

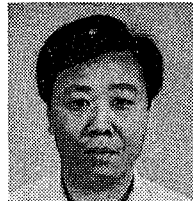
보일러 폐열회수를 위한 히트파이프 적용기술

The Application Technology of Heat Pipe for Waste Heat Recovery

강 도 석

D. S. Kang

한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

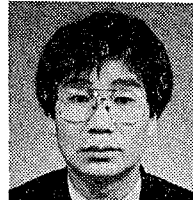


- 1955년생
- 대체에너지 기술개발 업무를 수행하고 있으며, 열전달 및 이상유동분야에 관심이 있다.

나 중 희

J. H. Na

한국전력기술(주) 전력기술개발연구소



- 1964년생
- 대체에너지 기술개발 업무를 수행하고 있으며, 폐열회수 분야에 관심이 있다.

1. 서 론

공기에열기는 보일러에서 배출되는 배가스의 현열을 회수하여 연소용 공기를 예열·공급함으로써 보일러의 배가스 손실을 줄여 효율을 증가시켜 주는 필수설비이다. 현재 화력발전소에서 사용되고 있는 이러한 공기에열기의 형식은 열소자가 가열부와 수열부를 주기적으로 이동하는 재생식으로 구조적으로 항상 일정량의 공기가 가스측을 통하여 대기중으로 방출된다. 이러한 누설량은 설비의 경년열화 현상인 마모 및 열적변형으로 더욱 증가되며 이로 인한 잦은 개보수는 유지보수 비용을 증대시킨다. 또한 공기의 누설증가는 열손실외에 공기 및 가스의 유량을 증대시켜 통풍기 소요 동력을 증가시킨다. 반면 히트파이프 공기에열기는 구조상 가열

측과 수열측이 완전 분리되어 이상과 같은 제반 문제점들을 해소 시킬 수 있어 선진국에서는 이의 효율적인 활용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 고에서는 발전소 보일러 배가스의 현열을 효율적으로 회수하여 이용하는 방안으로 대두되고 있는 히트파이프의 작동 원리를 비롯한 특징 및 장·단점을 검토하고 외국의 적용 사례를 소개하고자 한다.

2. 히트파이프 공기에열기의 작동원리

히트파이프 공기에열기는 여러개의 단위 히트파이프로 조합된 열교환기로 보일러 배열을 회수할 목적으로 사용된다. 즉, 그림 1에 나타난 바와 같이 히트파이프 내부의 작동유체는 배가

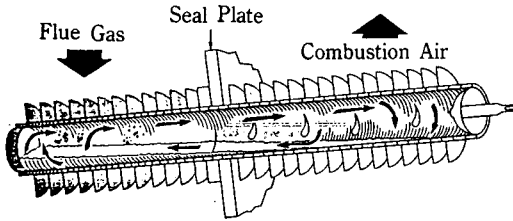


그림 1 공기예열기에서 단위 히트파이프의 작동원리

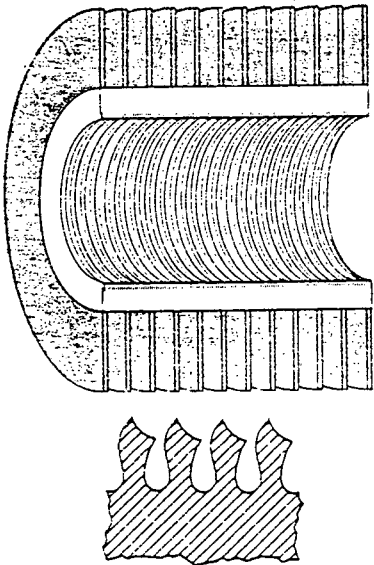


그림 2 내부에 형성된 그루브의 형태

스로 부터 열을 흡수하여 증기화되고 이것은 압력차에 의하여 연소용 공기측으로 이동하여 열을 방출한 후 응축되어 다시 배가스측의 증발부로 환류하는 증발과 응축이 연속적으로 사이클을 이룬다. 이러한 운전은 액체-증기간의 상변화로 생기는 높은 잠열을 이용하기 때문에 열전도 성능이 우수해진다.

작동방식은 작동유체의 내부 위크(wick) 구조물에 의한 모세관력에 의한 순환방식과 중력에 의한 밀도차로 유체의 순환이 이루어지는 열-사이편 방식으로 구분되는데 일반적으로 공기예열기는 열성능 및 제작비를 고려하여 열-사이편 방식을 채택하고 있다.

