

주차장 구조물 슬래브의 차량하중영향에 관한 연구

Vehicle Load Effects on Slab of Parking Garage Structure

곽 호 경* · 송 종 영**

Kwak, Hyo-Gyoung Song, Jong-Young

Abstract

The equivalent vehicle load factors which can consider the concentrated wheel load effect in slab design of parking garage structure are proposed. Based on the standard vehicle with total weight of 2.4 ton which is designed through the investigation of small to medium vehicle produced in Korea and the review of numerous foreign design codes for parking garage structure, the effects of moving vehicle loads on slab are analyzed using the finite element method. Besides, the relationships between the equivalent load factors and the sectional dimensions are established by regression analysis. The calculation of design forces can be easily accomplished without taking sophisticated numerical analysis for the moving vehicle load as the results obtained to the distributed load are multiplied by the proposed load factors in practice.

1. 서 론

오늘날 경제발전과 생활 수준의 향상에 따른 자동차 수요의 기하급수적인 증가로 인하여 주차장 관련 구조물의 건설이 활발히 이루어지고 있으나 알려진 바와 같이 주차장 관련 구조물은 구조체의 균열을 포함한 많은 구조적 결함을 내포하고 있어 이를 보수, 보강하는데 적지 않은 경제적 손실이 따르고 있는 실정이다. 이러한 주차장 구조물의 하자 발생 요인은 시공 측면에서 볼 때 콘크리트 타설 중 상부 주철근의 침하와 시공중 과적작업차량의 빈번한 통행 및 동바리와 거푸집의 조기제거 등 구조적인 결함을 유발시키는 요인이 상당수 내포되어 있으며 설계 측면에서는 기본 설계 단계에서부터 작용하는 활하중이 차량하중이라는 하중의 특수성을 합리적으로 반영하지 않고 일반 건축 구조물과 동일한 기준⁽²⁾에 따라 규정된 등분포하중에 대해서 설계하기 때문이다. 특히 차량하중이 작용하는 경우는 구조 부재의 종류, 부재 길이, 설계 부재력의 종류 등 여러 요인에 따라서 등분포하중과 매우 다른 거동을 나타내는데 이러한 등분포하중과 다른 차량하중의 특성은 크게 차륜(wheels)에 의한 집중하중 효과⁽¹⁰⁾와 차량의 이동에 따른 동적하중 효과로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 주차장 구조물의 슬래브 부재에서 이러한 차량하중의

* 한국과학기술원 토목공학과 조교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

집중하중에 의한 영향을 현 설계기준의 등분포하중($w=500kg/m^2$)이 작용하는 경우와 비교, 검토하여 이를 바탕으로 주차장 구조물에 작용하는 실제하중인, 차량하중에 대한 합리적인 설계 활하중 부재력을 산정할 수 있는 관계식을 회귀분석을 통해 제시하고자 한다. 또한 차량하중의 작용에 의해 발생하는 부재력을 복잡한 차량하중에 대한 구조해석을 수행하지 않고 현 설계방법에 의해 계산된 부재력으로부터 손쉽게 구할 수 있도록 등가차량하중계수 개념을 제안하고자 한다.

2. 설계기준차량의 설정

통상적으로 주차장 구조물의 평면을 계획하는 경우 중, 소형 차량 한 대가 차지하는 면적($2.3m \times 5.0m$)을 기준으로 주행공간(roadway area)과 주차공간(parking area) 등이 설정되지만 설계 부재력을 산정함에 있어 차륜(wheels)에 의한 집중하중의 영향평가를 위한 기준차량은 설정되어 있지 않은 실정이다. 우리나라의 경우 현재 일반 대형차량을 기준으로 하는 도로교통표준시방서⁽³⁾에는 도로교에 적용할 기준차량에 대한 제원을 명시하고 있으나 이 기준차량을 한계하중이 2.4 ton인 일반 승용차를 전용으로 하는 주차장 구조물에 적용시키기에는 너무 과다하므로 주차장 구조물에 타당한 기준차량의 재원을 중, 소형 차량을 기준으로 설정할 필요성이 있다. 본 연구에서는 국내에서 생산되는 승용차 및 소형 트럭의 조사를 통하여 주차장 구조물의 차륜하중에 의한 구조제산에 적용할 설계기준차량을 표 1과 같이 설정하였다. 설계기준차량은 접지면적이 $0.04 m^2$ ($0.2m \times 0.2m$)인 차륜을 통하여 구조물에 전달되는데 이 때 전륜과 후륜이 각각 1:2의 비율로 차량 총중량을 분담한다고 설정하였다. 이는 각국의 설계규준 가운데 최소형 설계차량(총중량 3.0 ton기준)을 규정하고 있는 DIN 1072규준⁽⁸⁾의 전륜과 후륜의 하중 분담률을 참고로 한 것이다.

