

주행 진동 모드와 시트 진동을 고려한 주행 안락감 분석

Evaluation of Ride Comfort Considering Seat and Ride Vibration Modes

김 명 규*, 유 완 석**, 김 정 훈***
Myung-Gyu Kim, Wan-Suk Yoo, Jung-Hoon Kim

ABSTRACT

Ride comfort, one of the most important performances of a car, is affected by vibration, noise, dynamic movement, and ergonomic factors. Among these factors, ride comfort vibration is heavily affected by the seat system, tire, suspension, and body structure. In this study, vibration characteristics of seat, tire, suspension, and body structure are analyzed. The vibration transfer function from the road input to the human body is also investigated.

주요기술용어 : Ride comfort(승차안락감), Human body vibration(인체진동), Seat vibration(시트진동)

1. 서 론

주행안락감은 여러가지 형태로 나타나는 각종 차량 성능 중에서도 매우 중요한 부분으로 인식되어지고 있다. 주행시 인체 안락감 혹은 차량 승차감에는 차량의 진동, 소음, 동역학적 거동, 및 감성 공학 측면까지 광범위한 요소들이 영향을 미치고 있다. 이 중에서 노면으로부터의 가진력이 인체 진동으로 전달되는 진동 전달 현상이 주행시 인체 안락감에 가장 큰 영향을 주고 있다.

인체 진동 응답 특성과 주행안락감의 상관 관계를 나타내기 위해서 승차감 관련 진동 특성과 인체의 진동에 대한 적응력에 대한 연구가 진행되어 왔다.¹⁾ 일반적으로 차량 탑승자들이 주행안락감과 관련하여 가장 연관성이 크다고 느끼

는 부분이 시트 부분이며 그 밖에 감성 공학적인 부분을 제외할 경우 서스펜션, 차체 진동, 스티어링 진동의 순으로 나타나고 있다.²⁾ 따라서, 주행안락감을 연구하는데 있어서 차량에 의한 인체 진동 반응과 시트 및 인체 진동을 유발시키는 차량 각 요소의 특성 및 기여도를 분석하는 것이 우선적으로 요구된다.

지금까지 조사에 의하면 인체 진동과 관련된 시트 진동 연구는 시트 시스템만에 대한 진동 응답 특성분석이 대부분이며, 실차 주행시의 차량의 주행 진동 모드 영향을 고려하지 않음으로써 실차에서 나타나는 승차감과 관련된 진동현상을 분석하는데 제한적인 연구 결과를 보인다.

이러한 문제점을 개선하기 위해서 본 연구에서는 주행 안락감에 있어서 시트 뿐만 아니라 차량의 주행진동까지 통합하여 분석하는 방법을 제시하여 차량을 구성하고 있는 각 서브 시스템

* 회원, 현대자동차

** 회원, 부산대학교 기계기술연구소

*** 회원, 부산대학교 기계설계공학과 대학원

들과 주행 조건들이 인체에 전달되는 진동에 어떻게 기여하고 있는지에 대한 분석과 이에 대한 개선 방향에 대하여 분석하고자 한다.

2. 인체의 진동

주행 안락감을 객관적으로 표현하기 위해서는 주관적 평가에 의존하던 항목을 물리적 측정치로 정량화 하는 과정이 필요하며, 앞에서 조사된 바와 같이 주행 안락감과 가장 관련이 높은 물리적 현상은 진동이다. 이와 관련하여 논문에서는 인체 진동 감수성, 노면 가진 조건, 차량 각 시스템의 진동 전달 특성, 시트 시스템의 진동 전달 특성을 분석한다.

2.1 인체의 안락감 평가

승차감과 관련하여 인체의 진동에 대한 저항력을 통계학적으로 조사한 결과를 인용해보면 진동의 크기, 진동 주파수 특성 및 이러한 진동에 인체가 노출된 시간에 밀접한 관련성이 있음을 알 수 있다.¹⁾ 또한 주행 안락감 관련 인체 진동은 전신 진동(whole-body vibration)에 주로 관련되어 있으며, 시트에서 느끼는 진동도 같은 경우이다.

