

# 모듈러 도로시스템을 위한 지지모듈 설계 및 성능평가

## Design and Performance Evaluation of Support Module for Modular Road System

김 동 규<sup>†</sup>  
Donggyou Kim

Received: November 5<sup>th</sup>, 2021; Revised: November 12<sup>th</sup>, 2021; Accepted: November 23<sup>rd</sup>, 2021

**ABSTRACT** : As the number of using road in Korea increases, maintenance costs and traffic congestion costs also increase. In order to reduce maintenance cost and time of road, existing long - lived modular road system has been proposed. In this study, the design and performance evaluation of the adaptable support module, which is the substructure of the proposed system, was performed. Two adaptable (Cross-Beam type) support modules were designed and fabricated to determine the load and shape. A adaptable support module was constructed and a static load test was carried out to select the type with better performance. As a result of the load test, the maximum value of the measured earth pressure difference is about 158 kPa and the settlement amount is about 0.032 mm in the two types of adaptable support modules. Based on these results, it is concluded that the performance of the adaptable support module of the bottom curved cross-beam type is better.

**Keywords** : Modular, Road system, Base module, Crossbeam

**요 지** : 국내의 공용 중인 도로의 연장의 증가와 함께 유지보수 비용 및 교통혼잡비용도 함께 증가하고 있는 추세이다. 도로의 유지보수 비용 및 소요시간의 단축을 위하여 기존에 지속가능한 장수명 모듈러 도로시스템이 제안되었다. 본 연구에서는 제안된 시스템의 하부구조인 맞춤형 지지모듈의 설계 및 성능평가를 수행하였다. 하중을 결정하고 형태가 다른 2가지의 맞춤형(Cross-Beam 형태) 지지모듈을 설계, 제작하였다. 제작한 맞춤형 지지모듈을 시공하고 성능이 더 우수한 형태의 지지모듈 선정을 위하여 정하중재하 시험을 진행하였다. 하중재하 시험 결과 두가지 형태의 맞춤형 지지모듈에서 측정된 최대 토압은 약 158kPa 차이가 났으며, 최대 침하량은 약 0.032mm의 차이가 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 하부곡선형 Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈의 성능이 더 우수한 것으로 판단된다.

**주요어** : 모듈러, 도로시스템, 지지구조, 크로스빔

## 1. 서 론

국내에서 공용 중인 도로의 총 연장은 1991년에는 일반국도, 고속국도를 모두 포함하여 58,088km에 불과하였으나, 2015년에는 107,527km로 약 25년 사이에 약 1.9배 증가하였다. 도로연장의 증가와 맞물려 유지보수에 소요되는 금액도 함께 증가하였다. 일반국도와 고속국도만을 고려했을 때 유지보수 비용은 2002년 약 1조원에서 2015년에는 1.14조원으로 약 1.14배가 증가하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015; Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 또한 교통체증의 발생으로 인해 시간가치의 손실과 차량운영비의 증가 등과 같이 추가적으로 발생하는 총체적인 손실비용을 의미하는 교통혼잡비용은 2002년

22.1조원에서 2012년에는 30.3조원으로 10년 동안 약 1.4배가 증가하였다. 이와 같이 도로에 투입되는 예산이 매년 꾸준히 증가하고 있는 것으로 나타났다(Cho et al., 2014). 그 중 국내에서 발생하는 교통혼잡비용 증가의 주요 요인으로 차량의 증가뿐만 아니라 빈번한 유지보수로 인한 교통체증도 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 도로의 유지보수에 소요되는 시간을 최소화하기 위한 방안 마련이 필요한 실정이다. 기존 연구에서 유지보수 최소화 방안의 일환으로 공장 대량생산 및 조립시공으로 공사기간 단축이 가능한 지속가능한 장수명 모듈러 도로시스템이 제안되었다(Kim et al., 2012).

국내에서 뿐만 아니라 국외에서도 도로 연장의 증가와 함께 급속도로 도로의 포장이나 유지보수가 가능한 방법을

<sup>†</sup> Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author : dgkim2004@kict.re.kr)