표 1 설계기준차량

총 중 량	2.4 TON
전폭(TW)	2.5 m
전장(TL)	5.0 m
윤거(W)	1.5 m
축거(L2)	2.5 m
후륜 하중	0.8 TON
전륜 하중	0.4 TON

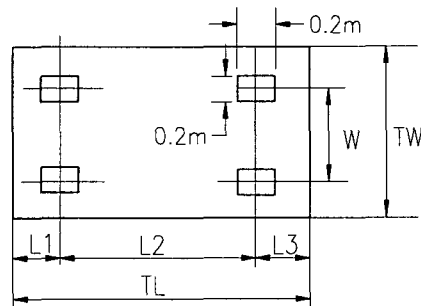


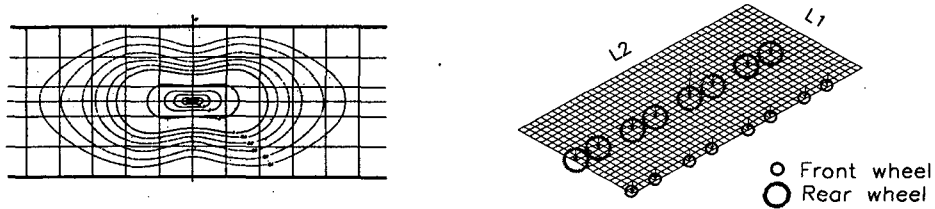
그림 1 설계기준차량의 제원

3. 차량하중에 따른 거동분석

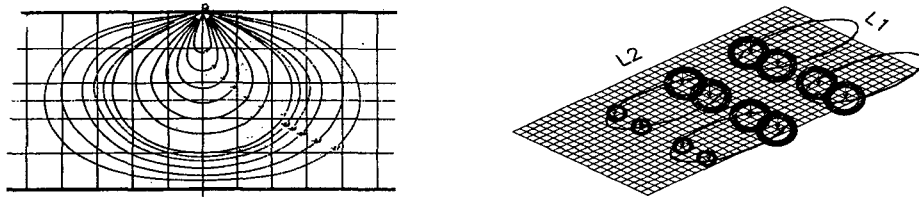
3.1 집중하중의 영향

차량하중은 등분포하중과는 달리 이동하중으로서 작용하는 위치에 따라 발생하는 부재력도 달라지게 된다. 따라서 임의의 일차원 부재에 최대 부재력을 유발시키는 활하중의 위치를 결정할 필요가 있으며 이 경우 영향선의 개념을 사용하게 된다. 주차장 슬래브 구조체는 일차원 부재와 달리 두 방향의 강성에 따라 하중을 분할하여 분담하는 관계로 본 연구에서는 영향선의 이차원적인 확장이라고 할 수 있는 영향면의 개념을 사용하여 슬래브에 최대 부재력을 일으키는 차량하중의 위치를 결정하였다. 본 연구에서 주차장 구조물의 바닥판 규격을 실제 많이 사용되어지는 규격을 중심으로 단변의 길이를 2m 에서 8m 까지 변화시키고, 각각 단변(L1)대 장변(L2) 비를 정방형

