2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력발전소 재생열교환기 최적설계에 대한 연구

A Study on the Design Optimization for Regenerative Heat Exchanger in Nuclear Power Plant

이송규, 임덕재, 김은기, 노태선
한국전력기술주식회사 원자로설계개발단
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력발전소에서 냉각재의 정화를 위해 냉각재의 온도 강하는 필수적이며 이때 온도강하를 위하여 대부분 비재생열교환기와 함께 재생열교환기가 사용된다. 재생열교환기는 열회수 및 충전노즐의 열충격 최소화 측면에서도 중요한 역할을 하는 기기이나 지금까지 설계 적정성 검토나 계통 운전성 측면에서의 성능 평가가 제대로 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 현재 발전소에서 운전중인 재생열교환기들의 특성을 비교 검토하고 각각에 대해 성능을 비교, 평가함으로써 최적의 재생열교환기 설계 방안을 제시하였다. 또한 안정적인 운전 및 운전성 향상 그리고 최적의 성능을 보장하기 위한 재생열교환기 설계개선 가능성을 검토하였다.

Abstract

The letdown flow is cooled for the purification of reactor coolant in Nuclear Power Plant (NPP). In order to reduce the temperature of letdown flow, the regenerative heat exchanger (RGHX) is used with non-regenerative heat exchanger in most NPP. The RGHX has an essential function that recovers heat from the letdown flow by heating the charging flow and reduces thermal impacts on the charging nozzle. However, the performance evaluation and design review of RGHXs have not been performed appropriately. Therefore, the design features of the RGHX for various NPPs are reviewed and their performances are evaluated for selected operating modes. Based on the review results, the RGHX design improvements are proposed for more stable operation of the letdown system.

1. 서 론

원자력발전소에서 냉각재 정화를 위하여 냉각재의 일부가 정화계통으로 계속 유출되며, 유출되는 고온의 냉각재를 정화계통 운전온도까지 낮추기 위해 직렬로 연결된 재생열교환기 (regenerative heat exchanger)와 유출수열교환기 (letdown heat exchanger)가 설치되어 있다. 또한 재생열교환기는 정화운전을 거친 냉각재를 냉각재 계통으로 충전할 때 유출수의 열을 충전수로 전달하여 열손실을 줄이고 충전노즐의 열충격을 최소화한다. 이와 같이 원자력발전소 핵증기 공급계통에서 중요한 기능을 수행하는 재생열교환기는 오랜 운전 경험을 통하여 현재 한국표준형원전(KSNP)에서와 같은 multitube hairpin 형태의 열교환기로 설계되고 있으나 이러한 설계도 설계조건 및 운전조건 그리고 계통의 과도조건 등을 고려하여 그 성능 및 건전성에 대한 정성적인 평가가 필요하다. 이러한 평가를 위하여 고온, 고압의 운전조건에서 재생열교환기로 사용 가능한 열교환기의 형태를 검토하고 여러 발전소에서 운전되고 있는 재생열교환기의 형태 및 특징에 대하여 조사하여 재생열교환기 설계의 적절성을 검토하였다. 원자력발전소에서 다양한 형태의 재생열교환기가 운전되고 있으며 여기서 조사한 재생열교환기는 웨스팅하우스 발전소의 재생열교환기를 비롯하여 중수로발전소, BWR 발전소에서의 재생열교환기이다. 이들에 대한 검토결

과 및 운전 경험을 바탕으로 KSNP의 성능조건 및 운전조건 등을 만족하는 재생열교환기의 적절한 설계 형태를 제시하였으며 열교환기 설계용 전산코드인 HTFS.TASC를 이용하여 한국표준형원전 (KSNP) 재생열교환기의 운전조건을 기준으로 각 열교환기의 성능을 평가하였다. 이들 평가결과를 재생열교환기의 시험결과와 비교하여 KSNP 재생열교환기 평가의 정확성을 검토하고 다른 발전소의 재생열교환기도 시험조건에 대해 평가함으로써 열교환기 설계개선 방안을 제시하였다.

2. 재생열교환기 설계 일반

2.1 설계조건 및 열교환기 형태 검토

한국형표준원전 (KSNP) CVCS의 재생열교환기 설계조건은 다음과 같다.

