

터보차저의 공기맥동음 평가를 위한 측정 및 판별법

Measurement and Discrimination Method for the Evaluation of Aero-Pulsation Noise Generated by the Turbocharger System

김 재 현*, 이 종 규*

(Jaeheon Kim*, Jong-Kyu Lee*)

*현대자동차주 연구개발총괄본부 파워트레인센터

(접수일자: 2007년 8월 17일, 채택일자: 2007년 9월 5일)

터보차저가 장착된 승용디젤엔진차량의 주요 소음원 중 하나로 터보차저 회전체의 기하학적 불균형에 기인한 공기 맥동음을 들 수 있다. 이 소음의 주요 발생부는 일반적으로 터보차저의 컴프레셔휠로서 소음기와 같은 후처리 장치에 의해 저감될 수 있지만, 제조비용을 증가시키는 요인이 될 수 있다. 보다 효과적인 방법은 전반적인 기하학적 대칭성을 개선하거나 문제가 될 수 있는 단품을 분별해냄으로써 부품 품질을 관리하는 것이다. 제조상의 문제나 기타 여러 관점에서 볼 때, 단품에 대한 품질관리가 보다 효과적이고 적합하다고 할 수 있다. 이를 위해서는, 생산 라인 상에서 공기맥동음의 수준을 평가할 수 있는 적절한 판별방법이 필요하다. 본 논문에서는 공기맥동음의 수준을 정확히 측정할 수 있는 방법을 소개하고 그 판별기준도 제시하고자 한다. 또한 리그 측정시스템의 신뢰성 평가와 함께, 리그측정결과와 차량측정결과 간의 상관관계도 분석하였다. 25개 샘플에 대한 측정 재현성 검증을 위해 게이지 R&R 기법을 활용하였다. 이와 같은 측정 및 분석 결과로부터, 공기맥동음 관점에서 단품의 우열을 판별할 수 있는 표준관리값을 제시할 수 있었다.

핵심용어: 공기맥동음, 평가기준, 터보차저, 기하학적 비대칭성, 게이지 R&R

투고분야: 소음 및 공력유향 분야 (10.2)

Aero-pulsation noise, generally caused by geometric asymmetry of a rotating device, is one of considerable sources 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 devices 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 simple and reasonable than the former in view of manufacturing. Thus, 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.

Key words: Aero-pulsation noise, Evaluation criteria, Turbocharger, Geometric asymmetry, Gage R&R

ASK subject classification: Noise and Aeroacoustics (10.2)

I. 서론

배기가스 규제 대응 및 성능향상을 목적으로 디젤 자동차의 경우 터보차저 (turbocharger) 시스템 장착이 일반화되어 있다. 그런데 이러한 터보차저 (이하 T/C)의 특성상, 광대역 기류성 이음과 함께 터보차저 회전수에 비해

하는 고주파 화인 소음을 발생시켜 차량 실내 음질 및 안락성 측면에서 부정적 요인을 야기시키고 있다 [1]. 이와 같은 소음 중 대표적인 예로 가속시 컴프레서 휠 (compressor wheel)의 기하학적 비대칭성 (geometric asymmetry)에 기인한 공기맥동음 (aero-pulsation noise)을 들 수 있다 [2]. 일반적으로 공기맥동음을 제어하기 위해서 공명기 등의 사후처리장치를 사용해 왔지만, 이 방법은 제품의 원가 상승을 발생시켜 보다 효과적인 제어 방법에 대한 필요성이 제기되어 왔다 [3].

공기맥동음을 제어하는 효과적인 방법으로는 컴프레서 휠의 기하학적 비대칭성을 개선하거나 단품상태에서 문제가 될 수 있는 터보차저를 미리 확인, 분류함으로써 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 공기맥동음을 구별하는 적절한 방법과 조건들을 제시하였다. 또한 측정시스템의 신뢰성을 평가하기 위해 단품상태와 차량상태에서의 상관성을 분석하고, 측정시스템에 대한 반복성을 확인 하기 위해 25개 이상의 샘플에 대해 Gage R&R 분석 방법을 수행하였다.

