

## 기기관각수 폐열회수용 흡수식 히트펌프의 부분부하 성능에 관한 연구

박병철<sup>†</sup> · 김태형 · 김광수

한국남동발전

(2019년 5월 2일 접수, 2019년 6월 10일 수정, 2019년 6월 12일 채택)

### A Study on Partial Load Performance of Absorption Type Heat Pump for Waste Heat Recovery of Closed Cooling Water

Byungchul Park<sup>†</sup> · Taehyeong Kim · Kwangsu Kim

Korea South-East Power Co.

(Received 2 May 2019, Revised 10 June 2019, Accepted 12 June 2019)

#### 요 약

복합화력발전소 에너지절감 사업으로 폐열회수용 흡수식 히트펌프가 설치됨에 따라 부분부하(Partial Load)에서의 성능 데이터 확인을 위해 성능시험을 실시하였다. 부분 부하에서 히트펌프 가동에 따른 운전 데이터 변화는 다음과 같다. 기기관각수(CCW) 배열 및 배열회수열교환기(HRSG)로부터 공급되는 저압증기(LP STM)의 일부가 히트펌프의 열원으로 공급되므로 지역난방열 생산이 증대된다. 그러나 증기터빈으로 공급되는 저압증기의 유량 감소에 따라 증기터빈 출력이 감소된다. 또한 고압 지역난방열교환기(HP-DH) 및 저압 지역난방열교환기(LP-DH)로 공급되는 고압터빈(HPT) 배기증기의 유량 저하에 따라 HP-DH 및 LP-DH의 열생산량도 감소한다. 부분부하에서는 정격부하 대비 히트펌프에 운전에 따른 터빈 출력 저하가 큰 것으로 나타났으며, 이에 따라 부분 부하에서는 발전소 전체의 열 생산 증가량, 전기출력 감소량을 종합적으로 고려하여 히트펌프 운전 여부를 결정해야 한다.

**주요어 :** 히트펌프, 부분부하, 성능시험, 전력생산량, 열생산량, 열회수율

**Abstract -** As absorption type heat pump for waste heat recovery is installed in combined cycle power plant for Energy Service Company, performance test is implemented to confirm the operation data on partial load. The operation data changes according to the heat pump operation on partial load are as follows. Total heat output increases, because waste heat of closed cooling water and a portion of LP steam from HRSG is supplied. But electric power output of steam turbine is reduced, because LP steam to steam turbine is reduced. And heat output from HP district heater and LP district heater is reduced, because HP turbine exhaust steam to HP district heater and LP district heater is reduced. On partial load operation, turbine output reduction is higher than the base load operation. Therefore, on partial load, heat pump should be operated in consideration of the heat output increase and electric power output reduction

**Key words :** Heat Pump, Partial Load, Performance Test, Electric Power Output, Heat Output, Heat Recovery Rate

## 1. 서 론

히트펌프는 저온부의 열원을 고온부에 공급하여 고온부에서 추가적인 열생산이 가능<sup>(1)</sup>하다. 이 중

흡수식 히트펌프는 냉매로서 물을 사용하고, 흡수제로 리튬브로마이드(LiBr)를 사용<sup>(2)</sup>한다. 또한 재생기에서 냉매와 흡수제를 분리하기 위해서는 고온의 구동열원이 필요<sup>(3)</sup>하게 된다. 근래 석탄화력발전소 배기가스열<sup>(4)</sup>, 열병합발전소 기기관각수배열<sup>(5)</sup> 등의 발전소 폐열을 활용하여 히트펌프를 구동하는 시스템에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-070-8898-5781 E-mail : pbc9@koenergy.kr

복합화력발전소 에너지절감 사업으로 폐열회수용 흡수식 히트펌프가 설치됨에 따라 부분부하에서의 성능 데이터 확인을 위해 본 성능시험을 실시하였으며, 세부적으로 부분부하에서 히트펌프 운전 전·후 지역난방 열생산량 및 증기터빈 출력 변화를 확인하였다. 대용량 흡수식 히트펌프(1,000 냉동톤)의 설치사진, 운전화면을 Fig. 1에 나타내었다.