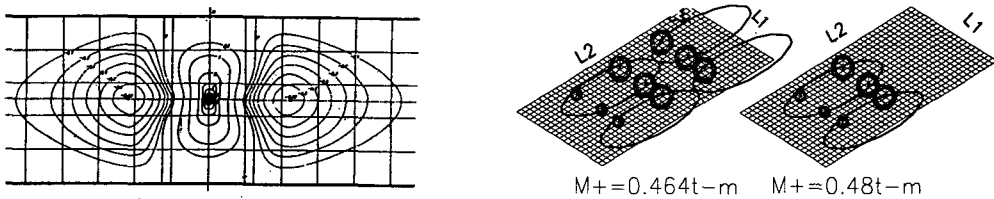
인 1:1 에서 이방향(2-ways) 슬래브의 상한선인 1:2 까지 바꾸면서 영향면⁽⁶⁾을 이용하여 설계 기준 차량하중을 적용시켰다. 이 때 슬래브 바닥판은 축력과 휨을 모두 받는 shell 요소로 모델링하였다. 그림 2(a)의 단변방향 중앙부 정모멘트에 대한 영향면을 살펴보면 슬래브의 중앙에 작용하는 하중의 영향이 가장 크고, 슬래브 단변의 지지점 가까이에 작용하는 하중의 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 영향면을 이용한 차량하중의 적용은 가장 영향이 큰 슬래브 중앙점에 하중의 크기가 큰 후륜을 그림 2와 같이 먼저 위치시킨 다음 앞 절에서 결정한 설계기준차량의 차륜간격, 차량간의 거리, 차축 거리 등 차량의 제원에 따라 재하 가능한 차량을 슬래브 위에 재하시키게 된다. 장변방향 부모멘트의 경우 그림 2(d)와 같이 한쪽 슬래브 위에 작용하는 하중의 영향은 전체 부재력에 1%정도 밖에 되지 않아 거의 무시할만하나 본 연구에서는 재하 가능한 모든 차량을 재하시켜 부재력을 산정하였다. 또한 장변방향 중앙부 정모멘트일 때는 하중의 작용이 오히려 부재력을 감소시키는 효과(Relieving Effect)를 일으키는 영역이 존재하여 그림 2(c)와 같이 슬래브 위에 4대의 차량이 작용하는 경우보다 부재력을 증가시키는 효과(Adversing Effect)를 일으키는 영역에만 차량이 작용하는 경우 더 큰 부재력이 발생한다.



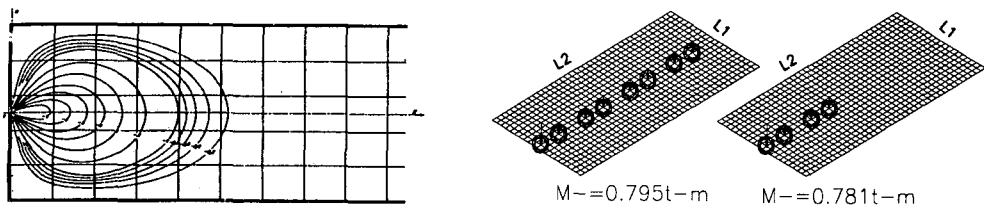
(a) 단변방향 중앙부 정모멘트



(b) 단변방향 지점부 부모멘트



(c) 장변방향 중앙부 정모멘트



(d) 장변방향 지점부 부모멘트

그림 2 영향면을 이용한 차량하중재하

3.2 부재력 산정

앞 절에서 정의된 차량하중의 적용을 통해 슬래브 크기의 변화에 따른 단변방향 중앙부 정모멘트를 나타내면 그림 3과 같다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 단변 길이가 증가할수록 부재력의 변화폭이 등분포하중이 작용하는 경우는 큰 데 반해 차량하중이 작용하는 경우는 많은 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

