

## 과속방지턱 설치규격 검토를 위한 동역학적 분석

### Dynamic Analysis for Evaluation of Speed Control Hump Dimensions

심재수 Shim, Jae Soo | 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail: jsshim@khu.ac.kr)  
최현규 Choi, Hyun-Gyu | 한국시설안전공단 (E-mail: hero0812@khu.ac.kr)  
김성민 Kim, Seong-Min | 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail: seongmin@khu.ac.kr)

#### ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the characteristics of installation dimensions of speed control humps based on the theoretical dynamic analyses. The field surveys of speed control humps were performed first to compare their sizes with those suggested in the installation standard. Then, the displacement response spectra under impact loads were obtained using the single degree of freedom models where the vehicle and human were assumed to combine completely. The analysis results showed that the human perception became larger as the width and height of the humps increased, but the extremely higher uncomfortableness should be avoided. In addition, the ratio between the width and height should be considered when the humps are designed and installed because the ratio governs the vertical acceleration magnitude.

#### KEYWORDS

speed control hump, dynamic analysis, vertical acceleration, shock spectrum, degree of freedom, velocity, width, height

#### 요지

본 연구는 과속방지턱의 설치규격 특성을 검토하기 위하여 동역학적 이론을 기반으로 분석을 수행하였다. 먼저 과속방지턱에 대한 현장조사를 통해 기하구조 자료를 수집하여 현행 설치기준과 비교 분석하였으며, 차량과 운전자를 일체화시킨 단자유도 모델링 방법을 이용하여 충격하중에 의한 변위응답 스펙트럼을 구하였다. 해석 결과 과속방지턱의 폭과 높이는 커질수록 운전자에게 미치는 심리적 부담감이 커지나 과도한 불편함을 초래하지 않도록 크기를 결정해야 하는 것으로 분석되었다. 또한 과속방지턱의 폭과 높이의 비율은 운전자가 느끼는 수직가속도의 크기를 지배하므로 폭과 높이의 조화도 고려하여 과속방지턱을 설치하여야 한다.

#### 핵심용어

과속방지턱, 동적해석, 수직가속도, 충격스펙트럼, 자유도, 속도, 폭, 높이

### 1. 서론

자동차 대수의 급속한 증가 및 과속 운전으로 인한 보행 중 교통사고 사망률이 증가하고 있어 보행자를 위한 생활도로 교통안전 대책을 시행하고 있다. 교통안전을 위한 주요 대책으로는 노면표시나 도로표지 같은 교통규제 수법과 과속방지턱과 같은 물리적인 시설물들이 사용되고 있다. 이 중 과속방지턱은 도로 노면을 돌출시켜 턱이 지게 만든 것을 뜻하며 과속으로 인한 교통안전사고가 우려되는 도로에 설치하여 차량에 물리적 충격

과 운전자에게 심리적인 저항을 줌으로써 차량 주행속도의 저감을 가져오는 안전시설물로 평가되고 있다.

과속방지턱에 대한 연구는 영국의 TRRL(Transportation and Road Research Laboratory)의 실험을 시작으로 미국과 네덜란드, 독일, 일본 등 여러 나라에서 연구가 이루어져 왔다. 영국의 TRRL 실험에서는 과속방지턱은 원호의 단면으로 길이는 0.05m에서 3.66m로 하고, 높이는 1.3cm에서 15cm까지로 하여 15종류의 과속방지턱을 대상으로 실험을 실시하였다

(Watts, 1973). 그 결과 Short Hump는 실험에 사용된 7개 차종에 따라서 결과가 크게 차이가 났기 때문에 고속으로 진행되는 차량에 대해서는 효과가 적어 주행속도를 통제하기 위한 안전장치로서는 안전상의 문제가 있는 것으로 분석되었다. 하지만 길이 3.6m, 높이 10cm의 과속방지턱은 속도가 32km/h를 초과하면 주행에 있어서 불쾌감을 발생시켰으나 8km/h의 저속에서는 차나 운전자에게 적절한 쾌적함을 느끼게 하였으므로 이를 과속방지턱의 표준규격으로 결정하였다(Watts, 1973).

