



# 차량 주행특성을 고려한 감속 완화곡선 설계방법 개발

## A Development of Design Method for Deceleration Transition Curve Based on Vehicle Driving Characteristics

이 점 호\*  
Lee, jeom ho

### Abstract

I study for design criteria and research about Interchange diverging area of express highway and freeway, the most recent, at interchange diversion of express highway and freeway, design criteria and researches are focus on safety guarantee a point of view movement dynamics of vehicle and road geometric as to transition section, deceleration section, curve radius, nose section, outflow angle etc. that is, design criteria and research of Interchange diverging area have not consider a point of view movement dynamics of vehicle and road geometric and driver, so that I will be focus characteristic of running speed on transition curve. and I will consider vehicle running speed characteristics and study problem of Interchange diverging area design criteria. For this study, First, analysis meaning about theory of now design criteria, Second, look at vehicle running speed and traffic accident characteristics of Interchange diverging area, Third, propose new deceleration transition curve design method get along vehicle running speed characteristics of Interchange diverging area, new deceleration transition curve design method put out new outcomes, that is, I definite cause to safety new deceleration transition curve design method better than presently, used design criteria of Interchange diverging area, especially, deceleration transition curve design criteria produced good result in the running speed 50km/h,40km/h, that is inertia better than inertia of present used design criteria, and deceleration transition curve is extended better than present transition curve criteria, so that new deceleration transition curve design method safety is good better than the past method safety.

*Keywords : interchange diverging area, vehicle driving characteristics, traffic accident, design criteria, deceleration transition curve*

### 요 지

고속도로 및 국도 등의 인터체인지 유출부에 대한 설계기준과 연구 내용은 주로 변이구간, 감속차로, 곡선반경, 유출각 및 노즈부의 형상 등 자동차와 도로 기하구조간의 운동역학적인 관점의 안전성 확보만 주요 관심사였다. 따라서 본 연구에서는 차량 주행속도 특성에 초점을 맞추어 첫째, 현행 설계기준의 이론적 의미를 해석하고, 둘째, 유출부 완화곡선에서 차량의 주행속도 및 교통사고 특성을 살펴보고, 셋째, 기존의 인터체인지 유출 램프부 최소곡선반경의 부적합성을 검토한 후 운전자의 완화 곡선부 주행특성에 맞는 새로운 완화곡선 설계방법을 제시하였고 그 결과를 산출하여 기존방법과 비교 검토한 결과 유출램프 완화 곡선부 설계속도 50km/h,40km/h의 경우기존의 원심력과 구심력이 평형을 이루는 최소곡선반경에서 관성력이 커져 교통사고의 위험이 높아진다는 것을 확인할 수 있었고 새로이 제안한 감속주행 완화곡선에서는 기존의 완화곡선보다 관성력이 작아지고 곡선은 커져 기존보다 안전한 곡선으로 확인되었다.

**핵심용어 : 인터체인지 유출부, 차량 주행특성, 교통사고, 설계기준, 감속 완화곡선**

\* 정희원·전북도시경영연구원 도로교통 및 R&D연구 공학박사 063-228-2227(E-mail: jeomho60@naver.com)



## 1. 서론

고속도로 및 국도 등의 인터체인지 유출부는 고속의 교통환경에서 저속의 교통환경으로 전환하는 공간으로 운전자의 주의를 요구되는 구간이며 특히 직선구간과 원곡선 구간을 연결하는 완화 곡선부는 운전자의 주행에 있어 부담을 줄뿐만 아니라 사고가 가장 많은 위험한 구간이다.

현행 인터체인지 유출부에 대한 설계기준과 그동안의 연구 내용들을 살펴보면 주로 변이구간, 감속차로, 곡선 반경, 유출각 및 노즈부의 형상 등 자동차와 도로 기하구조간의 운동역학적인 관점에서 안전성 확보에 대해서만 주요한 관심사가 되어왔다. 지금까지의 설계기준이나 연구들은 이용자인 운전자는 제공된 시설을 수용하여 적응해야하는 객체로 인식되어 운전자의 실 주행특성이 충분히 고려되지 못한 것이 사실이다\*. 이러한 주장에 타당한 논리적 뒷받침을 해주는 논거로 설계기준을 준용하여 건설된 인터체인지 유출부에서 발생한 사고들을 살펴보면 상당히 많은 사고들이 발생하고 있다. 특히 설계시 적용된 가정과 운전자의 주행특성 사이에 큰 차이를 보이는 완화곡선부에서 가장 높은 사고비율을 기록하고 있다는 것은 아직도 인터체인지 유출부 감속변이 구간에 대한 설계기준이 운전자의 주행특성을 충분히 반영하지 못하고 있다는 것을 의미하며 도로설계에서 시사하는 바가 매우 크다 하겠다.

따라서 본 연구에서는 차량 주행속도 특성에 초점을 맞추어 현행 고속도로 유출부 설계기준의 문제점을 고찰하고, 이에 대한 개선방안을 모색하고자 한다. 그리고 이를 위해 첫째, 현행 설계기준의 이론적 의미를 해석하고, 둘째, 고속도로의 유출부에서 차량 주행속도 및 교통사고 특성을 검토 분석하여 셋째, 고속도로의 유출부가 운전자의 차량 주행속도 특성을 잘 반영하도록 하는 새로운 고속도로 유출부 완화곡선 설계방법을 제시하고자 한다.

