

대형 디젤 엔진 터보차저 고주파 소음에 관한 연구

최 성배 정 용진 여 승동

현대자동차, 파워트레인연구소

Investigation on Turbocharger Whine Noise in a Heavy-duty Diesel Engine

Sungbae Choi

Yong-Jin Jeong

Seung-Dong Yeo

Powertrain R&D Center, Hyundai-Motor Co., Ltd.

choisun@hyundai-motor.com yjjeong@hyundai-motor.com sdyeo@hyundai-motor.com

Abstract

Current diesel engines are usually equipped with turbochargers for improving fuel economy as well as meeting more stringent emission regulations. These turbochargers usually cause noise problems because they spins very high such as 100,000 to 200,000 rpm. These noises are largely divided into whistle and whine noises. The frequency of whistle noise corresponds to their rotation speed, and the frequency of whine noise does to the multiplication of their rotation speed and the number of compressor blades.

Turbocharger manufacturers developed a special type of compressor, effectively compressing air sucked from a duct; Recirculation Compressor Cover (RCC) or Map Width Enhancement (MWE). This special structure improves turbocharger's capability by expanding compressor's working area, but it seriously causes a noise problem, whine noise. There were many trials to suppress the noise occurred inside a compressor such as modification of a compressor, noise baffles or secondary measurements. However, it was currently concluded that the whine noise caused by the special compressor can not be reduced to that done by a standard compressor, and the strength difference of whine noises between the two compressors is not negligible. Thus, the standard compressor is decided to be applied to a newly developing heavy-duty diesel engine in order to resolve the turbocharger noise problem with a stiffened suction duct directly connected to a compressor.

1. 서론

최근에 생산중인 디젤 엔진은 거의 100% 터보차저를 장착하고 있다. 터보차저는 고압 분사 장치와 함께 점차 강화되고 있는 배기 가스 규제와 만족 및 연료 효율을 증대하기 위한 장치이다.¹⁾ 터보차저는 배기 가스의 운동에너지를 이용하여 흡

입 공기를 압축함으로써 많은 양의 공기를 엔진에 공급하는 장치로서, 소형 엔진에서는 소형의 터보차저를 적용하고, 큰 흡기 용량이 요구되는 대형 디젤 엔진에서는 대형 터보차저를 사용하고 있다.

터보차저에서 발생하는 소음은 크게 두가지로 구분되는데, "Whistle" 소음과 "Whine" 소음이 그것이다. 우선 "Whistle" 소음은 보통 터보차저의 회전체 또는 그 외의 구조물 가공시 발생하는 오차 및 장착 상태로 부터 터보차저의 무게 중심이 완벽하게 회전 중심축과 일치하지 못하고 다소의 불평형 질량이 필연적으로 발생하게 되는데, 이 불평형 질량에 의하여 회전수에 비례하는 주파수로 진동이 발생하여 이와 연결된 하우징을 가진 함으로써 주로 발생한다. 이에 의하여 가진된 터보차저 하우징의 진동에 의하여 구조물 방사 소음이 발생하기도 하고 이 진동이 터보차저와 결합되어 있는 구조물에 전달되어 소음을 유발하기도 한다. 이 소음 발생 주파수는 대체로 2kHz 내외가 된다.²⁾

한편, 콤프레서 회전체에는 공기 압축을 위하여 회전 날개가 장착되어 있는데, 이 회전 날개의 거동이 공기 유동에 압력 변화를 유도하여 콤프레서 회전체의 회전수와 날개수의 곱에 해당하는 고주파 소음인 "Whine" 소음이 발생한다. 이것은 대체로 5kHz 이상의 고주파 소음에 해당된다. 대형 디젤 엔진의 경우 보통 Whistle 소음은 엔진 소음에 묻혀 구분하기 힘들기 때문에 소음 문제로 크게 거론되지 않으나, Whine 소음이 발생하는 주파수 구간에서는 엔진 소음의 기여도가 매우 낮은 반면, 주변 주파수 소음 대비 Whine 소음의 크기가 상대적으로 크기 때문에 비록 낮은 크기의 소음이기도 하나 쉽게 구별할 수 있으며, 소음이 협대역으로 방사되기 때문에 사람의 귀에 거스르게 된다.

