

Falling Weight Deflectometer를 이용한 동상방지층의 구조적 특성 분석

Structural assessment of Anti-Freezing Layer with use of Falling Weight Deflectometer Deflection

이 문 섭 Lee, Moon-Sup	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원 · 공학석사 (E-mail : truepath@kict.re.kr)
김 부 일 Kim, Boo-il	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 · 공학박사 (E-mail : bikim@kict.re.kr)
전 성 일 Jeon, Sung-il	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원 · 공학석사 (E-mail : jeonsi@kict.re.kr)
박 희 문 Park, Hee-Mun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 · 공학박사 (E-mail : hpark@kict.re.kr)

ABSTRACT

Until now, the thickness design of anti-freezing layer has been empirically conducted using the frost depth determined from the freezing index. This approach cannot consider the structural properties of anti-freezing layer, which can cause the over-design of pavement structure. This paper presents results of structural evaluation of anti-freezing layer using the Falling Weight Deflectometer (FWD) deflections. The FWD testing was directly conducted on top of the subbase layer located at the embankment, cutting, and boundary area of each section. It is observed from this testing that the center deflections of pavement structure with anti-freezing layer are smaller than those without anti-freezing layer. The deflection reduction rates are 15~55% in the embankment, 11~64% in the cutting, and 2~38% in the boundary, respectively. It was also found that the use of anti-freezing layer enables to reduce the Surface Curvature Index (SCI) values up to 24 percent. Fatigue lives show that pavement structure with anti-freezing layer are about two times higher than the those without anti-freezing layer. This fact indicates that the anti-freezing layer should be considered as a structural layer in the asphalt pavement system.

KEYWORDS

anti-freezing, FWD, deflection

요지

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 과다설계의 우려가 있다. 이에 본 논문은 2m 이하 저성토부, 절토부 및 절성경계부 등을 구분하여 포장 하부층에서 동상방지층의 구조적 역할을 규명하기 위하여 Falling Weight Deflectometer(FWD) 시험을 수행하였다. 전국 10개 현장에 대하여 보조기층면에서 FWD 시험을 수행하였다. 각각의 단면은 동상방지층이 있는 구간과 없는 구간으로 구분하여 시험을 수행하였다. 이번 현장 시험을 통하여 동상방지층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 처짐량이 작게 측정되어 동상방지층이 포장체에서 구조적 역할을 담당하는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 절토부에서 동상방지층이 있는 경우에 처짐량 값이 약 15~55% 정도 감소하며, 절성경계부에서 동상방지층이 있는 경우에 처짐량 값이 약 11~64%, 저성토부의 경우 약 2~38%정도 감소하는 것으로 나타났다. SCI를 이용하여 분석한 결과, 동상방지층의 두께가 전체 포장체의 구조적인 능력에 약 24% 차지하는 것으로 나타났다. 피로수명은 동상방지층이 있는 구간이 없는 구간에 비해 약 2배 높은 결과를 보여 피로균열 저항성을 증진시키는 것으로 나타났다. 이것은 동상방지층이 포장체에서 구조적인 역할을 한다는 의미이다.

핵심용어

동상방지층, FWD, 처짐량

1. 서론

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승한다. 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 물성특성뿐만 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 과다설계의 우려가 있다.

기존의 도로 동결과 관련된 연구는 주로 동결깊이를 산정하고 동상을 저감시키는 공법 개발 위주로 수행되어 왔다. 반면, 동상방지층의 지지력 등 포장의 공용성을 고려한 연구는 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 동상에 따른 포장 하부 지지력 변화를 현재까지 개발된 가장 우수한 포장 지지력 측정 장비 중 하나인 Falling Weight Deflectometer (FWD)를 통해 조사·분석하고 이를 통해 동상으로 인한 도로포장의 구조적 효과를 평가하는데 있다. 이와 같은 연구를 통해 궁극적으로는 동상 방지층의 구조적 효과분석을 통해 보다 합리적이고 효과적인 도로포장 설계기법 개발이 가능할 것으로 판단된다.

현재까지 연구는 포장 하부구조인 보조기층에서 FWD 시험이 완료되었다. 이에 본 논문에서는 보조기층에서의 처짐량 및 처짐계수, 피로수명 등을 이용하여 동상방지층 유·무에 따른 구조적 효과를 분석하였다.