## 2. 설비개요

### 2-1. 히트펌프 설치 전(개선 전)

히트펌프 설치 전 복합화력발전소 증기터빈의 열정산도는 Fig. 2와 같다. 연료가 LNG 히터로 들어가서 예열된 후 가스터빈으로 들어가고 전력 생

산 후 배기가스는 배열회수보일러(HRSG)로 가서 증기를 생산하는 열원으로 쓰인다. 여기서 생산된 증기는 고압터빈 및 지역난방 열교환기를 거쳐 전력 생산 및 지역 난방수의 열원으로 사용된다. 지역난방수의 승온은 3개의 주 지역난방 열교환기(HP-DH, LP-DH, DH-CLR) 및 연돌의 배기열 회수용 열교환기(Stack DH)에서 이루어진다. 히트펌프 설치 전 성능 특성은 Table. 1과 같으며 정격부하(Base Load) 기준으로 작성되었다. 가스터빈과 HRSG는 5 Unit 이고 스팀터빈은 1 Unit이다.

### 2-2. 히트펌프 설치 후(개선 후)

기기냉각수(CCW) 배열 및 HRSG로부터 공급되는 저압증기의 일부를 히트펌프의 열원으로 공급하여

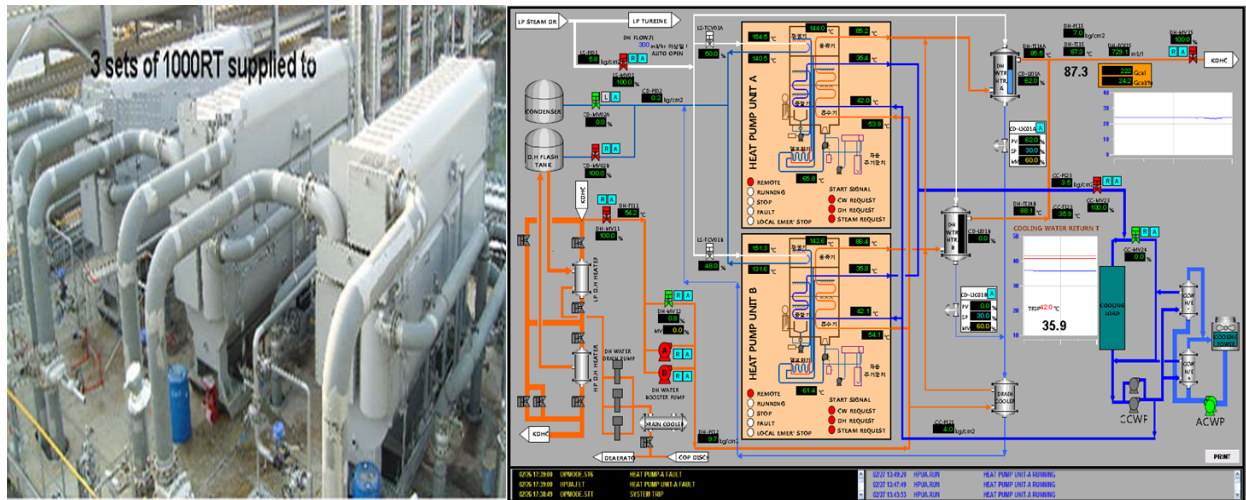


Fig. 1. General arrangement and operation screen of absorption type heat pump

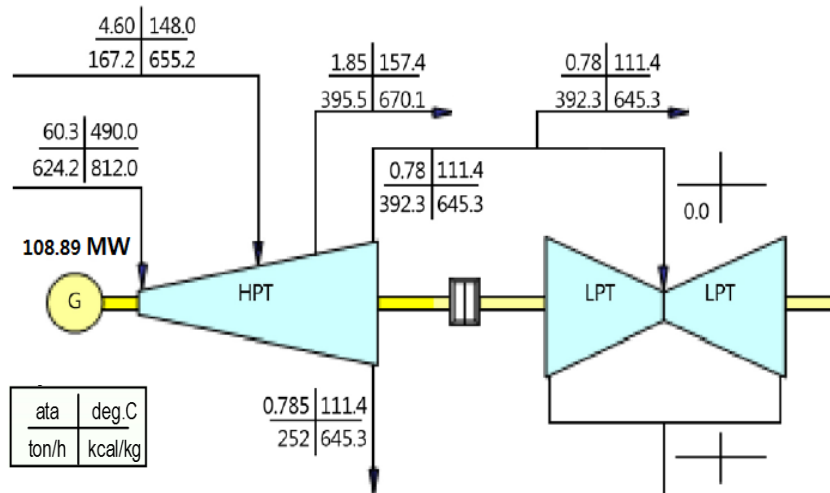
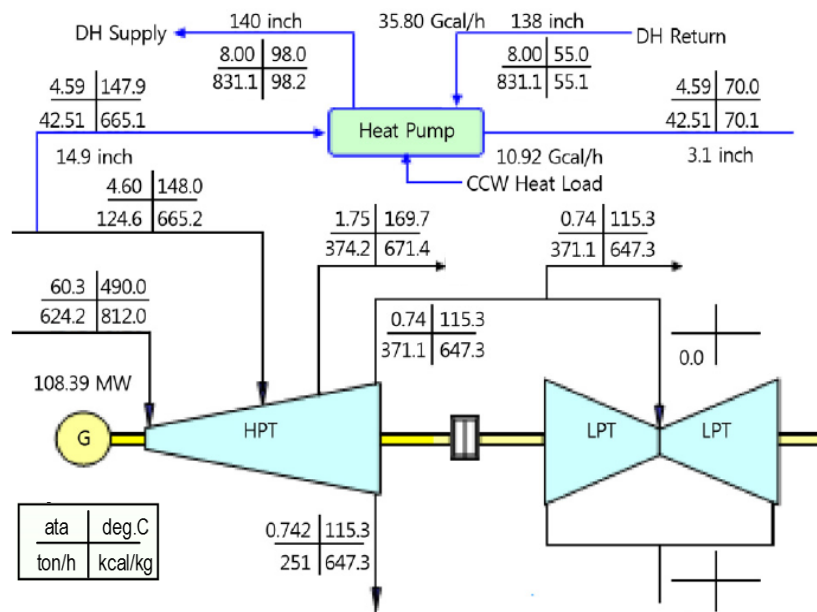


Fig. 2. Heat balance before heat pump installation

**Table 1.** Design performance summary before heat pump installation

Item	Unit	Design Data	Description
Combination		5:1	-
GT Output	MW	397.000	-
