신기술소개

폐열회수용 열교환기

윤 정 인

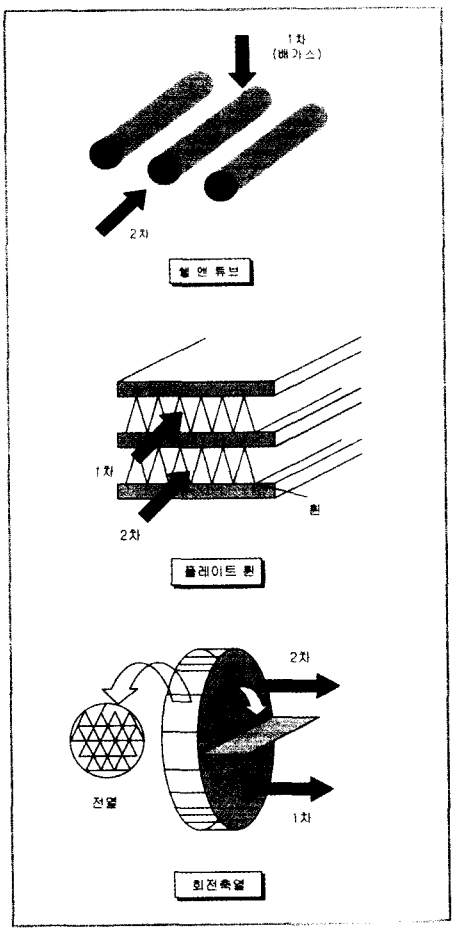
부경대학교 기계공학부

(yoonji@dolphin.pknu.ac.kr)

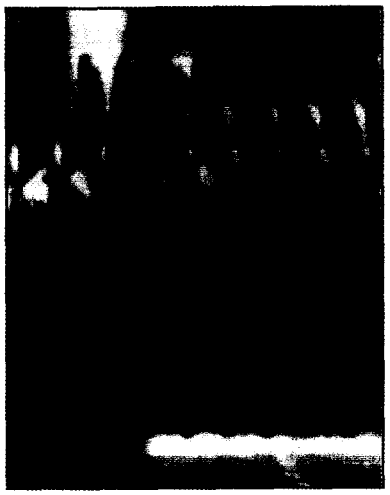
현재 세계적으로 지구 온난화 가스 배출삭감 목표는 대단히 엄격하다. 종합적인 삭감대책을 검토하는 것도 중요하지만, 현 단계에서 실현 가능한 것부터 먼저 실천에 옮길 필요가 있다. 화석연료를 대량 소비하는 분야에 있어서는 배가스 열회수 기술의 도입 및 연료전환 등에 의해 이산화탄소 배출을 억제해야 한다. 배가스중에는 온도에 의해 계량 가능한 현열과 불가능한 수증기 잠열이 포함되어 있다. 예전에는 배가스의 열회수라고 하면 전자의 현열 회수를 말하였으나 최근에는 특히 유제연료나 수소가 많은 연료가 환경 부하 저감 효과가 있어 많이 사용되게 됨에 따라 배가스 중의 수증기 농도 및 함유 잠열량은 증가하는 경향이 있다. 따라서 내부식성 재료의 개발 등과 함께 잠열 회수가 크게 주목되고 있다. 이러한 추세에 맞춰 산업 및 운송용 동력원에 대한 배가스 현열회수기술을 소개하고, 잠열회수 기술을 중심으로 앞으로의 개발과제를 소개하고자 한다.

현열회수

배가스의 현열회수를 전열형태별로 분류하면 그림1과 같다. 셸 엔 튜브 타입은 일반적으로 전열관내를 2차 유체인 액체가 흐른다. 이 경우 배가스측 열전달계수가 액체측보다 비교적 작은 경우에는 그림2와 같은 휜관이 사용된다.