2. 시험개요

본 연구는 비파괴 방법으로 포장의 지지력을 분석할 수 있는 FWD를 이용하여 동상방지층 유·무에 따른 포장의 지지력 변화를 분석하여 동상방지층의 구조적 효과를 분석하는데 있다. 이에 아래와 같이 현장 시험구간을 선정하여 1단계로 각 구간별 보조기층면에서 FWD 시험을 수행하여 포장 하부구조의 지지력을 평가하였다. 2단계는 포장층까지 시공 완료 후 계절변화에 따른 동상방지층의 구조적 효과를 분석할 예정이다. 현재까지 1단계 보조기층까지 시험을 마무리하였으며, 그림 1과 같은 절차에 따라 결과를 분석하였다.

보조기층에서의 FWD 데이터를 이용하여 각 구간의 처짐량을 비교하고, 처짐량을 이용하여 탄성계수 역산을 수행하였다. 또한, 포장층이 시공된 상태에서 동상방지층의 지지력 및 구조적 효과를 보기 위하여, 각 구간의 포장층에 사용되는 혼합물을 동일하다고 가정하였다. 포장층의 두께는 각 현장의 실시설계 보고서의 포장설계편에 나와 있는 두께를 적용하여 구조해석 및 피로수명을 예측하였다. 구조해석은 동상방지층 유·무에 따른 지지력을 보기위하여 수행하였으며, 지지력 차이에 따른 포장 구조의 피로수명을 예측 하였다. 이와 같은 보조기층에서의 FWD 분석 결과는 향후 포장층에서의 FWD 시험과 비교·분석하여 보다 정확한 포장층의 지지력 평가를 위해 사용될 것이다.

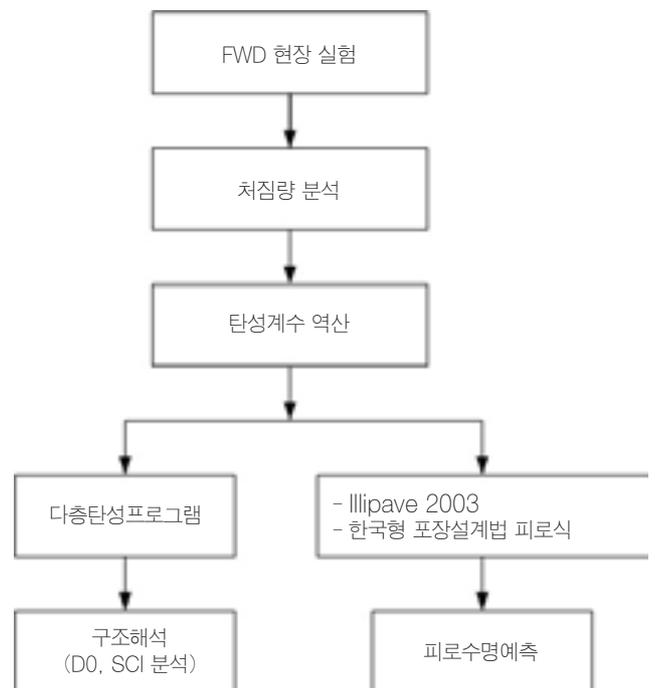


그림 1. FWD 데이터를 이용한 분석 절차

2.1. 현장 시험 구간

도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치 기준 연구에서는 시험포장 구간을 국내 전지역에 걸쳐 북부지역과 남부지역으로 구분하여 구축하였다.

북부지역의 동결지수 650℃·일 미만에 대하여 350℃·일~450℃·일 3개 지역과 450℃·일~550℃·일 3개 지역, 550℃·일~650℃·일 3개 지역에 대하여 25 단면(절토부 9개 단면, 절성경계부 9개 단면 및 저성토부 7개 단면)을 구축하였다. 남부 지역은 동결지수 350℃·일 미만에 대하여 200℃·일 이하 3개 지역과 200℃·일~350℃·일 3개 지역에 대하여 16개 단면(절토부 6개 단면, 절성경계부 6개 단면 및 저성토부 4개 단면)을 구축하였다. 표 1은 현장 시험을 수행한 구간명과

해당 구간의 단면 두께를 보여주고 있다. 시험포장 구간의 아스팔트 층의 두께는 21~30cm, 보조기층의 두께는 15~37cm로 나타났다. 동상방지층의 두께는 일반적으로 26~55cm 정도로 적용하는 것으로 나타났으며, 동결지수가 가장 크게 나타나는 사북의 경우에는 79cm까지 적용하는 것을 볼 수 있다.

