

이산화탄소 냉매용 가스쿨러

장영수 - 한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터, 선임연구원

e-mail : yschang@kist.re.kr

이 글에서는 차세대 대체냉매로 주목받고 있는 이산화탄소의 특성과 이에 따른 가스쿨러의 설계방법에 대하여 설명하고, 가스쿨러의 개발 동향에 대해 소개하고자 한다.

이산화탄소는 자연냉매로서 가연성과 독성이 없어 대체냉매로 주목받고 있으나, 임계압력이 높고, 임계온도가 매우 낮아 이를 시스템에 적용할 경우, 작동 압력이 기존 시스템에 비하여 월등하게 높으므로 내압성이 우수하여야 한다. 또한 열전달 과정에서 물성치가 크게 변하여 기존냉매의 열전달과는 많은 차이를 보인다. 따라서 이산화탄소를 이용한 냉난방 시스템의 개발을 위해서는 시스템을 구성하는 각 요소 부품들도 이러한 이산화탄소의 특성을 고려하여 설계 및 제작되어야 한다. 그 중에서도 열교환기는 시스템의 크기

및 성능과 효율을 결정짓는 핵심 요소이므로, 이산화탄소의 특성을 고려한 열교환기의 설계 및 제작 기술 개발이 필수적이다.

이산화탄소 이용 냉동 사이클의 특성

이산화탄소를 냉매로 한 냉동 사이클도 기본적으로는 일반 냉매를 사용하는 냉동시스템과 유사하다. 그러나 일반 냉동 사이클에서는 냉매의 열방출 과정(응축 과정)이 임계점 이하의 2상류 영역에서 이루어지지만, 이산화탄소를 사용하는 냉동 사이클은 이산화탄소의 임계온도가 31.1℃로

낮기 때문에 대개의 경우 열방출 과정이 초임계 영역에서 이루어진다. 따라서 이산화탄소의 열방출 과정(일반 냉동사이클에서의 응축 과정)은 일정한 압력에서 상의 변화를 수반하지 않고 있으므로 응축이라 하지 않고 가스쿨링(gas cooling)이라 한다. 그림 1의 일반적인 증기 압축식 냉동사이클과 달리 이산화탄소를 사용한 초임계 냉동사이클에서는 고온열원에서 방열과정이 임계점 이상에서 일어나고, 저온열원에서의 증발과정은 임계점 이하에서 일어나므로, 기존의 역랭킨사이클로 운전되는 증기압축기 냉방시스템과는 구분되는 특징을 가지게 된다.

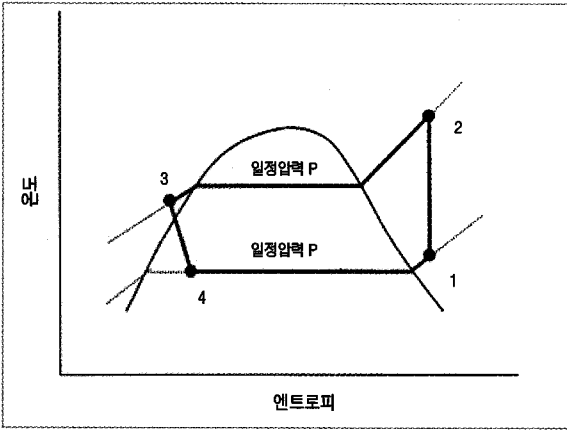


그림 1 일반적인 증기 압축식 냉동사이클

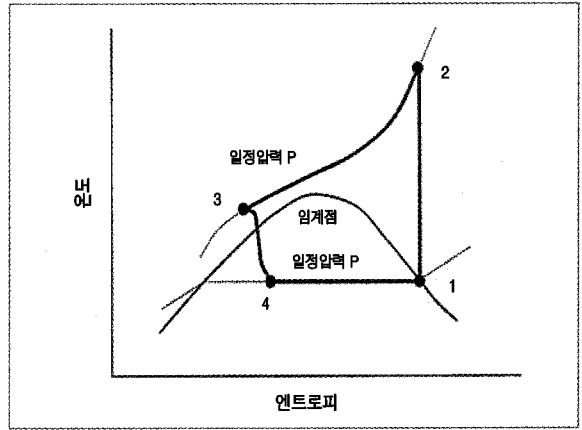


그림 2 이산화탄소 이용 초임계 냉동사이클



가스쿨링은 기존시스템의 응축기와는 달리 상변화 과정이 없고, 임계압 이상의 고압 단상 상태에서 지속적으로 온도가 감소하면서 열 방출이 일어나는 과정

고압 단상 상태의 냉매가 가스쿨러를 지나는 동안 지속적으로 온도가 감소되면서 열 방출이 일어나게 된다.

