

자동차용 에어컨 압축기의 성능 향상에 대한 연구

김영신^{*†} · 유성연^{**} · 나승규^{*}

* 한라비스테온공조 기술연구소, ** 충남대학교 기계설계공학과

Study of Compressor-Performance Improvement in Automotive Air-Conditioning System

Young Shin Kim^{*†}, Seong Yeon Yoo^{**} and Seung Gyu Na^{*}

* R&D Center, Halla Visteon Climate Control Corp.,

** Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received January 28, 2015 ; Revised July 4, 2015 ; Accepted July 8, 2015)

Key Words: Air Conditioning System(에어컨), Compressor(압축기), Fuel Economy(연비), Automobile(자동차), Performance(성능), COP(성적계수)

초록: 본 연구의 목적은 자동차용 에어컨 시스템의 연비 개선을 위하여 압축기의 성능 향상을 도모하고자 하는데 있다. 압축기 성능은 자동차용 에어컨 압축기 전용 열량계를 이용하여 평가를 수행하였다. 압축기의 성능을 향상시키기 위하여 흡입 유량의 증대와 토출 사체적 축소를 검토하였으며, 각 개선 항목에 대한 평가를 진행하여 성능과 COP의 개선을 확인하였다. 흡입 유량을 증대했을 경우 저속 구간보다 고속구간에서의 성능 효과가 컸으며, 토출 사체적을 축소를 했을 경우 상대적으로 저속 구간의 성능 개선 효과가 컸다. 조합품의 경우 저속과 고속에서 전반적으로 균형 있게 개선되었으며, 토출측 온도가 가장 크게 개선되었다. 성능의 경우 저속에서 약 3.2%, 고속에서 약 8.3% 개선되었으며, COP는 저속에서 약 5.8%, 고속에서 약 6.2% 개선되었고, 토출 온도는 저속에서 3℃, 고속에서 5℃ 개선되었다.

Abstract: The purpose of this study is to realize compressor-performance improvements in the fuel economy of an automotive air-conditioning system. We conduct cooling performance tests in a compressor calorimeter test stand. To improve the cooling performance, we investigate the increase in the suction flow rate and the decrease in the discharge dead volume. Based on the results of the test, we found that the cooling capacity and the coefficient of performance (COP) of the compressors were improved as follows. The cooling performance improved greater at high speeds than low speeds in the case of an increase in the suction flow rate increase, and it improved more at low speeds than at high speed when there was a decrease in the discharge dead volume. When both of the above factors were included, we observed that the improvement effects were generally balanced for both high- and low-speed modes, and there was a significant improvement in the discharge temperature. The improvement was found to be about 3.2% at low speed, 8.3% at high speed during in cooling performance improvement, about 5.8% at low speed and about 6.2% at high speed in COP improvement, and there was a decrease of about 3℃ at low speed and a 5℃ decrease at high speed in discharge temperature.

- 기호설명 -

Φ : 압축기 단품 성능(kcal/hr)
 G_f : 열량계 냉매 유량 (kg/min.)
 h_{gs} : 압축기 흡입 엔탈피 (kcal/kg)

h_{fa} : 압축기 토출 포화 엔탈피 (kcal/kg)
 Φ_p : 열량계 배관 열손실 (kcal/hr)
 N_m : 토크미터 축 회전수 (rpm)
 M_{trq} : 토크미터 측정 토크 (kgf.m)
RPM : 압축기 회전수 (revolution per mimute)
 P_d : 토출 압력 (discharge pressure)
 P_s : 흡입 압력 (suction pressure)
 T_s : 흡입 온도 (suction temperature)

