

■ 論 文 ■

도로선형에 대한 설계일관성 평가모형의 개발

Development of a Highway Geometric Design Consistency Evaluation Model

최재성

(서울시립대학교 도시공학과 교수)

목 차

I. 서론

- 1. 연구의 배경 및 목적
- 2. 연구의 접근방법

II. 본론

- 1. 기존 연구의 검토
- 2. 새로운 설계일관성 검토기법의 정립방향 수립
 - 1) 설계속도를 기준으로 한 도로설계의 문제점
 - 2) 새로운 설계일관성 검토기법의 정립방향
- 3. 모형의 정립
 - 1) 직선구간

2) 평면곡선

3) 종단곡선

4) 평면곡선과 종단곡선이 겹치는 경우

4. 모형의 검증

1) 현장조사를 통한 속도분석

2) 모형을 통한 속도추정 결과

5. 설계일관성의 적용

III. 결론

참고문헌

요 약

본 연구는 새로운 설계일관성 검토기법의 정립을 위하여 수행되었으며, 이를 위해 속도추정 모형을 개발하였다. 본 연구를 통해 개발된 모형은 차량의 주행속도에 가장 큰 영향을 미치는 주 요소를 고려한 장점을 지니고 있다. 즉, 평면곡선에서는 운전자의 시각적 판단을 기초로 최소시거를 산정함으로써, 최소주행속도를 추정하였고, 종단선형에서는 구배의 영향과 차량의 성능을 기초로 등판차량의 주행속도를 추정하였다. 합성선형에 대하여서는 평면곡선 및 구배의 영향을 동시에 고려하여 주행속도를 추정하였다. 또한 이러한 속도추정이 승용차뿐만 아니라 트럭의 경우로 나누어 이루어짐으로써, 차종별 고려가 가능하도록 하였다. 다음은 본 연구를 통해 이루어진 결과이다. 평면곡선에서는 승용차와 트럭의 속도가 같게 추정되었으며, 시거를 통해 산정된 추정속도는 곡선반경과 밀접한 관계를 갖는다. 종단선형에서 승용차의 속도는 구배의 영향을 받지 않으나, 트럭은 구배의 영향으로 속도가 감소한다. 이 때 트럭에 작용되는 가속도는 모두 세 종류로써, 첫째, crawl speed에 도달할 때까지 작용한 가속도(a_1)와 둘째, crawl speed 이후 작용한 가속도(a_2) 그리고 셋째, 하향구배 주행시 작용된 가속도(a_3)로 구분된다. Watanatada가 제시한 것과 같이 평지에서 나타나는 평면곡선의 주행속도와 구배에서의 속도를 단순 비교 함으로써, 작은 속도의 궤적을 따라 합성선형의 속도를 추정하는 것은 합성선형이 차량의 주행속도에 미치는 영향을 간과한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 본 모형에서는 합성선형의 영향을 고려하여 승용차와 트럭의 주행속도를 추정함으로써, 보다 현실적으로 주행속도를 추정하였다. 본 연구의 결과는 도로의 설계일관성을 검토하는데 매우 유용한 도구가 될 것이며 향후 운전자의 회망속도 결정, 감속율의 산정, 교통류의 고려, 도로설계의 전산화 자료와 연결 등을 통해 보다 실용적인 결과를 산출할 수 있을 것이다.

主要語 : 설계일관성, 시거, 속도추정, 주행속도

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

도로의 설계기술자나 이용자의 입장에서 볼 때 무엇보다 중요한 것은 설계된 도로선형이 도로로서의 서비스를 얼마만큼 만족시킬 수 있는지 또는 임의의 도로지점에서 과연 안전한 주행이 가능한지를 검토해 볼 수 있는 것이다. 이는 단순히 도로의 최소설계기준을 정립하여 그 조건을 만족시키는 것과는 다르다. 즉 도로설계에 대한 최소설계기준을 정해놓고 그 기준을 만족시키기만 하면 교통안전성이 확보되었다고 보는 현재의 설계검토과정은 사실상 도로를 주행하는 운전자들의 욕구를 지나치게 단순화시킨 점이 있으며, 최소설계기준만을 만족시키려는 것은 매우 소극적인 접근방법이라 할 수 있다. 따라서 운전자들의 욕구를 반영할 수 있는 선형설계를 유도하기 위해서는 선형설계에 대한 훨씬 정밀하고 합리적인 설계검토과정이 필요하다.

도로 기하구조 등 설계의 적절성을 검토하기 위해서 많이 사용되는 기법은 설계일관성을 평가하는 것이다. 설계일관성이란 운전자들이 전방의 도로에 대해 기대하는 조건이나 운전자들이 가까이 받아들일 것으로 생각되는 도로조건을 감안하여 이에 조화를 이루는 도로조건을 정립함으로써 나타나는 바람직한 상태를 말하는 것으로 정의할 수 있으며, 운전자들의 기대심리를 확인해줌으로써 운전자들이 신속하고 정확하게 판단하게 하도록 하는 기능을 한다. 또한 설계일관성을 평가하기 위해서는 이를 실현할 수 있는 적절한 모형의 개발이 요구되어 진다.

2. 연구의 접근방법

새로운 설계일관성 평가기법을 마련하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 네 단계의 과정을 수행하였다.

- 기존 연구의 검토

본 연구와 관련하여 시대별로 선행된 연구들에 관하여 살펴봄으로써, 연구자별로 설계일관성 평가를 위해 제시하였던 핵심사항을 기술함.

- 새로운 설계일관성 검토기법의 정립방향 수립

기존 연구들에 대한 개념정립과 문제점 진단을 통해 현실적인 설계요소(운전자의 행태 및 안전요소 등)를 추론해 냄으로써, 이를 반영한 새로운 설계기법 및 설계일관성 검토기법의 방향을 제시함.

- 설계일관성 평가모형의 정립

새로이 제시된 설계일관성 검토기법의 정립방향을 토대로 도로 기하구조에 따라 보다 정확히 주행속도를 추정할 수 있는 모형을 개발함.

- 현장 속도와의 비교

모형에 의해 산출된 차량의 주행속도를 토대로 연속적인 도로구간의 speed profile을 작성하여 설계속도와 비교하였고, 평면 곡선부에서의 현장 조사속도와 모형에 의해 추정된 주행속도를 비교함.

II. 본론

1. 기존 연구의 검토

미국에서는 1930년대 Stonex와 Noble, Moyer와 Berry, 그리고 연방도로청에 근무하던 Barnett 등의 연구성과에 의해 평면곡선에서 원심력에 대항하기 위해 운전자에게 필요한 횡방향 마찰계수 값의 존재 범위를 개략적으로 찾아냈다. 그 방법으로는 도로의 설계속도개념을 설정하여 설계속도별 최소곡선반경을 정립해야 했는데 최소곡선반경을 정립하기 위해서 횡방향 마찰계수의 최대값을 결정하였다. 이를 위해 Ball-Bank Indicator를 사용했고 이 값은 현재도 AASHTO Green Book에 설정근거로 제시되어 있으며 설계속도가 20-110 kmph의 범위를 가질 때 마찰계수는 0.21-0.10으로 설정되어야 한다는 것이었다²⁾.

1970년대 들어서 J. Leisch를 필두로 하여 종전의 설계속도개념의 모순점을 제기하며 이를 개선할 것을 주장하는 사람들이 나타났다. Leisch는 설계속도를 사용했을 때, 특히 90kmph 이하 속도에서 운전자들은 직선과 곡선의 반복적 선행조합 때문에 계속해서 속도를 바꾸어야 하며 이는 결국 설계속도의 기본가정

인 균등한 속도의 확보라는 문제를 해결하지 못한다는 한계점을 지적하면서 소위 10 mph 원칙에 의한 속도종단곡선분석기법을 제시하였다³⁾. 그의 주장은 상당한 설득력을 가지게 되어 현재까지도 설계일관성 분석의 주류를 이루게 되었고 특히 10mph 원칙은 향후 안전성검토의 기준이 되었다.

설계속도개념에 강한 반박을 가한 또 다른 한 사람은 호주의 ARRB(Australian Road Research Board)의 J. McLean이었다. 그는 1974년 ARRB Proceeding에서 평면곡선에서의 운전자행태분석연구를 통해 종전에 사용되던 설계속도개념의 속도-방향항마찰계수 관계 곡선보다는 속도-곡선반경 관계식이 보다 현실적이고, 설계속도와 주행속도는 별개의 문제라고 주장했다⁵⁾. 그는 또한 설계속도 대신 주행속도를 산정해서 설계에 반영해야 하며, 주행속도는 평면곡선의 설계조건에 따라 경험적으로 산정할 수 있다고 주장하였다.

