

축하중 분포 변화가 콘크리트 포장의 공용성 예측결과에 미치는 영향 연구

Influence on Predicted Performance of Jointed Concrete Pavement with Variations in Axle Load Spectra

이 경 배	Lee, Kyungbae	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구원 · 교신저자 (E-mail : kblee6078@ex.co.kr)
권 순 민	Kwon, Soonmin	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 (E-mail : soonmini2@ex.co.kr)
이 재 훈	Lee, Jaehoon	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : ranian74@ex.co.kr)
손 덕 수	Sohn, Duecksu	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : mgsds@ex.co.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this article is to investigate the predicted life of jointed concrete pavement (JCP) with two variables effecting on axle load spectra (ALS). The first variable is different data acquisition methods whether using high-speed weigh-in-motion (HS-WIM) or not and the other one is spectra distribution due to overweight enforcement on main-lane of expressway using HS-WIM.

METHODS : Three sets of ALS had been collected i) ALS provided by Korea Pavement Research Program (KPRP), which had been obtained without using HS-WIM ii) ALS collected by HS-WIM before the enforcement at Kimcheon and Seonsan site iii) ALS collected after the enforcement at the same sites. And all ALS had been classified into twelve vehicle classes and four axle types to compare each other. Among the vehicle classes, class 6, 7, 10 and 12 were selected as the major target for comparing each ALS because these were considered as the primary trucks with a high rate of overweight loading. In order to analyze the performance of JCP based on pavement life, fatigue crack and International Roughness Index (IRI) were predicted using road pavement design program developed by KPRP and each ALS with same annual average daily traffic (AADT) was applied to design slab thickness.

RESULTS : Comparison ALS of KPRP with those of HS-WIM shows that the ALS of KPRP has a low percentage of heavy spectra such as 6~9 tonnes for single axle, 18~21 tonnes for tandem axle and 27~30 tonnes for tridem axle than other two ALS of HS-WIM in most vehicle classes and axle types. It means that ALS of KPRP was underestimated. And after the enforcement, percentage of heavy spectra close to 10 tonnes per an axle are lowered than before the enforcement by the effect of overweight enforcement because the spectra are related to overweight regulation. Prediction results of pavement life for each ALS present that the ALS of HS-WIM collected before the enforcement makes the pavement life short more than others. On the other hand, the ALS of KPRP causes the longest life under same thickness of slab. Thus, it is possible that actual performance life of JCP under the traffic like ALS of HS-WIM could be short than predicted life if the pavement was designed based on ALS provided by KPRP.

CONCLUSIONS : It is necessary to choose more reliable and practical ALS when designing JCP because ALS can be fairly affected by acquisition methods. In addition, it is important to extend performance life of the pavement in service by controlling traffic load such as overweight enforcement.

Keywords

axle load spectra(ALS), data acquisition method, high-speed weigh-in-motion(HS-WIM), overweight enforcement, KPRP

Corresponding Author : Lee, Kyungbae, Researcher
Pavement & Materials Research Division, Expressway & Transportation
Research Institute, Korea Expressway Co. 208-96, Dongbudae-ro 922gil,
Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 445-812, Korea
Tel : +82.31.371.3360 Fax : +82.31.371.3479
E-mail : kblee6078@ex.co.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Nov. 11, 2013 Revised Nov. 18, 2013 Accepted Jan. 21, 2014

1. 서론

과적단속은 도로구조물의 파손을 방지하고 과적으로 인한 운행의 위험을 방지하기 위해 실시하는 적극적인 교통하중 관리방안이다. 현재 국내의 경우, 도로법시행령 제55조에 따라 축하중 10톤 또는 총중량 40톤을 초과한 차량을 과적차량으로 규정하고 있으며 실제 단속은 10%의 중량 측정오차를 허용하여 축하중 11톤 또는 총중량 44톤을 초과한 차량에 대해 과적으로 고발하고 있다. 차량의 축하중을 10톤으로 제한하는 이유는 과거 포장설계시 AASHTO설계법에 의해 8.2톤 등가단축하중(ESAL, Equivalent Single Axle Load)을 바탕으로 포장두께를 설계하였고(한국도로공사, 2012) 축하중이 증가할수록 포장이 받는 손상(damage)은 비약적으로 증가하기 때문에 적절한 제한기준을 두어 포장의 조기 손상을 방지할 필요가 있기 때문이다. Fig. 1은 축하중 1회 통과 시 콘크리트 포장이 받는 손상으로 정의되는 등가하중계수(EALF, Equivalent Axle Load Factor)를 AASHTO Eq.에 의해 계산된 결과를 나타내고 있다. 10톤 초과 과적범위에 해당하는 축하중을 운행허용범위 내로 낮출 경우, 포장의 손상이 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 포장 공용수명을 연장시킬 수 있음을 의미한다.

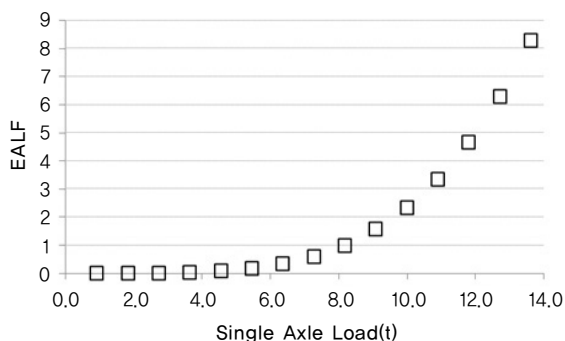


Fig. 1 EALF for Concrete Pavements with Depth=23cm and Terminal Serviceability Index=2.5 (Huang, 2004)

