

# WIM 자료를 활용한 화물차 축하중 분포 모형 개발

## Development of Truck Axle Load Distribution Model using WIM Data

이동석\* · 오주삼\*\*  
Lee, Dong Seok · Oh, Ju Sam

### Abstract

Traffic load comprise primary input to pavement design causing pavement damage. therefore it should be proceeded suitable traffic load distribution modeling for pavement design and analysis. Traffic load have been represented by equivalent single axle loads (ESALs) which convert mixed traffic stream into one value for design purposes. But there are some limit to apply ESALs to other roads because it is empirical value developed as part of the original AASHO(American Association of State Highway Officials) road test. There have been many efforts to solve these problems. Several leading country have implemented M-E(Mechanistic-Empirical) design procedures based on mechanical concept. As a result, they established traffic load quantification method using load distribution model known as Axle Load Spectra. This paper details Axle Load Spectra and presents axle load distribution model based on normal mixture distribution function using truck load data collected by WIM system installed in national highway. Axle load spectra and axle load distribution model presented in this paper could be useful for basic data when making traffic load quantification plan for pavement design, overweight vehicle permit plan and pavement maintenance cost plan.

**Keywords :** axle load, axle type, weigh-in-motion, normal mixture distribution model

### 요 지

교통하중은 포장 설계 및 해석에서 가장 중요한 입력 변수로서 포장 파손의 주요 원인이 된다. 따라서 정확한 포장 설계 및 해석을 위해서는 적절한 교통하중 정량화가 선행되어야 한다. 전통적으로 교통하중은 혼합된 교통흐름을 설계목적의 하나의 값으로 변환시켜주는 ESALs 관점에서 추정되어왔으나 이는 AASHO 도로 테스트를 통해 도출된 지극히 경험적인 값으로 전 노선망에 대해 평균적인 계수로 적용하기에는 한계가 있다. 이러한 등가단축하중계수의 문제점을 해결하기 위해 선진국에서는 역학적 개념을 도입한 많은 연구를 진행한 결과 역학적-경험적 설계법(Mechanistic-Empirical Design)에 적용할 수 있는 축하중 분포(Axle Load Spectra)를 이용한 교통하중 정량화 방안을 수립하였다. 본 논문에서는 일반국도에 설치·운영되고 있는 WIM 시스템을 통해 수집된 화물차 하중 데이터를 이용하여 축하중 분포 특성(Axle Load Spectra)을 이해하고 혼합정규분포함수에 기초한 축 형태별 하중 분포 모형을 제시하였으며, 이를 기존 하중 분포 모형과 비교 평가하였다. 본 논문에서 제시한 화물차 축하중 분포 특성 및 축하중 분포 모형식은 향후 일반국도 및 고속도로의 포장 설계법 개발을 위한 교통하중 정량화 방안 수립 시, 과적 차량 단속 정책 수립 시, 도로 유지관리를 위한 계획 수립 시 기초자료로써 활용 가능하다.

**핵심용어 :** 축하중, 축 배열 형태, 동적 하중 측정 장비, 혼합정규분포모형

### 1. 서 론

교통하중은 포장 설계 및 해석에서 가장 중요한 입력 변수이고, 시공 후 공용 시에는 포장 파손의 주요 원인이 된다. 교통하중이 작용하면 포장체 내부에는 응력(Stress)과 변형(Strain)이 발생되고, 이것이 포장체 강도보다 커지게 되면 포장체는 파손된다. 따라서 정확한 포장 설계 및 해석을 위해서는 적절한 교통하중 정량화가 선행되어야 한다. 포장체에 작용하는 교통하중을 완전히 해석하기 위해서는 중차량

대수, 축하중의 동적 분포, 각 축별 윤하중의 분포, 타이어의 종류 및 압력, 타이어 압력의 분포 등 많은 요소를 고려하여야 한다.

교통하중 정량화 방법은 등가단축하중계수(ESALF; Equivalent Single Axle Load Factor)를 이용하는 방법과 축하중 분포(Axle Load Spectra)를 이용하는 방법으로 구분된다. 등가단축하중계수는 기존 AASHO 설계법에서 사용되고 있지만 AASHO 도로 테스트에서 만들어진 경험적인 방법이라는 한계점이 있다. 즉 제한된 재료와 환경조건에서

\*한국건설기술연구원 첨단도로시스템연구센터 UST 석사과정 (E-mail : geenzo@kict.re.kr)

\*\*정회원 · 한국건설기술연구원 첨단도로시스템연구센터 선임연구원 (E-mail : jusam@kict.re.kr)

이루어진 시험의 결과를 다른 환경과 조건의 포장체에 적용하게 되면 동일 축에서 다양한 하중범위를 가지는 축하중과 환경변화에 따른 축하중의 영향을 간과하여 부정확한 결과를 유발할 수 있다. 이러한 등가단축하중계수의 한계점을 극복하기 위해 선진국에서는 역학적 개념을 도입한 많은 연구를 진행한 결과 역학적-경험적 설계법(Mechanistic-Empirical Design)에 적용할 수 있는 축하중 분포를 이용한 교통하중 정량화 방안을 수립하였다.

본 연구에서는 일반국도에 설치되어 있는 WIM 시스템을 통해 수집된 화물차량의 하중 자료를 바탕으로 화물차의 축하중 분포 특성을 분석하고 축 형태별 하중 분포 모형식을 개발하였다. 축하중 분포 특성에 대한 이해는 과적 차량 단속 정책 수립을 위한 기초자료로써 활용 가능하며, 축하중 분포 모형식의 개발은 교통하중 정량화 방안 수립이라는 국내 포장 설계법 개발을 위한 선행과제로써 그 의미가 있다.

