

차량용 터보차저 흡기 유동음 최적 개선 Optimization of an Intake Flow Noise Induced from an Automotive Turbocharger

박 호 일[†] · 최 성 배* · 장 성 식* · 황 준 영*

Hoil Park, Sungbae Choi, Seongsik Jang and Junyoung Hwang

(Received May 19, 2015 ; Revised July 1, 2015 ; Accepted July 1, 2015)

Key Words : Turbocharger(터보차저), Noise(소음), Intake(흡기), Groove(홈), Flow(유동)

ABSTRACT

In the previous study, the air flow noise around 1.6 k~1.8 kHz was analyzed, and could be reduced by machining a groove in the bore of compressor inlet in front of the main blades of a compressor wheel. It was proven that this groove was very effective for removing the noise without critical sacrifice of compressor performance, and in addition, it did not noticeably deteriorate vehicle performance, drivability and acceleration. It is interesting that the type of groove tried for 1.6~1.8 kHz noise reduction could be effective for another air flow noise, 4 k~6 kHz which is the 3rd order frequency range of turbocharger speed. This study tried various shapes of grooves for minimizing engine performance difference as well as reducing the 3rd order noise. Finally, it was shown that the groove should be round for the engine performance, and an optimal size exist for the noise and the engine performance.

기 호 설 명

- dBA : A웨이팅 압력레벨
- g : 진동 가속도 수준(=9.81 m/sec²)
- Rx : 원형 홈의 반경
- Ry : 원형 홈의 원형 모서리 반경
- Depth : 원형 홈의 깊이
- Reference : 유동 소음 개발 목표 수준
- P2/P1 : 컴프레서 압력비
- m³/sec : 컴프레서 통과 유량
- FRF : 구조물 진동 주파수 응답 함수

1. 서 론

터보차저는 공기과급기로서 엔진 연소 후 배출되는 배기가스의 유동 에너지를 이용하여 터빈을 회전시키고 이때 유도되는 회전동력을 이용하여 터빈 축과 직결된 엔진 흡기구축에 위치한 압축기를 회전시킴으로써 강제로 공기를 압축하여 연소실로 공급하는 장치이다. 터보차저를 엔진에 적용함으로써 작은 엔진 배기량으로 출력을 증대하기가 용이하기 때문에 고압 연료 분사시스템을 장착하는 차량용 디젤엔진에 모두 장착되고 있으며 최근에는 가솔린엔진에서도 그 적용이 확대되고 있다⁽¹⁾.

[†] Corresponding Author ; Member, Keyyang precision
E-mail : hi_park@keyyang.co.kr
* Keyyang precision

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2015 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

차량용 터보차저는 최대 200,000 rpm 이상으로 회전하고 엔진 연소실의 입출구에 위치하기 때문에 내구의 강건성이 요구되며, 차량에서 생활하는 시간이 증가됨에 따라 차량 승차감에 많은 부분을 차지하는 특이음의 발생 여부가 매우 중요하다. 터보차저에서 유발되는 소음은 주로 순음(pure tone) 성분들이며 이들 소음은 비록 낮은 수준이라도 일정 수준 이상이면 엔진의 다른 소음 성분들과 구분되어 감지될 수 있기 때문에 차량의 승차감을 크게 훼손시킬 수 있다. 이들 소음을 개선하고자 하는 방안들이 터보차저 성능과 배치되는 경우가 있어 터보차저 성능과 소음을 최적화하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다⁽²⁻⁴⁾.

이 논문의 연구 대상 소음은 컴프레서에서 발생하는 유동소음이며, 이 유동소음에 대하여 소음 특성과 개선 방안이 연구되었다.

