

2단압축 이산화탄소 사이클의 냉방성능 향상 특성에 대한 실험적 연구

조 홍 현, 이 호 성*, 김 용 찬**

삼성전자(주), *고려대학교 기계공학과 대학원, **고려대학교 기계공학과

Experimental Study on the Cooling Performance Improvement of a Two-stage Compression CO₂ Cycle

Honghyun Cho, Hoseong Lee*, Yongchan Kim**

Samsung Electronics Co. Ltd., Maetan-3Dong, Yeongtong-Gu, Suwon 443-742, Korea

*Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received July 11, 2006; revision received September 15, 2006)

ABSTRACT: A CO₂ system using the two-stage compression cycle was tested by varying 1st-2nd compressor frequencies in the cooling mode. To improve the cooling performance of the two-stage compression CO₂ cycle, the following cycle options were applied: a basic cycle, a cycle with an intercooler, a cycle with an IHX (internal heat exchanger), and a cycle with an intercooler and IHX. The cycle with the intercooler-IHX showed the highest cooling capacity improvement among the cycle options at all compressor frequencies. The cycle with the intercooler, the cycle with the IHX, and the cycle with the intercooler-IHX improved the cooling COP by 7, 12, and 15%, respectively, over the basic CO₂ cycle when the compressor frequencies for the first and second compressors were 50 Hz and 30 Hz, respectively. In addition, the applications of the selected cycle options enhanced system reliability.

Key words: CO₂ cycle(이산화탄소 사이클), Intercooler(중간냉각기), IHX(internal heat exchanger, 내부열교환기), Two-stage compression cycle(2단압축 사이클)

1. 서 론

초기의 이산화탄소를 이용한 초월임계(transcritical) 사이클의 적용은 주로 가정용 급탕시스템에서 시작되었으며, 현재는 자동차용 열펌프, 그리고 대형 냉동시스템에 이르기까지 그 적용영역이 크게 확대되고 있다. 그러나 공기를 열원으로

하는 초월임계 냉방시스템의 경우 외기조건에 크게 영향을 받으며, 기존 시스템에 비하여 팽창장치에서 팽창손실이 크고, 가스쿨링(gascooling) 과정에서 비가역성이 크므로 기존의 아임계 냉방시스템에 비하여 낮은 성능을 나타낸다.^(1,2) 따라서, 이러한 단점을 극복할 수 있는 초월임계 냉방시스템의 성능향상 방안에 대한 체계적인 연구가 요구되고 있다.

이산화탄소의 냉동공조기기 적용에 대한 연구는 유럽, 일본, 그리고 미국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. Hwang et al.⁽³⁾은 이산화탄소를

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3366; fax: +82-2-921-5439

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

적용한 사이클의 성능향상을 위하여 팽창기(expander), 2단압축, 증발냉각을 이용한 가스쿨러를 적용한 사이클에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 또한 여러 가지 2단압축 사이클에서 운전 조건에 따른 성능을 비교 고찰하였다.⁽⁴⁾ Groll et al.⁽⁵⁾은 2단압축-중간냉각 사이클에서 1단압축비와 2단압축비의 변화에 따른 사이클의 성능변화를 고찰하였을 뿐만 아니라 팽창기를 사용한 사이클의 성능향상에 대한 연구를 동시에 수행하였다. Yitai et al.⁽⁶⁾은 팽창기를 적용한 초월임계 사이클에서 왕복동식, 스크류, 로터리, 스크롤 압축기에 대하여 동일한 소요동력비를 가지는 경우 각각의 성능 및 적용의 용이성에 대한 고찰을 수행하였다. Neksa et al.⁽²⁾와 Hrnjak et al.⁽⁷⁾은 이산화탄소 사이클의 최적화와 토출압력의 제어를 통한 사이클의 성능향상에 관한 연구를 시뮬레이션과 실험을 통하여 수행하였다. Halozan et al.⁽⁸⁾과 Kim et al.⁽⁹⁾은 저온조건에서 성능향상을 위한 캐스케이드(cascade) 형태의 냉동사이클에서 이산화탄소를 적용하여 그 특성을 고찰하였다.