이러한 열-사이편 방식의 설비도 제작회사에 따라서 그림 2에 나타난 바와같이 튜브 내면에

나선형 모양의 그루브(groove)를 형성하여 시키기도 하는데 그 목적은 다음과 같다.

- ① 가스측에서 작동유체를 내부표면에 균일하게 확산시킴으로서 열전달 표면이 완전히 작동유체로 젖음 상태가 되도록하여 열전달 효과를 상승시킨다.
- ② 증발부 및 응축부 내부의 열전달 면적을 증가시켜 준다.(내부 열전달 표면의 효율 증가)

3. 히트파이프의 적용 기술

히트파이프 열교환기는 일반 산업용 보일러의 절단기 및 공기예열기를 포함한 여러 분야에 널리 활용되고 있으나 발전용에 적용은 아직 일반화되지 않은 실정이며, 미국의 몇몇 발전소에 공기예열기용으로 활용되고 있다. 하지만 히트파이프의 우수한 특성 때문에 이의 효율적인 활용을 위하여 외국에서는 활발한 연구가 수행되고 있으며 주로 보일러 배가스의 에너지를 회수방안으로 이루어지고 있고 경우에 따라서는 배가스중의 오염물질 제거 설비에 적용을 위한 연구도 수행되고 있다.

3.1 히트파이프 공기예열기

3.1.1 구조 및 특징

히트파이프 공기예열기는 그림 3에 나타난 바와같이 여러개의 단위 히트파이프들의 집합체로 구성되며 설치 및 교체가 용이하도록 다단 구조물로 이루어진다.

각 튜브의 배열은 그림 4와 같이 배가스측과 연소용 공기측의 유동방향에 따라 수직형이나 수평형으로 설치될 수 있다. 여기서 배가스측인 증발부는 수직형인 경우 하단부에 수평형인 경우 수평면을 기준으로 하부에 위치하도록 구배를 주어 설치함으로써 중력에 의해 작동 유체의 귀환이 원활해지도록 한다.

튜브내의 작동 유체는 진공상태에서 내부의 불순물을 제거한뒤 주입되며, 시일링 후 누설 시험 과정을 거친다. 작동유체의 선정은 연소용 공기와 배가스 간의 운전온도에 의해 이루어지

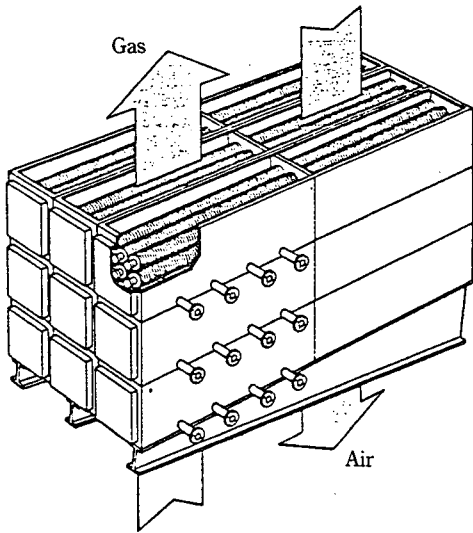


그림 3 Heat Pipe 공기에열기의 구조

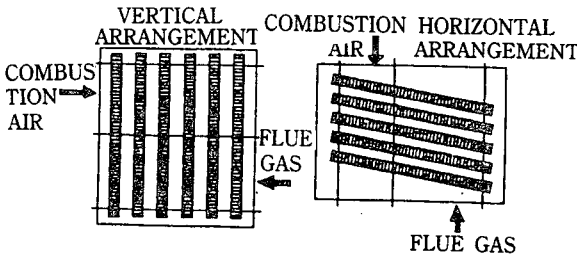


그림 4 히트파이프 공기에열기 배열의 종류

표 1 공기에열기용 히트파이프의 재질 및 작동유체

Temperature	Up to 900°F flue gas entering temperature
Working Fluids	Water Naphtalene Trichlorotrifluoroethane Dowtherm A Dowtherm J
Tube Material	Carbon Steel Porcelain enamel Coated Steel Duplex Steel Carbon Steel with Teflon Coating

며 주로 물, 나프탈렌, 톨루엔 그리고 Dowtherm 계통이 주종을 이룬다. 이들 작동유체는 일반적으로 설비의 운전온도에 따라 고온부, 중간부, 냉단부로 분리 적용되기도 하며 단일유체가 사용되기도 한다.

