

플랜트 동특성 해석용 소프트웨어 개발 및 초임계압 관류형 보일러에의 적용

이기현*, 이동수*, 조창호*

Development of Dynamic Simulation Software for Power Plant and its Application to Once-Through Boiler

KiHyun Lee, DongSu Lee and ChangHo Cho

Key Words : Plant Dynamic Simulation(플랜트 동특성 해석), System Relaxation(초기안정화), APSS(Advanced Plant Engineering & Simulation System)

Abstract

In the recent trend of electric power supply market, a variable pressure operation supercritical once-through steam generator is highlighted as a thermal power plant for cycling load because of its superiority in load regulation. Almost all thermal power plants of the future are expected to be variable pressure operation supercritical once-through units. APSS(Advanced Plant Engineering & Simulation System) is a dynamic simulation software for power plant which is under being developed by Korea Heavy Industries & Construction Co., Ltd. This paper present the introduction of APSS and the result of simulation for variable pressure operation supercritical once-through steam generator.

기호설명

- W_{s1} : 과열기 입구 증기 유량
- W_{s2} : 과열기 출구 증기 유량
- W_{g1} : 과열기 입구 가스 유량
- W_{g2} : 과열기 출구 가스 유량
- H_{s1} : 과열기 입구 증기 엔탈피
- H_{s2} : 과열기 출구 증기 엔탈피
- T_{g1} : 과열기 입구 가스 온도
- T_{g2} : 과열기 출구 가스 온도
- M_m : 메탈의 질량
- C_{pm} : 메탈의 비열
- T_m : 메탈 온도
- Q_{loss} : 가스 측 열손실
- Q_1 : 가스 측에서 메탈로의 열전달량
- Q_s : 메탈에서 내부 유체로의 열전달량
- K_2 : Node 2 의 Compressibility
- B_1 : Pipe Conductance

1. 서론

최근 국내에 건설되는 초대형 화력발전 플랜트 용 보일러의 대부분은 초임계압 관류형 보일러(Supercritical Once-Through Steam Generator)로서 변압운전 방식(Variable Pressure Operation)을 채택하고 있다. 이 보일러의 특징은 과거 드림형 보일러보다 부분부하 운전시 효율감소가 적으며, 부하변화시 빠른 부하추종성을 가진다는 것이다.

또한, 복합발전 플랜트용 배열회수 보일러(Heat Recovery Steam Generator)는 가스 터빈의 기동시간에 비해 그 기동시간이 상당히 오래 걸리므로, 복합 발전 플랜트 전체 기동에 걸리는 시간에 미치는 영향이 지대하다. 특히, 일일 기동정지(Daily Start & Shutdown) 운전을 하는 경우가 많아 최근에는 더욱더 짧은 기동시간이 요구되고 있으며, 이러한 요구에 대처하기 위하여 기존의 드림형 배열회수 보일러를 관류형으로 바꾸어 보일러 내부의 보유수량을 줄임으로서 기동시간을 단축하려는 연구가 국내에서는 한창 진행되고 있으며 해외 선진사의 경우에는 이미 실제 플랜트에 적용하기도 하였다.

* 한국중공업 기술연구원 기전기술연구실

따라서, 위와 같은 발전 플랜트의 과도상태, 즉 부하변화 및 기동과 같은 조건하에서 원하는 변화율 및 안전하고 신뢰성 있는 운전이 이루어지기 위하여 미리 발전 플랜트가 건설되기 전에 발전 플랜트를 시뮬레이션하는 분야의 중요성이 점차 강조되고 있는 실정이다.

발전 플랜트의 시뮬레이션 분야는 크게 발전 플랜트의 과도 상태 거동을 예측하기 위한 플랜트 각 구성 성분의 수학적 모델링 기술(Process & Control), 과도 상태에서 원하는 추종성 및 각 계통의 상태량 변화의 제한치를 만족할 수 있도록 하기 위한 제어기 파라미터 튜닝, 설계치로 주어지는 정적 정상상태에서 모사를 위한 초기조건(Initial Condition)을 만드는 System Relaxation 분야 등으로 나눌 수 있으며 국내에서는 다른 선진국에 비하여 그 연구 실적이 극히 미미한 실정이다.

