



설계 일관성 평가 모형의 고찰과 개선방안 연구

Review and Improvement of Highway Design Consistency Evaluation Models

김 상 엽* 최 재 성** 양 지 은*** 김 문 겸****
 Kim, Sang Youp Choi, Jai Sung Yang, Ji Eun Kim, Moon Kyum

Abstract

It's essential to meet the expectations of drivers through reasonable road design, which makes the drivers to recognize the conditions of road sufficiently. In this case, we could say that because the roads are consistently designed, drivers can make a safe and comfortable drive. There are so many studies about the alignment design consistency methods which are previously mentioned. In this study, firstly we categorize the studies which are concerned with the estimation of the alignment design consistency methods and then apply the method which fits for the actual condition into the practice. And we'll make a realistic method by using the data which are collected from the National Road. The developed model in this study is the predicting model including speed(V_i) as the variable on the upper stream 100m of the curve. This model was developed which divided to two cases in the all directions of two lanes; One case is the $R \leq 200m$ and another case is the $R > 200m$. In the section of the $R \leq 200m$, this case was influenced on the road alignment(R) and (V_i) and another section was found that is affected to the speed(V_i) on the upper stream 100m rather than the effect of road alignment(R). In the case of all directions of four lanes, however, this study is predicted divided to two sections on the 400m of R , these section have more influenced to (V_i) than the road alignment factors. This result of the four lanes was represented to different result with the two lanes. This study will further need development of the predicting model with the higher confidence through collecting data with more the exact data, the various road alignment data and speed of the several sections on the upper stream on the curve.

Keywords : design, consistency, horizontal, alignment(R), operating speed

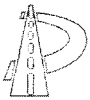
요 지

합리적인 도로 설계를 통해 운전자들의 기대를 만족시켜, 운전자들이 도로의 조건을 충분히 인지하여 주행하도록 하는 것은 매우 중요하다. 이러한 도로의 경우 우리는 흔히 선형의 일관성이 확보되어 운전자들이 안전하고 편안한 차량 주행을 할 수 있는 것이라고 말한다. 위에서 언급한 설계 일관성의 확보 유무를 평가하기 위해 국내·외에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기존의 국내·외 설계 일관성 평가 방법을 유형별로 구분하여 정리해 보고, 국내현실에 가장 적합하다고 판단되는 방법론을 응용하여, 일반국도의 과거 조사 자료를 바탕으로 현실적인 설계 일관성기법을 개발하고자 한다.

본 연구에서 개발한 모형은 곡선구간 상류부 100m지점의 속도(V_i)를 변수로 포함하는 예측식으로 양방향 2차로는 $R \leq 200m$ 인 경우와 $R > 200m$ 인 경우로 나누어 예측식을 개발하였다. $R \leq 200m$ 인 경우에는 곡선반경(R)과 V_i 의 영향이 있고, $R > 200m$ 인 구간에서는 기하구조의 영향보다는 곡선 상류부 100m지점의 속도(V_i)가 영향이 있는 것으로 판단된다. 양방향 4차로의 경우도 R 값을 400m라는 값에서 두 구간으로 구분하여 예측하였지만 양방향 2차로와는 달리 두 구간에서 모두 기하구조의 영향보다는 V_i 의 영향이 더 큰 것으로 판단되었다. 향후 보다 신뢰도가 높은 예측모형식 개발을 위해서는 더욱 정확하고 다양한 기하구조의 자료의 수집이 필요하다. 그리고 곡선 상류부 직선구간의 여러 지점의 속도를 수집하면 보다 신뢰도가 높은 예측 모형식 개발이 가능할 것이다.

핵심용어 : 설계일관성, 평면곡선반경, 주행속도

* 정회원 · 서울시립대학교 교통공학과 박사과정
 ** 정회원 · 서울시립대학교 교통공학과 교수
 *** 정회원 · 서울시립대학교 교통공학과 석사과정
 **** 정회원 · (주)현대산업개발 토목설계팀 부장



1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

합리적인 도로 설계를 통해 운전자들의 기대를 만족시켜 운전자들이 도로의 조건을 충분히 인지하여 주행하도록 하는 것은 매우 중요하다. 이러한 도로의 경우 선형의 일관성이 확보되어 운전자들은 안전하고 편안한 차량 주행을 할 수 있는 것이라고 판단된다.

현재까지 도로 공학자들의 설계는 “도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙”의 지침에 따라 설정된 도로 설계 최소 요구치 만을 만족하는 수준이다. 이러한 최소 요구사항을 만족하는 설계는 설계 속도를 통하여 판단되는 공학적 문제점은 없는 설계라고 판단할 수 있다. 그러나 최소기준을 만족하는 설계대안간 상대비교가 필요할 때는 이러한 기준은 의미가 없다. 따라서 설계 기준 이외의 평가방법인 도로 선형의 일관성 평가가 필요한 것이다.

이와 같은 도로에서의 설계 일관성 평가를 위해 국내·외에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 현재까지 연구되어 온 것들은 아직 초보적 단계여서 명확한 평가 방법이 제시되지 않거나 평가 기준의 개략적 범위만을 명시하고 있는 수준이다. 그리고 해외에서 연구된 결과들은 우리나라에 직접 적용이 가능할지 심층 검토되어야 하는 문제가 존재하여 본격적인 국내 적용이 이루어지지 않고 있으며, 우리나라 현실에 맞는 새로운 모형의 개발이 대두되고 있다.

본 연구는 기존의 국내·외 설계 일관성 평가 방법을 유형별로 구분하여 정리해 보고, 국내현실에 가장 적합하다고 판단되는 방법론을 응용하여, 일반국도의 과거 조사 자료를 바탕으로 현실적인 설계 일관성 기법을 개발하고자 한다.

1.2 연구 방법

본 연구에서는 새로운 설계 일관성 평가 모형을 개발하기 위해 그림 1과 같은 과정을 수행한다.

