

3축 가속도 시험을 통한 도로 노면의 주행 안정성 평가에 대한 연구

Study About the Evaluation of Driving Stability Using 3-axis Accelerometer Test

이 동 현	Lee Dong Hyun	정회원 · (주)토탈페이브시스템 부장 (E-mail : jangnangam@hotmail.com)
김 지 원	Kim Jiwon	정회원 · (주)토탈페이브시스템 대표이사 (E-mail : aircraft1@paran.com)
문 성 호	Mun Sungho	정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr)
정 원 석	Jeong Won Seok	(주)토탈페이브시스템 대리 (E-mail : 132and502@gmail.com)

ABSTRACT

This paper attempts to evaluate driving stability by the vibration of human body. The purpose of this research is to establish an evaluation methodology for controlling the quality of road surface. The study was conducted to investigate the relationship between road surface profiles (IRI, International Roughness Index) and the fatigue caused by the vibration of human body. Furthermore, 3-axis acceleration in driving vehicles was examined based on sampling sections under various road conditions. The acceleration value of frequency bands were analyzed by the characteristics of road surface, and realized the range of human influence by conditions and type of road surface with ISO-2631 standards. In general, more human fatigue by vehicle vibration was appeared in concrete pavements with high IRIs based on the analysis from given test data. Whereas, The SMA asphalt pavement and the diamond grinded concrete pavement reduce the human fatigue.

KEYWORDS

vehicle driving stability, acceleration, roughness, vibration, pavement, road evaluation

요지

본 논문은 인체에 영향을 미치는 진동에 따라 도로노면의 주행성을 정량화하고 향후 공용중인 도로 및 신설도로의 주행 안전성 평가에 적용할 수 있는 방법론을 정립하는 것이 주요 목적이다. 이를 위해 평탄성 및 인체 피로도 관련 조사를 수행하여 이론적 근거를 수립하였고 다양한 고속도로 표본 구간을 선정하여 차량 내 3축 가속도를 측정하였다. 도로 상태별로 ISO-2631에 준한 주파수별 가속도 값을 분류화함으로써 노면상태에 따른 인체에 미치는 진동 가속도 수준을 정량화할 수 있었다. 연구 결과, 전반적으로 인체에 미치는 피로도는 IRI가 높은 콘크리트 포장에 비해 크게 유발시키는 것으로 나타났으며, SMA 포장과 다이아몬드그라인딩이 적용된 콘크리트 포장은 상대적으로 피로도가 낮은 것으로 나타났다.

핵심용어

주행 안정성, 가속도, 평탄성, 진동, 포장, 노면 평가

1. 서론

도로의 관리업무는 도로 연장과 내구년수가 증가하면서 체계적이고 객관적인 유지보수 방식으로 발전하고 있다. 또한, 국민의 생활수준 향상에 따라 운전자들에게

보다 나은 서비스를 제공하여야 한다는 의견이 점차 증가하고 있다. 국내에서는 1990년대 초반부터 객관적으로 조사, 분석하여 유지보수공법을 결정하는 PMS(Pavement Management System)가 도입되었

다. PMS는 현재 국도 및 고속도로를 대상으로 수행되고 있으며, 크게 4단계로 조사, 평가, 분석, 공법 결정으로 구분되어 있다. 여기서, 가장 기본적인면서 결과에 절대적인 영향을 미치는 단계는 조사 및 평가 단계로 도로포장을 어떤 기준으로 조사하여 평가하는지에 따라 향후 투자예산 및 보수 대상 선정에 큰 차이가 발생한다. 일반적으로 도로포장은 현재 소성변형, 균열, 평탄성 세가지 항목을 가지고 성능을 평가한다. 국외에서는 2000년대 초반부터 도로 이용자의 요구수준이 높아지고 실제 주행 시 안정성에 영향을 가장 크게 미치는 인자를 파악하고 정량화하려는 경향이 중요시 되고 있다. 평탄성 지수는 개별적인 파손상태를 나타내는 다른 지수와 달리 여러 가지 파손 형태를 포함한 통합적인 지수로 다른 지수에 비해 주행성과 밀접한 관계가 높다. 더구나, 화물차량 운전자와 장시간 고속 주행하는 도로 이용자들이 증가하면서 승차감이나 주행 안정성에 따른 서비스 수준에 대한 요구도 높아지고 이에 따라 주행성에 대한 중요도가 점차 중요시 되고 있다. 본 논문에서는 운전 시 인체에 미치는 영향(피로도)을 평가할 수 있는 방법론을 제시하고 어떤 노면 상태가 운전자에게 영향을 더 미치는지 객관적으로 정량화하고자 한다. 궁극적으로 향후 공용중인 도로 및 신설도로, 고속도로의 주행성 평가에 적용할 수 있도록 관련 제반 지침을 마련하는 것이 본 논문의 향후 목표이다. 이를 위해 다양한 국내 도로 형식에 대한 도로 프로파일(IRI) 조사, 3축 가속도 시험 등을 수행하여 각 도로 노면 조건별 3축 진동 가속도 발생 정도를 파악하였고 ISO 기준에 따라 인체에 미치는 영향을 정량화하였다.