## 2. 기존 연구 고찰

### 2.1 기존 연구 사례

지금까지 하중 분포 특성 모델의 수치식을 정립하려는 많은 연구가 진행되어 왔다(Liu et al., 1988; Mohammad and Shah, 1992; Kim et al., 1998; Huang et al., 2002). 이는 하중 분포 특성 모델이 Monte Carlo 시뮬레이션과 같은 수치적 기술을 통해 신뢰도의 개념을 확립하는데 도움이 될 것이기 때문이다. 예를 들어, Monte Carlo 시뮬레이션을 사용할 경우, 이산적인 확률밀도함수보다는 수식을 사용하는 것이 산술적으로 보다 유의하다. 또한 하중 분포 특성을 표현하는 면에서도 이들 값들이 들어간 테이블보다는 수식으로 표현하는 것이 분명히 보다 수월하다. 두 명의 앞선 연구자들은(Liu et al., 1988; Mohammad and Shah, 1992) 이론상의 분포를 복잡한 축하중 분포에 적합화 시키려고 시도하였다. Mohammad and Shah(1992)는 법정 제한 하중의 초과 여부에 관점을 두어 총하중 자료를 두 개의 그룹(법정 제한 하중의 상·하)으로 나누어서 각각의 카테고리를 모델링 하는 개별적인 분포를 사용하였다. 분석 결과 비록 베타 분포가 유의한 수준에서 카이스퀘어 테스트를 통과하지 못하였지만 에러의 최소함을 이끌어낸다는 것을 발견하였다. 보다 최근에, Kim et al.(1998)은 LTPP<sup>1)</sup> 프로젝트에서 수집된 축 하중 자료를 사용하여 하중 분포 특성 모델을 개발하였으며, 하중의 누적밀도함수(Cumulative Density Function)를 4개의 구간으로 나누어 구간별 모형식을 도출하였다. 이 논문에서 지역별 축하중 분포에 통계적인 차이가 있었지만, 지역을 특성별로 3개, 8개 정도로 그룹화 하였을 때는 이 차이가 미비하게 나타났다. 비슷한 접근이 타이완의 연구자에 의해 수행되었고 이 연구에서는 하중의 누적밀도 함수를 하중 계급별로 5개 구간으로 나누었다(Huang et al., 2002). 이 연구에서는 타이완 고속도로 4개 지점에서 약 10년간 수집된 하중 자료를 사용하였으며, 단일축과 tandem축의

1) LTPP(Long Term Pavement Performance)는 실제 운영 중인 도로포장에 대한 장기적인 공용성을 관측하여 포장층의 물성, 환경 인자, 교통 하중 등과의 관련성을 밝히는 연구 프로젝트이다.

표 1. 기존 하중 분포 모형 정리

분포 함수	기존 문헌	분포 모형
확률밀도함수	Mohammad & Shah(1992)	혼합베타분포
	Liu et al.(1988)	로그정규분포
	Timm et al.(2005)	혼합분포
누적밀도함수	Kim et al.(1998)	3차곡선
	Huang et al.(2002)	3차곡선
	한국형 포장 설계법(2004)	S곡선

하중 계급별로 각각 다른 모형식을 적용하였다.

축하중 분포 특성과 관련된 최근의 연구에서 Timm et al.(2005)은 복잡한 축하중 분포를 특성화하기 위해서 로그정규분포와 정규분포의 선형 조합을 사용한 혼합분포모형을 적용하였다. 또한 Turochy et al.(2005)는 축하중 분포 특성의 시·공간적 차이에 대해 통계적이고 실제적인 중요성을 시험하였으며, 포장 두께 설계에 미치는 영향 또한 분석하였다. 분석 결과 대부분의 경우에서 일별·월별 축하중 분포 특성은 통계적으로 확인한 차이를 보였다. 하지만 시·공간적으로 다양한 경우에 대해서 포장 두께 설계에 대한 영향은 무시할 수준이었다.

### 2.2 기존 연구의 문제점 분석

누적밀도함수 형태의 축하중 분포 모형 개발과 관련된 초기 연구(Kim et al., 1998)를 통해 매우 높은 적합도를( $R^2$ 가 0.96 이상) 산출하였으나, 제기되어야 할 몇 가지 중요한 문제점이 발견되었다.

첫째, 이론상으로는 축 하중의 범위를 많은 부분으로 나눔으로써 1에 가까운 값을 얻을 수 있었다. 즉 다시 말해서 누적밀도함수를 충분한 계급 구간으로 나눔으로써 관측 하중 자료와 모형 사이에 매우 좋은 적합도를 얻을 수 있었다. 하지만 하중 계급으로 작은 부분을 사용함으로써 모형의 자유도가 떨어졌다. 왜냐하면 보다 많은 회귀 분석 인자들이 고려되어야 했기 때문이다. 예를 들어 기존 연구(Kim et al., 1998; Huang et al., 2002)에서 조사된 축 형태에 대해 지점 당 약 16~20개의 회귀 계수가 산출되었다. 이는 관측 자료수가 적을 경우, 회귀분석 과정에서 이 방법이 바람직하지 않음을 의미한다. 또한 이 방법은 구간을 나누는 과정이 객관적인 기준에 의한 것이 아니라 연구자의 주관에 개입된다는 문제점이 있다. 둘째, 관측된 축하중을 적합화 시키기 위한 이산적이고 불연속적인 다항식을 사용함으로써 높은 값에도 불구하고 통계적으로 큰 의미가 없다. 즉, 실용적이고 이론적인 관점에서 통계적인 의미를 갖는 모델을 만드는 것이 중요하다.

본 연구에서 제시된 것과 같은 이론적이고 통계적인 분포의 사용이 축 하중 분포 특성을 보다 명확하게 설명할 수 있다. 이 점은 Mohammad & Shah(1992)에 의해서도 관측되었다. 예를 들어, tandem축 하중의 빈도 분포는 두 개의 확률분포가 합쳐져서 구성된다. 이는 이어지는 두 개의 종형 곡선의 형태이다. 이럴 경우 축 하중 범위의 이산적 구간에 대한 다항식보다는 이론적인 분포에 기반을 둔 하중 분포 특성 모델로 개발하는 것이 가능하다. 이는 하중 분포 특성

에 이론적이고 통계적인 의미를 부여하고, 하중 분포 특성을 묘사하는 수학적 함수를 제공하는 소수의 회귀분석 인자를 갖는다는 이점이 있다.

### 3. 축하중 분포 모형 개발

#### 3.1 자료 수집 및 축 형태 구분

본 연구는 도로교통량 조사지점 중 일반국도 3호선의 동두천-전곡 구간에 설치되어 있는 WIM 시스템에서 수집한 화물차량의 하중 자료를 사용하였다. 일반국도에 설치되어 있는 피에조 방식의 WIM 시스템은 축하중에 대해  $\pm 30\%$ 의 오차 허용범위를 갖는다. 그러므로 자료의 신뢰성을 확보하기 위해서는 WIM 시스템에 대한 보정(calibration)이 필요하며, 자료 수집 기간 동안 해당 지점에서 두 차례의 보정이 수행되었다. 보정과정은 정적 계중기를 사용하여 미리 하중을 측정된 시험 차량을 이용하여 하중 오차가 시스템 오차범위 내에서 만족할 때까지 차로별로 수십 회 반복 수행하는 방법으로 진행되었다. WIM 시스템으로 측정된 차량 하중은 축하중 및 축하중을 합산한 총하중 형태로 검출된다. 본 연구에서 사용된 동두천-전곡 구간의 WIM 시스템이 설치된 지점은 양방향 4차로 도로이며, 2005년 연평균일교통량(Annual Average Daily Traffic, AADT)은 16,931 대/일이다. 전체 교통량중 화물차(5종~11종 트럭)의 비율로 정의되는 화물차 혼입률 및 차로별 화물차 구성 비율은 아래 그림과 같다.

그림 1, 2와 같이 해당 지점을 통행하는 차량 중 대부분은 승용차이며, 화물차 중에는 5종, 6종, 8종의 순으로 관측 빈도수가 많았으며, 9종과 11종 차량은 관측빈도가 미비하여, 전체 화물차량에 미치는 영향은 무시할 수 있는 수준이었다.

