

# 원자력발전소 기기냉각수계통의 판형열교환기 적용성

임혁순

## Applicability of Plate Heat Exchanger to Plant Cooling Water Systems in Pressure Water Reactor

Hyuk-Soon LIM

**Key Words:** APR1400 Heat Exchanger(신형경수로1400 열교환기), Plate Heat Exchanger(판형열교환기), Shell-and-Tube Exchanger(관류형 열교환기).

### Abstract

Advanced Pressurized Reactor 1400(APR1400), which is a standard evolutionary advanced light water reactor(ALWR), has been developed from 1992 as one of long-term Government Project(G-7). The APR-1400 is designed to operate at the rated output of 4000MWt to produce an electric power output of around 1450MWe. Due to the increased electric power, In Nuclear Power plant huge quantities of heat are generated in the thermo-dynamic process used for producing electrical energy. So, There is considerably additional cooling. Heat transfer area and increased cooling water of Heat Exchanger which take care of the different smaller cooling duties within the nuclear power plant. We review applying to PHE instead of Shell-and-Tube Heat exchanger. In this paper, we describe the major design features of PHE, Comparison between a PHE and a Shell-and-Tube Heat Exchanger, and then Applicability of Plate Heat Exchanger in Nuclear Power Plant Component Cooling water systems.

### 기호설명

- PHE : 판형열교환기(Plate heat exchanger)
- Shell-and-Tube : 관류형 열교환기
- CCW : 원자로 1차측 기기냉각수계통
- SFP : 사용후 핵연료 저장조
- TBCCW : 터빈 2차측 기기냉각수계통

### 1. 서론

신형경수로는 '92. 6월 정부의 G-7과제로 선정되어 현재까지 표준설계를 개발해 오고 있다. 안전성과 경제성을 향상시켜 대내외적 경쟁력을 확보

하고 장기전력수급 계획에 따른 전력수요 충족을 위해 대형원전의 장점을 살리고 해외 개량원전의 차별화를 위해 원자로 열출력 4000MWt로 설정하여 개량형 원전에 대한 표준설계를 한진 주도로 산·학·연이 합동으로 개발해왔다. 원자력발전소의 냉각수계통의 특성상 고온/고압의 유체로 인하여 대부분 관류형 열교환기를 사용하고 있으나 발전소 출력증가에 따른 열제거 용량 증가로 상대적으로 열교환기의 전열면적(A)을 증가시키거나 냉각유체의 유량을 증가시켜야 한다. 따라서 판형열교환기는 높은 전열성능으로 관류형보다 같은 열부하에서 열교환기 전열면적의 소형화, 기기 가격 및 설치 공간 측면에서 건설비용이 감소, 유지/보수성, 인허가성 등을 고려하여 원자력발전소의 냉각수계통에 판형열교환기의 확대 적용을 검토하였다. 본 보고서에서는 판형열교환기의 구조 및 특성, 판형 및 관류형 열교환

\* 한전 전력연구원 신형원전개발센터

기 특성비교, 원자력 발전소 냉각계의 판형열교환기의 확대 적용성에 대하여 제시하고자 한다.

## 2. 판형 열교환기의 구조 및 종류

### 2.1 판형열교환기 구조 및 종류

- 판형열교환기는 서로 평행한 여러개의 전열판을 겹쳐 쌓아서 열교환이 이루어지도록 고안된 장치로서 전열판은 기계적 강성을 높이고 난류를 일으키기 쉽게 하기 위하여 굴곡이 지어져 있다.
- 프레스 성형된 얇은 전열판을 가스켓을 이용하여 성층시키고 번갈아 온도가 서로 다른 유체를 공급하여 열교환이 이루어지도록 한다.
- 전열판은 End Cover(한쪽은 Fixed End Cover 다른 한쪽은 Movable End Cover)와 Compression Bolt에 의하여 조립된다.

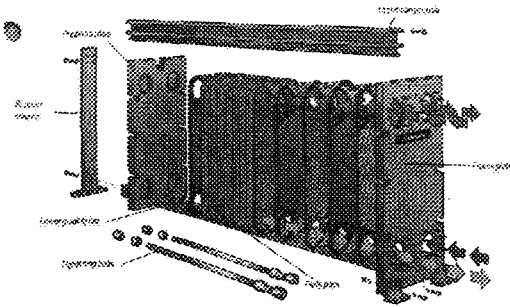


Fig. 1 Schematic of Plate Heat Exchanger

표1. 판형열교환기의 일반적 제원

항목		단위	제원
전열판	두께	mm	0.5 ~ 1.0
	폭	m	0.05 ~ 1.2
	높이	m	0.3 ~ 3.5
	면적	m <sup>2</sup>	0.032 ~ 3.63
주름(Corrugation)의 깊이		mm	3 ~ 7
전열판 사이의 간격		mm	1.5 ~ 5.0
전열판이 접촉하는 점		mm <sup>2</sup>	150 ~ 2000
Unit 당 전열판의 최대 갯수			700
End Cover의 두께		mm	20 ~ 100
입, 출구 Port의 최대 직경		mm	400
가스켓	두께	mm	3 ~ 7
	폭	mm	1 ~ 3