운전 압력

우선 기존의 냉방시스템과 가장 큰 차이는 운전 압력이다. 기존의 냉방시스템에서 응축기의 운전압력이 10~30bar 정도인데 반하여, 이산화탄소를 이용한 냉방시스템용 가스쿨러의 압력은 80~150bar 정도로 매우 높다. 따라서 이산화탄소를 이용한 냉방시스템용 가스쿨러의 설계 및 제작에서 가장 중요한 점은 가스쿨러를 고압에 견딜 수 있는 구조로 하여야 한다는 것이다.

한편 작동 압력이 매우 높아서 냉매의 밀도가 증가하므로, 동일한 냉방능력을 위한 냉매의 체적 유량이 기존 프레온 냉매에 비하여 1/3 이하의 값을 가진다. 그리고 열교환기 내 압력손실이 시스

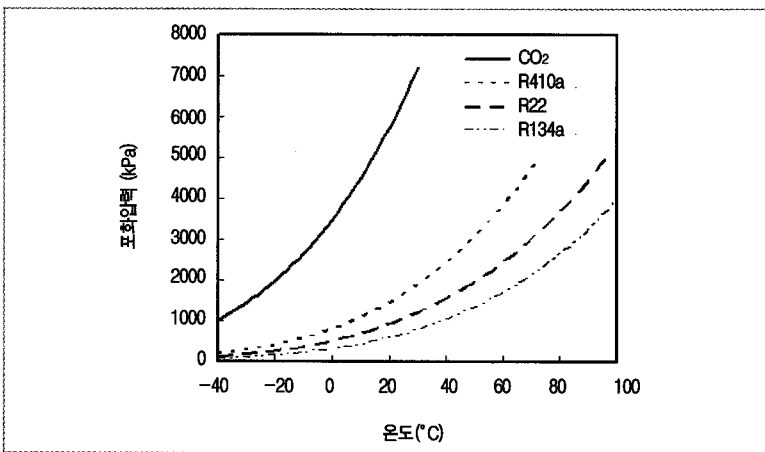


그림 3 냉매의 포화압력

이산화탄소 가스쿨러의 특성

가스쿨링 과정은 냉매의 포화 곡선 바깥쪽 영역으로 액상과 기

상이 뚜렷이 구분되지 않으며, 온도와 압력은 임계값보다 높은 영역인 초임계 영역에서 이루어진다. 따라서 기존시스템의 응축기와는 달리 상변화 과정이 없고,

템 성능저하에 미치는 영향이 기존 시스템에 비하여 작아지므로, 기존 시스템에서 적용하는 전열관보다 작은 지름의 관을 적용할 수 있으며, 이는 구조적 강도 및 열전달 성능 향상에 모두 이점으로 작용한다.

온도 변화

가스쿨러에서 이산화탄소의 냉각과정은 기존 시스템의 응축기와는 달리 가스쿨러를 지나는 동안 온도가 지속적으로 감소한다. 기존 시스템에서는 방열과정 동안 냉매가 거의 일정한 온도를 유지하므로, 냉매관의 배열에 의한 열교환기 성능변화가 미미하여, 주로 직교류 형태로 전열관이 배치된다. 그러나 이산화탄소의 경우 그림 4에서와 같이 고온의 이산화탄소가 가스쿨러에 유입되면서 온도가 급격히 감소하게 되며, 총 전열량의 80% 이상이 첫 열에서 일어나게 된다. 따라서 직교류형이나 향류 형태의 열교환기 배열은 적당하지 않으며, 냉매의 흐름과 냉각공기의 흐름을 대향류로 배치할 경우, 열교환기의 성능을 향상시킬 수 있다.