관측한 전체 화물차는 69,558 대이며, 축 수로는 161,404 축이다. 여기서, 탠덤축과 같이 세부적으로 두 개 이상의 축

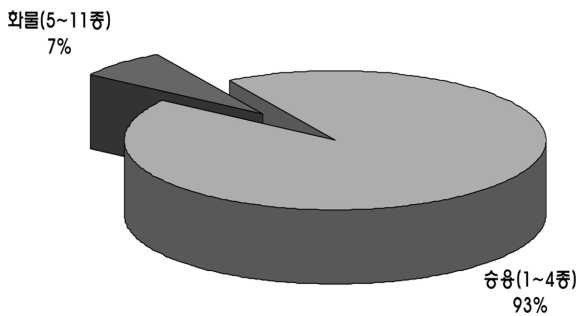


그림 1. 화물차 혼입률

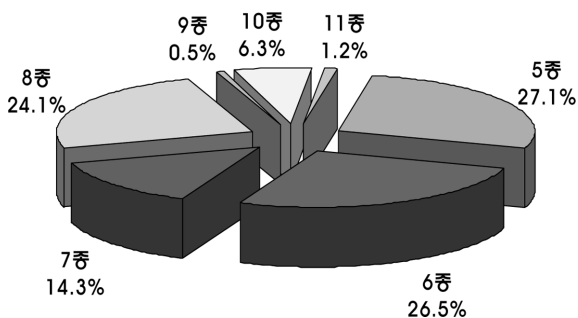


그림 2. 차종별 화물차 구성비

표 2. 수집 자료 현황

차량 수(N=69,558대)					
차로	상행1차로	상행2차로	하행1차로	하행2차로	합계
5종	5,007	2,002	6,877	4,993	18,879
6종	3,994	3,357	4,431	6,653	18,435
7종	1,293	848	3,419	4,396	9,956
8종	2,683	1,081	5,632	7,361	16,757
9종	109	7	139	35	290
10종	768	350	1,450	1,807	4,375
11종	247	273	165	181	866
합계	14,101	7,918	22,113	25,426	69,558

축 수(N=161,404축)					
차종	상행1차로	상행2차로	하행1차로	하행2차로	합계
5종	10,014	4,004	13,754	9,986	37,758
6종	7,988	6,714	8,862	13,306	36,870
7종	2,586	1,696	6,838	8,792	19,912
8종	8,049	3,243	16,896	22,083	50,271
9종	327	21	417	105	870
10종	2,304	1,050	4,350	5,421	13,125
11종	741	819	495	543	2,598
합계	32,009	17,547	51,612	60,236	161,404

으로 구성되어 있는 연속축은 하나의 축으로 간주하였다. 차량 축 형식은 일반적으로 단일축(single axle)과 연속축(consecutive axle)으로 나눌 수 있으며, 연속축은 다시 세부 축수에 따라 축수가 두 개인 탠덤축(tandem axle)과 세 개인 경우의 트라이템축(tridem axle)으로 구분할 수 있다. 연속축은 외견상 두 개 이상의 축으로 보이지만 타이어를 통해 차량의 하중과 직접 반응하는 도로나 교량 구조물 측면에서는 기계적인 하중 등분배(load equalization) 기능을 가지고 있어 하나의 축으로 보는 것이 합리적이다. 이러한 연속축은 차량의 하중을 타이어에 고르게 분산시켜 도로나 교량 구조물에 미치는 악영향을 최소화하기 위한 목적으로 주로 화물차와 같은 중차량에 설치된다. 본 연구에서는 단일축을 다시 조향 기능만을 담당하는 조향축(steering axle)과 직접적으로 차량 하중을 받는 싱글축(single axle)으로 구분하였다. 또한 축 형태 구분 시 8종 화물차량 1\_2축의 경우 축간거리만으로는 탠덤축으로 구분할 수 있지만 축의 형태 및 기능상으로 볼 때 단일축으로 구분하는 것이 바람직하였다. (표 3)은 차종별 화물차량 축 배열 형태를 나타낸 것으로, 대상 차량의 축 수나 축 형식, 타이어 개수 등에 대한 이해를 돕기 위하여 차종별 화물차의 하면도(bottom view)를 제시하였다.

#### 3.2 모형 개발 방법론

##### 3.2.1 혼합 정규 분포 모형(Normal Mixture Distribution Model)

본 연구에서는 화물차량의 하중 분포를 특성화하기 위하여 이론적인 분포함수를 결합한 형태의 혼합분포모형을 사용하였다. 그림 3과 같이 화물차량의 하중분포는 화물 적재에 따른 특성으로 인해 다수의 피크를 갖는 특성을 보인다. 그

표 3. 차종별 화물차 축 배열형태

차종 및 하면도		축 형식				
		1축	2축	3축	4축	5축
5종		steering	single			
6종		steering	tandem			
7종		steering	tandem			
8종		steering	single	tandem		
9종		steering	single	tandem		
10종		steering	tandem		tandem	
11종		steering	tandem		tridem	

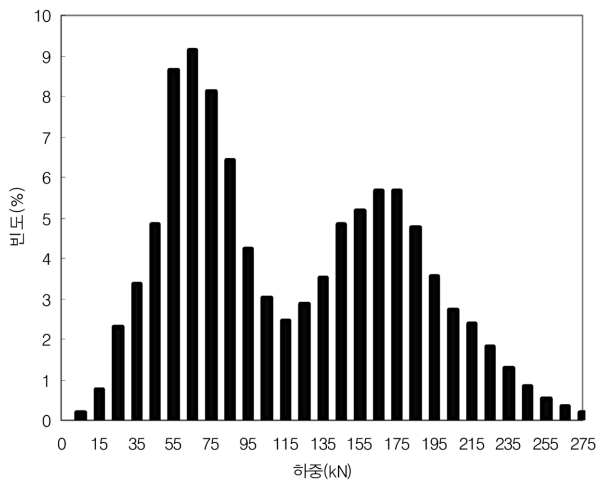


그림 3. 화물차량의 하중 분포

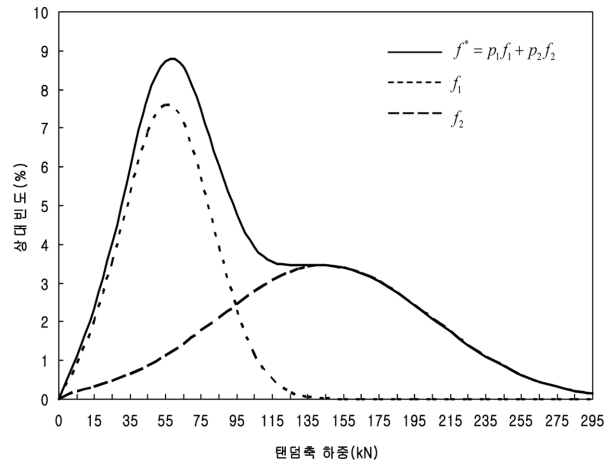


그림 4. 혼합 분포 함수의 구성

르므로 이를 두 개 이상의 이론적인 분포의 합으로 분해하는 것이 가능하다. 그림 4는 개별 정규분포와 이의 결합 형태인 혼합분포를 나타낸 것이다.

