

자동차 승차감 평가 방법에 관한 연구

A Study on the Estimation Method of Automotive Ride Comfort

황성연*, 홍동표**, 정인성**, 김동우**, 김진기*

*전북대학교 대학원, **전북대학교 기계공학부

Abstract

In these days, customers require high-quality, high-performance, high-ride comfort for Automobile. and then the automotive manufacturers concentrated on study of electrical, high-performance, low-cost of parts and sub-parts.

In this paper, for ride comfort estimation PSD(Power Spectral Density)of acceleration at eight test point are measured, and then are calculated with new index of ride comfort.

The new index of ride comfort developed for optimal design, real test, applied the actual. It can apply for various fields.

1. 서론

오늘날 소비자들의 자동차에 대한 요구가 고 품질화, 고성능화 됨에 따라서 자동차 업체들에서는 부품 및 서브시스템(sub-system)의 전자화와 고성능화의 연구에 역점을 두고 있다. 특히 자동차 현가 장치의 주요 역할인 안락한 승차감을 제공하면서 원활한 조종안정성을 확보하는데 관심과 연구가 집중되고 있다.

종래의 연구 동향을 살펴보면 첫째 승차감과 조종안정성이라는 상충되는 성능을 동시에 향상시키기 위해 능동형, 반능동형 현가 장치에 대한 연구[1,2]가 활발해지고 있다. 둘째로 인체의 진동 시스템을 고려하여 보다 효율적이고 운전자가 주관적으로 느끼는 승차감에 대한 연구[3,4,5]가 시

작되고 있다.

ISO 2631[6]에서는 인간의 감각을 객관적으로 표현할 수 있도록 인체가 받는 진동가속도의 유효치를 안락성 판단의 기준으로 정하였다. Griffin[3]은 앉은 사람이 수직 진동에 노출되었을 때의 자세와 진동레벨 및 주파수가 인체에 미치는 영향성을 연구하였고, Parsons[4]은 롤링(Rolling)과 피칭(Pitching)이 안락성에 미치는 효과에 대하여, Shoenberger[5]는 2축에서 동시에 일어나는 진동에 대한 연구 등을 수행하였다.

1980년대 후반에 ISO 2631[6]이 발표되면서 주파수 가중처리법을 이용하여 진동이 안락성에 미치는 영향을 추정할 수 있게 되었고 BS6841[7]은 ISO2631[6]을 더욱 개선시켰다. Sutjiatmo[9]등이 파워스펙트럼밀도(Power Spectral density)를 사용하여 차량 진동의 이론적 해석을 시도하였다. 실제 주행시 탑승자들이 느끼는 정확한 승차감을 추정하는 것이 어려운 실정이고 여러 환경조건(노면, 타이어 등)에 따른 승차감의 영향분석 및 평가방법의 기준이 구체적으로 마련되어 있지 않는 실정이다.

차량의 승차감을 객관적으로 평가하기 위한 여러 가지 승차감 지수가 제안되어 왔지만 실제 산업체에 응용되지는 못하고 있는 실정이고 최종 승차감 평가시 필링테스트(Feeling Test)로 사람이 직접 시승하여 차량의 승차감을 개선하고 있다.

본 연구에서는 이러한 최종 필링테스트의 접근의 용이성 및 실험회수를 줄이고, 기존의 평가 방법보다 간편하고 실제 승차감에 영향을 주는 여러 지점을 선택한 실차 평가 방법을 제안하고

자 한다.

2. 이론적 배경 및 새로운 승차감지수 제안

본 연구에서 사용된 차량의 진동 모델 Fig.1 은 소형 승용차에 대한 5자유도 모델을 선택하여 도로에서 주행하는 진동시스템으로 나타낸 것이다.

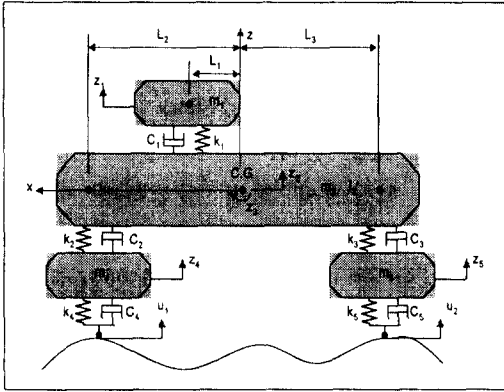


Fig1. Vehicle model with 5 D.O.F.