찾기 위한 연구가 지속되어왔다. 미국에서는 SHRP2를 통하여 프리캐스트 콘크리트 포장에 대한 연구를 진행하였다. 해당 연구에서는 각 나라의 프리캐스트 콘크리트 포장 연구 및 시공 현황을 나타내고 간단한 시공법을 설명하였다(Sidney et al., 2013). Park(2008)은 프리캐스트 슬래브를 적용한 도로 신설 및 보수 공법제안을 위하여 시험시공을 진행하고 매뉴얼을 제안하였다. 하지만 다웰바 포켓부분과 슬래브 하부의 빈 공간을 그라우팅으로 충전하는 과정에서 부착이 잘 되지 않는 문제점이 발생하였다. Kim et al.(2015)는 한국의 도로분야 기술수준에 대한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서 모듈러 도로포장에 관련한 기술수준이 도입기에 해당하는 수준으로 중점 투자할 경우 높은 투자효율을 얻을 수 있는 발전 가능성 있는 기술로 분석되었다. 국내의 도로 유지보수와 관련된 문헌과 기술들을 검토 해 본 결과 도로 포장에 사용하는 슬래브에 대한 연구는 있지만, 본 연구와 같이 하부 지지모듈에 대한 연구는 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지속가능한 장수명 모듈러 도로시스템의 하부구조인 맞춤형 지지모듈의 설계 및 성능평가를 통해 도로의 유지보수에 소요되는 시간을 최소화하기 위한 방안을 제안하는 것을 목적으로 한다.

본 연구에서는 표준관입시험결과치인 N치가 7 이상인 사질토 지반에 적용되는 경우를 가정하여 두 가지 Type의 맞춤형 지지모듈을 설계, 제작하였다. 제작한 맞춤형 지지모듈을 현장에 시공하고 정하중 재하 시험을 통하여 Type 별 맞춤형 지지모듈의 성능을 비교·평가하였다.

## 2. 맞춤형 지지모듈 기본개념

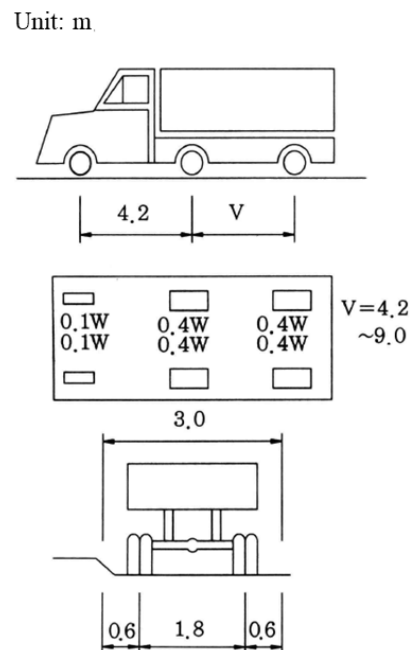
### 2.1 정의

맞춤형 지지모듈은 포장에 가해지는 교통하중, 포장조건 및 하부지반조건에 따라 기존 포장의 하부구조를 Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈로 대체하는 것이다. 대체되는 하부구조는 아스팔트 포장에서 기층, 보조기층, 동상방지층 및 노상 또는 콘크리트 포장에서 보조기층(또는 린콘크리트 층), 동상방지층 및 노상이다. 이 맞춤형 지지모듈은 공장생산 제품으로 품질이 보장되고 공장에서 사전 제작되므로 도로 현장까지 운반하여 시공만 하면 된다. 따라서 기존에 도로건설 및 유지보수 시에 소요되는 공사기간 및 공사비와 비교해 보았을 때 시간 및 비용절감이 가능할 것으로 예상된다(Kim et al., 2012).

### 2.2 지지모듈 설계

맞춤형 지지모듈을 설계함에 있어 형식 및 제원은 포장에 작용하는 차량하중, 포장하중 및 하부지반조건에 따른 침하량 및 지지력을 기준으로 결정된다. 따라서 설계를 하기 전에 이 값에 대한 기준을 정해야 한다. 우선 차량하중은 Fig. 1과 같이 도로교설계기준을 참고하여 1등급 교량의 설계기준인 DB-24 하중을 적용하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2010). 차량의 뒷바퀴간 거리는 하중작용의 최소거리인 4.2m로 가정하여 총 차량하중을 약 432kN으로 결정하였다.

포장하중에 포함되는 모듈러 도로시스템의 상부 슬래브는 철근콘크리트 단위중량인 24.5kN/m<sup>3</sup>을 적용하였으며, 길이가 서로 다른 두 개의 슬래브가 연속으로 거치되는 형태이다. 제원은 각 8m × 3.5m × 0.3m(L × W × H)와 3.9m × 3.5m × 0.3m(L × W × H)이다. 따라서 하부 맞춤형 지지모듈이 부담하게 되는 총 하중은 상부 슬래브의 자중과 차량하중을 합산하여 약 738kN이다. 지지력을 증대시키기 위해 Fig. 2와 같이 하부 지반에 근입되는 부분의 형상을 두 가지 Type으로 구분하여 Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈을 제작하였다. Type-1은 하부직선형태이고 Type-2는 하부곡선형태를 가진다.