## 2. 문헌 고찰

### 1. 국내외 완화곡선 및 완화곡선길이 문헌검토

#### 1) 국내외 법령 및 기준검토

##### (1) 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 (건교부, 2001)

도로의 구조·시설기준에 관한 규칙』에서는 곡선부를 주행하는 운전자가 한 방향의 핸들조작에 어려움을 느끼지 않고 통과하는데 걸리는 시간으로 2~3초(경험치)를 적용하여 다음과 같이 최소 완화곡선 길이 산출 식을 제시하였다.

$$L = \frac{V}{3.6} \times t \quad (1)$$

여기서, V = 주행속도(km/h)  
t = 주행시간(sec)

##### (2) AASHTO(2001)

AASHTO에서는 완화곡선 산출식으로 철도의 곡선부에서 원심가속도를 점진적으로 증가시키기 위해 Shortt (1909)가 개발한 완화곡선 최소길이 산출식을 적용하였다. 완화곡선 상수 값으로는 1994년 0.0702가 적용되었고, 2001년에는 0.0214가 적용되었다. 최소완화곡선 길이 산출 시에는 최대곡선반경(R)과 설계속도(V) 그리고 측방가속 변화율(C)의 최대치(1.2)를 넣어 계산한다. 일반적으로 운전자의 편안하고 안전한 주행을 위해서는 완화곡선 길이 산출시 0.3~0.9의 측방가속변화율 값의 적용을 제시하였다.

$$L = \frac{a V^3}{RC} \quad (2)$$

여기서, a = 완화곡선 상수  
R = 곡선반경(m)  
C = 측방가속변화율( m/ s<sup>3</sup>)  
L = 완화곡선 길이

##### (3) 일본 도로구조령(2004)

일본 『도로구조령』에서는 Shortt의 식을 모두 만족시키기 위해서는 4초 정도의 주행시간이 필요하지만 이는 곡선반경이 작을 때 요구되는 시간으로 판단하여 일반적으로 본선의 경우 3초의 주행시간을 적용해서 완화곡선 길이를 결정하도록 하였다. 한편, 일본 『도로구조령』에서는 유출부 노즈부에 설치된 완화곡선 길이 산정방법으

\* 김일환(2008), 주행특성을 고려한 고속도로 유출부 안전성평가 및 설계방법론 개발, 서울대학교 박사학위논문

로 본선에서 유출하는 차량들이 노즈부를 통과할 때 연결로의 설계속도까지 감속하지 못하는 것을 감안하여 노즈부에서 연결로까지 감속하는데 필요한 거리 산출식을 제시하였고, 완화주행구간이 이를 담당하도록 하였다.

미국의 AASHTO에서 제시한 것과 달리, 일본 도로구조령에서 제시한 완화곡선 길이는 측방가속 변화율에 적용하기 위한 완화주행 거리와 연결로의 설계속도까지 감속하지 못한 운전자들이 안전하게 감속 할 수 있는 여유 거리를 제공하고 있다는데서 큰 의미가 있다.

$$L = \frac{v_0^2 - v_1^2}{2a} \quad A = \sqrt{RL} \quad (3)$$

여기서,  $v_0$  = 노즈부 통과속도(m/s)

$v_1$  = 램프 최소곡선반경 통과속도(m/s)

$a$  = 감속도(%)

$A$  = 클로소이드 패러미터(m)

#### (4) 국내의 법령 및 기준 종합검토

고속도로 유출부를 구성하는 각 구간의 도로구조에 대한 국내, 미국, 일본의 지침을 살펴본 결과, 변이구간과 감속차로구간에 대하여는 각 국의 지침이 개념상 큰 차이는 없었다. 즉, 고속도로 본선에서 유출하려는 자동차는 변이구간에서 본선차로 밖으로 차로를 변경하고 감속구간에서 연결로 설계속도까지 감속한다는 개념이다.

감속차로가 끝나는 지점에 대하여 『AASHTO』는 곡선부인 경우 곡선반경 300m 이상, 직선부인 경우에는 더 큰 곡선반경이나 완화구간의 설치를 권장하고 있으며, 『도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙』과 『도로구조령』은 노즈부 최소곡선반경과 최소완화곡선 파라미터를 규정하고 있으나 이론적 근거의 제시가 미흡하다.

주행특성과 사고에 대한 연구는 곡선부에서 완화곡선의 추가 설치로 교통사고를 줄일 수 있고 속도 크기, 분산 등 속도특성이 교통사고와 밀접한 관련이 있다고 판단된다.

## 2) 기존 연구동향 고찰

### (1) 곡선부 주행행태

#### ○ Taragin의 연구

승용차 운전자들은 곡선부에 진입한 후에 속도를 바꾸지 않으며, 대부분이 곡선반경, 시거의 제약, 혹은 기타의 이유로 곡선부 진입 이전에 속도를 감속한다고 보았다. 곡선반경이 R=100~500m, 곡선의 길이가 L=274~358m 범위에 있는 15개의 곡선부 구간에서 30m간격으로 주행차량의 속도를 측정하여 분석함으로써 얻어진 결과이다. 이 연구결과에서 제시된 또 하나의 사실은 운전자가 선택하는 곡선부 진입속도는 편경사와는 무관하다는 것이다.

#### ○ McLean의 연구

곡선부를 주행하는 승용차는 곡선부 중앙까지 감속하다 곡선부의 나머지 부분을 가속하여 나가는 반면, 화물차는 곡선부를 모두 통과할 때까지 곡선부 중앙에서 기록한 최저 속도를 유지한다고 밝히고 있다.

### (2) 기하구조와 교통사고 (완화곡선)

교통사고예측모형을 기반으로 완화곡선의 존재가 교통사고에 미치는 영향을 수치화한 연구(Charles 등, 1992)에 의하면 완화곡선이 부족하여 선형의 변화가 급격한 구간은 타 구간에 비해 사고율이 높으며, 완화곡선의 추가에 의해서 사고율이 5% 감소함을 확인하였다. 완화구간의 추가와 사고율과의 관계를 다룬 또 다른 연구(Harwood 등, 2000)에 의하면 완화곡선의 추가는 곡선부의 사고율을 6.6% 줄일 수 있음을 제시하였다.

USDOT(2000)의 연구에서는 평지부의 급격한 곡선 구간(곡률 3° 이상), 구릉지 보조간선도로의 완만한 곡선 구간(곡률 8° 이하) 그리고 교통량이 많은(ADT 4000 이상) 주간선도로에서 완화곡선의 추가로 사고율이 감소하고 산지부에서 차로폭과 길어깨 폭의 확장이 사고를 감소시킨다는 연구결과를 제시하였다.

