

# 폐열회수 보일러의 동특성 시뮬레이션

이기현\*, 이동수\*, 조창호\*

## Dynamic Simulation of Heat Recovery Steam Generator

KiHyun Lee, DongSu Lee and ChangHo Cho

**Key Words :** Dynamic Simulation(동특성 시뮬레이션), APSS(Advanced Plant Engineering & Simulation System, 고등 플랜트 엔지니어링 시뮬레이션 시스템)

### Abstract

A thorough understanding of the transient behavior during load following and start-up is essential in the design and operation of an heat recovery steam generator(HRSG). During this period of time, material that is exposed to high temperature and experiences a large temperature variation is subject to high thermal stress. APSS(Advanced Plant Engineering & Simulation System) is a dynamic simulation software for power plant which is under being developed by Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd. This paper present the introduction of APSS and the result of simulation for an heat recovery steam generator.

### 기호설명

$\rho_i$  : 노드 I의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

$V_i$  : 노드 I의 검사체적(Control Volume)(m<sup>3</sup>)

$$\sum_{j=1}^{MP} INP_{ij} G_m$$

: 전체노드(Node number j : 1 ~ MP, MP : Number of total node)에서 노드 I로 연결된 간선 m(노드 i와 노드 j가 연결됨)에 대하여 유량( $G_m$ )과 유동의 방향( $INP_{ij}$  : 유동이 i에서 j 방향이면 값은 -1, 유동이 j에서 i 방향이면 +1)의 곱의 합(kg/sec)

$G_{leak}$  : 노드 I에서 외부(Ambient)로부터 유입되는 유량(kg/sec)(유입시 +, 유출시 -)

$h_i$  : 노드 I의 엔탈피(kJ/kg)

$ha_i$  : 노드 I의 외부 엔탈피(kJ/kg)

$DH_m$  : 간선 m의 엔탈피 유출입(kJ/kg)

$TM_i$  : 노드 I의 외부와 시스템간의 열전달 계수

$Pin_k, Pto_k$  : 간선 k의 입출구 노드에서의 압력

$RB_k, HB_k, Ia_k$  : 간선 k에서의 저항(Resistance), Pump head 및 관성모멘트

$W_{s1}, W_{s2}, W_{g1}, W_{g2}$  : 과열기 입출구 증기/가스 유량

$H_{s1}, H_{s2}$  : 과열기 입출구 증기 엔탈피

$T_{g2}, T_m$  : 과열기 출구 가스 온도, 메탈 온도

$M_m, C_{pm}$  : 메탈의 질량/비열

$Q_{loss}$  : 가스 측 열손실

$Q_1$  : 가스 측에서 메탈로의 열전달량

$Q_s$  : 메탈에서 내부 유체로의 열전달량

$W_{in}$  : 절탄기에서 오는 급수유량

$W_{con}$  : 응축량

$W_{wh}$  : 열전달에 의한 증발량

$W_{evp}$  : 압력변화에 의한 증발량

$H_{do}$  : 강수관 출구 엔탈피

$W_r$  : 수순환량

### 1. 서론

복합화력 발전소의 주기기중 하나로 사용되는 폐열 회수 보일러(HRSG : Heat Recovery Steam Generator)는 가스터빈에서 나오는 배가스를 이용하여 응축기(Condenser)에서 오는 물을 스팀터빈에서 원하는 조건의 증기로 만들어 주는 기기를 말한다. 따라서, 일반 산업용 보일러와 달리 화로가 없으며 주로 배가스로부터 물이나 증기로 열을 전달해주는 전열부로 구성되어 있다.

좀 더 상세히 폐열회수 보일러의 전열부에 대하여 설명하면 응축기에서 오는 물을 가열하여 이상상태 근처까지 만들어주는 절탄기(Economizer),

\* 두산중공업 기술연구원 시스템전단/제어연구팀

물을 증기로 변환시켜 주는 증발기(Evaporator), 증발기에서 나온 증기를 과열증기로 만드는 과열기(Superheater) 및 고압터빈에서 나온 증기를 다시 가열하여 중압터빈으로 보내기 위한 증기를 만들어내는 재열기(Reheater)로 구성되어 있다.

