

■ 論 文 ■

# 도로 평면곡선부에서 동적궤도이탈모형 개발에 관한 연구 (굴절차량을 중심으로)

Development of a Dynamic Offtracking Model on Horizontal Curve Sections  
(Based on Articulated Vehicles)

**최재성**

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

**김우현**

((주)동명기술공단 종합건축사사무소  
교통계획부 이사)

## 목 차

- I. 서론
  - II. 기존 연구의 고찰
    - 1. 궤도이탈의 개념
    - 2. 저속 궤도이탈모형
    - 3. 동적 궤도이탈모형
  - III. 우리나라 및 외국의 확폭설치기준
    - 1. 우리나라의 확폭 설치기준
    - 2. AASHTO의 확폭 설치기준
  - IV. 기존모형의 한계점 및 새로운 모형의 개발
    - 1. 기존모형의 한계점
    - 2. 동적 궤도이탈모형 개발
  - V. 새로운 모형 평가 및 적용
    - 1. 모형의 평가
    - 2. 기존모형과 새로운 모형 비교
    - 3. 확폭량 산정결과 및 모형값 비교
  - VI. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 동적궤도이탈모형, 동적확폭량 산정모형, 굴절차량, 확폭량, 차량주행폭원

## 요 약

도로의 평면곡선부는 선형 설계시 직선부와 달리 여러 가지 요소를 추가적으로 고려하며 확폭의 문제도 이중의 하나이다. 확폭은 차량 뒷바퀴가 앞바퀴의 궤적을 따라 주행하지 않고 이탈하는 궤도이탈(offtracking)현상 때문에 발생하고, 곡선부 설계시 이러한 현상을 반영하여야 운전자 안전성을 보장할 수 있다. 특히 대형차량 운행이 빈번한 산업도로나, 곡선반경이 작은 산악지역 간선도로의 경우 궤도이탈현상으로 인해 곡선부 사고위험이 증가하기 때문에 확폭 필요성이 강조된다.

본 연구에서는 굴절차량 궤도이탈모형 이론 및 확폭 설치 기준에 관련된 국내외 연구 결과를 비교·검토하여 도로의 기하구조와 차량의 속도를 감안한 현실적인 동적 궤도이탈모형(Dynamic Offtracking Model)을 개발하여 이 모형을 이용한 확폭량 산정 방법을 제시하였다.

본 연구로부터 얻어진 성과는 다음과 같다. 첫째, 견인차와 피견인차의 동적 거동에 편경사 영향을 반영할 수 있는 궤도이탈모형을 개발하였다. 둘째, 개발된 동적 궤도이탈모형을 이용하여 우리나라 실정에 맞는 새로운 확폭량 산정 방법을 개발하였다. 셋째, 개발된 모형을 이용하여 실제 궤도 이탈량과 확폭량을 산정하여 현재 사용되고 있는 우리나라 곡선부 확폭 설치기준의 타당성을 살펴보았다.

### 1. 서론

도로의 평면곡선부 선형설계시 직선부와 달리 여러 가지 요소를 추가적으로 고려하여 설계를 하여야 한다. 확폭의 문제도 곡선부에서 추가적으로 고려하여야 할 요소이다. 곡선부 주행시 차량 앞바퀴의 궤적과 뒷바퀴의 궤적이 달리 나타나는 궤도이탈(offtracking)현상으로 인해 직선부 차로폭보다 더 넓게 설치 하여야 한다. 이러한 궤도이탈 현상은 곡선부의 확폭량을 결정하는 데 기초가 된다. 현행 확폭 설치기준은 차량이 저속으로 운행하고 곡선부 기하구조의 주요특성중의 하나인 편경사가 설치되지 않았다고 가정하여 정립되었으나, 실제로 도로상에서 차량은 저속 뿐만 아니라 고속으로 운행하고 있으며, 곡선부에서는 적절한 편경사가 설치되어 있기 때문에 이러한 특성을 감안한 궤도이탈모형을 개발하여 보다 현실적인 곡선부의 확폭량을 결정할 필요성이 있다.

본 연구에서는 기존의 연구된 궤도이탈모형의 문제점을 해소 할 수 있는 새로운 모형을 개발하고, 이를 적용하여 새로운 확폭량 산정기법을 제안하고자 한다.

### II. 기존 연구의 고찰

기존모형은 차량의 속도의 고려 유무에 따라 저속모형과 고속모형으로 나눌수 있으며 저속모형의 대표적인 모형으로는 WHI모형이 있으며 고속모형으로는 Bernard모형과 Harwood모형이 있다. 한편 고속모형은 차량 움직임이 지극히 순간적이므로 동적모형이라고 부를 수 있다.

#### 1. 궤도이탈의 개념

궤도이탈이란 굴절 차량의 견인차 앞바퀴 축의 중심이 형성하는 곡선반경과 피견인차의 뒷바퀴축의 중심이 형성하는 곡선반경의 차이를 말하며, 식(1)과 같이 간단히 표현할 수 있다.

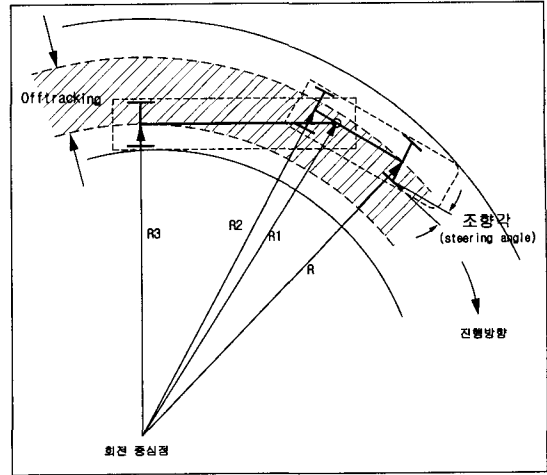
$$OT = R - R_3 \tag{1}$$

여기서,

OT : 평면곡선부에서 발생하는 궤도이탈량

R : 앞바퀴축의 중심이 형성하는 곡선의 반경

R<sub>3</sub> : 뒷바퀴축의 중심이 형성하는 곡선의 반경



<그림 1> 궤도이탈의 개념도

<그림 1>에서 Offtracking은 음영으로 표시한 부분이며, 도로설계시 이 부분만큼 추가적으로 확폭하여 운전자가 직선부 주행시와 같은 정도의 주행안전성을 갖도록 해야 한다.

#### 2. 저속 궤도이탈모형

이 모형의 기본가정은 곡선부 주행시 차량에 원심력이 발생하지 않는다는 것이며, 따라서 이 가정에 따르면 차량미끄럼각은 형성되지 않는다.

이러한 방식에 따라 수학적 기하구조를 이용한 전형적이고 대표적인 방법은 미국의 WHI(Western Highway Institute)에서 개발되었다. 이 방법은 모든 실제적인 목적에 사용되기에 좋고, 계산하기 쉽고 적용하기 간편하다는 장점이 있다. 이 방법은 미국의 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials) 도로설계기준을 정립하는데 있어 기초가 되었다.

