

‘96 추계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

Modular Modeling System(MMS)코드를 이용한 울진 3,4호기  
유출관계통의 과도현상 해석

안장선, 윤석정, 고용상  
한국원자력연구소

요 약

울진 3,4호기 유출관계통의 과도현상을 평가하기 위해서 발전소 과도해석용 코드인 Modular Modeling System(MMS) 코드를 이용하여 수력학적 현상을 모사하고 유출관계통 및 배압제어밸브의 특성, 이들 밸브들의 제어특성 및 밸브들의 운전특성등을 고려하여 분석을 수행하였다. 분석결과 배압제어밸브 제어기 제어변수의 적절한 선정이 계통의 과도현상에 매우 큰 영향을 미치고 있기 때문에 배압제어기 제어변수 선정이 계통의 과도현상 완화에 매우 중요한 인자임을 알 수 있었고, 배압제어밸브의 Stroke 속도변화가 유출관계통의 과도현상에 상당한 영향을 미치고 있음을 알았다. 또한 배압제어밸브의 특성에 따른 유출관계통의 과도현상을 분석한 결과 유출관계통의 운전에 따라 배압제어밸브 특성이 결정됨을 알았다. 결과적으로 유출관계통의 과도상태를 적절하게 제어하기 위해서는 밸브의 특성, 밸브의 Stroke 속도 및 배압제어밸브 제어기 제어변수등의 적절한 선정이 필수적으로 계통설계단계에서 고려되어야 한다고 판단된다.

1.0. 서론

본 연구의 목적은 울진 3,4호기 유출관계통의 과도현상을 평가하기 위해서 발전소 과도해석용 코드인 Modular Modeling System (MMS) 코드를 이용하여 수력학적 현상을 모사하고 밸브의 특성, 밸브제어특성 및 밸브의 운전특성등을 고려하여 계통의 성능 및 운전 등을 분석하고, 이러한 분석을 통해 유출관계통(Letdown Control Valves:CH-110P/Q)와 배압제어밸브(Backpressure Control Valves:CH-201P/Q) 사이 배관내에서 발생이 예상되는 압력진동(Pressure Oscillation), 압력변동에 따른 제어밸브의 운전특 또는 운전주기 그리고 계통의 유량변화등을 예측하여 이러한 과도상태가 유발되는 것을 사전에 방지하는데 있다. 울진 3,4호기 유출관계통은 영광 3,4호기의 유출관계통과 동일하며 그 계통의 성능이 이미 평가되었고, 과도상태시 그 건전성이 입증된 바 있다. 그러나 영광 3호기의 시운전시 유출관계통의 심각한 과도현상이 발생된 바 있으며[참고문헌1], 이 과도현상 원인을 규명하기 위하여 유출관계통의 관련기기 및 계통운전등을 검토한 결과 유출관계통 및 배압제어밸브의 밸브특성 부적절한 선정, 배압제어밸브 제어기 제어변수의 부적절한 선정 그리고 밸브의 Stroke 속도등이 부적절하게 설정되어 유출관계통 과도현상을 유발시킨 것으로 판명되었다. 따라서 영광 3호기와 같은 과도현상을 방지 및 완화시키기 위해서는 유출관계통 제어밸브들의 특성, 제어기 제어변수, 그리고 밸브의 Stroke 속도등이 적절하게 선정되어야 한다. 또한 미국 발전소인 팔로버디 발전소에서도 정상운전시 유출관계통의 배압진동이 매우 크고(250 psi), 빠르게 진행되고 있음이 발견되어 배압제어밸브 제어기의 제어변수(Control Parameter), 배압제어밸브의 특성 및 운전, 그리고 배압제어압력의 설정치등을 면밀하게 분석 검토하여 적절한

