

표면 평탄성에 대한 지불규정 도입을 위한 기초 연구

Preliminary Investigation of Surface Smoothness as a Pay Factor

김 성 민¹⁾ 이 석 근²⁾ 서 봉 교³⁾
Seong-Min Kim, Suk-Keun Rhee, Bong Kyo Seo

1. 서 론

주행하는 차량이 평탄하지 못한 표면을 가지는 도로를 주행하게 되면 이러한 도로 포장에 주행하는 차량에 의한 하중은 일정하게 작용하지 않게 되며 포장에 가해지는 하중의 크기가 매시간 변화하게 된다. 따라서 도로 포장의 표면 거칠기는 이러한 도로 포장을 사용하는 사용자들로 하여금 차량 주행 시 진동이나 소음을 느끼게 하여 포장의 기능적 성능을 저하시키게 되며 포장에 가해지는 하중의 크기를 증가시켜 이에 따른 포장의 응력 증가로 인한 포장의 구조적 성능의 저하를 초래한다. 이러한 이유로 미국의 여러 주에서는 도로 포장 준공 시에 표면 평탄성에 따라 보너스를 지급하던지 또는 벌금을 내도록 하는 지불규정(Pay Factor)을 도입하여 시행하고 있고 국내에서도 이를 적용하기 위하여 개발 및 연구 중에 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재의 시공방법 중심의 시방에 이러한 포장 표면의 평탄성에 대한 지불규정을 포함시키기 위하여 포장 표면의 거칠기가 포장의 공용성에 미치는 영향에 대하여 기초적인 연구를 수행하였다.

2. 포장의 표면 평탄성과 동적 차량 하중과의 관계

표면 거칠기와 포장의 공용성과의 관계를 분석하기 위하여 먼저 오래된 포장과 새로운 포장에서의 평탄성 데이터를 이용하여 구조해석을 수행함으로써 평탄성이 좋은 포장과 그렇지 않은 포장에서의 이동 차량의 동적 하중 크기 변화를 비교 분석하였다. 평탄성 데이터는 미국 텍사스주 마샬시 근교의 IH-20 고속도로에서 수집한 것을 사용하였다. 이곳은 연속철근콘크리트 포장 위에 아스팔트 덧씌우기를 한 곳으로써 평탄성 데이터는 새로운 아스팔트 덧씌우기를 하기 전과 후에 측정된 두 가지의 경우를 고려하였으며 일정 구간의 평탄성 데이터를 그림 1에 나타내었다.