Lee 등⁽⁵⁾에서 언급된 유동소음은 터보차저 회전수에 선형적으로 비례하지 않으며, 일정한 주파수로도 나타나지 않는 압축기 날개 형상과 하우징 형상의 조합에서 발생하는 소음으로 주파수는 1.6 k~1.8 kHz로 나타났으며, 이를 개선하고자 컴프레서 입구에 사각형 형상의 홈을 가공하여 문제의 유동소음을 충분한 수준으로 개선하였다. 이 논문에서의 관심 대상 소음은 보다 높고 넓은 주파수영역에서 존재하여, 이에 대하여 이전 연구에서 제안된 사각형 홈의 유효성을 확인하고, 추가적으로 최적화된 형상을 시험적으로 확인하였다. 연구 대상 유동소음은 터보차저 회전수의 3배에 비례하며, 소음 발생 주파수 영역은 대체로 4 k~6 kHz로 이전의 유동 소음의 주파수 영역보다는 상대적으로 넓은 주파수 영역에 걸쳐 소음이 구분되어 나타났다.

이 연구에서는 컴프레서 입구에 위치한 홈 형상으로 사각형 형상과 함께 원형 형상을 고려하였다. 여러 크기의 홈 형상에 대하여 가스벤치에서 소음 저감 수준을 평가한 후, 소음 저감이 효과적으로 나타난 최적의 홈 형상에 대하여 차량 시험을 통하여 최적의 소음 저감 형상을 결정하였다. 최적의 홈 형상은 터보차저의 성능을 유지한 상태에서 실내 소음의 목표 수준을 달성하였음을 보여주었다. 이 연구 결과로부터 압축기 입구의 홈은 협대역 유동소음 저감뿐만 아니라, 비교적 광대역의 유동소음 저감에도 효과가 있음을 알게 되었다.

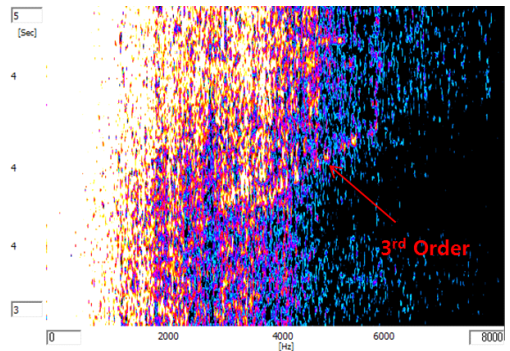
2. 터보차저 유동소음

2.1 소음 특성

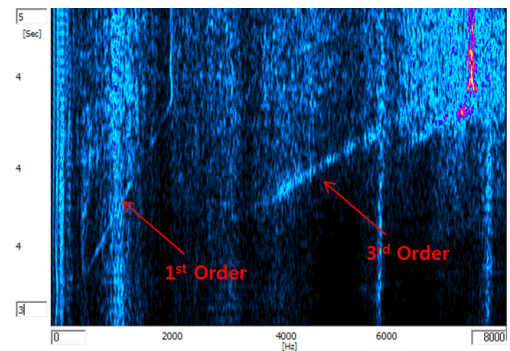
차량 운전 조건에서의 실내 소음과 터보차저 진동 신호에 대한 주파수 분석 결과가 Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 1(a)에서 중앙부에 나타난 이음 성분이 이 연구 대상 유동소음에 해당되며, 이 주파수 성분은 Fig. 1(b)의 진동 신호에서 뚜렷하게 나타난 터보차저의 1차 order 진동의 주파수 성분과 비교한 결과 터보차저 회전수의 3배에 해당됨을 확인하였다. 소음 발생 구간이 전체 운전 구간 중 국부적인 구간에서만 구분되어 나타나며, 대체로 4 k~6 kHz 주파수 영역에서 소음 신호도 구분되고 차량 실내에서도 감지되는 것으로 평가되었다.

2.2 노이즈맵 분석^(6,7)

차량 시험에서 문제의 3차 order 유동소음을 나타낸



(a) Cabin noise



(b) Turbocharger vibration

Fig. 1 Cabin noise and turbocharger vibration at a vehicle running condition

터보차저에 대하여 가스벤치에서 측정한 노이즈맵은 Fig. 2와 같다. 그림에서 보듯이 3차 order 소음이 상대적으로 높은 부분이 일정 영역으로 나타나고 있으며, 차량 운전 조건이 이 영역에 속하는 경우 문제의 소음이 차량 실내에서 감지된다. 이 운전 조건이 전체 차량 운전 영역 대비 국부적인 조건이기는 하나, 자동차 업체간 품질 경쟁이 매우 첨예하기 때문에 이와 같이 국부적인 조건에서 발생하는 소음일지라도 소음 문제 개선에 매우 적극적으로 임하고 있다.

