

저 출력시 증기발생기 수위의 자동제어논리 개발

Development of an Automatic Steam Generator Level Control Logic at Low Power

°한 재복*, 정 시채*, 유 준**

* 한국원자력연구소 계측제어실계 (Tel: 868-8190; Fax: 861-1388; E-mail: jbhan@nanum.kaeri.re.kr)
** 충남대학교 전자공학과 교수 (Tel: 821-5669)

Abstracts It is well known that steam generator water level control at low power operation has many difficulties in a PWR (pressurized water reactor) nuclear power plant. The reverse process responses known as shrink and swell effects make it difficult to control the steam generator water level at low power. A new automatic control logic to remove the reverse process responses is proposed in this paper. It is implemented in PLC (programmable logic controller) and evaluated by using test equipment in Korea Atomic Energy Research Institute. The simulation test shows that the performance requirements is met at low power (below 15%). The water level control by new control logic is stabilized within 1% fluctuation from setpoint, while the water level by YGN 3 and 4 control logic is unstable with the periodic fluctuation of 25% magnitude at 5% power.

Keywords Steam Generator, Level Control, Logic, PWR Plant

1. 서 론

원자력발전소의 주급수제어계통은 증기발생기 수위를 일정하게 유지하기 위하여 증기발생기에 급수를 공급하는 역할을 하고 있으며, 일차계통에서 생성된 열을 효과적으로 제거하고 터빈-발전기에 필요한 증기량을 공급하는 계통이다.^[3] 그러나 증기발생기 수위는 유량의 변동에 상반되는 수축 및 팽창효과 등의 특성을 갖고 있어서 자동제어가 어려운 것으로 알려져 있다.^[5] 또한 원자로출력의 약 15% 이하에서는 증기유량 및 급수유량의 높은 측정오차로 인해 이들을 사용할 수 없으므로 수위신호만으로 수동운전되고 있으며, 운전원의 실수로 인한 빈번한 원자로정지가 예상되고 있다.^[6]

본 논문에서는 이러한 요구에 따라 원자로출력의 15%이하에서 증기발생기 수위의 자동제어가 가능한 주급수제어계통의 논리를 제시하고, 검증장비^[4]를 이용하여 이의 실현가능성을 입증하는 연구를 수행하였다.

우선 저 출력시 증기발생기의 열수력학적 특성에 기인한 수축 및 팽창효과에 의한 역방향 제어특성을 제거하기 위하여 영광3,4호기의 1요소 제어방식에 추정된 증기유량과 하향유로(Downcomer) 급수유량을 활용하는 3요소 제어방식의 제어논리를 제시하였다.

제시된 제어논리의 안정성 및 제어능력을 시험하기 위하여 저 출력시 주급수제어계통의 운전환경을 모의실험하여 5~15% 출력구간에서 선정된 설계기준사건에 대한 응답을 얻고 이를 분석하는 방법으로 최적 설정치를 도출하였다. 또한 터빈병합 전·후의 운전모드에서 새로운 제어논리의 성능을 판단하기 위한 시험을 수행함으로써 실제 적용 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

마지막으로 Modicon사의 984-685모델의 PLC(Programmable Logic Controller)로 개발된 제어논리를 구현하고 이를 검증장비를 이용하여 그 성능을 검증함으로써 본 논문에서 제시된 제어논리의 실현 가능성을 입증하는 연구를 수행하였다.

2. 주급수제어계통의 제어논리 개발

2.1 증기발생기 수위제어의 난점

저 출력에서는 상당히 과냉각된 주급수와 튜브에서의 낮은 열속으로 인해 boiling boundary가 윗부분에 상당히 형성된다. 이때 증기유량이 증가하면 증기압이 감소하고, 내부의 bubble은 확장되어 boiling boundary는 아래로 떨어진다. 따라서 튜브다발 지역내의 증기량이 급속히 증가하고 downcomer로부터 튜브내로 들어오는 물의 유입을 방해하므로 수위의 증가가 가속화된다.