혼합분포함수의 확률밀도함수는 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며, 혼합정규분포 모형식은 식 (2)와 같다. 또한 혼합분포모형을 구성하는 개별 분포함수는 측정된 하중분포를 명확하게 모델링할 수 있어야 하며 또한 일반적으로 널리 알려진 분포함수를 사용할 것이 요구된다. 이에 본 연구에서는 개별 분포함수  $f_1, f_2$ 로 정규분포함수를 사용하였다. 식 (1)에서  $p_1, p_2$ 는 전체 함수  $f^*$ 에 대한 개별 분포함수의 비율을 나타내며, 정규분포의 확률밀도함수는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f^* = p_1 f_1 + p_2 f_2 \quad (1)$$

$$f(x|\Phi) = p_1 N(x; \mu_1, \sigma_1^2) + (1-p_1) N(x; \mu_2, \sigma_2^2) \quad (2)$$

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

여기서,

$f^*$  = 혼합 정규 분포 함수

$f_1, f_2$  = 정규 분포 함수

$p_1, p_2 = f_1, f_2$ 의 구성비(단,  $p_1 + p_2 = 1$ )

$\mu_1, \mu_2 = f_1, f_2$ 의 평균

$\sigma_1^2, \sigma_2^2 = f_1, f_2$ 의 분산

### 3.2.2 모수 추정 과정

개별 정규분포 함수식(식 (3))을 혼합분포 모형식(식 (1))으로 바꾸는 과정은 다섯 개의 알려지지 않은 모수들( $p_1, \mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2$ (단,  $p_2=1-p_1$ ))을 추정함으로써 가능하다. 모수 추정 과

표 4. EM 알고리즘 연산 과정s

EM 알고리즘	
[단계 1]	초기화 단계 $\theta^{(0)}$ 를 초기값으로 정한다.
[단계 2]	반복 단계 $t=0, 1, 2, \dots$ 에 대해 다음의 두 과정을 반복한다. (a) E-step 관측 자료와 현재의 해 $\theta^{(t)}$ 에 의해 조정된 완전한 자료의 log-likelihood 기대값을 계산한다. $Q(\theta \theta^{(k)}) = \sum_y [E[\log p(x \theta) y, \theta^{(k)}]]$ (b) M-step $Q(\theta \theta^{(k)})$ 를 최대화시키는 $\theta$ 를 $\theta^{(k+1)}$ 로 놓는다.
[단계 3]	종료 단계 $Q(\theta^{(k+1)} \theta^{(k)}) - Q(\theta^{(k)} \theta^{(k-1)}) \leq \epsilon, \forall \epsilon > 0$ 을 만족하면 반복과정을 종료한다.

정은 EM 알고리즘을 사용하여 이루어졌다. EM 알고리즘을 통한 모수 추정과정은 다음과 같은 단계를 거친다.

### 3.3 EM 알고리즘 검정 과정

#### 3.3.1 샘플수에 대한 검정

추정된 모수값을 토대로 R프로그램을 사용하여 하중자료를 랜덤하게 생성시킨 후, EM 알고리즘을 통해 모수 추정 과정을 다시 수행함으로써 프로그램을 검정하였다.

#### 3.3.2 Iteration 수에 대한 검정

본 연구에서 EM 알고리즘을 통한 모수 추정 시 15번의 반복계산을 실시하였다. 이 과정에서 iteration 수에 따른 모수의 변화 과정을 요약해보면 다음과 같다.

전체적인 모형 개발 과정과 모수 추정과정을 단순하게 표현하면 그림 7, 8과 같다.

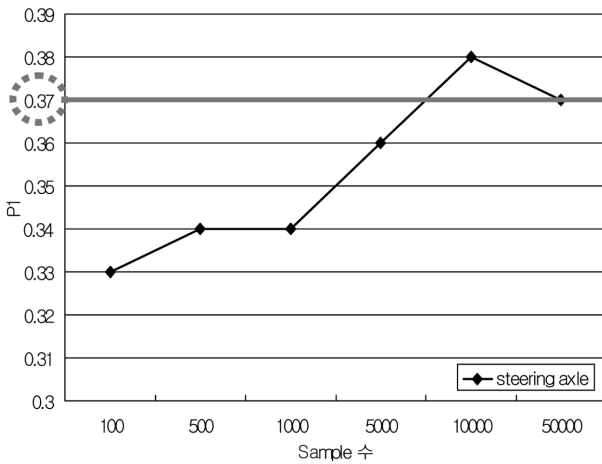


그림 5. 샘플수에 따른 모수 변화

표 5. 샘플수와 모수의 상관관계

모수	$p_1$	$p_2$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$
기준값	0.37	0.63	21.10	55.62	51.28	442.99
n=100	0.33	0.67	20.81	46.54	46.20	364.03
n=500	0.34	0.66	21.38	45.71	47.91	445.87
n=1000	0.34	0.66	19.76	43.78	51.59	456.71
n=5000	0.36	0.64	21.07	54.44	51.20	479.37
n=10000	0.38	0.62	21.02	59.46	51.48	435.09
n=50000	0.36	0.64	21.05	53.82	51.25	442.55

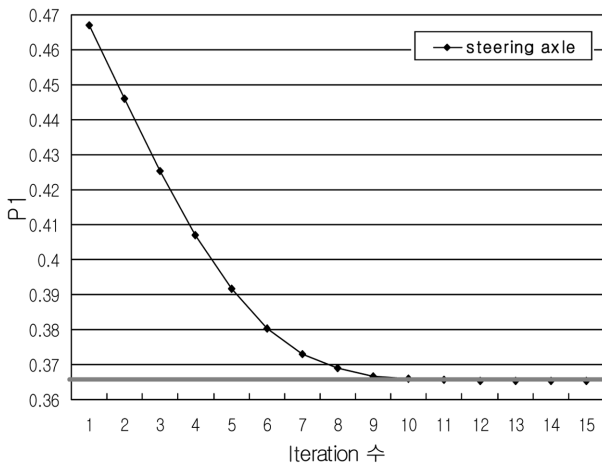


그림 6. Iteration 수에 따른 모수 변화

표 6. Iteration 수와 모수의 상관관계

iteration 수	$p_1$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$
1	0.47	22.24	56.03	71.20	365.94
5	0.39	21.59	52.27	62.24	433.79
10	0.37	21.11	51.30	55.74	442.81
15	0.37	21.10	51.28	55.62	442.99