† Corresponding Author, ykim29@hvccglobal.com

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

자동차 산업에서 최근에 가장 크게 떠오르는 이슈는 연비라고 해도 과언이 아닐 정도로 모든 완성차 업체에서는 연비 개선에 심혈을 기울이고 있는 실정이다. 에어컨 시스템은 차량 연비에서 기여하는 바가 크기 때문에 완성차 업체에서는 연비 개선을 위하여 차체 중량 감소와 함께 에어컨 효율 향상에 관심을 가지고 개선을 진행하고 있다. 따라서 과거의 에어컨 냉방 성능은 실내 온도만을 목표로 개발되어 왔으나, 최근에는 차량 연비까지 고려한 냉방 성능을 육성하는 단계로 발전되어 오고 있다. 범위를 좁혀서 차량용 에어컨 압축기 측면에서 살펴보면, 과거에는 압축기의 토출 용량을 증대하면서 실내 온도를 육성하였으나, 최근에는 에어컨 시스템 성능 향상을 통하여 압축기의 최대 토출 용량을 오히려 축소하면서도 목표 냉방 성능을 만족하는 수준으로까지 기술 발전을 이루어내고 있는 추세⁽¹⁾이다. 따라서 압축기의 토출 용량 증대 없는 성능 개선은 에어컨 시스템 최적화를 통하여 차량 연비의 개선으로까지 이어지고 있으며, 따라서 차량용 에어컨 시스템 설계 시 압축기의 토출 용량 증대를 배제한 단품 성능 개선 요구가 당연시 되는 현실이다.

최정원⁽²⁾은 자동차 에어컨 압축기의 개선을 통한 에어컨 성능 향상에 대해 실험을 진행하였으며, 유분리기를 적용했을 때는 유분리기가 없을 때보다 압축기 오일 함유량을 줄일 수 있으며, 이로 인하여 실차 에어컨 성능이 향상됨을 알아 냈고, 차용웅 등⁽³⁾은 에어컨 시스템의 고온 고압측 냉매와 저온 저압측 냉매의 열전달 특성을 고려한 배관 설계를 통하여 시스템 성능 향상을 도모하였으며, 이를 통하여 압축기 최대 토출 용량을 줄임으로 연비를 개선시킬 수 있게 되었음을 실험을 통하여 확인하였다. 이창원 등⁽⁴⁾은 파워 트레인 상태와 에어컨 상태를 반영한 가변 압축기 제어 로직을 개발하여 가속구간과 감속구간의 에어컨 제어를 통하여 연비 향상을 이루었으며, 이상익 등⁽⁵⁾은 압축기 관점에서 연비를 접근하였으며, 동일한 최대 토출 용량을 가지는 고정식 압축기와 가변식 압축기를 동일한 차량에서 연비 상호 비교 평가를 진행하여 결과를 발표한 바 있으며, 하경표 등⁽⁶⁾은 연비 평가 조건에서 고정식 압축기와 가변식 압축기의 토크 특성에 관하여 연구하는 등 다양한 실험이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 차량용 에어컨 압축기의 단품 성능 개선을 통하여 에어컨 시스템 성능을 향상시

키고, 궁극적으로 실차 상태의 연비개선을 도모하고자 실험을 진행하였다. 본 연구에 사용된 압축기는 가변 사판식 외부제어 압축기로서 압축기 전용 성능 시험장비를 통하여 실험을 진행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

차량용으로 사용되는 에어컨 압축기의 단품 성능 평가는 차량용 에어컨 압축기 성능 평가를 위해 제작된 전용 열량계에서 이루어진다. 본 실험에서 사용한 열량계는 KS B6565에 준하여 $\pm 1\%$ 이내의 평가 신뢰성을 확보하도록 제작되었으며, 다양한 종류의 차량용 에어컨 압축기에 대한 단품 성능 평가를 수행할 수 있다. Fig. 1은 본 실험을 진행한 2차 냉매 방식 압축기 열량계의 개략도를 보여주고 있다. 본 열량계에서 성능 평가는 전체 구성 시스템에서 압축기만을 교체하면서 평가를 진행하며, 냉매가 순환되는 시스템상 각부품의 입력과 출력단에서의 온도, 압력을 측정하고 시스템을 순환하는 냉매의 유량과 구동 모터를 통하여 구동되는 압축기의 토크를 측정하여 압축기의 냉방 능력과 소비 동력을 계산하게 된다. 또한 이를 통하여 압축기의 COP(Coefficient Of Performance)를 계산할 수 있다.

압축기 성능 평가용 열량계에서 냉매 유량의 측정은 열량계를 순환하는 냉매의 상태가 가장 안정적인 구간인 응축기와 팽창밸브 사이에서 액상 상태의 냉매가 흐르는 배관에 질량 유량계를 설치하여 측정하였으며, 성능 개선 전, 후품에 대하여 비교 분석을 수행하였다.