표 1. FWD 현장시험 구간 및 단면두께

구간 번호	구간명	표층 (cm)	중간층 (cm)	기층 (cm)	보조기층 두께 (cm)	동상방지층 두께 (cm)	구간 번호	구간명	표층 (cm)	중간층 (cm)	기층 (cm)	보조기층 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. 재하하중은 4ton, 8ton, 12ton으로 하였으며, 각각의 포장단면별 전국 10개 현장에 대하여 보조기층면에서 FWD 시험을 수행하였으며, 그림 2는 시험포장구간의 단면 및 FWD 시험 위치를 보여주고 있다. 각각의 단면은 동상방지층이 있는 구간과 없는 구간으로 구분하여 계측센서를 기준으로 양쪽 2m 구간에서 시험을 수행하였다. 그림 3은 FWD 시험 장비의 형상을 보여주고 있다.

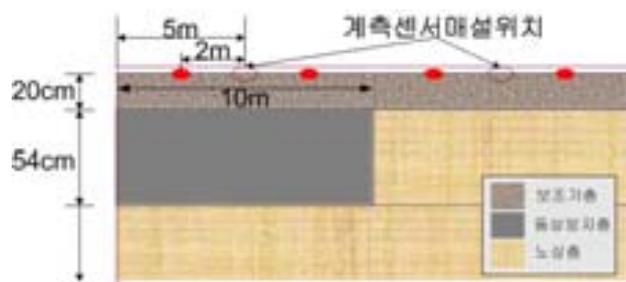


그림 2. 시험포장 구간의 예

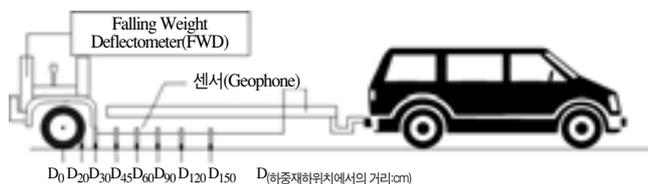
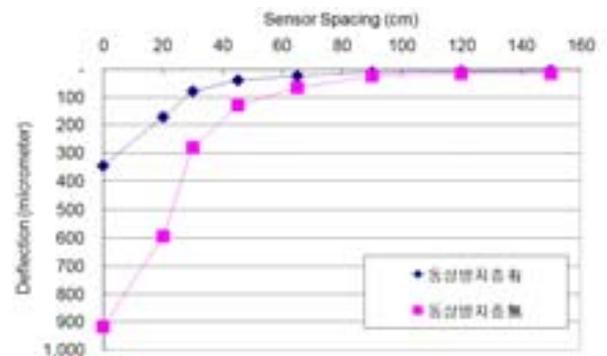


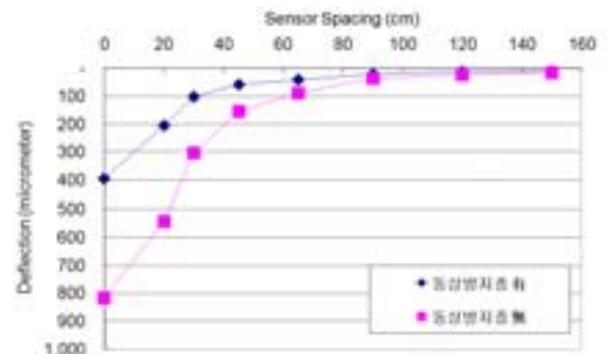
그림 3. FWD 장비 형상

3. FWD 시험결과

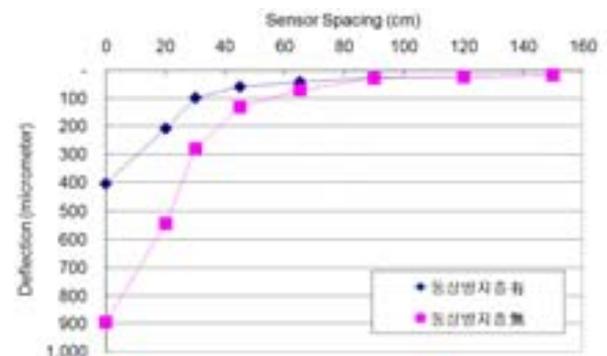
그림 4와 그림 5는 10개 현장 중 수안보와 안동 현장에 대하여 FWD 시험을 통해 측정된 처짐량 데이터 추이를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 동상방지층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 처짐량이 작게 측정되어 동상방지층이 포장체에서 구조적 역할을 담당하는 것으로 나타났다. 특히 절토부에서 동상방지층이 있는 경우에 처짐량 값이 약 11.2~63.9% 정도 감소하며, 절성경계부에서 동상방지층이 있는 경우에 처짐량 값이 약 2.0~38.1% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 성토부의 경우에는 동상방지층이 있는 경우 처짐량 값이 약 15.2~54.8% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 표 2~표 4는 전체 현장에 대한 처짐량 데이터를 보여주고 있다.



