

# IGCC 스팀터빈 사이클의 열 및 물질수지 정산<sup>1)</sup>

## (Heat and Material Balance Calculations for IGCC Steam Turbine Cycle)

김대규\*, 강승중, 조병화, 최정태\*, 박철\*  
고등기술연구원 전력에너지연구실  
\* 대우조선공업(주) Plant 해양설계실

### 1. 서론

석탄가스화 복합사이클 발전시스템에서 스팀터빈 발전시스템은 1차 사이클인 가스터빈사이클에서 나오는 폐열을 이용하여 발생하는 증기로 구동되며, 증기의 일부는 가스화기로 들어가서 가스화 반응에 이용된다. 이와같은 시스템의 설계나 평가를 위해서는, 주어진 시스템에 대한 열 및 물질수지 정산을 구할 수 있는 능력을 갖추는 것이 필요하다.

본 연구에서는 주어진 시스템의 성능을 평가할 수 있는 프로그램을 개발하여, IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) System의 증기터빈 사이클과 유사한 증기터빈계의 열 및 물질정산과 성능 해석에 적용하였다.

본 과정을 통하여 작성된 프로그램은 시스템의 각 구성요소의 특성을 나타내는 부프로그램들로 구성되고, 주프로그램에서 이들의 연결 관계에 대한 정의를 하는 형식으로 구성되어 있기 때문에, 현재의 적용 대상(Fig. 1)과 다른 구성을 가진 사이클의 성능 해석에도 적용될 수 있다.

### 2. 계산 과정

증기기관계의 열 및 에너지정산 과정에는 아래와 같은 몇 가지의 제약조건이 있다. 여기서 제시되는 조건은 주로 재생(Regeneration) 시스템과 관련된 것이다.

재생시스템에서는 증기터빈 내부에서 팽창하고 있는 증기의 일부를 꺼내서 급수(給水)를 가열하는 급수가열기를 사용한다. 이때, 증기터빈의 저온부에서 꺼낸 증기와 고온부에서 나오는 증기를 이용하여 급수를 포화수 상태로 만들어 주는데, 각각의 열교환기의 출구 온도는 Deaerator의 작동온도, 주 급수펌프의 작동 온도 등에 의해 제한이 된다. 이 두가지가 본 계산에서 사용된 기본적인 제한조건이다<sup>1)</sup>. 이러한 제한조건을 만족하기 위한 가장 중요한 변수는 터빈에서의 누출증기량이다. Fig. 2는 이와같은 재생과정을 나타내는 전형적인 T-S선도<sup>2)</sup>로서, 그림에서 등온선인 "1"은 HP(High Pressure) Bleeding, "2"는 IP(Intermediate Pressure) Bleeding을 "3"은 LP(Low Pressure) Bleeding을 각각 나타낸다. 이들 열량이 급수를 점차적으로 가열함으로써 비가역성을 줄여 전체 시스템의 효율을 향상하는 데 기여한다. 계산을 위한 반복과정이 진행되는 동안에는 이들 누출량 외에도, 요구되는 Process Steam의 양이 추가적인 제한조건으로 작용한다.

계산을 시작하는 초기에는 터빈에서의 누출량을 임의의 값으로 가정하고 그 값을 이용하여 반복 계산을 시작한다. 이와같은 과정을 거치면서 구해진

1. 본 연구과제는 '92. 2.부터 '94. 12.까지 진행중인 에너지자원기술개발지원센터에서 지원하고 아주대학교/고등기술연구원에서 주관하는 "석탄가스화 복합 사이클 발전시스템 실용화개발"의 일환으로 '92년도에 수행된 것이다.

증기량에 의해 보일러에서 만들어야하는 증기량이 구해지며, 보일러의 효율도 함께 고려하면 연료소모량 및 Plant 효율을 구할 수 있다. Fig. 3a는 10280 kcal/kg의 고위발열량을 가진 연료(중유)를 사용하는 경우, HP, IP, LP에서의 초기 누출 증기량을 각각 1000 kg/hr로 가정한 경우에 반복 횟수가 증가함에 따라 각각의 누출량들이 수렴해가는 과정을 보여주고 있다. Fig. 3b에는 LP, HP Bleeding은 1000 kg/hr으로 고정한 상태에서 IP Bleeding의 초기 가정을 1000 kg/hr, 5000 kg/hr, 10000 kg/hr 등으로 주었을 때 IP Bleeding 양이 수렴해가는 과정을 나타낸다. 각 계산 과정은 반복계산에 있어서의 오차한계를  $10^{-4}$  kg/hr로 한 경우이고, 약 60회의 반복계산 후에 수렴하는 것을 알 수 있다.