동분야 선진국들의 기술개발 현황을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 프랑스 EdF(Electric de France)에서 개발된 SICLE 은 주로 플랜트의 수학적 모델링 및 열 유체 모사용 기본 소프트웨어로 사용되고 있으며, Stein Industry 가 독점적 영업권을 보유하고 있다. 이 소프트웨어는 상당히 세부적인 모사까지 가능하나 사용하기가 상당히 까다로운 것이 단점이다.

둘째, 핀란드의 VTT 에서 개발한 APROS 는 초기에 자동화 및 제어 시스템의 모델링 및 모사용 소프트웨어로 사용되어 오다가 최근 발전플랜트 모사용 프로세스 모델(Process Model)도 지원하고 있는 것으로 알려지고 있다.

셋째, 미국 CE 의 경우는 지난 70 년대 말부터 TBM(Transient Boiler Model), TBCM(Transient Boiler Circulation Model), TDFM(Three Dimensional Furnace Model), TPUM(Transient Pulverizer Model), TFPM(Transient Furnace Pressure Model)등으로 세분하여 독자적으로 개발하고 있고 현재도 계속하여 수정중인 것으로 알려지고 있으며, 모든 프로그램들이 각각 독립된 소프트웨어들로써 주로 국부적인 문제들을 중점적으로 다루고 있다.

넷째, 독일의 SIEMENS 역시 자사 고유 시스템을 자체적으로 연구, 개발중인 것으로 알려지고 있으며, 이는 자사의 계장(Instrument & Control)사업을 위한 특수 목적으로 개발되고 있으므로 범용성이 결여된 것으로 보여진다.

다섯째, 미국 TRAX 사의 ProTRAX 는 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발한 MMS(Modular Modeling System) S/W 를 근간으로 하고 있으며 주로 화력발전 플랜트의 프로세스/제어 모델링 및 시뮬레이션을 위한 소프트웨어로써

윈도즈 NT 를 기반으로 하고 있다.

여섯째, 중국 청화 대학도 초기에 Unix 를 기반으로 하는 시뮬레이션 소프트웨어에서 현재 윈도즈 NT 를 기반으로 한 시뮬레이션 소프트웨어가 거의 개발완료 단계에 있는 것으로 알려지고 있으며 본 소프트웨어를 이용하여 지역 난방 시스템 해석, 발전 플랜트 훈련용 시뮬레이터 제작 등의 사업을 수행하고 있다.

마지막으로, 미국의 GSE 사도 삼성데이터 시스템과 공동으로 국내의 원자력 발전용 훈련용 시뮬레이터 과제를 수행하였으며 자체적인 소프트웨어를 보유하고 화력 발전소도 해석이 가능한 것으로 알려지고 있다.

본 논문에서는 약 7 년간에 걸쳐 국내 독자적으로 개발된 발전 플랜트 동특성 해석 및 모사용 소프트웨어인 APESS(Advanced Plant Engineering & Simulation System)와 소프트웨어의 신뢰성을 확보하기 위하여 실시한 예로서 500MW 급 화력 발전 플랜트용 보일러인 태안화력 #5, 6 호기의 동특성 해석에 대하여 소개하고자 한다.

2. 소프트웨어 구조

태안화력 #5, 6 호기의 동특성 해석에 적용된 소프트웨어는 APESS 로서 Fig.1 에 대략적인 구조를 나타내었다.

