

작은 보를 가진 지하 주차장 슬래브의 이동 하중 적용을 통한 안전성 평가 사례

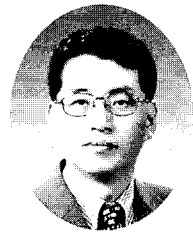
- An Example of Safety Evaluation of Underground Parking
Slabs with Beams through Application of Moving Loads -



송동엽*



박흥신**



김승덕***

1. 서 론

고도 산업사회의 발달로 인하여 도시 인구와 차량이 급격하게 증가하였고, 이를 수용하기 위하여 건축물은 대형화 혹은 고층화되면서 지하 주차 시설의 대형화는 불가피하게 되었다. 그러나, 갑작스런 건축 기술의 향상은 양적인 면에서는 대형 주차 시설의 시공을 가능하게 하였지만, 질적인 면에서 살펴보면 지하에 건설되는 주차장 구조물은 정적으로 해석하여 설계하고 있어 주차 공간에서의 차륜에 의해 전달되는 집중 하중 효과, 주행 공간에서의 이동 하중에 의한 구조물의 동적 과도 응답 효과, 외벽에 작용되는 토·수압에 의한 슬래브의 면내 하중, 그리고 작은 보 처짐의 과소 평가 등으로 사용성은 물론이고 안전성에도 심각한 문제를 내포하고 있는 곳이 많은 것으로 알려져 있다.

따라서, 본고에서는 이들 문제를 해결하기 위하여 설계기준 차량을 설정하여 주차 공간의 집중 하중 효과, 주행 공간의 이동 하중 효과 및 작은 보의 처짐 영향을 고려하여 지하 주차장 구조물의 안전성을 평가함으로써 신뢰성을 확보할 수 있는 적절한 구조 해석 및 검토 방법을 강구하도록 하였다.

2. 설계기준 차량

현재 교량에 적용하고 있는 도로교표준시방서에서는 차량(주 대상은 중 차량으로서 트럭)에 의한 활 하중 설계 및 부재력을 계산하기 위하여 교량의 등급에 따라 총 중량, 축간 거리, 윤거, 각 차륜의 하중 분담률 등 설계 차량 하중의 제원을 상세히 명시해 놓고 있다. 그러나, 건축 구조물의 주차장 구조물 설계시에 적용할 설계 하중 기준이 없는 실정이며, 건축물의 주차장을 이용하고 있는 차량은 승용차이므로 도로교표준시방서의 기준을 적용하기에는 적합하지 못하므로 주차장 구조물에서 차량 하중의 영향을 평가하기 위해서는 주차장 구조물에 적합한 설계기준 차량을 설정할

* 시설안전기술공단 건축실 차장

** 정회원, 시설안전기술공단 건축실 실장

*** 정회원, 세명대학교 건축공학과 조교수

표 1. 조사 대상 차종 제원

차종	축거 (mm)	전윤거 (mm)	후윤거 (mm)	공차중량 (kgf)	배기량 (cc)	전장 (mm)	전폭 (mm)	전고 (mm)
1	2345	1405	1385	880	1323	3922	1605	1460
2	2560	1465	1455	1080	1498	4430	1700	1410
3	2665	1505	1510	1255	1793	4745	1780	1400
4	2710	1445	1460	1465	1998	4955	1725	1430
5	2850	1525	1545	1700	3605	5020	1810	1435
6	2400	1420	1410	955	1341	4115	1620	1395
7	2550	1465	1450	1164	1495	4420	1700	1395
8	2700	1515	1505	1283	1836	4700	1770	1405
9	2700	1515	1505	1367	1997	4770	1770	1405
10	2745	1540	1550	1651	2497	4980	1810	1445
11	2520	1405	1425	1095	1498	4240	1680	1430
12	2570	1466	1450	1245	1498	4514	1700	1432
13	2670	1515	1500	1315	1799	4671	1779	1437
14	2670	1435	1412	1340	1998	4890	1720	1417
15	2910	1550	1540	1580	3206	4950	1810	1405
16	2900	1550	1540	2045	3199	5055	1825	1465
표본평균	2654.1	1482.6	1477.6	1338.8	2036.3	4648.6	1737.8	1422.9
표본표준편차	160.3	50.6	53.7	298.4	716.8	344.6	67.5	22.2
최소값	2575.5	1457.8	1451.3	1192.5	1685.1	4479.7	1704.7	1412.0
최대값	2732.6	1507.3	1503.9	1485.0	2387.6	4817.4	1770.8	1433.8

