



일반국도에서 차량 바퀴궤적의 횡방향 이동 특성 분석

Characteristic of Vehicle Lateral Displacements on National Highways

오 주 삼^{*}
Oh, Jusam

조 윤 호^{**}
Cho, Yoon-Ho

김 형 수^{***}
Kim, Hyoungsoo

Abstract

Wandering, variation of wheel tracks, has not been considered as an important factor for pavement designs and maintenance due to measuring difficulties. In order to investigate vehicle lateral displacements on roadways, this study measured wheel tracks on two-lane and four-lane National highways with lane widths 3.25m and 3.5m. The results showed that the tracks of left and right wheels were distributed into different forms, and those of left wheels were more concentrated. In the mean of the left distributions, 59.5cm and 80.7cm were obtained on lane widths 3.25m and 3.5m respectively by cars, and 58.4cm and 73.6cm were obtained by trucks. These mean differences seem to be generated from those between the lane widths. It is recommended to apply the distribution of left wheel tracks for pavement designs.

keywords : wandering, lateral position, wheel path, tape-switch sensor

요 지

차량의 바퀴궤적의 횡방향 변동을 의미하는 윈더링(wandering)은 포장의 설계 및 유지보수를 위하여 중요한 요소임에도 불구하고 계측의 어려움 때문에 심도 있게 다루어지지 못하고 있다. 본 연구에서는 왕복 2차로(3.5m 차로 폭)와 4차로(3.25m 및 3.5m 차로 폭)인 일반국도 직선 구간에서 차량 바퀴궤적을 조사하여 횡방향 이동 특성을 분석하였다. 조사 결과에서 좌우 바퀴 위치는 서로 다른 분포형태를 보였으며, 포장 설계에 적용할 경우 좌측바퀴에 의하여 얻어진 분포의 특성치가 포장에 미치는 영향이 더 크기 때문에 좌측바퀴의 특성치를 적용하는 것이 합리적인 것으로 나타났다. 좌측바퀴 위치의 평균값은 좌측차선을 기준으로 할 때, 승용·승합차량인 경우 3.25m 차로 폭에서 59.5cm, 3.5m일 경우 80.7cm에 위치하였고, 화물차량일 경우 각각 58.4cm와 73.6cm인 것으로 나타났다. 차량 축수에 따른 구분에서 2축 차량의 경우 차로 폭에 따라서 60.7cm와 79.1cm 이고, 3축이상일 경우 44.5cm 및 69.2cm 인 것으로 나타났다. 결국, 바퀴의 중심위치는 차로 폭에 따라 다르며, 그 차는 차로 폭의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

핵심어: 윈더링, 포장설계, 바퀴궤적, Lateral displacement

1. 서론

도로를 주행하는 차량은 주행하면서 좌우 바퀴를 통해서 포장체와 상호작용을 하게 된다. 차량의 이동에 의하여 발생하는 동적하중은 바퀴가 도로와 접하는 면을

통하여 포장체에 전달되므로 하중의 크기와 작용면에 대한 이해는 포장체의 설계 및 유지보수 전략 수립과정에서 중요한 의미를 갖는다.

차량이 주행할 때 좌측 차선 표시와 좌측바퀴, 우측 차선 표시와 우측바퀴 사이에는 각각 여유폭들이 발생하는

* 정희원: 한국건설기술연구원 첨단도로교통연구실, 선임연구원

** 정희원: 중앙대학교 건설환경공학과, 교수

*** 정희원: 한국건설기술연구원 첨단도로교통연구실, 선임연구원



다. 이들은 차량들이 동일 궤적을 갖고서 이동하지 않기 때문에 차량마다 서로 다른 값을 갖는다. Jeffrey J. Stempihar et. al.(2005)은 이와 같이 통과하는 차량들이 진행방향에 다른 차량궤적을 갖는 것을 차량바퀴의 횡방향 변동을 원더링(Wandering 혹은 Lateral Displacement)이라 정의하고 있다. Feng Hong & Jorge A. Prozzi(2006)는 구체적으로 Mechanistic-Empirical 포장 설계소프트웨어의 입력자료 값으로 원더링하는 바퀴 평균위치 값은 바퀴에서 차선표시까지의 값으로 정의하고 있다. 이러한 원더링으로 인하여 포장면에 접하는 차량의 바퀴는 한 곳에 집중되는 것이 아니라, 일정 분포를 형성하여 주변에 분산된다. 즉, 다른 조건이 동일할 경우 원더링이 심할수록 포장의 파손이 적을 것이다.

일반적으로 차량의 동적하중은 도로에 매설된 WIM(Weigh-In-Motion)장비를 통하여 계측된다. 국내의 경우, 국토해양부(2001년)에서 일반국도 37개 지점에 WIM장비를 설치하여 차량의 하중 자료를 수집하고 있으나, 하중의 작용위치에 대한 자료는 아직까지 체계적으로 조사되지 않고 있는 실정이다.