이상의 결과로부터 공기맥동음 측면에서 소음 양호품으로부터 소음 불량품을 구분할 수 있는 표준 관리값 (standard specification)을 설정할 수 있었다.

II. 공기맥동음 평가를 위한 측정과 판별법

2.1. 기존 공기맥동음 측정장치의 문제점

그림 1은 공기맥동음을 측정할 수 있는 기존의 일반적인 장치를 나타낸 것이다. 그림과 같이, 측정용 컴프레서 하우징 (Housing)은 휠의 형태에 따라 구분되며 휠이 일정 속도로 회전할 때 발생하는 압력 맥동 (pressure

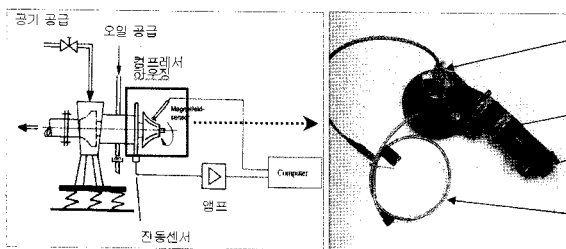


그림 1. 일반적인 공기맥동음 측정장치
Fig. 1. Conventional system for measuring aero-pulsation noise.

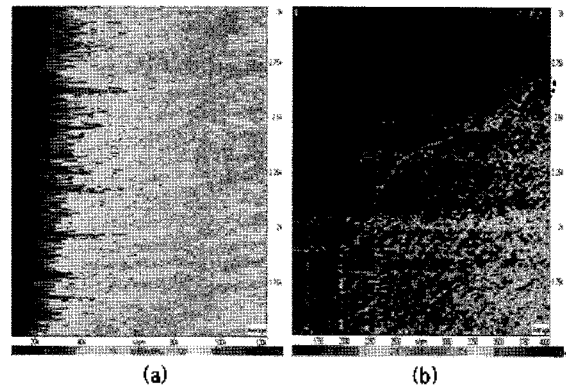


그림 2. 공기맥동음 측정 결과 비교 (기존 측정장비)
(a) 컴프레서 출구 압력 (b) 차량실내소음
Fig. 2. Comparison of measurement results (using the conventional system) (a) pressure at the compressor outlet (b) vehicle interior noise.

pulsation)을 압력 센서를 이용하여 측정한다 [4][5]. 그림 2는 단품 상태에서 측정된 관내 압력맥동 결과와 차량 실내소음 측정결과를 비교 도시하고 있다. 이 결과를 보면, 기존방식을 사용할 경우 실제 차량 실내 소음 측정 결과와 매우 상이함을 알 수 있는데, 이는 단품 측정 시 운전 영역의 한계와 측정된 압력 맥동값에 대한 분석 방법의 문제로 인한 것이다.

우선 운전 영역 측면에서 문제점을 살펴보자. 일반적으로 T/C 시스템의 공기맥동음 방사 부위는 T/C 컴프레서 출구측 호스 또는 파이프이며, 가속 주행시 T/C 회전수로 13만~16만rpm 영역에서 주로 발생한다. 그런데 기존의 공기맥동음 측정장치는 단품 상태 측정 최대회전수가 12만rpm으로 실제 차량에서의 소음발생 영역을 대변해 주지 못하며, 출구 압력이 대기압으로 실제 차량 장착조건과는 많은 차이가 있다. 즉, 실제 현상에 대한 재현에 있어서 운전 영역의 한계를 가지고 있다.

측정결과와 분석 방법 측면에서 보면, 관내의 압력 맥동을 측정하는 경우 기존 측정방법에서는 오버올 (overall) 성분으로 표시함으로써 광대역의 기류음과 순수한 공기 맥동음 성분을 모두 포함하게 된다. 이것을 분리하지 못하는 경우 공기맥동음의 수준을 정확하게 판별할 수 없다. 즉 기존 방법은 측정하고자 하는 소음에 대한 변별력 측면에서 정확성이 떨어진다.

