

Horizontal drum type HRSG(Heat Recovery Steam Generator)의 동특성 해석

이치환* · 김성호* · 김종현*

The analysis of dynamic behavior for horizontal drum type HRSG

Chi Hwan Lee, Sung Ho Kim and Jong Hyun Kim

Key Words : Horizontal drum type HRSG, ProTRAX, 동특성

Abstract

This dynamic analysis is performed about shutdown, load controlled and temperature controlled startup operating characteristics of the Horizontal drum type HRSG. This analysis was performed by constructing a dynamic model of the plant 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

복합화력발전소는 효율이 55%로, 일반화력 발전소의 효율 38% ~ 40% 수준에 비해 효율이 높은데다, 일반 화력발전소의 절반수준의 건설비와 짧은 건설기간, 빠른 운전기동특성 등 여러 가지 장점으로 차세대 발전소로 각광을 받고 있다. 당사는 그 동안 서인친 화력, 평택 복합화력, 한림 복합화력, 분당 복합화력 등에 Gas Turbine 과 HRSG, Steam Turbine 등 주기를 공급하였다.

복합화력 플랜트의 주기기 중, 증기를 발생하는

HRSG(Heat recovery steam generator)는 대부분 당사의 독자적인 기술에 의하여 설계, 제작, 시운전에 이르는 전 과정이 수행되고 있다. 빠른 운전 기동 특성을 가진 HRSG의 성능 검증, Tuning, 그리고 시운전을 위해서는 기동, 정지와 부하 변동에 따른 HRSG의 동특성 해석 및 모사가 기본 참고 자료로서 필수적으로 요구된다.

상기 horizontal drum type HRSG의 동특성 해석을 위해 상용화된 simulation code인 ProTRAX로 플랜트를 modeling한 후 모사를 실시하였다. 또한, 모사는 shutdown, load controlled startup 과 temperature controlled startup의 3가지 운전 방법에 따라 모사가 이루어졌다.

2. HRSG modeling

2.1 HRSG system

모델은 고온의 연소가스가 유입되는 댐퍼 전단에서 연소 가스가 방출되는 스택 전단까지를 HRSG 시스템으로 설정하였다. HRSG는 급수를 가열시키는 절탄기(LP, HP)와 증발기(LP, IP, HP), 증기를 분리하는 드럼(LP, IP, HP), 증기를 과열시키는 과열기(LP, IP, HP) 등으로 이루어져 있다. 가스 터빈에서 연소 후, 댐퍼를 통과한 연소가스는 과열기, 증발기, 절탄기의 관군들을 차례로 지나면서 에너지를 전달하고 난후 스택으로 방출된다.

* 한국중공업 기술연구원 기전기술연구실

모델의 주요 기기들의 정상상태 운전시 사양과 모델 schematic은 아래의 표 1.과 그림 1과 같다

표 1. 모델 specification

Type	Horizontal drum type (Natural circulation)
Capacity	500 MW
No. of superheater tubes	HPHTSH : 152 ea IPSH : 152 ea LPSH : 152 ea
Drum design pressure	HP : 134.1 bar IP : 30.0 bar LP : 5.3 bar
Outlet steam temperature	HPHTSH : 544.9 C IPSH : 332.2 C LPSH : 235.6 C
Gas property	Flow : 460.4 kg/s Temperature : 578 C

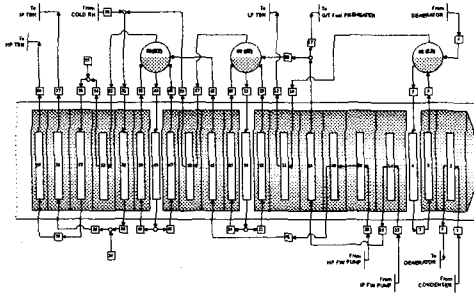


그림 1. 모델 schematic

2.1.1 Model scope

모사된 모델은 gas turbine을 제외한 나머지 기기들 - superheaters, economizers, drums, deaerators, turbines, valves, diverter dampers, pumps - 등이 모델링 되었으며, gas exhaust condition은 table로 작성되어 모사에 적용되었다. 모델에 적용된 제어기는 완전한 제어기의 모사가 이루어지 않고 일반적인 PI 제어기를 모사한 후, 이 제어기의 조작을 manually control하였다. 이와 더불어 산출된 결과는 운전 절차 및 제어 방식에 의해 영향을 받을 수 있으므로, 이를 적용한다면 보다 안정적인 산출 결과를 얻을 수 있을 것이다.