압축기에 흐르는 유량과 터보차저 회전수에 따른 3차 order 소음 수준은 Fig. 3과 같이 표시된다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 X축은 유량이며, Y축은 소음 크기이며, 특정 회전수와 특정 유량 범위에서 소음이 높게 나타났으며, 엔진 운전 조건이 이 영역을 지나게 되면 차량에서 소음이 감지됨을 차량 시험 결과로 확인하였다. 이 논문에서는 이 영역의 소음을 개선하기 위한 방안을 연구하였다. 소음의 크기가 상대적으로 크게 나타난 터보차저 회전수 대체로 100 krpm 부근이며, 주파수로는 5 kHz에 해당된다.

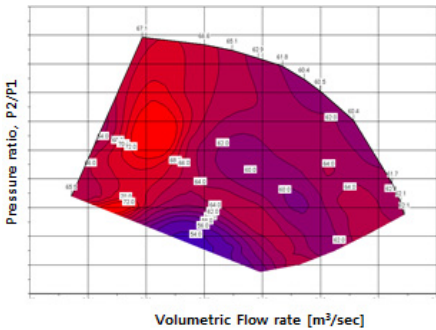


Fig. 2 Noise map of 3rd order noise

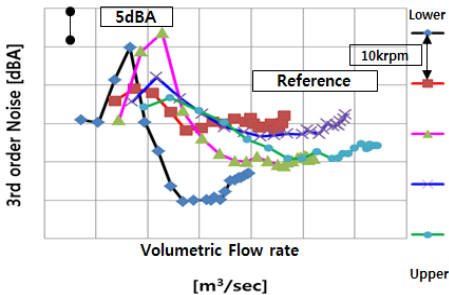


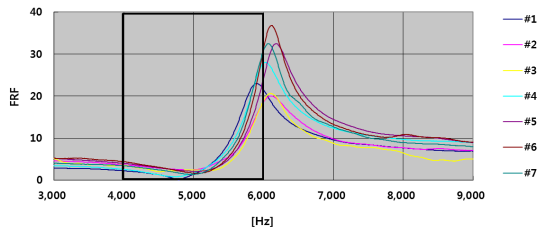
Fig. 3 3rd order noise vs. volumetric flow rate and turbocharger speed

2.3 구조물 동특성과의 관련성 검토

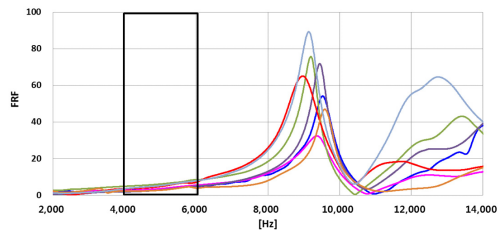
압축기 휠 날개의 고유진동수는 16 kHz 이상의 수준으로 문제 소음의 주파수 영역과는 관련이 없는 것으로 나타났으며, 7개의 카트리지에 대하여 회전축의 굽힘 방향과 축방향의 동특성이 Fig. 4에 나타난 바와 같이 문제의 주파수 특성과는 소음과는 무관한 것으로 판단하였다.

회전축의 상하좌우 방향의 거동 측정 신호에서도 3차 order 성분이 나타나지 않음을 시험을 통해서도 확인하였다. Fig. 5는 회전축의 거동을 압축기축에서 측정한 결과를 보여주고 있다. 중앙부 부근에 강하게 나타난 신호는 1차 order 진동 성분으로 3차 order 성분은 나타나지 않았다.

밸런싱 장비에서 측정한 터빈하우징 진동 분석 결과가 2개의 카트리지에 대하여 Fig. 6에 표시되어 있다. 1차와 3차 order 진동 성분을 분석하였으나, 검은실선 부분의 문제 터보차저 회전수 영역에서 3차 order 진동 성분은 나타나지 않았다.