압축기의 소요 동력은 압축기 효율을 계산하기 위하여 필요한 항목으로서 본 실험에서는 압축기를 회전하기 위하여 사용되는 구동 모터와 압축기 사이에 벨트 구동을 통하여 연결되는 중간 축을 구성하였으

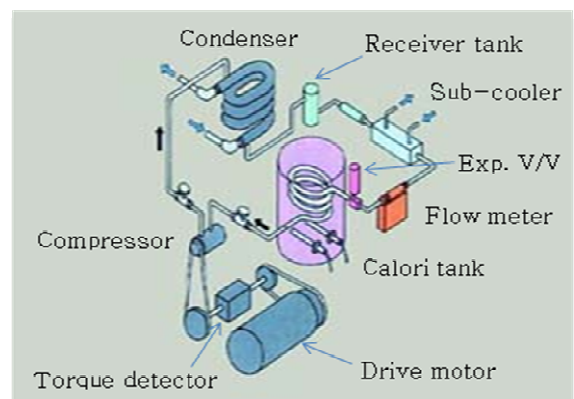


Fig. 1 Schematic of compressor calorimeter stand

며, 중간 축상에 토크미터를 설치하여 압축기 회전에 따르는 토크를 계산하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 동일한 최대 토출 용량을 가지는 압축기를 이용하여 실험을 진행하였으며, 현재 완성차 업체에서 생산하고 있는 양산 제품을 기준 사양으로 삼았으며, 개선품은 동일한 사양의 제품에서 실험 변수인 흡입 밸브, 밸브 플레이트, 실린더단을 변경하면서 개선 여부를 확인하고자 하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 압축기의 기본적인 사양을 보여주고 있으며 7개의 피스톤이 적용된 편두 가변 사판식 외부 제어 압축기를 이용하여 평가를 수행하였다.

압축기 단품 성능 시험기에서 각각의 압축기에 대하여 실차 상태의 저속 운전 구간과 고속 운전 구간에 대한 조건을 수립하여 평가를 수행하였다. Table 2는 본 실험에서 사용한 평가 조건을 정리한 것으로서 압축기 회전수와 함께 냉매 유입량과 냉매 토출 부하를 일정하게 유지시키기 위하여 압축기로 유입되는 냉매의 압력과 온도를 제어하고, 토출 냉매의 압력을 제어한 상태에서 실험을 진행하였으며, 측정 값의 신뢰성을 최대한 확보하기 위하여 압축기 열량계에서 압축기만을 교체하면서 진행하였으며, 압축기 외에 다른 모든 조건은 동일하게 설정하여 실험을 수행하였다.

압축기의 성능에 중요한 요소중의 하나인 냉매량과 냉동 오일의 양을 결정하기 위하여 각각의 단품에 대한 본 시험 전에 사전 평가를 통하여 적정한 냉매량과 냉동 오일량을 결정하게 된다. 본 실험에서 사용한 냉매는 현재 완성차 업체에서 가장 보편적으로 널리 사용중인 R134a 냉매이며, 냉동 오일은 PAG 오일을 사용하였다.

본 실험에서 단품 성능 평가 결과는 주어진 조건의 압력과 온도, 압축기 회전수에 대하여 조건이 안정된 상태에서 10분 동안의 측정값의 평균값으로 얻어지게 된다. 데이터 계측 중에 외부 영향 또는 압축기 내부의 이상 현상으로 조건이 규정된 제한치를 벗어나게 되면 처음부터 안정구간이 10분이 될 때까지 반복적으로 계측을 다시 하게 된다.

Table 1 Specification of compressor

Compressor Type	Variable Swashplate
Cylinder No.	7
Max. Displacement(cc/rev)	180

3. 실험결과 및 고찰

3.1 개선 사양 비교

압축기 단품 성능을 향상시키기 위하여 본 실험에서는 두 가지 개선안을 채택하였다. 첫번째는 압축기로 유입되는 냉매 유량을 증대시키는 것이며, 두번째는 압축기가 압축행정에 있을 때 토출측에 사체적을 줄이는 것이다. 개선 사양 시료의 제작 시 토출 유로측의 저항을 줄이기 위하여 토출 홀의 크기를 키운 사양은 기본적으로 포함되도록 시료를 제작하였다.