배압제어밸브 제어기의 제어변수선정 및 배압제어압력의 설정치등을 변경한 바 있다[참고문헌 2]. 이와같이 국내, 외국 발전소들에서 관찰되었던 유출관계통의 사고 및 과도상태를 미연에 방지하기 위해서는 발전소 과도해석코드인 MMS 전산코드를 이용하여 울진 3,4호기 유출관계통의 수력학적 현상을 적절하게 모사하고, 관련 기기들의 특성을 분석대상으로 선정하여 분석을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 Modular Modeling System 코드는 발전소 운전상황의 변화로 인하여 각 계통내의 압력, 유량, 운동량 및 에너지변동이 유발될 때 계통이 평형상태로 안정되도록 보조 및 제어계통이 작동되는 경우와 같은 과도현상 분석을 보다 효율적으로 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 발전소 전 계통을 모사하여 각 계통의 성능평가를 적절히 수행할 수 있는 코드로써 발전소 계통설계, 운전과도 현상분석, 운전상 문제점파악, 그리고 운전절차평가 및 개선 등에 적용이 가능한 코드이다. 또한 본 코드에서 계통의 동적거동을 모사하기 위해 사용된 방정식들은 질량보존방정식, 에너지보존방정식 그리고 선형운동량 보존방정식등이다.

2.0. 울진 3,4호기 유출관계통

그림 1에 나타낸 바와 같이, 발전소 정상운전시 유출유량 75 gpm, 온도 565 °F 그리고 압력 2250 psig인 원자로냉각재는 원자로냉각재계통 저온관에서 유출되어 재생열교환기의 관부분(Regenerative Heat Exchanger Tube Section)을 지나면서 원자로냉각재 계통으로 주입되는 충전수(Charging Flow)에 의하여 냉각된 후 유출수는 2개의 유출관계통(정상운전시 1개 운전, 발전소가열, 냉각 및 비정상운전시 2개 운전)을 통과하면서 최소 30 gpm에서 최대 135 gpm까지 유지되며, 유출수 압력은 이들

유출관제어밸브를 통과하면서 약 500 psig까지 일차로 감압되고, 유출수 유량 또한 이 밸브에 의해서 조절된다. 또한 유출관제어밸브는 정상운전 자동모드운전시 가압기 수위제어계통으로부터 제어신호를 받아 유출유량을 제어하는데, 이때 가압기수위제어계통은 지시된(Indicated) 가압기수위와 미리정해진(Predetermined) 수위 설정치와 비교해서 유출관제어밸브의 개도를 결정하고 결정된 개도에 의해서 유출유량이 제어된다. 이들 유출관제어밸브는 Pneumatic Diaphragm 글로브밸브로써 밸브특성은 선형특성(Linear Characteristic)을 갖고 있으며, 밸브의 Stroke 속도는 5초 이내에서 제어가 가능하도록 설계되어 있다. 유출관제어밸브를 통과한 유출수는 유출관열교환기를 통과하면서 기기냉각수에 의하여 120 °F (48.9 °C)까지 냉각되고, 유출수 압력은 배압제어밸브 전단에 설치된 배압제어기(PI Controller : PI-201)에 의하여 제어되고 배압제어밸브를 통과하면서 후단 계통들에 적절한 압력으로 감압된다. 또한 배압제어밸브는 기존호기와 동일한 Pneumatic Diaphragm 글로브밸브로써 밸브특성은 Equal Percentage 특성을 갖도록 설계되어 있으며, 밸브의 Stroke 속도는 5초이다. 여기서 배압제어밸브의 역할은 유출관 열교환기의 기기냉각수 상실시 유출관 열교환기내에 비등이 발생하지 않고, 유출관제어밸브내에서 Flashing 발생으로 인해 계통내에 증기가 발생하지 않도록 적절하게 계통의 압력을 제어하는 역할을 수행한다.

### 3.0. 분석방법

본 분석에서는 발전소계통과도해석 코드인 MMS 코드를 이용하여 울진 3,4호기의 유출관계통의 과도현상등을 분석하고, 유출관제어밸브와 배압제어밸브 사이 배관내에서 압력진동(Pressure Oscillation), 압력변동에 따른 제어밸브의 운전폭 또는 운전주기 그리고 계통의 유량변화등을 평가하여 유출관계통에서 발생이 예상되는 여러가지 과도상태를 사전에 예측하여 그 방지책을 구축하고자 한다. 따라서 울진 3,4호기 유출관계통에 설치된 각종 기기들의 수력학적 현상을 모사하고 각종 기기들의 운전특성, 배압제어기의 제어설정치등을 선정하기 위해서 다음과 같이 세가지 경우로 분류하여 분석을 수행하였다.