2.1.2 Custom code

Horizontal drum type HRSG model은 ProTRAX가 가지고 있는 기본적인 code를 사용하였으나, 원하는 결과 산출을 위해 drum metal temperature와 generator synchronization에 대한 code는 추가적으

로 작성하여 모사에 적용하였다.

2.1.2.1. Drum metal temperature

각각의 drum은 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.

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

드럼 metal과 절연체의 온도는 energy balance를 통해 계산되었다.

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

2.1.2.2. Generator synchronization modeling

일반적으로 generator가 3600RPM에 도달하고 나서 generator의 주파수, 위상, 속도 등을 자동적으로 synchronization되게 coding한다.

본 모델에는 turbine governor valve가 서서히 열림에 따라 generator는 가속화되어 3600RPM에 도달하면 synchronization이 되고 그 상태를 유지하도록 모사하였다.

2.2 Heat balance

Heat balance를 통해 inlet, outlet steam condition, gas condition 등이 정의된다. 이는 설계치에 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 data와 full load pressures, flows, temperatures, compositions 등의 operating data의 입력이 필요하게 된다.

2.4 Data adjustment

HP와 IP inlet pressure의 경우, 드럼내의 압력이 상승할 경우에도 불구하고, 지속적인 급수를 하기위해 압력은 재산출 되었으며, 이러한 조정이 없다면 모사시 드럼 압력이 높을 경우 급수 중단이 일어날 가능성이 있다.

2.5 Model control

모사에 적용된 주요한 제어기는 HP / IP / LP drum level, HP / IP superheat steam temperature, HP bypass pressure 를 제어 하기 위한 single loop controller 가 모사에 적용되었다.

3. 모델 검증

3.1 출력별 주요변수

모델의 신뢰성을 검증하기 위해 25%, 50%, 75%, MCR 출력에서의 주요변수에 대한 설계치와 모사 결과치의 비교는 아래 표 2, 3 과 같다.

표 2. 주요 변수

Variable	25%		50%		
	Design	Model	Design	Model	
HP	Drum pressure	80.1	79.3	86	86.5
	Steam flow	17.1	17.4	31.6	31.8
	Superheater temperature	412	414	532	536
IP	Drum pressure	17.8	17.1	19.2	19.2
	Steam flow	9.9	9.8	7.5	7.5
	Superheater temperature	291	291	300	304
LP	Drum pressure	5.2	5.3	5.2	5.2
	Steam flow	4.1	4.1	3.5	3.6
	Superheater temperature	211	214	214	220

표 3. 주요 변수

Variable	75%		MCR		
	Design	Model	Design	Model	
HP	Drum pressure	111.4	111.3	134.1	133.9
	Steam flow	40.9	40.9	49.7	49.7
	Superheater temperature	550	551	545	545
IP	Drum pressure	24.7	24.6	30	29.8
	Steam flow	8.8	9.0	11.2	11.2
	Superheater temperature	319	321	332	332
LP	Drum pressure	5.2	5.2	5.3	5.1
	Steam flow	4.9	5.0	6.9	6.9
	Superheater temperature	226	230	236	236

Note : Pressure [bar], Temperature [C], Flow [kg/s]

4. 모사 결과

4.1 기동특성 해석

4.1.1 부하 제어 기동특성 : cold startup

부하 제어 기동특성은 2 대의 gas turbine 이 동시에 기동하여 full load 가 되는 운전 방식이다.

모사에 적용된 gas condition 은 gas 유량의 10% 가 최초 유입되어 20 분간 유지되고 난후, 5 분내에 50%로 유량을 증가시켜 20 분간 유지하고, 5 분내에 100%의 유량을 유입해 gas 온도가 578C 에 도달하게 한다.

특히, IP 과열기에서의 유량은 HP bypass discharge 와 IP 과열기 discharge 가 cold reheat line 동일 선상에서 일어나기 때문에 불안정하게 나타났다. 즉, HP bypass 가 열리고 닫힘으로 인한 압력 등락이 IP 과열기의 유량 변화에 기여한 것으로 나타났다.

