

가변 사판식 압축기의 탑 클리어런스 측정 방법 및 신뢰성 확보에 관한 연구

Study on the Measuring Method and Reliability of Top Clearance of Variable Swashplate Type Compressor

김영신(Young-Shin Kim)[†], 나승규(Seung-Kyu Na)

(주)한온시스템 연구개발본부

Hanon Systems R&D Center, 95, Sinilseo-ro, Daedeok-gu, Daejeon, 34325, Korea

(Received October 31, 2015; revision received January 30, 2016; Accepted: January 30, 2016)

Abstract In this experimental study, the effects of top clearance on the performance of automotive a/c compressor were studied. Top clearance measuring device was also developed to ensure the reliability using vacuum conditions to secure constant control of top clearance without external environmental influence. Our results revealed that the improvements in compressor performance according to different top clearance values using the same compressor and same operator were about 4.12% at 800 rpm and about 7.8% at 2,000 rpm in 0.243~0.252 mm of top clearance compared to 0.431~0.456 mm of top clearance. To confirm the consistency in measuring top clearance affecting compressor performance, the top clearance measuring device was developed in this study using a vacuum pump. After performing reliable tests repeatedly, the distribution of measuring values under this device was within 0.99~1.83%, indicating that the constant test data in compressor performance was not affected by any other external environment.

Key words Top clearance(피스톤 탑 클리어런스), Compressor(압축기), Performance(성능), Dead volume(사체적)

[†] Corresponding author, E-mail: a95006@naver.com

기호설명

RPM	: 압축기 회전수 [Revolution per Minute]
Pd	: 압축기 토출압력 [kg/cm^2 , g]
Ps	: 압축기 흡입압력 [kg/cm^2 , g]
Ts	: 압축기 흡입온도 [$^{\circ}C$]
Q	: 냉방 성능 [kcal/h]
HP	: 압축기 소요동력 [HP]
COP	: 성적 계수 [Coefficient of Performance]
G_f	: 냉매 유량 [kg/h]
h_{gs}	: 압축기 흡입 엔탈피 [kcal/kg]
h_{fa}	: 압축기 토출 포화엔탈피 [kcal/kg]
Φ_p	: 배관 열손실 [Evap. Pipe Heat Leak]
N_m	: 토크미터 축 회전수 [rpm]
$Mtrq$: 토크미터 측정토크 [$N \cdot m$]

1. 서 론

21세기에 접어들면서 글로벌 자동차 업체에서는 포화 상태에 다다른 자동차 시장에서 매출을 지속적으로

증대시키기 위하여 연비 향상과 배출가스 저감 등 지구 온난화 방지와 같은 친환경 관련 기술 개발에 총력을 기울이고 있다. 이러한 과도한 기술 경쟁으로 인하여 최근 유럽의 일부 자동차 업체의 디젤 차량 배출가스 조작과 연비 조작과 같은 비정상적인 방법까지 동원되는 현실 상황에 직면해 있다.

기존 시장의 수정은 물론 글로벌 신시장 개척을 위하여 완성차 업체뿐만 아니라 차량용 에어컨 업체에서도 에어컨 성능을 기본적으로 만족하면서 차량 동력 소모를 최소화하는 부품 개발 및 시스템 육성에 기술력을 집중하고 있는 상황이다. 특히 차량용 에어컨 압축기는 에어컨 가동 시 차량의 엔진으로부터 많은 동력을 소모하게 하여 연비 저하의 주원인으로 지적받고 있다. 따라서 최근에는 냉방 성능을 향상시키면서도 압축기의 소요 동력 상수를 최소화하여 효율을 향상시킴으로서 실질적으로 차량 연비를 향상시키고자 하는 연구가 꾸준히 이어져오고 있는 추세이다.