이산화탄소의 가스 냉각과 같이 핀-튜브 열교환기에서 냉매의 온도구배가 큰 경우, 관벽과 핀을 통한 열전도로 인하여 열교환기의 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다. 특히 고온의 냉매가 유입되는 열과 후열 사이의 온도차가 커져 열전달을 방해하는 것으

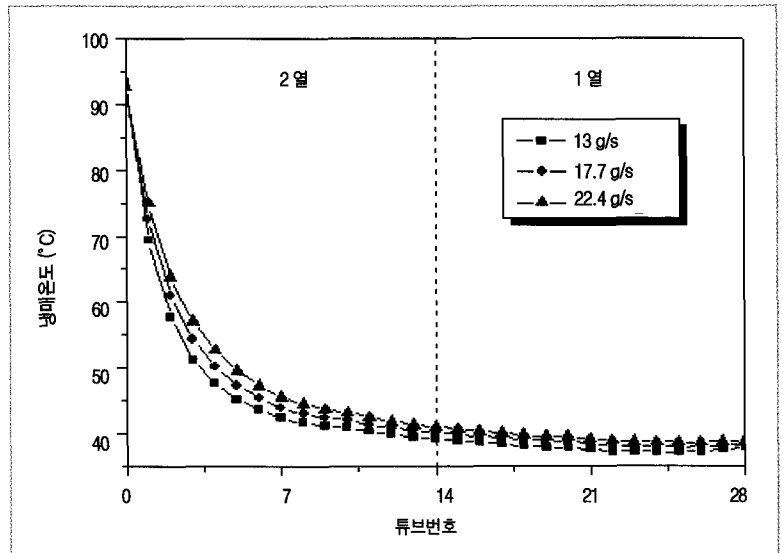


그림 4 2열 가스쿨러에서 이산화탄소의 온도 변화

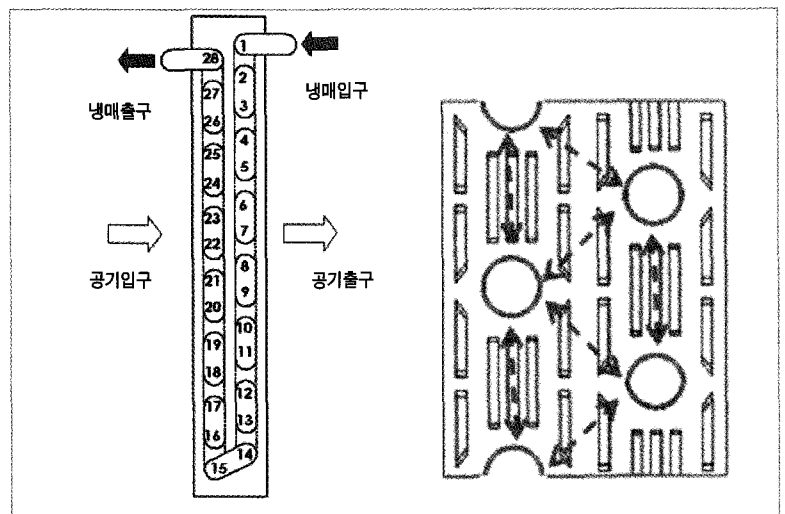


그림 5 핀을 통한 열전도

로 알려져 있다. 이를 방지하기 위해 가스쿨러의 열 사이의 핀을 분리하여, 핀을 통한 열전도에 의한 효과를 최소화하는 설계가 권장된다.

물성치 변화

이산화탄소를 이용한 냉방시스

템용 가스쿨러에서 냉매의 상변화는 일어나지 않지만, 그림 6에 나타난 바와 같이, 열전달이 진행되어 온도가 변화하면 전달현상과 관련한 물성치들이 크게 변화한다. 이러한 특성은 이산화탄소를 이용한 냉방시스템용 가스쿨러에서 상변화가 일어나지 않음