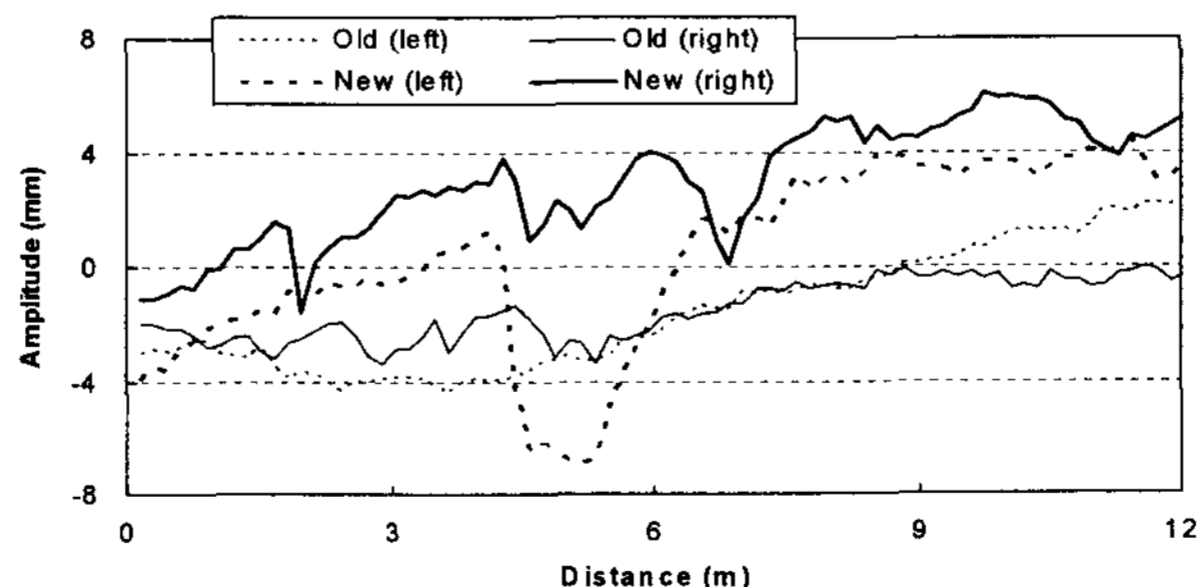


그림 1. 평탄성 데이터

1) 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수
2) 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수
3) 경희대학교 토목공학과 석사과정, 발표자

그림 1에서와 같은 평탄성을 가지는 도로를 주행하는 차량의 동적 하중 변화를 분석하기 위하여 미국의 Stress Engineering 회사가 미국 텍사스주의 포장가속시험기인 MLS(Mobile Load Simulator) 제작 과정에서 개발한 컴퓨터 프로그램을 사용하였다(Kim et al., 1995). 본 연구에서 고려한 차량 하중은 복축(tandem axle) 차량 하중이며 축간 거리 1.2m와 축 당 정적 하중 크기 81.5kN을 사용하였다. 그림 2는 그림 1에 나타난 평탄성을 가지는 포장 위를 복축 차량이 32km/h의 속도로 주행할 때의 전륜과 후륜의 동적 하중 변화를 보여 준다. 그림 2(a)에서 알 수 있는 바와 같이 전륜의 최대 동적 하중은 새로운 덧씌우기 이전의 포장에서 약 87.4kN이며 덧씌우기 후의 포장에서 약 84.3kN이다. 이는 정적 하중에 비해 각각 약 7.2%와 3.3% 증가된 하중이며 이러한 하중의 증가는 오래된 포장에서 더 큰 것을 알 수 있다. 후륜의 최대 하중도 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 기존의 포장과 새로운 포장에서 각각 약 88.3kN과 85.2kN으로 정적 하중에 비해 각각 약 8.3%와 4.4% 증가된 것을 알 수 있다. 따라서 분석 결과를 살펴보면 새로운 포장에서 차량 동적 하중 감소가 오래된 포장에서 보다 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있다. 이는 포장 표면의 평탄성이 주행하는 차량의 동적 하중 크기에 직접적인 영향을 미치게 된다는 것을 의미한다.