도로를 주행하는 차량의 진동은 도로면의 불균일성 때문에 차량에 가해지는 입력이 에르고딕(Ergodic)이고 그 평균값이 영이라고 가정하면 선형계의 출력도 에르고딕이며 평균값이 영이 되므로 해석이 용이해진다. 차량의 진동해석을 위해서는 입력에 사용되는 도로의 표면 조도에 관한 수학적 공식화 및 규정이 필요하다. 실제 도로는 불규칙 조도 및 형상을 가지고 있으므로 모든 주파수대에서 평균적인 조도를 갖는 백색노이즈(White noise)로 접근할 수 있으며 주행차량의 진동 입력으로 타이어와 접촉하는 부분의 조도만이 필요하기 때문에 실제 차량의 조도입력은 백색노이즈의 일부분인 칼라노이즈(colored noise)를 사용한다. Sutjiatmo[9]는 실제 도로의 진동 입력인 칼라노이즈 $u(t)$ 를 측정하여, 도로조도의 통계적인 성격을 나타내는 파워스펙트럼밀도로 표시하였다.

$$S_u(\Omega) = N \left(\frac{2\pi}{\Omega} \right)^b \quad (\text{cm}^3) \quad (1)$$

여기서 $\Omega = \omega/V$ 로 주파수 ω 와 차량속도 V 에 의해서 구해지며 N 과 b 의 값은 도로의 형태에 따라 Table.1과 같이 주어진다.

Table.1 Characteristic value of the road^[9]

| Road Type | N | b | W_u (m ² /sec) |
|-----------------|----------------------|------|--------------------------------|
| Macadam | 1.2×10^{-3} | 2.03 | $29.7 \times 10^{-6} \times V$ |
| Nacas | 3.4×10^{-3} | 2.14 | $84.3 \times 10^{-6} \times V$ |
| Hotmix Asphalt | 5.3×10^{-3} | 2.16 | $13.2 \times 10^{-6} \times V$ |
| Coldmix Asphalt | 7.3×10^{-3} | 2.16 | $18.1 \times 10^{-6} \times V$ |

다음으로 승차감 지수에 관하여 논하면 진동 환경 상태에 놓인 인간이 느낄 수 있는 진동의 양을 정량적으로 표현하려는 노력이 많은 연구자들에 의해 제시되고 있다. 그 중에서 ISO2631[6]은 진동에 대해 인간이 주관적으로 느낄 수 있는 지각변수(Perception Variable) K_s 라는 지수로 표현하였다. 이것을 차량 승차감의 판단에 적용하였을 때 K_s 가 작아질수록 차량의 승차감이 좋아지는 경향을 나타낸다. ISO2631[6]에 기초한 VDI 2057[8]에 따르면 단일축 진동에서의 지각변수는 아래와 같이 정의된다.

$$K_s = \alpha a_s \quad (2)$$

여기서 $\alpha = 20$ 이고 a_s 는 인체가 주관적으로 느끼는 진동가속도의 평균 제곱근값(Root-Mean-Square Value)을 나타낸다. 식(2)는 평균값이 영일 때 표준편차가 평균 제곱근값과 같다는 분산의 성질을 이용하여 인체가 주관적으로 느끼는 가속도 성분의 분산 σ_{hs}^2 로 나타낼 수 있다. 그리고 분산 σ_{hs}^2 는 인간이 느끼는 가속도 $H_s(t)$ 의 자기상관함수 R_{hs} 로 나타낼 수 있고, 자기상관함수는 스펙트럼밀도 함수의 푸리에 변환이므로 K_s 는 식(5)와 같이 인체에 실제로 전달된 차량의 진동가속도의 파워스펙트럼밀도 $S_{pb}(\omega)$ 로 나타낼 수 있다.