Shell 측	Tube측
설계유량: 180 gpm	설계유량 : 150 gpm
설계압력 : 3025 psig	설계압력 : 2485 psig
설계온도 : 550 °F	설계온도 : 650 °F
재질 : Austenitic Stainless Steel	재질 : Austenitic Stainless Steel

열교환기의 형태는 여러 가지가 있으나 위의 재생열교환기에 적절한 열교환기는 고온 및 고압의 설계조건 때문에 제한적일 수밖에 없으며 이에 적절한 열교환기 형태로는 double pipe, shell and tube heat exchanger, plate heat exchanger, compact heat exchanger 등을 고려할 수 있다.

가. Double Pipe/Multitube Hairpin 열교환기

Double pipe/multitube hairpin 열교환기는 Shell and tube 형태의 열교환기이나 산업규격인 TEMA standard에는 나타나 있지 않다. Shell 기능을 하는 tube 안에 다른 tube가 위치하여 counterflow를 쉽게 얻을 수 있으며 shell 안에 1개의 tube가 위치하면 double pipe이고 여러개의 tube가 위치하여 u-tube 형태로 제작되는 열교환기는 multitube hairpin 열교환기이다. 이들은 고압에서의 운전에 유리하나 부하가 큰 경우에는 가격이 비싸진다는 단점이 있다.

최대 압력	온도 범위
shell side : 4,500 psi	-15°F ~ 1,100°F
tube side : 21,000 psi	

재질 및 크기
다양한 재질로 제작할 수 있으며 전열면적 2.5 ~ 2,000 ft^2의 열교환기 제작이 가능하고 multiple unit 제작도 가능하다 (참고문서 4).

나. Shell and Tube Heat Exchanger

Shell and tube heat exchanger는 가장 흔히 사용되는 열교환기의 형태이며 process industry나 발전소에서 많이 사용된다. 관련 기준으로 TEMA를 적용하고 있으며 다양한 용도로 다양한 형태의 열교환기를 제작할 수 있다. Shell and tube HX는 세정을 위해 분해가 가능하도록 제작할 수 있으며 큰 하중에서도 견딜 수 있게 제작할 수 있다. 그러나 240 psi 이하 및 400°F 이하에서는 plate heat exchanger에 비해 큰 전열면적을 필요로 하므로 경제적이지 못하다. 또한 작은 ΔT나 높은 temperature effectiveness (ε_{max} = 0.9이상)의 경우에는 대수평균온도차 (Logarithmic mean temperature difference; LMTD) 보정계수 (F)의 값이 작아지기 때문에 적절하지 못하다.

최대 압력 온도 범위

Shell side : 4,500 psi -15°F ~ 1,100°F

Tube side : 20,000 psi

재질 및 크기

다양한 재질로 제작할 수 있으며 전열면적 100 ~ 10,000 ft^2의 열교환기 제작이 가능하다 (참고문서 4).

다. Plate Heat Exchanger (PHE)

Plate heat exchanger의 종류로는 gasketted PHE, brazed PHE, plate and shell heat exchanger, plate fin exchanger, printed circuit heat exchanger 등이 있다. 일반적으로 PHE는 0.9 이상의 high temperature effectiveness를 가지며 plate 양쪽의 유체 모두 turbulence이므로 높은 열전달율을 갖는다 (참고문서 4).

최대 압력 온도 범위

760 psi -15°F ~ 660°F

라. Compact Heat Exchanger

Compact heat exchanger최근에 제작되고 있는 열교환기의 종류로 plate heat exchanger의 변형으로 볼 수 있다.

Plate-fin Heat Exchanger

최대압력 : 1,500 psi

사용온도 : ~ 150°F

Printed Circuit Heat Exchanger

최대압력 : 1,0000 psi

사용온도 : ~ 1,000°F

위에서 검토한 바와 같이 KSNP의 재생열교환기 설계 조건 (설계압력 : 3,025 psig, 설계온도 : 650°F)에서 사용 가능한 열교환기 형태는 double pipe/multitube hairpin, shell and tube HX이다.