Kim et al.⁽¹⁾은 국내 가변 사판식 압축기를 대상으로 개발 시기가 다른 압축기에 대하여 성능 평가를 수행

하여 성능 위주의 개발에서 효율 위주로 개발 경향이 변화하고 있음을 알아내었으며, 최근에는 압축기의 토출 용량을 증대시키지 않으면서 사체적 축소와 흡입 냉매 용량의 증대 등을 통하여 효율을 향상시키는 연구를 수행⁽²⁾하기도 하였다.

이러한 에어컨 관련 효율 및 연비 개선 연구는 압축기에만 한정되지 않고 에어컨 시스템 차원은 물론 완성차에서도 다양한 방면에서 적극적인 연구가 이루어지고 있는 현실이다. Cha et al.⁽³⁾은 에어컨 시스템 배관에 이중 열교환기 개념을 도입하여 냉방 성능을 향상시킴으로써 성능이 향상된 만큼 압축기의 최대 토출 용량을 줄일 수 있도록 하여 완성차 연비를 향상시키고자 하였으며, Lee S.I. et al.⁽⁴⁾은 가변 사판식 압축기와 고정 사판식 압축기에 대한 연비 기여도에 대해서 동일한 차량상태에서 비교평가를 수행하여 가변 사판식 압축기가 연비에 효과가 있음을 확인하였다. 또한 Ha et al.⁽⁵⁾는 차량 상태에서 각종 보기류 부품들의 연비 기여도를 확인하기 위하여 토크미터를 활용하여 엔진 출력을 추가로 요구하는 부품들의 구동력 소모량 측정에 대하여 연구하였으며, Lee et al.⁽⁶⁾은 차량의 주행 상태에 따라서 에어컨의 부하를 달리하도록 로직을 개발하여 엔진 동력이 많이 소모되지 않는 구간에서 에어컨 냉기를 저장하였다가 엔진 동력 소모가 큰 구간에서는 에어컨 작동을 하지 않고, 저장된 냉기를 사용하여 차량 연비 개선을 도모하고자 하였다.

앞선 압축기 성능 개선 연구를 살펴보면 사판식 압축기의 성능에 사체적이 상당한 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 사판식 압축기를 개발하면서 성능에 직접적인 영향을 미치는 사체적에 관심을 두어 연구를 수행하였으며, 압축기 설계에서 주요 성능 인자로 작용하는 피스톤 탑 클리어런스별 성능 평가를 통하여 탑 클리어런스가 성능에 미치는 기여도에 대하여 확인하고자 하였고, 압축기의 조립시 조립 작업자마다 측정 산포를 보여 압축기 성능 평가 결과에 대한 신뢰성을 떨어뜨리는 주요 원인으로 지목받고 있는 탑 클리어런스의 측정 방법 개선을 위하여 측정 환경에 영향을 받지 않으면서 측정 결과 값에 신뢰성을 확보 할 수 있는 탑 클리어런스 측정 장치를 개발하고자 연구를 수행하였다.

2. 실험장비 및 실험방법

차량용 에어컨에 사용되고 있는 사판식 압축기에서 탑 클리어런스는 압축 행정의 마지막에 피스톤이 상사점에 도달하는 지점에서 피스톤 끝단과 흡입 밸브 간의 거리를 의미하며, 탑 클리어런스가 일정 관리 수준보다 클 경우에는 피스톤이 상사점까지 도달하였을 경우에도 압축되지 못하는 체적인 사체적이 증가하여

