

MMS-RTC코드를 이용한 영광 5,6호기 유출계통의 과도현상 해석

박종섭, 고용상, 정장규, 김은기, 노태선

한국전력기술(주) 원자로설계개발단
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

영광 5,6호기 유출계통의 과도현상을 평가하기 위해서 Electric Power Research Institute (EPRI)에서 개발한 발전소 과도해석용 코드인 Modular Modeling System-Real Time Capable (MMS-RTC) 코드를 이용하여 유출계통의 모델을 구성하였다. 구성된 모델을 이용하여 수력학적 현상을 모사하고 배압제어밸브 제어기의 제어변수 및 유출 오리피스 차단밸브의 Stroke Time 등의 운전특성을 고려하여 수력학적 현상을 분석하였다. 분석결과 배압제어밸브 제어기 제어변수의 적절한 선정이 계통의 과도현상 완화에 매우 중요한 인자임을 알 수 있었고, 유출 오리피스차단밸브의 Stroke Time의 변화가 유출계통의 과도현상에 상당한 영향을 미치고 있음을 알았다. 결과적으로 유출계통의 과도상태를 적절하게 제어하기 위해서는 밸브의 특성, 밸브의 Stroke Time 및 배압제어밸브 제어기 제어변수들이 적절히 선정하여야 한다고 판단된다.

1.0. 서론

영광 3호기 고온기능시험 중 유출계통에서 과도현상이 발생하였다. 이 과도현상의 원인은 계통의 유량제어 밸브, 방출밸브, 배압제어밸브 등이 부적절하게 선정되었고 배압조절이 잘 이루어지지 않아 발생한 방출밸브 개방시 급격한 압력변동으로 밝혀졌다.

영광 5,6호기 설계에서는 계통의 신뢰성 및 운전성을 개선하기 위하여 선행호기 유출계통의 유량조절기능을 담당했던 제어밸브 대신에 재생열교환기 후단에 세 개의 유로로 분기되는 배관을 설치하였고, 각 배관에는 감압용 오리피스, 오리피스 격리밸브 및 유량보정용 오리피스 설치되어 유출수 유량 및 압력을 조절한다. 그러나 유출수의 유량조절을 위해 오리피스 격리밸브의 개방이나 폐쇄시 갑작스러운 유량의 변화는 배관이나 기기에 심각한 과도상태를 초래할 수 있다. 따라서 설계변경에 따른 계통에서의 과도상태를 예측하고 과도상태를 완화하는 대책을 강구하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 영광 5,6호기 유출계통의 과도현상을 평가하기 위해서 EPRI에서 개발한 발전소 과도해석용 코드인 MMS-RTC 코드를 이용하여 유출계통 모델구성 및 수력학적 현상을 모사하고 밸브의 특성, 밸브제어특성 및 밸브의 운전특성등을 고려하여 계통의 성능 및 운전 등을 분석하고자 한다. 또한 이러한 분석을 통해 유출 오리피스차단밸브(CH-110X/Y/Z)와 배압제어밸브(CH-201P/Q) 사이 배관 내에서 발생이 예상되는 압력진동, 압력변동에 따른 제어밸브의 운전폭 또는 운전주기 그리고 계통의 유량변화 등을 예측하여 이러한 과도상태가 유발되는 것을 사전에 방지하고자 한다.

본 연구에서 사용한 MMS-RTC 코드는 과도현상을 실시간으로 모사할 수 있는 코드로서 발전소 계통설계, 운전과도현상분석, 운전상 문제점파악, 그리고 운전절차평가 및 개선 등에 적용이 가능한 코드이다. 또한 본 코드에서 계통의 동적거동을 모사하기 위해 사용된 방정식들은 질량보존방정식, 에너지 보존방정식, 선형운동량 보존방정식 등이다.