Bridge Grade	Load Grade	Weight W(kN)	Total load 1.8W(kN)	Front wheel load 0.1W(kN)	Rear wheel load 0.4W(kN)
1 <sup>st</sup> grade	DB-24	240	432	24	96
2 <sup>nd</sup> grade	DB-18	180	324	18	72
3 <sup>rd</sup> grade	DB-13.5	135	243	13.5	54

Fig. 1. DB Load (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2010)

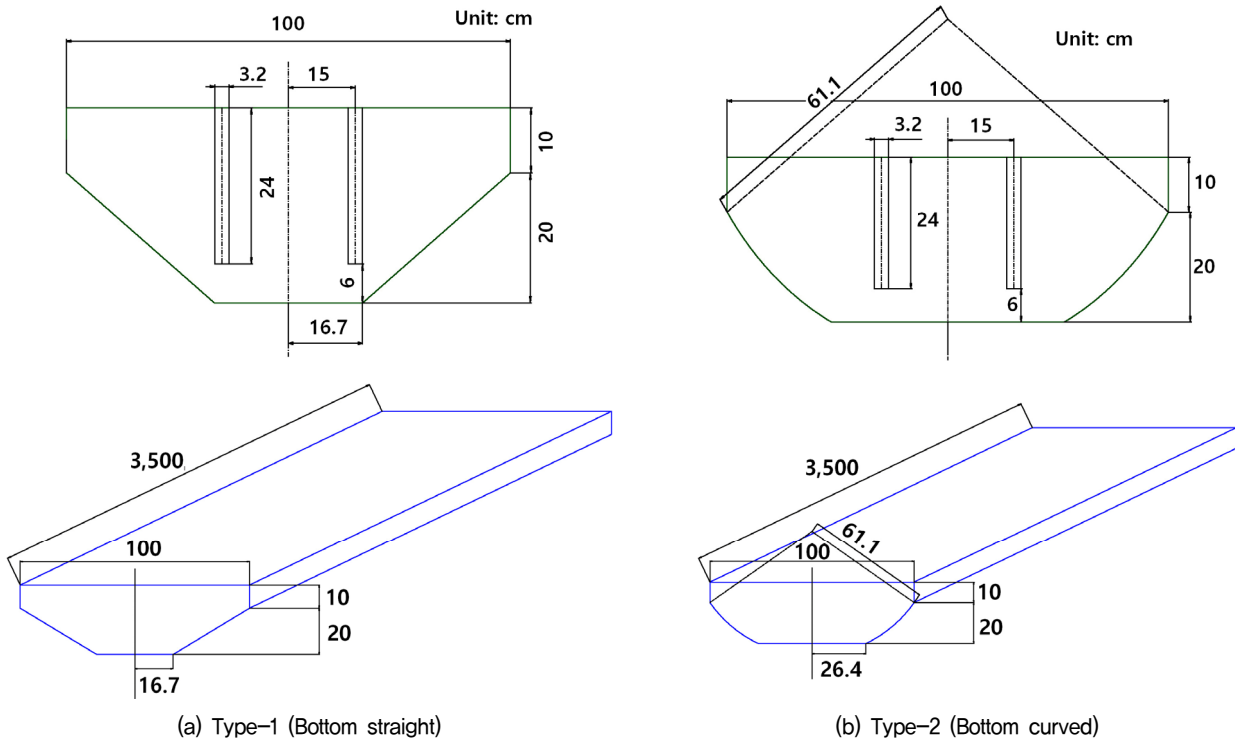


Fig. 2. Shape and dimension of two types of adaptable support module

국내에서 도로가 건설되는 원지반의 상태는 연약한 점성토에서부터 단단한 풍화토에 이르기까지 그 종류 및 강도가 다양하다. 본 연구에서는 표준관입시험결과 측정되는 N치의 범위가 7이상인 사질토 지반을 대상으로 앞에 언급한 차량하중과 포장하중을 지지할 수 있도록 두 가지 Type의 Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈을 제작하고 성능에 대한 비교평가를 수행하였다.