본 논문에서는 신규 대형 디젤 엔진 - 6 기

통, In-line, 터보-인터쿨러, 최대 출력 440 [ps] / 1800 rpm - 개발시 소음 특성이 고려되지 않고 성능 측면에서 크게 비중을 두어 선정된 터보차저에서 발생하는 Whine 소음의 원인 규명과 개선 내용을 설명하기로 한다.

2. 터보차저 소음 평가 방법

엔진 대상에서 터보차저로부터 방사되는 특이음을 평가하는 방법은 엔진 개발 업체 또는 터보차저 개발 업체 나름대로의 시험 규격을 가지고 있다.

초기에는 업체에서 제시한 터보차저 소음 평가 방법에 근거하여 엔진 대상에서 터보차저로부터 방사되는 특이 소음을 평가하였으나, 여러 엔진에서 수회에 걸친 시험 경험으로 부터 Table.1 에 보여진 것과 같은 단순화된 시험 조건으로 터보차저에서 발생하는 Whine 소음 평가가 충분함을 확인하였다. 소음 측정 위치는 터빈과 콤프레서 중심에서 30cm 거리이다.

Table.1 엔진 대상 터보차저 소음 평가 조건

부하	엔진 회전수	
	시작점	종료점
100%	Min R.rpm ^{*1)}	R.rpm

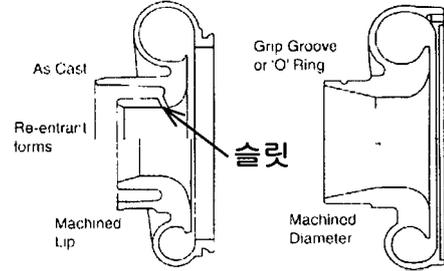
*1) 약 1000 rpm

터보차저 단체 소음 평가는 엔진 배기 가스 대신에 공기를 이용하여 터빈과 콤프레서를 구동시키며, 콤프레서에 흐르는 유량과 터보차저 회전수를 적절히 조절하여 콤프레서 작동 조건을 설정한다. 이 작동 조건은 콤프레서 성능곡선을 형성하는 흡입 공기의 압축비와 흡기 유량에 의하여 결정된다. 이 터보차저 운전 조건하에서 콤프레서 측에서 방사되는 소음을 개방된 콤프레서 입구로부터의 일정 거리에서 측정하여 평가한다.

3. RCC Type 콤프레서

터보차저 효율을 증대시키기 위하여 Fig.1 의 좌측과 같은 콤프레서가 개발되었다. 이 콤프레서는 흡입 공기 입구를 2원화 하여 공기 흐름에 자유도를 부여함으로써 터보차저의 정상 작동 구간을 확장하는 효과를 얻을 수 있다. 이 공기 흐름의 자유도는 슬릿 (Slit)을 통하여 이루어지는데, 이 슬릿은 초킹 (Choking) 유량을 증대시키고, 서징 (Surging) 유량을 감소시켜 터보차저의 콤프레서 작동 범위를 증대시켜 엔진의 성능을 향상시키고, 터보차저의 고지 적용성을 확대시키는 역할을 한다. 이러한 구조를 가진 콤프레서를 업체에 따라 다른 이름을 부여하고 있는데, 마쓰비시중공업에서는 RCC (Recirculation Compressor Cover) 라고 부르며, Holset 에서는 MWE (Map Width

Enhancement)^[3,8] 라고 부른다. 이러한 형태의 터보차저는 엔진 성능 및 터보차저 내구 측면에서는 유리하나 터보차저 Whine 소음을 심각하게 유발시키므로 차량에의 적용에는 드물다.



RCC or MWE 형 일반형 (Standard)
Fig.1 터보차저 콤프레서의 종류^[2]

4. 소음 개선 방안

(1) 슬릿 위치 변경

RCC 타입의 콤프레서 적용시 소음 발생은 터보차저의 성능 향상을 위하여 설치한 슬릿으로부터 유발됨을 확인하였다. 이 경우 슬릿을 통하여 흐르는 공기의 유동이 콤프레서 날개의 회전으로 인하여 압력차가 발생하게 되고 이 압력차가 Whine 소음을 유발하는 것으로 추정된다. 터보차저 회전수가 낮을 경우에 이 소음은 엔진 소음에 의하여 묻혀 구분되지 않지만, 고속에서는 엔진 주요 소음 주파수 영역을 벗어나게 되므로 뚜렷하게 감지된다. Fig.2 는 본 연구 대상 엔진에 장착된 터보차저를 도식적으로 보여 주고 있다.