### 2.1.1 가스켓 판형열교환기

Plate-and-Frame 열교환기로 가장 많이 이용되는 열교환기로 전열판의 유로는 전열판에 부착된 가스켓의 형상에 따라 유로가 형성되며 각각의 전열판사이로 고온 및 저온측 유체가 완전 대향류로 흐르게 되며 주요 특성은 다음과 같다.

- 1) 100% 완전 대향류, 전열판 사이에서 높은 난류형성 및 박판의 전열판을 사용할수 있기 때문에 쉘-튜브형 열교환기에 비하여 전열성능이 3~5배 향상된다.
- 2) 전열판사이의 유로에서 높은 난류흐름 발생과 정체지역이 없으므로 오염발생이 적어서 세척빈도를 줄일수 있다.
- 3) 같은 열부하에서 열교환기 본체의 소형화가 가능하고 보수 및 유지를 위한 공간도 작게 할 수 있어서 초기비용이 낮다.
- 4) 동일한 전열면적의 쉘-튜브형 열교환기와 비교할 경우 대수평균온도차가 크기 때문에 피냉각 유체의 유량에 대한 냉각유체의 유량을 감소시킬수 있다.
- 5) 전열판의 수를 가감하여 열부하를 대응할 수 있고 전열판의 가장자리만 대기중에 노출되어 있으므로 열손실을 무시할 수 있으며 가스켓의 파손으로 인하여 두 개의 유체가 내부에서 혼합되는 일이 없다.

### 2.1.2 용접형 판형열교환기

가스켓형 판형열교환기의 가스켓 대신에 전열판 주위를 용접한 구조로써 한쪽의 전열판만을 용접한 경우 Semi-Welding, 양쪽 전열판을 용접한 경우를 Full-Welding Type 이라 하며 방사성 또는 산성 등의 유체를 포함하는 경우 누설방지를 목적으로 사용된다.

### 2.1.3 Brazed 판형열교환기

가스켓형 판형열교환기와 같지만 가스켓 대신에 brazed material로 대체하여 사용압력이나 온도를 높은 구조이다.

## 2.2 가스켓 판형열교환기의 전열관 및 가스켓

### 2.2.1 전열관 재질

내부식성 우수한 표준 전열관 재질로 SS 316 및 Titanium을 가장 많이 사용하고 Titanium-Palladium, Diabon F100, Nickel, Incoloy 825 등도 사용한다.

## 2.2.2 가스켓 재질

종류	사용온도	특성
Nitrile	230°F이하	· 가장 많이 사용됨 : 물, 해수 · 내유저성임
Ethylene-propylene terpolymer (EPDM)	320°F이하	· 가장 많이 사용됨 : 물, 해수 · 오일의 냉각, 가열에는 부적합
Resin-cured butyl rubber (IIR)	302°F이하	· 산, 알칼리, 케톤 및 아민과 같은 범위의 화학약품에 내경항성이 있음 · 지방의 저항성이 나쁨
Compressed asbestos fiber	482°F이하	· 유기화학 혼합체에 내경항성이 있음 · 탄성이 좋지 않기 때문에 판과 프레임이 견고해야함

## 2.3 판형열교환기 적용제한 및 과압 보호설비

### 2.3.1 전열성능 및 사용제한

판형열교환기는 증발되는 유체나 많은 양의 증기를 다루기 부적합하며 일반적으로 저온, 저압 및 상변화가 동반되지 않은 유체간의 열교환에 적합하다. 즉, 최고 사용압력, 온도, 유량 및 전열면적은 제한되고 있으나 용접형의 경우는 다소 높은 압력 및 온도에서도 사용 가능하다.