중 하중과 비록 저속이지만 주행 구간의 동적 효과를 가지는 이동 하중이다. 이들은 설계 대상 차량의 크기, 슬래브의 두께를 포함한 구조 부재의 강성, 평면 구성 등 동적인 거동을 지배하고 있는 영향 인자가 교량 구조물과 크게 다르므로 도로교표준시방서에서 제시된 충격 계수를 주차장 구조물에 그대로 적용하는 데에는 문제가 있다. 즉, 교량 구조물의 경우 충격 계수는 노면 상태, 차량 속도, 지간 길이, 고정 하

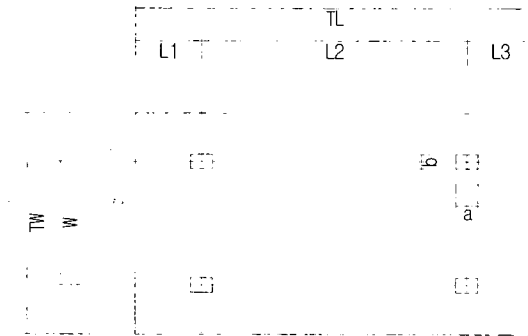


그림 1. 설계기준 차량 제원

필요성이 있다. 따라서, 본고에서는 국내 3개 사에서 생산되는 승용자동차 중 일반형 승용자동차 16개 차종에 대한 제원(〈표 1〉 참조)을 조사하여 설계기준 차량을 〈그림 1〉 및 〈표 2〉와 같이 설정하였다.

3. 차량 이동 하중

3.1 개요

건축물의 지하 주차장 구조물에서 고려하여야 할 차량 하중의 특징은 전술한 바와 같이 주차 구간의 집

표 2. 설계기준 차량의 치수 및 비교

제원	치수	참고문헌(3)	참고문헌(1)	참고문헌(5)
총 중량	1.8 tf		2.4 tf	
전폭(TW)	1.8 m	1.7 m	2.5 m	1.7 m
전장(TL)	4.8 m	4.7 m	5.0 m	4.7 m
전고(H)	1.4 m			
윤거(W)	1.5 m		1.5 m	1.3 m
앞오우버행(L1)	0.9 m	0.8 m		
축거(L2)	2.7 m	2.7 m	2.5 m	2.7 m
뒤오우버행(L3)	1.2 m	1.2 m		
전륜 하중(1개)	0.45 tf		0.4 tf	
후륜 하중(1개)	0.45 tf		0.8 tf	
전·후륜 폭(b)	0.125 m	0.125 m		
전·후륜 접지 길이(a)	0.2 m	0.2 m		

중과 활 하중의 비, 구조 특성 등에 따라 다르게 되나, 1방향 슬래브의 경우 대부분 교량을 기준으로 설정된 경간의 함수로서 경간이 10m 이하인 경우에는 충격 계수가 1.3으로서 항상 최대값을 갖게 되는데, 이를 지하 주차장 구조물에 그대로 적용하게 되면 대부분 경간이 10m 이하인 지하 주차장 구조물에서는

항상 최대치가 되어야 한다는 모순이 따른다(보통 차량 하중의 설계시 충격 계수를 1.3으로 사용함).

따라서, 건축물의 지하 주차장 구조물에 적용할 수 있는 동적 특성에 관한 연구가 필요하며, 이를 위해서는 이론적 연구와 함께 수많은 동적 특성 실험 및 주행 실험 연구가 병행되어야 하는데 본고에서는 1차적으로 차량 역학에 근거하여 이론적인 접근을 시도하였다.