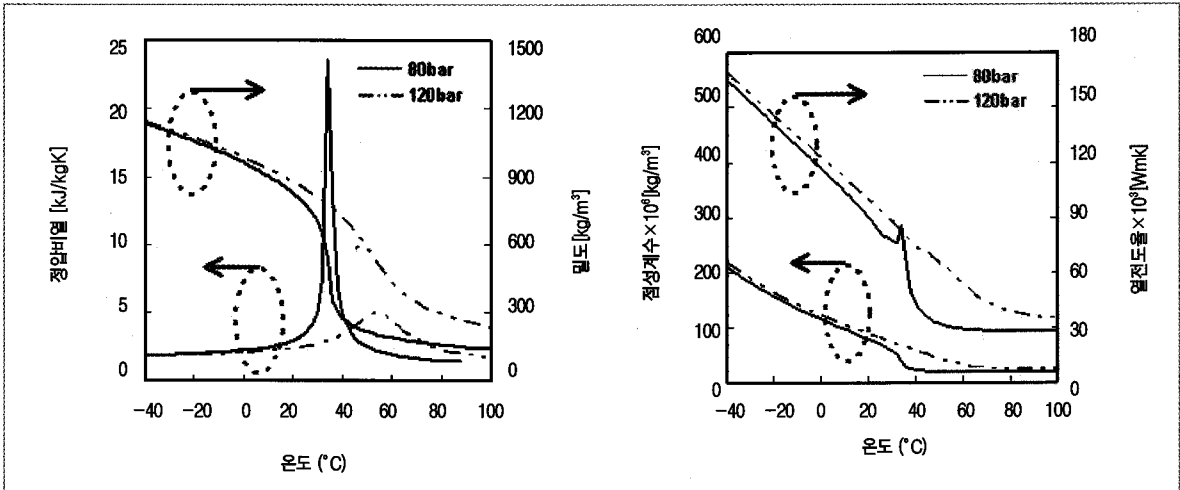


그림 6 이산화탄소의 전달물성 변화

에도 불구하고, 기존의 단상유체에 대하여 확립된 열전달계수나 압력손실계수 등을 적용하여 가스쿨러를 설계하거나 성능을 예측하기 어렵게 한다. 물성치가 온도에 따라 크게 변화하는 경우, 열전달량과 이산화탄소의 비열의 크기에 따라 관 내부 냉매의 온도분포가 발생하고, 이에 따라 물성치가 달라지므로, 열전달 및 압력손실은 열전달량의 크기에 영향을 받게 된다.

특히 비열과 열전도도는 임계점에 접근할수록 갑자기 증가하는 경향, 즉 임계점 향상(critical enhancement)현상이 나타남을 알 수 있다. 그리고 점성계수의 임계점 향상은 임계점 부근의 좁은 범위 내에서 한정적으로 발생하는데, 임계점에 도달하면 큰 변화를 나타낸다. 이산화탄소는 가스쿨러의 출구부에서 임계점에 접근하게 되므로, 출구부에서 비열의 급격한 증가로, 가스냉각에



가스쿨러는 고압에 견딜 수 있고, 냉매의 온도변화가 크므로 대항류 형태가 바람직하며, 임계점 부근에서 냉매의 급격한 물성 변화를 고려하여 설계하여야 한다

의한 냉매의 온도변화가 작음에도 불구하고 많은 열전달이 일어날 수 있으며, 시스템 성능에도 큰 영향을 미치게 된다. 한편으로는 가스쿨러 출구부는 이산화탄소와 공기와의 온도차가 가장 작은 부분으로 공기열원 냉방시스템의 경우 시스템의 성능 향상을 위해서 약 2°C 미만의 최소온도차를 유지할 수 있도록 가스쿨러를 설계하게 된다.

가스쿨러의 개발 동향

현재 이산화탄소는 냉매의 물성 특성상 주로 차량용 냉방시스템과 온수 제조용 열펌프 시스템

에 적용되고 있다. 국내에서도 산업자원부의 차세대신기술개발사업의 일환으로 이산화탄소를 이용한 냉난방시스템 개발 과제가 2001년부터 진행되고 있으며, 냉방/난방/온수 급탕이 가능한 이산화탄소 히트펌프시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 이산화탄소 냉동시스템의 용도와 구성에 따라 각각 다른 종류의 가스쿨러가 채용되어 사용되거나 개발되고 있다.

차량용 냉방시스템 가스쿨러

1990년대 초에 개발되기 시작한 이산화탄소용 가스쿨러는 먼저 차량용 에어컨에 적용되기 시

작하였다. 1990년도에는 외경/내경이 4.9/3.4mm인 알루미늄관에 폭이 34mm인 평판 알루미늄핀이 부착된 열교환기로 가스쿨러에 대한 연구를 본격적으로 수행하기 시작하였고, 이후 1994년도까지 원형관 가스쿨러에 대한 연구는 관경을 줄이고 핀의 형상을 일반 평판핀에서 루버핀의 형태로 다양하게 연구 개발되었다.

