

이젝터 냉동 시스템

기존 증기압축식 냉동시스템에 이젝터를 장착하여 시스템 효율을 향상시키는 여러 가지 방안과 상용화된 Denso 이젝터 시스템에 대해 소개하고자 한다.

이원희

LG전자 DA연구소 (beachtime@lge.com)

전 세계적으로 에너지 수요가 증가하고 있으며, 화석에너지 사용으로 인한 환경오염 문제가 심각해지면서, 환경 친화적인 고효율 제품의 상품적 가치는 점점 높아지고 있다. 기존의 증기압축식 사이클을 사용하고 있는 냉동, 공조제품 역시 마찬가지인데, 본 자료에서는 증기 압축식 사이클의 변형을 통한 시스템 효율 향상에 대한 연구중 하나로서, 이젝터 냉동 시스템을 소개하고자 한다. 우선, 시스템 내의 유동에너지를 이용할 수 있는 이젝터에 대한 소개를 하겠으며, 이러한 이젝터를 냉동시스템에 장착하여 시스템 성능향상을 하는 여러 가지 방법과 적용 제품(denso ejector system)에 관한 소개를 하겠다.

이젝터

증기 이젝터는 1901년 프랑스의 Le Blanc에 의하여 처음으로 발명되어 주로 증기터빈 복수기의 추기용으로 사용되어 왔다. 2차대전 후에는 화학공업의 발달과 장치의 대형화, 고진공화, 원가절약, 제품의 양질화 등의 요구에 의해 증기 이젝터의 사용범위가 확대되어 왔고, 이 때부터 이젝터를 이용한 열원구동 냉동기가 고려되어 왔다. Gay(1931)에 의해 이젝터 팽창 냉동사이클이 개발되었으며⁽¹⁾, Kemper 등(1966)⁽²⁾ 과 Newton(1972a, 1972b)⁽³⁾에 의해 수정된 이젝터 팽창 냉동사이클이 개발된 이후로 활발히 연구가 진행되고 있다. Guo 등(1992)은 이젝터를 이용

한 이중 증발 냉동사이클을 개발하여 성능 시뮬레이션을 수행한 결과 10% 가량 성능계수가 향상되었음을 보였고, Lee(1998)는 이중 증발 냉동사이클을 이용한 습증기 사이클과 과열증기 사이클에 대한 성능 실험에서 5% 정도의 압축일 감소를 얻었으며, 이에 따라 3~6% 정도의 성능계수가 증가하는 것을 확인하였다.⁽⁴⁾

작동원리

이젝터는 고압의 유체를 구동노즐로 분출시켜, 그 주위의 저압의 기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 기체를 보다 높은 압력으로 변환시켜 흐르게 하는 수송장치이다. 이젝터의 종류는 작동유체에 따라 공기 이젝터(air ejector), 액체 이젝터(liquid ejector), 증기 이젝터(steam ejector)로 나뉘는데, 그림 1에 일반적인 구조를 나타내었다. 이젝터는 크게 노즐(nozzle), 흡입실(suction area), 혼합부(mixing area), 디퓨저(diffuser) 등으로 구성되어 있다.

그림 2에 이젝터 내부에서의 압력변화를 나타내었다. 공기 또는 액체이젝터의 경우는 주로 압력에너지가, 증기 이젝터의 경우는 압력에너지와 열에너지의 합, 즉 유체가 보유하고 있는 엔탈피가 노즐출구에서 거의 대부분 속도에너지로 변환되어 분출할 때 흡입실에 원하는 진공압력이 형성되어 액체 또는 기체를 흡입하게 된다. 이렇게 흡입된 저압의 기체

는 구동노즐을 통과한 유체와 목부에서 적절히 혼합하면서 운동량 교환을 하게 되고, 디퓨저를 지나면서 압력을 회복되게 된다.