ST Output	MW	108.887	-
CC Output	MW	505.887	-
Main DH Output	Gcal/h	468.80	-
Stack DH Output	Gcal/h	68.53	-
Heat Pump	Gcal/h	-	-
Total DH Output	Gcal/h	537.33	-
CHP Eff(HHV)	%	80.91	-



**Fig. 3.** Heat balance after heat pump installation

지역난방열을 증대시키는 것이 본 히트펌프 ESCO (Energy Service Company) 사업의 주목적이며, 히트펌프 설치 후 증기터빈의 열정산도는 Fig. 3과 같다. CCW 배열과 고압터빈으로 흘러가는 HRSG의 저압증기의 일부를 추가하여 히트펌프 및 가열기의 열원으로 공급한다. 히트펌프로 저압증기의 일부를 추가(42.51 ton/h)하였으므로, 증기터빈의 전기 출력은 일부 감소하며, 주 지역난방 열교환기(Main DH)의 열출력 역시 감소하게 된다. 그리고, 가스터빈(GT) 전기출력, 연돌 열교환기(Stack DH) 열출력은 개선 전·후에 변화가 없는 것으로 볼 수 있다.

히트펌프 설치 전·후 성능특성은 Table. 2와 같으며, 정격부하(Base Load) 기준으로 작성되었다. 저압증기 중 42.51 ton/h의 유량을 히트펌프로 보내면서 증기터빈 출력은 0.497MW, 지역난방 열교환기 열생산량은 24.24 Gcal/h 감소하였으며, 히트펌프의 열량은 35.80 Gcal/h 증가된다. 그러므로 발전소 총 열생산량은 11.55 Gcal/h가 증가되게 된다. 여기서 증가된 열량은 기기냉각수 배기열(10.92 Gcal/h)와 저압터빈 추가 증기가 터빈에서 일을 하는 대신 히트펌프에 열량으로 공급되어 증가한 것이라 할 수 있다.