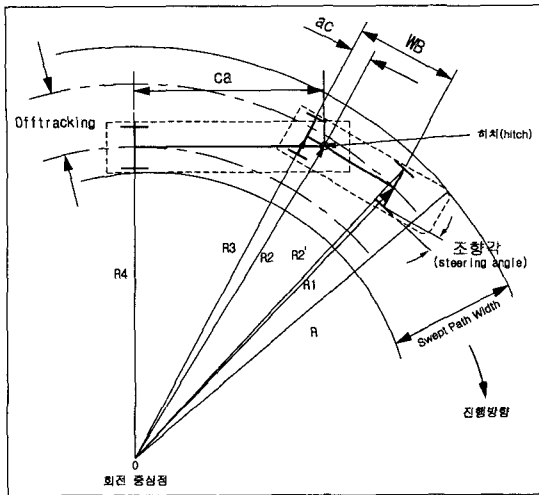
다음은 저속 궤도이탈모형에 대한 설명이다. 우선 <그림 2>의 기하구조로부터 직각삼각형에 대한 피타고라스정리를 이용하여 궤도이탈의 크기를 계산하는 식을 식(2)와 같이 유도할 수 있다.

$$OT_{max} = R_1 - R_4 = R_1 - \sqrt{R_1^2 - \sum L^2} \tag{2}$$

여기서,

R : 앞바퀴축의 중심이 그리는 곡선의 반경

$\sum L^2$  :  $WB^2 - ac^2 + ca^2$



〈그림 2〉 저속 궤도이탈의 개념도 및 명칭

- WB : 트랙터의 축거,
- ac : 연결점과 트랙터 뒤 차축간의 거리,
- ca : 연결점과 세미트레일러 뒤 차축간의 거리

WHI 공식은 저속으로 주행하는 차량에 대한 궤도이탈 값을 구하는 식이다. 자동차가 평면곡선부에 진입하게 되면 궤도이탈이 발생하게 되며 자동차가 평면곡선부를 진행함에 따라 궤도이탈 값은 점점 증가하다가 어느 순간이 되면 자동차가 평면곡선부를 계속 진행하더라도 궤도이탈 값은 더 이상 증가하지 않고 일정한 최대값을 보이게 된다. 이 지점에서는 모든 고정된 바퀴축의 회전중심이 평면곡선부의 중심점에 일치하게 되는데 이 상태를 안정상태라고 한다.

이모형에서 궤도이탈값은 간단한 피타고라스 정리에 의해 산출되는 장점이 있는 반면에, 차량 속도변화나 편경사로 인한 영향을 고려할 수 없는 단점이 있다.

### 3. 동적 궤도이탈모형

동적 궤도이탈모형은 속도변화에 따른 차량의 거동을 고려한 모형으로, 자동차 주행역학상의 특성을 밝히기 위해 자동차공학자들이 이런 모형개발의 선도적 역할을 하였으며 굴절차량에 대한 연구는 1980년대 초반에 연구가 이루어졌다. 이 당시 개발된 모형중 대표적인 것이 Bernard 모형이다. Bernard 모형은 자동차 공학자의 측면에서 연구 되었기 때문에 도로의

기하구조나 도로의 확폭문제 까지 연결시켜 적용하지는 못 하였다. 그후 1990년초반 도로의 편경사를 고려한 굴절차량의 동적 궤도이탈모형이 Harwood 에 의해 개발되었으나 실제 도로설계에 적용되지 못한채 이론적인 모형의 개발에 치중하였다.

다음은 이 두 모형에 대한 설명이다.

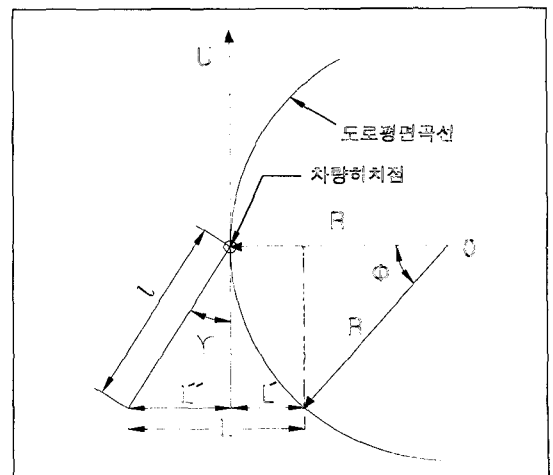
#### 1) Bernard 모형

Bernard와 Vanderploeg는 굴절차량이 곡선반경 R인 평면곡선부를 주행할 때 사용하는 기존 수식에 속도변화에 따른 영향을 반영할 수 있도록 동적 궤도이탈량 개념을 정립했고 〈그림 3〉과 같이 설명하였다.

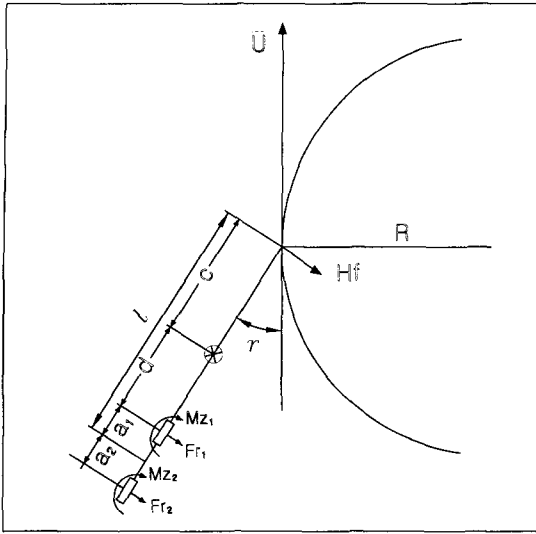
그림에서처럼 히치점과 피견인차 뒤바퀴 중심축간의 길이가 l 인 굴절차량을 가정하고, 이 피견인차는 히치점의 순간속도벡터의 방향과 굴절각( $\gamma$ )을 형성하며, 이 굴절각은 차량의 속도와 차량의 특성에 따라 변한다. 이때 총궤도이탈량은 L로 나타낼 수 있으며 속도벡터 방향과 피견인차가 일직선상에 있을 경우 궤도이탈량 L'와 피견인차의 차량굴절각으로 인한 궤도이탈량 L''의 합으로 표현할 수 있다.

$$L = L' + L'' = l\gamma + \frac{l^2}{2R} \quad (3)$$

〈그림 4〉는 피견인차량에 작용하는 힘의 자유물체도와 조향각의 형성 그림이다. 히치점에는 원심력에



〈그림 3〉 궤도이탈량 산정을 위한 개념도



〈그림 4〉 피견인차의 자유물체도

대응하는 수평력이 발생되고 피견인차량의 뒷바퀴에는 미끄럼에 대응하는 수평분력과 모멘트가 발생한다. 굴절각 유도를 위한 기본방정식은 뉴턴의 제2법칙과 무게중심점에 대한 모멘트 균형이다.

차량굴절각  $\gamma$ 와 궤도이탈량 OT는 식(5)와 같이 산정했다.

$$\gamma = -\frac{l}{R} \left\{ 1 + \sum \frac{\left(\frac{a_i}{l}\right)^2}{N(1+(t/l))} \right\} + \frac{U^2}{R} \left\{ \frac{1}{\bar{C}_a \cdot g(1+t/l)} + S \right\} \quad (4)$$

$$OT = l\gamma + \frac{l}{2R} = -\frac{l^2}{R} \left\{ 1 + \sum \frac{\left(\frac{a_i}{l}\right)^2}{N(1+(t/l))} \right\} + \frac{lU^2}{R} \left\{ \frac{1}{\bar{C}_a(1+t/l)} + S \right\} \quad (5)$$

여기서,

OT : 최대궤도이탈량

$l$  : 히치점에서 피견인차 뒷바퀴 차축셋의 중심까지의 거리

R : 곡선반경

$H_f$  : 히치점에서 트레일러 오른쪽에 작용하는 힘

- c : 히치점에서 트레일러 무게중심점까지 거리
- d : 트레일러 무게중심점에서  $a_1$  축까지의 거리
- $a_i$  : 차축셋의 중심선으로부터 i 번째 축까지의 거리 (피트, 단축일 경우  $a_1=0$ , 이축인 경우  $a_1, a_2=2$ , 삼축인 경우  $a_1, a_3=2, a_2=0$ )
- n : 차축셋에 있어서 차축의 수(단축  $n=1$ , 이축  $n=2$ , 삼축  $n=3$ )
- t : 뉴메틱 트레일
- U : 차량속도
- g : 중력가속도
- $\bar{C}_a$  : 전체적정하중에 대한 conering stiffness의 비( $\text{rad}^{-1}$ )
- S : 구름조향각

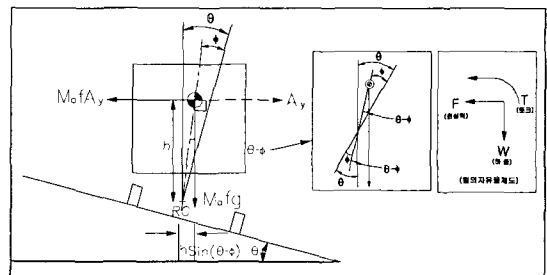
2) Harwood 모형

Glauze와 Harwood(1990)는 Bernard 모형을 토대로 하여 편경사가 있을 경우 굴절차량의 차량굴절각유도 및 궤도이탈모형을 개발하였다. 궤도이탈량의 개념 및 힘의 자유물체도는 Bernard 모형과 동일하며 〈그림 5〉와 같이 평면곡선부에 편경사  $\theta$ 가 있을 경우의 식을 유도하였다.