2011년에 개발된 한국형 포장설계법을 비롯한 최근의 역학적 경험적 포장설계에서는 교통하중의 정량화 방법으로 기존의 등가단축하중 대신 축하중 분포(Axle Load Spectra)를 사용하여 보다 세분화된 교통하중 데이터를 바탕으로 포장공용성을 예측할 수 있다. 한국형 포장설계법의 입력변수로 사용되는 대표적인 교통하중 데이터는 12개 차종 별 연평균 일일교통량(AADT, Annual Average Daily Traffic)과 각 차종의 축 구조별 축하중 분포이며 축 구조는 단축단륜, 단축복륜, 복축복륜 및 삼축복륜 총 4가지로 구분되어 있다. 또한 이 동식 축중기와 고속도로 영업소의 축중차로 중량 데이

터 등 실측자료를 바탕으로 한 축하중 통계자료를 기본적으로 제공하고 있다.

교통하중 데이터는 포장설계의 가장 중요한 인자이므로 가능한 실제 교통하중을 사용하여야 하며 WIM (Weigh-In-Motion)을 이용한 데이터 획득은 교통흐름에 영향을 주지 않으면서 신뢰성있는 교통하중 정보를 얻을 수 있는 방법이다(Huang, 2004). 2011년 한국도로공사에서는 고속도로 무인과적단속시스템을 구축하기 위해 고속도로 본선에 3개소의 고속축중기(HS-WIM, High-Speed Weigh-In-Motion)을 구축하여 본선 과적단속에 활용하고 있다. 이에 본 연구에서는 고속축중기가 설치된 구간의 단속 전과 단속 후의 축하중 분포를 비롯한 교통하중 정보를 수집하였으며, 수집된 데이터를 한국형 포장설계법의 교통하중 입력변수로 활용하여 과적단속이 포장의 공용수명 예측결과에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 한국형 포장설계법에서 기본적으로 제공하고 있는 고속도로 축하중 데이터와 비교하여 축하중 분포에 따른 공용수명 변화를 함께 살펴보았다.

2. 과적단속 전·후 교통하중 데이터 수집

2.1. WIM을 이용한 데이터 수집의 필요성

포장설계에 활용되는 교통하중 관련 변수는 모두 통계 자료 또는 통계 자료를 바탕으로 예측된 자료이기 때문에 통계에 사용된 데이터 자체의 신뢰성과 대표성이 매우 중요하다. 고속도로 본선에 설치된 고속축중기를 활용하여 교통하중 데이터를 수집함에 있어 실제 주행하는 모든 차량의 교통량 및 축하중 데이터를 확보할 수 있지만 고속축중기가 설치된 지역 또는 구간의 데이터만 수집할 수 있다는 지역적 제약이 따른다. Fig. 2는 김천 지역의 과적단속시스템 전경과 포장면에 설치된 WIM센서를 나타내고 있다.

고속축중기는 고속주행 중인 차량의 축하중을 측정하기 때문에 정지상태 측정값과의 오차가 발생하며, 오차 범위에 따라 WIM 데이터의 활용이 구분되어야 한다. 유럽의 WIM 성능등급 기준으로 활용되고 있는 COST 323에서는 중량 허용오차의 범위를 바탕으로 WIM의 성능등급을 구분하고 있으며, 각 등급 별 데이터 활용을 Table 1과 같이 제시하고 있다. 포장 설계를 비롯한 인프라구조물의 설계에 활용하기 위해 최소 B(10) 등급의 정확도를 가진 WIM을 활용하여야 하며, 과적단속에 활용하기 위한 WIM은 최상위 등급인 A(5) 등급의 WIM을 활용해야 함을 나타내고 있다. 본 연구에서 활용한 김천과 선산 지

역의 WIM은 과적단속을 위해 설치되었으며 모두 A(5) 등급에 해당하는 중량 측정오차를 보유하고 있기 때문에 포장설계 시 입력변수로 활용하기에 충분한 신뢰도를 확보한 것으로 볼 수 있다(Kwon et al., 2012).



(a) In-site Overview



(b) Installed WIM Sensor (Piezo-Quartz Type)

Fig. 2 Overweight Enforcement System (Kimcheon)

Table 1. The Main Applications of WIM with the Accuracy Classes (LCPC, 1999)

Accuracy Classes	Applications
A(5)	Legal purposes such as enforcement of legal weight limits
B+(7)	Enforcement of legal weight limits in particular cases with a special agreement of the legal authorities
B(10)	Accurate knowledge of weights for: i) infrastructure design, maintenance or evaluation ii) pre-selection of overloaded axles or vehicles iii) vehicle identification based on the loads
C(15) D+(20)	Detailed statistical studies, determination of load histograms with class width of one or two tonnes
D(25)	Weight indications required for statistical purpose, economical and technical studies, standard classifications of vehicles according to wide weight classes (e.g. by 5t)

교통하중 데이터를 수집하는 다른 방법으로는 Fig. 3 과 같이 고속도로 영업소의 축중차로 데이터를 활용하는 방법이 있으며, 이 방법은 국토교통부 12종 차종 분류 상 4~12 종에 해당하는 화물차량의 축하중 데이터를 확보할 수 있고 국내 대부분의 지역에서 고속도로를 진입하는 차량의 데이터를 수집할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 중량 측정의무가 없는 승용, 승합차, 버스 및 소형화물 차량의 축중량을 수집할 수 없고 다수의 대형 화물 차량에 가변축이 장착되어 있어 영업소 진입 중량 측정 시와 실제 주행 시 축수가 달라 차종 구분이 달라지는 문제점이 있다.