[그림 1] 전열형태에 따른 분류



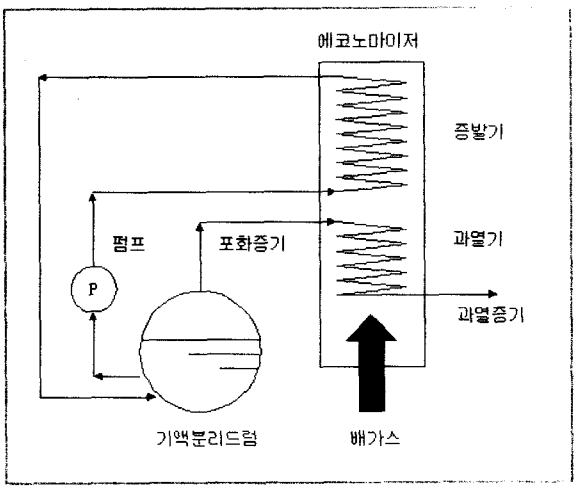
[그림 2] 휜 관

휜관을 이용하여 전열면적을 크게 하고, 액체측에 비해 떨어지는 가스측의 열전달을 보충하려는 것이다.

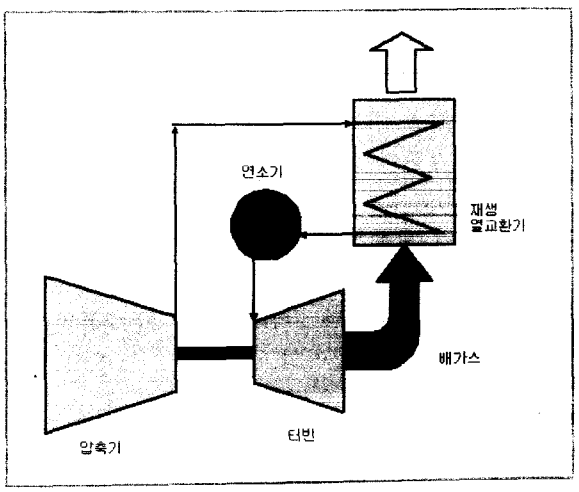
원래 이 타입은 보일러 급수를 예열하는 에코노마이저(절탄기)로 이용되어 왔었다. 최근에는 가스터빈이나 디젤엔진과 같은 고온동력원과 저온동력원인 증기터빈의 컴바인 사이클의 배가스 열회수보일러로 이용되게 되었다.

그림3은 가장 단순한 에코노마이저의 구성을 나타낸 것이다. 에코노마이저의 저온부인 증발부(예열부)에서 만들어진 증기-물 혼합물이 보일러 등의 기액분리드럼에서 포화증기가 되고, 과열부에서 과열증기로 되어 증기터빈에 유입된다. 일반적으로 에코노마이저는 증발부(예열부)와 과열부로 구성되지만, 대형이 되면 압력이 다
른 여러개의 증발부와 과열부로 구성되어, 고온에서 저온까지 효율좋게 열회수가 이루어진다. 플레이트 휜 타입은 2차측도 기체인 경우에 사용되어진다. 셀 엔 튜브 타입은 콤팩트화 하기 위해 배가스가 흐르는 1차측에 휜이 붙은 전열관을 이용했지만, 이 경우 2차측에는 기체가 흐르기 때문에 2차측에도 휜을 부착하였다. 기본적으로는 평판에 따라 나눠진 공간을 배기가스와 2차유체인 공기가 교대로 흘러 열교환하지만 일반적으로 평판과 평판사이에는 파형강판형 휜구조가 샌드위치 형태로 수납되어 있는 것이 일반적이다.

