

## 연성포장설계의 소성변형과 피로파괴 예측모델에 대한 신뢰성 연구

### A Study of Reliability of Predictive Models for Permanent Deformation and Fatigue Failure Related to Flexible Pavement Design

김도완 Dowan Kim  
한범수 Beomsoo Han  
김연주 Yeonjoo Kim  
문성호 Sungho Mun

정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정 (E-mail : marinater@daum.net)  
서울과학기술대학교 건설시스템공학과 학사과정 (E-mail : sc17921792@naver.com)  
서울과학기술대학교 건설시스템공학과 학사과정 (E-mail : kim920921@gmail.com)  
정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** The objective of this paper is to select the confidential intervals by utilizing the second moment reliability index (Hasofer and Lind; 1974) related to the number of load applications to failure which explains the fatigue failure and rut depth that it indicates the permanent deformation. By using Finite Element Method (FEM) Program, we can easily confirm the rut depth and number of load repetitions without Pavement Design Procedures for generally designing pavement depths.

**METHODS :** In this study, the predictive models for the rut depth and the number of load repetitions to fatigue failure were used for determining the second moment reliability index ( $\beta$ ). From the case study results using KICTPAVE, the results of the rut depth and the number of load repetitions to fatigue failure were deducted by calculating the empirical predictive equations. Also, the confidential intervals for rut depth and number of load repetitions were selected from the results of the predictive models. To determine the second moment reliability index, the spreadsheet method using Excel's Solver was used.

**RESULTS :** From the case studies about pavement conditions, the results of stress, displacement and strain were different with depth conditions of layers and layer properties. In the clay soil conditions, the values of strain and stresses in the directly loaded sections are relatively greater than other conditions. It indicates that the second moment reliability index is small and confidential intervals for rut depth and the number of load applications are narrow when we apply the clay soil conditions comparing to the applications of other soil conditions.

**CONCLUSIONS :** According to the results of the second moment reliability index and the confidential intervals, the minimum and maximum values of reliability index indicate approximately 1.79 at Case 9 and 2.19 at Case 22. The broadest widths of confidential intervals for rut depth and the number of load repetitions are respectively occurred in Case 9 and Case 7.

#### Keywords

*KICTPAVE, second moment reliability index, fatigue failure, rutting depth, permanent deformation, empirical design method, mechanical design method, mechanistic-empirical pavement design guide(MEPDG), korea pavement research program(KPRP)*

Corresponding Author : Sungho Mun, Associate Professor  
The Road Pavement Research Division, No.43, Seoul National  
University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu,  
Seoul, 139-743, Korea  
Tel : +82.2.970.9014  
E-mail : smun@seoultech.ac.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Nov. 13, 2014 Revised Nov. 14, 2014 Accepted Nov. 28, 2014

# 1. 서론

도로를 설계함에 있어서 포장 설계는 크게 램프 및 교통량 등을 고려한 횡방향의 도로 폭 및 구간을 설계하는 것과 포장의 성능에 대한 종방향의 두께를 설계하는 것으로 나누어진다. 종방향의 설계를 수행하는 경우, 경험적 설계방법(EDM, Empirical Design Method), 역학적 설계방법(MDM, Mechanical Design Method), 역학적-경험적 설계방법(MEPDG, Mechanistic Empirical Pavement Design Guide)이 존재한다. 국내에서는 기존에 종방향 설계를 실시하기 위해 AASHTO 기준의 포장설계법을 사용하였다. 이 포장설계법은 AASHTO에서 수행한 실험자료에 대하여 역학적으로 수차례 변수들을 검증함으로써 그 기능성과 공용성을 입증하였다. 하지만, 이 설계기술은 국내 교통하중 및 중차량, 파손발생률 등의 환경에 적절하게 조화되지 못하여 국토해양부에서는 국내 환경에 맞춘 역학적-경험적 설계방법을 개발하였다. 또한 국토해양부는 이 설계방법을 보편화시키기 위한 목적으로 도로포장 구조설계 요령(국토해양부, 2011. 12. 12)를 출간하였으며, 한국형 포장 설계 프로그램(KPRP, Korea Pavement Research Program)을 상용화하였다. KPRP는 기존에 사용하던 설계법을 역학적인 면에서 보완한 프로그램이다. 이 뿐만이 아니라 한국건설기술연구원에서 개발한 KICTPAVE 역시 도로 포장 설계를 목적으로 개발되었다.