## 2.1 프로그램 구성

프로그램은 FORTRAN으로 작성되었으며, 크게 두 부분으로 구분할 수 있다. 한 부분은, 증기기관계에서 사용되는 각 Component의 특성을 표현하는 부프로그램 들이고, 나머지 부분은 각 Components간의 연결 관계 및 제한조건을 포함하고있는 주프로그램이다.

Fig. 4는 프로그램 내부에서의 계산과정을 개략적으로 나타낸 흐름도이다. 이 흐름도는 프로그램의 개략적인 계산과정을 나타내는 것으로 실제의 진행과정과는 약간의 차이가 있다. 이것은, 연료의 발열량의 변경에 따라서 각 부프로그램의 계산을 제어하기 위한 판단기준이 달라지기 때문이다.

## 2.2 증기터빈 시스템

프로그램의 검증을 위하여, Fig. 1과 같은 증기터빈시스템에 대해 열 및 물질정산의 계산을 수행하였다. 여기에는 1개의 주 보일러가 있으며, 이것은 필요에 따라 중유, LNG를 단독으로 또는 동시에 사용할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한, 1개의 주기관과 2개의 보조증기기관이 있으며, 부하에 따라 작동을 조절할 수 있다. 주기관에서 팽창하는 증기 중 일부를 꺼내서 급수를 가열하는 데에 사용하는데, 여기서는 HP, IP(Cross-over Line), LP의 3부분에서 증기를 누출시킨다. 이들 증기를 이용하여 급수를 가열하는 급수가열기는 LP Heater, HP Heater의 2개가 있으며, 이들 사이에 설치된 Deaerator도 급수가열기의 역할을 한다.

계산결과의 검증을 위하여 기준으로 삼은 증기기관은 "130,000 M<sup>3</sup> LNG Carrier"의 추진용 증기기관계<sup>3)</sup>이다. 이것을 기준으로 삼은 것은 다른 어떤 것보다도 상세한 자료를 구할 수 있다는 장점때문이다. 또한, Boiler에서 생성된 증기의 일부(전체 증기발생량의 1 - 2%)를 증기기관 이외의 다른 용도로 사용한다는 점이 IGCC System의 Bottoming Cycle에서와 유사하기(Entrained Bed Type 가스화기를 채택한 경우의 가스화 반응용 증기량<sup>4)</sup>) 때문이다. 이러한 검증을 위해 채택된 증기기관계의 주요 장비는 Table. 1과 같다.

## 2.3 계산 결과

계산 결과는 Fig. 5에서 처럼, 주어진 시스템에 관한 열 및 물질정산 형식으로 정리된 형태로 구해진다. 여기에는 계산에 의해 구해진 증기기관계의 연료소모량, 증기터빈 각 Bleeding Point에서의 증기의 유량과 상태, 각 구성요소의 입구 및 출구에서의 유량, 온도, 압력, 엔탈피 등이 나타나있다.

Fig. 5의 결과를 이용하면 주어진 시스템의 Plant 및 Cycle 효율을 구할 수 있으며 Table. 2는 이들 효율을 나타낸 것이다. Plant 효율은 터빈의 출력 및 Process Steam의 열량을 사용된 연료의 총 발열량으로 나눈 것으로, 실제 상황에서 의미가 크다. 이에반해, Cycle 효율은 터빈의 출력 및 Process Steam의 열량을 사이클에 공급된 열량으로 나눈 값으로 열역학적인 의미가 있다. Cycle 효율은 보일러에서 생성된 증기의 열량을 기준으로 삼아서, 보일러의 효율을 고려하지 않기 때문에 Plant 효율보다는 높은 값을 보인다.

전체적인 효율을 살펴볼 때, 연료의 발열량이 높아짐에 따라 시스템의 효율이 크게 높아지는 않으며, 이는 사용되는 연료의 종류에 따른 Process Steam(Soot Blowing, Burner Atomizing 등)의 양이 달라지기 때문이다. 또한, 이것은 사용된 보일러의 특성에도 기인한다.

