

# 노상토의 함수비변화 영역을 고려한 수정 탄성계수 결정모델

Model for Determining Elastic Modulus based on Change of  
Water Content Ratio

박경수\* · 황정규\*\* · 임유진\*\*\*

Park, Kyung Su · Hwang, Jung Kyu · Lim, Yu Jin

## 1. 서 론

노상토의 함수량 변화는 기상요소 중 강수량, 대기온도 및 흙의 종류에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 아울러 동일 지역에서도 성토부 노상에 비해 절토된 원지반노상 또는 절성경계부에 있는 노상에서 그 영향이 더 큰 것으로 알려져 있다. 이 중에서도 강수량, 흙의 종류, 절·성토 여부가 노상토의 함수량변화에 가장 큰 영향을 준다. 그러나 우리나라처럼 산지지형이 많은 지역에서 설계시 1개 노선에서도 절·성토 구간이 계속 반복되므로 절·성토 여부에 따른 노상토의 함수량변화를 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 한국형포장설계법에서 채택한 함수비 예측모델을 기반으로 하여 실제 함수비의 변화가 탄성계수 예측모델에 미치는 민감도 분석을 실시하였으며 노상에서의 함수비 변화에 따른 탄성계수 결정모델을 제시하였다.

## 2. 함수비 예측식

한국형포장설계법에서는 국내 국도 LTPP에서 추진하고 있는 노상토 및 보조기층 등의 함수비측정 누적데이터와 각 함수비 측정기(TDR)가 매설된 도로현장의 기본 재료물성치를 이용하여 개선된 함수비 예측모델을 개발한 바 있다(국토해양부, 2009). 함수비 예측모델은 한반도 남부의 함수비 발생 형태를 대전을 기점으로 남부지방과 북부지방으로 구분하고 각 지방에 별도로 적용 가능하도록 표 1과 같이 제시되었다.

표 1. 함수비 예측식

지역	함수비 예측식(%)
남부지방	$\omega = 21.84699 + 0.09598 \times Temp + 0.00064287 \times Prec + 0.29130 \times p_{200}$
북부지방	$\omega = 23.54759 + 0.15216 \times Temp + 0.00070721 \times Prec + 0.17990 \times p_{200}$

여기서, Temp. = 월평균온도 (°C), Prec. = 월평균강수량 (mm), P<sub>200</sub> = 노상토의 세립분 (<0.075 mm)

\* 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 석사과정 · 042-520-5855(E-mail : kyungsoc0514@hanmail.net)  
 \*\* 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 석사과정 · 042-520-5855(E-mail : zzon202@naver.com)  
 \*\*\* 정회원 · 배재대학교 건설환경공학과 교수·공학박사 · 042-520-5402(E-mail : yujin@pcu.ac.kr)

### 3. 함수비 예측모형의 실측값의 비교

#### 3.1 신개발 함수비 예측모형의 특성

함수비 예측식을 국도 구간과 인접한 측후소의 강수데이터(Prec.)와 온도(T) 및 도로재료의 물성치( $P_{200}$ )를 이용하여 함수비의 변화추이를 시간축에 대하여 그리면 그림 1과 같이 건기와 우기의 특성을 적절히 표현한다. 즉, 개발된 함수비 예측모델에 의한 국내 노상도의 함수비 변화는 주기함수의 형태를 띠을 알 수 있다.