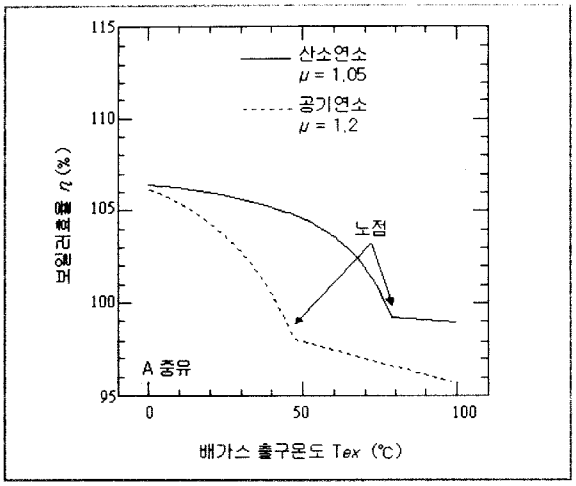
그림4는 재생 열교환기의 개념도로서, 압축기에서의 압축공기를 연소기로 보내기 전에 예열한다. 또, 저환경부하형 선박용 기관으로 현재 개발되고 있는 슈퍼마린



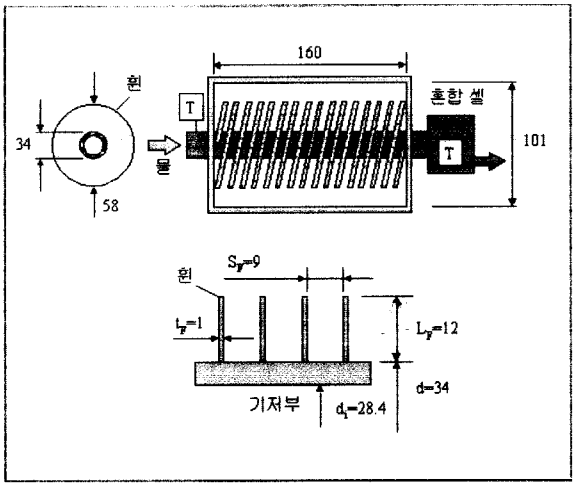
[그림 3] 에코노마이저의 구성



[그림 4] 가스터빈 재생열교환기



[그림 5] 보일러효율과 배가스 출구온도



[그림 6] 실배가스를 이용한 휜실험

가스터빈에도 콤팩트화를 위해 사용되고 있다. 이 경우 열교환기 본체가 상당히 콤팩트화되는 반면, 더러움 등에 따른 전열 열화에 주의할 필요가 있다.

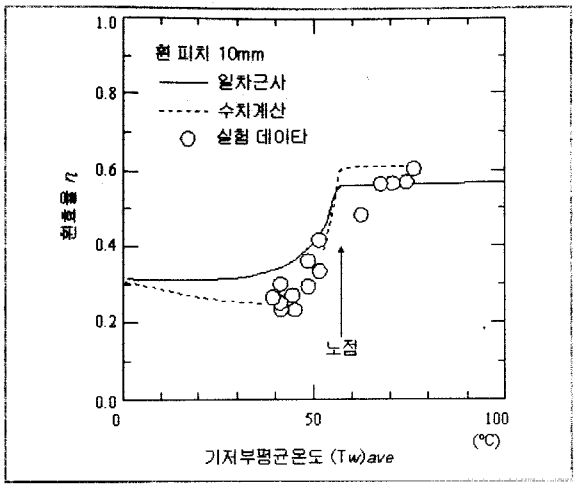
회전축열형은 열전달 물체를 회전시켜 그것을 일정 시간마다 배가스와 2차유체인 공기와 상호 접촉시켜 전열체에 흡수된 열을 공기에 방출한다. 여러개의 얇은 파형강판과 평판이 교대로 겹쳐진 전열체가 회전축을 중심으로 방사상으로 붙어 원통상 용기내에 넣어져 있다. 이 형식은 열교환 효율이 좋지만 1차측과 2차측 기밀성이떨어진다. 보일러의 공기예열기로 예전부터 이용되고 있는 동시에, 공업로에서 최근 주목을 받고 있는 배가스의 열로 고온으로 만들므로써 고온이며, 저과잉공기연소가 가능해져 질소산화물을 대폭 줄이고 배가스 열손실도 줄일 수 있다.