(a) FRFs on bending direction



(b) FRFs on axial direction

Fig. 4 FRFs on a rotating assembly, cartridge

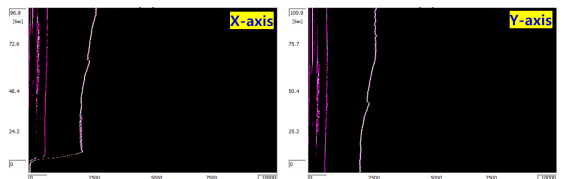


Fig. 5 Shaft motion for a cartridge

위의 결과로부터 문제의 소음은 구조물 공진 동특성 또는 진동 특성과는 무관한 것으로 나타났다.

날개간 형상 편차 가능성을 분석하기 위하여 3D 스캐너로 스캐닝하여 주 날개와 스플리터를 구분하고, 각각 하나의 날개를 기준으로 다른 날개와 비교

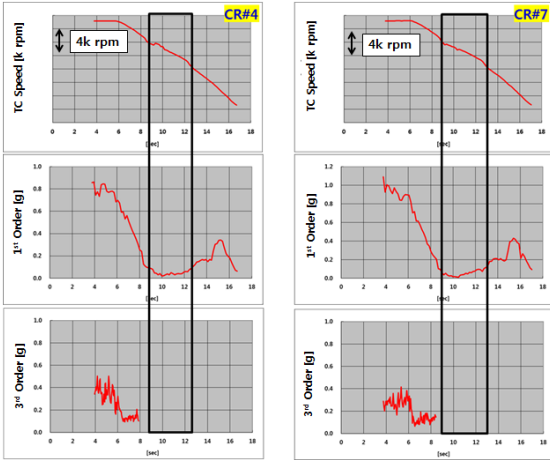


Fig. 6 1st & 3rd order vibration on a turbine housing at a balancing machine

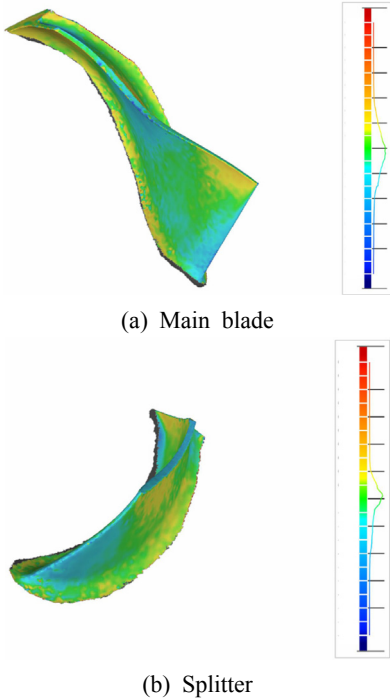


Fig. 7 Shape comparisons of main blades and splitters respectively

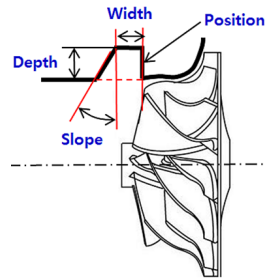
한 결과는 Fig. 7과 같다. 주 날개와 스플리터 모두 제작 기준 편차를 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

3. 소음 개선

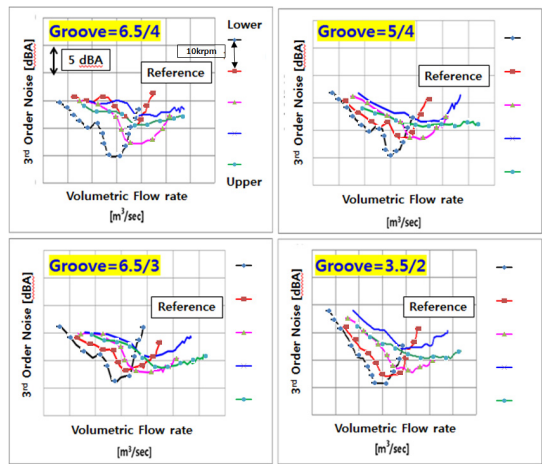
3.1 사각 홈

이전 연구에서⁽⁵⁾ 고안된 유동소음 문제 개선 방안을 적용해 보기로 하였다. 즉, 압축기 휠 입구측에서 주 날개 바로 앞에 Fig. 8(a)의 단면 형상으로 홈을 적용하였다. 4종의 홈 형상에 대하여 3차 order 소음 수준이 Fig. 8(b)에 나타내고 있으며, X축은 유량, Y축은 소음크기를 나타낸다. Reference는 차량 실내에서 소음이 발생하는 선을 표기하고 있다.