### 3. 맞춤형 지지모듈 성능평가

#### 3.1 성능평가 방법

두 가지 Type의 Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈 중 성능이 더 우수한 Type을 판단하기 위하여 현장실험을 실시하였다. Type-1(하부직선형)의 맞춤형 지지모듈과 Type-2(하부곡선형)의 맞춤형 지지모듈을 Fig. 3과 같이 일정한 간

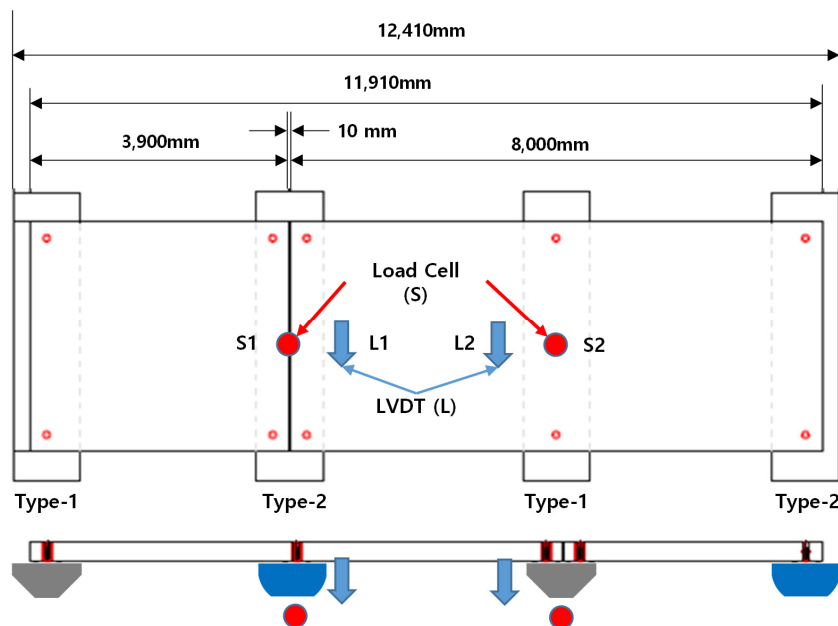


Fig. 3. Modular road system, load cell and LVDT installed on the test bed

격으로 각 2개씩 교차하여 시공하였다. Fig. 3에서 보여주듯이 차량하중 및 포장하중에 의해 맞춤형 지지모듈로 전달되는 하중 및 맞춤형 지지모듈의 침하량을 측정하기 위하여 토압계(S1과 S2)와 변위계(L1과 L2)를 설치하였다. 두 가지 Type의 Cross-Beam 형태 맞춤형 지지모듈의 중앙에 토압계와 변위계를 각 1개씩 설치하였다. 맞춤형 지지모듈 상부에 슬래브를 거치한 다음 슬래브에 정하중을 재하하고 토압과 변위를 측정하였다.

정하중은 Fig. 4에서 보여주듯이 종방향으로 5개 라인을 정하고 횡방향으로 7등분해서 총 35개 지점에 재하하였다. 정하중을 재하한 뒤 Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈에 설치한 토압계와 변위계의 변화를 측정하였다.

재하되는 정하중의 크기를 결정하기 위해서 도로법 시행령을 참고하였다. 도로법 시행령 55조(차량의 운행 제한)를 보면 축 하중이 10t(98kN)을 초과하거나 총중량이 40t(392kN)을 초과하는 차량에 대해서는 운행을 제한할 수 있도록 한다. 운행 제한에 단속되는 최대 축 하중인 10t은 복륵상태를 기준으로 하는 것으로 실험에 사용되는 하중 재하 시스템은 단륵 상태이므로 최대 축 하중을 5t으로 가정하였다. 과적 운행 상태에 대한 가정은 최대 두 배의 과적이 발생할 경우를 대비해 단륵에 재하되는 최대 축 하중을 10t으로 가정하였다. 앞의 가정을 바탕으로 최종적으로 현장실험에 사용되

는 하중을 kN단위로 50kN과 100kN으로 결정하였다.

Fig. 5는 본 연구를 위하여 결정된 50kN과 100kN을 모둘러 도로 포장면에 재하하기 위한 하중 재하 시스템을 보여주고 있다.

### 3.2 성능평가 결과

본 연구에서 제안된 두 가지 Type의 Cross-Beam 형태 맞춤형 지지모듈을 제작하여 성능평가를 위하여 현장 실험을 수행하였다.

본 연구에서 성능평가를 위하여 Fig. 4에서 보여주는 B-라인상의 7개 지점에 하중이 적용하였을 때 S1 토압계와 L1 변위계에서 측정된 하중과 변위를 사용하였다. 또한 Fig. 4에서 보여주는 D-라인상의 7개 지점에 하중이 적용하였을 때 S2 토압계와 L2 변위계에서 측정된 하중과 변위를 사용하였다.