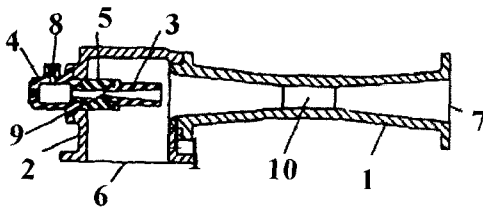
이젝터는 회전부나 운동부분이 전혀 없어 구조가 매우 간단한 장치로서 유지보수 및 고장의 염려가 없고, 액체나 기체는 물론 고체가 혼합되어도 작동상 아무런 무리가 없다는 이점이 있다. 그리고, 소형임에도 불구하고 대용량의 유체를 압축할 수 있는 장점이 있다. 이외에도 가동부분이 없어 기계적인 진동이 적을 뿐만 아니라, 동력원과 분리되어 있으므로 위치 및 구조에 있어서 제약이 적다. 이런 이유로 인해 이젝터는 최근에 건조 및 탈취장치, 진공펌프, 배기펌프, 각종 공조시설, 연소장치 등 산업 전 부분에 걸쳐 활용되고 있다.

이젝터를 장착한 냉동시스템

냉동시스템에 이젝터를 장착시킨 여러 가지의 예에 대하여 각각의 특징을 소개하고, 그 적용사례를 검토해 보고자 한다. 이젝터가 장착된 대표적인 냉동시스템으로는 이젝터 팽창시스템, 이중증발 냉동시스템, 열원구동 냉동시스템, 부스터 이젝터 냉동시스템 등이 있는데, 다음에 간략한 시스템 개략도 및 특징을 설명하였다.

이젝터 팽창시스템

1931년 Gay에 의해 이젝터 팽창 냉동사이클이 처



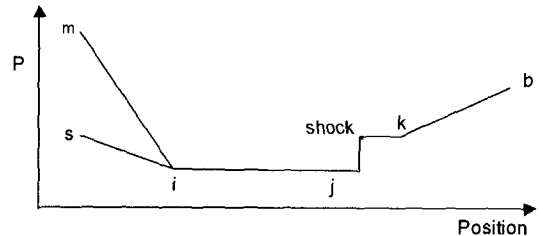
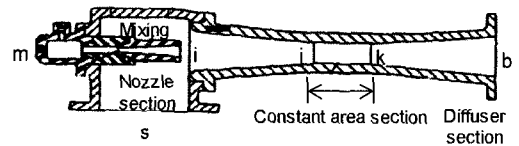
- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. Diffuser | 6. Suction |
| 2. Suction chamber | 7. Discharge |
| 3. Nozzle | 8. Inlet |
| 4. Steam chest | 9. Nozzle throat |
| 5. Extension | 10. Diffuser throat |

[그림 1] 이젝터의 구조

음 고안되었으며, Kemper 등(1966) 과 Newton (1972a, 1972b)에 의해 수정된 이젝터 팽창 냉동사이클이 개발된 이후로 활발히 연구가 진행되고 있는 사이클이다. 뒤에 소개할 일본 Denso 사의 'Ejector Cycle 냉동기'는, 바로 팽창장치로서 이젝터를 이용한 경우이다. 그림 3의 개략도에 나타난 바와 같이, 이젝터 팽창시스템은 이젝터를 팽창장치로 사용하여 팽창손실을 저감시키고, 압축기 입구에서의 압력을 보상하여 압축부하를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 때, 응축기에서 나오는 액상의 냉매와 증발기로부터 들어오는 기상의 냉매가 각각 이젝터의 구동유체와 흡입유체가 되기 때문에 혼합과정이 2상상태에서 이루어지는 2상류 이젝터를 사용하며, 기존의 냉동시스템에서 간단히 변형하여 구동할 수 있다는 장점이 있다.

이젝터를 이용한 이중증발 냉동시스템

그림 4에 이젝터를 이용한 이중증발 냉동기의 개략도를 나타내었다. Guo 등(1992)이 처음으로 소개한 이젝터 사이클(ejector cycle)은 각각 다른 온도 및 압력을 유지하는 두 개의 증발기를 갖고, 첫 번째 증발기의 출구와 두 번째 증발기의 출구가 이젝터로 연결되는 사이클이다. 이 사이클에서 이젝터는 1차 증발기로부터 나온 작동유체를 이용하여 2차 증발기로부터 압축기로 들어가는 냉매의 압력을 증가시켜 압축일을 감소시키는 역할을 하는데, Guo는 이젝터를 이용한 이중증발 냉동시스템에 대한 성능 시



[그림 2] 이젝터 내의 압력변화

물레이션으로부터 약 10% 가량 COP(coefficient of performance)가 향상되었음을 보였다.