### (3) 관련연구(김일환)

김일환(2008)의 연구에서는 국내 고속도로 유출부를 대상으로 각 기능구간별 교통사고 현황분석을 통해 노즈부 전후 즉, 완화주행구간이 사고취약 구간임을 밝혔다. 이 연구에서는 대표적인 4개소의 IC 유출부에 대한 영상



촬영 데이터 분석을 통해 지점별 속도 분포, 유출을 위한 차로변경지점, 감속주행특성을 확인하였고 이를 바탕으로 고속도로 유출부 설계안전성 평가를 위한 기준을 제시하였다. 유출부 설계안전도의 측정에 있어서는 구간별 사고율이 사고위험관리 관점에서 중요하다라는 점에 착안하여 구간별 사고율을 가중치로 하고 구간별 설치기준길이 대비 설치길이 비율을 각각 곱해서 구한 설계안전성지수를 제안하였다. 사고구간과 무사고구간에 대하여 각각 설계안전성평가 및 통계분석을 통해 구간별 설치 길이와 이를 기초로 산정한 설계안전성지수가 사고와 무사고를 특징적으로 구별할 수 있는 지표가 될 수 있음을 검증하였다. 또한 통계분석 내용을 토대로 설계안전성 평가기준을 Poor(DSI < 100 또는 설계기준 미달), Fair(100 ≤ DSI < 300), Good(300 ≤ DSI)으로 제안하였다.

한편, 새롭게 제시된 설계방법론은 완화주행구간 설치 길이를 늘리고 설계안전성지수를 크게 하여 설계안전도를 향상시키는 내용을 주요 골자로 한다. 또한 노즈부 이전에 설치될 완화주행구간 길이의 최대값을 제시함으로써 완화주행구간의 시작위치 및 범위를 결정할 수 있게 하였고, 노즈부 이후 감속 완화주행구간의 길이의 최소값을 제시하여 설계안전성이 증대되도록 하였다.

## 2. 완화곡선 산출식 유도 및 해석

자동차의 운전자는 직선부에서 평면곡선부로 주행할 때, 그 회전반경이 무한대(직선)에서 차츰 일정한 반경으로 적응 할 수 있도록 핸들을 조작하게 된다. 즉 직선 주행에서 일정 반경의 원곡선구간으로 주행하기 위해서는 직선과 원곡선부 사이에 어떤 특별한 형태의 곡선주행을 하게 되는데 이때의 주행을 완화주행이라 한다.

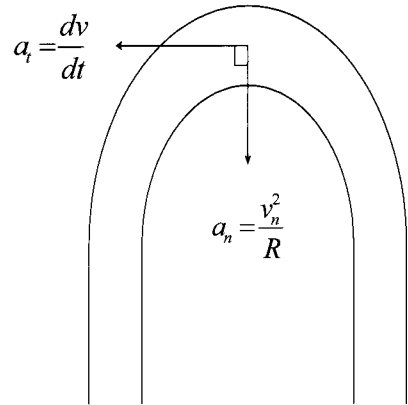
다음은 완화곡선 산출식과 관련된 개념 및 산출식의 유도과정이다. 완화곡선 유도과정은 원곡선부에서 나타나는 원심가속도의 유도로부터 출발하며, 직선구간에서 원곡선부까지 무한대의 곡선반경을 일정한 값의 곡선반경까지 줄여가는 과정에서 필요한 완화주행 길이를 산출하게 된다.

### 1) 원심가속도

$$v_n = \frac{dR}{dt} \rightarrow \frac{R}{t} \quad \therefore t = \frac{R}{v_n} \quad (4)$$

$$a_n = \frac{dv_n}{dt} \rightarrow \frac{v_n}{t} = \frac{v_n}{R/v_n} = \frac{v_n^2}{R} \quad (5)$$

이 때, 특별히 평면곡선의 설계에 있어서 최소곡선반경(또는 곡선반경)에 대한 최대속도를 구하는 경우는  $v_n = v$ 가 된다. ( $a_t$ =접선방향가속도,  $a_n$ =원심가속도)



(그림 1) 원심가속도 및 접선방향 가속도

### 2) 회전각가속도

원곡선부에서와 같이 주행속도 ( $v$ )와 곡선반경( $R$ )이 일정하면 회전각가속도  $w' = 0$ 이 되며, 회전각속도  $w$ 는 등속이 된다. 그러나 완화곡선부에서는 주행속도 ( $v$ )가 등속으로 일정(constant)하나, 곡선반경( $R$ )이 변수(variable)가 되고 회전각가속도  $w'$ 가 일정한 값을 지니므로, 회전각속도  $w$ 는 등가속이 된다. 즉, 완화곡선부에서 차량은 기본 가정에 의해 진행방향으로 등속주행을 하며 측방으로는 등가속의 회전운동을 하게 된다. 다음은 완화곡선부 회전각가속도의 산출 과정이다.

$$L = R\theta, \quad w = \frac{d\theta}{dt}$$

$$v = \frac{dL}{dt} = \frac{d(R\theta)}{dt} = R \cdot \frac{d\theta}{dt} = R \cdot w \quad (6)$$

$$\therefore w = \frac{v}{R} \quad (7)$$

$$a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d(Rw)}{dt} = R \frac{d(w)}{dt} = R w' \quad (8)$$



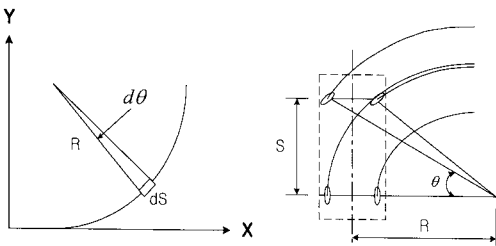
여기서,  $v_n$  = 평면곡선부의 법선방향 속도 ( $m/s$ )  
 $a_n$  = 평면곡선부 원심가속도(법선방향가속도)  
 ( $m/s^2$ )  
 $v$  = 평면곡선부의 주행속도(접선방향 속도)  
 ( $m/s$ )  
 $a_t$  = 평면곡선부의 주행가속도(접선방향 가속도)  
 ( $m/s^2$ )  
 $w$  = 자동차의 회전가속도 ( $\Theta/s$ )  
 $w'$  = 자동차의 회전각 가속도 ( $\Theta/s^2$ )

$$R = \frac{s}{\tan\theta} \quad (9)$$

$$w = \frac{v}{R} = \frac{v}{s} \tan\theta \quad (10)$$

여기서,  $s$  = 자동차의 전륜과 후륜 사이의  
 거리(축거) (m)

$$\begin{aligned} \therefore w' &= \frac{d(w)}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{v}{s} \tan\theta \right) = \frac{d}{d\theta} \left( \frac{v}{s} \tan\theta \right) \frac{d\theta}{dt} \\ &= \frac{v}{s} \cdot \frac{d}{d\theta} (\tan\theta) \frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{s} \cdot \sec^2\theta \frac{d\theta}{dt} \quad (11) \end{aligned}$$