**Table 2.** Design performance summary after heat pump installation

Item	Unit	Design Data		Description
		Before Heat Pump Installation	After Heat Pump Installation	
Combination(GT:ST)	-	5:1	5:1	-
GT Output	MW	397.000	397.000	0.000
ST Output	MW	108.887	108.390	-0.497
CC Output	MW	505.887	505.390	-0.497
Main DH Output	Gcal/h	468.80	444.56	-24.24
Stack DH Output	Gcal/h	68.53	68.53	0.00
Heat Pump	Gcal/h	-	35.80	35.80
Total DH Output	Gcal/h	537.33	548.89	11.55
CHP Eff(HHV)	%	80.91	81.84	0.93

### 3. 성능시험 방법

#### 3-1. 시험방법

발전소 운전 부하를 변경하면서, 히트펌프 운전 전·후 지역난방 열생산량 및 증기터빈 출력 변화를 확인하였다. 첫 번째 시험은 80 % 부하에서 히트펌프 운전 1회 및 히트펌프 정지 1회, 두 번째 시험은 60 % 부하에서 히트펌프 운전 1회 및 히트펌프 정지 1회, 마지막 시험은 40 % 부하에서 히트펌프 운전 1회 및 히트펌프 정지 1회로 진행되었다. 복합화력발전소 운전 모드는 열·전기 동시생산 모드(Mode- I)로 설정하였다.

증기터빈 전력량은 현장 전력량계에서 측정한 값을 기준으로 하였으며, 주 지역난방 열교환기(Main DH) 열생산량은 현장 열량계에서 측정한 값을 기준으로 하였다. 히트펌프 운전 전·후 발전소 운전 조건 변화에 따른 영향을 최소화하기 위하여 최대한 운전지침서상의 정상운전 상태를 유지하였으며, 자동제어 특성에 맞추어 발전단 전기출력 기준으로 출력유지 및 부하제한(Governor Free Off) 운전방식 채택하였다. 또한 기기냉각수(CCW) 유량 측정을 위해 초음파 유량계를 특설하여 유량 데이터 취득하였으며, 열병합 발전소의 안정적 운전이 가능한 한도로 계통격리를 실시하였다.

#### 3-2. 검토사안

기기냉각수(CCW) 배열 회수용으로 히트펌프를 설치하여 운용함으로써 열병합 발전설비에 영향을 미치는 주요소<sup>(6)</sup>는 다음과 같다. 첫째, 히트펌프에서 회수된 기기냉각수 배기열로 지역난방 열 생산이

증대되며, 증기터빈으로 공급되는 저압증기 유량 감소에 따라 증기터빈 출력은 감소한다. 둘째, 고압 지역난방 열교환기(HP-DH) 및 저압 지역난방 열교환기(LP-DH)로 공급되는 고압터빈 추기증기 유량 저하에 따라 HP-DH 및 LP-DH의 열생산량은 감소한다. 셋째, 히트펌프의 CCW 냉각에 따른 보조냉각수펌프 및 냉각팬 소비전력 절감되나, 히트펌프 내부 펌프 및 지역난방 열교환기 승압펌프 운전에 따른 소비전력 증대 요인이 있다.

### 4. 성능시험 결과

#### 4-1. 히트펌프 열생산량

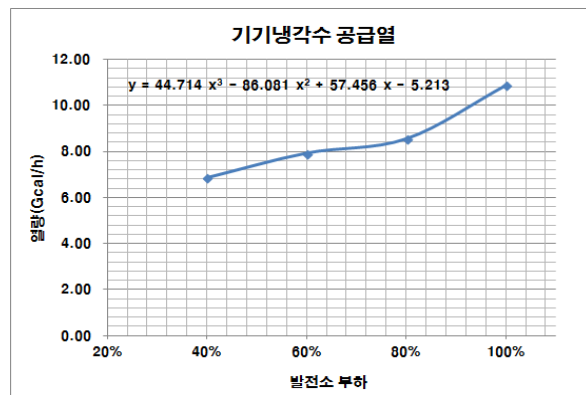
발전소 운전 부하대별 히트펌프 열생산량 및 관련된 운전 데이터는 Table. 3와 같다. 히트펌프 열생산량은 히트펌프 입출구의 지역난방수(DH WTR) 유량에 입출구의 엔탈피 차를 곱한 값으로 계산하였다. 기기냉각수 유량은 초음파 유량계를 특설하여 측정하였으며, 저압증기 출구온도는 시험 Data 미 확보로 히트펌프 공급자가 제시한 설계값을 사용하였다. 저압증기 열량은 히트펌프 열생산량에서 기기냉각수 공급열량을 제외한 값으로 산정하였다.