2.2. 개선된 공기맥동음 측정 방법

앞서 언급된 운전영역 재현의 문제점을 해결하기 위해, T/C 최대회전속도가 제한적이었던 시스템의 한계를 극복하고 단품 상태에서 가용 최대회전속도까지 측정기능도 록 측정장비를 구성하였다. 또한 공기맥동 수준에 대한

정확한 분석을 위하여, 기류음 성분을 포함한 압력맥동의 오버울 값으로부터 T/C 회전 1차 오더 (order) 성분만을 추출하도록 하였다.

기존의 측정장치가 회전수의 한계를 가졌던 이유는 컴프레서 출구 측이 대기압 조건, 즉 단순 개방되어 있어서 고속 회전시 컴프레서 압력과 터빈 압력 간의 급격한 차이가 발생되고, 이로 인해 T/C 회전축과 베어링간의 유착 현상이 발생하기 때문이었다. 그러나 신 측정시스템에서는 컴프레서 출구 측 압력을 조절하여 터빈과의 압력 차이를 보상에 줌으로써 T/C 회전수를 충분히 상승시킬 수 있게 되었다. 본 연구에 사용된 3.0L 엔진용 샘플 T/C의 경우 시스템 최대회전수를 16만rpm까지 상승시킬 수 있었다. 그림 3은 새로운 공기맥동음 측정장치에 대한 구성도를 나타낸 것이다.

그림 4는 운전 영역을 기존대비 상승시킨 후 컴프레서 출구 압력조건을 맞춘 상태에서 압력 맥동을 측정한 단품 측정 결과와 차량실내소음 측정 결과를 비교한 것이다. 도시된 바와 같이 공기맥동음이 발생하고 있는 2.0~

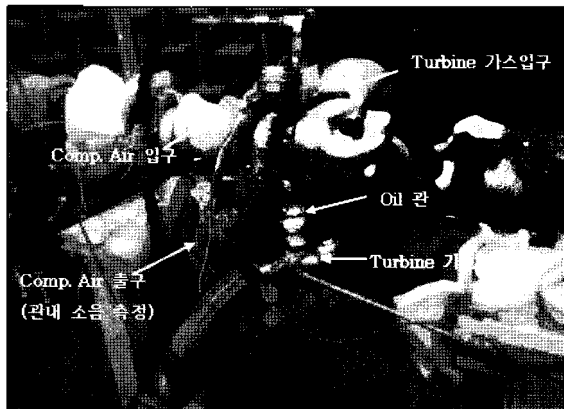


그림 3. 공기맥동음 측정용 신규장치
Fig. 3. New System for Measuring Aero-pulsation Noise.

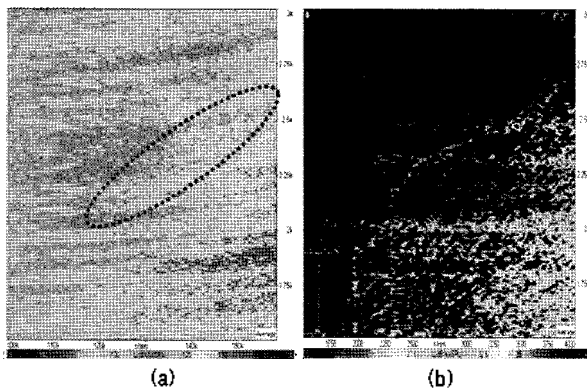


그림 4. 공기맥동음 측정 결과 비교 (신규측정장비)
(a) 컴프레서 출구 입력 (b) 차량실내소음
Fig. 4. Comparison of measurement results (using the new system) (a) pressure at the compressor outlet (b) vehicle interior noise.