미국의 Speed Bump는 길이가 0.91cm 이하이고, 높이가 12.7cm에서 15.3cm의 급구배의 과속방지턱이다. 미연방도로국(FHWA: Federal Highway Administration)의 보고에 의하면, Bump는 저속에서 충격이 큰 위험이 있지만 오히려 고속에서는 충격이 감소하는 좋지 않은 특징이 있다고 보고되고 있어 TRRL의 Short Hump와 비슷한 실험결과가 보고되고 있다(Smith and Appleyard, 1981).

그 이외의 연구로 Watts 등의 연구자는 자동차를 4개의 자유도로 모델링하여 분석하였고(1990, 1992, 2000), Maemori와 Ando(1987)는 과속방지턱을 지나갈 때 운전자의 의자에 수직가속도계를 장치하여 실험하여 분석하였고, Pedersen(1998)과 Khorshid와 Alfares(2004, 2007)는 운전자의 머리에 가속도계를 달고 운전자까지 포함시켜 12개의 자유도로 모델링하여 해석하였으며, Fwa와 Liaw(1992)는 half-car 모델링을 사용하여 과속방지턱을 통과할 때의 속도에 따른 수직가속도를 분석하였다. Ardeh 등(2008)은 사람과 자동차를 6개의 자유도로 모델링하여 프로그램을 이용하여 분석하였고, Baslamisli(2009)는 자동차를 두 개의 자유도로 모델링하여 해석하였다.

우리나라의 연구로는 과속방지턱에 의한 소음 영향 및 수직가속도 분석과 과속방지턱에 대한 운전자 의식을 조사하였으며, 외국의 실험을 참고하여 과속방지턱의 실험방법을 구축하여 실험한 결과, 실험차종별로 실험속도가 증가함에 따라 수직가속도가 증가하는 비례관계를 확인하였다. 그리고 이에 따른 정성평가에서도 불쾌감과 안전운전에 미치는 영향에서는 속도와 비례적으로 증가하고 이에 대한 희망속도에서는 고속일수록 저속을 희망하는 반비례 관계를 확인하였다. 또한 3.6m×10cm의 제원이 가장 우수하다고 보고하였다(금기정, 1996, 1999). 국토해양부 도로안전시설설치 및 관리지침(2009)에서는 과속방지턱의 종류와 설치장소, 구조, 형상/제원, 재료 도색 및 시공 등에 대해서 종합적으로

규정하고 있다.

과속방지턱의 중요성에 비해 국내의 관련 연구는 다소 부족하다고 할 수 있다. 특히 과속방지턱 설치규격에 관해 이론적인 접근으로 검토하는 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 과속방지턱의 현장조사를 통해 기하구조 자료를 수집하여 현행 설치기준과 비교 분석하였으며, 차량과 운전자를 일체화시킨 단자유도 모델링 방법을 이용하여 충격하중에 의한 변위응답 스펙트럼을 구하여 과속방지턱에 대한 이론적 접근을 시도함으로써 과속방지턱의 설치와 운용에 기여하고자 연구를 수행하였다.

## 2. 현장 조사

국토해양부(2009)에서의 과속방지턱의 법적 시설기준에서는 도로 관리 기관에서 공공 시설물로서 과속방지턱을 설치할 경우에는 설치 길이 3.6m, 설치 높이 10cm의 규격을 적용하는 것이 타당한 것으로 되어있다. 단, 국지도로 중 폭 6m 미만의 소로 등에서 표준규격이 크다고 판단되는 경우에는 실험 결과에서 적용 가능한 것으로 분석된 설치 길이 2.0m, 설치 높이 7.5cm를 적용할 수 있게 되어 있다. 한편 단지 내 도로 등에서 민간 설치자가 차량의 주행속도를 10km/h 이하로 제한하고자 하는 경우에는 설치 길이 1.0m, 설치 높이 7.5cm의 범프를 사용할 수도 있는 것으로 제시되어 있다.