미국의 경우 2002년부터 AASHTO 설계법에서 하중의 작용위치에 대한 부분을 포장설계인자로 채택하여 반영하고자 노력하고 있다. 과거의 포장설계법을 보면 차량하중은 설계기간 동안의 누적 등가단축교통량(TESAL: Total Equivalent Single Axle Loads)으로 계산되고 이는 차로 내에서 하중이 한 곳에 집중하여 작용하는 것으로 가정하여 설계되는 것이다. 실제 주행 차량들의 원더링 효과를 반영한다면 동일한 장래의 계획 교통하중에 대하여 설계포장수명은 늘어나게 될 것이다. 포장설계에 원더링 효과를 반영하려면 차량 바퀴궤적의 중심선이 차선으로부터 위치하는 지점과 분산 정도에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 연구의 목적은 차량의 횡방향 변동을 포장설계에 반영하기 위하여 주행 중인 차량의 바퀴궤적을 조사하여 원더링 분포를 추정하는 것이다.

바퀴궤적 조사를 위하여 테잎스위치를 이용한 윤거측정 장비를 자체 개발하여 일반국도에서 차로 수, 차로 폭, 차량축수별, 차종별 차량바퀴 궤적의 위치 자료를

수집하여 분석하였다. 차종별 특성 분석을 위해서 현재 운영 중인 상시교통량 조사지점(Automatic Vehicle Classification, 수집자료: 차종, 속도, 축수, 축간거리 등)과 자체 제작한 데이터 수집장비(수집자료: 속도, 축수, 축간거리, 윤거, 차량 바퀴의 좌우 위치 자료 등)를 동일지점에 설치하였다.

2. 기존 연구사례

원더링은 포장의 파손 정도에 직접적으로 영향을 미치는 주요 변수이다. Kasahara(1982)가 추정한 연구 결과에 따르면 원더링은 포장에서 바퀴 진행방향으로 깊이 파이는 현상인 러팅(rutting) 깊이에 있어 3.5배 더 영향을 주는 것을 주장하였다. 또한 Haddock J. et al.(1998)의 연구 결과에 의하면 단일 축(Single Axle)일 때 폭 250mm로 원더링 하는 경우, 러팅의 깊이는 원더링하지 않는 경우와 비교하여 약 1.4~1.7배 정도 얇은 것으로 제시하였다. 이와 같이 여러 문헌에서 원더링은 정도의 차이는 있으나 러팅 깊이에 영향 미치는 것으로 제시하고 있다.

김낙석 외 3인(2006)은 원더링에 대한 정의를 차량의 주행 이격거리의 변동성으로 정의하고 있다. 조명환 외 3인(2008)은 이동하중의 재하 위치로 부터의 일정거리 이격된 곳에서 포장체의 변형특성을 분석하기 위하여 차량의 운행속도 30, 50, 80km/hr로 차량을 주행시키고 원더링에 따른 변형효과를 분석하였다. 두 논문 모두 아스팔트 포장 거동특성 연구에 적용한 50m 이격된 2개의 수평으로 매설된 피에조센서와 45도 각도로 설치된 피에조 센서를 활용한 원더링 자료 수집 장비를 활용하였고, 포장 공용성 예측을 위한 핵심적인 사항중 하나로 제시하고 있다. 강민수(2001)는 원더링은 차로 폭, 차체 폭, 주행속도, 운전자 성향에 영향을 받으며 다양한 분포의 형태를 갖는 것으로 제시하였다. 그의 연구에서는 차로 폭 3.0m일 때 24.5cm, 3.3m일 때 26.3cm, 3.5m일 때 29.2cm의 표준편차를 갖는 것으로 제시되었다.

Buiter et al.(1993)등은 독일에서 차로 폭 3.6m일 때 30cm의 표준편차를 갖는다는 분석결과를 제시한 바



있으며, Kasahara(1982)의 연구결과를 시험도로에서 수행한 결과, 37.5cm의 표준편차를 제시한 후 원터링할 수 있는 공간이 제약되면 로그-정규분포를 갖는 것으로 모형을 제시하였다. Jeffrey J. Stempihar et al(2005) 등은 이러한 원터링에 영향을 미치는 인자로 차종, 교통 조건, 도로특성, 포장표면 상태, 운전자 특성, 날씨 등을 제시하였다.

현재까지 시행된 원터링 계측방법으로는 네 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째 방법으로는 Kasahara(1982)의 연구에서 시행한 방법으로 포장 면에 시인성이 우수한 페인트로 스케일을 그려두고 차량이 지날 때 비디오 카메라를 통하여 동영상을 촬영한 후 정지프레임에서 육안으로 차량의 바퀴위치, 차종, 등에 관한 자료를 수집하는 방식이다. 둘째 방법으로는 Buiter et al.(1989)의 연구에서 적용한 방법으로 20mm 간격으로 120개의 스위치를 부착한 얇은 매트를 포장 면에 부착후 차량이 매트 위를 지날 때 타이어에 의해서 압력이 가해진 스위치 자료를 활용하여 바퀴궤적의 위치와 타이의 폭을 파악하는 방식이다. 셋째 방법으로는 Hornyak et al.(2007)의 연구에서 적용한 방법으로 181.8cm 길이의 2개의 횡방향 피에조 센서를 212.1cm의 30도 각도의 사선으로 설치한 센서의 매설을 통해서 최외곽 차로를 주행하는 차량의 오른쪽 바퀴의 위치만을 계측 가능한 시스템을 활용하여 차량의 바퀴위치를 계측하였다. 넷째 방법으로는 도로 변에 일정거리 이격된 곳에 거리 측정이 가능한 레이저 검지기를 설치하고 이를 통하여 차량의 이격거리 측정하는 것이다(김낙석외 3인, 2007년). 이러한 경우는 최외곽 차로에 대하여 측정이 양호하나 안쪽 차로의 경우나 혹은 길어깨에서 좌측바퀴에 대한 위치 계측에는 불리하다.