2.2 발전소별 재생열교환기 형태

모든 원자력 발전소에서 냉각재 정화운전을 위하여 냉각재의 온도를 낮추는데 재생열교환기가 반드시 사용된다. 사용되는 재생열교환기는 발전소 운전조건이나 재생열교환기에 대한 요구 성능에 따라서 그 형태가 다양하다. 각 발전소 재생열교환기에 대한 개략도는 그림 1, 2, 3, 4에 나타나 있다.

가. 한국표준형원전 (KSNP) 재생열교환기

KSNP의 열교환기는 hairpin 형태의 열교환기이며 유출수가 tube측으로 흐르고 충전수가 shell측으로 흐른다. Tube는 u-tube 형태로 열팽창에 의한 영향을 받지 않으며 shell측에는 vent, drain을 위한 노즐이 제공되나 tube측에는 vent나 drain이 제공되지 않는다. 정상운전시 충전수 및 유출수의 온도는 각각 477°F, 289.5°F이며 최대유출수의 온도는 설계조건에서 450°F 이하가 되도록 설계된다.

나. 고리 1,2호기 재생열교환기 (Westinghouse 발전소)

고리 1,2호기의 재생열교환기는 multi-shell 형태의 열교환기이며 각 열교환기는 shell and tube HX이다. 충전수가 tube측으로 흐르고 유출수가 shell측으로 흐르며 이는 KSNP의 재생열교환기와 반대이다. U-tube를 사용하고 있어 tube의 열팽창은 문제가 되지 않으나 shell과 shell 사이, tube와 tube사이가 각각 2 inch, schedule 160의 배관으로 연결되어 있어 shell의 열팽창시 연결 배관 및 노즐이 손상 받을 우려가 있다. 이와 같은 형태의 재생열교환기를 사용하는 일본 쓰루가 발전소에서 1999년 7월, 재생열교환기의 shell과 shell을 연결하는 U자형 배관에서 crack이 발생하여 냉각재가 누출되는 사고가 있었다.

다. 영광 1,2호기 재생열교환기 (Westinghouse 발전소)

영광 1,2호기의 재생열교환기는 hairpin 형태의 열교환기이며 shell측 유동과 tube측 유동이 대향류 (counterflow)를 이룬다. 심한 thermal cycling에서도 건전성을 유지하고 누수를 방지하기 위해 이음부분이 없는 완전 용접체로 제작되며 세정도 필요 없게 설계되었다. 유출수가 shell측으로 흐르고 충전수가 tube측으로 흐르며 이는 한국표준형원전 (KSNP)과는 반대이다. 전열면적은 KSNP보다 50% 정도 크며 설계압력이나 열교환기 형태는 KSNP의 재생열교환기와 유사하다.

라. 울진 1,2호기 재생열교환기 (Framatome 발전소)

울진 1,2호기의 재생열교환기도 hairpin 형태의 열교환기이며 다른 발전소와 달리 수평으로 설치되고 tube 및 shell 측 모두 배기, 배수노즐이 설치되어 있다. 유출수는 Shell측, 충전수는 tube측으로 흐르도록 설계되었으며 이는 KSNP의 재생열교환기와 반대이다. 전열면적은 KSNP보다 30%정도 크며 정상운전시 충전유량 및 유출유량은 모두 KSNP보다 작으나 출구온도는 비슷하다.

마. 월성 2,3,4 호기 재생열교환기 (CANDU 발전소)

냉각재 정화를 위해서 냉각재 펌프의 출구로부터 냉각재가 정화계통으로 공급되며 이 냉각재는 interchanger (3335-HX1) 및 cooler (3335-HX2)를 지나며 이온교환기 운전에 적합하도록 260℃ (500°F) 에서 65℃(149°F) 로 냉각된다. Interchanger는 KSNP의 재생열교환기의 기능을 수행하며 cooler는 유출수열교환기의 기능을 수행한다. Interchanger는 TEMA의 F shell 형태 (FEU)의 열교환기로 shell의 길이방향으로 격벽이 설치되어 2 shell pass가 되며 이는 LMTD 보정계수 (F) 값을 크게 하고 temperature corss를 방지하여 고온 측을 보다 많이 냉각시킬 수 있다. 그러나 F shell 형태는 격벽의 단열이 어려우며 격벽에서 leakage가 발생할 수 있어 격벽을 통한 열전달이 발생하므로 정확한 열교환기 성능평가가 어렵다.

