

Subcooling Bypass Technology를 적용한 압축기 토출 냉매 온도 감소에 관한 연구

곽 경 민, 배 철 호[†]
영남대학교 기계공학부

A Study on the Decrease of Compressor Discharge Temperature Using Subcooling Bypass Technology

Kyungmin Kwak, Cheolho Bai[†]

Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

(Received October 27, 2008; revision received May 7, 2009)

ABSTRACT: The purpose of the study is to decrease the refrigerant temperature at the outlet of the compressor under high thermal load conditions for air cooled vapor compression refrigeration system. The subcooling bypass line called subcooling bypass technology(SBT) is installed to the window type A/C system to investigate the performance test. The standard air calorimeter test method is applied to measure the refrigerant temperature at the outlet of the compressor, cooling capacity, power consumption, and system EER. The refrigerant temperature at the outlet of the compressor decreases as the bypass rate increases. When the bypass rate is 8.2%, the refrigerant temperature at the outlet of the compressor decreases 2.8 °C while the cooling capacity and EER are the same as the conventional A/C unit.

Key words: Subcooling bypass technology(SBT), Discharge Temperature(토출온도), EER (에너지 효율), Bypass rate(bypass 율)

기 호 설 명

DB : 건구온도
EER : 에너지효율
h : 엔탈피
m : 질량유속
SBT : Subcooling bypass technology
WB : 습구온도

bypass : bypass 냉매 라인
main : 주 냉매 라인

하첨자

a, b, c, d : Fig. 2의 열전대 부착 위치

1. 서 론

압축기, 응축기, 팽창장치 및 증발기로 구성되는 증기 압축식 에어컨은 아주 무더운 사막 지역을 포함하여 다양한 온도조건 속에서 작동되고 있다. 에어컨을 운전할 때 외기온도가 증가하면 응축 냉매의 압력과 압축기의 토출 냉매온도를 증가시키는 요인으로 작용하며, 증발기의 냉방성능 및 압축기의 소비 일 등과 같은 에어컨의 전반적인 성능에 영향을 미친다. 따라서 아주 무더운 지역에서 에어컨을 작동시키면 응축 냉매의 압력이

[†] Corresponding author

Tel.: +82-53-810-2575; fax: +82-53-810-4627

E-mail address: chbai@yu.ac.kr

증가하며 결과적으로 압축기에서 토출되는 냉매 온도 역시 증가하게 된다. 이로 인해 압축기의 부하가 증가되며, 압축기의 토출 냉매온도가 압축기의 안정적인 작동범위 이상으로 증가되면 압축기의 보호를 위해 압축기는 정지하게 된다(shut-down). 이러한 현상은 특히 외기온도가 높은 지역이나 대용량 공랭식 에어컨에서 자주 발생하며 해결해야 할 중요한 과제이다.

압축기의 토출 냉매온도가 증가하는 현상은 대개 소형의 에어컨보다 대용량의 시스템에서 발생 빈도가 훨씬 많으며, 이것은 응축기의 크기와 직접적인 관계가 있다. 일반적으로 소형 에어컨의 경우, 증발기에서 흡수된 에너지와 압축기의 일을 모두 외기로 배출시킬 수 있는 만큼 충분한 응축기를 사용한다. 그러나 소형 에어컨에서도 외기온도가 상당히 높은 경우, 압축기의 토출 냉매온도가 압축기의 안정적인 작동범위 이상이 되면 압축기의 shutdown 가능성은 여전히 존재하게 된다. 반면에 대용량 에어컨 중 특히 공랭식의 경우 응축기는 소형에 비해 설치 조건 등의 제한이 커서 응축기의 크기가 충분하지 못한 경우가 많다. 대용량 에어컨의 경우 일반적인 외기 온도에서는 압축기가 정상적으로 작동하지만, 외기온도가 어느 이상 증가하면 제한된 응축기 용량으로 인해 압축기가 shutdown될 가능성은 소형에 비해 더욱 커지게 된다.

일반적으로 에어컨 운전조건 중에서 아주 더운 지역과 같이 공기온도가 높은 조건을 과부하 온도조건이라 부르며, 일반적인 온도조건을 표준 온도조건이라 부른다.