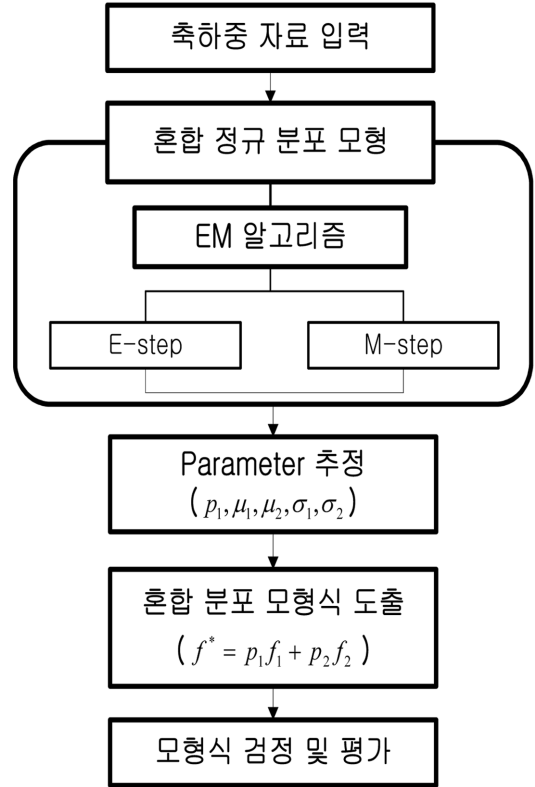


그림 7. 모형 개발 과정

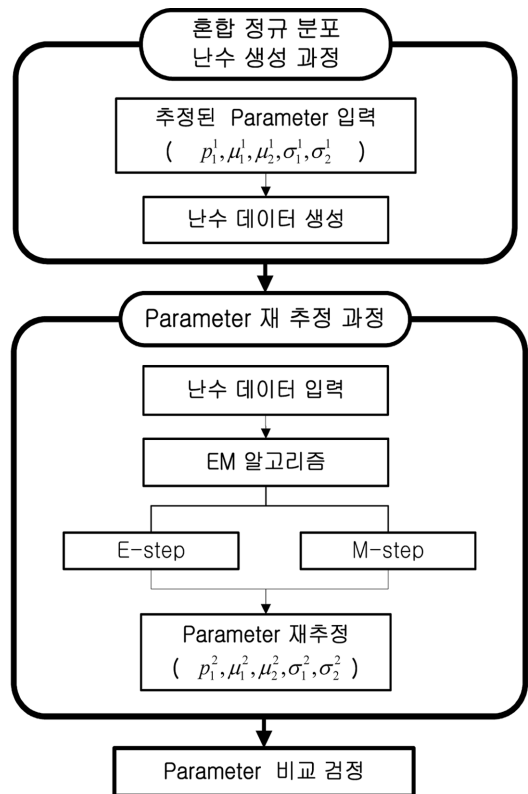


그림 8. 모수 검정 과정

표 7. 차종별 혼합분포 모형 모수

차종	측 형태	$p$		$f_1$		$f_2$		$R^2$
		$p_1$	$p_2$	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	
5종	S1	0.84	0.16	18.16	6.83	34.66	13.43	1.00
	S2	0.67	0.33	19.69	8.25	48.14	23.76	0.96
6종	S1	0.60	0.40	23.08	6.86	48.08	16.18	1.00
	T1	0.63	0.37	38.90	13.01	116.02	58.85	0.93
7종	S1	0.39	0.61	46.85	13.00	52.41	23.35	0.99
	T1	0.64	0.36	79.37	28.97	149.79	53.61	0.98
8종	S1	0.46	0.54	38.88	13.52	69.78	20.10	0.98
	S2	0.33	0.67	39.13	13.63	67.69	21.32	0.99
	T1	0.47	0.53	64.30	21.26	167.32	42.28	0.98
9종	S1	0.43	0.57	41.34	13.44	45.32	6.49	0.99
	S2	0.60	0.40	59.34	18.65	66.58	4.83	1.00
	T1	0.50	0.50	46.38	3.99	51.07	20.20	0.99
10종	S1	0.73	0.27	49.45	13.03	60.30	22.82	0.99
	T1	0.35	0.65	69.29	19.87	131.05	44.55	0.97
	T2	0.33	0.67	51.20	16.77	166.96	50.94	0.93
11종	S1	0.19	0.81	10.70	4.12	49.02	19.28	0.85
	T1	0.14	0.86	17.63	7.18	90.82	46.14	0.83
평균		0.49	0.51	41.98	13.08	83.24	28.71	0.96

여기서, S1 : 첫 번째 단일축, S2 : 두 번째 단일축, T1 : 첫 번째 탠덤축, T2 : 두 번째 탠덤축

#### 4. 결과 및 비교

##### 4.1 분석 결과

본 연구에서는 축 형태별 화물차 하중 분포 모형을 제시하였다. 단일축인 조향축과 싱글축의 하중 분포는 유사한 형

표 8. 축 형태별 혼합분포모형 모수

축 형태	$p$		$f_1$		$f_2$		$R^2$
	$p_1$	$p_2$	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	
조향축	0.37	0.63	21.10	7.46	51.28	21.05	0.98
싱글축	0.30	0.70	19.58	7.65	55.92	23.80	0.95
탠덤축	0.53	0.47	53.93	22.39	147.23	52.80	0.91
평균	0.40	0.60	31.54	12.50	84.81	32.55	0.95

태를 보이지만, 피크 하중이 포함된 하중계급과 두 번째 피크 하중의 분포 특성에 차이가 있었다. 즉 직접적으로 적재 하중의 영향을 받는 싱글축의 경우 하중 분포의 범위가 크며 첫 번째 피크하중 빈도가 조향축보다 낮았다. 이는 예측 모형 모수값의 차이를 통해서도 확인할 수 있다. 또한 조향축을 포함한 단일축 하중의 빈도 분포는 첫 번째 피크 하중에 집중된 경향을 보였으며, 이에 비해 탠덤축 하중은 뚜렷한 쌍봉 분포 형태를 보였다.