최근의 폐열회수 보일러의 설계에서 부상하고 있는 중요한 요소중 하나는 동적인 개념을 가미한 설계가 고려되고 있다는 점이다. 즉 최근 발전소에서 요구하는 사항을 보게 되면 냉간 기동(Cold start), 온간기동(Warm start), 열간기동(Hot start)을 몇 회 할 동안 수명에 문제가 없어야 한다는 조건이 나오며, 이것을 계산하기 위해서는 위의 상황에서 폐열회수 보일러의 증기계통의 온도 및 압력이 어떻게 되는지를 알아야 응력계산을 수행하여 수명에 문제가 없는지를 확인할 수 있다는 점이다. 또한 부하증감발시 드럼 수위의 변화가 어느 정도 되는지를 추정할 수 있어야 가스터빈의 부하변화의 속도를 만족시킬만한 적절한 크기의 드럼을 설계할 수 있다는 점도 들 수 있다.

본 논문에서는 약 7년간에 걸쳐 국내 독자적으로 개발된 발전 플랜트 동특성 해석 및 모사용 소프트웨어인 APSS(Advanced Plant Engineering & Simulation System)를 이용하여 대상 폐열회수 보일러에 대하여 동특성 해석을 수행하였다.

## 2. APSS 소개

### 2.1 APSS 구조 소개

폐열회수 보일러의 동특성 해석에 적용된 소프트웨어는 APSS로서 Fig. 1에 대략적인 구조를 나타내었다.

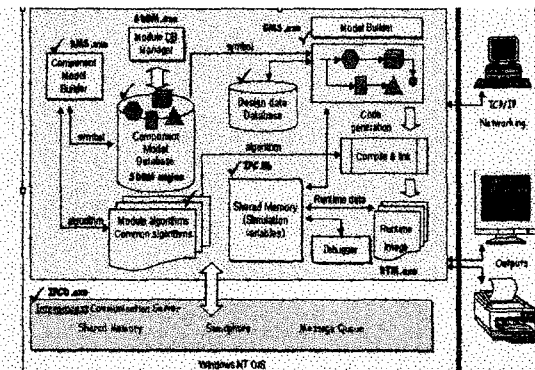


Fig. 1. APSS Structure

Fig. 1을 간략하게 설명하면 다음과 같다.

APSS는 모듈단위 모델링을 지원할 수 있도록 개발되었는데 이를 위하여 일반적인 발전 플랜트 동특성모델을 구성하는데 필요한 단위모듈들을 미리 만들어 두고 특정한 플랜트의 동특성 모델을 만들 때마다 해당 단위모듈들을 이용 상호 연결관계를 정의하고 설계데이터만 입력하면 되도록 하였다.

RMS(Resource Management System)는 발전 플랜트의 각 구성 기기(과열기, 터빈, 펌프 등)와 제어기(PID 등) 모듈(Module)을 개발하고 관리하는 기능을 가지고 있으며, GMS(Graphic Modeling System)는 RMS에서 작성된 단위모듈(Module)을 이용하여 특정 발전 플랜트의 동특성 프로세스 모델(Process Model) 및 제어모델을 작성할 수 있는 GUI(Graphic User Interface) 기능을 제공한다.

SDBM(Symbolic Database Manager)은 RMS에서 작성된 단위모듈들을 체계적으로 관리할 수 있는 모듈 데이터베이스 기능을 제공하며, 또한 GMS에서 동특성 모델 작성시에 단위모듈 라이브러리로써 사용된다.

