

승용차의 진동·소음 대책기술

Noise and Vibration Control Techniques for Passenger Cars

차 경 옥, 이 준 서
K. O. Cha, J. S. Lee



차 경 옥

- 1945년 1월생
- 명지대학교 기계공학과 교수
- 열기관 및 열공학
- 엔진의 배기소음 저감 대책



이 준 서

- 1967년 6월생
- 명지대학교 기계공학과 박사 과정
- 엔진 배기소음 연구

1. 서 론

'70년대 중반 부터 자동차의 진동·소음분야에 관련된 기술문헌을 읽어보면 차실내 소음의 저감을 위한 보디(Body)구조 변경에 대한 보고와 흡음 및 차음구조 최적화를 위한 접근방법의 예와 파워플랜트 공진대책의 리브(Rib)설계등, 현재 행해지고 있는 진동·소음의 저감기술이 그다지 변화되지 않았다는 것을 알 수 있다. 대책기술의 내용에 큰 변화를 느끼지 못했음에도 불구하고 그림1에서 보듯이 100Km/h 주행시 차내소음의 추이를 보면 '74~'78년에 급격한 레벨 향상이 있음을 알 수 있고, 그 후에도 점차 승용차의 정숙성은 향상되어 온 것도 사실이다. 이것에

대해서 두가지의 이유를 생각할 수 있다. 첫째는 진동·소음저감의 방법은 종래부터 기술화되어 있었지만 승용차의 상품성에 대한 진동·소음의 관심이 높아짐에 따라서 각 자동차 회사들이 공동으로 비용을 투자해온 결과로 정숙성이 향상된 것은 아니다. 즉 새로운 대책기술이 차례로 생성되어져 왔기 때문에 향상했다고 말하는 것 보다는 축적된 대책 노하우가 서서히 생산되어지는 차의 사양에 적용된 것이라고 생각한다. 둘째는 진동·소음을 취급하는 컴퓨터를 중심으로한 시뮬레이션 기술, 해석기술, 예측기술의 진보에 의해 제한된 개발기간 중에 대책사양이 확실히 생산차에 적용되었다는 견해이다. 그러나 이 경우에도 빠르고 정밀도가 좋은 해석결과가 얻어지게 되었다는 것이고 궁극적인 대책내용은 옛날과 큰 변화가 없다. 진동·소음의 대책기술을 회고해보면 차륜이나 엔진의 현가계에 고무를 사용해서 진동을 차단한 것에 필적하는 대책기술은 출현하지 않았다고 말할 수 있다. 그러나 앞에서 말한 것과 같이 확실히 진동·소음에 대한 자동차의 품질은 향상됐고 이 때문에 종래 문제가 되지 않았던 음과 음색의 문제까지 해석 대상이 넓어지고 그만큼 세부의 부품에 까지 치밀한 대책기술을 세울 필요가 있는 것도 사실이다. 이 같은 배경을 근거로해서 승용차의 구성부품별, 해석기술의 분야별로 기술동향을 찾아보고자 한다.

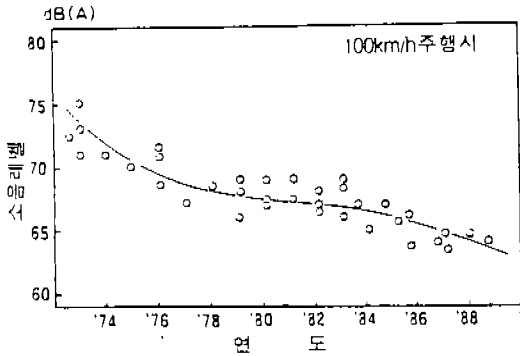


Fig.1 소형 승용차의 차실내 소음 레벨의 변화

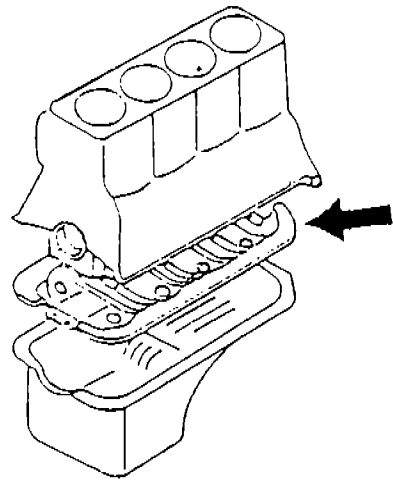


Fig.2 파워 플랜트의 강성향상 대책(보강재 부착)

2. 엔진과 변속장치 분야

2.1 파워 플랜트 강성

진동대책의 일반적인 방법인 고강성화에 대해서는 베어링빔, 보강재를 부착한 베드플랜트(그림 2)¹⁾나 주조오일팬을 엔진보강재 또는 유연성 보강부재로 하는 구조(그림 3)²⁾와 엔진과 트랜스미션의 결합면을 2중벽으로 하는 것 등을 들 수 있다. 이것들은 중량의 증가요인도 되기 때문에 생산차의 엔진특성에서 선택적으로 적용되어지고 있다.

