

운전기록 모니터링에 의한 발전보일러용 고압 급수가열기 내부 튜브의 파손예측

김경섭*, 유호선**†

*한국동서발전(주), **† 송실대학교 기계공학과

Prediction of Internal Tube Bundle Failure in High Pressure Feedwater Heater for a Power Generation Boiler by the Operating Record Monitoring

Kyeong-seob Kim*, Hoseon Yoo**†

*Korea East-West Power Co., Ltd., Ulsan 44543, Korea

**† Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

ABSTRACT : In this study, the failure analysis of the internal tube occurred in the high pressure feedwater heater for power generation boiler of 500 MW supercritical pressure coal fired power plant was investigated. I suggested a prediction model that can diagnose internal tube failure by changing the position of level control valve on the shell side and the suction flow rate of the boiler feedwater pump. The suggested prediction model is demonstrated through additional cases of feedwater system unbalance. The simultaneous comparison of the shell side level control valve position and the suction flow rate of the boiler feedwater pump compared to the normal operating state value, even in the case of the high pressure feedwater heater for the power boiler, It can be a powerful prediction diagnosis.

초 록 : 본 연구에서는 500 MW급 초임계압 석탄 화력발전소의 발전보일러용 고압 급수가열기에서 발생한 내부 튜브의 파손 사례 분석을 통해 운전 기록 모니터링에 의한 발전보일러용 고압 급수가열기 내부 튜브의 파손 예측 방안을 모색하고자 하였다. 이 연구를 통해 고압 급수가열기 내부 튜브 파손 시 셸 측 수위 조절 밸브 개도와 보일러 급수펌프 흡입 유량의 변화로 내부 튜브 파손을 진단할 수 있는 예측 모형을 제안하였고, 제안된 예측 모형은 급수 계통의 불균형이 일어난 추가 사례를 통해 실증하였다. 이에 따라 본 연구와 유사한 특성의 발전보일러용 고압 급수가열기의 경우에도 셸 측 수위 조절 밸브 개도와 보일러 급수펌프의 흡입 유량의 정상 운전 상태 값 대비 현재 운전 값 비교는 고압 급수가열기 내부 튜브의 파손에 대한 유력한 예측 진단 방안이 될 수 있다고 판단된다.

Key words : Feedwater heater(급수가열기), Tube failure(튜브 파손), Prediction diagnosis(예측 진단)

- 기호설명 -

C : 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도 운전값 (%)

F : 보일러 급수펌프 흡입 유량 운전값 (ton/h)

P : 발전단 출력 (MW)

C_r : 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도 변화율 (%)

C_o : 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도 실험값 (%)

F_r : 보일러 급수펌프 흡입 유량 변화율 (%)

F_o : 보일러 급수펌프 흡입 유량 실험값 (ton/h)

† Corresponding Author, hsy@ssu.ac.kr

1. 서론

2017년 제8차 전력수급기본계획에 따르면 우리나라 전력소비량은 '30년 기준 소요 667.0 TWh, 최대전력은 2030년 동계 기준 113.4 GW로 전망되었고, 연평균 증가율은 계획 기간 2017년부터 2031년 내 연평균 2.1% 수준으로 증가할 것으로 전망되었다.(1) 이처럼 전력수요가 늘어날수록 발전 플랜트에서의 설비 고장은 전력 공급의 차질로 이어질 수 있다.

따라서 발전소의 경우는 발전단 출력에 중요한 역할을 하는 설비는 운전 신뢰성 확보에 더욱 주의를 기울여 운영되어야 한다. 고압 급수가열기의 경우도 내부 튜브에 파손이 발생하면 상황에 따라 발전단 출력을 감발하거나 발전 정지하여 정비를 시행해야 한다.

하지만 고압 급수가열기는 출력 조건 변화에 따른 다양한 운전 상태 변화와 사이클 내 존재하는 단위 기기들과의 유기적 연계로 내부에 일어난 튜브 파손을 빠른 시간 내에 예측하기가 어렵다.(2) 이에 따라 본 연구에서는 당진화력 발전소 1~4호기의 고압 급수가열기 중 두 번째 고압 급수가열기에서 발생한 내부 튜브 파손 사례를 바탕으로 운전 기록 모니터링을 통한 내부 튜브 파손의 예측 모형을 제안하고자 하였다.

