

Fig. 1 Noise Generation In Diesel Engines.

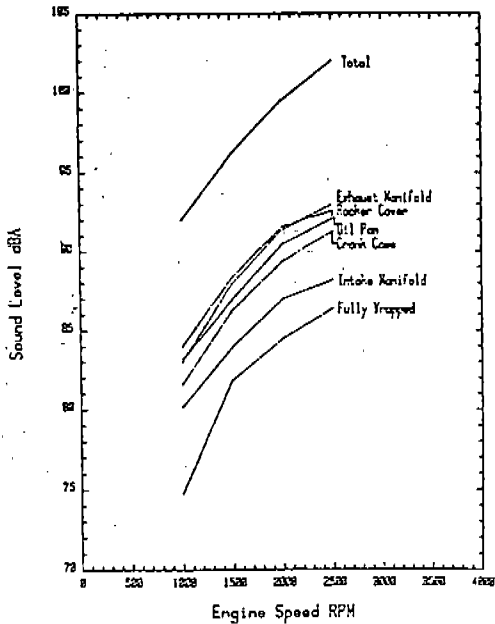


Fig. 2 Noise Contribution of Various Component of Diesel Engine.

명하는 기술이 사용되고 있다.

4000 RPM, 전부하 조건하에서 엔진 전면에서 등음향 인텐시티 맵핑 결과에 의하면, 크랭크 샤프트부의 음향 인텐시티 레벨이 제일 높아 주소음원임이 밝혀졌다. (그림3 참조)

Ricardo 사에서는 주로 음향 파워어를 측정하여 소음원 랭킹을 하고 있다. 그림 4는 Ricardo 사의 D. Morrison 이 배기량 12리터 엔진을 대상으로 소음원을 랭킹한 결과이다.

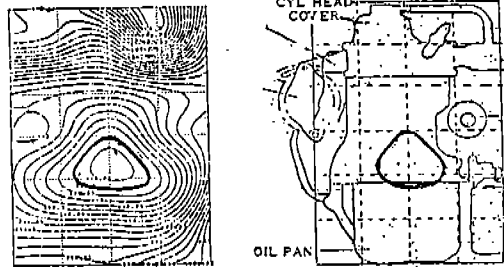


Fig. 3 Sound Intensity Contour Mapping of Diesel Engine Front Side.

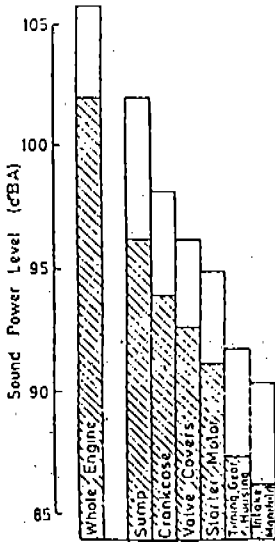


Fig. 4 Noise Source Ranking By Sound Power Measurement.

빛금친 부분은 소음 저감 대책후의 결과이다.⁽³⁾

3. 연소 소음

디젤 엔진은 비교적 높은 압축비와 연소지연 등으로 높은 압력 상승율과 함께 실린더 내부에 압력이 높아 결과적으로 연소 소음이 매우 크다. 압축 행정중에 압력상승율인 $dp/d\theta$ 를 감소시키면 연소 소음을 줄일수 있다. 그림 5는 실린더 압력의 피크치를 유지 하면서 $dp/d\theta$ 를 줄여 엔진 출력을 떨어지지 않게 하면서 연소 소음이 감소하는 것을 보여 준다.

