

# Shoiba 산업용 보일러의 range mode 운전시 turbine trip 모사

이치환\* · 김성호\* · 조창호\*

## The simulation of turbine trip on range mode of Shoiba desalination plant

Chi Hwan Lee, Sung Ho Kim and Chang Ho Cho

**Key Words :** Shoiba boiler(쇼아이바 보일러), ProTRAX,(프로 트렉스), turbine trip(터빈 고장), range mode(연속모드)

### Abstract

This simulation shows turbine trip on range mode, combined operation of 4 boilers and 5 turbines, for shoiba desalination plant which is being operated in Saudi Arabia. In this model, unit master controller controls load demand, fuel and air flowrate to be consumed during operating of the plant. Feedwater controller controls drum level to compensate feedwater with superheater steam flow. This analysis was performed by constructing a dynamic model of the plant using ProTRAX and running it through the appropriate.

#### 기호설명

$Q_{drum}$	: conductive heat transfer through drum
$L$	: drum length
$k$	: thermal conductivity of drum metal
$T_i$	: temperature at inner surface of drum
$T_o$	: temperature at outer surface of drum
$r_i$	: inner drum radius
$r_o$	: outer drum radius
$dT_{metal}$	: metal temperature derivative
$M$	: drum metal mass
$C_p$	: drum metal specific heat

### 1. 서론

현재 사우디 아라비아에 설치되어 시운전중인 Shoiba boiler의 동적 거동특성 해석에 있어 본 논문은 4대의 보일러에 4대의 터빈이 연결되어 있고 1대의 터빈이 common header를 통해 4대의 보일러에 연결된 range mode 운전시 보일러와 연결된 1대의 터빈 trip에 대한 해석 결과이다. 해석

에 있어 주안점은 고압단의 safety valve의 개폐여부 및 터빈 trip시 빠른 응답을 가지며, plant 운전이 가능한 load ramp ratio를 설정하는 것이었다. 모사에 있어 운전 절차에 따라 각기 다른 방식의 모사 방법을 적용해 결과를 산출하였다. 또한, 유효한 제어를 위해 실제 현장에 적용된 제어기를 모사하였으며, 전기적인 모듈 및 일부 BOP (Balance of plant) 등은 모델 작성에서 제외되었다.

### 2. HSC type 보일러의 모델링

#### 2.1 HSC type 보일러

재열기가 설치되지 않는 HSC (Hanjung -형 두중-Single drum Circulation) 보일러는 발전소와 다량의 증기가 필요한 대형 산업용 플랜트에 적합하다. 상부 지지 구조로 단일 드럼, 자연 순환 방식이며 오일 또는 가스를 사용한 전면 연소 방식을 채택했다. 연소로 벽, 대류영역 수관벽, 헤더, 질탄기 및 과열기 등 압력부의 완전 배수가 가능하며, 다만 대류형 과열기는 연소로의 복사열로부터 손상을 최소화하기 위해 대류영역에 배치한 형태의 보일러이다.

본 모사에 적용된 담수 플랜트용 HSC Type 보일

\* 두산중공업 기술연구원 시스템진단/제어연구팀

리의 외관 및 사양은 다음과 같다.

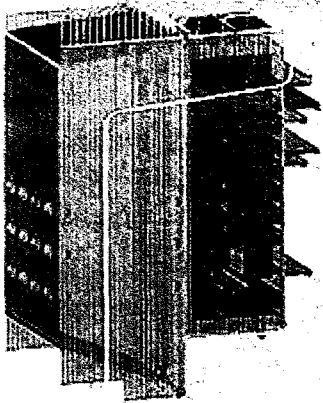


Fig. 1 Nonreheating HSC Type boiler

Table. 1 Specification of Nonreheating HSC Type boiler

TYPE		NATURAL CIRCULATION WITH DRUM
CAPACITY		100MW
FUEL		HEAVY OIL /CRUDE OIL
HEAT ABSORPTION	WALL	FRONT WW FRONT SIDE WW FRONT REAR WW CENTER WW B.P SIDE WW B.P REAR WW
	SH	LTSH, MTSH, HTSH
	ECO	ECO, ECO HANGER
DRUM PRESSURE		102BAR
HTSH OUTLET STEAM TEMPERATURE		523℃