표 1은 공기에열기에서 주로 사용되는 히트파이프의 재질 및 작동유체를 요약한 것이다.

튜브 표면은 외부 열저항을 최소화하기 위하여 핀이 부착되며 핀의 형상이나 갯수는 사용연료에 따라서 조정된다. 핀의 갯수는 보통 청정연료인 천연가스나 경유를 사용하는 경우 공기층과 마찬가지로 6개/인치 정도이며, 석탄과 같이 분진의 함량이 높은 연료에서는 3개/인치 정도를 이룬다. 또한 냉단부에서 황산에 의한 부식을 방지하기 위하여 사용 온도범위 및 가격등을 고려하여 납이나 테프론 등 내식성 재료로 튜브를 코팅 처리하거나 또는 튜브 차체를 특수 스테인레스 강으로 제작하기도 한다. 납으로 코팅한 경우 고온에서 운전되면 납성분이 휘발하여 인체에 유독한 오염물질이 생성되므로 세심한 주의가 요망된다. 한편 코팅처리하는 석탄연소보일러의 경우 가스중에 함유된 미립자들에 의한 침식 작용으로 손상을 입을 가능성이 높아 그림 5의 (b)와 같은 방법으로 적용한다.

단위 히트파이프는 그림 6에 나타난 바와같이

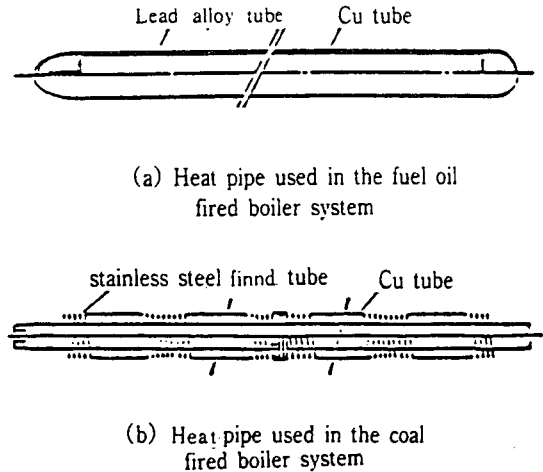


그림 5 냉단부의 코팅 형태

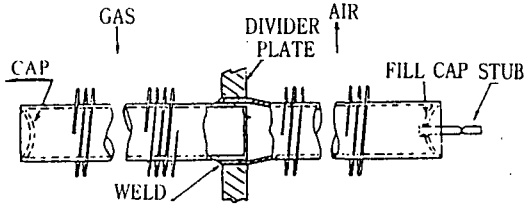


그림 6 히트파이프의 내부 시일링 및 지지 구조 형태

중간지점에 구조분리판(structural partition plate)에 의하여 연소공기측과 배가스측이 분할 고정된다. 그리고 히트파이프의 양끝단은 열응력에 의한 파손 및 진동을 피할 수 있도록 설계된 배플판(baffled plate)에 의하여 지지된다.

관군의 배열은 일반적으로 LNG나 경유를 연료로 사용한 경우 열전달률을 높이기 위하여 엇갈린(staggered) 형태로 배열하며 중유나 석탄을 연료로 사용하는 경우 물세척이나 수트송풍기(soot blower)의 설치 및 운전이 용이하도록 일렬(In-lined)로 배열을 이룬다.

3.1.2 히트파이프 공기예열기의 장·단점

히트파이프 열교환기는 그 특성상 여러 장점들을 갖고 있으며 표 2는 이러한 히트파이프를 활용한 공기예열기와 기존의 재생식공기예열기의 특성을 비교한 것이다. 이 표에 나타난 히트파이프 공기예열기의 장점을 살펴보면 우선 무누설에 의한 잇점으로 열손실 감소외에 통풍팬 및 집진기의 용량감소 효과가 있으며 화재 발생 위험성도 없어진다. 그리고 튜브의 온도 분포가 균일하므로 열소자의 최저온도가 동일 운전 조건에서 재생식 보다 40°C 정도 높아지며 따라서 저온부식 현상이 감소한다. 한편 이 설비는 정지 상태에서 운전되므로 설비의 마찰 및 마모가 발생되지 않고, 냉각 및 윤활장치가 불필요하며, 회전동력도 소요되지 않는 잇점이 있다. 또한 이같은 정지 상태의 운전으로 열소자의 이동이 없어지므로 열사이클링(thermal cycling)에 의한 열응력이 발생되지 않아 열소자의 수명이 증대되고, 저온부식 방지를 위한 코팅(coating) 등의 처리도 용이해지는 등 여러가지 장점들이 있다.