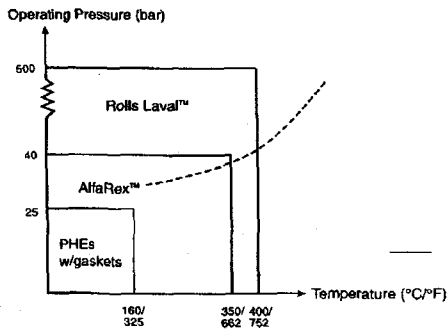


Fig. 2 Comparison of Laval High-Performance PHE's

표2. 판형열교환기 사용제한치

구분	최대 사용제한치
압력(psig)	360(25bar)
온도(°F)	320(160°C)
유량(gpm)	15,400~20,000
전열면적(ft <sup>2</sup> )	0.2~35,600

### 2.3.2 가스켓의 누설 및 수명

높은 압력 및 온도에서 판형열교환기의 가스켓 손상으로 인하여 사용유체가 외부로 누설될 가능성이 있으나 판형열교환기 최상의 성능은 온도조건 140°F이하이고 이때의 가스켓 수명은 10년 정도이다.

### 2.3.3 과압보호설비 설치

펌프의 기동시 또는 운전전환시 수격현상에 의해서 발생되는 과다압력으로부터 전열판을 보호하기 위해 과압을 방지 할 수 있는 설비를 전열판 전단 또는 후단에 과압 보호설비를 설치한다.

## 2.4 판형열교환기 고장율

전열판 사이의 막힘, 전열판의 부식에 의한 내부 누설 및 가스켓의 파괴에 의한 외부 누설로 인한 판형열교환기의 고장율은 원전의 경우 1.8failures/10<sup>6</sup> hr로 쉘-튜브형의 열교환기의 고장율인 4.2 failures/10<sup>6</sup> hr와 비슷하다.

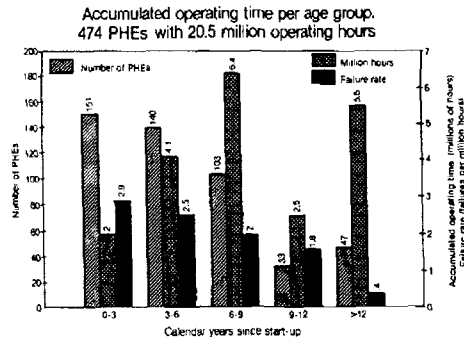


Fig. 3 A risk of PHE Failure

## 3. 판형/관류형 열교환기 비교

### 3.1 열교환기 주요 특성비교

- 1) 쉘-튜브형 열교환기는 튜브사용으로 고온/고압의 유체에 적합하나 상대적으로 열전달율(U)이 작기 때문에 동일한 열용량의 판형열교환기에 비해 열교환기의 전열면적(A)을 증가 시키거나 냉각유체의 유량을 증가 시켜야 한다.
- 2) 쉘-튜브형 열교환기의 총합열전달 계수(U) 값은 판형열교환기 대비 일반적인 경우 약

2~3배 정도 작기 때문에 동일 용량(UA)을 위해서는 전열면적(A)이 2~3배 정도 증가되어야 한다. 따라서 튜브 수가 증가하게 되고 보수시 Tube Bundle 해체를 위해 열교환기 길이와 거의 동일한 보수공간이 필요하므로 많은 설치공간이 요구된다.

- 3) 셸-튜브형 열교환기는 튜브사용으로 기계적 세척이 불가능한 반면 판형열교환기는 기계적 세척이 가능하며 분해조립이 용이하여 보수에 편리한 잇점이 있다.
- 4) 냉각유체 및 피냉각 유체가 모두 일반적인 유체조건을 갖고 있어 얇은 박막(전열판)을 물결모양으로 프레스 성형하여 그주위에 가스켓을 부착하는 형태인 가스켓 판형 열교환기가 적합하다.

표3. 판형기준 대비 관류형에 대한 상대적 평가

항목	특성	장점	단점
1. 분해, 조립	○ 용접을 하지 않고 Bolt로 조립하므로서 분해, 조립 용이	○	
2. 기계, 화학적 세정	○ 난류가 발생되고 분해가 용이하여 세정이 쉬움	○	
3. 누설 감지	○ 각 판 사이에 배기구가 있어 누설 감지 용이	○	
4. 필요 전열면적 및 설치, 보수면적	○ 열전달 계수 큼 → 필요 전열면적 작음 → 열교환기 크기 작음 → 수납 공간 작음 ○ 크기가 작고 전열판 인출을 위한 공간이 필요없이 설치 및 보수를 위한 면적이 작아도 됨 (관류형 대비 1/2 이상 절약 가능)	○	
5. 사용제한	○ 온도, 압력 및 유량에 따른 제한이 있음		○
6. 전열면적 변경	○ 부하 증감에 따라 판 수를 조정하여 가능	○	
7. 열손실	○ 외부와의 접촉 면적이 작아 열손실이 작음	○	