- 1). 배압제어밸브 제어기 제어변수의 설정치 변화에 의한 과도현상평가
- 2). 유출관제어밸브 및 배압제어밸브의 Stroke 속도변화에 따른 과도현상평가
- 3). 배압제어밸브의 특성 변화에 따른 과도현상평가

본 분석에 의해서 평가된 분석결과는 유출관계통 시운전 및 운전시에 참고자료로 사용가능할 것으로 판단된다. 다만 여기서 모사된 배압제어밸브 및 유출관제어밸브의 동적거동은 밸브의 Stiction Effect를 고려하지 않은 이상적인 경우를 선정한 경우이다.

#### 3.1. 유출관계통 모델

유출관계통의 모델을 간략화하기 위해서 그림 1에 나타난 바와 같이 재생열교환기 후단부터 배압제어밸브 후단까지만 본 분석의 모델 대상으로 선정하였다. 즉 재생열교환기

후단의 배관을 입구 경계조건 그리고 배압 제어밸브 후단의 배관을 출구 경계조건으로 정하였다. 모델에 포함된 기기는 2개의 유출관제어밸브, 유출관열교환기, 배압제어밸브의 배압제어기(PI Controller), 배압제어밸브의 설정치, 배압제어밸브, 각종밸브의 구동자, 배관등이다. 또한 유출관열교환기의 기기냉각수배관과 입구 및 출구 경계조건도 모사되었다.

### 4.0. 분석 및 결과

#### 4.1. 배압제어밸브 제어기 제어변수의 설정치 변화에 의한 과도현상평가

배압제어밸브 제어기 제어변수의 설정치가 유출계통 운전에 미치는 영향을 면밀하게 분석하기 위해서 배압제어기 제어변수의 설정치 변화에 따른 배압제어밸브의 개도(Position)변화, 유출관 유량변화 및 배압제어밸브의 전단압력등이 시간에 따라 어떻게 나타나는지를 분석하였다. 여기서 배압제어밸브 제어기는 비례변수 및 적분계수등이 적절하게 설정될 경우 배압제어밸브의 전단압력을 460 psig로 유지하기 위해서 전단압력을 입력받아 배압제어밸브의 개도를 결정하고 결정된 개도를 출력으로 내보내 배압제어밸브를 운전하는 역할을 수행한다. 그림 2는 배압제어기 제어변수의 설정치중 비례계수(Proportional Gain)가 0.25 이고, 적분계수(Integral Gain)는 0.005인 경우 시간에 따른 배압제어밸브의 개도, 유출관계통의 유량, 유출관제어밸브의 개도 그리고 배압제어 밸브의 전단압력을 나타낸 그림이다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 배압제어밸브의 개도는 약 20초까지는 약간의 진폭으로 왕복주기운동을 하다가 그 이후 시간부터는 일정한 개도를 유지하고 있으며, 계통유량도 배압제어밸브의 개도에 따라 상당한 변화를 거듭하다 일정한 유량을 유지하고있다. 이는 배압제어기 제어변수의 설정치가 적절하게 선정되어 계통의 과도상태를 안정하게 유지시키기 때문이다. 그림 3은 제어기의 적분계수는 0.005로 고정하고 비례계수만 0.025로 변화시켰을때의 동적거동을 나타낸 그림이다. 초기시간에 배압제어밸브의 개도에 따라 계통유량이 상당히 불안정상태로 흐르고, 배압제어밸브의 전단압력도 460 psig를 중심으로 진동폭 약 15 psi 정도로 진동하고 있음을 볼 수 있다. 이는 배압제어기의 비례계수가 적절하게 선정되지 않아 배압제어기가 제대로 계통의 과도상태를 제어하지 못하여 이러한 과도현상을 유발시키고 있는 것으로 판단된다. 그림 4는 배압제어기 제어변수의 설정치중 비례계수가 0.25이고, 적분계수는 0.15인 경우에 대한 과도현상을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 배압제어밸브의 전단압력이 460 psig를 중심으로 약 진폭 3 psi정도로 미세하게 진동하고 있고, 배압제어밸브의 개도는 배압제어밸브의 전단압력에 의해서 시간 40초까지 밸브개도 40%를 기점으로 개폐를 반복하면서 서서히 그 진폭이 줄어들고 있으나, 그 이후에는 밸브개도 38%를 일정하게 유지하고 있다. 또한 유출관계통의 유량도 약 40초까지는 배압제어밸브의 개도에 의해서 변화를 반복하다가, 그 시간 이후에는 적절하게 배압제어기에 의해서 제어되고 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 상기 분석 결과로 볼때 배압제어기의 제어변수의 선정이 유출관계통의 과도현상에 매우 민감하게 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있으며, 계통의