체적효율의 하락을 가져오며 이는 곧 성능의 저하를 의미한다. 반면에 탑 클리어런스가 일정 관리 수준이하로 작을 경우에는 압축 과정의 상사점에서 피스톤 끝단과 흡입밸브 간 접촉이나 타격이 발생할 수 있는데, 이러한 경우 소음이 발생하거나 흡입 밸브 또는 피스톤 파손 등 내구성에 심각한 문제를 초래하게 된다. 따라서, 탑 클리어런스는 각종 부품들의 조립으로 이루어지는 차량용 에어컨 사판식 압축기의 설계에서 일정한 수준의 유지 관리가 필요한 중요 설계 인자이다. 그럼에도 불구하고 기존에 압축기 조립시 수행되어 온 탑 클리어런스 측정 방법에 따르면, 측정자에 따라서 심한 경우 0.1~0.2 mm까지도 산포를 가지게 되어 압축기 성능 결과에 대한 신뢰성을 떨어뜨리는 결과를 초래하기도 한다. Fig. 1은 사판식 압축기의 탑 클리어런스에 대해 이해하기 쉽도록 사판식 압축기의 주변 구성 부품들과 비교하여 설명하고 있으며, 본 연구에서 탑 클리어런스별 성능 평가를 위하여 사용된 압축기는 현재 국내에서 양산하고 있는 6개의 피스톤으로 구성된 편두 가변 사판식 압축기로서 Table 1에서 기본적인 사양을 보여주고 있다.

차량용 에어컨 압축기의 단품 성능 평가는 압축기 성능 평가를 위해 제작된 전용 열량계에서 이루어지며, 본 실험에서 사용한 압축기 성능 평가용 열량계는 이중 냉매 방식을 적용하였으며, KS B 6565에 준하여 제작되었다. 본 열량계의 측정 오차는 최대 3%를 넘지 않으며, 제조사가 다르며 최대 토출 용량이 다른 다양한 종류의 차량용 에어컨 압축기에 대한 단품 성능 평가를 수행할 수 있다.

차량용 에어컨 압축기의 성능은 압축기로 유입되는 흡입 냉매의 온도와 압력 및 압축기 회전수와 압축기 토출 압력을 일정하게 유지시킨 상태에서 압축기가 압축 토출한 냉매가 증발기를 통과하면서 열교환 시킨 냉

Table 1 Specification of tested compressor

Compressor Type	Variable Swashplate
Cylinder No.	6
Max. Displacement	142 cc/rev.

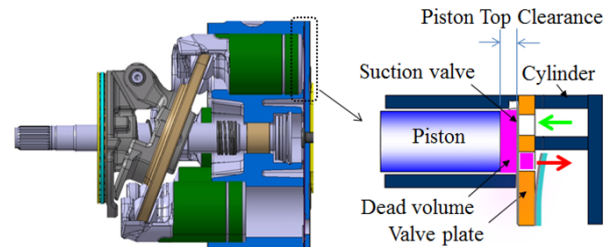


Fig. 1 Detail view of piston top clearance.

Table 2 Conditions of performance test

Conditions	#1	#2
RPM	800	2,000
Pd(kg/cm ² , g)	19.4	15.3
Ps(kg/cm ² , g)	4.07	1.82
Ts(°C)	25.7	8.6

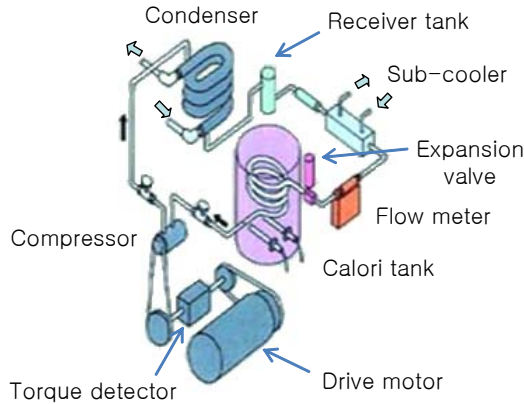


Fig. 2 Schematic of compressor calorimeter.