2. 이론적 고찰

장시간의 고속주행 시 운전자는 도로 노면 상태에 따라 발생하는 진동에 지속적으로 노출된다. 노면 표면조직은 파장에 따라 마이크로조직, 매크로조직 그리고 메가조직(megatexture)이 있으며, 종단프로파일도 여러 가지 파형(장파, 단파)의 형태로 존재한다. 이에 따라 운전자가 체감하는 진동은 전후(X-축), 좌우(Y-축), 상하(Z-축) 방향인 3축별로 다른 주파수 특성을 나타낸다(송인준, 1998). 각 주파수별 진동은 방향별 진동의 가속도로 표시하는데 최대값, 실효값, 평균값 등으로 표시하는 방법이 있으나 신체와 관련해서는 실효값으로 진동의 가속도를 표시한다. 인체에 영향을 미치는 진동을 주파수범위별로 구분하면 초저주파진동, 전신진동, 국소진동으로 분류할 수 있다. 초저주파진동(0.01~0.5Hz)은

자동차, 배, 비행기 등에 탑승할 경우에 나타나는 현기증, 구토감 등의 멀미증상(motion sickness)을 야기하게 되는데, 이는 인체의 세반고리관에 가해지는 과도한 자극으로 발생하는 증상이다. 전신진동(0.5~100Hz)은 인체 전반에 영향을 미치는 진동으로 인체 장기와 인체를 지탱하는 척추 관절 등과 연관이 있으며, 노면의 특성과 직접적인 상관성이 있는 진동이다. 특히 인체에 영향을 끼치는 주파수는 상하 방향으로 4~8 Hz의 진동이며, 경부골에 민감하게 작용한다. 100Hz 이상 주파수는 특별한 영향이 없으나, 국소진동(8~1000Hz)과는 관련성이 있다. 국소진동은 인체의 특정 범위에 영향을 미치는 진동으로 예를 들어 소형 모터가 장착된 장비를 사용할 때 접촉된 손에서만 영향을 미치는 진동이다(정승균, 1998; 조해경, 2005; ISO 2631-1, 1997).

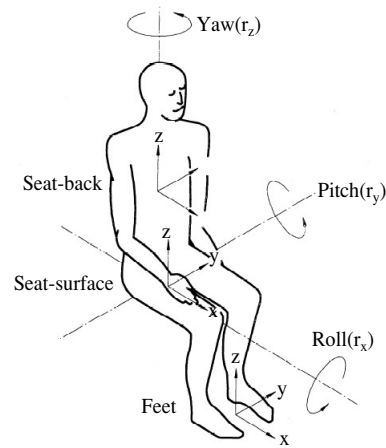


그림 1. 방향별 진동 가속도

표 1. 인체 각 부위의 공진주파수

공진주파수	인체의 공명 부위
3~4 Hz	경부골(목)
4Hz	요추골(상체)
5Hz	건대
20~30Hz	머리와 어깨 사이
60~90Hz	안구

현재 전신진동 노출과 신체장애와의 분명한 노출-반응 관계는 명확하지 않지만 일반적으로 장시간 전신진동 노출은 목-어깨 장애, 소화기 장애, 순환기 장애, 청각 장애 및 생식기관 장애를 야기할 수도 있다. 전신진동에 의한 인체의 반응은 매우 다양하므로 가속도의 크기만으로 설명이 어려우며 주파수의 영향도 동시에 고려되어야 한다. 그 이유는 전신 진동에 노출된 인체의 각 부위는 진동의 크기뿐만 아니라 주파수에 따라서도 각각 다르게 반응을 하기 때문이다. 이와 같이 인체의

조직이 같은 크기의 진동임에도 불구하고 민감하게 반응하는 특정한 주파수를 공진주파수(Natural frequency)라고 부르며 앉아 있는 사람의 경우 신체부위에 따른 공진 주파수는 표 1과 같다. 인체 각 부위의 공진주파수로 인하여 인체로 전달되어지는 진동의 주파수 특성에 따라 인체의 민감도는 다르게 나타난다(조해경, 2005; ISO 2631-1, 1997).

현재 전신진동에 대한 노출정도를 평가하는 기준으로 보편적으로 널리 사용되고 있는 것은 ISO-2631-1로서 다른 평가기준의 기초가 되고 있다. 이 기준을 바탕으로 미국정부산업위생전문가협회(ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists)와 유럽연합회(EU, European Union), 미연방수송부(FTA, Federal Transit Administration) 등에서 근로시간 기준 등을 제시하고 있다. 현재 도로 노면 평가시 ISO-2631에 따라 승차감을 관리하는 나라는 아직 없는 것으로 파악되고 있지만 이에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. 그림 2는 ISO-2631-1(1985) 상하 방향 진동가속도 피로도 기준이다. 1분에서 24시간에 이르는 노출시간에 대해 수직 및 수평방향에 대한 진동 주파수별 기준으로 각 한계선(피로능률감퇴경계) 이상 진동에 노출되면 능률 감퇴에 해당하는 피로도를 느끼는 것으로 정의하고 있다(ISO 2631-1, 1997).