편경사를 고려한 차량굴절각은 식(6)과 같다.

$$\gamma = -\frac{l}{R} \left[ 1 + \frac{\sum (a_i/l)^2}{n(1+t/l)} \right] + \frac{U^2}{R} \left[ \frac{1}{\bar{C}_a \cdot g(1+t/l)} + S \right] - S_r \theta - \frac{\theta}{\bar{C}_a(1+t/l)} \quad (6)$$

결론적으로 편경사를 고려한 확폭모형에서의 궤도이탈량을 식(7)과 같이 나타냈다



〈그림 5〉 트레일러의 무게중심에 대한 힘의 작용

$$\begin{aligned}
 OT = & -\frac{l^2}{R} \left[ 0.5 + \frac{\sum (a_i/l)^2}{n(1+t/l)} \right] \\
 & + \frac{lU^2}{R} \left[ \frac{1}{C_a g(1+t/l)} + S \right] \\
 & - \frac{l\theta}{C_a(1+t/l)} - Slg\theta \quad (7)
 \end{aligned}$$

이상과 같이 평면곡선부를 주행하는 차량에 대한 기존의 케도이탈량 산출기법을 살펴보았다. 차량 케도이탈량을 알게 되면 평면곡선부 확폭량 산정시 가장 중요한 추가적 여유폭원을 알 수 있기 때문에 도로 설계기준 정립시 유용하다. III장에서는 국내의 확폭설치기준을 살펴본다.

### III. 우리나라 및 외국의 확폭설치기준

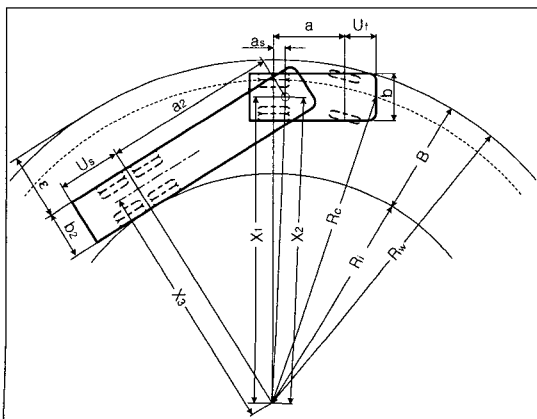
#### 1. 우리나라의 확폭 설치기준

우리나라의 확폭설치의 기본 개념은 차량에 대한 케도이탈의 개념이 아니라 차량의 주행폭원을 근거로 한 것이다.

케도이탈이 앞뒤바퀴의 궤적의 차이를 말한다면 차량의 주행폭원은 차량전체가 휩쓸고 가는 폭을 일컫는 것으로, 확폭량의 산정시 전차는 차량바퀴의 궤적차가 기준이 되는 반면 후차는 앞뒤차량의 범퍼 모서리가 기준이 된다.

〈그림 6〉에서

- a : 견인차의 축간거리
- a<sub>2</sub> : 피견인차의 축간거리



〈그림 6〉 세미트레일러의 확폭량

- a<sub>s</sub> : 피견인차의 연결판에서 뒤축까지의 거리
- b<sub>2</sub> : 피견인차의 폭

차량의 주행폭원은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = R_w - R_i \quad (8)$$

1차로당 확폭량은  $\epsilon = B - b$  이며, 〈그림 6〉의 세미트레일러 제원을 대입하면 주행폭원 B는 식(9)와 같다.

$$B = R_w + 1.25 - \sqrt{R_c^2 - 111.25} \quad (9)$$

여기서,

$$R_w = \sqrt{(\sqrt{R_c^2 - 30.25} + 1.25)^2 + 30.25}$$

#### 2. AASHTO의 확폭 설치기준

AASHTO의 확폭산정 개념은 차량 속도를 감안하지 않은 케도이탈모형으로 이모형은 WHI모형과 일치한다. 우선 차량바퀴의 케도이탈량을 구한 다음 차량 앞내민거리를 산정하고 차량속도를 감안한 안전치를 더하여 곡선부 확폭량을 산정하였다.

곡선부의 확폭은 〈그림 7〉에서 보는데로 곡선부에서 요구되는 폭 W<sub>c</sub>와 직선부에서 필요한 폭 W<sub>n</sub>의 차이이다. 확폭의 산출식은 식(10)과 같다.

$$w = W_c - W_n \quad (10)$$

$$W_c = N(U + C) + (N - 1)F_A + Z \quad (11)$$

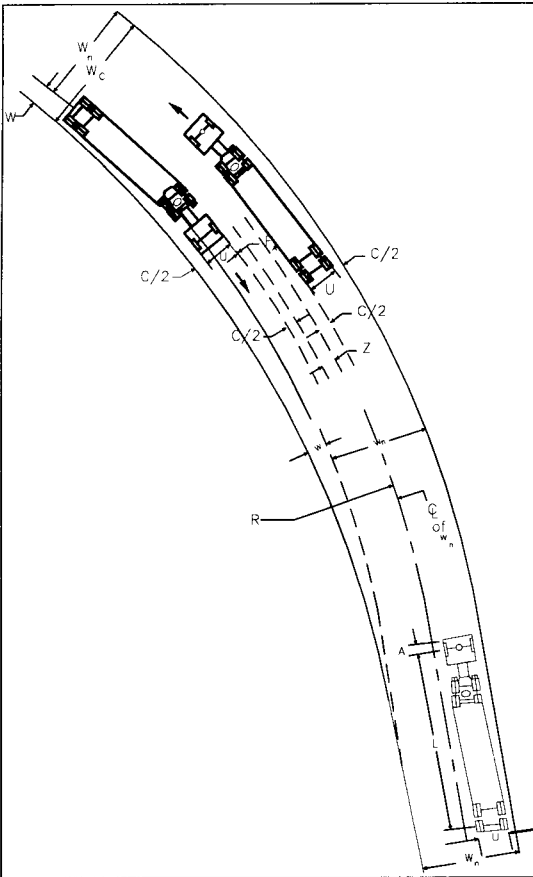
여기서,

- N : 차로수
- w : 곡선부의 확폭량(m)
- W<sub>c</sub> : 곡선부에서의 차로폭(m)
- W<sub>n</sub> : 직선구간에서의 차로폭(m)

$$U = u + R - \sqrt{R^2 - L^2} \quad (12)$$

$$F_A = \sqrt{R^2 + A(2L + A)} - R \quad (13)$$

$$Z = (0.104) (V/\sqrt{R}) \quad (14)$$



〈그림 7〉 곡선부에서의 확폭 개념도(AASHTO)