(a) 절토부

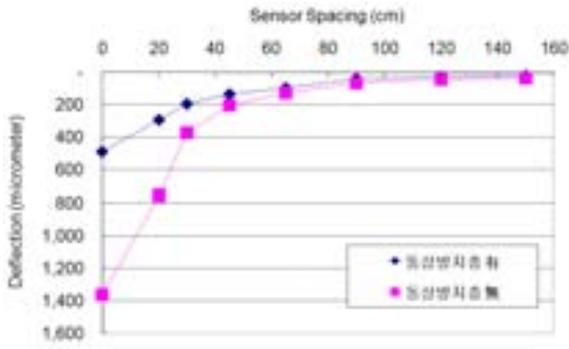


(b) 절성경계부

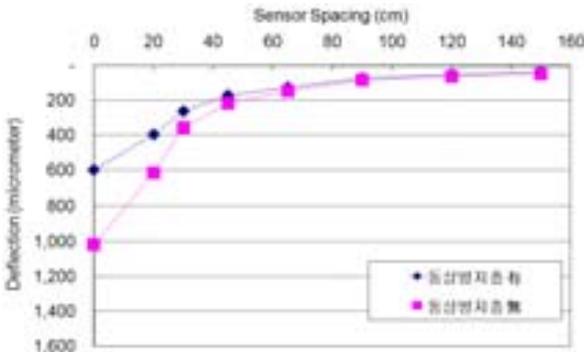


(c) 성토부

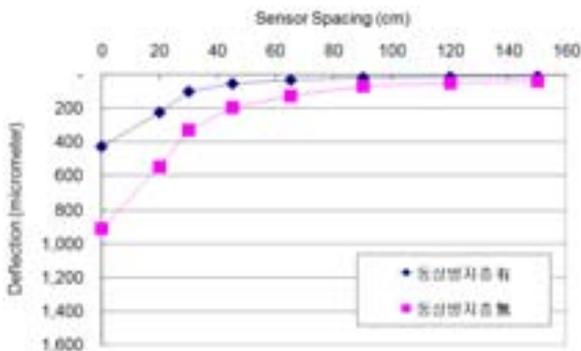
그림 4. FWD 처짐량 데이터 비교(수안보)



(a) 절토부



(b) 절성경계부



(c) 성토부

그림 5. FWD 처짐량 데이터 비교(안동)

표 2. FWD 처짐량 데이터(절토부)

(단위 : μm)

현장	센서	Sensor Spacing(cm)							
		0	20	30	45	65	90	120	150
용인	동상방지층 有	712	460	236	131	81	40	27	16
	동상방지층 無	1083	680	346	168	104	42	29	20
사북	동상방지층 有	411	243	93	33	14	8	7	6
	동상방지층 無	464	282	164	85	43	11	6	5
수안보	동상방지층 有	310	146	52	25	16	13	9	4
	동상방지층 無	928	570	256	123	66	26	16	10
진천	동상방지층 有	607	421	328	253	209	154	118	91
	동상방지층 無	960	652	444	284	203	127	87	66

(표 계속)

표 4. FWD 처짐량 데이터(성토부)

(단위 : μm)

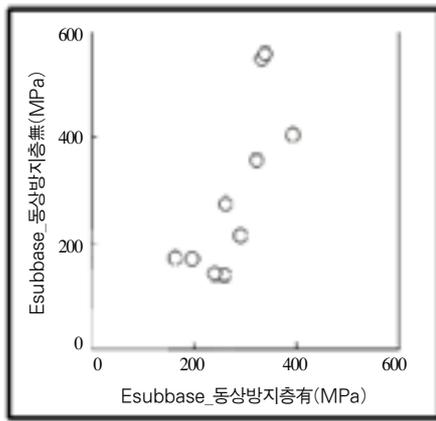
현장	센서	Sensor Spacing(cm)							
		0	20	30	45	65	90	120	150
수안보	동상방지층 有	549	284	121	59	37	23	20	16
	동상방지층 無	863	490	235	111	65	27	37	15
성환	동상방지층 有	646	386	261	166	114	64	42	31
	동상방지층 無	830	567	366	225	153	82	55	42
보성	동상방지층 有	428	277	151	93	62	32	22	17
	동상방지층 無	505	321	190	111	72	35	24	18
안동	동상방지층 有	597	394	262	169	123	71	50	38
	동상방지층 無	1016	613	356	215	147	84	62	46