$$K_s = \alpha \sqrt{\sigma_{hs}^2} = \alpha \sigma_{hs} \quad (3)$$

$$\sigma_{hs}^2 = E[H_s^2(t)] = R_{hs}(0) \quad (4)$$

$$S_{hs}(\omega) = |f(\omega)|^2 S_{pb}(\omega)$$

$$\begin{aligned} K_s &= \alpha \sqrt{\sigma_{hs}^2} = \alpha \sqrt{R_{hs}(0)} = \alpha \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_{hs}(\omega) e^{j\omega(0)} d\omega} \\ &= \alpha \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_{hs}(\omega) d\omega} = \alpha \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega)|^2 S_{pb}(\omega) d\omega} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $S_{hs}(\omega)$ 는 인간이 느낄 수 있는 진동가속도의 파워스펙트럼밀도이며, $f(\omega)$ 는 인체의 역할을 전달함수로 나타낸 것으로 식(5)에서 K_s 를 계산하려면 먼저 전달함수 $f(\omega)$ 를 구해야 한다. VDI 2057[8]에서는 이 전달함수 $f(\omega)$ 를 ISO 2631[6]의 요구에 맞게 계산하여 수직방향 진동에서 인체에 전달되는 함수를 아래와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} f(\omega) &= 0.5 \cdot \sqrt{\omega/2\pi} & 2\pi \cdot 1 \leq \omega \leq 2\pi \cdot 4 \\ f(\omega) &= 1 & 2\pi \cdot 4 \leq \omega \leq 2\pi \cdot 8 \\ f(\omega) &= 2\pi \cdot 8 / \omega & 2\pi \cdot 8 \leq \omega \leq 2\pi \cdot 80 \end{aligned} \quad (6)$$

한편 BS 6841[7]에서는 ISO 2631[6]을 더욱 발전시켜 전달함수 $f(\omega)$ 와 같은 개념으로 수직 진동 하에서 가중함수(Weighting function) W_b 를 제안하였다.

$$\begin{aligned} W_b(f) &= 0.4 & 0.5 \leq f \leq 2.0 \\ W_b(f) &= f/5.00 & 2.0 \leq f \leq 5.0 \\ W_b(f) &= 1 & 5.0 \leq f \leq 16.0 \\ W_b(f) &= 16.0/f & 16.0 \leq f \leq 80.0 \end{aligned} \quad (7)$$

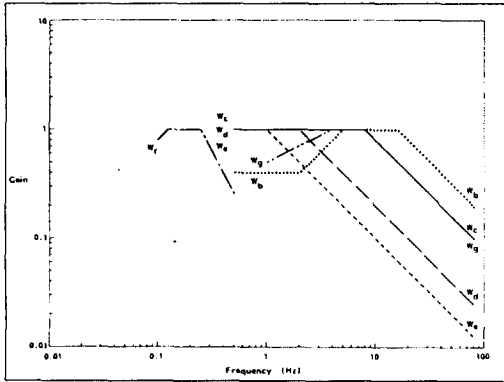


Fig.2 Frequency Weighting W_b (BS 6841)^[7]

식(6)의 전달함수는 연속성이 없어서, 해석이 용이하지 않기 때문에 피드포워드(feedforward)가 없는 전달함수 $f(\omega)$ 의 일반형태로 표현하면 다음과 같다.

$$f(\omega) = \frac{\beta_1(i\omega) + \beta_2}{(i\omega)^2 + \gamma_1(i\omega) + \gamma_2} \quad (8)$$

$$f(\omega) = \frac{49.42_1(i\omega) + 465.76}{(i\omega)^2 + 48.97(i\omega) + 1108.95} \quad (9)$$

$$\beta_1 = 49.42, \beta_2 = 465.76,$$

$$\gamma_1 = 48.97, \gamma_2 = 1108.95$$

수직 진동 하에서 식(8)의 각 계수들은 BS 6841

에서 식(9)처럼 정의하여 K_s 의 이론 해석시 사용한다.