### 2.1.1 Model scope

본 모사에 적용된 모델인 Shoaiba boiler는 크게 연소가 일어나는 furnace와 flue gas가 이동하는 backpass로 구분된다. Furnace 내에서 연소에 의해 생성된 flue gas는 screen wall을 통하여 backpass로 이동된다. Furnace는 연소를 위한 버너와 연소에 의해 발생되어진 heat flux를 흡수하는 water wall들로 구성되며, backpass는 flue gas로부터 열을 흡수하고 다시 드럼으로 이어지는 각각의 wall들과 backpass 측에 위치하여 flue gas로부터 열을 흡수하는 Economizer, Low Temperature Superheater, Middle

Temperature Superheater, High Temperature Superheater 등으로 이루어져 있다. 급수는 ECO를 거쳐 hanger tube를 따라 드럼으로 이동하며, 드럼에서 분리된 증기는 과열기들을 지나면서 고온, 고압의 과열증기가 된다.

### 2.1.2 Custom code

본 논문에 적용된 Shoaiba model은 ProTRAX가 가지고 있는 기본적인 code를 사용하여 작성되었으며, 계산에 사용된 기본적인 mass, momentum, energy 보존식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial M}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial(w\bar{V})}{\partial x} + \frac{\partial(M\bar{V})}{\partial t} = -g_c \left[ \frac{\partial(pA)}{\partial x} dx + \tau_w P_w dx + W \sin \theta \right]$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \bar{V} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{k}{\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

$$- \frac{(q' - P')}{\rho A} = 0$$

### 2.1.3 Drum metal temperature

드럼은 두꺼운 절연체로 균일하게 덮혀 있다고 가정하였으며, 드럼 내부 온도는 liquid water temperature, 대기 온도는 25C, natural convection coefficient는 드럼의 외부 온도를 통해, 드럼 wall을 통한 conductive heat transfer는 드럼 내부와 외부 온도차를 통해 계산되었다. 또한, 절연체를 통한 conductive heat transfer는 드럼 내외부 절연체간의 온도차를 통해 계산되었다.

$$\frac{q_{\text{drum}}}{L} = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right)} (T_i - T_o)$$

드럼 metal과 절연체의 온도는 energy balance를 통해 계산되었다.

$$\frac{dT_{\text{metal}}}{dt} = \frac{q_{\text{drum}} - q_{\text{insulation}}}{MC_p}$$

### 2.2 Heat balance

Heat balance를 통해 inlet, outlet steam condition, gas condition 등이 정의된다. 이는 설계값에 부합하는 값들을 가져야만 한다.

### 2.3 Model parameterization

Model parameterization은 2가지의 data를 입력함으로써 이루어진다. Tube size, metal masses, pump head curves, valve stroke times, etc. 등의 physical data

와 full load pressures, flows, temperatures, compositions 등의 operating data의 입력이 필요하게 된다.

### 2.4 Range mode

Unit mode 운전은 1 boiler/ 1 turbine 으로 구성되어 운전되며, range mode(4 boiler/ 5 turbine)는 정상상태의 경우 85 bar 의 common header 를 통해 4 대의 보일러에서 발생된 고온, 고압의 증기중 일부가 보일러가 없는 터빈을 구동하는 운전 방식을 말한다. Unit mode 운전시의 열정산과 range mode 상의 열정산은 운전방식의 차이로 인하여 각기 다른 열정산 값을 가진다.

### 2.5 Model control

모사에 적용된 주요한 제어기는 unit master controller(fuel and air flowrate, load demand control), drum level, HP / MT superheater steam temperature, bypass pressure 를 제어 하기 위한 controller 가 모사에 적용되었다.

