

FWD를 이용한 동상방지층의 구조적 특성 분석

Structural Analysis of Anit-Freezing Layer using FWD

이문섭* · 김부일** · 박희문*** · 전성일****

Lee, Moon-Sup · Kim, Boo-il · Park, Hee-Mun · Jeon, Sung-il

1. 서론

국내 도로포장두께 설계는 미국에서 개발된 AASHTO 설계법, 일본에서 사용하고 있는 T_A 설계법 등을 주로 사용하고 있다. 그러나 이들 설계법은 각국의 기준에 맞추어 개발되었기 때문에 우리나라 실정에 잘 맞지 않아 설계수명이 실제 도로수명과 차이를 보이고 있다. 특히, 동결깊이의 결정에 있어 기온자료를 분석하여 만든 동결지수를 근간으로 하여 동결지수와 동결깊이의 상관관계식으로부터 동결깊이를 산정하고 있다.

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승 한다. 동토지역의 지역적 기후 조건 특성으로 국내 도로분야에서는 동결융해(Freezing and Thawing)로 인한 피해를 줄이기 위하여 도로포장구조를 설계할 때 노상이 동결하는 것을 방지하기 위하여 동상방지층(Anti-Freezing Layer)을 노상위에 별도로 설치하도록 하고 있다.

그러나 도로는 다양한 재료와 단면으로 구성된 구조물이기 때문에 계절적 및 재료 물성특성 뿐만 아니라 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력 정도를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재, 기존 동상방지층 설계법에 따르면, 동상방지층은 포장체의 구조적 적정성과는 무관하게 온도조건에 따른 동결깊이에 따라 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용하다 보니 포장설계의 부실 내지는 과다 설계의 우려가 있다.

본 연구에서는 현재까지 개발된 가장 우수한 포장 지지력 측정 장비 중 하나인 Falling Weight Deflectometer (FWD) 및 구조해석을 이용하여 동상방지층의 구조적 효과를 파악하고자 한다.

2. 시험개요

2.1 현장 시험 구간

도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치 기준 연구에서는 시험포장 구간을 국내 전 지역에 걸쳐 구축하였으며, 북부 지역과 남부 지역으로 구분하여 구축하였다. 북부 지역의 동결지수 $650^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$ 미만에 대하여 $350^{\circ}\text{C}\cdot\text{일} - 450^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$ 3개 지역과 $450^{\circ}\text{C}\cdot\text{일} - 550^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$ 3개 지역, $550^{\circ}\text{C}\cdot\text{일} - 650^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$ 3개 지역에 대하여 25 단면(철토부 9개 단면, 절성경계부 9개 단면 및 저성토부 7개 단면)을 구축하였다. 남부 지역은 동결지수 $350^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$ 미만에 대하여 $200^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$ 이하 3개 지역과 $200^{\circ}\text{C}\cdot\text{일} \sim 350^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$ 3개 지역에 대하여 16개 단면(철토부 6개 단면, 절성경계부 6개 단면 및 저성토부 4개 단면)을 구축하였다. 표 1은 현장 시험을 수행한 구간명과 해당 구간의 단면 두께를 보여주고 있다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원 · 공학석사(E-mail : truepath@kict.re.kr)
** 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사(E-mail : bikim@kict.re.kr)
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사(E-mail : hpark@kict.re.kr)
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원 · 공학석사(E-mail : jeonsi@kict.re.kr)

표 1. FWD 현장실험 구간 및 단면두께

구간 번호	구간명	표층 (cm)	중간 층 (cm)	기층 (cm)	보조 기층 두께 (cm)	동상방지층 두께 (cm)	구간 번호	구간명	표층 (cm)	중간 층 (cm)	기층 (cm)	보조 기층 두께 (cm)	동상방지층 두께 (cm)
1	양구	5	6	14	15	55	6	용인	5	6	19	30	40
2	부여	10	6	14	20	30	7	합천	10	-	15	20	25
3	안동	5	7	18	25	30	8	보성	5	7	18	37	30
4	사북	5	6	14	20	79	9	성환	5	6	16	30	40
5	수안보	5	6	10	20	54	10	진천	5	6	10	20	50

