디젤엔진 공기과급기의 압력맥동 기인소음 평가기법 개발

Development of the Evaluation Method for Aerodynamic Noise Caused by Pressure Pulsation in the Turbocharged Diesel Engine

이종규†, 김형진*, 강구태*
Lee, Jong Kyu Kim, Hyung Jin Kang, Koo Tae

Key Words : Aero-pulsation Noise, Standard Specification, Geometric Asymmetry, Gage R&R

ABSTRACT

Aero-pulsation noise, generally caused by geometric asymmetry of a rotating device, is considerable source of annoyance in passenger cars using the turbocharged diesel engine. Main source of this noise is the compressor wheel in the turbocharger system, and can be reduced by after-treatment such as silencers, but which may increase the manufacturing cost. More effective solution is to improve the geometric symmetry over all, or to control the quality of components by sorting out inferior ones. The latter is more effective and reasonable than the former in view of manufacturing. So, an appropriate discrimination method should be needed to evaluate aero-pulsation noise level at the production line. In this paper, we introduce the accurate method which can measure the noise level of aero-pulsation and also present its evaluation criteria. Besides verifying the reliability of a measurement system – a rig test system -, we analyze the correlation between the results from rig tests and those from vehicle tests. The gage R&R method is carried out to check the repeatability of measurements over 25 samples. From the result, we propose the standard specification which can discriminate inferior products from superior ones on the basis of aero-pulsation noise level.

1. 서 론

디젤 자동차의 경우 배기가스 규제 대응 및 성능향상을 목적으로 터보차저(turbocharger) 시스템 장착이 일반화되어 있다. 그런데 이 터보차저는 실차 주행 중 특정 운전 조건에서 터보차저 회전수에 비례하는 고주파 화인 소음(whine noise)을 발생시켜 차량 실내 음질 및 안락성 측면에서 부정적 요인이 되고 있다. 이러한 문제소음의 주된 원인으로서는 가속시 컴프레서 휠(compressor wheel)의 기하학적 비대칭성(geometric asymmetry)에 기인한 압력맥동음(aero-pulsation noise)을 들 수 있다.

예전에는 압력맥동음을 제어하기 위해서 공명기등의 사후 처리 장치를 사용했지만, 이 방법은 제품의 원가 상승을 발생시켜 보다 효과적인 제어 방법에 대한 필요성이 제기되었다.

압력맥동음을 제어하는 효과적인 방법으로는 컴프레서 휠의 기하학적 비대칭성을 개선하거나 단품상태에서 문제가 될 수 있는 터보차저를 미리 확인, 분류 함으로써 양산품의 질적 향상을 꾀하는 것이다. 전자의 방법은 어느 정도 개선 효과가 있는 반면에 기술적으로 한계를 지니고 있으므로 제조관점에서 유리한 후자의 방법이 전자에 비해 보다 효과적이라 할 수 있다.

그래서 본 연구에서는 측정시스템을 사용하여 양산라인에서 압력맥동음을 구별하는 적절한 방법과 조건들을 제시하였다. 또한 측정시스템의 신뢰성을 평가하기 위해 단품상태와 차량상태에서의 상관성을 분석하고, 측정시스템에 대한 반복성을 확인하기 위해 25개 이상의 샘플에 대해 Gage R&R 방법을 수행하였다.

이상의 결과로부터 압력맥동음 측면에서 소음 양호품으로부터 소음 불량품을 구분할 수 있는 표준 관리값(standard specification)을 설정하였다.

.