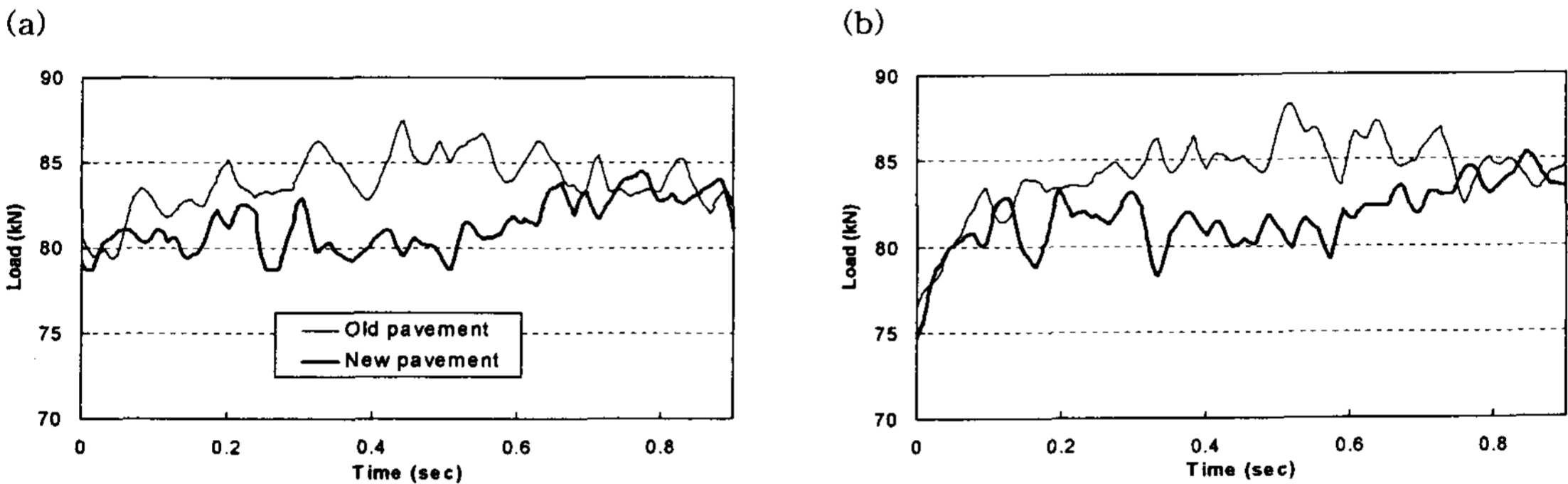


그림 2. 주행 차량의 하중 변화 : (a) 전륜 (b) 후륜

3. 표면 평탄성 인자 및 차량 속도의 영향

도로 포장 표면의 평탄성은 파동에서의 특징과 같이 진폭과 파장으로 표현할 수 있다. 실제 포장의 표면 평탄성을 진폭과 파장으로 표현할 수 없기 때문에 본 연구에서는 평탄성 데이터를 확률이론과 FFT(Fast Fourier Transform) 등을 이용하여 분석한 후 평균 진폭과 파장 또는 가장 지배적인 진폭 및 파장 등의 특성을 파악하였다. 따라서 본 연구에서는 포장 표면의 평탄성에 대한 진폭 및 파장이 일정한 가상의 평탄성 데이터를 구성하여 표면 거칠기 변화인 진폭과 파장이 이동 차량 하중의 크기 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 진폭과 파장 그리고 차량의 속도 등 세 가지의 변수를 고려하였다. 진폭은 5, 10, 15, 20mm, 파장은 1.2, 2.4, 6, 12m, 그리고 차량속도는 32, 64, 96, 128km/h의 각각 4가지의 경우를 조합하여 분석을 수행하였다. 우선 표면 거칠기의 진폭이 최대 동적 하중의 크기에 미치는 영향을 분석한 결과 일정한 차량속도와 일정한 표면 거칠기의 파장에서는 표면 거칠기의 진폭이 증가할수록 최대 동적 하중의 크기도 증가하는 것을 알 수 있었다. 차량속도가 32km/h일 때는 표면 거칠기의 파장이 다르더라도 진폭에 따른 최대 하중의 크기가 거의 일정하지만 차량속도가 증가하면 표면 거칠기의 파장이 상대적으로 짧은 1.2m와 2.4m의 파장에서 최대 하중의 크기가 상당히 증가하는 것을 알 수 있었다.

그리고 표면의 거칠기에 대한 파장이 최대 동적 하중 크기에 미치는 영향에 대한 분석 결과 앞의 진폭의 영향에 대한 분석에서 설명한 바와 같이 차량속도가 32km/h로 낮을 때는 최대 동적 하중의 크기가 표면 거칠기 파장의 길이에 거의 관계없이 일정한 것을 알 수 있었지만 차량속도가 증가할수록 표면 거칠기 파장이 1.2m와 2.4m로 짧을 때 최대 동적 하중 크기가 크게 증가하였고 파장이 6m 이상일 경우에는 동적 하중에 영향을 거의 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

마지막으로 차량속도가 최대 동적 하중의 크기에 미치는 영향에 대한 분석을 통하여 차량속도가 증가할수



록 초기에는 최대 하중의 크기가 증가하지만 특정 속도에 다다르면 속도 증가에 따른 하중의 증가가 없이 거의 일정한 최대 하중을 보이게 되는 것을 알 수 있었다. 여기서 최대 하중의 증가가 거의 없어지는 차량속도는 표면 거칠기의 진폭 및 파장에 따라 달라진다.