표 2 히트파이프와 재생식공기예열기의 장·단점

구분	재 생 식	히트파이프
장점	- 열소자교체 용이 - 단위 용량당 부피가 작다.	- 누설 발생 없음. - Tube의 온도분포가 균일. - 회전부가 없다. - 설치기간이 짧다.
단점	- 누설방지	- 부피가 크다. - 신뢰도 낮다.

3.1.3 발전소별 설치사례

(1) Pleasants 발전소

(A) 현 황

석탄연소 발전소인 Pleasants 발전소는 Allegheny 전력회사의 소유로서 이 발전소의 보일러는 Foster Wheeler사에서 제작한 626MW급 초임계압 관류형 보일러이고 6대의 미분기와 평형통풍(balanced draft) 시스템으로 구성되어 있다. 또한 사용설계탄은 Pittsburgh Seam 아역 청탄이며 수직형의 회전 재생식 공기예열기가 1차 공기측과 2차공기측으로 각각 분할되어 2대씩 설치되어 있다.

(B) 교체 내용

이 설비는 1982년 히트파이프 전문 제작업체인 Q-Dot사(1985년 CE사에 흡수되었으며 현재는 ABB사입.)에 의하여 설계 공급되었다. 히트파이프 공기예열기는 그림 7에 나타난 바와같이 나선형의 핀이 부착된 단위 히트파이프가 다수 내장된 4개의 모듈이 수직으로 배열된 형태를 이루며 각각의 단위 히트파이프는 누설방지를 위하여 연소 가스측과 공기측을 중앙분리판으로 서로 분리 하였다. 또한 열-사이편 효과가 원활하도록 수평으로 부터 약 6°정도 경사를 주었으며 단위 히트파이프의 배열은 수트송풍기(Soot Blower)의 설치 및 운전이 용이하도록 10.5 cm 일렬로 사각배열로 구성되어 있다. 최상단 모듈의 하부와 최하단 모듈의 상부에는 각각 2대씩의 수트송풍기가 설치되었다. 수트송풍기의 운전주기는 1회/8시간이며 1회 운전시 100psi

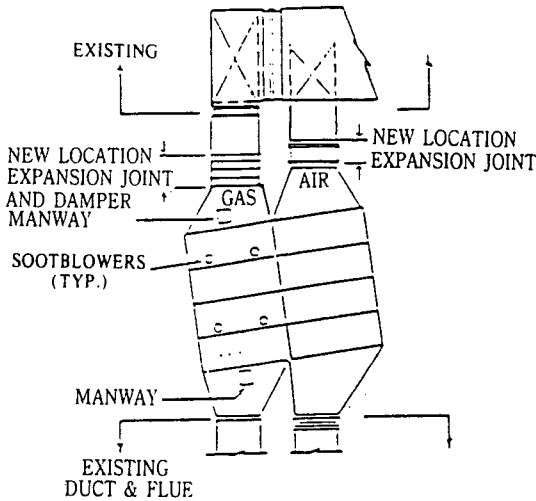


그림 7 히트파이프 공기예열기의 형태

압력의 압축공기가 동시에 4개의 수트송풍기를 통하여 약 2분간 운전되었다.

히트파이프의 작동유체는 나프탈렌 및 톨루엔을 사용 온도별로 분리 적용하였으며 튜브의 재질은 탄소강을 사용하였다. 단위 히트파이프의 교체는 모듈별로 이루어 지도록 하였다.

(C) 교체 결과

이 사업의 주요 목적인 히트파이프 공기예열기의 성능 분석을 위하여 3년간의 시험이 이루어졌으며 그 결과는 다음과 같다.