2.0. 영광 5,6호기 유출계통

그림 1에 나타낸 바와 같이 발전소 정상운전시 원자로냉각재는 원자로냉각재계통 저온판에서 유출되어 재생열교환기의 관부분을 지나면서 원자로냉각재 계통으로 주입되는 충전유량에 의하여 냉각된다. 유출수는 3개의 오리피스 및 오리피스차단밸브 (CH-110X, CH-110Y, CH-110Z)를 통과하면서 약 500 psig까지 일차로 감압된다. 유출계통은 정상운전시 CH-110X 및 CH-110Y를 통한 유로를 형성하며, 자동모드 운전시 가압기 수위제어 계통으로부터 제어신호를 받는 오리피스차단밸브의 개폐에 의하여 유출유량을 제어한다. 이때 가압기 수위제어계통은 지시된 가압기수위와 수위 설정치를 비교해서 유출 오리피스 차단밸브들의 개폐를 결정하고, 개폐된 밸브에 의해서 유출유량이 결정된다. 유출유량은 사용되는 오리피스의 조합에 따라 30, 75, 135 gpm으로 유지된다. 유출 오리피스차단밸브를 통과한 유출수는 유출 열교환기를 통과하면서 기기냉각수에 의하여 120 °F (48.9 °C)까지 냉각된다. 배압제어밸브 전단에 설치된 배압제어기(PI-201)에 의하여 밸브 전단의 압력은 474.7 psia (33.4 Kg/cm²)로 제어되고 배압제어밸브를 통과하면서 적절한 압력으로 감압된다. 여기서 배압제어밸브는 유출 오리피스 및 오리피스차단밸브 내에서 Flashing 발생으로 인하여 계통 기기가 손상받지 않도록 적절하게 계통의 압력을 제어하는 역할을 수행한다.

3.0. 분석방법

본 분석에서는 과도해석 코드인 MMS-RTC 코드를 이용하여 영광 5,6호기의 유출계통을 모사하여 유출 오리피스차단밸브와 배압제어밸브 사이 배관 내에서 압력진동, 압력변동에 따른 제어밸브의 운전폭 또는 운전주기 그리고 계통의 유량변화를 평가하고자 한다. 따라서 영광 5,6호기 유출계통에 설치된 각종 기기들의 수력학적 현상을 모사하고 각종 기기들의 운전특성, 배압제어기의 제어설정치 등을 선정하기 위해서 다음과 같이 두 가지 경우로 분류하여 분석을 수행하였다.

- 1) 배압제어밸브 제어기 제어변수의 설정치 변화에 따른 과도현상평가 및 최적제어변수 도출
- 2) 유출 오리피스차단밸브의 Stroke Time에 따른 과도현상평가

여기서 모사된 배압제어밸브 및 유출 오리피스차단밸브의 동적거동은 밸브의 Stiction Effect가 고려되지 않은 경우이다.

3.1. 유출계통 모델

본 연구에서 모사한 계통은 원자로냉각재 저온판으로부터 분지되는 유출 노즐부터 배압제어밸브 후단의 체적제어탱크 연결 배관까지로 하였으며, MMS-RTC 코드를 사용한 모델 구성도는 그림 2와 같다. 즉, 입구경계조건은 원자로냉각재 계통의 저온판을, 출구경계조건은 체적제어탱크 입구 조건을 사용하였다. 모델에 포함된 기기는 3개의 유출 오리피스 및 오리피스차단밸브, 재생열교환기, 유출 열교환기, 배압제어밸브의 배압제어기, 배압제어밸브의 설정치, 배압제어밸브, 각종밸브의 구동자, 배관 등이다. 또한 유출 열교환기의 기기 냉각수배관과 입구 및 출구 경계조건도 모사되었다.