Fig. 4에 발전소 운전부하 변화에 따른 기기냉각수(CCW) 공급열 변화를, Fig. 5에 발전소 운전부하 변화에 따른 히트펌프 열생산량 변화를 각각 나타내었다. Fig. 4 및 Fig. 5의 100% 부하의 CCW 공급열 및 히트펌프 열생산량은 과거 수행된 정격부하 성능시험의 결과<sup>(7)</sup>를 적용하였다.

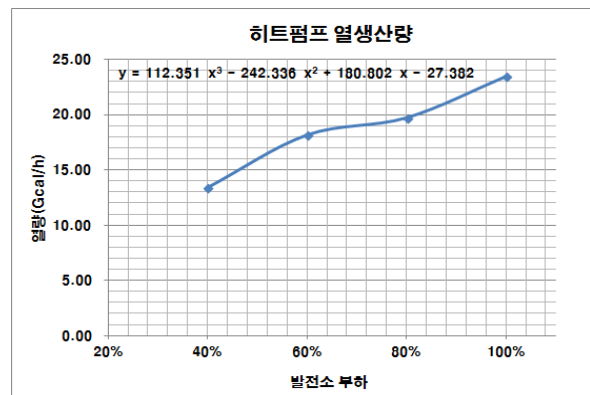
100% 부하의 히트펌프 열생산량이 설계치(Table 2) 35.8 Gcal/h 대비, 운전치(Fig. 5)가 23.5 Gcal/h로

**Table 3.** Operation data related to heat production of heat pump at each load

Item	Unit	80% Load		60% Load		40% Load		
		Heat Pump Off	Heat Pump On	Heat Pump Off	Heat Pump On	Heat Pump Off	Heat Pump On	
Heat Pump Heat Output	Gcal/h	-	19.69	-	18.13	-	13.36	
CCW	Inlet T	℃	-	38.12	-	37.67	-	34.47
	Outlet T	℃	-	33.00	-	32.93	-	30.37
	Pr.	kg/cm2	-	5.07	-	5.03	-	5.03
	Flow	ton/h	-	1671.09	-	1674.62	-	1671.38
	Heat	Gcal/h	-	8.55	-	7.93	-	6.86
LP STM	Inlet T	℃	-	156.80	-	149.90	-	147.47
	Outlet T	℃	-	92.40	-	92.40	-	92.40
	Pr.	kg/cm2	-	5.80	-	4.83	-	4.53
	Flow	ton/h	-	19.70	-	18.10	-	11.55
	Heat	Gcal/h	-	11.13	-	10.20	-	6.50
DH WTR	Inlet T	℃	-	53.87	-	54.07	-	53.33
	Outlet T	℃	-	81.90	-	81.00	-	73.93
	Pr.	kg/cm2	-	10.37	-	10.03	-	10.93
	Flow	ton/h	-	700.97	-	671.77	-	647.30
	Heat	Gcal/h	-	19.69	-	18.13	-	13.36



**Fig. 4.** Heat supply of CCW



**Fig. 5.** Heat production of heat pump

12.3 Gcal/h 낮은 원인은, 히트펌프로 열을 공급하는 기기냉각수 출구온도가 설계치 40 ℃ 대비 35.8 ℃로

4.2 ℃ 낮은 것이 주요인이다. 또한 설계 시 히트펌프에서의 열손실이 적정 수준으로 반영되지 않아, 시험

시 히트펌프 열생산량이 설계 대비 낮게 나타났다.