- 100% 부하시 가스측 온도효율은 설계치(74.4%) 보다 약간 낮은 72.9%를 나타내었으며, 공기측과 가스측의 통풍손실은 설계치보다 작은 1.7in.Wg와 1.68in.Wg를 나타냈다.
- 공기예열기의 누설은 거의 없었음.
- 공기예열기의 내부검사는 발전소 보수기간에 수행되었는데 히트파이프 모듈에 큰 문제점은 발견되지 않았으나 수트송풍기의 통로에서 튜브의 편이 침식된 것이 발견되었다. 또한 약간의 재가 가스측의 상단부에 발견되었으나 큰 문제점은 야기되지 않았다.
- 1991년(약 10년간의 운전실적)까지 손상된 히트파이프를 교체한 사례가 없이 잘 운전되고 있다.

(2) Crist 7호기 발전소

(A) 현 황

Crist 7호기 발전소는 걸프전력회사(Gulf Power Company)의 소유로 플로리다주 Pensacola 근처에 있는 500MWe급 석탄연소 발전소로 1973년에 상업운전 되었다. 이 발전소의 보일러는 Foster Wheeler 제품으로 평형통풍 시스템으로 되어 있으며 2 세트의 공기예열기가 장착되어 있다. 세트별 공기예열기는 규모가 큰 2차 공기예열기와 규모가 작은 1차 공기예열기로 구성되어 있으며 회전 배스켓형(basket-type) 재생식이다. 이 발전소의 공기예열기 누설율은 정격부하시 71% 최소부하시 138%로 1987년 이래로 지속되어 왔으며 이로 인하여 성능저하의에 수분함량이 많은 탄이 사용되거나 동절기에는 발전소 출력까지 제한을 받아왔다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 1989년 5월에 일차공기예열기를 히트파이프 식으로 교체했다.

(B) 교체 내용

- 외경은 2인치, 두께 0.095인치 길이 약 22.5ft의 히트파이프가 36×44의 배열로서 구성되어 있으며, 가스측의 길이는 11ft이다. 각 튜브의 피치는 3.75×3.75인치의 일렬사각배열로 이루어졌다.
- 공기예열기는 4개의 모듈로 되어있고 냉단부 모듈은 교체가 가능토록 설계 되었으며 교체공간을 감안하여 튜브는 약 25° 정도로 경사를 이루고 있다.
- 작동유체는 3종류가 사용되었는데 고온부는 Dowtherm A, 중간부는 Fowtherm J, 저온부는 방식제를 첨가한 Morpholine과 Glycerol 수용액이 사용되었다.(처음에는 메탄을 넣었으나 유독성 및 취급상의 이유로 현장에서 교체하였다.)
- 4개의 회전 수트송풍기가 설치되었다.
- 연소공기의 온도제어는 배가스 유량을 조절함으로써 이루어지며 이를 위하여 Leaf Damper가 가스 입구 덕트에 부착되었으며, 이것은 공기 흐름이 중단될 시 히트파이프의 과열을 방지하는 수단으로 사용되기도 한다.

표 3 유량 및 온도에 미치는 영향

운전 형태	항 목	기존 예열기	히트파이프	차이(%)
520MW	일차공기 팬의 유량, 1b/h	618,400	456,600	-26
	공기 누설량, 1b/h	192,700	0	-100
	Mill로 유입되는 공기, 1b/h	425,700	456,600	+7
	일차공기 팬 전류, (A)	198	153	-23
	입구 가스 유량, 1b/h	289,300	253,200	-12
	출구 가스 유량, 1b/h	482,000	253,200	-47
	출구 가스 온도, °F	272	294	+22
520MW	일차공기 팬의 유량, 1b/h	420,100	229,200	-45
	공기 누설량, 1b/h	196,200	0	-100
	Mill로 유입되는 공기, 1b/h	223,000	229,200	+2
	일차공기 팬 전류, (A)	155	120	-23
	입구 가스 유량, 1b/h	158,000	208,900	-32
	출구 가스 유량, 1b/h	354,700	208,900	-41
	출구 가스 온도, °F	199	297	+98

(C) 교체 결과

이 설비는 1989년에 설치된 이래 현재까지 잘 운전되고 있으며 가끔 비산회에 의한 튜브다발에 막힘문제가 가끔 발생되었다. 이것은 저온부에서 발생하는 회분의 침착에 의한 현상으로 고온부에는 침전물이 없었다.

표 3은 1990년 시험 결과를 토대로 기존 공기 예열기와 히트파이프 공기예열기의 성능을 비교한 것이다.