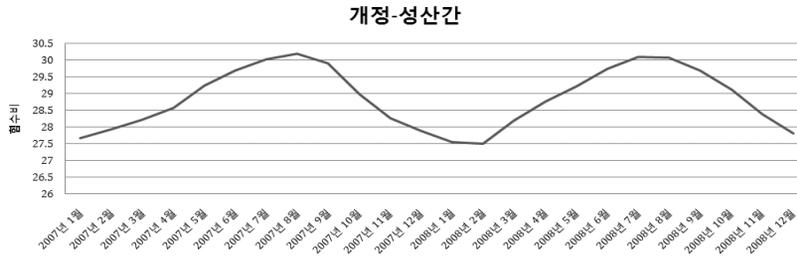


그림 1. New 모델 함수비 모형

#### 3.2 현장 실측값과 모델예측값의 비교

임유진 등 (2009)은 함수비 예측모델의 신뢰성과 정확도를 평가하기 위하여 기존 함수비 예측모델과 임의로 선택된 국내 도로현장의 실측함수비 변화추이를 비교, 분석한 바 있다. 분석에 의하면 함수비의 실측데이터 추세분석 결과 우리나라 국도 구간에서의 함수비(무게)는 현장 다짐에 의한 시공시 함수비보다 상당히 증가하는 것으로 나타났으며 이는 포장공용에 따라 포장 내부로 다양한 형태의 침투가 발생하고 침투된 물의 배수불량에 의하여 지속적으로 함수비가 증가된 결과로 판단된다고 하였다. 그림 2 및 표 2는 분석된 구간중 개정-성산 구간에서의 함수비 실측결과와 예측결과를 비교한 것으로서 다짐시의 함수비 대비 상당한 함수비의 증가가 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 함수비의 증가는 탄성계수에도 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 탄성계수 결정모델에도 이러한 영향을 고려할 필요가 있다.

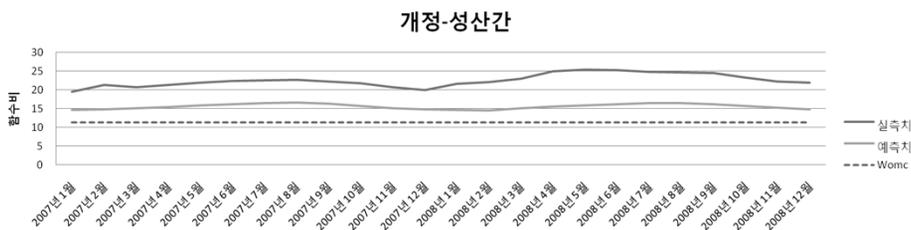


그림 2. 현장실측값과 함수비 모델 비교(개정-성산)

표 2. 함수비 및 최적함수비(OMC) 최대, 최소값 비교

	OMC(%)	실측함수비(%)	OMC 대비 차이(%)
실측치	$\omega_{omc} (\theta_{omc})$	Max : 25.39 Min : 19.59	Max : +14.08 Min : +8.28
New Method	11.31 (22.72)	Max : 16.62 Min : 14.59	Max : +5.31 Min : +3.28

#### 4. 노상의 함수비 변화를 고려한 탄성계수 결정모델

##### 4.1 함수비 변화에 의한 탄성계수 변화

한국형 포장설계법에서 채택하는 노상에서의 탄성계수 결정모델은 아래 식(1)과 같다.

$$E = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3} 10^{k_w(w-w_{opt})} \tag{1}$$

$k_1, k_2, k_3$ 는 모형계수이고  $\theta$ =체적응력(kPa),  $\sigma_d$ =축차응력(kPa)이며  $k_w = -0.1417$ (조립질 노상도),  $-0.0574$ (세립질 노상도),  $W$ =함수비(%),  $W_{opt}$ =최적함수비(%)이다. 탄성계수 결정모델에서는 최적함수비에 비하여 현장에서의 함수비의 변화를 고려할 수 있도록 하였으나 함수비 변화의 대역(최대 및 최소)을 유효한 영역 내로 제한할 필요가 있다. 이를 위하여 현장의 함수비 변화 영역을 고려하여 탄성계수 결정모델에서 사용할 함수비의 변화영역을 제시할 필요가 있다. 국내 국도의 LTPP구간 중 한 구간의 재료물성과 식 (1)의 탄성계수 결정모델을 사용하면 최적함수비 대비 함수비의 증가에 따른 탄성계수의 변화영역을 그림 3과 같이 그려 볼 수 있다. 이는 함수비의 적절한 제한이 주어지지 않으면 함수비의 증가가 탄성계수의 완전한 멸실이 초래할 수 있음을 의미하며 지나치게 함수비 변화에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