2.7kHz 주파수 대역에서 두 결과가 매우 유사하게 나타나고 있다. 즉, 신규시스템에 의한 단품 측정 결과가 실제 차량 상태의 공기맥동음 발생 현상을 매우 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 측정방법에 따른 압력맥동값을 비교한 것으로, 압력맥동의 오버울 성분이나 1차 오더 성분 모두 T/C 회전수 전체에 걸쳐 비선형적 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 어느 특정 회전수의 압력맥동값으로는 각 단품의 특

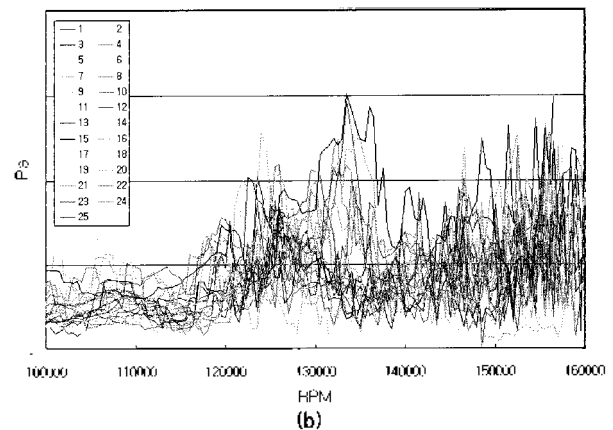
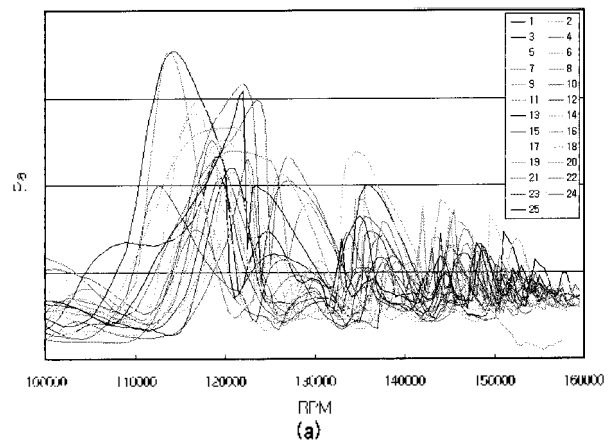


그림 5. 분석방법에 따른 압력맥동값 비교 (a) 오버울 성분 (b) 1차 오더 성분
Fig. 5. Comparison between (a) the overall value and (b) the 1st order value of aero-pulsation noise level.

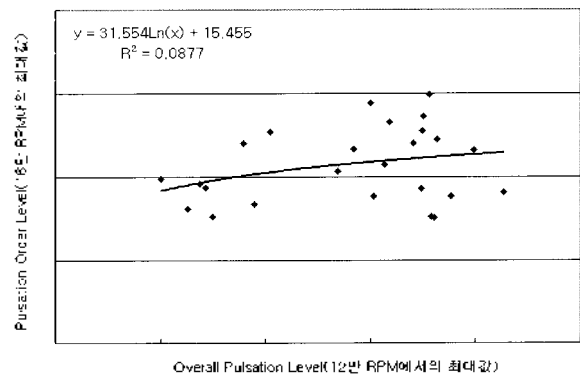


그림 6. 분석방법별 압력맥동값의 상관관계
Fig. 6. Correlation between the overall value and the 1st order value of aero-pulsation noise level.

성으로 대표할 수 없다는 것을 알 수 있다. 이에 대해서는 다음 절에서 다시 살펴보도록 하자.

한편, 실제 차량 조건과 경향성이 일치하고 있는 1차 오더 성분을 기준으로 오버올 성분을 비교해 보면, 두 값의 최대치 간의 상관도는 매우 낮은 수준이다. (그림 6) 이로부터, 앞서 언급한 바와 같이 오버올 성분을 기준으로 T/C 단품의 공기맥동음을 표현하는 것은 대표성이 없음을 다시 확인할 수 있다.