† 교신저자 ; 현대자동차 연구개발본부
E-mail : jongkyu@hyundai-motor.com
Tel : (031) 368-5073

* 현대자동차 연구개발본부

2. 본 론

2.1 압력맥동음 평가를 위한 측정방법의 비교

2.1.1 기존의 압력맥동음 측정방법

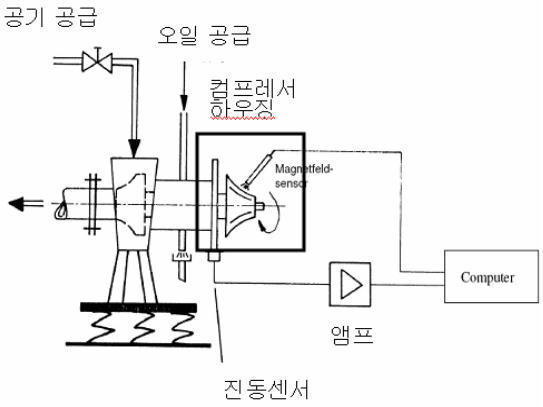
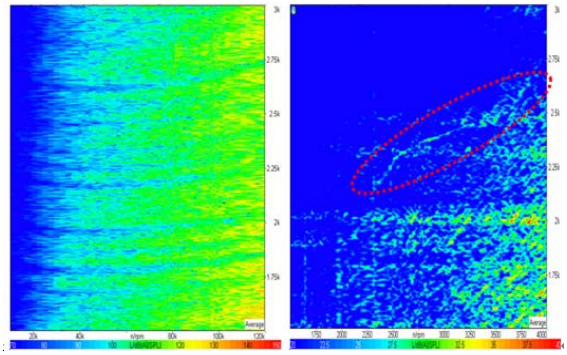


Fig. 1 기존의 압력맥동음 측정장치



(a) 단품시험 결과 **(b) 차량시험 결과**

Fig. 2 기존 측정장치에서의 압력맥동음 비교

위의 Fig. 1은 12만 RPM까지의 압력맥동음을 측정할 수 있는 기존 측정장치를 나타낸 것이다. 그림을 보면 측정용 컴프레서 하우징은 휠의 형태에 따라 구분되며 휠이 일정 속도로 회전할 때 발생하는 맥동압력을 압력센서를 이용하여 측정하였다.

Fig. 2는 단품상태에서 12만 RPM까지 측정한 결과와 차량 실내소음 결과를 비교하여 나타내고 있다. 결과를 보면 단품상태에서 12만 RPM까지 측정하는 기존방식을 사용할 경우 차량 시험결과와 매우 상이한데 이는 단품시험시 운전영역의 한계와 측정된 압력맥동값에 대한 분석 방법의 문제로 인한 것이다.

우선 운전영역 측면에서의 문제점을 살펴보자. 일반적으로 터보차저 시스템의 압력맥동음 방사부위는 터보차저 컴프레서 출구측 호스 또는 파이프이며, 가속 주행시 터보차저 회전수로 13만~16만 RPM 영역에서 주로 발생한다. 그런데 기존의 압력맥동음 측정장치는 단품상태 측정 최대회전수가 12만 RPM으로 실제 차량에서의 소음발생 영역을 대변해주지 못하며, 출구 압력이 대기압으로 실제 차량 장착조건과는 많은 차이가 있다. 즉, 실제 현상에 대한 재현에 있어서 운전영역의 한계를 가지고 있다.

그리고 측정결과의 분석 방법 측면에서 보면, 관내의 압력맥동을 측정하는 경우 기존 측정방법에서는 오버올(overall) 성분으로 표시함으로써 광대역의 기류음과 순수한 압력맥동음 성분을 모두 포함하게 된다. 이것을 분리하지 못하는 경우 압력맥동음의 수준을 정확하게 판별할 수 없다. 즉 기존 방법은 측정하고자 하는 소음에 대한 변별력 측면에서 그 정확성이 떨어지는 문제점이 있다.