본 연구의 목적은 과부하 운전 조건에서 압축기의 토출 냉매온도를 감소시켜 압축기의 부하를 줄이는 것이다. 연구방법으로서 본 연구에서는 기존 냉매회로에 subcooling bypass technology을 적용하였다.

Cho and Bai⁽¹⁾는 에어컨의 성능(냉방성능의 증가 및 압축기의 소비일 감소)을 향상시키기 위해 냉매라인에 별도의 subcooling bypass line을 제안하였으며 subcooling bypass technology(SBT)라고 명칭하였다. Fig. 1은 SBT의 기본 개념도이다. SBT의 기본 개념은 응축기 출구에서 응축된 액상의 냉매유량을 bypass 라인으로 일부 bypass 시켜 보조 팽창장치를 통하여 팽창시키는 것이다. 일례로 bypass 라인에 전체 냉매유량의 5%를 by-

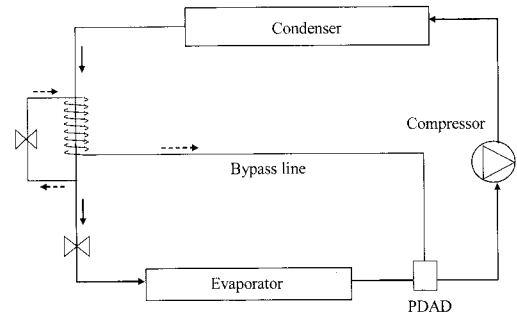


Fig. 1 Schematic diagram of subcooling bypass technology(SBT).

pass 시키게 되면 95%의 냉매유량은 주 냉매 라인으로 흐르게 된다. Bypass 라인에는 bypass 열교환기가 설치되어 있으며, bypass 열교환기에서 두 냉매의 온도차에 의하여 주 팽창장치로 흐르는 액상냉매는 bypass 라인의 냉매에 에너지를 전달시키고 그 결과로서 응축기 출구의 냉매온도보다 낮은 추가의 과냉도를 얻게 된다. 반면에 bypass 라인에서 팽창된 냉매는 에너지를 전달받아 과열되어 증발기 출구와 압축기 입구 사이의 주 냉매 라인으로 유입이 된다. SBT의 경우 안정된 운전을 위하여 bypass 라인의 압력을 증발기 출구보다 약간 높게 유지하며, Fig. 1의 PDAD(Pressure Difference Associating Device)는 bypass 라인의 냉매와 주 냉매 라인의 냉매를 혼합하는 소형 저장탱크 같은 장치이다. 이외에 bypass 기법을 냉동사이클에 적용한 연구가 Yoneda⁽²⁾에 의해서 수행된 바 있다. SBT의 장점은 응축기 크기를 증가시키지 않고서도 응축기 출구의 액상 냉매온도를 감소시켜 추가의 과냉도를 얻는 것이다. 이것은 응축기를 크게 만든 효과와 유사하며 응축기의 응축압력과 압축기에서 토출되는 냉매온도를 감소시킬 수 있는 가능성을 가지게 된다.

SBT 시스템에서 응축압력과 압축기의 토출 냉매 온도를 감소시킬 수 있는 가능성은 과부하 온도 조건에서 큰 이점을 가지게 된다. 이러한 관점에서 SBT 시스템이 과부하 조건에서 어느 정도 압축기 토출 냉매 온도를 감소시킬 수 있는지에 대한 연구가 수행되었다. 또한 SBT에 의해서 압축기의 토출 냉매온도가 감소되더라도 에어컨에 실제로 적용되기 위해서는 압축기의 일반적인 성능은 기존 시스템과 최소 동등한 수준으로 유지되어야 한다. 이에 본 연구에 적용된 SBT 시

시스템을 대상으로 과부하 온도조건과 표준 온도조건에서 냉방성능, 압축기의 소비전력 및 EER 등을 실험적으로 평가하였으며, 기존 에어컨 제품의 성능과 비교하였다.

2. 시험장치 및 시험방법

성능 시험을 위해 본 연구에 사용된 에어컨은 상업용 창문형 에어컨으로서, 사용된 에어컨의 정격 사양은 냉방 능력 3.52 kW, 소비전력 1.1 kW이며 EER은 3.23이다.