방 부하를 측정하여 계산해낸다. 압축기의 성능에 영향을 주는 오일의 경우 별도의 기준 조건에서 오일 순환량을 일정하게 맞춘 상태에서 본 시험을 진행하게 되며 오일 순환량 측정을 위한 별도의 측정기가 유량계와 같은 위치에 설치되어 있다. Fig. 2는 압축기 성능 평가용 열량계의 개략도를 보여주고 있으며, 식(1)~식(3)은 압축기 열량계를 통하여 측정된 값과 R134a 냉매선도로부터 계산되어진 압축기의 최대 냉방 성능과 COP 및 구동 동력을 계산하는 식이다. 압축기 단품 성능 평가는 차량의 신호 대기과 같은 정차 상태나 복잡한 시내 주행 상태를 모사한 저속 조건과 교통이 원활한 도로에서의 주행 상태를 모사한 고속 조건에 대하여 평가를 수행하였으며, 가변 사판식 압축기 일지라도 성능은 최대 토출 용량을 기준으로 평가를 진행하며, 본 연구에서는 외부 환경 영향을 최소화하기 위하여 제어밸브 전류를 최대 토출 용량 허용치로 고정하였다. Table 2에 세부 평가 조건을 명기하였다.

$$Q = Gf(h_{gs} - h_{fa}) + \Phi_p \quad (1)$$

$$HP = \frac{2\pi \times Nm \times Mtrq}{60 \times 76.04} \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q/860.421}{HP/1.3405} \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 탑 클리어런스별 압축기 성능 평가

탑 클리어런스가 압축기 성능에 미치는 영향에 대해 확인하기 위해 압축기의 탑 클리어런스에 변화를 주면서 평가를 진행하였다. 압축기에서 탑 클리어런스를 조정하기 위해서는 직접적으로 연관이 되는 부품인 피스톤의 길이에 변화를 주면서 탑 클리어런스를 맞춰야 되겠지만, 통상적으로 압축기 제조사에서는 양산성과 비용 측면을 고려하여 피스톤을 조정하여 탑 클리어런스를 맞추지 않고 조립 부품 중에서 상대적으로 생산성이 양호한 부품을 이용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 탑 클리어런스 값을 Fig. 3에서 보는 바와 같이 압축기 내부에서 구동부와 함께 회전하고 있는 베어링을 지지해주는 역할을 하는 레이스의 두께로서 조정하였다. 레이스의 두께를 달리하면 압축기 내부의 축방향 길이가 변화하기 때문에 결과적으로 피스톤의 길이에 변화를 준 것과 동일한 결과를 가져오는데 착안하였다. 이때 레이스의 두께는 생산성을 고려하여 통상 50 μm 전·후 사이로 구분이 되도록 제작을 하고 있다. 본 연구에서는 실험에 사용되는 가변 사판식 압축기의 탑 클리어런스 규격의 중간 값과 상한 값에 대한 압축기 성능을 평가하고자 하였다. 탑 클리어런스 하한치에 대한 평가는 앞서 언급한 소음과 파손 등 제품상의 문제가 발생할 것을 우려하여 제외 하였으며, 제품의 실험간 조립 산포를 최소화하기 위하여 동일한 압축기를 이용하여 평가를 진행하고 동일한 실험자가 탑 클리어런스를 측정하면서 평가를 진행하였다.

Table 3은 Table 2의 실험 조건을 기준으로 탑 클리어런스 크기에 따라 평가를 수행한 압축기의 성능 평가 결과이며, 저속 조건과 고속 조건 모두에서 탑 클리어런스가 커질수록 압축기 성능은 반대로 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 평가 결과로부터 Fig. 4에서

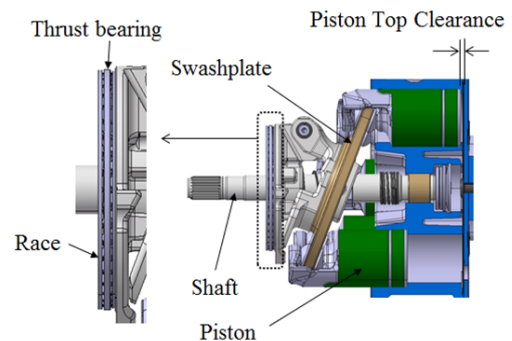


Fig. 3 Detail view of race for piston top clearance fitting.