이산화탄소는 높은 기체 밀도와 우수한 열전달 특성을 가지고 있고, 단위체적당 용량이 크므로 열교환기의 소형 경량화가 가능하다. 이에 냉매관의 수력직경을 기존의 관보다 크게 줄인 마이크로채널형태의 가스쿨러가 사용된다. 마이크로채널 열교환기를 사용하면 수력반경이 작아 높은 작동압력으로 인한 재료 두께의 증가를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 1997년도에는 내경 0.79mm의 마이크로채널관 형태의 가스쿨러가 개발되어 연구되었다. 마이크로채널관 형태의 가스쿨러에 대하여 다중 슬랩(multi-slab) 형태로 구성된 것이 단일 슬랩(single-slab)보다 시스템의 성능이 5% 정도 향상된다는 연구도 제시되었다. 실제 자동차에 적용되었던 마이크로채널관 가스쿨러는 그림 7과 같은 형태를 가진다.

냉난방시스템용 가스쿨러

관이 작아질수록 내압성과 열전달 성능이 좋아지므로 이산화탄소 시스템에는 작은 직경의 열

교환기가 많이 사용될 전망이다. 그러나 차량용 냉방기에 사용되는 알루미늄 재질의 마이크로채널관형태의 가스쿨러를 냉난방시스템용 히트펌프에 적용하는 경우 몇 가지 문제점이 발생하게 된다. 히트펌프의 가스쿨러는 난방과 급탕 운전 시에는 증발기로 사용된다. 이 경우 열교환기 표면에 응축 또는 착상이 발생하며, 응축수 배수나 착/제상에 따라

열교환기 성능이 크게 저하하는 문제점이 있다. 이산화탄소이용 냉난방 시스템은 고압축의 작동압력이 15MPa(약 150bar)까지 상승하는 고압 시스템이다. 일반적으로 내압 한계는 시스템 안전상 최고 사용 압력의 3배까지 견딜 수 있도록 해야 하므로 약 45MPa(약 450bar)까지 견딜 수 있도록 시스템을 구성해야 한다. 그러나 현재 알루미늄 마이크

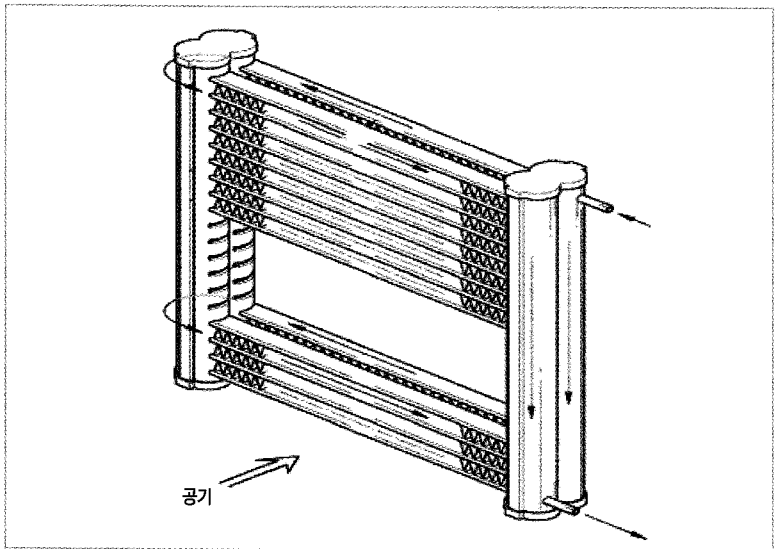


그림 7 차량용 냉방시스템 가스쿨러

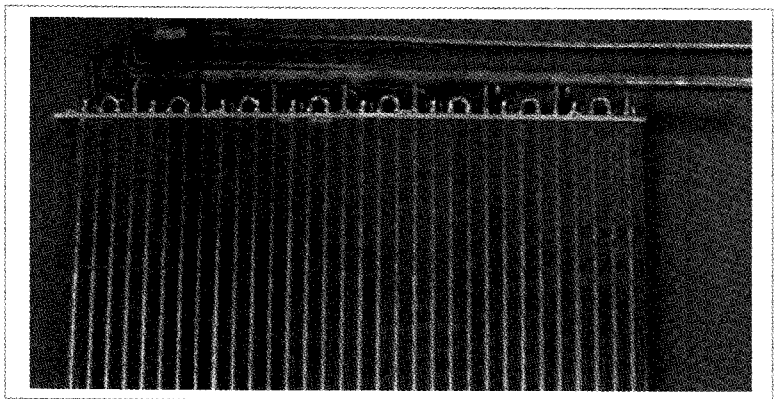


그림 8 냉·난방시스템용 가스쿨러

로채널관 열교환기로는 요구 내압성능을 만족시키기 어려운 실정이다. 따라서 열전달 성능, 제작성, 가격 등 종합적인 요인을 고려하여 기존의 공랭식 열교환기에 많이 사용되는 핀-튜브 열교환기를 관두께를 증가시키고, 용접기술을 개선하여 요구 내압성능을 만족하는 가스쿨러를 개발하고 있다.