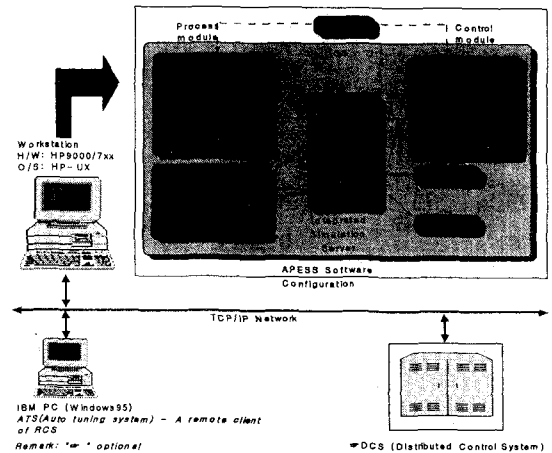


Fig.1 APESS 구조

Fig. 1 을 설명하면 아래와 같다.

RMS(Resource Management System)는 발전 플랜트의 각 구성 성분(과열기, 터빈, 펌프 등)과 제어

기(PID 등)의 모듈(Module)을 개발하고 관리하는 기능을 가지고 있다.

PMS(Process Modeling System)는 RMS 에서 작성된 모듈(Module)을 이용하여 특정 발전 플랜트, 즉 태안화력 # 5, 6 호기와 같은 프로세스 모델(Process Model)을 GUI(Graphic User Interface)상에서 작성하는 기능을 제공한다.

CMS(Control Modeling System)는 PMS 와 그 기능이 유사하며 특정 발전 플랜트의 제어 모델(Control Model)을 작성하는 기능을 제공한다.

APESS 는 CMS 를 사용하여 제어모델을 소프트웨어적으로 구현할 수도 있으며, 실제의 제어 시스템인 DCS(Distributed Control System) 와 연결할 수도 있다.

그리고, APESS 는 기계모델과 제어모델이 서로 정보를 교환하며 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 해주는 시뮬레이션 엔진으로서 ISS(Integrated Simulation Server), 시뮬레이션 데이터의 시각화(Visualization)를 지원하는 RTV(Real Time Viewer), 실제의 DCS 시스템과 연결될 수 있도록 하는 CSM(Control System Manager) 및 각종 제어로직의 튜닝을 위하여 제공되는 ATS(Auto Tuning System) 등으로 구성되어 있다.

3. 태안 #5, 6 호기 모델링

태안 #5, 6 호기 동특성 해석을 위한 모델은 크게 플랜트를 구성하는 주요기기들로 구성된 기계 모델과 플랜트 제어설비에 해당하는 플랜트 제어 계통의 모델로 구성된다.

3.1 절 기계 모델

3.1.1 모델링 대상

동특성 해석을 수행하는 대상 플랜트인 태안화력 #5, 6 호기를 간략하게 Fig.2 에 나타내었다.

Fig.2 를 간단히 소개하면 보일러 형태는 IHI-FW SOVR(Supercritical Once-Through and Reheater)이며 갑작스런 주증기 온도의 변화에 대비하여 3 단 스프레이를 설치하였다. 또한 아임계압 상태에서 물과 증기를 분리하는 장치인 기수분리기(Separator)가 있으며 재순환 운전을 위하여 기수분리 탱크(Separator Tank)가 설치되어 있다. 운전방식은 변압운전을 하고, 약 30%NR 이상에서는 관류 운전 모드로, 그 이하에서는 재순환 펌프(BRP)가 운전되는 재순환 모드로 작동되는 정격시 고압 터빈으로 들어가는 증기가 초임계압 상태인 500MW

급 발전 플랜트이다..

