

발전 플랜트 설계용 시뮬레이터에서
Executive System의 개발

Development of Executive System
in Power Plant Simulator

°예재만(J.M.Yae), 이동수(D.S.Lee), 박형준(H.J.Park),
권상혁(S.H.Kwon), 오동한(D.H.Oh), 노태정(T.J.Lho)

삼성중공업 기전연구소 메카트로개발팀 (Tel:+82-551-60-8240; E-mail:xillix@samsung.co.kr)

Abstracts The PMGS(Plant Model Generating System) was developed based on modular modeling method and fluid network calculation concept. Fluid network calculation is used as a method of real-time computation of fluid network, and the module which has a topology with node and branch is defined to take advantages of modular modeling. Also, the database which have a shared memory as an instance is designed to manage simulation data in real-time. The applicability of the PMGS was examined implementing the HRSG(Heat Recovery Steam Generator) control logic on DCS.

Keywords Simulator, Power Plant, Fluid Network, Module Modeling, Sparse Matrix

1. 서론

1983년 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 MMS(Modular Modeling System)를 개발한 이후 발전 플랜트의 시뮬레이션에서 모듈 모델링 개념은 일반적으로 구현되고 있다. 그리고 압력점 방식(Pressure Nodal Method)을 적용한 유체 역학적 네트워크(Fluid Network)의 실시간 해석은 발전 플랜트의 훈련용 시뮬레이터 등에 적용되고 있다(VTT의 APROS, ABB의 THLF). 당사는 모듈 모델링을 기초로 유체 역학적 네트워크의 개념을 적용한 독자적인 시뮬레이터 PMGS(Plant Model Generating System)를 개발하였다.

PMGS는 실제 DCS와 연결하여 발전 설비의 기동 및 정지 모의 실험, 부하 변동 추종성, 제어 로직 등의 검증용 시뮬레이션 시스템으로 현재 HRSG(Heat Recovery Steam Generator)에 대한 시뮬레이션 환경을 만들어 운전 특성 파악 및 제어 계통 설계의 적합성을 평가하는 데에 적용하고 있다.

2. 배경 이론과 구현 방법

2.1. 모듈 모델링과 유체역학적 네트워크의 해석

발전 플랜트를 구성하고 있는 설비 기기를 의미하는 모듈은 기기의 동특성을 묘사하며, 유체 역학적 네트워크는 대상 발전 플랜트의 전체 시스템의 에너지, 질량, 운동량을 표현하고 해석한다. 유체 역학적 네트워크는 모델링 하는 대상 시스템의 설비 기기의 해석이 아니고 플랜트 전체 시스템에 대응된다.

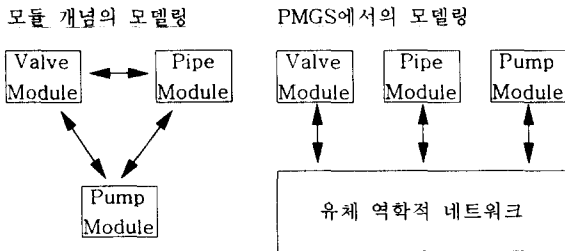


그림1 모듈과 유체 역학적 네트워크
Fig.1 Modularity and Fluid network

유체 역학적 네트워크계의 실시간 해석의 수단으로서 본 연구에서 채택한 압력점 방식은 Li T.D.⁽¹⁾에 의해 구체적으로 제시된 것으로 이 방식은 경계 조건이 주어지는 경우 발전 플랜트의 해석에

유용하게 적용될 수 있다. PMGS에서 발전 설비 구성 기기의 모델링은 압력점 방식에서의 노드/브랜치(Node/Branch) 개념과 이들로 이루어진 토폴로지(Topology) 개념을 포함하고 있다. 노드와 브랜치 개념은 MMS에서의 Storage/Resistance 개념에 대응되지만 차이점은 노드와 브랜치는 발전 플랜트의 전체 시스템에 대응되는 유체 역학적 네트워크를 만들고 해석하는데 있다. PMGS에서는 토폴로지를 내장한 모듈들의 조합으로 전체 발전 플랜트를 디자인하고 전체 토폴로지를 생성해 낸다. 즉 시뮬레이션 대상 플랜트에 의해 결정된 발전 설비 기기의 배열에 따라 압력점 방식의 네트워크 모델이 자동으로 만들어진다.