4개의 샘플 모두가 base 대비 3차 order 소음은 약 5~10 dBA 만큼 개선한 것으로 나타났으며, 이중 상대적으로 소음 개선에 가장 유리한 홈 형상 (Groove 6.5/4)에 대하여 차량 시험을 실시한 결과,



(a) Definition of rectangular grooves



(b) 3rd order noises for 4 cases

Fig. 8 3rd order noise reduction with rectangular grooves(width/depth)

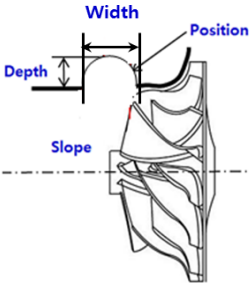


Fig. 9 Definition of round grooves

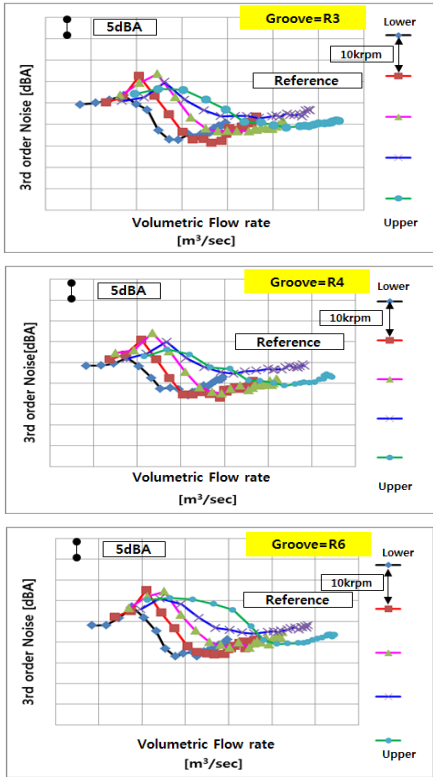


Fig. 10 3rd order noise reduction with round grooves - Ry=4.0 and depth=2.0

문제의 소음은 충분한 수준으로 개선된 것으로 평가되었으나, 엔진 성능이 약 3마력이 낮아져 엔진 성능과 소음을 함께 고려한 최적의 홈 형상 개발이 요구되었다.

3.2 원형 홈

홈의 형상을 컴프레서 입구에서의 유동이 되도록 부드러운 흐름을 유지하도록 Fig. 9와 같은 형상을

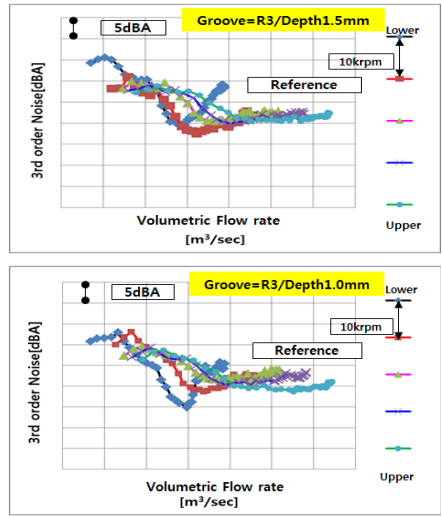


Fig. 11 3rd order noise reduction with round grooves - Rx=3.0 and Ry=2.0

고안하였다. 홈의 형상을 주로 결정하는 것은 홈의 반경 Rx이며, Ry는 홈의 모서리를 부드럽게 처리하기 위한 모서리의 반경이다. 홈의 깊이는 Rx의 중심 위치 이동을 통하여 결정할 수 있다.