2. 발전보일러용 고압 급수가열기

2.1 기능 및 구조

500 MW급 석탄 화력발전소는 정압가열, 단열팽창, 정압응축, 단열압축으로 이루어지는 재생 재열의 밀폐계로 구성되어 있다.

Fig. 2-1은 500 MW급 석탄 화력발전소 계통을 도시화한 것이다. 일반적으로 보일러, 터빈, 복수기, 급수가열기로 대표 구성되는 발전소 사이클에서 급수가열기는 증기 터빈 일부 단에서 추기를 인출하여 보일러에 공급되는 급수 온도를 높인다. 급수가열기는 증기 사이클 효율을 개선하고, 급수를 연화시켜 보일러의 수명을 연장시키는 기능을 한다.

급수가열기는 혼합식과 표면식이 대표적인데 표면식이 많이 사용되어지고 있으며, 통상적으로 여러 개를 직렬 배

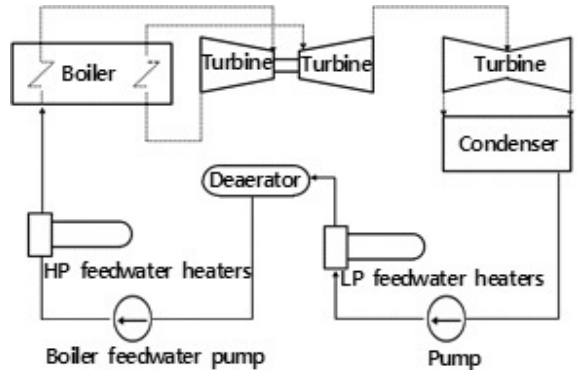


Fig. 2-1 Schematic diagram of the turbine cycle

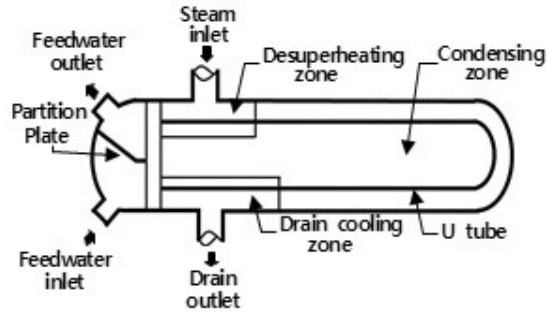


Fig. 2-2 Schematic diagram of the high pressure feedwater heater

치하여 보일러 급수펌프 기준 보일러 쪽에 설치된 것을 고압 급수가열기, 복수기 쪽에 설치된 것은 저압 급수가열기로 나누어서 구분한다.(3)

Fig. 2-2는 고압 급수가열기를 간략히 도시화하여 나타낸 것이다. 당진화력 발전소 1~4호기 고압 급수가열기는 수평으로 된 U 튜브로 설계되었다.

급수실(Feedwater chamber)은 입출구를 구분하는 분할판(Partition Plate)을 통해 상하로 나누어지며, 하부의 급수 입구실(Feedwater inlet chamber)로 유입된 급수는 U 튜브를 거쳐 상부 급수 출구실(Feedwater outlet chamber)로 빠져 나간다.(4)

고압 급수가열기 내부의 급수를 가열하는 터빈의 추기 스팀은 과열저감부로 들어가 포화 증기가 되고, 응축부에서 다시 응축 된다. 이때 생성되어지는 응축수는 드레인 냉각부에서 더 냉각된다. 과열저감부는 추기의 과열도에 상당하는 감열로, 응축부에서는 포화 증기가 가지고 있는

잠열로 급수를 가열한다. 드레인 냉각부에서는 응축된 포화수의 잠열을 이용하여 급수를 최종 가열한다.

2.2 정상 운전 조건

보일러 급수펌프로부터 공급되는 급수는 고압 급수가열기를 거쳐 보일러로 최종 공급된다. 고압 급수가열기에서 터빈의 추기 스팀이 응축되어 생성된 응축수는 수위 조절 밸브를 통해 하위 급수가열기로 배출됨으로써 정상 수위를 유지한다. 내부 튜브 파손과 같은 비정상 상황에 의해 고압 급수가열기의 셸 측의 수위가 경보 알람 값 이상으로 상승 시에는 비상 수위 조절 밸브가 열려 셸 측 응축수를 복수기로 배출하고 고압 급수가열기의 셸 측 수위를 정상 값으로 제어한다.

