

노상토 함수량의 계절적 변화 예측을 위한 간편 모형

Simple Model for Predicting Seasonal Variations of Subgrade Moisture Conditions

박성완* · 황규영**

Park, Seong-Wan · Hwang, Kyu Young

1. 서론

일반적으로 온도와 함수량은 포장체의 공용성에 가장 많은 영향을 미치는 환경적인 요소들로 알려져 있다. 이중 온도는 상대적으로 포장체 상부층인 아스팔트층의 물성 변화에 영향을 많이 미치며, 반면에 함수량은 포장체 하부층인 기층, 보조기층, 및 노상토의 지지력에 영향을 많이 미친다. 따라서, 우리나라와 같이 기후가 사계절인 지역에서는 포장의 설계에 있어서 계절적인 영향의 변화를 적절하게 고려한 설계가 필요하다. 특히, 노상토의 함수량변화 특성을 고려하기 위해서는 두 가지 방식의 접근법 적용이 필요하다. 첫 번째는 노상토 종류별로 회복탄성계수(Resilient Modulus)의 계절적인 영향을 고려하는 것이고, 두 번째는 노상토의 회복탄성계수와 환경조건을 나타내는 인자들의 상관관계를 활용하는 것이다. 이때, 포장체의 설계에서는 노상토의 함수량에 대한 직접적인 고려도 필요하다. 그러나, 이러한 접근법은 매우 제한적으로 고려되고 있는 실정이다. 따라서, 계절적인 영향을 고려한 노상토의 환경영향은 함수량의 변화를 적절한 형태의 계수로 표현하여 층의 회복탄성계수와의 관계를 활용하는 것이 반드시 필요하다고 할 수 있다.

2. 국내 노상토의 함수량변화에 미치는 영향 요소

노상토의 회복탄성계수는 노상토의 동상 및 함수량의 변화에 따라 상당한 영향을 받는다. 이를 고려한 미국의 '86 AASHTO 포장설계법에서는 유효회복 탄성계수(Effective Resilient Modulus)라는 개념을 도입하여 노상토의 지지력을 평가하도록 되어 있다. 이를 국내에 합리적으로 적용하기 위하여 한국도로공사(1993)에서는 노상토의 계절별 함수량 변화 추정을 전국의 고속도로 10개 노상토에 대해 시행하였고, 측정결과 노상토의 함수량변화에 영향을 미치는 요소들을 정리하면 표 1과 같다.

여러 영향인자들 중 기상적인 인자인 강수량, 대기온도 및 풍속은 어느 정도 유의성이 있는 상관관계가 있었지만 상대습도, 일사량 및 증발량은 노상토의 함수량변화에 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 또한, 노상토의 함수량변화는 흙의 종류에 따라 상당히 영향을 받고 있고, 지역이 같을 경우 성토지에 비해 원지형 또는 절토지의 함수량이 다소 높은 경향이 나타났다.

* 단국대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · 02-799-1363 (E-mail : spark@dankook.ac.kr)

** 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 02-709-2555 (E-mail : hky21th@hanmail.net)

표 1. 노상토의 함수량변화에 영향을 미치는 요소

위 치 명	노상토 함수량변화에 영향을 미치는 요소						위 치	절성토	흙의 분류
	강수량	대기온도	상대습도	풍속	일사량	증발량			
적금 Bus Stop	×	×	×	×	△	-	영동고속도로 하행 신갈지점 58km	-	SM
기흥휴게소 입구	×	×	×	×	×	×	경부고속도로 하행 서울기점 35km	성토지	SM
기흥휴게소 출구	○	×	×	×	×	×	경부고속도로 하행 서울기점 35km	절토지	SM
추풍령휴게소	△	△	△	△	×	-	경부고속도로 상행 서울기점 215km	절토지	SP
봉산 Bus Stop	○	×	×	×	×	×	경부고속도로 상행 서울기점 220km	-	SM
경산 IC	△	△	×	×	-	-	경부고속도로 상행 서울기점 316km	성토지	SM
경산 Bus Stop	×	△	×	×	-	-	경부고속도로 하행 서울기점 317km	절토지	SM
논산IC입구	×	△	△	○	-	-	호남고속도로 하행 회덕기점 50km	성토지	SM
논산IC출구	△	△	×	○	-	-	호남고속도로 하행 회덕기점 50km	절토지	SM
이서 Bus Stop	△	△	△	○	×	-	호남고속도로 상행 회덕기점 86km	-	SW

NOTE. ○:영향관계가 많음. △:영향관계가 어느정도 있음. ×:영향관계가 없음.