원터링 계측방법에 관련된 연구로 오주삼은(2006) 바퀴의 누름으로 on-off 신호를 발생시키는 테잎스위치(Tape Switch) 센서를 활용한 장비로 차량의 바퀴간 거리인 윤거를 산출하는 수식을 제시한 바 있다. 본 논문에서 제시한 차선표시와 차량의 좌우 바퀴간의 거리의 산출식은 차량의 윤거를 산출하는 것과 동일한 방식으로 구할 수 있다. 현재 개발중인 한국형 포장설계법에 원터링에 관련 설계입력 자료에 활용하기 위해서는 시험도로

가 아닌 실제 도로 상에서 도로의 종류, 차로 폭, 다양한 차종구성에 대해서 자료를 수집하고 이를 일반화하는 과정이 필요하다. 이러한 차원에서 차로 폭에 따른 차량 바퀴의 횡방향 이동 특성(혹은 원터링 특성치)를 제시하였다.

3. 바퀴궤적 계측 방법

본 연구에서는 차량 바퀴궤적의 위치 자료를 수집하기 위하여 자체 수집 장비를 개발하였다. 통과 차량을 인식하기 위한 검지 부분에 사용된 센서는 차량의 축(Axle) 검지 목적으로 개발된 테잎스위치(Tape-Switch) 센서로 바퀴가 센서를 밟을 때 “on” 신호를 지나갈 때 “off” 신호를 발생시켜 바퀴가 센서를 통과하는 시각을 정확히 기록한다. 테잎스위치 센서를 활용한 장비에서 차량의 좌우 바퀴의 궤적의 위치자료, 차량 윤거, 차량속도, 축수, 축간거리 등의 자료를 수집한다. 자체 개발한 장비는 원터링 계측 방법중 Hornyak et al.(2007)의 방법과 동일하며, 단지 센서의 종류만 피에조 센서에 대신하여 테잎스위치 센서를 사용한 것이다. 테잎스위치 센서의 장점은 피에조 센서에 비교하여 사용이 편리하고 on-off 신호로 신호가 단순하다는 장점을 갖고 있다. 즉, 피에조 센서를 사용하는 경우는 아날로그 신호를 받아서 차량의 밟는 순간에 대한 임계값을 확정해야하고 이로 인해서 오차가 발생할 수 있다는 단점을 가지고 있다.

개발한 차량의 바퀴궤적 수집 장비의 구조는 두개의 테잎스위치 센서를 3.0m 간격으로 설치하여 통과 차량의 속도를 얻고, 그 사이에 또 다른 테잎스위치 센서를 사선으로 설치하여 바퀴궤적을 추적한다. <그림 1>은 테잎스위치 센서의 설치 위치 및 바퀴궤적 자료 수집을 위하여 추출되는 시각과 거리자료를 보여 준다. <그림 1>에서 차량이 바퀴궤적 수집 장비 영역에 진입하면 수평으로 설치된 첫 번째 테잎스위치 센서(TS1)에서 좌우 두 바퀴가 동시에 센서를 누르고, 이후 사선으로 설치된 센서(TS2)에서 첫 축의 우측바퀴가 누르고 다음에 좌측 바퀴가 순서적으로 누르게 된다. 따라서 2축 차량인 경



우 수평으로 설치된 첫번째 센서에서 앞 축과 뒷 축을 각각 검지하므로 2번의 검지 신호가 발생되나, 사선으로 설치된 센서에는 앞 축에서 2번, 뒷 축에서 2번 검지하여 총 4번의 센서신호가 발생하게 된다.

임의의 차량이 바퀴궤적 수집 장비 영역을 통과할 때의 센서별로 발생하는 센서의 시각정보를 이용한 차량의 속도(V)산출은 식 1과 같다.

$$V = \frac{3}{1,000} * \frac{3,600}{(t_3 - t_0)} \text{ [km/hr]} \quad (1)$$

바퀴궤적 수집 장비 영역을 통과할 때의 속도를 측정하기 위하여 첫 번째 센서와 세 번째 센서에서 기록된 시각(t_0 , t_3)을 사용한다. 식 1에 의한 속도는 바퀴궤적 수집 장비 영역 내(본 연구에서는 3.0m 적용)의 공간속도를 의미하지만, 차량의 윤거 및 좌우 여유폭을 계산에서는 정속도로 차량이 통과한다는 것을 가정한다.

산출된 차량의 속도를 활용하여 식 2에서 d_1 이 얻어지고 식 3을 이용하여 우측의 여유폭(L1)이 산출된다.

$$d_1 = V \times (t_1 - t_0) \quad (2)$$

$$L1 = \frac{d_1}{\tan(\theta)} \quad (3)$$

t_1 , d_1 : 차량의 첫 번째 축의 우측바퀴가 TS2를 밟았을 때의 시각과 거리

t_2 , d_2 : 차량의 첫 번째 축의 좌측바퀴가 TS2를 밟았을 때의 시각과 거리

t_3 , d_3 : 첫 번째 축이 TS3를 밟았을 때의 시각과 거리($d_3 = 3m$)