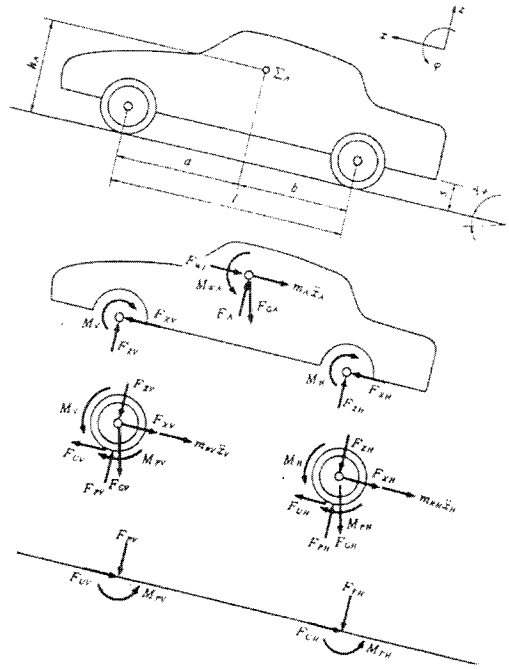


그림 2. 차량 중 역학 모델

3.2 자동차에 작용하는 힘과 운동

차량 역학에는 자동차 차체 중심의 전후 방향, 좌우 방향, 상하 방향의 3가지 작용력에 의한 직선 운동과 각 방향의 좌표 축 주위의 3가지 모멘트, 즉 롤링(Rolling), 피칭(Pitching), 요잉(Yawing)에 의한 회전 운동으로 6자유도가 있다. 본고에서는 이들 중에서 차량의 구동성, 제동성 및 안전성과 관계가 있는 전후 방향 운동인 중 역학에 대한 특성을 파악하여 이 동 하중을 설정하였다.

3.3 차량 중 역학 운동 방정식

평면상에서 2축(앞·뒤축)을 갖는 차량의 운동 방정식을 수립하기 위하여 차량을 자유 물체인 세 부분(차체, 앞축, 뒤축)으로 나누어 직선 운동과 회전 운동을 적용하여 운동 방정식을 수립할 수 있다.

· 차 체:

$$m_A \ddot{x}_A = F_{XV} + F_{XH} - F_{WL} - F_{GA} \sin \gamma_{st} \quad (1)$$

$$m_A \ddot{z}_A = F_{ZV} + F_{ZH} + F_A - F_{GA} \cos \gamma_{st} = 0 \quad (2)$$

$$\theta_A \ddot{\varphi}_A = F_{ZH} b - (M_V + M_H) - F_{ZV} a - (h_A - s)(F_{XV} + F_{XH}) + M_{WA} = 0 \quad (3)$$

· 앞바퀴:

$$m_{RV} \ddot{x}_V = F_{UV} - F_{XV} - F_{GV} \sin \gamma_{st} \quad (4)$$

$$m_{RV} \ddot{z}_V = F_{PV} - F_{ZV} - F_{GV} \cos \gamma_{st} = 0 \quad (5)$$

$$\theta_V \ddot{\varphi}_V = M_V - F_{UV} \cdot s - M_{PV} \quad (6)$$

· 뒷바퀴:

$$m_{RH} \ddot{x}_H = F_{UH} - F_{XH} - F_{GH} \sin \gamma_{st} \quad (7)$$

$$m_{RH} \ddot{z}_H = F_{PH} - F_{ZH} - F_{GH} \cos \gamma_{st} = 0 \quad (8)$$

$$\theta_H \ddot{\varphi}_H = M_H - F_{UH} \cdot s - M_{PH} \quad (9)$$

이들 식을 정리하면 구동력은 식 (10)과 같다.

$$\frac{M_V + M_H}{s} = \left[F_G \frac{\ddot{x}}{g} + F_G \sin \gamma_{st} + F_{WL} \right] + F_{WR} + \frac{(\theta_V + \theta_H) \cdot \ddot{x}}{\gamma_{dyn} \cdot s} \quad (10)$$

차량이 구동하기 위하여 구동력은 최소한 바퀴 저항력보다 커야 하므로 "구동력 > 주행 저항 (= 구름 저항 + 공기 저항 + 가속 저항 + 등반 저항)"이다.