2.2 음원대책

엔진 진동·소음저감의 최근의 연구로써 가속시에 발생하는 '우르르 우르르'하는 음이 주목되고 있고, 듀얼모드 크랭크 댐퍼 풀리(Damper Pulley) (그림 4)³⁾ 폴렉시블 후라이 호일⁴⁾ 등에 의한 중·저주파수대책이 행해졌다. 또한 해석수법 및 물리량과 감성평가와의 관계도 검토되며 음색개선을 겨냥해서 시간차점화로 하기도하여 점화시간을 기동별로 조정하는 등 섬세한 전자제어도 시행되고 있다. 이것들은 엔진마운트의 다이내믹 댐퍼첨가와 실린더 블록 방사면의 리브(rib)대책과 같은 수동적 대책방법, 전달계, 발생메카니즘으로의 근본대책, 새로운 평가방법의 연구 및 가변, 최적화등이 하나의 현상에 대해서 여러형태로 진행되는 좋은 예라고 할 수 있고 다른 소음 현상대책의 실마리가 된다고 생각된다.

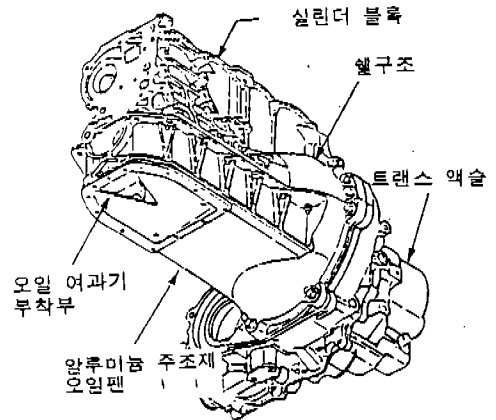


Fig.3 파워 플랜트의 강성향상 대책(Total Shell Power Plant)

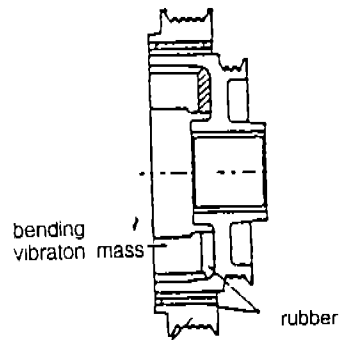


Fig.4 Dual Mode Damper Pulley

이 밖에도 플라스틱과 제동강관등의 댐핑재를 이용해서 방사음대책을 실시한 카바류의 적용이 실린더 헤드카바와 오일팬등에 증가하고 있다.

2.3 미션 분야

자동차 부속기어음에 관해서는 노하우에 해당하는 것이 많은 치면(齒面), 치형(齒形)의 생산 기술적 개량에 의지하고 있고, 음 그 자체에 직결한 대책을 위한 해석방법과 모델화가 연구 중에 있다고 할 수 있다. 그 밖에 CTV등도 포함해 대표적인 운동전달부품의 소음발생 기구에는 미지요인이 있고 대책방법의 전개가 늦어지고 있는 것은 앞으로의 큰 과제일 것이다. 근년의 AT(Automatic Transmission) 보급은 현저하고 전자제어에 의한 변속성능의 향상이 진행되어 엔진과 AT와의 종합적인 제어의 시대로 들어섰다. 이것에 관해서 변속쇼크저감 콘트롤이 실용화되어 있고 앞으로도 퍼지제어의 도입등 기구면의 콘트롤이 진동저감의 가능성을 더 넓히는 수단이 될 것이다.

3. 흡·배기계 분야

흡·배기계의 소음대책은 엔진출력과의 이율 배반성 때문에 부압, 배압을 높이지 않고 소음을 낮추지 않으면 안되는 경우에 기술적인 어려움이 있다. 또 자동차의 성격을 음질적으로 표현하는 것에서도 흡·배기의 음은 중요한 부분이다.