상하 방향으로의 정현파 진동의 경우 2Hz 이하의 주파수 대역에서는 인체의 모든 부분이 동시에 상하 운동을 하게 되며, 인체의 각 부분(머리, 흉부, 복부, 손, 발)은 착좌 자세에서 개인에 따라 공진 주파수가 상이하나 일반적으로 첫번째 공진 주파수는 4~5 Hz 근처로 알려져 있다. 시트에 착좌 상태에서 등받이 부분은 전후/좌우 진동의 상체로 전달되는 주경로가 되며, 전후 진동이 증폭 될 수 있는 가능성이 있다.

인체 진동에 대한 규격으로는 ISO 2631 및 BS 6841이 있으며, 등가 안락감 특성 곡선(equivalent comfort contours) 및 진동이 인체에 미치는 영향의 정도에 따라 진동 크기(magnitude)에 곱해지는 가중 계수를 이용한 주파수 가중 함수(frequency weighting function)을 이용하여 인체 진동 안락감을 평가하는 기준을 삼는다.

2.2 차량주행시 노면 가진

인체 진동 감수성에 대한 연구결과를 분석해보면 손과 발등 인체 일부분을 제외하고는 대체로 30Hz 이하의 저주파 영역에서 주파수 감응 계수가 높게 나타나며 이런 결과는 상하방향 뿐만 아니라 전후 좌우 방향에 대해서도 같은 조사 결과를 보인다. 진동 가진원으로는 노면 가진력과 엔진 및 구동계로부터의 가진력이 될 수 있다. 이러한 가진원으로부터 전달되는 진동 특성은 주파수 대역 뿐만 아니라 진동의 세기, 진동의 지속성 등에 있어서 다양한 형태로 나타나게 된다.

본 연구에서는 다양한 방법을 이용한 노면가진 조건을 검토하였으며 노면에 의해 발생하는 진동의 확률론적 접근방법을 이용하였다. 타이어/휠을 가진하는 노면 굴곡의 초기 PSD(Power Spectral Density)를 다음과 같이 가정한다. 또한, 노면은 기본적으로 백색잡음(white noise) 특성 및 일반 노면의 주파수 특성을 가진다고 생각한다.

$$G_z(f) = aV/f^{**}N \quad (1)$$

여기서, a : road roughness
 V : vehicle velocity
 f : frequency
 N : exponent

이 노면 PSD를 이용하여 시간 영역에서 동역학적 해석을 위한 시간 영역 노면 신호를 만들 수 있다.

$$Z(t) = A * k * \cos(\omega kt + k\phi), \quad 0 < \phi < 2\pi \text{ (랜덤 value)} \quad (2)$$

3. 차량시스템 진동과 주행 안락감

노면 가진으로부터 인체로 전달되는 진동의 물리적 특성은 진동 전달 경로상에 있는 서스펜션, 타이어, 차체, 휠 베이스, 차량 중량, 차량 속도, 부상 및 시트 등의 진동 전달 특성에 의하여 결정된다.

Fig. 1과 같이 노면 입력이 차량의 전후 타이어/휠에 작용할 경우 앞에서 거론한 바와 같이 승차감 진동 주파수 영역이 30Hz 이하로 비교적 저주

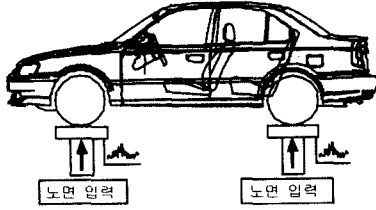


Fig. 1 Excitation from road input

파 영역이므로 차량 속도와 휠 베이스, 휠 트레드를 고려해 보면 일반 도로에서 좌우 동일 입력이 작용하는 것으로 가정하여도 된다. 이 경우 차량의 주행중 주행 진동 기본 모드는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X(t)=h_1(t)z_1(t)+h_2(t)z_1(t-\tau) \quad (3)$$