3. 중부내륙고속도로 시험도로(Test Road) 노상토의 함수량 변화

3.1 시험도로의 함수량계 개요

중부내륙고속도로 시험도로(Test Road)에는 WCR(Water Content Reflectometer)형식의 함수량계가 설치되어 노상토의 함수량 변화를 10분간격으로 측정중에 있다. 함수량계는 아스팔트 포장구간에 5개소(총 39개), 콘크리트 포장구간에 3개소(총 30개)씩 본선 2차로의 노상토층에 15cm 간격으로 7~10개가 매설되어 있다. 그림 1은 시험도로 노상토의 함수량계 배치도를 나타내고 있고, 시험도로에 설치되어 있는 함수량계는 그림2와 같다.

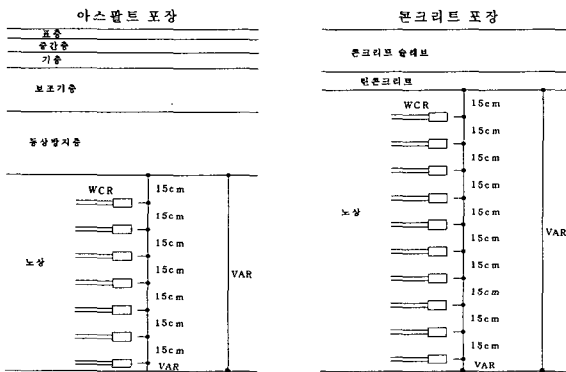


그림 1. 시험도로 노상토의 함수량계 배치도

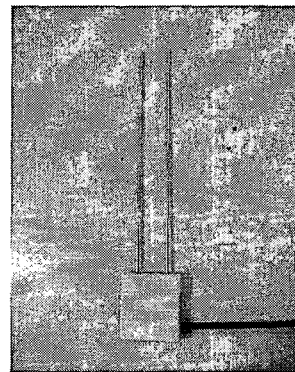
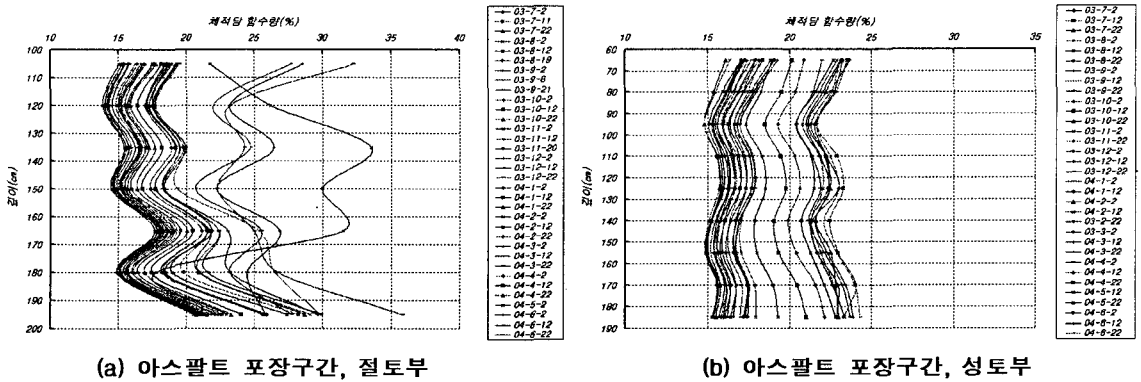