Table 2-1은 당진화력 1~4호기의 두 번째 고압 급수가열기의 발전단 출력에 따라 정상 운전되어질 때의 데이터를 나타낸 것이다. 발전단 출력 500 MW 경우 보일러 급수펌프로부터 온도 177 °C, 압력 309 kgf/cm²로 공급되는 급수는 3단으로 구성된 고압 급수가열기를 거쳐 단계적으로 199 °C, 248 °C 그리고 279 °C로 승온 후 보일러로 공급된다. (3) 발전단 출력이 높을수록 셸 측 압력, 온도, 응축수 드레인 출구 온도뿐만 아니라 튜브 측의 입구 압력, 온도, 출구 온도도 높은 값을 유지한다.

일반적으로 고압 급수가열기는 종단온도차, $\Delta T_{so}(\text{°C})$ 와 배수온도차, $\Delta T_{di}(\text{°C})$ 로 정상 운전 시 성능을 판단하며 관리된다. 종단온도차와 배수온도차는 발전단 출력에 상관없이 일정한 값을 유지하며, 과열저감부가 있는 고압 급수가열기 경우에 종단온도차는 영의 값을 가진다. 종단온도차, ΔT_{so} 와 배수온도차를 나타내는 ΔT_{di} 는 아래 식으로 구해진다. (2)

$$\Delta T_{so} = T_s - T_o \quad (2-1)$$

$$\Delta T_{di} = T_d - T_i \quad (2-2)$$

여기서

T_s : 급수가열기 셸 측 포화 증기 온도 (°C)

T_o : 급수가열기 튜브 측 출구 급수 온도 (°C)

T_d : 급수가열기 셸 측 증기 드레인 온도 (°C)

T_i : 급수가열기 튜브 측 입구 급수 온도 (°C)

Table 2-1 Operation data of the second high pressure feedwater heater (5)

	Item	Values		
	Generator output (MW)	550	500	375
Shell side	Pressure (kgf/cm ²)	43.6	39.2	29.0
	Temperature (°C)	254.3	247.9	230.8
	Drain outlet temperature (°C)	210.0	204.9	191.3
Tube side	Inlet pressure (kgf/cm ²)	308.9	308.9	251.4
	Inlet temperature (°C)	204.5	199.4	185.7
	Outlet temperature (°C)	254.3	247.9	230.8
etc.	ΔT_{so} (°C)	0	0	0
	ΔT_{di} (°C)	5.6	5.6	5.6

3. 내부 튜브의 파손

3.1 파손 원인

고압 급수가열기의 내부 튜브 파손의 원인은 다양하다. 하지만 일반적으로 재질 결함, 장기 사용에 의한 경련열화 및 응력 부식 균열이 대부분이다. 특히, 응력 부식 균열은 인장 응력의 조건 속에서 특정 금속 재료와 부식 환경이 조합되어 취성적으로 파괴되는 현상이다. 고압 급수가열기의 경우에는 고온, 고압의 운전 조건 속에서 오스테나이트 스테인리스강 재질인 튜브에 급수 계통의 해수 유입으로 인한 염소 이온의 조합이 이 같은 경우라 할 수 있다.

3.2 파손 시 급수계통의 변화

당진화력 1~4호기는 2013년부터 2017년 사이에 두 번째 고압 급수가열기에서 3건의 내부 튜브 파손 사례가 있었다. 이 사례 모두 다른 운전값은 큰 변화가 없었으나, 고압 급수가열기의 셸 측 수위 조절 밸브 개도, C%와 보일러 급수펌프 흡입 유량, F ton/h가 동시에 증가되었다. Table 3-1은 고압 급수가열기 내부 튜브가 손상되었을 때 운전 기록된 데이터(Event value)를 나타낸 것이다.

발전단 출력이 520 MW일 때 손상 인지 전 운전 데이터(Operating value)와 비교하여 보면 셸 측 수위 조절 밸브 개도는 32 %, 보일러 급수펌프의 흡입 유량은 148 ton/h 증가하였다. 발전단 출력이 512 MW일 때는 셸 측 수위 조절 밸브 개도 11 %, 보일러 급수펌프의 흡입 유량은 65

Table 3-1 Operation data of the tube failure cases

Case	Operating values			Event values		
	P	C	F	P	C	F
1	520	68	1,811	520	100	1,959
2	512	71	1,733	512	82	1,798
3	487	67	1,645	487	89	1,721

ton/h 증가되었다.

