

Table 1 Performance summary(Mode I)

Section	Unit	Value
Combination		5:1
GT Output	MW	397.000
ST Output	MW	133.946
CC Output	MW	530.946
Main DH Output	Gcal/h	446.00
Stack DH Output	Gcal/h	68.53
Heat Pump	Gcal/h	-
Total DH Output	Gcal/h	514.53
CHP Eff(HHV)	%	80.81

DH-CLR)에서 이루어지는 열교환량만 개선 후와 비교하였다.

히트펌프 설치 전 Performance Summary(Mode-I 기준)는 Table 1과 같다. 가스터빈과 HRSG는 5 Unit이고 스팀터빈은 1 Unit이다.

2.2 히트펌프 설치 후(개선 후)

기기냉각수 배열(Closed Cooling Water Heat Load) 및 HRSG로부터 공급되는 LP Steam의 일부를 히트펌프의 열원으로 공급하여 지역난방열을 증대시키는 것이 본 히트펌프 ESCO(Energy Service Company) 사업의 주목적이며, 히트펌프 설치 후 Heat Balance는 Fig. 2와 같다. CCW Heat Load와 HPT로 흘러가는 HRSG의 LP Steam의 일부를 추가하여 히트펌프 및 가열기의 열원으로 공급한다. LP Steam의 일부를 추가(27.25 ton/h)하였으므로, 증기터빈의 전기 출력(ST Output)은 일부 감소하며, Main DH Output는 역시 감소하게 된다. 그리

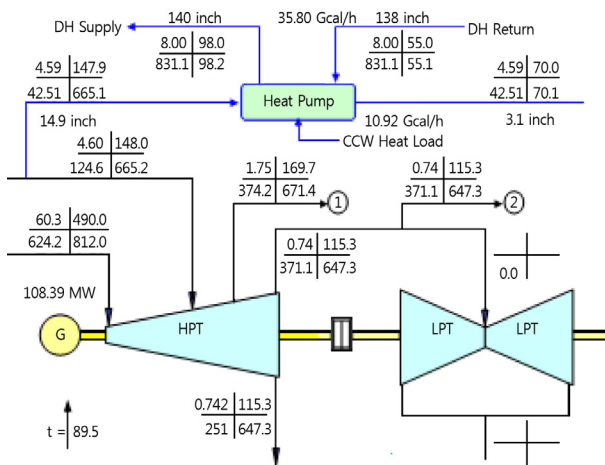


Fig. 2 Heat balance after heat pump.

Table 2 Performance Summary Before After Improvement

Section	Unit	Value		Note
		Before	After	
GT Output	MW	397.000	397.000	0.000
ST Output	MW	133.946	133.712	-0.234
CC Output	MW	530.946	530.712	-0.234
Main DH Output	Gcal/h	446.00	431.20	-14.80
Stack DH Output	Gcal/h	68.53	68.53	0.00
Heat Pump	Gcal/h	-	26.32	26.32
Total DH Output	Gcal/h	514.53	526.05	11.52
CHP Eff(HHV)	%	80.81	80.81	0.94

고, 가스터빈 전기출력(GT Output), Stack DH Output은 개선 전·후에 변화가 없는 것으로 볼 수 있다. 개선 전·후 Performance Summary는 Table 2와 같다.

LP Steam 중 27.25 ton/h의 유량을 히트펌프로 보내면서 증기터빈 출력은 0.234 MW, Main DH Output는 14.8 Gcal/h 감소하였으며, Heat Pump의 열량은 26.32 Gcal/h 증가된다. 그러므로 Total DH Output은 11.52 Gcal/h가 증가되게 된다. 여기서 증가된 열량은 CCW Heat Load(10.92 Gcal/h)와 LP Steam 추가 증기가 터빈에서 일을 하는 대신 히트펌프에 열량으로 공급되어 증가한 것이라 할 수 있다.

3. 성능시험 방법

3.1 시험방법

히트펌프 운전 전·후 지역난방 열생산량 및 증기터빈 출력 변화를 확인하였다. 시험부하는 Mode-I 히트펌프 운전, Mode-I 히트펌프 정지에서 1시간씩 각 1회 실시하였다. 시험조건은 증기터빈 전력량은 기존 전력량계에서 측정된 값을 기준, Main DH 열생산량은 기존 열량계에서 측정된 값을 기준으로 하였으며, 히트펌프 운전 전·후 발전소 운전조건 변화에 따른 영향을 최소화하기 위하여 최대한 운전지침서상의 정상 운전 상태를 유지하였다. 또한 자동제어 특성에 맞추어 발전단 전기출력 기준으로 출력유지 및 부하제한(Governor Free Off) 운전방식을 채택하였으며, 히트펌프 입출구 기기냉각수, 저압 스팀, 지역난방수 관련 Data는 전력연구원 보유 계측기를 특설하여 자동 데이터 취득 시스템(DAS)을 통해 취득하였다. 계통격리는 증기 응축수 배출, 탈기, 수질감시 등을 제외한 계통외부의 열 출입이 없도록 실시하였으며, 보조증기는 자체호기에서 공급하도록 하였고, 타 호기와의 Common 계통은 완전히 차단하였다.