성환	동상방지층 有	836	596	424	302	235	162	121	95
	동상방지층 無	941	657	486	351	266	167	114	84
합천	동상방지층 有	499	198	82	25	8	6	4	2
	동상방지층 無	1101	618	309	98	11	8	7	4
보성	동상방지층 有	574	335	165	90	53	18	10	6
	동상방지층 無	678	393	188	96	52	16	8	6
안동	동상방지층 有	490	292	194	134	95	41	28	19
	동상방지층 無	1359	754	372	203	126	67	42	37
부여	동상방지층 有	704	444	336	273	208	130	95	71
	동상방지층 無	1808	1111	648	383	264	140	101	72

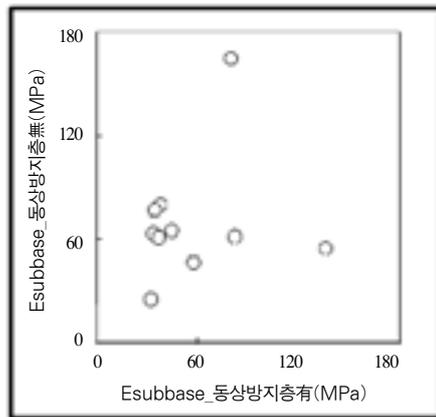
표 3. FWD 처짐량 데이터(절성경계부)

(단위 : μm)

현장	센서	Sensor Spacing(cm)							
		0	20	30	45	65	90	120	150
양구	동상방지층 有	509	303	175	118	87	53	45	32
	동상방지층 無	748	478	336	238	189	115	79	59
사북	동상방지층 有	953	602	293	188	134	74	52	40
	동상방지층 無	972	590	269	172	131	86	67	47
수안보	동상방지층 有	306	129	55	30	19	9	6	4
	동상방지층 無	1005	643	331	165	91	33	23	18
진천	동상방지층 有	600	384	229	142	98	52	37	16
	동상방지층 無	749	485	247	121	66	30	22	18
합천	동상방지층 有	907	552	381	252	176	100	75	60
	동상방지층 無	1465	1005	606	355	235	108	69	52
보성	동상방지층 有	563	347	214	139	101	61	45	33
	동상방지층 無	907	546	328	193	127	68	50	37
안동	동상방지층 有	428	222	101	51	32	17	13	9
	동상방지층 無	907	546	328	193	127	68	50	37
부여	동상방지층 有	346	170	82	42	25	14	11	9
	동상방지층 無	454	300	110	40	19	11	8	7



(a) Subbase



(b) Subgrade

그림 6. 동상방지층 유·무에 따른 탄성계수 변화

치짐량 데이터는 역산 프로그램 'EVERCAL 5.0'을 이용하여 보조기층 및 노상의 탄성계수를 계산하였다. 역산은 기본적으로 동상방지층 유·무에 상관없이 2개층으로 간주하고 수행하였다. 이는 동상방지층의 재료와 보조기층의 재료가 대부분의 현장에서 동일한 재료를 사용하기 때문에 역산을 통하여 탄성계수의 차이를 구분할 수 없기 때문이다.

그림 7은 Illipave 2003을 이용하여 보조기층면에서의 구조해석 결과의 예를 보여주고 있다. 그림은 양구지역에 포장 두께를 적용하였으며, 보조기층면에 4ton의 하중이 가해졌을 때 응력이 어떻게 분포되는지를 보여주고 있다. 응력 분포가 약 7.58inch(약 20cm)까지 전달되는 것을 볼 수 있다. 이러한 응력분포는 FWD 센서의 D1까지의 거리와 동일한 것을 알 수 있다. 따라서 보조기층면에서의 FWD 시험은 D0와 D1센서만으로도 포장층의 특성을 분석할 수 있다는 것이다. 이에 본 연구에서는 D0와 D1센서 2개만을 이용하여 역산을 수행하였다.