### 3. 결론

- 본 연구과정을 통하여 스팀터빈사이클의 열 및 물질정산 계산을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 실제 Steam Turbine System의 열 및 물질정산에 적용하였다.
- 본 과정에서 대상으로 삼은 증기기관계의 효율은 약 30% 정도가 됨을 알 수 있었다.
- 본 연구과정에서 개발된 프로그램은 IGCC System의 Bottoming Cycle의 성능 계산에 이용될 수 있으며, 향후 기존의 상용 소프트웨어를 이용한 계산 결과와의 상호 비교도 가능하다.

### 4. 참고문헌

1. Panel M-15(Heat Balance), "Marine Power Plant Heat Balance Practices", Technical & Research Bulletin 3-11, SNAME, 1971
2. Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag, "Fundamentals of Classical Thermodynamics in SI Ver. 2nd Ed.", John Wiley and Sons, 1976
3. "Heat Balance for Steam Turbine for DAEWOO 130,000 CM LNG Carrier", Ship Marketing Engineering Dept. in DSHM, DA750M002, 1992
4. Fluor Engineers Inc., "Shell-based Gasification Combined-Cycle Power Plant Evaluation", EPRI-AP-3129, 1983

Table. 1. 증기터빈 시스템에 사용된 주요 장비

장비명	Maker	제품명	비고
보일러	KHI*	UMG 45/41	최대 증기발생량 : 41,700 (kg/H)
주기관	KHI*	UA-310	Rated Output : 19,694 (kW)
보조터빈	SHINKO	RG92	Rated Output : 3,000 (kW)
Deaerator	Sasakura	SD2	최대 처리 용량 : 150,000 (kg/H)

(\* KHI : Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

Table. 2 시스템의 효율

Fuel	Energy Input (kcal/s)	Cycle Input (kcal/s)	Electric Load (kW)	Plant Eff. (%)	Cycle Eff. (%)
중유	16,035	14,479	20,964	31.0	34.6
중유 + LNG	16,717	14,478	20,964	29.7	34.2
LNG	17,055	14,565	20,964	29.9	35.0
중유*	2,125	1,920	1,580	29.4	32.5
중유*	6,875	6,214	2,650	30.4	33.6

(\* 주 기관을 사용하지 않고 보조기관 만을 가동한 경우임)

