

원전 습분분리재열기 튜브 번들 교체를 위한 열전달 고찰

최유성[†] · 최광희* · 이상국*

Heat Transfer Study to Replace a Tube Bundle of Moisture Separator Reheater at Nuclear Power Plant

You-Sung Choi[†], Kwang-Hee Choi* and Sang-Guk Lee*

ABSTRACT

The plugging rate of reheater tubes of Wolsung unit 1 nuclear power plant has been increased by corrosion and erosion since 1990. As the dimensions of the new first stage reheater bundle tubes which were supplied by Hanjung company to replace were different from old one, numerical calculations are carried out for flow and heat transfer in the reheater bundle tubes of the N.P.P. Numerical calculations consists of thermal performance, drain line pressure drop, flow change by pressure drop of line, stress analysis of finned tubes and analysis of flow induced vibration. Computational analysis using heat transfer research institute program is adopted to verify the results of the numerical calculations. It contains the evaluation of performance in the system with view to location of the new reheater bundle and it shows the differences between the numerical calculation results and heat transfer research institute program output.

Key Words : Tube bundle(튜브번들), Moisture Separator Reheater(습분분리재열기), Replace(교체)

1. 서론

전세계적인 에너지 자원의 부족 문제와 엄격해지는 환경규제에 능동적으로 대응하기 위한 방안으로서 무공해 청정에너지인 원자력의 국내 전력공급 비중이 40% 수준에 이르고 있다. 원자력발전소 2차 계통에는 화력발전소와는 다르게 습분분리재열기(Moisture Separator Reheater; MSR)가 설치되어 고압 터빈의 배기 증기속에 포함된 습분을 제거하고 과열증기로 만들어 효율을 향상시키고 저압터빈 부품의 침·부식을 방지한다. 국내 가동중인 원자력발전소의 MSR은 장기간 사용으로 인한 설비의 노후화로 성능이 현저히 저하되어 발전소 출력의 감소 현상을 수차례 경험하였다. 또한, 고압 및 저압

재열기 튜브의 침·부식(erosion&corrosion), 과냉각(subcooling) 및 과잉증기(excess steam)량의 부적정으로 인한 응축수의 동요현상(fluctuation)이 발생되어 배수계통의 운전상태가 불안정 유발 등의 복합적인 문제로 인하여 설비의 건전성이 저하되고 있는 실정이다.

1983년도부터 상업운전을 시작한 월성원자력 1호기는 1990년부터 재열기 탄소강 튜브의 침·부식과 잦은 누설로 인하여 관막음율(약 5%)이 계속하여 증가되는 추세로서, 총 5단의 재열기 중에서 가장 손상이 심한 1단 재열기의 교체를 위해 설계·제작한 재열기 튜브의 사양이 기존의 것과 매우 상이하였다. 그러므로, MSR 설비의 건전성을 제고하고 원자력발전소의 안정적인 운영을 확보할 목적으로 발전소 현장에서 관련 설비를 정밀점검하고 재열기 내부의 열·유체 유동해석을 위한 수치계산을 수행하고, 열교환기 전용 설계프로그램인 HTRI(Heat Transfer Research Institute)를 활용하여 검증한 후 종합적으

[†] 책임저자, 회원, 한국전력공사 전력연구원
E-mail :yousung@kepco.co.kr
TEL : (042)865-5536 FAX : (042)865-5537

* 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소

로 기기의 성능과 계통에 주는 영향 및 재열기의 설치위치에 대한 결론을 도출한 현장적용 연구를 수행하였다.

2. 원전 MSR의 기능 및 터빈사이클

2.1 MSR의 기능 및 사양

Fig. 1의 계통개략도 및 Fig. 2의 습분분리재열기 구조도에서 보듯이 월성원자력 1호기 습분분리재열기는 국내의 타 원전과 다르게 습분분리기와 재열기가 별도로 분리되어있는 형태로서 2대의 습분분리재열기가 고압터빈 양쪽에 설치되고 습분분리과정은 상·하부에 수평으로 설치된 2개의 원심식 습분분리기(High velocity cyclone)에서 이루어지며, 재열 과정은 습분분리기를 경유한 계통증기(Cycle steam)가 수직으로 설치된 동체(Shell) 내부에 위치한 총 5개의 튜브 번들을 순차적으로 거치면서 원자로에서 발생된 열을 흡수한 증기발생기로 부터 공급되는 주 증기에 의해 가열되어 헤더에서 저압터빈 3대로 나누어져서 공급된다.