이러한 기준과 실제 적용되고 있는 과속방지턱의 크기를 비교 분석하기 위하여 지방부 75개의 과속방지턱 크기를 실측하여 결과를 그림 1에 나타내었다. 실측한 값을 보면 과속방지턱의 폭(B)은 약 2.1m에서 7.6m, 높이(H)는 약 4cm에서 18cm정도로 분포되어 있었다. 그림에서 이점쇄선(-·-)으로 표시된 것은 과속방지턱의 일반적인 기준이고, 이점쇄선(-··-)으로 표시된 것은 국지도로 중 폭 6m 미만의 소로 등에 적용되는 기준이다. 조사 결과를 토대로 봤을 때 설치기준 크기 부근에

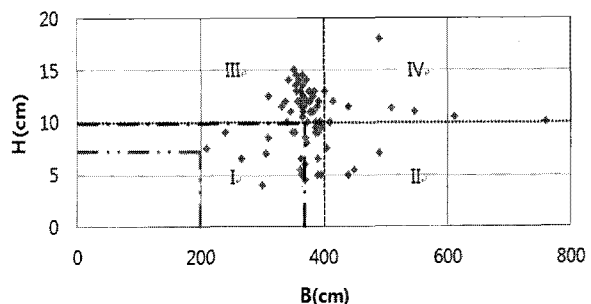


그림 1. 지방부 과속방지턱 크기

데이터가 어느 정도 집중되어 있는 양상을 보이고 있기는 하나 64개가 법적기준에 벗어나 상당한 비율의 과속방지턱은 법적 설치기준과는 차이를 보이는 것을 알 수 있었다.

실측한 과속방지턱 크기를 이용하여 이론적 해석을 수행할 때, 먼저 실제 측정한 값 중 높이와 폭이 최대, 최소를 가지는 과속방지턱에 대해 해석을 한 뒤, 그림 1에 나타난 것과 같이 법적 설치기준의 일반적인 기준을 바탕으로 도표를 I~IV 영역으로 나누고 각 영역의 대표값을 표 1과 같이 가정하여 이론적 해석을 수행하도록 하였다.

표 1. 영역별 대표값

영역	폭(m)	높이(cm)
I	3	7.5
II	4	7.5
III	3	12.5
IV	4	12.5

### 3. 이론적 해석 모델링

과속방지턱을 차량이 통과할 때의 동역학적 특성을 분석하기 위하여 그림 2와 같이 단자유도 시스템으로 모델링하고 자동차와 사람은 일체화된 것으로 가정하였다. 차량은 v의 등속도로 과속방지턱을 넘어가며 높이 H는 정적변위의 최대값이다. 과속방지턱 폭인 B와 속도 v의 관계는  $v=B/t_d$ 로 가정하였다. 여기서  $t_d$ 는 충격하중의 하중 재하시간이 된다. 과속방지턱은 다양한 형상이 있지만 그 중에서 많은 부분을 차지하고 있는 반정현형(반사이클 Sine 함수형) 과속방지턱으로 가정하여 해석하였다. 그림에서 m은 차량의 질량, k는 유효강성, c는 감쇠상수이다.

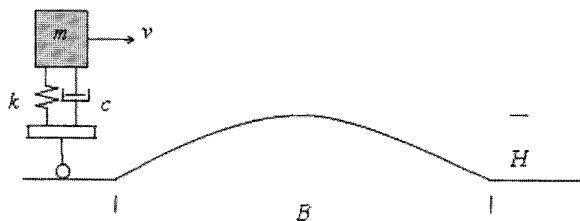


그림 2. 단자유도 시스템 모델링

자동차의 실제 재원을 토대로 해석 시 필요한 입력값을 구하기 위하여 자동차 제조사에 유효강성(k)과 감쇠비( $\xi$ ) 값에 대해 문의하였으나 유효강성은 2.0~2.9kgf/mm

정도지만 무게중심에 대한 스프링 위치에 따라 차이가 크며 부품이 변경될 때마다 다르게 적용되어 표준값이 정해져있지는 않았다. 감쇠비의 경우도 타이어의 상하방향 운동속도에 따라 계속 변화하는 값이 적용되나 일반적으로 0.25에서 0.4 정도의 값을 가지는 것을 알 수 있었다(장병주, 1995). 그리고 무게는 각 차종별로 다르기 때문에 본 연구에서는 국내 중소형 차량 중 다수가 판매된 A 차량(1191kg)을 기준으로 해석을 수행하였다.