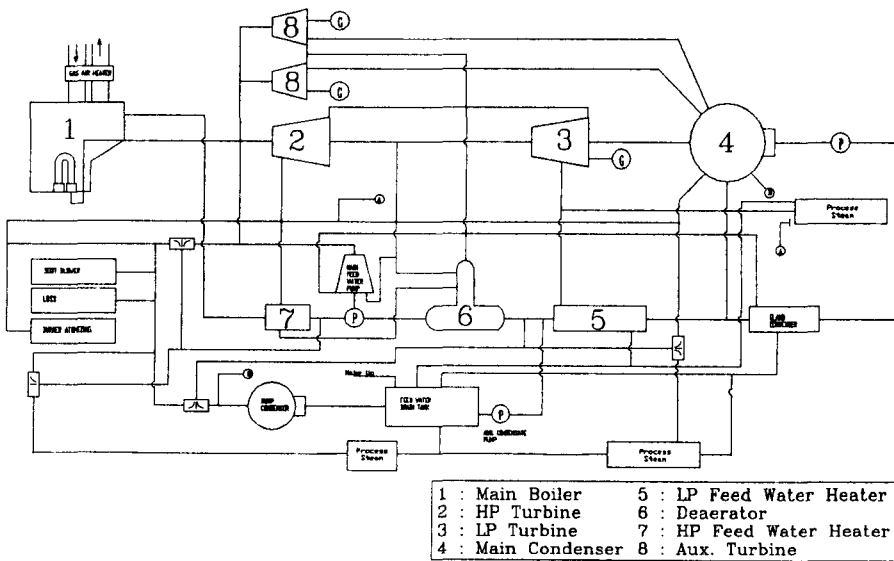


Fig. 1 대상 증기터어빈의 Schematic Diagram

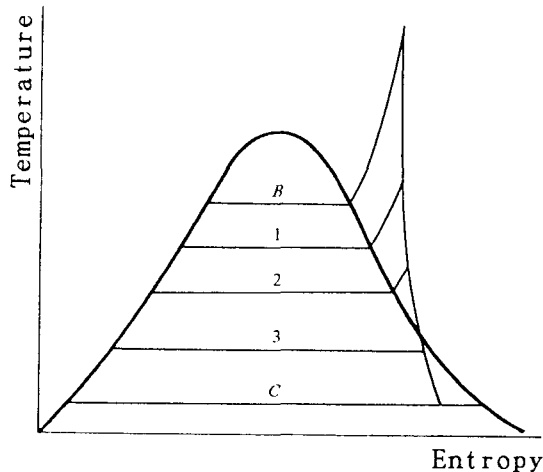


Fig. 2 T-S Diagram for Regenerative Type Stean Turbine Cycle

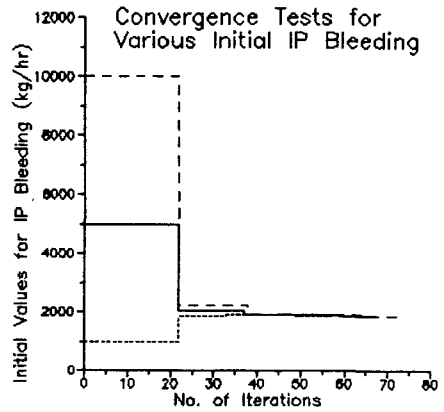
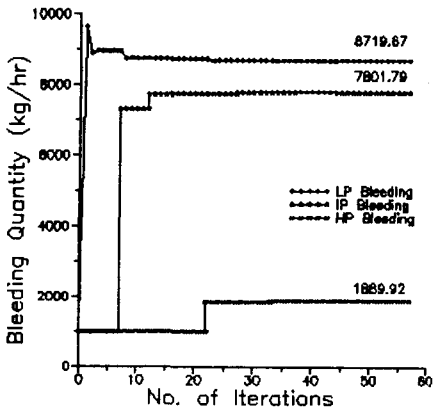


Fig. 3 Turbine Bleeding양의 수렴 과정

- a. 초기값이 1000(kg/hr)인 경우 LP, IP, HP Bleeding의 수렴과정
- b. 초기값이 1000, 5000, 10000(kg/hr)인 경우 IP Bleeding의 수렴과정