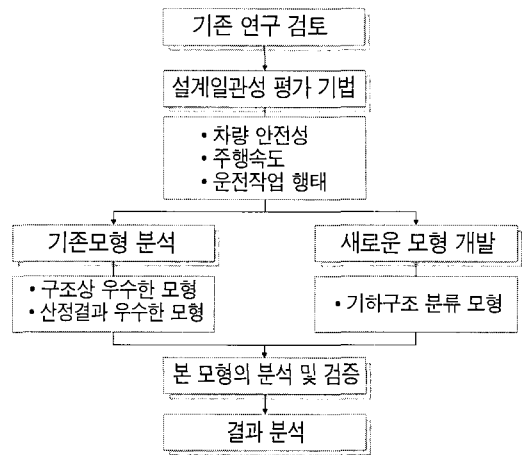


그림 1. 본 연구에서 수행한 연구 과정

1) 기존 연구 검토

현재 국내·외 설계 일관성 평가 모형을 분석 유형별로 구분하여 평가한다. 각 모형별 평가 방법과 기준에 관하여 분류 및 정리하여 우리나라 현실에 적용이 가능한 설계 일관성 평가 모형을 모색한다.

2) 분석 구간에 적용

기존 연구 모형들 중 구조적으로 우수한 모형 중에 우리나라 도로 상황에 적합할 것이라 판단되는 모형을 선정한다. 구조적으로 우수한 모형이라 함은 설계 일관성을 평가하는데 있어서 모형 변수의 적합성이 높은 것을 의미한다. 이러한 구조상 우수한 모형을 분석 구간에 적용하여 가장 정확한 예측을 나타내는 모형을 선정한다.

3) 새로운 설계 일관성 평가 모형 개발

위의 2가지 단계를 거쳐 각 모형의 장단점 및 개선 방안을 모색한 후, 새로운 설계 일관성 모형을 구축한다.

4) 기존 모형과의 비교 분석

본 연구에서 개발된 모형을 분석 구간 이외의 다른 분석 구간에 적용함으로써 적합성 검증을 수행한다.



2. 기존 연구 검토

본 연구에서 살펴본 바로는 설계 일관성 평가 지표는 주행속도, 차량 동적안전성, 도로선형, 운전 작업 부하의 변화량 등 다양하다. 본 연구에서 고찰한 국내의 설계 일관성의 평가 기준을 정리하면 다음과 같다.

2.1 속도를 이용한 설계일관성 평가

1) 단일구간

유럽의 여러나라에서는 어떤 단일 구간의 설계일관성을 평가하기 위하여 설계속도와 주행속도 차이를 이용한다. 그 예로 독일에서는 설계속도는 최소 곡선반경과 최대 경사지점에서 예상되는 차량속도를 기준으로 설정한다. 일단 주행속도 산출이 이루어지면 설계속도와 차이가 큰 도로를 찾아내어 설계 일관성을 검토한다. 이러한 점에 기인하여 미국의 경우 Leisch & Leisch가 제시한 10mph의 법칙을 설계 일관성 평가에 응용하고 있다.

Leisch & Leisch(1977)가 제안한 설계 일관성 평가 기준은 운전자의 기대정도를 속도차라는 평가 기준을 이용하여 제시하였다. 구체적으로 어느 단일 구간의 주행속도와 설계속도의 차이는 최대 15km/h 이하가 되어야 하며, 승용차와 트럭의 주행 속도 차이도 최대 15km/h 이하가 되어야 한다. 즉 최대 15km/h 이상의 속도차가 나타나면 설계 일관성이 떨어진 구간이라고 판단하는 것이다.

Lamm. etc.(1988b, 1995)은 설계속도(V_d)와 85퍼센트 주행속도(V_{85})의 차이를 평균 사고율과 비교하여 관계를 규명하였다. 이를 바탕으로 도로의 일관성 평가 기준을 Good, Fair, Poor로 구분하여 표 1과 같이 제시하였다.

표 1. 설계속도와와의 차이 기준

Good design : $V_{85}-V_d \leq 10\text{km/h}$
Fair design : $10\text{km/h} < V_{85}-V_d \leq 20\text{km/h}$
Poor design : $V_{85}-V_d \geq 20\text{km/h}$

2) 연속 구간

위에서 검토한 단일구간과는 달리 연속 구간의 평가 지표로는 평균 굴곡도, 평균경사도, 평면선형 구조, 종단선형의 곡선 길이, 평균 곡선반경, 설계 곡선반경 등을 기반으로 산출한 각 차량간 주행속도(V_{85}) 차이를 사용한다. 독일의 Lamm. etc(1995)은 평균 사고율을 기반으로 직선부-곡선부의 설계 일관성 평가를 표 2와 같이 Good, Fair, Poor로 구분하였다.

표 2. 각 차량간 주행속도 차이 기준

Good design : $\Delta V_{85} \leq 10\text{km/h}$
Fair design : $10\text{km/h} \leq \Delta V_{85} \leq 20\text{km/h}$
Poor design : $\Delta V_{85} > 20\text{km/h}$

3) 주행속도 예측 모형

1), 2)에서 살펴본 단일구간과 연속구간의 경우 속도차를 이용하여 설계 일관성을 평가한다. 이러한 속도차를 산정하기 위해서는 주행속도 예측모형을 구축하게 되는데 국내의 많은 연구를 통하여 많은 모형들이 제시되고 있다. 이러한 국내·외 주행속도 예측모형을 본 연구에서 정리하여 제시해 보면 표 3과 같다.

2.2 동적 안전성을 이용한 설계일관성 평가

1) 사고

교통 운영에서의 안전상의 문제와 설계 일관성은 사고율과 관련이 있다. 독일, 스웨덴, 스위스의 설계 기준은 백만대-km당 사고수를 기반으로 평가하며 Lamm. etc.(1987c, 1988b)은 표 4와 같이 평가 기준을 제시하고 있다.