단자유도 시스템에서 반정현형 충격하중에 의한 변위 응답을 구하면 강제진동(Forced Vibration) 단계에서 결정된 미분방정식의 해는 다음과 같다(Chopra, 2001).

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} (A \cos\omega_D t + B \sin\omega_D t) + C \sin\omega t + D \cos\omega t \quad (1)$$

또한 자유진동(Free Vibration) 단계에서 결정된 해는 다음과 같다.

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n(t-t_d)} \{ e^{-\xi\omega_n t_d} (A \cos\omega_D t_d + B \sin\omega_D t_d) - D \} \cos\omega_D(t-t_d) + \{ e^{-\xi\omega_n t_d} (-A \sin\omega_D t_d + B \cos\omega_D t_d) - \frac{\omega}{\omega_D} C - \xi \frac{\omega_n}{\omega_D} D \} \sin\omega_D(t-t_d) \quad (2)$$

$$\begin{cases} A = u(0) - D \\ B = \frac{u(0)}{\omega_D} + \xi \frac{\omega_n}{\omega_D} A - \frac{\omega}{\omega_D} C \\ C = \frac{P_0}{k} \frac{1 - (\omega/\omega_n)^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2} \\ D = -\frac{P_0}{k} \frac{-2\xi(\omega/\omega_n)}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2} \end{cases} \quad (3)$$

강제진동단계와 자유진동단계에서 각각의 응답에서 최대값을 분리해서 결정하고, 두 최대값 중 큰 쪽이 전체영역에서의 최대응답이 된다. 따라서 최대변위를 결정하기 위해서 식 (1)과 (2)를 미분하여 0이 되는 점들 중 최대변위발생 시각과 그 크기를 찾으면 된다. 우선 감쇠시스템에서의 해를 가지고  $\xi=0$ 을 대입하여 반정현형 충격하중에 대한 강제진동과 자유진동단계에서의 최대응답을 구하고 전체영역의 최대값을 구하면 그림 3과 4와 같은 충격스펙트럼이 된다. 그림 3은 강제진동과 자유진동 단계의 결과를 각각 보여주며 그림 4는 전체영역에서의 최대 응답을 보여준다. 그림에서  $T_n$ 은 고유진동주기이며 U는 변위를 나타낸다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 강제진동단계에서는 과속방지턱을 통과한 후 최대변위가 발생하며, 자유진동단계에서는 과속방지턱 내에서 최대변위가 발생한다.

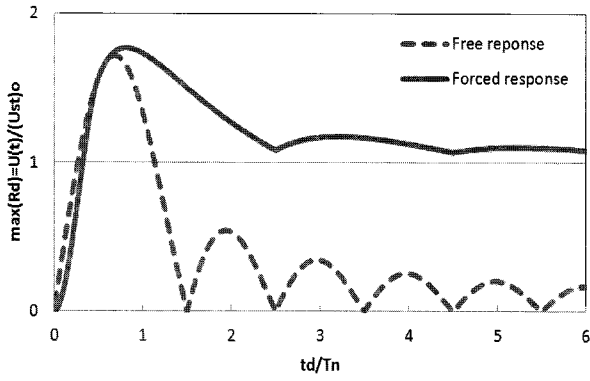


그림 3. 강제진동과 자유진동단계에서의 최대응답( $\xi=0.00$ )

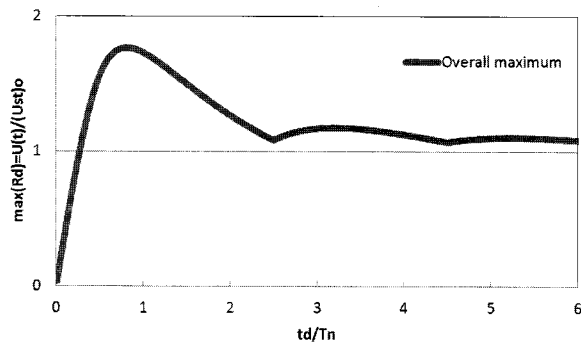


그림 4. 전체영역에서의 최대값( $\xi=0.00$ )