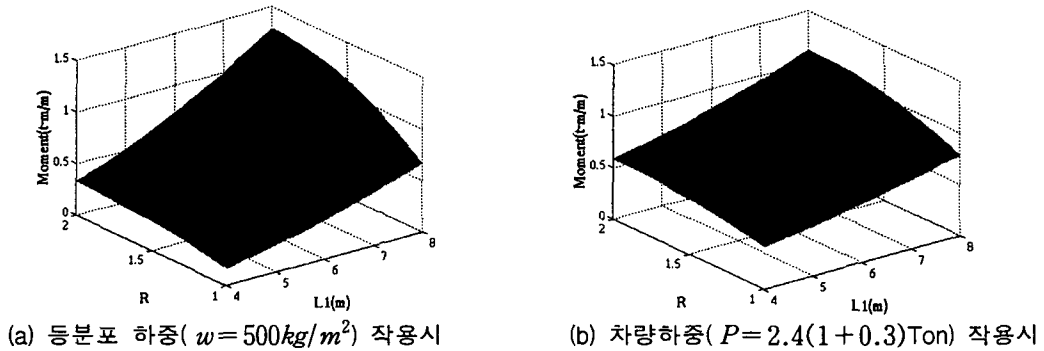
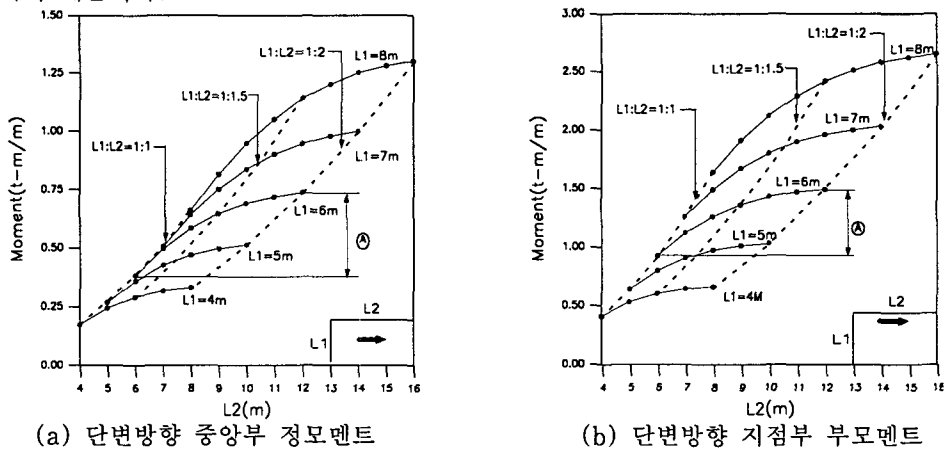
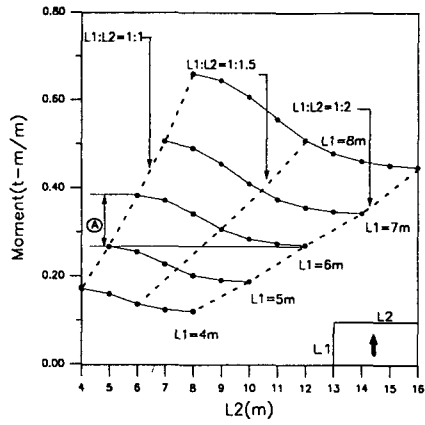