3.2 검토 사안

기기냉각수(CCW) 배열 회수용으로 히트펌프를 설치하여 운용함으로써 열병합 발전설비에 영향을 미치는 주 요소는 다음과 같다. 히트펌프에서 회수된 CCW Heat Load에 따른 지역난방열 생산이 증대되며, 증기터빈으로 공급되는 LP STM 유량 감소에 따른 증기터빈 출력이 감소한다. HP-DH 및 LP-DH로 공급되는 HPT 추기 STM 유량 저하에 따른 HP-DH 및 LP-DH의 열생산량 감소되었다. 또한 히트펌프의 CCW 냉각에 따라 ACWP 및 냉각팬 소비전력이 절감되며, 히트펌프 내부 펌프(용액순환펌프, 냉매펌프) 및 DH WTR 증압펌프 운전에 따라 소비전력이 증대된다.

4. 성능시험 결과

4.1 히트펌프 성능

4.1.1 히트펌프 열회수량

히트펌프 운전 시 열회수량(보정 후)은 29.17 Gcal/h로 나타났다.

히트펌프의 열회수량 보정은 공급사가 제시한 성능시험 절차서 상의 4가지 항목(저압증기 압력, 기기냉각수 유량, 기기냉각수 출구 온도, 지역난방수 입구 온도)에 대해 보정곡선으로 보정하였으며, 히트펌프 단독 운전 시 보정 내역은 Fig. 3과 같다.

Table 3 Result of performance test about heat pump

	Item	Unit	Result
Before correction	Heat pump	Gcal/h	23.43
	Heater	Gcal/h	-
	Sum	Gcal/h	23.43
	Comparision	%	89%
Correction item	Low pr'	kg/cm ²	6.90
	STM	correction factor	1.05
		%	103
	CCW flow	correction factor	1.01
	CCW outlet TEMP	℃	35.9
		correction factor	0.75
	Hot water inlet TEMP	℃	54.9
		correction factor	1.01
	Total correction factor		0.80
After correction	Heat pump	Gcal/h	29.17
	Heater	Gcal/h	-
	Sum	Gcal/h	29.17
	Comparision	%	111%

Analaysis of special actual(operating) property of Heatpump

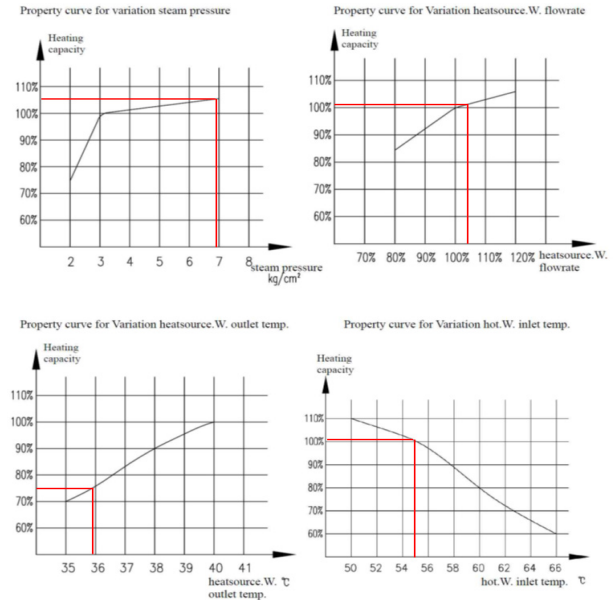


Fig. 3 Correction curve of heat pump only operation.

히트펌프 열회수량과 관련된 주요 운전 변수는 Table 4와 같으며, 히트펌프 열회수량은 히트펌프 입출구의 지역난방수(DH WTR) 유량에 입출구의 엔탈피 차를 곱한 값으로 계산하였다.