4.0. 분석 및 결과

4.1. 배압제어밸브 제어기 제어변수의 설정치 변화에 의한 과도현상 평가

배압제어밸브 제어기 제어변수의 설정치가 유출계통 운전 에 미치는 영향을 분석하기 위해서 배압제어기 제어변수의 설정치 변화에 따른 배압제어밸브의 개도 변화와 배압제어밸브의 전단압력이 시간에 따라 어떻게 변하는지를 분석하였다. 여기서 배압제어밸브 제어기는 배압제어밸브의 전단압력을 474.7 psia로 유지하기 위해서 전단압력을 입력으로하여 배압제어밸브의 개도를 결정하고 결정된 개도를 출력으로하여 배압제어밸브를 운전하는 역할을 수행한다. 그림 4~그림 7은 유출계통에서 유량변화가 가장 큰 정상유출유량 (75 gpm)에서 최대유출유량(135 gpm) 으로 변경시, 즉 오리피스차단밸브(CH-110Z)가 열리는 경우로서 이 때의 오리피스차단밸브의 Stroke Time은 25초로 설정하였다. 그림 4는 배압제어기 제어변수의 설정치 중 비례이득이 0.2 이고, 적분상수는 0.3초일 때 시간에 따른 배압제어밸브의 개도, 배압제어밸브의 전단압력 및 유량변화를 나타낸 그림이다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 배압제어밸브의 개도는 약 10초까지는 약간의 진폭으로 0.7 에서 0.9로 증가 후 일정한 개도를 유지하고 있으며, 배압제어밸브 전단의 압력변화는 초기 580 psia 까지 증가하고, 약 20초까지 압력진동 후 배압제어밸브 제어기의 설정압력인 474.7 psia로 수렴하고 있음을 보여준다. 그림 5는 비례이득이 0.2 이고 적분상수가 10초인 경우로 오리피스 차단밸브가 열림에 따라 배압제어밸브의 전단 압력은 약 30 psia로 떨어진 후 1050 psia까지 증가하는 급격한 과도현상을 보여준다. 이러한 과도현상은 배압조절이 잘 이루어지지 않아 설정압력이 614.7 pisa인 방출밸브의 개방을 야기시킨 것으로, 이로 인해 유량은 상실됨을 보여준다. 그림 6은 비례이득이 1.5이고 적분상수가 0.3초인 경우로 그림 5와 유사한 경향을 보유하고 있으나 응답속도는 그림 5보다 더 빠름을 알 수 있다. 그림 7은 비례이득이 3.0이고 적분상수가 0.3초인 경우로 그림 4 및 그림 6와 유사한 경향을 보유하고 있으나, 제어기 설정압력을 중심으로 밸브의 개도 및 압력이 계속해서 진동하고 있음을 보유하고 있다. 따라서, 그림 4~그림 7에서 보듯이 계통의 과도상태를 줄이기 위해서는 제어기의 제어변수가 적절하게 선정되어야 하며, 또한 비례이득과 적분상수는 서로 연관되어 계통에 영향을 미치기 때문에 적절하게 조절되어야 한다. 본 연구에서는 비례이득이 각각 0.2, 0.67, 1.5, 3.0이고 적분상수가 0.3, 10, 25, 40인 경우를 조합하여 그 결과를 표 1과 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 보듯이 유출계통의 과도상태를 완화시키기 위한 비례이득과 적분상수는 일정 띠를 형성하는 범위 내에 있으며, 표 1에서 최적의 제어변수는 비례이득이 0.67, 적분상수가 10~40초인 경우로 나타났다.

4.2. 유출 오리피스차단밸브의 Stroke Time에 따른 과도현상평가

유출 오리피스차단밸브의 Stroke Time에 따른 유출계통의 과도현상을 평가하기 위해서 Pneumatic On/Off 밸브인 유출 오리피스차단밸브를 빠른 속도(5초)로 닫을 경우와 느린 속도(60초)로 닫을 경우 등 단계적으로 구분하여 분석을 수행하였다. 배압제어밸브의 배압제어기 제어변수 중 비례이득 및 적분상수는 각각 0.67, 10초인 경우를 채택하였다. 그림 8은 오리피스차단밸브의 Stroke Time이 5초인 경우로 배압제어밸브 전단압력이 약 960 psia 까지 급격하게 증가하여 방출밸브가 열리는 과도현상이 발생하였다. 이러한 과도현상은 오리피스차단밸브가 열림에 따른 압력증가를 배압제어밸브가 제어하지 못함으로서 발생하는 것으로 판단된다. 그림 9는 오리피스차단밸브의 Stroke Time이 20초인 경우로 그림 8과 같은 급격한 과도현상은 나타나지 않으며, 배압제어밸브 전단압력은 600 psig 까지 증가 후 수렴하고 있다. 그림 10과 그림 11은 오리피스차단밸브의 Stroke Time이 각각 30초와 60초인 경우로 배압제어밸브 전단압력의 변화가 상당히 완화되었음을 보여준다. 따라서 그림 8~11로부터 오리피스 차단밸브의 Stroke Time이 30초 이상 되어야 함을 알 수 있다.

5.0. 결론

MMS-RTC 코드를 이용하여 영광 5,6호기 유출계통의 과도현상을 분석한 결과 다음과

같은 결론을 얻었다.

- 1) 배압제어기 제어변수의 설정치 변화에 따른 계통의 과도현상을 분석한 결과 배압제어기의 제어변수가 계통의 과도현상에 매우 큰 영향을 미치고 있어 배압제어기 제어변수 선정이 계통의 과도현상 완화에 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다. 또한, 비레이득이 0.67, 적분상수가 10~40초인 경우가 유출계통의 과도현상이 완화되는 제어변수 범위임을 알 수 있었다.
- 2) 유출 오리피스차단밸브의 Stroke Time에 따른 계통의 과도현상을 분석한 결과 유출 오리피스차단밸브의 운전은 약 30초 이상에서 과도현상이 완화됨을 알았다.