(그림 2) 자동차의 완회주행

### 3) 완회곡선 패러미터(A)

직선부에서 평면곡선부로 또는 평면곡선부에서 직선  
 부로 주행하는 회전각가속도  $w'$ 가 일정할 때 차량의  
 주행궤적을 구해보면 다음과 같다.

$$w' = \frac{v}{s} \cdot \sec^2\theta \frac{d\theta}{dt} = k(\text{일정}) \quad t \text{에 대해 양변을}$$

$$\text{적분하면, } \tan\theta = \frac{k \cdot s}{v} \cdot t + c$$

$t=0$  일 때,  $\tan\theta=0$ 이므로,  $c=0$ 이 된다.

$$\text{따라서, } R = \frac{s}{\tan\theta} = \frac{v}{k \cdot t} \quad \text{완회곡선의 길이를 } L$$

$$\text{이라 하면, } t = \frac{L}{v}, \quad R = \frac{v^2}{k \cdot L}$$

$$\therefore R \cdot L = \frac{v^2}{k} = A^2 \left( A^2 = \frac{v^2}{k} = \text{일정} \right) \quad (12)$$

### 4) 완회곡선 길이

$$R = \frac{v^2}{k \cdot L} \rightarrow L = \frac{v^2}{R \cdot k}, \quad k = \frac{c}{V}$$

$$\therefore L = \frac{v^3}{R \cdot c} \quad (13)$$

여기서,  $k$  = 회전각 가속도 ( $\Theta/s^2$ )  
 $c$  = 측방가속도변화율 ( $m/s^3$ )

### 3. 고속도로 유출부에서 차량의 주행속도 및 교통사고 특성

#### 1) 고속도로 유출부에서 차량의 주행속도 특성\*

한국도로공사에서 수행한 『고속도로 분합류부 설계  
 기준 수립에 관한 연구(2005)』에서는 “감속구간 시점  
 부에서의 평균속도는 현 설계기준에서 사용하고 있는  
 값과 비슷하거나 작은 반면 종점부인 노즈부(완회주행  
 구간)에서의 평균속도는 현 설계기준에서 사용하고 있  
 는 값보다 모두 큰 것을 확인” 하였다.

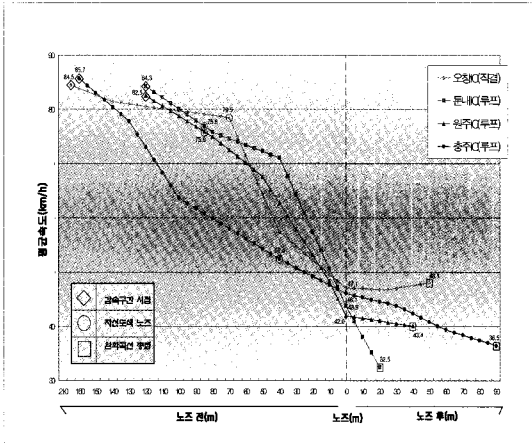
또한 상기 연구에서는 <그림 3>과 같이 IC별 유출부의  
 지점별 평균속도를 조사한 결과 “차선도색 노즈부에  
 이르기 전의 감속구간에서는 고속도로 설계기준에서 사  
 용되는 1.96m/s<sup>2</sup> 보다 훨씬 작은 감속도로 주행하다 차  
 선 도색 노즈부 이후 완회주행구간에서 급격한 감속” 을  
 보이는 것을 확인하였다.

이상의 결과를 통해 고속도로 유출부에서는 현행 설계개  
 념처럼 감속구간에서 감속이 종결되지 않고 등속으로 주행

\* 한국도로공사(2005), 고속도로 분·합류부 설계기준 수립에 관한 연구



해야 하는 완화 곡선부까지 감속이 이어짐을 알 수 있다. 이를 통해 향후 감속구간의 설계 및 유출부에서의 안전성 향상 방안으로는 완화곡선부에서 실제 차량의 주행 형태를 반영해 주어야 할 것으로 사료된다.



〈그림 3〉 IC별 고속도로 유출부 평균속도 비교

## 2) 고속도로 유출부에서 교통사고 특성\*

『주행특성을 고려한 고속도로 유출부 안전성평가 및 설계방법론 개발(김일환, 2008)』에서는 총 23개 IC에 대한 4년(2001년~2004년)간의 사고 45건에 대해 분석한 결과 변이구간에서 7건, 감속구간에서 9건, 완화주행구간에서는 29건의 사고가 발생한 것을 확인 할 수가 있었다.

상기 연구에서 제시한 〈표 1〉의 결과를 살펴볼 때, 고속도로 유출부의 교통사고는 운전자의 주행속도 감속과 방향전환이 동시에 요구되는 고속도로 유출부 완화주행구간에서 변이구간이나 감속구간보다 더 밀접한 관계를 보이는 것으로 해석할 수가 있었다.