그림 2. WCR형식 함수량계

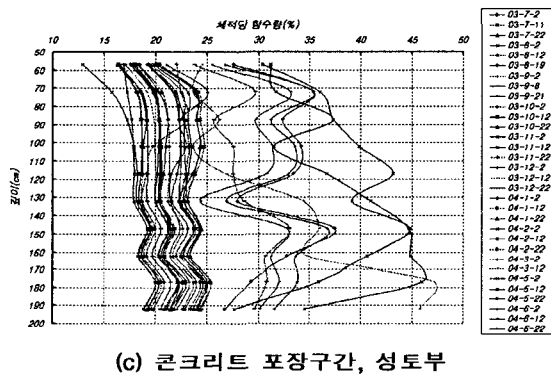
3.2 깊이에 따른 노상토의 함수량변화

아스팔트 포장의 절토부, 성토부 구간과 콘크리트 포장의 성토부 구간을 대표 단면으로 하여, 2003년 7월부터 2004년 6월까지 시험도로 노상토의 함수량계 측정결과는 그림 3과 같다.



(a) 아스팔트 포장구간, 절토부

(b) 아스팔트 포장구간, 성토부

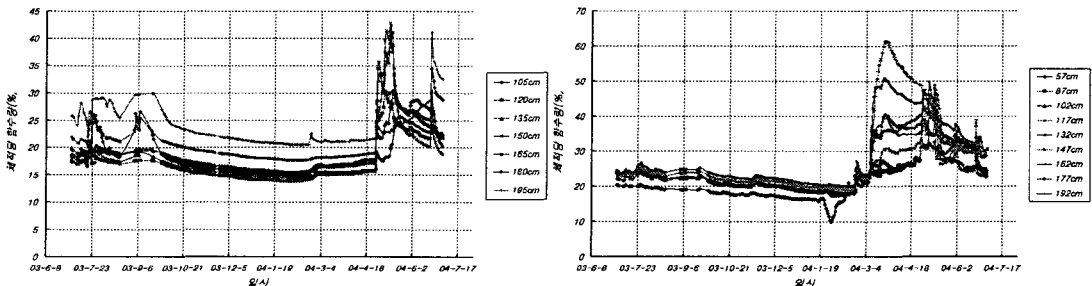


(c) 콘크리트 포장구간, 성토부

그림 3. 노상토의 깊이에 따른 체적당 함수량의 변화

현재, 시험도로에서 측정중인 WCR형태의 함수량계는 국내여건에 맞는 보정이 이루어지지 않은 상태로 설치되어 그림 3에서 처럼 다소 분산되고 일정하지 않은 결과를 보이고 있으나, 노상토의 깊이별 체적당 함수량의 연중 변화 폭은 절토부에서는 비교적 크고, 성토부에서 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 성토부 보다는 절토부에서 지하수위 등의 지형적인 영향을 상대적으로 많이 받아서 나타난 결과라 판단된다.

그림 4는 연간 노상토의 지점별 함수량의 변화를 보여주고 있는데, 2004년 4월 이후에 함수량의 변화가 매우 분산됨을 알 수 있다. 이처럼 함수량이 변화가 일정한 경향을 나타내지 않는 것은 시험도로의 교통개방 시기와 일치하여 교통하중의 영향 때문인 것으로 추정되나, 정확한 원인은 아직 알 수 없는 실정이다. 따라서, 시험도로의 WCR형태의 함수량계의 보정이 이루어진 이후의 측정 결과를 토대로 보다 신뢰성 있는 계절적인 노상토의 함수량 변화를 알 수 있으리라 판단된다.



(a) 아스팔트 포장구간, 절토부

(b) 콘크리트 포장구간, 성토부

그림 4. 노상토의 지점별 체적당 함수량의 변화

3.3 강수량에 따른 노상토의 함수량변화

그림 5에서는 강수량에 따른 노상토 함수량의 변화를 살펴보기 위해, 연중 강수량이 가장 많은 7~8월 사이의 일 누적 강수량과 노상토의 함수량 변화를 비교 분석하였다. 함수량 변화를 더 확연하게 구별하기 위하여, 노상토 함수량계의 설치위치별로 상부 TOP, 중간 MIDDLE, 아래 BOTTOM으로 구분하여 그 추세를 살펴보았다.