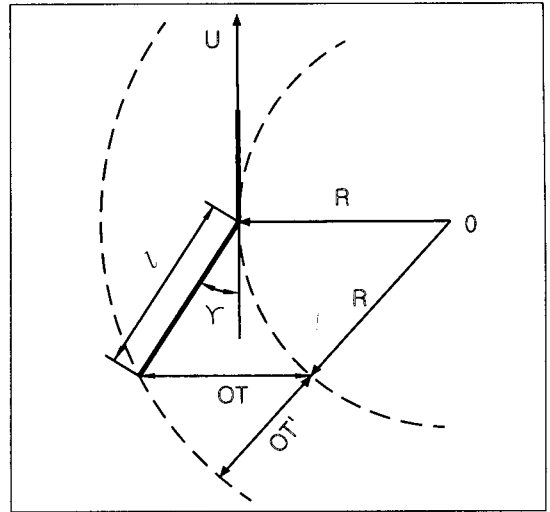
여기서,

- U : 차량의 곡선부 주행폭(앞바퀴 바깥쪽 궤적과 뒷바퀴 안쪽 궤적사이의 폭, m)
- C : 차량당 측방여유폭
- $F_A$  : 앞 내민길이의 곡선부 주행폭(m)
- Z : 곡선상의 주행의 어려움을 위한 추가폭
- u : 직선구간에서의 궤도폭
- R : 2차로 도로의 중앙선에서의 반경(m)
- L : 축거(m)
- A : 차량 앞범퍼폭(m)
- V : 설계속도(km/h)

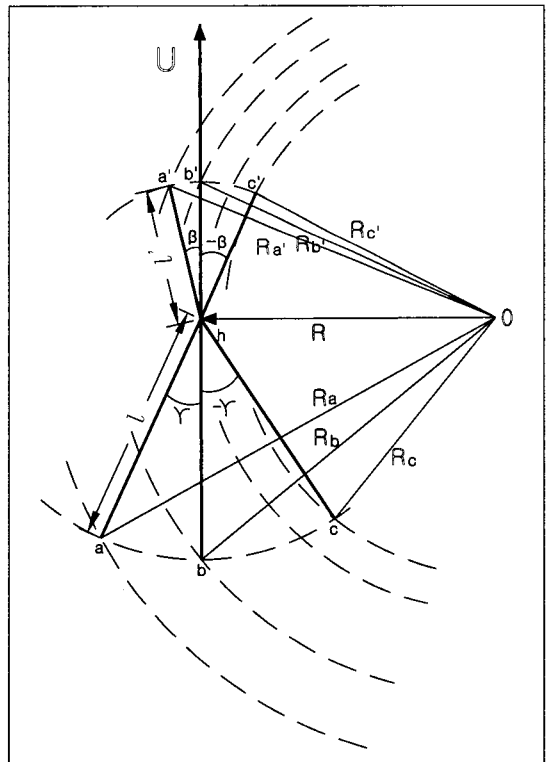
**IV. 기존모형의 한계점 및 새로운 모형의 개발**

**1. 기존모형의 한계점**

기존 모형중에서 가장 앞선 것은 Harwood 모형이다.



〈그림 8〉 Harwood 모형의 궤도이탈량 개념도



〈그림 9〉 견인차를 고려한 새로운 궤도이탈량 개념도

이 모형은 히치점을 중심으로 피견인차량의 동적특성과 도로의 기하구조 특성인 편경사를 고려하여 궤도이탈량을 산정했다. 따라서 차량의 동적특성과 도로의 기하구조의 특성을 반영한 모형이라 할 수 있다.

그러나 이 모형은 히치점에서 피견인차의 뒤차축

중심간의 거리와 히치점의 속도벡터와 피견인차량간의 차량굴절각만을 가지고 궤도이탈량을 산정하였는고, 견인차(축거 4.2m)의 거동을 고려하지 않고 있다. 즉 견인차도 피견인차와 마찬가지로 동적인 거동을 하게 되며, 이러한 견인차의 거동을 고려하지 않은 기존모형은 정확한 궤도이탈량을 추정할 수 없다.

또한 궤도이탈량은 앞서 설명한 바와 같이 어느 두 지점의 주행궤적의 차이로서 두 지점의 곡선반경 차이로 표현될 수 있는 바, Harwood 모형에서는 이런 개념을 무시하고 단순한 직선으로 궤도이탈량을 계산하는 점이 문제다. 즉, <그림 8>의 기존모형 OT는 OT'로 바뀌어야 궤도이탈량 개념의 일관성을 유지할 수 있다.

**2. 동적 궤도이탈모형 개발**

**1) 견인차량의 동적개념정립**

실질적으로 우리나라 표준트럭인 세미트레일러의 경우 견인차의 축거(4.2m)와 앞내민길이(1.3m)의 합은 5.5m로 견인차의 거동을 고려치 않은 Harwood 모형은 궤도이탈량의 산정결과에 많은 오차를 보일 수 있다. 또한 차량의 속도와 곡선반경에 따라 견인차의 거동도 동적으로 변하므로 이를 감안한 모형의 재정립이 필요하다.

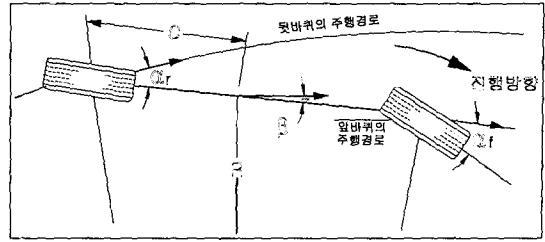
따라서 기존모형에서 무시된 견인차의 동적인 거동을 고려하기 위해 견인차의 횡방향 미끌림각(side slip angle)  $\beta$ 를 도입하여 견인차의 동적거동을 식(15)와 같이 표시할 수 있다.

$$\beta = 57.3 c/R - \alpha_r$$

$$= 57.3 c/R - W_r V^2 / (C_a g R) \tag{15}$$

여기서,

- $\alpha_r$  : 뒷바퀴의 미끌림 각(slip angle)
- $c$  : 견인차 뒷차축에서 히치점까지의 거리
- $R$  : 곡선반경
- $W_r$  : 견인차 뒤차축에 전달되는 하중(lb)
- $V$  : 속도
- $C_a$  : 견인차 뒤차축 타이어들의 cornering stiffness (lb/deg)
- $g$  : 중력가속도(32.2ft/sec)



<그림 10> 고속차량주행시의 횡방향미끌림각(side slip angle)의 형성

피견인차의 거동을 산정하기 위한  $\gamma$ 는 Harwood 모형을 적용하여 산정하였으며, 견인차의 거동을 고려한 궤도이탈량은 견인차의 앞 차축과 피견인차의 뒷 차축이 형성하는 곡선반경을 산정하여 그 차이를 궤도이탈량으로 새롭게 정립하였다.

**2) 견인차를 고려한 동적 궤도이탈모형 개발**

새로운 모형에서는 차량 속도와 곡선반경에 따라 히치점의 속도벡터의 방향과  $\beta$ 각으로 거동하는 동적 특성 및 궤도이탈량을 회전반경 차이의 개념으로 모형을 재구성했다.

**(1) 견인차의 앞차축이 형성하는 곡선반경 산정**

견인차의 앞 차축이 형성하는 곡선반경은 <그림 9>에서  $R_a$ 에서  $R_c$  사이의 범위를 가지며, 각 곡선반경은 식(16)~식(18)과 같이 산정했다.