디젤 엔진의 연소 현상은 매우 복잡한 현상이다. 실린더내에 연료가 분사되는 순간에 점화되지 않고 점화 지연 기간이 있다. 점화 지연 기간은 연료가 연소실내에 분사 될때의 흡입 공기의 압력과 온도, 엔진의 운전 속도, 연료의 세탄가 등에 의한 영향을 받는다. 점화 기간 동안은 매우 복잡한 과정이 발생한다. 정상적인 엔진 운전중에는 압축 온도와 인젝션 타이밍이 점화 지연 시기에 가장 큰 영향을 준다. 흡입 공기 속도, 분사 압력, 분사계 형상들은 두번째로 중요한 영향을 미친

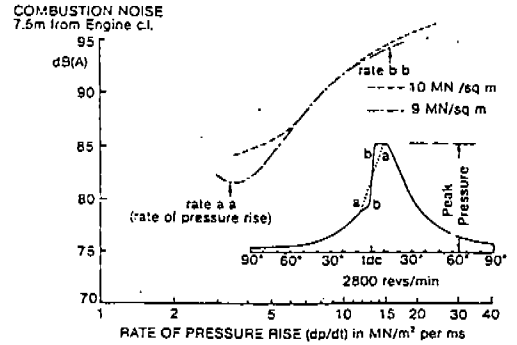


Fig. 5 Combustion Noise From Cylinder Pressure Diagrams with Various Rates of Pressure Rise and the same Peak Pressure.

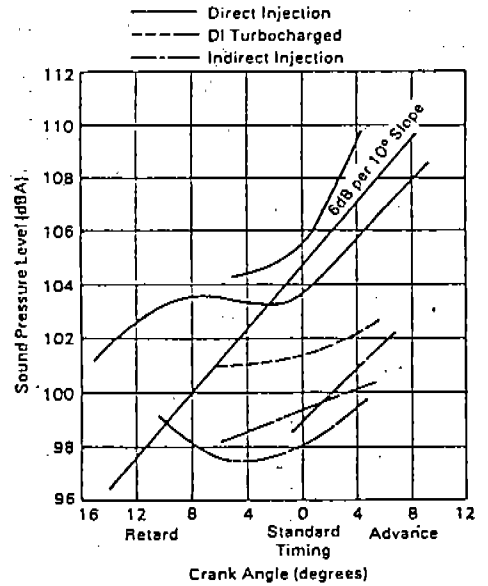


Fig. 6 Effect of Injection Timing.

다. 그림 6은 인젝션 타이밍 변화에 따른 음압 레벨이다. IDI, DI 엔진은 인젝션 타이밍을 지연시킬때 대략 6 dBA/10°(크랭크 각)의 소음 저감 효과를 얻을수 있다.⁽⁴⁾ 인젝션 타이밍에 의한 효과는 실린더 압력 스펙트럼에 1 KHz 이상의 고주파수에 영향을 미친다. 인젝션 타이밍 지연에 의한 연소 소음 제어는 모든 엔진에 적용되는 법칙이라고는 할수 없다. 연소 소음에 미치는 영향은 인젝션 타이밍 이외에도 많으며, 경우에 따라서는 인

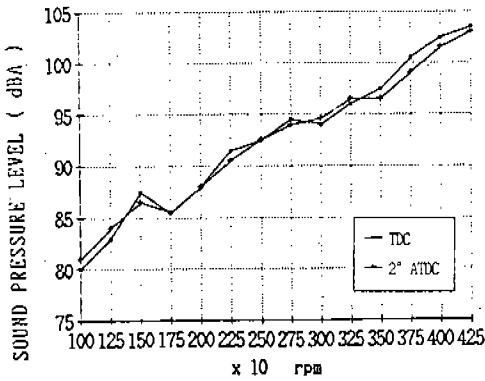


Fig 7 Noise Reduction Effect of Injection Timing Retard.

젝션 타이밍을 지연시킬때 소음이 커질 수도 있다. 일반적으로 인젝션 타이밍을 2° 지연시켰을때 3500rpm 이상에서 약 1dBA 소음 저감의 효과가 있다.