Fig. 6(a)는 B-라인 7개 지점과 D-라인 7개 지점에 50kN의 하중을 재하하였을 때 S1 토압계와 S2 토압계에서 측정된 토압을 보여주고 있다. x축은 Fig. 4에서 보여 주듯이 1번 ~ 7번 지점을 표시한 것이고, y축은 각 지점에서 측정된 토압값을 kPa단위로 나타낸 것이다. Fig. 6(b)는 B-라인과 D-라인에서 측정된 각각의 최대 토압과 최소 토압을 보여주고 있다. Table 1은 B-라인과 D-라인의 총 14개 지점에서

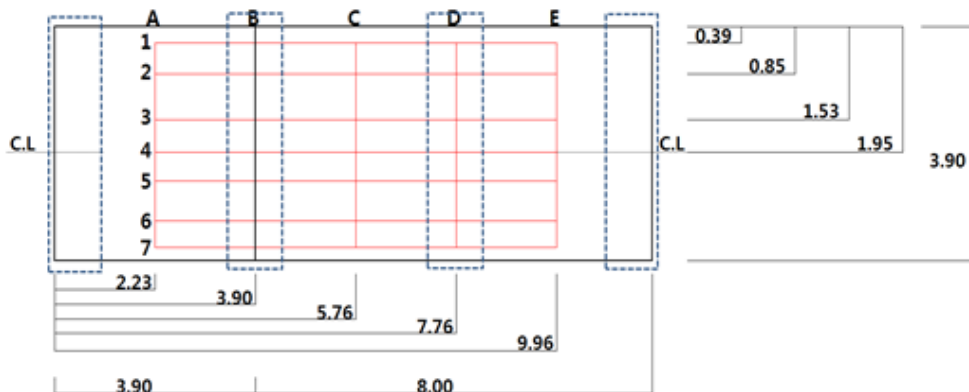


Fig. 4. Loading position

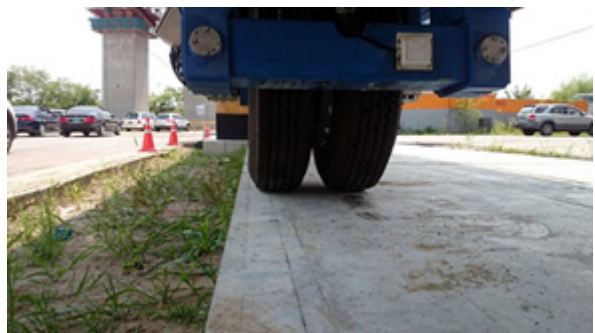
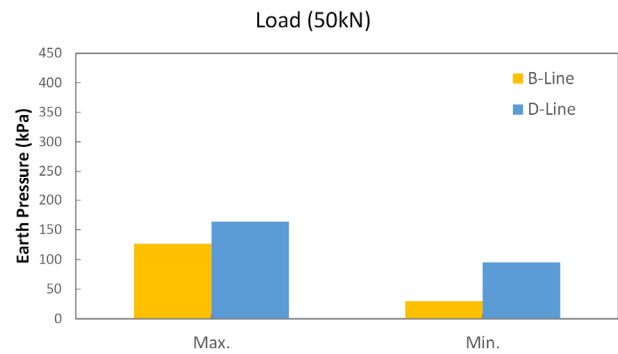
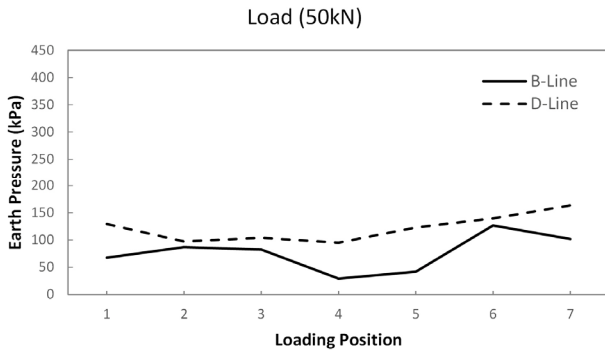


Fig. 5. Loading system



(a) Measured earth pressures

(b) Max. and Min. earth pressure

Fig. 6. Earth pressures measured at 14 positons in applying 50kN

Table 1. Earth pressures measured at 14 positons in applying 50kN

	1	2	3	4	5	6	7
B-Line (kPa)	67.53	87.08	82.34	29.32 (min.)	42.76	126.78 (max.)	101.89
D-Line (kPa)	129.26	97.54	104.17	95.17 (min.)	123.10	139.68	163.82 (max.)