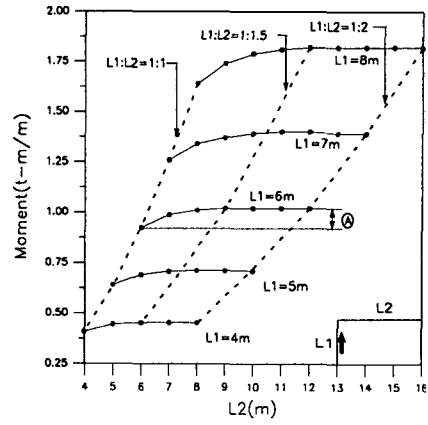
그림 3 단변방향 중앙부 정모멘트의 비교

설계규준에서 정의하고 있는 주차장 구조물 설계시 고려하는 등분포 활하중 500kg/m^2 이 작용하는 경우와 충격을 고려한 설계기준차량이 작용하는 경우의 슬래브 부재력을 살펴보면 슬래브 위에 작용하는 하중을 주로 부담하는 단변방향의 정모멘트와 부모멘트는 슬래브가 정방향 ($L1:L2=1:1$)에서 장방향($L1:L2=1:2$) 슬래브로 변할 때 부재력도 증가하나 장변방향의 정모멘트와 부모멘트는 감소하여 그림 4, 5의 (c), (d)와 같이 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 등분포하중과 집중하중의 영향을 비교하면 등분포하중이 작용하는 경우 슬래브의 길이가 길어질수록 부재력의 증가하는 폭(그림 4의 ㉠)이 차량하중이 작용하는 경우(그림 5의 ㉡)보다 큼을 알 수 있다. 그림 6(a)의 단변방향 정모멘트에 대한 경우를 살펴보면 슬래브의 단변길이가 4m, 6m일 때는 차량하중에 의한 부재력이 크지만 8m인 경우에는 등분포하중에 의한 부재력이 더 커지게 된다. 장변방향 정모멘트의 경우에 차량하중에 의한 부재력이 등분포하중에 의한 부재력보다 항상 더 크게 나타나게 되는데 이는 영향면에서 볼 수 있듯이 영향면상에서 증거값이 큰 영역이 이 경우에 가장 좁게 분포하므로 차량하중의 경우, 차량 총중량의 2/3를 부담하는 후륜하중(rear wheel) 하나가 항상 이 영역에 작용하게 되어 등분포하중보다 큰 부재력을 일으키게 되기 때문이다.