III. 측정장치에 대한 신뢰성 검증

대표성 있는 측정값 취득을 위해서는, 운전영역 확대 및 컴프레서 출구 압력 조정 등 새롭게 제작된 본 시험장치에 대해 신뢰성 검증이 우선적으로 필요했다. 이를 위해, Gage R&R 분석 방법을 사용하였는데, 장비의 특성상 재현성 (reproducibility)에는 문제가 없는 것으로 판단되어 반복성 (repeatability)에 대해서만 검증하기로 하였다. 반복성을 평가하는 방법으로는 샘플간의 교호작용에 의한 변동을 추가한 분산분석 (Analysis of Variance, ANOVA) 방법을 사용하였다. [6] 다양한 압력 맥동값을 가진 컴프레서 휠 사양에 대해 측정시스템을 갖춘 T/C 단품 리그실에서 전부하 가속조건으로 시험을 수행하였으며, 공기맥동음 수준은 컴프레서 끝단에서 약 10cm 정도에서 인터쿨러 입구 호스 관내의 압력맥동값을 측정함으로써 구할 수 있었다.

다음의 표 1은 공기맥동음 측정장치의 반복성 (repeatability)에 대한 검증 결과를 나타낸 것이다. 표 1에서 R&R 기여도율 (% contribution)이란 전체 산포에 대한 각 항목별 오차의 기여도를 백분율로 표현한 것으로, 이는 보통 측정시스템이 전체적인 측정변동을 얼마나 잘 나타내는지 평가할 때 사용한다. Gage R&R 분석 결과, 전체 분산에 대한 부품간 (part-to-part) 기여도가 크고, 측정에 의한 반복성의 기여도가 매우 작은 것으로 나타났다. 즉 시스템에 대한 신뢰도가 매우 높다고 할 수 있다. 그리고 또다른 신뢰도 판단 기준의 하나인 관별지표 (number of distinct categories)는 측정시스템이 공정 전반의 편차를 몇 개까지 분할해서 측정할 수 있는지를 보여준다. 다시 말해 측정부품의 신뢰구간이 겹치지 않는 개수를 의미하는데, 측정시스템의 측정 단위는 제품이나 프로세스의 관리단위에 비해 단위 아래까지 측정 가

표 1. 측정장치에 대한 Gage R&R 분석

Table 1. Gage R&R studies for the new measurement system.

측정구간 (T/C RPM)	% 기여도율(Contribution)		관별 지표	평가
	Part-to-Part	Measuring		
0~12만	94.5	5.5	6	신뢰도 매우 높음
12만~14만	99.3	0.7	17	
14만~16만	99.2	0.8	16	
0~16만	99.4	0.6	19	

표 2. 압력맥동 표준관리치 예 - 3.0L 엔진

Table 2. An Example on the standard specification of pressure pulsation level - 3.0L engine.

측정구간 (T/C RPM)	압력맥동값 (Pa)
0~12만	90
12만~14만	100
14만~16만	120

능하여야 한다. 관별지표 역시 신뢰성 높은 측정시스템임을 보여 주고 있다.

IV. 공기맥동음의 관리치 설정

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 단품상태에서 측정된 인터쿨러 내 압력맥동값의 T/C 1차 회전수 성분이 실제 공기맥동음 수준을 제대로 표현하고 있기는 하지만, 단품상태 검증을 위해서는 적절한 대표값을 정하고 이를 기준으로 관리를 할 필요가 있다.

그림 5의 결과처럼, T/C 회전수에 따른 선형성이 없으므로 특정 회전수의 맥동값 관리는 실제 현상과 괴리가 있으므로 회전수별 단계를 구분하여 관리치를 설정하는

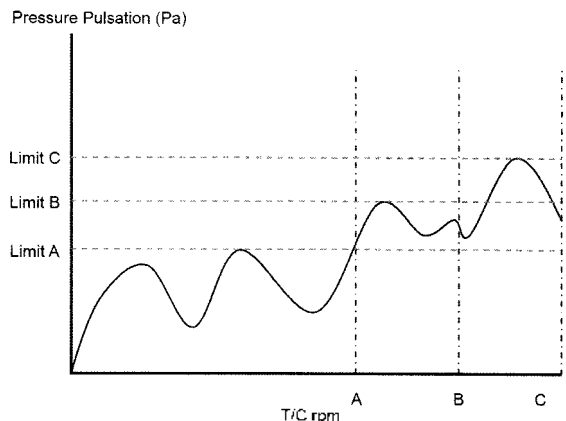


그림 7. 압력맥동값 상한치 결정

Fig. 7. Determining the upper limit of pressure pulsation level.