첫번째 개선안인 압축기로의 유입 냉매량을 증대시키기 위하여 압축기 실린더에 형성되어 있는 냉매 흡입측 밸브 안착면의 가공 형상을 변경하였다. 통상적으로는 흡입 유량 증대를 위하여 밸브 흡입 단차를 증대시키는데, 이는 성능은 개선되었으나 단차 증대로 인하여 흡입 밸브의 파손이나 밸브 플레이트와 흡입 밸브와의 타격 소음 증대 등 내구성능에 악영향을 주게되므로 내구성능에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 밸브 열림 단차 높이는 그대로 유지하면서 계단 형상의 실린더 형상을 원뿔형상으로 변경하여 흡입 밸브의 열림량을 확보하여 냉매 유량의 증대를 도모하였으며, 이때 실린더 단차 변화에 따른 흡입 밸브의 형상도 수정이 필요하고 흡입밸브의 내구성에 대해서는 CAE를 통해 검토하였다.

두번째 개선안인 토출측 사체적을 줄이기 위해서는 토출 밸브와 피스톤 사이의 간극을 줄이는 것이 주요한 인자이나, 피스톤 끝단과 밸브간 간극이 확보되지 않는다면 압축기 토출 행정시에 피스톤이 밸브에 충격을 가해서 압축기 불량을 유발하게 되므로 이를 감안한다면 최소 간극을 줄이는 것은 위험한 발상이 된다. 따라서 본 실험에서는 토출 밸브와 피스톤 사이에 위치한 밸브 플레이트의 토출 홀 사체적을 줄이기 위하여 밸브 플레이트의 두께를 줄이는 안을 채택하였으며, 플레이트 두께는 벤치마킹과 생산성을 고려하여 결정하였다.

토출 사체적 축소의 경우 밸브 플레이트의 두께를 축소하였는데 밸브 플레이트 두께를 줄일수록

Table 2 Test condition of compressor calorimeter

Test condition	#1	#2
Comp. RPM	800	2000
Pd(kg/cm ² .g)	19.4	15.3
Ps(kg/cm ² .g)	4.08	1.84
Ts(°C)	25.8	8.9

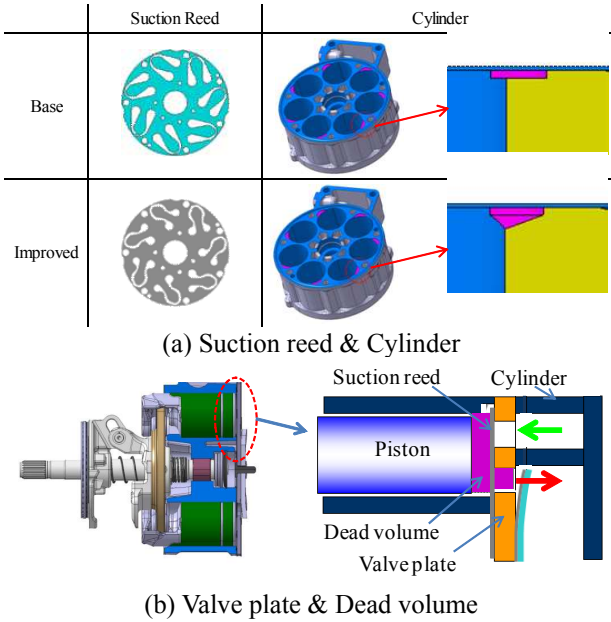


Fig. 2 Comparison of compressor improvement item

단품 성능은 향상이 되겠지만 밸브 플레이트의 평면도 유지가 어려워 결과적으로 토출 밸브와 밸브 플레이트간 들뜸으로 인한 누설을 유발하게 되어 품질 문제를 초래할 수 있으며, 제조 과정에서도 비용 증가 및 생산성 저하를 가져올 수 있다. 따라서 생산성과 성능 개선을 모두 고려한 사양으로 최종 개선 사양을 결정하게 되었다. 또한 실린더 흡입 단차의 변경에 따른 내구성 확보를 위하여 흡입 밸브의 형상 수정도 병행하였다. Fig. 2는 양산중인 사양과 개선안에 대한 형상 및 사양 비교를 나타내고 있다.