2.2 유체 역학적 네트워크

유체 역학적 네트워크계의 일반적 형태는 Fig.2와 같고 노드(P_1, P_2), 바운드리(P_3, P_4, P_5, P_6), 브랜치(G_1, G_2, G_3, G_4, G_5)로 구성되어진다. 1) 노드 (Internal Node) - 노드는 브랜치로 연결된 Control Volume이다. 노드에서의 압력과 엔탈피는 알려지지 않으며 유체 역학적 네트워크를 해석함으로써 결정된다. 노드의 중요 파라미터는 압력, 엔탈피, 압축성, Leakage 등이다. 2) 바운드리 (External Node) - 바운드리는 노드의 특수한 경우이며 바운드리에서의 유체의 특성(압력, 엔탈피 등)은 드럼, 콘덴서 등의 발전 플랜트의 설비 기기 또는 대기 조건 등의 유체 역학적 네트워크의 외부 요인에 의해서 결정되어진다. 바운드리에서의 압력과 엔탈피는 단순히 외부 압력, 외부 엔탈피에 의해 결정된다. 3) 브랜치 (Branch) - 브랜치에서는 저항 특성 즉, 단면, 밸브의 개도, 팬 및 펌프의 저항과 유동 저항 등을 반영한다. 브랜치에서의 중요 파라미터는 저항, 압력 Head, 유량 등이다.

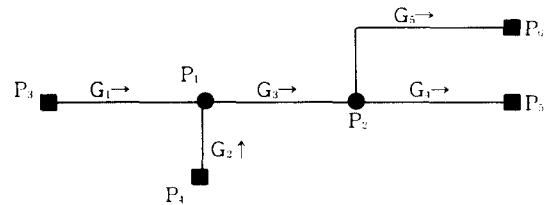
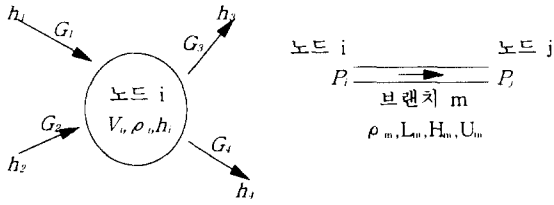


그림2 유체 역학적 네트워크
Fig.2 Fluid network

Fig.2와 같은 유체 역학적 네트워크계안에서 모든 노드의 압력과 엔탈피 그리고 브랜치에서의 압력 강하 및 질량 유량을 계산하는 것은 선형 방정식으로 표현되며 노드 i에서의 유체의 압력 P_i 와 엔탈피 H_i 는 다음과 같이 정의할 수 있다.



노드 i에서 질량 보존과 에너지 보존 그리고 브랜치 m에서 운동량 보존(베르누이 방정식)으로부터 아래식을 유도할 수 있다. 또한 유체의 밀도 ρ 의 변화를 무시할 수 있다면 온도의 변화 ΔT 는 노드 i에서 질량 변화와 브랜치 m에서 운동량 변화와는 독립적으로 구할 수 있다. 즉 노드에서의 온도는 노드에서의 압력과 브랜치에서의 유동이 결정된 후에 계산되어질 수 있다. 이러한 가정은 계산 프로그램의 작성 순서에 결정적인 요소이다.

$$C_i \frac{\Delta P_i}{\Delta t} = \sum_{j=1}^K \frac{P_j - P_i + INP_j H_m}{R_m |G_m|} + \frac{C_i (P_m - P_i)}{T_{ci}} \quad (1)$$

$$M_i \frac{\Delta h_i}{\Delta t} = \sum_{j=1}^K \text{Max}(INP_j G_m, 0) h_j - h_i \sum_{j=1}^K \text{Max}(INP_j G_m, 0) + V_i \frac{\Delta P_i}{\Delta t} + S_i + \frac{M_i (h_m - h_i)}{T_{mi}} \quad (2)$$

유체 역학적 네트워크의 노드의 압력 벡터

$$[P] = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n\} \\ [A][P] = [B] \quad (3)$$

$$a_{ii} = C_i \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{1}{T_{ci}} \right) + \sum_{j=1}^K \frac{1}{R_m |G_m|} \quad (4)$$

$$a_{ij} = -1 / (R_m |G_m|) \quad (5)$$

$$b_i = C_i \left(\frac{P_i}{\Delta t} + \frac{P_{ci}}{T_{ci}} \right) + \sum_{j=1}^K \frac{P_j^\beta}{R_m |G_m|} + \sum_{j=1}^K \frac{INP_j H_m}{R_m |G_m|} \quad (6)$$