Fig. 3 A Designated Lane for Weighing

특히 일부 과적차량의 경우 가변축을 악용하여 축중량 및 총중량을 속인 후 고속도로 진입을 시도하고 있다. 예를 들어 5축 카고 트럭의 경우, 영업소 중량 검측 시에는 5축 비과적 차량(7종)으로 진입한 후 본선 주행 시에는 가변축을 들어올려 4축 과적상태(6종)로 운행하는 경우가 있다. 6축 세미 트레일러(12종)의 경우도 마찬가지로 가변축을 1개 들어올리면 10종 5축 세미 트레일러로 구분되기 때문에 영업소 진입 시 차종구분과 실제 주행 시 차종구분이 달라지며(Kwon et al., 2012) 또한 포장체에 가하는 축하중의 크기도 달라지게 된다. 즉, 영업소에서 수집한 교통하중 데이터를 바탕으로 고속도로 본선을 설계할 경우, 설계에 활용한 영업소의 교통하중 데이터가 실제 교통하중을 과소평가할 가능성이 있기 때문에 고속축중기와 같이 본선 중량검측이 가능할 경우에는 WIM에서 얻을 수 있는 데이터를 적극 활용할 필요가 있다.

2.2. 단속 후 과적차량 변화

고속축중기를 활용한 과적단속은 2012년 1월 중순부터 실시되었으며, 이동단속반과 연계하여 본선을 주행

하는 과적차량을 단속하고 있다. 권순민 등(2012)은 차종 별 과적교통량을 바탕으로 과적단속시스템의 운영으로 인한 과적 억제 효과를 분석하였으며, 그 결과 고발 기준값을 상회한 과적차량들이 단속 전에 비해 약 27%가 감소한 것으로 나타났다. 특히 Fig. 4와 같이, 총중량 44톤을 초과한 과적차량들은 단속 전에 비해 감소한 반면, 40~44톤의 총중량을 가진 차량의 비율은 오히려 증가한 것으로 나타나 과적단속시스템이 과적차량의 운행을 상당부분 억제하고 있는 것으로 보고되었다.

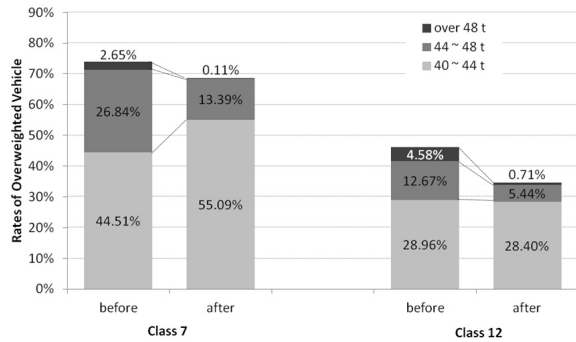


Fig. 4 Changes of Composition Rates for Gross Weight with the Enforcement (Kwon et al., 2012)

현재 과적 비율이 높은 차종은 국토교통부 12종 차종 분류 상 6종 및 7종에 해당하는 4~5축 카고 트럭과 10종 및 12종에 해당하는 5~6축 세미 트레일러 차량이며, 4종 이상 전체 화물교통량의 약 36%를 차지한다. 따라서 이들 차량의 축하중 분포 변화로 인해 포장체에 가해지는 전체적인 교통하중이 변화될 것으로 예상할 수 있다.

3. 한국형 포장설계법 프로그램을 이용한 포장 공용성 예측

3.1. 요약

본 연구에서는 한국형 포장설계법(2013년 9월 버전)을 이용하여 설계 등급 1등급의 지방지역 고속도로 줄눈콘크리트 포장의 공용성을 예측하였다. 설계법 프로그램에 적용한 주요 인자를 Table 2에 정리하였다.

차종 별 연평균 일일교통량을 분석한 결과, Fig. 5와 같이 세 종류의 축하중이 유사한 양상을 보였다. 이는 한국형 포장설계법의 고속도로 차종 별 교통량은 수시 조사되는 교통량 통계자료를 바탕으로 작성되었으며, 통계자료는 고속도로 노선에 설치된 AVC(Automatic Vehicle Classifier) 등을 통해 교통량이 수집되기 때문에 현장에서 실측된 WIM 데이터와 큰 차이가 없는

것으로 판단된다. 따라서 차종 별 교통량은 한국형 포장설계법에서 제시된 값을 세 종류의 축하중 분포에 적용하였으며, 공용기간 동안 교통량 변화는 없는 것으로 가정하였다.

따라서 축하중 분포와 슬래브 두께를 변수로 활용하여 공용기간 내 줄눈 콘크리트포장의 피로균열을 진전양상과 국제평탄성지수(IRI, International Roughness Index)를 예측하였으며 이를 바탕으로 축하중 분포 변화에 따른 포장 공용성 변화를 분석하였다.

Table 2. Inputs for KPRP Pavement Design Program

Road Classification	Expressway
Design Grade	1
Pavement Type	JPCP
Joint Spacing	6m
Thickness of Slab	26, 28, 30, 32cm
Source of Axle Load Spectra	1. HS-WIM(before) ; before the enforcement 2. HS-WIM(after) ; after the enforcement 3. KPRP
AADT	30,000
Design Life	20 years
Cross-Section	

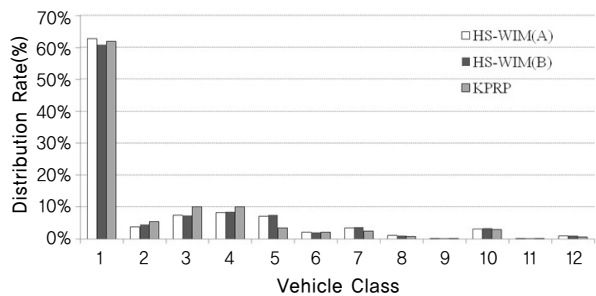


Fig. 5 Distribution Rate with Vehicle Class

3.2. 축하중 분포 비교분석

동일한 축하중이라 하더라도 축의 형태 및 타이어 수에 따라 포장에 미치는 영향이 다르기 때문에 한국형 포장설계법에서는 차종 및 축 형태 별로 축하중을 구분하여 입력하도록 하고 있다. Table 3은 국토교통부 통합 12종 차종 분류가이드에 따른 각 차종 별 대표적인 차축 배열을 나타낸 것이다(국토교통부, 2011).