$\triangle oha'$ 에서

$$R_a = \sqrt{R^2 + l'^2 - 2Rl' \cos(90 + \beta)} \tag{16}$$

$\triangle ohb'$ 에서

$$R_b = \sqrt{R^2 + l'^2} \tag{17}$$

$\triangle ohc'$ 에서

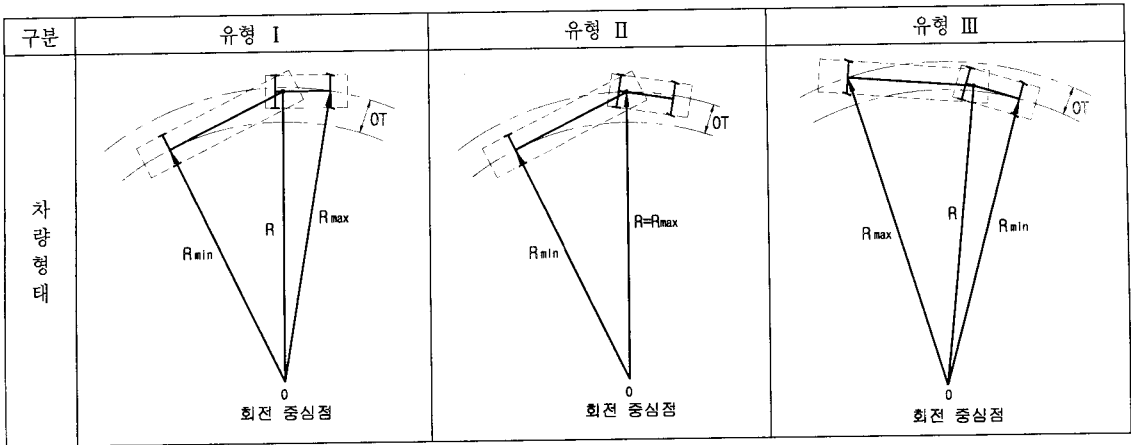
$$R_c = \sqrt{R^2 + l'^2 - 2Rl' \cos(90 + \beta)} \tag{18}$$

**(2) 피견인차의 뒷차축이 형성하는 곡선반경 산정**

피견인차도 견인차와 같이 생각하여 식(19)~식(21)과 같이 표시했다.

$\triangle oha$ 에서

$$R_a = \sqrt{R^2 + l^2 - 2Rl \cos(90 + \gamma)} \tag{19}$$



〈그림 11〉 일반적인 경우  $R_{max}$ 와  $R_{min}$ 의 형성

$\triangle ohb$ 에서  

$$R_b = \sqrt{R^2 + l^2} \quad (20)$$

$\triangle ohc$ 에서  

$$R_c = \sqrt{R^2 + l^2 - 2Rl \cos(90 + \gamma)} \quad (21)$$

**(3) 견인차를 고려한 동적 궤도이탈모형 정립**

견인차의 차축이 형성하는  $\beta$ 값과 피견인차축이 형성하는  $\gamma$ 값에 의해  $R_{max}$  값과  $R_{min}$  값이 결정된다.  $R_{max}$ 와  $R_{min}$ 은  $\beta$ 와  $\gamma$ 값에 의해 좌우되며 주행행태에 따라 견인차축에 형성될 수도, 피견인차축에 형성될 수도 있다. 여기서  $\gamma$ 값은 기존 Harwood모형에서 유도한 값을 사용한다.

굴절차량에서 최대곡선반경과 최소곡선반경을 구하기 위해서는 단일차축차량과 달리 견인차 앞차축의 중심점, 히치점, 피견인차 뒷차축의 3개 중심점을 고려하여, 최대곡선반경과 최소곡선반경을 산정한 후 궤도이탈 방향을 알기 위해 뒤의 곡선반경(최대 또는 최소)에서 앞의 곡선반경(최대 또는 최소)을 빼서 구했다.

$$OT = R_{R(max\ or\ min)} - R_{F(max\ or\ min)} \quad (22)$$

여기서,

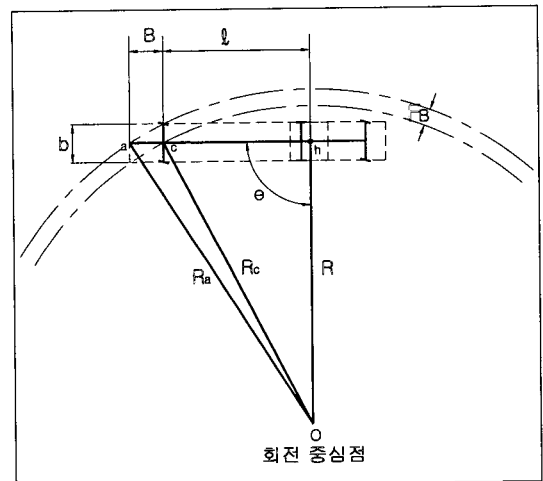
OT : 궤도이탈량

$R_{R(max\ or\ min)}$  : 차량 뒷부분(피견인차 뒷차축 중심점 또는 히치점) 곡선반경(최대 또는 최소)

$R_{F(max\ or\ min)}$  : 차량 앞부분(견인차 앞차축 중심점 또는 히치점) 곡선반경(최대 또는 최소)

**3) 차량 내민길 이로 인한 확폭량 산정방법**

궤도이탈량을 이용해 도로확폭량을 산정할 경우 궤도이탈량이 차축의 중심간의 차이로 궤도이탈량을 나타냈기 때문에 확폭량을 산정하기 위해서는 차량의 폭원과 차량의 앞·뒤 내민길 이로 인한 주행폭원을 고려하여야 한다. 그러나 차량 앞 내민길이(1.3m)로 인한 확폭증가량  $F_A$ 의 AASHTO 산정방법은 차량이 저속일 경우 적용이 가능하나, 차량이 고속으로 주행하는 동적상태에서는 적용할 수 없다. 따라서 본연구에서는 이러한 동적인 차량굴절각과 앞·뒤 내민길이를 동시에 반영할 수 있는 새로운 방식을 적용하였으며, 한 예로 차량 뒷내민길이(B)로 인한 확폭량 산정 방법은 〈그림 12〉와 같다.



〈그림 12〉 차량 뒷내민거리로 인한 확폭량 산정 개념도



피견인차의 뒷내민길이로 인한 확폭량산정 개념도 는 <그림 12>와 같고 차량 뒷내민길이 B로 인한 확 폭량은 직선거리 B가아니라  $R_a$ 와  $R_c$ 의 반지름의 차이 즉, FB로 나타내는 것이 정확한 개념이다. 이런 개념은 차량 앞내민길이 뿐만 아니라 차량의 폭원의 확폭량을 계산 할 수 있으며 더 나아가서는 곡선부에서 차량 주행폭원을 구하는 방법에도 응용할 수 있다.

$$\overline{ha} = l + B \quad (23)$$

$$F_B = R_a - R_c \quad (24)$$

$\triangle oha$  에서

$$R_a = \sqrt{ha^2 + R^2 - 2lR\cos\theta} \quad (25)$$

$\triangle ohc$  에서

$$R_c = \sqrt{l^2 + R^2 - 2lR\cos\theta} \quad (26)$$

## V. 새로운 모형 평가 및 적용

### 1. 모형의 평가

모형의 평가는 기존의 Harwood 모형 궤도이탈량과 새로운 모형의 궤도이탈량의 비교를 통해 수행했다. 주어진 조건은 편경사, 차량의 속도와 회전반경이고 결과값으로는 조건에 따른 차량굴절각과 횡방향 미끌림각이 계산되며 최종결과 값으로는 궤도이탈량이다. 또한 속도와 회전반경에 따른 미끌림각과 차량

굴절각의 민감도분석이 수행되었다.

### 1) 설계기준자동차

설계기준자동차는 우리나라 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침상의 세미트레일러를 대상으로하였는 바, 그 이유는 평면부 곡선 주행시 궤도이탈량이 가장 많은 차량이 세미트레일러로 곡선부 도로 주행중 차량의 안전성확보에 가장 적합하기 때문이다.

### 2) 최소 평면곡선반경

평면곡선부 주행시 주어진 횡방향마찰계수 및 편경사에서 차량이 주행궤적을 이탈하지 않고 주행할 수 있는 최소곡선반경을 적용회전반경으로 하였다. 왜냐하면 이 곡선반경 이상으로 회전반경을 적용한다는 것은 최소곡선반경기준 이상의 확폭을 할 경우 평면곡선부에서의 주행안전성이 확보되기 때문이다.