것이 필요하다. 즉 다중 포인트에서의 T/C 1차 회전수 성분
 분에 해당하는 압력맥동값의 최대치를 선정해야 한다.

본 연구에서는 이러한 공기맥동음 관리치 설정을 위해
 우선 무작위로 선정된 동일 사양 T/C 25대에 대해 차량
 및 단품 시험을 진행하였다. 그런 다음 차량시험에서 소
 음수준이 매우 양호한 T/C를 선택하고 이에 대한 압력맥
 동값 선도를 기준으로 T/C 회전수별 맥동값 상한치를 정
 하였다. (그림 7) 본 연구에 사용된 3.0L급 엔진에 장착
 되는 T/C의 경우, 표 2와 같은 표준관리치를 설정할 수
 있었다.

이와 같이 선정된 표준관리치로 단품을 관리함으로써,
 차량 장착시 공기맥동음이 과다하게 발생할 수 있는 단품
 을 추출해 내는 사전 관리 프로세스를 구축할 수 있었다.

V. 결론

본 연구를 통해, 기존 단품 측정장비가 가지고 있던 한
 계를 극복하고 단품 표준관리가 가능한 신 시스템 및 프
 로세스를 제시하였다. 신 측정시스템에서는 컴프레서 출
 구 압력을 조정함으로써 T/C 회전수를 관심운전영역까지
 상승시킬 수 있었으며, 측정된 압력맥동값을 T/C 회전수
 성분으로 분리하여 분석함으로써 실제 현상을 대표할 수
 있는 단품 측정치를 구할 수 있었다.

신 측정시스템에 대한 Gage R&R 분석을 실시한 결과,
 시스템의 반복성 및 측정 신뢰도가 매우 높음을 확인하였
 고, 단품 관리 용도로서의 그 적정성을 검증하였다. 또
 한, 검증된 시스템으로 측정된 압력맥동값에 대한 T/C
 회전수별 다중포인트 표준관리치를 설정방법을 제시하였
 고 이를 통해 차량 장착 전 공기맥동음 관리가 가능한 관
 리 프로세스를 구축할 수 있었다.

참고 문헌

1. Dominic Evans and Andrew Ward, "Minimizing Turbocharger
 Whoosh Noise for Diesel Powertrains", SAE 2005-01-2485,
 2005
2. David Japikse and Nicholas C. Baines, "Introduction to
 Turbomachinery", Concepts ETI, Inc. and Oxford university
 press, 1994
3. Kang-Young Soh, Dong-Kyu Yoo and Koo-Tae Kang,
 "Introduction of Noise Reduction Examples in Turbocharger
 System of Diesel Engines", FISITA, 30th Congress, 2004
4. L. Mongeau and D.E. Thompson, "A Method for Characterizing

Aerodynamic Sound Sources in Turbomachines", Journal of
 sound and vibration, 181 (3), 369-389, 1995

5. P. H. Bent and D. K. McLaughlin, *Enhancement to Noise Source
 Measurement Techniques for Turbomachinery*, (AIAA Paper
 93-4373, 1993)
6. Minitab INC. *Minitab User's Guide #2: Data Analysis and
 Quality Tool*, (2000)

저자 약력

• 김재현 (Jaeheon Kim)

한국음향학회지 제 18권 7호 참조

• 이종규 (Jong-Kyu Lee)



1995년: 인하대학교 기계공학과 학사
 1997년: 인하대학교 기계공학과 석사
 2005년: 아주대학교 시스템공학과 박사
 1997년~1999년: 고등기술연구원 연구원
 1999년~2006년: GM-대우자동차 연구원
 2006년~현재: 현대자동차 선임연구원