한편 설계일관성의 분야에서 독특한 또 한사람은 미국의 C. Messer이다. 그는 FHWA의 연구를 수행하면서 운전자의 운전부담량을 통해 설계일관성분석이 가능할 것으로 판단했다. 운전부담량은 운전자에게 부과되는 과제의 난이도와 빈도에 따라 달라지며 부담량의 수준과 운전자에게 미치는 영향은 운전자의 기대심리 및 능력에 따라 달라진다고 생각했다. 설계가 불합리한 도로는 운전자의 기대심리를 위배하게 되며 이는 곧 운전자에게 많은 부담을 주게 된다. 운전 부담량을 산정하는 모형을 개발했고, 이 모형은 운전자들이 주행정보를 주로 도로선형에서 얻으며 도로의 선형이 복잡할수록 운전 부담량이 높아지게 되고 운전자가 전혀 예측하지 않은 도로조건이 나타나면 그 양이 극도로 높아진다고 보았다⁶⁾.

이 밖에도 곡선-주행속도분석법이나 Lamm의 일관성분석기법, Polus의 곡선설계일관성에 관한 안전기준 정립문제, Gattis에 의해 새롭게 주장된 사전 예측식 거 정립 문제 등이 중요하다.

2. 새로운 설계일관성 검토기법의 정립방향 수립

1) 설계속도를 기준으로 한 도로설계의 문제점

설계속도를 기준으로 건설된 도로의 경우 도로 각

구간의 설계속도가 일정하므로 차량의 속도가 일정하다고 가정한다. 그러나 실제로 도로구간을 주행하는 차량들은 각 구간마다 속도의 변화를 보인다. 이러한 속도의 변화는 주로 평면곡선부에서 발생하며, 종단곡선부에서는 트럭 등 중차량의 속도가 변화한다. 평면곡선부에서의 속도변화 원인은 다음과 같다.

- 직선구간에서 운전자는 자신이 내고자 원하는 속도로 주행할 것이며, 이 때 나타나는 속도는 설계속도 이상이 될 것이다.

- 평면곡선은 설계속도별 최소 곡선반경을 기준으로 그 이상의 곡선반경을 지닌 곡선을 설치하도록 되어 있다. 만약 설계속도별 최소 곡선반경으로 평면곡선을 설치한다면, 평면곡선에서의 설계속도는 원심력과 구심력이 평형을 이룬 상태로 차량이 주행할 수 있는 최대 속도가 되지만, 운전자는 안전을 고려하여 설계속도 이하로 주행할 것이다.

따라서 직선구간과 평면곡선구간을 포함한 도로를 한 설계속도로 설계한다 하더라도 도로의 각 구간을 지나면서 차량은 속도의 변화를 보이게 된다. 따라서 설계자가 정한 설계속도로는 실제 차량의 주행속도를 반영할 수 없으므로, 설계자가 의도했던 설계일관성을 확보하지 못하게 되며, 이로써 설계일관성을 검토하기 위한 새로운 기법의 마련이 요구되어진다.

2) 새로운 설계일관성 검토기법의 정립방향

- 미국의 Glennon과 Harwood는 설계일관성에 대해 지적하기를 설계일관성은 도로설계에서 항상 가장 기본적인 항목이라고 강조되기는 하나, 실제로는 설계요소가 조합적으로 나타나기 때문에 이런 경우에 적용할 수 있는 분명한 설계일관성 검토기준이 제시되지 않고 있다고 주장한다⁷⁾. 이는 매우 적절한 지적으로서 이들의 주장에 부합할 수 있도록 설계일관성 검토기준 마련의 필요성이 대두되었다.

- 우리 나라에서는 기존의 2차로 지방부 도로들이 설계속도 개념이 받아들여지기 전에 건설되었거나, 시기적으로 설계속도 개념이 도입된 이후라 하더라도 설계속도 개념과는 무관하게 건설된 경우가 많다. 또

한 설계속도 개념에 입각하여 건설된 도로의 경우라 하더라도 앞에서 살펴본 바와 같이 도로의 각 구간을 주행하는 차량의 속도가 설계속도와 다르게 나타난다. 이러한 도로들에 대하여 설계일관성을 검토할 새로운 기법의 정립이 요구되어진다.

- 따라서 본 연구에서는 설계일관성 검토뿐만 아니라 그 이전 단계의 도로 설계시 가장 염두에 두어야 할 사항으로써 도로 기하구조와 이에 반응하는 운전자의 기대심리에 초점을 맞추었다. 다음은 그러한 예이다.

- 도로 설계시 설계자는 안전성, 쾌적성, 운전자 심리, 운전자 행태 등을 고려하며, 운전부담량을 줄이고 또한 운전자가 갖는 도로상황에 대한 기대심리를 만족시킬 수 있어야 한다.
- 그러나 설계자는 임의로 속도를 정해놓고 그에 따라 도로 기하구조를 설계하였다. 이러한 설계는 설계자의 의도대로 운전자가 반응하도록 하는 결과를 가져오지 못하였다.
- 실제로 주행시 운전자는 곡선반경, 곡선장, 편구배, 종단구배 및 마찰계수 등의 기하조건을 정확히 파악하지 못하며, 오로지 운전자 자신의 감각에 의존해 판단을 내리게 된다.
- 특히, 운전자는 자신의 감각 중 도로 기하구조 등의 변화를 가장 먼저 감지할 수 있는 시각에 크게 의존하게 되며, 이는 설계요소 중 시거와 관련이 많다.

- 이상을 토대로 본 연구에서는, 시거개념을 적용하여 평면곡선의 곡선반경, 시선의 여유폭, 노면마찰계수, 종단구배, 중력가속도 및 운전자 인지반응시간 등의 요소를 종합적으로 고려한 속도추정모형을 개발하였으며, 이를 통해 추정된 주행속도를 각 도로 구간별로 비교함으로써 설계일관성을 판단하고자 하였다.

3. 모형의 정립

새로이 개발된 모형은 직선구간의 속도를 추정하기 위하여 설계속도 대신 운전자의 기대심리를 반영

한 희망속도(desired speed) 개념을 사용하였으며, 평면곡선에서는 운전자가 도로 기하구조에 반응한다는 전제하에 시거를 이용한 속도추정식을, 그리고 종단곡선에서는 에너지보존의 법칙을 이용한 관계식을 정립하였다. 또한 본 연구에서는 두 개의 평면곡선이 연결된 경우와 두 평면곡선 사이에 존재하는 짧은 직선구간 및 평면곡선과 종단곡선이 섞여 있는 합성곡선에 대하여도 주행속도의 변화를 추정할 수 있는 모형을 정립하였다.

- 주행속도를 추정하기 위해 본 모형에서 사용한 가정은 다음과 같다.

- 운전자는 항상 주행하고 있는 속도에 대한 최소정지시거 또는 그 이상의 시거를 확보하려 한다. 따라서 운전자는 주행속도에 대한 최소정지시거 이상의 시거가 확보되지 않으면 감속을 하며, 주행속도에 대한 최소정지시거 이상의 시거가 확보되는 경우에는 가속을 하되 희망속도 이상으로는 가속하지 않는다.
- 운전자가 선택하는 감속도 즉, 속도의 변화율은 시거의 변화율을 따른다.
- 운전자는 시거가 커지는 구간을 주행하더라도 차량 가속능력으로 인하여 시거의 변화율에 비례하여 가속도를 높일 수 없다. 따라서 이 때에 작용하는 가속도는 차량의 평균가속도이다.

1) 직선구간

직선구간에서 운전자가 낼 수 있는 속도는 설계속도와 관계가 있으나 항상 이와 일치하지는 않는다. 따라서 직선구간에서 운전자가 내는 속도를 운전자가 희망하는 희망속도로 정의하여 설계속도와 구별해야 한다. 이러한 희망속도는 설계속도와 같이 도로설계자에 의하여 정해지는 값이 아니며, 운전자들이 주행하고자 희망하는 속도로서 운전자 특성에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 모형을 통한 속도 산출의 예를 설명하기 위하여 지방부 2차로 직선구간에서의 희망속도를 승용차와 트럭 공히 70km/h로 설정하였다. 그러나 실제로 직선구간에서 승용차의 희망속도가 트럭보다 높을 것으로 기대된다.