Table 3. Arrangement of Axles with Vehicle Class

Class 1	Class 2	Class 3
Class 4	Class 5	Class 6
Class 7	Class 8	Class 9
Class 10	Class 11	Class 12

■ Single Axle with Single Tire

 ■ Single Axle with Dual Tires

 ■ Tandem Axle with Dual Tires

 ■ Tridem Axle with Dual Tires

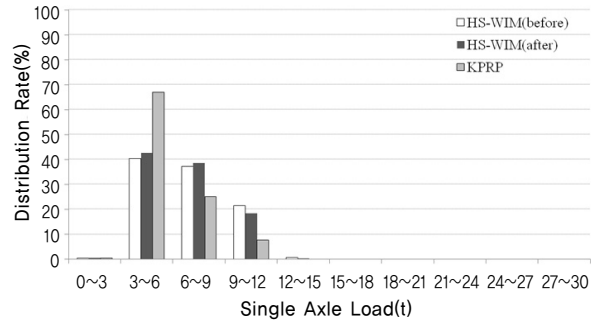
본 연구에서는 단속 전·후 고속측중기에서 생성된 차종 별 축하중을 Table 3에 정리된 4종류의 축 형태로 모두 재분류하여 포장설계법에서 제시된 축하중 분포와 함께 비교하였으며 앞서 언급한 과적차량 비율이 높은 차종인 6, 7종 카고 트럭과 10, 12종 세미 트레일러의 축하중 분포를 중점적으로 분석하였다.

3.2.1. 4~5축 카고 트럭

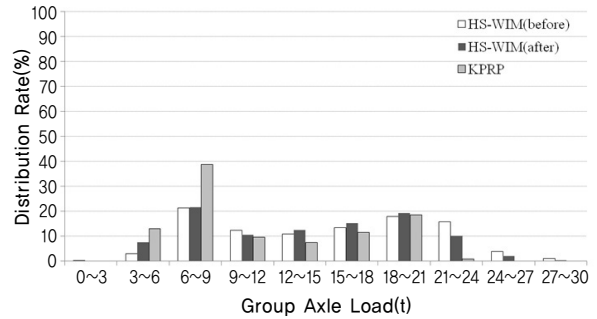
6종 화물차량으로 분류되는 4축 카고 트럭은 일반적으로 조향축으로 사용되는 2개의 단축과 하중 지지를 위한 1개의 복축으로 구성되어 있다. Fig. 6은 6종 화물차량의 축 형태 별 하중 분포를 나타낸 것이다. 단축의 경우, 축하중 단속기준이 포함되어 있는 9~12톤의 단속 후 스펙트럼이 단속 전에 비해 감소하였으며, 9톤 미만에 해당하는 스펙트럼은 소폭 증가한 것을 알 수 있다. 즉, 단속기준을 초과한 과적차량은 감소한 반면, 단속기준에 가까이 적재하여 운행한 비과적차량은 증가한 것으로 해석할 수 있다. Fig. 6(b) 복축의 경우도, 단속기준이 포함된 21~24톤을 중심으로 유사한 양상을 보였다.

한편 포장설계법에서 제시된 축하중은 복축 21~24톤의 축하중이 약 1%로, 단속 전 실측데이터 약 15%나 단속 후 실측데이터 약 10%에 비해 매우 낮은 것을 알 수 있다. 또한 2~5%의 비교적 낮은 비율이지만 24톤 이상의 과적하중이 반영되지 않아 결과적으로 실측된 교통하중에 비해 과소평가되어 적용되고 있음을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 축하중 분포 데이터의 수집 방

법과 지역에 따라 통계된 데이터가 상이할 가능성이 충분하기 때문에 설계법의 축하중 분포 데이터가 수정, 보완이 필요한 것은 아니며, 다만 포장 설계 시 설계 단계에서 적용한 예상 교통하중보다 과도한 교통하중이 재하될 수 있어 포장의 조기 파손을 야기시킬 수 있음을 의미한다.



(a) Single Axle with Single Tire

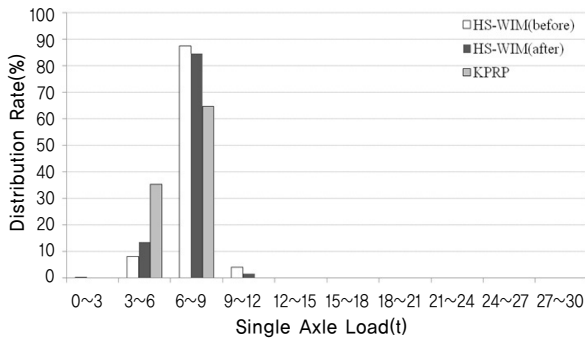


(b) Tandem Axle with Dual Tires

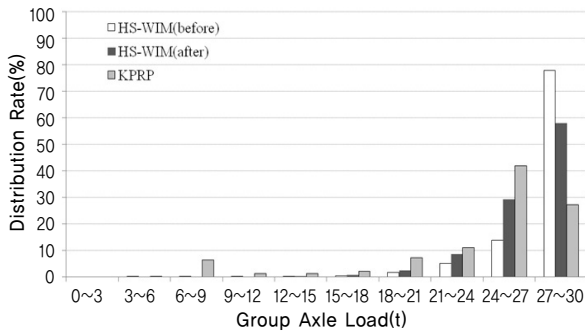
Fig. 6 Comparison of Axle Load Spectra (Class 6)