3.1 흡·배기음

종래부터 머플러 및 서보 머플러의 구조도 엔진의 기통수에 의해 약간의 차이는 있지만 팽창실, 증명실(resonator)의 분할 등 거의 기본 구조는 변화가 없다고 생각할 수 있다. 앞으로의 제한된 스페이스 레이아웃에서 보다 큰 용적을 가진 머플러를 어떻게 만들 것인가 알아보자. 제작상의 혁신과 고주파 방사음 저감을 위한 복합재를 사용한 배기계, 그위에 광범위한 소음효과를 목적으로 능동적인 제어를 첨가한 가변형 머플러가 연구 실용화되어 갈 것이다(그림 5)⁵⁾ 한편 내구성, 방청 등을 고려한다면 일반화하는

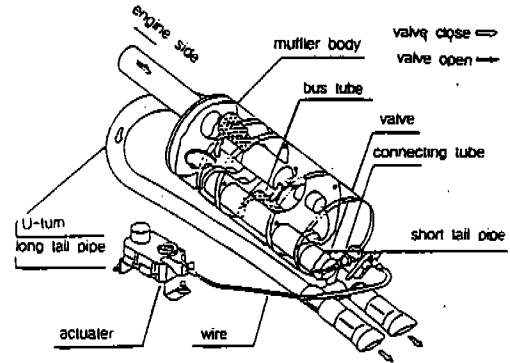


Fig.5 제어형 배기 시스템(Dual Mode Muffler)

데는 재료기술의 발전이 큰 도움이 될 것이다.

3.2 실내 소음

차실내 소음에 대해서 배기계 진동입력에 대한 제어는 종래의 공진모드의 부분은 마운팅하는 방법에서 적극적으로 벡터입력을 이용해서 진동을 저감하는 방법과 마운팅의 중간에 공진계를 설치하여 위상을 콘트롤하는 등의 사례가 증가하고 있다. 그러나 흡·배기음과 같은 음향입력에 기인한 실내소음의 제어에 관해서는 흡·배기계에서의 대상에는 한계가 있고 앞으로 엔진의 연소 및 차체를 포함한 제어기술이 기대된다.

4. 엔진 마운팅 분야

엔진 마운팅에 관해서는 주로 레이아웃에 관한 연구와 엔진 마운팅 자체의 개량이라는 두가지 문제로 크게 나눌 수 있다.

4.1 마운팅 레이아웃

엔진 마운팅의 레이아웃은 파워플랜트 중량의 지지, 구동반력의 지지를 고려한 후에 진동입력의 차단특성이 요구되는 관계상 구동방식에 최적화의 연구를 해왔다. 특히 FF방식의 구동계를 이용한 승용차에서는 아이들링 시의 토크변동에 따르는 진동과 소음의 저감을 위해 여러가지 시행을 해왔지만 현재에는 엔진의 관성주축상에 메인 마운팅을 배려한 레이아웃이 주류이다.(그림 6)⁶⁾

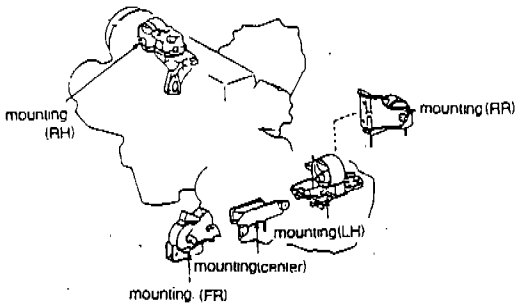


Fig. 6 엔진 마운트 레이-아웃의 예

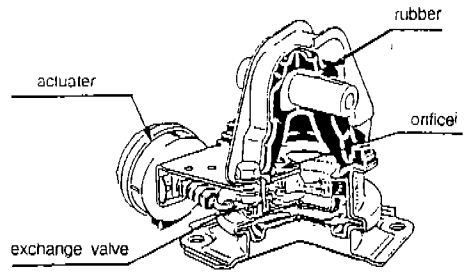


Fig. 7 전자 제어 엔진 마운트의 예

4.2 마운팅 특성

마운팅 중심 영역에의 진동의 영향을 저감해야 하고 엔진 마운팅계의 고감쇄화가 요구되었지만 종래의 고무 블록 마운팅에서는 충분한 감쇄가 얻어지지 않았고 유체를 내장한 댐퍼방식의 복합마운팅의 연구 실용화가 확산되어져 왔다. 이 기술의 저주파영역에 대한 고감쇄성과 고주파영역에 대한 저진동스프링(탄성)특성이 요구되고 다이어프램(diaphragm)을 내장하고 액압상승에 의한 동스프링특성 개선기능을 가진 복잡한 기구의 액체투입 마운팅이 현재 주류가 되고 있다.

4.3 전자제어 마운팅

가·감속시의 엔진 거동의 개선과 아이들링시의 저진동스프링(탄성)화를 목적으로 하고 그 동적 특성을 능동적으로 제어하는 전자제어 엔진 마운팅이 '80년대 중반부터 실용되어 현재에 이르고 있다.(그림 7) 그러나 감쇄만을 제어하는 등 비교적 쉬운 제어만이 가능하다. 더욱이 감쇄기구를 가지기 때문에 대형화에는 적용되지 않고 적용부위의 자유도도 반드시 크지 않은 것이 실상이다. 앞으로는 엔진과 차체의 상태에 적합한 동적특성을 자유자재로 제어 가능한 기구를 가진것의 출현이 예상된다.