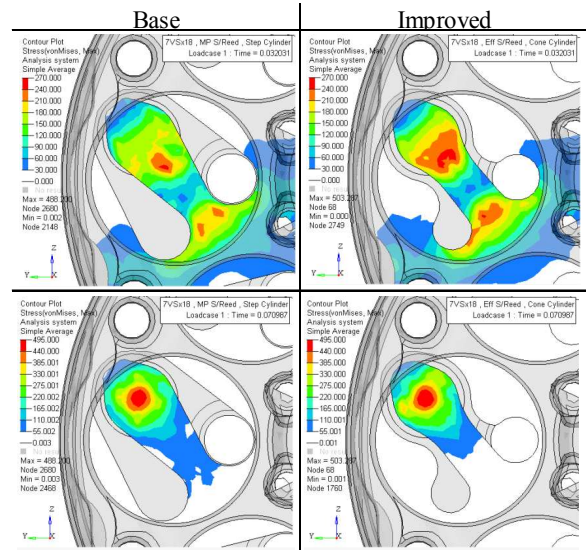
3.2 CAE 해석

흡입 유량의 증대를 위하여 실린더 흡입 밸브 단차 형상 변경에 대한 위험 요인으로는 내구성능 약화가 우려된다. 관련하여 내구 성능을 확보할 수 있는 흡입 밸브의 최적 사양을 결정하기 위하여 CAE(Computer Aided Engineering) 해석을 수행하였다. 해석은 동일한 압축기에서 실린더 단차와 흡입 밸브 형상 차이만을 고려하였으며, 압축기 내구 시험 조건중 흡입 밸브 내구에 가장 크게 영향을 주는 조건인 고압 내구 조건과 고속 내구 조건에 대하여 수행하였다.

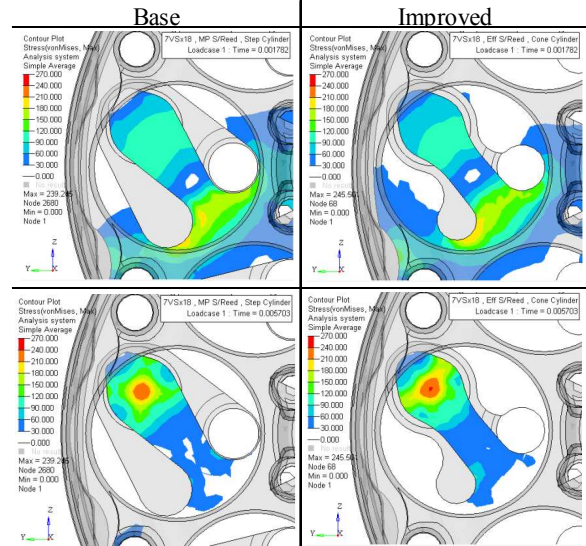
Fig. 3과 Table 3은 CAE 해석 결과로서 고속 조건에서는 개선 사양이 밸브 목부에서는 약 13MPa우세하며, 포트 중앙에서는 약 7MPa 열세로 나타났으며, 고압 조건에서는 개선 사양이 목부에서 약 7MPa 정도 열세이며, 포트 중앙에서도 약 12MPa 정도

Table 3 Result of CAE simulation for compressor durability mode

Suction reed	Cylinder	Unit : Stress(Mpa)			
		High pressure		High speed	
		Root	Port Center	Root	Port Center
Base	Step type	243	489	219	241
Improved	Cone type	250	501	206	247



(a) Result of high pressure condition



(b) Result of high speed condition

Fig. 3 Result of CAE simulation for compressor durability mode

열세로 나타나지만 본 해석에서 사용된 밸브의 내구 허용 응력값이 약 600 MPa로서 개선 사양 밸브와 실린더 조합품이 양산 사양 대비 동등한 수준의 내구 성능을 확보하고 있음을 확인하였다.

3.3 단품 성능

압축기 단품 열량계에서 주어진 조건에서의 실험을 통하여 계측한 값으로부터 아래의 계산식을 통하여 성능 개선품과 양산품간의 단품 상태의 냉방 능력과 소요 동력 및 COP를 구할 수 있다.

$$\Phi = Gf(hgs - hfa) + \Phi p \tag{1}$$

$$HP = \frac{2\pi \times Nm \times Mtrq}{60 \times 76.04} \tag{2}$$

$$COP = \frac{\Phi/860.421}{HP/1.3405} \tag{3}$$

단품 성능 평가는 베이스 사양인 양산 사양과 흡입측 냉매 유량 증대를 위한 실린더 흡입 단차 형상 변경 및 흡입 밸브 형상 변경 사양, 토출 사체적 축소를 위한 밸브 플레이트 두께 축소 사양, 흡입 유량 증대와 토출 사체적 축소 동시 적용 사양에 대하여 각각 실험을 진행하였다.