2.2 FWD 시험

FWD 시험은 각각의 포장단면에 대한 구조적 성능을 평가하기 위해 수행되었다. FWD 시험을 통해 각 위치별 표면 처짐량 데이터를 수집하였고, 역산 해석 프로그램 'EVERCAL 5.0'을 이용하여 각 층의 탄성계수를 추정하여 비교하였다. 재하중은 4ton, 8ton, 12ton으로 하였으며, 각각의 포장단면별 전국 10개 현장에 대하여 보조기층면에서 FWD 시험을 수행하였으며, 그림 1은 시험포장구간의 단면 및 FWD 실험 위치를 보여주고 있다. 각각의 단면은 동방방지층이 있는 구간과 없는 구간으로 구분하여 계측센서를 기준으로 양쪽 2m 구간에서 실험을 수행하였다.

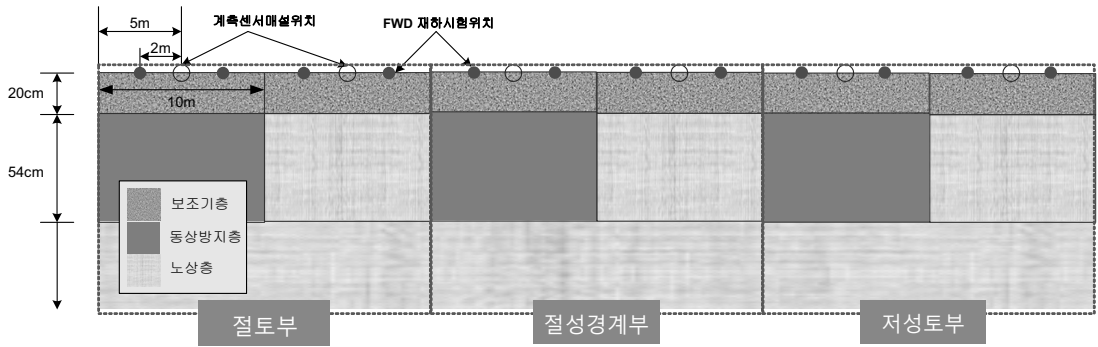


그림 1. 시험포장 구간(예)

3. FWD 시험결과

그림 2와 그림 3은 10개 현장 중 2개 현장에 대하여 FWD 시험을 통해 측정된 처짐량 데이터 추이를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 동상방지층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 처짐량이 작게 측정되어 동상방지층이 포장체에서 구조적 역할을 담당하는 것으로 나타났다. 특히 절토부에서 동상방지층이 있는 경우에 처짐량 값이 약 34~63% 정도 감소하며, 절성경계부에서 동상방지층이 있는 경우에 처짐량 값이 약 39~52% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

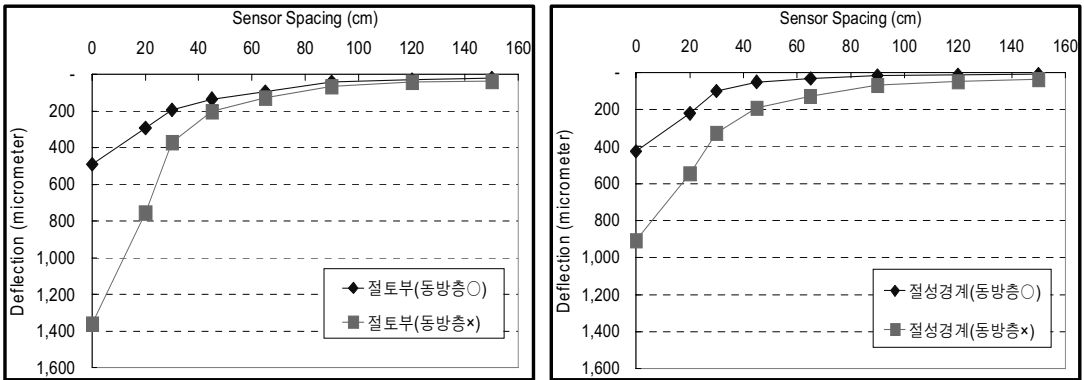


그림 2. FWD 처짐량 데이터 비교 (안동)