<그림 1>에서 첫 축의 좌측바퀴가 사선센서(TS2)를 밟을 때까지 주행한 거리 즉, 차량 속도 V로 t_2 시간 동안 주행한 거리를 d_2 라 하면 다음과 같이 표현된다면 차량의 윤거는 식 4 및 5에서 산출된다.

$$\tan(\theta) = \frac{d_2}{(L1 + \text{윤거})} \quad (4)$$

$$\text{윤거} = \frac{V \cdot t_2}{\tan(\theta)} - L1 \quad (5)$$

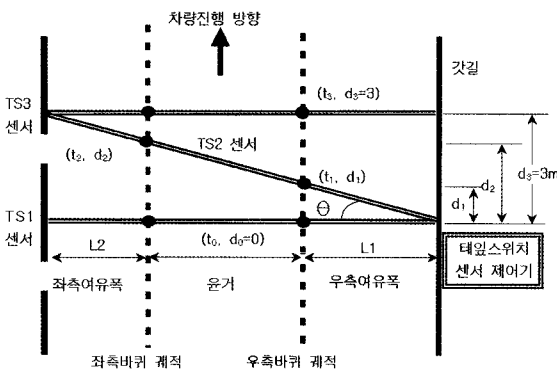
차량의 좌측 여유폭(L2)은 식 6과 같이 차로 폭에서 윤거와 우측 여유폭을 감하여 얻어진다.

$$L2 = \text{차로폭} - (\text{윤거} + L1) \quad (6)$$

4. 바퀴궤적자료 수집 및 분석

4.1 자료수집 및 신뢰성 검증

차량바퀴의 횡방향 이동을 조사를 위해서 개발된 장비의 검증과 통과 차량에 대한 차중, 축거, 및 기타 교통 관련 자료를 함께 얻기 위하여 기존에 일반국도에 설치되어 있는 상시 교통량 조사 장비(AVC)와 동일지점에 대해서 조사를 실시하였다. 조사지점은 경기도 지역에 위치한 일반국도 37호선 두 곳과 일반국도 1호선 상의 한 곳이 선택되었다. 일반국도 37호선 상의 한 지점은 왕복 4차로로 운영 중이고 다른 1지점은 왕복 2차로 운영 중인 곳으로 차로 폭은 모두 3.5m이다. 국도 1호선 조사지점은 차로 폭 3.25m로 운영되고 있는 곳으로 차로는 왕복 4차로이다. 이들 모두 직선구간에 경사가 없는 평지상의 도로인 것으로 조사되었다. 조사차로는 모두 중앙선으로부터 가장 바깥쪽 차로에서 조사하였으며, 이는 포장설계에서 있어 안쪽 차로 보다는 중차량



<그림 1> 바퀴궤적 수집 장비의 구조

TS1, TS3: 수평으로 설치하는 테잎스위치 센서
 TS2: 일정 각도(θ) 사선으로 설치된 테잎스위치 센서
 t_0 , d_0 : 차량의 첫 번째 축이 TS1 센서를 밟았을 때의 시각(sec)과 거리($d_0 = 0m$)



비율이 높은 바깥차로가 일반적으로 보다 큰 의미를 갖기 때문이다.

자료 수집 과정에서 상시 교통량 조사 장비와 자체 개발한 장비는 서로 독립적으로 운영되기에 두 장비에 대한 시각 동기화를 시킨후 각각 자료를 수집하였다. 따라서 차량 진행과 더불어 상시교통량조사 장비에서 차종, 속도, 축거 등의 자료가 수집되고 또한 자체 개발된 장비에서도 동일 차량에 대하여 차량속도, 축거, 운거, 좌우측 바뀌어유폭 등이 얻어진다.

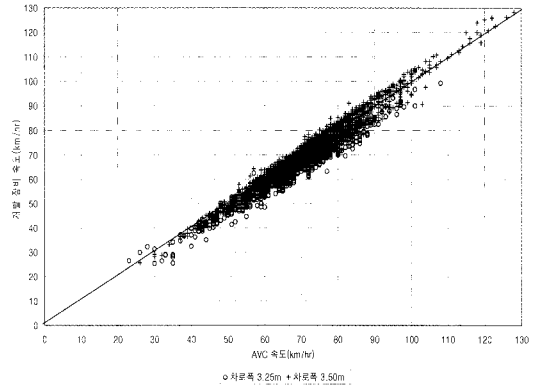
차종분류는 국토해양부에서 지정한 통합 12종 분류시스템에 근거하여 상시교통량 조사장비를 통해서 얻어지게 된다. <표 1>은 조사된 자료의 차종별 구성을 보여준다. 총 3,800대 차량의 바뀌귀적이 차로 폭(3.25m, 3.5m)과 차로수(2차로, 4차로)로 구분해서 조사되었다. 차로 폭이 3.25m인 지점으로부터 조사된 차량중 1종의 비율이 40.40%로 비교적 낮은 것은 왕복 4차로로 운영되는 구간에 바깥쪽 차로에서 조사되었기 때문이다.