RTM(Run-time Manager)는 GMS에서 작성된 동특성 모델의 실행시에 특정 시간에서의 모델 동특성 파라미터의 저장복구(snapshot), 동특성 모델의 실행(run), 정지(suspend), 실행재개(resume) 등 실행 시간 모델제어 기능과 각 단위모듈간의 데이터 전송 및 실행을 동기(Synchronization)시킨다.

IPCD(Inter-Process Communication Daemon)는 APSS의 통합환경에서 여러 개의 프로세스가 서로 원활한 통신을 할 수 있도록 공유메모리(Shared memory), 세마포어(Semaphore) 그리고 메시지큐(Message queue) 메커니즘을 제공한다.

APSS는 현재 Microsoft Windows 95/98/NT/2000 운영체제에서 동작될 수 있도록 개발되었다.

### 2.2 해석기 및 기계 모듈

기계 모듈(Process Module)이란 특정 복합화력 발전 플랜트를 모사한 프로그램을 뜻하지 않고 어떠한 복합화력 발전 플랜트라도 구성할 수 있도록 복합화력 발전 플랜트를 구성하고 있는 각각의 기기(가스터빈, 과열기, 증발기, 절탄기, 증기터빈, 펌프 등)들을 독립적으로 모사한 것을 의미하며, 해석기(Solver)란 각각의 기계 모듈들을 연결하여 특정 복합화력 발전 플랜트 모델을 작성할 수 있도록 해주는 로직을 말한다. 따라서 각각의

기계 모듈 및 해석기가 독립적으로 존재하기 때문에 상호간의 데이터 전달의 필요성이 존재하게 되며 APESS에서는 이를 만족하기 위하여 유동 인터페이스(Stream Interface) 및 정보 인터페이스(Signal Interface)를 개발하였다. Fig. 2에 본 연구를 통하여 개발한 해석기 및 기계 모듈간의 관계에 대한 개략적인 구조를 나타내었다.

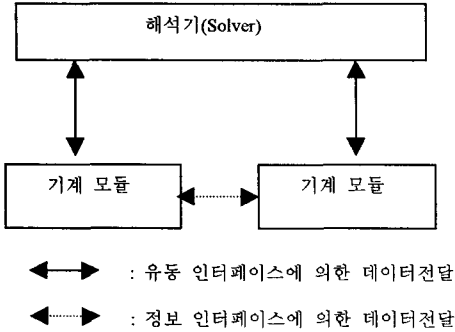


Fig. 2. The relation of solver and process module

### 2.2.1 해석기(Solver) 개발

해석기는 시스템의 에너지, 질량, 운동량 보존 방정식을 모사할 수 있으며, 본 해석기는 이상 유동에는 적용되지 않고 단상 유동만 고려한다.

#### 2.2.1.1 기본적인 개념 도입

첫째, 검사 체적의 질량, 에너지 보존 방정식을 처리하기 위하여 노드(Node)라는 개념을 도입하였고, 이는 해석기 자체에서 검사체적의 압력과 엔탈피를 계산하는 비경계 노드(Inner Node)와 외부에서 압력과 엔탈피가 입력이 되는 경계 노드(Boundary Node)로 구별된다.

둘째, 검사체적의 운동량 보존 방정식을 처리하기 위하여 간선(Branch)이라는 개념을 도입하였으며, 이것은 비경계 노드 사이에 연결된 간선인 비경계 간선(Inner Branch)과 적어도 한 부분이 경계 노드와 연결되는 경계간선(Boundary Branch)으로 구별된다.

#### 2.2.1.2 유체역학적 이론

임의의 노드 I(I=1~N, 여기서 N은 비경계노드의 수)에 대하여 도식적으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 여기서 노드 I로 노드 j에서 간선 k를 이용하여 유입되는 유량이 있을 수 있고, 노드 I에서

노드 j+1로 간선 k+1를 이용하여 유출되는 유량 및 노드 I로 외부에서 유입되는 유량(Leakage flow)이 있을 수 있다.