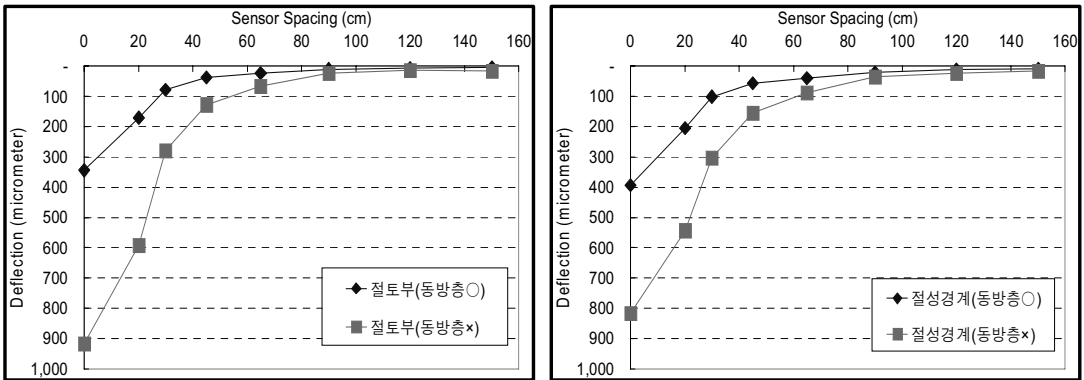
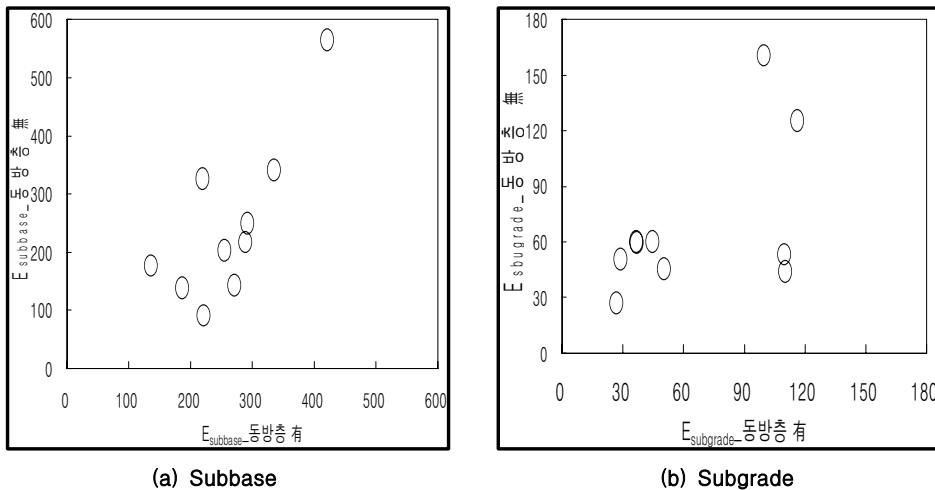


그림 3. FWD 처짐량 데이터 비교 (수안보)



(a) Subbase

(b) Subgrade

그림 4. 동상방지층 유·무에 따른 탄성계수 변화

그림 4는 10개 현장에 대하여 동상방지층 유·무에 따른 보조기층 및 노상의 탄성계수의 변화를 보여주고 있다. 동상방지층 유·무에 따른 처짐량의 차이는 크게 나타나지만, 역산을 통해 추정된 포장층의 탄성계수는 유사하게 나타났다.