다음 Fig. 1은 KPRP와 KICTPAVE 프로그램의 모습이다.

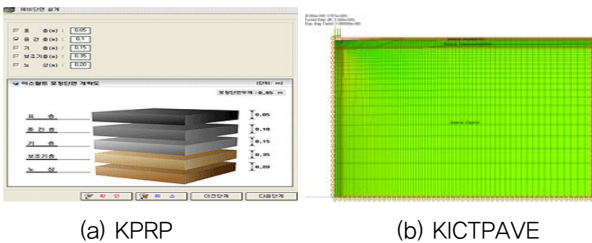


Fig. 1 KPRP and KICTPAVE (www.pavmentinfo.com)

KPRP 프로그램의 결과에서 중요시 되는 부분은 피로 균열, 러팅, 평탄성지수(IRI, International Roughness Index)에 대한 공용성분석이다. KPRP 프로그램의 공용성 결과는 설계기준의 만족도 및 공용기간 내의 파손발생률을 보여준다. 결국, KPRP는 포장의 전체적인 설계를 수행하는 경우 공용성을 판단하는 것에 중점을 두고 있으며, KICTPAVE FEM 프로그램은 유한요소법에 의한 변형 및 응력 결과에 중점을 두고 있다는 특징을 갖는다. 이

와 관련하여 본 연구는 피로파괴와 소성변형 각각에 대한 설계 시의 신뢰성을 간단하게 파악하기 위한 목적을 갖는다. 이를 수행하기 위해 KICTPAVE와 피로파괴 및 소성변형에 대한 예측모형을 사용함으로써 포장의 신뢰성을 판별하고자 한다. 신뢰성 평가는 기존연구(Hasifer and Lind, 1974)에 의한 2차 모멘트 신뢰지수(Second Moment Reliability Index)이론에 기초하였다.

# 2. 연성포장에 대한 유한요소법

실제 도로에서 발생하는 파손이나 변형에 대한 정보를 알기 위해 유한요소 프로그램을 사용하여 사전에 모의실험을 수행한다. 이러한 유한요소법은 실제 도로 포장에 대한 조건을 제공함으로써 다양한 정보를 얻기 위한 목적으로 사용된다. 본 연구에서는 영구변형(Permanent Deformation)과 피로파괴(Fatigue Failure)에 대한 예측모형을 활용하여 신뢰성을 판단하기 위해 FEM 프로그램 중 KICTPAVE를 사용하였다. KICTPAVE는 2011년 도로 포장 시스템을 개발하기 위한 목적으로 한국건설기술연구원에서 개발한 프로그램이다. 이 프로그램은 표층, 중간층, 기층, 노상, 노체에 대한 공학적 특성을 제공함으로써 아스팔트, 콘크리트, 지반의 초기조건을 설정할 수 있다. 본 연구에서는 표층을 아스팔트포장으로, 기층을 Lean Concrete로, 노상을 사질토, 실트질토, 점성토로 구분하였다.

KICTPAVE는 유한요소법 중 축방향 문제에 대한 모형을 해석하도록 개발되어있다. KICTPAVE는 기존의 ABAQUS 또는 ILLIPAVE와 같은 해석코드의 제한을 해결함과 동시에 국내의 환경에 맞는 점탄성 축대칭 문제를 해결하기 위해 제작되었다. 이러한 점탄성 축대칭 문제를 해결하기 위해 KICTPAVE에서는 유한요소이론 중 일반화된 맥스웰 모형(Generalized Maxwell Model, GMM)을 사용하였다. 맥스웰 모형의 병렬적 연속체로 구성된 일반화된 맥스웰 모형은 기본적으로 다음 Eq. (1)과 같이 표현되며, 점탄성 재료적 강성을 스프링-댐퍼이론에 입각하여 적용하였다.

$$\sigma(t) = \sum \int_0^t E_i e^{-\frac{t-\tau}{\lambda_i}} \varepsilon d\tau \quad (1)$$

여기서,  $\sigma(t)$ 는 시간( $t$ )에 따른 응력 값을 의미하며,  $\varepsilon$ 은 변형률을 시간으로 미분한 것,  $\lambda_i$ 는 댐퍼 상수와 스프링상수( $E_i$ )에 대한 비를 의미한다.

또한 KICTPAVE는 4개의 절점과 1개의 요소로 설정된 CAX4 연속체 모형을 사용하였으며, 요소 내의 응력을 구하기 위해 가상일의 원리를 적용하였다.