본 연구에서는 유출계통의 정상운전시 발생가능한 과도현상을 중심으로 분석한 것이며, 유출계통의 기기, 밸브 또는 제어계통의 오작동이나 고장에 의한 유출계통 차단시 예상되는 과도현상의 분석과 밸브의 Stiction Effect 등의 고려는 계속해서 연구해야할 사항이다. 또한, 본 분석에 의해서 평가된 분석결과는 유출계통 설계, 시운전 및 운전시에 참고자료로 사용 가능할 것으로 판단된다.

6.0. 참고문헌

- 1) Mitchell and Gauthier Associates, "Advanced Continuous Simulation Language Reference Manual", 1995.
- 2) Framatome Technologies, "MMS-RTC Code Manual", 1996.

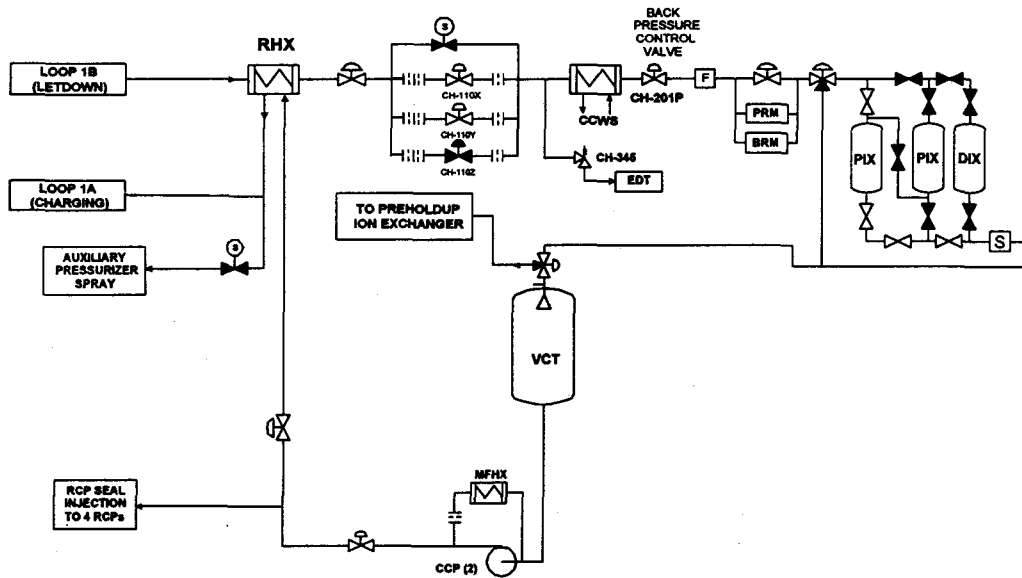


그림 1. 영광 5,6호기 유출계통의 개략도

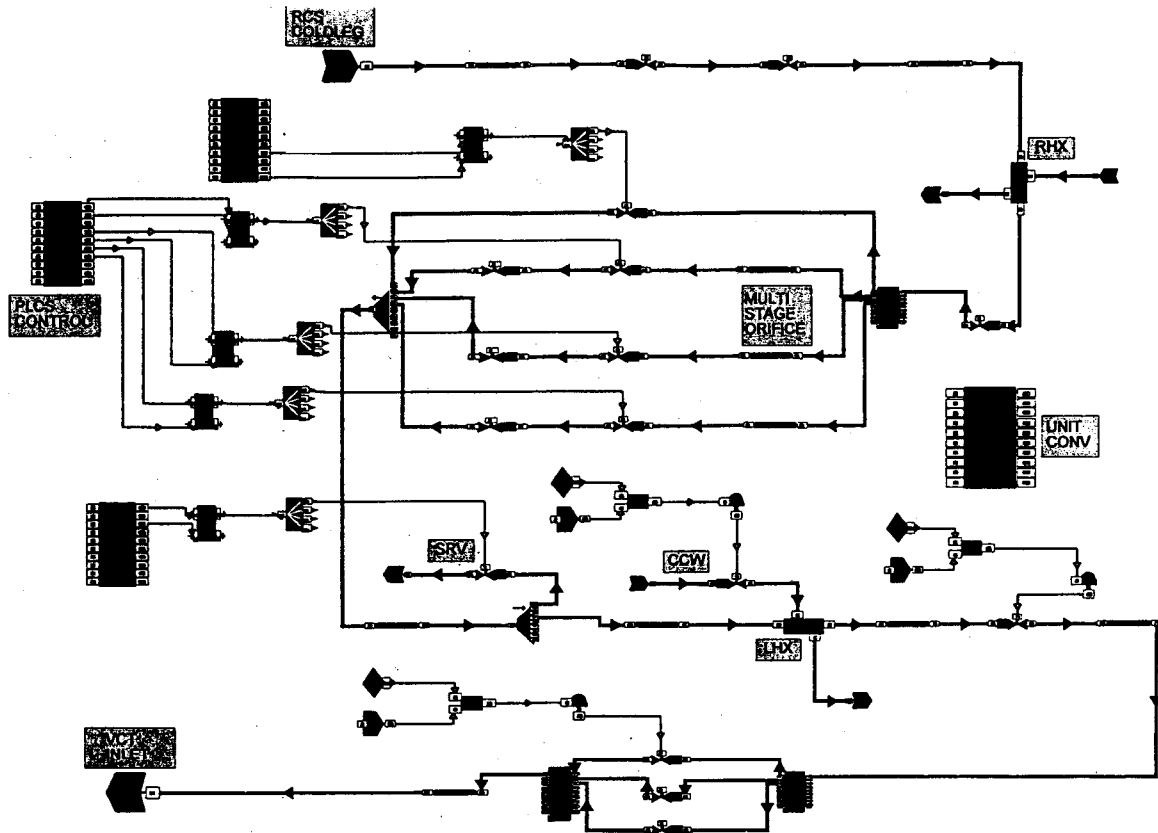


그림 2. MMS-RTC 코드를 이용한 유출계통의 모델 구성도

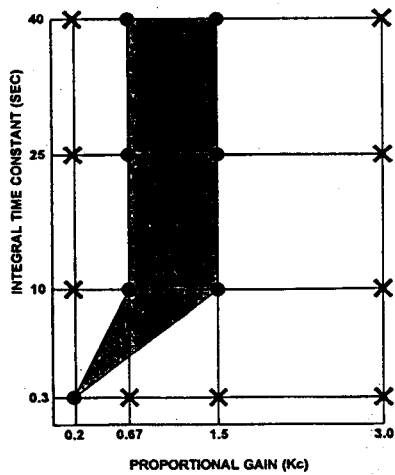


그림 3. 1. PI-201 제어상수값의 Mapping