바. BWR 발전소 재생열교환기 (GE 발전소)

BWR에는 정화계통으로 RWCS (Reactor Water Clean-up System) 이 있으며 RWCS에서 이온교환수지의 운전온도까지 냉각재의 온도를 낮추기 위해 재생열교환기 및 비재생열교환기 (non-regenerative heat exchanger)가 사용되며 재생열교환기는 계통에서의 열손실을 최소화한다. BWR 재생열교환기는 tube측으로 유출수, shell측으로 충전수가 흐르며 u-tube를 사용하는 shell-and-tube 형태의 동일한 열교환기 세 개가 직렬로 연결되어 있다.

2.3 발전소별 재생열교환기 설계 자료

KSNP, 고리 1,2호기, 울진 1,2호기, 영광 1,2호기의 재생열교환기 설계 및 운전에 대한 자료를 표1에 요약하였으며 각각에 대한 설계특성은 다음과 같다.

모든 발전소에서 정상운전 조건에서 재생열교환기를 통과하여 나오는 유출수의 온도는 비슷하고 충전온도는 영광 1,2호기의 경우가 가장 높다.

설계온도, 설계압력은 모두 비슷하며 shell측, tube측 유속은 큰 차이가 없으나 압력강하는 3 shell로 설계된 고리 1,2호기의 재생열교환기에서 다소 크다.

KSNP 재생열교환기는 tube측에 유출수, shell측에 충전수가 흐르며 고리 1,2호기, 영광 1,2호기, 울진 1,2호기의 재생열교환기는 이와 반대이다. 즉 KSNP는 fouling 측면을 중요시하여 오염정도가 상대적으로 심한 유출수를 tube측으로 하고 오염정도가 보다 덜한 충전수를 shell측에 배치하였으며 다른 열교환기는 운전 압력이 낮은 유출수를 shell측에 배치하여 건전성 유지를 용이하게 하였다.

기기건전성 측면에서는 2", Sch. 160 배관으로 각 shell을 연결하도록 설계된 고리 1,2호기가 가장 불리할 것으로 보인다.

전열면적은 영광 1,2호기가 가장 크며 최대유출, 최소충전 조건에서 영광 1,2호기 재생열교환기의 유출온도가 가장 낮을 것으로 예측된다.

월성 2,3,4호기의 재생열교환기는 전열면적이 KSNP의 12배 이상으로 매우 큰 열교환기이며 상세 설계데이터가 표2에 나타나 있다. 월성 2,3,4호기 재생열교환기는 PWR의 재생열교환기와 크기 및 용량 면에서 매우 다르므로 비교 대상에서 제외하였다.

2.4 발전소별 재생열교환기 성능비교

위에서 검토한 각 발전소별 재생열교환기의 성능을 KSNP 재생열교환기 운전조건 기준으로 평가, 비교하였다. 각 성능평가는 열교환기 설계코드 HTFS.TASC를 이용하여 수행하였다. 성능평가 운전모드는 KSNP의 정상유출/정상충전, 최대유출/최소충전, 최소유출/최대충전 조건이며 모두 fouling 조건에서 평가하였다. 그리고 실제 수행된 재생열교환기 (울진 4호기) 시험 조건 중 정상운전 조건에 대하여 각 재생열교환기의 성능을 평가하였으며 특히 KSNP에 대한 성능평가 결과를 시험결과와 비교하여 평가의 정확성을 확인하고자 하였다. 또한 LMTD 보정계수 (F) 관점에서 각 재생열교환기의 설계 적정성도 검토하였다.
계통의 운전성이나 기기건전성 측면에서 볼 때 동일운전에서 더 낮은 유출온도, 더 높은 충전온도를 나타내는 재생열교환기가 바람직 할 것이다.