<표 1> 차로 폭에 따른 차종별 조사 대상 차량 구성

차종	3.25 m		3.5 m	
	대수	구성비(%)	대수	구성비(%)
1종(2축)	301	40.40	1,651	54.05
2종(2축)	45	6.04	24	0.79
3종(2축)	192	25.77	739	24.19
4종(2축)	153	20.54	292	9.56
5종(3축)	45	6.04	148	4.84
6종(4축)	7	0.94	151	4.94
7종(5축)	2	0.27	19	0.62
8종(4축)	0	0.00	9	0.29
9종(4축)	0	0.00	5	0.16
10종(5축)	0	0.00	13	0.30
11종(5축)	0	0.00	0	0.00
12종(6축)	0	0.00	4	0.13
소계	745	100.00	3,055	100.00

<그림 2>에서 상시 교통량 조사 장비와 자체 개발 장비의 속도를 비교한 것이다. 자체 개발한 장비의 정확도를 확인하기 위하여 두 가지 항목에 대하여 비교하였다. 첫째, 동일 차량에 대하여 기존의 상시 교통량 조사 장비

(AVC)에서 산출되는 속도자료와 자체 개발 장비로부터 산출되는 속도자료를 비교하였다. 둘째, 각각의 장비로부터 산출되는 첫 번째 축과 두번째 축의 축간 거리(축거)를 비교하였다.



<그림 2> 상시 교통량 조사 장비와 자체 개발 장비의 속도 비교

축거의 산출 역시 운거를 산출하는 방법과 유사하게 이루어진다. 평가지표로 절대오차백분율(MAPE), 상관계수, 짝진 표본에 대한 t 검정을 사용하였다. 짝진 표본에 대한 t 검정에서는 평균속도(\bar{V})의 차와 평균축거(\overline{Axle})의 차를 각각 d_n 이라는 귀무가설(H_0)로 설정하고 검정을 하였다.

2축 차량에 대한 AVC장비의 평균속도-자체개발 장비의 평균속도:

$$H_0: \overline{V}_{AVC} - \overline{V}_{Tape} = d_1,$$

$$H_1: \overline{V}_{AVC} - \overline{V}_{Tape} \neq d_1$$

2축 차량에 대한 AVC장비의 평균축거-자체개발 장비의 평균축거:

$$H_0: \overline{Axle}_{AVC} - \overline{Axle}_{Tape} = d_2,$$

$$H_1: \overline{Axle}_{AVC} - \overline{Axle}_{Tape} \neq d_2$$

3축 이상 차량에 대한 AVC장비의 평균속도-자체개발 장비의 평균속도:

$$H_0: \overline{V}_{AVC} - \overline{V}_{Tape} = d_3,$$

$$H_1: \overline{V}_{AVC} - \overline{V}_{Tape} \neq d_3$$



3축 이상 차량에 대한 AVC장비의 평균측거-자체개발 장비의 평균측거:

$$H_0: \overline{Axle_{AVC}} - \overline{Axle_{Tape}} = d_4,$$

$$H_1: \overline{Axle_{AVC}} - \overline{Axle_{Tape}} \neq d_4$$

〈표 2〉에서 상시 교통량 조사 장비와 자체 개발한 장비의 속도 및 측거의 평가에서 절대오차백분율이 5%를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 동시에 두 장비에서 추출된 속도 쌍과 측거 쌍에 각각에 대해서 상관계수가 0.98 이상으로 매우 높은 것을 고려할 때 두 자료의 속도 변화 패턴이 유사한 것을 알 수 있다. 평균속도의 차는 2km/hr 미만이고 평균측거의 차는 8cm 미만으로 평균값과 비교할 때 매우 작았다. 2축 차량의 속도 비교에서 속도평균의 차(1.14km/hr)에 대한 짝진 표본(Paired t-test)에 대한 검정에서 유의확률(0.93)은 유의수준(0.05) 큰 값임으로 유의수준 5%에서 귀무가설을 채택한다. 즉, 95%의 신뢰수준에서 상시 교통량 조사 장비의 속도와 자체 개발한 장비에서 수집한 속도 평균값의 차이는 각각의 경우에 대하여 1.14km/hr, 0.54km/hr이고 평균측거의 차는 7.97cm, 7.63cm인 것으로 볼 수 있다.

4.2 바퀴궤적 분석

4.2.1 바퀴의 좌우 여유폭

바퀴의 여유폭을 차량의 바퀴로부터 각각의 차선까지의 거리로 정의하였다. 조사된 차량의 바퀴궤적에 대한 좌우 여유폭을 위에서 언급된 수식을 이용하여 구하였다. 〈표 3〉은 조사지점별 좌우 여유폭에 대한 평균, 표

준편차를 제시하였다.

3.25m 차로 폭에서는 좌측의 경우는 58.88cm이고 우측은 104.74cm인 것으로 분석되었다. 그리고 좌측 여유폭의 크기는 3.5m 도로 폭에서는 2차로 도로에서는 7.85cm 그리고 4차로 도로에서는 81.06cm에 이르는 것으로 산출되었다. 또한 좌우측의 여유폭이 다르다는 사실은 차량들이 주행시에 차로의 중심선과 차량의 중심선이 일치되지 않고, 일정 정도 이격되어 주행한다는 것을 의미한다.