증기발생기에서 나와 고압터빈을 거친 증기는 건도가 99.5%에서 88%로 낮아져 저압터빈으로 바로 유입시 Last Blade의 부식을 초래하고 터빈 효율을 저하시킨다. 따라서, MSR은 고압터빈을 거치고 나온 증기의 습분을 제거하고 재가열하여 과열증기(superheated steam) 상태로 만들어 증기의 건도를 99.5%로 높여서 저압터빈으로 공급하는 기능을 하며 주요 제원은 Table 1과 같다.

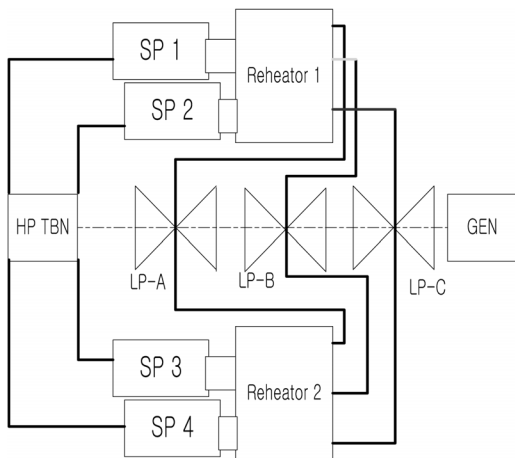


Fig. 1 General Arrangement of secondary system

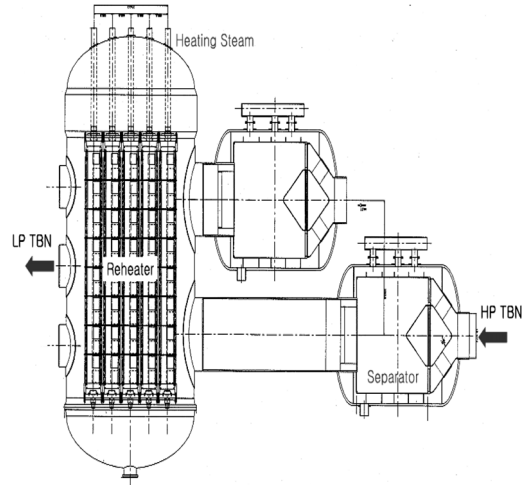


Fig. 2 Schematic of Moisture Separator Reheater

Table 1 Dimensions of MSR

구분	Reheater	Separator
Manufacturer	Howden Canada	Howden Canada
Type	Vertical type	High Velocity Cyclone
Quantity	2×5Bundle	4
Design base	ASME VIII UW12A	ASME VIII UW12B
Design pr.	100psig	115psig
Design temp.	469°F	350°F
Material	SA516-65	SA515
Size	Ø16' 1/2"×36' 9"	Ø11' 6"×L17' 3"
Head THK.	1.5"	2"
Shell THK.	1.5"	1.125"
Quantity of tube	791개	170개 (Blade)
Tube material	A210-A1	Cyclone : Carbonsteel, Blade:STS
Tube I.D/O.D/Height	1 1/8" / H19' 11/16" Pitch	-

2.2 원자력발전소 터빈사이클

Fig. 3의 1단 재열기만을 가진 발전소 증기사이클 선도와 Fig. 4의 원자력발전소의 터빈사이클 선도에서 보듯이 원자로에서 발생된 열을 흡수한 증기발생기에서 만들어진 포화증기는 고압터빈에서 단열팽창 일을 하고난 후, 습분분리기에서 함유된 습분이 제거되고 재열기를 거치면서 과열증기 상태가 되어 증기의 건도를 높인 후 저압터빈에서 단열팽창일을 한다. 그후에 저압터빈 배기(exhaust steam)는 복수기에서 응축되어 포화수 상태가 된 뒤에 주

급수펌프(main feedwater pump)에 의하여 다시 증기 발생기로 보내진다.