가. HTFS.TASC 열교환기 설계 코드

HTFS.TASC 코드는 shell and tube 형태 및 multitube hairpin 형태의 열교환기에 대해서 design, checking, simulation 모드로 계산할 수 있는 열교환기 설계 코드이며 HTRI 코드와 함께 널리 사용되고 있다. HTFS.TASC 코드는 다음 4개의 계산 모드가 있으며 각각에 대한 기능은 아래와 같다.

1) Design 모드 : 주어진 설계요건 및 형상에 대한 제한조건 내에서 최적의 면적 또는 최적의 비용을 기준으로 열교환기를 설계함.
2) Checking 모드 : 설계된 열교환기가 주어진 열교환기 입구, 출구 조건의 열부하를 수용할 수 있는지 점검하는 계산모드로 계산 결과는 실제 열전달 면적과 요구되는 열전달 면적과의 비(ratio)로 나타남.
3) Simulation 모드 : 주어진 shell측 및 tube측 입구조건으로부터 열교환기의 성능 및 각 출구 조건을 계산함.
4) Thermosyphon : thermosyphon reboiler에서의 성능 및 reboiler 입,출구 배관에서 circulation 유량이나 압력 손실 등을 계산함.

HTFS.TASC 코드는 단상 유체나 기체, boiling liquid, condensing vapour, 또는 혼합기체 등에 대해 과열, 포화, 이상유동 및 subcooled 등 어느 조건에서도 열교환기 유동 및 성능특성을 계산

할 수 있으며 이러한 장점으로 화학공장, gas industry, 발전소 등의 열교환기 설계에 사용되고 있다.

나. 운전조건별 재생열교환기 성능평가

1) 정상유출/정상충전 운전조건

발전소	Charging			Letdown		
	유량(lb/hr)	입구온도(°F)	출구온도(°F)	유량(lb/hr)	입구온도(°F)	출구온도(°F)
KSNP	30800	120	477.0	37500	564.5	289.5
고리 1,2			466.3			299.2
울진 1,2			485.4			281.8
영광 1,2			504.4			263.9

2) 최대유출/최소충전 운전조건 (Sizing 모드)

발전소	Charging			Letdown		
	유량(lb/hr)	입구온도(°F)	출구온도(°F)	유량(lb/hr)	입구온도(°F)	출구온도(°F)
KSNP	22000	130	546.2	67500	564.5	442.0
고리 1,2			539.5			444.5
울진 1,2			545.8			442.2
영광 1,2			556.2			438.1

3) 최소유출/최대충전 운전조건

발전소	Charging			Letdown		
	유량(lb/hr)	입구온도(°F)	출구온도(°F)	유량(lb/hr)	입구온도(°F)	출구온도(°F)
KSNP	52800	120	250.7	67500	564.5	133.7
고리 1,2			249.2			139.3
울진 1,2			252.4			127.5
영광 1,2			253.8			122.3

4) KSNP 시험조건 (울진 4호기 정상충전, 정상유출)

발전소		Charging			Letdown		
		유량(lb/hr)	입구온도(°F)	출구온도(°F)	유량(lb/hr)	입구온도(°F)	출구온도(°F)
시험결과		22000	90.6	493.7	67500	566.2	249.8
KSNP	Fouled			471.2			274.1
	No Fouled			503.1			244.8
고리 1,2				538.5			435.2
울진 1,2				545.7			432.5
영광 1,2				557.3			427.9

다. 재생열교환기 성능 평가 결과

동일한 정상유출/정상충전 조건에 대해서 영광 1,2호기 재생열교환기의 유출온도가 가장 낮고 충전온도는 가장 높으며 고리 1,2호기 재생열교환기에서 유출온도가 가장 높고 충전온도는 가장 낮게 나타났다. 고리 1,2호기는 shell and tube 형태의 열교환기 세 개를 직렬로 연결하여 LMTD 보정계수 (F) 값을 크게 할 수 있어 shell and tube 열교환기의 단점인 temperature cross 문제를 보완할 수는 있으나 shell측과 tube측 유동이 대향류가 되는 multitube hair pin 형태의 열교환기보다 열전달 효율이 개선되지 않는다.