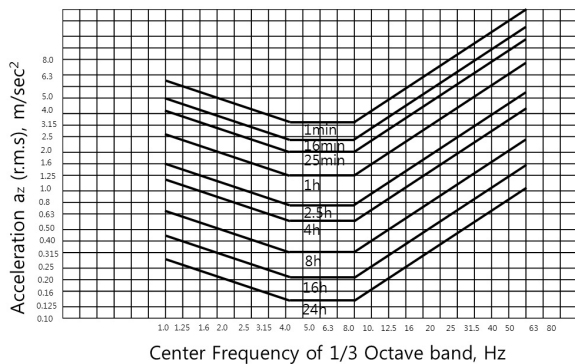


그림 2. 1/3 옥타브 밴드 중심 주파수와 노출시간간의 관계

ISO-2631-1(1985) 기준은 1997년에 개정되어 가중치 곡선이 수정되었으며, 측정된 r.m.s(root-mean-square) 가속도 값으로 진동 수준을 평가하는 방식이 추가되었다. 여기서, 취득된 진동신호 데이터는 방향별로 각각 1~80 Hz의 주파수 범위에서 주파수별 가중합수가 적용된 값 즉, Overall frequency-weighted r.m.s acceleration으로 나타낸다(ISO 2631-1, 1997). 예를 들어 1/3 옥타브 밴드 주파수 분석을 수행한다고 할 때, 가속도는 다음과 같다.

$$a_w = \sqrt{\sum_i (W_i a_i)^2} \quad (1)$$

여기서, a_w : 주파수별 가중치가 적용된 가속도

W_i : 1/3옥타브 밴드에서 i 번째의 가중치

a_i : 1/3옥타브 밴드 주파수분석에서 i 번째의 r, m, s 가속도

안락감 평가관점의 경우에는 나머지 세 방향의 진동이 고려된 진동 총합(vibration total value)인 a_v 가 사용되며, 상하 방향에 대한 가중치가 가장 크다.

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (2)$$

여기서, a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} : 주파수별 가중치가 적용된 x, y, z 방향별 가속도

k_x, k_y, k_z : x, y, z 방향별 영향계수

본 논문에서는 인체가 느끼는 1~80Hz까지 주파수 범위에 따라 전후, 좌우, 상하의 세 방향(x, y, z 축)을 대상으로 노출 진동 가속도(진동 총합)를 측정하고 ISO-2631-1(1985 및 1997 안락감) 기준을 활용하여 포장구간별 운전자 피로도를 산출하여 각 인자들의 상관관계를 파악하였다.

3. 3축 가속도 시험

예비 실험을 통하여 본 실험에 필요한 가속도계의 설정치는 측정 범위 0~1G, 분해능 1/1000, 측정 속도(Sampling Rate) 500Hz로 결정하였다. 차량에 장착되는 가속도계가 비포장도로에서 측정한 최대 가속도 범위가 0.5~0.6G 수준이기 때문이다. 측정 속도는 빠르면 빠를수록 유리하지만 500Hz이면 인체가 느낄 수 있는 한계 이상이기 때문에 충분하며(김장호 외, 1996). 측정 주파수 대역은 0~100Hz으로 설정하였다. 3축 가속도 시험은 운전석 옆 보조석 시트에서 장착하였다. Solid 형태로 된 직육면체 목재상자에 가속도계를 3축 방향으로 부착하고 주파수 분석기(FFT analyzer)를 통해 측정 진동가속도를 산출하였다. ISO 규정상에는 15° 방향별 오차는 허용하고 있으나 정확한 측방향을 파악할 수 있도록 수평계를 부착하여 방향별 오차를 2° 이하로 조정하였다.



그림 3. 시험 차량

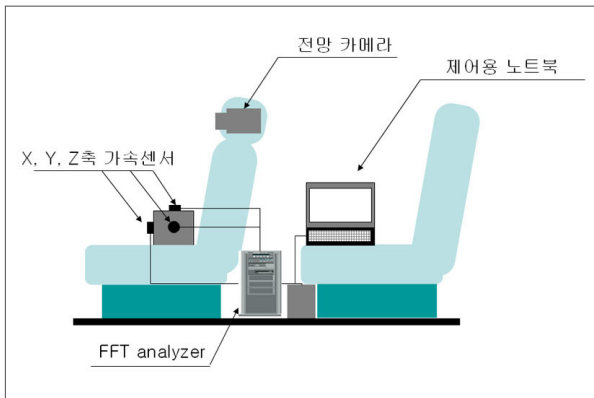


그림 4. 전신진동용 3축 가속도계 개요

예비 시험에서는 차종을 승용차(그랜저 TG)와 승합차(스타렉스)로 구분하였다. 차량 속도는 80km/h에 비해 100km/h 주행 시 데이터가 명확하게 수집되었다. 120km/h 이상 주행 시에는 가속도 값은 증가하나 포장 표면조직에 따른 민감도가 떨어지는 결과가 나타났으며, 차량성능(엔진)에 따른 진동이 점차 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 최종적으로 본 시험에서는 고속도로 구간을 대상으로 총 38개 구간(터널: 8개소, 교량부: 8개소, 토공부: 22개소)에 대하여 3축 진동 가속도를 측정하였다.

시험 차종은 변별력이 상대적으로 높은 스타렉스 승합차(타이어 규격: 205/70R15, 타이어압: 평균 40psi, 누적운행거리: 65,000km)로 출고 된지 2년이 지난 동일차량으로 시험을 실시하였다. 대상노선은 경부선, 평택음성선, 영동선, 중부선 구간으로 준공년도, 평탄성, 포장형식별로 다양한 구간을 선정하였다.