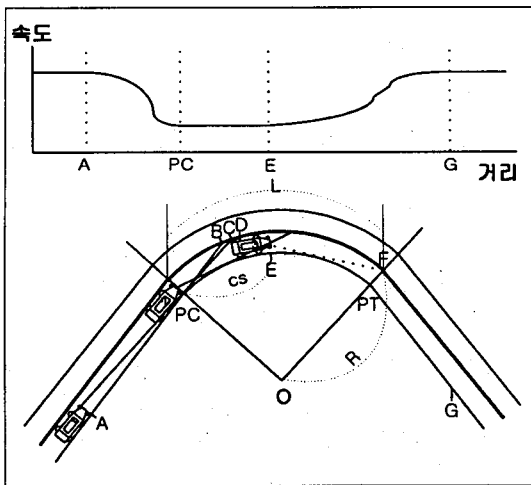
2) 평면곡선

위의 가정을 토대로 평면곡선의 속도추정은 다음의 사항을 기초로 구축되었다.

- 평면곡선에서 확보되는 최소시거와 이에 따른 평면곡선에서의 최소주행속도 추정.
- 직선구간에서 평면곡선구간으로 진입하기 전 최초 감속시작 지점.
- 평면곡선을 빠져 나와 직선구간에서의 가속완료 지점.

(1) 독립된 평면곡선부의 경우

① 평면곡선구간의 최소시거 및 최소주행속도



<그림 1> 도로의 평면선형 및 주행속도

<그림 1>에서 보는 바와 같이 도로구간을 주행하는 운전자에게 최소시거가 나타나는 때는 평면곡선구간의 시점 PC로 진입할 때이다. 지점 PC와 지점 E사이에서는 운전자의 시거가 평면곡선구간 내에 위치하므로 두 지점 사이에서 운전자가 바라보는 시거는 최소시거로 동일하게 된다. 또한 지점 E를 지나면서부터 운전자의 시거는 계속 증가하게 된다.

다음은 지점 D와 지점 F사이의 직선거리로 표현되는 최소시거(SD_h)를 계산한 식이다.

■ 내측차로

$$SD_h = 2\sqrt{R^2 - (R - 4.5)^2} \quad (1)$$

여기서,

SD_h : 평면곡선구간에서 확보되는 최소시거(m)

R : 평면곡선의 곡선반경(m)

4.5 : 차로폭(3.5m)+시선의 여유폭(1.0m)

■ 외측차로

$$SD_h = 2\sqrt{(R + 4.5)^2 - R^2}$$

평면곡선구간에서의 최소시거(SD_h)를 최소화시거로 놓으면, 이에 따른 평면곡선에서의 최소주행속도는 다음과 같다.

$$SD_h = tV_h + \frac{V_h^2}{2g(f \pm G)} \quad (2)$$

여기서,

V_h : 평면곡선에서의 최소주행속도(m/s)

t : 인지반응시간(2.5초)

g : 중력가속도(9.8m/s²)

f : 노면마찰계수

G : 종단구배(%)

식(2)를 평면곡선에서의 최소속도(V_h)에 대한 2차식으로 정리하면,

$$V_h^2 + 2g(f \pm G)tV_h - 2g(f \pm G)SD_h = 0$$

이 되며, 평면곡선에서의 최소속도

$$V_h = \frac{-g(f \pm G)t + \sqrt{[g(f \pm G)t]^2 + 2g(f \pm G)SD_h}}{1} \quad (3)$$

가 된다.

또한, 평면곡선구간에서의 최소시거(SD_h)를 지점 E에 위치한 차량3의 전면부에서 지점 F까지의 직선거리(s) 및 차량길이(L)의 합으로 근사시키면, 동일한 최소시거가 유지되는 지점 PC부터 지점 E까지의 거리(cs)를 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$cs = L - (SD_h - \ell) \quad (4)$$

여기서,

cs : 최소시거가 유지되는 구간의 거리(m)

L : 곡선장(m)

ℓ : 평균 차량길이(10m)

위의 식(2)에서 사용된 노면마찰계수(f)는 다음의 <표 1>에서 보는 바와 같다.

일반적으로 마찰력은 정지상태에서 막 움직이려 할 때 가장 큰 값을 나타내며, 이때의 값이 최대정지 마찰력이 된다. 또한 마찰력은 속도가 증가할수록 작아지게 된다.

<표 1> 노면이 습윤 상태일 때의 마찰계수

설계속도(km/h)	노면마찰계수(f)	최소곡선반경(m)
120	0.28	710
100	0.29	460
80	0.30	280
70	0.31	200
60	0.32	140
50	0.34	90
40	0.37	60
30	0.44	30
20	0.44	15

자료 : 건설부, 도로구조령개정령, 1990.

그러나 평면 곡선부에서는 곡선반경에 따라 주행 속도가 달라지게 되므로 직선구간에서와 같이 설계속도에 따라 마찰계수를 선택하는 것이 아니라 곡선반경을 기준으로 선택하는 것이 타당할 것이다. 또한 평면곡선부는 횡방향 마찰력이 작용하므로, 편구배를 설치함으로써 이에 대해 보완하고 있다. 따라서 본 모형에서는 평면곡선구간에 적용할 새로운 마찰계수 값을 구하지 않고, 설계속도별 최소곡선반경에 따른 마찰계수 값을 적용하여 평면곡선에서의 최소정지거리를 계산할 수 있도록 하였다.

② 평면곡선구간 진입전 최초 감속시점

회망속도(V_d)로 평면곡선에 진입하는 차량의 최소정지시거는 다음과 같다

$$SD_d = tV_d + \frac{V_d^2}{2g(f \pm \mu)} \tag{5}$$

여기서,

SD_d : 회망속도에 필요한 최소정지시거(m)

V_d : 회망속도(m/s)

식(5)로부터 구해진 최소정지시거(SD_d)는 위의 <그림 1>에서 보는 바와 같이 지점 A에 도달한 차량 1의 운전자가 지점 C를 바라보는 직선거리이다. 이때 최소정지시거(SD_d)는 직선구간에서의 시거와 곡선구간에서의 시거로 나눌 수 있으며, 곡선구간에서의 시거는 평면곡선구간의 최소시거(SD_h)에서 차량 길이(ℓ)를 뺀 거리로 근사시킬 수 있다. 따라서 직선구간에서의 시거를 지점 A와 지점 PC사이의 직선거리로 근사시키면, 차량의 위치 A와 곡선의 시점 PC사이의 감속거리(S_{dec})를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{dec} = SD_d - (SD_h - \ell) \tag{6}$$

여기서,

S_{dec} : 직선구간과 곡선구간사이의 감속거리(m)

<그림 1>을 보면, 직선구간에서 평면곡선구간으로 진입하는 운전자는 시거의 감소를 확인한 후, 서서히 속도를 감속하며, 그 이후 계속적으로 시거가 줄어들어 따라 속도를 급격히 감속한다. 또한 운전자는 곡선 진입부에 이르러 시거가 더 이상 줄어들지 않으므로 속도를 일정하게 유지하는 것을 볼 수 있다. 속도의 변화가 이와 같이 나타나는 이유는 줄어드는 시거에 대한 운전자의 인지반응의 결과로 풀이된다.

③ 가속완료지점

<그림 1>에서 지점 G는 차량이 평면곡선구간의 최소시거구간을 지나 회망속도에 도달한 지점을 나타낸 것이다. 가정 ③에 의하여 차량의 평균가속도를 상수로 정의하면, 평면곡선구간의 지점 E로부터 지점 G사이의 거리는 다음과 같다.

$$S_{acc} = \frac{V_d^2 - V_h^2}{2A} \tag{7}$$

여기서,

S_{acc} : 평면곡선의 최소주행속도로부터 회망속도에 도달하는데 걸린 거리(m)

A : 차량의 평균가속도(m/s^2)

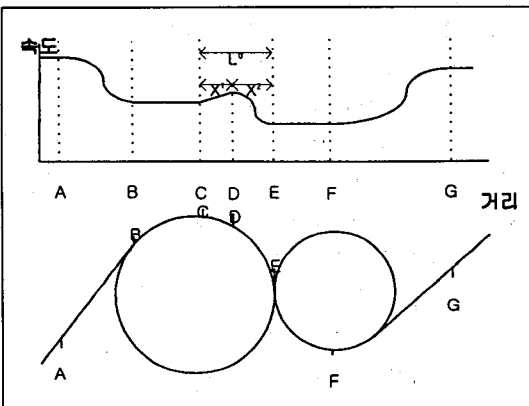
가속의 경우도 감속의 경우와 마찬가지로 곡선의 형태로 속도의 변화가 일어나지만 차량의 가속능력이 감속능력보다 떨어지므로 장거리에 걸쳐 속도변화가 일어나게 된다. 또한 곡선부를 진출하는 차량은 곡선부를 완전히 빠져 나오기도 전에 이미 회망속도에 필요한 최소정지시거를 확보하게 된다. 그러나 차량은 시거의 확보에 맞추어 속도를 가속하기보다는 차량의 성능 내에서 가속하게 된다.