Fig. 7은 7종 5축 카고 트럭의 축하중 분포를 비교한 그림이다. 전반적으로 단속 전·후의 축하중 변화 양상이 6종 화물차량과 유사한 것을 알 수 있으며, 설계법의 축하중 분포에 비해 과도한 축하중이 실측된 모습을 보여준다. 특히, Fig. 7(b)의 27~30톤에 해당하는 삼축하중은 포장설계법에서 통계된 분포비율에 비해 단속 전에 약 2.8배, 단속 후에 약 2배에 해당하는 축하중이 검출되었다.

7종 화물차량은 하중지지를 위한 후륜부가 삼축으로 구성되어 있으며 일반적으로 1개의 가변축이 포함되어 있다. 따라서 가변축을 들어올리면 4축 6종 화물차량으로 분류되며 일부 운전자들은 고속도로 영업소 중량검측 시에는 5축 상태로 진입한 후 본선 주행 시에는 4축 상태로 주행하는 경우가 있다. Fig. 6(b)의 22톤 이상 과적 고발대상에 해당하는 복축하중이 이러한 원인으로 고속측중기에서 검출된 경우로 의심할 수 있다.



(a) Single Axle with Single Tire



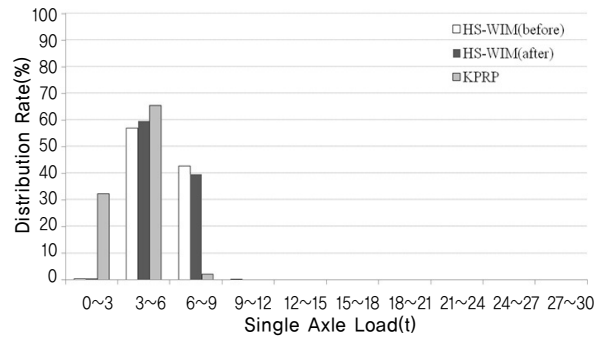
(b) Tridem Axle with Dual Tires

Fig. 7 Comparison of Axle Load Spectra (Class 7)

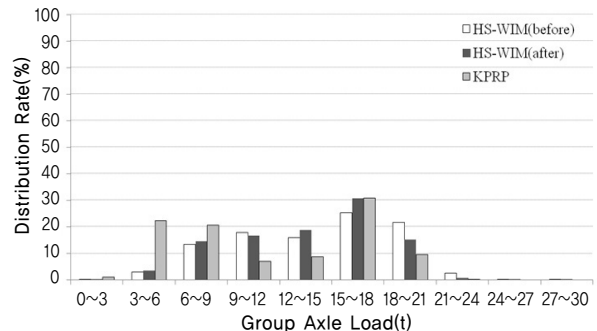
한편 한국형 포장설계법 프로그램은 Fig. 6 및 7의 x 축과 같이 3톤 단위로 0~30톤까지 축하중 분포를 입력 할 수 있도록 개발되었다. 따라서 단축 및 복축의 경우에는 현행법상 과적에 해당하는 범위의 축하중을 대부분 반영할 수 있으나 삼축의 경우에는 30톤을 초과하는 과적하중을 반영할 수 없으며, 이에 본 연구에서는 Fig. 7(b)와 같이 30톤 이상의 삼축하중을 27~30톤 범위에 모두 포함시켜 그래프로 도시하였다. 실제 고속측중기에서 수집한 축하중 분포를 분석한 결과, 7종 화물차량의 30톤 이상의 삼축하중 비율은 단속 전 37.4%, 단속 후 8.6%로 나타났다.

3.2.2. 5~6축 세미 트레일러

5축 세미 트레일러인 10종 화물차량의 차축은 Table 3과 같이 1개의 단축과 2개의 복축으로 구성되어 있다. 축 형태 별 세 종류의 축하중 분포 비교 결과는 Fig. 8과 같다. 단속 전과 후의 축하중 분포 변화 양상은 6, 7종 화물차량과 유사하며, 전반적으로 포장설계법의 축하중 분포에 비해 실측 교통하중이 높게 형성되어 있음을 보여준다.



(a) Single Axle with Single Tire

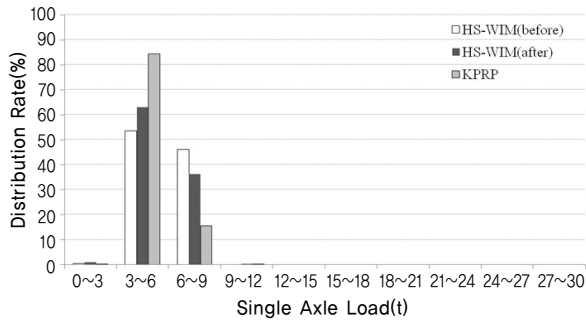


(b) Tandem Axle with Dual Tires

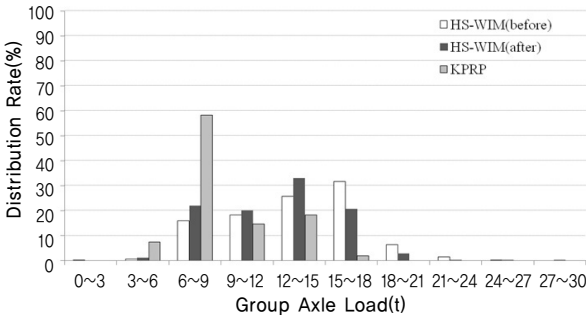
Fig. 8 Comparison of Axle Load Spectra (Class 10)