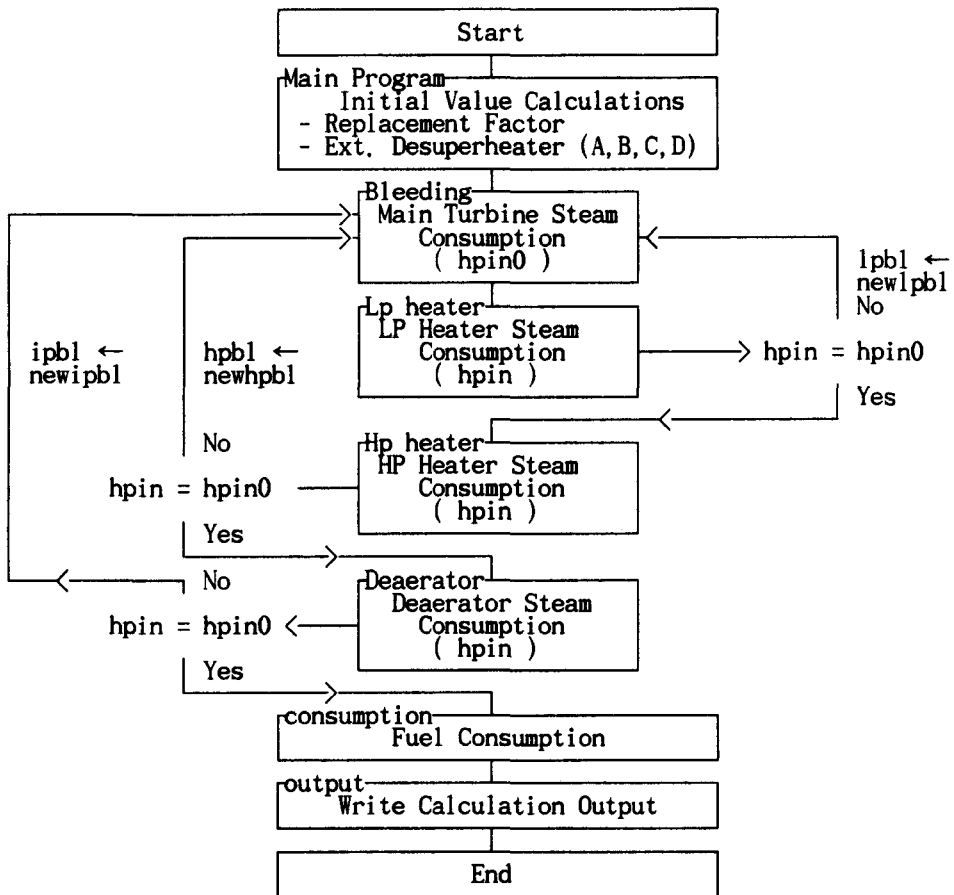


Fig. 4 프로그램의 흐름도

Date: 1992. 9. 16  
 Project : D&W Steam Cycle for IGCC System  
 Condition : F.O. Burning Condition

== Calculation Base == (T:deg C, G:kg/h, P:ata, h:k cal/hk)

Shaft Horse Power	2640.0	shp
Turbo Generator Load	1270.0	MW
F.O. Generator Load	30.0	Tons/Day
Gas Meter Temperature	34.0	deg C
Air Temperature at G.M. Inlet	38.0	deg C
Air Condition Unit	Not in Use	
Main Condenser	BOOP	

== Summary of Input Data ==

1. Main Boiler	
Inlet Condition	204.7 T
Outlet Condition	818.0 T
	65.0 P
	825.0 h
Boiler Steam Consumption	234.0 G
Burner Atomsing Steam Consumption	180.0 G
2. Main Turbine	
NBSR (Non Bleeding Steam Rate)	62303.0 G
Main Turbine Gland Steam	150.0 G

Point	Exchngy (k cal/hk)	Replacemnt Factor
TOP	825.0	
SR	753.3	0.7459
C/D	699.7	0.5823
LPS	642.0	0.3644
ELP	547.6	

3. Turbo Generator		
	No. 1	No. 2
Capacity (MW)	1270.0	0.0
Steam Consumption (G)	5900.0	0.0
Gland Steam Quantity (G)	110.0	0.0

4. Distiller	
Distiller Load	30.0 tons/day
Steam for Heating	970.0 kg/h
Steam for Air Ejector	94.0 kg/h

5. L.P. Feed Water Heater		
	Inlet	Outlet
Condensate Temp. (T)	38.6	104.6
Heating Steam	642.0 h	107.6 T

6. H.P. Feed Water Heater		
	Inlet	Outlet
Condensate Temp. (T)	152.9	204.7
Heating Steam	753.3 h	162.9 T

7. Main Feed Water Pump	
Steam Consumption	4150.0 kg/h
Gland Steam	50.0 kg/h
Feed Water Temperature (in)	151.1 deg C
Feed Water Temperature (out)	152.9 deg C

8. External Desuperheater (Temperature Condition, Given)			
	Steam Inlet	Steam Outlet	Supply Meter
Superheated (A)	623.0 h	705.8 h	162.9 T
Superheated (B)	798.8 h	679.9 h	162.9 T
Gland (C)	499.7 h	648.3 h	105.1 T
Dump (D)	738.8 h	646.0 h	162.9 T

9. etc.	
Dump Condenser	0.0 kg/h
Domestic Service	150.0 kg/h
L.O. Heater	50.0 kg/h
F.O. Heater	608.0 kg/h
F.O. Dumper Tank	0.0 kg/h
F.O. Bettle Wash	0.0 kg/h
De-aer	150.0 kg/h
Boil Off/Make Up Gas Heater	0.0 kg/h
Cargo Vaporizer	0.0 kg/h
Forcing Vaporizer	0.0 kg/h
Vent Heater	22.0 kg/h
Cofferdam Heating	700.0 kg/h

== Summary of Calculation Output ==

1. General Output		
Fuel Oil	Consumption	5618.5 kg/h (212.7 G/PH)
	HRV	10280.0 k cal/hk
Boil Off Gas	Consumption	0.0 kg/h (0.0 G/PH)
	HRV	13280.0 k cal/hk