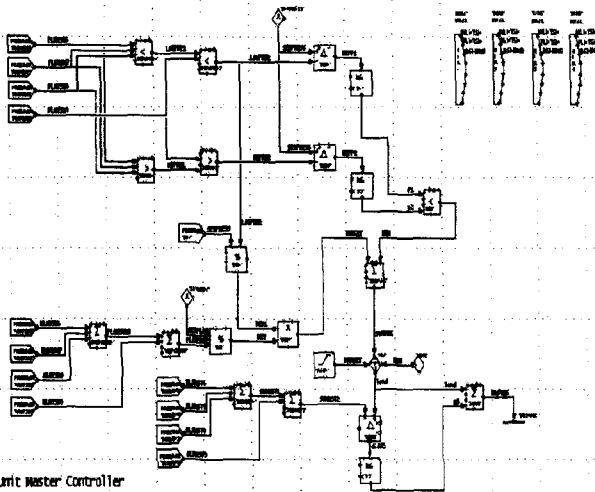


Fig. 2 Unit master controller

## 3. 모사

### 3.1 모델 검증

모델의 신뢰성을 검증하기 위해 unit mode 에 대한 정상(MCR) 상태에서 해석값들과 실제값을 비교하고, 각 load(30%, 50%, 100%)에 대한 출력에서의 주요변수의 비교는 아래 표 3 과 같다.

Table. 3 Design and simulation values for major components

Variable	30%		50%	
	Design	Model	Design	Model
Drum pressure	86.4	86.4	87.7	87.7
Steam flow from boiler	59.6	59.4	99.1	99
Steam temperature at Shtr 2 outlet	457	457	460	461
Steam temperature at Shtr 3 outlet	516	516	523	522
Fuel flow	3.9	3.9	6.3	6.3
Spray flow to Attemp.1	0	0	0	0
Spray flow to Attemp.2	0	0	0.24	0
Economizer inlet temperature	185	184	201	204
Variable	100%		BMCR	
	Design	Model	Design	Model
Drum pressure	89.8	89.8	92.6	92.6
Steam flow from boiler	159.3	159.3	181.3	181.3
Steam temperature at Shtr 2 outlet	473	473	482	482
Steam temperature at Shtr 3 outlet	523	523	523	523
Fuel flow	9.7	10.2	12.1	12.1
Spray flow to Attemp.1	6.0	6.0	11.7	11.7
Spray flow to Attemp.2	2.9	2.7	5.6	5.6
Economizer inlet temperature	225	228	226	226

### 3.2 모사 방법

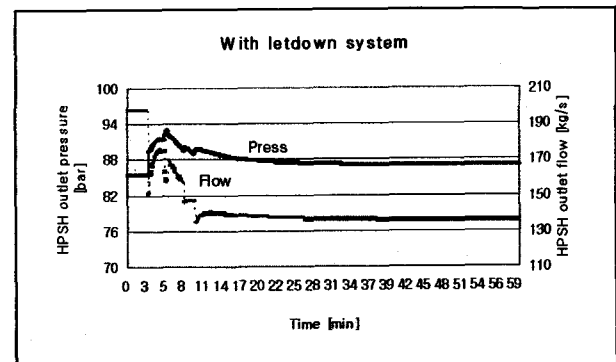
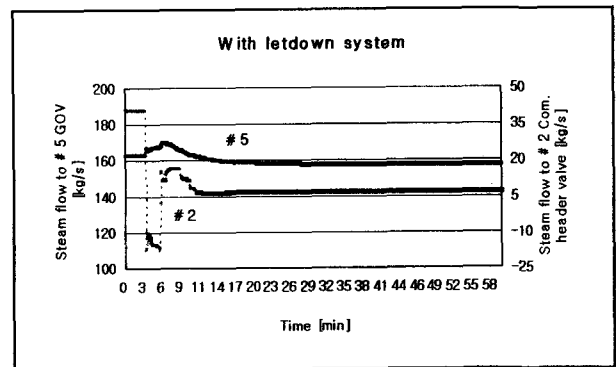
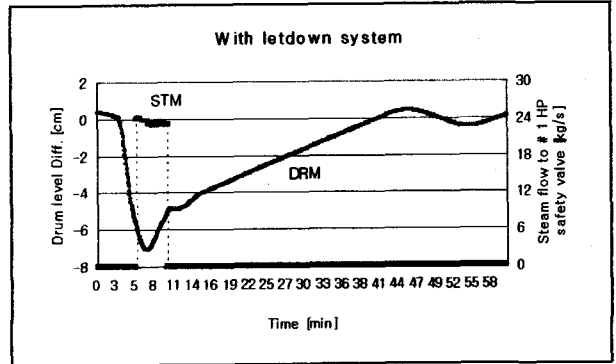
Shoaiba boiler 의 range mode 운전시 turbine trip - MCR to 100%NR with & without letdown system 은 아래의 4 가지 방법에 따라 개별 수행되었다.