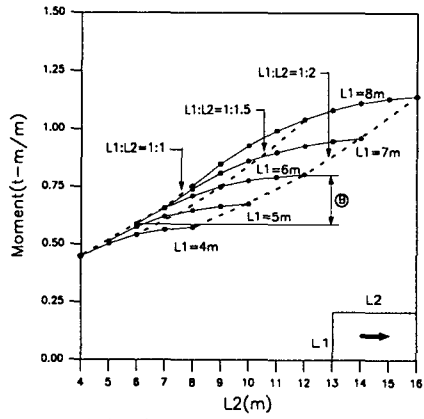


(c) 장변방향 중앙부 정모멘트

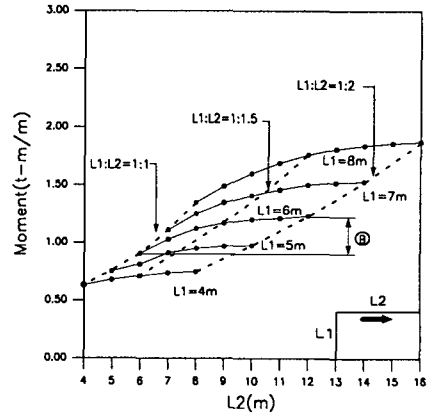


(d) 장변방향 지점부 부모멘트

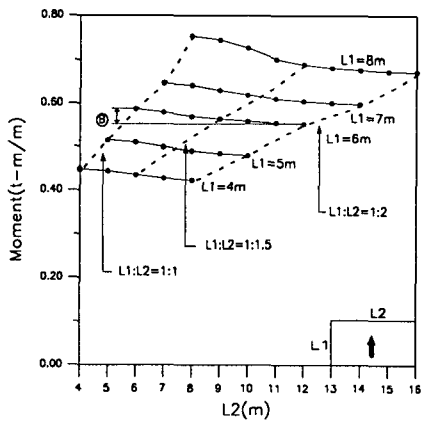
그림 4 등분포하중 작용시 부재력



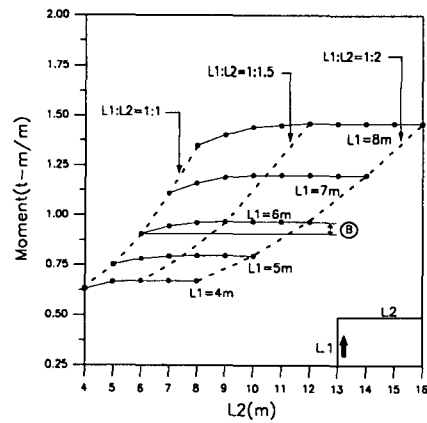
(a) 단변방향 중앙부 정모멘트



(b) 단변방향 지점부 부모멘트



(c) 장변방향 중앙부 정모멘트



(d) 장변방향 지점부 부모멘트

그림 5 차랑하중 작용시 부재력

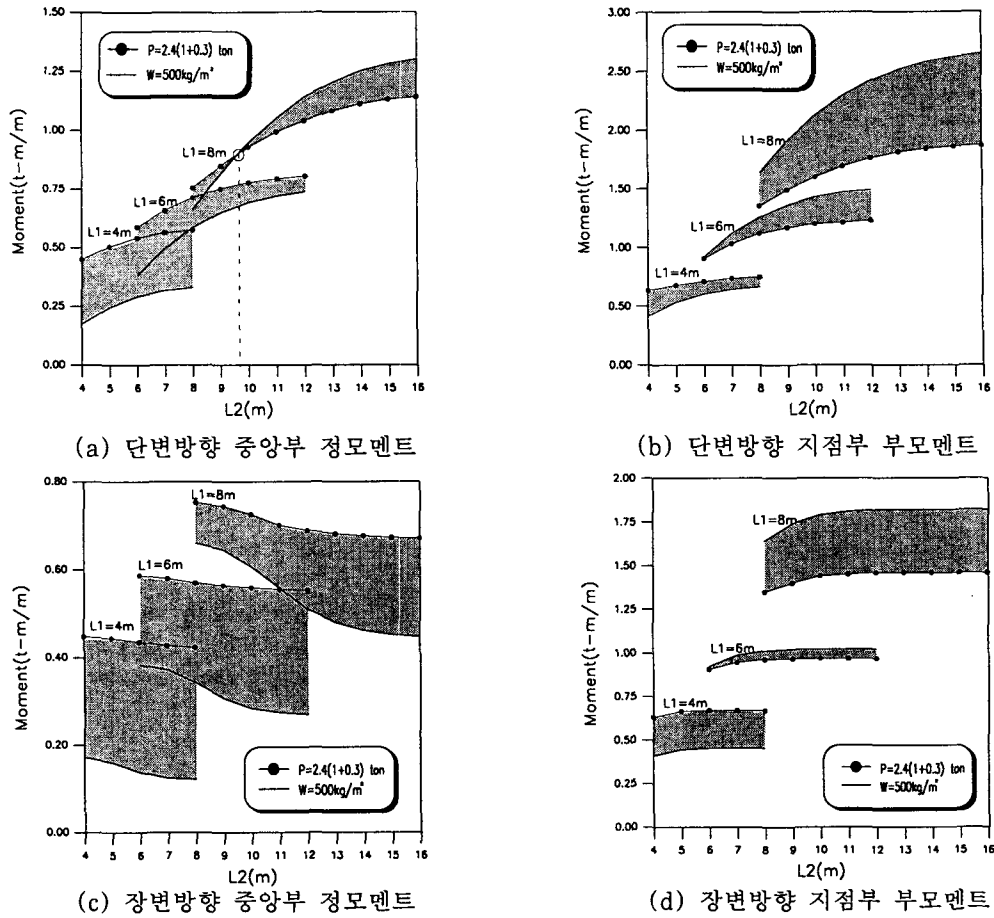


그림 6 등분포하중과 차량하중 부재력 비교

4. 등가차량하중계수의 결정

기존의 설계방법에 의해 계산된 부재력에 차량하중의 집중하중효과를 반영하는 계수를 곱하여 줌으로써 간단하게 차량하중의 영향을 고려할 수 있도록 도모하기 위하여 등가차량하중계수 F 를 네가지 경우의 부재력에 대하여 각각 산정하였다. 등가차량하중계수는 등분포하중이 작용할 때 발생하는 부재력에 대한 설계기준차량하중이 작용할 때의 부재력의 비를 의미하는 것으로 만약 등가차량하중계수가 1이라면 현 설계기준대로 등분포하중을 작용시켜 구한 부재력과 차량하중이 작용할 때 발생하는 부재력이 같다는 것을 의미한다.

$$F = \frac{M_p}{M_w} \quad (1)$$

여기서 F 는 등가차량하중계수를, M_p 는 충격을 고려한 차량하중 2.4 ton이 작용할 때의 부재력을, M_w 는 설계 등분포하중 500kg/m^2 이 작용할 때의 부재력을 각각 의미한다.