본 연구에서 제시한 혼합 정규 분포 모형과 실제 관측 하중을 비교한 결과 축 형태별로 높은 적합도( $R^2$  0.9를 초과하는)를 얻을 수 있었다. 축 형태별로는 특히 조향축의 모형 적합도가 가장 높았으며, 탠덤축의 경우 첫 번째 피크하중이 정규분포에서 다수 이동된 경향을 보여 적합도가 다소 떨어

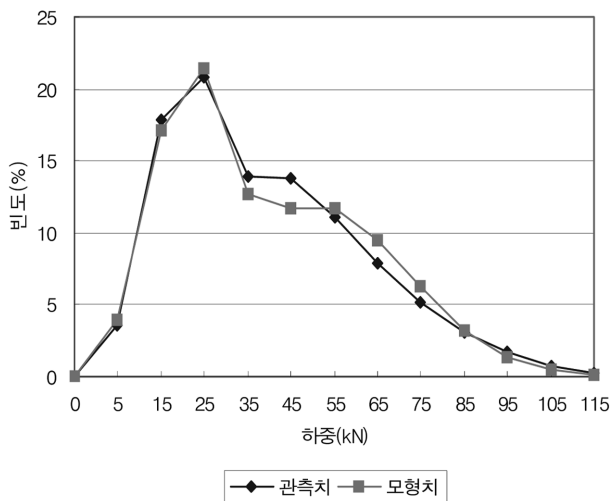


그림 9. 조향축 관측치와 모형치 비교

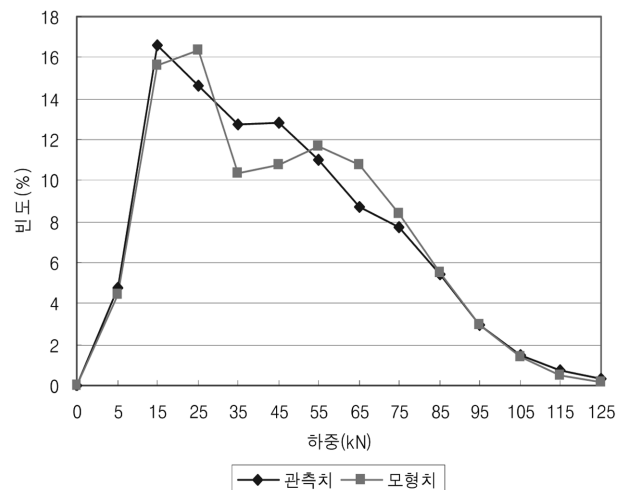


그림 10. 싱글축 관측치와 모형치 비교

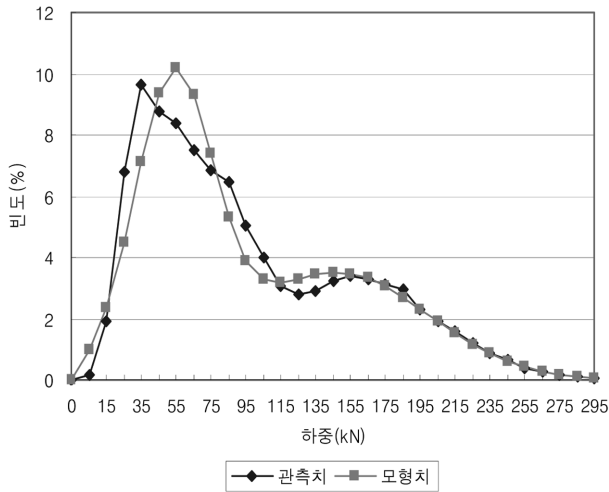


그림 11. 탠덤축 관측치와 모형치 비교

졌다. 차종별로는 11종의 모형 적합도가 떨어졌는데, 이는 11종 관측 자료수가 충분하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 점을 감안하더라도 축 형태별 하중 분포 모형의 예측치와 실제 관측치와의 적합도는 평균 0.95 이상으로 모형의 예측력이 우수하였다.

#### 4.2 기존 모형과의 비교

앞서 언급한바와 같이 기존 연구에서는 누적하중분포를 3차 곡선식이나 S곡선식을 사용하여 높은 적합도를 갖는 모형을 도출하였다. 하지만 아래 표에서 확인할 수 있듯이 누적하중분포를 사용한 모형은 누적밀도함수간의 비교에서는 높은 적합도를 보이지만, 이를 확률밀도함수로 세분하여 비교 하였을 때는 관측빈도와 예측빈도 사이에 많은 차이가 발생한다. 그림 12~14의 관측치와 혼합정규분포 모형치, 3차 곡선 모형치와의 비교를 통해 혼합정규분포모형식의 하중 분포 예측력이 3차모형식보다 우수함을 알 수 있다.

표 9. 3차 곡선식의 적합도

결정계수( $R^2$ )	조향축	싱글축	탠덤축	평균
누적하중분포	0.99	0.99	0.99	0.99
상대하중분포	0.79	0.93	0.50	0.74
평균	0.89	0.96	0.75	0.87