〈표 1〉 고속도로 유출부의 사고건수 및 분포율

	변이구간	감속구간	완화주행구간	계
교통사고(건수)	7	9	29	45
분포(%)	0.16	0.20	0.64	100

## 3. 고속도로유출부 감속완화곡선모형개발

### 1. 모형개발 개념 및 방향

앞에서 살펴본 바와 같이, 감속 완화곡선은 운전자들이 감속구간에서 충분히 감속하지 못함으로 인해 완화곡선부에서 연결로 설계속도와 동일한 속도로 등속주행하지 못하고 감속주행을 하는데서 그 필요성이 대두되게 되었다. 본 연구에서 제시하는 새로운 감속 완화곡선의 산출 개념을 기존의 완화 곡선부 및 원곡선부의 기하구조(곡선반경)와 속도 등의 특성을 토대로 비교해보면 〈표 2〉 및 〈표 3〉과 같다.

〈표 2〉 및 〈표 3〉에서 보는 바와 같이, 새로이 제시하는 감속 완화곡선 산출 방식과 기존 방식의 가장 큰 차이점은 기하구조 설계의 기본 가정인 완화곡선부에서의 등속주행이 운전자의 주행특성과 맞지 않다는 것이다. 즉, 기하구조 설계의 기본가정과 운전자의 주행특성이 서로 상이함으로써, 운전자 부담감(Driver's Work Load)이 발생하게 되며, 이 같은 상이함 정도에 따라 사고 위험도도 달라진다고 판단된다.

〈표 2〉 기존 완화곡선 및 원곡선 특징

구분 \ 항목	기존 완화곡선	원곡선	비고
곡선반경 (R)	감소	일정	기하구조 특성
주행속도 (V)	일정	일정	실제 기본가정
각속도 ( $\omega$ )	증가	일정	R과 V에 의해 중속적으로결정
각가속도 ( $\omega'$ )	일정	0	

따라서 본 연구에서는, 고속도로 유출부 완화곡선부에서 운전자의 감속 주행행태를 반영한 완화곡선 산출식을 〈표 3〉과 같이 제시 검토하였다

〈표 3〉 새로운 완화곡선 설계 개념

구분 \ 항목	새로운 완화곡선	원곡선	비고
곡선반경 (R)	감소	일정	기하구조 특성
주행속도 ( $v$ )	감속	일정	운전자 주행특성 반영
각속도 ( $\omega$ )	일정	일정	편안하고 안전한 주행을 위해 수정
각가속도 ( $\omega'$ )	0	0	

\* 김일환(2008), 주행특성을 고려한 고속도로 유출부 안전성평가 및 설계방법론 개발, 서울대학교 박사학위논문



## 2. 고속도로 유출부 감속 완화곡선 산출식 개발

본 연구에서 제시하는 감속 완화곡선은 <표 3>에 제시된 바와 같이 완화곡선부에서 주행속도의 감속, 일정한 각속도(각가속도=0)를 기본 조건으로 이를 구현하는 방법을 토대로 다음과 같은 식이 개발되었다.

$$R = \frac{s}{\tan\theta}, \quad w = \frac{v}{R} = \frac{v}{s} \tan\theta$$

$$w' = \frac{a}{s} \cdot \tan\theta + \frac{v}{s} \cdot \sec^2\theta \frac{d\theta}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{a}{s} \cdot \tan\theta = -\frac{v}{s} \cdot \sec^2\theta \frac{d\theta}{dt}$$

$$\Rightarrow a \cdot \tan\theta = -v \cdot \sec^2\theta \frac{d\theta}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{a}{v} = -\frac{\sec^2\theta \frac{d\theta}{dt}}{\tan\theta} \quad \text{t에 대해 양변을 적분하}$$

$$\text{면, } \ln v = -\ln \tan\theta = \ln(\tan\theta)^{-1}$$

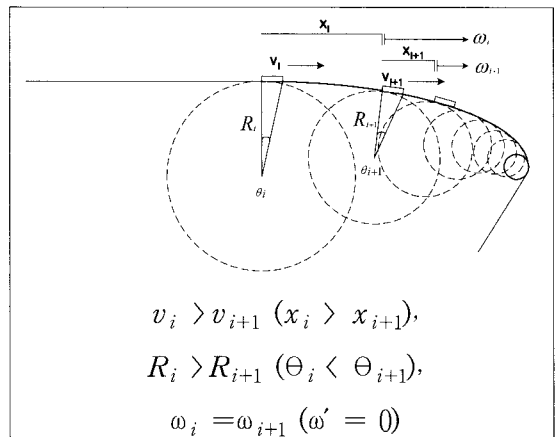
$$\therefore v = (\tan\theta)^{-1} = \frac{1}{\tan\theta} \Rightarrow v \cdot \tan\theta = 1$$

$$\text{그러므로, } w = \frac{v}{R} = \frac{v}{s} \tan\theta = \frac{1}{s} \quad (\text{일정})$$

$$R = \frac{s}{\tan\theta} = v \cdot s \quad (14)$$

이상의 식에서 알 수 있는 것은, 각속도가 일정한 완화 주행궤적에서 속도와 곡선반경의 변화는 비례관계에 있으며, 일정한 거리로 표현되는 축거(s)에 대한  $\tan\theta$  값은 속도 및 곡선반경과 반비례관계에 있다는 것을 알 수가 있었다. 즉, 기존의 완화주행구간에서는 자동차의 등속주행을 가정하기 때문에 회전각속도가 증가하게 되는데 실제 운전자는 가정된 속도보다 높은 속도에서 점차 감속하여 주행을 하게 됨으로써 운전자에게 작용하는 관성이 원곡선부와 달리 축방(진행방향)으로 크게 작용한다. 다시 설명하면, 차량의 진행방향은 원곡선의 접선방향이 되는데 완화곡선부에서는 차량이 주행할수록 원곡선반경이 작아지게 되고 작아지는 원곡선반경을 주행하는 차량은 완화주행궤적을 이탈하려는 힘(관성)이 작용하게 된다. 이것이 완화곡선부에서 발생하고 있는 차량의 주행궤적 이탈사고와 깊은 관련이 있음을 설명해 주는 것이다.