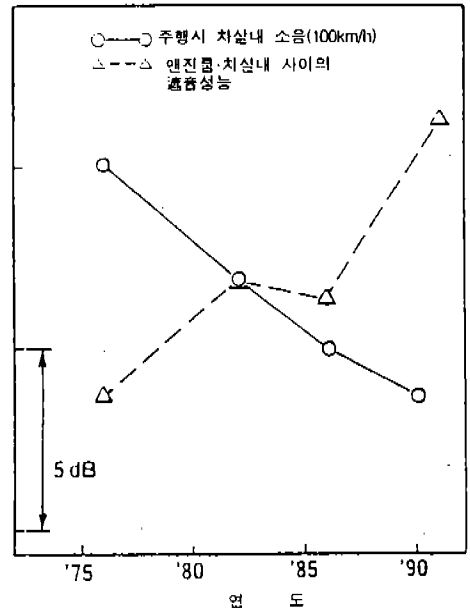


Fig. 8 차실내 소음 레벨 및 엔진 노이즈 차음(遮音)성능의 변화

이 그림이 나타내는 것처럼 최근 100Km/h 주행시의 실내음을 점유하는 비율은 엔진에서의 투과음 성분보다는 풍절음과 지면마찰음 성분이 크다는 것을 알 수 있다. 특히 노면의 상태에 의해 음압변화를 초래하는 불쾌한 지면(地面)마찰음의 저감은 앞으로의 승용차 소음품질을 향상시키는 데 중요한 과제일 것이다.

5. 타이어·서스펜션 분야

그림 8에 100Km/h 주행시의 실내음과 엔진소음 및 차실내 사이의 차음성능에 대해서 어떤 소형 승용차의 네번의 모델체인지 발전 예를 나타냈다.

5.1 서스펜션

진동·소음개선을 위해서 '노면입력'의 전달체로서의 서스펜션 튜닝을 행한 것은 대부분의 경우 조종안정성에 악영향을 끼치기 때문에 한계가

있다. 현재 보디의 강성, 음향특성의 개선에서 그 대책을 강구하고 있다. 앞으로 지면마찰음도 고려한 제어의 실현도 멀지 않았다고 생각된다.

5.2 타이어

타이어 자체가 가지는 저주파영역의 공진, 공조현상에 기인한 실내음에 대해서는 앞으로 차체의 음향특성을 포함한 해석 및 대책을 진행해갈 필요가 있다.

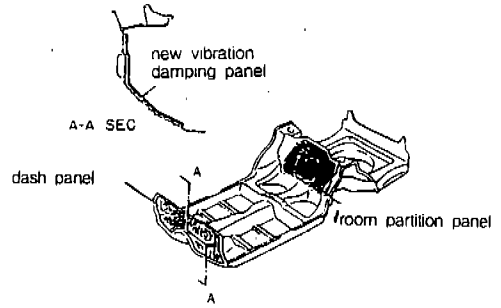


Fig.9 Body Panel에 제진(制振)강판 적용 예

6. 보디, 프레임 분야

6.1 보디 구조

자동차의 보디(body)와 프레임은 표면상은 가장 변화가 적은 부분이라고 말할 수 있다. 오히려 경량화, 고탄성화를 목적으로한 계산예측 또는 최적화라고 하는 소프트웨어에서의 진보가 보디 기술 그 자체가 아니라 말하는 견해도 가능하다고 생각된다. 보디 그 자체에 관해서는 프레임 부착에서 모노코크(monocock)보디로 변한 시대를 빼고는 그 구조 및 재료 등에 관한 큰 변화점은 없고 오직 알루미늄 또는 수지재의 적용이 있었을 뿐이다. 이것들도 진동·소음에 영향이 있을 때에는 거의 사용하지 않았다. 한편 판넬면에 적용된 제진(制振)재료에 관해서는 충전재의 변경에 의한 경량화, 강판과 수지에 의한 구속층 부착의 제진구조 등이 보고되고 있고, 근년에는 강판 사이에 댄핑재를 적층판(積層板)으로 만든 제진강판을 보디에 적용(그림 9)하고 있으며 벌집구조의 플로어에도 적용(그림 10)하는 새로운 기술이 중요한 소재라고 말할 수 있다. 그리고 앞으로의 동향이 주목된다.