Table 4 Test results according to the operation paramater of heat pump

	Item	Unit	Result
Heat pump recovery	Before	Gcal/h	23.43
	After	Gcal/h	29.17
Closed cooling water	Inlet TEMP	℃	42.04
	Outlet Temp	℃	35.88
	Pressure	kg/cm ²	4.58
	Flow	ton/h	1,767.59
Auxiliary STM	Calory	Gcal/h	10.88
	Inlet TEMP	℃	163.49
	Outlet Temp	℃	92.18
	Pressure	kg/cm ²	6.88
DH water	Flow	ton/h	22.15
	Calory	Gcal/h	12.56
	Inlet TEMP	℃	54.92
	Outlet Temp	℃	87.13
DH water	Pressure	kg/cm ²	10.68
	Flow	ton/h	726.03
	Calory	Gcal/h	23.43

기기냉각수 출구 온도가 기준치 40℃ 대비, 35.9℃로 낮게 운전되고 있는 점이 보정 전 히트펌프 열회수량이 낮은 원인으로 보여진다. 히트펌프 출구의 저압증기 드레인이 계약기준 90℃ 대비, 92.18℃으로 높은 온도로 유지되어 히트펌프로 공급되는 저압증기의 유량을 증가시킬 수 있다. 지역난방수 입구 온도가 낮을수록 히트펌프의 열회수량이 높아지므로 히트펌프 운전 시 지역난방수 입구 온도를 정격치 55℃ 이내에서 운전하는 것이 바람직하다.

4.1.2 히트펌프 저압증기 공급열량

히트펌프 성적계수(효율)는 지역난방수의 열회수량을 재생기에 공급되는 저압증기 열량으로 나눈 값으로 정의된다. 이에 따라 계약기준으로 계산된 성적계수는 1.71로 나타났다. 시험 시의 성적계수를 1.71로 계약기준과 동일하게 가정하고 저압증기 공급열량 및 추가유량을 계산하면 Table 5와 같다.

저압증기 유량 및 열량을 히트펌프 성적계수를 고려하지 않고 단순 열평형으로 계산할 경우와 성적계수를 고려할 경우를 비교하면 Table 6과 같다.

히트펌프 성적계수를 고려할 경우 저압증기 공급열량은 14.12 Gcal/h으로 나타났다. 이는 성적계수를 고려

Table 5 Test result according to the low pressure steam supply and extraction steam quantity

	Item	Unit	Result
	COP	-	1.71
DH water	Total recovery	Gcal/h	23.43
	Heat recovery	Gcal/h	0.98
	Heat recovery	Gcal/h	22.45
Auxiliary steam	Heat supply	Gcal/h	13.13
	Heat exchanger heat recovery	Gcal/h	0.98
	HTR heat supply	Gcal/h	-
	Total heatsupply	Gcal/h	14.12
	Supply flow	ton/h	24.89

Table 6 Low pressure steam calory and quantity

	Item	Unit	Result
STM Calory	COP not count	Gcal/h	12.56
	COP count	Gcal/h	14.12
	Difference	ton/h	1.56
STM flow	COP not count	ton/h	22.15
	COP count	ton/h	24.89
	Difference	ton/h	2.75

Table 7 Test result on the heat pump

	Item	Unit	Result
Heat pump	CCW heat supply	Gcal/h	10.88
	STM heat supply	Gcal/h	14.12
	Heat loss (estimation)	Gcal/h	1.56
	Heat pump	Gcal/h	23.43

하지 않고 단순 열평형으로 계산시 대비 1.56 Gcal/h 늘어난 값이다. 히트펌프 성적계수를 고려할 경우 저압증기 유량은 24.89 t/h으로 나타났다. 이는 성적계수를 고려하지 않고 단순 열평형으로 계산시 대비 2.75 t/h 늘어난 값이다. 성적계수를 고려할 경우 늘어난 저압증기 공급열량 1.56 Gcal/h은 히트펌프 운전에 따라 발생하는 열손실로 추정할 수 있다. 히트펌프 성적계수를 고려하여 계산된 히트펌프 내부 열평형 상태는 Table 7과 같다.

4.2 발전소 열생산량

개선 전·후 ‘A’ 발전소 열생산량을 Table 8에 나타냈다. 개선 전에는 430.71 Gcal/h의 열이 생산되며, 개선 후에는 440.83 Gcal/h의 열이 생산되어 10.12 Gcal/h의 열생산 증가를 나타냈다. 개선 전에는 지역난방수 가열기에서만 열이 생산되며, 개선 후의 열생산량은 지역난방수 가열기 열생산량 417.40 Gcal/h 및 히트펌프 열생산량 23.43 Gcal/h로 구성된다.

히트펌프 열생산량 23.43 Gcal/h는 기기냉각수의 폐열 10.88 Gcal/h 및 구동증기열 12.56 Gcal/h로 구성된다. 흡수식 히트펌프의 성능을 나타내는 성적계수는 히트펌프 열생산량을 증기공급열로 나눈 값으로 정의되며, 이 때 성적계수는 1.86이 된다.