### 3) 모형에서 사용된 파라미터 값

본 모형에서 적용된 파라미터는 화물 적재시에 적용되는 값을 적용하였는 바, 적용치는 우리나라에서는 현재 설계기준차량에 대한 파라미터 값이 연구된 적이 없어 부득이 <표 3>과 <표 4>에서 제시된대로 미국에서 적용된 값을 적용하였다. 앞차축과의 거리는 우리나라 설계기준차량의 길이를 적용하였으며 나머지 파라미터는 미국SAE(Society of Automotive Engineers)값을 준용하였다.

<표 1> 세미트레일러 제원 비교

(단위:ft)

설계차량	A	B	C	D	E	F	전체길이
STAA single with 48-ft trailer and conventional tractor	2.5	18.0	0.0-2.0	40.5	4.5	2.99	63.5-65.5
한국 Semi-trailer	4.3 (1.3m)	13.8 (4.2m)	2 (0.6m)	31.5 (9.6m)	7.2 (2.2m)	2.99 (0.91m)	54.8 (16.7m)

〈표 2〉 최소평면곡선반경

(단위:m)

설계속도 (km/h)	횡방향 미끄럼 마찰계수	최소 평면곡선반경(m)					
		최대 편경사 6%		최대 편경사 7%		최대 편경사 8%	
		계산값	규정값	계산값	규정값	계산값	규정값
120	0.10	709	710	667	670	630	630
110	0.10	596	600	560	560	529	530
100	0.11	463	460	437	440	414	420
90	0.11	395	380	354	360	336	340
80	0.12	280	280	265	265	252	250
70	0.13	203	200	193	190	184	180
60	0.14	142	140	135	135	129	130
50	0.16	89	90	86	85	82	80
40	0.16	57	60	55	55	52	50
30	0.16	32	30	31	30	30	30
20	0.16	14	15	14	15	13	15

〈표 3〉 케도이탈 분석에서 사용된 화물적재시에 대한 가정된 특성

파라미터	견인차의 차축	피견인차의 차축
차축셋의 유형	단축(n=1)	텐템(n=2)
앞차축으로 부터의 거리(l)(ft)	13.8	31.5
차축셋의 서스펜션에 전달된 무게[(W)(lb)]	적재시 30,000	적재시 30,000
중심점의 높이(in)	71.4	80

〈표 4〉 케도이탈 모형에 대한 파라미터들의 전형적인 값

파라미터	전형적인 값	전형적인 범위
코너링계수( $C_a/F_{zr}$ )	0.15 deg <sup>-1</sup>	0.12~0.19
타이어의 적재하중( $F_{zr}$ )	레디얼타이어 : 6,040 lb 편심플라이타이어 : 5,150 lb	
축당 타이어의 수	4	2~4
뉴메틱트레일(t)	0.179ft	0.15~0.23
서스펜션 구름조향계수(구름각당 조향각)	0.18	-0.04~0.213
차축당 복합 roll stiffness( $K_r$ )	0.158×10 <sup>6</sup> in-lb/deg	0.070~0.165×10 <sup>6</sup>
구름중심점의 높이( $h_{rc}$ )	22 in	21~33

## 2. 기존 모형과 새로운 모형 비교

### 1) 기존 모형과 새로운 모형의 케도이탈량 비교

상기에 기술한 파라미터 값과 조건을 기존의 Harwood 모형에 적용하여  $\gamma$  값과 케도이탈량을 산출하고, 동일조건하에서  $\beta$  값을 산출하고  $\gamma$  값과  $\beta$  값을 이용하여 본 연구에서 제안된 새로운 모형에 적용했다. 케도이탈량을 구한 결과는 〈표 5〉에 나타낸 바와 같다.

기존모형과 새로운 모형의 케도이탈량의 절대량을

비교해 보면, 기존모형에 비해 새로운 모형의 계산값이 최대 -1.90m에서 최소 -0.18m 정도 차이가 나는 것으로 분석되었다. 이 원인은 견인차의 차축의 길이와 차량 앞내민길이의 합이 5.4m에 이르고 견인차의 차량굴절각  $\beta$  에 기인한다.

주어진 반경하에서 속도에 따른 케도이탈량을 살펴 보면 60km/h 이상에서 케도이탈량은 바깥쪽으로 발생되며, 그 양은 최소 0.214m에서 0.590m를 보이고 있어 고속주행시 트랙이탈은 바깥쪽으로 발생하는 현상을 명확히 보이고 있다.

<표 5> 기존 모형과 새 모형의 퀘도이탈 절대량 비교

조건			$\beta$ (deg)	$\gamma$ (deg)	퀘도이탈량(m)			
속도 (km/h)	반경 (m)	편경사			기존모형 (Harwood)(A)	새모형 (B)	절대량 차이 (B-A)	비율 (B/A)
20	15	0.06	-4.541	-49.198	-3.291	-5.189	1.898	1.577
30	30	0.06	-6.607	-22.885	-1.430	-2.284	0.854	1.599
40	60	0.06	-6.355	-10.294	-0.576	-0.955	0.379	1.654
50	90	0.06	-6.826	-5.712	-0.248	-0.445	0.197	1.791
60	140	0.06	-6.435	-2.889	-0.067	0.358	0.291	5.370
70	200	0.06	-6.195	-1.378	0.030	0.356	0.326	11.983
80	280	0.06	-5.823	-0.497	0.079	0.590	0.511	7.467
90	380	0.06	-5.456	0.012	0.103	0.449	0.346	4.354
100	460	0.06	-5.580	0.439	0.136	0.510	0.374	3.750
110	600	0.06	-5.190	0.601	0.136	0.492	0.356	3.634
120	710	0.06	-5.229	0.823	0.152	0.522	0.370	3.436
120	1000	0.06	-3.713	0.245	0.068	0.314	0.246	4.639
120	1500	0.06	-2.475	-0.227	-0.001	0.220	0.219	194.096
120	2000	0.06	-1.857	-0.463	-0.036	0.214	0.178	6.027

2) 속도, 반경변화에 따른  $\beta$ 값의 민감도 분석

속도와 곡선반경의 변화에 따른  $\beta$ 값의 민감도 변화를 살펴보면 <표 6>과 같다. <그림 13>은 속도를 두 가지(40km/h, 100km/h)로 고정 시키고, 곡선반경을 변화하였을 경우  $\beta$ 값은 곡선반경이 작으면 곡선반경의 변화에  $\beta$ 값의 변화량은 매우 커지나, 곡선반경이 커짐에 따라  $\beta$ 값의 변화량은 점차 감소하는 형태를 보이고 있다. 두가지 속도에 대한  $\beta$  값은 동일 회전 반경상에서 높은속도(100km/h)가 낮은속도(40km/h)에 비해 민감한 변화를 보인다.

회전반경을 고정시키고 속도를 변화시켰을 경우  $\beta$ 값의 변화를 살펴보면<그림 14>와 같으며, 속도가 증가 할수록  $\beta$ 값은 음의 방향으로 커지고, 속도의 변화량에 대한  $\beta$ 값의 변화량은 고속에서 크고 저속에서는 작아지는 형태를 보이고 있다. 동일 조건하에서 작은 반경(60m)에서의 탄력성이 매우 크나, 큰반경(460m)에서  $\beta$ 의 탄력성은 작은 것으로 나타났다.