이와 같은 방식으로  $\xi=0, 0.01, 0.10, 0.20, 0.40$ 의 다섯 가지 경우의 충격스펙트럼을 구하면 그림 5와 같다. 감쇠비가 0.01일 때와 0.1일 때의 최대변위를 비교해 보면 각각 1.7426과 1.5425로 감쇠비가 10배 증가해도 최대변위는 단지 약 12%가 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 감쇠를 무시하고 무감쇠 시스템에 대한 결과를 이용하여도 큰 차이가 발생하지 않으며 오히려 설계측면에서는 최대변위가 크게 발생하므로 더욱 보수적인 측면을 나타낸다고 할 수 있다.

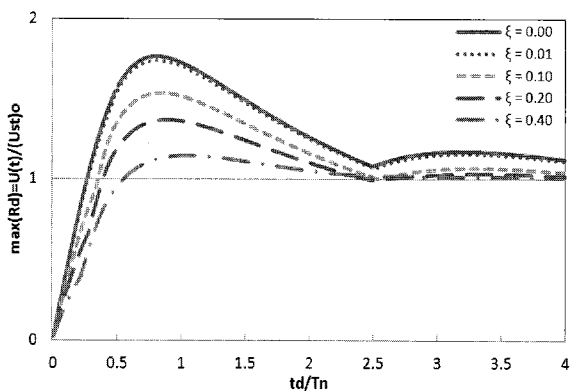


그림 5. 감쇠를 고려한 반정현형 충격하중에 대한 충격스펙트럼

## 4. 해석 결과

### 4.1. 최대응답을 이용한 분석

그림 6은 과속방지턱의 폭 및 속도 변화에 따른 충격스펙트럼을 보여준다. 과속방지턱의 폭이 커질수록 대체적으로 최대응답이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 속도가 빨라질수록 최대응답이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과가 나오는 것은 속도가 빨라질수록 자유진동단계가 아닌 강제진동단계에서 최대변위가 발생하기 때문이다. 그림에서 최대응답이 0.6554일 경우를 살펴보면 속도가 20km/h이고 과속방지턱의 폭이 2m일 때와 속도가 40km/h이고 폭이 4m일 때의 최대응답이 동일하므로, 궁극적으로는 폭과 속도의 비율이 같으면 최대응답도 유사한 것을 알 수 있다. 과속방지턱의 높이는 결과를 그림으로 나타내지는 않았으나 모델링에서 바로 알 수 있듯이 시스템에서 받는 충격하중의 수직방향의 최대변위이므로 높이가 크면 클수록 비례하여 최대응답이 크게 나타나게 된다.

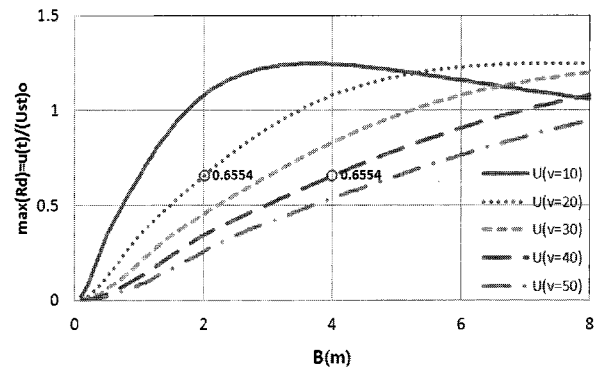


그림 6. 속도별 과속방지턱 폭 변화에 따른 충격스펙트럼

차량의 유효강성과 감쇠비의 변화에 대한 영향은 그림 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 유효강성이 증가하면 최대응답이 증가하는 것을 알 수 있으며 감쇠비가 증가하면 최대응답이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 차량의 서스펜션 스프링 강성이 커지면 동적 변위가 더욱 커져서 같은 크기의 과속방지턱을 통과하더라