또한 급수의 유입이 감소하면 증기발생기내부의 물의 온도는 증가하여 boiling boundary는 증기유량이 증가하는 경우와 같이 아래로 떨어진다. 이 경우도 증기의 부피가 증가하므로 튜브 지역으로 진행되는 물의 유입을 막아 downcomer 내의 수위를 급속히 증가시킨다. 이것을 '팽창'현상이라고 한다.^[5]

한편 증기유량이 증가하면 급수유량을 증가시켜야 하는데 팽창현상에 의해 수위가 증가하므로 수위제어기는 수위를 감소시키기 위해 급수유량을 줄이라는 역신호를 발생시켜 팽창현상을 더욱 가속화시킨다. 바로 이 역동특성 때문에 제어기의 안정성이 떨어진다. 역으로 증기가 감소하거나, 주급수 유량이 증가하면 반대의 현상이 생기게 되는데 이를 '수축'현상이라고 한다.

2.2 영광 3,4호기 주급수제어계통

영광 3,4호기 주급수제어계통은 원자로출력 5%이상에서 자동 제어가 가능하도록 설계되어 있으며 5%이하에서는 운전원의 수동운전에 의해서 증기발생기 수위를 조절하도록 되어 있다.^[4] 한편, 자동제어영역중 원자로출력이 15%이상인 고출력에서는 전체 급수량의 10%를 downcomer밸브가 일정하게 공급하고, 나머지 유량은 economizer밸브로써 조절하게 설계되어 있다. 이때의 수위제어는 증기유량 신호, 급수유량 신호, 및 증기발생기 수위신호의 3요소 제어기법에 의하여 이루어진다. 즉, 증기발생기 수위신호는 전체 증기유량 신호와 급수유량 신호의 차이에 의해 보상되며, 보상된 신호는 다시 수위설정치(level setpoint)와의 차이에 의해 수위오차 신호를 발생시킨다. 비례적분제어기(PI Controller)에서는 수위오차 신호를 입력으로 하여 급수요구 신호가 발생하게 되고, 급수요구 신호에 의해 필요한 만큼의 economizer밸브의 개폐도와 주급수펌프의 회전수가 결정된다.

원자로출력 5~15%의 저 출력시에는 economizer밸브가 완전히 닫히고 downcomer밸브만 사용하여 급수량을 제어한다. 이때의 급수량 제어는 증기발생기 수위신호만에 의한 1요소 제어기법에 의해서 이루어진다. 또한 2.1절에서 설명된 저 출력에서의 수축 및 팽창현상을 보상하기 위하여 원자로출력에 따른 보상신호를 이용한다. 즉, 비례적분제어기의 비례상수 및 적분시정수값을 원자로출력에 따라 변화시키는 제어논리를 채택하고 있다. 그리고 증기발생기 수위설정치는 전 출력구간에서 협역수위계(narrow range)의 44%의 일정한 값으로 설정되어 있다.

2.3 저 출력 운전을 위한 주급수제어계통의 제어논리

저 출력 운전을 위한 제어논리를 도출하는 과정을 설명한다. 새로운 제어논리는 관련 공정변수로부터 계산된 증기유량의 계산값과 downcomer flow transmitter로 얻어진 급수유량을 사용한 3요소 제어 방식으로 개발되었다.

2.3.1 가상 증기유량 산출

발전소운전중 약 15%이하의 저 출력 구간에서는 증기유량 및 급수유량의 측정값을 사용할 수 없다. 그러나 증기유량은 다른 제어계통에서 사용되는 공정변수를 이용하여 증기유량을 계산할 수 있다.

증기는 터빈을 거쳐 복수기로 가는 것과 터빈우회밸브를 통하여 복수기로 가는 두개의 유로로 구성되어 있다.^[1] 터빈으로 가는 증기의 양은 터빈부하지수(Turbine Load Index)와 선형적인 관계를 가지므로 이를 이용하여 계산할 수 있다. 터빈우회밸브를 통과하는 증기의 양은 각 밸브의 용량과 밸브위치로부터 계산할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Steam Flow} = TLI + \sum_{i=1}^n K_i \times (i^{\text{th}} \text{ bypass valve position demand}) \quad (1)$$

이 때, 터빈부하지수 신호와 8개의 bypass valve position demand는 각각 원자로출력조절계통 및 증기우회제어계통으로 얻을 수 있으며, 각 밸브의 용량인 K_i 값은 현장자료로부터 얻을 수 있다. 본 논문에서는 K_i 의 값을 영광 3,4호기의 설계값인 8.0%로 가정하였다.^[2] 한편 bypass valve의 비선형적인 특성에 의해 밸브위치와 밸브를 통과하는 유량과의 관계가 선형적이 아니므로 설계자료를 이용하여 (1)식을 다음과 같이 보정하였다

$$\text{Steam Flow} = TLI + \sum_{i=1}^n K_i \times (\text{fraction of } i^{\text{th}} \text{ bypass valve opening area}) \quad (2)$$