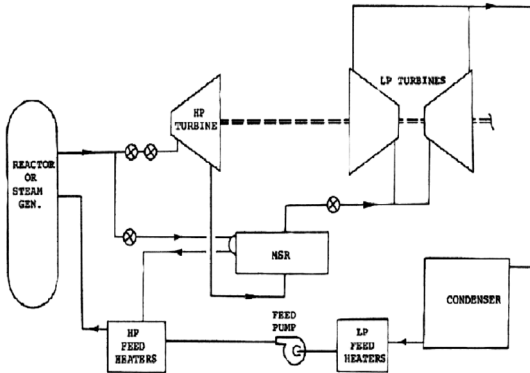
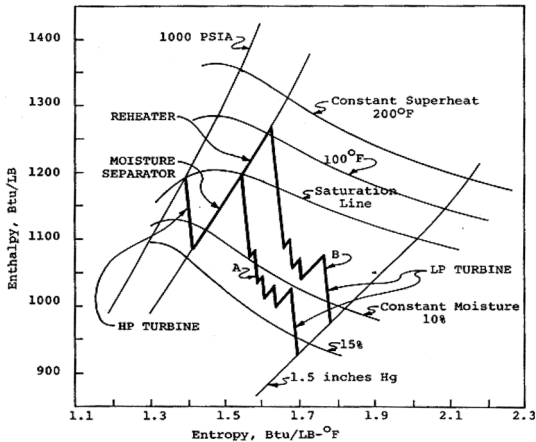


Fig. 3 Plant steam cycle of 1st stage reheater



Line A is moisture separation only
Line B is moisture separation with reheat

Fig. 4 Turbine cycle of N.P.P.

Table 2 Thermal characteristic of MSR under 100%

구분	Separator Inlet	Separator Outlet	Reheater Outlet
Steam flow(kg/hr)	3,162,175	2,702,650	2,702,650
Pressure(bar.a)	6.272	6.040	5.674
Temperature(°C)	160.58	159.1	242.6
Stm Quality(%)	0.8815	0.99403	-

Table 2는 월성원자력 1호기의 발전소 100% 전출력 운전조건에서 MSR의 습분분리기 및 재열기 입·출구에서의 특성치의 변화를 나타낸 것으로서, 습분분리기를 통과 후의 증기의 건도는 99.5%이고 재

열기의 과열도는 재열기의 출구측 온도에서 습분분리기 출구측 온도를 빼 값인 83.5°C 정도로 개선 되었음을 볼 수 있다.

3. 재열기의 튜브사양 비교분석

3.1 기존 및 신규 제작 튜브의 사양변화 비교

월성원자력 1호기는 1990년도 이후 재열기 튜브의 침식 및 누설현상으로 인하여 관막음율이 계속하여 증가 추세로써 Fig. 5는 1단 재열기의 교체를 위해 한국중공업(주)사에서 제작한 재열기 튜브의 사양이 기존 규격과 상이하여 신규 제작된 번들과 발전소 현장의 MSR설비를 정밀점검하여 실측하고 사진으로 비교하였으며, 유효 튜브길이는 기존 것이 5478.2mm로 흰이 없는 부분이 45mm×7개소 있는데 비하여 신규로 제작된 것은 5791.2mm로서 전체가 흰튜브로서 전열면적이 증가된 것을 알 수 있다. Fig. 6은 기존 것과 신규로 제작된 튜브 번들의 주요부의 치수를 비교해서 나타내었다.