창문형 에어컨에 SBT 시스템을 구성하기 위하여 본 연구에 적용된 bypass 열교환기는 이중관식 열교환기로 제작되었다. 시행착오를 거쳐 열교환기의 길이는 110 cm로 하였다. 열교환기의 길이가 110 cm보다 짧을 경우 bypass 라인의 냉매와 주 냉매 라인의 냉매 사이에 열교환이 충분히 일어나지 않아 bypass 라인의 열교환기 출구에서 액체 상태의 냉매가 유출되어 압축기로 유입될 가능성이 있다. 반면에 열교환기의 길이가 너무 길 경우 bypass 라인 열교환기 출구의 냉매가 지나치게 과열되어 냉매의 비체적이 증가함으로써 압축기를 통한 작동 냉매 유량이 감소하여 에어컨의 성능이 저하될 가능성이 있다. 내부 동관은 직경 9.52 mm의 전열축진관을 사용하였고 외부 동관은 직경 15.9 mm의 평활관을 사용하여 이중관 열교환기를 제작하였다.

Bypass 라인이 설치된 에어컨의 성능 실험은 미국 ANSI/ASHRAE Standard 37-1978⁽³⁾과 ARI-310/380-2004⁽⁴⁾에 제시된 Calorimetric Air Enthalpy Test Method를 따라 표준 칼로리미터에서 수행하였다. 본 연구에 사용된 칼로리미터는 2실로 구성되어 있으며, 각각 실내 및 실외의 온/습도 조건을 모사한다. 각 실의 크기는 3.5 m(W)×4.0 m(D)×3.0 m(H)이다.

실험에 사용된 에어컨은 2실 사이 벽면에 위치한 창문에 수평으로 설치되어 있으며 배수구가 연결되어 있다. 에어컨의 증발기 부분은 공기 유량, 건구 온도 및 습구 온도 측정을 위하여 실내 측에 위치한 풍동에 연결하였다. 에어컨은 최대 풍속에서 실험하였으며 환기기는 닫아두었다. 본 연구에 사용된 실험 조건은 한국 KS 에어컨 냉방시험조건⁽⁵⁾의 과부하 온도조건과 표준 온도조건이다. 실내온도와 실외온도는 과부하 온도조건에서는 각각 32.0/23.0 °C(DB/WB)와 43.0/26.0 °C

(DB/WB)이고, 표준 온도조건에서는 각각 27/19.5 °C(DB/WB)와 35.0/24.0 °C(DB/WB)이다.

실험에 사용된 에어컨의 모세관 팽창장치를 주 팽창장치로 사용하였으며, 표준조건에서 운전을 하여 증발기 출구에서 냉매의 과열도가 5 °C, 응축기 출구에서 냉매의 과냉도가 5 °C 정도 유지되도록 하면서 에어컨 성능이 정격 사양의 ±2% 이내가 되도록 냉매 960 g을 충전하였다. Bypass 라인이 설치된 시스템의 경우, bypass 라인의 설치로 인해 최적 냉매 충전량이 증가하게 된다. Bypass 라인에 설치된 가변식 팽창밸브를 닫고 기존 에어컨의 정격 사양을 재현할 수 있도록 냉매를 100 g 추가하였다. Bypass되는 냉매의 양은 가변식 팽창밸브를 이용하여 조절하였으며, 실험 중 증발기 출구에서 냉매의 과열도가 유지되는 지 확인하였고 냉매 과열도가 확보된 경우에 한해 실험 결과를 취하였다. 본 연구에서 사용된 냉매는 R22이며, 실험의 유일한 변수는 bypass 율이다.