2.3.2 급수유량의 측정

영광 3,4호기의 경우, 급수유량의 측정을 위하여 total feed-water transmitter와 downcomer feedwater transmitter의 두 가지 transmitter를 사용하고 있다.^[3] 이 중 downcomer feedwater transmitter는 주제어반의 downcomer 추이기록기(downcomer trend recorder)의 입력만으로 사용될 뿐 자동제어를 위한 입력으로는 사용하지 않고 있다. 즉, 저 출력 증기발생기 수위의 수동제어를 위한 운전원의 참조정보로만 활용되고 있다.

그러나 현재 급수제어논리의 주요 입력으로 사용되는 total feedwater transmitter의 경우 측정 범위가 3.86×10^6 lb/hr로 MFR(Maximum Feedwater Rate : 3.18×10^6 lb/hr)의 약 12.14% 이하에서는 제어입력으로 사용할 수 없다.^[1] 반면에 downcomer feedwater transmitter의 경우는 측정범위가 1.21×10^6 lb/hr로 MFR의 약 3.13%이상에서 급수유량 측정이 가능하므로 본 논문에서는 15%이하의 저 출력 운전모드에서 downcomer feedwater의 유량율로서 급수유량 신호를 사용하였다.

2.3.3 제어논리 개발

그림 1의 실선은 5% 출력에서의 영광 3,4호기 주급수제어계통의 자동제어의 결과를 보여준다. 수위가 큰 요동을 보이고 있으며, downcomer 밸브의 열림이 0%에서 27%까지 주기적으로 요동함을 볼 수 있다.

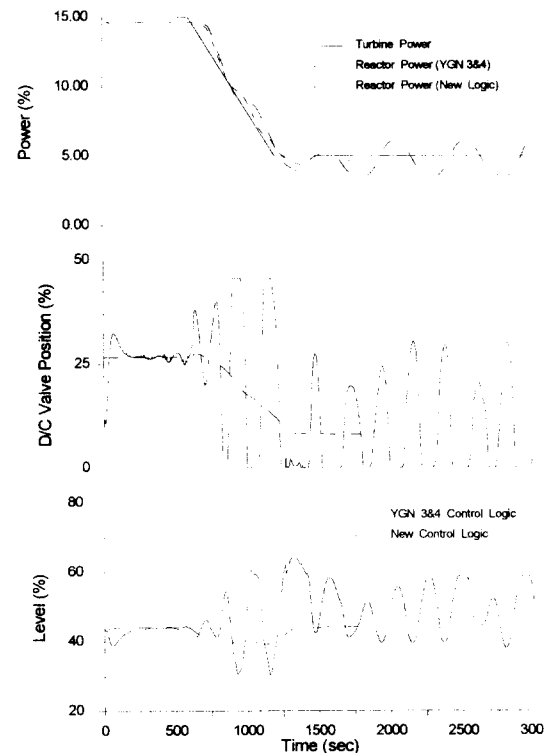


그림 1 터빈출력이 -1%/min율로 15%에서 5%로 감소할 때의 영광 3,4호기대비 주급수제어계통의 성능비교

이것은 수위신호만을 이용한 1요소 제어방식으로는 수축 및 팽창효과에 대해 적절한 제어를 수행할 수 없다는 것을 보여준다. 수축 및 팽창효과에 적절히 대처하기 위해서는 증기유량 및 급수유량 입력신호가 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 2.3.1

절 및 2.3.2절에서의 방법으로 가상 증기유량과 downcomer feedwater의 유량율을 사용함으로써 그림 2와 같은 3요소 방식의 제어논리를 제안하였다.