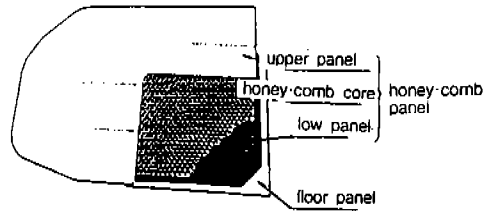


Fig.10 고강성 Body Panel(Honey-comb Floor Panel)

6.2 실내음

현상면에서의 실내소음, 지면마찰음과 보디와의 관계에 관한 연구는 보디 그 자체가 발음체로 되는 현상 때문에 새로운 문제로써 연구되어져 오고 있다. 이에 대한 연구는 BEM(Boundary Element Method)에 의한 음장해석과 보디의 모드 해석기술 등이 주류를 이루고 있다.

6.3 품질음과 그외의 음

'80년대에 들어서 새롭게 보디, 도어(door) 구조 등에 의한 품질음의 연구와 차문을 닫을 때의 음질에 관한 연구, 브레이크음과 보디의 관련에 관한 보고 등, 종래의 보디 기술과는 약간 다른 보다 높은 기능으로써의 보디의 존재가 요구되어지고 있다.

6.4 경량 고강성(輕量 高剛性)

현재 보디의 고강성화 등은 현상소재의 범주에서 최적화에 의해 한계에 왔고 오히려 내구성, 품질성의 관점에서 동일 차종에 대한 보디 중량은 증가하는 경향이 있다. 앞으로의 연비등의 관점에서 크게 경량화가 다시 요구되는 시대가 다가올 것이라고 예상되고 보디의 알루미늄화, 수지화라고 하는 소재의 변화와 벌집구조, 발포우레탄 등을 내장재료로 한 판넬재를 사용하여 그 위에 내장부품과의 조합에 의한 다기능 경량화 수법 등이 사용되고(그림 11), 이 결과 현재와는 다른 형상과 구조등을 지니고 종전보다 가볍고 강성이

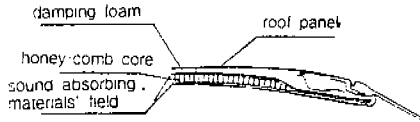


Fig.11 다기능 경량 내장재

있는 보다가 연구 개발되어져 간다고 생각된다.

7. 진동·소음실험 기술 분야

7.1 계측기술

자동차에 의한 진동·소음의 레벨향상은 계측 해석기술의 진보에 많은 영향을 받고 있다. '70년대의 리얼타임 어날라이저(real time analyzer)의 출현, 발전된 형태의 FFT의 범용화, 또 '80년대에 들어서의 현장에서 사용하기 쉬운 콤팩트형의 모달 어날라이저(modal analyzer)의 급속한 보급등은 에니메이션 기술과 함께 진동에 대한 비약적인 해석기술의 향상을 가져왔다. 더욱이 컴퓨터의 소형, 고성능화, 저가격화 등에 의해 모달기술로 연결되어 여러가지 해석 시뮬레이션 프로그램의 일반화를 가져왔고, FEM에 의한 구조해석과 함께 소위 CAE에 의한 연구개발의 시작을 맞이했다. 또한 레이저홀로그래픽 기술도 엔진의 실린더 블록처럼 비교적 고주파 소진쪽의 진동현상 해석에 이용되어져 오고 있다. 음향해석에 대해서는 다년에 걸쳐 이렇다 하는 새로운 해석 측정기술은 볼 수 없었지만 '80년대에 들어서 음향 인텐시티(sound intensity) 측정기술이 디지털 프로세서의 진보에 따라 급속하게 퍼지고 있다. 특히 종래 불가능했었던 음의 흐름과 음장의 가시화가 가능하게 되어 음향에 관한 정보를 비교적 쉽고 정밀도 좋게 얻을 수 있게 되었다. (그림 12) 과도적으로 발생하는 진동·소음도 문제시되는 것이 많게 되었다. 예를들면 엔진노크나 회전수 변동에 기인한 소음등은 주파수 성분과 시간변동의 양자를 종합적으로 평가하는 방법이 시도되어지고 있다.(그림 13)⁽⁷⁾

7.2 센서

진동·소음의 측정 해석기술의 진보는 컴퓨터

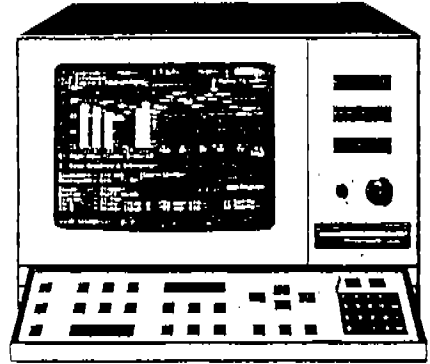


Fig.12 실시간(Real Time) 주파수 분석기(음향 Intensity Analyzer)