모사 결과는 아래 그림 2~5 에 나타나 있다.

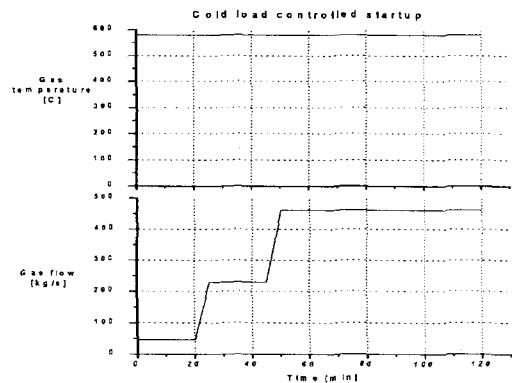


그림 2. Gas flow & temperature

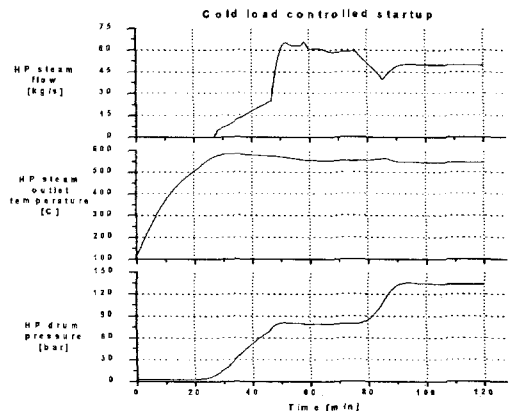


그림 3. HP steam flow, temperature, drum pressure

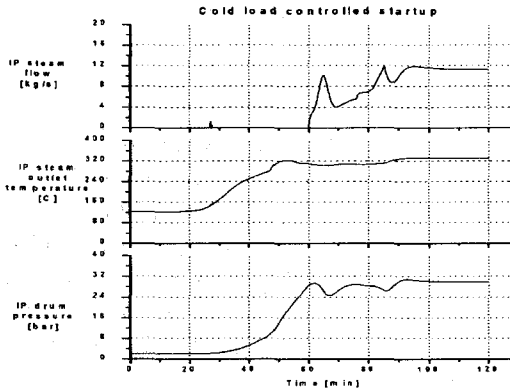


그림 4. IP steam flow, temperature, drum pressure

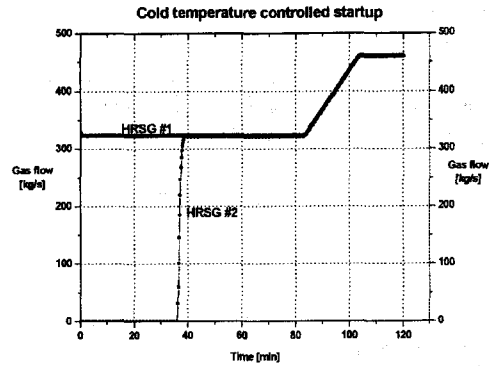


그림 6. Gas flow into HRSG #1 & #2

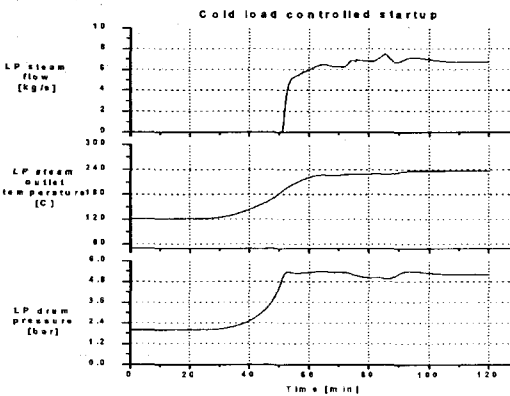


그림 5. LP steam flow, temperature, drum pressure

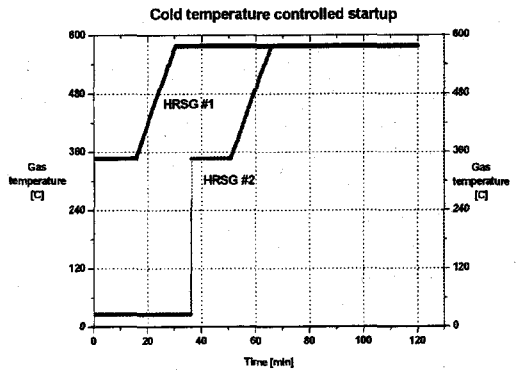


그림 7. Gas temperature into HRSG #1 & #2

4.1.2 온도 제어 기동특성 : cold startup

온도 제어 기동특성은 1 대의 gas turbine 이 먼저 기동하여 특정 부하에 도달해 유지되고 있는 동안 나머지 한대의 gas turbine 이 기동하여 특정 부하에 도달하면 2 대의 gas turbine 이 동시에 full laod에 도달하는 운전 방식이다.