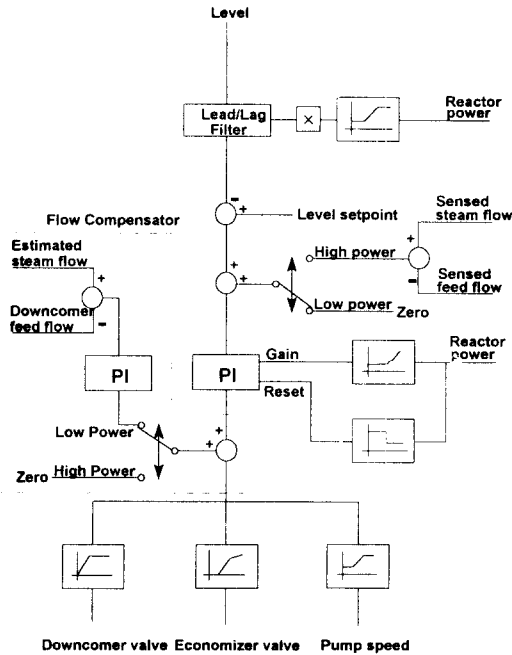


그림 2 저 출력시 자동운전을 위한 제어논리

그림 2의 제어논리는 숙련된 운전원이 증기발생기 수위를 제어하는 방식과 같은 유형의 자동제어 논리이다. 급수온도가 낮을 때 숙련된 운전원은 추정되는 증기유량에 비례하여 적정량의 급수를 공급한다. 이때 증기발생기 수위가 설정치로부터 다소간 차이를 보이더라도 이에 대한 과도한 보상을 자제한다. 수위신호가 과도상태를 멈춘 후, 수위의 증감 상태를 판단하여 급수유량을 조절하는 방법으로 수동제어를 수행하고 있다. 즉, 숙련된 운전원은 수위오차(level setpoint - level)에 대한 보상보다는 유량오차(steam flow - feedwater flow)를 크게 하거나 큰 변동이 요구되지 않도록 운전하고 있다.

그림 2의 경우에는 추가된 증기유량 및 급수유량에 의한 보상 회로가 (그림 2의 flow compensator) 이러한 수동제어방식과 유사한 기능을 한다. 즉 수위신호가 설정치로부터 일정한 차이를 갖더라도 유량오차 신호에 대한 비례적분제어기가 증기유량과 급수유량의 차이를 억제하는 방식으로 작동하여 수위오차 신호에 대한 비례적분제어기의 수위 변동에 대한 역동작용을 감쇄시키는 역할을 수행한다.

3. 모의실험

제어논리의 안정성을 분석하고, 저 출력운전에 최적인 설정치를 찾기 위하여 검증장비를 이용하여 설계기준사고에 대한 모의실험을 실시하였다. 이때 level controller 및 기타 제어함수들의 설정치는 영광 3,4호기의 설정치와 동일한 값을 사용하였다. 최적화된 설정치를 찾아내기 위한 모의실험을 수행하기전에 검증장비의 on-line tuning 기능을 사용하여 터빈출력을 5%로 유지

시키며 flow compensator의 tuning을 실시한 결과 안정된 수위 응답을 갖는 최적설정치를 찾을 수 있었다.

이 때, 찾아낸 gain(비례상수)값의 범위는 0.2~1.0%/%였고, reset(적분상수)값의 범위는 10~80 sec 이었다.

3.1 Flow PI Compensator의 최적설정치

그림 3과 4는 flow compensator의 gain을 변화시켰을 때 각 설계기준사고에 대한 모의실험 결과이다. 이 모의실험은 최적 gain값을 찾아내기 위한 시험으로써 reset값을 40 sec로 설정한 상태에서 여러 gain에 대한 수위응답을 분석하기 위한 것이다.