잠열회수

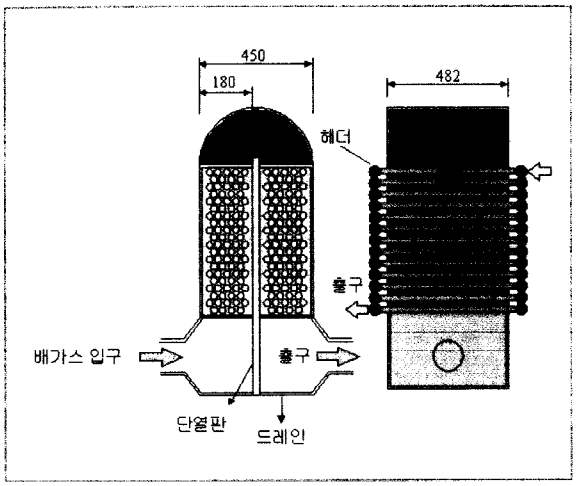
탄산가스 배출제어 문제에 관련하여 보일러 효율 향상은 중요한 과제가 되고 있다. 보일러에서의 가장 큰 손실은 배가스에 의해 대기중에 방출되는 배가스 열손실이다. 수증기를 포함한 배가스를 노점이하까지 냉각하여, 현열과 함께 잠열도 회수하면 보일러 효율의 대폭적인 개선을 이룰 수 있다.

그림5는 중유를 사용한 보일러의 배가스온도와 보일러 효율(저위발열량기준)의 관계를 나타낸 것이다. 계산은 산소비 1.05의 산소연소와 산소비 1.2의 공기연소인 경우에 관하여 했다.

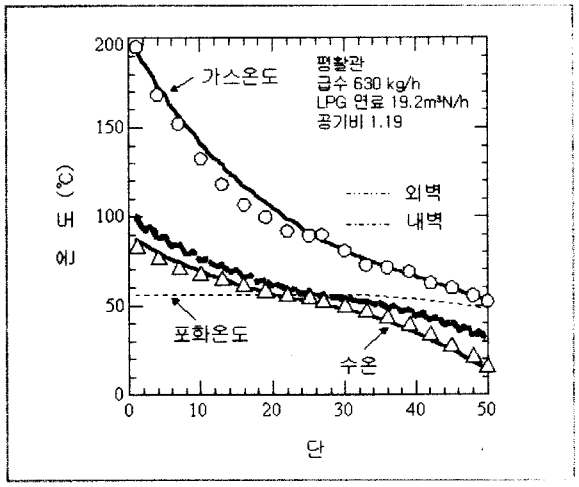
배가스의 노점에 있어서 보일러 효율의 급격한 상승을 볼 수 있다. 이것은, 이 이하의 온도에 있어서 잠열의 회수가 이루어지기 때문이다. 지금까지 Osakabe 등은 천연가스(13A) 실배가스를 이용하여 건조 단계부터 응축 단계까지의 광범이한 열전달 실험을 1 또는 2단의 각종의 전열관을 사용하여 왔었다. 이 결과, 건구역에서 응축역의 응축 단계의 경계는 거의 배가스 증기의 분압에 상당하는 포화온도로 간주하는 것이 가능했다. 또, 실배가스의 물성치를 추정한 열 및 물질 이동에 관계하는 수정 아나로지이 관계식 등에 의해 배가스 중 증기질량농도 30% 이내, 전열면온도 30℃ 이상의 실용범위에 있어서 열전달계