이미 초월임계 이산화탄소 사이클의 성능향상에 대한 연구는 많이 진행되었지만, 2단압축을 이용한 이산화탄소 사이클에 대한 연구는 국내뿐만 아니라 국외에서도 초기단계에 있으며, 그 문헌 또한 매우 제한적이다. 이산화탄소를 적용한 2단압축 시스템의 성능향상 방안의 제시 및 평가에 대한 연구는 천연냉매를 적용한 냉동시스템의 선진기술을 미리 확보함으로써 국가경쟁력 향상을 위하여 절실히 요구되어진다. 따라서 본 연구에서는 이산화탄소를 적용한 여러 가지 2단압축 사이클을 구성하여 성능을 측정하고, 그 결과를 고

찰하였다. 이를 통하여 각 사이클의 성능향상에 관한 구체적인 데이터를 제시하고 각 사이클들의 특성을 비교하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

이산화탄소를 이용한 2단압축 냉방사이클의 특성을 파악하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 이산화탄소 사이클의 성능측정을 위하여 열펌프를 두 개의 챔버로 구성된 열량계에 설치하였다. 본 실험에 사용된 2개의 압축기는 동일한 덴소(Denso)사의 스크롤형 가변속 압축기로 난방용량 4.5 kW 정도를 가지는 소형 압축기이다. 실내의 및 중간냉각기에 사용된 열교환기는 핀튜브 형태의 열교환기로 내경 4 mm, 외경 5 mm로 고압에 견딜 수 있도록 설계하였다. 또한 열교환 효과를 향상시키기 위하여 오프셋

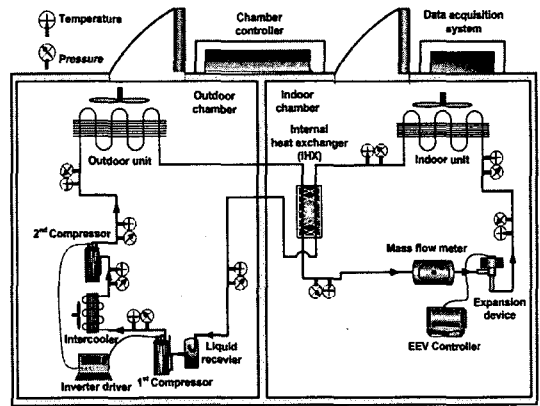


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

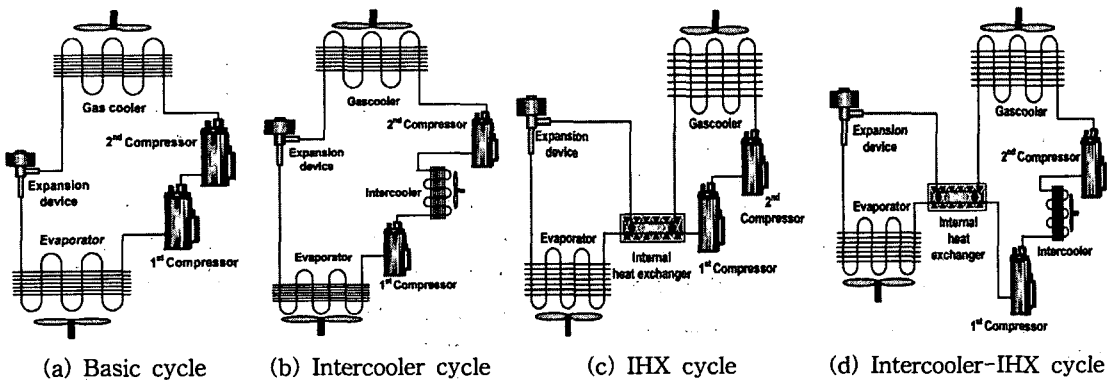


Fig. 2 Schematic diagrams of two-stage compression cycles.

Table 1 Experimental uncertainties

Parameters	Uncertainties
Temperature (T-type)	±0.1 °C
Pressure	±0.2% of full scale
Mass flow rate	±0.2% of reading
Power input	±0.01% of full scale
Cooling capacity	±3.71%
COP	±3.73%

스트립 핀(offset strip fin)을 사용하였다. 팽창장치는 후지코끼(Fugikoki)사의 EEV를 시스템 용량에 맞게 선정하여 사용하였다. 내부열교환기(IHX)는 이중관 형태의 열교환기로 열교환 효율을 높이기 위하여 냉매의 흐름은 대향류로 설계하였다. Fig.1에서 볼 수 있듯이 내부열교환기는 가스쿨러 출구의 고온의 냉매와 증발기 출구의 저온의 냉매가 서로 열교환할 수 있도록 제작하였으며, 이를 2단압축 시스템에 설치하였다.