과도현상을 적절하게 잘 제어하기 위해서는 배압제어기의 비례계수, 적분계수등을 적절하게 선정하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

#### 4.2. 유출관제어밸브 및 배압제어밸브의 Stroke 속도변화에 따른 과도현상평가

유출관제어밸브 및 배압제어밸브의 Stroke 속도변화에 따른 유출관계통의 과도현상을 평가하기위해서 유출관제어밸브는 개도 0%에서 매우느린속도(80초)로 개도 40%까지 개방할 경우와 상당히 빠른 속도(10초)로 개방할 경우로 구분하여 분석을 수행하였다. 또한 이 조건에서 유출관계통의 과도현상을 분석하기 위해서 배압제어밸브는 닫혀있다가 밸브 Stroke속도 1초, 5초, 10초만에 개방할 경우를 선정하여 분석을 수행하였다. 이 경우 유출관제어밸브 밸브특성은 선형특성, 배압제어밸브의 밸브특성은 Equal Percentage이며, 배압제어밸브의 배압제어기 제어변수중 비례계수 및 적분계수는 각각 0.25, 0.005 이다. 그림 5, 6 및 7은 유출관제어밸브가 매우느린 속도(80초)로 밸브개도 0%에서 40%로 개방되고 배압제어밸브의 Stroke 속도가 각각 1초, 5초 및 10초로 변화시켰을 때의 유출관제어밸브 개도, 배압제어밸브 개도, 유출관계통의 유량, 그리고 배압제어밸브 전단압력을 나타낸 그림인데, 그림에서 볼 수 있듯이 배압제어밸브의 Stroke 속도변화에 따라 유출관계통의 과도현상에 미치는 영향이 상당히 존재하고 있음을 알수있다. 즉 배압제어밸브의 Stroke속도가 적절하게 선정되지 않을 경우 심각한 계통의 과도현상을 초래 할 수 있으며, 특히 밸브의 Stroke 속도가 10초 이상일 경우 배압제어밸브의 전단압력이 상당히 높게 나타나며 이에 따라 밸브 개도도 심하게 요동하고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 유출관제어밸브가 매우 빠른 속도(10초)로 밸브개도 0%에서 40%로 개방되고, 배압제어밸브의 Stroke 속도는 5초일 경우를 분석한 그림 인데, 그림 6과 비교해 볼 때 배압제어밸브의 전단압력이 약 5 psi정도 증가하여 배압제어밸브의 개도가 순간적으로 약 12%정도 더 열리다가 닫히는 현상이 발생하고 유출유량은 유출관제어밸브 Stroke속도가 매우 느린 경우보다 약간 증가하지만 급격하게 증.감을 반복하다가 안정되는 과도현상을 유발하고 있다. 이는 유출관제어밸브가 순간적으로 빠르게 개방되어 이 때 발생하는 과도상황을 배압제어밸브가 제대로 제어하지 못하기 때문에 발생하는 상황이라고 판단된다. 따라서 상기 분석을 통해서 볼 때 유출관제어밸브의 운전은 매우 서서히 운전되어야 되고, 적어도 배압제어밸브의 Stroke 속도는 5초이내로 설정하는 것이 유출관 계통의 과도현상초래 방지 및 완화에 매우 중요하다고 판단된다.

#### 4.3. 배압제어밸브의 특성 변화에 따른 과도현상평가

배압제어밸브의 특성 변화에 따른 계통의 과도현상에 대한 영향을 평가하기 위해서 배압제어밸브의 밸브특성을 선형특성과 Equal Percentage 특성인 경우를 고려하여 유출관계통의 과도현상을 분석하였다. 그림 9는 배압제어밸브의 밸브특성이 선형인 경우만 그림 6과 다르게 다른 모든 조건이 동일한 경우이다. 그림 6과 그림 9의 분석결과를 비교해볼 때 배압제어밸브 전단압력의