히트펌프 열생산량은 부하대별로 19.69 Gcal/h(80% 부하), 18.13 Gcal/h(60% 부하), 13.36 Gcal/h(40% 부하)로 나타났다. 다음으로 히트펌프로 공급되는 기기냉각수 입구 온도는 부하 감소에 따라 낮아지며, 이에 따라 히트펌프에 공급되는 기기냉각수 열량도 8.55 Gcal/h(80% 부하), 7.93 Gcal/h(60% 부하), 6.86 Gcal/h(40% 부하)로 부하 감소에 따라 낮아지는 것으로 나타났다.

히트펌프로 공급되는 저압증기 압력 및 온도도 부하 감소에 따라 낮아지는 것으로 나타났으며 이는 부분부하에서 터빈출력저하를 증대시키는 요인으로 작용할 수 있다. 또한 히트펌프 출구 지역난방수 온도는 81.90 °C(80% 부하), 81.00 °C(60% 부하), 73.93 °C(40% 부하)로 부하 감소에 따라 낮아지는 것으로 나타났다.

**4-2. 복합화력발전소 총 열생산량 비교**

복합화력발전소 총 열생산량은 현장 열량계 측정치를 사용하였으며, 주 지역난방 열교환기(Main DH) 열생산량은 총 열생산량에서 히트펌프 열생산량을 제외한 값으로 계산하였다. 복합화력발전소 기기별 열생산량 내역은 Table 4와 같다. Fig. 6에 발전소 운전부하 변화에 따른 복합화력발전소 총 열생산량 증가분의 변화를 나타내었으며, 100% 부하의 총 열생산량 증가분은 과거 수행된 정격부하 성능시험의 결과<sup>(7)</sup>를 적용하였다.

총 열생산량 증가분은 부하별로 8.39 Gcal/h(80% 부하), 6.94 Gcal/h(60% 부하), 6.00 Gcal/h(40% 부하)로 나타났다. 또한 히트펌프가 회수한 저압증기

열량 11.13 Gcal/h(80% 부하), 10.20 Gcal/h(60% 부하), 6.50 Gcal/h(40% 부하) 대비하여 Main DH 열생산량 감소분이 11.30 Gcal/h(80% 부하), 11.18 Gcal/h(60% 부하), 7.35 Gcal/h(40% 부하)로 높은 것은 히트펌프가 회수하지 못한 저압증기 열량이 있음을 나타낸다. 이에 따라 히트펌프 운전에 따라 일부 열손실이 발생함을 추정할 수 있다.

지역난방 열교환기(DH) 출구 지역난방수 온도는 히트펌프 정지 시 105.16 °C(80% 부하), 105.48 °C(60% 부하), 104.56 °C(40% 부하), 히트펌프 운전 시 102.25 °C(80% 부하), 101.26 °C(60% 부하), 98.94 °C(40% 부하)로 나타났다. 이와 같이 히트펌프 운전 시 지역난방수 공급 온도가 저하되므로, 지역난방수 공급 조건을 고려하여 히트펌프 운전 여부를 결정해야 한다.

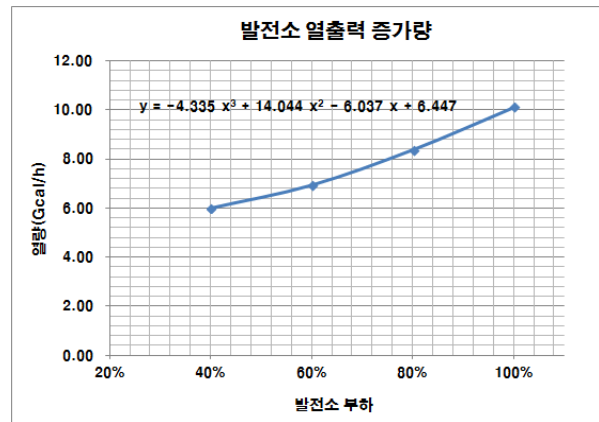


Fig. 6. Total heat production increase

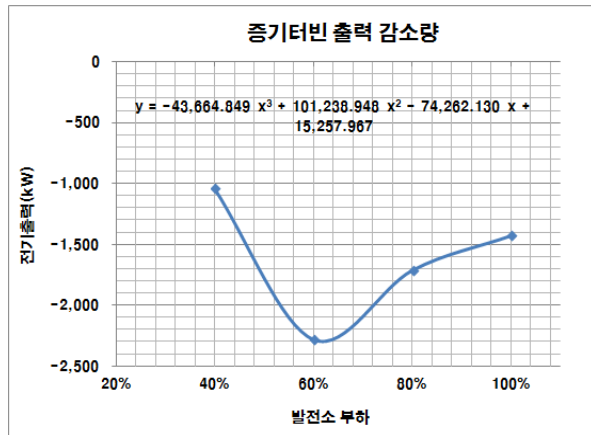
Table 4. Total heat production of combined cycle power plant at each load