3.4 주행 저항

1) 구름 저항

공기 타이어에서 발생하는 구름 저항은 타이어 자체로부터의 구름 저항, 노면 상태에 따른 구름 저항 및 바퀴의 사선 방향 주행에 따른 구름 저항이 있는데 본고에서는 차량 속도가 저속이고 종 방향 주행(일직선 주행)이므로 노면 상태에 따른 구름 저항만을 고려한다. 구름 저항과 바퀴 부하력과의 관계는 식 (11)과 같고, 노면 상태가 포장된 아스팔트, 콘크리트인 경우 구름 저항 계수 f_R 는 0.01 ~ 0.02이다.

$$F_{WR} = f_R \cdot F_P \quad (11)$$

2) 공기 저항

공기 저항 FWL은 식 (12)와 같으며, 공기 저항 계수는 풍동 실험에 의하여 얻어지는 값이나 일반형 승용자동차에 대한 공기 저항 계수는 참고문헌 (6)을 참고하였다.

$$F_{WL} \text{ (kgf)} = (1/2) \rho C A v^2 \quad (12)$$

3) 등반 저항

본고는 차량의 주행이 옥내에 한정되어 있기 때문에 등반성은 0으로 하였다.

4) 가속 저항

가속 저항은 식 (13)과 같으며, 차량의 총 변속비에 따른 추가 질량 상수값은 참고문헌 (4)를 참고하였다.

$$F_{WB} = \lambda \cdot F_G \cdot \ddot{x} / g \quad (13)$$

3.5 주차장에서의 이동 하중

1) 수평면에서 정속 주행(전륜 구동)

$$f_V = \frac{F_{WRH} + C_{WA} A \rho \frac{v_{res}^2}{2}}{F_G \frac{b}{l} - C_{AV} A \rho \frac{v_{res}^2}{2} - \frac{s}{l} F_{WR}} \quad (14)$$

$$f_H = \frac{-F_{WRH}}{F_G \frac{a}{l} - C_{AH} A \rho \frac{v^2}{2} + \frac{s}{l} F_{WR}} \quad (15)$$

2) 수평면에서 저속의 가속 주행(전륜 구동)

$$f_V = \frac{F_G \frac{\ddot{x}}{g} + F_{WRH}}{\left[\frac{b}{l} - \frac{\ddot{x}}{g} \left(\frac{h}{l} + \frac{s}{l} (\lambda - 1) \right) \right] F_G - \frac{s}{l} F_{WR}} \quad (16)$$

$$f_H = \frac{-F_{WRH}}{\left[\frac{a}{l} + \frac{\ddot{x}}{g} \left(\frac{h}{l} + \frac{s}{l} (\lambda - 1) \right) \right] F_G + \frac{s}{l} F_{WR}} \quad (17)$$

4. 작은 보의 영향

작은 보의 휨이 클 경우 부가 휨 모멘트에 의하여 슬래브 단면 방향의 외단, 중앙, 내단의 모멘트는 <표 3>과 같이 변한다.

1) $\Delta \delta (= \delta_b - \delta_{By})$ 에 의한 부가 부 휨 모멘트

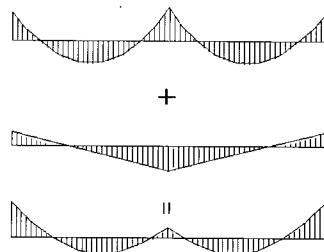
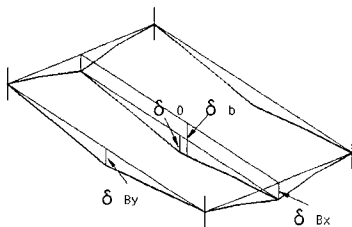
$$\Delta M_{X1} = -6 \frac{EI_S}{l_x^2} \cdot \Delta \delta \quad (18)$$