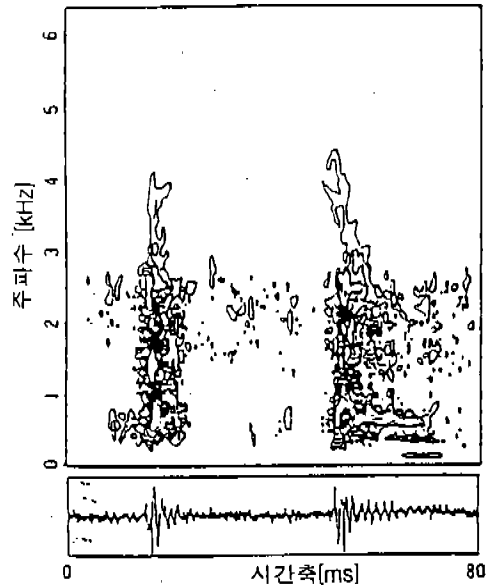


Fig.13 Winger 분포에 의한 음의 해석 결과

를 포함한 디지털 하드웨어의 진화 그 자체라고 말할 수 있다. 계측기에 접속하는 센서로서의 픽업이나 마이크로폰 등의 일부 소형 저가격품이 출현하고 있지만 부착시의 어려움등과 같은 취급성은 그다지 변하지 않고 레이저등의 비접촉 계측을 포함해서 부착을 용이하게 하는 개량이 요구되는 때이다.(그림 14)

7.3 실험 시뮬레이션

BBA를 대표로 하는 테스트 방법을 기본으로 한

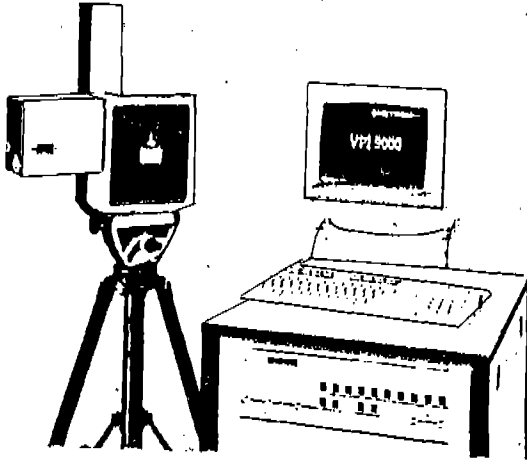


Fig.14 비접촉형 계측기의 예

시뮬레이션 기술은 그의 원리적 의미를 따로 고려하더라도 실용면에서 우리 기술자들에 꼭 만족할 만한 결과를 주지 않은 것도 사실이다. 현재는 이와같은 모달해석기술, 음향인텐서티 측정기술 등 취급하는 주파수 범위가 다소 다른 것도 있지만 반드시 종합적인 해석기술로 일체화되어 지는 것은 아니다. 예를들어 복수인텐서티, 입자속도계측등 방사음장 정보가 정확하게 얻어지는 방법을 개발해서 진동·음향의 양자를 취급하는 것이 가능한 계측해석 시뮬레이션 방법으로 제안될 가능성이 있다고 생각된다. 또한 이와같은 테스트 방법과 FEM, BEM을 주체로한 예측 시뮬레이션 기술과의 결합에 의해 보다 높은 정밀도로 진동·소음에 대한 예측과 해석이 가

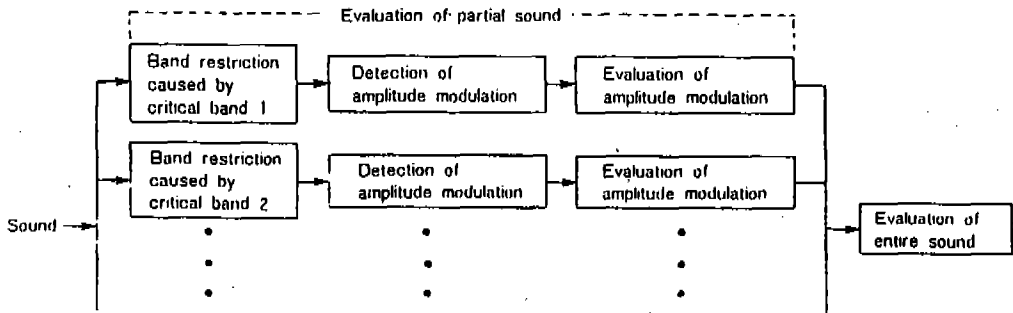


Fig.15 차실내 음의 음질평가 방법의 예

능하게 되는 날이 다가 왔다고 생각된다.