흡입측 냉매 유량 증대를 위한 실린더 흡입 단차 형상 변경 및 흡입 밸브 형상 변경 사양에 대한 단품 성능 평가 결과 양산 사양 대비해서 전반적으로 성능 개선이 됨을 알 수 있었으며, 저속구간에서 성능은 약 2.7%, COP는 약 5.9%, 토출 온도는 약 1°C 개선이 되었고, 고속구간에서는 성능은 약 11.8%, COP는 약 9.1%, 토출 온도는 약 4°C 개선 효과를 얻게 되었다. 저속 구간보다 고속 구간에서의 성능 개선이 월등하게 좋게 나타나는데 이는 흡입되는 냉매의 양이 커질수록 성능 개선 효과가 비례하여 증가됨을 알 수 있다.

토출 사체적 축소를 위한 밸브 플레이트 두께 축소 사양의 경우에도 전반적으로 성능 개선 효과가 나타남을 알 수 있었으며, 저속 구간의 경우 성능이 약 4.2%, COP는 약 3.8%, 토출 온도는 약 1°C 개선 되었으며, 고속 구간의 경우에는 성능이

약 7.1%, COP는 약 4.4%, 토출 온도는 약 2°C 개선 되었다. 이를 통하여 사체적의 경우에는 고속 구간보다는 저속 구간에서 성능에 더 크게 영향을 주게 됨을 알 수 있었다.

흡입 냉매 유량 증대를 위한 실린더 흡입 단차 형상 변경 및 흡입 밸브 형상 변경과 토출 사체적 축소를 위한 밸브 플레이트 두께 축소 사양을 동시에 적용한 경우에는 저속구간에서 성능이 약 3.2%, COP는 약 5.8%, 토출 온도는 약 3°C 개선 되고 고속구간에서는 성능이 약 8.3%, COP는 약 6.2%, 토출 온도는 약 7°C 개선됨을 알게 되었다.

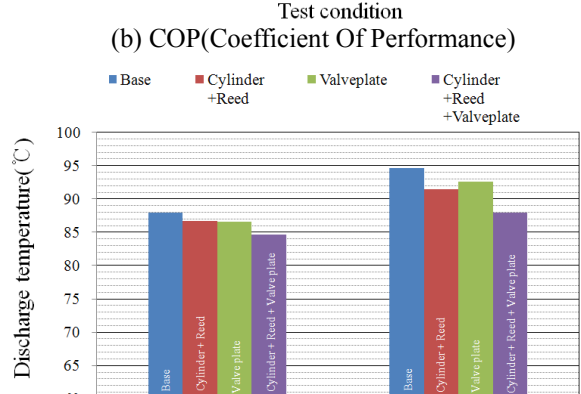
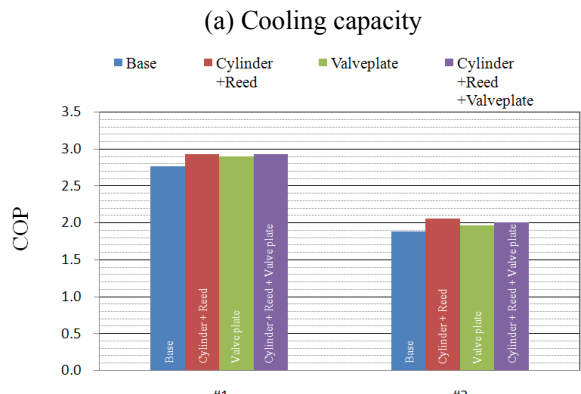
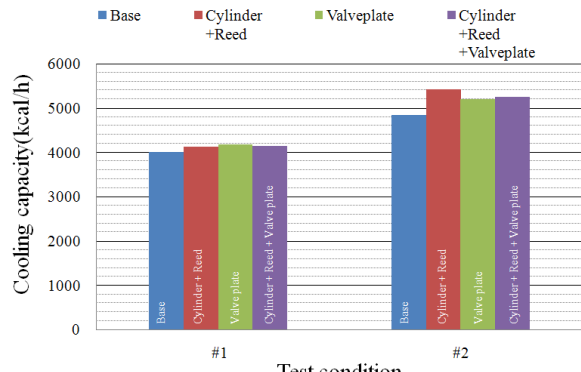