이 K_s 를 이용한 승차감 지수는 이상적인 차량에 대한 모델링으로 중간의 계산 과정 중 공분산 이론 등 어려운 처리과정을 포함하고 있어 실제 현장에서 바로 응용하기에 어려운 점이 있고, 차량의 정확한 진동의 영향을 분석함에 있어서 실제 진동이 전달되는 지점에서 정확한 승차감 지수를 예측하는데 어려움을 가지고 있다. 또한 차량의 질량을 한 점에 분포되어 있는 강체로 모델링이 되었기에 실차의 질량분포와 위치에 따른 변화를 정확히 분석하여 승차감 개선 시 이용하는데 문제가 되고 있다.

그래서 현장에서 직접 실험하여 이용할 수 있고, 계산상의 편리성과 실측데이터를 쉽게 분석 및 평가할 수 있고, 차량의 평면상(종축상, 횡축상) 위치에 따른 승차감의 영향정도를 쉽게 인식할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 또한 실측데이터를 이용해 승차감 지수를 제안함으로써 다른 승차감 지수와 비교 및 실제 승차감 개선시 이용할 수 있도록 자료를 구축하여 차량의 비선형성의 영향 등을 고려한 최적 설계시 이용하고자 한다.

식(5)을 간단히 변형하여 새로운 승차감지수를 G_{is} 를 정의하면 아래와 같다. 먼저 $\alpha=1$ 을 대입하고 제공한 후, $f(\omega)$ 와 BS 6841[7]의 $W_b(f)$ 와 같으므로 치환하면 식(11)과 같이 되고

$$G_{is} = \left(1 \cdot \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega)|^2 S_{pb}(\omega) d\omega} \right)^2 \quad (10)$$

$$G_{is} = \int_{-\infty}^{\infty} \left| W_b\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \right|^2 S_{pb}(\omega) d\omega \quad (11)$$

여기서 인체에 가해지는 진동 중 가장 영향이 큰 주파수영역만을 취하기 위해 가중함수 $W_b(f)$ 가 1인 주파수대($5 \leq f \leq 16$)만을 고려하여 계산하게 되면 $W_b(f)=1$ 이 되고 식(11)은 식(12)과 같이 변형된다. 식(12)을 인체에 가장 영향이 큰 주파수대의 진동량을 평가하기 위해서 S_{pb} 의 절대값을 취해 정해진 구간에 관하여 평균하여서 G_{is} 라는 새로운 승차감 지수를 정의하면 아래의 식(13)과 같이 표현된다.

$$G_{is} = \int_{2\pi A}^{2\pi B} S_{pb}(\omega) d\omega$$

$$= \sum_A^B S_{pb}(f) \quad (12)$$

$$G_{is} = \frac{1}{B-A} \sum_A^B |S_{pb}(f)|$$

$$A = 5, \quad B = 16 \quad (13)$$

여기서 횡축상의 네 지점의 수직방향의 승차감을 나타내기 위해 H_a 를 정의하고 종축상의 네 지점의 수직방향의 승차감을 표현하기 위해 H_o 를 나타내었고 또한 차량의 전체적인 승차감을 나타내기 위하여 H_T 를 정의하고자 한다.(숫자는 측정 위치)

$$H_a = (G_{is1} + G_{is2} + G_{is3} + G_{is4})/4$$

$$H_o = (G_{is5} + G_{is6} + G_{is7} + G_{is8})/4 \quad (14)$$

$$H_T = H_a + H_o \quad (15)$$

3. 실험장치 및 실험방법

본 실험은 4실린더 4사이클 DOHC 엔진을 장착한 전륜구동의 경승용차를 이용하여 속도, 승차위치, 도로유형에 따른 실차 실험을 수행하여 각각의 영향이 승차감에 어느 정도 영향을 미치고 새로운 승차감지수의 타당성 및 효과를 측정하고자 한다. 실험을 위하여 실제 도로 주행시 이용되고 있는, 두 종류의 노면을 시험용 도로로