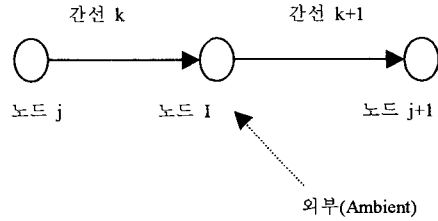


Fig. 3. Diagram of flow entering and leaving at Node I

Fig. 3을 기준으로 노드 I에 대하여 질량보존 방정식을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{d(\rho_i V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^{MP} INP_{ij} G_m + G_{leak} \quad (1)$$

또한, Fig. 3을 기준으로 노드 I에 대하여 에너지 보존 방정식을 적용하면 다음과 같이 된다

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho_i V_i h_i)}{dt} = & \sum_{j=1}^{MP} \text{Max}(INP_{ij} G_m, 0)(h_j + DH_m) \\ & + h_i \sum_{j=1}^{MP} \text{Min}(INP_{ij} G_m, 0) \\ & + \text{Max}(G_{leak} h_a, 0) \\ & + \text{Min}(G_{leak} h_i, 0) \\ & + TM_i(h_a - h_i) \end{aligned} \quad (2)$$

마지막으로 Fig. 3을 기준으로 간선 k에 대하여 운동량 보존 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$Ia_k \frac{dG_k}{dt} + G_k = \sqrt{\frac{Pin_k + HB_k - Pto_k}{RB_k}} \quad (3)$$

식 (3)에서 좌변의 첫째항은 압력의 변화에 따른 유량 변화의 지연 요소를 가미하기 위하여 사용하였다.

#### 2.2.1.3 수치해석적 이론

n개의 선형 수식들은 다음과 같이 행렬 형태로

표현될 수 있다.

$$Ax = b \quad (4)$$

여기서,

A 는 n x n 계수 행렬

x 는 n 개의 미지항에 대한 열벡터

b 는 최소한 한 개 이상의 0 이 아닌 요소를 갖는 알려진 벡터

실제 많은 계산에서 계산식들은 A 가 변하지 않는 서로다른 우측항에 대한 일련의 계산식들로 표현된다. 식 (4)의 해는 다음과 같이 역행렬을 이용하여 바로 구할 수 있다.

$$x = A^{-1}b \quad (5)$$

그러나, 기억장소의 구조 및 계산시간의 견지에서 볼 때 행렬 A 의 역행렬을 직접 계산하는 것은 효율적이지 못하다. 이것은 특히 희소행렬에 대하여 더욱 그러하다. 따라서 식 (4)의 해를 구하는 방법으로 본 시스템에서 적용한 방법은 다음과 같다.

$$L^{(n)}L^{(n-1)} \dots L^2L^{(1)}AR^{(1)}R^{(2)} \dots R^{(n-1)}R^{(n)} = I \quad (6)$$

여기서,

L 은 좌향 행렬

R 은 우향 행렬

I 는 단위행렬

수식 (6)을 간단히 하면 다음과 같다.

$$A^{-1} = L^{(n)}L^{(n-1)} \dots L^2L^{(1)}AR^{(1)}R^{(2)} \dots R^{(n-1)}R^{(n)} \quad (7)$$

## 2.2.2 기계 모듈(Process Module) 개발

### 2.2.2.1 과열기

#### a. 질량 보존식(Steam Side and Gas Side)

$$W_{s2} - W_{s1} + \frac{d(\rho V_s)}{dt} = 0 \quad (8)$$

$$W_{g1} = W_{g2}$$

#### b. 에너지 보존식(Steam, Gas and Metal side)

$$W_{s2}H_{s2} - W_{s1}H_{s1} + \frac{d(\rho V_s u)}{dt} - Q_1 = 0$$

$$W_{g2}H_{g2} - W_{g1}H_{g1} + Q_1 + Q_{loss} + V_s \frac{d(\rho_g h_g - P_g)}{dt} = 0$$

$$M_m C_{pm} \frac{dT_m}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (9)$$