(2) 두 평면곡선이 접하는 경우

① 선행 곡선반경이 큰 경우

이 경우와 위에서 살펴본 평면곡선과의 차이점은 다음의 <그림 2>에서 보는 바와 같이 선행곡선의 구간CE 사이에서 가속과 감속이 일어난다는 것이다. 따라서 지점 D의 위치와 지점 D에서의 속도를 파악하는 것이 중요하다.

구간 CD에서의 시거는 구간 BC에서의 시거보다 크며 지점 C에서 지점 D로 갈수록 점점 시거가 커진다.



<그림 2> 선행 곡선반경이 큰 경우

또한 구간 DE에서의 시거는 구간 EF에서의 시거보다 크며, 지점 D에서 지점 E로 갈수록 시거가 작아진다. 즉, 구간 BF에서 지점 D의 시거가 가장 크므로, 지점 C를 통과한 차량은 지점 D까지 가속하게 되며, 그 후로 지점 E까지 감속하게 된다.

구간 CE사이의 가속 및 감속거리와 속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_0 = X_1 + X_2 = SD_{hl} - \ell \tag{8}$$

$$X_1 = \frac{V_s^2 - V_{hl}^2}{2A}$$

$$X_2 = SD_{vs} - (SD_{h2} - \ell)$$

그러므로 X_1 을 다음과 같이 다시 바꾸어 쓸 수 있다.

$$X_1 = L_0 - X_2 = (SD_{hl} - \ell) - [SD_{vs} - (SD_{h2} - \ell)] = (SD_{hl} + SD_{h2} - 2\ell) - SD_{vs}$$

$$SD_{vs} = tV_s + \frac{V_s^2}{2g(f+G)}$$

여기서,

L_0 : 구간 CE사이의 가속 및 감속거리(m)

X_1 : 가속거리(m)

X_2 : 감속거리(m)

SD_{hl} : 선행곡선의 최소시거(m)

SD_{h2} : 후행곡선의 최소시거(m)

SD_{vs} : 선행곡선으로부터 최대로 가속한 지점에서 확보되는 최소정지시거(m)

V_s : 두 평면곡선구간 사이에서 도달할 수 있는 최대속도(m/s)

따라서,

$$X_1 = \frac{V_s^2 - V_{hl}^2}{2A}$$

$$= (SD_{hl} + SD_{h2} - 2\ell) - [tV_s + \frac{V_s^2}{2g(f+G)}]$$

위의 식을 V_s 에 대한 2차 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$V_s^2 + \frac{2Ag(f+G)t}{[g(f+G) + A]} V_s - \frac{2Ag(f+G)}{[g(f+G) + A]} (SD_{hl} + SD_{h2} - 2\ell) - \frac{g(f+G)V_{hl}^2}{[g(f+G) + A]} = 0 \tag{9}$$

식(9)에서, V_s 에 대한 2차 방정식의 1차항의 계수를 b, 상수항을 c라 하면, V_s 에 대한 2차 방정식은 다음과 같이 치환된다.

$$V_s^2 + bV_s + c = 0$$

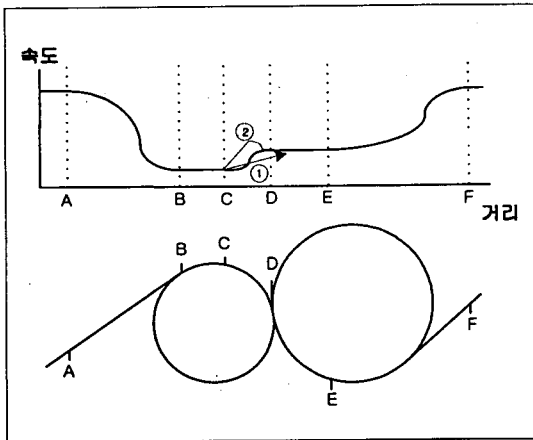
이 때, b 와 V_s 는 항상 0보다 크므로,

$$V_s = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \quad (10)$$

이 외에도 직선구간에서의 감속시점, 가속완료지점 및 두 평면곡선 상에서의 최소주행속도 등은 위의 평면곡선에서와 같은 방법으로 구할 수 있다.

② 선형 곡선반경이 작은 경우

선형곡선 반경이 작은 경우에는 다음의 <그림 3>에서 보는 바와 같이 두 가지의 경우가 존재할 수 있다.



<그림 3> 선형 곡선반경이 작은 경우

- 두 평면곡선 사이에 가속만 존재

구간 CD의 길이가 평균가속도에 의해 가속하는 데 걸리는 거리보다 짧은 경우로서, 가속에 필요한 거리는 식(7)에서와 같은 방법으로 구할 수 있다.

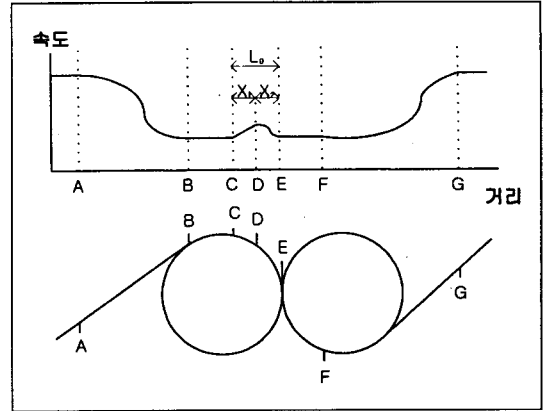
- 두 평면곡선 사이에 가속 및 감속 존재

구간 CD의 길이가 평균가속도에 의한 가속거리보다 긴 경우로서, 식(8)~(10)에 의해 구간 CD에서의 최대속도와 가·감속거리를 구할 수 있다.

③ 두 곡선반경이 같은 경우

두 평면곡선의 곡선반경이 같은 경우는 <그림 4>에

서 보듯이 선형 곡선반경이 큰 경우와 마찬가지로



<그림 4> 두 곡선반경이 같은 경우

구간 CE사이에서 가속 및 감속이 발생하며, 최대속도 및 가·감속거리 등의 산정은 위에서 살펴본 바와 같다.

(3) 곡선-직선-곡선구간의 경우

운전자는 충분히 긴 직선구간에서 희망속도로 주행할 수 있으나, 두 평면곡선 사이의 짧은 직선구간에서는 희망속도에 도달하지 못할 수도 있다. 따라서 이러한 경우에는 운전자가 확보할 수 있는 시거와 차량의 평균가속도를 고려하여 두 곡선부 사이 직선구간의 속도를 추정하여야 한다. 다음의 <그림 5>는 두 곡선부 사이의 직선구간에서 희망속도에 도달하지 못하는 경우를 보여준다.

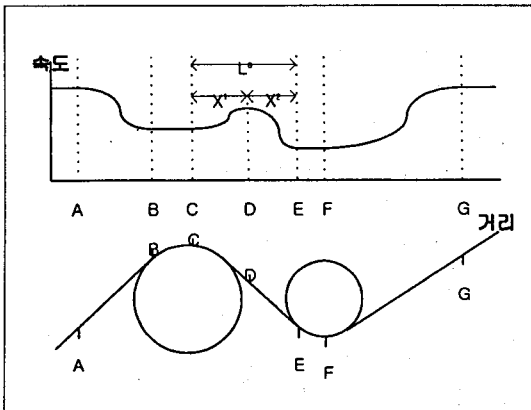
두 곡선구간 사이에 직선구간이 있는 경우는 두 곡선구간이 접한 경우와 비교해 가·감속구간에 직선구간이 추가된 경우이므로, "①선형 곡선반경이 큰 경우"와 같은 방법으로 구간 CE사이의 가속 및 감속거리와 속도를 구할 수 있다.