한편, <그림 4>에서 보는 바와 같이 각속도가 일정한 감속주행의 경우에는, 비록 완화곡선부에서 감속을 하더라도 원곡선을 등속으로 주행할 때와 마찬가지로 회전각속도가 일정하게 되며, 기존 완화곡선부와는 달리 축방으로 작용하는 관성력이 원곡선부에서와 같이 동일한 수준으로 나타나게 된다. 반면 회전각속도가 증가하는 기존의 완화곡선보다는 축방으로 작용하는 관성력이 작게 나타나게 된다.



<그림 4> 고속도로 유출부 완화곡선부에서 새로운 감속 완화곡선 주행특성 개념도(각속도 일정)

## 4. 고속도로 유출부 감속 완화곡선 설계 방법

### 1. 적정 감속 완화곡선 최소 길이 산출

감속 완화곡선 최소 길이는 실제 차량의 감속주행 특성을 고려하여 일본 도로구조령에서 제시한 유출부와 노즈부에 설치된 완화곡선 길이 산정방법과 같이 완화곡선의 시종점부 속도를 적용하여 식(15)와 같이 산출한다.

$$L_{\min} = \frac{v_0^2 - v_1^2}{2a} \quad (15)$$

여기서,  $v_0$  = 완화곡선 시점부 속도 (m/s)  
 $v_1$  = 완화곡선 종점부 속도 (m/s)  
 $a$  = 평균 감속도 (1.0 m/s<sup>2</sup>)



## 2. 설계속도별 기존 완화곡선반경과 새로운 감속완화곡선반경 비교검토

주행 중인 차량이 원심력과 구심력이 평형을 이룬 상태에서 회전각속도가 증가하는 기존의 완화곡선에서는 관성력이 커지는 특성을 나타내고 있다. 그리고 기존의 완화곡선에서 설계속도별로 주행할 수 있는 최소 평면곡선반경은 도로의 편경사와 노면마찰계수 및 설계속도의 관계로부터 식 (16)과 같이 구해진다.

$$R_n = \frac{v^2}{g(e+f)} \quad (16)$$

여기서,  $R_n$ =원심력(법선방향)대향최소곡선반경 (m)  
 $V$ = 설계속도 또는 평균주행속도

한편, 본 연구에서 제시한 각속도가 일정한 감속주행의 경우에는, 비록 완화곡선부에서 감속을 하더라도 원곡선에서 등속 주행할 때와 마찬가지로 회전각속도가 일정하게 되며, 기존 완화곡선부와는 달리 측방으로 작용하는 관성력이 원곡선부와 같이 동일한 수준으로 나타나게 된다. 따라서 완화곡선부에서 회전각속도가 일정한 감속주행에 필요한 최소 곡선반경 유도식과 개념은 식 (17)로부터 구할 수 있다.

$$R_t = v \cdot s \quad (17)$$

$$R_t = \text{관성력(접선방향)대향최소곡선반경 (m)}$$

$V$ = 설계속도 또는 평균주행속도

(표 4) 설계속도별 기존의 완화곡선과 새로운 방법의 감속완화곡선 간 비교

설계속도	e	f	Rn (m) 기존완화곡선	Rt (m)(감속완화곡선)		
				semi-t1) (s=9m)	대형차 (s=6.5m)	승용차 (s=2.7)
120	0.06	0.1	7103)	300	271	90
110	0.06	0.1	6003)	275	199	83
100	0.06	0.11	4603)	250	181	75
90	0.06	0.11	3803)	225	163	68
80	0.06	0.12	2803)	200	144	60
70	0.06	0.13	2003)	175	126	53
60	0.06	0.14	140	1503)	108	45
50	0.06	0.16		1253)	90	38
40	0.06	0.16		1003)	723)	30

주1) : 고속도로 설계기준 차량,  
 주2) : ( )는 e=0.08 적용한 값  
 주3) : 설계속도 별 감속 완화곡선에 필요한 최소 곡선 반경

(표 4)는 평면곡선에서 설계속도별 최소 곡선반경과 감속 완화주행을 위한 최소 곡선반경 산출 결과를 나타낸 것이다. 고속도로의 경우, 본선에서 램프유출부로 진입 할 때 본선과 램프 원곡선사이 완화곡선과 접하는 최소 평면곡선반경은 원심력과 측방가속도 모두를 충족시켜야 한다. (표 4)의 결과는 설계속도별로 필요한 최소곡선반경을 나타낸 것이며 굵은 글자체의 최대값이 고속도로 유출램프 진입부 평면곡선에서 적용해주어야 할 최소곡선반경 값이다.  $R_n \geq R_t$ 인 조건을 만족해야 곡선상을 주행하는 운전자는 안전운행을 할 수가 있다. 따라서 새로운 감속주행 완화곡선식에 의해 산출한 결과 설계속도 50km/h 및 40km/h에서 기존의 최소 평면곡선반경 ( $R_n$ )을 값을 적용할 경우, 완화곡선부에서 운전자들이 감속 주행을 하기 어려운 상황에 처하게 된다. 즉 설계속도 40km/h, 50km/h 구간에서는 최소평면곡선반경 ( $R_n$ )보다 큰  $R_t$ 의 감속완화 최소곡선반경( $R_t$ )를 적용 해주어야 완화곡선부에서 운전자가 감속을 하면서 안전한 주행을 할 수 있다.

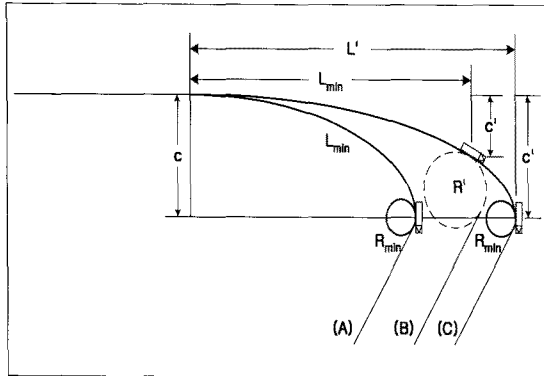
## 3. 고속도로 유출부 감속완화곡선 설치 방법 1) 측방가속변화를 조정