(1) Case 1(Ry=4.0, depth=2.0)

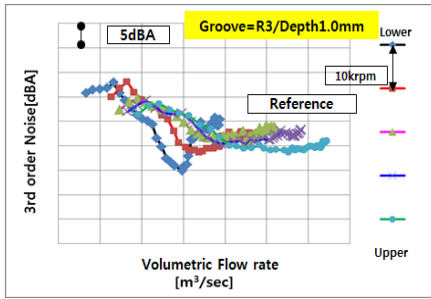
Rx=3, 4, 6에 대한 3차 order 소음 평가 결과가 Fig. 10에 보여주고 있다. Base 대비 약 2~3 dBA 소음 개선이 나타났으나, Rx 차이에 따른 소음 개선 차이는 뚜렷하게 구분되지 않고 있다. 소음 개선 수준이 충분치 않은 것으로 분석되었다.

(2) Case 2(Rx=3.0, Ry=2.0)

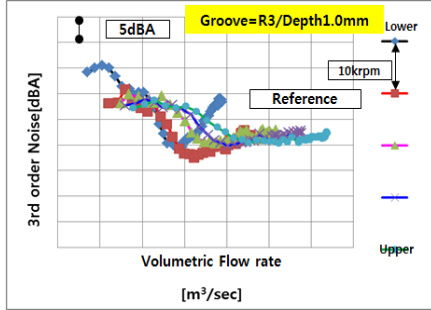
Rx=3.0에 대하여 depth의 차이에 따른 3차 order 소음 저감이 Fig. 11에 표시되었다. Base 대비 소음 저감은 대체로 1 dBA 이하의 수준으로 나타난 바, 차량에서의 소음 저감 효과를 얻을 수 없을 것으로 판단되어 추가 개선 형상을 고려하였다.

(3) Case 3(Rx=2.0)

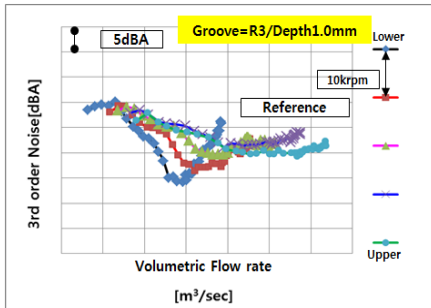
Depth 변화에 대한 3차 order 소음 저감 효과가 Fig. 12에 표시되어 있다. 소음 저감 효과는 전체적으로 약 4~5 dBA 수준으로 나타났으며, 3장 2절 (1)과 3장 2절 (2)에서 제안된 홈의 형상 대비 소음 저감 효과가 크게 나타났다.



(a) Rx=2.0, depth=1.0



(b) Rx=2.0, depth=1.5



(c) Rx=2.0, depth=2.0

Fig. 12 3rd order noise reduction with round grooves - Ry=0.5

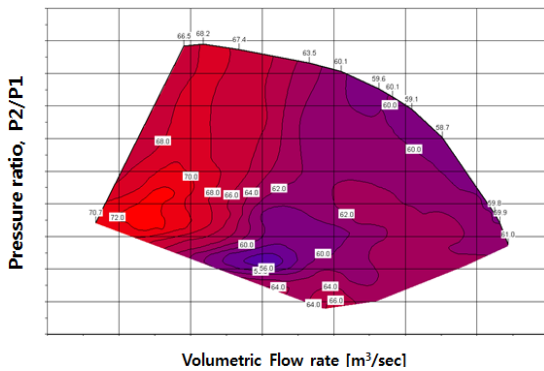


Fig. 13 Noise map for Rx=2.0, Ry=0.5, and depth=1.0



Fig. 14 Compressor performance maps for base (blue) and “Rx=2.0, Ry=0.5 and depth =1.0”(red)

위의 흡 형상들에 대하여 차량 시험을 실시한 결과 Fig. 12(a)의 형상이 차량 소음 저감이 상대적으로 유리하게 나타나, 이 형상의 흡을 3차 order 소음 저감에 최적 형상으로 결정하였다. Fig. 12(a) 형상에 대한 3차 order 소음에 대한 노이즈맵은 Fig. 13과 같다. 붉은색일수록 소음도가 높고 파란색일수록 소음도가 낮을 때 Fig. 2 대비 소음 수준이 전체적으로 낮아진 것을 알 수 있다.