4. 기계 소음

기계 소음은 엔진의 매우 많은 Source로부터 발생하고 연소 소음보다 규명하기 어렵다. 기계 소음은 연소 소음과 밀접한 관계를 가지며 연소가 없는 기계적 가진은 있을 수 없다. 기계 소음은 각각의 Source로부터 개개의 특성이 모여진 것이라고 생각할 수 있다. 대표적인 기계 소음으로는

- 피스톤 슬랩
- 베어링
- 타이밍 드라이브시스템
- 밸브 트레인
- 퓨엘 인젝션 펌프 및 노즐

Ricardo 사는 인젝션 타이밍을 조절하여 기계 소음과 연소 소음을 분류한다. 그들의 연구 결과에 의하면 기계 소음은 부하가 많이 걸릴수록, 엔진이 고속으로 운전될수록 기계 소음이 커지는 경향이 있다.

1) 타이밍 드라이브 시스템 (Timing Drive System)

주로 사용되는 타이밍 드라이브방식은 기어 또는 벨트 방식이다. 타이밍 드라이브기

어는 중요한 기계소음이 되고 있다. 기어에 작용하는 큰 부하를 줄이기 위하여 기어 물림 에러를 줄이는 설계가 필요하다. 가능한한 기어의 모두율을 줄이면 맞물리는 기어에 작용하는 단위하중과 물림 에러에 의한 힘이줄게 된다. 헬리컬 기어는 스퍼 기어보다 소음 저감 효과가 크다. 백래쉬를 줄여 치타음을 줄이는 프릭션 기어는 2t 정도의 철판으로, 체결되는 타이밍 기어보다 잇수가 1개가 더 많게 만드는데, 프릭션 기어 장착 유무 음압 레벨 측정결과 2000 rpm 이하에서 2~3 dBA 소음 저감 효과가 있었다. 그림 8.9는 프릭션 기어의 장착도, 실험 결과이다.

2) 비틀림 진동 댐퍼 (Torsional Vibration Damper)

크랭크 샤프트는 실린더내의 큰 개스 압력과 커넥팅 로드, 피스톤 등의 왕복 관성력에

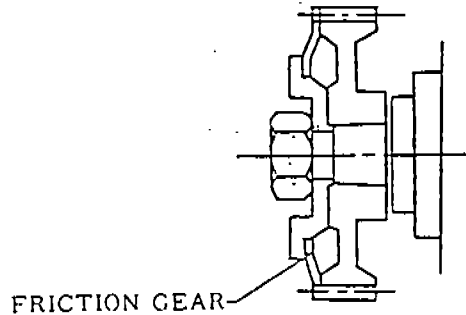


Fig. 8 Installation of Friction Gear.

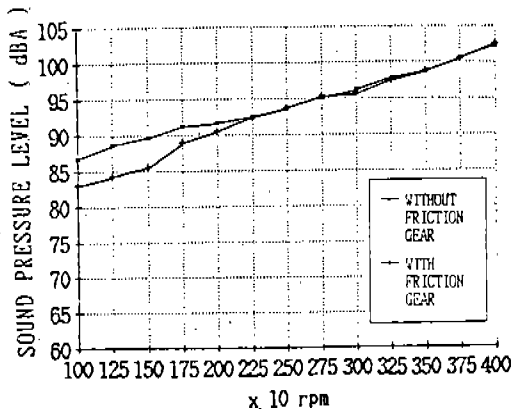


Fig. 9 Noise Reduction Effect of Friction Gear.

의하여 토르크를 전달함과 동시에 비틀림 진동을 받게 된다. 크랭크 샤프트에 작용하는 회전력의 하모닉이 크랭크 샤프트의 고유 진동수와 일치하면 공진을 일으키고 어떤 엔진 속도에서는 진폭이 커져 크랭크 샤프트의 웨브 및 크랭크 핀의 파괴, 저어널부 유막에 파괴에 의한 메탈의 마모, 타이밍 기어의 채터링 등의 문제를 야기시키기도 한다. 크랭크 샤프트의 공진폭이 설계 기준치를 초과하나 크랭크 샤프트의 구조 변경이 사실상 어려울 때 비틀림 진동 댐퍼를 크랭크 샤프트 풀리에 설치하여 공진에너지를 흡수하여 공진폭을 설계 기준치내로 줄일 수 있을 뿐 아니라 소음 저감도 가능하다. 그림 10은 본 실험에 사용된 비틀림 진동 댐퍼이다. 그림 11은 4000 rpm에서 1/3 Octave 주파수 분석 결과 비틀림 진동 댐퍼를 장착한 사양이 엔진 폭발 주파수의 1차, 3차, 4차 하모닉에서 현저한 소음 저감 효과가 있었다.