여기서, h_1, h_2 : weighting functions of the system on input 1 & 2

z_1 : road excitation

τ : time delay between front & rear road input

$X(t)$ 는 차량의 임의 위치에서의 노면 입력에 대한 반응이며 이때의 이 시스템의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(j\omega)=H_1(j\omega)+H_2(j\omega)e^{-j\omega\tau} \quad (4)$$

차량의 전륜 및 후륜 휠에서 차체까지의 각각의 전달함수를 각각 식 (5), 식 (6)과 같이 표현하면, 차량의 임의의 위치에서의 노면 응답특성 PSD는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_1(j\omega)=C_1(\omega)+jD_1(\omega) \quad (5)$$

여기서,

$$H_2(j\omega)=C_2(\omega)+jD_2(\omega) \quad (6)$$

$$Y(\omega)=(|H_1|^2+|H_2|^2+2\{R(\omega)\cos[\omega\tau-\phi(\omega)]\})X(\omega) \quad (7)$$

여기서,

$$R(\omega)=\frac{[(C_1(\omega)C_2(\omega)+D_1(\omega)D_2(\omega))^2+(C_1(\omega)D_2(\omega)-D_1(\omega)C_2(\omega))^2]^{1/2}}{(C_1(\omega)C_2(\omega)+D_1(\omega)D_2(\omega))} \quad (8)$$

$$\phi(\omega)=\tan^{-1}\left[\frac{(C_1(\omega)D_2(\omega)-D_1(\omega)C_2(\omega))}{(C_1(\omega)C_2(\omega)+D_1(\omega)D_2(\omega))}\right] \quad (9)$$

이다. $Y(\omega)$ 는 차량의 임의 위치에서의 진동응답 특성이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y(\omega)=H(\omega)X(\omega)$$

여기에서 $X(\omega)$ 는 노면입력함수이며, $H(\omega)$ 는 노면입력점으로부터 차량의 임의의 위치까지 진동전달함수로 정의할 수 있다.

식 (7)로부터 차량의 주행시 나타나는 주행 진동 기본 모드는 차량 속도와 전,후 타이어에 작용하는 노면 입력의 시간 지연 및 노면 PSD 특성에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 차체나 시트 등의 진동 전달도 차량 속도 및 노면 조건, 주행 진동 기본 모드를 고려하여 해석한다.

Fig. 2 에는 차체 앞쪽 플로워에서 측정된 차량 속도에 따른 상하 방향 진동 가속도 PSD 를 나타내었다. 앞의 수식과 Fig. 2를 비교해 보면 차량 속도가 저속에서는 4~5Hz 대역의 차체 진동이 시트 및 인체 진동에 영향을 미치지만 100kph 이상의 고속에서는 5Hz 근처에 공진주파수를 두고 있는 시트 등의 공진 특성의 영향이 상대적으로 작아진다는 것을 알 수 있다.

4. 시트의 진동 특성

4.1 시트의 정특성 및 동특성

인체가 적절한 위치에서 잘 지지되면 인체 근육에 가해지는 힘이 최소화 된다. 그러므로 인체와 시트 접촉면에서의 집중적인 체압 분포를 피

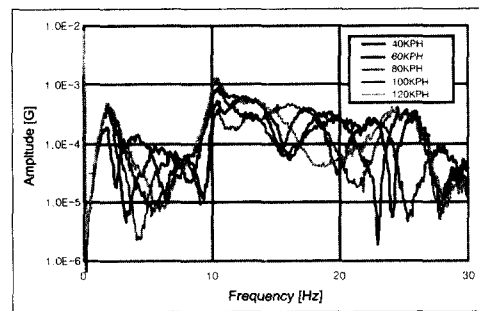


Fig. 2 Vertical acceleration PSD at the front floor

하기 위해서 시트 표면을 굴곡지고 부드럽게 변형될 수 있도록 한다. 시트 쿠션은 인체의 좌골 결절(ischial tuberosities) 주위에 집중된 하중을 골고루 분산 할 수 있도록 부드러운 특성을 가져야 하고, 진동 감쇄 특성이 우수해야 한다. 그리고 좋은 체압 분포 조건은 인체와 시트의 접촉면적 증가로 인해 체압이 고르게 분포되어야 함을 의미하며, 이를 위해서는 좌좌 자세가 매우 중요하며 좋은 자세는 다리부분의 위치, 시트 경사각, 머리부분 각도등에 의해 결정된다.