### 2.2.2.2 증발기와 드럼 모듈

#### a. 질량보존식

$$\frac{d(\rho_s V_s)}{dt} = W_{wi} + W_{con} - W_{evh} - W_{exp} - W_{blow}$$

$$\frac{d[\rho_s(V_i - V_f)]}{dt} = W_{evh} + W_{exp} - W_{so} - W_{con} \quad (10)$$

#### b. 에너지 보존식

$$\frac{d(\rho V u)}{dt} = Q_i + \frac{1}{2} W_{wi} H_{wi} + W_r H_{do} - (W_r - \frac{1}{2} W_{wi}) H_{water}$$

$$- W_{so} H_{steam} - W_{blow} H_{water}$$

$$\frac{d(\rho_s V_s u_s)}{dt} = (W_r - \frac{1}{2} W_{wi}) H_{water} + \frac{1}{2} W_{wi} H_{wi} - W_r H_{do} \quad (11)$$

## 3. 폐열회수 보일러의 모델링

본 시뮬레이션의 목적은 가스터빈이 분당 10%/min, 20%/min 부하 증감발시 폐열회수 보일러의 각 드럼(고압/중압/저압 드럼 3개)의 수위변화가 어느 정도 인지를 파악하자는 것과 냉간기동시 폐열회수 보일러의 주증기온도, 재열증기 온도 및 각 드럼(고압/중압/저압 드럼 3개)의 압력이 어떻게 변하는지를 계산하는 것이다.

기계모델은 크게 폐열회수 보일러의 입구 배가스의 조건을 만들어주는 가스터빈 부분, 폐열회수 보일러 부분, 증기 터빈 부분으로 구성되어 있으며 폐열회수 보일러의 입구 급수조건을 만들어주는 응축기 부분은 일정하다고 가정을 하였다.

제어모델은 드럼수위를 조절하는 제어로직, 증기온도를 제어하는 로직 및 부하증감발 및 기동시뮬을 할 수 있도록 구성하였다.

## 4. 시뮬레이션 결과

본 연구는 2가지의 목적을 가지고 실시하였다. 가스터빈 부하를 10%/min 및 20%/min 으로 변화시킬때 드럼수위의 변화가 제한치(±100mm)안에 들어오는지의 유무와 냉간기동(Cold start)시 증기 터빈으로 들어가는 증기의 조건과 압력이 어떻게 변화할 것인가를 추정하여 수명계산의 입력자료를 만드는 목적으로 실시하였다.

#### 4.1 가스터빈 부하증감발 시험

시험조건은 Table 1 과 같다.

항 목	가스터빈 부하레벨(%)	부하변화율 (%/min)
부하증감발 시험	30 ~ 100	10
	30 ~ 100	20

Table 1. Load swing test condition

시험결과 고압/중압/저압 드럼의 수위변경이 제한치( $\pm 100\text{mm}$ )안에 들어와 가스터빈을 20%/min 으로 부하변화를 시키더라도 문제가 없다고 판단하였다.

가스터빈 부하를 10%/min 으로 변경했을때 드럼 수위의 변화와 20%/min 으로 변경했을때 드럼수위의 변화를 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타낸다.