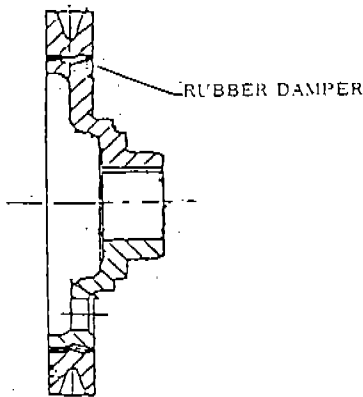


Fig. 10 Torsional Vibration Damper.

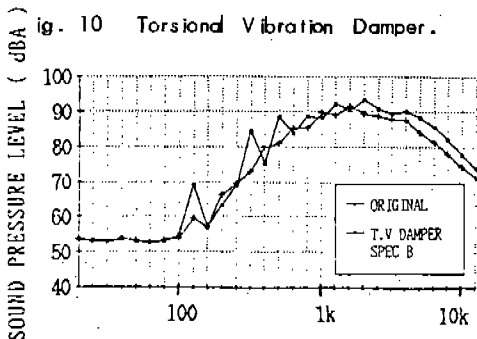


Fig. 11 Noise Reduction Effect of Torsional Vibration Damper.

5. 구조응답 (Structural Response)

1) 실린더 블록

엔진의 기계적인 필요 요건은 압축 체적을 제공해야 하고 가스 압력을 기계적인 일로 변환할 수 있어야 한다. 내연기관이 발명된 이래로 수많은 연소시스템이 제안되어 왔고, 부분적으로 혹은 새롭게 변경되고 있다. 엔진의 기본적인 요건을 만족시키고 더욱더 성능을 개선시키기 위하여 구조변경은 계속되고 있고 그동안 경험에 의해 세워진 설계 기준들은 아직 대부분 그대로 사용되고 있다. 그러나 신소재, 신기술이 소개됨에 따라 설계 기준도 다소 변경되고 있다. 일반적인 IN-Line 디젤 엔진의 구조는 그림 12와 같다.⁽⁶⁾

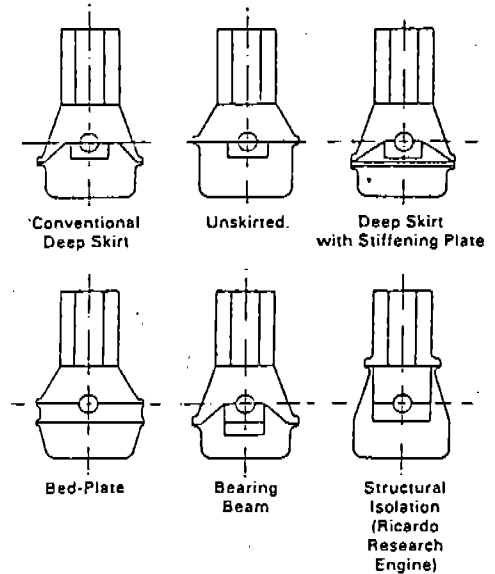


Fig. 12 Various Cylinder Block Arrangements.

Deep Skirt 실린더 블록은 횡방향과 종방향에 대해서 적당한 굽힘 강성을 갖고 있고 실린더 블록에 취부되는 여러 부품의 공간확보가 용이한 장점이 있다. 이에 반해 Unskirted 실린더 블록은 엔진 경량화에 유리하다. Unskirted 실린더 블록은 오일 팬의 방사면적이 상대적으로 크기 때문에 오일 팬의 소음이 엔진 전체소음에 지배적일 수 있으므로 오일 팬의 소음 저감 설계에 유의하여야 한

다. 실린더 블록의 소음을 줄이기 위한 방법으로는 Skirt 부의 강성을 증가시키거나 진동 절연시키기 위한 방법 등이 고안되고 있다.