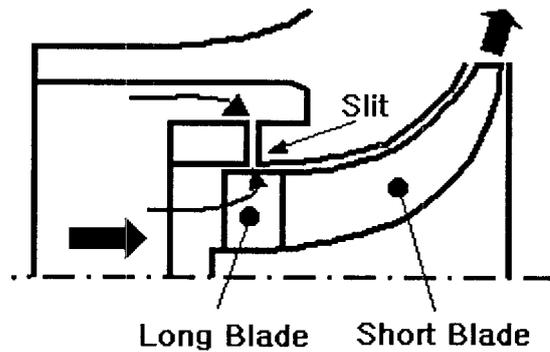


Fig.2 RCC 콤프레서 단면

이를 확인하기 위하여 슬릿을 제거한 콤프레서를 적용한 터보차저를 장착하여 엔진 소음 시험을 한 결과 이 Whine 소음이 상당량 저감되며 차량 실내에서는 매우 낮은 수준의 Whine 소음이 발생함을 확인하였다. 이는 터보차저의 성능 및 내구 특성이 고려되지 않았기 때문에 엔진에의 적용까지는 충분한 확인 시험이 요구되었다.

초기 개발 콤프레서 슬릿 위치는 Fig.2 에 서와 같이 Long Blade 측에 위치하고 있었다. 이

회전 날개와 슬릿에 의하여 콤프레서 회전수와 날개수의 곱에 해당되는 주파수의 White 소음이 심각하게 방사됨을 확인하였다. Long Blade 와 Short Blade 는 각각 7 개로 구성되어 있다. Short Blade 부분은 Long Blade 와 겹치기 때문에 실제로는 14 개의 날개가 회전하고 있는 것과 같다. 따라서, 상기의 슬릿 위치를 이곳으로 이동시키면 White 소음 발생 주파수가 2 배로 증가되는 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상했다. 즉, 기존의 슬릿 위치에서 주요 White 소음의 발생 주파수는 약 7kHz~12kHz 이나, 슬릿의 위치를 14 개의 회전날개 부분으로 이동시키면, White 소음의 발생 주파수가 이전의 두배인 14kHz~24kHz 로 이동되어 주요 가청 주파수 영역에서의 White 소음의 강도가 약화될 것으로 기대하였다. 물론 이의 소음 개선안은 터보차저의 성능과 내구 특성은 고려되지 않고 소음 개선에만 초점을 맞추었다. 이 슬릿 위치 이동에는 슬릿의 폭, 위치, 및 슬릿의 가공 각도가 고려되었다. 이를 바탕으로 여러 경우의 시험 샘플을 제작하였으며 우선 콤프레서 단품 소음 시험의 수행을 통하여 최적의 소음 특성을 보이는 샘플을 선정하였다.

슬릿의 가공 각도는 가능한 한 회전축과 수직을 유지하려 하였으며, 기존의 콤프레서를 이용했기 때문에 슬릿 위치에 따라 경사가 되기도 했다. 이들을 터보차저의 단품 소음 시험 평가를 통하여 1 차 비교하였다. 시험 조건중 90,000 [rpm] / 0.4 [m³/s] 는, 엔진 전부하 조건에서 1,600~1,700 [rpm] 에 해당된다.

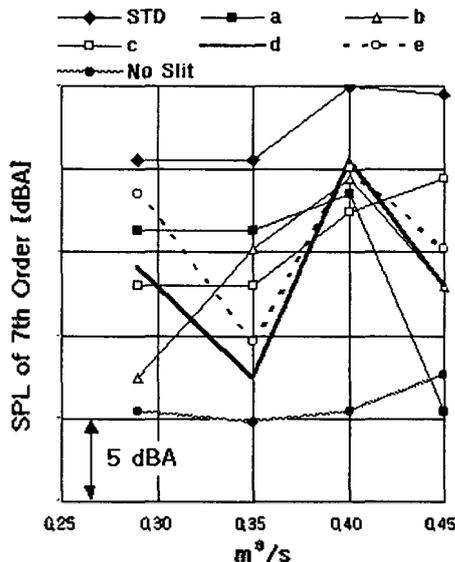


Fig.3 터보차저 단품 White 소음 크기 비교 (터보차저 회전수; 90,000 [rpm])