Fig.2는 본 연구에서 제안된 2단압축 사이클들의 개략도를 보여주고 있다. 본 연구에서 이산화탄소 사이클의 성능향상을 위하여 기본 사이클, 중간냉각 사이클, 내부열교환 사이클, 그리고 중간냉각-내부열교환 사이클 등 총 4개의 사이클을 구성하였다. Fig.2에서 볼 수 있듯이 기본 사이클에 추가로 중간냉각기를 적용한 사이클을 중간냉각 사이클, 내부열교환기를 적용한 사이클을 내부열교환 사이클, 그리고 중간냉각기와 내부열교환기를 동시에 적용한 사이클을 중간냉각-내부열교환 사이클로 표현하였다. 일반적인 2단압축 시스템은 하나의 압축기에 두 개의 각기 다른 압축비를 가지는 압축실을 하나의 모터를 구동함으로써 2개의 압축실을 동시에 압축하는 형태를 가진다. 그러나 본 연구에서는 여러 가지 실험장치의 제작의 제한성에 의하여 두 개의 동일한 압축기를 직렬로 연결하여 사용하였다.

이산화탄소 사이클에서 각 부분의 온도와 압력에 대한 상태량을 확인하기 위하여 열전대와 압력계를 시스템의 주요 부위에 설치하였다. 본 실험에 시스템 각 부분의 물성치를 측정하기 위한 실험장치의 정확도와 이를 통하여 얻어진 냉동용량 및 성능계수의 불확실도를 Table 1에 나타내었다. 이산화탄소 시스템의 냉방 실험조건을 설정하기 위하여 우선 단일유닛 시험조건인 ASHRAE Standard 116⁽¹⁰⁾에 근거하여 온도와 습도를 설정

Table 2 Test conditions

Parameters	Value
*EEV opening (%)	49
1 st -2 nd compressor frequency (Hz)	35-30, 40-30, 50-30 50-35, 50-40
Operating conditions (db/wb)	Indoor = 27/19.5 °C Outdoor = 35/24 °C
IHX length (m)	0, 2

*Normalized of full opening.

하였다. 본 실험에서 설정된 EEV 개도와 1단-2단 압축기의 회전수, 그리고 설정된 외기조건 및 내부열교환기의 길이를 Table 2에 나타내었다. 설계된 시스템의 열량은 냉매 엔탈피법을 이용하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 각 주파수에 대한 압축기 소요동력의 변화를 사이클 사양에 따라 보여주고 있다. 압축기 소요동력은 중간냉각 사이클, 기본 사이클, 중간냉각-내부열교환 사이클, 그리고 내부열교환 사이클 순으로 크게 나타났다. 또한 1단-2단 압축기의 주파수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 형태를 보인다. 중간냉각기를 사용하는 경우, 1단에서 토출된 냉매는 외기와 열교환을 통하여 외기와 비슷한 온도로 냉각되며 냉각된 냉매는 2단의 압축기 입구로 유입된다. 2단압축기에서 압축기 입구의 온도감소로 인하여 더 많은 냉

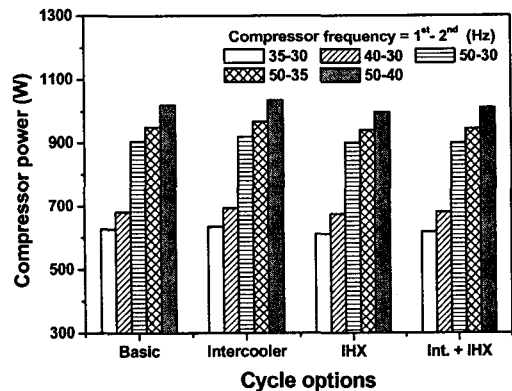


Fig. 3 Variation of compressor work with cycle option.