2) $\Delta \delta$ 에 의한 부가 정 모멘트

하중 조건 및 전단력, 휨 모멘트의 일반식은 <표 3>과 같다.

$$\text{전단력 } Q=0 \text{인 위치는 } x = \frac{l_x}{2} + \frac{12EI_S}{wl_x^3} \cdot \Delta \delta$$

이므로



M_{xn} : 주변고정 슬래브의 휨모멘트

ΔM_{xn} : $\Delta \delta$ 에 의한 부가휨모멘트

($\Delta \delta = \Delta \delta_b - \Delta \delta_{By}$)

*n=1,2

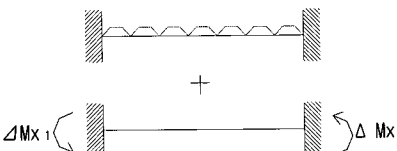
$$\sigma_{x1} = \frac{M_{x1} + \Delta M_{x1}}{Z}$$

σ_{x1} : 외단의 응력도

Z : 슬래브의 단면계수

그림 3. 작은 보의 휨에 의한 슬래브의 부가 휨 모멘트

표 3. 하중 조건 및 전단력, 휨 모멘트

하중 조건	
전단력	$Q = \frac{w}{2} l_x - wx + \frac{12EI_S}{l_x^3} \cdot \Delta \delta$
휨 모멘트	$M = \frac{w}{2} l_x^2 \left(-\frac{1}{6} + \frac{x}{l_x} - \frac{x^2}{l_x^2} \right) + \frac{6EI_S}{l_x^2} \cdot \Delta \delta \cdot \left(\frac{2x}{l_x} - 1 \right)$

$$M_{\max} = \frac{w}{2} l_x^2 \left(-\frac{1}{6} + \frac{x}{l_x} - \frac{x^2}{l_x^2} \right) + \frac{6EI_S}{l_x^2} \cdot \Delta \delta \cdot \left(\frac{2x}{l_x} - 1 \right) \quad (19)$$

5. 이동 하중에 의한 동적 과도 응답

본고에서는 이동 하중에 의한 동적 과도 응답 해석을 위하여 유한요소법을 이용하여 프로그램을 개발하였다. 우선 복합 적층이방성 평판의 기하학적 비선형을 고려한 기초 방정식을 von Karman 이론과 Reissner-Mindlin 이론에 의해 유도하고, 이를 기초로 하여 아이소파라메트릭 쉘 요소에 의한 접선 강성 방정식을 정식화한다. 아이소파라메트릭 쉘 요소는 9절점 Lagrange 요소를 채택하며, reduced integration을 이용하여 shear locking 현상과 membrane locking 현상을 해결한다. 이들 제 이론을 이용하여 정적 및 동적 응답 해석 프로그램을 작성한다. 이들 중 동적 해석 및 이동 하중의 적용은 구체적으로 다음과 같다.

5.1 동적 해석(Newmark-β 법)

평판의 동적 응답을 얻기 위해 Newmark의 직접적분법을 이용하였으며, 이는 다음과 같이 정리할 수 있다.

① $d(t + \Delta t)$ 를 구한다.

② $\ddot{d}(t + \Delta t)$ 및 $\dot{d}(t + \Delta t)$ 를 구한다.

③ 현재까지 구한 $d(t + \Delta t)$, $\dot{d}(t + \Delta t)$,

$\ddot{d}(t + \Delta t)$ 를 각각 $d(t)$, $\dot{d}(t)$, $\ddot{d}(t)$ 로 치환한다.

이상의 과정 ①→②→③을 시간증분 Δt 를 증분시키며 반복하여 계산한다. 직접적분법의 안정 조건으로 Leech의 임계 시간(critical time step)을 이용한다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{4} \left(\frac{\rho h}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta x^2 \quad (20)$$

여기서, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$

Δx : 최소 인접거리

5.2 이동 하중을 고려한 경우

이동 하중은 이동 차량에 따른 집중 하중의 크기 및 위치 변동을 계산하여 외력 항에 대입한다. 차량 위치의 변동에 따른 각 절점 하중의 계산은 <그림 4>에서와 같다.