표 4. 사고건수 기준

Good design : 사고 수/ 10^6 대-km ≤ 2.27
Fair design : $2.27 <$ 사고 수/ 10^6 대-km ≤ 5.00
Poor design : 사고 수/ 10^6 대-km > 5.00



표 3. 주행속도 예측 모형

구조상 특이 모형	
McFadden 등 (2000)	$V_{85\text{redu}} = -0.812 + (998.9/R) + (0.017 \times LAPT)$ ($R^2=0.603$) • 주행속도 Pro-file 모형에서 연속되는 설계 요소 간 일관성을 평가하는데 속도분포를 이용 $V_{85\text{redu}}$ 곡선부에서의 85퍼센트 속도 감소(km/h), LAPT=Tangent 길이(m), R=곡선반경(m)
McFadden과 Elefteriadou (1997)	$V_{85} = 41.62 - 1.29D + 0.0049L_c - 0.12A + 0.95V_t$ $R^2=0.90$ • 78개의 곡선구간의 속도자료를 이용하여 85퍼센트 주행속도를 예측 V_{85} =곡선부 85퍼센트 주행속도(km/h), V_t =Tangent의 85퍼센트 접근 속도(km/h)
Fitzpatrick 등 (2000)	$GM_L = (TL \times (R_1 \times R_2)^{1/2}) / 100$ $TL \geq t$ $GM_S = (TL \times (R_1 + R_2) / 2)$ $TL < t$ 그룹1 : 곡선반경은 250m미만, TL은 150m미만인 구간 $SP=101.11-3420/GM_S$ $R^2=0.553$ 그룹2 : 곡선반경은 250m미만, TL은 150m~1000m인 구간 $SP=98.405-3184/GM_L$ $R^2=0.684$ 그룹3 : 곡선반경은 250m이상, TL은 150m~1000m인 구간 $SP=97.73-0.00067/GM_L$ $R^2=0.2$ $SP=105.00-22.953/e^{(0.00012 \times GM_L)}$ $R^2=0.838$ 그룹4 : 곡선반경은 1000m이상인 구간과 설계속도 기준상 최소 곡선반경 이상인 구간 $SP=105.00-22.953/e^{(0.00012 \times GM_L)}$ $R^2=0.838$ GM_L = 긴 Tangent구간의 곡선부에서의 기하구조 측정 변수(m^2) R_1, R_2 = Tangent구간 이전, 이후의 곡선 반경(m), T_L = Tangent길이(m) t = 선택된 Tangent 길이 한계치(m), SP = 85퍼센트 주행속도(km/h) • 지방부 2차로 간선도로 Tangent길이의 영향을 고려하여 기하구조의 유형을 분류하여 주행속도의 모형식을 개발
Schurr 등 (2001)	$V_{85\text{lim}} = 86.8 + 0.297V_p - 0.614G_1 - 0.00239T_{ADT}$ $V_{85\text{control}} = 72.1 + 0.432V_p - 0.00212T_{ADT}$ • 95%, 85% 평균 주행속도를 중단경사, 도로상황, 교통 및 속도의 특성을 고려하여 다중 선형 회귀 모형식으로 주행속도 예측 모델을 개발 V_p = posted속도(km/h), G_1 = 접근 경사, T_{ADT} = 일교통량($ADT \leq 5000$) $V_{85\text{lim}}$ = 시거계약 지점에서의 승용차 85퍼센트 속도(km/h) $V_{85\text{control}}$ = 시거계약이 없는 지점의 85퍼센트 속도(km/h)
2차로 도로의 주행속도 예측 모형	
Lamm와 Choueiri (1987c)	$V_{85} = 95.780 - 0.076CCR$ $R^2=0.84$
Lamm 등 (1990)	$V_{85} = 94.396 - \frac{3,188.656}{r}$ $R^2=0.79$
Kanellaidis 등 (1990)	$V_{85} = 129.88 - \frac{623.1}{\sqrt{r}}$ $R^2=0.78$
Krammes 등 (1994,1995)	$V_{85} = 102.40 - 1.57D + 0.012L_c - 0.10A$ $R^2=0.82$
McLean	$V_{85} = 53.8 + 0.464V_t - 3.26(1/R) \times 10^3 + 8.5(1/R)^2 \times 10^4$
독일-구	$V_{85} = 60 + 39.7e^{(-2.98 \times 10^{-4}CCR)}$
레바논	$V_{85} = 91.03 - 2.06DC = 91.03 - 0.056CCR$
Lamm	$V_{85} = 58.310 - 1.052(DC)$
뉴욕	$V_{85} = 93.85 - 1.82DC = 93.85 - 0.05CCR$
V_{85} = 곡선부 85퍼센트 주행속도(km/h), r = 곡선반경(m), R^2 = 결정계수, CCR = 곡률변화율(gon/km), DC = 곡률(deg/100ft)	
4차로 도로의 주행속도 예측 모형	
정준화	$V_{85} = 98.809 - 4646.9(1/R)$ ($R^2=0.801$)
독일	$V_{85} = 148.75 - 0.0162CCR$
그리스	$V_{85} = 135.42 - 0.0755CCR$
Tarris 등(1996)	$Y = 52.18 - 0.231DC$ • 개별차량 속도자료와 panel분석 방법으로 주행속도를 예측
V_{85} = 곡선부 85퍼센트 주행속도(km/h), r = 곡선반경(m), R^2 = 결정계수, CCR = 곡률변화율(gon/km), DC = 곡률(deg/100ft)	



2) 차량 안전성

평면 선형에서 전복, 정면충돌 사고는 마찰계수와 차량의 타이어 상태, 노면상태의 영향으로 발생한다. Lamm, etc.(1995)은 횡방향 마찰계수의 요구치 (f_{Rd})와 공급치(f_R)의 차이(Δf_R)를 이용하여 설계 일관성 기준을 표 5와 같이 제시하였다.

표 5. 횡방향 마찰계수 기준

Good design : $\Delta f_R \geq +0.02$
Fair design : $+0.02 > \Delta f_R \geq -0.02$ (적절한 횡방향 마찰계수를 지닌 편경사 확보)
Poor design : $\Delta f_R < -0.02$ (도로 제설계 요구)

Lamm 등(1995)은 이전의 단일 구간, 복합 구간의 평가를 조합한 전체구간의 설계 일관성 평가 (Good, Fair, Poor)의 단계를 이용하여 표 6과 같이 제시하였다.