두 평면곡선이 접하는 경우와 비교해 가·감속거리에 직선구간의 거리만 추가되므로,

$$L_0 = X_1 + X_2 = (SD_{h1} \cdot t) + L_t \quad (11)$$

여기서,

L_t : 두 평면곡선 사이 직선구간의 거리(m)



〈그림 5〉 곡선-직선-곡선구간의 속도 profile

그러므로,

$$\begin{aligned} X_1 &= L_0 - X_2 \\ &= (SD_{h1} - \ell + L_1) - [SD_{vs} - (SD_{h2} - \ell)] \\ &= (SD_{h1} + SD_{h2} - 2\ell + L_1) - SD_{vs} \end{aligned}$$

그리고,

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{V_s^2 - V_{h1}^2}{2A} \\ &= (SD_{h1} + SD_{h2} - 2\ell + L_1) - \left[tV_s + \frac{V_s^2}{2g(f \pm G)} \right] \end{aligned}$$

이 되며, V_s 에 대한 2차 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

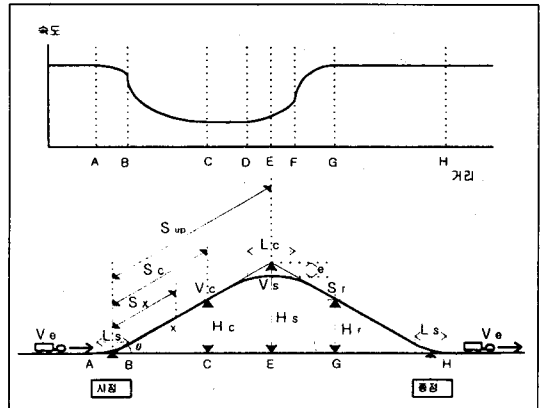
$$\begin{aligned} V_s^2 + \frac{2Ag(f \pm G)t}{[g(f \pm G) + A]} V_s \\ - \frac{2Ag(f \pm G)}{[g(f \pm G) + A]} (SD_{h1} + SD_{h2} - 2\ell + L_1) \\ - \frac{g(f \pm G)V_{h1}^2}{[g(f \pm G) + A]} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서, V_s 는 식(10)과 같은 방식으로 구할 수 있다.

3) 종단곡선

종단곡선에 의하여 지속적으로 속도에 영향을 받

는 차량은 중차량이며, 승용차는 영향을 받지 않는 것으로 가정한다.



〈그림 6〉 도로의 종단선형 및 주행속도

또한 중차량에 대한 종단선형상의 속도추정은 〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 상향구배와 하향구배의 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

종단선형에서 최소시거가 발생하는 지점은 종단곡선이 설치된 지점이다. 이러한 종단선형의 최소시거가 속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 오목곡선과 볼록곡선의 최소시거 산출식을 살펴보기로 한다.

▶ 오목곡선(sag vertical curve)

- 시거가 종단곡선의 길이 미만일 때($S_{sv} < L$)

$$S_{sv} = \frac{3.5}{A} L_{min} \pm \sqrt{\left(\frac{3.5}{A} L_{min}\right)^2 + \frac{480L_{min}}{A}}$$

여기서,

S_{sv} : 오목 종단곡선의 최소시거(m)

L_{min} : 종단곡선의 최소 길이(m)

A : 종단구배 대수 차

($(\text{후행종단구배}(G_2) - \text{선행종단구배}(G_1))$)(%)

- 시거가 종단곡선의 길이 이상일 때($S_{sv} \geq L$)

$$S_{sv} = \frac{AL_{min} + 120}{2A - 3.5}$$

▶ 블록곡선(crest vertical curve)

- 시거가 종단곡선의 길이 미만일 때($S_{cv} < L$)

$$S_{cv} = \sqrt{\frac{100(\sqrt{2h_1} + \sqrt{2h_2})^2}{A}} L_{min}$$

여기서,

h_1 : 운전자의 눈 높이(1.0m)

h_2 : 장애물의 높이(0.15m)

- 시거가 종단곡선의 길이 이상일 때($S_{cv} \geq L$)

$$S_{cv} = \frac{1}{2} L_{min} + \frac{100(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A}$$

다음의 <표 2>는 설계속도별 최대종단구배 및 최소 종단곡선 변화비율을 나타낸 것이다. <표 2>의 내용을 준수하여 설계된 종단선형의 최소시거는 항상 설계속도에 필요한 최소정지시거를 만족한다. 따라서 종단선형에서는 시거의 제약이 없으며, 단지 종단구배만이 속도에 영향을 끼치는 것으로 판단할 수 있다.

<표 2> 최대종단구배 및 최소종단곡선 변화비율

설계속도 (km/h)	곡선 형태	최소종단곡선 변화비율 (m/%)	최대종단구배 (%)	
			표준	부득이한 경우
120	블록	190	3	-
	오목	70		
100	블록	100	3	5
	오목	50		
80	블록	50	4	6
	오목	35		
70	블록	30	4	6
	오목	25		
60	블록	20	5	7
	오목	20		
50	블록	10	6	9
	오목	12		
40	블록	5	7	10
	오목	7		
30	블록	3	8	11
	오목	4		
20	블록	1	10	13
	오목	2		

자료 : 건설부, 도로구조령개정령, 1990.

(1) 상향구배

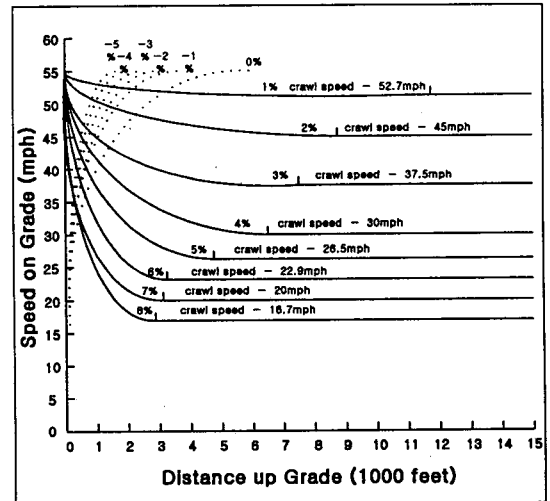
종단선형 상향구배에서의 속도추정은 다음과 같은 요소를 고려하여야 한다.

- 차량의 진입속도
- crawl speed 및 crawl speed 도달 위치
- 상향구배에 작용하는 가속도
- 진입부 오목곡선 종점에서의 속도
- 블록곡선 정점에서의 속도

① crawl speed 및 crawl speed 도달 위치

crawl speed는 AASHTO에서 작성한 구배별 트럭 성능 곡선그래프(200lbs./hp)를 이용하여 구하였으며, crawl speed 도달 위치 (S_c)는 거리 당 속도변화율 (α_1)을 근거로 계산하였다.

다음의 <그림 7>과 <표 3>은 구배별 트럭 성능 곡선그래프와 거리 당 속도변화율을 나타낸 것이다.



<그림 7> 구배별 트럭 성능 곡선(AASHTO)

<표 3> 종단구배별 감·가속률

상향구배 (%)	감속율(α_1) (mph/1000ft)	하향구배 (%)	가속률(α_2) (mph/1000ft)
1	0.20	0	7.02
2	1.14	-1	11.58
3	2.36	-2	15.36
4	3.85	-3	19.21
5	6.01	-4	22.80
6	10.13	-5	27.19
7	12.03	-	-
8	13.97	-	-

② 가속도의 종류

상향구배에 작용하는 가속도는 crawl speed에 도달할 때까지 작용하는 평균가속도(a_1)와 crawl speed 도달 이후 작용하는 최대가속도(a_2)로 나누어진다. crawl speed에 도달할 때까지 작용하는 평균가속도(a_1)는 다음의 속도추정식을 통하여 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} mV_e^2 + ma_1 S_c = mgH_c + \frac{1}{2} mV_c^2 \quad (13)$$

$$H_c = S_c \sin \theta$$

$$S_c = \frac{V_e - V_c}{a_1}$$

그러므로,

$$a_1 = g \sin \theta - \frac{V_e^2 - V_c^2}{2S_c} \quad (14)$$

여기서,

- m : 차량질량
- V_e : 진입속도(m/s)
- a_1 : 종단선형의 시점부터 crawl speed에 도달할 때까지 작용된 가속도(m/s^2)
- S_c : 종단선형의 시점으로부터 crawl speed에 도달할 때까지 주행한 거리(m)
- a_1 : 상향구배별 거리 당 감속도(mph/1000ft)
- g : 중력가속도(m/s^2)
- H_c : crawl speed에 도달한 지점의 높이(m)
- V_c : crawl speed(m/s)
- θ : 종단구배 각($\tan \theta = \text{종단구배}$)

또한 crawl speed 도달이후 작용하는 최대가속도(a_2)는 crawl speed가 발생한 지점 이후의 속도추정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} mV_e^2 + mgH_c + ma_2(S_{up} - S_c) = \frac{1}{2} mV_c^2 + mgH_s \quad (15)$$

$$H_c = S_c \sin \theta$$

$$H_s = S_{up} \sin \theta$$

그러므로,

$$a_2 = g \sin \theta \quad (16)$$

여기서,

- a_2 : crawl speed 도달이후 작용된 가속도(m/s^2)
- S_{up} : 종단선형의 시점부터 두 종단구배가 교차하는 위치까지의 직선거리(m)
- H_s : 두 종단구배가 교차하는 위치의 높이(m)

따라서 a_1 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a_1 = a_2 - \frac{V_e^2 - V_c^2}{2S_c}$$

다음은 종단선형을 주행할 때 나타나는 마찰력과 가속도에 대한 설명이다.