7.4 감성의 정량화

특히 소음에 관해서는 음에 대한 사람의 감성 연구가 근년에 활발하고 기존의 어날라이저와는 별도로 여러가지 수치화된 특성에 대한 평가분석기술이 제안되어지고 있다.(그림 15)⁽⁶⁾ 이와같은 방법에 관해서는 종래와 다른 감성과 음향심리라는 음향분야에서의 기술 도입도 필요하게 되어지고 있다. 앞으로 이와같이 인간과 계측기술 사이의 인터페이스의 연구가 더욱 새로운 해석 방법을 만들어 갈 것이라고 생각된다.

8. 시뮬레이션 해석 분야

8.1 적용범위

유한요소법에 의한 차체 및 엔진부품의 구조 해석은 슈퍼 컴퓨터와 프리 포스트 프로세서 (prepost processor)의 보급에 의해 실용상의 모델사이즈와 스텝수가 크게 증대해 왔다. 이것은 강도 및 내구성이나 공력(空力), 충돌에서는 이제까지 불가능했던 부분에 대한 시뮬레이션의 실현이라고 하는 직접적인 진보이겠지만 진동·소음분야에 대해서는 보다 상세한 모델에서 단 시간에 충분한 시각적 검토가 가능하게 되었다는

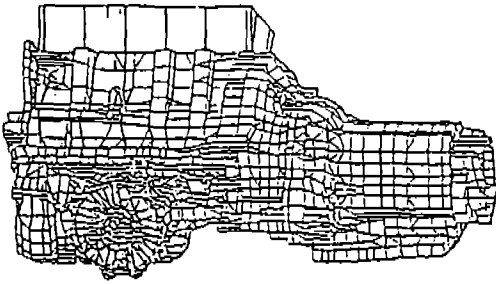


Fig.16 파워 플랜트 모델화의 예

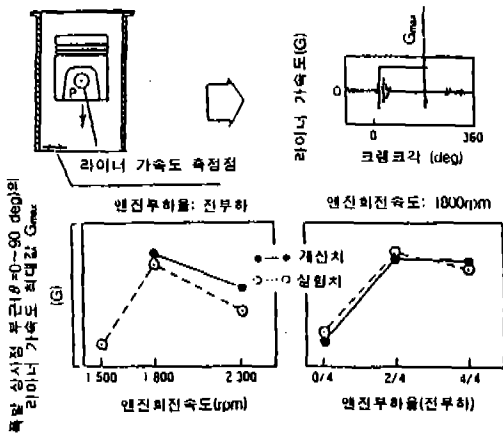


Fig.17 피스톤 슬랩에 의한 라이너 가속도 응답 (실험치와 시뮬레이션 계산결과 비교)

것이 큰 장점이라고 말할 수 있다.(그림 16)⁽⁹⁾ 기구적인 거동 시뮬레이션이 동벨브계, 크랭크계, 서스펜션계에 적용된 것은 새로운 것이 아니지만, 강체링크나 선형근사에 의한 거시적 모델에서만 만든 진동·소음현상을 충분히 설명할 수 없는 부분이 있고, 시간 스텝, 수축 스텝을 충분히 얻은 만큼의 계산과위를 확보하는 것도 쉽지는 않았다. 최근에는 유막이나 피스톤 라이너의 강성을 고려한 피스톤 슬랩(Slap)의 시뮬레이션이 발표(그림 17)⁽¹⁰⁾되어 있고 정성적(定性的)인 경향을 파악에서 운전중 엔진의 실제현상과의 정량적 상관을 겨냥한 연구가 계속되어지고 있다. 기어음에 대해서는 부하시의 치(齒)에 대한 시뮬레이션의 효용은 있어도 정성적인 판단에 그치는 것이 많다. 이것들의 대책 구조로서 새로운 것이 생기는 것은 앞으로의 발전을 기대해야 하고 점

축모델, 유막강성, 종합강성의 세부사항을 포함한 모델에 확장하는 것에는 슈퍼 컴퓨터의 계산능력을 활용해서 정밀도를 높여가는 것이 필요할 것이다.

8.2 복합 시뮬레이션

차체에는 공명음이나 팬넬 방사음의 계산 시뮬레이션이 음향인텐서티나 레이저 홀로그래픽의 계측 해석기술과의 접목되는 점을 근거로 해서 적극적으로 행해지고 있고, 앞으로는 보다 정밀한 경계조건을 취급함으로써 실제적인 음장평가 가능하게 하는 응용연구가 기대된다. 전반적으로 차체구조와 실내음장의 연성, 복수 부품의 상호작용등 보다 복잡한 현상에의 적용이 가능하게 되어지고 있다. 예를 들어 차체모델과 음장을 종합해서 구조대책을 음압레벨에서 평가하기도 하고 파워플랜트 공진모델에 크랭크계를 더해서 상대운동을 검토하는 것등이 있다.