〈표 3〉 차로 폭과 차로에 따른 좌우 바퀴의 여유폭

차로 폭	차로	좌측 바퀴의 여유폭		우측 바퀴의 여유폭		바퀴수
		평균 (cm)	표준 편차	평균 (cm)	표준 편차	
3.25m	4차로	58.88	20.95	104.74	25.06	1,555
	2차로	71.85	20.44	122.73	23.13	2,838
3.50m	4차로	81.06	33.71	92.12	30.98	3,862
	2차로	71.85	20.44	122.73	23.13	2,838
전체	4차로	74.69	32.20	95.74	29.95	5,417

4.2.2 원더링 패턴

포장설계를 위하여 바퀴궤적 분포를 사한다면 교통량 보다 바퀴의 통과횟수가 더 중요하게 다루어져야 할 것이다. 예를 들어, 2축 차량의 경우 바퀴가 지나간 횟수는 차량 축수인 2회가 된다. 본 연구에서는 원더링 분포를 추정하기 위하여 바퀴궤적의 위치를 조사할 때, 해당 차량의 축수만큼 통과 횟수를 증가시켜 계산하였다. 〈그림 3〉은 차로내 통과 위치 자료를 좌측 차선을 기점으로 하여 10cm 단위로 계급화한 것이다.

〈표 2〉 AVC 장비와 자체 개발 장비의 속도 및 측거 비교에 대한 평가

		차량수 [대]	MAPE [%]	상관 계수	평균 [km/hr]	평균의 차 [km/hr]	t 값	유의확률 (양쪽)	
2축 차량	AVC 속도	3,397	3.58	0.98	73.92	1.14	0.090	0.93	
	자체장비 속도				72.78				
	AVC 측거		4.24	0.99	291.32	7.97		0.036	0.97
	자체장비 측거				283.35				
3축 이상 차량	AVC 속도	403	2.93	0.99	67.96	0.54	0.009	0.99	
	자체장비 속도				67.42				
	AVC 측거		3.84	0.99	306.25	7.63		0.006	0.99
	자체장비측거				298.62				



〈그림 3〉에서 좌측바퀴의 원더링 분포는 단봉(Uni-Modal)에 상대적으로 집중되어 있는 반면, 우측바퀴에 대한 분포는 다수의 첨두와 함께 분산되었다. 차로 폭 간의 비교에서는 전체적인 그래프의 형태가 유사하며, 약 차로 폭 차이만큼 이동(shift)된 모습을 보여준다. 즉, 좌측 여유했은 차로 폭이 3.25m인 경우 50-60cm 범위에서, 차로

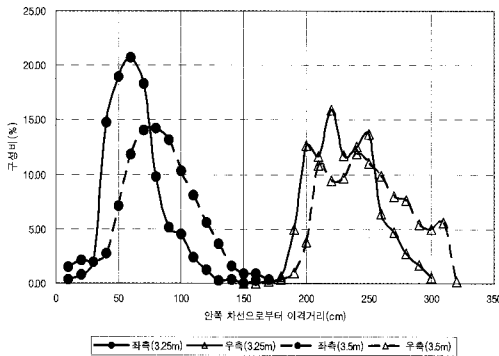
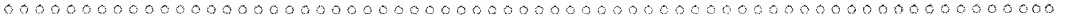
폭이 3.5m인 경우 70-80cm인 범위에서 가장 빈도가 높았다. 좌우 바퀴 모두에서 차로 폭이 넓으면 원더링폭도 넓은 것을 알 수 있다. 또한 우측바퀴의 원더링 폭이 좌측바퀴의 원더링 폭보다 넓은 것으로 분석되었다.

〈표 5〉 차종 및 축수별 차로 폭에 따른 좌우 바퀴의 평균 위치의 신뢰구간

	차종	차로 폭(m)	바퀴수	평균(cm)	표준편차	평균에 대한 95% 신뢰구간	
						하한값(cm)	상한값(cm)
좌측	승용·승합	3.25	692	59.54	20.91	57.98	61.10
		3.50	3,350	80.70	31.35	79.63	81.76
	화물차	3.25	863	58.35	20.97	56.95	59.75
		3.50	3,350	73.62	26.41	72.73	74.52
우측	승용·승합	3.25	692	221.62	24.35	219.80	223.44
		3.50	3,350	238.15	28.60	237.18	239.11
	화물차	3.25	863	228.19	25.24	226.50	229.87
		3.50	3,350	251.65	33.22	250.53	252.78
좌측	2축 차량	3.25	1,382	60.68	20.73	59.59	61.77
		3.50	5,412	79.06	29.15	78.29	79.84
	3축 이상	3.25	173	44.51	16.74	42.00	47.02
		3.50	1,288	69.16	28.04	67.63	70.70
우측	2축 차량	3.25	1,382	221.75	22.86	220.54	222.95
		3.50	5,412	236.50	27.59	235.77	237.24
	3축 이상	3.25	173	253.35	24.19	249.72	256.98
		3.50	1,288	280.19	22.26	278.97	281.41

〈표 6〉 차종별, 차량 축수별 좌우바퀴의 평균값의 차로 폭에 따른 차이

바퀴위치 및 차종		차로 폭	집단-간	제공합	자유도	F	유의확률
좌측	승용·승합	3.25m	집단-간	40,207	1	97.32	0.00
		3.50m	집단-내	641,585	1,553		
	화물차	3.25m	집단-간	101,949	1	121.73	0.00
		3.50m	집단-내	5,609,554	6,698		
우측	승용·승합	3.25m	집단-간	153,552	1	290.05	0.00
		3.50m	집단-내	822,159	1,553		
	화물차	3.25m	집단-간	1,985,958	1	2,796.57	0.00
		3.50m	집단-내	4,756,520	6,698		
좌측	2축 차량	3.25m	집단-간	372,013	1	486.78	0.00
		3.50m	집단-내	5,190,693	6,792		
	3축 이상	3.25m	집단-간	92,707	1	127.55	0.00
		3.50m	집단-내	1,060,446	1,459		
우측	2축 차량	3.25m	집단-간	239,623	1	336.25	0.00
		3.50m	집단-내	4,840,225	6,792		
	3축 이상	3.25m	집단-간	109,883	1	217.10	0.00
		3.50m	집단-내	738,453	1,459		