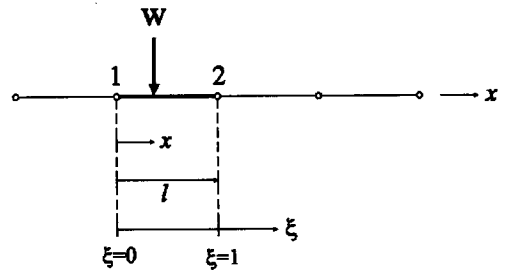


그림 4. 이동 하중의 보간

절점 1, 2 사이에 차량이 통과할 경우, 각 절점에 분산되는 하중 비율은 다음과 같이 선형보간함수 N_i 를 이용하여 결정한다.

$$P_i = \sum_{n=1}^n W_n N_i(\xi_n) \quad (21)$$

여기서, $N_1 = 1 - \xi$, $N_2 = \xi$, $\xi = \frac{x}{l}$

구간 내에서 이동 하중이 한 개만 존재할 때는 $n = 1$ 인 경우이므로 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$P_1 = W_1(1 - \xi_1)$$

$$P_2 = W_1(\xi_1)$$

(22)

6. 안전성 평가 사례

6.1 개요

본고에서는 전술한 이동 하중을 적용하여 D아파트의 부속 지하 주차장 슬래브 중 내부 패널인 경우에 대해서만 주행 구간에 대하여 현행 구조 설계시 적용되고 있는 슬래브 설계 방법에 의한 정·부 모멘트와 작은 보 고려 여부 및 차량 이동 경로에 따른 정·부 모멘트를 비교, 검토하였다.

이들의 비교 검토에서 사용된 재 물성값은 <표 4>와 같으며, 차량의 이동 경로는 <표 5>와 같다. 그리고 옥내 주차장에서의 차량 속도는 지속이므로 560

cm/s(약 20 km/h)로 가정하였고, 가속도는 차량이 정지 상태에서 20 km/h로 가속되는데 1.5초가 소요된다고 가정하여 0.38 g를 적용한 결과 주차장에 작용되는 수직 및 수평 하중은 <표 6>과 같다.

6.2 검토 결과

1) 안전율

본고에서 사용한 개발 프로그램은 안전율이 고려되지 않은 이론해이므로 4변 고정 슬래브에 대하여 이론해와 실용해를 비교하여 안전율을 산정한 후 작은 보 고려 여부 및 차량 이동 경로에 따른 해에 적절한 안전율을 부여하여 안전성을 평가하였다.

<표 7>에서 보는 바와 같이 이론해는 4변 완전 고정, 유한 요소 해석 및 판이론의 적용 결과가 거의 비슷한 것으로 나타났으며, 실용해는 단부의 경우 1방향 슬래브 실용식이 이론해의 약 110%, 중앙부의 경우 4변 고정 기준식이 이론해의 약 130%, 1방향 슬래브 실용식과 ACI 318-63 제2방법이 이론해의 약 150%로 나타났다.

따라서, 본고에서는 개발 프로그램을 이용하여 해석한 후, 단부는 이론치의 100%, 중앙부는 이론치의 150%를 각각 단부 및 중앙부의 안전치로 설정하여 안전성을 평가하였다.

표 4. D아파트 부속 지하 주차장 특성 및 적용 물성값

구분	기둥경간 (m)	lx×ly (m)	t (cm)	ρ (tf/m ³)	E (kgf/cm ²)	ν	D.L (kgf/m ²)	L.L (kgf/m ²)
치수	7×8	3.5×8.0	15	2.4	2.1×10 ⁹	0.17	820	500