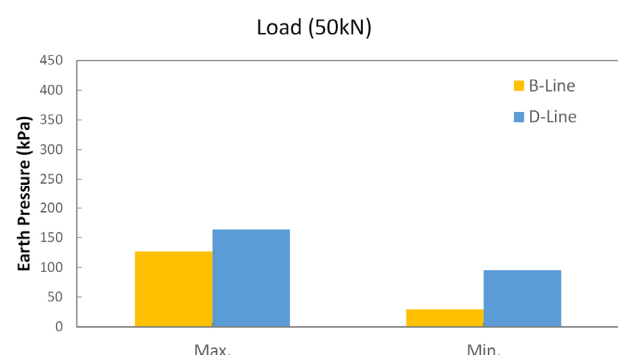
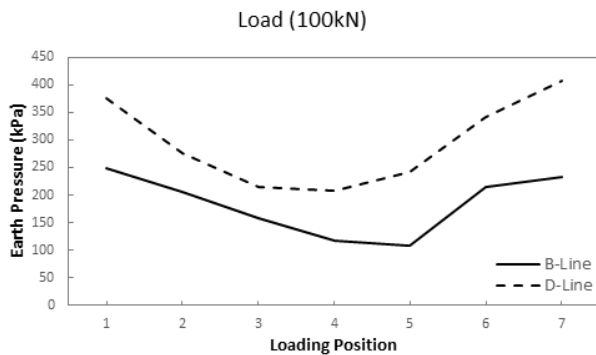
측정된 토압의 구체적인 수치를 나타낸 것이다.

50kN의 하중을 재하하여 실험을 진행 한 뒤 S1 토압계에 서 측정된 데이터를 비교하였다. B-라인에 위치한 Type-2 (하부곡선형) 형태의 지지모듈에는 최대 약 127kPa의 토압이 측정되었다. D-라인에 위치한 Type-1(하부직선형) 형태의 지지모듈에는 약 164kPa이 측정되었다. Type-1(하부직선형) 형태의 지지모듈에서 약 37kPa 정도 토압이 크게 측정되었다.

Fig. 7(a)는 B-라인 7개 지점과 D-라인 7개 지점에 100kN의 하중이 재하하였을 때 S1 토압계와 S2 토압계에서 측정

된 토압을 비교한 그림이다. x축은 Fig. 4에서 보여 주듯이 1번 ~ 7번 지점을 표시한 것이고, y축은 각 지점에서 측정된 토압값을 kPa단위로 나타낸 것이다. Fig. 7(b)는 B-라인과 D-라인에서 측정된 각각의 최대 토압과 최소 토압을 보여주고 있다. Tabel 2는 B-라인과 D-라인의 총 14개 지점에서 측정된 구체적인 수치를 나타낸 것이다.

Table 2에서와 같이 100kN의 하중을 재하한 경우 B-라인에 위치한 Type-2(하부곡선형) 형태의 지지모듈에는 최대 약 249kPa이 측정되었으며, D-라인에 위치한 Type-1(하부직



(a) Measured earth pressures

(b) Max. and Min. earth pressure

Fig. 7. Earth pressures measured at 14 positons in applying 100kN

Table 2. Earth pressures measured at 14 positons in applying 100kN

	1	2	3	4	5	6	7
B-Line (kPa)	249.40 (max.)	205.57	159.06	118.19	107.52 (min.)	213.86	232.22
D-Line (kPa)	375.47	275.07	213.78	208.80 (min.)	242.18	341.85	407.19 (max.)

선형) 형태의 지지모듈에는 약 407kPa이 측정되었다. Type-1 (하부직선형) 형태의 지지모듈이 약 158kPa 크게 토압이 측정되었다.

측정된 토압 비교를 통해 Type-2(하부곡선형) 형태의 맞춤형 지지모듈이 Type-1(하부직선형) 형태의 맞춤형 지지모듈보다 하중을 분산시키는 효과가 큰 것으로 판단된다.

Fig. 8과 Table 3은 B-라인 7개 지점과 D-라인 7개 지점에 50kN의 하중이 재하되었을 때 L1 변위계와 L2 변위계에서 측정되는 변위를 비교한 것이다. Fig. 8(a)에서 x축은

토압과 마찬가지로 Fig. 4에서 1번 ~ 7번 지점을 표시한 것이고, y축은 측정된 변위를 mm 단위로 나타낸 것이다.