KICTPAVE는 하중의 중심을 축방향의 무게중심이 아닌 최하부층의 원점을 무게중심으로 지정되어있으며, 본 연구에서는 고정분포하중의 연속적 이동을 가정하여 고정분포하중을 적용하였다. 기존연구(이창준 외 3명)에서는 KICTPAVE의 유한요소 해석코드에 대한 신뢰성을 입증하였다.

### 3. 소성변형 및 피로파괴 예측모형

본 연구에서는 소성변형 또는 피로파괴를 예측하기 위해 개발된 모형에 대한 기존연구의 결론을 사용하였다. 이러한 예측모형들에 있어 파괴에 이를 때까지 적용되는 하중의 수( $N_f$ )가 중요한 인자로 사용된다. 기존의 연구들은 파괴에 대한 하중반복의 수와 아스팔트-콘크리트의 수평변형률간의 연관성이 중요하다고 판단하거나 수직변형률과 노상의 회복탄성계수간의 연관성이 중요하다고 판단하였다. 그 중, 미국 아스팔트 협회(Asphalt Institute, 1982)에 따르면, 아스팔트의 피로 파괴와 인장응력의 관계는 다음 Eq. (2)와 같다.

$$N_f = 0.0796 \varepsilon_t^{-3.291} E^{-0.854} \quad (2)$$

여기서,  $E$ 와  $\varepsilon_t$ 는 각각 아스팔트-콘크리트의 탄성계수와 아스팔트 포장의 하부 층의 수평인장률을 의미한다.

그러나, 1962년에 Heukelom와 Klomp가 제안한 결론에 따르면 다음 Eq. (3)과 같은 관계를 갖는다.

$$N_f = 10^{-(5 \log \varepsilon_t + 2.665 \log_{10}(E/14.22) + 0.392)} \quad (3)$$

이러한 연구결과는 실험에 의해 회귀계수를 찾아가는 방향으로 진행되었으며, 파손이 될 때까지 하중을 재하시켜야만 인장응력과 탄성계수간의 관계를 유도할 수 있다는 단점을 갖는다. 실제 Heukelom와 Klomp의 연구(1962)에서는 Asphalt Institute CBR을 사용하여 파괴에 대한 하중재하를 최대 약 120억 번을 수행하여 위 회귀함수식을 도출하였다.

그러나 최종적으로 1991년에 개정된 미공병단의 조사에 따르면 소성파괴에 대한 하중재하 수는 노상의 회복

탄성계수(Resilient Moduli)와 노상 상부에 작용하는 수직 압축변형률이 중요한 관계를 갖는다. 기존연구에서 수행한 삼축방향의 시험에서 다음 Eq. (4)와 같은 결론을 내렸다.

$$N_f = b_1 \beta \varepsilon_v^{-b_2} M_R^{b_3} \quad (4)$$

여기서,  $M_R$ 과  $\varepsilon_v$ 는 각각 노상토에 대한 설계 회복탄성계수와 노상 상부에서의 수직 압축변형률을 의미하며,  $b_1, b_2, b_3$ 는 삼축시험으로부터 얻을 수 있는 상수값을 의미한다. 또한  $\beta$ 는 지역 보정 요소로 환경에 대한 계수 값을 나타낸다.

이러한 이론에 기초하여 다양한 연구에서는 파괴에 이르는 하중재하의 수를 다음 Table 1과 같이 정의하였다.

Table 1. Equations for Number of Load Repetitions to Failure

Equation ( $N_f$ )	Information
$1.365 \times 10^{-9} \varepsilon_v^{-4.477}$	Asphalt Institute(1984)
$6.15 \times 10^{-7} \varepsilon_v^{-4}$	Shell(1978, 50% Reliability)
$1.05 \times 10^{-7} \varepsilon_v^{-4}$	Shell(1978, 95% Reliability)
$1.259 \times 10^{-11} \varepsilon_v^{-4.082} M_R^{0.955}$	U.S. Army Corps of Engineering (1991)
$6.18 \times 10^{-8} \varepsilon_v^{-3.95}$	TRRL(1984, 85% Reliability)
$3.05 \times 10^{-9} \varepsilon_v^{-4.35}$	Belgian Road Research Center(1977)