유체 역학적 네트워크의 노드의 엔탈피 벡터

$$[H] = \{h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n\} \\ [D][H] = [E] \quad (7)$$

$$d_{ii} = M_i \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{1}{T_{mi}} \right) + \sum_{j=1}^K \text{Max}(INP_j G_m, 0) \quad (8)$$

$$d_{ij} = -\text{Max}(INP_j G_m, 0) \quad (9)$$

$$e_i = M_i \left(\frac{h_{mi}}{\Delta t} + \frac{h_i}{T_{mi}} \right) + \sum_{j=1}^K \text{Max}(INP_j G_m, 0) h_j^\beta + S_i \quad (10)$$

모든 노드의 압력이 식(3)으로부터 결정된다면 브랜치에서의 질량 유량율을 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$G_m = \frac{INP_j F_m}{|F_m|} \sqrt{\frac{F_m}{R_m}} \quad (11)$$

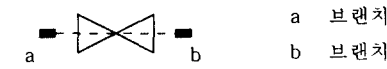
2.3 모듈의 토폴로지 내장

PMGS에서 발전 설비 구성 기기의 모델링은 노드/바운드리/브랜치 개념과 이들로 이루어진 토폴로지 개념을 포함하고 있다. 토폴로지를 내장한 모듈들의 조합으로 전체 발전 플랜트를 디자인하고 전체 토폴로지를 생성해 낸다.

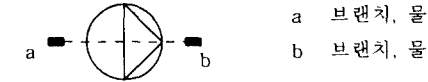
유체 역학적 네트워크 해석 방법을 적용하기 위해서 모듈 모델링 개념을 확장하여 노드, 바운드리, 브랜치로 이루어진 토폴로지를 내장한 모듈을 정의하였다. 이러한 방식을 구현한 이유는 유체 역학적 네트워크 해석 방법을 사용하면서도 모듈 모델링의 장점을 유지하기 위한 것이다. 즉 발전 설비 기기들을 배치함으로써 전체 발전 플랜트의 유체 역학적 네트워크의 구성이 이루어진다. 각

모듈들은 내장한 노드, 바운드리, 브랜치의 파라미터를 통해 시뮬레이션의 입출력을 수행한다. 다음은 모듈과 내부 토폴로지의 간단한 예다.

밸브 (Valve) - 브랜치 a,b의 파라미터중 압력을 입력으로 해서 밸브를 통과하는 유량을 결정하는 경우



펌프 (Pump) - 브랜치 a,b의 파라미터중 압력과 Head를 입력으로 해서 밸브를 통과하는 유량을 결정하는 경우



2.4 유체 역학적 네트워크의 모듈화

유체 역학적 네트워크는 시뮬레이션 대상 플랜트의 기기 사이의 연결을 반영하며 최종적으로 네트워크 토폴로지는 노드 사이의 연결을 나타낸다. 그러나 발전 플랜트의 모델링에서 유체 역학적 네트워크는 발전 설비 모듈의 배치가 완료된 후에 결정되어질 수 있으며 배치가 바뀌면 유체 역학적 네트워크의 토폴로지는 바뀌어야 한다. 또한 같은 시뮬레이션 대상 플랜트에 대해서도 시뮬레이션 목적에 따라 다른 토폴로지가 결정되어질 수 있다. 이러한 이유 때문에 유체 역학적 네트워크를 펌프나 과열기처럼 모듈화하는 것이 쉽지 않다. 그러나 모듈 모델링의 장점을 잃지 않기 위해 유체 역학적 네트워크를 모듈화 하는 것은 반드시 필요하다.

PMGS에서는 각 모듈에 이미 정의되어진 내부 토폴로지와 모듈간에 정의된 연결 관계를 이용해서 전체 토폴로지가 만들어지며 각 모듈의 배치와 연결만으로 유체 역학적 네트워크 모듈의 자동 생성이 이루어진다. Fig.3에서는 모듈들로 구성된 모델에서 토폴로지를 분리하는 예를 보여주고 있으며 이 때 3개의 전체 토폴로지가 생성되어지는 경우를 보여준다(화살표 A). 분리된 토폴로지는 대응되는 3개의 유체 역학적 네트워크 모듈로 만들어지고 펌프, 밸브, 콘덴서 모듈과 데이터 교환이 이루어 지도록 정의된다(화살표 B). 최종적으로 모든 입출력 데이터는 공유메모리에 등록되고 네트워크 모듈을 포함한 모든 모듈의 프로그램이 수행된다.(화살표 C).