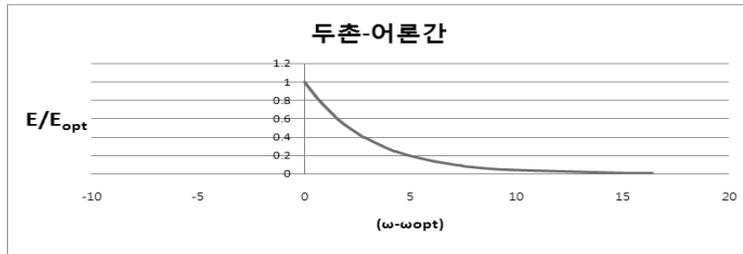


그림 3. 최적 함수비에 대한 현장 함수비 증가에 따른 탄성계수 변화추세

국내 LTPP자료와 이를 이용한 함수비 예측모델을 이용하면 노상도 지반에서의 적정수준 함수비의 최대 변화폭은 최적함수비(OMC) 대비  $\pm 5\%$  내외가 될 것임을 지적한 바 있다(국토해양부, 2010). 또한 AASHTO 2002 설계지침(MEPDG)을 개발중인 미국의 경우에서도 함수비 변화에 따른 탄성계수의 변화정도를 일정수준에서 제한하는 모델을 채택한 바 있다. AASHTO 2002모델의 경우 노상에서의 포화도 변화를 고려할 수 있도록 탄성계수 결정식을 식 (2)와 같이 제시한 바 있다. 이는 불포화특성을 반영하도록 한 것이다.

$$\frac{E}{E_{opt}} = 10^{a + \frac{b-a}{1 + \text{EXP}\left(\ln\frac{-b}{a} + k_m(S - S_{opt})\right)}} \tag{2}$$

여기서  $a$ =탄성계수의 하한계 값,  $b$ =탄성계수의 상한계 값,  $k_m$ = 탄성계수 예측 모델 직선부의 기울기(또는 감쇄율),  $S$ = 포화도,  $S_{opt}$ = 최적다짐도시의 포화도이다. 한편 함수비와 포화도의 관계 (식 (3))를 고려하면 위의 AASHTO 2002 모델 식 내의  $(S - S_{opt})$ 와  $(w - w_{opt})$ 의 관계를 설정할 수 있다.

$$S \cdot e = W \cdot G_s \tag{3}$$

일반적으로 노상 다짐을 하였을때의 간극비( $e$ )= 0.39와 노상토 재료의 평균비중( $G_s$ )= 2.7 및 식 (3)을 이용하면 포화도와 함수비의 관계를 식 (4)와 같이 설정해 볼 수 있다.

$$S - S_{opt} = 6.923(\omega - \omega_{opt}) \tag{4}$$

위와 같은 포화도와 함수비의 관계를 이용하여 적절한 함수비 변화정도를 고려한 노상 탄성계수의 합리적인 결정값을 획득하기 위하여 탄성계수의 상·하한계값의 설정이 가능하도록 탄성계수 결정모형식을 수정하였다. 수정한 탄성계수 결정모형식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{E}{E_{opt}} = 10^{a + \frac{b-a}{1 + \text{EXP}\left(\ln\frac{-b}{a} + k_m(\omega - \omega_{opt})\right)}} \tag{5}$$

탄성계수의 상하한계 값과 직선부의 기울기(또는 감쇄율)를 결정하기 위해서는 수정모델의 수립에 필요한 파라미터 a, b 및  $k_m$ 은 LFWD를 이용한 현장에서의 탄성계수 측정값과 함수비 변화대역폭을 최적함수비 대비 최대  $\pm 5\%$ 로 하여 표 3과 같이 결정하였다. 여기서 a, b는 각각 함수비 변화에 따른 탄성계수의 하한계값 및 상한계 값이 되며  $k_m$ 은 감쇄율이 된다(그림 4참조).