AASHO Road Test의 결과에 따르면, 하중재하의 수는 다시 아스팔트-콘크리트 포장의 러팅 깊이에 영향을 미친다고 알려져 있다. 이를 표현하면 다음 Eq. (5)와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{For } < 6 \sim ACP, \\ & \log RR = -5.617 + 4.343 \log d \\ & \quad - 0.167 \log(N) - 1.118 \log \sigma_c \\ & \text{For full depth } ACP, \\ & \log RR = -1.173 + 0.717 \log d \\ & \quad - 0.658 \log(N) + 0.666 \log \sigma_c \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $\log RR, d, \sigma_c$  및  $N$ 은 각각 하중의 반복에 의한 100만분의 1인치에 해당하는 러팅비, 40kN이 작용하는 경우 노면변형량, 표층과 기층사이에 작용하는 수직 압축응력 및 18-kips의 단일 축하중의 수를 10만으로 나눈 값을 의미한다.

다른 기존연구(Baladi, 1989)에서는 파괴에 이르는 하중의 반복 수가 아닌 러팅 깊이에 대한 등가단축하중

(ESAL)의 수 및 다양한 요소에 대한 러팅 깊이를 예측할 수 있는 통계적 모형을 제안하였다. 이 제안식은 다음 Eq. (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Log } RD = & -1.6 + 0.067 V_a - 1.4 \log h_{AC} + 0.07 T_{avg} \\ & - 0.000434 \eta_k + 0.15 \log ESAL - 0.4 \log M_R \quad (6) \\ & - 0.5 \log E_{base} + 0.1 \log \delta_0 + 0.01 \log \epsilon_v \\ & - 0.7 \log h + 0.09 \log (50 - h_{AC} - h_{EQ}) \end{aligned}$$

여기서, RD,  $V_a$ ,  $h_{AC}$ ,  $T_{avg}$ ,  $\eta_k$ , ESAL,  $M_R$ ,  $E_{base}$ ,  $\delta_0$ ,  $\epsilon_v$ ,  $h$  및  $h_{EQ}$ 는 각각 러팅깊이, 포장의 공극률, 기층의 등가 깊이, 그 해의 평균기온, 135℃에서 아스팔트 바인더의 동적점성도, 등가단축하중, 노상의 회복탄성계수, 기층의 유효 회복탄성계수, 표면의 변형량, 아스팔트 하부층의 압축변형률, 아스팔트 및 등가 포장 깊이를 나타낸다.

또 다른 기존연구(Shell, 1978)에서는 압축성 크리프 시험(Compressive Creep Test, CCT)을 수행하여 다음 Eq. (7)과 같은 관계식을 얻었다.

$$\Delta h = \frac{C_m h_{AC} \sigma_c}{E_{mix}} \quad (7)$$

여기서,  $C_m$ ,  $h_{AC}$ ,  $\sigma_c$  및  $E_{mix}$ 는 각각 혼합물의 종류에 따른 동적효과에 대한 상관계수, 아스팔트 포장 층에 대한 두께, 표층 내에서 발생하는 평균 수직압축응력 및 아스팔트 포장에 대한 탄성계수를 의미한다.

## 4. 예측모델 및 KICTPAVE의 적용

본 연구에서는 피로파괴를 설명할 수 있는 하중재하의 수와 소성변형에 대해 설명할 수 있는 러팅 깊이의 예측모델을 사용하고자 한다. 더욱이 이러한 예측모델의 사용은 KICTPAVE를 통한 사례연구방법으로 진행되기 때문에 KICTPAVE에 사용되는 입력변수(Input Variables)는 본 연구에서 중요한 요소로 작용한다.

### 4.1. 예측모델의 선정

본 연구는 사례연구방법을 통해 진행되기 때문에 예측모델의 사용 여부는 가용 FEM의 구성요소에 의해 제한된다. 이와 관련하여 러팅 깊이에 대하여 다양한 요소를 고려하는 Baladi식은 KICTPAVE에서 입력되지 않는 변수가 존재하기 때문에 사용이 불가능하다. 또한 아

스팔트-콘크리트층 및 탄성해석에 의한 Shell식 역시 사용이 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 파괴가 발생할 때까지 반복되는 하중의 수를 구하기 위해 Table 1의 식들을 사용하며, 러팅 깊이를 예측하기 위한 식은 AASHTO Road Test에 의한 Eq. (5)를 사용하도록 한다.