2.5 [A][P]=[B] 의 프로그래밍

유체 역학적 네트워크 모듈은 결국 식(3),(7)를 풀게 되며, 식(3),(7)의 실제 프로그래밍은 해석 방법 못지 않게 중요하다. 발전 플랜트와 같은 Thermal System에서 식(3),(7)는 보통 희소행렬(Sparse Matrix)이며 행렬의 Order는 수백에 이른다. 기억 장소 구조 및 계산 시간의 측면에서 볼 때 매트릭스의 역행렬을 구하는 것은 효율적이지 못하며 희소행렬의 경우 더욱 그렇다. 또한 실시간 해석을 요구하는 시뮬레이션에서는 계산의 정확도 외에 계산 효율을 고려해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 방법이 알려져 있으며 본 연구에서는 K.ZOLLENKOPF⁽⁴⁾가 구현한 BI-FACTORIZATION 방법에서의 반복적인 직접해를 구하는 알고리즘을 프로그래밍하여 식(3),(7)의 해를 구한다.

3. PMGS의 구성

PMGS는 Unix와 X-Window 환경하에서 동작하는 발전 설비의 설계를 위한 시뮬레이터이며 실제 제어시스템인 DCS와 연결하여 발전 설비의 운전의 특성과 제어의 적합성을 검증한다.

3.1 하드웨어의 구성

PMGS는 HP9000 워크스테이션에서 작동하며 Fig. 4와 같이 VALMET의 DAMATIC-XD DCS 등과 연결되어 운영된다.