그림 5. 중부선 아스팔트 구간 토공부 (상태양호 IRI : 1.15)



그림 6. 중부선 JPC 다이아몬드 그라인딩 구간 토공부 (상태보통 IRI : 1.43)



그림 7. 중부선 노출바닥판 횡방향 타이닝 구간 교량부 (상태불량 IRI : 2.30)

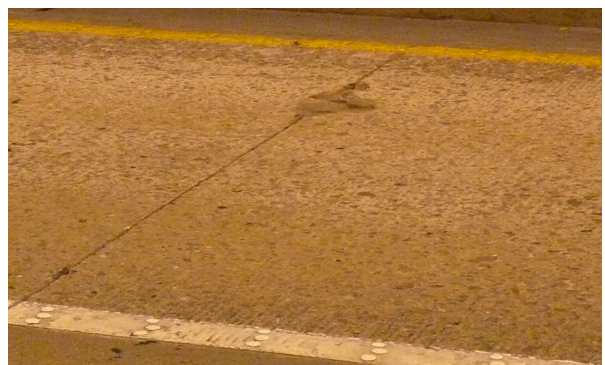


그림 8. 중부선 JPC 횡방향 타이닝 구간 터널부 (상태불량 IRI : 3.17)

4. 상관관계 분석

IRI 평탄성 지수와 주행 시 진동에 의해 발생하는 3축 가속도간에 상관관계를 파악하였다. 도로 시공 시에는 이동 직선자(7.6m)로 구성된 프로파일 수동식 장비로 양단의 요철을 측정하여 도로의 평탄성(PrI: Profile Index)을 평가하지만 인력으로 측정해야하고 측정자나 장비에 따른 오차가 크기 때문에 일반적으로 유지관리에서는 적용하고 있지 않는다(김국한 외, 2003). 포장 평가 시 국내외적으로 가장 널리 이용되는 지표는 IRI(International Roughness Index)로 운전자가 주행하면서 느끼는 승차감의 정도를 수치적으로 정량화한 지수이다. 기본 개념은 승용차가 시속 80km/h로 정속 주행할 때 차량의 상하 방향 누적변위를 측정하여 차량의 주행 거리로 나눈 값으로 m/km 또는 mm/m로 표현한다. 초음파를 이용한 자동화 장비를 통해 측정된 종단 프로파일 값을 Quarter-Car Simulation Model이라는 덤퍼와 스프링으로 구성된 수치 모델에 적용함으로써 산출한다(송인준, 1998).

국내외적으로 평탄성 지수는 시공 시 IRI 1.5m/km 미만이지만 국내의 공용중인 지방도나 도심지 도로의 경우 IRI 4.0m/km 이상인 구간까지 존재한다. 관리주체에 따라 차이가 있지만 국내외적으로 3.0~3.5m/km 이상이면 보수가 필요한 것으로 판단한다(Chelliah et, al.). 표 2는 IRI에 따라 각 축별 가속도합의 변화를 나타낸 것으로 X축은 차량 진행 방향(앞뒤), Y축은 수평 방향(좌우), Z축은 수직 방향(상하)을 나타낸다. 전반적으로 Z축 방향이 가속도합이 가장 높게 나타났으며, X축 및 Y축 값은 유사하게 나타났다. IRI 3m/km 이상의 경우 Z축의 가속도합이 10m/s² 이상으로 나타나 인체에 가장 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

표 2. IRI에 따른 가속도합 변화

	IRI 0~1m/km	IRI 3m/km 이상	증가율(%)
Z축 가속도합 (m/s ²)	3.73	11.30	203
Y축 가속도합 (m/s ²)	2.45	5.51	125
X축 가속도합 (m/s ²)	2.59	6.99	170

그림 9는 각 축별 가속도합과 IRI 값간의 상관관계를 비교한 그래프로 R² 값이 0.5~0.75으로 나타나 IRI가 증가할수록 가속도 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 IRI 3m/km 이상인 경우 가속도 값이 상대적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다.