매가 압축되며 이에 압축기 체적효율은 향상된다. 그러나 많은 냉매의 압축으로 인하여 압축기 소요동력은 기본 사이클에 비하여 증가하게 된다. 반면 내부열교환기를 적용한 사이클의 경우, 1단의 압축기의 온도가 기본 사이클에 비하여 상승하고 비체적이 증가하여 상대적으로 적은 냉매가 압축된다. 이 경우 2단의 압축기 입구의 온도가 상승하고 1단에서 토출된 냉매의 양이 상대적으로 적기 때문에 2단의 압축기에서도 동일한 현상을 보이게 되고 최종적으로 토출된 냉매의 압력과 양은 상대적으로 감소하게 된다. 내부열교환기와 중간냉각기를 동시에 사용하는 경우는 앞에서 설명한 두 가지 효과가 복합적으로 발생한다. 하지만 본 실험에서는 내부열교환기를 사용하는 경우 압축기 소요동력의 증가는 크지 않는 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 1단-2단 압축기 주파수가 35-30 Hz, 50-40 Hz일 때, 중간냉각 사이클의 압축기 소요동력은 기본 사이클에 비하여 각각 1.5%, 1.8% 정도 증가하였다. 반면 내부열교환기 사이클의 경우 각각 2.4%, 2.1% 정도 감소하였다.

Fig. 4는 냉방용량의 변화를 사이클 사양에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 냉방용량은 압축기 주파수가 증가할수록 향상되었다. 또한 냉동용량의 향상 정도는 중간냉각 사이클, 내부열교환 사이클, 그리고 중간냉각-내부열교환 사이클 순으로 나타났다. 중간냉각 사이클에서 냉동용량의 향상은 사이클에 흐르는 냉매유량의 증가에 그 주요한 원인이 있다. 일반적으로 내부열교환기는 냉방용량의 확보와 팽창손실의 감소를 목적으로 사

용되고 있다. 이산화탄소 사이클에서 실외온도가 35℃인 경우, 압축기 토출압력과 가스쿨러 출구의 온도에 따라 사이클 성능은 크게 변화한다. 따라서 내부열교환을 통하여 외기보다 더 낮은 가스쿨러 출구의 온도를 유지함으로써 증발기 입구의 건도를 감소시키게 되고, 이에 시스템의 냉방용량은 증가된다. 본 연구에서는 내부열교환기의 설치로 냉방용량이 크게 증가함을 확인할 수 있다. 중간냉각-내부열교환 사이클의 경우 질량유량의 증가효과와 증발기 입구에서 건도의 감소효과가 동시에 나타나게 되므로 각 사이클 중 냉방용량이 가장 크게 향상된다. 본 연구에서는 1단-2단 압축기 주파수가 35-30 Hz, 50-40 Hz일 때, 중간냉각-내부열교환 사이클의 냉방용량은 기본 사이클에 비하여 각각 14%, 11% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 각 사이클 사양에 따라 냉방성능계수의 변화를 비교하여 보여주고 있다. 각각의 주파수에 따른 냉방성능은 모든 사이클 사양에 대하여 비슷한 경향을 보이며 변화한다. 중간냉각 사이클에서는 냉방용량이 크게 증가하였음에도 불구하고 압축기 일의 증가로 인하여 냉방성능은 내부열교환 사이클보다 작게 나타났다. 내부열교환기를 적용한 사이클의 경우 압축기 일의 감소와 냉방용량의 증가가 동시에 발생함으로 냉방성능의 증가 정도가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 내부열교환기-중간냉각 사이클에서는 압축기 일이 내부열교환기 사이클에 비하여 약간 증가하였으나 질량유량의 증가로 인한 냉방용량이 크게 향상되므로 냉방성능계수는 가장 크게 나

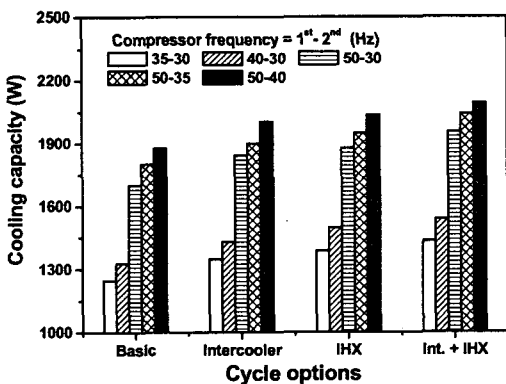


Fig. 4 Variation of cooling capacity with cycle option.