에어컨의 냉방 능력은 증발기를 통한 공기의 엔탈피 차이와 공기 유량의 곱으로 구하였다. 공기의 엔탈피는 건구온도와 습구온도를 측정하여 ANSI/ASHRAE Standard에서 제시한 식을 이용하여 구하였으며, 압축기와 팬에서 사용된 에어컨의 소모 전력은 Hioki Power meter(Model number 3189 AC/DC Power HiTester, 측정 오차 0.35%)를 사용하여 측정하였다. EER은 측정된 냉방 능력과 소비 전력의 비이며 식(1)에 나타내었다.

$$EER = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

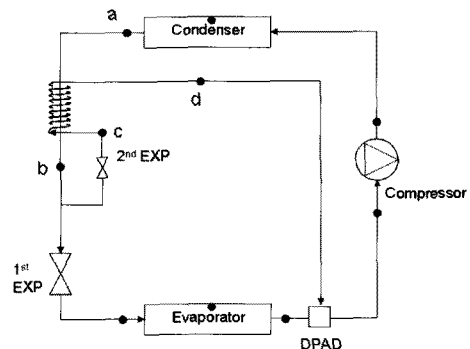


Fig. 2 Locations of thermocouples (black circular symbols) where refrigerant temperatures were measured.

실험을 수행하는 동안 Fig. 2에 점으로 나타낸 지점에 T형 열전대를 동관의 외벽에 부착하여 온도를 측정하였다. 측정된 온도는 실험중인 에어컨의 상태를 확인하며 또한 bypass 율을 계산하기 위하여 사용되었다. T형 열전대의 온도는 Fluke data acquisition system(Model NETDAQ 2645A)을 사용하여 측정하였다. 응축기의 출구, 증발기 출구 및 bypass 라인의 압력을 측정하여 시스템 운전 상태 파악 및 엔탈피 계산에 사용하였다. Bypass 율은 bypass 라인과 주 냉매 라인의 냉매의 엔탈피 차이로부터 구하였다. 냉매의 엔탈피는 측정된 온도로부터 NIST Refprop Version 6 program⁽⁶⁾을 이용하여 구하였다. 주 냉매 라인과 bypass 라인의 냉매 사이의 열교환 양이 동일하다는 에너지 평형 식(2)로부터

$$\dot{m}_{main}(h_a - h_b) = \dot{m}_{bypass}(h_d - h_c) \quad (2)$$

Bypass 율은 식(3)에 주어진 것과 같이 엔탈피 차이에 의해 계산할 수 있다.

$$Bypass Rate = \frac{\dot{m}_{bypass}}{\dot{m}_{main}} = \frac{h_a - h_b}{h_d - h_c} = \frac{h_a - h_b}{h_d - h_b} \quad (3)$$

실험에 사용된 칼로리미터 측정 장치는 ANSI/ASHRAE Standard에서 요구하는 정확도를 만족한다. 온도 측정 오차는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이다. McClintock error analysis⁽⁷⁾을 적용한 식(1)의 EER에 대한 오차는 1.14%이며, 식(3)의 bypass 율에 대한 오차는 3.28%로서 상대적으로 큰 오차를 나타내었다. 이는 식(3)의 엔탈피 차이가 상대적으로 작기 때문이다. NIST Refprop을 이용한 냉매의 엔탈피 계산은 오차를 무시하였다.

3. 결과 및 토의

앞에서 언급한 바와 같이 본 연구의 가장 큰 목적은 압축기의 토출 냉매온도를 감소시키는 것이다.

Fig. 3과 Fig. 4는 과부하 온도조건에 대하여 SBT 시스템의 냉매 bypass 율에 따른 압축기의 토출 냉매온도와 응축압력을 각각 나타내었다. 이때 bypass 율 0%는 bypass가 설치되지 않은 기존 시스템을 의미한다. 본 연구에 사용된 소형 에

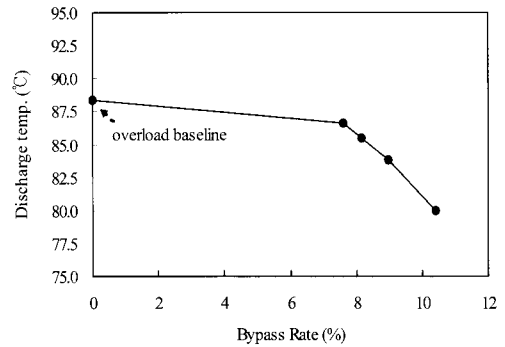


Fig. 3 Experimental results of refrigerant discharge temperature of compressor over a range of bypass rate under overload conditions.