표 3. 수정 탄성계수 결정모형식의 상하한 값 결정을 위한 파라미터

파라미터	조립토	세립토
a	-0.36	-0.615
b	0.33	0.42
$k_m$	0.4718	0.4245

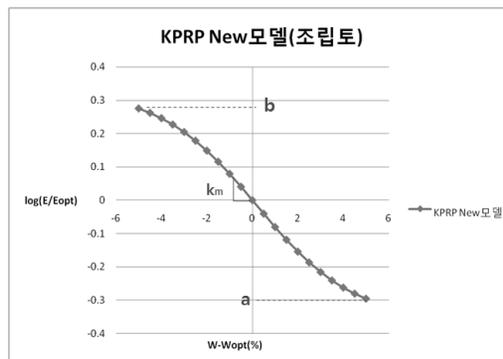


그림 4. 수정 탄성계수 결정모형식의 상하한 값 결정 로직

KPRP New모델식과 표 3의 파라미터를 이용하면 함수비 변화에 따른 국내 노상토의 탄성계수 변화폭을 결정할 수 있으며 함수비가 최적함수비 대비 -5%로 줄어 건조측이 되었을 경우 탄성계수가 최적함수비 일 때 노상의 탄성계수( $E_{opt}$ )에 비하여 얼마나 증가되는 지를 파악할 수 있다. 또한 최적함수비 대비 함수비가 증가할 경우에도 최적함수비 일 때의 노상 탄성계수( $E_{opt}$ )에 비하여 최대 몇 배 감소하는 지를 제한 할 수 있다. 함수비 대역폭을 최적함수비 대비 최대  $\pm 5\%$ 로 가정하고 이를 표 3의 파라미터와 함께 수정 탄성계수 결

정모델에 적용하면 그림 5~그림 8과 같이 구 모델에 의한 탄성계수 변화값과 비교해 볼 수 있다.

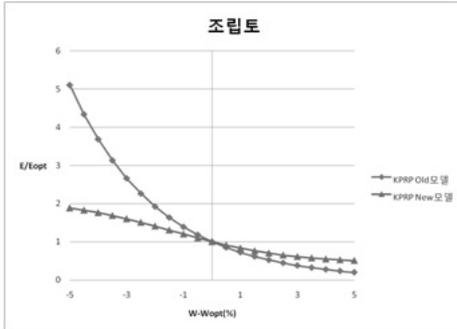


그림 5. KPRP Old모델과 New모델 비교(조립토)  
- 로그 스케일

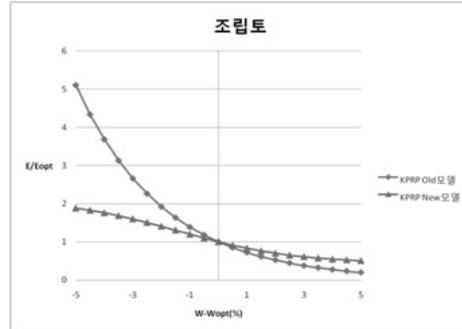


그림 6. KPRP Old모델과 New모델 비교(조립토)

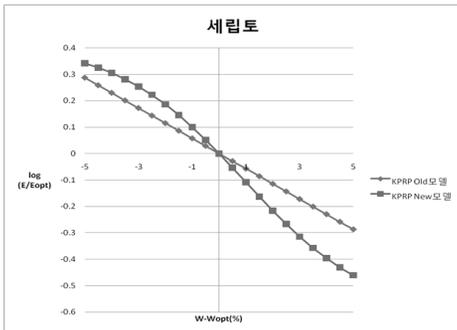


그림 7. KPRP Old모델과 New모델 비교(세립토)  
- 로그 스케일

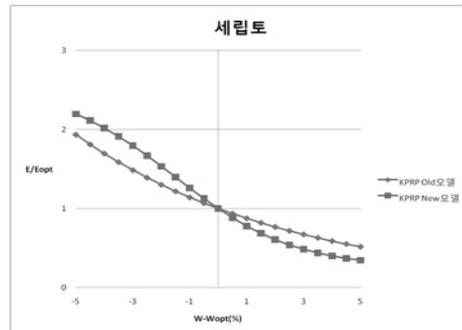


그림 8. KPRP Old모델과 New모델 비교(세립토)