6축 화물차량인 12종 세미 트레일러 차종은 단축, 복축, 삼축으로 구성되어 있다. 6축 트레일러 대부분의 차량이 1~2개의 가변축을 장착하고 있어 가변축 작동 여하에 따라 8종 또는 10종 화물차량으로 구분되기도 한다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 단속 전에는 총중량 48톤 이상으로 주행한 차량의 비율이 약 4.6%에 달하며 이는 단속기준 44톤을 4톤 이상 초과하였기 때문에 고의적인 과적을 행한 것으로 추정할 수 있다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, 단속 전·후의 축하중 분포 양상은 앞서 분석된 다른 차종과 유사하며 특히 삼축하중 27~30톤에 해당하는 스펙트럼이 단속 후 약 1/3수준으로 낮아진 것으로 나타났다. 앞 절에서 설명한 바와 같이, 30톤 이상의 삼축하중을 모두 27~30톤 범위의 스펙트럼에 포함시킨 결과이며, 실제 30톤 이상의 삼축하중 비율은 단속 전 3.0%, 단속 후 0.3%로 나타났다.

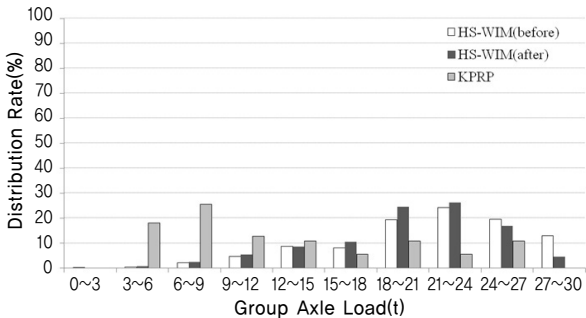
12종 화물차량의 축하중 분포는 본 연구에서 비교한 차종 중 포장설계법의 축하중 분포가 고속측중기에서 검출된 축하중 분포와 가장 상이한 차종으로 볼 수 있으며, 12톤 미만의 삼축하중의 분포비율이 전체의 약 56%에 해당하는 점은 다수의 공차상태 또는 비교적 가벼운 중량을 적재한 12종 차량이 축하중 조사 시 포함된 것으로 유추할 수 있다.



(a) Single Axle with Single Tire



(b) Tandem Axle with Dual Tires



(c) Tridem Axle with Dual Tires

Fig. 9 Comparison of Axle Load Spectra (Class 12)

3.3. 축하중 분포 별 공용성 예측

축하중 분포에 따른 콘크리트 공용성의 변화를 파악하기 위해 한국형 포장설계법에서 개발된 ‘도로포장 구조 설계 프로그램’을 이용하여 설계수명 내 균열율과 평탄성의 변화를 살펴보았다. 여기서, 단속 전·후 고속축중기에서 수집된 축하중 분포를 이용한 공용성 예측결과는 프로그램 상의 입력변수의 제한으로 인해 7종과 12종 차량의 30톤 이상의 삼축의 축하중을 정확히 반영하지 못한 과적하중을 과소평가한 결과라는 제한이 있다.

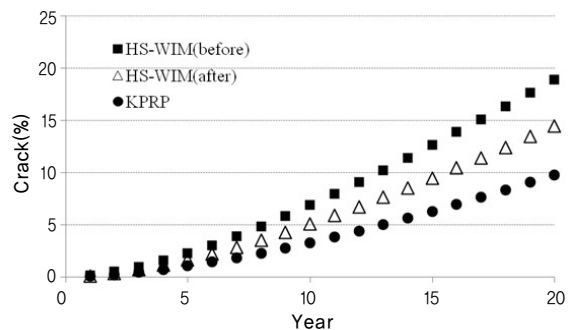
3.3.1. 균열율

포장설계법 프로그램에 사용된 응력비를 고려한 콘크리트 포장의 피로수명(N_f) 예측식은 Eq. (1)과 같다(국토교통부, 2011).

$$\text{Log}(N_f) = 13.291 - 12.413(S) + 2.667(R) \quad (1)$$

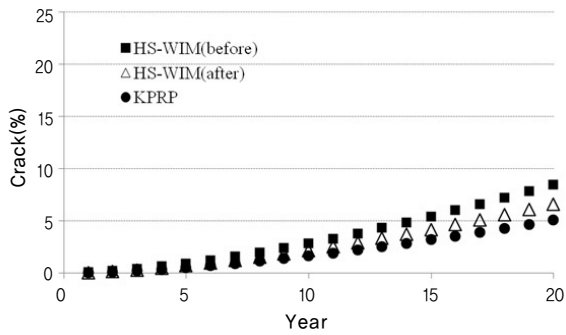
여기서, S 는 최대응력과 강도의 비, R 은 최소응력과 최대응력의 비를 의미한다. 따라서 과적에 해당하는 축하중을 비롯한 과도한 교통하중은 슬래브에 발생하는 최대응력을 증가시켜 슬래브의 피로수명을 단축시키고, 지속적으로 재하될 경우 결국 피로균열을 발생시키게 된다.