Item	Unit	80% Load			60% Load			40% Load			
		Heat Pump Off	Heat Pump On	Diff (On-off)	Heat Pump Off	Heat Pump On	Diff (On-off)	Heat Pump Off	Heat Pump On	Diff (On-off)	
Heat Pump	CCW Heat	Gcal/h	-	8.55	8.55	-	7.93	7.93	-	6.86	6.86
	LP STM Heat	Gcal/h	-	11.13	11.13	-	10.20	10.2	-	6.50	6.5
	Heat Pump Heat	Gcal/h	-	19.69	19.69	-	18.13	18.13	-	13.36	13.36
Main DH Heat	Gcal/h	339.27	327.96	-11.31	259.25	248.07	-11.18	177.19	169.84	-7.35	
Total Heat	Gcal/h	339.27	347.65	8.38	259.25	266.20	6.95	177.19	183.19	6.00	



**Table 6.** Electric power output of steam turbine at each load

Item	Unit	80% Load			60% Load			40% Load		
		Heat Pump Off	Heat Pump On	Diff (On-off)	Heat Pump Off	Heat Pump On	Diff (On-off)	Heat Pump Off	Heat Pump On	Diff (On-off)
Turbine Output	MW	105.042	103.327	-1.715	75.610	73.325	-2.285	45.492	44.449	-1.043



**Fig. 7.** Steam turbine power output reduction

**4-3. 복합화력발전소 증기터빈 전력생산량 비교**

증기터빈 전력생산량은 현장 전력량계 측정치를 사용하였으며, 히트펌프 운전 전·후 증기터빈의 출력 변화를 비교하였다. 히트펌프 운전 시 증기터빈 출력 변화는 Table 6과 같다. Fig. 7에 발전소 운전부하 변화에 따른 증기터빈 전기출력 감소분의 변화를 나타내었으며, 100% 부하의 증기터빈 출력 감소량은 과거 수행된 정격부하 성능시험의 결과<sup>(7)</sup>를 적용하였다.

증기터빈 입구로 공급되는 저압증기 유량의 일부가 히트펌프로 분기되므로 히트펌프 운전 시에는 터빈출력이 감소한다. 증기터빈 출력 감소량은 부하별로 1,715 kW(80% 부하), 2,285kW(60% 부하), 1,043 kW(40% 부하)로 나타났다. 증기터빈으로 공급되는 저압증기 압력은 히트펌프로 일부가 분기되면서 낮아지는 것으로 추정되며, 저압증기 유량 저하와 함께 터빈출력 저하요인으로 작용한다.

60% 부하에서 터빈출력 저하가 상대적으로 큰 이유는 다음과 같다. 60% 부하에서는 히트펌프 정지 시, 증기터빈 저압증기 제어밸브(Control Valve) 전후단의 배기밸브(Drain Valve)가 Close 되어 있으나, 히트펌프 운전 시에는 터빈으로 공급되는 저압증기의 압력 저하에 따라 Drain Valve가 Open 된다. 이에 따라 터빈으로 공급되는 저압증기의 유량

손실이 증대되어 터빈 출력 저하분이 상대적으로 커지게 된다.

100% 및 80% 부하에서는 히트펌프 정지 및 운전 시 모두 증기터빈 저압증기 제어밸브 전후단의 Drain Valve가 Close 상태로 유지되고, 40% 부하에서는 히트펌프 정지 및 운전 시 모두 증기터빈 저압증기 제어밸브 전후단의 Drain Valve가 Open 상태로 유지된다. 이에 따라 증기터빈 저압증기 제어밸브 전후단의 Drain Valve가 히트펌프 정지 시 Close, 운전 시 Open 상태에 변화되는 60% 부하 대비하여 상대적으로 출력 감소분이 작은 것으로 나타났다.