마지막으로 발전단 출력이 487 MW일 때는 셀 측 수위 조절 밸브 개도가 22 %, 보일러 급수펌프의 흡입 유량이 76 ton/h 증가되어 운전되었다.

4. 내부 튜브 파손예측 모형

4.1 파손예측 인자 고찰

고압 급수가열기에 설치된 셀 측 수위 감지기는 셀 측 수위 조절 밸브로 신호를 보내 밸브 개도를 조정한다. 고압 급수가열기 내부 튜브 파손 시에는 고압 급수기 셀 측의 응축수 수위가 상승하고, 셀 측 수위 조절 밸브 개도는 정상 수위가 될 때까지 열린다.

고압 급수가열기 내부의 튜브 파손 시 내부 누설이 발생하면 보일러로 공급되는 급수량은 누설량에 비례하여 줄어든다. 이때 급수 제어부가 보일러 급수펌프의 부하를 증가시켜 보일러 급수펌프의 흡입 유량을 늘려줌으로써 누설된 양만큼 보일러 유입 급수량을 보충한다.

4.2 운전기록 모니터링에 의한 파손예측 모형 제시

Fig. 4-1와 Fig. 4-2는 발전단 출력 변화에 따른 급수가열기 셀 측 수위 조절 밸브 개도와 보일러 급수펌프 흡입 유량의 값을 나타낸 것이다.

500 MW급 초임계압 발전보일러용 고압 급수가열기 내부 튜브 파손 예측 모형 구성은 각 출력 구간에서 셀 측 수위 조절 밸브 개도와 보일러 급수펌프 흡입 유량을 최종적으로 활용하였다.

당진화력 1~4호기의 두 번째 고압 급수가열기를 대상으로 출력 변화가 잦은 300 MW에서 520 MW까지 10 MW 단위로 실험 구간을 설정하고, 셀 측의 수위 조절 밸브 개

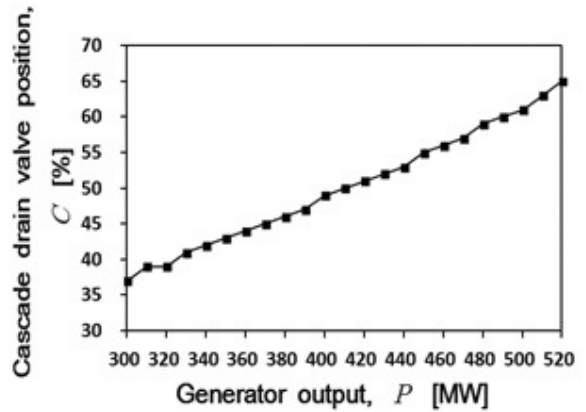


Fig. 4-1 Cascade drain valve position for generator output

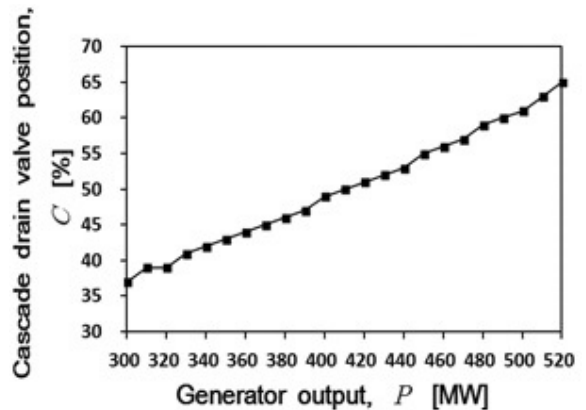


Fig. 4-2 Boiler feedwater pump suction flow for generator output

도와 보일러 급수펌프 흡입 유량 값을 각각의 실험 출력 구간에서 6개월간 운전된 평균값으로 도출하였다.