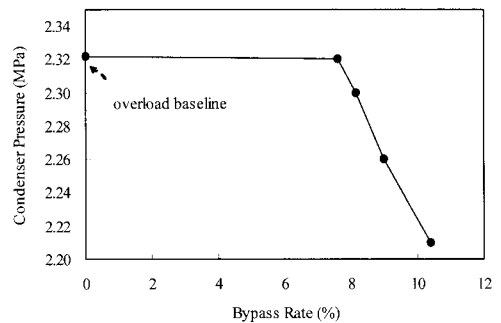


Fig. 4 Experimental results of condenser pressure over a range of bypass rate under overload conditions.

어컨의 경우 응축기의 크기가 충분히 커서 과부하 온도조건에서도 정상적으로 작동하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 기존 시스템의 압축기 토출 냉매온도는 88.3°C 이며, 이 온도를 본 연구의 기준 온도(baseline)로 사용하였다. Bypass 라인에 전체 냉매유량(응축된 냉매)의 7.6%, 8.2%, 9.0% 및 10.4%를 각각 bypass 시키면 이에 대응하는 압축기의 토출 냉매온도는 각각 86.6°C , 85.5°C , 83.8°C 및 79.9°C 로 나타났으며, bypass 량이 증가할수록 압축기의 토출 냉매온도는 감소하였다. 이러한 결과는 기존 시스템의 88.3°C 보다 낮은 값이며, SBT에 의해서 압축기의 토출 냉매온도가 낮아져 압축기가 shutdown되지 않고 연속적으로 작동 가능함을 보여준다.

SBT 시스템은 응축압력에도 영향을 미치며 Fig. 4와 같이 bypass율이 증가할수록 응축압력은 기존 시스템에 비해 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 과부하 온도조건에서의 기존 시스템의 응축압력은 약 2.32 MPa이다. 반면에 bypass율을 최대 10.4%까지 증가시키면 응축압력은 약 2.21 MPa이 된다. 본 연구에서 평가한 기존 시스템은 응축기가 이미 충분히 커서 bypass에 의한 영향으로 응축압력이 크게 감소되지는 않았다.

그러나 bypass율이 증가함에 따라 응축압력이 감소되는 경향은 확인할 수 있었으며, 과부하 조건에서 응축기가 충분히 크지 않은 대용량 시스템의 경우 응축압력의 감소 정도가 더 클 것으로 예상된다.

이상의 결과로부터 SBT 시스템은 기존 시스템에 비해 응축압력을 감소시키고 이에 대응하는 압축기의 토출 냉매온도를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 압축기의 토출 냉매온도의 감소는 압축기의 부하를 감소시키고 압축기의 shutdown을 방지할 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 SBT 시스템이 실제로 적용되기 위해서는 SBT 시스템의 성능이 기존 시스템의 성능과 최소한 동등한 수준으로 유지되어야 한다. 이러한 관점에서 표준 온도 조건과 과부하 온도조건에서 SBT 시스템의 성능을 평가하였으며, 기존 시스템의 성능과 비교하였다.

Fig. 5는 과부하 온도조건 및 표준 온도조건에서의 bypass율에 따른 압축기의 소비 일을 각각 나타내었다. 기존 시스템의 압축기 소비 일은 과부하 조건에 대해서는 1.29 kW이며, 표준 온도조건에 대해서는 약 1.09 kW이다. SBT 시스템의 경

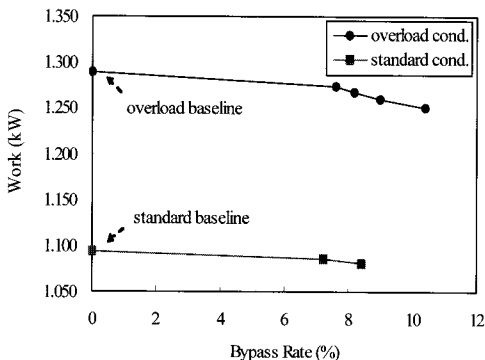


Fig. 5 Experimental results of compressor work over a range of bypass rate.