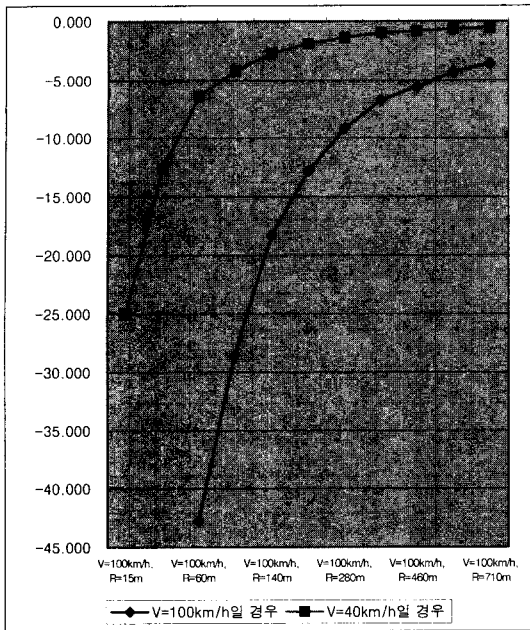
3. 확폭량 산정결과 및 모형값 비교

1) 확폭량 산정결과

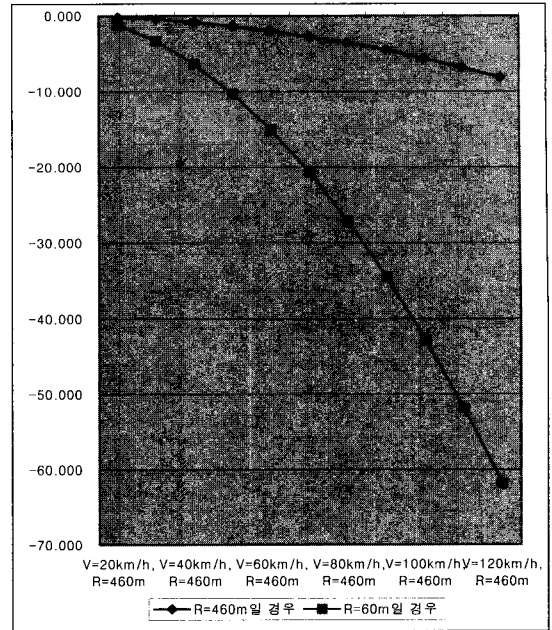
새로운 제안모형을 사용하여 퀘도이탈량을 산정하고 AASHTO의 설계기준에 근거하여 확폭량을 산정한

<표 6> 속도 및 반경변화에 따른  $\beta$ 량 변화

조건			$\beta$ (deg)	조건			$\beta$ (deg)
속도 (km/h)	반경 (m)	편경사		속도 (km/h)	반경 (m)	편경사	
40	15	0.06	-25.038	100	15	0.06	-
	30		-12.646		30		-
	60		-6.355		60		-
	90		-4.229		90		-28.466
	140		-2.722		140		-18.318
	200		-1.905		200		-12.825
	280		-1.362		280		-9.169
	380		-1.004		380		-6.757
	460		-0.829		460		-5.580
	600		-0.636		600		-4.279
710	-0.537	710	-3.616				
20	60	0.06	-1.152	20	460	0.06	-0.150
30			-3.320	30			-0.433
40			-6.355	40			-0.829
50			-10.257	50			-1.338
60			-15.026	60			-1.960
70			-20.662	70			-2.696
80			-27.165	80			-3.544
90			-34.535	90			-4.506
100			-42.772	100			-5.580
110			-51.876	110			-6.768



〈그림 13〉 속도 40, 100km/h 일 경우 반경변화에 따른  $\beta$ 량 변화



〈그림 14〉 반경 60, 460m 일 경우 속도변화에 따른  $\beta$ 량 변화

결과는 〈표 7〉와 같다. 궤도이탈량은 실제속도와 곡선반경에 따라 -5.19에서 0.521범위로 산정되었고 뒤바퀴가 앞바퀴의 외측로 나가는 현상 즉 이탈량의 부호가 양이 되는 속도와 회전반경은 60km,와 반경

〈표 7〉 제안모형을 AASHTO기준에 적용한 확폭량 산정결과

속도	곡선 반경	베타	감마	OT	$\omega c$	$\omega n$	$\omega$
20	15	-4.5405	-49.1983	-5.1888	17.4910	7.0	10.4910
30	30	-6.6067	-22.8846	-2.0853	10.8260	7.0	3.8260
40	60	-6.3549	-10.2941	-0.6640	9.0440	7.0	2.0440
50	90	-6.8262	-5.7121	-0.0880	8.1730	7.0	1.1730
50	100	-6.1415	-5.2566	-0.0987	8.1590	7.0	1.1590
60	140	-6.4349	-2.8892	1.1683	8.4120	7.0	1.4120
70	200	-6.1953	-1.3779	0.8171	8.2110	7.0	1.2110
80	280	-5.8231	-0.4972	0.5901	8.0350	7.0	1.0350
90	380	-5.4558	0.0118	0.4486	7.9000	7.0	0.9000
100	460	-5.5802	0.4393	0.5098	8.0320	7.0	1.0320
110	600	-5.1903	0.6008	0.4924	7.9750	7.0	0.9750
120	710	-5.2292	0.8232	0.5219	8.0370	7.0	1.0370
120	1000	-3.7135	0.2452	0.3139	7.5210	7.0	0.5210
120	1500	-2.4754	-0.2270	0.2199	7.1610	7.0	0.1610
120	2000	-1.8567	-0.4630	0.2140	7.0150	7.0	0.0150

140m이상으로 나타났다. 이런 궤도이탈량을 이용하여 확폭량을 AASHTO기준에 근거하여 산정하면 -11.598m에서 1.491m 범위로 산정되었다. 우리나라의 확폭설치를 차로당 0.25m 이상으로 규정한 것을 기준으로 살펴 보았을 경우, 실제속도 120km/h, 곡선반경 1,000m에서 확폭량이 0.521m로 산정되었으므로 그 이하는 확폭을 설치하여야 하는 것으로 나타났다. 우리나라 확폭설치기준에서 최대곡선반경이 280m인 경우를 감안 하였을 때 새로운 모형에 의한 확폭설치기준반경은 매우 큰 것을 알 수 있다. 이는 차량속도로 인한 외측의 궤도이탈량이 나타나고 AASHTO 확폭설계기준이 안전측을 고려 한데서 기인 한다. 따라서 굴절 차량의 운행이 빈번한 회전반경이 큰 고규격의 도로에서도 확폭이 필요한 것으로 분석되었다.

2) 모형별 확폭량 및 적용성비교

〈표 8〉은 모형별로 궤도이탈량과 확폭량을 산정하여 비교한 것으로 정적모형에서 전체적으로 국내 기준값이 AASHTO기준값 보다 작는데 그 이유는 AASHTO 기준이 곡선부 안전측 개념을 도입하였기 때문이다. 동적 모형은 Harwood모형의 확폭량 보다 제안모형의 확폭량이 더크게 산정되었는 바, 이는 새로운 모형이 견인차의 크기와 동적거동을 고려한데서 그 원인을

〈표 8〉 모형별 확폭량 비교

속도 (km/h)	곡선반경 (m)	국내기준 (m)		AASHTO (m)		AASHTO+Harwood (m)		제안모형+AASHTO (m)	
		OT	확폭량	OT	확폭량	OT	확폭량	OT	확폭량
20	15	-4.254	8.508	-4.250	9.101	-3.291	7.183	-5.189	10.491
30	30	-1.895	3.790	-1.883	4.219	-1.430	3.312	-2.085	3.826
40	60	-0.929	1.858	-0.919	2.167	-0.576	1.480	-0.664	2.044
50	90	-0.618	1.236	-0.610	1.530	-0.237	0.784	-0.088	1.173
50	100	-0.556	1.112	-0.549	1.373	-0.248	0.772	-0.099	1.159
60	140	-0.397	0.794	-0.391	1.050	-0.067	0.400	1.168	1.412
70	200	-0.278	0.556	-0.274	0.790	0.030	0.302	0.817	1.211
80	280	-0.198	0.397	-0.195	0.608	0.079	0.375	0.590	1.035
90	380	-0.146	0.293	-0.144	0.483	0.103	0.401	0.449	0.900
100	460	-0.121	0.242	-0.119	0.435	0.136	0.469	0.510	1.032
110	600	-0.093	0.185	-0.091	0.359	0.136	0.447	0.492	0.975
120	710	-0.078	0.157	-0.077	0.330	0.152	0.480	0.522	1.037
120	1000	-0.056	0.111	-0.055	0.210	0.068	0.235	0.314	0.521
120	1500	-0.037	0.074	-0.036	0.099	-0.001	0.028	0.220	0.161
120	2000	-0.028	0.056	-0.027	0.037	-0.036	0.053	0.214	0.015