시트 쿠션은 승객의 요구 수준, 불특정 다수 사용자의 체격 조건 및 신체 형상을 고려해야 한다. 시트가 너무 부드러우면 진동 절연성은 양호해지나 엉덩이 및 허벅지 부위의 체압 분포가 불리해지기 때문에 시트 유연성은 진동 감쇄만 고려해서는 안되며 안락감(feeling comfort)을 같이 고려해야 한다.

시트의 인체 접촉점 및 진동 입력 방향에 따라 진동의 크기 및 민감도가 다르다. 즉, 차체 플로워(floor)의 상하 방향 진동 전달만 고려하는 것은 시트 동적 특성의 최적화에 불충분 하므로 전후/좌우 진동 전달 특성을 함께 고려하여야 한다.

시트의 동적 효율성을 위한 고려사항으로써 진동 가진 조건등과 같은 진동 환경, 시트 동적 응답 특성, 인체 진동 응답 특성등이 있으며, 시트도 문제시되는 진동 가진 방향 및 주파수에 대한 진동 전달률을 최소화 하기위한 튜닝이 필요하다.

일반적인 시트의 상하방향 공진 주파수는 4Hz 근처이며, 인체대신 같은 질량의 강체 더미(dummy)를 사용할 경우 공진 주파수에서 진폭이 증폭되고 고주파 영역에서 감쇄특성이 커지는 현상을 나타낸다. 충돌 더미는 인체와 구조적 임피던스(mechanical impedance) 특성이 달라 시트 진동 전달률 측정에 부적합하며 인체와 임피던스 특성이 유사한 해부학적(anthropodynamic) 더미 사용이 필요하다.

시트 진동 전달률을 구하기 위해서는 모든 주파수의 영향을 다 고려할 수 있는 입력에 대한 응

답 특성을 볼 수 있어야 하므로, 랜덤 가진 입력을 이용한 FRF를 통하여 입출력 사이의 전달 특성을 구할 필요가 있다.

4.2 시트 평가방법 및 위치

시트 동역학의 정량적 평가 방법으로서 S.E.A.T. 지수⁸⁾(Seat Effective Amplitude Transmissibility)는 시트의 진동 절연성을 간단한 수치로 표현한 값이며, 이 수치는 차량과 시트, 인체의 조합 특성에 의해서 결정된다. 그밖에 진동의 가속도의 제곱평균값(root mean square)으로 나타내는 방법도 있다.

시트 진동 및 진동 전달 특성에 대한 분석을 하기 위해서 시트 트랙에서의 진동 시트 쿠션 각부위에서의 진동 응답성 차이 및 진동 전달특성 차이를 찾아야 하며, 인체구조 및 접촉 압력에 따른 가중 함수를 차등화 할 필요가 있다.

시트 등받이의 경우 시트 등받이 프레임이 엔진 아이들 진동 등에 민감하게 공진이 발생하는 경우나 시트 등받이 쿠션의 인체 접촉 압력분포 및 시트 등받이 쿠션 지지 스프링 및 패드의 탄성 특성 등에 의하여 인체로의 진동 전달 특성이 결정된다. 이와 동시에 진동의 방향 및 조향 운동(handling maneuver)에서 인체의 측면 지지 성능 등이 동시에 고려되어야 한다. 또한 운전석 시트 뿐만 아니라 조수석 시트 등에 대한 분석도 병행되어야 한다.