Table 3 Results of compressor performance test

PEC(mm)		0.243	0.252	0.431	0.456
Capacity	#1	4.280	4.191	4.096	4.040
(kW)	#2	5.660	5.529	5.244	5.135

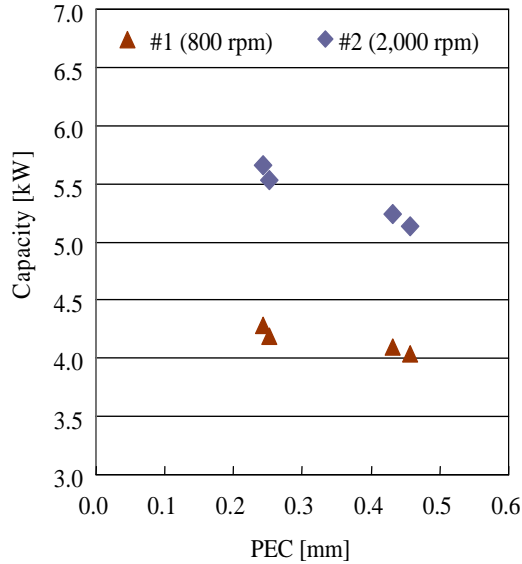


Fig. 4 Results of performance test.

보는 것과 같이 탑 클리어런스 크기에 대한 압축기 성능 평가 결과 값이 선형적인 경향성을 띠고 있음을 확인 할 수 있었으며, 평가 결과를 바탕으로 탑 클리어런스의 크기에 따른 성능은 탑 클리어런스 크기가 0.243~0.252 mm에서 0.431~0.456 mm로 증가할 때 저속 조건인 #1 조건에서 4.28~4.191 kW에서 4.096~4.04 kW로 평균 약 4.12% 저하되며, 고속 조건인 #2 조건에서는 5.66~5.529 kW에서 5.244~5.135 kW로 평균 약 7.8% 저하 되는 것을 알 수 있었다.

3.2 탑 클리어런스 측정 장치 개발

상기 탑 클리어런스별 압축기 성능 평가 결과로부터 알 수 있듯이 탑 클리어런스는 압축기 성능에서 중요한 설계 인자로 작용한다. 때문에 모든 압축기 성능 평가의 신뢰성을 확보하기 위해 평가 전 탑 클리어런스를 측정하여 일정한 목표 값으로 조정할 필요가 있다. 이러한 압축기의 개발 및 평가를 위하여 기존에 사용되어 온 탑 클리어런스 측정 방법은 측정자가 Fig. 5의 리어 플레이트에 조립된 상태의 압축기의 피스톤 끝단을 손으로 누른 상태에서 다이얼 게이지를 이용하여 탑 클리어런스 측정을 수행하였다. 그러나 이러한 측정 방식은 동일한 측정자라 하더라도 측정

자의 업무 강도나 컨디션에 따라서 반복 측정을 수행했을 시에 측정값이 바뀔 수 있으며, 측정자가 바뀌었을 경우에는 피스톤을 누르는 힘이 달라지기 때문에 탑 클리어런스의 측정 결과 값에 상당한 차이가 발생하게 된다. 이는 곧 압축기 성능 결과 값에 대한 신뢰성이 떨어지는 결과를 초래하게 되며, 성능 산포의 원인을 정확하게 파악하지 못 할 경우 다른 설계 인자의 변경을 검토하는 치명적인 시행착오를 겪을 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 측정 환경이 변한다 해도 탑 클리어런스 측정 신뢰성을 확보할 수 있는 측정 장치를 개발하고자 하였으며, 이를 위하여 가변 사판식 압축기의 제어실에서 진공 펌프를 이용하여 사판각이 최대가 되도록 유지한 상태에서 탑 클리어런스를 측정할 수 있도록 장치를 개발 하게 되었다. 본 측정 장치는 차량용 가변 사판식 압축기의 작동 원리와 동일하게 피스톤 전.후단의 압력차를 주어 실제 압축기 작동시의 탑 클리어런스를 예측할 수 있도록 고안하였다.