우 bypass율이 증가할수록 압축기의 소비 일 기존 시스템보다 감소하는 경향을 보이고 있다. 과부하 온도조건에서 bypass율이 10.4%일 때 압축기의 소비 일은 약 1.25 kW이며, 표준 온도조건에서는 bypass율이 8.4%일 때 압축기의 소비 일은 1.08 kW로 나타났다. 압축기 소비 전력의 감소는 단순히 응축 압력의 감소로 인해 발생하는 것이 아니라 압축비 및 흡입 냉매의 비체적 등과 관련이 있다. 본 연구에서는 에어컨에 SBT를 설치하고 모든 인자를 고정한 채 bypass율만 변화시켰으며, bypass율에 따라 과열도가 조금씩 변하기는 하였지만 증발기 출구에서 냉매의 과열도가 확보되었을 경우에만 데이터를 수합하였다. 실험의 결과 bypass를 하면 압축기 토출 온도가 내려가고, 응축 압력도 약간 감소하며 따라서 전반적으로 압축비 등이 감소하여 압축기 소비 전력이 어느 정도 감소한다고 판단된다.

Fig. 6은 과부하 온도조건 및 표준 온도조건에서의 bypass율에 따른 냉방성능을 나타내었다. 기존 시스템의 냉방성능은 과부하 온도조건에 대해서는 약 3.63 kW이며, 표준 온도조건에 대해서는 약 3.53 kW이다. 반면에 SBT 시스템의 경우 냉방성능은 bypass율에 따라서 과부하 온도조건에서는 3.64~3.52 kW의 범위이며, 표준 온도조건에서는 3.53~3.50 kW의 범위이다. Bypass 라인으로 냉매가 흐르게 되면 주 냉매 라인의 증발기로 흐르는 냉매유량은 bypass량만큼 감소되고 이로 인해 냉방성능은 기존 시스템의 냉방성능에 비해 감소될 여지가 있다. 그럼에도 불구하고 SBT 시스템의 냉방성능은 기존 시스템에 비해 거의 같거나 혹은 감소하더라도 bypass율이 10.4%일 때

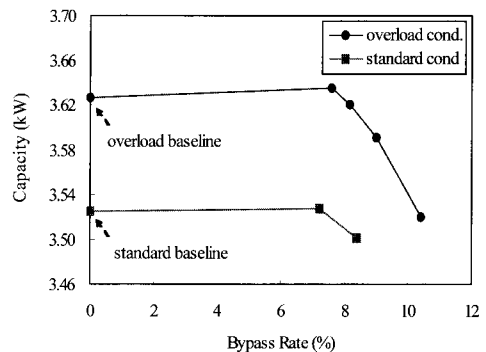


Fig. 6 Experimental results of cooling capacity over a range of bypass rate.

최대 3% 정도 감소하는 수준에 불과하며, SBT 시스템의 실제 적용 가능성을 높이는 결과라고 생각할 수 있다. Bypass를 했음에도 불구하고 냉방 성능의 감소가 거의 없는 이유는 bypass에 의해 팽창장치 입구에서 냉매의 과냉도가 증가하여 팽창장치를 통과하는 냉매의 유량이 증가되는 요인과 증발기 입구에서 냉매의 건도가 감소되어 냉매의 증발잠열이 증가된 요인이 함께 작용하여 냉방성능으로 나타났기 때문으로 판단된다. 그러나 bypass 율을 지나치게 증가시키면 주 냉매라인의 증발기로 흐르는 냉매유량이 상당히 작아지기 때문에 증발기의 냉방능력이 오히려 작아지므로 본 연구결과와 같은 적절한 bypass 율의 선정이 필요하다. 또한 Fig. 6은 bypass 율이 7% 보다 작을 경우 기존 시스템에 비해 냉방성능을 증가시킬 수 있는 가능성을 제시하지만 압축기의 토출 냉매온도의 감소에는 영향이 별로 없음을 Fig. 3에서 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5와 Fig. 6에 나타난 압축기의 소비 일과 증발기의 냉방성능을 이용하여 식(1)의 EER로 나타내었다. 기존 시스템의 EER은 과부하 온도조건에 대해서는 2.81이며, 표준 온도조건에 대해서는 3.23이다. SBT 시스템의 EER은 bypass 범위에 따라서 과부하 온도조건에서는 2.85~2.78의 범위이며, bypass 율이 증가할 수록 EER은 감소하였다. 표준 온도조건에서의 EER은 bypass 율에 따라서 3.25~3.24이다. 과부하 온도조건에서 10.4%의 bypass 율을 제외하면 SBT 시스템의 EER은 기존 시스템에 비해 거의 동등한 수준을 나타내고 있다.

