

흡기럼블음 저감을 위한 다기관에 관한 연구

박기춘 김재현 강구태

현대자동차, 파워트레인연구소

A study on Intake Rumble Noise and Related Intake Manifold Design

Kichun Park

Jaeheun Kim

Kutae Kang

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

pkcwork@netian.com cacique@hyundai-motor.com kanggood@hyundai-motor.com

Abstract

흡기 럼블 소음의 발생원을 규명하고 흡배기계와 엔진을 포함한 1-D 모사 실험을 통하여 흡기 럼블 소음을 저감하기 위한 다기관의 구조를 제안하고 실험을 통하여 확인하였다. 흡기 럼블 소음은 다기통 엔진에서 기통간 흡입 편차 외에도 쓰로틀 바디로부터 각 연소실 흡기 밸브 사이의 거리 편차로 인하여 발생하고 거리 편차를 줄여 제작된 흡기 다기관에서는 Half Order 성분이 저감되어 럼블 소음이 저감되었다.

서론

차량 소음의 전체 소음 레벨(Overall Level)이 개선됨에 따라 럼블 소음은 음질(sound Quality) 측면에서 차실 내의 불쾌감(annoyance)의 인식을 증대시키는 효과를 가져와 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 엔진에서의 주된 럼블 소음은 크랭크축(Crankshaft)의 진동에 의한 엔진 방사음, 가속시 흡기 럼블음 등이 있고 흡기 다기관을 포함한 흡기계의 음파에 관하여는 관성 효과, 맥동 및 공명 등의 동적 효과를 이용한 체적효율의 향상에 대하여 주로 연구가 행하여져 왔다[1]. 흡기 토출음의 전체 소음은 특정 주파수에 작용하는 공명기(Resonator)를 흡기 토출구와 쓰로틀 바디(Throttle Body) 사이에 부착하여 제어하여 왔으나 럼블 소음은 하나의 특정 주파수의 소음원에 의하

지 않으므로 이와 같은 대책이 큰 효과를 보지 못한다. 흡기 럼블음에 대한 연구로는 흡기계 다기관 내의 음향 모드의 영향을 최소화하여 연소실간의 토출음 반응 편차를 줄임으로써 Half Order 성분을 저감시킬 수 있는 형태의 흡기 다기관이 제안되었다[2]. 본 논문은 흡기계에서 발생하는 럼블 소음의 발생 원인을 밝혀 이를 억제하는 흡기 다기관의 구조를 제안하고자 한다.

럼블 소음의 발생

럼블 소음은 그림 1과 같이 셋 이상의 근접한 주파수의 소음이 서로 간섭하여 주기적인 크기 변화의 반복 특성을 가지는 형태의 소음을 말한다.

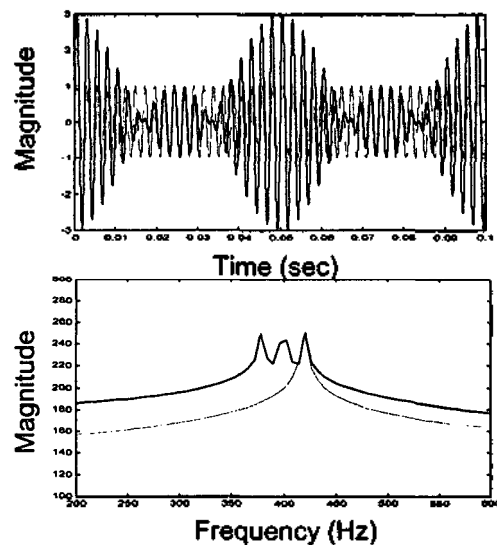


그림 1. 시간, 주파수 영역의 럼블소음

일반적인 4행정 엔진의 경우에서 발생하는 흡기 럼블 소음은 크랭크축 1회전 당 폭발수에 해당하는 폭발 차수(4기통:2차, 6기통:3차)와 그 주변의 0.5차 하모닉(harmonic) 차수 성분에 의하여 형성되고 비트(beat)음의 특성처럼 인접한 차수 성분들의 크기 차이가 작을수록 더 강하다. 즉 럼블 소음을 줄이기 위해서는 폭발 차수 성분 외에 0.5차 성분을 줄여야 한다 본 연구의 대상 엔진에서는 6.0차 성분과 근접 차수인 5.5차, 6.5차 성분이 주된 럼블 소음을 형성한다.(그림 6. (a)).