표 5. 차량의 이동 경로

작은 보 고려 여부	차량 주행 방향	차륜	차량 이동 경로	비고
미고려	단변 방향	좌측	31→32→33→34→35	그림 5 참조
		우측	21→22→23→24→25	
고려	작은 보의 횡 방향	좌측	67→68→69→70→71→72→73→74→75→76→77	그림 5 참조
		우측	45→46→47→48→49→50→51→52→53→54→55	
	작은 보의 종 방향	좌측	5→16→27→38→49→60→71→82→93→104→115	그림 5 참조
		우측	3→14→25→36→47→58→69→80→91→102→113	

표 6. 주차장에 작용되는 수직·수평 하중

구분	정속 주행시 율하중 (kgf)				가속 주행시 율하중 (kgf)			
	전륜수평	전륜수직	후륜수평	후륜수직	전륜수평	전륜수직	후륜수평	후륜수직
치수	450	450	450	450	350	358	-8	542

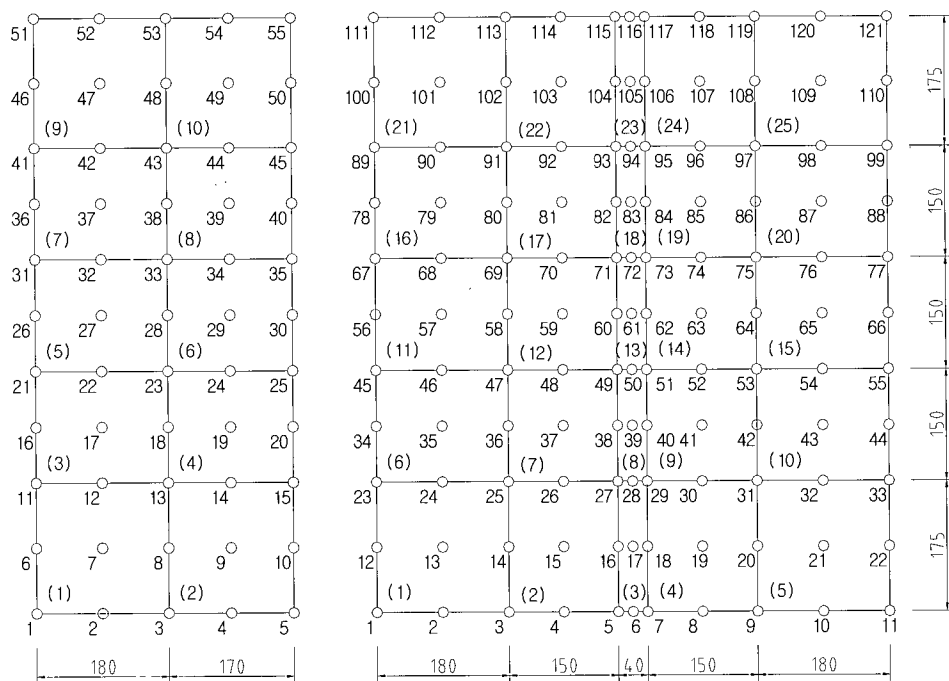
2) 검토 결과

<표 7>에서 보는 바와 같이 다음과 같은 사항을 알 수 있다.

① 차량이 정속 주행할 때와 가속 주행할 때의 정·부 모멘트 값은 큰 차이가 없는 것으로 사료된다.

② 작은 보 미고려시 단부는 안전치의 약 83%, 중앙부는 안전치의 약 117%로서 모멘트 재분배를 고려한다면 구조적으로 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

③ 작은 보 고려시가 미고려시에 비하여 외단부, 중앙부 및 내단부에서 각각의 평균치는 124%, 86%, 47%로서 외단부의 부모멘트가 과소 평가된다. 그러나, 이 값



$l_x \times l_y(m) = 3.5 \times 8.0$

$l_x \times l_y(m) = 7 \times 8$

그림 5. 주행 구간 슬래브 모델링(개발 프로그램 해석용)

은 단부 안전치의 103%로서 구조적으로 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

표 7. 계수 모멘트 비교 (단위: $t \cdot m$)