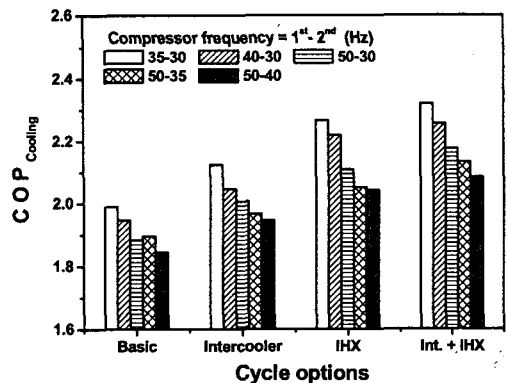


Fig. 5 Variation of cooling COP with cycle option.

타났다. Hwang et al.⁽⁴⁾의 연구에 의하면 일정한 운전조건에서 단일의 2단압축 형태의 압축기를 사용하는 경우, 냉방성능은 중간냉각 사이클이 내부열교환 사이클보다 4% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 하지만 본 연구에서는 두 개의 단일 압축기를 직렬로 연결하여 2단압축 사이클을 구현하였으므로 전체적인 압축기의 특성이 달라지고 이에 사이클 성능도 다르게 나타난 것으로 사료된다. 일반적으로 냉방성능은 압축기의 주파수가 저하될수록 감소한다. 이는 압축기의 주파수가 증가할수록 열교환기의 효율성의 감소와 배관 및 밸브에서 압력강하의 증가로 인한 사이클 손실이 크게 증가하기 때문이다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 1단과 2단의 압축기의 주파수가 증가할수록 냉방성능계수는 작아짐을 확인할 수 있다. 본 연구에서 1단-2단 압축기 주파수가 35-30 Hz, 50-40 Hz일 때, 중간냉각-내부열교환 사이클의 냉방성능은 기본 사이클에 비하여 각각 16%, 13% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 압축기 주파수가 50-30 Hz의 경우, 기본 사이클에 비하여 중간냉각 사이클은 약 7%, 내부열교환 사이클은 약 12%, 중간냉각-내부열교환 사이클은 약 15% 향상되는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 1단-2단 압축기 주파수가 50-40 Hz일 때, 각각의 사이클 사양에 따른 냉방성능계수 향상 정도를 기본 사이클에 대한 상대적인 값으로 비교하여 나타내고 있다. 중간냉각 사이클, 내부열교환 사이클, 그리고 중간냉각-내부열교환 사이클의 냉방성능은 기본 사이클에 대하여 각각 4~10%, 7~13%, 그리고 11~18% 정도 향상되는

것으로 나타났다. 앞에서 설명한 것과 같이 중간냉각기를 사용한 사이클의 성능 향상 정도가 가장 낮게 나타났으며, 중간냉각기와 내부열교환기를 동시에 사용한 사이클이 가장 큰 성능향상을 나타냈다. 이는 질량유량과 함께 증발기 입구의 건도가 크게 감소하였기 때문으로 사료된다. 또한 기본 사이클에 비하여 개선된 사이클들은 넓은 작동조건과 운전조건의 변화에 대하여 상대적으로 높은 성능과 작은 변화폭을 나타냄으로써 시스템의 신뢰성 또한 크게 향상시킴을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 각각의 사이클 사양에 따른 질량유량의 변화를 보여주고 있다. 질량유량의 변화는 냉방용량과 압축기 소요동력을 변화시켜 시스템 성능에 큰 영향을 미친다. 시스템의 질량유량이 증가하면 냉방용량뿐만 아니라 압축기 소요동력도 같이 증가하게 된다. 따라서 시스템에서 과도한 압축기의 소요동력이 형성되지 않는 조건 하에서 시스템에 흐르는 질량유량 및 각 부분의 압력이 결정되어야 한다. 중간냉각 사이클의 경우, 시스템에 흐르는 냉매의 질량유량은 증가한다. 이는 앞에서 설명하였듯이 2단 압축기 입구의 온도 감소로 인하여 2단 압축기의 체적효율의 상승에 의한 질량유량의 증가가 주요한 원인이다. 반면 내부열교환기를 사용하는 경우, 1단 압축기 입구의 온도가 크게 상승하고 이에 비례적이 커지면서 압축기에 흡입되는 냉매유량이 줄어든다. 따라서 1단과 2단의 압축기에 흐르는 냉매유량은 기본 사이클에 비하여 약간 줄어들게 된다. 하지만 중간냉각-내부열교환 사이클의 경우, 내부열교환기

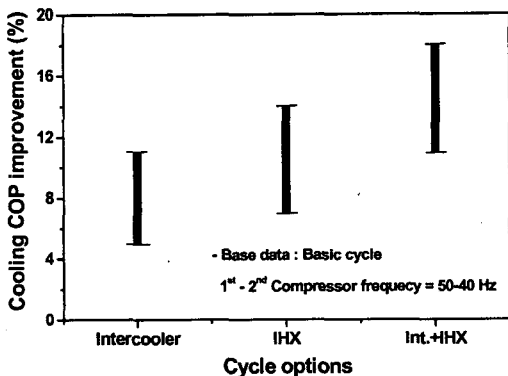


Fig. 6 Improvement of cooling COP for each cycle option.