〈표 9〉 모형별 확폭량 산정값 비교

구분		확폭산정개념	차량 속도	단점	장점
정적	국내 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침」방법	• 차량주행폭원 $B=R_{max} - R_{min}$	저속	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차도 안쪽만 고려</li> <li>• 고속의 경우 확폭량을 알수 없음</li> <li>• 편경사 미고려</li> <li>• 차량 주행궤적 파악 곤란</li> <li>• 곡선부 주행 안전측 미고려</li> </ul>	• 개념단순
	미국 「AASHTO」방법	• 웨도이탈량과 안전측 고려	저속	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 확폭 내측면 고려</li> <li>• 고속의 경우 확폭량을 알수 없음</li> <li>• 편경사 미고려</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 웨도이탈 개념 도입으로 차량주행궤적 파악 가능</li> <li>• 곡선부 주행의 안전측 고려</li> </ul>
동적	Harwood 모형을 AASHTO 설계에 적용	• 동적 웨도이탈량 (피견인차의 특성) 과 안전측 고려	저속+고속	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차도 내측만 고려</li> <li>• 견인차의 크기 및 특성 고려치 못함</li> <li>• 웨도이탈량개념 일관성 모호</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 동적인 차량 궤적 파악 가능</li> <li>• 편경사 반영</li> </ul>
	제안모형을 AASHTO에 적용	I	저속+고속	• 계산 다소 복잡	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 동적인 차량 궤적 파악 가능</li> <li>• 실제 현상과 부합</li> </ul>
	제안모형을 AASHTO에 적용	II	저속+고속	• $F_A$ 값 미고려 과다 확폭 우려	• 개념단순

찾을 수 있다.

모형의 적용성을 분석결과를 토대로 살펴보면 〈표 9〉와 같이 정리될 수 있다. 전통적인 확폭산정모형인 정적확폭모형은 차량의 속도나 편경사를 고려하지 않으므로 해서 적용의 한계성을 내포하고 있으나, AASHTO 설계기준 개념은 보다 과학적인 안전측 개념 도입이라는 측면에서 우수성이 있다고 할 수 있다. 동적모형 중 Harwood모형은 편경사를 고려하고 차량의 동적인

거동을 어느정도 표현하였으나, 견인차의 거동과 크기를 무시함으로써 확폭의 양을 과소 추정하는 경향이 있다. 제안모형은 이러한 결점을 보완할 수 있는 모형으로 차량주행폭원을 이용한 모형은 동적인 차량 궤적의 파악이 곤란한 단점이 있으므로 웨도이탈모형을 이용한 확폭량산정방법이 가장 적용성이 우수하며, 설계기준값 설정과정은 AASHTO의 과정을 준용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

## VI. 결론 및 향후 연구과제

기존의 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침」상의 확폭산정 방법은 차량이 매우 저속일 경우에만 적용이 가능하다. 또한 도로의 편경사의 영향을 반영치 못하고 있어 그 적용성에 한계를 지니고 있다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 차량의 속도와 도로의 편경사를 고려한 동적케도이탈모형이 개발되었는데 대표적인 모형이 Harwood 모형이다. 이모형은 차량의 속도와 편경사를 고려한 케도이탈량을 산출하였으나, 이 모형은 피견인차의 길이만을 고려하고 견인차의 영향을 무시하고 있으며, 케도이탈량의 개념에 있어서도 차량 주행폭원을 고려하지 않는 결점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 Harwood 모형에서 반영하지 못한 견인차의 길이와 견인차의 동적거동을 고려하여 새로운 모형을 도출하였다. 이러한 새로운 모형은 견인차와 피견인차의 길이와 차량의 속도와 편경사의 영향을 반영할 수 있다. 기존 Harwood 모형과 본 논문에서 개발된 모형을 적용한 결과, 기존 모형에 비해 설계속도, 반경에 따라 케도이탈량의 절대값이 최대 1.947m에서 최소 0.173m 정도 증가를 보이는 것으로 나타났다. 이는 견인차의 길이와 동적거동이 미치는 영향이 상당한 것으로 분석되었는 바, 케도이탈량 산정시 반드시 견인차가 고려되어야만 한다. 견인차도 차량속도나 회전반경에 따라 차량거동이 동적으로 변하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 본연구에서는 이러한 특성을 고려하여 횡방향미끄럼각을 도입하여 속도와 회전반경을 반영하여 견인차의 동적모형을 구성하였다.

본 연구에서 개발한 모형식의 적용성을 입증하기 위하여 케도이탈량을 산정해본 결과, 대부분 곡선의 안쪽에서 일어나지만 고속의 경우(반경120m, 속도 50km/h) 케도이탈량은 바깥쪽에서 일어나는 현상을 나타내고 있어 차량의 속도가 매우 높은 경우 확폭이 필요한 경우가 발생한다. 참고로 우리나라 확폭기준이 곡선반경 280m(설계속도 80km/h의 최소곡선반경)이상은 확폭을 하지 않도록 하고 있다. 그러나 본 연구에 의하면 곡선반경이 280m 이상이 되어도 케도이탈량은 외측으로 발생하고 속도가 증가할수록 오히려 케도이탈량은 증가하는 것으로 나타나, 대형차량의 운행이 많은 산업도시나, 산업도시간 연결도로의 경우 곡선반경이 큰 고규격도로에서도 확폭이 필요한 것으로 나타났다.

향후 연구과제로는 첫째, 설계차량에 대한 재검토,

설계차량에 대한 각종 파라미터값에 대한 검증에 대한 기초연구가 수행되어야 할 것이다. 둘째, 케도이탈량에서 합리적이고 안전한 확폭량 기준설정 및 설치방법, 직선구간과 곡선부 최대 케도이탈 사이의 완화구간에 대한 케도이탈 변화 양상, 차량구성비에 따른 설계차량설정, 케도이탈의 사고분석에서의 응용, 첨단 도로에서의 곡선부 도로에의 케도이탈 응용 등에 관한 추가적인 연구가 필요하다 하겠다.

## 참고문헌

1. Bernard, J. E. and Vanderploeg, M.(1980), "Static and Dynamic Offtracking of Articulated Vehicles", Paper 800151. SAE, Warrendale, Pa.
2. Fancher, P. S., Ervin, R. D., Winkler, C. B. and Gillespie, T. D.(1986), "A Factbook of the Mechanical Provirerties of the Components of Single Unit and Articulated Heavy Vehicles" Report DOT HS 807125. NHTSA, U.S. Department of Transportation, Dec.
3. Gillespie, T. D.(1992), "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., pp.7~10, pp.196~197.
4. Glaus, W. D. and Harwood, D. W.(1991), "Superelevation and Body Roll Effects on Offtracking of Large Trucks", Transportation Research Record 1303, Transportation Research Board, Washington, D.C.
5. Heald, K. L.(1986), "Use of the WHI Offtracking Formula", Transportation Research Record 1052, Transportation Research Board, Washington, D.C.
6. Sayers, M. W.(1986), "Vehicle Offtracking Models", Transportation Research Record 1052, Transportation Research Board, Washington, D.C.

✉ 주 작 성 자 : 김우현

✉ 논문투고일 : 2002. 3. 4

논문심사일 : 2002. 4. 29 (1차)

2002. 5. 16 (2차)

2002. 5. 21 (3차)

심사판정일 : 2002. 5. 21

✉ 반론접수기간 : 2002. 10. 30