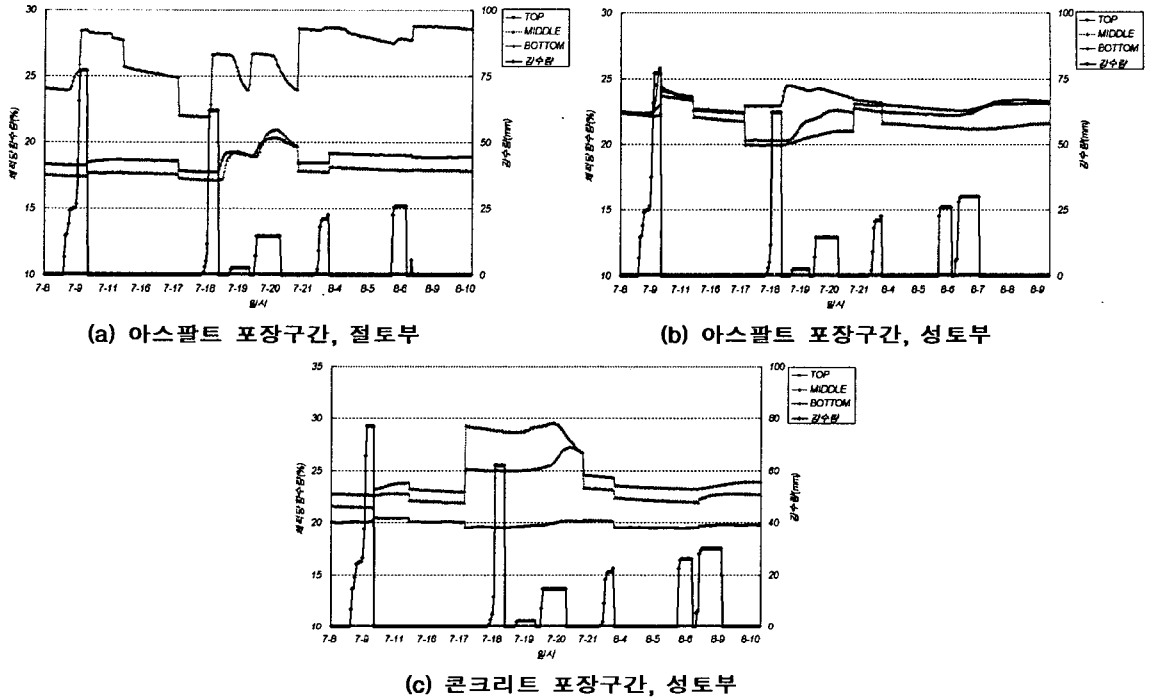
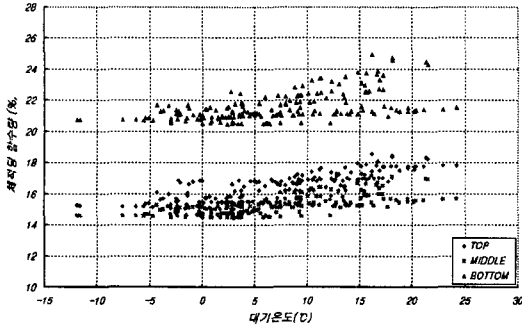


그림 5. 강수량에 따른 노상토의 체적당 함수량변화

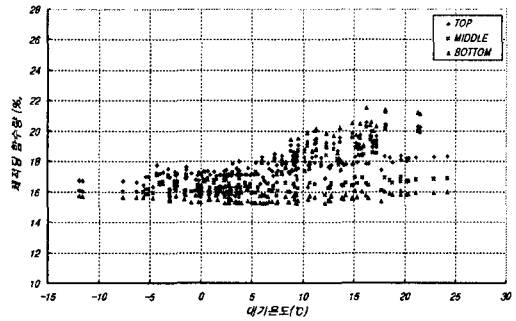
그림 5(a)에서 절토부 지점의 강수량에 따른 노상토 함수량 변화는 상관관계가 다소 있는 것으로 나타났다. 그러나, 성토부 지점인 그림 5(b)와 그림 5(c)에서는 약간의 관계가 있을 뿐, 유의성 있는 상관관계는 보이지 않았다. 이는 강수량에 따른 지하수위등의 지형적인 변화가 절토부에서 더욱 민감하기 때문인 것으로 판단된다. 강수량이 노상토의 함수량 변화에 가장 많은 영향을 미치는 기후요소이므로, 성토부에 대해서도 장기적인 계측을 통해 그 결과를 판단해야 할 것으로 사료된다.