표 6. 전체구간의 평가 기준

Good design : 3Good, 2Good & 1Fair, 2Good & 1Poor
Fair design : 3Fair, 2Fair & 1Good, 2Fair & 1Poor, 1Good & 1Fair & 1Poor
Poor design : 3Poor, 2Poor & 1Good, 2Poor & 1Fair

2.3 운전 작업 부하 분석

Wooldridge(1994)와 Masser(1980)는 지방부 2차로 설계 일관성 평가를 위해 운전 작업부하(WL_n)를 이용하여 방법론을 개발하였다. 작업부하의 수준을 1~6으로 구분하고 평균 작업부하(R_f)는 전문가 집단이 제시한 일반적인 도로 기하구조 특성의 값을 이용하였다.

$$WL_n = (U \times E \times S \times R_f) + (D \times WL_e)$$

WL_n = 기대되는 작업부하
 U = 도로에 친숙하지 않은 운전자 계수
 E = 기대치 계수(도로의 특성이 이전과 비슷할 경우는 $E=C-1$, 그 이외는 $E=1$)
 S = 시거, R_f =평균 작업부하
 C = 이전의 도로 특성의 영향
 WL_e = 이전의 작업부하

분석결과 $WL_n \leq 1$ 이면 그 도로는 일관성을 지닌 도로로 평가되며, $WL_n > 6$ 이면 일관성이 결여된 도로라고 평가한다.

Krammes 등(1995)은 운전자들의 시거를 이용한 방법론을 개발하였다. 운전자들은 도로 주행시 필요한 정보의 대부분을 눈을 통해서 얻는다는 사실에 중점을 두어 곡선부 평면선형에서의 작업부하(WL)를 예측하는 회귀 모형식을 개발하였다.

$$WL = 0.193 + 0.016D \quad R^2 = 0.90$$

WL = 곡선부의 평균 작업부하(%)

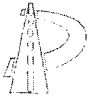
3. 새로운 설계 일관성 평가 모형 개발

2장에서 살펴본 바와 같이 설계일관성의 평가를 위해 속도와 관련된 연구가 중점적으로 이루어졌다. 따라서 본 연구에서는 속도 자료 수집과 기존 연구와의 비교 및 검증이 용이한 설계 일관성 평가 방법을 응용하여 검토하기로 한다. 즉, 속도는 설계 일관성을 평가하는 가장 기초적인 측정 지표로써 본 연구에서는 현재까지 개발된 주행속도 예측모형의 특성을 살펴본 후, 우리나라에 적용 가능한 새로운 모형을 개발하고자 한다.

3.1 기존 연구 중 모형 구조의 우수성 검토

기존연구의 대부분은 각 도로 구간의 주행속도를 예측하는 모형이다. 그러나 기존의 주행속도 분석 기법은 서로 차이가 있으므로, 본 연구에서는 이들 기존 연구의 속도분석 모형구조를 심층적으로 검토한다.

McFadden과 Elefteriadou(1997)은 곡선부 길이, 교각, 곡선반경, 곡선부 접근 속도 등의 변수를 이용하여 보다 정확한 속도 예측이 가능하게 하였다. 다양한 기하구조 조건을 모형식에 포함시킴으로써



모형의 신뢰도를 높였다.

$$V_{85} = 41.62 - 1.29D + 0.0049L_c - 1.29\Delta + 0.95V_t \quad R^2 = 0.90$$

V_{85} = 곡선부 85퍼센트 주행속도(km/h), Δ = 교각,
 V_t = Tangent의 85퍼센트 접근 속도(km/h)

Fitzpatrick 등(2000)은 Tangent길이의 영향을 고려하여 세부적인 도로 구간의 분석을 수행하여 모형 개발의 우수성을 지니고 있다. 도로구간을 세부적으로 분류하여 모형식을 추정함으로써 속도예측의 정확도를 높였다.

- 곡선반경은 250m미만, TL은 150m~1000m인 구간
 $SP = 98.405 - 3184/GM_t \quad R^2 = 0.684$
- 곡선반경이 250m이상, TL은 150m~1000m인 구간
 $SP = 97.73 + 0.00067 \times GM \quad R^2 = 0.2$

SP = 85퍼센트 주행속도(km/h),
 GM = 직선구간의 곡선부에서의 기하구조 측정 변수(m²)

Schurr 등(2001)은 시거제약과 관련된 95%, 85%, 평균 주행속도 예측모형을 개별적으로 개발하여 도로조건과 관련하여 적용이 가능하다.

$$V_{85, control} = 72.1 + 0.432V_p - 0.00212T_{ADT}$$

V_p = posted속도(km/h), T_{ADT} = 일교통량($ADT \leq 5000$),
 $V_{85, control}$ = 시거제약이 없는 지점의 85퍼센트 속도(km/h)

2차로 주행속도 예측 모형에서 Schurr 등의 모형의 방법론은 분석자료 중 교통량에 관한 변수가 없으므로 분석 자료에 적용할 수 없으므로 본 연구의 분석에서는 제외한다.

3.2 기존 연구 중 모형 산정 결과 우수성 검토

1) 변수 설명

분석을 위한 자료 수집은 지방부 2차로의 108개 지점과 4차로의 92개 지점에서 이루어졌으며 2차로의 경우 제한속도가 60km/h로 동일하며 4차로의 경

우 80km/h, 90km/h인 구간에서 측정되었다. 수집된 자료는 경기도, 강원도, 충청도, 전라도 지점에서 1999년~2004년 첨두, 비첨두 시간동안의 자유 교통류 상태를 조사한 것이다. 변수는 제한속도, 분석구간의 곡선반경, 곡선길이, 직선길이, 곡선구간 상류부 100m지점의 85퍼센트 주행속도, 평면곡선의 교각, 종단경사차 등으로 정리된다.

2) 연구 방법

기존 연구 중 모형 산정 결과의 우수성을 검토하기 위하여 최소제곱오차(RMSE)방법을 이용한다. 최소제곱오차(RMSE)는 값이 클수록 분석 모형의 예측값이 실제 도로의 관측값과 적합하지 않다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 RMSE값이 가장 작은 모형 5가지를 선정하여 분석하였다. 표 7은 주행속도 예측 모형 예측의 오차가 가장 작은 모형을 선정한 결과이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (O - E)^2}$$

O = 관측된 주행속도(km/h),
 E = 계산된 주행속도(km/h), n = sample 수

모형 산정 결과의 분석 과정에서 양방향 4차로의 경우 양방향 2차로에 비해 기존연구결과가 부족하고 적용성의 문제로 본 연구에서는 분석 가능한 3개의 모형을 선정하였다.