4.3 발전소 전기생산량

개선 전·후 ‘A’ 발전소 전기생산량 변화는 Table 8에서 확인할 수 있다. 히트펌프는 증기터빈에 공급되는 증기의 일부를 구동열원으로 활용하므로 증기터빈의 출력이 저하되게 된다. 이에 따라 개선 후 증기터빈 전기생산량은 1,440 kW 저하된 것으로 나타났다. 이를 열로 환산하면 1.24 Gcal/h이 된다.

이번 성능시험에서 전기 출력 저하는 터빈에 공급되는 증기의 유량 감소분에 단순 비례하지 않고 더 크게 나타났다. 이는 히트펌프에서 구동열원을 터빈증기로 활용할 경우 출력저하가 설계시보다 증대될 수 있음을 보여준다.

Table 8 Comparison of energy generation

Item		Unit	Before	After	Diff	
Heat	CCW	Gcal/h	-	10.88	10.88	
	Heat pp	Driving STM	Gcal/h	-	12.56	12.56
		Sum	Gcal/h	-	23.43	23.43
	DH heater	Gcal/h	430.71	417.40	-13.32	
	Sum	Gcal/h	430.71	440.83	10.12	
Power	Steam TBN	kW	129,523	128,083	-1,440	
		Gcal/h	111.39	110.15	-1.24	
Total energy		Gcal/h	542.10	550.98	8.88	

4.4 개선효과

히트펌프 설치에 따른 개선효과를 Table 9에서 확인할 수 있다. 기기냉각수의 폐열 10.88 Gcal/h는 8.88 Gcal/h 회수되어 81.62%의 회수율을 나타냈다. 18.38%의 손실율은 발전소에서 히트펌프로 기기냉각수, 구동증기, 지역난방수 등이 공급되면서 발생하는 손실 및 히트펌프 내부 효율에 기인한 것으로 추정된다. 개선 후 에너지 생산은 개선 전 542.10 Gcal/h 대비 1.64% 늘어난 550.98 Gcal/h로 나타났다.

4.5 증기터빈 출력저하 검토

‘A’ 발전소에 설치된 흡수식 히트펌프는 HRSG에서 증기터빈으로 공급되는 저압증기를 일부 추가하여 구동열원으로 사용한다. 이에 따라 증기터빈에 공급되는 저압증기량이 감소하여 터빈 출력이 떨어지게 된다. 본 절에서는 터빈 출력 저하의 원인을 분석하였다. 계약서 상의 Heat Balance 기준으로 개선 전(히트펌프 설치 전), 개선 후(히트펌프 설치 후)의 터빈 출력을 계산하면 Table 10과 같다. 터빈 출력은 터빈 입·출구 증기의 엔탈피차에 증기유량을 곱한 값으로 계산하였으며, 터빈입구로 공급되는 고압증기와 저압증기는 50%는 HP-DH로, 나머지 50%는 LP-DH로 배기되는 것으로 가정하였다. Table 10은 Mode- I 기준으로 작성되었다.

Table 9 Improvement effectiveness

Item		Unit	Result
Recovery rate	CCW waste heat	Gcal/h	10.88
	Heat recovery	Gcal/h	8.88
	Recovery rate	%	81.62%
	Loss rate	%	18.38%
Growth rate	Before energy	Gcal/h	542.10
	After energy	Gcal/h	550.98
	Growth rate	%	1.64%

Table 10 Calculation of turbine power output(Mode I)

Item		Unit	Before	After	Diff
HPT Inlet	HP STM Enthalpy	kcal/kg	812.00	812.00	-
	HP STM Flow	t/h	624.20	624.20	-
	LP STM Enthalpy	kcal/kg	655.15	655.15	-
		t/h	167.20	139.90	-27.30
HPT Outlet	HP-DH Inlet STM Enthalpy	kcal/kg	644.80	644.80	-
	HP-DH Inlet STM Flow	t/h	395.50	381.90	-13.60
	LP-DH Inlet STM Enthalpy	kcal/kg	615.80	616.20	0.40
		t/h	392.20	378.60	-13.60
TBN Work	HP-DH Inlet HP STM	kW	60,678	60,678	-
	HP-DH Inlet LP STM	kW	71,202	71,057	-145
	LP-DH Inlet HP STM	kW	1,006	842	-164
	LP-DH Inlet LP STM	kW	3,825	3,168	-657
	Total	kW	136,711	135,745	-967
Generator Efficiency		-	0.98	0.98	-
ST Output(calculation)		kW	133,946	132,999	-947
ST Output(contract)		kW	133,946	133,712	-234

계약서 상의 Heat Balance 기준으로 계산된 히트펌프 운전 전·후 증기터빈 출력 변화는 -947 kW로 나타났다.