Fig. 10은 설계 공용기간 20년 동안의 축하중 분포 별 균열율을 콘크리트 슬래브 두께 별로 예측한 결과이다. 축하중 분포 별 균열 진전속도는 단속 전 축하중 분포, 단속 후 축하중 분포, 포장설계법의 축하중 분포 순으로 빠르며 슬래브 두께가 얇을수록 교통하중에 의한 균열 발생 속도가 빠른 것을 보여준다. 슬래브 두께 26cm를 적용한 결과, 단속 전의 축하중 분포를 적용한 균열율은 단속 후의 축하중 분포를 적용한 예측치보다 1.3배 더 높은 것으로 예측되었으며, 포장설계법의 축하중 분포를 바탕으로 예측한 균열율과 비교하면 약 2배 더 높아짐을 알 수 있다. 균열율 10%를 기준으로 공용수명을 예측할 경우, 단속 전의 교통하중으로는 약 13년, 단속 후의 교통하중으로는 약 16년, 포장설계법에 제시된 교통하중으로는 약 20년으로 산정할 수 있어 고속축중기 과적단속으로 약 3년의 공용수명을 연장할 수 있음을 의미한다. 또한 포장설계법의 축하중 분포를 적용하여 설계한 26cm 두께의 콘크리트 포장에, 단속 전의 축하중 분포에 해당하는 교통하중이 작용한다고 가정했을 때 설계수명은 20년이나 공용수명은 13년으로 단축됨을 의미하기 때문에, 일반적으로 사용되는 28~30cm의 두께보다 얇은 슬래브 두께로 콘크리트포장을 설계하는 경우에는 교통하중 데이터를 선택, 적용함에 있어 신중을 기해야 할 것으로 판단된다. Fig. 10(c)와 (d)는 슬래브 두께 30, 32cm를 각각 적용했을 때 예측되는 균열발생률이며, 본 연구에서 사용된 축하중 분포의 변화 정도는 균열율에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

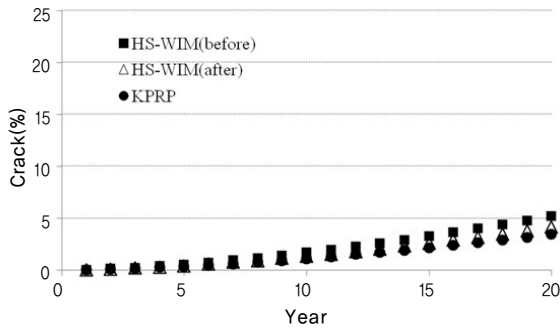


(a) Slab Thickness = 26cm

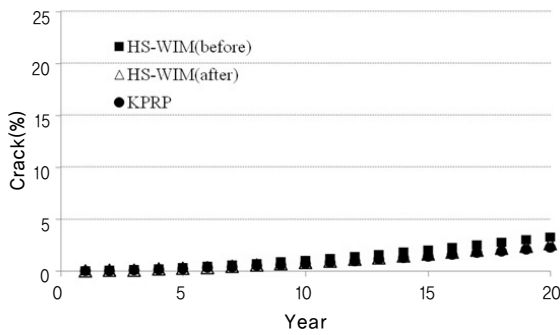
(Fig. Continued)



(b) Slab Thickness = 28cm



(c) Slab Thickness = 30cm



(d) Slab Thickness = 32cm

Fig. 10 Results of Predicted Fatigue Crack

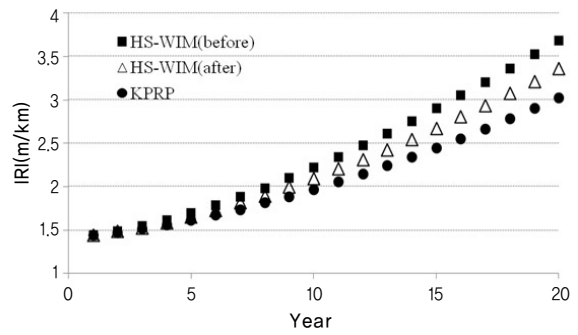
3.3.2. 평탄성

한국형 포장설계법에 적용된 콘크리트 포장 IRI 회귀 분석 모형은 Eq. (2)와 같다. 스폐링 및 균열발생률은 공용년수 별 예측된 값을 사용하며 초기평탄성 IRI 0는 1.41m/km, 린콘크리트 기층 적용 시에는 Base값으로 0을 적용한다(국토교통부, 2011).

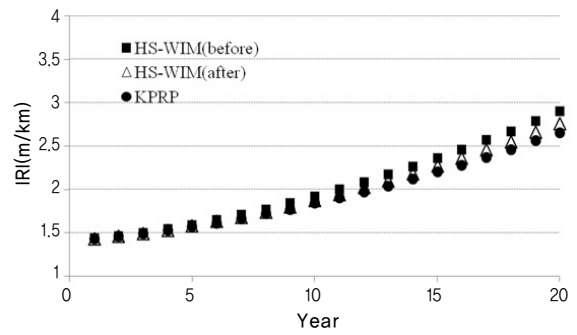
$$IRI = IRI_0 + 0.0235AGE + 2.17Spalling(\%) + 1.88Cracking(\%) + 0.811Base \quad (2)$$

축하중 분포 별 공용년수에 따른 IRI 예측값은 Fig. 11과 같다. 동일한 교통하중 하에서는 슬래브 두께가 얇

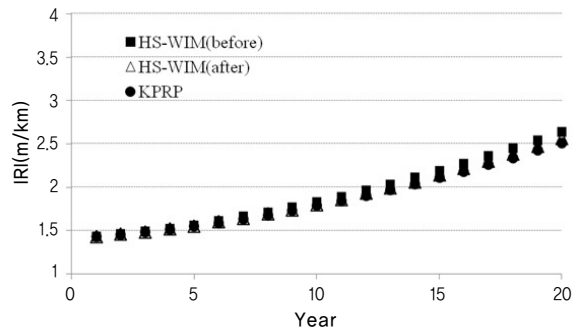
을수록 균열 및 스폐링 파손이 증가하기 때문에 IRI 예측값이 증가하는 것을 보여준다. 반면 Fig. 11(c), (d)와 같이 슬래브 두께가 30cm 이상이 되면 20년 공용 후의