2.1.2 개선된 압력맥동음 측정방법

앞서 언급된 운전영역 재현의 문제점을 해결하기 위해 터보차저 속도를 기존의 12만 RPM까지만 측정할 수 있었던 시스템적인 한계를 뛰어 넘어 단품상태에서 16만 RPM까지 측정 가능하도록 하였다. 또한 칼만 필터(kalman filter)를 사용하여 기류음 성분을 포함한 압력맥동의 오버올 성분으로부터 1차 오더 성분만을 정확히 추출하도록 하였다. 여기서 기존의 측정장치가 16만 RPM까지 측정할 수 없었던 이유는 컴프레서 출구의 조건이 열려있는 관계로 컴프레서 압력과 터빈 압력차로 인해 발생되는 쓰러스트 베어링(thrust bearing)의 유착 현상 때문이었다. 그러나 본 논문에서는 컴프레서와 터빈사이의 압력차를 맞춰줌으로써 터보차저 회전수를 16만 RPM까지 올려 측정할 수 있게 하였다. Fig. 3은 개선된 압력맥동음 측정장치에 대한 구성도를 나타낸 것이다.

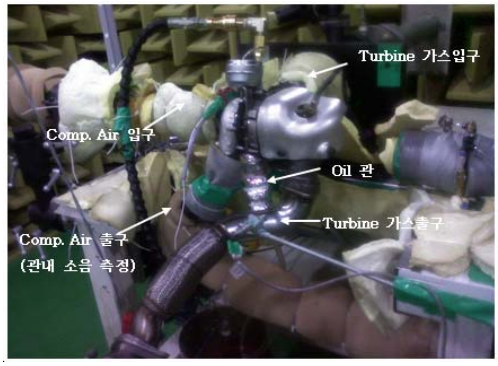
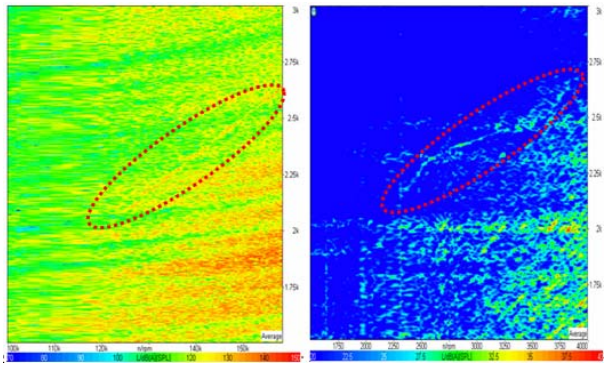


Fig. 3 개선된 압력맥동음 측정장치



(a) 단품시험 결과 (b) 차량시험 결과

Fig. 4 개선된 측정장치에서의 압력맥동음 비교

소음수준 / 시험조건	압력맥동음 발생수준 A	B	C	D	순위상관도
차량상태의 소음 측정결과	大	中	小	極小	-
기존 측정장치의 결과	大	極小	小	中	20%
개선된 측정장치의 결과	大	中	小	極小	100%

Table. 1 압력맥동음 측정장치들의 변별력 비교

Fig. 4는 터보차저 측정 RPM을 16만 RPM까지 올리고 컴프레서 출구 압력조건을 맞춘 상태에서 압력맥동음을 측정한 단품시험 결과와 실차시험 결과를 비교한 것이다. 그림을 보면 2~2.7kHz의 주파수 대역에서 두 결과가 매우 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이로부터 터보차저가 장착된 차량에서 발생되는 압력맥동음을 보다 정확하게 측정할 수 있고, 소음을 예측할 수 있다.

또한 Table. 1은 압력맥동음 측정장치로 측정한 결과들과 차량에서 측정한 결과를 순위 비교한 것이다. 기존의 측정장치로 측정한 결과와 차량소음을 비교한 결과 순위상관도가 20%로 매우 낮은 반면에 개선된 측정장치로 측정한 결과와 차량소음을 비교한 결과 순위상관도가 거의 일치하는 결과(100%)를 보이고 있어 개선된 측정장치의 소음에 대한 변별력이 매우 높음을 알 수 있다.