또한 증기터빈으로 공급되는 증기 유량 감소에 따라 터빈 출력 특성이 변화된 것으로 추정된다. 증기터빈으로 공급된 저압증기 유량은 아래와 표와 같다. 히트펌프 정지 시 190.29 ton/h 대비하여 히트펌프 운전 시는 166.86 ton/h로 나타났다.

일차적으로 증기터빈으로 공급되는 저압증기 질량 유량 감소에 따라 터빈 출력이 감소된 것으로 판단되나, 유량 감소에 따른 터빈 출력 특성 변화에 따라 터빈 출력 저하가 높아진 것으로 추정된다. 저압증기 유

Table 11 Difference between stop and operation of heat pump

Unit	Unit	Heat pump stop	Heat pump operation	Diff
ST inlet LP STM Flow	ton/h	190.29	166.86	-23.43

량에 따른 터빈 출력 곡선이 제작사로부터 입수되지 않아, 본 논문에서는 저압증기 유량 저하에 따른 터빈 출력 저하분에 대한 계산은 수행하지 않았다. 다만 ‘A’ 발전소 증기터빈의 경우 저압증기 유량과 터빈출력이 단순 비례하지 않고, 유량 저하에 따른 출력 감소분의 기울기가 높은 수준으로 추정된다.

5. 결 론

기기냉각수(CCW) 배열 및 HRSG로부터 공급되는 LP Steam의 일부를 히트펌프의 열원으로 공급하여 지역난방열을 증대시키는 것이 히트펌프 설치의 주목적이다. 이에 따라 히트펌프에서 회수된 CCW Heat Load에 따른 지역난방열 생산이 증대되나, 증기터빈으로 공급되는 LP Steam 유량 감소에 따라 증기터빈 출력이 감소된다. 또한 HP-DH 및 LP-DH로 공급되는 HPT 배기 Steam 유량 저하에 따라 HP-DH 및 LP-DH의 열생산량도 감소한다. 소내소비동력의 경우 히트펌프의 CCW 냉각에 따라 ACWP 및 냉각팬 소비전력이 절감되는 효과가 있다.

시험결과 히트펌프 단독 운전 시 열회수량(보정 후)은 29.17 Gcal/h로 나타났다. 단 기기냉각수 출구 온도가 기준치 40℃ 대비, 35.9℃으로 낮게 운전되고 있는 점이 보정 전 히트펌프 열회수량이 낮은 원인으로 보여진다. 증기터빈 출력 감소량은 히트펌프 운전 시 -1,430 kW로 나타났다. 증기터빈 출력 감소가 높게 나타나게 된 원인은 증기터빈으로 공급되는 증기 유량 감소에 따라 터빈 출력 특성이 변화된 것으로 추정된다.

복합화력발전소에 흡수식 히트펌프를 설치하여 기기냉각수 폐열을 회수할 경우 폐열의 82% 수준이 실제 에너지 생산량 증가로 나타남을 이번 성능시험에서 확인할 수 있었다. 이는 히트펌프 설치 전 사전 경제성 분석 시, 적정 수준의 폐열 회수율을 반영해야 함을 보여준다.

후 기

본 연구는 Heat Pump에 대한 ESCO 사업의 성능시험 확인시험에 의해 이루어진 것임.

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, Proceedings of the KIEE 2010 Summer Conference, pp. 1213-1214.
2. Suh, J. W., 2004, Absorption heat pump, Journal of Air Conditioning and Refrigerating Equipment, pp. 83-89.
3. Herold, K. E., Radermacher, R., and Klein, S. A., 1996, Absorption chillers and heat pump, CRC Press, New York, p. 218.
4. Park, Y., Park, M. Y., and Kim, C. M., 2003, Economic analysis of heat pump system in educational building, Korea Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 10, pp. 879-887.
5. Jung, S. S., A study on the life cycle cost analysis of EHP and GHP for heating and cooling systeming of school building in pusan, Korea Journal of Architectural Institute, Vol. 19, No. 11, pp. 247-254.
6. Kim, Y. S. and Kang, C. H., 2004, A study on the effect measurement of ESCO projects using LCC technique, Korea Journal of Architectural Institute, Vol. 20, No. 2, pp. 89-96.
7. Jung, J. R. and Lee, K. H., 2003, Evaluation of alternatives for building service systems in high-rise building based on life cycle cost analysis, Korea Journal of Architectural Institute, Vol. 19, No. 1, pp. 249-257.