2) 오일 팬

거의 대부분의 엔진에 사용되는 오일 팬은 1.5t 정도의 얇은 강판으로 제작되고 있다. 오일 팬은 매우 넓은 주파수 범위에서 많은 공진주파수를 갖는다. 오일 팬은 얇은 철판이기 때문에 엔진운전중에 쉽게 진동한다. 오일 팬은 실린더 블록의 Skirt 부에 장착되고, Skirt 부는 실린더부보다 크게 진동하기 때문에 일반적으로 오일 팬은 엔진의 주요소음원의 하나이다.

오일 팬의 소음 저감 대책으로 먼저 오일

팬의 고유 진동모드를 조사하였다. 오일 팬의 FRF(Frequency Response Function) 측정시 경계조건을 실차 조건을 만족시키기 위해 실린더 블록에 실차와 동일한 사양의 오일 팬 가스켓, 스티프너 브라켓을 사용하여 체결하였다. 오일 팬은 1차와 2차 굽힘 모드에서 오일 팬의 중간부분이 큰 진폭으로 진동하고 있음이 밝혀졌다. (그림 13, 14 참조)

일반적으로 오일 팬의 소음 저감 대책으로는 오일 팬의 좌우측면에 강성을 증가시키는 방법과 감쇠재질을 사용한다. 본 연구에서는 일본의 스미토모 금속의 제진강판을 사용하여 동일형상의 오일 팬을 제작하고 제진성을 실험하였다. 그림 15는 냉간 압연 강판과 제진 강판제 오일 팬의 FRF 측정 결과이다. 첫번째 피크가 295 Hz 에서 267.5 Hz로 주파수가 낮아졌으며 레벨도 다소 낮아졌다. 제진강판의 제진성은 500Hz 이상에서 우수 했다. (그림 15 참조)

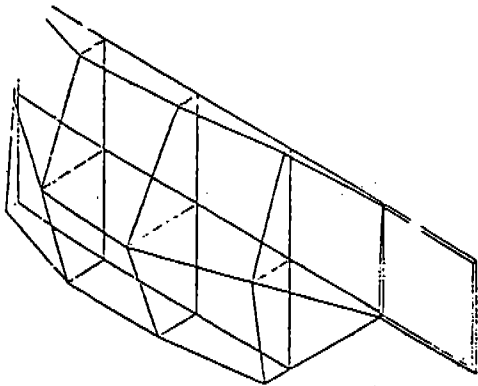


Fig. 13 Vibration Mode of Oil Pan At 350 Hz.

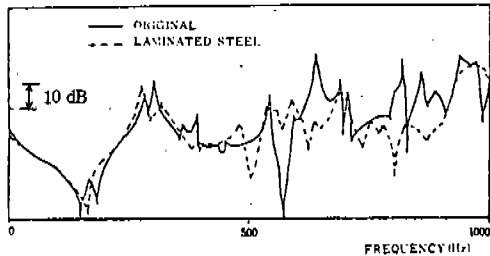


Fig. 15 FRF Comparison Between Original and Laminated Steel Oil Pan.

Full Load 조건하에서 엔진으로부터 1m 전방에서 측정한 냉간 압연 강판제 오일 팬과 제진 강판제 오일 팬이 장착된 엔진의 음압 레벨 비교이다. 2500 rpm 의 중고속에서 제진 강판제 오일 팬이 장착된 엔진이 냉간 압연 강판제 오일 팬이 장착된 엔진보다 1 ~ 2 dBA 소음 저감의 효과가 있었다. (그림 16 참조)

제진 강판은 온도와 주파수의 변화에 따라 그 특성이 변함으로 제진 강판의 감쇠재질의 선정에 주의하여야 한다. 제진 강판은 온도에 따라 손실계수가 변화하므로 엔진 상용은

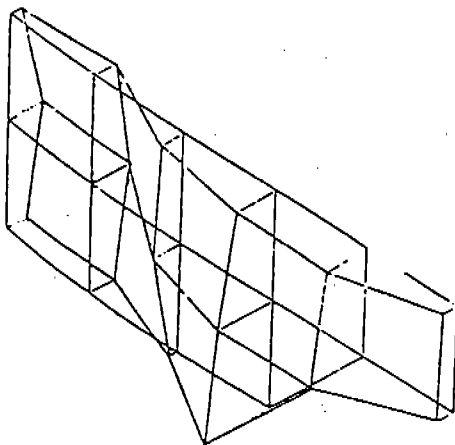


Fig. 14 Vibration Mode of Oil Pan At 557.5 Hz.