첨두압력(Peak Pressure)은 선형인 경우가 약간 낮으나, 배압제어밸브 전단압력이 일정하게 유지하는데 걸리는 시간은 좀더 길고, 그리고 배압제어밸브의 전단압력에 따라 배압제어밸브의 개도 및 유량변화 상승폭은 약간 작지만 하강폭은 더 크고 느리게 변화하며, 약 22초 근처에서 전단압력이 회복되면서 갑자기 밸브 개도 및 유량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 유출관제어밸브의 운전이 매우 느리고 배압제어밸브의 특성이 선형인 경우 나타나는 현상으로 판단된다. 그림 10은 그림 8과 다른 조건은 모두 동일하고 단지 배압제어밸브의 특성이 선형인 경우이다. 그림 8과 10을 비교해 볼 때 오히려 밸브특성이 선형인 경우가 Equal Percentage특성인 경우에 비해 안정적인을 알 수 있다. 이는 유출관제어밸브 운전이 매우 빠르게 운전될 경우에는 배압제어밸브의 밸브 특성이 선형인 경우가 계통운전 특성상 적절하기 때문이다. 결과적으로 유출관제어밸브의 운전을 빠르게 할 경우는 배압제어밸브의 특성이 선형인 경우가 유출관 과도현상 완화 측면에서 유리하나 유출관제어밸브의 운전을 매우 느리게 할 경우는 배압제어밸브의 특성이 Equal Percentage인 경우가 유출관 과도현상 완화 측면에서 유리하다고 판단된다.

#### 5.0. 결론

MMS 코드를 이용하여 올진 3,4호기 유출관계통의 과도현상을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배압제어기 제어변수의 계수변화에 따른 계통의 과도현상을 분석해 본 결과 배압제어기의 제어변수가 계통의 과도현상에 매우 큰 영향을 미치고 있어 배압제어기 제어변수 선정이 계통의 과도현상 완화에 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다.
- 2) 유출관제어밸브 및 배압제어밸브의 Stroke 속도변화에 따른 계통의 과도현상을 분석해 본 결과 유출관제어밸브의 운전은 매우 서서히 운전되어야 되고, 적어도 배압제어밸브의 Stroke 속도는 5초이내로 설정하는 것이 유출관 계통의 과도현상 완화에 매우 중요하다고 것을 알았다.
- 3) 배압제어밸브의 밸브특성 변화에 따른 유출관계통의 과도현상을 분석해 본 결과 유출관제어밸브의 운전을 빠르게 할 경우는 배압제어밸브의 특성이 선형인 경우가 유출관 과도현상 완화 측면에서 유리하고, 유출관제어밸브의 운전을 매우 느리게 할 경우는 배압제어밸브의 특성이 Equal Percentage인 경우가 유출관 과도현상 완화 측면에서 유리함을 알 수 있다.

#### 6.0. 참고문헌

- 1) ABB-CE, "Final Report for Resolution of the Problems Related to the Letdown System for YGN 3&4", 1994.
- 2) Terry C. Price, "Modeling of the Palo Verde Letdown System", ANS Winter Meeting, Oct. 31, 1995

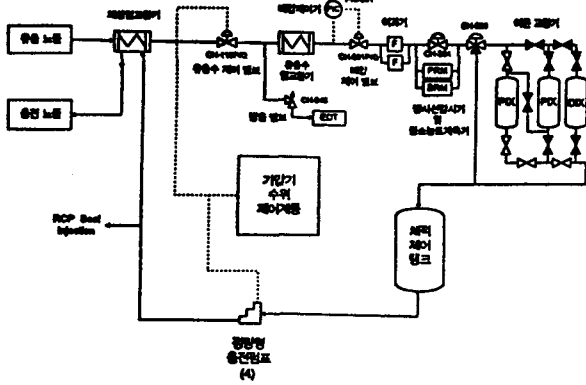


그림 1 울진 3, 4호기 유출관 계통의 개략도

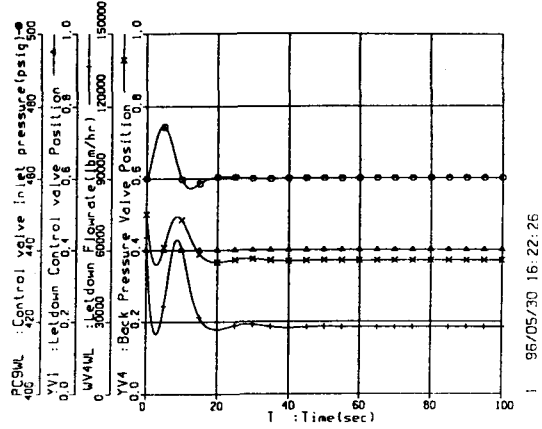


그림 3 배압제어기 제어변수(PG=0.025, IG=0.005)에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화.