평탄성 인자가 미치는 영향의 분석 결과로부터 표면 거칠기의 진폭은 동적 하중 크기와 거의 선형적으로 비례하는 관계를 보이며 동적 하중의 크기는 표면 거칠기 파장이 대체로 짧고 차량속도가 대체로 높을 때 정적 하중 크기에 비해 매우 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 포장의 평탄성과 공용성과의 관계

포장의 표면이 완벽하게 평탄하다고 하면 이동하는 차량에 의한 하중은 차량의 정적 하중과 일치하게 될 것이다. 하지만 포장의 표면에 거칠기가 존재할 경우에는 이동 차량에 의한 하중은 정적 하중에 비하여 크게 작용하게 된다. 일반적으로 포장의 변형률 및 응력은 설계 하중 정도의 크기에서는 하중 크기에 선형적으로 비례하기 때문에 표면 거칠기에 의한 차량 하중의 증가는 포장의 변형률 및 응력을 증가시키게 된다. 따라서 포장의 표면 거칠기는 포장의 구조적인 면에서 볼 때 설계 응력보다 큰 응력을 작용하게 하여 포장체의 수명을 단축시키는 불리한 영향을 미치게 된다. 미국 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officers)에서는 이러한 응력의 증가에 따른 포장의 수명 감소를 나타내는 식을 개발하였고 콘크리트 포장의 잔존 수명을 식 (1)에서와 같이 정의하고 있다. 여기서 LEF(Load Equivalency Factor)는 등가하중인수로서 일반적으로 응력 비율의 네제곱에 해당하는 값인데 응력의 크기는 하중의 크기와 비례하므로 등가하중인수는 식 (2)에서 나타낸 것과 같이 구할 수도 있다.

$$\text{잔존수명} = \frac{1}{LEF} \dots\dots\dots(1) \qquad LEF = \left(\frac{\text{실제 하중}}{\text{설계 하중}} \right)^4 \dots\dots\dots(2)$$

실제 포장의 평탄성에 따른 하중의 크기 변화를 나타낸 그림 2(a)에서의 하중을 앞에서 설명한 식에 대입하여 잔존 수명에 대한 예측한 결과를 그림 3에서 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적으로 표면 평탄성이 좋지 않은 오래된 포장에서의 잔존 수명이 표면 평탄성이 좋은 새로운 포장에서의 잔존 수명에 비해 작은 것을 알 수 있다.