최소유출/최대충전 조건에서도 영광 1,2호기 재생열교환기의 유출온도가 가장 낮고 충전온도는 가장 높으며 고리 1,2호기 재생열교환기에서 유출온도가 가장 높고 충전온도는 가장 낮게 나타

났다.

유출수 온도가 가장 높게 나타나는 최대유출/최소충전 조건에서는 모든 재생열교환기가 비슷한 성능을 나타낸다.

울진 4호기 시험결과중 정상유출/정상충전 조건에 대해 HTFS.TASC 코드를 이용하여 각 열교환기의 성능을 계산한 결과에서도 영광 1,2호기 재생열교환기에서 가장 바람직한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 HTFS.TASC 코드를 이용하여 KSNP 재생열교환기를 평가한 결과와 시험결과가 정확히 일치하지는 않으나 fouling의 영향으로 발생하는 차이와 계측기 오차 범위 내에서 해석결과와 시험결과가 일치하므로 열교환기의 성능평가에서 fouling의 영향을 정확히 예측하여 반영하는 것이 중요함을 알 수 있다.

라. 대수평균온도차 (LMTD) 보정계수 (F)

열교환기 설계에서 기본적으로 사용되는 열전달 식은 아래와 같다.

$$Q = UA_0[MTD]$$

Q = Heat exchanger duty, Btu/hr
U = Overall heat transfer coefficient, Btu/hr-ft^2-F
A_0 = Effective external surface, ft^2
MTD = Mean temperature difference, °F

위 식은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Q = UA_0[LMTD]F$$

LMTD = Logarithmic mean temperature difference, °F

여기서 F는 순대향류 (true counterflow)로부터의 이탈을 보정하기 위한 LMTD 보정계수이다. 영광 1,2호기, 울진 1,2호기, 영광 5,6호기의 재생열교환기는 hairpin형태로 순대향류가 형성되므로 F값은 1이 된다. 고리 1,2호기 설계는 multi shell and tube 형태의 재생열교환기로 설계하여 대수평균온도차 (LMTD) 보정계수 (F) 값을 크게 하였으며 고리 1호기는 F=0.92로 F값 관점에서는 적절한 설계로 볼 수 있다. 고리 1,2호기에서 재생열교환기를 1 shell로 설계할 경우 F값이 0.67이 되어 일반적인 설계 참고 값인 F = 0.8에 크게 미달되어 temperature cross의 발생으로 열교환기 제작이 불가능하다.

2.5 재생열교환기 최적설계 제안

Shell and tube 형태의 작은 열교환기들을 직렬로 연결하여 설계한 고리 1,2호기와 같은 재생열교환기 형태가 LMTD 보정계수 (F) 값을 크게 할 수 있어 shell and tube 형태에서는 유리한 설계로 볼 수 있지만 multitube hairpin 형태인 KSNP, 영광 1,2호기, 울진 1,2호기 등의 재생열교환기에 비해서 건전성 및 운전성 측면에서 유리하다 볼 수 없다. 또한 multitube hairpin 형태의 재생열교환기가 동일한 면적에서 유출수 온도를 더 낮게 할 수 있어 유리한 재생열교환기 형태로 볼 수 있다. Multitube hairpin 형태의 열교환기 중 영광 1,2호기 재생열교환기의 전열면적이 가장 커 KSNP의 재생열교환기보다 유출수 온도를 10°F 정도 더 낮출 수 있을 것으로 보인다. 따라서 KSNP의 안정적인 운전을 위해 재생열교환기의 설계개선이 필요하다면 현재와 동일한 multitube hairpin 형태로 하고 영광 1,2호기 설계를 참고로 계통운전 변수를 고려하여 열교환기 Sizing을 증가시킬 수 있을 것이다. 또한 효율적인 배기 및 배수를 위해 KSNP 설계대로 재생열교환기를 수직으로 설치하여야 하며 크기를 증가시키기 위해 tube수를 늘리고 또한 baffle수도 늘려 fouling 측면에서 유리하도록 shell측 유속을 증가시키는 것이 바람직 할 것이다.