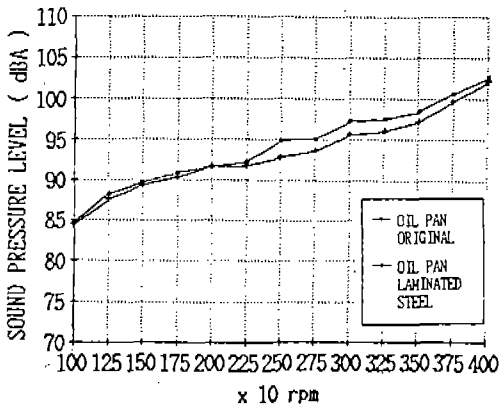


Fig. 16 Noise Reduction Effect of Laminated Steel.

전 범위에서 오일 팬의 사용 온도를 조사하여 그 온도 범위에서 손실계수가 가장 큰 감쇠 재질을 사용하면 효과적인 소음 저감 대책이 될 수 있다.

위에서 기술한 제진강판의 특성으로 판단할때 제진 강판제 오일 팬을 적용한 엔진이 중고속 운전시 소음 저감 효과가 큰것은 엔진이 고속으로 운전될수록 오일 팬의 온도가 상승하고 감쇠 재질의 온도 상승에 따른 손실계수가 커졌기 때문으로 판단된다.

제진강판은 두 얇은 철판 사이에 매우 얇은 수지층인 감쇠재질이 전달되는 진동 에너지를 열 에너지로 변환시켜 진동 진폭을 줄여 제진 효과를 얻는데, 두 얇은 철판 사이에 수지층을 얇고 균일하게 고착시키는 것이 노-하우이다. 제진강판은 아직 국내에서 개발되지 않았고 외국에서 도입해야 하는데 고가임이 단점이다.

결 론

본 연구에서는 엔진 소음 저감 대책으로 다음과 같이 추진되었다.

1) 외부 소음원 규명

엔진 전면에서 등음향 인텐시티 맵핑을 통해 크랭크 샤프트 폴리부가 주소음원임을 밝혀내고 그 대책이 추진되었다.

2) 연소 소음 저감

인젝션 타이밍 지연에 의한 소음 저감 효과를 확인하였다. 인젝션 타이밍을 2° 지연시 3500 rpm 이상에서 약 1dBA 소음 저감의 효과가 있었다.

3) 기계 소음 저감

프릭션 기어는 2000 rpm 이하의 저속에서 2~3 dBA 소음 저감의 효과가 있었다. 비틀림 진동 댐퍼의 장착시 비틀림 진동 댐퍼가 장착되지 않았을 때보다 폭발주파수의 1.3.4 차 하모닉에서 현저한 소음 저감의 효과가 있었다.

4) 구조응답 개선

냉간 압연과 제진강판제 오일 팬의 소음 실험 비교 결과 제진강판제 오일 팬이 장착된 엔진이 2500 rpm 이상의 중고속에서 소음 저감 효과가 있었고, 감쇠재질의 특성상 엔진의 중고속운전 범위에서 소음 저감효과가 있는 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

1. N. Watson, Design and Application in Deisel Engineering, p. 203~250.
2. Baxa, Noise Control in Internal Combustion Engines p. 327~402.
3. D. Morrison, The Pratical Development of a Heavy Duty Truck Engine for Low Noise, SAE 861285
4. Lilly, Diesel Engine Reference Book Section 19
5. Hickling, Engine Noise, p. 433~478.