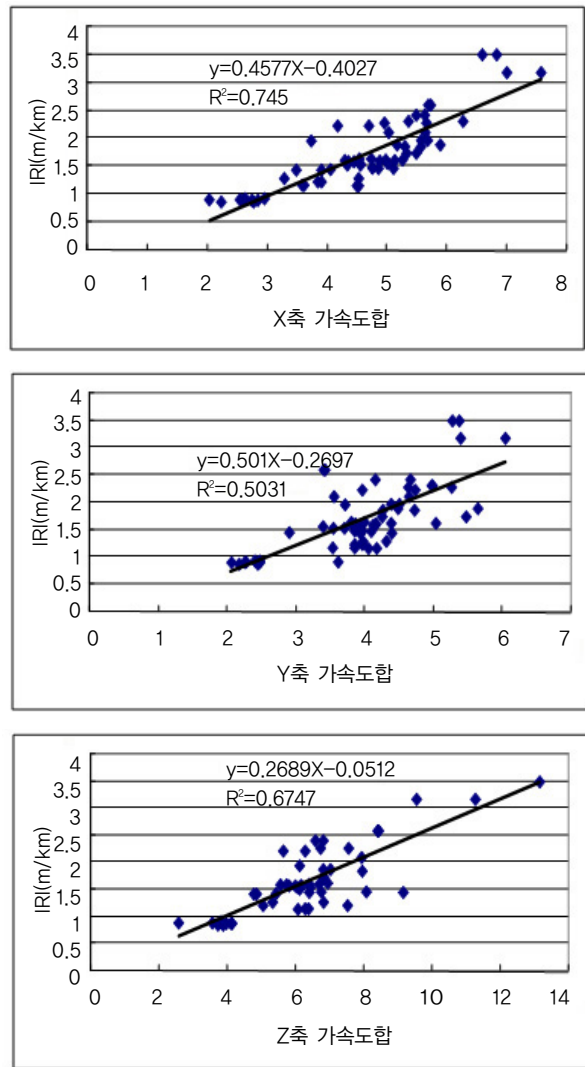


그림 9. 각 방향별 가속도와 IRI 상관관계

그림 10은 평탄성이 보통 수준인 구간인 IRI 값 1~2m/km 구간만을 추출해서 각 구간 특성별 3축의 가속도합을 나타낸 것이다. 평탄성 값이 유사하더라도 노면 형식에 따라 가속도가 크게 차이가 나타났다. 다이어몬드 그라인딩이 실시된 콘크리트포장(JCP) 구간의 가속도 값이 매우 적게 나타나 인체의 피로도 측면에서도 상당히 우수한 것으로 나타났다. 이 경우 커팅에 의해 생성된 2~4mm폭의 종방향 Macro-texture가 진동 감소에 크게 작용한 것으로 판단된다(FHWA, 2001). 콘크리트 토공부 CRCP 포장은 모두 1980년대 후반에 준공되어 재령이 20년 이상 지난 포장임에도 공용년수에 비해서 가속도 값이 매우 낮은 것으로 판단되며, 줄눈이 존재하지 않은 특성상 JCP 포장과 비교해서도 가속도가 낮게 나타났다.

또한 SMA 구간이 일반아스팔트(AP)에 비해 가속도가 낮게 나타나 내구성뿐만 아니라 주행성 측면에서

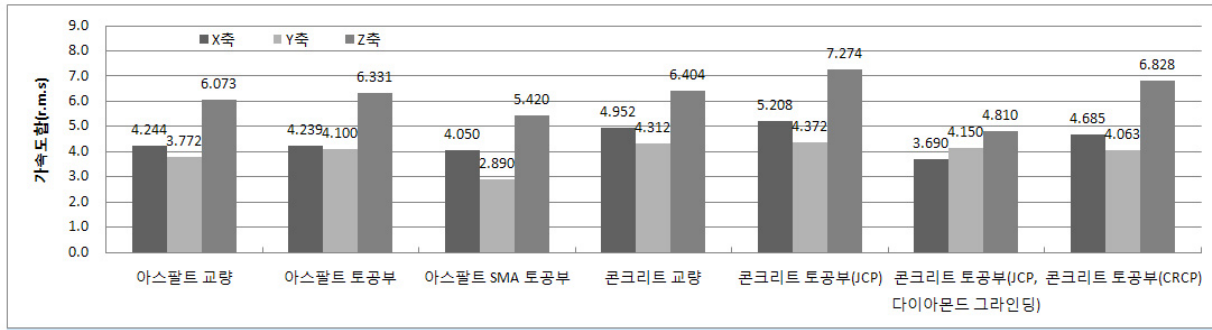


그림 10. 평탄성 보통인 구간의 포장형식별 가속도합

도 우수한 것으로 나타났다. 특히 횡방향 진동이 적어 Y축 방향 가속도가 상대적으로 낮게 나타났다. 0~100Hz내 발생하는 진동가속도는 아스팔트 구간인 경우 교량부와 토공부간의 차이가 거의 나타나지 않았으며, 콘크리트 구간은 교량 구간보다 오히려 토공부 구간의 가속도가 높게 나타났다. 교량 자체의 거동이 주행 시 발생하는 가속도에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 평탄성이 불량한 노출 바닥판과 같은 경우는 제외하였다.

종방향 타이닝 구간과 횡방향 타이닝 구간의 가속도 값을 비교한 결과 종방향 타이닝의 가속도 값이 전체적으로 약간 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 감소폭이 매우 미미하기 때문에 일반화하기에는 다소 어려운 측면이 있었으며, 향후 추가적인 시험이 필요할 것으로 판단된다. 종방향 타이닝 구간에서 X, Y축 방향의 감소폭이 다소 컸다.

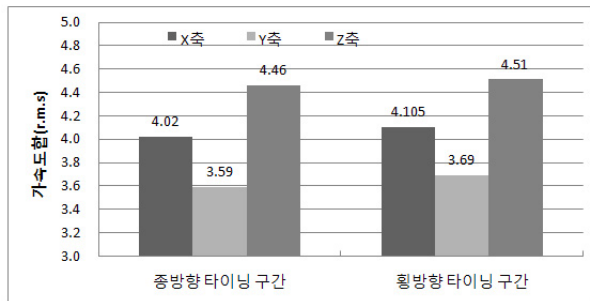


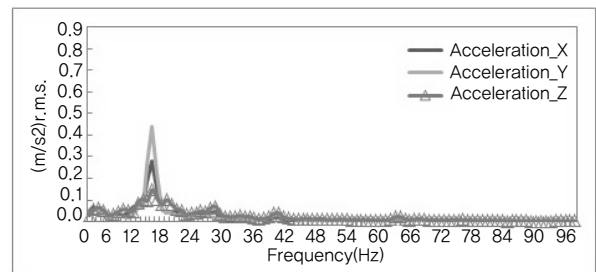
그림 11. JCP 구간의 타이닝 방향별 가속도합

5. 주파수별 분석

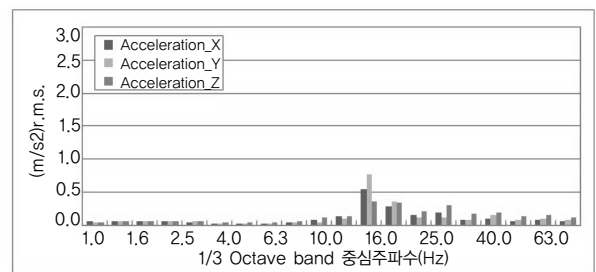
본 장에서는 각 주파수 대역에 따른 가속도 값을 비교함으로써 포장 특성별로 어떤 대역이 크게 발생하는지 파악하고 1/3 옥타브 밴드 분석에 따라 인체에 미치는 영향(피로시간)을 정량화하였다. 피로시간 산출은