- 종단선형을 주행하는 차량에 작용하는 마찰력으로는 노면마찰 및 공기저항이 있다. 따라서 위의 식(13) 및 (15)에서, 각 식의 양변에 마찰력을 표현하는 항이 추가되어야 하지만, 마찰력이 서로 같은 크기를 가지므로 결국은 상쇄되어 위와 같이 간략하게 표현되었다.

- 종단선형 상향구배를 주행하는 차량에 작용하는 가속도는 점점 증가하여 crawl speed에 도달할 때 최대가 된다. 따라서 종단구배 진입후 crawl speed에 도달하기까지 차량의 가속도는 계속 변화하므로, 이 기간을 대표하는 평균가속도로써 a_1 을 적용하였다.

- crawl speed 도달 이후 중차량에 작용하는 최대 가속도는 $a_2 = g \sin \theta$ 이므로, 결국 차량의 가속력과 구배지에서 미끄러져 내리는 힘이 같아지게 되어 차량은 속도의 변화 없이 일정하게 주행하게 된다. 그러나 crawl speed에 도달하기 전에는 차량의 가속력이 미끄러져 내리는 힘보다 작으므로 속도는 점점 감소하게 되며, crawl speed에 접근할수록 가속력과 미끄러져 내리는 힘의 차이가 작아져 속도의 감소폭도 줄어들게 된다.

③ 오목곡선 종점에서의 속도추정

종단선형에서 오목곡선은 진입부와 진출부에 존재한다. 진입부 오목곡선에서는 진입속도로 진입한 차량이 오목곡선의 종점에서 어떠한 속도를 나타내는지 알아야 한다.

따라서 다음의 식이 성립한다.

$$\frac{1}{2} mV_c^2 + ma_p S_p = \frac{1}{2} mV_p^2 + mgH_p \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} mV_c^2 + ma_1 S_m = \frac{1}{2} mV_p^2 + mgH_p \quad (16)$$

$$H_p = \frac{AL_s}{200}$$

$$S_m = \frac{H_p}{\sin \theta}$$

위의 식(15)의 우변과 식(16)의 우변이 같으므로, 오목곡선 종점에서의 속도는 식(16)만을 사용하여 구할 수 있다.

그러므로,

$$V_p = \sqrt{V_c^2 - 2(a_2 - a_1)S_m} \quad (17)$$

여기서,

- a_p : 진입부 오목곡선 주행차량의 가속도(m/s²)
- S_p : 차량이 실제로 진입부 오목곡선을 주행한 거리(m)
- V_p : 진입부 오목곡선 종점에서의 속도(m/s)
- H_p : 진입부 오목곡선 종점의 높이(m)
- S_m : 종단선형의 시점으로부터 오목곡선 종점과 만나는 지점까지의 직선거리(m)
- L_s : 진입부에 위치한 오목 종단곡선의 길이(m)

따라서, 종단선형의 시점으로부터 crawl speed에 도달하기전 S_x 만큼 이동하였을 때의 속도(V_x)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} V_c^2 + a_1 S_x = gH_x + \frac{1}{2} V_x^2 \quad (18)$$

$$H_x = S_x \sin \theta$$

$$V_x = \sqrt{V_c^2 - 2(a_2 - a_1)S_x} \quad (19)$$

여기서,

- S_x : 종단선형의 시점과 지점 x 사이의 직선거리(m)

V_x : 지점 x 에서의 속도(m/s)

H_x : 지점 x 의 높이(m)

④ 블록곡선 정점에서의 속도추정

종단선형 상향구배에서는 crawl speed에 도달한 이후 계속 crawl speed를 유지하나, 정점부에 다다라 종단곡선에 진입하게 되면 종단곡선의 구배가 상향구배보다 작기때문에 가속이 일어나게 된다. 이는 종단곡선 상의 정점의 높이와 두 구배가 교차하는 위치 사이에 높이 차가 발생하기 때문으로, 종단곡선 정점에서는 위치에너지가 감소하는 대신 운동에너지가 증가하여 속도가 증가한 것으로 볼 수 있다. 종단곡선 정점에서의 속도를 추정하기 위해서는 종단구배가 교차하는 위치의 높이(H_s)와 정점의 높이 차를 알아야 한다. 이 때의 높이 차 $\frac{e = AL_c}{800}$ 이므로, 정점의 높이는

($H_s - e$)가 된다.

따라서,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} mV_c^2 + mgH_c + ma_2(S_l - S_c) \\ &= \frac{1}{2} mV_s^2 + mg(H_s - e) \end{aligned} \quad (20)$$

$$V_s = \sqrt{V_c^2 + 2a_2(S_l - S_{up}) + 2ge} \quad (21)$$

여기서,

- V_s : 정점에서의 속도(m/s)
- S_l : 종단선형의 시점과 정점사이의 거리(m)
- e : 종단구배가 교차하는 위치와 정점사이의 높이 차(m)
- L_c : 정점부 블록 종단곡선의 길이(m)

또한 종단선형 상향구배의 길이가 crawl speed에 도달하는데 필요한 거리보다 짧은 경우에는 다음의 식(24)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{2} mV_c^2 + ma_1 S_l = \frac{1}{2} mV_s^2 + mg(H_s - e) \quad (22)$$

그러므로,

$$V_s = \sqrt{V_c^2 + 2(a_1 S_l - a_2 S_{up}) + ge} \quad (23)$$

(2) 하향구배

중단선형 하향구배에 대한 속도 추정은 중단곡선 정점에서의 속도와 진출속도에 의하여 결정된다. 진출속도는 앞의 <그림 7>과 <표 2>를 이용하여, 정점으로부터 희망속도로 속도를 회복하는데 필요한 거리 ($S_r = \frac{V_o - V_s}{a_2}$) 와 중단선형 하향구배의 길이(S_2)를 비교함으로써 결정된다. 즉, 중단선형 하향구배상에서 희망속도에 도달할 수 있는 경우($S_r < S_2$)는 진출속도가 희망속도가 되며, 그렇지 않은 경우($S_r \geq S_2$)의 진출속도는 <표 3>에 나와있는(a_2)을 이용하여 구하게 된다.

중단선형 하향구배에서의 속도추정 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} mV_s^2 + mg(H_s - e) + ma_3S_r \\ & = \frac{1}{2} mV_o^2 + mgH_r \end{aligned} \quad (24)$$

$$H_r = (S_2 - S_r)\sin \theta$$

if $S_r \geq S_2, V_o < V_r = V_d, V_o = V_s + a_2S_2$

if $S_r < S_2, V_o = V_r = V_d$

따라서,

$$a_3 = \frac{V_o^2 - V_s^2}{2S_r} + a_2(S_2 - S_{down} - S_r) + ge \quad (25)$$

여기서,

- H_s : 두 중단구배가 교차하는 위치의 높이(m)
- S_{down} : 두 중단구배가 교차하는 위치와 중단선형 중점사이의 거리(m)
- S_2 : 정점에서 중단선형 중점까지의 거리(m)
- S_r : 정점으로부터 희망속도에 도달할 때까지 주행한 거리(m)
- H_r : 희망속도에 도달한 지점의 높이(m)
- V_o : 진출속도(m/s)
- a_3 : 하향구배에서 작용된 감·가속도(m/s²)
- a_2 : 구배별 거리 당 속도의 변화율(mph/1000ft)

중단곡선의 정점으로부터 하향구배를 따라 S_y 만큼 이동하였을 때의 속도(V_y)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} V_s^2 + g(H_s - e) + a_3S_y \\ & = \frac{1}{2} V_y^2 + gH_y \sin \theta \end{aligned} \quad (26)$$

$$H_y = (S_2 - S_y)\sin \theta$$

그러므로,

$$V_y = \sqrt{V_s^2 + 2a_2(S_{down} + S_y - S_2) + 2(a_3S_y - ge)} \quad (27)$$

여기서,

S_y : 정점과 지점 y사이의 거리(m)

V_y : 지점 y에서의 속도(m/s)

H_y : 지점 y의 높이(m)

중단선형을 내려올 때 작용된 감속도 또는 가속도 (a_3)는 중단곡선의 상향구배를 주행할 때와 마찬가지로 하향구배를 내려갈 때 나타난 속도의 변화율을 의미한다.