등가차량하중계수는 그림 7에서 보는 바와 같이 슬래브 단변의 길이에 반비례하며 단변 대 장변의 비가 증가할수록 장변방향 중앙부를 제외하고 값이 점점 작아진다. 정모멘트는 슬래브 단변 길이가 10m보다 작을 때 1보다 큰 값을 갖지만 부모멘트의 경우에는 이보다 작은 슬래브 단변 길이가 6m보다 작을 때 1보다 큰 값을 갖는다. 또한 등가차량하중계수는 임의의 단변길이에 대

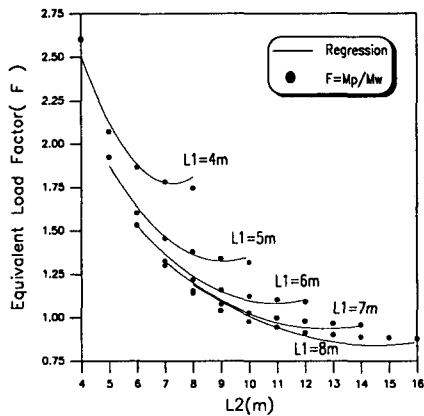
해 이차함수의 형태를 나타내므로 장변 대 단변의 비(R)의 이차함수로 모델링하였으며 단변의 길이(L)가 증가함에 따라 각각의 이차함수가 지수함수 형태로 감소하므로 식 (2)와 같이 두 함수를 곱한 관계식으로 나타내었다

$$F = (aL^b + c) \times (AR^2 + BR + C) \quad (2)$$

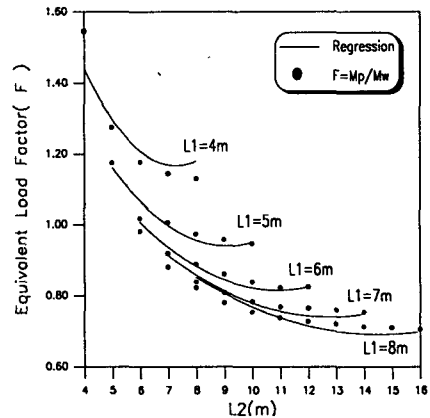
여기서 L은 슬래브의 단변길이(L1)를, R은 장변 대 단변의 비(L2/L1)를 a, b, c, A, B, C는 회귀분석을 통해 결정된 비례상수이다.

표 2 슬래브의 등가차량하중계수 (F)

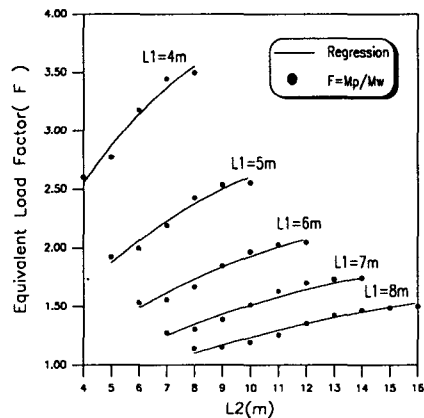
CASE	$F = F_1 \times F_2 = (aL^b + c) \times (AR^2 + BR + C)$		
	$F_1(L) = aL^b + c$	$F_2(R) = AR^2 + BR + C$	r^2
단변 중앙부 정모멘트	$3.662L^{-2.009} + 0.097$	$3.4063R^2 - 12.38R + 16.72$	0.990
단변 지점부 부모멘트	$3.22L^{-1.939} + 0.1774$	$1.026R^2 - 3.733R + 6.34$	0.978
장변 중앙부 정모멘트	$1.83L^{-1.857} + 0.0378$	$-2.08R^2 + 11.89R + 4.60$	0.995
장변 지점부 부모멘트	$4.44L^{-2.606} + 0.0976$	$0.530R^2 - 1.803R + 8.325$	0.999