Table. 4 Turbine trips for 4 different methods

모사	운전 방법
1. With letdown	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Steady state for 180 sec</li> <li>- Trip #1 TBN</li> <li>- Open #1,2 HP bypass valves</li> <li>- Set ramp ratio with 45%/min down to 100%NR manually</li> <li>- Tune gains for air &amp; feedwater, fuel flow controller</li> <li>- Close #1, 2 HP bypass valves when 100%NR load demand is achieved at UMC</li> </ul>
2. W/O letdown	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Steady state for 180 sec</li> <li>- Trip #1 TBN</li> <li>- Set ramp ratio with 45%/min down to 100%NR manually</li> </ul>

	- Tune gains for air & feedwater, fuel flow controller
3. With letdown & Close 85 bar common header valves of # 2,3,4 BLR	- Steady state for 180 sec - Trip #1 TBN - Open #1,2 HP bypass valves - Close 85bar common header valves of # 2,3,4 BLR - Set ramp ratio with 45%/min down to 100%NR manually - Tune gains for air & feedwater, fuel flow controller - Close #1, 2 HP bypass valves when 100%NR load demand is achieved at UMC
4. With letdown & Close 85 bar common header valves of # 2,3,4 BLR	- Steady state for 180 sec - Trip #1 TBN - Open #1,2 HP bypass valves - Close 85bar common header valves of # 2,3,4 BLR - Set ramp ratio with 45%/min down to 100%NR manually - Tune gains for air & feedwater, fuel flow controller - Close #1, 2 HP bypass valves when 100%NR load demand is achieved at UMC - Modification of valve stroke time

또한, 열려있는 # 1,2 BLR 의 HP bypass valve 의 open/close stroke time 을 줄이게 되면 HP bypass valve 는 열리지 않게 되나 # 1 BLR 의 HTSH steam flow 는 # 1 BLR 의 pressure drop 과 병행하여 100%NR steam flow 의 85.15%에 해당하는 steam flow 를 형성하였다.



### 3.2.1 모사 방법에 따른 해석 결과

모사 1 ~ 4 는 MCR to 100%NR for crude oil(45%/min ramp ratio)로 TBN trip on range mode with & without letdown(bypass) system 을 수행하였으며, 현장의 예상(steam flow to 85 bar common header  $\approx 0$  kg/s)에 따라 TBN trip on range mode with letdown system 의 경우 # 2,3,4 BLR 의 85 bar common header valve 를 닫고 모사 3, 4 를 수행하였다.

모사 1, 2 는 현장의 예상과는 달리, trip 되지 않은 85bar common header valve 로 흐르는 유량이 줄어들기는 하나  $\sim 0$  kg/s 가 되지 않음은 현 모델을 통해 확인되었다. 하지만, #10 BLR 로 유입되는 steam flowrate 은 100%NR 의 조건을 만족하였다.

모사 3 은 현장 예상에 따라 # 2,3,4 BLR 의 85 bar common header valve 를 닫고 ( $\approx 0$  kg/s)모사를 수행하였으나, # 1, 2 BLR 의 HP safety valve 는 열리지 않고 # 3, 4 BLR 의 HP safety valve 가 HTSH 압력 증가로 인해 열리게 되었다.