각 콤프레서 샘플에서의 터보차저 White 소음의 크기를 비교하면 Fig.3 과 같다. 이 결과는

소음 개선을 위한 시험 샘플들이 기존 샘플 (RCC, "STD") 대비 White 소음의 절대 크기는 5~10 [dBA] 만큼 저감되었으나, "No Slit" 대비해서는 아직도 5~15 [dBA] 만큼 높은 수준에 있다. 소음 개선 샘플 중 소음 측면에서 다소의 소음 차이는 있으나, 어느것도 "No Slit" 에는 미치지 못하는 것으로 나타났으며, 이 분석 결과를 토대로 최적의 샘플을 선정하여 엔진 대상에서 소음 수준을 평가하였다. 최적의 샘플은 전영역의 소음 수준을 감안하여 "d" 샘플을 선정하여 엔진 대상에서 터보차저 White 소음 저감 효과를 확인하였다.

Fig.4 는 엔진 대상에서의 "d" 샘플의 White 소음 수준을 "No Slit" 의 경우와 함께 비교하고 있다. "d" 샘플은 "No Slit" 샘플 대비 높은 수준의 콤프레서 White 소음이 발생하는 것으로 나타났다. 그림에서 점선 부분은 터보차저 White 소음을 나타낸다.

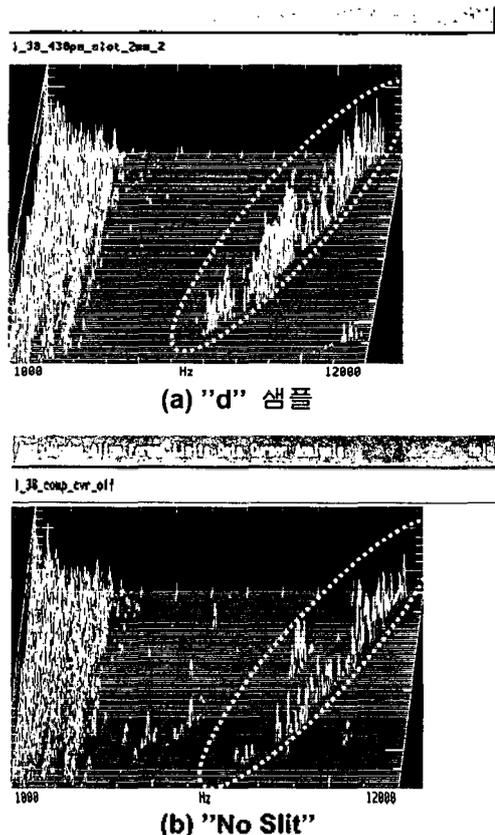


Fig.4 소음 개선 콤프레서의 엔진 대상 시험 결과

여기서 제시된 시험 샘플들이 모든 경우를 대표하는 것은 아니나, 보다 많은 연구가 수행되지 않는 한, 슬릿 위치 및 폭 변경에 통한 RCC 타입의 콤프레서는 "No Slit" 콤프레서의 White 소음 대비 열세를 충분히 극복하기 어려울 것으로 보인다.

(2) 주변 구조물 개선

컴프레서 Whine 소음이 컴프레서로부터 주도적으로 유발되기는 하나, 이는 이와 근접하여 연결된 덕트 구조물을 통하여 방사되기도 한다. 부가적으로 컴프레서 Whine 소음을 개선하기 위하여 이들 덕트 구조물의 근접 소음 방사 특성을 분석하여 Whine 소음 방사에 기여하는 구조물에 대하여 우선 순위를 정하였다. 시험 결과로 부터 컴프레서의 입구측 덕트에서 터보차저의 소음 특성이 가장 뚜렷하게 나타났으며, 출구측 덕트에서는 상대적으로 Whine 소음 기여도가 낮았다. 이를 근거로 하여 우선 덕트의 강성을 증대시켜 이를 통한 소음 방사를 최소화 하는 방안을 강구하였다. Fig.5에서 점선 부분은 덕트의 강성 보강 형태를 보여주고 있다.