표 7. 주행속도 예측의 RMSE 수치

왕복 2차로 주행속도		왕복 4차로 주행속도	
McLean	9.70	정준화	7.37
독일-구	13.05	그리스	11.85
레바논	14.64	독일	21.24
Lamm	16.49	-	-
뉴욕	16.18	-	-

3.3 새로운 설계 일관성 평가 모형 구축

본 연구에서는 새로운 설계 일관성 평가 모형을 구축하기에 앞서 기존 연구 중 모형구조가 우수한 모형과 모형산정결과 우수한 모형의 장점을 응용하여 적용 가능성이 높은 모형을 개발한다. 모형식에 포함될 변수들은 수집된 자료를 이용하여 다중 공선성 여부로 분석하고 95% 신뢰수준에서 유의하다고 판단되는 변수들을 선정했다. 유의 수준에서 선정된 변수와 주행속도의 관계를 통해 회귀 모형식을 선정했으며, 모형식은 다음과 같다.

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon$$

$Y = 85$ 퍼센트 주행속도 예측치, $\alpha, \beta, \epsilon =$ 모수, $X =$ 변수

1) 기초자료 분석

설계 일관성 평가를 위한 주행속도 예측 모형식을 개발하기에 수집한 본 연구 자료가 모든 지역을 대변할 수 있는 대표성을 지니는지에 대한 여부를 판단하기 위해 자료의 정규성 확인작업을 수행하였다. 그림

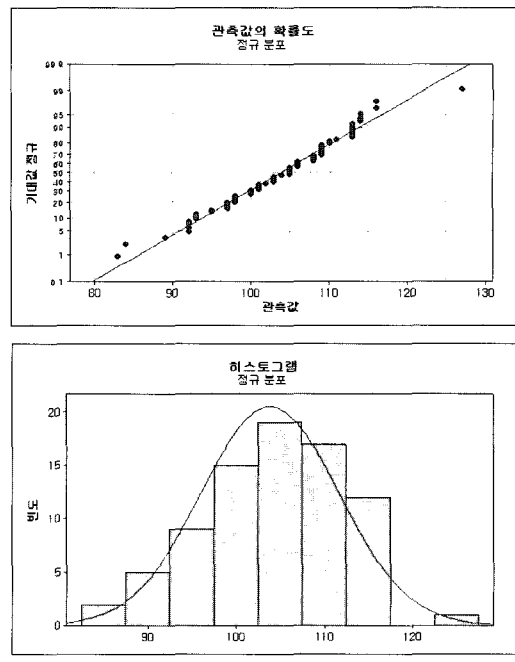


그림 3. 양방향 4차로 정규성 분포

2, 3에서 볼 수 있듯이 2차로와 4차로의 속도 자료는 정규분포를 이루고 있으므로 분석 과정에서 분석 자료의 대표성을 나타내고 있다고 판단할 수 있다.

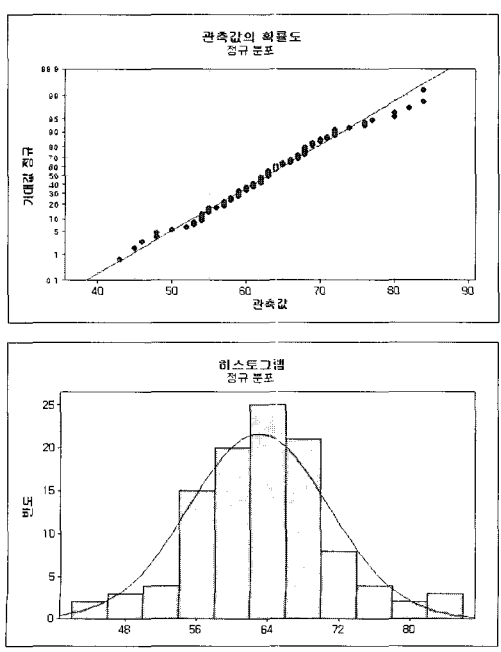


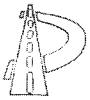
그림 2. 양방향 2차로 정규성 분포

2) 2차로, 4차로 전체구간 분석

표 8은 2차로 전체 분석구간에 대한 기하구조와 주행속도 상관관계를 분석하였다. 분석 결과 기존연구의 속도예측모형에서 사용되어 왔던 주요 변수인 곡선반경, 곡선길이, 종단경사등과 같은 기하구조 관련 변수는 주행속도와의 상관관계가 적은 것으로 판단된다. 그림 4는 곡선반경(R)을 기준으로 2차로 주행속도와의 관계를 나타낸 것이다. 여기에서 알 수 있는 사실은 2차로 전체구간의 주행속도와 곡선반경

표 8. 본 연구의 2차로 전체구간 상관분석 결과

구분	1/R	곡선 길이	직선 길이	종단 구배차	교각	곡선구간 상류부 100m 지점속도
상관계수	-0.278	0.105	-0.016	-0.031	-0.183	0.735
(유의수준)	(0.064)	(0.280)	(0.874)	(0.752)	(0.059)	(0.000)



(R)과의 관계는 5% 유의수준에서 상관관계가 없다고 판단된다.

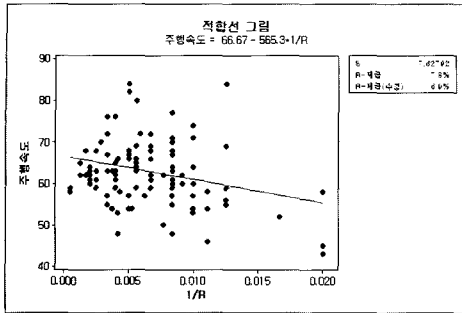


그림 4. 2차로 전체구간 적합도

상관분석을 통하여 주행속도 예측모형을 개발하였다. 주행속도 예측 변수는 곡선구간 상류부 100m지점의 주행속도의 영향이 가장 큰 것으로 판단되어, 다음과 같은 회귀 모형식으로 도출하였다.

$$V_{85} = 18.5 + 0.668V_i \quad R^2 = 0.536$$

V_i : 곡선구간 상류부 100m지점 속도

4차로 주행속도 예측모형도 2차로와 같은 방법으로 분석하였고, 그 결과도 유사하다고 판단된다.