구분	설계 방법 (주행 조건)	외단부	중앙부	내단부	비고	
이론해	4변 완전 고정 슬래브 이론해	-2.03	+1.00	-2.03	작은 보 미고려	
	유한 요소 해석	-2.04	+1.04	-2.04		
	판이론 적용	-2.03	+1.00	-2.03		
실용해	4변 고정 균준식	-1.96	+1.31	-1.96		
	1방향 슬래브 실용식	-2.23	+1.53	-2.23		
	ACI 318-63 제2방법	-2.03	+1.52	-2.03		
개발 프로그램 해석해	횡 방향 정속	-1.68	+1.75	-1.68		작은 보 고려
	횡 방향 가속	-1.70	+1.76	-1.70		
	횡 방향 정속	-2.11	+1.53	-0.81		
	횡 방향 가속	-2.14	+1.50	-0.83		
	종 방향 정속	-2.08	+1.50	-0.78		
	종 방향 가속	-2.07	+1.50	-0.79		
	정하중 유한 요소*	-2.63	+1.04	-1.29		

* 정하중 유한 요소 해석은 상용 프로그램 이용 결과임.

④ 작은 보 고려시 최대 정모멘트 발생 위치는 외단부에서 약 $0.7l_x$ 전·후이므로 굽힘 철근(Bent Bar) 사용시 유의하여야 할 것으로 사료된다.

7. 맺는 말

본고에서는 지하 주차장 구조물에 작용하는 하중 중에서 주행 공간에

서의 이동 하중에 의한 구조물의 동적 과도응답 효과와 작은 보의 처짐에 의한 외단부의 추가 부 휨 모멘트의 영향에 대하여 적절한 구조 해석 및 검토 방법을 강구하도록 하였다.

이를 위하여 설계기준 차량의 설정 및 이동 하중의 작용력을 1차적으로 차량 역학에 근거하여 이론적인 접근을 시도하였으며, 이동 하중에 의한 구조물의 동적 과도 응답 효과를 구하기 위하여 프로그램을 개발하였다.

이와 같은 방법으로 실제 구조물에 대하여 안전성 평가를 실시한 결과 구조적으로 큰 문제는 없을 것으로 해석되었다.

그러나, 본고의 내용은 일례에 불과하고, 앞으로 많은 시행착오가 있어야 할 것으로 사료되고, 실제 구조물은 이들 조건에 부가하여 토·수압에 의한 면내 하중인 추가 하중이 작용하므로 압축력 및 면내 하중과 작은 보의 처짐에 의한 추가 모멘트가 발생하기 때문에 이들에 대한 연구가 계속 진행되어야 하며, 실험이 병행되어야 할 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. 광효경, 송종영, "주차장 구조물의 보와 거더의 등가차량 하중계수에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제 10권, 제3호, pp.203~216, 1997. 9.
2. 광효경, 윤정방, 이형진, 이석용, "PC 지하주차장 구조물의 거동분석을 위한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제18권, 제1-1호, pp.97~110, 1998. 1.
3. 대통령령 제13001호, "도로의 구조·시설기준에 관한 규정", 1990. 5. 4.
4. 박보용 외 1인, "차량역학", 1판, 동명사, 서울, 1997. 4.
5. 유병익, 정창용, 한상호, "실무측면에서 본 차량하중 적용에 의한 지하주차장 슬래브 구조설계", 건축, p.99, 1997. 11.
6. 자동차연구회, "자동차 공학", 중판, 중원사, 서울, pp. pp.15-13~15-20, 1992. 1.
7. "바닥·슬래브의 설계와 시공", 건축기술정보, 통권75, pp.30~41, 1995. 1.
8. L. Meirovitch, "Computational Methods in Structural Dynamics", S&N, 1980.
9. William H. Press, "Numerical Recipes in Fortran", 2nd ed., Cambridge, 1992.
10. H. Kolsky, "Stress Waves in Solids", Dover, 1963.
11. J. D. Achenbach, "Wave Propagation in Elastic Solids", North-Holland, 1984.
12. 鷺津久一郎, "有限要素法ハンドブック", I-II, 培風館, 1981.
13. 戸川準人, "有限要素法による振動解析", サイエンス社, 1975.