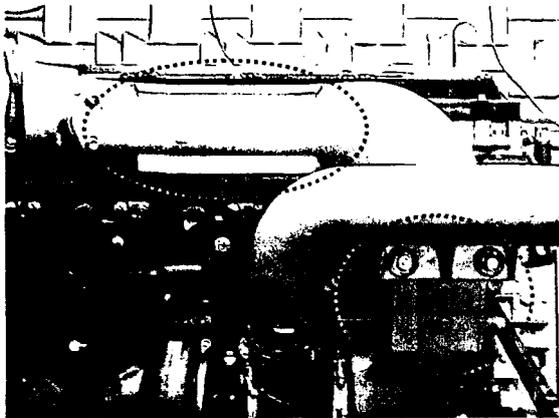


Fig.5 터보차저 덕트 강성 보강

이 시험 샘플 적용에 따라 터보차저 Whine 소음의 저감과 함께 터보차저측 엔진 1m, 1200 rpm 이상의 엔진 회전수 구간에서의 엔진 소음이 약 2 [dBA] 만큼 저감되는 효과를 얻었다. 이 소음 저감량은 엔진 진동으로 부터 유발된 소음 저감과 컴프레서 Whine 소음 저감이 모두 포함되어 있다. 이 개선 방안을 "No Silt" 컴프레서와 함께 적용함으로써 차량실내에서 터보차저 소음을 거의 느낄 없을 정도로 저감시켰다.

5. 결론

엔진 개발 초기에 엔진 성능 측면이 크게 강조되어 선정된 터보차저로 부터 유발된 컴프레서 Whine 소음 개선을 개선하고자 하였다. 지면의 제한상 본 논문에서 거론되지 않은 개선 방안을 포함한 여러 방안을 통하여 기존에 선정된 터보차저의 Whine 소음을 개선하고자 하였다. 이 개선 작업을 통하여 다음과 같은 결론을 유도할 수 있었다.

(1) 현재의 소음 저감 기술로는 RCC 타입의 터보차저 적용시 컴프레서 Whine 소음이 문제의

수준으로 남을 것으로 예상된다. 따라서, RCC 타입의 컴프레서를 채택한 터보차저를 선택하고자 할 경우에는 이로부터 방사되는 Whine 소음 경도가 반드시 수반되어야 한다.

(2) (1)항에 근거하여, 본 논문의 개발 대상 엔진에서는 RCC 타입의 컴프레서에서 슬릿을 제거한 상태에서 엔진 성능을 재투입하여, 1차적으로 컴프레서 Whine 소음을 개선하였다. 아직 남아 있는 Whine 소음은 컴프레서에 연결된 덕트 구조물의 강성을 보강하여 저감시켰다. 이들을 통하여 차량 실내에서 컴프레서 Whine 소음을 느낄 수 없는 수준으로 개선하였다.

6. 감사의 글

이 시험에 수반된 컴프레서 샘플 제작 및 터보차저 단품 소음 시험 결과 부분은 미쓰비시중공업에서 제공하였다. 이를 논문에 인용하도록 허용해준 미쓰비시중공업 T. Mikogami 과장에게 감사드립니다.

7. 참고 문헌

- [1] N. Hikosaka, 'A view of the future of automotive diesel engine', SAE 972682
- [2] J. W. Fitch, *Motor truck engineering handbook*, Society of automotive engineers, Inc., 4th ed., 1994
- [3] Holset Engineering Co. Ltd., *Turbocharger application guidelines*, 1998
- [4] N. Ikeya, H. Yamaguchi, K. Mitsubori, and N. Kondoh, 'Development of advanced model of turbocharger for automotive engines', SAE920047
- [5] Y. Miyagi, T. Koiko, N. Ikeya, and S. Takabe, 'The trend of turbocharger and supercharger and their effect', 自動車技術會 學術講演會前刷集 972, pp.121-124
- [6] 宮下直也, 黒木秀雄, *自動車用 ディーゼルエンジン*, 山海堂, 1993
- [7] In-Soo Jung, Sungbae Choi, Douck-Han Bae, and Seung-Dong Yeo, 'Investigation on turbocharger noises and their reduction of light-duty diesel engines', SAE 2000 World Congress, OOP-93, Detroit, Michigan, Mar. 2000
- [8] F.B. Fisher, 'Application of map width enhancement devices to turbocharger compressor stages', SAE 880794