실험 결과 정상 운전 시 발전단 출력에 따른 셀 측 수위 조절 밸브의 개도는 식(4-1)로, 보일러 급수펌프의 흡입 유량은 식(4-2)로 각각 산출 되었다.

$$C_o = 0.1216P + 0.2976 \quad (4-1)$$

$$F_o = 3.667P + 166.6 \quad (4-2)$$

여기서

C_o : 급수가열기 셀 측 수위 조절 밸브 개도 실험값 (%)

F_o : 보일러 급수펌프 흡입 유량 실험값 (ton/h)

P : 발전단 출력 (MW)

고압 급수가열기의 내부 튜브 파손 예측 모형은 이 관계식을 기반으로 내부에 튜브의 파손이 일어날 경우에 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도의 값과 보일러 급수 펌프 흡입 유량의 값이 정상 운전 값에서 같이 상승하는 점을 활용하였다.

우선 당진화력 1~4호기 두 번째 고압 급수가열기의 내부 튜브 파손 실제 사례 3건을 바탕으로 튜브 파손 예측의 기준을 정하기 위해 예측 모형 산출식으로 도출된 실험값 대비 손상 당시 실제 운전 값으로 변화율을 구하였다. 식 (4-3)은 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도의 실험값 대비 변화율을 C_r (%)로 나타낸 것이다.

$$C_r = \frac{(C - C_o)}{C_o} \times 100 \quad (4-3)$$

여기서 C_o 값은 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도의 실험값이고, C 값은 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도의 운전 값이다. 식 (4-4)는 보일러 급수 펌프 흡입 유량의 실험값 대비 변화율을 F_r (%)로 나타낸 것이다.

$$F_r = \frac{(F - F_o)}{F_o} \times 100 \quad (4-4)$$

여기서 F_o 값은 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도의 실험값이고, F 값은 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도 운전 값이다.

Table 4-1은 고압 급수가열기 셸 측 수위 조절 밸브 개도와 보일러 급수 펌프 흡입 유량을 예측 모형의 산출식으로 도출된 실험값 대비 실제 운전 값의 변화율을 정리한 것이다. 고압 급수가열기 내부 튜브 파손의 경우 정상 운전 시 도출한 예측 모형의 실험값과 비교했을 때, 각각의 사례별로 셸 측 수위 조절 밸브의 개도는 56%, 30% 그리고 48% 증가하였고, 보일러 급수 펌프의 흡입 유량은 13%, 5% 그리고 6% 증가하여 운전되었다.

셸 측 수위 조절 밸브의 개도와 보일러 급수 펌프 흡입 유량은 동시에 증가하였으며, 상대적으로 셸 측 수위 조절 밸브의 개도가 보일러 급수 펌프 흡입 유량 보다는 더 큰 폭의 상승 변화를 보였다. 이러한 사례 분석을 통해서 셸 측 수위 조절 밸브의 개도가 예측 모형의 산출식에서 도출한 실험값에서 30% 이상 크고, 동시에 보일러 급수 펌프 흡입 유량이 5% 이상 클 경우 두 번째 고압 급수가열기의

Table 4-1 Change rate for the tube failure cases

Item	Case	Values						
		P (MW)	C (%)	C _o (%)	C _r (%)	F (ton/h)	F _o (ton/h)	F _r (%)
Tube failure	1	520	100	64	56	1,959	1,740	13
	2	512	82	63	30	1,798	1,711	5
	3	487	89	60	48	1,721	1,619	6

내부 튜브가 파손되었음을 예측할 수 있는 기준을 마련하였다.

4.3 급수 계통 불균형 사례를 통한 내부 튜브 파손 예측 모형 실증

고압 급수가열기의 셸 측 수위 조절 밸브 개도와 보일러 급수 펌프 흡입 유량의 상승은 다른 운전 변수에 의해 발생할 수도 있으므로 실제 급수 계통 불균형 사례로 예측 모형을 실증하였다. Table 4-2는 이 같은 급수 계통 불균형 사례 발생 시 예측 모형에서 도출한 실험값 대비 운전 값 변