4) 평면곡선과 중단곡선이 겹치는 경우

평면곡선과 중단선형이 합성된 경우는 평면곡선과 중단선형에서의 속도를 비교하여 추정할 수 있다. 즉, 각각의 선형에 의해 결정되는 속도에 대해 speed profile을 작성하여 각 구간별로 작은 값을 나타내는 선형의 속도를 선택하면 된다. 위의 방법은 Watanatada가 제시한 것과 외형상으로 동일한 방법론⁸⁾을 따르지만, 근본적으로는 다른 특성을 지니고 있다. 즉, 평면곡선의 속도 추정식이 평지뿐만 아니라 중단구배의 영향도 함께 반영하도록 구축되어 있기 때문에, 같은 기하조건을 갖는 평면곡선이 평지와 구배지에 대하여 서로 다른 속도 추정결과를 보이게 된다. 따라서 이는 같은 방법론을 취하였어도 결과는 다르게 되며, 보다 현실 반영적인 것으로 풀이된다. 이러한 예에 대하여는 다음 장에서 자세히 다루기로 한다.

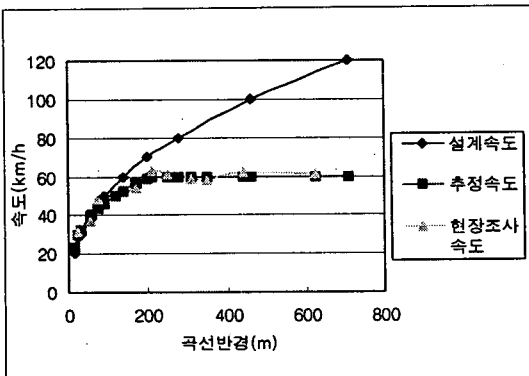
4. 모형의 검증

1) 현장조사를 통한 속도분석

본 연구에서는 평면곡선의 추정속도와 실제 주행속도를 비교하여 모형을 검증하기 위하여 곡선반경별로 현장조사를 수행하였다. 다음의 <표 4>와 <그림 8>은 현장조사 결과를 보여주며, 평면곡선의 추정속도가 실제 주행속도를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. <표 4>에서 실제 주행속도는 곡선반경이 커지더라도 이상 증가하지 않고 약 62km/h에서 수렴하고 있다. 따라서 <표 4> 및 <그림 8>에서 나와있는 추정속도는 실제 주행속도를 반영하도록 모형에 의한 추정속도가 60km/h 이상되는 구간에 대하여 최대값을 60km/h로 정하여 나타낸 것이다. 한편, <그림 8>에 제시된 설계속도는 <표 1>에 나와있는 설계속도와 최소곡선반경을 표시한 것이다.

<표 4> 현장조사 속도와 추정속도의 비교

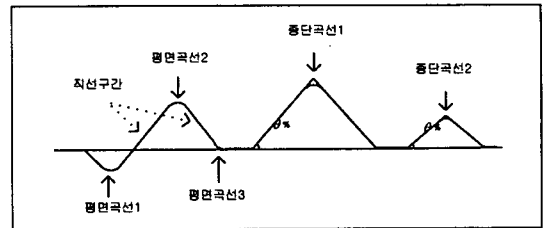
곡선반경	추정속도 (km/h)	현장 조사속도 (km/h)
25	29.8	31.5
55	39.5	36.8
75	43.3	48.3
170	56.1	54.2
210	59.6	63.2
250	60	61
310	60	59
350	60	58
440	60	61.7
625	60	61.6



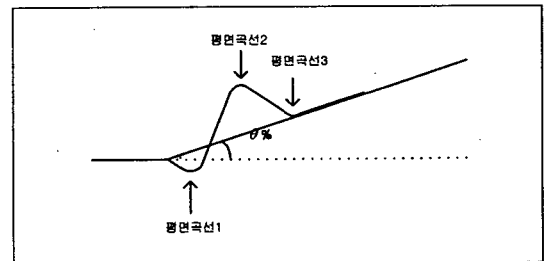
<그림 8> 곡선반경별 추정속도의 비교

2) 모형을 통한 속도추정 결과

설계속도를 기준으로 설계된 도로의 주행속도를 추정하기 위하여 다음의 <그림 9>, <그림 10> 및 <표 5>에 도로의 선형 및 기하조건을 제시하였다.



<그림 9> 평지의 도로선형 예



<그림 10> 중단구배상의 평면곡선 예

<표 5> 도로선형의 기하조건

곡선명	곡선반경 (R)	f±G	곡선장(L)	평균가속도(A)
C-1	280	0.30	200	0.14
C-2	200	0.31	120	0.14
C-3	210	0.31	210	0.14
C-4	-	0.35	4000	-
C-5	-	0.35	2000	-
C-6	280	0.35	200	0.14
C-7	200	0.36	120	0.14
C-8	210	0.36	120	0.14

위의 그림에 나와있는 도로의 기하조건은 설계속도 70km/h를 기준으로 최소 요구치 이상을 반영한 것이다. 속도추정모형에 사용된 변수 중 평면곡선에서의 평균가속도(A)는 현장 조사자료를 통해 곡선반경별로 산출된 것을 사용했다.

다음의 <그림 11>과 <표 6>은 평균가속도(A)에 대한 현장 조사치와 이에 대하여 곡선반경별로 추정된 값을 보여준다. 이와 같은 입력변수 값들을 토대로

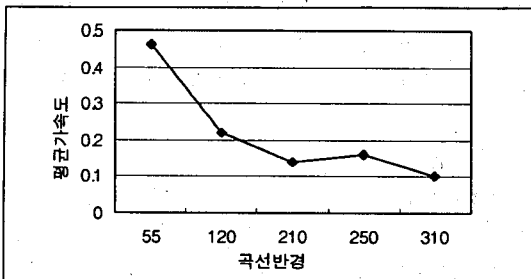
본 논문에서는 프로그래밍을 통해 다음의 <그림 12> 및 <표 7>의 결과를 얻었다. Computer software는 C를 이용해서 작성했고, <그림 12>는 실행 결과이다.

그림에서 실선은 승용차의 속도 궤적을 나타내며 굵은 점선은 트럭의 속도 궤적을 나타낸다. 또한 설계속도는 70km/h이며 운전자의 희망속도는 편의상 설계속도와 같이 70km/h로 정하였다. <그림 12>에서 C-1부터 C-3은 평지에서서의 평면곡선을 나타내며, C-4와 C-5는 종단선형을 나타낸다. 또한 C-6부터 C-8은 평면곡선이 구배지에 설치된 합성선형을 나타낸다.

모형을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 평면곡선 : 승용차와 트럭의 추정속도가 동일하게 추정됨.
- 종단선형 : 승용차는 직선구간에서처럼 희망속도를 유지하나, 트럭은 종단구배의 영향으로 속도가 감소함.
- 합성선형 : <표 7>에서 볼 수 있듯이 같은 기하조건을 갖는 평면곡선에 대하여 승용차의 속도는 평지에서보다 구배지에서 다소 증가함.

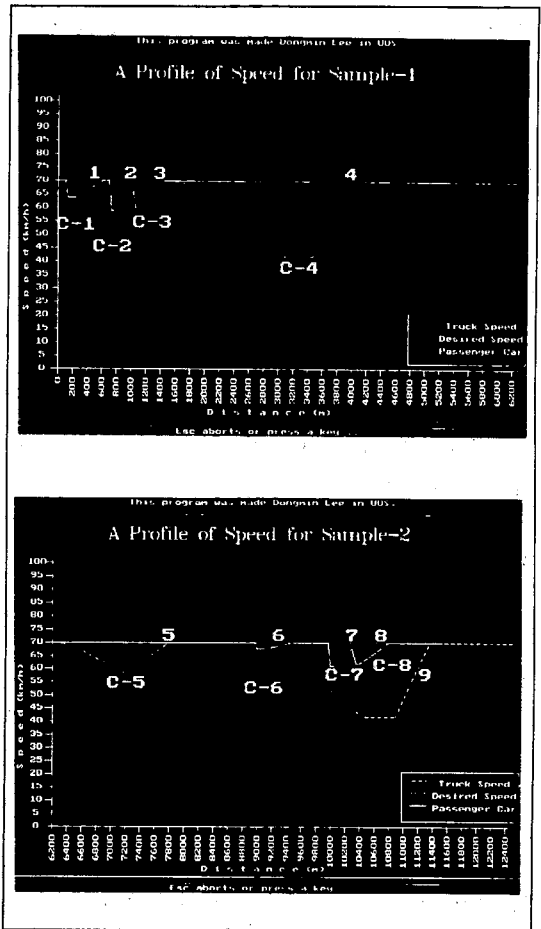
트럭의 속도는 <그림 12>에서 보는 바와 같이 두 속도 profile 중 작은 값으로 표시되며, 합성선형의 첫 번째 평면곡선에서 승용차와 마찬가지로 평지보다 높