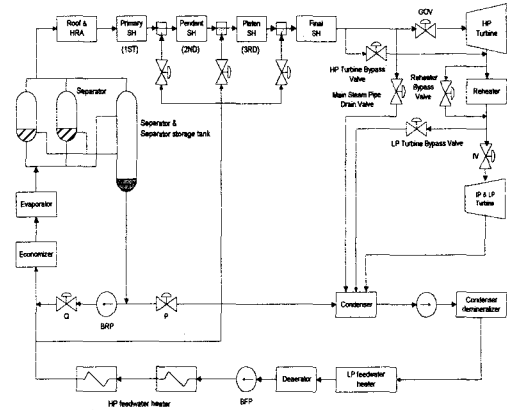


Fig.2 Schematic Diagram of Taean #5, 6

3.1.2 기계 모델링의 기본 이론

태안 #5, 6 호기를 수학적으로 묘사하기 위해서 채택한 방식은 모듈러 모델링(Modular Modeling) 방식이며, 본 방식은 발전 플랜트를 이루고 있는 구성 기기(예 : 과열기, 터빈, 펌프 등)들의 특성을 수학적인 수식으로 충실히 표현한 모듈(Module)을 개발하고, 이러한 모듈(Module)들을 서로 연결하여 묘사하고자 하는 발전 플랜트의 모델(Model)을 만드는 기법을 말한다. 모듈러 모델링 방법은 어떻게 발전 플랜트의 구성 기기들의 특성을 적절히 묘사하여 단위 모듈(Module)을 개발하고 이러한 단위 모듈들을 서로 연결하여 원하고자 하는 모델을 만들 것인가 하는 두가지 분야의 기술개발을 요구한다. 아래에 태안 #5, 6 호기의 모듈중 하나인 과열기 모듈과 모듈들을 서로 연결을 할 때 필요로 하는 이론(여기서는 Flownet 이라 명명한다)에 대하여 설명한다.

(1) 과열기(Superheater) 모듈 관련 이론

a. 질량 보존식(Steam Side and Gas Side)

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

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

b. 에너지 보존식(Steam, Gas and Metal side)

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

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

$$M_m C_{pm} \frac{dT_m}{dt} = Q_1 - Q_s$$

(2) Flownet 이론

유체역학 네트워크에서의 Flownet 방식은 Fig. 3에 간단한 예를 들어 설명한다. 노드 2와 3에 대하여 질량 보존식 및 운동량 보존식을 세우면 다음과 같다.

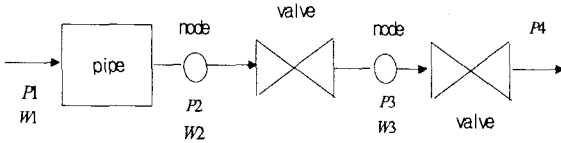


Fig. 3 A simple Network

$$K_2 \frac{dP_2}{dt} = W_1 - W_2$$

$$K_3 \frac{dP_3}{dt} = W_2 - W_3$$

$$W_1 = B_1(P_1 - P_2)$$

$$W_2 = B_2(P_2 - P_3)$$

$$W_3 = B_3(P_3 - P_4)$$

위의 식을 조합하면 아래와 같은 형태로 표시할 수 있으며 각각의 인자를 구할 수 있게 된다.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$$

Flownet 방식에 따라 노드 압력은 위의 행렬을 풀면 알게 되고 노드의 수가 많아지면 행렬의 차수도 증가하므로 이를 풀이하는데 있어서는 특별한 기법이 필요하게 된다.

3.2 질 제어 모델

태안화력 #5, 6 호기의 APC(Automatic Plant Control) Logic 을 충실히 묘사하였다. 아래에 일부 제어 로직의 개념을 설명하였다.

3.2.1 주증기 압력 제어계

주증기 압력은 발전기 출력지령에 따라 설정되도록 하였으며, 압력 설정치는 부하변화시 압력설정만이 선행하여 보일러 마스터가 과수정하는 것을 방지하기 위하여 보일러의 시정수에 해당하는 1 차 지연회로를 거치도록 하였다. 부하상승 중에

만약 주증기 압력 설정치가 실제압력에 비해 6 기압 보다 크게 선행하는 경우에 있어서는 주증기 압력 편차 적분기에서 보일러 입력지령(BID : Boiler Input Demand)을 증가시키고, 조속기(Governor)는 닫히거나 유지되게 하여 결국 보일러에 공급되는 연료 및 급수량은 늘어나고 발전기 출력의 응답은 느려지게 되도록 모델링을 하였다.

3.2.2 주증기 온도 제어계

통상 관류운전 모드에서 주증기 온도는 기본적으로 수연비(Water / Fuel Ratio)에 의하여 제어되도록 하였으며, 재순환 운전 모드에서는 스프레이 유량에 의하여 제어되도록 하였다.