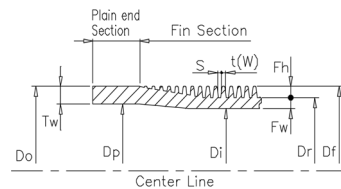
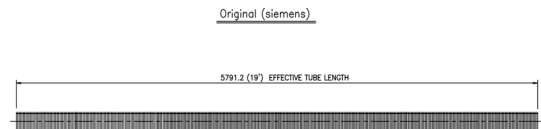
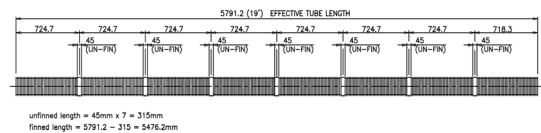
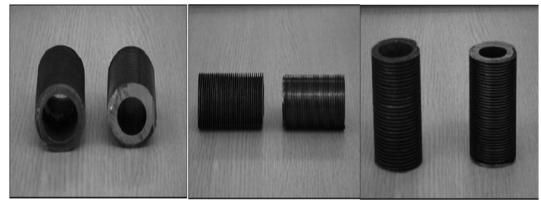


Fig. 5 Photos & Effective tube length of old and new

구분		Old Tube	New Tube
OD of finned section	Df	28.6 mm	28.52 mm
Root diameter of fin	Dr	24 mm	24.02 mm
OD of bare section	Do	28.6 mm	28.6 mm
ID of finned section	Di	19.86 mm	16.55 mm
ID of bare tube	Dp	22.86 mm	19.72 mm
Fin height	Fh	2.2~2.4 mm	2.25 mm
Thickness including fin	Fh+Fw	4.37 mm	5.9 mm
Wall thickness of finned section	Fw	2.07 mm	3.735 mm
Wall thickness of bare section	Tw	2.87 mm	4.44 mm
Pitch		16 fins / inch	20 fins / inch
Fin thickness	t(W)	0.48 mm	0.36 mm
Distance between fin and fin	S	1.1075 mm	0.91 mm
Tube length		19 ft	19 ft

Fig. 6 Dimensions of old and new tube

3.2 열적 성능 변화 분석

재열기 튜브의 사양 변화 전·후의 열·유동 현상을 해석하기 위하여 재열기의 Shell 및 Tube side의 기하학 적인 형상에 따른 유속, 압력강하와 총괄열 전달계수 및 총열전달량 등의 주요 변수를 수치적 계산을 통하여 산출하고 비교 분석한 결과는 다음의 Table 3과 같다.

Table 3 Comparison of parameters old and new tube

구분		Old	New	Ratio	Remarks
ID of fin (mm)		19.86	16.55	0.833	Change of reheater tube
Fins/inch		16	20	1.250	
Total heat transfer area (m ²)		1462.115	1703.60	1.165	Increase of fins, and heat transfer area
Velocity(m/s)	Shell side	21.27	21.15	0.994	$\dot{m} = A \cdot V$ Increase of fins, heat transfer area, Decrease of velocity
	Tube side	1.27	1.83	1.44	Decrease of ID and area Increase of velocity
Pressure drop (kg/cm ²)	Shell side	0.033	0.035	1.06	Increase of fins, And Pr. drop
	Tube side	0.07	0.07	1.0	Decrease of ID, Increase of Pr. drop
Heat transfer coefficient Shell(W/m ² °K)		434.9	405.9	0.933	Change of reheater tube
TUBE		4016.9	3824.8	1.05	
Overall heat transfer coefficient(W/m ² °K)		338.3	316.3	0.934	
Total heat transfer capacity(W)		2.072×10 ⁷	2.13×10 ⁷	1.029	Increase of heat transfer area and capacity

Table 4 Heat transfer capacity of old and new tube

Location	Old (BTU/hr)	New (BTU/hr)	Remarks
1	63,791,175	64,216,571	0.7% ↑
2	61,156,554	61,637,671	0.78% ↑
3	57,429,450	58,063,813	1.1% ↑
4	50,041,164	51,074,050	2.06% ↑
5	27,661,250	28,452,271	2.8% ↑