표 9. 본 연구의 4차로 전체구간의 상관분석 결과

구분	1/R	곡선 길이	직선 길이	중단 구배차	교각	곡선구간 상류부 100m 지점속도
상관계수 (유의수준)	-0.323 (0.064)	0.225 (0.045)	0.034 (0.762)	0.133 (0.241)	-0.059 (0.606)	0.662 (0.000)

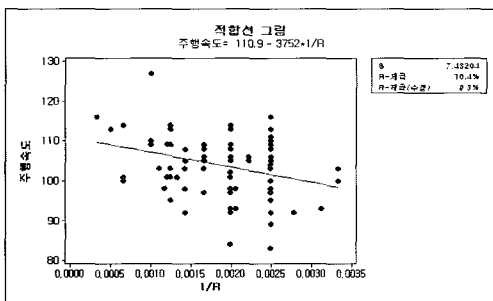


그림 5. 4차로 전체구간 적합도

4차로 역시 주행속도 예측 모형의 변수로는 곡선구간 상류부 100m지점의 주행속도를 반영하여 주행속도 예측 모형을 개발하였다.

$$V_{85} = 33.5 + 0.664V_i \quad R^2 = 0.431$$

V_i : 곡선구간 상류부 100m지점 속도

기존연구의 모형에 사용되는 곡선반경을 이용한 모형을 적용했을 경우 오차가 큰 이유는 운전자들이 도로의 제한속도에 영향을 받고, 설계속도에 따른 도로의 기타 기하구조의 영향(편경사, 도로폭, 곡선길이, 직선길이, 시거 등)이 복합적으로 적용되는 것에 기인된다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 분석 전체구간을 주행속도와 기하구조별로 구분(곡선반경을 기준으로 분류)하여 보다 합리적인 주행속도에 대해 예측모형을 정립하고자 한다.

3) 2차로, 4차로 세부구간 분석

앞선 분석 결과에서 전체구간에 대한 분석 결과는 곡선반경에 대한 영향이 불분명한 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 2차로, 4차로 구간을 Fitzpatrick 등의 연구를 응용하여 곡선반경별 세분화하여 분석했다.

(1) 2차로 세부구간 분석

곡선반경을 기준으로 2차로를 세분화하였고 구분하는 값은 p-value를 통하여 통계적 유의정도를 확인한 후 분류하였다. 통계적 분류 결과 곡선반경 200m기준으로 분류하였고 곡선반경의 분류에 따라 구간을 산정하여 속도 예측모형을 정립하였다. 즉, $R \leq 200m$ 인 구간과 $200m < R$ 인 구간으로 분류하여 주행속도 예측 모형을 정립하였다.

본 연구에서 2차로 도로의 기하구조 관련 변수들의 분석 결과, 주행속도는 곡선부 상류부 100m 지점속도에 영향을 받는 것으로 나타났으므로 주행속도 예측모형의 변수로 포함시켰다. 곡선반경이 $R \leq 200m$ 인 구간의 변수 분석 결과는 곡선반경과, 상류



부 100m지점 속도 두 가지의 변수가 모두 곡선부 주행속도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 200m<R≤1000m인 구간은 곡선반경의 상관관계가 떨어져 곡선부 상류부 100m지점속도만을 변수로 포함한 예측모형을 구축하였다.

표 10. 본 연구의 R≤200m인 구간의 상관분석 결과

구분	1/R	곡선 길이	직선 길이	중단 구배차	교각	곡선구간 상류부 100m 지점속도
상관계수 (유의수준)	-0.567 (0.000)	0.232 (0.108)	-0.060 (0.684)	0.171 (0.240)	-0.249 (0.084)	0.683 (0.000)

표 11. 본 연구의 200m<R인 구간의 상관분석 결과

구분	1/R	곡선 길이	직선 길이	중단 구배차	교각	곡선구간 상류부 100m 지점속도
상관계수 (유의수준)	0.125 (0.418)	-0.059 (0.703)	0.056 (0.720)	0.256 (0.094)	0.025 (0.871)	0.862 (0.000)

$R \leq 200m \quad V_{85} = 36.3 - 692(1/R) + 0.455V_t \quad R^2 = 0.552$ $200m < R \quad V_{85} = 11.8 + 0.978V_t \quad R^2 = 0.736$
--

2차로 전체구간을 분석한 결과와 비교하면 전체구간에서는 곡선반경과 주행속도와의 관계가 6.9%로 상관관계가 낮으나 곡선반경 200m를 기준으로 구분하여 분석한 결과, 곡선반경 200m 미만의 구간에서는 곡선반경이 작아질수록 주행속도가 떨어지는 관계임을 알 수 있으며 상관관계는 30.9%로 다소 높아졌다. 반면 곡선반경이 200m 이상인 구간에서는 곡선반경과 뚜렷한 관계(0.0%)가 나타나지 않았으나 주행속도 예측 모형식의 결정계수는 높게 (73.6%) 산출되어 곡선반경과 주행속도의 직접적인 관계는 없는 것으로 판단된다.

모형에 사용된 변수들의 통계치는 P-value가 0.05보다 작으므로 95% 유의수준에서 유의하다고

표 12. 본 연구의 각 모형의 변수 통계량 결과

구분	예측변수	SE계수	T	P
R≤200m	1/R	208.2	-3.32	0.002
	V_t	0.08807	5.16	0.000
200m<R	V_t	0.07252	11.00	0.000

판단할 수 있다. 또한 모형식의 상관계수 값이 모두 50%를 넘으면서 2차로 전체구간의 주행속도 예측 모형의 상관계수 값보다 높기 때문에, 보다 정확한 예측이 이루어지는 것을 알 수 있다.