2.2 개선된 측정장치에 대한 신뢰성 검증

앞서 제기된 기존 측정장치에 대한 신뢰성의 문제로 13만~16만 RPM까지 측정 가능하도록 새롭게 제작된 본 시험장치에 대해 신뢰성 검증이 필요하게 되었다.

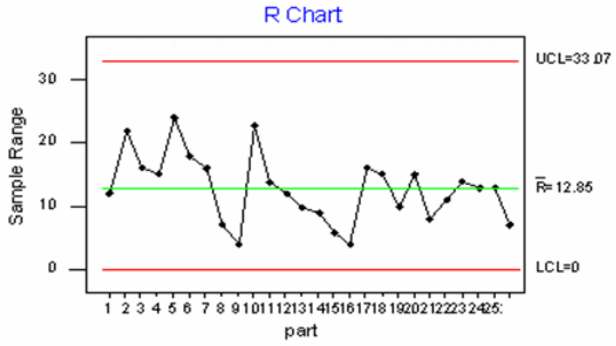
본 논문에서는 측정장치에 대한 신뢰성 검증을 위해서 Gage R&R방법을 사용하였는데, 장비의 특성상 재현성에는 문제가 없는 것으로 판단되어 반복성에 대해서만 검증하기로 하였다. Gage R&R을 평가하는 방법으로는 샘플간의 교호작용에 의한 변동을 추가한 ANOVA 방법을 사용하여 분석하였다. 압력맥동음은 다양한 압력맥동값을 가진 컴프레서 휠 사양에 대해 측정시스템을 갖춘 터보차저 단품 리그실에서 16만 RPM까지 전부하 가속조건으로 시험을 수행하였다. 측정은 인터쿨러 입구 호스 관내의 맥동값을 측정하는데, 위치는 컴프레서 끝단에서 약10cm 정도에서 측정하였다. 아래의 Table. 2는 개선된 측정장치의 반복성(Repeatability)에 대한 Gage R&R 결과를 나타낸 것이다. Gage R&R 검토결과 반복성에 대한 신뢰도가 매우 높음을 알 수 있다.

T/C RPM	R&R기여도율	판별지표	평가
12만 이하	94.5	6	신뢰도 매우 높음
12~14만	99.3	17	
14~16만	99.2	16	
전체	99.4	19	

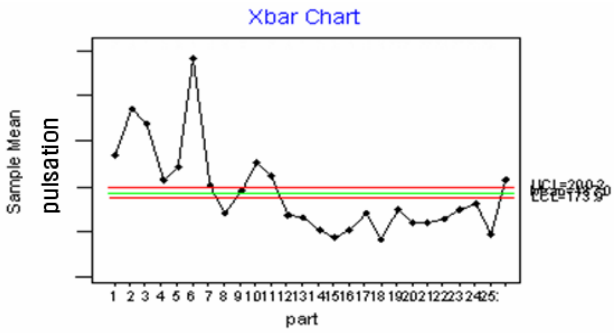
Table. 2 개선된 측정장치에 대한 Gage R&R

위의 Table. 2에서 R&R 기여도율(%contribution)이란 전체 산포중 몇% 정도가 Gage R&R의 측정오차에 의한 것인지를 나타나는데, 이는 보통 측정시스템이 전체적인 측정변동을 얼마나 잘 나타내는지 평가할 때 적합하게 사용한다.

그리고 신뢰도 판단기준의 하나인 판별지표(number of distinct categories)는 측정시스템이 공정 전반의 편차를 몇 개까지 분할해서 측정할 수 있는지를 나타낸다. 다시말해 측정부품의 신뢰구간이 겹쳐지지 않는 개수를 의미하는데, 측정시스템의 측정단위는 제품이나 프로세스의 관리단위에 비해 단위 아래까지 측정 가능하여야 한다.