ISO-2631-1을 적용하여 1/3 옥타브 밴드 그래프상의 최고 피크 값을 통해 추정하였다.

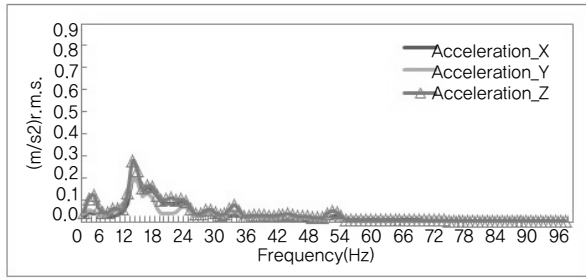
그림 12의 (a), (b) 그래프는 평탄성(IRI 0.9m/km)이 양호한 다이아몬드 그라인딩 콘크리트 (JCP) 구간 (평택음성 음성 26.9~27.1)의 주파수별 가속도 값을 나타낸 것이다. 다른 포장과 특이한 점은 Z축 방향의 가속도 피크값이 상대적으로 낮게 나타나 Y축 방향(좌-우) 진동가속도가 인체에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 평균 8.0시간 노출 시 피로를 유발시키는 수준으로 조사구간 중 가장 우수하였다. Z축 방향의 가속도가 낮은 이유는 다이아몬드 그라인딩이 적용된 구간에서 나타나는 일반적인 패턴으로 종방향 마이크로 표면 조직과 연관성이 있는 것으로 사료된다. 그림 12 (c), (d) 그래프는 평탄성(IRI 0.86m/km)이 양호한 SMA 아스팔트 구간의 주파수별 가속도 값을 나타낸 것이다. 1/3 옥타브 밴드 분석



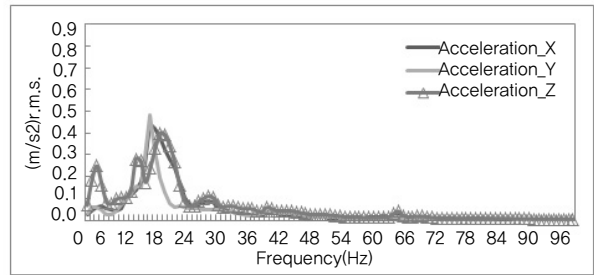
(a) 다이아몬드 그라인딩 구간 주파수 분석(평탄성 양호)



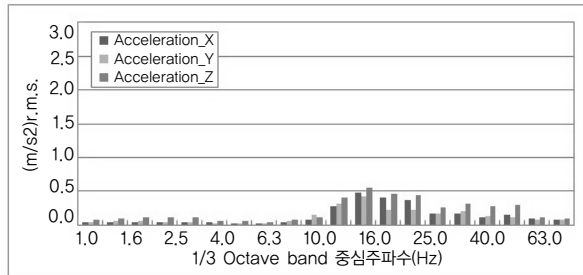
(b) 다이아몬드 그라인딩 구간 1/3 옥타브 밴드 분석(평탄성 양호)



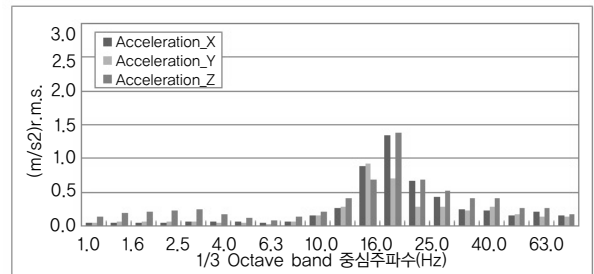
(c) SMA 구간 주파수 분석(평탄성 양호)



(a) 콘크리트 구간 주파수 분석(평탄성 보통)



(d) SMA 구간 1/3 옥타브 밴드 분석(평탄성 양호)

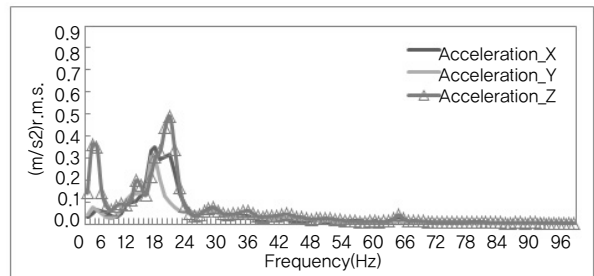


(b) 콘크리트 구간 1/3 옥타브 밴드 분석(평탄성 보통)

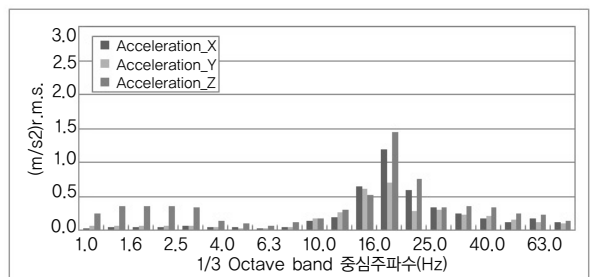
그림 12. 양호 구간 주파수 분석

결과로 Z축 값이 12.5Hz와 16 Hz 대역에서 약 0.5m/s² 수준으로 나타났다. 이는 대략 6.0시간 노출 시 피로를 유발하는 수준이다. X축 및 Y축 방향의 진동가속도는 24.0시간 노출 시 피로를 유발하여 상당히 미미한 수준이다.