3.4 대기온도에 따른 노상토의 함수량변화

선행 연구결과를 토대로 노상토의 계절별 함수량 변화와 대기온도의 상관관계에 대한 분석을 실시하였다. 2003년 10월 이전과 2004년 4월 이후의 시험도로 노상토 함수량변화가 일정한 경향을 나타내고 있지 않기에, 2003년 10월부터 2004년 4월까지의 자료만을 대상으로 하였다. 분석결과, 대기온도에 따른 노상토 함수량의 변화는 TOP, MIDDLE 지점에서는 약 3%, BOTTOM 지점에서는 약 4%의 변화가 있었지만, 대기온도만을 노상토의 함수량 변화에 독립적인 영향요소로 보기에는 어려움이 있다고 판단되어진다. 그림 6은 대기온도에 따른 노상토 함수량의 변화를 나타내고 있다.



(a) 아스팔트 포장구간, 절토부



(b) 아스팔트 포장구간, 성토부

그림 6. 대기온도에 따른 노상토의 체적당 함수량변화

4. 국내 노상토의 함수량 변화모델

노상토의 함수량변화는 기상요소 중 강수량, 대기온도와 풍속에 상관관계가 있으며, 흙의 종류에 따라 상당히 영향을 받고 있고, 지역이 같을 경우 성토지에 비해 원지형 또는 절토지에 영향이 더 많은 것으로 나타났다. 이 중에서 강수량, 흙의 종류, 절·성토 여부에 노상토의 함수량변화가 가장 많은 영향을 받고 있다. 그러나, 우리나라처럼 지형이 험준한 지역에서 설계시 1개 노선에서 절·성토 구간은 무수히 많이 반복되므로 절·성토 여부에 대한 노상토의 함수량변화를 고려하기에는 현실적으로 매우 어려운 일이다. 또한, 흙의 분류에 따른 노상토의 함수량변화도 제한된 범위의 측정 자료를 토대로 상관관계를 구하기 어려움이 있는바, 본 연구에서는 노상토의 함수량 변화에 가장 영향이 많은 미치는 강수량에 대한 간단한 형태의 모델을 제시하고자 하였다.

표 2는 전국의 국도 및 고속도로에서 측정한 노상토의 함수량 측정자료를 나타낸다. 현재, 국도 00호선 의정부지역의 함수량계는 당해(2004년)년도에 설치되어 1년간의 측정자료 분석이 불가능 하였으며, 중부내륙고속도로 시험도로의 측정자료는 함수량계의 보정이 이루어져야만 정확한 함수량 자료를 얻을 수 있으므로, 노상토의 함수량변화 모델을 구성하는 기본 자료로는 활용하지 않았다.

표 2. 월평균 국내 노상토의 함수량변화

함수량 위치	월평균 노상토의 함수량 (%)												연평균 함수량 (%)	연간 강수량 (mm)	절·성 토
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월			
적금 Bus Stop	10.17	10.26	10.55	10.71	10.42	10.70	10.67	10.59	10.36	10.47	10.94	10.90	10.56	1273.9	-
기흥휴게소 입구	11.05	10.98	11.30	11.67	11.29	11.73	11.60	11.56	11.29	11.27	11.74	11.60	11.42	1210.9	성토지
기흥휴게소 출구	12.41	12.51	13.40	13.30	-	-	13.51	14.25	12.37	12.48	12.98	14.19	13.14	1210.9	절토지
시험도로	8.52	8.61	10.53	11.30	12.72	11.77	11.31	10.97	11.20	9.93	9.33	8.92	10.43	1490.7	-
의정부 국도00호선	6.39	6.20	6.45	6.58	6.63	6.79	-	-	-	-	-	-	6.51	-	-
추풍령휴게소	7.72	7.76	7.97	7.94	8.35	8.17	8.52	8.72	7.76	7.89	8.19	8.34	8.11	1316.0	절토지
봉산 Bus Stop	9.20	9.15	-	9.59	9.39	9.59	9.42	9.00	9.20	8.96	9.81	9.47	9.34	1316.0	-
경산 IC	6.06	5.87	6.20	6.52	6.44	6.45	6.10	6.37	5.76	5.85	6.08	6.10	6.15	1107.3	성토지
경산 Bus Stop	6.86	6.73	7.11	7.50	7.19	7.49	7.15	7.33	6.90	6.74	7.06	7.23	7.11	1107.3	절토지
논산 IC 입구	13.62	13.60	13.96	14.42	13.90	14.49	14.68	14.98	14.51	13.67	14.38	14.12	14.19	1400.7	성토지
논산IC 출구	14.21	14.25	14.91	14.85	14.69	15.21	15.30	15.32	14.68	14.39	15.31	14.78	14.83	1400.7	절토지
이서 Bus Stop	15.02	14.88	15.22	15.85	15.33	15.97	15.64	15.31	15.12	14.85	15.83	15.45	15.37	1428.2	-