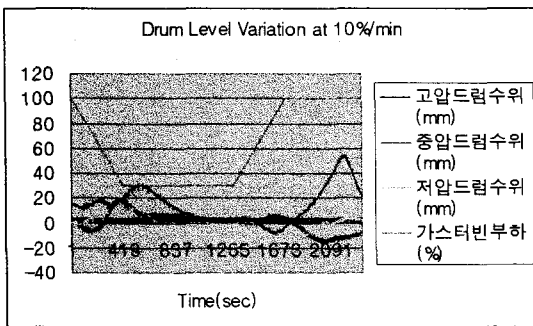


Fig. 4. Drum level variation at 10%/min

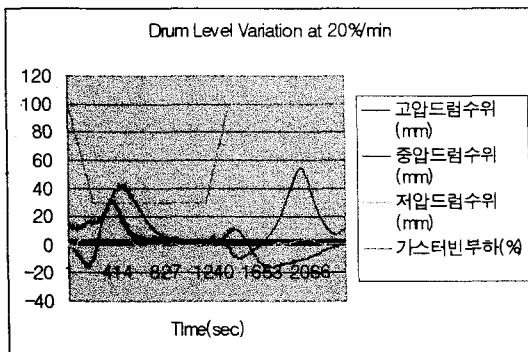


Fig. 5. Drum level variation at 20%/min

#### 4.2 냉간기동(Cold Start) 시험

냉간기동(Cold Start) 시험의 목적은 냉간기동시 증기터빈으로 들어가는 증기온도의 변화곡선과 각 드럼의 압력곡선을 이용하여 응력계산의 초기자료로 삼아 수명을 만족하는지의 여부를 계산하고자 함이다. Fig. 5 에서 Fig.7 까지 에 걸쳐 냉간기동의 결과 곡선을 나타내었다.

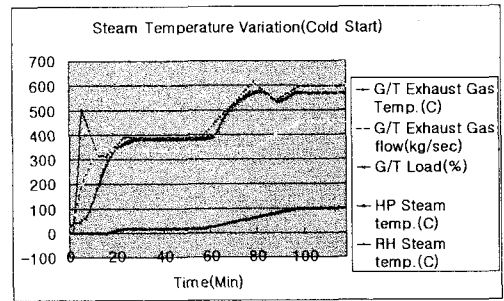


Fig. 5. Steam temperature variation at cold start

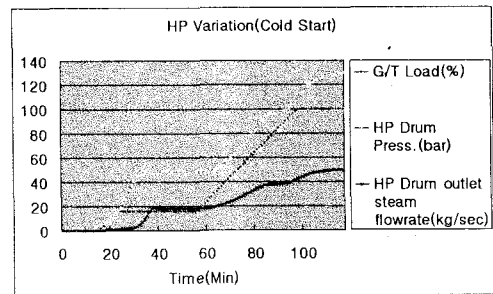


Fig. 6. HP part variation at cold start

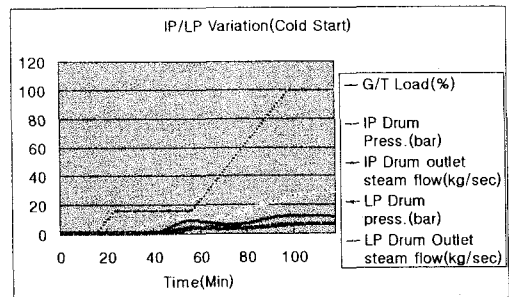


Fig. 7. IP/LP part variation at cold start

## 5. 결론

본 시뮬레이션을 통하여 당사에서 자체적으로

개발한 APESS 소프트웨어를 폐열회수 보일러의 동특성 시뮬레이션에 성공적으로 적용하였다. 또한 본 결과를 현재 설계에 적용하고 있으며 향후 실제 플랜트의 운전 결과와 비교검토 할 예정이다.