그림 6은 10개 현장에 대하여 동상방지층 유·무에 따른 보조기층 및 노상의 탄성계수의 변화를 보여주고 있다. 동상방

지층 유·무에 따른 치짐량의 차이는 크게 나타나지만, 역산을 통해 추정된 포장층의 탄성계수는 일정한 경향을 보여주고 있다. 탄성계수는 치짐계수 및 피로수명을 분석하기 위한 기초자료로 사용되며, 포장층의 FWD 시험 결과로 얻어지는 탄성계수와 비교하여 정확한 포장하부 구조의 지지력을 평가하는데 사용될 것이다.

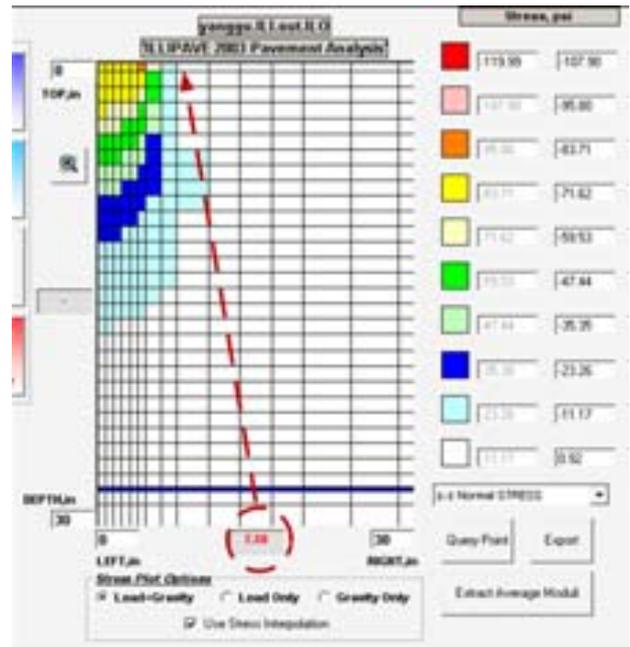


그림 7. 구조해석을 이용한 포장층 응력 변화(양구)

4. 동상방지층 유·무에 따른 치짐계수의 변화

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 확인하기 위해, 동상방지층을 포함하는 포장층과 포함하지 않는 포장층으로 구분하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석 프로그램은 한국형 포장설계법 프로그램에 적용한 다층탄성 프로그램을 사용하였다. 구조해석에 적용한 아스팔트 층의 탄성계수는 도로설계 편람에서 기본설계시 사용하는 물성값으로 상대강도 계수 $a_1=0.157(2,452\text{MPa})$, $a_2=0.110(1,765\text{MPa})$ 에 대응하는 탄성계수를 사용하였다. 보조기층 및 동상방지층, 노상의 탄성계수는 FWD 시험값을 역산하여 나온 탄성계수를 적용하였으며(표 5), 아스팔트 포장층의 두께는 설계도면에 나와 있는 두께를 적용하였다(표 1).

표 5. 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	129.4	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	266.9	38.1	157.1	46.3	3	보성	376.5	49.8	321.4	72.6
2	수안보	269.0	104.5	189.2	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 평가하기 위해 사용된다. 표면 처짐량 지수로 AREA, D0, D1524, BCI, SCI, BDI 등이 사용된다. D0는 재하판 중심에서의 처짐량을 말하며, D0 Ratio는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다. 그리고 SCI는 Surface Curvature Index의 약자로서 상부층과 보조기층을 대표하는 지수로서 표층곡률지수라고 하기도하며, SCI 지수는 크면 클수록 포장층의 처짐량이 크다는 것을 나타낸다. SCI 지수는 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 이에 본 연구에서는 동상방지층의 유무에 따른 포장층의 변화를 보기 위하여 D0와 SCI 지수를 이용하였다(DeBruin et al., 2002).

D0 Ratio는 표 2~표 5의 FWD 처짐량 데이터 중에서 재하판에서의 처짐량 데이터를 이용하여 식 (1)로 구할 수 있으며, 그 결과값을 그림 8에서 보여주고 있다. D0 Ratio는 포장층에 대한 표층의 처짐량 비를 가지고 전체 포장체에서 동상방지층 유무에 따른 구조적인 효과의 비를 나타낸다. D0 Ratio가 클수록 동상방지층의 구조적인 효과가 크다는 것을 의미하며, 그림 8에서 보듯이 동상방지층의 두께가 증가할수록 약 1.1~55.2%까지 D0 Ratio가 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기서, 동상방지층의 두께가 증가할수록 D0 Ratio가 증가한다는 의미는 포장층 전체의 구조적 효과에서 동상방지층이 큰 부분을 차지한다는 것을 말한다.