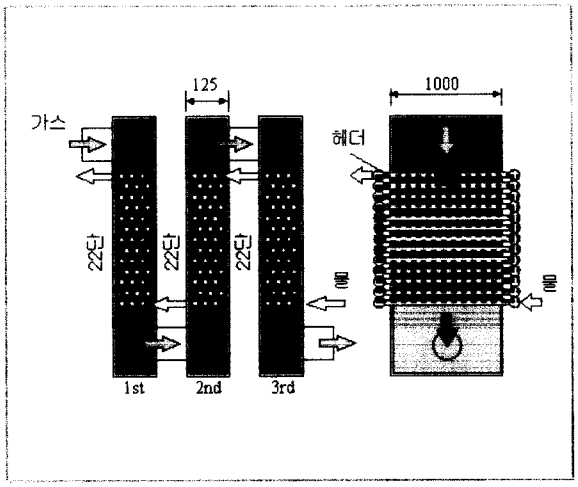
[그림 7] 실배가스의 휜효율



[그림 8] 공기연소 배가스의 잠열회수 실험장치 개념도



[그림 9] 잠열회수(공기연소) 열교환기내 온도분포



[그림 10] 산소연소배가스의 잠열회수 실험장치 개념도

수의 예측이 가능하다는 것이 밝혀지고 있다. 실제 열교환기를 설계하는데 있어서는 전열관에 휜관을 채용하는 것은 특히 현열회수 영역에 있어서는 그 콤팩트화에 대단히 공헌한다고 생각할 수 있다. 그렇지만 응축 등의 상변화 현상이 있는 경우에는 높은 열전달계수에 따라 휜효율의 저하로 휜을 설치하는 의미는 희박해진다. 예를 들어 증기터빈 시스템의 복수기에는 휜관을 이용하지 않는다. 이상적으로는 열전달계수의 증가에 대응하여 휜높이를 감소시킬 필요가 있다.

그림6은 실배가스를 이용한 수평 나선상 휜관의 전열유동실험장치의 개념도이다.

원형 덕트중에 현열회수에 일반적으로 사용하는 휜관 한 개를 설치한 실험장치이다. 배가스는 휜관에 대해 크로스플로이다.

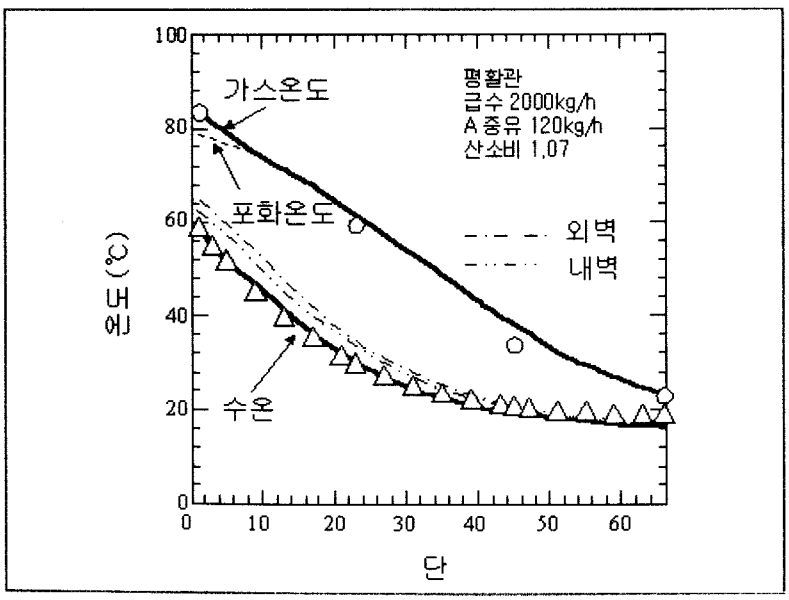
그림7은 이 실험장치에 의해 얻어진 휜효율과 경험식 및 열전도 수치계산으로 구한 휜효율 비교이다. 열전달 수치계산은 24분할 매쉬의 콘트롤 볼륨법을 이용했다. 휜기저부 평균온도(TW)ave.가 노점이 되면 휜효율이 급격히 강하하는 것을 알 수 있다. 이것은 응축열전달의 개시와 함께 휜내에 대량의 열이 흘러 기저부에 비해 휜부 온도가 높게 되어 휜효율이 저하하기 때문이다. 또, 응축 영역에서의 실험결과는 열전도 수치계산결과에 가까운 것을 알 수 있다. 이처럼 응축 영역에서는 휜효율이 급격히 감소하기 때문에 잠열회수를 위해서는 휜 높이를 낮게 하든지, 평활관을 이용하는 것이 바람직하다.