(a) 샘플내의 반복성에 대한 관리한계선

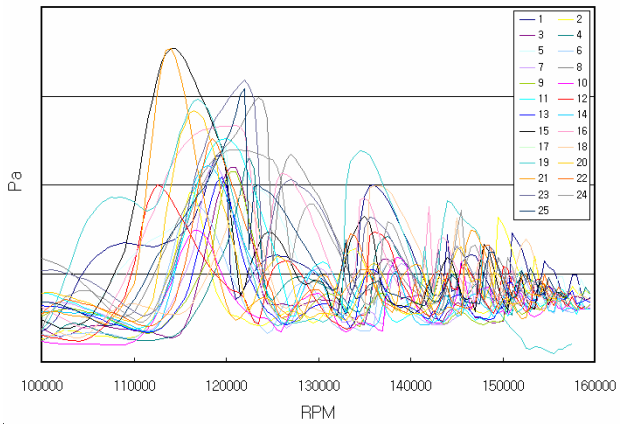


(b) 샘플간의 측정값에 대한 관리한계선

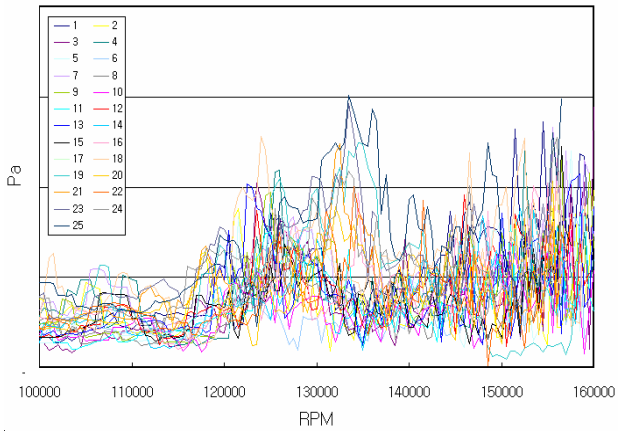
Fig. 5 측정장치에 대한 Gage R&R Chart

Fig. 5는 압력맥동음 측정장치에 대한 Gage R&R Chart를 나타낸 것이다. 위의 그림은 샘플내 또는 샘플간의 관리한계선을 비교한 것인데, 그림 (a)의 R Chart를 보면 표준편차의 관리한계선 안에 샘플내 타점들이 안정적으로 랜덤하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 반면에 그림 (b)의 Xbar Chart를 보면 샘플간의 타점들이 대부분 관리한계선을 벗어나고 있는데 이는 변동의 대부분이 주로 샘플간의 변동에 기인한 것임을 알 수 있다.

다음의 Fig. 6은 측정방법에 따른 압력맥동값을 비교한 것이다. 결과를 보면 압력맥동의 오버올 성분이 12만 RPM 이하는 물론 그 이상의 RPM 영역에서도 비선형적 경향을 보임을 알 수 있다. 또한 기류음 성분을 포함한 압력맥동의 오버올 성분으로부터 1차 오더 성분만을 추출한 경우도 터보차저 회전수에 따라 압력맥동 1차 오더 수준이 선형적인 증가 또는 감소 경향없이 비선형적으로 변화하고 있음을 알 수 있다.