### 3.2 경제성

#### 3.2.1 동일조건에서의 판형/원통형 열교환기 비교

- 유량 : 163.7 kg/sec
- 온도 변화목표 : 23.8°C → 31.6°C (41.7°C 유체 사용할 때)

표4. 판형/관류형 열교환기 경제성 평가

항목	판형 열교환기	관류형 열교환기
열전달 면적(m <sup>2</sup> )	448	1217
열전달 계수 (clean, W/m <sup>2</sup> °C)	4168	2192
열전달 계수 (design, W/m <sup>2</sup> °C)	3640	1539
유효 평균 온도차(°C)	5.5	4.8
재질	Stainless Steel	Mild Steel
가격	\$66,000	\$91,800

※참고자료 : Heat Transfer Handbook

#### 3.2.2 사용 재질별 비교

- Stainless Steel Plate 및 고무 가스켓을 사용한 판형 열교환기를 기준한 상대적 비교는 다음과 같다

표5. 사용재질에 의한 경제성 평가

종류	재질		상대 제작비
	Plate or Tube	Gasket or Shell	
판형	Stainless Steel	고무	1
	Stainless Steel	압축 석면	1.3
	Titanium	고무	2
	Hastelloy		8
관류형	Carbon Steel	Carbon Steel	0.93
	Stainless Steel	Carbon Steel	1.5
	Stainless Steel	Stainless Steel	2
	Titanium	Carbon Steel	4

※참고자료 : Fundamentals of Heat Exchanger and Pressure Vessel Technology

#### 4. 원자력 발전소의 적용성 검토

##### 4.1 국내원전의 사용실적

원자력발전소는 계통의 특성상 고온/고압의 유체로 인하여 대부분 관류형 열교환기를 사용하고 있으며 해수를 이용한 일부 냉각계통에 제한적으로 판형열교환기를 사용하고 있다.

발전소명	상업운전 개시	원자로	출력 (MWe)	사용지
고리 2	'83	경수로	650	TBCCW HX
울진 1, 2	'88/'89	경수로	950	CCW HX
월성 1	'83	중수로	679	ECC HX

##### 4.2 적용성 검토

원자력발전소의 용량증가로 제거하여 할 열부하를 증가하여 관류형을 사용시 설치공간, 기기의 유지, 보수, 경제적 비용이 증가하여 다음과 같은 기기에 판형열교환기의 적용성을 검토하였다.

##### 4.2.1 적용대상 기기

판형열교환기는 가스켓 사용으로 온도 및 압력에 따른 적용 제한조건이 있다. 따라서, 관련 적용제한 요건을 고려하여 다음과 같이 대상 기기를 검토 하였다.

##### 1) 적용 제외기기

- 관련기기의 특수성이 있는 경우
  - 급수가열기, 공기조화계통의 공기냉각기 등
- 특정기기에 속해 있거나 냉각 용량이 특별히 작은 경우
  - 발전기 수소냉각기, 각종 펌프 및 전동기 냉각기, 터빈 윤활유 냉각기 등

##### 2) 적용 대상기기

- 특정 기기에 속해 있지 않아 관련기기 제작자의 Spec에 제한을 받지 않고 열교환기 크기가 특별히 작지 않은 열교환기
  - 1차측 기기냉각수 계통 열교환기(CCW)
  - 2차측 기기냉각수 계통 열교환기(TBCCW)
  - 화학 체적제어계통 유출 열교환기(L/D)
  - 사용후 저장조 열교환기(SFP)
  - 격납건물 살수계통 열교환기(Con. Spray)
  - 정지냉각 열교환기(S/D)
  - 증기발생기 유출 재생 열교환기(B/D)

표6. 판형열교환기 적용 타당성 검토

항목	제한치	Tube/Shell	TBCCW		CCW		L/D	
			값	적용	값	적용	값	적용
유량	3600 m <sup>3</sup> /hr	Tube	2952.5	○	5905.1	○ <sup>1)</sup>	45.42	○
		Shell	3543.0		4996.6		545.08	
온도	160℃	Tube	51.67	○	54.44	○	287.78	×
		Shell	65.56		93.33		93.33	
압력	25.31 kg/cm <sup>2</sup>	Tube	7.031	○	8.437	○	174.71	×
		Shell	11.250		11.250		11.250	
항목	제한치	Tube/Shell	Fuel Pool		Con. Spray		S/D Cooling	
			값	적용	값	적용	값	적용
유량	3600 m <sup>3</sup> /hr	Tube	795	○	1135.6	○	1810	○
		Shell	1135.8		1816.9		1130	
온도	160℃	Tube	98.9	○	204.4	×	93.33	×
		Shell	121.1		121.1		177	
압력	25.31 kg/cm <sup>2</sup>	Tube	11.58	○	64.3	×	31	×
		Shell	11.58		11.6		11.25	