엔진 토출음에서 0.5차 하모닉 성분이 발생하는 요인으로는 기통간 흡기량의 편차에 의한 요인, 기주 공명에 의한 기통간 응답특성의 변화 요인 [2], 음파 전달 거리에 의한 위상차가 있다. 이 중 양산엔진에서의 흡기량 편차는 럼블 소음에 영향을 줄 정도로 크지 않고, 기주 공명에 의한 요인은 공명 주파수 대역의 rpm영역에서만 존재하여야 한다는 점에서 엔진회전수가 변화하면서 지속적으로 발생하는 0.5차 하모닉 성분들에 대해서는 구체적인 설명이 불가능하다. 음파 전달 거리, 즉 각 흡기 밸브로부터 서지탱크 입구에 이르는 길이 편차 요인에 의해 럼블 소음이 발생하는 원리는 다음과 같다. 가장 간단한 경우로써 각 기통의 흡기 밸브가 열릴 때 발생하는 흡기 포트의 압력 변동을 Hanning함수로 가정하였다.



(a) 이상적인 경우 (b) 편차가 있는 경우
그림 2. 흡기 매니폴드의 형상

이상적인 경우로써 각 기통간 거리 편차가 없는 경우(그림 2. (a))는 폭발 순서에 따라 120°의 위

상차를 갖고 서지탱크 입구 위치를 기준으로 하여 합성하면 된다. 반면, 각 기통 간 거리 편차가 선형적으로 존재하는 경우(그림 2. (b))를 모사하기 위해서는 각 러너 입구 중심간의 거리 및 서지탱크 입구까지의 거리를 고려하여 기통별로 폭발 간격의 위상차에 거리차에 의한 위상차를 더하여 주고 이를 합성하면 된다. 이때, 엔진 회전수는 3000rpm, 러너간 거리 편차는 5cm로 가정하면 1번 기통과 6번 기통 러너의 거리 편차에 따른 전파 시간의 편차는 이상적인 경우에 비해 크랭크각 기준으로 약 13°차이(120° → 107°, 상온 기준)를 가지게 된다. 이 결과를 시간 및 주파수 영역에서 도시한 것이 그림 3이다.

그림 3. (a)는 거리편차가 없는 이상적인 경우로 폭발차수 성분에 해당하는 C3, C6, C9 성분이 지배적으로 나타나고 거리편차가 존재하는 경우는 폭발차수 성분 외에 0.5차 하모닉 성분들이 존재하여 럼블 소음이 발생함을 보인다.

흡기 과정의 압력 변동이 실제와는 다르지만 일반적인 경향을 보기에는 충분하므로 이와 같은 결과로부터 서지탱크 입구까지 이르는 각 기통 러너 간의 거리 편차가 럼블 소음을 발생시키는 요인이라는 가정이 적절함을 확인할 수 있다.

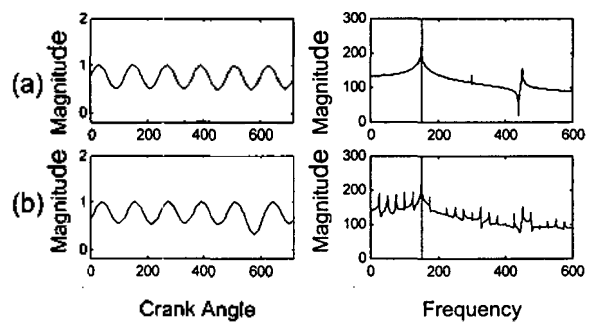


그림 3. 6기통 엔진의 흡기 과정의 압력변동 (a) 이상형 (b) 일정한 거리편차를 가지는 형

개선 사례

흡기 다기관은 엔진의 성능에 큰 영향을 미치는 요소이고 특히 다기관의 길이에 따라 중속 및 고속 rpm영역의 성능이 크게 좌우되므로 엔진 성

능과 밀접한 관계를 갖는 체적 효율이나 연소특성을 토출 소음과 동시에 모사하여야 하고 이를 수행할 수 있는 WAVE Code를 사용하였다[3,4].