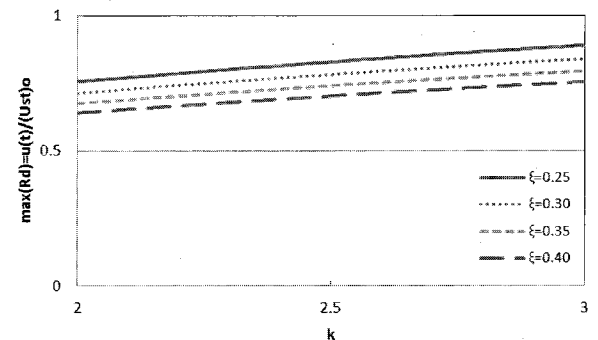


그림 7. 유효강성과 감쇠비 변화에 따른 충격스펙트럼

도 운전자는 더 큰 불편함을 느끼게 되는 것이다. 반대로 감쇠비가 커지면 동적변위가 작아져서 운전자가 느끼는 불편함이 감소하게 된다.

### 4.2. 최대변위를 이용한 분석

과속방지턱의 법적 설치기준의 일반적인 기준인 폭 3.6m와 높이 10cm인 경우와 그림 1에 나타난 실제 측정된 과속방지턱의 폭과 높이 각각의 최대, 최소 경우를 고려하여 최대변위를 분석하여 그림 8에 나타내었다. 기준보다 폭이나 높이가 클수록 최대변위가 크게 나오며 폭과 높이가 작을 경우엔 기준보다 최대변위가 작게 나오는 것을 알 수 있다.

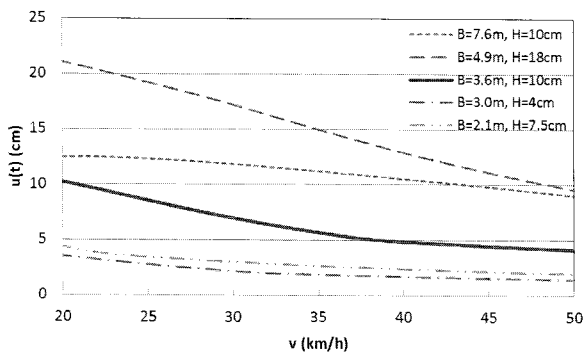


그림 8. 과속방지턱 크기에 대한 최대변위 ( $\xi=0.30, k=2.5\text{kgf/mm}$ )

과속방지턱의 크기를 설치기준 크기의 기준으로 4개로 나눈 표 1에서 보여주는 크기에 대해서도 분석을 실시하여 그림 9에 나타내었다. 과속방지턱의 폭이 넓고 높이가 높을수록 더 큰 최대변위가 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 같은 높이에서는 폭이 넓으면 최대변위가 크게 나타나며, 같은 폭에서는 높이가 높으면 최대변위가 더 크게 나타났다. 또한 I, II 영역에 비해 III, IV 영역의 최대변위가 큰 것으로 보아 과속방지턱의 폭 변화보다 높이의 변화가 최대변위에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그리고 이미 설명한 바와 같이 속도가 증가

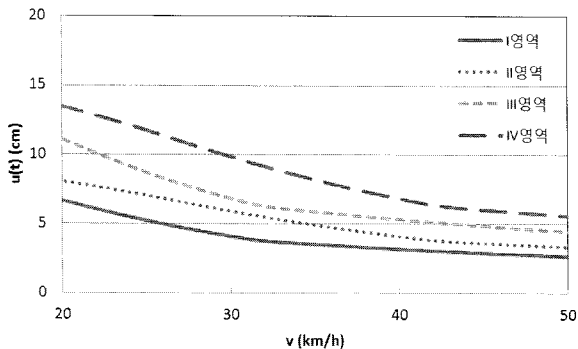


그림 9. 영역별 대표값에 대한 최대변위 ( $\xi=0.30, k=2.5\text{kgf/mm}$ )

하면 최대변위가 작아지는 것을 볼 수 있다.