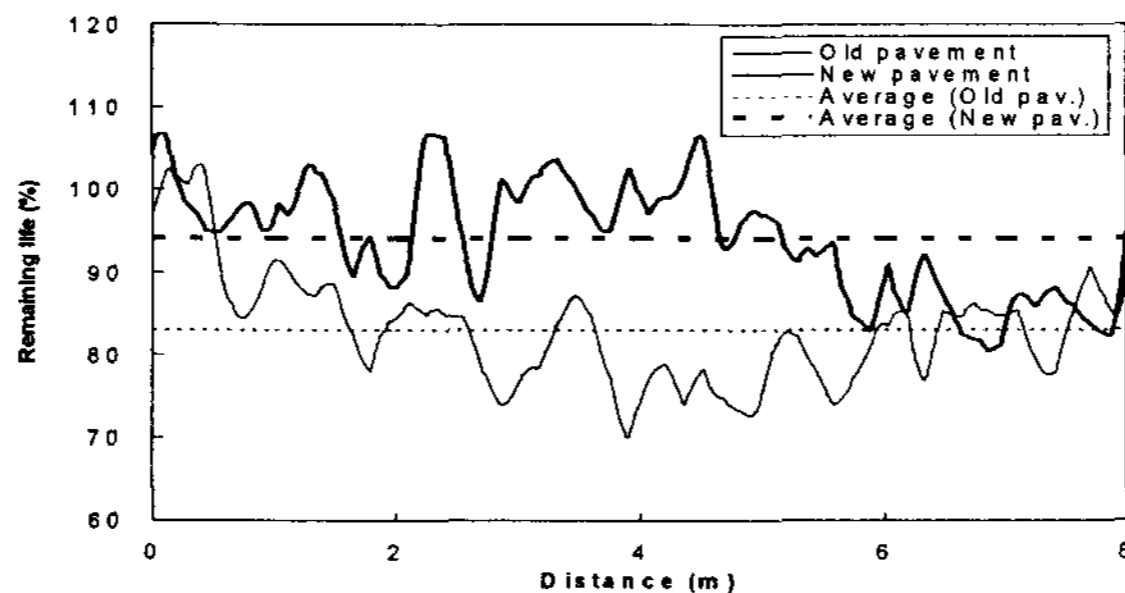


그림 3. 포장의 잔존 수명 예측

한편 그림에서 나타낸 평탄성에 따른 포장 수명의 감소는 평탄성 이외의 요인에 의한 포장 수명의 감소와 복합적으로 작용할 수 있다. 예를 들어 그림 4(a)에서 나타낸 바와 같이 포장의 수명이 단지 표면 평탄성에 의해서만 영향을 받는다고 가정하면 표면이 완벽하게 평탄한 포장의 잔존 수명은 항상 100%라 할 수 있다. 이때 표면의 거칠기가 시간이 지남에 따라 증가한다면 이에 따른 차량 동적 하중도 증가하게 될 것이고 이는 포장의 수명 감소를 초래하게 될 것이다. 이러한 포장의 수명 감소는 식 (1)에 의하여 구할 수 있게 된다. 하지만 포장의 수명이 피로파손 등 표면 평탄성 이외의 다른 요인에 의해 감소하게 된다면 시공 시 완벽하게 평탄한 포장일지라도 그림 4(b)에서 나타낸 바와 같이 시간이 지남에 따라 포장의 수명이 감소하게 될 것

이다(Kesler, 1953; Vesic and Saxena, 1969). 이러한 경우에는 시공 시에는 완벽하게 평탄한 포장이었지만 평탄성 이외의 다른 요인에 의하여 수명이 감소된 것을 고려하여 포장의 잔존 수명을 구해야 한다. 예를 들어 식 (1)을 이용하여 구한 어느 특정한 시간의 표면 거칠기에 의한 잔존 수명이 80%이며 같은 시간에서 완벽하게 평탄한 포장의 포장의 잔존 수명은 90%라 하면 최종적인 잔존 수명은 72%가 되게 된다. 표면 거칠기에 의해 포장의 잔존 수명이 설계 수명에 비해 먼저 감소하게 되면 이에 따른 유지보수의 시기가 앞당겨지기 때문에 손실이 크게 발생할 수 있다.