흡기 토출구에서 엔진 및 배기 매니폴드까지 구성된 모델을 사용하여 엔진회전수 1000rpm부터 6000rpm까지 500rpm 단위로 증가시키면서 정속, 전부하 상태에서 해석하였다. 우선 기존의 흡기 매니폴드 형태인 기본형에 대하여 해석을 수행하면서 시험데이터와의 비교를 통해 모델링에 대한 검증은 거친후 서지탱크 입구로부터 러너까지의 거리가 모두 균일한 러너 배치를 가지는 이상적인 형태에 대해 해석을 수행하였다. 이러한 이상적인 형태의 개념을 바탕으로 하여 실제 장착 가능하도록 기본형 흡기 매니폴드를 수정 보완한 집중형 형태의 흡기 매니폴드를 모델링하여 해석하였다.

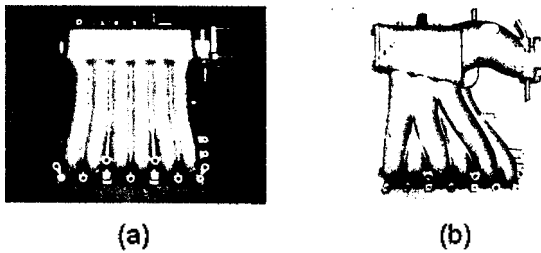


그림 4. 기본형 및 집중형 흡기 대기관

그림 6은 토출구 소음의 Overall 레벨과 주 령을 차수 성분인 5,5차 6.5차 성분의 해석 결과로 해석상의 오차를 고려하더라도 Overall 소음수준과 령 소음 수준의 저감이 상당하므로 집중형 흡기 매니폴드를 제작, 시험하였다.

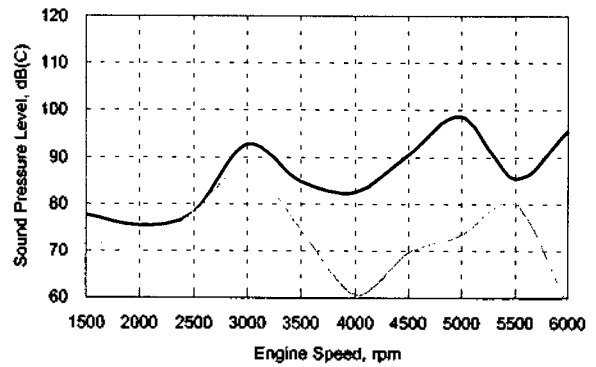
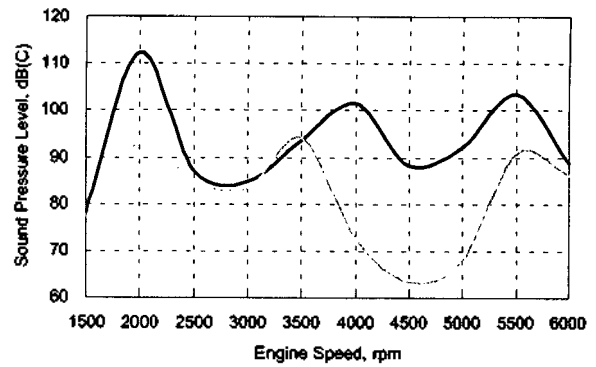
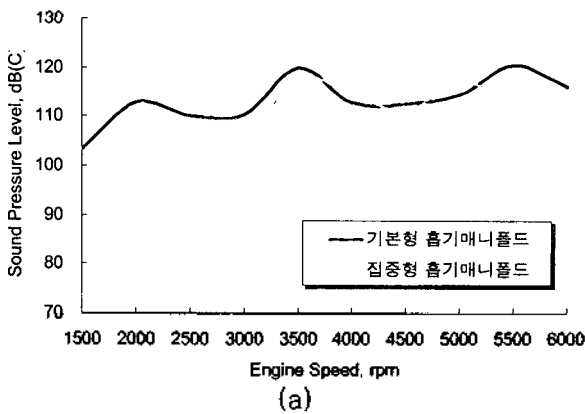