3.3 신규번들의 위치별 열전달량 및 증기조건

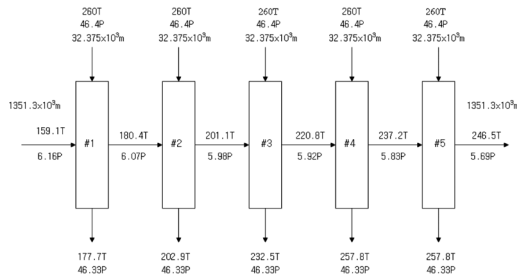
1단 재열기 교체에 위해 한국중공업(주)에서 제작한 재열기 환류브의 사양이 기존 규격과 상이하어 재열기 내부의 열·유체 유동해석을 위하여 수치적 계산을 한 결과를 열교환기 전용 설계프로그램인 HTRI 프로그램을 활용하여 검증한 결과 Table 4 및 Table 5에서 보듯이, 기기의 성능은 신규 번들의 위치에 따라 기존 것과 비교해 볼 때 총열전달량이 0.7~2.8% 정도 증가되고, 증기의 조건은 Shell측이 0.1 ~ 0.3°C 증가되어 다소 향상된 것을 알 수 있다.

Table 5 Steam condition of old and new tube

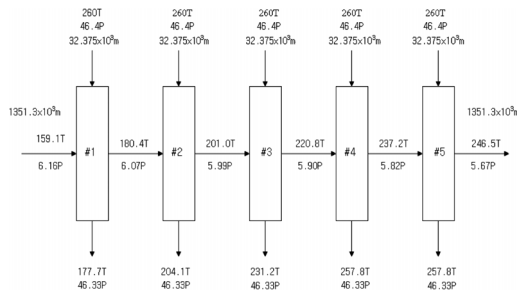
구분		Design(°C)	Old(°C)	New(°C)	Remarks
Shell side	Inlet	159.1	159.1	159.1	Same
	Outlet	242.6	248.5	248.5	0.1~0.3°C ↑ Compare to old 5.9~6.2°C ↑
Tube side	Inlet	260	260	260	Same
	Outlet	260	260	260	Same

3.4 신규 번들의 배치에 따른 열성능 해석(HTRI)

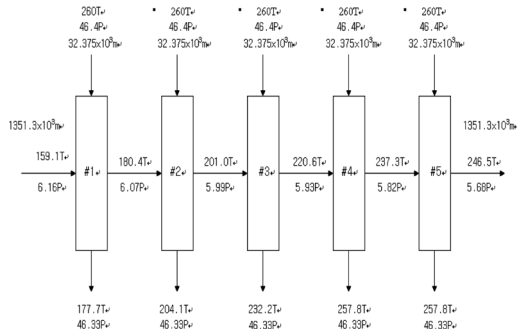
3.4.1 신규 번들을 1단에 배치하는 경우



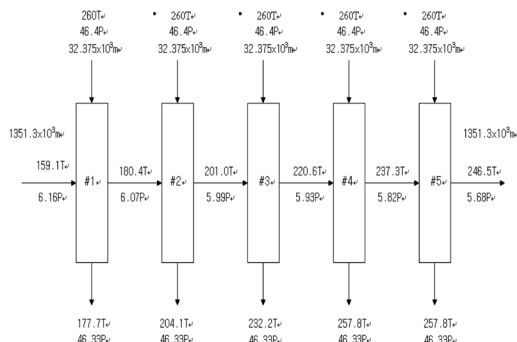
3.4.2 신규 번들을 2단에 배치하는 경우



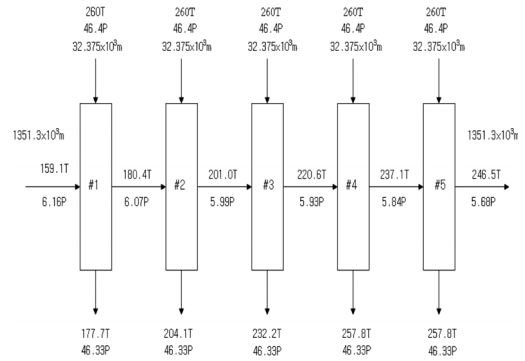
3.4.3 신규 번들을 3단에 배치하는 경우



3.4.4 신규 번들을 4단에 배치하는 경우



3.4.5 신규 번들을 5단에 배치하는 경우



3.5 신규 번들의 배치에 따른 압력강하 분석

신규 번들의 배치가 계통에 미치는 영향으로서 압력강하값을 전용 프로그램을 활용하여 산출해 보면 Table 6에서 보듯이 Tube측(재열기)은 최대 0.02psi 정도로 미미하게 증가되고, Shell 측은 기존 것과 동