〈그림 3〉 차로 폭에 따른 좌우바퀴의 빈도 분포

〈표 4〉는 〈그림 3〉에서의 자료를 차종별, 차량 축수별로 다시 세분화하였다. 국토해양부의 통합 12 차종 분류 체계에서 1종과 2종은 사람 수송에 활용되는 차종이고 3종 이상은 화물수송용이다. 또한 차량 축수 측면에서 보면 2축 차량은 승용, 승합, 소형 화물이 포함되고 3축 이상 차량은 중대형 화물차량이다. 도로포장을 측면에서는 3축 이상의 중대형 화물차량이 보다 큰 의미를 갖는다.

4.3 차로 폭에 따른 좌우측 바퀴의 평균 위치의 동일성 검증

차로 폭 요인에 따른 바퀴위치의 차이여부를 검증하기 위하여 일방향 분산분석을 시행하였다. 일방향 분산분석(One-way ANOVA)은 한 개의 실험요인에 대한 여러 개의 다른 처리(treatments)가 가져오는 효과에 대한 차이를 검증하는 것으로 인자 수준에 따른 반응값의 차이를 알고자 할 때 사용하는 방법이다. 차로 폭에 따른 좌측 바퀴위치의 평균값에 차이가 있는지에 대한 검증하기 위하여 귀무가설과 대립가설을 각각 다음과 같이 설정하였다. 또한 우측 바퀴에 대해서도 동일한 검정을 하였다.

차종별 차로 폭에 따른 평균의 차이 검정:

좌측바퀴의 검정: $H_0: \mu_{\text{좌측}, 3.25} = \mu_{\text{좌측}, 3.50}$,

$H_1: \mu_{\text{좌측}, 3.25} \neq \mu_{\text{좌측}, 3.50}$

우측바퀴의 검정: $H_0: \mu_{\text{우측}, 3.25} = \mu_{\text{우측}, 3.50}$,

$H_1: \mu_{\text{우측}, 3.25} \neq \mu_{\text{우측}, 3.50}$

차량 축수별 차로 폭에 따른 평균의 차이 검정:

좌측바퀴의 검정: $H_0: \mu_{\text{좌측}, 3.25} = \mu_{\text{좌측}, 3.50}$,

$H_1: \mu_{\text{좌측}, 3.25} \neq \mu_{\text{좌측}, 3.50}$

우측바퀴의 검정: $H_0: \mu_{\text{우측}, 3.25} = \mu_{\text{우측}, 3.50}$,

$H_1: \mu_{\text{우측}, 3.25} \neq \mu_{\text{우측}, 3.50}$

좌우 바퀴위치의 평균값은 95%신뢰수준에서 〈표 5〉에서 보는 바와 같다. 좌측 바퀴의 경우 2축과 3축이상의 차량에서 각각 18.38cm, 24.65cm의 차이가 남을 알 수 있다. 차로 폭이 넓은 경우가 좁은 경우보다 위치의 표준편차가 큰 것을 알 수 있다. 즉, 차로 폭이 넓은 경우가 원터링 폭도 넓은 것을 알 수 있다. 평균의 차에 대한 일방향 분산분석(One-way ANOVA) 결과는 〈표 6〉에서와 같다.

〈표 6〉에서 보는 것과 같이, 분석 결과 유의확률이 $P=0.000$ 으로 유의수준(0.05)보다 작으므로 귀무가설을 기각한다. 따라서 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서는 차로 폭 3.25m와 3.50m에서 바퀴 위치의 평균값은 같다고 볼 수 없다. 즉 차량의 종류별로 차로 폭에 따라서 차량의 바퀴위치는 평균위치는 서로 상이함을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구

도로를 주행하는 차량들이 모두가 동일한 궤적으로 주행하는 것은 아니기 때문에 도로포장에 가해지는 차량의 하중은 차로 내에서 횡방향으로 위치에 따라 다르게 작용한다. 차량의 바퀴궤적에 의한 횡방향 변동을 의미하는 원터링은 결국, 차량의 하중이 포장체에 한 점에 집중되거나 또는 균일하게 전달되는 것이 아니라 횡방향으로 분포를 형성하게 한다. 개정중에 있는 포장설계법 또한 이러한 측면을 고려하여 원터링을 포장 설계인자로 포함하려고 노력중이다.

바퀴궤적 조사는 선형에 의한 영향을 배제시키기 위하여 일반국도의 직선구간에서 이루어졌으며, 왕복 2차로(3.5 m 차로 폭)와 4차로(3.25 m 및 3.5 m 차로 폭) 구간에서 좌측 차선에서 좌측 바퀴까지의 거리인 좌측 여유폭을 측정하였다. 이들 자료에 대한 정확성을 기존의 상시 교통량 조사 장비의 자료와 비교하여 속도 및



산출한 축간거리의 정확도를 평가하였다. 해당 자료에 대하여 차량용도별(승용승합, 화물차)과 차량축수별(2축 차량과 3축 이상 차량)로 구분했으며, 이들 차량구분 각각에 대하여 좌측 바퀴의 위치와 우측바퀴의 위치에 대한 평균과 표준편차를 제시하였다. 또한 이들 값이 차로 폭에 따라서 통계학적으로 서로 상이하다는 것을 일방향 분산분석을 통해서 규명하였다.