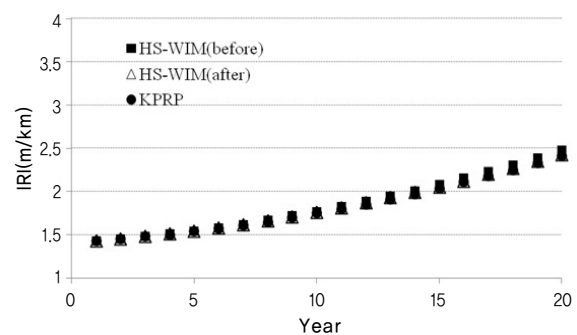
(a) Slab Thickness = 26cm



(b) Slab Thickness = 28cm



(c) Slab Thickness = 30cm



(d) Slab Thickness = 32cm

Fig. 11 Results of Predicted IRI

IRI 예측값이 2.5m/km 전후로 분포하며 축하중 분포 별 차이가 거의 없음을 나타낸다.

Fig. 11(a)의 슬래브 두께 26cm의 결과에서 IRI 2.5m/km에 도달하는 공용년수를 바탕으로 과적단속으로 인한 축하중 분포의 영향을 살펴보면, 단속 전의 축하중 분포로는 약 12년, 단속 후의 축하중 분포로는 약 14년 공용 후로 예측되었다. 또한 포장설계법의 축하중 분포로는 동일 조건에서 약 15.5년의 공용년수를 보여, 포장설계에 사용된 축하중 분포에 따라 공용수명의 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 고속도로 본선 과적단속이 실시된 기점을 전후로, 고속축중기가 설치된 구간의 단속 전과 후의 축하중 분포 실측 데이터를 수집하였으며, 단속에 따른 축하중 분포의 변화가 콘크리트 포장의 공용성에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구의 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 한국형 포장설계법에서 제공하고 있는 축하중 분포와 본 연구에서 수집한 축하중 분포를 비교한 결과, 설계법의 축하중 분포는 전반적으로 중량축에 속하는 축하중의 비율이 낮고, 경량축에 속하는 축하중의 비율이 높은 것으로 나타났다. 특히, 12중 화물차량의 축하중 분포가 두드러지게 상이하였으며 이와 같은 결과는 교통하중 데이터의 수집방법의 차이에 의한 것으로 유추된다.
2. 기존에 과적비율이 높은 차종으로 분석된 6, 7, 10, 12중 화물차량에 대해 본선 과적단속 전과 후의 축하중 분포를 비교한 결과, 축 당 9톤 이상에 해당하는 축하중 비율은 감소하고 이보다 낮은 축하중의 비율은 증가하는 양상을 보였다. 이는 기존의 과적차량이 과적단속 후 중량을 낮추어 운행하고 있는 것으로 판단할 수 있다.
3. 한국형 포장설계법 프로그램을 이용하여 축하중 분포의 차이에 따른 포장의 균열율과 IRI의 예측값 변화를 분석하였다. 슬래브 두께가 감소할수록 균열율

및 평탄성의 증가속도가 증가하였으며, 축하중 분포 별 예측값의 격차도 커지는 것으로 나타났다. 다만 설계법 프로그램의 최대 축하중 스펙트럼이 30톤으로 제한되어 있어, 단속 전, 후 30톤 이상의 삼축하중이 공용성에 미치는 영향을 정확히 반영하지 못한 결과이며, 과적하중이 모두 반영된 공용성 예측결과에 비해 과소평가된 결과라 할 수 있다.

포장설계 시 사용되는 교통하중 예측자료와 실제 공용 중의 교통하중은 서로 상이할 가능성이 높다. 하지만 본 연구결과는 AADT가 동일하더라도 통행하는 차량의 축하중 분포에 따라 포장의 공용수명 변화가 발생하며, 포장 두께가 감소할수록 이러한 변화의 폭이 더 크게 발생함을 나타낸다. 따라서 포장설계 시 가능한 신뢰도가 높은 축하중 분포 데이터를 이용해야 최적의 포장두께 설계 및 목표 공용수명의 달성이 가능하며 일부 과적하중이 현재 포장설계 프로그램에 반영되지 못하는 점은 보완이 필요한 것으로 판단된다. 또한 과적단속과 같은 적극적인 교통하중 관리방안을 통해 포장의 공용수명을 유지관리 단계에서 지속적으로 증가시킬 필요가 있다.

References

- LCPC, 1999, COST 323 : Weigh in Motion of Road Vehicles, Final Report of the COST 323 Action, Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, France.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011, The Guidebook of Structural Design for Road Pavement, Korea
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2010, Korea Pavement Research Program, KPRP-G1 Final Report
- Kwon, Soon-min, Suh, Young-chan, 2009, Development and Application of the High Speed Weigh-in-motion for Overweight Enforcement, Journal of the Korean Society of Road Engineers, Vol. 42, pp.69~78
- Kwon, Soon-min, Jung, Young-yoon, Lee, Kyung-bae, 2012, Overloading Control Effectiveness of Overweight Enforcement System using High Speed Weigh In Motion, International Journal of Highway Engineering, Vol. 14, No. 5, pp.179~188
- KEC, 2012, Do You Know Overweight Load?, Korea Expressway Cooperation
- Yang H. Huang, 2004, Pavement Analysis and Design, 2nd Edition, Pearson Prentice Hall, US