### 4.3. 최대가속도를 이용한 분석

일반적으로 과속방지턱을 넘을 때 운전자가 느끼는 주행성은 최대변위 뿐만 아니라 수직방향의 가속도와 밀접한 관계가 있기 때문에 이에 대한 분석을 수행하였다. 그림 10은 실측한 과속방지턱의 폭과 높이 각각의 최대, 최소 경우에 대한 최대가속도를 분석한 결과이다. 우선 속도가 증가할수록 수직 최대가속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 높이가 같은 경우에는 폭이 커지면 최대가속도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 폭이 유사할 경우에는 높이가 높으면 최대가속도가 증가하게 된다. 또한 폭에 대한 높이의 비율이 커지면 최대가속도가 증가하며, 따라서 폭과 높이가 다르더라도 비율이 유사하면 최대가속도가 비슷해지는 것을 알 수 있다. 즉, 최대가속도는 과속방지턱의 폭과 높이의 비율에 영향을 받는다고 할 수 있다.

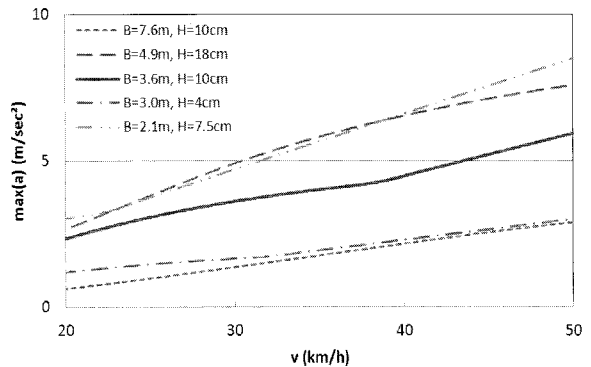


그림 10. 과속방지턱 크기에 대한 최대가속도 ( $\xi=0.30, k=2.5\text{kgf/mm}$ )

그림 11은 표 1에 나타난 영역의 대표값을 사용하여 해석을 수행한 결과이다. 그림에서와 같이 최대가속도는 II → I → 기준 → IV → III 영역 순으로 값이 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 이미 언급한 바와 같이 폭에 대한 높이의 비율(H/B)이 커질수록 최대가속도가 커지

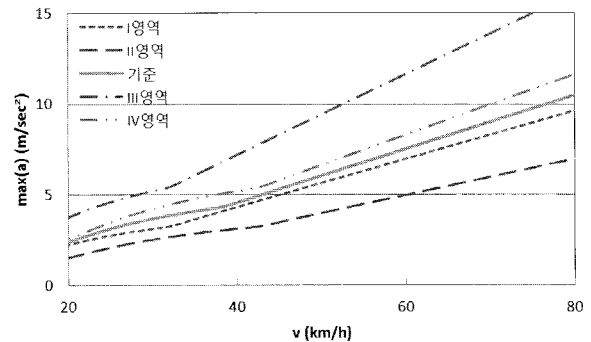


그림 11. 영역별 대표값에 대한 최대가속도 ( $\xi=0.30, k=2.5\text{kgf/mm}$ )