Table 6 Analysis of tube and shell side pressure drop

Location	Old (psi)		New (psi)		Remarks	
	Shellside	Tubeside	shellside	Tubeside	Shellside	Tubeside
1	0.4	-3.9	0.4	-3.88	Same	0.02psi Increase
2	0.29	-3.46	0.29	-3.46	Same	Same
3	0.31	-2.76	0.31	-2.78	Same	0.02psi Increase
4	0.33	-1.36	0.33	-1.36	Same	Same
5	0.96	0.03	0.96	0.04	Same	0.01psi Increase

Table 7 Analysis of drain line pressure drop

Reheater No.	Bundle No. (Valve)	Pr. drop(psi)	Remarks
Reheater "A"	#1 (V 81)	0.114	Same
	#2 (V 80)	0.114	Same
	#3 (V 79)	0.114	Same
	#4 (V 78)	0.114	Same
	#5 (V 77)	0.114	Same
Reheater "B"	#1 (V 84)	0.099	0.015 Decrease
	#2 (V 82)	0.085	0.029 Decrease
	#3 (V 85)	0.114	Same
	#4 (V 83)	0.114	Same
	#5 (V 86)	0.114	Same

일하여 계통에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

또한, Table 7에서 보듯이 배수관로 측도 0.029 psi 정도로 미미하게 감소하여 계통에 미치는 영향은 없다.

3.6 신규 번들 배치와 압력강하의 상관관계 고찰

3.6.1 압력강하 메커니즘

Tube 측(주증기)의 압력강하는 $\Delta P_1 = P - P_1$ 로서 그 값이 클수록 유속의 증가로 열교환이 많이 되고, Shell 측(계통증기)의 압력강하는 $\Delta P_2 = P' - P''$ 로서

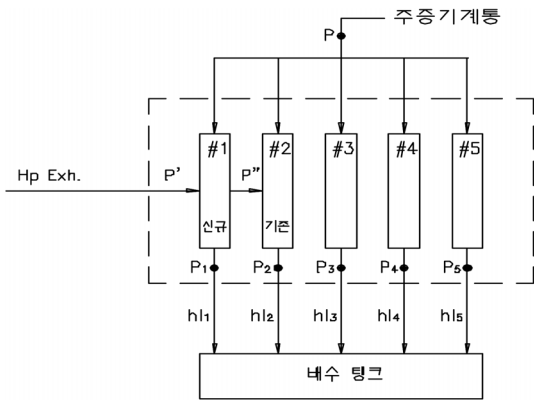


Fig. 7 Relations between location of new bundle and pressure drop

작을수록 온도가 높아 열교환이 많이 된다.

3.6.2 배수관로의 압력손실

재열기 번들의 튜브측 출구와 배수탱크 사이에 위치한 배수관로의 압력손실을 전용 프로그램을 사용하여 분석한 결과 Table 6과 7에서 보듯이 Tube 측(재열기)은 0.02 psi 정도로 미미하게 증가되고, 배수관로 측도 0.029 psi 정도 미미하게 감소하여 계통에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다 .

3.6.3신규 번들 배치와의 상관관계

신규 제작된 bundle의 성능(열전달량)이 증가하면 tube 측(주증기)의 압력차(ΔP)가 증가하여 유속이 증가되고 P_1 (배압)은 작아진다. 따라서, 기존 bundle의 배압 P_2 는 일정하므로 시스템 전체의 압력 평형을 이루기 위해서는 $P_1 + h_{l1} = P_2 + h_{l2}$ 에서 $P_1 > P_2$ 이므로 $h_{l1} < h_{l2}$ 가 되어야 하므로 신규 Bundle은 4단 측에 설치함이 바람직하며, 1단 튜브 번들 교체 전·후의 전체적인 성능은 Table 8에서 일목요연하게 정리하여 나타내었다.