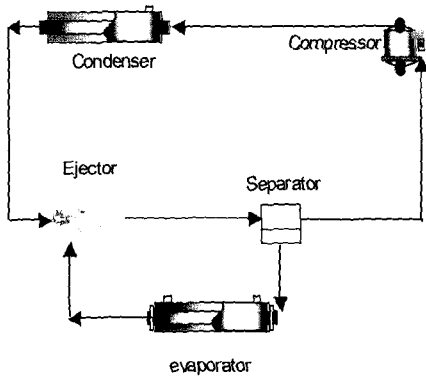
열원구동 냉동시스템

이젝터를 이용한 열원구동 냉동기는 1901년 Le Blanc에 의해 제안된 것으로 그림 5에 이젝터를 이용한 열원구동냉동기의 개략도를 나타내었다. 그림에서와 같이 발생기(generator, boiler, Solar collector 등의 장치)와 펌프, 이젝터가 기존 증기압축식 냉동기의 압축기에 해당하는 역할을 하는 것으로, 발생기로 부터의 열 에너지가 이젝터를 통하면서 유동에너지인 압력 및 속력으로 전환되면서 시스템이 구동된다. 증기압축식 냉동기에 비해 성능계수는 떨어지지만 열원으로 태양열이나 지열, 폐열 등

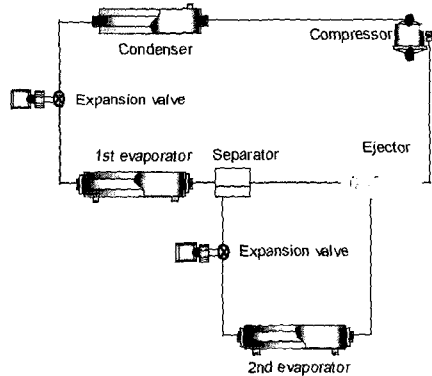
을 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있고, 화석연료를 이용하는 전기에너지의 소모가 매우 작기 때문에 환경 친화적이다.

부스터 이젝터 냉동시스템

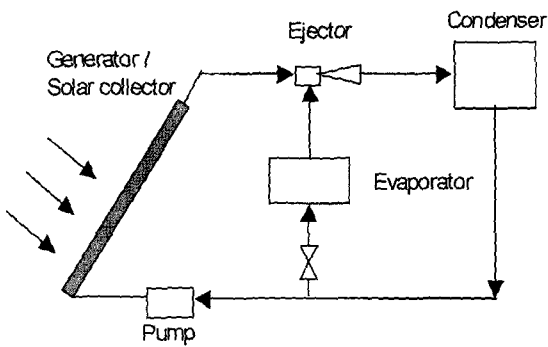
그림 6에 부스터 이젝터 냉동기의 개략도를 나타내었다. 부스터 이젝터 사이클은 우크라이나 Odessa Technology Institute에서 대륙 횡단 냉동차용으로 제작한 것으로 압축기에서 나오는 유량의 일부를 구동 유체로 하고 증발기에서 나오는 유량의 일부를 흡입해서 압력을 보상하여 압축기로 유입시키는 사이클로서, 압축기로 들어가는 유량의 압력을 상승시키는 효과를 발생하게 되어 압축기 부하를 절감할 수 있는 사이클이다. 특히 주위의 온도변화가



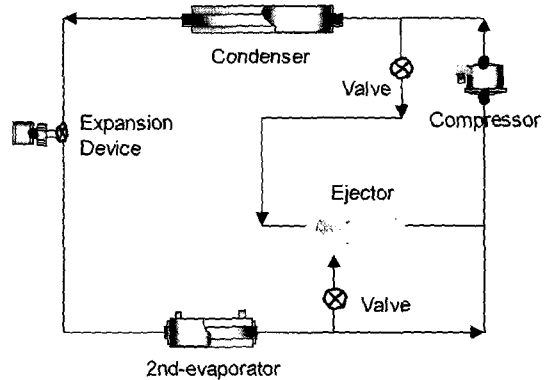
[그림 3] 이젝터 팽창시스템



[그림 4] 이젝터 이중증발 냉동시스템



[그림 5] 열원구동 냉동시스템



[그림 6] 부스터 이젝터 냉동시스템

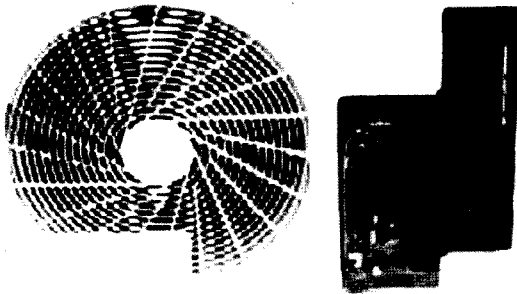
큰 조건에서 이젝터에 들어가는 유량을 조절하여 부하변동에 대응할 수 있다는 장점이 있다.