<그림 11> 곡선반경별 평균가속도

<표 6> 곡선반경별 평균가속도

현장 조사치		모형 적용치	
곡선반경 (m)	평균가속도 (m/s ²)	곡선반경 (m)	평균가속도 (m/s ²)
55	0.46	≤ 60	0.46
120	0.22	≤ 90	0.33
210	0.14	≤ 140	0.22
250	0.16	≤ 280	0.14
310	0.10	> 280	0.10



<그림 12> 본 연구에서 작성한 Computer software에 의한 Speed Profile 산출 결과

<표 7> 속도추정 모형의 결과치

곡선명	구배	곡선특성	진입	곡선내	진출	비 고
			속도 (km/h)	속도 (km/h)	속도 (km/h)	
C-1	0%	평면곡선	70	68.3	70	
C-2	0%	곡선사이 짧은	70	58.9	70	
C-3	0%	직선구간 존재	70	70	70	
C-4	5%	종단곡선	승용차 70	70	70	
			트럭 70	42.7 ¹⁾ (54.7) ²⁾	70	
C-5	5%	crawl speed	승용차 70	70	70	
		미달	트럭 70	58.9	70	
C-6	5%	평면곡선	승용차 70	68.3	70	
			트럭 70	68.3	63.9	
C-7	5%	곡선사이 짧은 직선 구간 존재	승용차 70	67	68	
			트럭 42.5	52	45	
C-8	5%		승용차 70	70	70	
			트럭 30	43.1	42.7	

1) crawl speed 2) 정점에서의 속도

은 속도를 보임.

이상의 결과 중 특이한 것은 평지가 아닌 구배지에서 평면곡선의 추정속도가 높게 나타나는 것인데, 이는 안전과 관련된 문제로서 구배가 증가함에 따라 상향구배에서 차량의 제동능력이 증가하기 때문이다. 즉, 돌발상황에 대하여 급제동이 가능하므로 운전자는 평지에서 보다 구배지에서 속도를 더 높일 수 있는 것으로 풀이된다.

본 모형은 합성선형에서도 평지에서의 평균가속도(A)를 그대로 적용하였다. 그러나 합성선형에서는 구배의 영향으로 가속력이 떨어질 것이므로, 추후 구배지에서 작용하는 평균가속도에 대한 연구가 추가되어야 할 것이다.

5. 설계일관성에의 적용

위에서 적용된 속도추정 결과와 설계속도를 비교해 보면, 모형에 의한 추정속도가 70km/h의 설계속도로 일관되지 않고 도로선형에 따라 크게 변화하는 것을 볼 수 있다.

위의 예는 설계자의 입장에서 볼 때, 설계속도를 기준으로 일관되게 설계를 하였다고 판단할 수 있다. 그러나 운전자의 입장에서 볼 때는, 도로 주행시 나타나는 반복적인 속도의 변화로 인하여 일관되게 설계된 도로선형이라고 느끼기는 어렵다. 특히 반복적인 속도의 변화 또는 급격한 속도의 변화를 요하는 구간은 운전자의 운전부담량을 급격히 증가시켜 안전치 못한 위험구간으로 판단할 수 있다. 또한 승용차와 트럭의 속도 차이가 크게 나는 구간에서는 2차로 도로의 특성상 승용차의 지체가 심화되어 전체적인 도로 운영의 효율을 저하시킬 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서 개발된 속도 추정 모형식과 computer program을 이용하면 손쉽게 설계일관성을 검토할 수 있다.

또한, 최소설계기준인 설계속도를 사용하여 설계할 경우 최소곡선반경만이 제시되고 설계속도에 해당하는 적정곡선반경을 찾을 길이 없으며 과도하게 큰 곡선반경을 허용할 경우 예산상의 낭비를 초래할 수 있으나, 평균주행속도를 사용하여 적정곡선반경을 찾는다면 가능한 예산의 범위 내에서 일관성을 고려하여 최소곡선반경과 적정곡선반경 사이의 값을 선택할 수

있게 된다. 예를 들어 설계속도가 60km/h이고 도로 기하구조상 충분히 큰 반경의 평면곡선을 설치할 수 없을 경우, <표 1> 및 <표 4>에서 최소곡선반경은 140m이고 추정속도에 대한 적정곡선반경은 210~250m임을 알 수 있다. 따라서 설계자는 60km/h의 설계속도에 대하여 140m~250m 사이의 반경을 갖는 평면곡선을 설치할 수 있으며, 반경 250m 이상의 과도하게 큰 평면곡선을 설치할 필요가 없게 된다.

III. 결론

다음은 본 연구를 통해 이루어진 결과에 대한 요약이다.

- 평면곡선

평면곡선에서는 승용차와 트럭의 속도가 같게 추정되었으며, 시거를 통해 산정된 추정속도는 곡선반경과 밀접한 관계를 갖는다.

- 종단선형

종단선형에서 승용차의 속도는 구배의 영향을 받지 않으나, 트럭은 구배의 영향으로 속도가 감소한다. 이 때 트럭에 작용되는 가속도는 모두 세 종류로써, 첫째, crawl speed에 도달할 때까지 작용한 가속도(a_1)와 둘째, crawl speed 이후 작용한 가속도(a_2) 그리고 셋째, 하향구배 주행시 작용된 가속도(a_3)로 구분된다.

- 합성선형

Watanatada가 제시한 것과 같이 평지에서 나타나는 평면곡선의 주행속도와 구배지에서의 속도를 단순 비교 함으로써, 작은 속도의 궤적을 따라 합성선형의 속도를 추정하는 것은 합성선형이 차량의 주행속도에 미치는 영향을 간과한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 본 모형에서는 합성선형의 영향을 고려하여 승용차와 트럭의 주행속도를 추정함으로써, 보다 현실적으로 주행속도를 추정하였다.

- 설계일관성

설계일관성을 검토하기 위하여 주행속도를 추정하

였으며, 추정된 속도를 사용하여 연속된 도로의 구간별 속도변화를 관찰하고 설계속도와 비교하였다. 또한 설계일관성의 기준으로 희망속도(또는 설계속도)와 주행속도의 차이의 범위를 10km/h로 정의하였다. 이를 통하여 설계일관성의 검토 결과 또는 새로운 도로의 설계시, 주행속도를 기준으로 한 설계일관성을 확보하기 위하여 평면곡선부에서의 적정곡선반경을 결정할 수 있게 되었다.

이상의 연구를 수행함에 있어 보완해야할 과제는 다음과 같다.

- 희망속도의 결정
- 모형에 반영할 노면마찰계수, 차로폭 및 시거의 여유폭, 평균가속도(평지 및 구배지) 등에 관한 정확한 산정
- crawl speed 및 거리당 속도 감속율의 정확한 산정
- 실제 교통상황에서 차량간의 상호작용을 고려한 모형의 개발(지체, 추월 등)
- 일관성 평가자의 입장에서 도로선형과 speed profile을 동시에 구현할 수 있는 소프트웨어의 개발

참고문헌

1. Woods et al, "Safety Design and Operational Practices for Streets and Highways," Texas Transportation Institute, 1979.
2. J. Barnett, Safe Side Friction Factors and Superelevation Design, HRB Proceeding, Vol 16, 1936.
3. J. Leisch, J. Leisch, "New Concepts in Design-Speed Application," TRR.
4. J. McLean, Driver Behavior on Curves - A Review, Vol 7, Part 5, 1974.
5. J. McLean, "An Alternative to the Design Speed Concept for Low Speed Alignment Design," TRR 702, 1979.
6. C. Messer, "Highway Geometric Design Consistency Related to Driver Expectancy (Vol II)," FHWA-RD-79-35, 1979.
7. J.C. Glennon, D.W. Harwood, "Highway Design Consistency and Systematic Design Related to Highway Safety," TRB Annual Meeting, 1978.
8. Thawat Watanatada, Ashok M. Dhareshwar, Paulo Roberto S. Rezende Lima, " Vehicle Speeds and Operating Costs", A World Bank Publication, 1987.