모사에 적용된 gas condition 은 gas 온도 347C, 유량의 70%를 유입하여 15 분간 유지하고 난후, gas 유량은 유지된 상태에서 15 분 내에 gas 온도를 578C로 증가시켜 특정 부하에 도달하면 나머지 한대의 gas turbine 을 동일한 방법으로 기동하여 특정 부하에 도달하고 나면, 동시에 2 대의 gas turbine 의 gas 유량을 20 분 내에 100%로 증가시키는 운전 방식이다.

부하 제어 기동특성에서와 마찬가지로 온도 제어 기동특성에서도 IP 과열기에서의 유량이 다소 불안정하게 나타났다.

모사 결과는 아래 그림 6~10 에 나타나 있다.

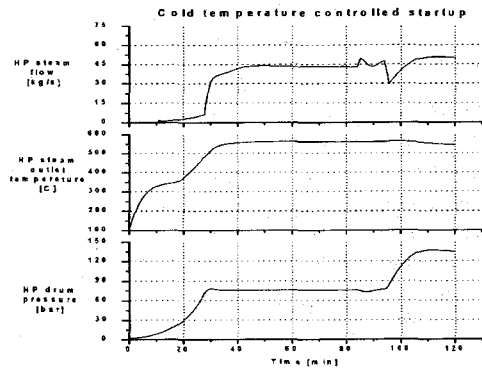


그림 8. HP steam flow, temperature, drum pressure of HRSG #1

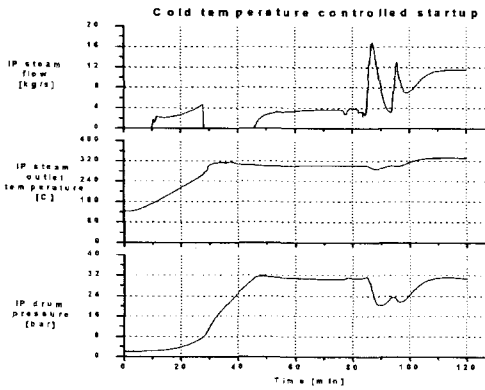


그림 9. IP steam flow, temperature, drum pressure of HRSG #1

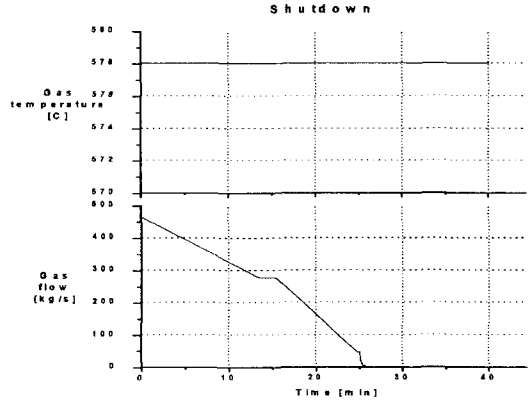


그림 11. Gas flow & temperature

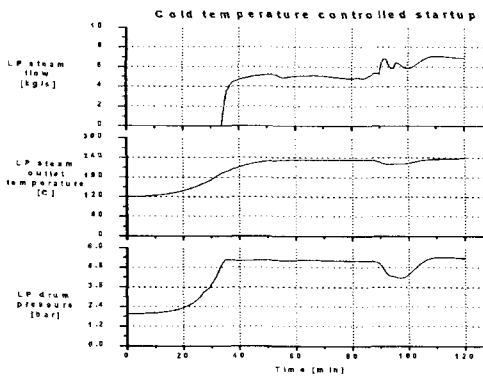


그림 10. LP steam flow, temperature, drum pressure of HRSG #1

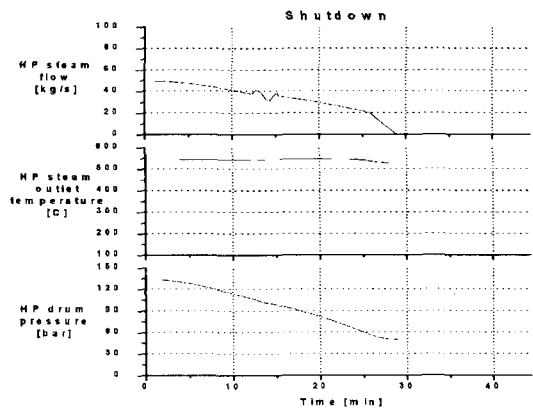


그림 12. HP steam flow, temperature, drum pressure

4.1.3 정지 특성

정지 특성 파악에 적용된 gas condition 은 578C 의 gas 를 15 분내에 100%의 유량에서 60%로 감소 시킨후 2 분 간 유지하고, 10 분내에 60%에서 10%로 감소시키고 난 후 10%에서 0%로 감소시켜 운전 하는 방식이다.