Table 4-2 Change rate for the feedwater system unbalance cases

Item	Case	Values						
		P (MW)	C (%)	C _o (%)	C _r (%)	F (ton/h)	F _o (ton/h)	F _r (%)
Cascade drain valve poor performance	1	514	100	63	59	1,746	1,718	2
	2	485	100	59	69	1,651	1,612	2
	3	482	99	59	68	1,630	1,601	2
	4	483	100	59	69	1,634	1,605	2
	5	481	100	59	70	1,649	1,597	3
Cascade drain valve clogging	1	524	100	64	56	1,796	1,755	2
	2	514	100	63	59	1,695	1,718	-1
	3	511	88	62	41	1,741	1,707	2
	4	510	72	62	16	1,704	1,704	0
Level transmitter failure	1	520	38	64	-40	1,743	1,740	0
	2	478	38	58	-35	1,610	1,586	1
	3	508	79	62	27	1,672	1,696	-1
Boiler feed pump minimum flow control valve poor performance	1	505	65	62	5	2,321	1,685	38
	2	500	70	61	15	2,244	1,667	35

화율을 나타낸 것이다. 셀 측 수위 조절 밸브 응동 불량, 내부 막힘, 수위 감지기 고장의 경우는 셀 측 수위 조절 밸브의 개도가 보일러 급수펌프 흡입 유량보다는 상대적으로 큰 상승을 보였다. 내부 튜브의 파손을 예측할 수 있는 기준과 비교해서는 셀 측 수위 조절 밸브의 개도가 30 % 보다 큰 경우도 있으나, 동시에 보일러 급수펌프 흡입 유량이 5 % 이상 큰 경우는 없었다.

보일러 급수펌프 최소 유량 조절 밸브 응동 불량의 경우에는 고압 급수가열기 내부 튜브 손상의 사례와는 반대로 보일러 급수펌프 흡입 유량이 셀 측 수위 조절 밸브 개도의 변화보다 큰 폭으로 상승하였다. 내부 튜브의 파손을 예측할 수 있는 기준과 비교해서는 보일러 급수펌프 흡입 유량이 5 % 이상 큰 경우도 있었으나, 동시에 셀 측 수위 조절 밸브의 개도가 30 %보다 큰 경우가 없어 제시된 다른 급수계통 불균형 사례와 명확히 구분되었다.

5. 결론

본 연구에서는 플랜트 효율을 향상을 위해 보일러로 공급되는 급수가 급수가열기를 거쳐서 단계적으로 승온되어야 하는 500 MW급 초임계압 석탄 화력 발전소에서 급수계통 불균형 사례 분석을 통해 운전 기록 모니터링에 의한 발전보일러용 고압 급수가열기 내부 튜브의 파손 여부를 예측하는 방안을 찾고자 하였다.

1. 발전단 출력이 500 MW 운전 시 온도가 177 °C, 압력이 309 kgf/cm² 인 급수가 튜브 내부로 유입되는 3단으로 구성된 초임계압 발전 보일러용 고압 급수가열기 중 두 번째 고압 급수가열기는 발전단 출력, P MW 값에 따라 셀 측 수위 조절 밸브 개도 실험값, $C_0(\%)$ 값과 보일러 급수펌프 흡입유량 실험값, $F_0(\text{ton/h})$ 값이 아래와 같은 상관관계식으로 운전된다.

$$C_0 = 0.1216P + 0.2976$$

$$F_0 = 3.667P + 166.6$$

2. 두 번째 고압 급수가열기는 셀 측 수위 조절 밸브 개도, C % 값이 실험값에서 30 % 이상 크고 동시에 보일러 급수 펌프 흡입유량, F ton/h 값이 실험값에서 5 % 이상 큰 경우에는 내부 튜브의 파손이 발생하였다고 할 수 있으며, 이는 운전 기록 모니터링에 의해서 튜브 파손 정보를 얻을 수 있음을 의미한다.

참고문헌

- (1) Dong-chul Lee, 2017, The Eighth Power Supply Master Plan, Ministry of Trade, Ministry of Trade, Industry and Energy, pp. 23.
- (2) Gyun-young Heo, 2011, Internal leakage detection for feedwater heaters in power plants using neural networks, Expert systems with Application 39(2012), pp. 5078~5086.
- (3) Jong-seon Min, 2008, The Practice of Power Plant(1), KPLI, pp. 339~350.
- (4) Korea East-West Power Company, 1999, Dangjin Power Plant Unit #1,2 Operation Manual(2), Chapter8, Korea East-West Power Company, pp. 61~65.
- (5) Eun-ki, Hong, 2001, The report of Performance Test in Dangjin unit 4, KEPCC, pp. 69~71. 