주1) 두 대의 열교환기 병렬로 연결하여 적용가능함

##### 4.3 검토결과

판형열교환기 운전 제한조건 및 사용선례를 기준으로 검토한 결과 CCW, TBCCW, SFP 열교환기의 설계 온도/압력이 관련 규정한 운전온도, 압력 제한조건을 만족하고, 기기 구매가격 절감으로 인한 경제적 효과가 크며, 기기 배치 관점에서 설치공간 축소에 따른 이득이 있어 원자력발전소에 적용하였다.

#### 5. 개선효과

신형경수로 발전소냉각계통의 열교환기를 관류형 열교환기에서 판형열교환기를 적용함으로써 다음과 같은 개선효과를 얻을 수 있었다.

1) 기술성

판형열교환기 전열판이 분해, 조립되는 형태이므로 분해 세척이 가능하고 보수작업 공간이 관류형 열교환기 보다 작게 필요하므로 운전 및 보수성이 향상되며, 필요시 전열판의 수량을 조절할 수 있어 부하변동에 대처가 가능하다.

2) 인허가성

열교환기의 형식은 계통의 특성에 따라 결정되므로 관련 규제요건 해당되지 않아 인허가에 영향 없이 적용 가능하다.

3) 건설성

관류형 열교환기와 같은 재질 및 전열면적을 사용하면 높은 열전달 효율 때문에 소요 유량이 적어지므로 펌프용량을 줄일 수 있으며 판형열교환기 하중의 경우 관류형 열교환기의 약 1/5 수준의 경량화로 인하여 구조물의 건설 비용을 절감할 수 있으며 시공성이 향상된다.

4) 경제성

기기 구매가격에 따른 직접적인 경제적 효과와 열교환기 설치공간 축소 및 펌프 용량축소에 따른 간접적인 효과가 있다.

○ 기기구매 절감액 : 2개호기 기준

(영광원전 5,6호기 기준)

구분	내역	기재액비
절감분	관류형열교환기 12대	10,109(백만원)
추가분	판형열교환기 12대	3,480(백만원)
절감 총액	66억원	

○ 추가 비용절감 효과

판형 열교환기 하중의 경량화로 인한 구조물의 건설비용을 절감하였다.

○ 공간축소 인한 경제성

기존호기의 관류형 열교환기기준으로 판형 열교환기로 대체시에 설치공간이 체적대비 80% 축소 효과가 있다.

6. 결론

- 원자력발전소의 판형열교환기 적용은 운영 및 정비 보수 편의성 측면에서 관류형에 비해 우수할 뿐만 아니라 기기 가격이 저렴하고 설치공간이 작아져 경제성 측면에서 유리하나 기기 특성상 일정 범위의 온도, 압력 등으로 사용이 일부계통에 제한하여 적용하였다.
- 이러한 제한된 범위 내에서도 해외원전 및 국내원전에서 사용실적이 다수 있어 건전성 및 인허가 취득 등에 문제가 없고 기술적 타당성 검토한 후 신형경수로에서는 1차 기기 냉각수계통, 2차측 기기냉각수계통, 사용후 연료 저장저의 열교환기에 대하여 판형열교환기를 적용하여 설계하였다.
- 따라서 원자력발전소의 냉각수계통의 제한은도 및 압력등을 고려하여 관류형열교환기 대신 판형열교환기의 확대 적용에 따라 기기 구매가격 절감으로 인한 경제성 효과가 크고 기기 배치 관점에서 설치공간 축소에 따른 이득이 있으며, 계통부하의 요구량에 따라 전열판의 조절할 수 있어 부하변동에 대처가 가능하여 원자력 발전소의 판형열교환기의 확대 적용의 기반을 마련할 수 있었다.

참고문헌

- (1) J.P. Gupta, "Fundamentals of Heat Exchanger and Pressure Vessel Technology", Hemisphere Publishing Corporation, 1986
- (2) APV, "Heat Transfer Handbook", APV Equipment Inc., Tonawanda, N.Y. B3
- (3) Technical Information, "Plate Heat Exchangers for the Power Industry, Published by Alfa Laval.
- (4) 한국전력공사, 한국표준원전(1000Mwe) 설계 개선사업 종합보고서 (본문편 3권), 1999
- (5) 한국전력공사, 차세대원전 표준안전분석 보고서(SSAR)