진공 방식 탑 클리어런스 측정 장치는 Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 압축기 사양에 맞게 플레이트와 피팅을 준비하였으며, 탑 클리어런스를 측정하고자 하는 압축기를 리어 플레이트와 베이스 플레이트에 조립한 상태에서 압축기 구동부가 있는 제어실의 오일 공급 홀에 진공 펌프를 연결하여 진공을 잡게 된다. 본 연구에서 사용된 진공 펌프는 자동차 서비스 센터에서 사용하고 있는 냉매 회수 및 주입 장치에 사용되는 진공 펌프와 동일한 사양으로 분당 142리터의 진공능력의 가지고 있다.

탑 클리어런스 측정 과정에서 진공펌프의 작동을 중단하면 안되는데, 이는 압축기의 피스톤과 실린더 사이에는 원활한 작동을 위하여 최소한으로 유지되는 일정한 갭이 있고 가변 사판식 압축기의 작동 특성상 제어실에 작은 바이패스 홀이 형성되어 있는데, 탑 클리어런스 측정중 진공 펌프의 작동을 중단하게 되면 피스톤과 실린더 사이의 갭과 바이패스 홀을 통하여 리크가 발생하여 사판각이 최대각으로 유지되지 못하



Fig. 5 Parts of vacuum type top clearance measuring.

고, 이에 따라서 피스톤이 상사점까지 가지 못하여 정확한 측정이 이루어지지 못하게 된다. 그러므로 진공 펌프는 측정 시작에서 끝나는 시점까지 연속해서 작동을 하여야 한다. 본 연구에서는 진공 압력으로 1 bar 이상이 되었을 때 사판각이 최대가 되었다.

개발된 진공 방식 탑 클리어런스 측정 장치의 신뢰성 확보를 위하여 레이스 두께별로 반복적으로 탑 클리어런스 측정을 진행하여 측정 장치의 신뢰성을 확인하고자 하였다. 이때 레이스의 두께는 약 50 μm 차이를 가지는 3가지 사양에 대하여 측정을 진행하였으며 Table 4와 같은 결과 값을 얻게 되었다. 각각의 레이스별로 압축기 1대에 대하여 전체 6개 피스톤에 대한 탑 클리어런스를 총 3회에 걸쳐 반복 측정을 수행하였으며 결과 값에 대한 압축기별 반복 측정 산포는 Fig. 6에서 보여 지듯이 3가지 레이스에 따른 탑 클리어런스 측정 결과가 모든 경우에 5 μm 이내의 산포로 반복성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한 레이스 두께별로 반복 측정할 압축기에 대하여 피스톤 위치를 기

록한 뒤 개별로 측정된 전체 탑 클리어런스 값에 대하여 측정 평균값에서의 상·하 산포와 최대값과 최소값간의 차이를 비교 하였을 때 Fig. 7에서와 같이 레이스 두께별로 평균값에서의 상·하 산포는 0.99~1.83%를 나타내었고, 최대값과 최소값간의 측정 산포는 1.77~3.28%를 나타내었다. 이는 탑 클리어런스 값의 중간값과 상한치 값에 대한 압축기 성능 차이인 4.12~7.8%와 비교하였을 때 충분히 신뢰할 수 있는 데이터라고 판단되며, 과거 측정자에 따른 측정 오차가 0.1~0.2 mm까지도 발생하였음을 감안했을 때와 비교시에는 진공 방식 탑 클리어런스 측정의 경우 동일한 압축기를 기준으로 각각의 피스톤을 기준으로 가장 적은 측정 산포의 경우 최소 2 μm 이었으며, 가장 크게 측정 산포를 가지는 피스톤의 경우 최대 22 μm 으로서 측정 산포의 획기적인 개선이 이루어졌음을 확인할 수 있게 되었다.