3. 결론

재생열교환기의 형태는 운전 및 설계조건을 고려해 볼 때 KSNP나 영광 1,2호기에서 채택하고 있는 multitube hairpin 형태의 열교환기가 가장 적절하다.
Multi-shell and tube 형태의 재생열교환기가 성능 면에서 유리할 것으로 생각되나 같은 조건에서 오히려 KSNP나 영광 1,2호기 재생열교환기보다 유출수 온도가 높게 됨을 알 수 있다. 따라서 기기건전성 측면이나 계통운전 측면에서 multi-shell and tube 형태의 재생열교환기는 바람직하지 않다. 현재 운전중인 각 발전소의 재생열교환기를 동일한 정상운전 조건에 대해 평가한 결과 영광 1,2호기와 같은 형태의 재생열교환기가 가장 좋은 성능을 나타내며 유출수의 온도를 10°F 이상 낮출 수 있어 계통 운전 측면에서 가장 유리하다. KSNP 재생열교환기의 성능 향상을 위해 설계개선을 수행할 경우 영광 1,2호기의 설계를 참고하여 열교환기의 크기를 증가시키는 방안이 적절할 것이다.

참고문헌

1. Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA), Seventh Edition, 1988.

2. Standards for Power Plant Heat Exchanger, Third Edition 1998, Heat Exchange Institute.

3. Heat Exchanger Design Handbook, G.F. Hewitt, 1998

4. HTFS Workshop Proceeding "Introduction to Heat Exchangers and Their Design" May 20, 1999. Seoul, Korea.

5. Final Safety Analysis Report for YGN 1&2.

6. Final Safety Analysis Report for UCN 1&2.

7. Final Safety Analysis Report for Kori 1&2.

8. Final Safety Analysis Report for YGN 5&6.

표 1. 발전소별 재생열교환기 설계 및 운전 자료

항 목	KSNP	고리 1,2호기	울진 1,2호기	영광 1,2호기
형 태	hairpin	TEMA NEU	hairpin	hairpin
shell 수	1	3 (series)	1	1
전열면적 (ft^2)	222	246 (82x3)	295	345
설계압력 shell/tube (psig)	3025 / 2485	2485 / 2735	2486 / 2813	2485 / 3100
설계온도 shell/tube (°F)	550 / 650	650 / 650	650 / 650	650 / 650
설치방향	vertical	horizontal	horizontal	vertical
shell/tube 유동	tube-letdown shell-charging	shell-letdown tube-charging	shell-letdown tube-charging	shell-letdown tube-charging
shell, tube 유동방향	true counterflow	crossflow (shellside)	true counterflow	true counterflow
fouling factor (Hr ft^2 °F/Btu)	0.00025	0.0003	0.0003	0.0003
정상유출온도 입구/출구 (°F)	564.5 / 292.5	541 / 285	547 / 284	560 / 290
정상충전온도 입구/출구 (°F)	120 / 478.8	130 / 483.4	130 / 496	130 / 518.7
정상운전유량 유출/충전 (gpm)	75 / 61.6	40 / 30	60 / 44.7	74.6 / 54.8
정 상 운 전 유 속 shell/tube (ft/sec)	1.7 / 8.4	2.8 / 6.4	-	2.06 / 3.25
정상운전압력강하 shell/tube (psi)	9.2 / 14.1	17 / 16	0.75 / 0.25	-

표 2. 월성 2,3,4호기 Interchanger (3335-HX1) 설계 자료

설계 변수	shell (charging)	tube (letdown)
유량	1080 gpm	1120 gpm
설계온도	535 °F	535 °F
운전온도(입구/출구)	150 °F/445.3 °F	511 °F/225 °F
설계압력	1870 psi	1870 psi
운전압력	1400 psi	1600 psi
유속	2.6 ft/sec	2.36 ft/sec
재질	carbon steel	Incoloy-800
노즐(입구/출구)	10″/10″	10″/8″