3.2 응축열교환기로 적용

3.2.1 응축형 열교환기의 특징

발전소 보일러 배가스온도는 항상 공기예열기 출구가스의 유황 노점에 의해 제한된다. 히트파이프를 포함한 모든 형태의 공기예열기들을 이 노점보다 낮은 온도로 운전할 수 있지만 이에 따른 발전소의 열효율 개선효과 보다 유황부식으로 인한 설비의 손상에 따른 영향이 더 크기 때문이다.

이러한 유황부식을 방지하기 위하여 보로실리카유리관(borosilicate glass tubes), 테프론피복관(tefloncovered tubes), 경테프론관(solid teflon tubes) 등의 재질이 사용된다.

이러한 설비의 에너지 회수에 의한 경제성은 연료 비용과 연관이 있지만 오늘날에는 열효율을 향상시키고 물을 회수하는 것은 경제적인면보다 환경측면에서 더 중요시되고 있다.

특히, 응축형열교환기를 적용함으로써 오염물질 배출제어 능력이 우수해지는 특징에 더욱 관심이 집중되고 있다. 즉 이 계통의 첫단 열교환기에서 응축점 부근까지 배가스를 냉각시킨뒤 응매 슬러리를 분사하여 포화시킨후 두번째 열교환기에서 냉각 홍축시키면 물과 함께 오염물질도 동시에 제거된다. 여기서 제거된 오염물질은 SO₂, SO₃, HCl, 미립자, 휘발성 유기화합물 및 기타 독성물질들이다. 이 열교환기의 튜브 및 셸의 내면은 테프론으로 코팅되었으며, 이 표면에서 이루어지는 독특한 형태의 응축(핵응축)은 미세한 수적을 형성시켜 가스중의 마이크론이하 크기의 미립자를 흡착 분리시키는 역할을 돕는다.

4. 결 론

히트파이프 공기예열기는 구조적으로 가스와 공기가 완전 분리되어 누설이 발생되지 않는

점을 포함한 여러 장점이 있어 보일러 배가스의 에너지를 회수하는 설비로 효율적으로 활용될 수 있다. 특히 기존의 재생식 공기예열기의 누설 등에 의한 각종 문제점들을 용이하게 해소시킬 수 있어 좋은 대안으로 부상하고 있다.

기존의 중유 연소 보일러의 경우 유황분해에 의한 저온부식 억제제를 위하여 150°C 정도의 상당히 높은 에너지를 대기로 배출하므로써 열손실은 물론 환경문제도 대두될 수 있다. 히트파이프는 그 특성상 운전온도가 일정하고 온도분포가 균일하여 유황부식 방지를 위한 각종 코팅처리가 용이하며 운전 신뢰성을 충분히 확보할 수 있다. 따라서 저온부에서의 열을 회수하는 설비로 적용이 유리하다. 이와같이 저온에서 열을 회수함으로써 가스중의 수분도 동시에 응축되어 작은 온도차에도 잠열을 포함한 많은 양의 에너지를 회수할 수 있다.

이상과 같이 히트파이프를 적용하여 대기로 배출되는 폐열을 회수하는 방안은 환경관리 차원에서 그리고 에너지 수입 의존도가 높은 우리 실정을 감안할 때 에너지 절감 차원에서 신중히 그 적용을 고려할 필요가 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Loughner, G.A., "Heat Pipe Air Preheater Operating Experience on a Coal Fired Unit," Allegheny Power System Pleastants Power Station.
2. Franklin, H.N. and Henderson, G.O., "In-service Operation of the Heat Pipe Air Preheater," American Power Conference, Apr. 1980.
3. Misner, T.L. and Franklin, H.N., "Coal-Fired Operating Experience with a Heat Pipe Air Preheater," Americal Power Conference, Apr. 1983.
4. Noble R.T., "Heat Pipe Air Preheater : Performance Test Results Plant Crist Unit-7," EPRI Conference, 1991.
5. "Q-PIPE Air Preheater Product Information," Combustion Engineering Inc.
6. Kitto. J.B., Watson, G.B., "HEATFLO™ Heat Pipe Based Air Heater," Hudson Product Co., Jan. 1987.
7. Brower, P.H and diggins, J.P., "Design and Operating Experience of Utility-Sized Heat Pipe Primary Air Pre Heater," Canadian Electrical Association., Oct. 1983.
8. Dunn, P.D. and Reay, D.A., Heat Pipes, 3th Edition, Pergamon Press, oxford, UK, 1982.