그림 13의 (a), (b) 그래프는 평탄성(IRI 1.7m/km)이 보통인 콘크리트(JCP) 구간(중부 통영 263.0~262.4)의 주파수별 가속도 값을 나타낸 것이다. 횡방향 타이닝 처리가 된 포장으로 10~15Hz 대역의 가속도가 높게 나타났으며, Z축 방향의 경우 3~5Hz 대역에서도 가속도가 높아지는 경향이 나타났다. 1/3 옥타브 밴드 분석 결과로 Z축 가속도 값이 16Hz 대역에서 1.42m/s² 까지 발생하였는데, 이는 2.0~2.5시간 노출 시 피로를 유발하는 수준이다. 그림 13 (c), (d) 그래프는 평탄성(IRI 1.6m/km)이 보통인 아스팔트(AP) 구간(중부 통영 281.0~279.0)의 주파수별 가속도 값을 나타낸 것이다. 전체적으로 10~15Hz의 가속도가 높게 나타나 콘크리트 구간과 유사한 특성을 보여주고 있다. 1/3 옥타브 밴드 분석 결과, Z축 값이 16Hz 대역에서 1.5m/s² 정도로 2.0~2.5시간 노출 시 피로를 유발한다. 전반적으로 인체 피로도에 큰 영향을 미치는 4~8Hz 대역에서는 가속도 값이 크게 나타나지 않았다.



(c) 아스팔트 구간 주파수 분석(평탄성 보통)

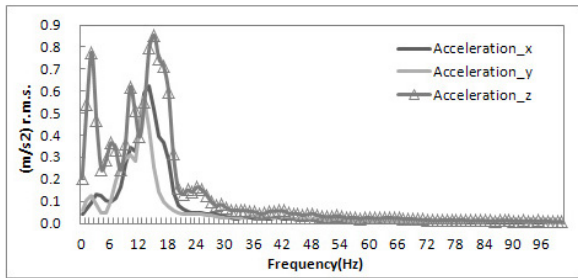


(d) 아스팔트 구간 1/3 옥타브 밴드 분석(평탄성 보통)

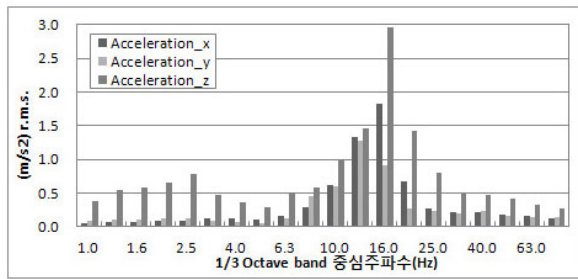
그림 13. 보통 구간 주파수 분석

그림 14는 평탄성(IRI 3.49m/km)이 불량한 콘크리트(JCP) 구간의 주파수별 가속도 값을 나타낸 것이다. X, Y축 방향에서 8~20Hz의 가속도가 매우 높게 나타났으며, Z축에서는 2~4Hz, 8~22Hz에서 가속도 값이 크게 나타났다. 이는 평탄성이 양호한 구간에 비해 피크 값이 3배가 넘는 수치이며, Z축 값이 16Hz 대역에서 2.9m/s² 까지 발생하였다. 이는 15분 노출 시 피로를 유

발하는 수준으로 장시간 주행 시 급격한 피로 유발이 예상된다. 이 구간은 터널내 구간으로 장기간 동안 유지보수가 이루어지지 않은 것으로 추정된다.



(a) 콘크리트 구간 주파수 분석(평탄성 불량)



(b) 콘크리트 구간 1/3 옥타브 밴드 분석(평탄성 불량)

그림 14. 불량 구간 주파수 분석

콘크리트 포장 구간의 경우 IRI가 불량한 구간에서 인체의 피로도가 급격하게 증가하는 경향이 파악되었다. 가속도가 가장 적게 발생된 구간은 피로 노출 시간이 8.0시간 정도에 불과한데 비해 IRI 값이 3m/km 이상인 구간에서는 노출 시간이 15분까지 단축되는 경향이 나타났다. 이는 ISO 특성상 피로시간이 지수함수 형태로 감소하는 특성이 있기 때문이다. 동일한 속도로 주행하는 동일한 차중임에도 불구하고 노면 상태에 따라 피로도를 느끼는 시간이 8.0시간에서 15분으로 32배 감소하는 점을 포장관리측면에서 매우 중요한 시사점이다. 유지관리측면에서도 노면진동가속도를 중요한 결정인자로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 도로 관리를 단순한 파손 정도에 따라 관리하는 것에서 벗어나 주행성에 영향을 미치는 인체 피로도까지 고려함으로써 보다 발전된 서비스를 제공할 수 있다. 표 3은 가속도 시험 결과와 ISO-2631-1 기준을 토대로 작성한 도로노면 관리 방안이다. 주행시 피로도를 최소화할 수 있는 3축 가속도합 기준과 피로도에 지배적인 영향을 미치는 Z축 방향 1/3 옥타브 밴드 가속도 기준을 결정하고 국내 적용가능한 공법을 토대로 대처 방안을 제시하였다. 이와 더불어 향후 노면 가속도측정 시험 방법도 도로 관

리 지침으로 정립하여야 할 것으로 판단된다.