50kN의 하중이 재하되는 경우에 L1 변위계와 L2 변위계 모두 최댓값이 약 -0.02mm로 나타났다. 미세한 차이지만 L2 변위계에서 측정된 값이 약 -0.002mm 크게 측정되었다. 따라서 L2 변위계가 설치된 Type-1(하부직선형)의 맞춤형 지지모듈의 침하량이 더 크게 측정되었다.

Fig. 9와 Table 4는 B-라인 7개 지점과 D-라인 7개 지점에 100kN의 하중이 재하되었을 때 L1 변위계와 L2 변위계

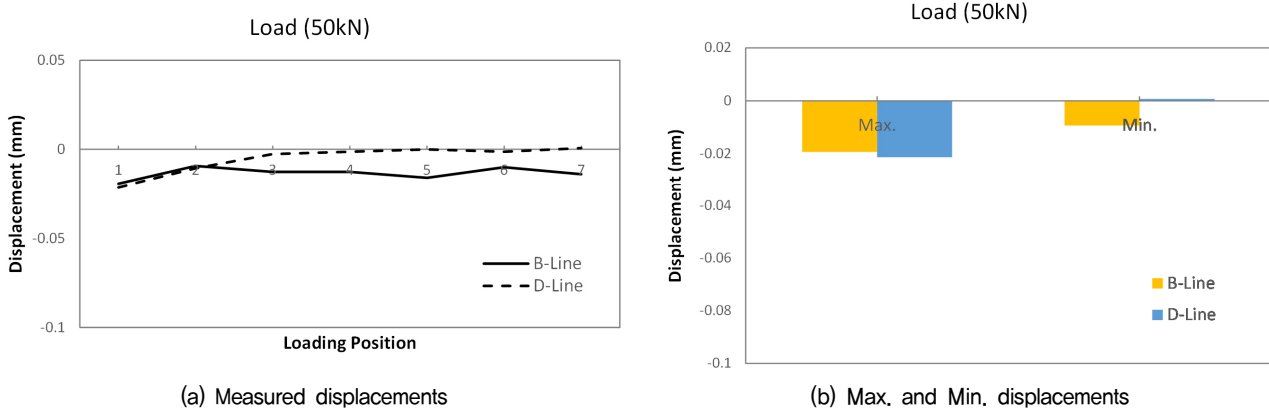


Fig. 8. Displacements measured at 14 positons in applying 50kN

Table 3. Displacements measured at 14 positons in applying 50kN

	1	2	3	4	5	6	7
B-Line (L1 displacement, mm)	-0.019 (max.)	-0.009 (min.)	-0.013	-0.013	-0.016	-0.01	-0.014
D-Line (L2 displacement, mm)	-0.021 (max.)	-0.011	-0.003	-0.001	0 (min.)	-0.001	0.001

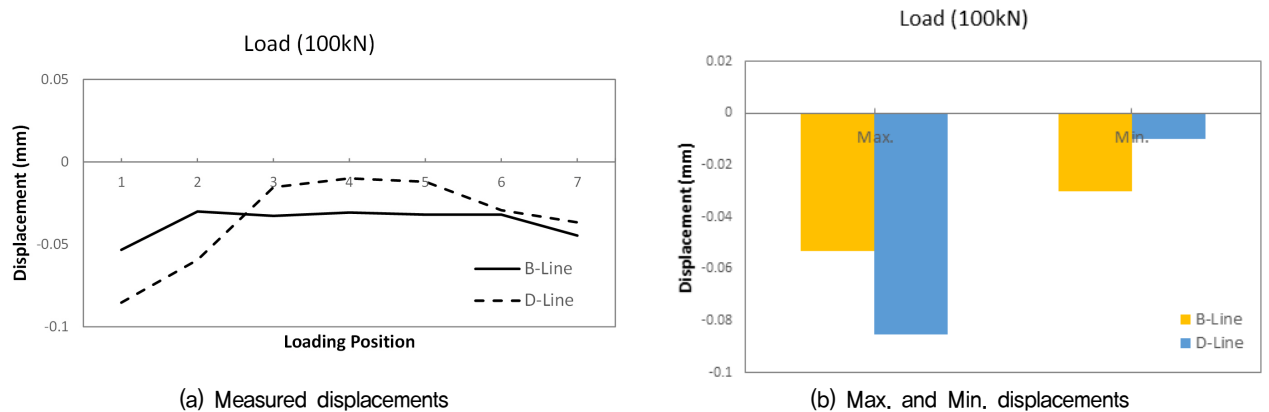


Fig. 9. Displacements measured at 14 positons in applying 100kN

Table 4. Displacements measured at 14 positons in applying 100kN

	1	2	3	4	5	6	7
B-Line (L1 displacement, mm)	-0.053 (max.)	-0.03 (min.)	-0.032	-0.031	-0.032	-0.032	-0.045
D-Line (L2 displacement,mm)	-0.085 (max.)	-0.059	-0.015	-0.01 (min.)	-0.012	-0.029	-0.037

에서 측정된 변위를 비교한 것이다.