그림 5. 토출구 소음 해석 결과
(a) Overall Level (b) 5.5th Order (c) 6.5th Order

집중형 흡기 대기관은 엔진의 성능을 유지하고 차량에서의 장착성을 고려하여 러너를 집중시키기 위한 재원 변경 외에는 기본형의 기하학적 재원을 최대한 유지하는 기준에서 이루어졌다. Fig. 9는 엔진회전수 변화에 따른 토출소음의 변화를 1KHz 이하 대역에서 도시한 Spectral Map이다

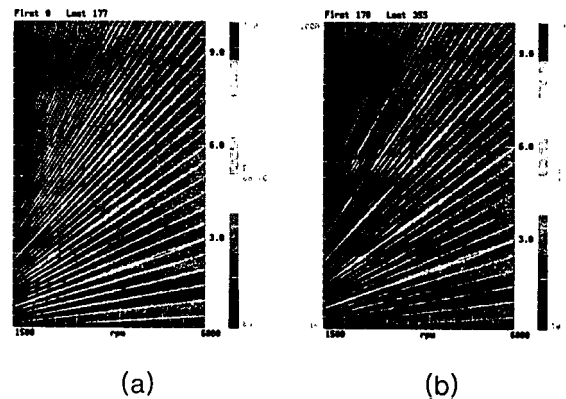


그림 6. 기본형(a) 및 집중형(b)의 흡기토출음

전부하 가속시험에 대한 토출소음의 측정결과를 살펴보면 폭발차수 성분은 거의 동등 수준이라고 0.5차 하모닉 성분들이 감소하여 전반적으로 럼블 소음이 감소함을 알 수 있다.

결과 정리 및 결론

흡기계의 럼블 소음에 대하여 이의 발생 메커니즘을 설명하기 위하여 간단한 해석적 접근 및 수치 모사를 통해 가정의 적절함을 밝히고 이를 근간으로 하여 실차 적용 가능한 집중형 흡기 매니폴드를 제작, 시험하여 긍정적인 결과를 도출하였다. 이를 간략히 정리하면 다음과 같다.

- (1) 흡기계 전체 제원 상에서 각 러너 입구가 가지는 기하학적 거리 편차는 기주진동을 형성함에 있어 각 기통에서 발생한 압력파의 전파길이 차이를 제공하게 되고 이로 인해 흡기 럼블 소음이 발생한다고 가정하고 간단한 해석적 접근을 통해 이의 적절함을 확인하였다.
- (2) WAVE를 이용하여 수치적인 모사를 수행하여 거리편차가 없는 이상적인 흡기 매니폴드로부터 집중형 흡기 매니폴드를 모델링하고 이의 럼블 소음의 저감 효과를 확인하였다.
- (3) 해석결과로부터 제작된 집중형 흡기 매니폴드 모델에 대한 대상 엔진의 흡기 토출을 측정 결과, 해석에서 예측한 바와 같이 0.5차 하모닉 성분들이 전반적인 엔진회전수 영역에서 약 10dB정도 저감됨으로 인하여 럼블 소음이 개선되었으며 Overall Noise Level도 저속 구간에서 약 2dB 정도 개선하였다.

이와 같은 결과로부터 집중형 흡기 매니폴드 장착을 통한 흡기 럼블 소음 개선을 통하여 대상 엔진 및 차량 실내 음질 개선을 도모할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Heywood, J.B, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, 1988
2. T. Suzuki and F. Kayaba, "The Analysis and Mechanism of Engine Intake Rumbling Noise", SAE paper 901755, 1990
3. J. J. Silvestri, T. Morel, and M. Costello, "Study of Intake System Wave Dynamics and Acoustics by Simulation and Experiment", SAE paper 940206, 1994
4. WAVE Simulation Code, Documentation/ User's Manual Version 3.5, Ricardo Software, 1999
5. W. Eversman and J. A. White, Jr., "Acoustic Modeling and Optimization of Induction System Components", SAE paper 951261, 1995
6. Y. Nishio, T. Kohama, and O. Kuroda, "New Approach to Low-Noise Air Intake System Development, SAE paper 911042, 1991