2. Steam Consumption for Each Device

Item	kg/h	deg C	ata	k cal/hk
Boiler Feed Water	84688.4	204.7		
Boiler Steam	234.0	204.7	81.0	705.8
Burner Atomizer	180.0	355.5	18.8	753.3
Main Steam Turbine	7234.9	610.0	61.0	623.0
H.P. Bleeding	7801.8	355.5	18.8	753.3
L.P. Bleeding	1889.9	237.9	6.7	499.7
L.P. Bleeding	8719.7	112.7	1.6	643.0
Gland Steam	150.0			
Exhaust	13783.5	32.4	0.0	548.0
Make-up (Non-Bleeding Cond.)	0.0			
Turbo Generator No. 1	5900.0	610.0	61.0	623.0
Exhaust Steam	5790.0			
Gland Steam	110.0			
Turbo Generator No. 2	0.0	610.0	61.0	623.0
Exhaust Steam	0.0			
Gland Steam	0.0			
Main Condenser Exhaust	6978.5	32.1		
Main Condenser Ammoniation	0.0	38.8		
H.P. Exhaust Steam Dump	0.0		5.3	744.0
Gland Condenser Inlet	6978.5	32.1		
Outlet	6978.5	38.6		
Heating Steam Inlet	340.0			
Outlet	340.0			
L.P. Feed Water Heater Inlet	6978.5	38.6		
Outlet	6978.5	104.6		
Heating Steam Inlet	7749.7	112.7	1.6	643.0
Outlet	7749.7	112.7		
Bypass Water to H.P. Heaters	5.2	109.3		
Reheater	71278.3	106.3		
H.P. Feed Water Heater	7527.8			162.9
Main Feed Pump/L.P. Bleeding	5790.0			
Air Ventilation	30.0			654.0

(Continued)

Item	kg/h	deg C	ata	k cal/hk
Main Feed Water Pump Inlet	84688.4	151.1		
Outlet	84688.4	152.9		
Driving Steam	4150.0	610.0	61.0	623.0
Driving Steam Gland	50.0			
Steam Exhaust	4100.0		5.3	744.0
H.P. Feed Water Heater Inlet	84082.4	152.9		
Outlet	84082.4	204.7		
Heating Steam Inlet	7527.8	355.5	18.8	753.3
Outlet	7527.8			320.3
Distiller Heating Steam	970.0		1.6	643.0
Air Ejector Steam	94.0	368.8	18.8	753.3
Feed Water Drain Tank Outlet	11708.1	98.6		
Domestic Service	150.0	200.0	4.0	688.8
L.O. Heater Inlet	50.0	200.0	4.0	688.8
Outlet	50.0	90.0		
F.O. Heater Inlet	500.0	210.0	11.0	679.9
Outlet	500.0	88.0		
F.O. Dumper Tank Inlet	0.0	218.0	11.0	678.8
Outlet	0.0	88.0		
F.O. Settling Tank Inlet	0.0	210.0	11.0	679.9
Outlet	0.0	88.0		
Deaer Inlet	150.0	90.0		
Outlet	150.0	90.0		
Boil Off Heater Inlet	0.0	210.0	11.0	679.9
Outlet	0.0	90.0		
Cargo Vaporizer Inlet	0.0	210.0	11.0	679.9
Outlet	0.0	90.0		
Forcing Vaporizer Inlet	0.0	218.0	11.0	678.8
Outlet	0.0	88.0		
Vent Heater Inlet	22.0	210.0	11.0	679.9
Outlet	22.0	88.0		
Cofferdam Heating Steam	700.0	210.0	11.0	679.9
Outlet	420.8	90.0		

3. External Desuperheaters

	kg/h	deg C	ata	k cal/hk
Superheated (A)				
Inlet Steam	1698.5	610.0	61.0	623.0
Outlet Steam	2038.5	320.0	61.0	705.8
Supply Meter	340.0	162.9		
General (B)				
Inlet Steam	1374.1	230.0	11.0	738.8
Outlet Steam	1820.8	210.0	11.0	678.8
Supply Meter	145.9	182.9		
Gland (C)				
Inlet Steam	196.8	355.5	4.0	699.7
Outlet Steam	200.0	200.0	4.0	683.3
Supply Meter	3.2	109.3		
Dump (D)				
Inlet Steam	0.0	220.0	11.0	738.8
Outlet Steam	0.0	210.0	11.0	646.0
Supply Meter	0.0	106.3		

Fig. 5 계산 결과의 예 (전력부하 20964 kW, 중유를 연소시키는 경우)