4. 결 론

차량용 에어컨 가변 사판식 압축기의 탑 클리어런스 크기에 따른 압축기 단품 성능 평가를 수행하여 탑 클리어런스가 압축기 성능에 끼치는 영향성을 파악하였으며, 압축기 성능에 주요 설계 인자로 작용하는 탑 클리어런스에 대하여 측정 환경에 영향을 받지 않는 신뢰성 있는 탑 클리어런스 측정 장치 개발을 위한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하게 되었다.

- (1) 탑 클리어런스 값이 증가함에 따라서 압축기 냉방 성능은 평가 조건에 무관하게 반대로 저하되며, 탑 클리어런스 값에 따라서 성능의 변화가 크게 나타남을 알게 되었다. 실제 탑 클리어런스별 압축기 성능 평가를 수행한 결과, 탑 클리어런스가 0.243~0.252 mm일때의 성능 대비 0.431~0.456 mm일때의 성능은 800 rpm에서 평균 약 4.12%, 2,000 rpm에서 평균 약 7.8% 정도 압축기 성능이 저하됨을 알 수 있었다.
- (2) 측정 환경에 영향을 받지 않는 신뢰성을 확보한 탑 클리어런스 측정 장치를 개발하게 되었다. 실제 에어컨 시스템에서 작동되는 압축기의 상태를 최대한 반영한 진공 펌프를 이용한 탑 클리어런스 측정 장치를 개발 하였으며, 레이스 등급별 반복 측정을 실시했을 경우 압축기 1대를 기준했을 경우에는 5 μm 이내의 산포를 유지하였고, 압축기의 개별 피스톤에 대한 경우에도 측정 평균값 기준으로 약 0.99~1.83% 수준의 측정 산포를 보이며, 최대값과 최소값을 기준으로 했을 때에도 약 1.77~ 3.28%의 측정 산포를 보임을 확인할 수 있었다. 이는 기존 탑 클리어런스 측정에서 발생하는 0.1~0.2 mm 측정 산포와 비교했을 시 충분히 신뢰성을 확보하였음을 알게 되었다.

Table 4 Top clearance measurement repeatability

Race thickness (mm)	Piston No.	PEC(mm)		
		1st	2nd	3rd
1.653	#1	0.132	0.129	0.131
	#2	0.108	0.104	0.107
	#3	0.135	0.131	0.129
	#4	0.148	0.149	0.145
	#5	0.124	0.129	0.118
	#6	0.118	0.117	0.115
	Average	0.128	0.127	0.124
1.708	#1	0.179	0.182	0.168
	#2	0.152	0.143	0.153
	#3	0.162	0.171	0.184
	#4	0.194	0.19	0.193
	#5	0.158	0.158	0.166
	#6	0.17	0.161	0.174
	Average	0.169	0.168	0.173
1.755	#1	0.253	0.253	0.251
	#2	0.222	0.228	0.224
	#3	0.241	0.244	0.24
	#4	0.256	0.256	0.268
	#5	0.251	0.252	0.252
	#6	0.243	0.25	0.249
	Average	0.244	0.249	0.247

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. Kim, Y. S., Yoo, S. Y., and Na, S. G., 2013, Study of Compressor Performance Improvement in Automotive Air Conditioning System, KSME, pp. 74-75.
3. Cha, Y. W., Byon, S. C., Park, M. H., Kim, J. Y., and Ko, C. S., 2009, A Study of Subcool Acceleration on Air Conditioning System, KSAE, pp. 1372-1377.
4. Lee, S. I. and Kim, S. J., 2005, Investigation of Variable Displacement Swashplate Compressor Effects on Fuel Economy, KSAE, pp. 1824-1832.
5. 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.
6. 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.