제어변수 값		분석 결과	
비례이득 (Kc)	적분상수 (τ _i)	방출밸브 개방여부	CH-201Q Peak to Peak dP (psid)
0.2	0.3	no	120
	10	yes	1050
	20	yes	1100
	40	yes	1100
0.67	0.3	no	100
	10	no	80
	25	no	80
	40	no	80
1.5	0.3	no	120
	10	no	90
	25	no	90
	40	no	90
3.0	0.3	no	140
	10	no	130
	25	no	130
	40	no	130

표 1. PI-201 제어상수값 분석 결과표

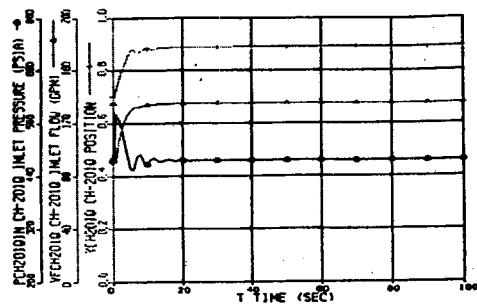


그림 4 배압제어기 제어변수($K_c=0.2$, $ITC=0.3$)에 대한 밸브개도, 배압제어밸브의 전단압력 및 유량변화(오리피스차단밸브 stroke time은 25초, 특성은 Linear)

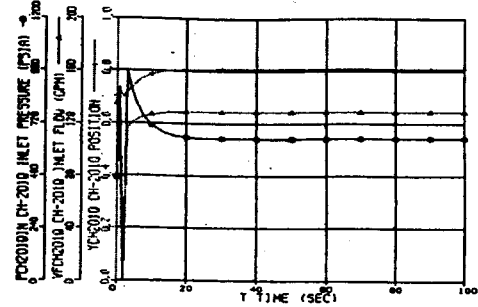


그림 8 오리피스차단밸브 Stroke Time 5초인 경우에 대한 배압제어밸브개도, 배압제어밸브 전단압력 및 유량변화(배압제어기 제어변수 $K_c=0.67$, $ITC=10$)