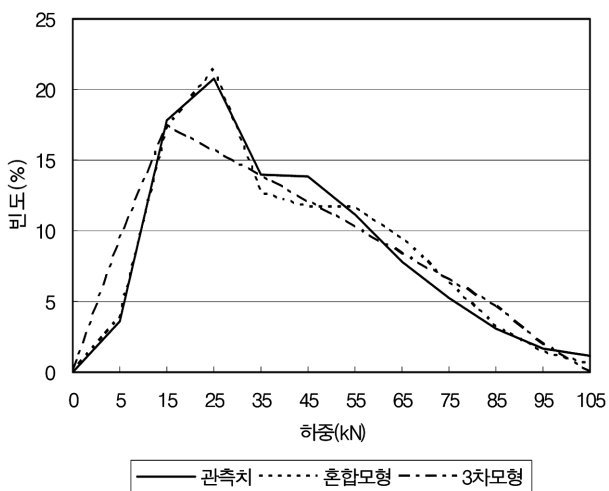


그림 12. 조향축 모형 비교

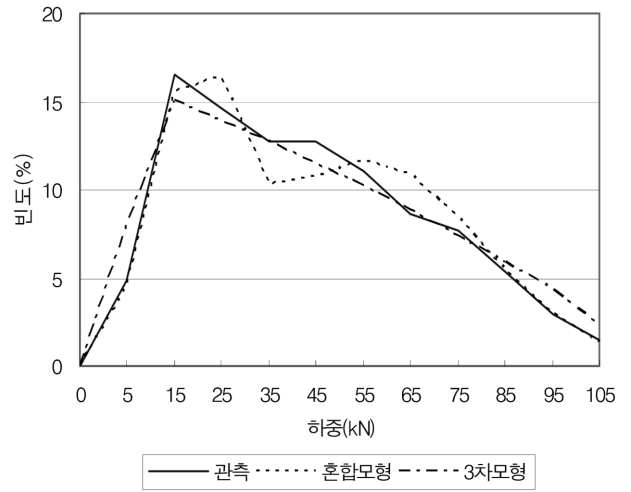


그림 13. 싱글축 모형 비교

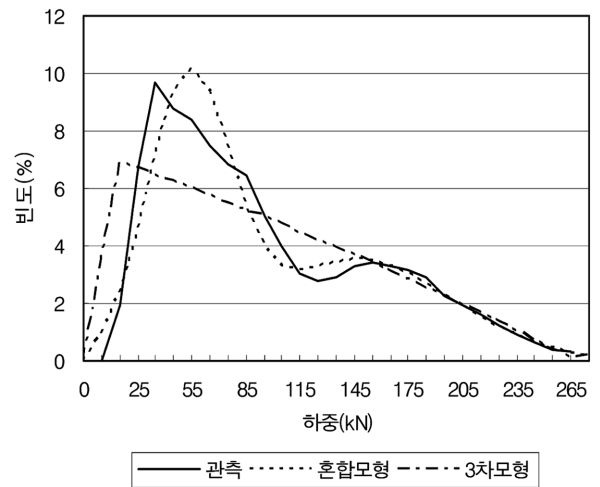


그림 14. 탠덤축 모형 비교

#### 4.3 다른 지점과의 비교

본 논문에서는 단일 지점에서 장기간에 걸쳐 수집한 하중 자료를 사용하여 축하중 분포 모형을 도출하였다. 하지만 이 결과는 공간적으로 국한된 것이므로 일반국도를 대표할 수 있는 화물차량의 하중 분포 특성으로 단정 지을 수는 없다. 향후 공간적으로 다양한 지점에서 장기간에 걸쳐 축하중 자료를 이용한 분석이 필요하겠지만, 현실적으로 이러한 하중자료가 충분치 않다는 문제점이 있다. 이에 본 논문에서 사용된 지점과 인접한 다른 조사 지점에서 이들에 걸쳐 하중자료를 수집하였으며 이 자료를 사용하여 같은 방법으로 축하중 분포 모형을 도출하여, 지점 간 하중 분포 특성 및 하중 분포 모형을 비교하였다.

##### 4.3.1 지점 간 하중 분포 모형의 비교

두 지점의 축하중 분포 형태를 비교한 결과, 축 형태별 하중 분포의 기본 패턴은 비슷하였으나 하중 자료의 수집 기간 및 자료 수집 지점 특성 등의 차이로 인해 피크하중의 분포 형태는 다소 차이가 있었다. 이러한 차이는 지점 간 모형식의 비교에서도 확인할 수 있다. 아래 그림에서 지점 B는 본 논문에서 사용된 장기간에 걸쳐 자료 수집이 이루어진 지점이며, 지점 A는 지점 간 하중 분포 형태의 비교를 위해 조사된 교통량 조사 지점이다. 그림 15~17은 지점 간

표 10. 혼합 분포 모형 모수

축 형태	$p$		$f_1$		$f_2$		$R^2$
	$p_1$	$p_2$	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	
조향축	0.65	0.35	27.86	12.33	63.46	25.65	0.90
싱글축	0.69	0.31	31.50	14.40	75.07	30.20	0.86
탠덤축	0.27	0.73	62.30	17.54	173.35	74.08	0.85
평균	0.46	0.54	45.08	14.94	118.40	49.87	0.88

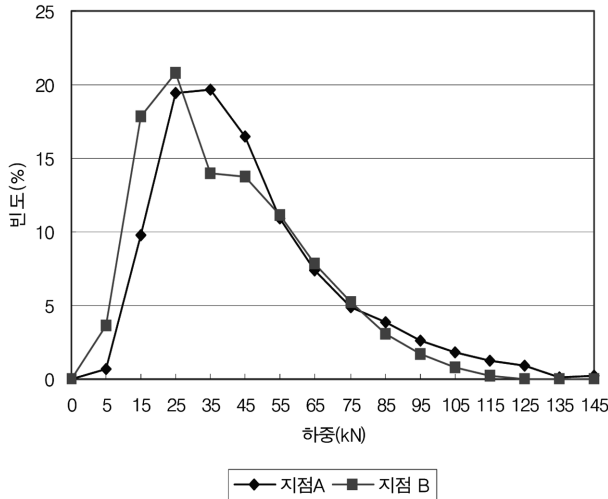


그림 15. 조향축 지점 비교

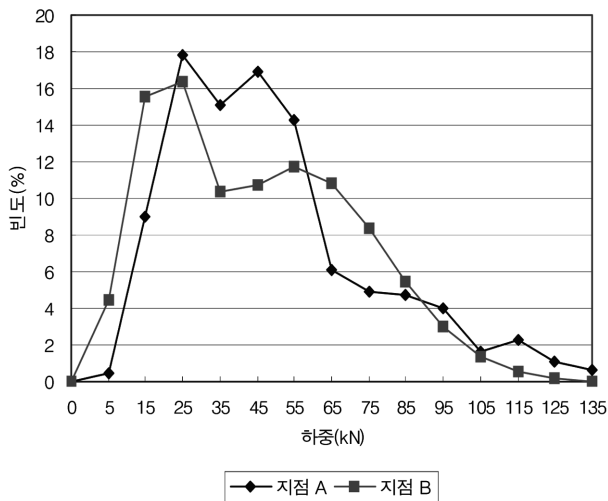


그림 16. 싱글축 지점 비교

하중 분포 형태를 비교한 것이며, 그림 18~20은 지점 간 하중 분포 모형식을 비교한 것이다. 또한 아래 표는 지점 A의 혼합분포 모형 모수를 정리한 것이다.

### 5. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 일반국도 3호선 동두천-전곡 구간에 설치되어 있는 WIM 시스템에서 수집한 화물차량의 하중 자료를 사용하여 축 형태별 화물차 하중 분포 모형식을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 혼합정규분포 모형식은 축하중의 확률밀도함수를 수식화한 것으로 화물차량의 하중분포가 확률적제에 따른 특성으로 인해 다수의 피크를 갖는다는 점을 토대로 모형식을 두 개 이상의 이론적인 분포의 합으로 분