표 2를 토대로 한 그림 7은 지역별 월평균 노상토의 함수량변화를 나타내고 있다. 지역에 관계없이, 연간 노상토의 함수량 변화는 2%이하로 변화폭이 크지 않았다. 그러나, 가을(9월~11월)과 겨울(12월~2월)보다는 봄(3~5월)과 여름(6~8월)에 상대적으로 노상토의 함수량이 높은 경향을 보이고 있다. 또한, 연간 강수량이 많은 지역(논산, 이서, 연간 강수량 1400mm이상)에서의 노상토 함수량이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

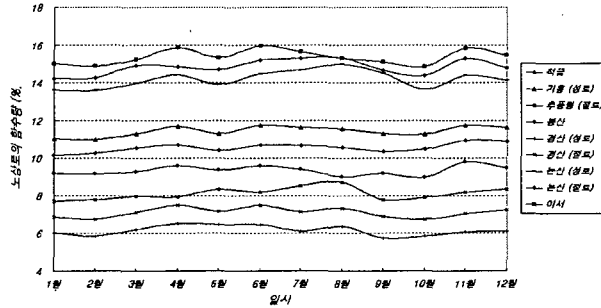
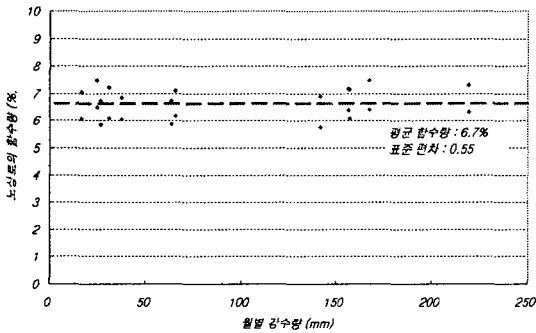
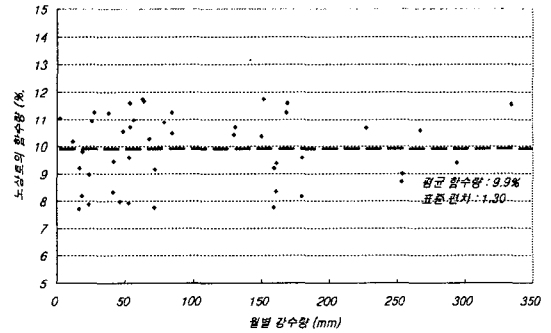


그림 7. 지역별 월평균 노상토의 함수량 변화

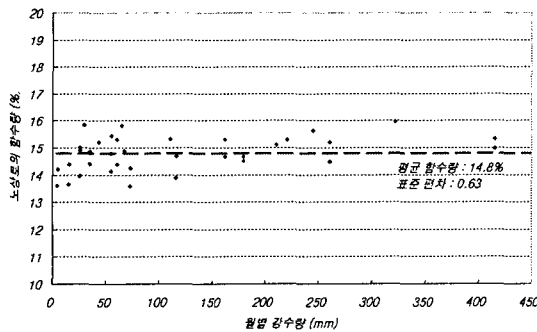
그림 8은 표 2의 자료를 토대로 연간 강수량 1200mm이하, 1200mm에서 1400mm, 1400mm이상인 3개의 지역으로 구분하여 월평균 강수량과 노상토 함수량과의 관계를 나타내었다.