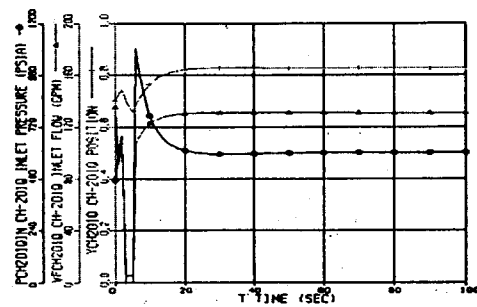


그림 5 배압제어기 제어변수($K_c=0.2$, $ITC=10$)에 대한 밸브개도, 배압제어밸브의 전단압력 및 유량변화(오리피스차단밸브 stroke time은 25초, 특성은 Linear)

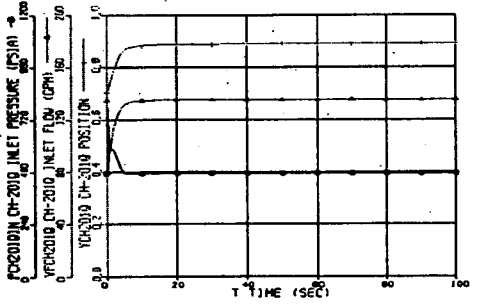


그림 9 오리피스차단밸브 Stroke Time 20초인 경우에 대한 배압제어밸브개도, 배압제어밸브 전단압력 및 유량변화(배압제어기 제어변수 $K_c=0.67$, $ITC=10$)

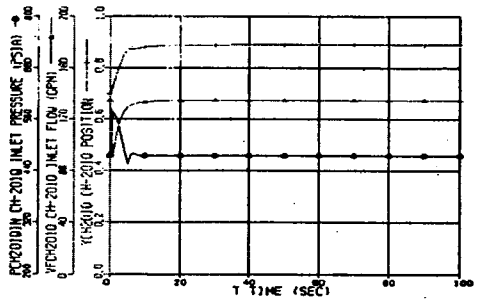


그림 6 배압제어기 제어변수($K_c=1.5$, $ITC=0.3$)에 대한 밸브개도, 배압제어밸브의 전단압력 및 유량변화(오리피스차단밸브 stroke time은 25초, 특성은 Linear)

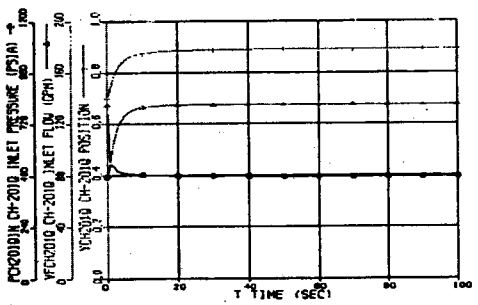


그림 10 오리피스차단밸브 Stroke Time 30초인 경우에 대한 배압제어밸브개도, 배압제어밸브 전단압력 및 유량변화(배압제어기 제어변수 $K_c=0.67$, $ITC=10$)

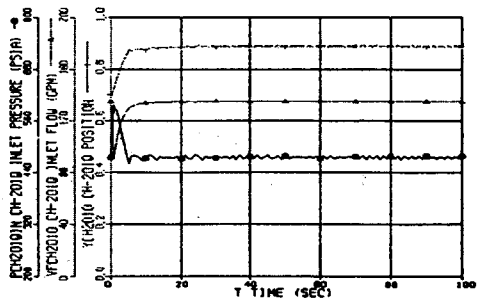


그림 7 배압제어기 제어변수($K_c=3.0$, $ITC=0.3$)에 대한 밸브개도, 배압제어밸브의 전단압력 및 유량변화(오리피스차단밸브 stroke time은 25초, 특성은 Linear)

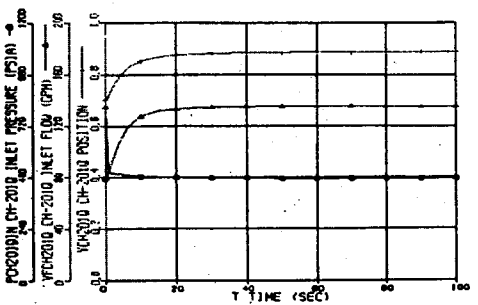


그림 11 오리피스차단밸브 Stroke Time 60초인 경우에 대한 배압제어밸브개도, 배압제어밸브 전단압력 및 유량변화(배압제어기 제어변수 $K_c=0.67$, $ITC=10$)