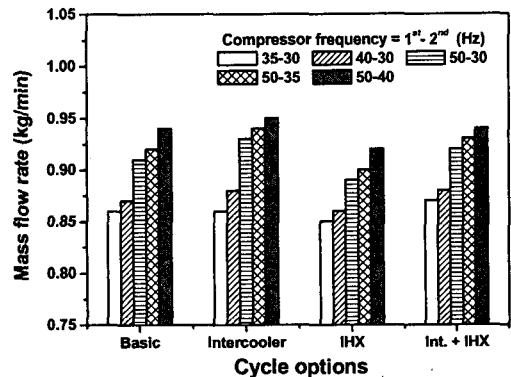


Fig. 7 Variation of mass flow with cycle option.

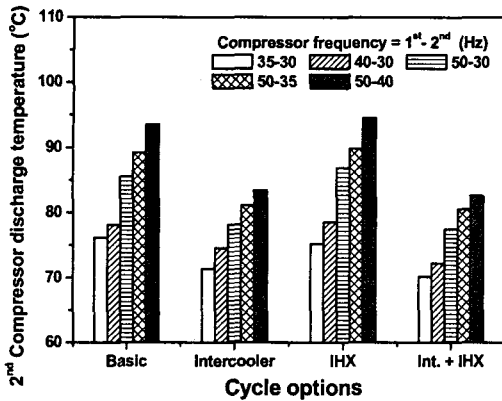


Fig. 8 Variation of 2nd-compressor discharge temperature with cycle option.

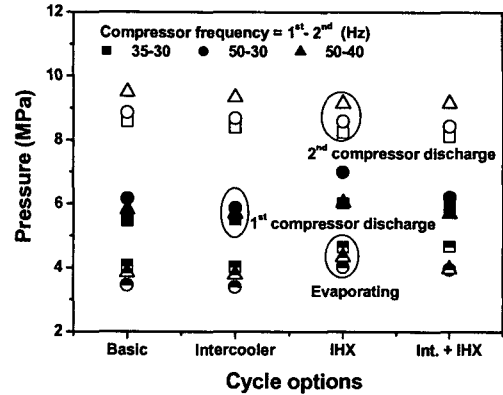


Fig. 9 Variations of discharge pressures at the 1st- and 2nd-stage compressor and evaporating pressure with cycle option.

의 사용으로 감소된 냉매유량이 중간냉각기를 사용함으로써 크게 회복되는 것을 확인할 수 있다. 이는 냉방용량의 증가로 이어져 시스템의 성능을 향상시킨다. 본 연구에서는 1단-2단 압축기 주파수가 35-30 Hz, 50-40 Hz일 때, 중간냉각 사이클의 질량유량은 내부열교환기 사이클에 비하여 각각 3%, 4% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 2단 압축기의 최종 토출온도의 변화를 보여주고 있다. 압축기 토출온도는 중간냉각기를 사용하는 사이클이 가장 낮게 나타났으며, 그 다음으로 중간냉각-내부열교환 사이클, 기본 사이클, 그리고 내부열교환 사이클 순서로 높게 나타나고 있다. 중간냉각기를 이용하는 경우 모든 사이클이 거의 비슷한 1단의 토출온도를 가진다고 하더라도 중간냉각기를 통하여 2단 압축기 입구의 온도가 외기와 같은 낮은 온도조건으로 형성되므로 2단의 압축기 토출온도는 크게 감소하게 된다. 이러한 압축기 토출냉매의 온도 감소는 가스쿨러 출구의 온도 감소로 이어져 냉방용량의 향상 효과를 가져온다. 모든 주파수에서 중간냉각기를 사용함으로써 최종 냉매의 토출온도는 최소 7°C 이상 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 2단 압축 시스템에 중간냉각기를 사용함으로써 냉방용량의 증가뿐만 아니라 시스템의 신뢰성도 동시에 향상됨을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 1단과 2단의 압축기 토출압력 및 증발압력의 변화를 각각의 사이클 사양에 따라 보여주고 있다. 중간냉각기, 내부열교환기, 그리고 중