그림8은 프로판가스(공기연소) 배가스의 잠열회수 실험장치 개념도이다. 프로판 가스 보일러의 배가스를 장치하부 우측으로 도입하여 열교환기 관군을 통과하게 하고 하부 우측으로 배출한다. 열교환기 형식은 대향류형 크로스플로 관군 배열이다.

배가스 흐름의 입구 절반은 상승류가 되고, 출구 절반은 하강류가 된다. 전열관은 SUS304형의 평활관으로 외경 27.2mm, 내경 23.2mm이다. 배가스의 상승측 및 하강측은 각각 25단이다. 각 단의 전열관 입구 및 출구는 헤더관으로 연결되어 있고 각 단 복수 전열관의 물측 조건은 동일하다.

그림9는 실험 결과와 예측계산 결과의 비교도이다. 예측 계산에 있어서, 배가스는 CO2, O2, N2, 및 H2O의 혼합물로 간주하였다. 이 그림에 있어서 가스 및 물온도, 1점 쇄선은 전열관 내벽 온도, 2점 쇄선은 전열관 외벽 온도이다. 파선은 배가스 중의 수증기 분압에 대한 포화(노점)곡선을 나타낸다. 포화온도는 응축에 따라 배가스 중의 수증기농도가 저하하므로, 점점 감소하는 경향을 나타낸다. 또한, 전열관 외측 온도가 포화온도이하의 영역이 응축을 일으키고 있다. 벽면 온도가 들쑥날쑥하게 되는 것은 단마다 가스측 및 물측 최소 유로면적이 다르고, 가스 및 물 유속이 변화하는 것을 계산에 고려했었기 때문이다. 실험 데이터는 ○가 가스온도, △가 물온도이다. 실험결과와 예측결과는 잘 일치한다.

그림10은 A중유를 산소만 연소하게 하는 보일러의 배가스 열회수 실험 장치의 개념도이다. 실험장치는 내경 21.4mm, 외경 25.4mm의 SUS 316제 평활관



[그림 11] 잠열회수(산소연소) 열교환기내부 온도분포

을 3열 22단 포함하고 있는 대향류 열교환기 3대로 구성되어 있다. A중유 산소 연소보일러의 배가스가, 하강류로서 제 1열교환기에서 열교환한다. 제 2열교환기에서는 상승류가 되고 제 3열교환기에서 다시 한번 하강류가 되어 배출된다.

그림11의 실험결과와 예측계산결과의 비교처럼, 전열관 6단 부근에서 가스온도와 노점이 일치하여 감소하는 백연상태가 나타나고 있다. 이 경우, 가스 중의 수증기가 잠열을 방출하면서 미소한 물방울(백연)이 된다. 산소연소의 경우에도 실험 결과와 예측결과는 잘 일치한다.

앞으로의 전망

배가스의 현열회수에 관해서는 기술적으로 성숙되어 있다고 생각할 수 있다. 단, 열교환기 콤팩트화와 더불어 휜등을 이용함으로써 열교환기내 오염에 따른 전열열화가 생길 가능성이 높아져 적절한 세정방법등의 개발이 필요시되고 있다. 또, 잠열회수에 관해서는 전열계산법이 어느 정도 확립되어 왔다. 발생하는 응축수 pH도 천연가스를 공기연소시킨 경우에는 약 4배 정도되어 예전의 내부식성을 이용하면 충분히 가능하다. 우선, 천연가스 보일러 잠열회수 에코노마이저가 보급되기를 기대해 본다.