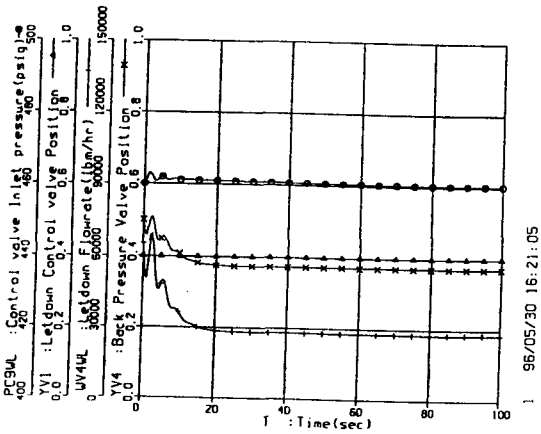


그림 2 배압제어기 제어변수(PG=0.25, IG=0.005)에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화.

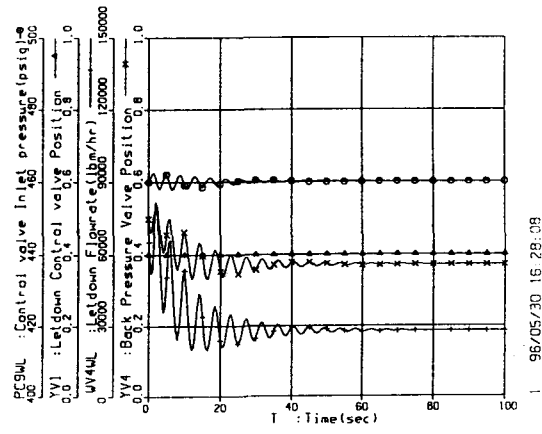


그림 4 배압제어기 제어변수(PG=0.25, IG=0.05)에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화.

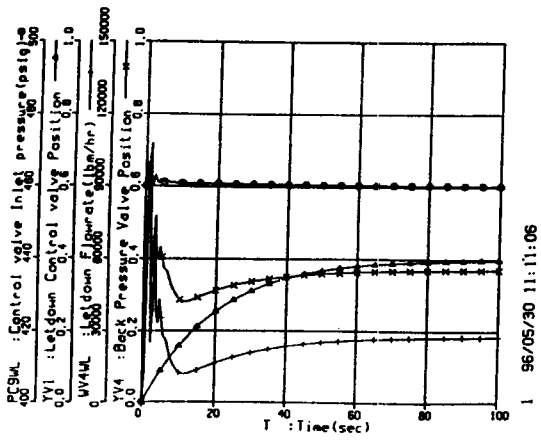


그림 5 배압제어밸브 Stroke 속도가 1초인 경우에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화 (CH-110P/Q밸브 특성은 Linear, CH-201P/Q밸브 특성은 Equal Percentage, CH-110P/Q 밸브는 80초만에 0-40%로 개방)

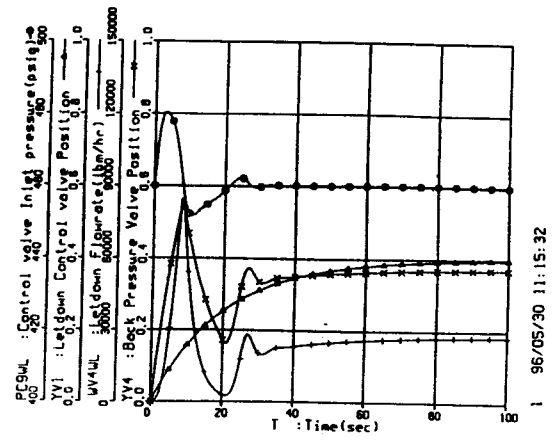


그림 7 배압제어밸브 Stroke 속도가 10초인 경우에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화 (CH-110P/Q밸브 특성은 Linear, CH-201P/Q밸브 특성은 Equal Percentage, CH-110P/Q는 80초만에 0-40%로 개방)