표 3. 인체에 미치는 영향을 고려한 도로노면 관리 방안(안)

포장 종류	콘크리트			아스팔트	
	교면	토공부	터널부	교면	토공부
3축 가속도합 (ISO-2631-1)(mm/s ²)	630 이하	630 이하	630 이하	630 이하	630 이하
1/3 옥타브 (m/s ² Z축, 4~8Hz)	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하	0.3 이하	0.3 이하
기준 초과 시 권장 조치 방안	초속경 LMC	다이아몬드 그 라인딩		덧씌우기 (SMA)	덧씌우기 (SMA)

5. 결론

본 논문에서는 이론적 고찰 및 가속도 시험을 통하여 노면 특성과 인체 피로도간의 상관관계를 파악하고 관리기준을 개발하기 위한 방법론을 정립하였다. 노면형식별로 도로 구간을 선정하여 IRI를 측정하고 전신진동 측정이 가능한 3축 가속도계를 차량 내부에 설치하여 실내 진동가속도를 측정하였다. 포장 종류, 차중, 운행 속도에 따른 각 축별 진동가속도를 측정하여 대표적인 기준을 설정하고 다양한 고속도로 구간에서 시험을 수행하였다. 각 축별 Overall 값 및 주파수별 가속도 값과 IRI 값을 비교함으로써 인체 전신진동 노출 정도에 따른 피로도를 파악하였다. 다음은 본 연구에서 도출된 결과이다.

1. 아스팔트의 경우는 SMA 포장의 가속도가 상대적으로 낮게 나타났다.
2. 콘크리트 포장 중 CRCP 형식의 경우 공용년수(20년 이상)에 비해 가속도가 낮은 것으로 나타났다.
3. 다이아몬드 그라인딩이 실시된 JCP 구간의 가속도 값이 매우 적게 나타나 인체의 피로도 측면에서도 상당히 우수한 것으로 나타났다.
4. 각 축별 가속도합과 IRI 값과 상관관계가 밀접한 것으로 나타났으며, 대부분 Z축(상하) 방향의 진동이 인체에 가장 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.
5. 대부분 구간에서 나타나는 가속도 특성은 10~15Hz 대역에서 높게 나타났으며, Z축의 경우 3~5Hz 대역에서는 다소 높아지는 경향이 나타났다. 이들 영역은 목, 어깨, 허리 등에 영향을 미치는 주파수에 해당하는 대역이다.
6. IRI가 불량한 콘크리트(JCP) 구간의 경우 양호한 구

간에 비해 2~3배 정도 가속도가 높게 나타났다. 이는 0.25~0.6시간 노출 시 피로를 유발시키는 수준으로 장시간 주행 시 급격한 피로 유발이 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 07-기술혁신-A01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

진동공학회, 2001년도 추계학술대회 논문집, pp.711~718, 2001

김국한, 이병덕, 최고일, 양성철, 평탄성 지수 IRI와 Pri의 상관관계에 관한 연구, 한국도로포장공학회논문집, 제5권 제1호, 2003. 3

김장호, 장부규, 소음 진동 제어 공학, 지구 문화사, 1996. 1

김재수, 진동소음학, 도서출판 세진사, 2008.7

송인준, 국도포장의 평탄성 예측모델 개발, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1998. 12

안성순, 포장도로의 노면 평탄성 평가방법에 대한 연구, 한국도로공사, 1990

이규성, 반무록, 소음 진동 공학, 형설출판사, 1999. 1

정승균, 승용차의 진동소음 평가 및 개선방법, 한국소음진동

공학회지, 제8권 제1호,

조해경, 전신진동 노출특성 연구 : 토목 현장 15톤 덤프트럭을 중심으로, 한국산업안전공단, 2005

Concrete Pavement Rehabilitation Guide for Diamond Grinding, FHWA, 2001. 6

ISO 2631-1, Second edition Corrected and reprinted 1997-07-1
Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1:

ISO 8608, Mechanical Vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data 1995-09-01

Liu chiu, *Pavement Ride Quality and Vehicle- Road Dynamic Interaction*, 1997 UMI

Michael W. Sayers, Steven M, Karamihas, *The Little Book of Profiling Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*, The Regent of the University of Michigan 1998

Michale W. Sayers, *On the Calculation of IRI from Longitudinal Road Profile*, University of Michigan Transportation Research Institute, 1987

The International Roughness Index, *FHWA R&D Concrete Pavement Research & Technology*, 2002. 8

Chelliah, Stephanos, Shah, Smith, *Devolping a Design Policy to Improve Pavement Surface Characteristics*, *Transportation Research Record*, 03-2433

(접수일 : 2012. 3. 29 / 심사일 : 2012. 4. 5 / 심사완료일 : 2012. 4. 30)