이처럼 종전의 시뮬레이션 방법에 새로운 해석방법이 응용되고 보다 실제현상에 가까운 해석방법이 전개되어져 오고 있다. 더욱이 경계요소법, 유체해석, 비선형 해석이나 제어이론을 포함하여 다양하게 조합시킨다면 실용화로 갈 것이라고 생각된다.

8.3 모델화

시뮬레이션 모델의 작성에 CAD 데이터가 이용하는것은 일반화되어 왔지만 유한요소 메쉬(mesh)작성 작업중에는 전과 다름없이 인간에 의지하는 국면이 있다. 형상 데이터와 가공정보는 대상물의 구조해석에 필요한 정보를 거의 포함하고 있기 때문에 용도에 상응하는 시뮬레이션 모델을 자동작성하는 프로그램에 거는 기대는 크다. 이와같이 부품별 프리포스터의 개발과 함께 경계요소법과 P-Version Solve라고 하는 것도 연구되고 있다.⁽¹¹⁾ 이것들의 또 한가지 특징은 변형모드와 공진 주파수등의 전체(global)특성과 함께 응력등의 국부적인(local) 성질에 대해 높은 정밀도를 구하는 것이 동일한 모델에 시행되고 있는 것이다.

8.4 감성 시뮬레이션

통계적 해석을 이용해서 소음에 대한 감성검사 결과에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. 이것의 최종목표인 음색과 대책 하드웨어와의 관련성에 대해서 입력에서 실내음으로의 전달함수 계측데이터를 이용했고 음색시뮬레이션 어프로치¹³⁾는 앞으로 그의 응용 및 전개가 기대되는 분야이고 이와 같은 기술이 앞으로 종합적 드라이브 시뮬레이션 등에 연결될 것이라고 생각된다.

9. 결 론

이와 같이 각 분야별로 살펴보면, 진동 및 소음향상을 겨냥해서 착실히 발전을 이루고 있고 차세대의 소재도 준비되고 있음을 알았다. 차실내의 정속성도 100Km/h 주행시 70dB(A)에서 65dB(A)의 시대로, 그리고 60dB(A)의 시대로 이행하고 있다. 그러나 이것은 어디까지나 음을 소음으로서만 취급한 소극적 소음대책기술의 하나이다. 앞으로 자동차의 가속 필링(feeling)에 맞는 음색만들기, 새로운 착상의 음색만들기 등의 적극적인 음향 공간 만들기가 큰 연구방향이라고 말할 수 있을 것이다. 또한 환경문제로의 대책이 중요시되는 가운데 진동·소음에 대한 본연의 모습도 문제가 됨을 잊어서는 안될 것이다.

참 고 문 헌

1. 新谷, 寺本, 森實, 出口 : クレング軸支持剛性向上による加速時の車室内音質の改善, 自動車技術會學術講演會前刷集, No.891 (1989)

2. 澁谷, 石浜, 木下, 青木 : トータルシエル構造パワープラントによる加速時の音質向上, 自動車技術會學術講演會前刷集 : No.882 (1988)

3. 黒田, 藤井 : エンジン音色改善方法の考察, 自動車技術, Vol.43, No.8, p.47 (1989)

4. 井出, 内田, 小澤 : フレキシブルフライホイールによる加速音質の改善, 自動車技術會學術講演會前刷集, No.881 (1988)

5. 稻葉, 西卿ほか : ジェアルモードマフラの開發, 日産技報, 第23號

6. 新型車解説書 [トヨタカローラ] (1987)

7. 川浦, 鈴木, 小野 : Wigner分布による信號の時間一周波數平面上の表現, 自動車技術, Vol.42, No.12, p.1549 (1988)

8. T. Wakita, Y. Kozawa : Objective Rating of Rumble in Vehicle Passenger Compartment During Acceleration, SAE, Noise & Vibration Conference 89, 891155.

9. 佐藤 : CAD, CAM/CAE連携一體化, 自動車技術, Vol.43, No.4(1989)

10. 岡材, 前川, 太田 : ピストンストラップのメカニズムとエンジン消音について, 自動車技術, Vol.42, No.12, p.1580(1988).

11. J. A. Flowers : The P-version of the Finite Element Method : Its Place in the Analytical toolkit ; Finite Element News, Issue No.4 Aug (1989)

12. 石端 : 自動車騒音音響 シミュレーションのコンピュータの應用 ; 自動車技術, Vol.42(1988).