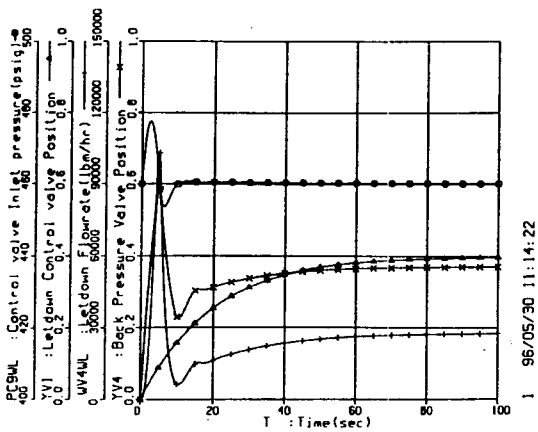


그림 6 배압제어밸브 Stroke 속도가 5초인 경우에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화 (CH-110P/Q밸브 특성은 Linear, CH-201P/Q밸브 특성은 Equal Percentage, CH-110P/Q는 80초만에 0-40%로 개방)

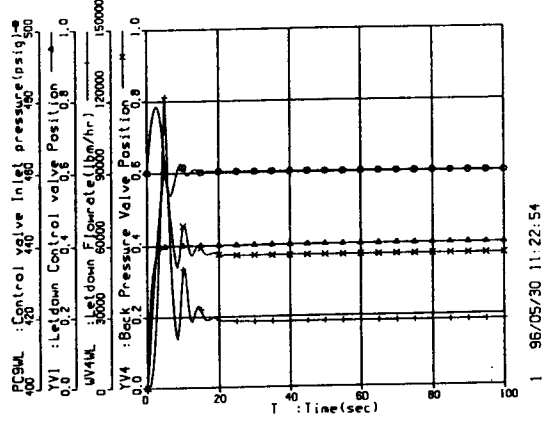


그림 8 배압제어밸브 Stroke 속도가 5초인 경우에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화 (CH-110P/Q밸브 특성은 Linear, CH-201P/Q밸브 특성은 Equal Percentage, CH-110P/Q는 10초만에 0-40%로 개방)

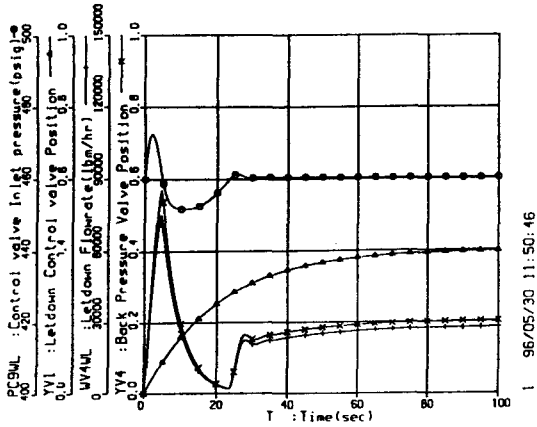


그림 9 배압제어밸브 Stroke 속도가 5초인 경우에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화 (CH-110P/Q밸브 특성은 Linear, CH-201P/Q밸브 특성은 Linear, CH-110P/Q는 80초만에 0-40%로 개방)

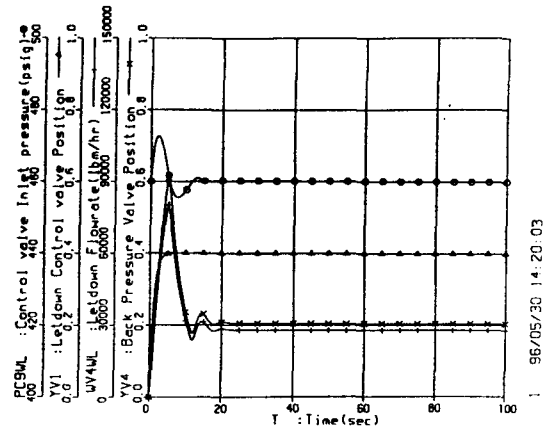


그림 10 배압제어밸브 Stroke 속도가 5초인 경우에 대한 밸브개도, 유량 및 배압제어밸브 전단압력변화 (CH-110P/Q밸브 특성은 Linear, CH-201P/Q밸브 특성은 Linear, CH-110P/Q는 10초만에 0-40%로 개방)