Denso 이젝터 시스템

앞서 언급한 바와 같이 이젝터는 냉동 사이클 내에서 여러가지 기능을 수행할 수 있다. 여기서는 이젝터를 팽창장치로 사용한 일본 Denso 사의 'Ejector Cycle 냉동기'에 대하여 소개하고자 한다.

개요

Denso는 90년대초부터 에너지 효율 개선을 위해 자동차용 에어컨에 ejector cycle을 적용하고자 하는 연구를 시작하였다. 그림 3에서와 같이 이젝터를

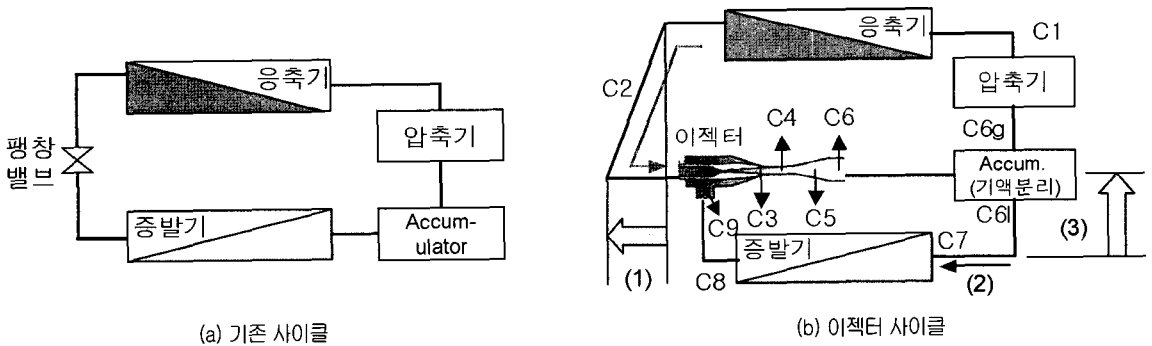


[그림 7] Denso 히트펌프 급탕기

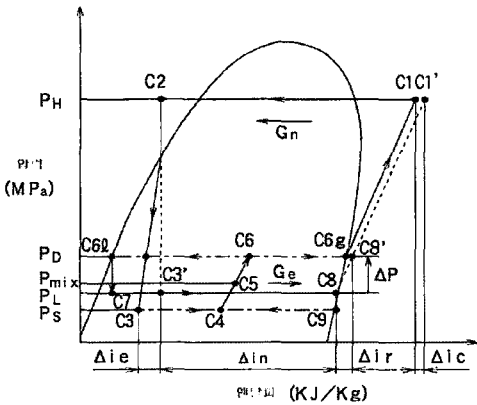
팽창장치로 사용함으로써, 종래 시스템의 팽창장치에서 발생하였던 에너지 손실을 ejector에 의해 압축기 구동력으로 재이용함으로써, 압축기 부하를 약 20% 감소시키는 것이다. 2003년 세계최초로 자동차용 냉동장치에 ejector cycle을 실용화하여 기존 시스템 대비 50%의 효율을 향상시켰으며, 같은 기술을 가정용 공조기에 적용하여 2003년에 이산화탄소(CO₂)를 냉매로 사용한 히트펌프 급탕기(heat pump water heater)를 출시하였다(그림 7). DENSO는 현재 이 기술을 자동차용 에어컨, RAC(room air conditioner) 및 냉장고에 적용하여 상용화 하는 일을 진행하고 있다.