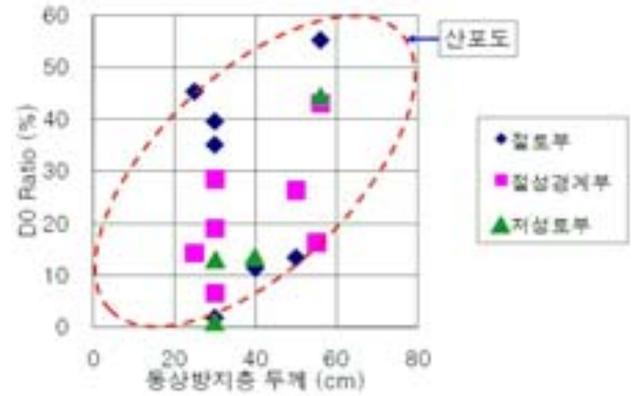


그림 8. 동상방지층 두께에 따른 D0 Ratio 변화

$$D0 \text{ Ratio}(\%) = \frac{D0 - D0^*}{D0} \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

여기서, D0 = 동상방지층이 없는 구간의 D0

D0* = 동상방지층이 있는 구간의 D0

표 6은 구조해석 결과로 나온 SCI 지수의 값을 보여주고 있으며, SCI 지수는 동상방지층이 없는 포장층이 동상방지층이 있는 포장층에 비하여 크게 나타났다. 그림 9는 식 (3)을 이용하여 계산한 동상방지층 유무에 따른 SCI Ratio를 보여주고 있다. SCI Ratio는 전체 포장체의 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 고려해야 한다고 판단된다.

동상방지층의 유무에 따른 도로 포장 구조체의 구조적 효과를 보기 위하여 D0 Ratio와 SCI Ratio를 가지고 비교를 하였다. D0 Ratio와 SCI Ratio는 모두 동상방지층이 구조적 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 하지만, 그림 8과 그림 9의 산포도를 보면 그림 9의 SCI Ratio가 작은 것을 볼 수 있다. 산포도는 자료의 흩어진 정도를 보는 것으로 SCI Ratio가 도로 포장의 구조적 효과를 보는데 더 좋은 지수임을 보여주고 있다.

$$SCI = D0 - D30 \quad \text{식 (2)}$$

여기서, D0 = 재하판 중심의 처짐

D30 = 재하판으로부터 30cm 떨어진 지점의 처짐

$$SCI \text{ Ratio}(\%) = \frac{SCI - SCI^*}{SCI} \times 100 \quad \text{식 (3)}$$

여기서, SCI = 동상방지층이 없는 구간의 SCI
 SCI^* = 동상방지층이 있는 구간의 SCI

표 6. 동상방지층 구간별 SCI 지수

(단위 : μm)

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

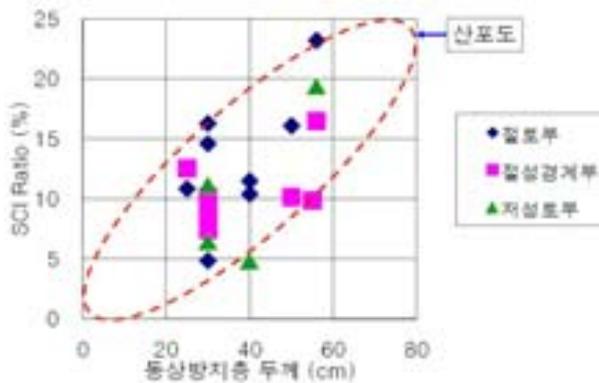


그림 9. 동상방지층 두께에 따른 SCI Ratio 변화

5. 피로수명예측 결과

현장 실험결과 동상방지층은 일정부분 구조적인 역할을 담당하는 것으로 나타났으며, 현장 실험 결과를 이용한 구조해석 결과에서도 동상방지층 두께가 증가할수록 구조적 효과도 크게 나타나는 것으로 나타났다. 이와 같은 동상방지층 유무에 따른 구조적 효과가 포장 수명에는 얼마만큼의 영향을 미치는지 알아보기 위하여 피로수명 예측을 수행하였다. 피로수명 예측에 사용한 식은 한국형 포장설계법에서 개발한 식