## 4.2. KICTPAVE의 적용

본 연구에서는 KICTPAVE를 적용하기 위해 표층, 기층, 노상으로 구조를 구분하였다. 각 층들은 Asphalt, Lean Concrete, 사질토, 유사, 점성토로 구분하였다. 아스팔트 층의 두께는 5cm, 기층의 두께는 15cm로 선정하였으며, 노상의 경우 무한 깊이를 적용하기 위해 300cm로 적용하였다. 외력의 크기는 40kN을 적용하였으며, 이에 대한 초기조건은 다음 Table 2와 같다.

Table 2. Conditions for Pavement Design

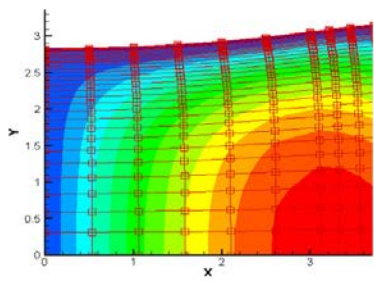
Layer Type	Temp (°C)	Material	Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Depth (cm)
Surface	0	Asphalt	21,000	0.35	5
	20		3,700		
	50		140		
Base	-	Lean Concrete	5,000	0.40	15
			10,000		
			20,000		
Subgrade	-	Sand	122	0.45	300
		Silt	92		
		Clay	67		

이러한 초기조건에 대한 경우의 수는 총 27가지로 구성되며, 적용결과는 Fig. 2와 같다.

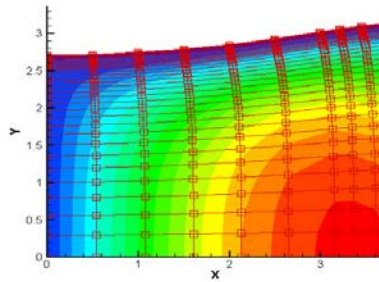
Table 3. Conditions for KICTPAVE

	Asphalt Layer Property	Lean Concrete Layer Property
Case 1	21 GPa (0°C)	5 GPa
Case 2	21 GPa (0°C)	10 GPa
Case 3	21 GPa (0°C)	20 GPa
Case 4	3.7 GPa (20°C)	5 GPa
Case 5	3.7 GPa (20°C)	10 GPa
Case 6	3.7 GPa (20°C)	20 GPa
Case 7	0.14 GPa (50°C)	5 GPa
Case 8	0.14 GPa (50°C)	10 GPa
Case 9	0.14 GPa (50°C)	20 GPa

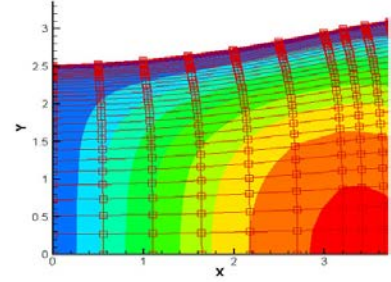




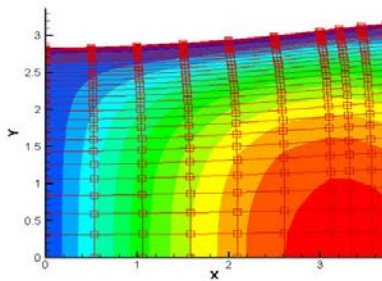
(a) Case 1(Sand)



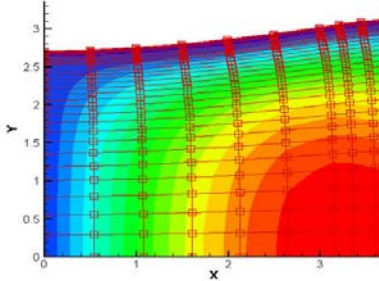
(b) Case 1(Silt)



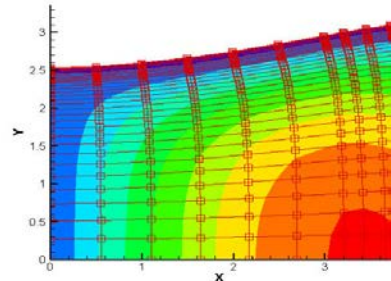
(c) Case 1(Clay)



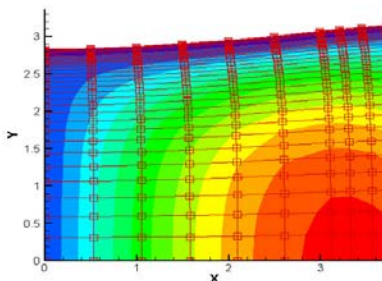
(d) Case 2(Sand)