기존 KPRP 탄성계수 결정모델(Old)의 경우, 조립성의 노상토(조립토)일 때 최적함수비에서 최건조축(OMC-5%)으로 함수비가 감소하면 탄성계수는 최적함수비 일 때의 탄성계수에 비하여 최대 약 500% 증가하며 최습윤축(OMC+5%)으로 함수비가 증가하면 탄성계수는 최적함수비일 때의 탄성계수값의 약 19.5%까지 감소하는 것을 알 수 있다(그림 6 및 표 4 참조). 반면에 수정 탄성계수 결정모델(New)의 경우, 조립토에서는 최적함수비일 때의 탄성계수에 비하여 최습윤축(OMC+5%)으로 갈수록 최소 50%까지 감소하며 최건조축(OMC-5%)에서는 최적함수비일 때의 탄성계수에 비하여 최대 약 188%까지 증가하는 것을 알 수 있다(그림 6 및 표 4 참조). 세립성의 노상토(세립토)일 때 기존 KPRP 탄성계수 결정모델(Old)의 경우, 최적함수비에서 최건조축(OMC-5%)으로 함수비가 감소하면 탄성계수는 최적함수비 일 때의 탄성계수에 비하여 최대 약 200% 증가하며 최습윤축(OMC+5%)으로 함수비가 증가하면 탄성계수는 최적함수비일 때의 탄성계수 값의 약 50%까지 감소하는 것을 알 수 있다(그림 8 및 표 4 참조). 반면에 수정 탄성계수 결정모델의 경우 최적함수비에서 최건조축(OMC-5%)으로 함수비가 감소하면 최적함수비 일 때의 탄성계수에 비하여 최대 약 200% 증가하고 최습윤축(OMC+5%)으로 함수비가 증가하면 탄성계수는 최적함수비일 때의 탄성계수값에 비하여 약 34%정도까지 감소하는 것을 알 수 있다(그림 8 및 표 4 참조). 수정된 노상 탄성계수 결정모형은 기 개발된 국내 노상토의 함수비 예측모델에 기초하여 탄성계수의 합리적인 변화폭을 제시할 수 있음이 확인되었다.

**표 4. 함수비 변화에 따른 KPRP Old모델 및 New모델의 탄성계수 변화폭 비교**

	조립토		세립토	
	KPRP Old 모델	KPRP New모델	KPRP Old 모델	KPRP New모델
E/E <sub>opt</sub>	(0.195~5.11)	(0.5~1.88)	(0.516~1.936)	(0.346~2.196)

## 5. 결 론

국내 노상에서의 함수비 변화를 적절히 고려할 수 있는 노상 탄성계수의 결정모형과 이에 필요한 파라미터를 결정, 제시하였다. 최적함수비에 대한 현장에서의 함수비 증가는 급격한 탄성계수의 감소가 있을 수 있으나 포화도와 노상의 다짐상태(간극비에 기초)를 고려하면 탄성계수의 함수비 변화에 따른 상하한계 값의 적절한 제한이 필요하다. 수정 노상 탄성계수 결정모델은 함수비에 기초한 탄성계수의 상하한계 값 결정이 가능하도록 하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구의 일부로 본 연구를 지원하여준 건설교통부 및 한국건설기술연구원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 한국도로공사, (1996) “도로설계실무편람”
2. Cedergren, H.R. (1977) “Seepage, Drainage and Flow Nets”
3. Fredlund, D.G, and Rahardjo,(1993) “Soil Mechanics for Unsaturated Soils”
4. Hassan, H.F., and White, T.D., (1998) “Measuring and Modeling Performance of Pavement Subdrainage Systems.”, Presentation at TRB 77th Annual Meeting
5. Lebeau, M., Lafleur, J. and Savard, Y.(1998) “Comparison of Different Internal Drainage Systems Based on FEM”, Proceedings on International Symp. on Subdrainage in Roadway Pavements and Subgrades
6. Moulton, L.K.(1980) “Highway Subdrainage Design”, FHWA