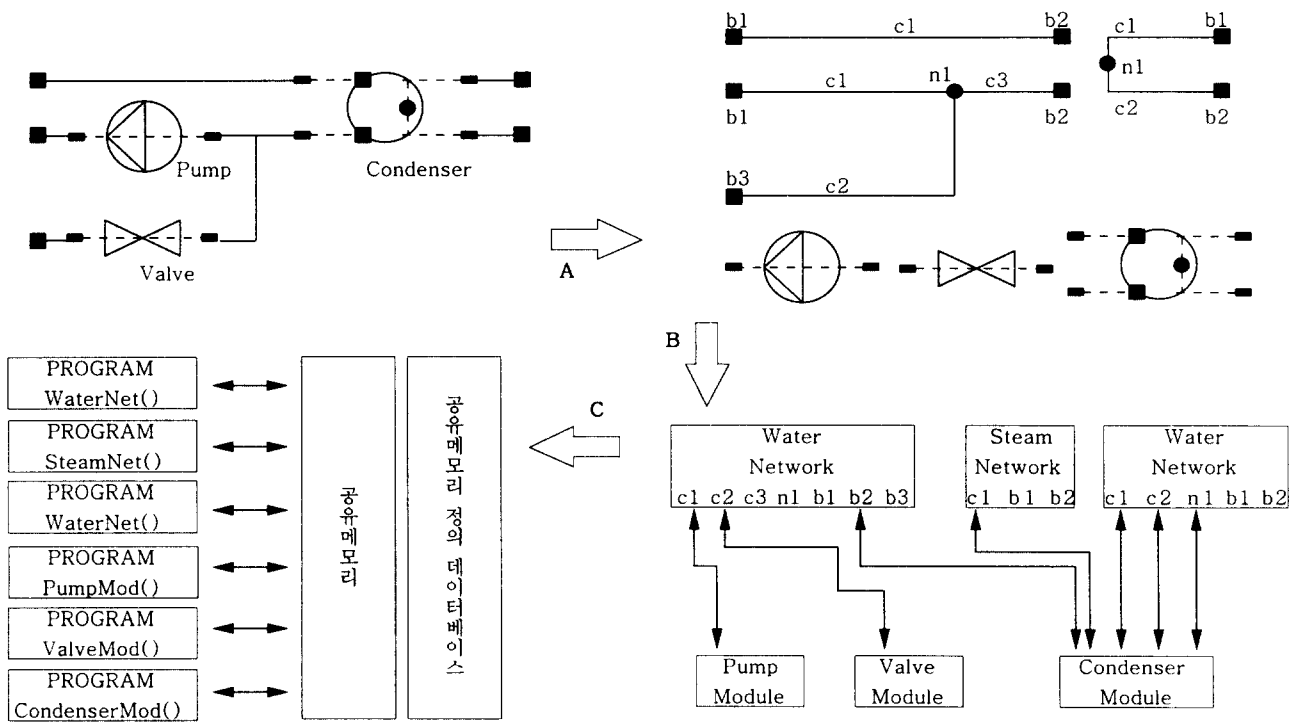


그림3 유체 역학적 네트워크의 모듈화
Fig.3 Modularity of fluid network

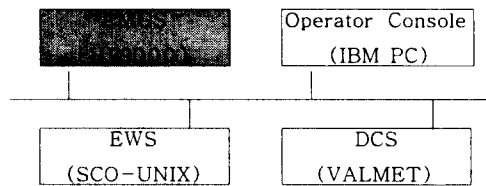


그림4 PMGS environment
Fig.4 PMGS의 전체 환경

3.2 소프트웨어의 구성

PMGS의 기본 환경은 Unix, X Window, Motif이며 사용된 컴퓨터 언어는 Fortran과 C/C++이다. 본 연구에서는 일반적인 프로그램 개발 틀이 적합하지 않아 컴파일러 외에는 상용 개발틀 또는 상용 소프트웨어를 사용하지 않고 자체 개발하였다.

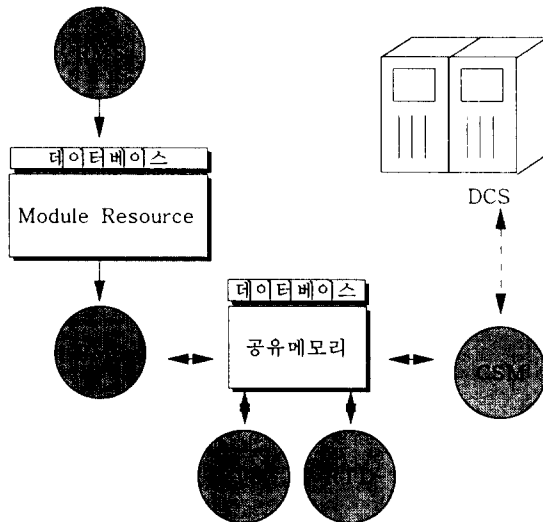


그림5 MGS의 소프트웨어 구성
Fig.5 PMGS software configuration

3.2.1 공유메모리와 데이터베이스의 설계

PMGS에서 시뮬레이션에 사용하는 모든 데이터는 데이터베이스에 저장되며 다음과 같은 특징이 있다. 1) 특정 모듈의 계산 결과 또는 출력은 다른 모듈의 입력으로 사용되어지기 때문에 모듈간의 빈번한 데이터 교환이 요구된다. 2) 시뮬레이션을 직접 수행하는 프로그램 뿐만 아니라 통신 프로그램 등 여러 프로그램이 동시에 데이터의 접근을 시도한다. 3) 발전 플랜트의 데이터는 값뿐만 아니라 단위, 값의 허용 범위, 설명 등 많은 부가적인 정보를 포함하고 있다. 4) 발전 플랜트의 모델 구성 단계에서 모듈의 수정, 삭제, 추가가 빈번히 이루어지기 때문에 동적인 데이터의 할당이 필요하다. 이러한 데이터 관리의 특성 때문에 PMGS에서는 일반적인 데이터베이스와는 다르게 데이터베이스의 Instance에 해당하는 공유메모리를 만들어서 빠른 데이터 교환이 이루어지도록 설계하였다. 특정 데이터에 접근하기 위해서 처음 한번은 데이터베이스를 통해서 데이터의 공유메모리상의 위치와 데이터의 부가적인 정보를 획득하고 이후에는 공유메모리만을 사용한다. 이러한 데이터베이스의 설계는 발전 플랜트의 리얼타임 시뮬레이션에 적합함으로 제어 로직 검증 및 운전 시험 등에 PMGS를 적용할 수 있다.