**4. 결론**

복합화력발전소에 기기냉각수 배열 회수를 위한 흡수식 히트펌프가 설치됨에 따라 부분부하에서의 성능 데이터 확인을 위해 성능시험을 실시하였다.

시험결과 히트펌프 열생산량은 부하대별로 19.69 Gcal/h(80% 부하), 18.13 Gcal/h(60% 부하), 13.36 Gcal/h(40% 부하)로 나타났다. 또한 히트펌프 운전 시에 따라 증가된 발전소 총 열생산량은 부하대별로 8.39 Gcal/h(80% 부하), 6.94 Gcal/h(60% 부하), 6.00 Gcal/h(40% 부하) 측정되었다. 다음으로 히트펌프 운전 시 발전소의 증기터빈 출력 감소량(보정 후)은 부하대별로 1,713 kW(80% 부하), 2,266 kW(60% 부하), 1,074 kW(40% 부하)로 나타났다.

60% 부하에서는 히트펌프 정지 시, 증기터빈 저압증기 제어밸브(Control Valve) 전후단의 배기밸브(Drain Valve)가 Close 되어 있으나, 히트펌프 운전 시에는 터빈으로 공급되는 저압증기의 압력 저하에 따라 Drain Valve가 Open 된다. 이에 따라 터빈으로 공급되는 저압증기의 유량 손실이 증대되어 터빈 출력 저하분이 상대적으로 커지게 된다. 그러므로 저압증기 Control Valve의 Drain 열량을 주 지역난방 열교환기(Main DH)로 회수할 수 있는 설비 개선이 이루어진다면 전체 발전소의 열효율을 향상시킬 수 있다.

부분 부하에서는 정격부하(Base Load) 대비 히트펌프에 운전 시에 따른 터빈 출력 저하가 큰 것으로

나타났으며, 이에 따라 부분 부하에서는 열 생산 증가량, 출력 감소량을 종합적으로 고려하여 히트펌프 운전 여부를 결정해야 한다. 특히 히트펌프 운전 에 따라 증기터빈 저압증기 제어밸브 전후단의 Drain Valve가 Close 상태에서 Open 상태로 변하는 운전 부하가 있으므로 시운전 시, 증기터빈 저압증기 제어밸브 전후단의 Drain Valve 가 Open 되는 운전 부하 확인 후 그 부하점 이상에서 히트펌프를 운전하는 것이 에너지절감 측면에서 바람직하다.

## References

1. Yang, D. C., Hwang, W. J. and Park, K. H., 2010, Heat Recovery System by Heat Pump for the Efficiency Improvement in Power Plant, Summer Conference. Trans. Korean Soc. Electric. Eng., No. 1, pp. 1213-1214
2. Herold, K.E., Radermacher, R., Klein, S.A., 1996, Absorption Chillers and Heat Pump, CRC Press, New York, pp. 218
3. Suh, J. W., 2004, Absorption Heat Pump, Journal of Air Conditioning and Refrigerating Equipment, pp. 83-89
4. Na, S. E., Kim, M. S., 2014, A Prediction of Gas Consumption of Absorption Type Heat Pump using Waste Heat in Coal Power Plant, Vol. 43, pp. 42-48
5. Park, H. D., Heo, K. M., Yoon, S. H., Moon, Y. J., Yoo, H. S., Lee, J. H., 2014, Prediction of Performance Characteristics with Various Location of Waste Heat Recovery Heat Pump in a Gwang-gyo Cogeneration Plant, THE PLANT JOURNAL, Vol. 10, No. 2, pp. 28-37
6. Lee, S. H., 2014, Analysis of the Performance Test Results of a Heat Pump for Closed Cooling Water Heat Recovery on a Combined Thermal Power Plant, SAREK, Vol. 26, No. 11, pp. 541-546
7. Lee, S. H., 2016, Analysis on the Performance Test Results of Heat Pump for the Closed Cooling Water Heat Recovery on Combined Thermal Power Plant, KSF, Vol. 19, No. 2, pp.43-48