(그림 5)에서 (A)는 일본 방식으로 감속에 필요한 거리를 먼저 산정한 후 기존 방식에 의해 완화곡선을 설치하는 예이며, (B)는 본 연구에서 새로이 제시한 방식으로 감속에 필요한 거리를 먼저 산정한 후 감속 완화곡선 설치 방식에 의해 완화곡선을 설치한 예이다. (그림 5)에서 보는 바와 같이 원활한 감속 완화주행을 위해서는 당초 정해진 연결로 설계속도에 해당하는 최소 원곡선반경  $R_{min}$ 보다 큰  $R'$ 을 적용 하여야 한다. 이 때 동일한 완화곡선 길이  $L_{min}$ 에 대하여 최소 원곡선반경  $R_{min}$ 이  $R'$ 로 변화하였으므로 측방가속변화를 역시  $c$ 에서  $c'$ 로 변화하게 된다. 즉 동일한 완화곡선 길이에 대하여 측방가속 변화율을 달리 적용할 경우, 다른 값의 최소 곡선반경 적용이 가능해진다.

$$(A) \text{ 방식 ; } L_{min} = \frac{v^3}{R_{min} \cdot c} \quad (18)$$

$$(B) \text{ 방식 ; } L_{min} = \frac{v^3}{R' \cdot c'} \quad (19)$$





〈그림 5〉 기존방법과 새로운 제안방법에 의한 완화곡선의 설치비교

## 2) 완화곡선 길이 조정

도로 건설시 고려되는 여러 가지 제약조건으로 인해 앞에서 구한 곡선반경  $R'$ 을 적용하기 곤란한 경우에는 감속 완화주행이 가능하도록 측방가속변화율  $c'$ 를 적용하여 연결로 설계속도에 맞는 최소 원곡선반경  $R_{min}$ 을 적용하여 증가된 완화곡선 길이  $L'$ 을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$(C) \text{ 방식} : L' = \frac{v^3}{R_{min} \cdot c'} \quad (20)$$

## 3) 완화곡선 파라메타(A)

완화곡선 파라메타(A)는 Shortt에 의해 개발된 Spiral Curve의 형태를 결정짓는 파라메타로서 곡선반경  $R$ 과 완화곡선 길이  $L$ 에 의해 결정된다. 따라서 본 연구에서 제시한 감속 완화곡선의 형태를 결정짓는 파라메타(A)는 다음과 같이 일정하므로 운전자의 감속 완화주행에는 차이가 없으며, 다만 도로 건설시 따르는 제약 조건에 맞추어 적절한 곡선반경 및 완화곡선길이를 결정할 수 있다. 이 때 완화곡선 길이  $L$ 은 최소값  $L_{min}$ 과 최대값  $L'$  사이에 놓이게 된다.

$$R \cdot L_{min} = R_{min} \cdot L = \frac{v^3}{c} = A^2 \quad (21)$$

## 4. 새로운 감속주행 완화곡선반경 산출식에 의한 적정 완화곡선길이와 국내외 기준 검토

고속도로의 연결로 설계속도별 기준 최소곡선반경보다 큰 값을 요구하는 감속주행완화곡선의 곡선반경은 설계속도 50km/h 및 40km/h의 범위에서 나타났다. 연결로 설계속도 40km/h, 50km/h에서 감속주행 완화곡선 반경식에 따른 적정완화곡선길이를 산출해보면 〈표 5〉와 같이 산출되었다. 〈표 6〉은 일본 기준에 의한 방식과 본 연구에서 새로이 제시한 방식간의 비교를 나타낸 것이며, 〈표 7〉은 국내의 최소 완화곡선 길이 기준과 새로이 산출된 감속 완화곡선 길이 산출 결과를 비교한 것이다.

〈표 5〉 감속 완화곡선 길이 산출 결과

완화곡선 설계속도	노즈 부통과 속도 $u_0$	연결로 실제평균주행속도 $u_1$ )	$R_{min}$ (m)	$R'$ (m)	$c'$ $m/s^3$	$L_{min}$ (m)	$L'$ (m)
50	60	42	90	125	0.18	71	98
40	55	35	60	100	0.13	69	116

주1) : 완화곡선 길이 산정시 반영된 노즈부 통과속도  $u_0$ ,  $u_1$ 는 고속도로 연결로의 실제 평균주행속도를 적용한 값임

〈표 6〉은 일본에서 적용하고 있는 방법과 본 연구에서 개발한 (B)방식과 (C)방식 간 비교표로서 방식(B)는 동일한 최소완화곡선길이에 따른 곡선반경, 측방가속변화율, 완화곡선 파라메타의 변화를 비교한 것이며 방식(C)는 동일한 곡선반경에 따른 측방가속변화율, 완화곡선 파라메타, 완화곡선길이 변화를 비교한 것이다.

〈표 6〉 일본 방법과 본 연구 방법의 완화곡선 길이 산정방법 비교

		연결로설계속도	50	40
일본 방법1)	(A) 방식(m)	$R_{min}$	90	60
		$c$	0.25	0.22
		$L_{min}$	71	69
		$A$	80	65
본 연구 방법2)	(B) 방식(m)	$R'$	125	100
		$c'$	0.18	0.13
		$L_{min}$	71	69
	(C) 방식(m)	$A'$	94	83
		$R_{min}$	90	60
		$c'$	0.18	0.13
		$L'$	98	116
	$A'$	94	83	

주1) : 일본산출 방식에 국내 기준을 적용할 경우

주2) : 본 연구에서 새로이 제시한 방법으로 국내 기준을 적용 할 경우



국내외 고속도로 유출부 완화곡선구간의 최소완화곡선길이가 기준과 본 연구에서 산출한 감속주행 완화곡선 길이를 <표 7>과 같이 설계속도 50km/h, 와 40km/h에 대해 비교한 결과 우리나라의 고속도로 연결로 유출부의 완화곡선 설계 기준이 매우 낮다는 것을 확인 할 수가 있다.

반면 본 연구에서 검토한 감속주행완화곡선길이가 미국이나 일본의 기준과 잘 부합한 결과를 나타내 주고 있었으며 우리나라의 고속도로 유출부 연결로에서 운전자의 안전한 주행확보를 위해서는 최소완화곡선길이를 조정해 줄 필요가 있는 것으로 분석되었다.