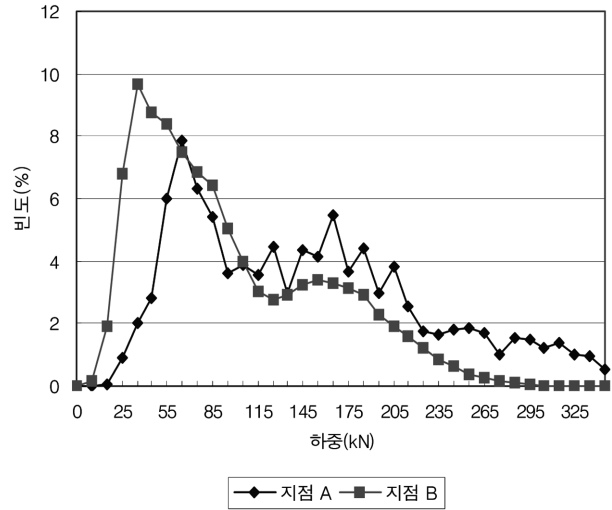


그림 17. 탠덤축 지점 비교

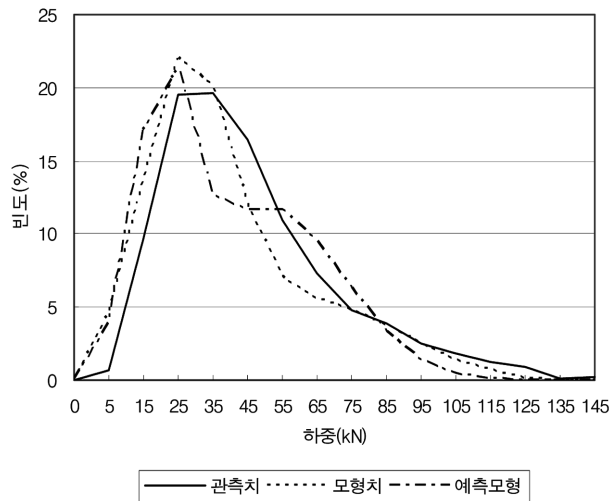


그림 18. 조향축 지점 간 모형 비교

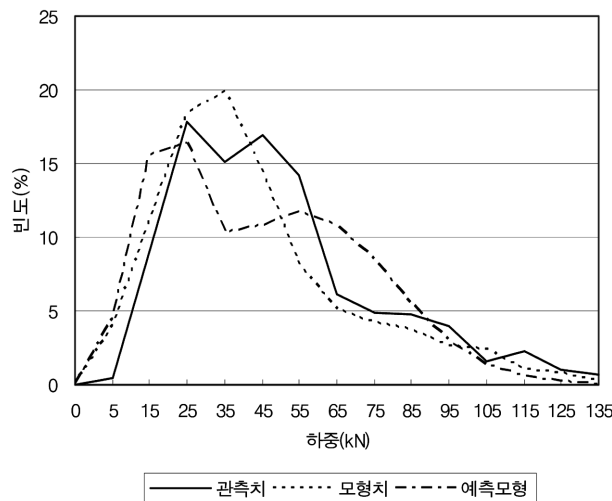


그림 19. 싱글축 지점 간 모형 비교

해하여 표현하였다. 개별 분포함수로 사용된 이론적인 함수로는 일반적으로 널리 알려졌으며, 하중분포 특성을 명확하게 모델링할 수 있는 정규분포함수가 사용되었다.

본 논문에서 제시된 혼합정규분포 모형식은 비록 통계적으로 유의한 수준에서 카이스퀘어 검정을 통과하지는 못하였지만, 관측 자료와의 직접적인 비교·평가를 통해 높은 적



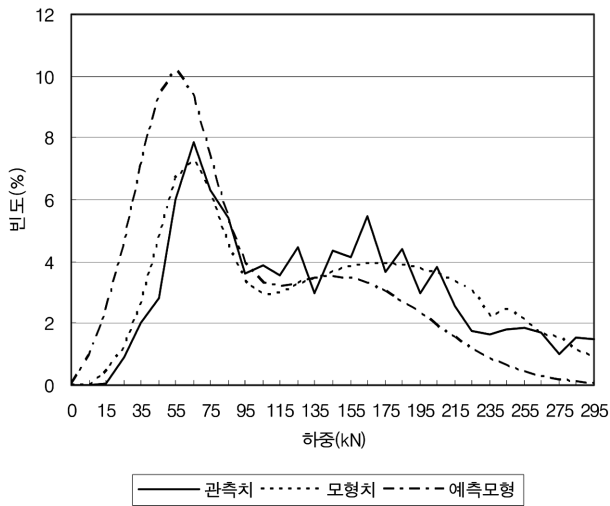


그림 20. 탠덤축 지점 간 모형 비교

합도( $R^2$  0.95 이상)를 보였으며, 누적밀도함수를 이용한 기존 3차모형식과의 비교를 통해 모형식의 예측력이 기존 모형식보다 우수함을 보여주었으며, 제한된 샘플이었지만 타 지점의 하중자료를 이용하여 모형식의 적용성을 평가하였다.

앞서 언급한바와 같이 본 논문에서 제시한 축하중 분포 모형식은 특정지점에서 수집된 하중 자료를 이용하여 산출한 것이므로 이를 일반국도를 대표하는 모형식이라고 단정 지을 수는 없다. 하지만 향후 다양한 지점에서 장기간에 걸친 하중 자료의 축적이 이루어진다면 특정 도로 및 차종을 대표하는 축하중 분포 모형식의 도출이 가능할 것이다. 이처럼 향후과제를 위해서는 시·공간적으로 다양한 하중 자료의 수집이 선행되어야 할 것이며, 이를 위해서 하중정보의 필요성과 중요성에 대한 인식 정립이 우선적으로 요구된다.

### 참고문헌

건설교통부(2001) 도로 교통량 조사 지침.  
 건설교통부(2006) 2005 도로교통량 통계연보.  
 건설교통부(2004) 콘크리트 포장 설계법 개발.

김현석, 오주삼, 이동석(2005) 화물차의 축하중 분포모형 개발에 관한 연구, 대한토목학회 정기 학술대회.  
 유수현(1997) 차종별 등가단축하중계수 산정모형 구축, 서울대학교.  
 조운호(1999) 고속도로 트럭하중 분포 및 포장 설계를 위한 등가차량하중계수의 산정, 대한토목학회논문집, 대한토목학회.  
 한국건설기술연구원(1998) 고속도로 트럭 하중 분포 및 포장설계를 위한 차량등가하중계수의 산정.  
 허문열 외(2005) R & 통계계산, 박영사.  
 ASTM (2005) *Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion Systems with User Requirements and Test Method*, ASTM Committee E-17 on Vehicle-Pavement Systems.  
 Bryan, J. K. et al. (2002) *Field of Modeling Framework for Evaluating Truck Weigh Station Operations*, Virginia Tech Trans. Institute.  
 Bushman, R. and Pratt A. J. (1998) *Weigh In Motion Technology - Economics and Performance*, North American Travel Monitoring Exhibition and Conference  
 Cebon, D. (1993) *Interaction between Heavy Vehicles and Roads*, Cambridge Univ.  
 Huang, W. H. et al. (2002) *Development of the Axle Load Distribution Model for Heavy Vehicles*, Taiwan National Central Univ., TRB.  
 Kim, J. R. et al. (1998) Axle Load Distribution Characterization for Mechanistic Pavement Design TRR 1629.  
 Liu, W. D. et al. (1988) *Analysis of Bridge Truck Loads*, Probabilistic Methods in Civil Engineering, ASCE.  
 Lu, Q. et al. (2002) *Truck Traffic Analysis using Weigh-In-Motion Data in California*, University of California, Berkeley.  
 McCall, B. et al. (1997) *States' Successful Practices WIM System Handbook*, FHWA.  
 Mohammad, J. and Shah, N. (1992) Statistical evaluation of truck overloads, *Journal of Transportation Engineering*.  
 Scheuter, F. (1998) *Evaluation of Factors Affecting WIM System Accuracy*, 2nd European Confer. on WIM.  
 Timm, D. H. et al. (2005) Axle load spectra characterization by mixed distribution modeling, *ASCE Journal of Transportation Engineering*.  
 Turochy, R. A. et al. (2005) Spatial and temporal variations in axle load spectra and impacts on pavement design, *ASCE Journal of Transportation Engineering*.

(접수일: 2006.5.30/심사일: 2006.6.21/심사완료일: 2006.7.16)