차로 폭 3.25m 도로에서는 좌측바퀴와 우측바퀴 위치의 평균은 좌측차선을 기준으로 할 때 승용승합차량은 경우는 59.54cm와 221.62cm이고 화물차량은 58.35cm와 228.19cm로 산출되었다. 3.5m 차로 폭에서는 승용승합차량은 80.70cm와 238.15cm 이고 화물차량에서는 73.62cm와 251.65cm로 산출되었다. 동일한 자료에 대하여 차량의 종류를 2축 차량과 3축 이상 차량으로 구분했을 때는 차로 폭 3.25m인 경우 2축의 경우 좌측바퀴와 우측바퀴는 60.68cm와 221.75cm이고, 3축이상의 차량에서는 44.51cm와 253.35cm로 산출되었다. 또한 3.5m 차로 폭에서는 2축 차량의 좌측바퀴와 우측바퀴의 위치는 79.06cm와 236.50cm이었고, 3축 이상 차량에서는 각각 69.16cm와 280.19cm인 것으로 산출되었다.

이러한 연구는 많은 사례조사를 통하여 일반화하는 과정을 거쳐서 도로의 설계인자로 확정할 필요가 있다. 향후 연구에서는 포장에 가해지는 차량의 하중의 크기별로 해당 하중이 작용하는 위치에 대한 검토가 필요할 것으로 본다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 중앙대학교 학술연구비 지원의 한 것입니다.

참고문헌

1. 국토해양부, 도로 교통량조사지침, 2001.
2. 오주삼, 김종훈, 단일 센서(Single Sensor)를 활용한 차량 속도 추정에 관한 연구, 대한토목학회 논문집 26권-3D호, 대한토목학회, 2006, pp. 461-467.
3. 오주삼, ITS 요소장비 성능평가 방안제시 및 시스템 평가센터 검토연구 부록 3:(차량 검지기 검증용 이동식 장비 개발), 한국건설기술연구원, 2001.

4. 조명환, 김낙석, 남영오, 임종혁, 차량의 이동하중과 하중 형태가 연성 포장의 거동 특성에 미치는 영향 평가, 한국방재학회 논문집 제8권1호, 한국방재학회, 2008, pp. 39-45.
5. 김낙석, 정진훈 이재훈, 박창우, 월더링 장비 적용을 통한 아스팔트 포장 거동 특성 연구, 대한토목학회논문집 제26권-제1D호, 대한토목학회, 2006, pp. 89-94.
6. 강민수, 차량 Wandering의 포장손상 저감 정량화 연구, 석사학위 논문, 한양대학교, 2001.
7. Thomas D. White, and John E. Haddock, Adam J.T.Hand, Hongbing Fang, Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements, *NCHRP Report 468*, 2002.
8. Nicholas J Hornyak, James A Crovetti, David E. Newman, Jay P.Schabelski, Perpetual Pavement Instrumentation for the Marquette Interchange Project-Phase 1, *Transportation Research Center Marquette University August 2007*.
9. Kasahara, A., Wheel Path Distribution of Vehicles on Highway, *Proceedings of the International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Vol. Trondheim, Norway, 1982, pp. 413-420.
10. Haddock, J., C. Pan, A. Feng, K. Galal, and T.D. White, *National Pooled Fund Study No. 176*: Validation of SHRP Asphalt Mixture Specifications Using Accelerated Testing, Interim Report, Indiana Department of Transportation, 1998.
11. Chakroborty partha, Das Animesh, Principles Of Transportation Engineering, Prentice-Hall, 2003.
12. Buitter, R., W.M.H.Cortenraad, A.C. van Eck, And H.van Rij, Effects of Transverse Distribution of Heavy Vehicles on Thickness Design of Full-Depth Asphalt Pavemnets, *Transportation Research Record 1227*, Transportation Research Board, Washington, D.C. 1989.
13. Nicholas J Ohrnyak, James A Crovetti, David E.



- Newman, Jay P. Schabalski, Perpetual Pavement Instrumentation for the Marquette Interchange Project Phase 1 Final Report, *WHRP 07-11*, 2007.
14. Nicholas J Hornyak, James A Croveti, David E. Newman, Jay P. Schabalski, "Perpetual Instrumentation for the Marquette Interchange Project SPR# 0092-06-01", *the Wisconsin Highway Research Program by the Wisconsin Department of Transportation and the Federal Highway Administration*, Transportation Research Center, Marquette University, 2007.
15. Jeffrey J. Stempihar, R. Christopher Williamms, Thomas D. Drummer, Quantifying the Lateral Displacement of Trucks for use in Pavement Design, *TRB 2005 Annual Meeting*, 2005.
16. Feng Hong, Jorge A. Prozzi, Evaluation of Equipment, Methods, and Pavement Design Implications of the AASHTO2002 Axle Load Spectra Traffic Methodology, *Center for Transportation Research at The University of Texas at Austin August*, 2006.

접 수 일 : 2008. 5. 14
심 사 일 : 2008. 6. 2
심사완료일 : 2008. 8. 27