또한 수연비 제어로직에서는 주증기 온도 및 화로 출구 증기 온도등에 따라 급수에 대한 연료비를 증감하여 주증기 온도의 선행제어를 실시하도록 모델링하였다.

3.2.3 재열증기 온도 제어계

재열증기 온도는 기본적으로 재열기 쪽으로 흐르는 배가스 유량을 조절할 수 있는 탬퍼로 조절하고, 부하변화시의 과도한 온도변화에 대해서는 재열기 바이패스 밸브에 의한 제어 및 비상용 재열기 스프레이를 이용하여 제어할 수 있도록 모델링하였다.

4. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션은 태안 #5, 6 호기와 유사한 형태의 발전소인 일본의 Nanao 발전소 시운전 자료를 가지고 시뮬레이션 결과를 대체적으로 비교하려고 하였으므로 기본적으로 일본의 Nanao 발전소에서 행한 시운전 수순과 유사하게 다음과 같은 수순으로 실시하였다.

4.1 질 정특성 시험

본 시험의 목적은 프로세스 모델(Process Model)의 신뢰도를 확보하기 위하여 실시하였으며, 시험 방법은 100% NR, 75% NR, 50% NR, 30% NR 의 4 개 부하대에서 성능계산 프로그램의 결과와 프로세스 모델 단독으로 시뮬레이션 수행시 수렴치를 비교하여 에러가 원하는 값 이하가 되는 지를 확인하였다. 그 중에서 중요한 데이터만 결과를 Table. 1에 나타내었다.

부하	항목	정특성	동특성
100% NR	주증기 압력(Mpa)	25.037	25.041
	주증기 유량(kg/s)	409.89	409.955
	주증기 온도	541	541.097
	재열증기 온도	541	541.557
	발전기 출력(MW)	500	500.094
75% NR	주증기 압력(Mpa)	20.863	20.8674
	주증기 유량(kg/s)	296	296.05
	주증기 온도	541	540.833
	재열증기 온도	541	541.899
	발전기 출력(MW)	375	375.098
50% NR	주증기 압력(Mpa)	14.145	14.1452
	주증기 유량(kg/s)	195.42	195.35
	주증기 온도	541	540.46
	재열증기 온도	541	540.349
	발전기 출력(MW)	250	249.747
30% NR	주증기 압력(Mpa)	8.2073	8.2106
	주증기 유량(kg/s)	121.69	121.642
	주증기 온도	541	539.282
	재열증기 온도	530	530.026
	발전기 출력(MW)	150	149.851

Table 1. 정특성 시험 결과

시험결과 에러가 그리 크지 않은 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

4.2 절 부하변화(Load Following) 시험

부하변화 시험에서는 보일러에 대한 부하요구량에 따른 보일러의 부하 추종성 및 부하 수렴성을 분석하였다.

4.1.1 시험조건

- (1) 관류운전 모드에서 실시하였다.
- (2) 부하변화율은 Table 2.와 같이 설정하였다.

항 목	부하레벨 (%NR)	부하변화율 (%NR/MIN)
Load Following	30 ~ 50	3
	50 ~ 100	5

Table 2. 부하변화 시험조건

4.1.2 시험 결과

부하변화 시험의 일부인 75%NR(375MW)에서 100% NR(500MW) 사이의 결과를 Table 3, Fig. 4, Fig.5 에 나타내었다.

시험결과 압력 및 출력시정수는 120 초로 나타났으며 부하변화 시험의 제한치인 발전기 출력 편

차($\Delta MW, \pm 30MW$), 주증기 압력 편차($\Delta TP, \pm 0.6 Mpa$), 주증기온도 편차($\Delta MST, \pm 8 C$), 재열증기 온도 편차($\Delta RST, \pm 8 C$)를 만족하면서 부하변화율 5% NR/MIN 를 만족하였다. 따라서 5% NR/MIN 으로 운전이 가능한 것으로 판단된다.