는 것을 의미한다. 따라서 과속방지턱은 절대적인 폭과 높이의 크기 뿐만 아니라 폭과 높이의 비율이 운전자의 심리적 부담감을 결정짓는 요인이라는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 과속방지턱에 대하여 이론적 방법으로 접근하여 과속방지턱의 설치규격 특성을 검토하는 목적으로 수행되었다. 이를 위해 지방부에 설치된 과속방지턱을 실측하여 크기를 비교·분석하였고, 이론적 해석을 통해 최대변위와 수직가속도를 구하여 과속방지턱의 설치규격을 분석하였다. 본 연구의 결과는 다소 단순화된 모델을 이용하더라도 과속방지턱에 대한 제원을 결정하는 이론적 기반을 마련할 수 있다는 것을 보여준다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 사람과 자동차를 일체화시킨 단자유도 시스템을 이용한 모델링으로 과속방지턱에 대한 분석을 수행하여도 최대변위, 수직 최대가속도 등의 기본 특성을 분석하는 데는 매우 효과적이었다.
2. 설치기준보다 과속방지턱의 폭이나 높이가 클 경우 최대응답, 최대변위 그리고 수직가속도가 모두 커지는 것을 확인하였고 과속방지턱의 폭과 높이는 차량의 속도, 무게, 유효강성, 감쇠비 보다 상대적으로 해석결과에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.
3. 실제로 측정된 과속방지턱의 경우 법적 설치기준을 어기고 무분별하게 설치된 것을 확인하였고 그 중 폭과 높이의 최대, 최소의 경우에 대해 해석하고 분석한 결과 기준 과속방지턱보다 폭이나 높이가 큰 것은 최대변위와 수직가속도가 커져 운전자 및 탑승자가 느끼는 승차감이 불안정하고 불쾌감을 증가시킬 수 있다는 것을 확인하였으며 따라서 법적 설치기준을 만족하도록 과속방지턱을 설치할 필요가 있다.
4. 과속방지턱이 갖는 기본적 성격상 수직가속도가 클 수록 주행속도 저감효과를 기대할 수 있으나 수직가속도 과다에 의한 과잉충격은 운전자의 부정적 인식과 차량손실이 우려되고 운전자 뿐만 아니라 탑승자가 느끼는 가속도에 대한 심리적 부담감도 커지기 때문에 과다한 수직가속도가 발생하지 않도록 과속방지턱을 설치하여야 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 경희대학교 연구년 지원에 의한 결과임.

## 참고 문헌

- 국토해양부 (2009). "도로안전시설 설치 및 관리지침", 국토해양부.
- 금기정 (1996). "과속방지턱의 설치효과 분석 및 수직가속도에 의한 개발 연구". *대한교통학회논문집*, 제14권 제4호, pp. 77-89.
- 금기정 (1999). "수직가속도에 의한 과속방지턱 설치기준에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제19권 제III-4호, pp. 541-551.
- 장병주 (1995). "신편 자동차공학", 동명사.
- Ardeh, H. A., Shariatpanahi, M, and Bahrami, M. N. (2008). "Multiobjective shape optimization of speed humps," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 37, No. 2, pp. 203-214.
- Baslamisli, S. C. (2009). "Optimization of speed control hump profiles," *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 135, No. 5, pp. 260-269.
- Chopra, A. K. (2001). *Dynamics of Structures, 2nd Ed., Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey.
- Fwa, T. F. and Liaw, C. Y. (1992). "Rational approach for geometric design of speed-control road humps," *Transportation Research Record*, No. 1356, pp. 66-72.
- Khorshid, E. and Alfares, M. (2004). "A numerical study on the optimal geometric design of speed control humps," *Engineering Optimization*, Vol. 36, No. 1, pp. 77-100.
- Khorshid, E. and Alfares, M. (2007). "Model refinement and experimental evaluation for optimal design of speed humps," *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, Vol. 2, No. 1, pp. 80-99.
- Maemori, K. and Ando, S. (1987). "Alternate optimization of speed control hump for automobiles and automobile suspension," *JSME International Journal, Series C*, Vol. 40, No. 1, pp. 17-24.
- Pedersen, N. L. (1998). "Shape optimization of a vehicle speed control bump," *Mechanics of Structures and Machines*, Vol. 26, pp. 319-342.
- Smith, D. T. and Appleyard, D. (1981). "Improving the residential street environment-Final Report," FHWA/RD-81/031.
- Watts, G. R. (1973). "Road humps for control of vehicle speeds," TRRL Laboratory Report LR 597.
- Watts, G. R. (1990). "Traffic induced vibrations in buildings," TRRL Research Report 246.
- Watts, G. R. (1992). "The generation and propagation of vibrations in various soils produced by the dynamic loading of road pavement," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 156, No. 2, pp. 191-206.
- Watts, G. R. and Krylov, V. V. (2000). "Ground-borne vibration generated by vehicles crossing road humps and speed control cushions," *Applied Acoustics*, vol. 59, No. 3, pp. 221-236.

접 수 일 : 2011. 3. 31

심 사 일 : 2011. 4. 1

심사완료일 : 2011. 5. 20