(a) 압력맥동의 오버올 성분



(b) 압력맥동의 1 차 오더 성분

Fig. 6. 측정방법에 따른 압력맥동값 비교

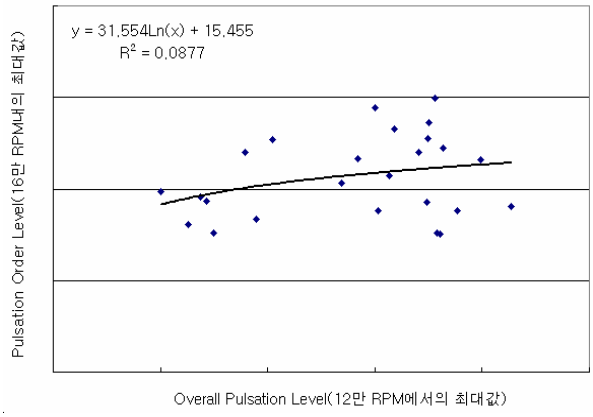


Fig. 7 측정방법에 대한 압력맥동값의 상관관계

위의 Fig. 7은 두 측정방법에 대한 압력맥동값의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림을 보면 압력맥동의 오버올 성분과 압력맥동의 1차 오더 성분의 상관도는 매우 낮은 수준으로 12만 RPM의 최대값을 가지고 압력맥동음의 수준을 평가하는 기존 측정방법으로는 기본적으로 압력맥동음을 구분할 수 없음을 알 수 있다.

2.3 압력맥동음의 관리치 설정

이렇듯 압력맥동음의 RPM에 따른 비선형성으로 인해 기존의 12만 RPM에서 최대값을 가지고는 그 수준들을 구분할 수 없다 그러므로 측정 RPM을 압력맥동음이 발생 가능한 RPM으로 증대시킨 후 하나의 포인트가 아닌 다중포인트에서의 압력맥동값을 가지고 압력맥동음을 규제하는 것이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 이러한 압력맥동값 관리치 설정을 위해 우선 무작위로 선정된 터보차저 25대에 대해 차량 및 단품시험을 진행하였다. 그런 다음 차량시험에서 소음수준이 매우 양호한 터보차저를 골라 단품상태에서 압력맥동음 선도를 그린 후, 이를 기준으로 실내에서 문제가 되지 않을 각 터보차저 회전수별 압력맥동값을 정하였다. 그 결과 아래의 Table. 3과 같은 압력맥동값 관리치를 설정할 수 있게 되었다.

T/C RPM	최대 압력맥동값
12만 이하	90 Pa 이하
12만 ~ 14만	100 Pa 이하
14만 ~ 16만	120 Pa 이하

Table. 3 회전수에 따른 압력맥동값 관리치

3. 결 론

앞서의 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 기존의 12만 RPM까지 측정할 수 있는 측정장치 시험결과는 차량의 소음발생 수준 경향과 상이함은 물론 터보차저 회전수에 따른 압력맥동 수준의 비선형성으로 인해 단품 수준에서의 변별력이 거의 없는 문제점을 가지고 있으므로 기본적으로 16만 RPM까지 측정할 수 있어야 한다.

(2) 본 논문에서 제시한 개선된 압력맥동음 측정장치로 측정한 결과는 차량에서 측정한 결과와 소음발생 수준 경향이 일치하는 결과를 보이고 있고, 측정장치의 반복성에 대한 Gage R&R 검토결과 개선된 압력맥동음 측정장치의 신뢰성이 매우 높음을 알 수 있다.

(3) 무작위로 선정된 25대의 터보차저에 대한 차량 및 단품시험을 통하여 터보차저 회전수별 압력맥동값 관리치를 설정함으로써 압력맥동음 측면에서 소음 양호품으로부터 소음 불량품을 구분할 수 있게 되었다.

참 조 문 헌

(1) Soh Kang-Young, Yoo Dong-Kyu and Kang Koo-Tae, 2004, “Introduction of noise reduction examples in turbocharger system of diesel engines”, FISITA, 30th Congress.

(2) Dominic Evans and Andrew Ward, 2005, “Minimizing turbocharger whoosh noise for diesel powertrains”, SAE 2005-01-2485

(3) David Japikse and Nicholas C.Baines, 1994, "Introduction to turbomachinery", Concepts ETI, Inc. and Oxford university press.

(4.) L. Mongeau and D.E.thompson, 1995, “A method for characterizing aerodynamic sound sources in turbomachines”, Journal of sound and vibration, 181(3), 369-389.

(5). P. H. Bent and D. K. Mclaughlin, 1993, "Enhancement to noise source measurement techniques for trubomachinery", AIAA Paper 93-4373.