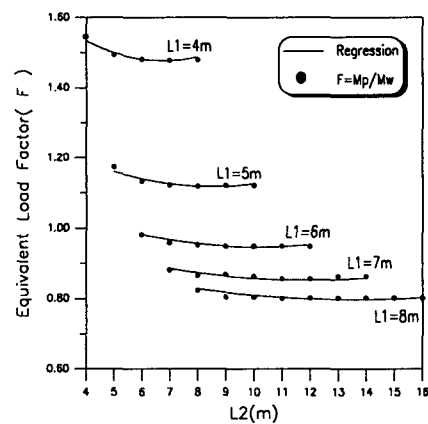
(a) 단변방향 중앙부 정모멘트



(b) 단변방향 지점부 부모멘트



(c) 장변방향 중앙부 정모멘트



(d) 장변방향 지점부 부모멘트

그림 7 등가차량하중계수

주차장 슬래브의 설계시 차량하중의 고려는 현 설계방법대로 등분포하중 $500\text{kg}/\text{m}^2$ 을 작용시켜 산정한 슬래브의 부재력에 제시한 등가차량하중계수 F 를 곱하여 줌으로써 이루어진다.

$$M_i(\text{design}) = F_i \times M_i(500) \quad (3)$$

여기서 $M_i(\text{design})$ 은 i 경우(case)의 설계모멘트를, $M_i(500)$ 은 등분포하중 $500\text{kg}/\text{m}^2$ 이 작용할 때 i 경우의 부재력을, F_i 는 $\frac{W_{eqi}}{500}$ 로써 i 경우의 등가차량하중계수를 각각 의미한다.

5. 결 론

주차장 구조물에 작용하는 주된 하중은 차량하중임에도 불구하고 지금까지 대부분의 주차장 구조물은 일반 건축 구조물과 동일하게 등분포하중에 대해서만 설계, 시공되어 오고있다. 그러나 차량하중은 등분포하중에 비해 전체 하중의 크기는 작을지라도 좁은 면적의 차륜을 통해서 구조물에 전달되는 집중하중의 영향을 나타내어 부분적으로 등분포하중 보다 더 큰 부재력을 유발시키므로 등분포하중에 대해서만 설계한다면 상대적으로 취약한 부분이 발생하게 된다. 본 연구에서는 설계단계에서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 영향면을 이용한 유한요소해석을 수행하여 차량하중의 영향을 현 설계등분포하중과 비교하였고 이를 토대로 차량하중을 고려하는 합리적인 설계활하중 부재력의 산정을 위한 슬래브의 등가차량하중계수를 제시하였다. 나아가 차량하중에 대한 복잡한 구조해석을 수행하지 않고 단지 현 설계방법에 의해 계산된 부재력에 등가차량하중계수를 곱하여 줌으로써 실무에서 차량하중에 의한 설계 활하중 모멘트를 쉽게 산정할 수 있도록 도모하였다.

6. 참 고 문 헌

1. 김 경호, "주차장 계획과 설계", 건축문화, 1994.
2. 건설부령 제505호, "건축물의 구조기준 등에 관한 규칙", 1992.
3. 건설부, "도로교 표준시방서", 1995.
4. 윤정방, 박효경, 현장재하시험을 통한 PC 지하 주차장 구조물의 거동분석연구, 1997.
5. AASHTO, *Standard specification for highway bridges.*, Washington, D.C., 1989.
6. Adolf Pucher, *Influence Surface of Elastic Plates*, New York, 1977.
7. E.L. Wilson and Habibullah, *SAP90 Structural Analysis Program*, Computers & Structures, California, 1992.
8. DIN 1072, Standard imposed loads assigned to the revised bridge.
9. IMSL Library, "User's Manual, Fortran Subroutines for Mathematics and Statics" Volume 1 to 4, IMSL Inc., Houston, 1982.
10. John F. Stanton, "Point Loads on Precast Concrete Floors". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 11, 1982, pp. 2619-2637.
11. John E. Akin and Massood Mofid, "Numerical Solution For Response of Beams with Moving Mass", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 1, 1989, pp. 120-131.
12. Mahil J. Inbanathan and Martin Wieland, "Bridge Vibrations due to Vehicle Moving over Rough Surface", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 113, No. 9, 1987, pp. 1994-2008.
13. UBC, *Uniform Building Code*, 1991.