(a) 연간강수량 1200mm 이하



(b) 연간강수량 1200mm~1400mm



(c) 연간강수량 1400mm 이상

그림 8. 월별 강수량에 따른 노상토의 함수량 변화



연간 강수량이 1200mm이하인 지역에서 노상토의 $\omega_{average}$ 는 6.7%, 1200mm에서 1400mm인 지역에서는 9.9%, 1400mm이상인 지역에서는 14.8%로 나타났다. 노상토 함수량의 변화에 따라 노상토의 탄성계수는 변화가 있는데, 여름철에는 노상토의 함수량이 평균 함수량보다 높아서 노상토의 탄성계수가 상대적으로 낮아지고, 겨울철에는 노상토의 함수량이 평균 함수량보다 낮아서 노상토의 탄성계수가 상대적으로 높아진다. 따라서, 본 연구에서는 연간 강수량의 구분으로 계절별 노상토의 함수량변화를 고려한 노상토의 함수량 변화모델을 식(1)과 같이 제시하였다. 표 3에서는 국내 노상토의 평균함수량 및 계절별 노상토의 함수량 변화에 따른 변화가중치를 보여주고 있다.

$$\omega = \omega_{average} + (\Delta\omega \times \text{변화가중치}) \tag{1}$$

표 3. 국내 노상토의 평균함수량 및 계절별 함수량변화 가중치

연간 강수량	$\omega_{average}$	$\Delta\omega$	계절별 함수량 변화 가중치				적용 범위 (월누적 강수량)
			3~5월 (봄)	6~8월 (여름)	9~11월 (가을)	12~2월 (겨울)	
1200mm이하	6.7%	2%	0.25	0.30	-0.40	-0.35	250mm이하
1200mm~ 1400mm	9.9%	4%	0.40	0.45	-0.45	-0.50	350mm이하
1400mm이상	14.8%	2%	0.35	0.40	-0.30	-0.50	450mm이하

향후 연구에서는 국도 8개소에 대해 추가로 노상토의 함수량계측을 실시할 예정이며 중부내륙고속도로 시험도로의 계측자료도 활용할 수 있을 예정이므로, 장기적인 계측결과를 토대로 본 연구에서 제시한 노상토의 함수량 변화모델을 보다 합리적으로 도출해 낼 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

국내에서 환경적 요인들에 기인하여 포장의 공용성에 미치는 영향들을 정량적으로 분석하고 규명함과 동시에 포장의 하부구조에 대한 계절적인 영향을 역학적-경험적 포장설계에 반영하기 위한 효율적인 방법론을 개발하는 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 노상토의 함수량변화는 강수량, 흙의 종류, 질·성토 여부에 가장 많은 영향을 받고 있다.
- 노상토 함수량의 연중 변화 폭은 질토부에서는 비교적 크고, 성토부에서 상대적으로 작은 것으로 나타났다.
- 지역에 관계없이 연간 노상토의 함수량 변화는 2%이하이며, 가을(9월~11월)과 겨울(12월~2월)보다는 봄(3~5월)과 여름(6~8월)에 상대적으로 노상토의 함수량이 높은 경향을 보이고 있다.
- 제한된 범위의 자료를 토대로 포장하부재료에 대한 함수량과 온도 등 환경적인 요인들의 변동성 계측을 통하여 강수량에 따른 영향을 고려한 노상토의 계절적인 함수량 변화 예측 모델을 제시하였다.
- 향후 장기적인 계측결과를 토대로 본 연구에서 제시한 노상토의 함수량 변화모델을 보다 합리적으로 도출해 낼 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부에서 지원하는 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부로, 연구가 가능케 한 건설교통부에 감사드립니다. 아울러 논문의 내용은 건설교통부의 공식적인 내용이나 정책이 포함되어 있지 않음을 밝힙니다.



참고문헌

1. 류순호 외 (1993). "노상토의 계절별 함수량 변화 측정에 관한 연구," 연구보고서, 한국도로공사.
2. 기상청 통계연보.