모사 4 의 HP safety valve 가 열리지 않는 조건은 모사 3 에 비해 # 2,3,4 BLR 의 85 bar common header valve 의 open/close stroke time 을 늘리고

Fig. 3 Turbine trip with letdown(MCR to 100%NR)

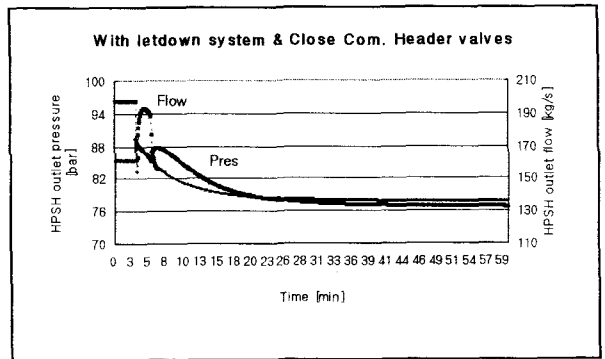
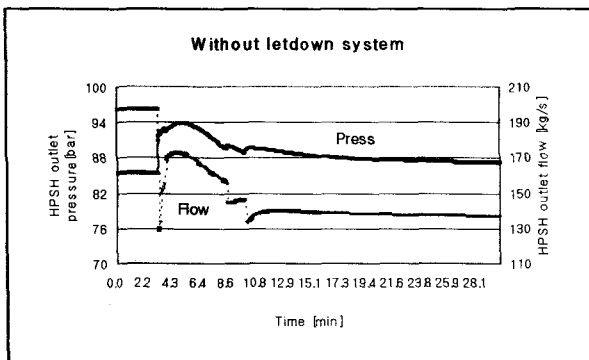
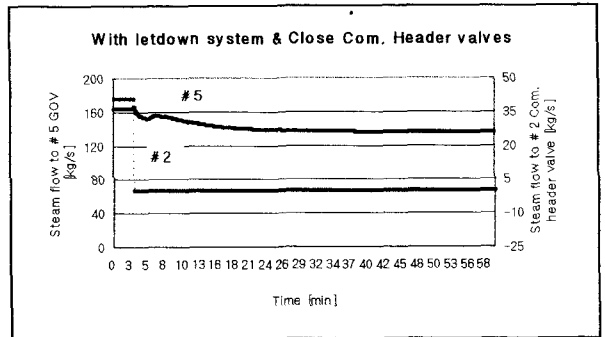
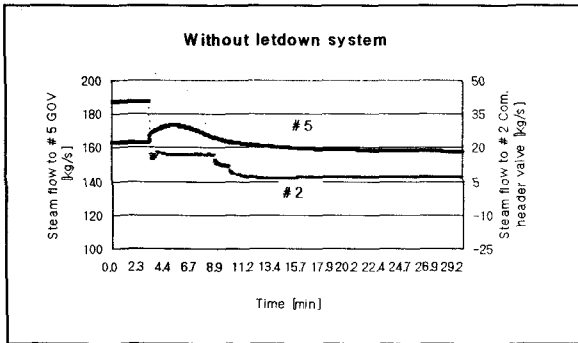
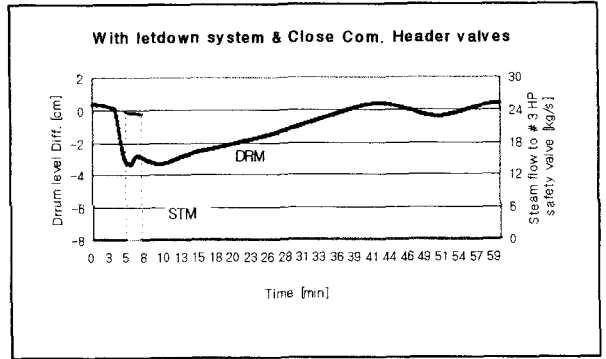
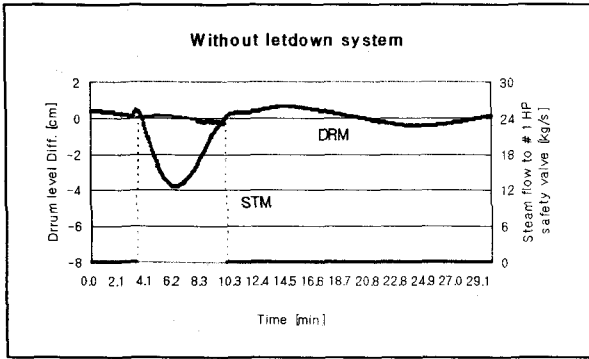


Fig. 4 Turbine trip without letdown(MCR to 100%NR)

Fig. 5 Turbine trip with letdown(MCR to 100%NR)

#### 4. 결론

이번 해석에 있어 주안점은 고압단의 safety valve의 개폐여부 및 터빈 trip 시 빠른 응답을 가지며, plant 운전이 가능한 load ramp ratio를 설정하는 것이었다. 상기 해석을 통해 얻을수 있는 조건은 아래와 같다.