Fig. 3에서는 시트 구조와 시트 쿠션 및 시트 등받이에서 인체가 접촉하는 여러 부분에서의

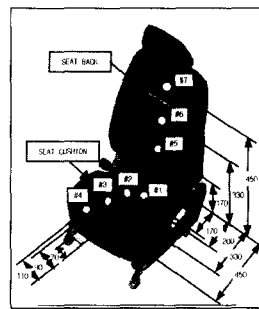


Fig. 3 Positions of seat vibration measurement

진동 스펙트럼 및 전달 특성을 측정할 위치를 나타내었다. 여기서 측정 위치를 다양하게 선정하는 이유는 인체와 시트가 접촉하는 부분의 접촉압력 및 분포되는 등가 질량에 따라 시트의 진동 응답 특성 및 진동 전달율이 다르기 때문이다.

4.3 시트에서의 진동 측정

속도별 노면 입력과 랜덤 노면 입력에 따른 시트 트랙에서의 상하 방향 진동 가속도 PSD를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다.

이 결과를 보면 중고속 이상에서는 시트 공진 영역에서 시트로 전달되는 가진 주파수에서의 가진력이 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 또한, 시트 쿠션에서의 가속도 PSD를 측정하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 쿠션위에서 인체로 전달되는 진동 전달력도 작다는 것을 알 수 있다.

시트트랙과 시트쿠션 간의 진동응답 상관관계 함수를 Fig. 6에서 나타내었다. 상관관계 함수

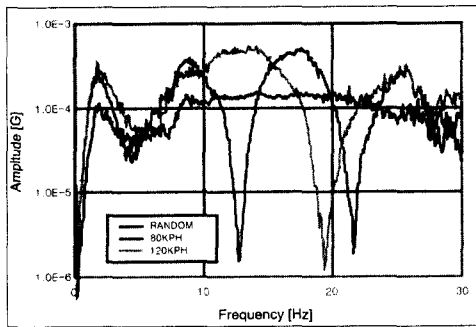


Fig. 4 Vertical acceleration PSD at the seat track

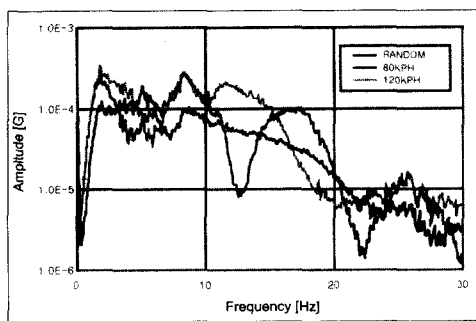


Fig. 5 Vertical acceleration PSD on the seat cushion

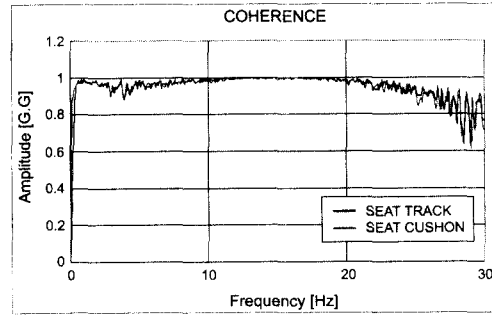


Fig. 6 Autocorrelation function between acceleration PSDs at the seat track and on the seat cushion

가 1에 가까울 때 선형 시스템으로 가정할 수 있으므로 이를 이용하여 서스펜션, 시트등의 승차감 진동 관련 진동 전달 함수를 구할 수 있다.

5. 시트의 특성 비교 및 개선

5.1 시트 특성의 비교

Fig. 7에서는 저주파 노면 가진 조건 하에서 국산 소형승용차 H1 과 외제 소형승용차 G1의 승차감 진동 관련 시트 트랙에서의 상하 방향 진동 특성을 나타내었으며 이는 시트 시스템에 대한 가진 특성을 보여주고 있다.