3.2.2 PMGS의 프로그램별 기능

RMS Resource Management System(RMS)은 파이프, 드럼 등의 발전 플랜트 설비 기기의 모듈을 정의하는 시스템이다. RMS를 사용해서 모듈의 알고리즘 작성, 내장 토폴로지의 정의, 모듈의 외형 등을 만들어서 모듈 리소스에 등록한다. PMGS에서 모듈의 알고리즘은 대부분 포트란으로 작성된다.

PMS Process Modeling System(PMS)은 PMGS의 GUI 통합 환경이다. PMS에는 계층 구조의 모델링, 모듈별 시뮬레이션 데이터의 관리, 시뮬레이션의 전체 프로젝트 관리 등을 지원한다.

RTM & RTD 시뮬레이션 모델을 실행하는 Run Time Manager(RTM)는 플랜트 모델을 실행하고 그 결과를 공유 메모리에 반영한다. RTM은 플랜트 모델을 구성하고 있는 모듈의 알고리즘을 수행하기 위해 동적으로 모듈의 오브젝트 코드를 Load/Unload한다. 또한 모듈간의 입출력 속도를 향상시키기 위해 모듈간의 데이터 교환을 따로 수행하지 않고 모듈간의 입출력을 공유 메모리에서 직접 연결한다. Run

Time Debugger(RTD)는 시뮬레이션 모델의 테스트 환경을 지원하며 다음과 같은 기능을 가지고 있다. 1) 실행, 정지, 단계별 실행, 모듈별 실행 2) 특정 초기 상태에서의 시뮬레이션 3) Snapshot 4) Fast/Slow time

CSM Communication System Manager(CSM)는 실제의 DCS와 PMGS간의 데이터 교환을 수행한다. 현재는 VALMET DCS의 CNP 프로토콜에 맞추어져 있다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

개발한 PMGS를 한화에너지(주)의 HRSG 실운전 제어 로직을 갖고 있는 VALMET DAMATIC-XD DCS에 연결하여 PMGS의 적용성을 조사하였다. Fig.6은 PMGS에서 구현한 모델의 디자인 화면이며 Fig.7과 Fig.8 그리고 Fig.9는 PMGS에서 계산한 시간에 따른 드럼(HP, IP, LP)의 동특성을 나타내고 있다. 제시되는 결과는 HRSG에서의 입구 가스 온도를 600℃에서 549℃로 변동시 주요 파라미터의 계산 값들과 DCS에서의 밸브개도 조정값을 나타내고 있다. LP 드럼에서 초기의 드럼 수위의 overshoot는 유체 역학적 네트워크의 계산에서 실시간 계산을 위해 계산 횟수를 줄인 것에 기인한다.

HRSG에서의 입구 가스 온도를 600℃에서 549℃로 변동시 Fig.7에서 HP 드럼 수위(E)의 일시적인 하강 현상과 드럼 압력(B)이 내려가는 추이를 확인할 수 있으며 드럼 수위의 상승시에는 DCS의 제어에 의해 급수량(D)이 줄어드는 것을 알 수 있다 Fig.8에서는 IP 드럼내의 압력의 하강이 확인되며 HP 드럼의 영향으로 IP 드럼의 증기 출력의 압력이 낮아짐으로 해서 일시적인 증기 배출량의 증가가 나타난다. IP 드럼의 이러한 현상은 실제 운전 데이터와의 비교가 필요하다. Fig.9에서 LP 드럼의 수위가 입구 가스온도의 변동 후 증기량과 급수량이 균형을 이루어 안정화 되는데에 HP, IP 드럼보다 더 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다. 이는 현장에서의 시운전 경험과도 일치한다. 결론적으로 개발된 PMGS가 보일러의 동적 특성을 묘사하는데 사용될 수 있음을 알 수 있다.

5 결론

모듈 모델링과 유체 역학적 네트워크에 근거한 시뮬레이터인 PMGS를 개발하고 HRSG의 제어 계통을 설치한 실제 DCS와 연결하여 시험하였으며, 현장의 실운전 데이터와 비교하여 검증용 실시 중에 있다. PMGS는 발전 설비의 배치만으로 유체 역학적 네트워크를 생성해 내며, 실시간 해석을 위한 데이터의 처리, 실제 DCS와의 연결지원, 특정 초기 상태에서의 시뮬레이션 지원 등의 기능을 가지고 있다. 향후 발전 설비 구성 기기를 정밀하게 시뮬레이션 하기 위해서는 입력해야 할 데이터가 중요하므로 향후 데이터의 수집과 검증용 더 수행해야 한다.