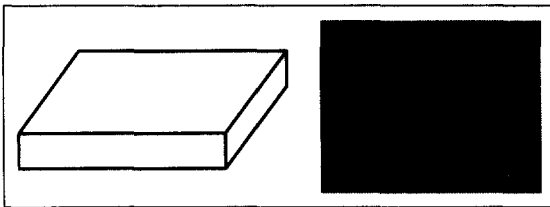


Fig.3-1 Asphalt

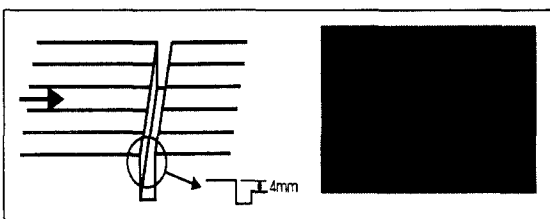


Fig.3-2 American Freeway Rough Road

사용하였다. Fig.3-1은 일반 아스팔트이고 Fig.3-2는 미국 고속도로 (Freeway Rough Road)이다.

Fig.4는 횡축상(Lateral Axis)의 가속도 변동량을 측정하기 위한 측정 위치를 표시하였다. Fig.5는 종축상(Longitudinal Axis)의 측정 위치를 나타낸다. 횡축상에서는 노면으로부터 들어오는 입력 중 실제 사람에게 직접적으로 진동을 전달하는 경로 상에 설치하기 위해 차체와 좌석이 결합되는 곳에 가속도계를 설치하여 좌우 승차감의 영향을 비교하였다. 이론 해석시 질량이 한 부분에 집중된 상태로 해석하기 때문에 무시하기 쉬운 실제 진동 전달 지점에서 가속도 변동량을 측정하기 위해 4지점을 측정위치로 선정하였다. 또한 종축상에서는 좌우 무게 중심선상에서 차량의 전, 후 승차감의 차이를 느낄 수 있도록 위치를 선정하여 가속도계를 장착하여 차량의 피칭의 영향성도 고려할 수 있다. 모든 측정 위치에서 수직방향의 가속도를 측정하도록 가속도계를 설치하였다.

이 실험방법은 기존의 평가지수와 달리 예측보다는 실제 측정된 값을 분석하여 자료를 구축하여 현장에서 원하는 승차감 수준에 접근의 용이성을 제공하고, 설계자료로 활용하기 위해 실측 데이터를 기준으로 평가 한 것이다.

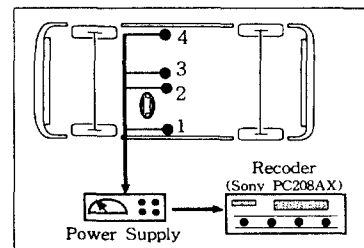


Fig.4 Test Point of Lateral Axis

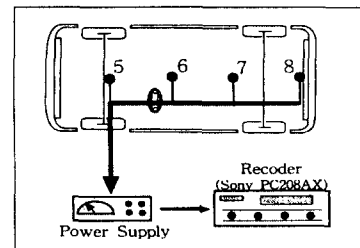


Fig.5 Test Point of Longitudinal Axis

Fig.6은 각 계측 위치로부터 동시에 측정되어 저장된 데이터를 DSA210 신호분석기를 이용하여 분석한 후 컴퓨터를 이용해 데이터를 가공 처리하는 개략도를 보여주고 있다. 이때 모든 분석은 종축상, 횡축상 각각 4채널씩 동시에 처리하여 데이터 처리속도를 높였다.

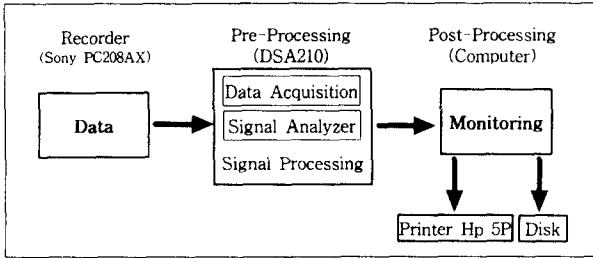


Fig.6 Schematic diagram of the analyzing instrument

4. 실험결과 및 고찰

4.1 속도변화에 따른 승차감 영향

먼저 지각변수 K_s 를 이용한 속도 및 차량의 무게중심으로부터 종축상의 거리변화에 따른 이론 해석 결과치를 Table.2에 나타내었다.