시스템 구성 및 이젝터 설계

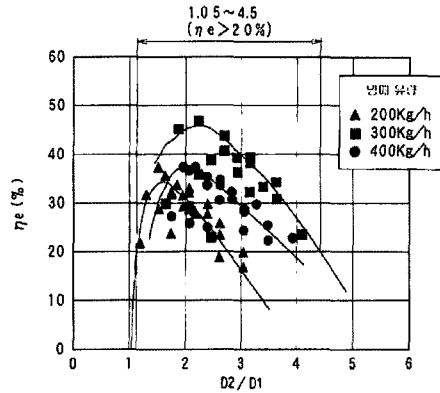
그림 8에 기존 사이클과 이젝터 사이클을 비교하였다. 그림에서와 같이 이젝터가 팽창장치의 역할을 하였을 경우, 그림 8.(b)의 (1)과 같이 냉방능력의 증가를 얻을 수 있고, 기액분리기를 통과하면서 실제 냉방능력에 크게 기여하지 않는 기상(gas) 냉매를 제외한 액상(liquid) 냉매만 증발기로 유입되기 때문에 증발기에서의 압력강하가 줄어들어 전체 열전달 성능이 향상된다. 어큐뮬레이터(accumulator, 기액분리 기능)에서 증발기로 연결되는 line (2)는 증발기에서의 팽창을 위하여 보통 모세관(capillary tube)이나 fixed throttle로 제작된다. 또, 기액분리기를 거친 기상의 냉매는 그림 8.(b)의 (3)과 같이 증발압력보다 높은 압력으로 압축기로 흡입되어 압축기에서의 동력을 감소시키며, 전체 시스템 성능은 향상되게 된다. 그림 9에 본 시스템에 대한 압력



[그림 8] 기존 사이클과 이젝터 사이클 비교



[그림 9] 압력(P) 엔탈피(h) 선도



[그림 10] 직경비에 따른 효율변화

(P)-엔탈피(h) 선도를 나타내었다. 그림에 나타난 각 점(point) 및 번호는 그림 8.(b)에 표기된 점 및 번호와 일치한다.

노즐을 통과하는 과정(C2→C3) 및 증발과정(C6I→C7→C8)을 통해 냉방능력을 효율적으로 증가시키고, 압축기 흡입압력을 높여(C4→C5) 동력 감소를 최대로 하기 위한 이젝터 설계는 매우 중요하다.

Denso의 경우, 여러 설계인자의 변화에 따른 이젝터 자체 효율 및 시스템 효율 변화를 연구하고 있다. 수축확대 노즐설계를 예로 들면, 수축부 길이가 확대부 길이보다 짧으며, 노즐 최후단부 직경과 일정 면적부(constant area section) 직경 사이의 비가 1.05 이상이어야 하는데, 그 이유는 그림 10에 나타난 바와 같이 직경비가 1.05 이상이었을 때에 이젝터 자체 효율이 약 20%를 넘고, 이 때의 시스템 효율(COP)이 일반적인 팽창밸브를 사용하는 것보다 3% 정도 개선되기 때문이다. 이 외에도 일정 면적부 길이와 직경비, 디퓨저(diffuser) 형상, 냉매 종류 및 유량 등의 변수들을 변화시켜가며, 각 인자들의 영향도 및 시스템 효율을 최대로 하는 인자 조합을 찾고 있다.

맺음말

본 자료에서는 여러 가지 형태의 이젝터를 장착한 증기압축식 냉동시스템을 소개하고, 실제 제품으로 출시된 Denso 사의 'Ejector Cycle 냉동기'에 대하여 간략히 소개하였다. CO₂냉매를 사용하고, 이젝터

를 팽창장치로 사용하는 Denso system은 냉방능력 증대 및 압축기 동력감소로 20% 이상의 에너지를 절약할 수 있었다.

최근 들어 에너지 효율과 환경 문제가 중시되면서, 기존 증기압축식 냉동사이클을 변형하거나 새로운 부품을 추가하여 효율 향상을 꾀하는 여러 다양한 방법이 시도되고 있다. 이젝터를 이용하는 변형시스템의 경우, 2상류 이젝터 설계의 어려움과 소음 문제, 유량 조절문제 등을 해결함으로써 제품화되었는데, 이러한 부품 및 새로운 변형사이클에 대한 연구가 지속적으로 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. Gay, N. H., 1931, "Refrigerating system", U.S. Patent No. 1,836,318
2. Kemper, G. A., Harper, G. F., and Brown, G. A., 1966, "Multiple-phase ejector refrigeration system", U.S. Patent No. 3,277,660.
3. Newton, A. B., 1972a, "Capacity control for multiple-phase ejector refrigeration systems", U.S. Patent No. 3,670,519
4. Lee, W. H. 1998, "Experimental study on the performance of dual-evaporator refrigeration system with an ejector", M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.