이 시험 결과를 분석해 보면 H1이 G1 대비 2~5Hz 부근의 진동레벨이 높게 나타나며 그 원인은 H1의 차체 중량이 작고 서스펜션 마찰력이 크기 때문이다. 또한 H1이 9~12Hz 부근의 진동이 높게 나타나는 원인은 서스펜션 스트럿(Strut)

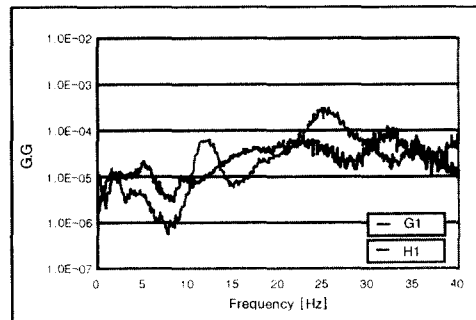


Fig. 7 Comparison of acceleration PSDs at the seat track

감쇄력이 상대적으로 커서 휠로부터의 차체 가진력이 증가한 점과 파워 플랜트 유동량이 크기 때문이며, 24-27Hz 부근의 진동이 높게 나타나는 원인은 차체 1차 굽힘 진동 모드에서 차체 진동 감쇄 특성이나 파워 플랜트 혹은 라디에이터 장착 진동 특성이 불리하기 때문이다. 이와 같은 사시 부분의 진동 전달 특성의 상관 함수가 1에 가깝기 때문에 시트로 바로 전달되며 따라서 이 부분에서의 진동 전달력을 감소시키게 되면 승차감 진동을 직접적으로 개선할 수 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 8에서는 H1 시트 등받이 프레임의 전후 방향 진동 특성을 나타내고있다. 이 결과를 분석해 보면 12Hz 부근의 진동 모드는 승차감에 불리한 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있으며, 26Hz 부근의 진동 모드는 엔진 공회전 진동에 불리하게 작용할 수 있다는 것을 보인다. 이 현상은 공회전 상태에서 차량의 강성감이 저하되는 원인 중 하나로 지적될 수 있다.

Fig. 9에서는 시트 쿠션 #2 부분의 진동 전달 함수를 나타내었으며, Fig. 10에서는 시트 등 패드 #5의 진동 전달 함수를 나타내었다. 시트 쿠션 진동 전달 특성은 5Hz 부근보다 승차감 진동이 문제가 되는 10~20Hz 영역에서 진동 감쇄가 잘 나타나는 G1의 경우 시트 쿠션의 꺼짐감이나 잔진동 전달 특성등에서 유리하다고 평가된다.

시트백에서의 진동특성을 비교한 Fig. 10에서 보면 시트 등 패드의 진동 전달율에서 H1이 전후

방향 승차감 진동에 영향을 주는 7~10Hz 영역에서 불리하다는 것을 알 수 있다. 이는 시트 등받이 패드의 강성과 감쇄 특성 및 인체의 접촉 압력에 의해서 결정되어 지는 것으로 분석된다.

5.2 시트 특성의 개선

시트백에서의 진동특성을 비교한 Fig.10에서 알 수 있듯이 H1에서 시트 등 패드의 진동 전달율이 전후 방향 승차감 진동에 영향을 주는 7Hz 영역에서 불리하다는 것을 알 수 있다. 이를 개선하기 위해서는 시트 등받이 패드의 강성과 감쇄 특성을 바꿀 필요가 있는 것으로 판단하며, 개선 시험 결과의 경향을 Fig. 11에 표시하였다. 80kph 주행 조건에서 시트 요추 지지 부분의 패드를 추가하여 강성을 낮춘 결과 진동 전달 특성이 개선되는 결과를 보여주고 있다.