Table.2 Perception value(K_s) according to velocity, distance of the center of gravity on asphalt

| Velocity | 30km/h | 60km/h |
|----------|--------|--------|
| K_s | 8.7 | 13.1 |
| Distance | -0.5m | +0.5m |
| K_s | 6.25 | 6.25 |

지각변수 K_s 와 승차감 지수 G_{is} 를 속도변화에 따라 비교해 보면 Fig.7과 8에서 횡축상의 속도의 변화(30km/h → 60km/h)시 승차감 지수 G_{is} 의 변화를 살펴보면 K_s 와 같이 속도 증가에 따라 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 K_s 와 차이점은 각 위치별 승차감지수 변화를 정확히 가시적으로 보여주고 실제 진동 레벨이므로 한계 진동 레벨의 범위를 정할 수 있는 이점을 가지고 있다. 또한 속도 변화에 따른 확연한 승차감 변화 차이를 구분할 수 있어 승차감 판단에 용이하다.

횡축에서뿐만 아니라 종축상(Fig.9~10)의 영향도 속도에 따라 확연히 승차감 지수가 높아져 안락성을 감소시킴을 볼 때 새로운 승차감 지수 G_{is} 의 타당성을 증명할 수 있었다. 또한 Fig.11과 Fig.12에서와 같이 G_{is} 를 이용한 횡승차감 지수 H_a

와 종승차감 지수 H_o 도 속도에 따라 증가하고 차량전체 승차감 지수 H_r 도 역시 속도에 따라 증가하여 승차감의 안락성을 감소시키고 있음을 알 수 있다.

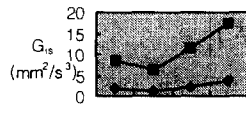


Fig.7 G_{is} of Lateral Axis (Asphalt)

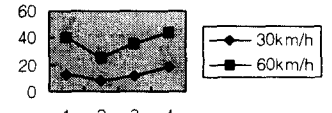


Fig.8 G_{is} of Lateral Axis (Freeway)

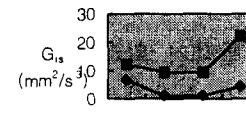


Fig.9 G_{is} of Longitudinal Axis (Asphalt)

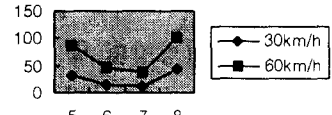


Fig.10 G_{is} of Longitudinal Axis (Freeway)

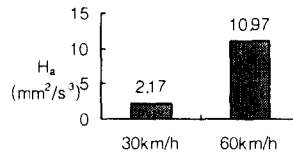


Fig.11 H_a of Lateral Axis (Asphalt)

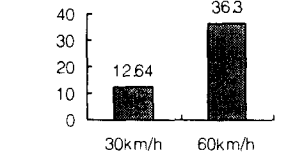


Fig.12 H_a of Lateral Axis (Freeway)

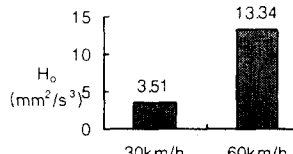


Fig.13 H_o of Longitudinal Axis (Asphalt)

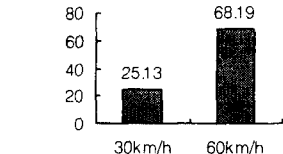


Fig.14 H_o of Longitudinal Axis (Freeway)

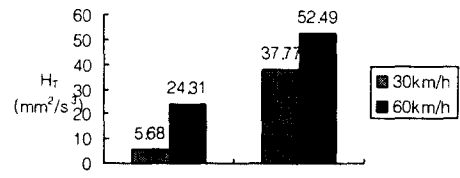


Fig.15 H_r Ride Index of Full Car

4.2 승차위치에 따른 승차감 영향

Fig.7의 횡축선상(Asphalt)의 승차위치에 따라 승차감지수 G_{is} 의 변화량을 고려해보면 속도 30(km/h)일 때 「운전석 우측 < 운전석 좌측 < 조수석 좌측 < 조수석 우측」 순으로 승차감지수 G_{is} 가 변화하고 있다. 이와 같이 새로운 승차감지수 G_{is} 는 각 중요 측정위치에 대한 정확한 승차감의 차이를 분별할 수 있게 해주고 현재 문제가 되는 지점을 정확히 진단하여 승차감 개선에 이용할 수 있다. 횡축과 종축상의 영향을 고려해볼 때 차량의 위치별 승차감 지수가 각각 차이가 있음

을 알 수 있다. 또한 횡축상의 변동량보다 종축상의 변동량이 큰 것으로 볼 때 차량의 승차위치에 따른 승차감의 영향은 종축상의 영향을 더 고려하여 설계하는 것이 전체 승차감에 미치는 영향을 개선하는데 도움이 되리라 생각된다.