4. 결론

재열기의 탄소강 재질 튜브 누설로 관막음율이 지속적으로 증가하여 총 5단 중 가장 손상이 심한

Table 8 Summary of the overall performance

구분	HTRI			Numerical calculation			
	Old	New	Ratio	Old	New	Ratio	
ID of fins(mm)	19.86	16.55	0.833	19.86	16.55	0.833	
Fins / inch	16	20	1.250	16	20	1.250	
Fin tube Total heat transfer area(m ²)	1396.2	1703.3	1.219	1462.115	1703.597	1.165	
velocity(m/sec)	-Shell	19.34	19.21	0.993	21.27	21.15	0.994
	-Tube	0.77	1.16	1.506	1.27	1.83	1.44
Pr. drop(kg/cm ²)	-Shell	0.14	0.15	1.071	0.033	0.035	1.06
	-Tube	0.07	0.07	1.00	0.07	0.07	1.00
Heat transfer coefficient (kcal/hr m ² °C)	-Shell	425.22	427.02	1.004	434.9	405.9	0.933
	-Tube	7811.74	7811.74	1.00	3532	4024	1.134
Overall heat transfer coefficient(kcal/hr m ² °C)	271.42	229.13	0.844	338.3	316.3	0.934	
Tatal heat transfer capacity(kcal/hr)	1.586×10 ⁷	1.590×10 ⁷	1.002	2.072×10 ⁷	2.13×10 ⁷	1.029	
Remarks	0.2 % Increase of Performance			2.9 % Increase of Performance No effect to system Locatio of bundle is 4th			

1단 재열기 튜브번들 교체를 위해 한국중공업에서 제작한 환튜브의 사양이 기존 규격과 상이하여, 재열기 내부 열·유체의 유동 해석을 위한 수치적 계산을 수행하였으며, HTRI 프로그램을 활용하여 검증하였고, 기기의 성능과 계통에 주는 영향 및 재열기의 배치에 대한 현장 적용연구를 수행한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 기기의 열성능은 신규 번들의 배치에 따라 총 열전 달량이 0.7 ~ 2.8% 정도 증가되고, 증기의 조건은 계통 증기인 Shell 측이 0.1 ~ 0.3°C 증가된다.

2) 계통에 주는 영향으로서 압력강하값의 차이는 재열기 Tube 측은 0.02psi 정도 증가하고, Shell 측은 0.029psi 정도 미미하게 감소하여 기존의 것과 유사한 값을 가지므로 계통에 주는 영향은 없다.

3) 신규 번들의 배치는 재열기와 배수관로를 포함한 계통의 압력손실과 총열전달량 등을 종합적으로 고려 해 보면, 압력평형이 유지되고 총열전달량이 2.06% 상승되며 Shell의 출구 온도가 0.2°C 상승되는 효과가 있는 4단 쪽에 배치함이 바람직하며 설비의 건전성 확보는 물론 원자력발전소 안전운전에도 적극 기여할 것으로 사료된다.

2. J. P. Peyrelongue, C.J. Monks, 1996, "Development of Design for Moisture Separator Reheaters".
3. A. L. Yarden, 1994, "Excess steam flow optimization in operating MSRs". *EPRI Nuclear Plant Performance Improvement Seminar*.
4. R. L. Coit, P. D. Ritland, 1995, "Moisture Separator Reheaters entering the Second decade".
5. Prairie Island Nuclear Station, 1987, "Assessment of a need to replace older C.S Reheater bundles with newer improved S.S bundles at Prairie Island Nuclear Station".
6. A.L Yarden and R.R Neo, 1980, "Improvement in Performance and Availability of currently operating MSRs", *ASME*.
7. G. B. Faust and A.L. Yarden, 1976, "Improved Moisture Separator Reheater for Nuclear Steam Supply System" *Power Engineering* Vol. 80.
8. Heat Exchange Institute, INC. 2000, "Performance Standard for Liquid Ring & Vacuum Pumps" second edition.
9. TEMA. 1999, "Standards of the Tubular Exchanger Manufactures Association".
10. Heat Transfer Research Institute 1999, Shell and Tube Heat Exchanger Program ST Ver. 5.3

참고문헌

1. Scott. T. Deahna and Charles V. McFeaters , 1992, "In-Situ Reconstruction of the MSRs at the Beaver Valley Nuclear Power Station", *ASME PWR - Vol. 18 Steam Turbine-Generator Developments for the Power Generation Industry*.