4. 구조해석 결과

현재의 포장설계법에서는 동결심도를 고려하여 동상방지층을 포함시키더라도 포장층 두께에는 영향을 미치지 않고 동상방지층만 보조기층과 노상 사이에 추가로 삽입하고 있다. 하지만 현장 실험결과 동상방지층은 일정부분 구조적인 역할을 담당하는 것으로 나타났다. 따라서 동상방지층이 포장층 전체에서 얼마만큼의 구조적인 역할을 하는지 확인하기위해, 동상방지층을 포함하는 포장층과 포함하지 않는 포장층으로 구분하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석 프로그램은 한국형 포장설계법 프로그램에 적용한 다층탄성 프로그램을 사용하였다. 구조해석에 적용한 아스팔트 층의 탄성계수는 SN 설계법에서 기본 설계값으로 사용하는 대표값으로 상대강도 계수 $a_1=0.157$, $a_2=0.110$ 에 대응하는 탄성계수를 사용하였다. 보조기층 및 동상방지층, 노상의 탄성계수는 FWD 시험값을 역산하여 나온 탄성계수를 적용하였으며(<표 2>), 아스팔트 포장층의 두께는 설계서에 제시한 두께를 적용하였다(<표 1>).

표 2. 구조해석에 사용한 탄성계수

(단위 : MPa)

구간 번호	구간명	동상방지층 有		동상방지층 無		구간 번호	구간명	동상방지층 有		동상방지층 無	
		보조 기층	노상	보조 기층	노상			보조 기층	노상	보조 기층	노상
절토부											
1	부여	221.8	40.6	109.7	29.5	5	합천	153.9	170.5	139.7	53.5
2	안동	277.1	60.9	99.2	39.9	6	보성	233.9	48.3	205.5	63.6
3	수안보	310.4	1294	207.2	48.3	7	진천	292.4	85.5	157.2	124.0
4	용인	211.0	25.8	143.4	34.7						
절성경계부											
1	양구	317.9	57.8	404.0	73.9	5	합천	264.2	70.8	137.0	80.2
2	부여	185.0	39.1	186.9	29.3	6	보성	263.1	35.4	226.1	45.1
3	안동	266.6	51.1	174.0	51.8	7	진천	311.3	179.1	280.9	126.8
4	수안보	283.3	94.6	258.5	54.6						
성토부											
1	안동	269.0	104.5	189.2	57.9	3	보성	376.5	49.8	321.4	72.6
2	수안보	269.0	104.5	1892	57.9	4	성환	317.9	59.6	377.4	64.8
* E1 = 2,452 MPa (표층, 중간층)											
** E2 = 1,765 MPa (기층)											

표면 처짐량을 통하여 산정될 수 있는 지수는 포장체의 구조적인 특성을 평가하기위해 사용된다. 표면 처짐량 지수로는 AREA, D0, D1524, BCI, SCI, BDI 등이 사용된다. 여기서 SCI는 Surface Curvature Index의 약자로서 상부층과 보조기층을 대표하는 지수로서 표면곡률계수라고 하기도하며, SCI 지수는 크면 클수록 표면 처짐량이 크다는 것을 나타낸다. SCI 지수는 <식 1>을 이용하여 구할 수 있다. 이에 본 연구에서는 동상방지층의 유무에 따른 포장층의 변화를 보기위하여 SCI 지수를 이용하였다(DeBruin et al., 2002). 표 3은 구조해석 결과로 나온 SCI 지수의 값을 보여주고 있으며, SCI 지수는 동상방지층이 없는 포장층이 동상방지층이 있는 포장층에 비하여 크게 나타났다.

그림 5는 <식 2>를 이용하여 계산한 동상방지층 유무에 따른 SCI Ratio를 보여주고 있다. SCI Ratio는 전체 포장체의 구조적인 능력에 대한 동상방지층의 구조적인 능력에 대한 동상방지층의 구조적인 효과의 비를 나타낸다. 따라서 SCI Ratio가 클수록 동상방지층의 구조적인 효과가 큼을 의미한다. 또한, 그림에서 보듯이 동상방지층의 두께가 증가할수록 4.9%~23.3%까지 SCI Ratio가 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 동상방지층의 두께가 60cm 정도로 매우 큰 경우 동상방지층의 구조적인 능력은 전체 포장체의 구조적인 능력의 약 25%에 해당함을 보여준다. 따라서, 현재 포장설계법에서 무시되고 있는 동상방지층의 구조적인 효과를 반드시 고려되어야 한다고 판단된다.