온수 급탕기 가스쿨러

최근 일본에서 이산화탄소 이용 온수 급탕기가 개발되어 미쓰비시를 비롯한 5~6개 기업에서 판매하고 있다. 온수 급탕기용 가스쿨러는 앞서 설명한 냉매 대공기의 냉난방시스템용 가스쿨러와 달리 냉매 대 물용 열교환기이다.

그림 8은 일본 다이킨 사의 4.5kW급 이산화탄소 온수제조용 히트펌프에 사용된 가스쿨러를 보여주고 있다. 냉매는 코일형으로 감긴 외경 4mm, 관 두께 0.9mm의 2개의 세관으로 흐르며 냉각된다. 물은 세관이 감고 있는 중앙부의 관내를 흐르며 가열된다. 이 열교환기는 2층으로 구성되어 있으며 그림에 나타난 것은 상층부 열교환기이다.

산요전기공조는 가스쿨러를 다채널 마이크로 튜브를 사용하여 구성하였다. 냉매는 4개의 마이크로 채널 내를 흐르고, 물은 구리로 만든 원관으로 흐르게 되는데, 원관과 마이크로 채널관을 직경이 15cm 정도 되는 원통에 나선형으로 감아서 열교환을 하게 된다. 이 방식은 다이킨 사의 가

스쿨러와 마찬가지로 냉매관과 물측관이 단순히 접촉되어 있는 형태로, 접촉 저항이 상당히 클 것으로 예측된다. 덴소의 경우 내경 0.5mm의 동관 150개가 U

자 형으로 구성되어 있으며 관의 길이는 약 1m 정도이다. 이산화탄소는 미세관 내를 흐르며 냉각되며 물은 미세관과 직각으로 형성된 유로를 흐른다. 물측의 열전달을 향상시키기 위하여 유로 내에 핀이 부착되어 있으며 열교환기 전체가 브레이징으로 일체화되어 있다.

맺음말

지금까지 이산화탄소의 특성과 이를 반영한 기본적인 가스쿨러의 설계방법에 대하여 설명하였고, 현재 사용 중이거나 개발 중인 가스쿨러에 대한 개발동향을 살펴보았다. 이산화탄소는 자연물질로 환경에 미치는 영향이 미미하므로, 냉매 누설이 많이 발생하는 차량용 냉방시스템에 우선적으로 적용되어 왔다. 또한 열방출 온도가 고온인 특성을 이용하여 급탕기로도 개발되어 사용되고 있다. 현재 국내에서 냉난방시스템용 히트펌프의 개발 연구가 진행되고 있으므로, 이산화탄소를 이용한 냉난방시스템의 보급과 응용 분야가 확대될 것으로 생각한다. 이를 위해 기존의 증기 압축식 냉동시스템과 차별되는 가스쿨러의 고효율, 고신뢰성 기술의 개발이 필수적이라고 여겨진다.

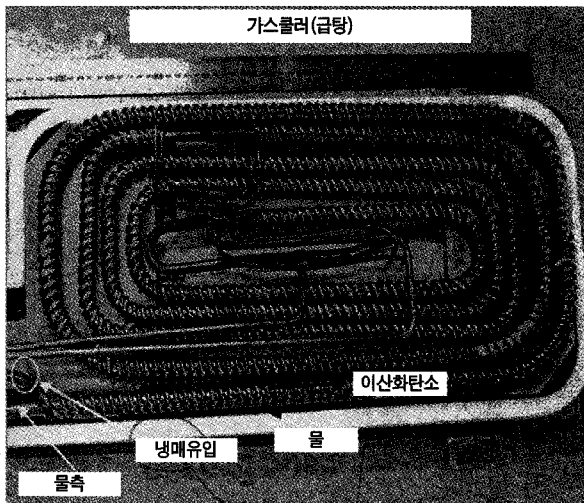


그림 9 온수급탕기 가스쿨러(다이킨 사)