부하변화 항목	75% NR 100% NR	100% NR 75% NR
부하변화율	5%/MIN	5%/MIN
압력시정수(초)	120	120
출력시정수(초)	120	120
$\Delta MW(MW)$	+7.5 / -15.1	+8.7 / -2
$\Delta TP(Mpa)$	+0.53 / -0.56	+0.51 / -0.58
$\Delta MST(C)$	+2.5 / -5.7	+8.0 / -2.6
$\Delta RST(C)$	+5.9 / -3.6	+4.5 / -4.7

Table 3. 부하변화 시험 결과

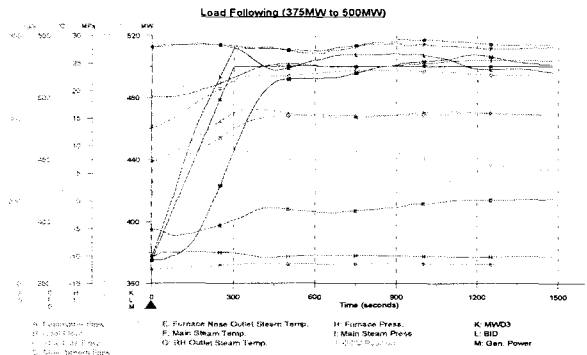


Fig. 4. Load Following(375MW -> 500MW)

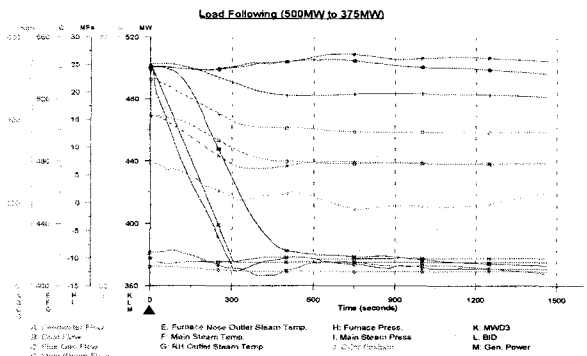


Fig. 5 Load Following(500MW -> 375MW)

5. 결론

본 시뮬레이션을 통하여 당사에서 자체적으로 개발한 APSS 소프트웨어를 이용하여 500MW 급 석탄화력 발전소의 시뮬레이션에 성공적으로 적용

하였다. 현재까지 본 결과를 태안 #5, 6 호기와 유사한 발전소의 각종 시운전 자료, 해외 시뮬레이션 전문가 및 운전 전문가에 본 결과의 정도를 의뢰한 결과 양호하다는 판정을 받았다.

향후 본 시뮬레이션을 통하여 나온 제어 변수 값을 이용하여 태안화력 #5, 6 호기의 시운전 참여를 할 예정이며, 시뮬레이션 결과와 시운전 결과의 상세한 비교를 수행할 예정이다.

또한, 선진국들에 의하여 개발된 소프트웨어와의 비교, 공동협력, 다양한 실제 프로젝트의 수행 및 훈련용 시뮬레이터 사업 수행을 통하여 지속적으로 본 소프트웨어의 신뢰도를 높일 예정이다.

후 기

태안화력 #5, 6 호기의 동특성 해석은 한국전력에 제출된 자료이며, 실제 프로젝트를 수행하면서 도출된 결과임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Gordon, J. Van Wylen and Richard E. Sonntag : "Fundamentals of Classical Thermodynamics", John Wiley & Sons, 3rd 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, 6th Ed.(1986)
- (4) 일본기계학회 : "JSME Steam Tables", 도서출판 신기술(1990)
- (5) Sam G. Dukelow : "The Control of Boilers", Instrument Society of America, 2nd 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, 2nd 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, 양리핑, 인종수, 박석호, 권상혁, 오동환 : "고부하에서의 보일러 플랜트 부하변동 묘사를 위한 프로세스 모델 개발 및 적용", 한국에너지공학회지, 제 6 권 제 1 호(1997)