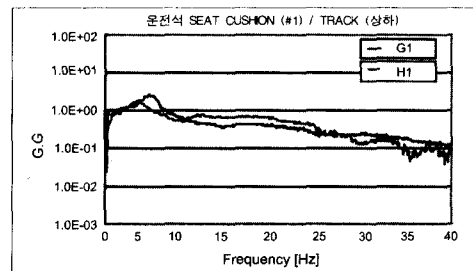


Fig. 9 Comparison of transfer functions at the seat cushion

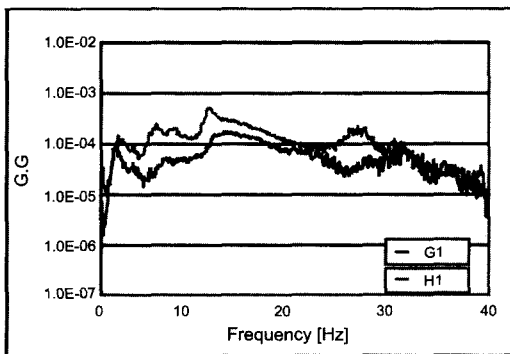


Fig. 8 Comparison of acceleration PSDs on the seat back

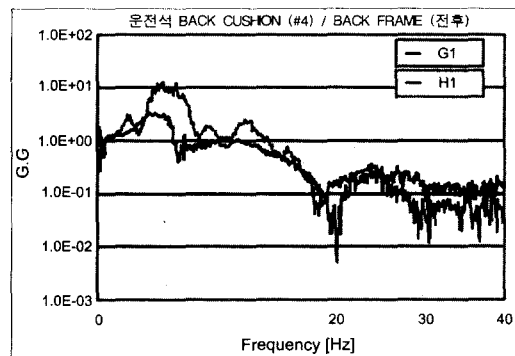


Fig. 10 Comparison of transfer functions on the seat back

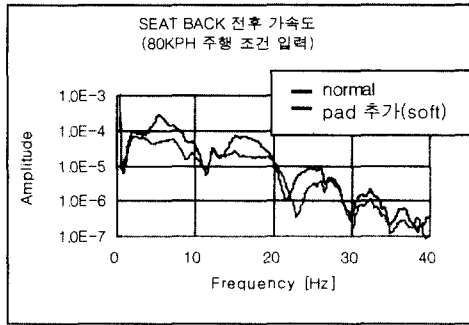


Fig. 11 Improvement of seat back vibration in H1 model

6. 결론

주행 안락감 분석에 있어서 기존의 차체 진동 분석이나 시트 진동 분석만에 의한 주행 안락감 해석은 실제 탑승자가 느끼는 안락감을 표현하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 개선하고자 샤시와 차체의 진동모드까지 고려하여 시트에서의 승차감을 해석하는 샤시-차체-시트 통합 분석 방법을 제시하였으며, 그 결과 실제 주행시에 탑승자가 느끼는 주관적 평가와 주행 진동에 의한 객관적 평가 결과의 상관 관계를 개선할 수 있었다. 물론 주행 안락감이 차량의 주행시 나타나는 진동 현상만으로 분석하는 것은 상당한 무리가 따르지만 물리적인 양으로

인체의 피로감 혹은 안락감을 표현하는데는 차량 및 인체의 진동 현상을 가지고 표현하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

- 1) P. Branton, "Behaviour, Body Mechanics and Discomfort," Ergonomics, Vol.12, No.2, pp. 316-327, 1969.
- 2) A.D. Bruning, "Customer Perception of In-vehicle Comfort," UK Group Meeting on Human Response to Vibration, pp.345-354, 1997.
- 3) G. Millet, D. Pignede, "The Soft & Firm Seat : How Innovation in Automotive Seating Can Improve the User's Well Being," SAE 2001-01-0383, 2001.
- 4) H. Okiyama, N. Michida, "Objective Evaluation of Seat Lateral Support for Cornering," SAE 2001-01-0387, 2001.
- 5) M. G . Kim, "The Effects of Vehicle Velocity and Engine Mount Stiffness on Ride Comfort," SAE 941045, 1994.
- 6) Roy R. Craig Jr. Structural Dynamics, John Wiley & Sons, 1981.
- 7) J. S. Bendat, A. G. Piersol, Random Data, John Wiley & Sons, 1986.
- 8) M. J. Griffin, "Handbook of Human Vibration," Academic Press, 1990.