을 사용하였으며, 식 (4)에서 보여주고 있다. 식 (4)의 아스팔트층 하단의 수평인장 변형률은 Illipave 2003을 이용하여 계산하였으며, 기타 다른 입력 변수들은 동상방지층 유·무를 제외한 모든 변수에 대하여 영향을 받지 않게 하기 위하여 한 가지로 가정하여 계산하였다. 표 7은 피로수명 예측에 사용된 입력 변수를 보여주고 있다. 피로수명 예측에 사용된 입력 변수들은 한국형 포장설계법 프로그램에 적용한 19mm 밀입도 혼합물에 대한 계수값을 적용하였다.

$$N_f = 10^M k_1 (\epsilon_t)^{k_2} (1E^*1)^{k_3} \quad \text{식 (4)}$$

여기서, N_f = 아스팔트 혼합물의 피로수명

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

V_b = 아스팔트 바인더의 체적함량(%)

V_a = 공극률(%)

ϵ_t = 아스팔트층 하단의 수평인장변형률

$1E^*1$ = 동탄성계수 (MPa)

k_1, k_2, k_3 = 회귀분석을 통하여 얻어지는 상수

표 7. 피로균열 모델의 계수값

혼합물	k_1	k_2	k_3	V_b (%)	V_a (%)	$1E^*1$
밀입도 19mm (PG 64-22)	$10^{-17.3782}$	-2.6894	3.2373	5.0	4.0	5,756

그림 10~그림 12는 시험포장 구간에 대한 피로수명을 예측한 결과를 보여주고 있다. 동상방지층이 있는 구간이 없는 구간에 비하여 절토부 구간의 경우에는 1.2~2.0배, 절성경계부 구간에서는 1.2~1.5배, 성토부 구간에서는 1.1~1.6배 높게 나타났다. 이것은 동상방지층은 구조적으로 역할을 담당하고 있으며 피로균열 저항에도 우수하다는 것을 알 수 있었다.



그림 10. 절토부 구간에 대한 피로수명 예측 결과

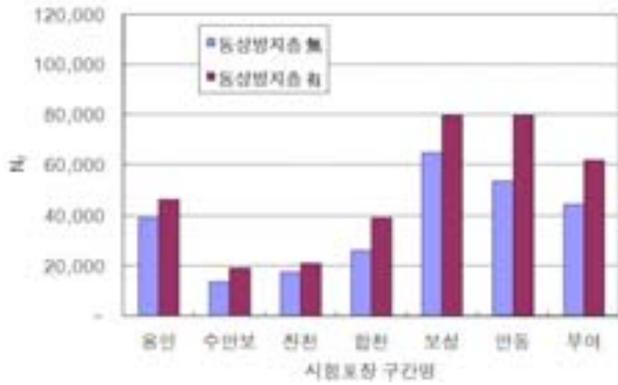


그림 11. 질성경계부 구간에 대한 피로수명 예측 결과

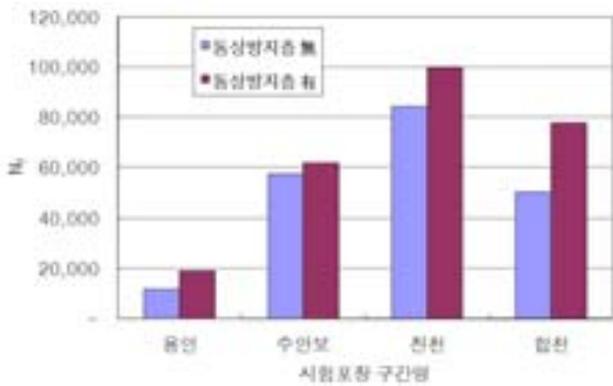


그림 12. 성토부 구간에 대한 피로수명 예측 결과

6. 결론

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

1. 보조기층면에서 FWD 시험을 수행한 결과 동상방지층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 처짐량이 작게 측정되어 동상방지층이 포장체에서 구조적 역할을 담당하는 것으로 나타났다.
2. D0와 SCI 지수를 이용하여 동상방지층 유무에 따른 효과를 분석한 결과, SCI 지수가 D0 지수에 비하여 적은 산포도를 보여 동상방지층의 효과를 분석하기에 적절한 것으로 나타났다.

3. SCI 지수를 이용하여 동상방지층 유무에 따른 효과를 분석한 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.
4. 피로수명 예측결과, 동상방지층이 있는 구간이 없는 구간에 비해 1.1~2.0배 높은 결과를 보여 피로균열 저항성을 증진시키는 것으로 나타났다.
5. 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 효용성 검증 및 설치기준 연구’의 연구수행 결과입니다.

참고 문헌

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

접 수 일 : 2010. 2. 19
 심사 일 : 2010. 2. 23
 심사완료일 : 2010. 3. 31