- ✓ 45%/min load ramp ratio
- ✓ HP bypass open/close stroke time (3 & 30 sec)
- ✓ 85 bar common header valve open/close stroke time (100 sec)

상기 조건 적용시 터빈이 trip된 #1 보일러의 출력이 100%NR에 미치지 못했다. 보일러의 출력을 증가시키기 위해선 load demand(100%NR)보다 높은 load demand가 요구되어야 할 것으로 보인다. 본 논문을 통해 현장에서 range mode로 운전시 참고 자료로 활용될 수 있을 것이라 판단되며, 운전 결과와의 비교를 통해 모사에 대한 검증이 이루어질 예정이다.

#### 참고문헌

- (1) Sam G. Dukelow, "The control of boilers", 2<sup>nd</sup> Ed, ISA, 1991
- (2) C. Maffezzoni, "Issues in modelling and simulation of power plant," IFAC Control of Power Plant and Power System, 1992.
- (3) E. D. Grimison, "Correlation and Utilization of New Data on Flow Resistance and Heat Transfer for Cross Flow of Gases over Tube Banks," Trans. ASME, 1937.
- (4) H. N. Sharan, "Correlations for Heat Transfer by Non-luminous Radiation between Boiler Flue Gases and Grey Walls," SULZER Technical review, 1963
- (5) ProTRAX, "Analyst's Instruction manual vol. 1,2", 1997

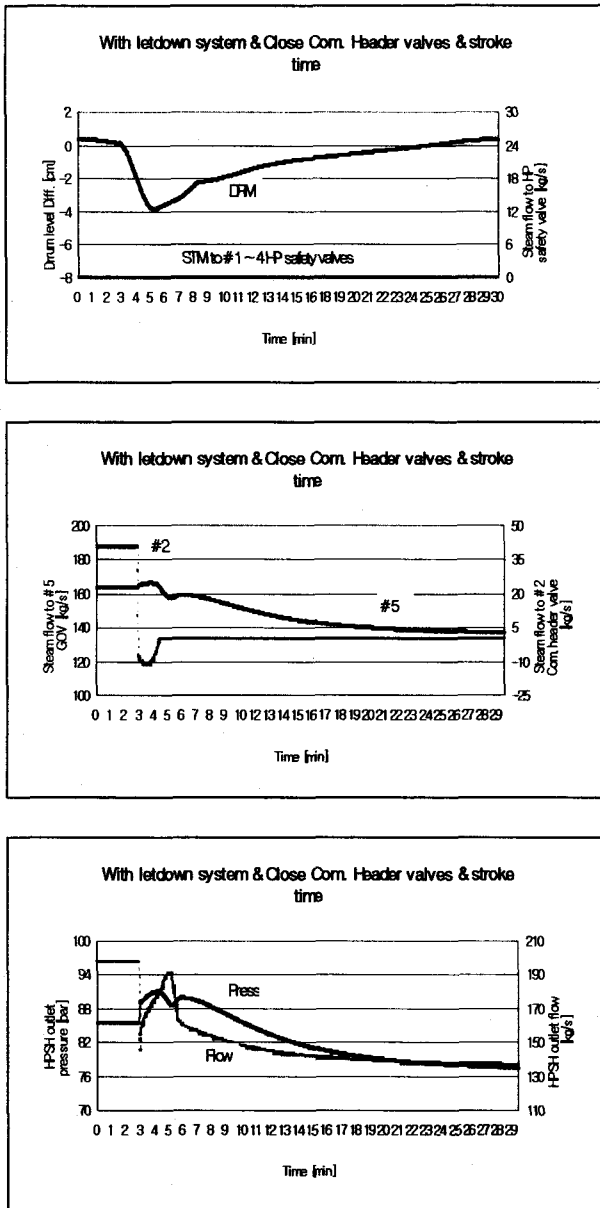


Fig. 6 Turbine trip with letdown and modified valve stroke time(MCR to 100%NR)