Table 4 Results of compressor performance test

Test condition		Base	Cylinder+Reed	Valveplate	Cylinder+Reed+Valveplate
#1	Capacity (kcal/h)	4010	4120	4176	4137
	COP	2.76	2.93	2.90	2.92
	Discharge Temp. (°C)	88	87	87	85
#2	Capacity (kcal/h)	4848	5420	5192	5248
	COP	1.88	2.05	1.97	2.00
	Discharge Temp. (°C)	95	91	93	88

Fig. 4 Result of compressor performance test

두 가지 사양을 동시에 적용했을 때에는 저속 구간과 고속 구간 모두 개선의 폭이 한가지 사양만을 적용했을 때 보다 최대 개선치는 낮아졌으나 압축기 운전 조건에 영향을 받지 않으면서 COP가 약 6% 수준까지 개선이 되었고, 시스템 성능 및 시스템 구성 부품 사양 결정에 영향을 주는 압축기 토출 온도의 경우에 상당한 수준의 개선을 얻게 되었다. Table 4와 Fig. 4는 압축기 성능 개선 사양에 따른 압축기 단품 성능 평가 결과를 보여주고 있다.

본 실험의 결과를 통하여 압축기의 토출 용량을 증대하지 않으면서도 압축기 성능 개선을 얻어 낼 수 있게 되었다. 또한 흡입 냉매 유량 증대 범위와 토출 사체적 축소 범위를 적절히 선정 및 조합하게 된다면 향후 차량용 에어컨 시스템 성능 개선을 진행함에 있어서 차량별 지역별로 요구되는 필요한 구간에 대한 성능 육성 시 압축기 선정의 기준으로 하나의 개선 지표가 될 수 있을 것으로 기대한다.

또한 본 연구 성과를 바탕으로 각각의 개선품 결과와 개선 조합품에 대한 효과의 차이에 대해서 추가적으로 원인 분석 및 개선 연구 필요성을 알게 되었다.

4. 결 론

실차 연비에 직접적인 영향을 주는 에어컨 압축기의 단품 성능 개선을 진행하였으며, 압축기 단품 성능 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압축기로 유입되는 냉매의 유량을 증대시키기 위하여 실린더 흡입 단차 형상 변경 및 흡입 밸브 형상 변경을 통하여 성능개선이 되었으며, 저속에서 약 2.7%, 고속에서 약 11.8% 성능 개선

을 보였다.

(2) 압축기 토출 사체적을 줄이기 위한 밸브 플레이트 두께 축소를 통하여 압축효율의 증대로 인한 성능개선이 되었으며, 저속에서 약 4.2%, 고속에서 약 7.1% 성능 개선을 보임을 확인하였다.

(3) 압축기의 흡입저항과 토출 사체적을 동시에 줄이면 성능은 저속에서 약 3.2%, 고속에서 약 8.3% 개선됨을 보이며, 이때 COP는 저속에서 약 5.8%, 고속에서 약 6.2% 향상되며 토출 온도는 저속에서 약 3°C, 고속에서 약 7°C 낮아져 시스템 효율 향상에 기여하게 됨을 확인하였다.

참고문헌 (References)

- (1) Yoo, S. Y. and Kim, Y. S., 2011, "An Experimental Study on the Performance Characteristics of Car Air-conditioning Swash Plate Type Compressors," *SAREK*, pp. 581~585.
- (2) Choi, J. W., 2004, An Experimental Study on the Cooling Performance Improvement in an Automotive Air Conditioning System, Ph.D Thesis, Chungnam National University, Daejeon, Korea.
- (3) Cha, Y. W., Byon, S. C., Park, M. H., Kim, J. Y. and Ko, C. S., 2009, "A Study of Subcool Acceleration Air Conditioning System," *KSAE*, pp. 1372~1377.
- (4) Lee, C. W., Kim, J. W., Jang, K. L. and Jeong, G. S., 2010, "Development of Speed Sensitive Air Conditioning System for Fuel Economy and Power Performance," *KSAE*, pp. 1141~1150.
- (5) Lee, S. I. and Kim, S. J., 2005, "Investigation of Variable Displacement Swashplate Compressor Effects on Fuel Economy," *KSAE*, Vol. 3, pp. 1824~1832.
- (6) Ha, K. P., Gong, J. K. and Kim, W. T., 2006, "Development of Engine Torquemeter for In-vehicle Application and Parametric Study on the Fuel Consumption Contribution," *KSAE*, pp. 77~82.