이상의 결과를 종합하면, SBT 시스템은 기존

시스템에 비해 압축기의 토출 냉매온도를 감소시키고 동시에 시스템의 냉방성능과 EER을 최소한 동등한 수준으로 유지할 수 있다. 일례로 과부하 시스템에 비해 압축기의 토출 냉매온도를 감소시키고 동시에 시스템의 냉방성능과 EER을 최소한 동등한 수준으로 유지할 수 있다. 일례로 과부하 온도조건에서 8.2%의 bypass 량을 적용시키면 압축기의 토출 냉매온도는 기존 시스템의 88.3 °C보다 2.8 °C 낮은 85.5 °C가 되며, 냉방성능과 EER은 기존 시스템과 거의 같다. 특히 SBT 시스템이 응축기의 크기가 충분하지 않는 대용량 시스템에 적용될 경우 압축기의 토출 냉매온도가 감소될 가능성이 더욱 크다고 예측된다.

4. 결 론

본 연구는 압축기의 부하를 감소시키기 위하여 압축기의 토출 냉매온도를 감소시키는 것이며, 그 방법으로 subcooling bypass technology(SBT)을 적용하였다. 이를 시판되고 있는 창문형 에어컨에 적용하여 압축기의 토출 냉매온도, 응축압력, 시스템의 성능(냉방성능, 압축기의 소비 일, EER)을 평가하였으며, 기존 시스템의 성능과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SBT 시스템은 냉매의 bypass 율이 증가될 수록 압축기의 토출 냉매온도가 감소되며, 기존 시스템보다 압축기의 토출 냉매온도가 낮다.

(2) 과부하 온도조건에서 bypass 율이 8.2%일 때 압축기의 토출 냉매온도는 기존 시스템의 88.3 °C보다 2.8 °C 낮은 85.5 °C가 되었으며, 냉방성능과 EER은 기존 시스템과 거의 같다. 표준 온도조건에서도 냉방 성능과 EER은 기존 시스템과 거의 유사하였다.

(3) SBT 시스템은 소형에 비해 응축기가 충분하지 않는 대용량 시스템에서 효과가 클 것으로 예상되며, 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Cho, Y.I. and Bai, C., 2004, International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT), International Publication Number WO 2004/079279 A2, Refrigeration system Having an Integrated Bypass System.

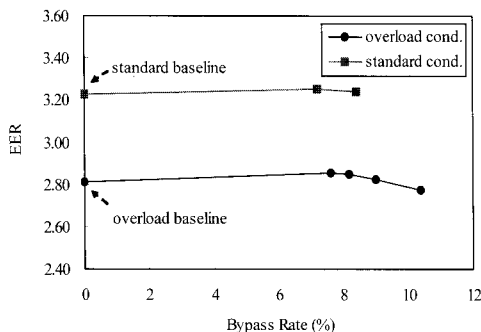


Fig. 7 Experimental results of EER over a range of bypass rate.

2. Yoneda et al., United States Patent, Patent No. US 6,314,742 B1, Double-Tube Type Heat Exchanger and Refrigerating Machine.
3. ANSI/ASHRAE 37, 1978, Method of Testing for Rating Unitary Air Conditioning and Heat Pump Equipment.
4. ARI-310/380, 2004, Standard for Packaged Terminal Air-Conditioners and Heat Pumps.
5. KS B ISO 15042-2006, Multi-Split System Air-Conditioners and Heat Pump.
6. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version 6.0, 2004, Standard Reference Data Program, National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Dr., Stop 2310, Gaithersburg, MD 20899-2310.
7. Kline, S. J. and McClintock, F. A. 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-8.