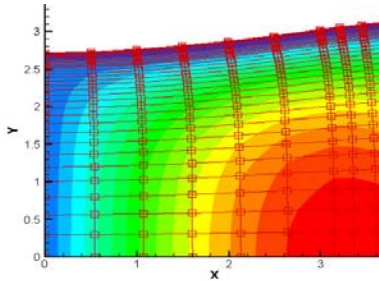
(e) Case 2(Silt)



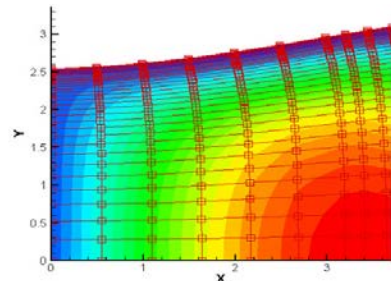
(f) Case 2(Clay)



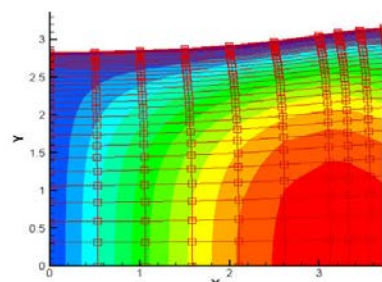
(g) Case 3(Sand)



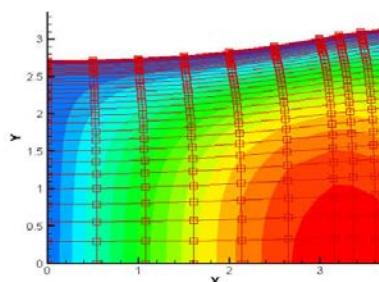
(h) Case 3(Silt)



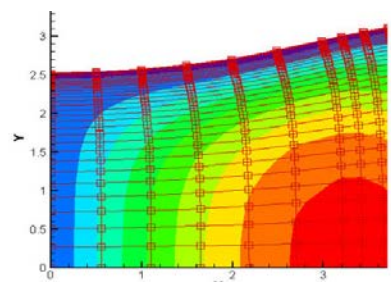
(i) Case 3(Clay)



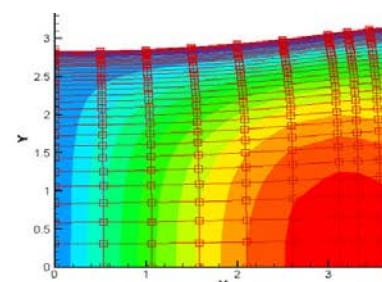
(j) Case 4(Sand)



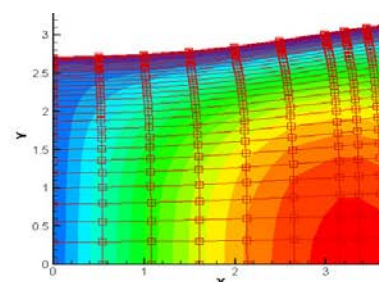
(k) Case 4(Silt)



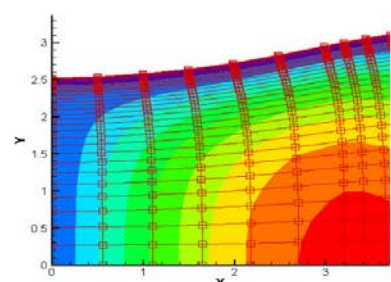
(l) Case 4(Clay)



(m) Case 5(Sand)



(n) Case 5(Silt)



(o) Case 5(Clay)