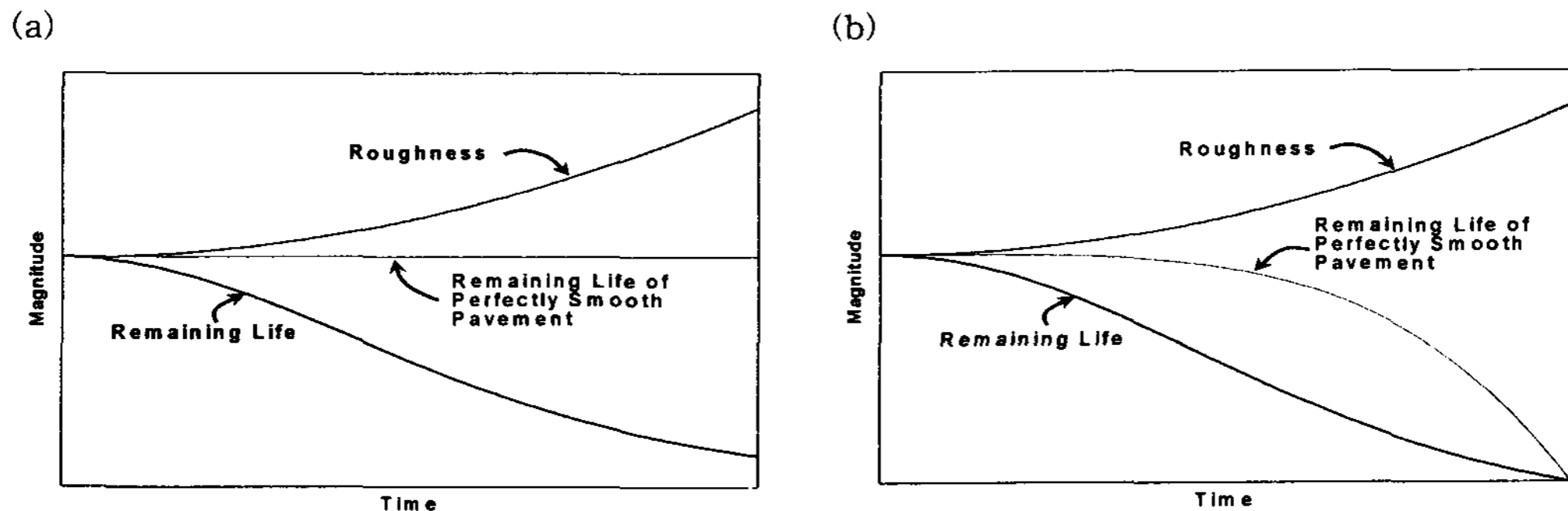


그림 4. 포장의 잔존 수명에 대한 표면 거칠기의 영향 :

(a) 평탄성 요인에 의한 영향만 있을 때 (b) 평탄성 이외의 요인에 의한 영향이 있을 때

5. 결론

1. 도로 포장 표면의 평탄성은 이동하는 차량의 동적 하중 크기에 직접적인 영향을 미치게 되며 표면 평탄성이 우수한 포장에서는 동적 하중의 크기가 정적 하중에 비해 그리 크게 증가하지는 않지만 평탄성이 좋지 않은 포장에서는 차량의 동적 하중이 크게 증가하게 된다.
2. 표면 거칠기의 진폭은 동적 하중 크기와 거의 선형적으로 비례하는 관계를 보이며 동적 하중의 크기는 표면 거칠기 파장이 대체로 짧고 차량속도가 대체로 높을 때 정적 하중 크기에 비해 매우 크게 증가하는 것을 알 수 있다.
3. 표면 평탄성과 포장의 공용성을 연관시킬 수 있는 방법을 제시하였으며 표면 평탄성이 나빠지게 되면 포장의 잔존 수명을 크게 감소시킬 수 있다. 이러한 포장의 잔존 수명 감소는 유지보수의 시기를 앞당기게 하여 손실 발생의 원인이 된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 건설교통R&D정책 인프라사업의 일환인 성능중심의 건설기준 표준화 연구 - 도로포장 및 콘크리트 구조물 중심 연구 중 공용성을 기반으로 한 지불규정 개발 연구에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, S. M., Roesset, J. M., White, T. D., and Hugo, F. (1995) "Dimensional Analysis of the Mobile Load Simulator Action on Pavements," *Report 2914-1F*, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
2. Kesler, C. E. (1953) "Effect of Speed of Testing on Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete," *Proceedings of Highway Research Board* 32, No. 5, pp. 251-258.
3. Vesic, A. S. and Saxena, S. K. (1969) "Analysis of Structural Behavior of AASHO Road Test Rigid Pavements," *Highway Research Record* 291, HRB, pp. 156-158.