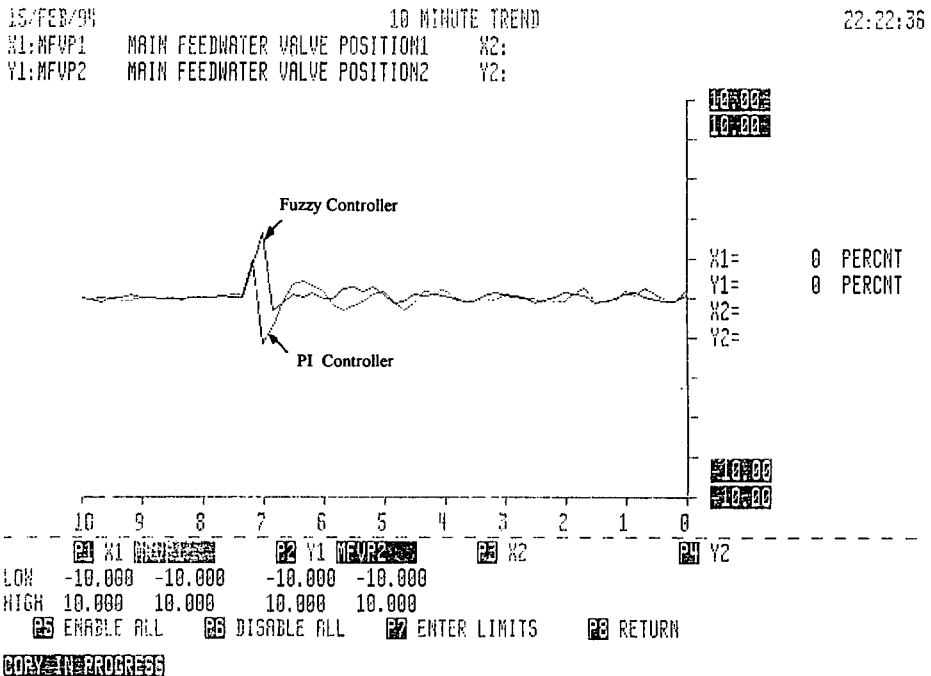


Fig. 12 Behavior of control outputs at 40% → 50% step increase of turbine Load

시스템의 변화시간이 빠른 이상상태가 발생하면 제어불능 현상이 발생할 수도 있다. 그러나 퍼지제어기에서는 그러한 재조정을 해주어야 할 필요가 없었다. 또한 조정(tuning)해야 할 계수가 퍼지제어기는 수위오차와 유량오차 2개이고 PI 제어기는 조정(tuning)계수가 4개이다. 따라서 퍼지제어기의 조정(tuning)시간이 월등히 짧았다. 위의 실험을 바탕으로 보면 조정계수가 적어 개념적으로 명백하고 운전자와 비슷한 제어법칙을 가진 퍼지제어기가 발전소 운전자들이 증기발생기 협력수위제어를 하는데 있어서 훨씬 수월할 것이다.

참고문헌

- (1) KAIF Newsletter, 1992, 原電을 퍼지시스템으로 制御, 한국원자력산업회의, 55호, pp. 1~2.
- (2) CARR 고등제어계측실, 1994, 제2차 신형원자로연구센터 연구발표회 논문집(종합디지털 제어 시스템 개발연구), 신형원자로연구센터, pp. 1~38.
- (3) Irving, E., et al., 1980, "Toward Efficient Full Automation Operation of the PWR Steam Generator with Water Level Adaptive Control," *Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Station*, pp. 309~329.
- (4) Lee, J. Y. and No, H. C., 1990, "Dynamic Scaling Method for Testing the Performance of the Water Level Controller of the Nuclear Steam Generator," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 122, pp. 313~327.
- (5) Zadeh, L. A., 1973 "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No. 1, pp. 28~44.
- (6) Lee, C. C., 1990, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I, II," Vol. 20, No. 2, pp. 404~435.
- (7) Terunuma, S., et al., 1990, "A Simulation Study on the Application of Fuzzy Algorithm to a Feedwater Control System in Nuclear Power Plant," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 28, pp. 319~335.
- (8) Page, E., 1977, "Approximation to the Cumulative Normal Functions and First Inverse for Use on a Pocket Calculator," *Applied Statistics*, Vol. 26, pp. 75~76.
- (9) 1992, 고리2호기 마이크로 시뮬레이터용 소프트웨어 개발, 한국전력공사.
- (10) 1992, 고리2호기 마이크로 시뮬레이터용 소프트웨어 개발 (사용자 지침서), 한국전력공사.
- (11) Huh, W. S., 1994, "A Study on the Optimal Sampling Period of Digital Control System for Steam Generator Level Control," Bachelor's Thesis, Department of Nuclear Engineering, KAIST.