간냉각-내부열교환을 적용한 사이클에서 2단 압축기의 토출압력은 기본 사이클에 비하여 낮아짐을 확인할 수 있다. 반면, 1단의 압축기 토출압력은 대부분 6 MPa 근처에서 형성되고 있으며, 내부열교환기를 적용한 사이클의 경우 다른 사이클에 비하여 약간 더 높게 형성됨을 볼 수 있다. 내부열교환기를 적용한 사이클에서 증발압력은 중간냉각기를 사용한 사이클과 기본 사이클에 비하여 증가하였으며, 증발압력과 토출압력의 변화를 볼 때 내부열교환기 사이클이 가장 작은 압축비를 나타냄을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 2단 압축 이산화탄소 시스템에 대하여 기본 사이클, 중간냉각 사이클, 내부열교환 사이클, 그리고 중간냉각기와 내부열교환기를 동시에 이용한 중간냉각-내부열교환 사이클을 구성하여 성능을 평가하였으며, 운전조건에 따른 성능 향상 정도와 각각의 사이클 특성들을 비교하였다. 이를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 2단 압축 시스템에서 중간냉각기를 사용함으로써 냉매의 질량유량이 크게 증가하였으며 이에 냉방용량도 증가하였다. 그러나 압축기 일의 증가로 인하여 냉방성능의 향상 정도는 다른 사이클에 비하여 크게 나타나지 않았다.

(2) 내부열교환기의 사용으로 압축기 일은 약간 감소하고 증발기 입구의 건도가 감소하여 냉

방용량이 크게 증가되었으며 이에 냉방성능 또한 크게 향상되었다.

(3) 냉방성능의 향상정도는 중간냉각-내부열교환 사이클이 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 내부열교환 사이클, 중간냉각 사이클 순으로 나타났다. 압축기 주파수가 50-30 Hz의 경우, 각 사이클별 냉방성능의 향상정도는 각각 7%, 12%, 15% 정도로 나타났다. 내부열교환기와 중간냉각기의 사용으로 사이클의 신뢰성 또한 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 산업자원부 차세대 신기술 개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lorentzen, G. and Pettersen, J., 1993, A new, environmentally benign system for car air-conditioning, *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 16, No. 1, pp. 4-12.
2. Neksa, P., Rekstad, H., Zakeri, R. and Schiefloe, P., 1998, CO₂-heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results, *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 21, No. 3, pp. 172-179.
3. Hwang, Y. and Radermacher, R., 1999, Experimental investigation of the CO₂ refrigeration cycle, *ASHRAE Transactions*, Vol. 105, Pt. 1, pp. 1219-1227.
4. Hwang, Y. and Radermacher, R., 2002, Operations for a two-stage transcritical carbon dioxide cycle, 5th IIR-Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference at Guangzhou, pp. 143-149.
5. Groll, E., Baek, J. and Lawless, P., 2002, Effect of pressure ratios across compressors on the performance of the transcritical CO₂ cycle with two-stage compression and intercooling, *Compressor Engineering Conference at Purdue*, R11-7.
6. Yitai, M., Dong, W., Shitong, Z. and Minxia, L., 2002, Thermodynamic analysis and compression of expander for CO₂ transcritical cycle, 5th IIR-Gustav Lorentzen on Natural Working Fluids Conference at Guangzhou, pp. 292-297.
7. Hrnjak, P., Richeter, M., Song, S., Yin, J., Kim, M. and Bullard, C., 2000, Transcritical CO₂ heat pump for residential application, 4th IIR-Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference at Purdue, pp. 9-16.
8. Halozan, H. and Rieberer, R., 2000, CO₂ as refrigerant-possible application, The 4th IIR-Gustav Lorentzenon Natural Working Fluids at Purdue, pp. 43-50.
9. Kim, S. and Kim, M., 2002, Experiment and simulation on the performance of an auto-cascade refrigeration system using carbon dioxide as a refrigerant, *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 25(8), pp. 1093-1101.
10. ASHRAE, 1983, Methods of testing for seasonal efficiency of unitary air-conditioner and heat pumps, *ASHRAE Standard 116*.