100kN의 하중이 재하되는 경우, L1 변위계에서 최대 -0.053mm의 변위가 측정되었으며 L2 변위계에서는 -0.085mm가 측정되었다. Type-1(하부직선형)의 맞춤형 지지모듈에 설치된 L2 변위계의 변위가 약 -0.032mm더 크게 측정되었다. 또한 같은 종방향 라인에 하중이 재하 된 경우 L2 변위계에서는 맞춤형 지지모듈의 모서리부와 중앙부의 침하량 차이가 최대 0.075mm으로 나타나 실제로 현장에 적용되는 경우 부등침하의 문제가 발생할 가능성이 있을 것으로 판단된다.

두 가지 Type의 Cross-Beam 형태 맞춤형 지지모듈에서 측정된 변위와 토압의 최댓값을 비교해 본 결과, Type-2(하부곡선형)의 맞춤형 지지모듈의 성능이 더 우수한 것으로 판단할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 기존 도로의 유지보수에 소요되는 시간을 줄이기 위한 방법으로 제안되었던 모듈러 도로시스템 중 하부구조인 맞춤형 지지모듈을 두 가지 Type으로 설계·제작하였다. 제작한 맞춤형 지지모듈을 현장에 시공하고 정하중 재하 실험을 진행하여 각 Type별 성능에 대한 비교평가를 수행하였다. 이상의 연구로부터 도출된 주요 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 차량하중, 포장 슬래브의 자중 및 하부지반조건을 고려하여  $N > 7$ 인 사질토 지반에 적용 가능한 Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈을 설계·제작하였다. 지반에 근입되는 부분의 형태를 다르게 두 가지 Type, 즉 Type-1(하부직선형)과 Type-2(하부곡선형)으로 설계·제작하였다.
- (2) 제작한 맞춤형 지지모듈을 슬래브 하부에 교차로 2개씩 시공하고 상부 슬래브를 거치한 뒤 35개의 하중 재하 지점을 선택하였다. 선택한 지점에 정하중을 재하한 다음 Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈에 설치한 토압계와 변위계의 측정값을 이용하여 Type별 맞춤형 지지모듈의 성능을 비교평가 하였다.

- (3) 각 지점에 50kN과 100kN의 하중을 재하하여 각 Type별 맞춤형 지지모듈의 변위와 토압을 측정한 결과 토압 측정값의 최댓값은 약 158kPa 차이가 났으며, 변위의 경우는 침하량에서 약 0.032mm의 차이가 나타났다. 이러한 비교를 바탕으로 Type-2(하부곡선형) Cross-Beam 형태의 맞춤형 지지모듈의 성능이 더 우수한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 ‘맞춤형 지지 모듈러 시스템 개발’ 과제의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## References

1. Cho, H. S., Lee, H. and Kim, Y. C. (2014), 2011, 2012 traffic congestion costs: estimation and trend analysis, Occasional study 2014-01, KOREA TRANSPORT INSTITUTE, pp. 62~76 (In Korea).
2. Kim, Y. B., Song, J. J. and Kim, D. G. (2012), Sustainable-Perpetual-Modular (SPM) road system development, KICT 2013-185-1, Korea Institute of Construction Technology, pp. 16~27 (In Korea).
3. Kim, K. H. and Lee, D. H. (2015), A study on the technology level assessment of road construction in Korea, Korean Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 16, No. 4, pp. 129~138 (In Korea).
4. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010), Korean highway bridge design code, Korea Road and Transportation Association, pp. 2.1~2.5 (In Korea).
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015), 2015 Statistical Yearbook of Land Transport Statistics, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (In Korea).
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), 2016 Road bridge and tunnel status report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (In Korea).
7. Park, H. B. (2008), Experimental Constructions of New Pavements and Pavement Repairs Using Precast Slabs (In Korea).
8. Sidney III, S., Konrath, L. and Ferragut, T. (2013), PERFORMANCE SPECIFICATIONS FOR RAPID HIGHWAY RENEWAL FINAL REPORT, TRB, SHRP2 R07.