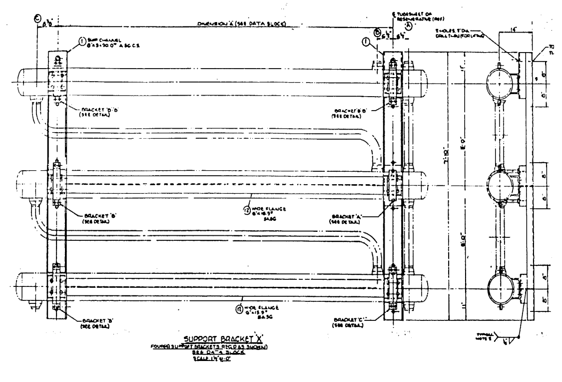

그림 1. 고리 1호기 재생열교환기 개략도

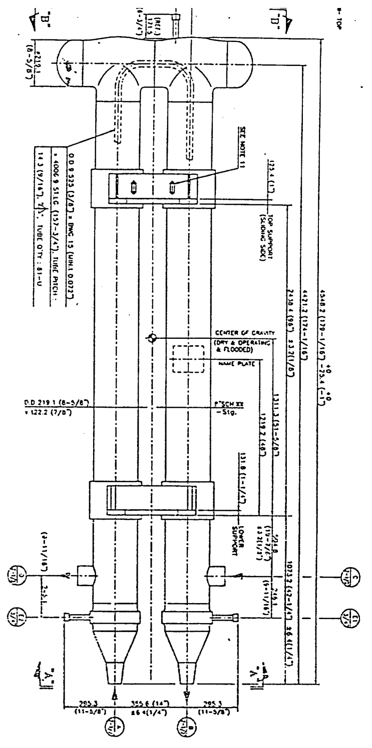

그림 2. 영광1,2호기/KSNP 재생열교환기 개략도

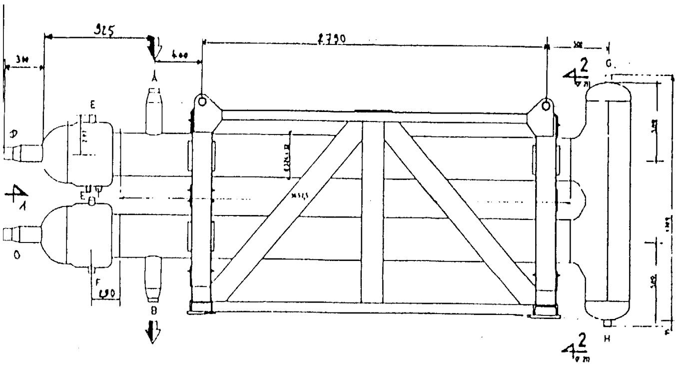

그림 3. 울진 1,2호기 재생열교환기 개략도

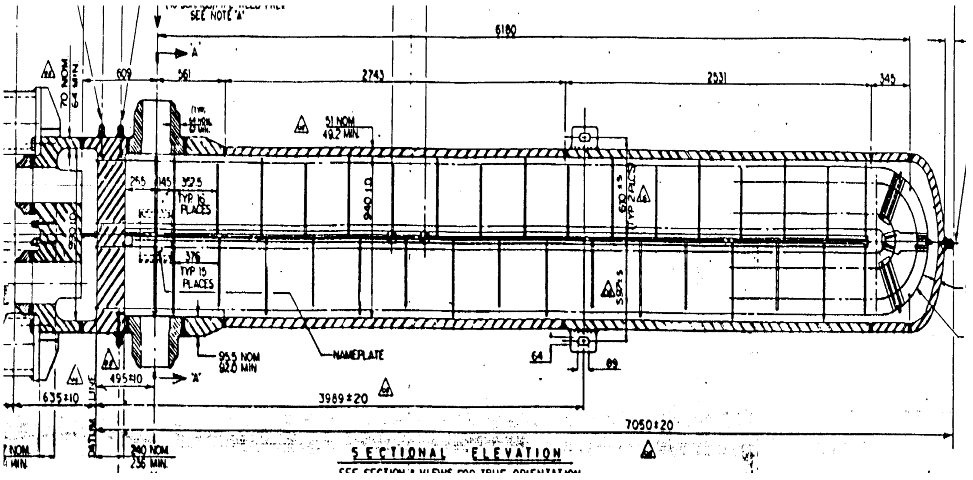

그림 4. 월성2,3,4호기 재생열교환기 개략도