3.3 컴프레서 성능 맵

Rx=2.0 & depth=1.0 최적의 소음 저감 흡 형상에 대하여 압축기 성능을 가스벤치와 엔진 동력계에서 비교한 결과, base 대비 동등임을 확인하였다. Fig. 14는 가스벤치에서 base와 소음 개선 흡 형상의 컴프레서 성능을 비교한 결과이다.

4. 결 론

차량용 터보차저에서 발생한 터보차저 회전수의 3배에 해당되는 3차 order 소음 성분에 대한 소음 특성과 소음 개선 결과는 다음과 같다.

- 문제의 유동소음은 4 k~6 kHz의 영역에서 구분되어 나타나며, 100 krpm 부근에서 소음의 크기가 가장 높게 나타났다.
- 이전의 연구에서 유동소음 저감 방안으로 제안

된 컴프레서 입구의 사각흡을 적용한 결과, 최대 약 10 dBA의 소음 저감이 나타났으나, 엔진 성능의 감소가 나타났다.

· 원형 형상의 흡을 적용한 결과, 사각형 흡 대비 소음 저감 효과가 낮아졌으며 흡의 형상에 따라 소음 저감 효과에 차이가 있어 최적 흡 형상이 존재하는 것으로 분석되었다.

· 가스벤치에서의 소음 시험과 차량 시험을 통하여 최적의 흡 형상을 결정하였으며, 이 형상에 대하여 엔진 성능의 저하가 없음을 확인하여 차량에 최종 적용하였다.

· 컴프레서 입구에 흡의 적용은 협대역 유동소음 뿐만이 아니라, 주파수가 비교적 높고 넓은 영역의 유동 소음에 대해서도 소음 저감 효과가 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2015년 정부(W300과제번호10050290 과제산업통산자원부)의 지원을 받아 수행된 것임.

References

(1) Arnold, S., 2004, Turbocharger Technologies to Meet Critical Performance Demands of Ultra-low Emissions Diesel Engine, SAE Technical Paper 2004-01-1359.

(2) Trochon, E. P., 2001, A New Type of Silence for Turbocharger Noise Control, SAE 2001-01-1436.

(3) Trochon, E. P., 2001, A New Type of Silencers for Turbocharger Noise Control, SAE Technical Paper, Vol. 19, No. 2, pp. 11~18.

(4) Park, H. I., Hong, S. Y., Kang, S. Y. and Kim, J. G., 2011, Reduction of an Intake Flow Noise Induced in a Vehicle Turbocharger, Proceedings of the KSAE Conference & Exposition, pp. 90~97.

(5) Lee, H. I., 2010, Noise Diagram of an Automotive Turbocharger and Its Applications, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol 20, No. 5, pp. 502~509.

(6) Park, H. I., Kim, H. J., Kang, S. Y. and Eom, S. B., 2010, Investigation on Engine Operation Area based on Turbocharger Noise Map, Proceedings of the KSAE Conference & Exposition, pp. 462~467.



Hoil Park received M.S. degree from Kumoh Institute of Technology in 2009, and has 15-year NVH experience at two auto-part companies. He is currently a team leader of Keyyang R&D Center. His interests are reduction of air-borne and structure-borne noises radiated from automotive turbochargers.



Sungbae Choi received M.S. from KAIST in 1988, and Ph.D. degrees from The University of Michigan in 1997. He is currently a technical advisor at Keyyang Precision Company. His research interests are reduction of air-borne and structure-borne noises induced from engines as well as high-speed turbochargers.



Seongsik Jang received B.S. and M.S. degrees of Mechanical Engineering from Sungkyunkwan Univ. in 1986 and 1988. 25 years of Powertrain R&D center experience at GM Korea including 3 years as a director, and he is currently a director of Keyyang R&D center.



Junyoung Hwang received B.S. degree from Catholic Univ. of Daegu in 2013. He has worked for Keyyang Precision Company as an NVH test engineer since 2013. His interests are dynamic movement of rotating system of high-speed turbochargers.