이에 반해 steam turbine 은 그 유량을 12 분내에 100%에서 70%로, 2 분 내에 70%에서 20%로 감소 시키면 turbine 은 그 유량이 20% 이하일 경우 trip 되게 된다. 이때 드럼 내의 압력을 유지하기 위해 bypass valve 를 잠그게 되고, 드럼 수위는 자동으로 제어되게 했다.

정지 특성 곡선에서도 HP bypass 의 개폐에 따라 IP 과열기의 유량은 다소 불안정하게 나타났다.

모사 결과는 아래 그림 11~14 에 나타나 있다.

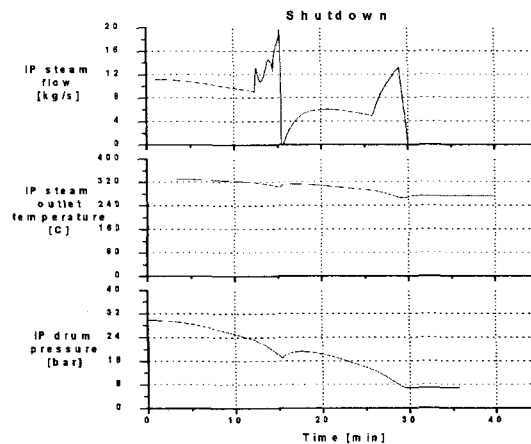


그림 13. IP steam flow, temperature, drum pressure

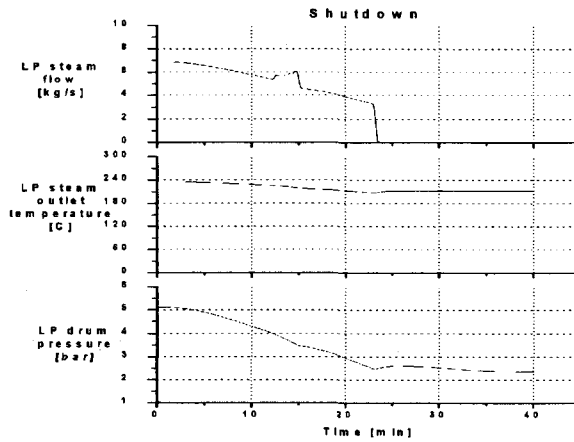


그림 14. LP steam flow, temperature, drum pressure

5. 결론

본 모델의 동특성 해석을 통하여, HRSG의 운전 조건에 따른 기동 및 정지에 대한 특성을 산출할 수 있었다. 또한, 모델에 적용된 제어 시스템 구성의 타당성을 검증할 수 있었으나, controller의 fine gain tuning을 위한 기초 자료로 활용하기 위해서는 제어기 모사의 보완이 필요할 것이라 본다.

수행된 결과는 설계치에 추종하고 있음이 확인되었고, 다양한 운전 방식과 제어 방식에 따라 다른 결과의 산출을 이룰 수 있을 것이라 본다.

앞으로도, 이러한 모사 결과는 플랜트 시운전 및 commissioning을 위한 기초 자료로도 활용될 것이라 본다.

참고문헌

- (1) Sam G Dukelow, "The control of boilers", 2nd 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