(2) 4차로 세부구간 분석

4차로의 분류 기준은 분석 데이터들의 구분 중 특성이 뚜렷하다고 산출된 결과를 선택하였다. 구분의 기준은 곡선반경이 400m로 구분할 때 가장 뚜렷한 차이가 나타났으므로 본 연구에서는 곡선반경 기준을 400m로 정하여 분석한다.

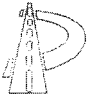
표 13. 본 연구의 R≤400m인 구간의 상관분석 결과

구분	1/R	곡선 길이	직선 길이	중단 구배차	교각	곡선구간 상류부 100m 지점속도
상관계수 (유의수준)	-0.169 (0.420)	0.186 (0.373)	-0.239 (0.250)	0.209 (0.316)	0.124 (0.553)	0.763 (0.000)

표 14. 본 연구의 400m<R인 구간의 상관분석 결과

구분	1/R	곡선 길이	직선 길이	중단 구배차	교각	곡선구간 상류부 100m 지점속도
상관계수 (유의수준)	-0.326 (0.015)	0.213 (0.119)	0.093 (0.500)	0.068 (0.623)	-0.020 (0.886)	0.586 (0.000)

4차로를 곡선반경 400m로 구분하여 분석한 결과, 2차로와는 달리 세부구간으로 구분한 상태에서의 곡선반경과 주행속도의 관계는 구분하지 않을 때에 비해 오히려 낮은 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다. 즉, 전체구간으로 속도예측모형을 개발한 것이



세부구간으로 분류하여 모형을 개발한 모형보다 우수하다고 판단된다.

세부구간의 주행속도 예측 모형은 변수를 분석한 결과, 2차로의 분석과 같은 곡선구간 상류부 100m 지점 속도가 곡선부 주행속도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으므로 주행속도 예측모형에 변수로 사용한다.

$$R \leq 400m \quad V_{85} = 18.4 + 0.816V_i \quad R^2 = 0.564$$

$$400m < R \quad V_{85} = 39.3 + 0.608V_i \quad R^2 = 0.331$$

여기서, V_i : 곡선구간 상류부 100m지점 속도

표 15. 본 연구의 각 모형의 변수 통계량 결과

구분	예측변수	SE계수	T	P
R ≤ 400m	V_i	0.1443	5.66	0.000
400m < R	V_i	0.1155	5.27	0.000

4차로의 변수의 통계량도 2차로의 변수 통계량과 같이 P-value가 0.05보다 작으므로 유의하다고 판단할 수 있다. 곡선반경별로 구분하여 주행속도를 예측한 결과, 두 가지 모형 중 한 가지 모형이 50% 미만으로 예측의 정확성이 떨어져 기하구조별로 구분하여 예측하는 것은 의미가 없다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 4차로의 경우는 전체구간에 대한 주행속도 예측 모형을 선택한다.

표 16. 본 연구가 제시하는 속도 예측 모형식

구분	양방향 2차로		양방향 4차로	
모형식	R ≤ 200m	$V_{85} = 36.3 - 692(1/R) + 0.455V_i \quad R^2 = 0.331$	R ≤ 400m	$V_{85} = 18.4 + 0.816V_i \quad R^2 = 0.564$
	R > 200m	$V_{85} = 11.8 + 0.798V_i \quad R^2 = 0.736$	R > 400m	$V_{85} = 39.3 + 0.608V_i \quad R^2 = 0.331$
여기서, R: 곡선반경 (m), V_i : 곡선구간 상류부 100m지점 속도				

4. 기존 모형과 새로운 모형의 비교

본 연구에서 제시하는 모형에 대해 속도모형 검증 과정을 수행했다. 비교대상 모형은 본문에서 검토했던 모형구조가 우수한 모형과 산출결과가 우수한 모형을 포함했고, 속도 검증에는 추가적으로 확보한 속도 자료를 이용했다.

표 17. 2차로, 4차로 모형 비교 결과

2차로			4차로		
모형의 구조		RMSE	모형의 구조		RMSE
모형 구조상 유의한 모형	McPadden	23.21	모형 구조상 유의한 모형	정준화	16.83
산정결과상 유의한 모형	McLean	8.31	산정결과상 유의한 모형	정준화	16.83
새로 개발된 모형	본 연구	5.86	새로 개발된 모형	본 연구	5.73

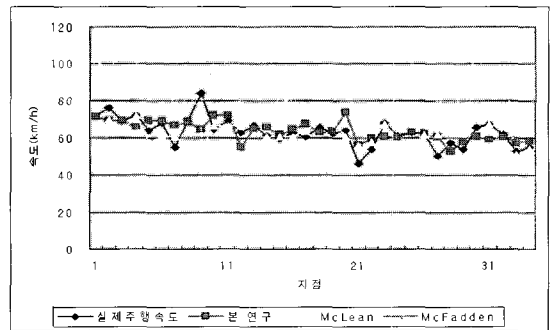


그림 6. 2차로 모형 비교

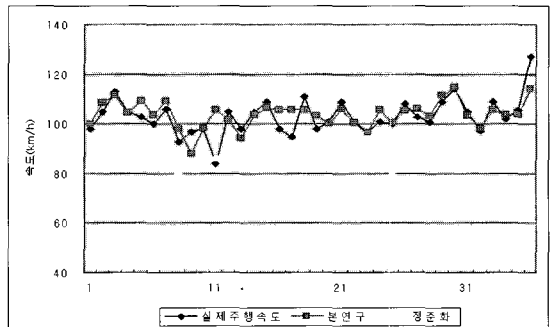


그림 7. 4차로 모형 비교



비교 분석 결과 그림 6, 7에서와 같이 새로 개발된 모형은 기존에 우수하다고 검증한 모형보다 정확한 예측값을 나타냈다. RMSE 검정 결과도 2차로 구간에서 새로 개발된 모형이 5.86으로 McFadden이 23.21와 McLean 8.31보다 적은 오차를 나타냈다. 4차로의 경우 또한 새로 개발된 모형이 5.73으로 정준화의 16.83보다 현저히 적은 오차를 나타냈다.