<표 7> 국내외 최소 완화곡선 길이 기준과 본 연구 감속 완화곡선 길이 산출결과와 비교

연결로 설계 속도 (km/h)	우리 나라 (m)	일본 (m)	미국 (m)	본 연구 (m)	
				Lmin	L'
50	30	99	33~99	71	98
40	25	82	25~76	69	116

## 5. 결론 및 향후연구

본 연구의 결과로 고속도로의 유출부 연결로 완화곡선 구간에서 교통사고발생이 잦은 점에 착안 연결로의 최소 평면곡선반경이 원심력과 측방가속도 모두를 충족시키는지와 교통사고 예방 및 안전을 위한 완화 곡선부 최소완화곡선 길이의 개정이 필요한 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 연구 결론을 얻을 수가 있었다.

1) 현재 우리나라 고속국도 및 국도의 인터체인지 연결로 설계속도 40km/h, 50km/h에서 유출부 연결로 완화곡선 설계기준이 운전자들의 안전한 주행을 도로 구조적으로 확보해 주기에는 미흡한 것으로 나타났다.

따라서 우리나라의 인터체인지 유출부 연결로 최소완화곡선반경 설계기준보다 큰 감속 완화곡선반경을 적용해 주어야 할 것으로 분석되었다.

설계속도 50km/h에서 현행 설계기준 최소곡선반경은  $R_n=90m$ 인데 감속완화곡선을 적용해 줄 경우에는

$R_t=125m$ 가 필요한 것으로 산출되었고 설계속도 40km/h에서 현행 설계기준 최소곡선반경은  $R_n=60m$ 인데 반해 감속완화곡선 산출방식을 적용해 줄 경우  $R_t=100m$ 가 필요한 것으로 나타났다.

2) 고속도로 유출부 완화곡선구간에서 운전자가 원활한 감속 완화주행을 하기 위해서는 우리나라 설계기준에서 정해진 연결로 설계속도에 해당하는 최소 원곡선반경  $R_{min}$ 보다도 큰 곡선반경  $R'$ 를 적용해 주어야 한다. 그리고 이 때 동일한 최소완화곡선 길이  $L_{min}$ 에 대하여 최소 원곡선반경  $R_{min}$ 이 곡선반경  $R'$ 로 변함에 따라 측방가속변화율 역시  $c$ 에서  $c'$ 로 변하게 된다는 것을 알게 되었다.

3) 도로 건설시 고려되는 여러 가지 제약조건으로 인해 운전자가 원활한 감속 완화주행을 하기 위해서는 최소 원곡선반경  $R_{min}$  보다 큰 곡선반경  $R'$ 를 적용하기 곤란한 경우가 있을 때에는 감속 완화주행이 가능한 측방가속변화율  $c'$  '를 적용하여 연결로 설계속도에 맞는 완화곡선 길이  $L'$ 을 다음과 같이 산출할 수가 있었다.

$$(C) \text{ 방식 : } L' = \frac{v^3}{R_{min} \cdot c''}$$

4) 완화곡선 파라메타(A)는 Spiral Curve의 형태를 결정짓는 파라메타로서 곡선반경  $R$ 과 완화곡선 길이  $L$ 에 의해 결정되는데 본 연구에서는 감속 완화곡선의 형태를 결정짓는 파라메타(A')를 다음 식과 같이 일정한 것으로 나타나 운전자의 감속 완화주행에는 차이가 없으며, 다만 도로 건설시 따르는 제약 조건에 따라 적절한 곡선반경 및 완화곡선길이를 결정할 수가 있다는 것을 확인 할 수가 있었다. 이 때 운전자에게 쾌적한 주행을 주는 완화곡선 길이  $L$ 은 최소값  $L_{min} < L < \text{최대값 } L'$  사이 값으로 나타났다.

$$R \cdot L_{min} = R_{min} \cdot L' = \frac{v^3}{c} = A'^2$$

또한 노즈부 이전에 설치될 감속 완화주행구간 길이의 최대값을 제시함으로써 완화주행구간의 시작위치 및 범위를 결정할 수 있게 하였다. 즉, 연결로 설계속도



50km/h에서 적정 완화곡선길이는 최대값  $L'=98m$ , 40km/hr에서 적정 완화곡선길이는 최대값  $L'=116m$  적용을 제안하였고 노즈부 이후 감속 완화주행구간의 길이는 설계속도 50km/h에서 최소값  $L_{min}=71m$ , 설계속도 40km/hr에서 최소값  $L_{min}=69m$ 를 제시하여 설계안전성이 증대되도록 하였다.

향후 연구과제로는 본 연구의 결론을 보편화 할 수 있도록 하기위한 연결로의 설계속도별 최소완화곡선반경  $R_{min}$ 보다 큰  $R'$  값 적용과 적정완화곡선길이  $L$  산정, 측방가속변화율  $c''$  산출 등에 대한 실제적용 및 검증을 위해 보다 많은 현장 중심 case study가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

**참고문헌**

1. 도로구조령해설과 운용(2004), 사단법인 일본도로협회
2. 도로의 구조시설기준에 관한 규칙, 해설 및 지침(2000), 건설교통부.
3. 고속도로 분합류부 설계기준 수립에 관한 연구, 한국도로공사(2005),

4. 주행특성을 고려한 고속도로 유출부 안전성평가 및 설계방법론 개발, 김일환(2008), 서울대학교 박사학위논문
5. A Polocy on Geometric Design of Highways and Streets(2001), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
6. Taragin A.(1954), Dr iver Performance on Horizontal Curves, Proceedings of the US Highway Research Board, 25
7. McLean J.R.(1974), Driver Behaviour on Curves – a Review, Proceedings 7th Australian Road Research Board Conference, 7(5)
- 8., McLean J.R.(1974), Driver Behaviour on Curves –a Review, Proceedings 7th Australian Road Research Board Conference, 7(5)

접 수 일 : 2008. 5. 15  
 심사 일 : 2008. 6. 2  
 심사완료일 : 2008. 8. 13