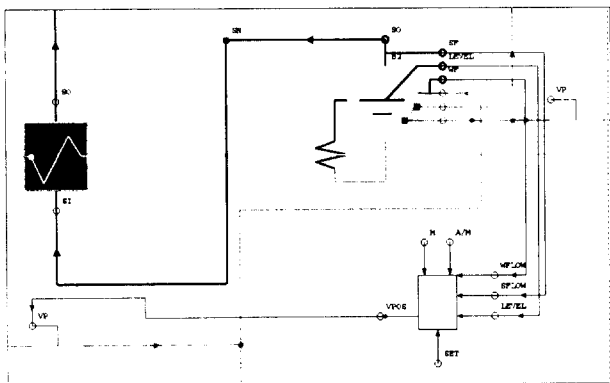


그림6 PMGS의 디자인 화면
Fig.6 Screen shot of PMGS

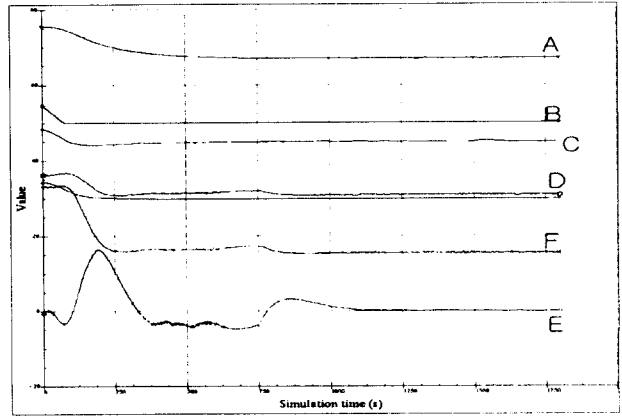


그림7 HP 드럼의 추이
Fig.7 Response of HP Drum

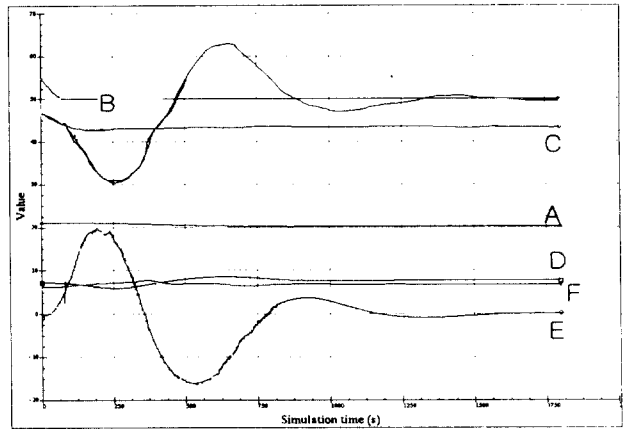


그림8 IP 드럼의 추이
Fig.8 Response of IP Drum

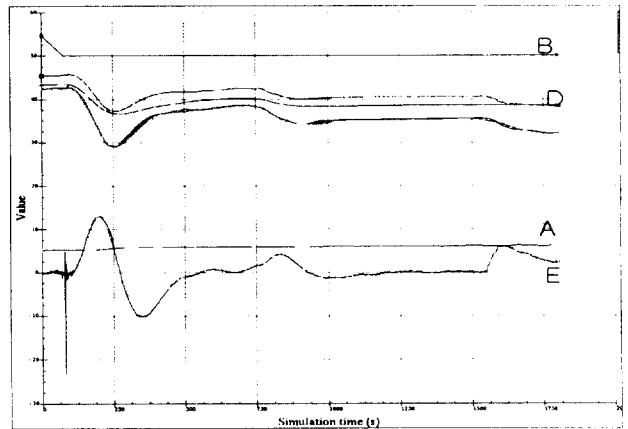


그림9 LP 드럼의 추이
Fig.9 Response of LP Drum

참고문헌

- [1] Li, T.D., An algorithm for real-time simulation of fluid network systems, Modelling, Simulation & Control, B. AMSE Press, Vol.19, pp.55-64(1988)
- [2] 박정, 고부하에서의 보일러 플랜트 부하변동 묘사를 위한 프로세스 모델 개발 및 적용, 에너지공학회지 제6권 제1호 pp.41-51 (1997)
- [3] K. Zollenkopf, "Bi-Factorization-Basic Computational Algorithm and Programming Techniques", pp75-96