본 연구에서 구축한 주행속도 예측 모형은 실제 우리나라 도로 영향을 고려한 모형으로 기하구조만으로 분석을 하는 해외 연구에 비해 보다 정확한 예측이 가능하였다. 그 이유는 본 연구에서는 기하구조별로 도로구간을 분류하여 속도를 예측하였기 때문에 신뢰도가 높아진 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 도로 설계 일관성 평가의 방법을 정리하고 가장 일반적으로 사용되고 있는 주행속도 예측방법을 이용한 설계 일관성 평가를 하는 방법에 대한 분석을 수행하였다.

분석 방법으로는 모형의 구조가 우수한 모형과 구조에 관계없이 산정결과가 우수한 모형을 선정하여 새로운 모형과 비교 분석하였다. 새로운 모형의 경우 모형의 구조상 유의하다고 판단된 장점을 바탕으로 평면곡선의 구분을 통한 주행속도 예측 모형을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 모형은 곡선 상류부 100m 지점의 속도(V_f)를 변수로 포함하는 예측식으로서, 양방향 2차로는 $R \leq 200m$ 인 경우와 $R > 200m$ 인 경우로 나누어 예측식을 개발하였다. $R \leq 200m$ 인 경우에는 기하구조와 V_f 의 영향이 있고, $R > 200m$ 인 구간에서는 기하구조의 영향보다는 곡선 상류부 100m 지점의 속도(V_f)가 영향이 있는 것으로 판단된다. 양방향 4차로의 경우도 R값을 400m라는 값에서 두 구간으로 구분하여 예측하였지만 양방향 2차로와는

달리 두 구간에서 모두 기하구조의 영향보다는 V_f 의 영향이 더 큰 것으로 판단되었다.

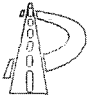
향후 더욱 정확하고 다양한 기하구조의 자료, 그리고 곡선 상류부 직선구간의 여러 지점의 속도를 수집하여 신뢰도가 높고, 다양한 검증을 통해 개발된 속도예측 모형식이 필요하다.

감사의글

이 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 고종대, 장명순, 정준화(2002), “국도 4차로 곡선부에서 주행속도의 특성 및 모형”, 대한교통학회지, p.95-p.105
2. 최재성(1998), “도로선형에 대한 설계일관성 평가모형의 개발”, 대한교통학회지, 제16권4호, pp.195-212
3. American Association of State Highway and Transportation Officials(2004), *A policy on geometric design of highways and streets, 5th*
4. Abishai Polus, Doron Dagan(1987), “Model for Evaluating the Consistency of Highway Alignmen”, *Transportation Research Record* No: 1122, p.47-56
5. Abishai Polus, M.ASCE, Caroline Mattar-Habib(2004), “New Consistency Model for Rural Highway and Its Relationship to Safety”, *Journal of transportation engineering*, p.286-293
6. Abishai Polus, Kay Fitzpatrick, Daniel B. Fambro(2000), “Predicting Operating Speeds on Tangent Sections of Two-Lane Rural Highways”, *Transportation Research Record* No: 1737, p.50-57
7. Alberto M. Figueroa, Andrew P. Tarko(2005), “Speed factors on four-lane highways in free-flow conditions”, *Transportation Research Record* No: 1912



8. Daniel R. Jessen, Karen S. Schurr, Patrick T. McCoy, Geza Pesti, Ryan R. Huff(1987), "Operating Speed Prediction on Crest Vertical Curves of Rural Two-Lane Highways in Nebraska", *Transportation Research Record* No: 1751, p.67-75
9. Gamal M. Gibreel, Ibrahim A. El-Dimeery, Yasser Hassan, Said M. Easa(1999), "Impact of highway consistency on capacity utilization of two-lane rural highways", *Canada journal Civil engineering* No.26, p.789-798
10. G. M. Gibreel, S. M. Easa, I. A. El-Dimeery (2001), "Prediction of Operating Speed on Three-Dimensional Highway Alignments", *Journal of transportation engineering*, p.21-30
11. G. M. Gibreel, S. M. Easa, Y. Hassan, I. A. El-Dimeery(1999), "State of the Art of Highway Geometric Design Consistency", *Journal of transportation engineering*, p.305-313
12. John McFadden, Lily Elefteriadou(1997), "Formulation and Validation of Operating Speed-Based Design Consistency Models by Bootstrapping", *Transportation Research Record* No: 1579, p.97-103
13. John McFadden, Lily Elefteriadou(2000), "Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency of Two-Lane Rural Highways", *Transportation Research Record* No : 1737, p.9-17
14. Joseph P. Tarris, Christopher M. Poe, John M. Mason, Jr., Konstadinos G. Goulias(1996), "Predicting Operating Speeds on Low-Speed Urban Streets:Regression and Panel Analysis Approaches", *Transportation Research Record* No: 1523, p.46-53
15. Kay Fitzpatrick, Jon M. Collins(2000), "Speed-Profile Model For Two-Lane Rural Highways", *Transportation Research Record* No: 1737
16. Kent M. Collins and Raymond A. Krammes(1996), "Preliminary Validation of a Speed-Profile Model for Design Consistency Evaluation", *Transportation Research Record* No: 1523, p.11-21
17. Ruediger Lamm, Elias M. Choueiri(1987), "Recommmendations For Evaluating Horizontal Design Consistency Based on Inverstigations in the State on New York", *Transportation Research Record* No: 1122, p.68-78
18. Ruediger Lamm, Elia M. Choueiri, John C. Hauward(1988), "Tangent as an Independent Design Element", *Transportation Research Record* No: 1195, p.123-131
19. Y. Hassan, G. Gibreel, S. M. Easa(2000), "Evaluation of Highway Consistency and Safety:Practical Application", *Journal of transportation engineering*, p.193-201
20. Yasser Hassan(2004), "Highway Design Consistency:Refining the sata of knowledge and practice", *Transportation Research Record* No: 1881, p.63-70

접 수 일: 2006. 8. 9

심 사 일: 2006. 8. 21

심사완료일: 2006. 9. 22