$$SCI = D0 - D30 \quad \text{<식 1>}$$

여기서, D0 = 재하판 중심의 처짐

D30 = 재하판으로부터 30cm 떨어진 지점의 처짐

$$SCI \text{ Ratio } (\%) = \frac{SCI - SCI^*}{SCI} \times 100 \quad \text{<식 2>}$$

여기서, SCI = 동상방지층이 없는 구간의 SCI

SCI* = 동상방지층이 있는 구간의 SCI

표 3. SCI 지수

구간 번호	구간명	동상방지층 有 (SCI*)	동상방지층 無 (SCI)	구간 번호	구간명	동상방지층 有 (SCI*)	동상방지층 無 (SCI)
절토부							
1	부여	0.005500	0.006443	5	합천	0.006752	0.007576
2	안동	0.005485	0.006555	6	보성	0.005510	0.005793
3	수안보	0.006617	0.008622	7	진천	0.006775	0.008079
4	용인	0.005625	0.006358				
절성경계부							
1	양구	0.005892	0.006538	5	합천	0.006377	0.007294
2	부여	0.005652	0.006190	6	보성	0.005390	0.005822
3	안동	0.005540	0.006169	7	진천	0.006563	0.007307
4	수안보	0.006819	0.008166				
성토부							
1	안동	0.005569	0.006275	3	보성	0.005093	0.005446
2	수안보	0.006904	0.008574	4	성환	0.005616	0.005909

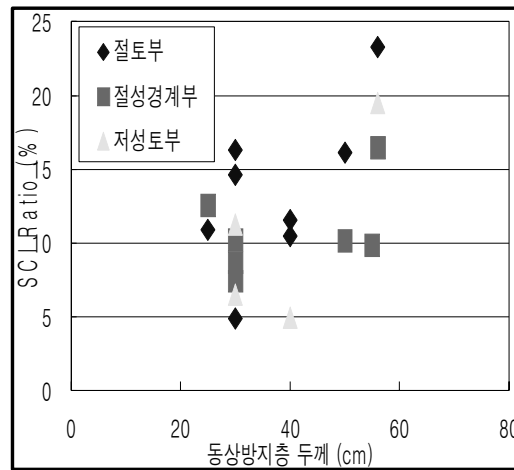


그림 5. SCI Ratio

5. 결론

본 연구에서는 FWD를 이용하여 동상방지층의 구조적 평가를 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 보조기층면에서 FWD 시험을 수행한 결과 동상방지층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 처짐량이 작게 측정되어 동상방지층이 포장체에서 구조적 역할을 담당하는 것으로 나타났다.

나. SCI 지수를 이용하여 동상방지층 유무에 따른 효과를 분석할 결과, 동상방지층이 포장체에 구조적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며 동상방지층의 두께가 증가함에 대한 전체 포장체의 구조적인 능력에 대하여 약 25% 수준의 구조적인 능력을 보여줌을 알 수 있었다.

다. 이와 같은 결과는 보조기층면에서 수행한 FWD 시험 결과이며, 향후 아스팔트 포장면에서 FWD 시험을 통해 동상방지층의 구조적 효과를 평가할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 ‘도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치기준 연구’의 연구수행 결과입니다.

참고 문헌

1. Irwin, L.(2002). "Backcalculation:An overview and perspective." Proc., Workshop 3, 6th int. Conf. on Bearing Capacity of roads, Railways and Airfields, Lisbon, Portugal.
2. A Loizos, G Boukovalas, A Karlaftis, "Dynamic Stiffness Modulus for Pavement Subgrade Evaluation", Journal of Transportation Engineering 129, 434 (2003).
3. DeBruin, P. W., Visser, Alex T., and Jordan, Gerrit J.(2002), "Modeling theChanges in Pavement Layers During Rehabilitation and the Effect of These Changes on the Structural Capacity", 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. New York, NY.
4. 국토해양부(2009), "도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치기준 연구"