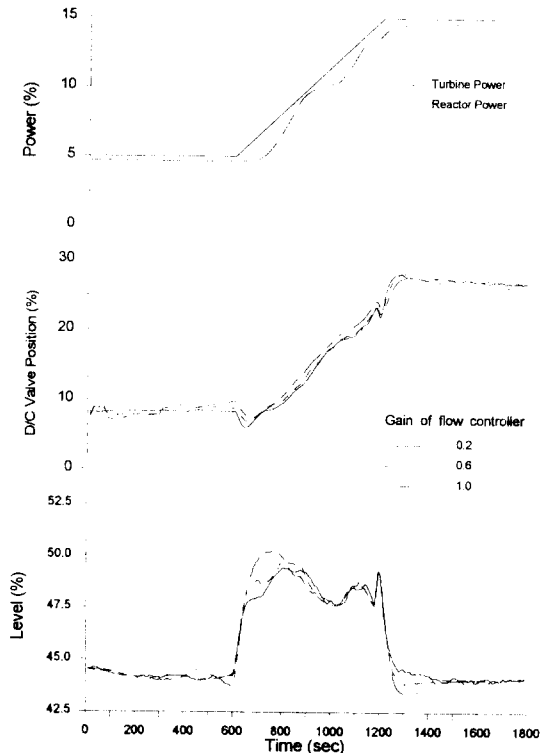


그림 3 터빈출력이 +1%/min율로 5%에서 15%까지 증가할 때 flow compensator의 각 gain에 대한 모의실험 결과

그림 3은 터빈출력이 $\pm 1\%/min$ 으로 변화할 때의 모의실험 결과이다. 본 모의실험에서는 각 gain에 대한 수위의 안정성을 분석하기 위해 사고초기에 600초동안 터빈출력을 5%로 유지하도록 하였다. 그 특성을 살펴보면 gain이 0.8 또는 1.0인 경우를 제외하고 수위가 요동하지 않는 것으로 나타나고 있다. 또한 downcomer밸브의 위치도 gain이 0.6이하에서 밸브의 제어상태가 매우 안정되어 있음을 볼 수 있다. 그러나 gain이 0.4보다 낮은 경우, 수위설정치(44%)로 수렴시간이 매우 길다.

그림 4는 터빈출력이 $\pm 1\%$ step으로 변할 때의 모의실험 결과이다. 이 경우도 앞의 결과와 같이 gain이 0.4 또는 0.6인 때 수위제어가 최적으로 나타났다. 따라서 설계기준사고 발생시 flow compensator의 가장 적절한 gain값은 0.5로 결정할 수 있었다.

또한 flow compensator의 최적의 reset설정치를 찾기 위하여 gain값을 0.5로 고정하고, 여러 reset 값에 대한 제어성능을 분석하였다. 그림 5는 설계기준사고에 대한 모의실험 결과이다. 각 사고에 대한 결과를 분석하면 reset값이 커질수록 수위의 진폭은 감소하였으나, 수위가 불안한 현상을 보이고 있다. 또한 reset값