### 참고문헌

- (1) Gordon, J. Van Wylen and Richard E. Sonntag : "Fundamentals of Classical Thermodynamics", John Wiley & Sons, 3<sup>rd</sup> Ed.(1985)
- (2) Babcock & Wilcox Company : "Modular Modeling System(MMS): A Code for Dynamic Simulation of Fossil and Nuclear Power Plants", Electric Power Research Institute, Vol. 1 Theory Manual(1985)
- (3) J.P. Holman : "Heat Transfer", McGraw-Hill, 6<sup>th</sup> Ed.(1986)
- (4) 일본기계학회 : "JSME Steam Tables", 도서출판 신기술(1990)
- (5) Sam G. Dukelow : "The Control of Boilers", Instrument Society of America, 2<sup>nd</sup> Ed(1991)
- (6) Sadik Kakac : "Boilers, Evaporators and Condensers", John Wiley & Sons(1991)
- (7) 김무환, 김병주, 이상용 : "이상유동 열전달", 대영사(1993)
- (8) 발전부 : "펌프의 이론과 실제", 구미기술, 2<sup>nd</sup> Ed.(1994)
- (9) R.C. Martinelli and D.B. Nelson : "Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water", Transaction of the ASME(August, 1948)
- (10) J.R.S. Thom : "Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water", J. Heat Mass Transfer, Vol. 7, pp 709-724(1964)
- (11) Caseau, p. and p. Godin : "Mathematical modeling of power plants", IFAC Symposium, pp 139-143(1968)
- (12) Seiichi Matsumoto, Takahira Ohki, Hirofumi Furukoshi, Toshino Inoue : "Control System of Variable Pressure Operation Supercritical Once-Through Steam Generator", 화력 원자력 발전, Vol. 30, No. 9(1979)
- (13) Kazuyuki Okabe, Hiroshi Yamano, Isamu Nunokawa, Akira Takami : "Start-up System of IHI-FW Variable Pressure Operation Once-Through Steam Generator", 화력 원자력 발전, Vol. 31, No. 4(1980)
- (14) Li, T.D., B.H. Wu, R.P. Qin, and others : "Mathematical model for a 200MW boiler turbine unit", J. Tsinghua University, Vol. 20, No. 2, pp 1-14(1980)
- (15) Li, T.D. : "Mathematical model of the evaporating system with natural circulation", J. of Engineering Thermophysics, Vol. 2, No. 1, pp 8-13(1981)
- (16) Takahira Ohki and Eijiro Tanimura : "Fast-Cut-Back for Variable Pressure Operation Supercritical Once-Through Steam Generator", Ishikawajima-Harima Engineering Review, Vol. 21, No. 5(1981)
- (17) Takahira Ohki and Toshino Inoue : "Dynamic Characteristics and Control System for Variable Pressure Operation Supercritical Once-Through Steam Generator", Ishikawajima-Harima Engineering Review, Vol. 21, No. 5(1981)
- (18) Dohgi Soh, Seiichi Matsumoto, Tokahisa Ohki, Mutsumi Masuyama, Masuei Abe : "Operating Results of Supercritical Once-Through Boiler for Variable Pressure Operation", 화력 원자력 발전, Vol. 32, No. 1(1981)
- (19) Li, T. D. and others : "An algorithm for real time simulation of fluid network system", Modeling Simulation & Control, B, ASME Press, Vol. 10, No. 2, pp 55-64(1988)
- (20) Takahira Ohki, Toshino Inoue, Yukari Yazawa, Yukiko Ohsawa : "Development of Dynamic Simulation System for Energy Plant", Ishikawajima-Harima Engineering Review, Vol. 31, No. 5(1991)
- (21) Sulzer : "Sulzer Technical Report(Dynamic Behavior of Poryong #3, 4)"(1993)
- (22) Kohlenberg, M.W. and Wood, R.K. : "Pressure and flow transient response prediction for power plant piping networks", Simulation, Vol. 63, No. 4, pp 235-248(1994)
- (23) Li, T.D., Li, liqin, Wang, Hao : "A simulator for export to pakistan and a compact multi-model power plant simulator based on microcomputers and transputers", 일본 시뮬레이션학회 제 14 회 simulation technology conference, pp 257 ~ 262(1995)
- (24) 박정, 이기현, 양리밍, 인종수, 박석호, 권상혁, 오동한 : "고부하에서의 보일러 플랜트 부하변동 묘사를 위한 프로세스 모델 개발 및 적용", 한국에너지공학회지, 제 6 권 제 1 호(1997)
- (25) 이기현, 이동수, 조창호 : "플랜트 동특성 해석용 소프트웨어 개발 및 초임계압 관류형 보일러에의 적용", 대한기계학회 추계학술대회(2000)