4.3 도로형태에 따른 승차감영향

Fig.11과 Fig.13에서 보는 바와 같이 도로 형태에 따른 횡승차감지수 H_a 는 노면의 변동량이 적은 아스팔트 도로가 주기적인 단차와 노면조도가 큰 미국 고속도로보다 적은 값을 나타내고 있다. 종승차감 지수 H_o (Fig.12, Fig.14)와 차량전체 승차감 지수 H_T (Fig.15)도 역시 입력의 변동량이 큰 미국 고속도로에서 승차감지수가 커져 안락성을 악화시키는 것을 보여주고 있다. 이와 같이 새로운 승차감 지수를 이용한 평가 방법이 기존의 지각 변수를 사용한 평가 방법과 같은 경향을 나타낸다. 그러나 새로운 승차감 지수는 이러한 승차감의 차이를 더 명확히 구분해 주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 차량의 초기 개발 단계에서 승차감을 시험하는데 많은 시간과 인력 및 비용을 투자하는데 반하여 그 결과의 분석 및 방향성을 결정하는데 개인적인 노하우(Know-How)에 의존하던 것을 탈피해 구체적인 접근이 가능하게 하였다.

기존의 지각변수 K_s 를 이용한 평가 방법과 비교하여 새로운 승차감 지수 G_{18} 를 사용한 평가 방법의 타당성이 있음을 증명하였다.

또한 새로운 승차감 지수 G_{18} 는 간단하게 실제 차량의 승차감을 평가하여 차량의 어느 부분과 어떤 구성부품의 역할을 변화시켜야 하는지를 추정할 수 있는 방법임을 보였고 차량의 여러 환경 조건에서 승차감을 평가할 수 있는 방법이라 생각된다. 진동 발생시 주된 영향을 주는 주파수 영역만을 고려하여 예측 및 평가하는데 이 방법을 활용할 수 있으리라 사료된다.

후기

본 연구논문은 전북대학교 자동차 신기술 연구소 지원 연구과제(연구과제 번호 : 9701B)를 토대로 작성한 것임을 밝히고 지원해주신 주관 기관 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. D. Moline, S. Floyd, et al. , "Simulation and Evaluation of Semi- active Suspensions", SAE Paper 940864.
2. D. J. Cole, D, Cebon, et al. , "Optimisation of Passive and Semi-Active Heavy Vehicle Suspensions", SAE Paper 942309.
3. M. J. Griffin, Handbook of Human Vibration, Academic Press Inc., 1990.
4. Parsons. K. C., M. J. Griffin, "The effect of rotational vibration in roll and pitch axes on the discomfort of seated subjects", Ergonomics, Vol. 21, No. 8, pp.612-625, 1978.
5. Shoenberger, R. W., "Subjective effect of combined-axes vibration comparison of y-axis and y-plus-roll vibration", Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 55, No. 5, pp. 387-390, 1984.
6. International Organization for Standardization, Evaluation of Human exposure to whole-body vibration - part1: General Requirement(ISO 2631/1), International Organization for Standardization, 1985.
7. British Standards Institution, British Standard Guide to Measurement and Evaluation of Human Expose to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock(BS 6841), British Standards Institution, 1987.
8. Association of German Engineers, Effect of Mechanical vibrations on Human beings(VDI 2057), Association of German Engineers, 1987.
9. Sutjiatmo, B. Bagiasna. K., et al. "Typical Wet Java Road Surface Power Spectral Density", The 2nd. IPC Conference on automotive Engineering, pp.505-509, 1983.