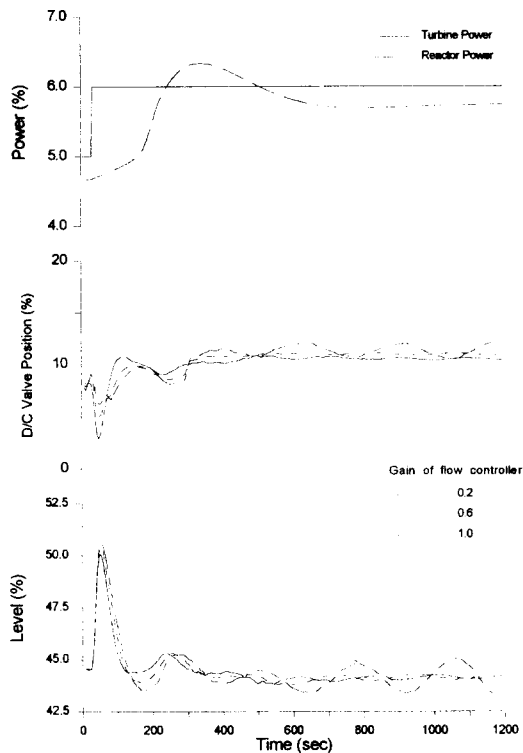


그림 4 터빈출력이 5%에서 6%까지 step으로 증가할 때의 flow compensator의 각 gain에 대한 모의실험 결과

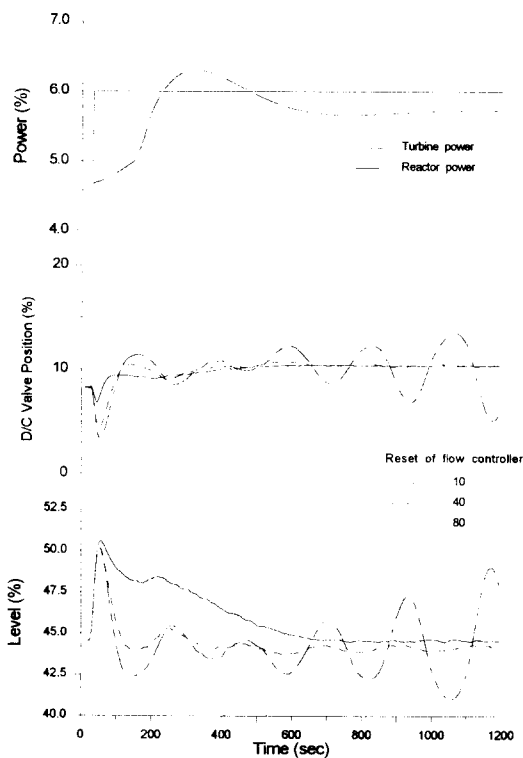


그림 5 터빈출력이 5%에서 6%까지 step으로 증가할 때의 flow compensator의 각 reset값에 대한 모의실험 결과

이 작을수록 수위의 진폭이 크게 나타났으나, 수위가 안정된 현상을 보이고 있다. 각 그림으로부터 수위가 설정치근처로 수렴하는 시간이 짧고, 수위의 요동폭이 가장 안정된 반응을 보이는 최적의 reset값은 40sec로 나타났다.

3.2 영광 3,4호기 주급수제어제통과 성능 비교

그림 1의 실선과 점선은 본 논문에서 제안된 3요소 제어방식과 기존의 영광 3,4호기 제어논리의 성능을 비교하고 있다. 이때, 적용된 설계기준사고는 터빈부하가 15%에서 5%로 -1%/min로 감소하는 사고이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 수위신호만을 제어입력으로 사용하는 1요소 제어방식의 경우, 수위제어기의 역동작용에 의하여 수위의 요동이 가속화되었으며, 사고의 종료 후 5%출력근처에서 수위가 수위설정치로 수렴하지 않고, 약 25%의 큰 요동폭을 보이고 있다.

반면에 본 논문에서 제안된 급수제어기(flow compensator)는 이러한 수위제어기의 역동작용을 보상하도록 하여 downcomer밸브 위치제어를 최적화할 수 있었으며, 그림 1에서 볼 수 있듯이 매우 안정된 수위응답을 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서 새로이 제안된 제어논리의 최적설정치를 찾아내기 위하여 설계과정에서 사용되는 설계기준사고중 주급수제어제통의 저 출력운전과 관련된 4가지를 선정하였다. 설정치들을 변화시키며, 각 설계기준사고에 대한 응답을 분석한 결과, 최적의 자동운전을 위한 설정치를 얻을 수 있었다.

제안된 제어논리의 실현가능성을 확인하기 위하여 Modicon사의 984-685 모델의 PLC로 하드웨어를 제작하였다. 제작된 하드웨어를 검증장비를 이용하여 검증시험을 실시한 결과, 모의실험의 경우와 유사한 결과를 얻었으며, 성공적으로 제작되었음을 확인할 수 있었다.

또한 새로이 제안된 제어논리의 성능을 영광 3,4호기의 주급수 제어제통의 성능과 비교한 결과, 영광 3,4호기의 경우 5%출력에서 증기발생기 수위가 약 25% 크기의 주기적인 요동현상을 나타낸 반면, 새로운 제어논리는 같은 출력에서 수위설정치의 1% 미만의 범위에서 수위를 자동으로 제어하는 결과를 보여 수위제어의 안정성이 매우 향상된 것으로 나타났다.

따라서 본 논문에서 제안된 제어논리를 발전소에 적용시키기 위한 후속연구를 계속 수행할 경우, 발전소 이용률향상 및 운전여유도 증가에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] C. K. Ko, "Design Requirements for Main Steam and Feedwater Systems Instrumentation and Controls for YGN 3&4", ABB-CE, 10487-DR310-I2, Rev.00, 1988.
- [2] H. T. Seo, "LTC Basedeck Calculation for YGN 3&4", ABB-CE, K-FS-C-028, Rev.02, 1990.
- [3] J. H. Yun, "System Description for the Feedwater Control System for YGN 3&4", ABB-CE, 10487-IC-SD332, Rev.01, 1991.
- [4] 정시채, "제어제통의 하드웨어 성능검증을 위한 시험장비 개발", 한국원자력연구소, 선임논문, 1994.
- [5] "증기발생기 수위제어제통 개선", 한국전력, 1988.
- [6] "증기발생기 수위제어 및 보호제통 개선", 한국전력, 1987.