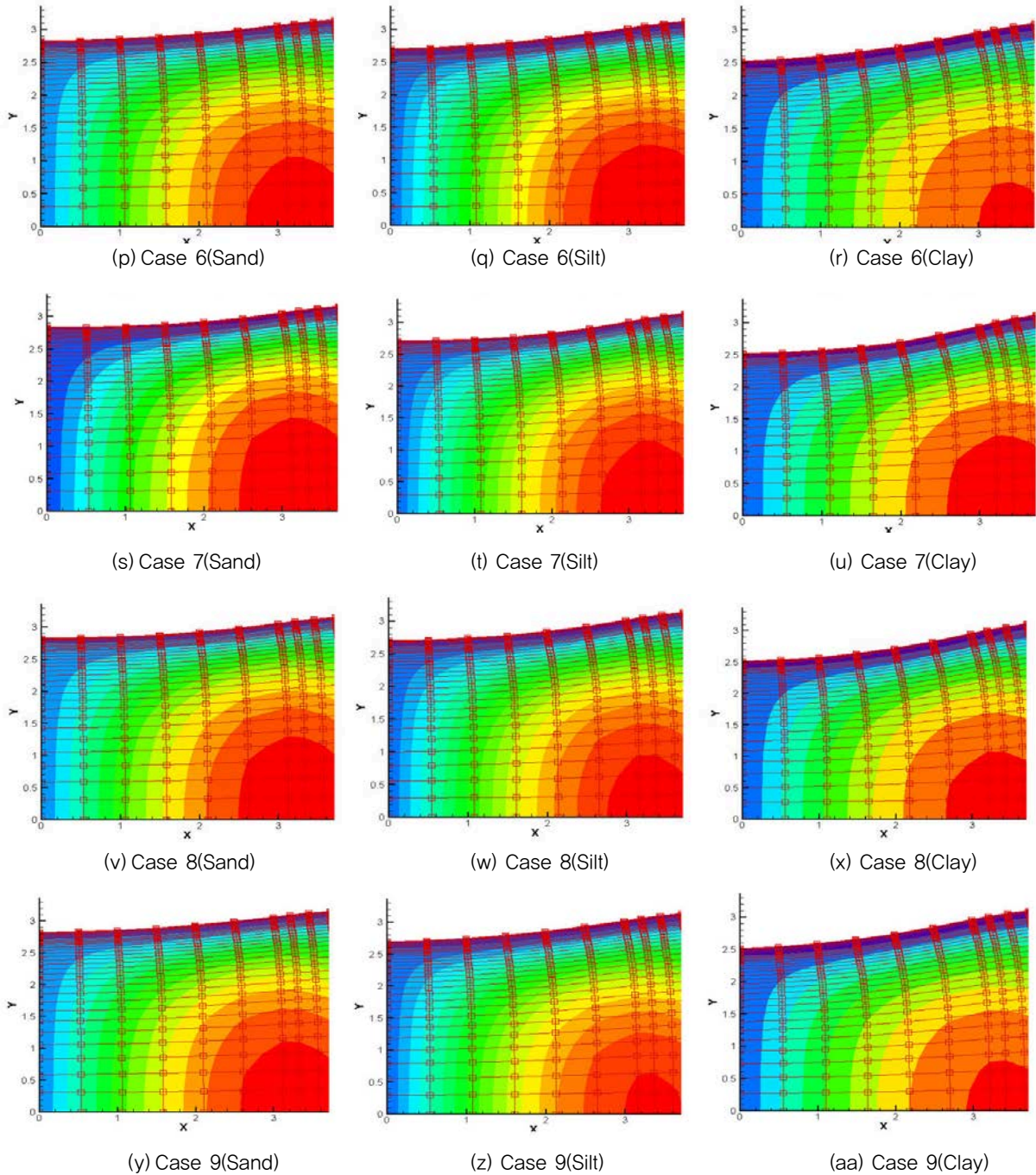


Fig. 2 KICTPAVE Application Results

### 4.3. KICTPAVE 결과에 의한 피로파괴 및 소성 변형 예측모형 적용

KICTPAVE의 적용 시 전 두께 아스팔트 포장(Full-Depth Asphalt Pavement)을 가정하지 않아 AASHO Road Test식의 (a)를 사용한다.

Table 2의 식에서 기층과 노상층의 수직 압축변형률을 요구하기 때문에 Fig. 3의 결과를 반영하도록 한다.

Fig. 3에 대한 수직 압축변형률을 이용하여 피로파괴

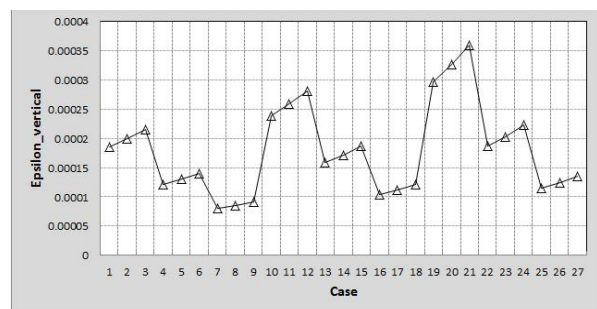


Fig. 3 Vertical Compressive Strain Results

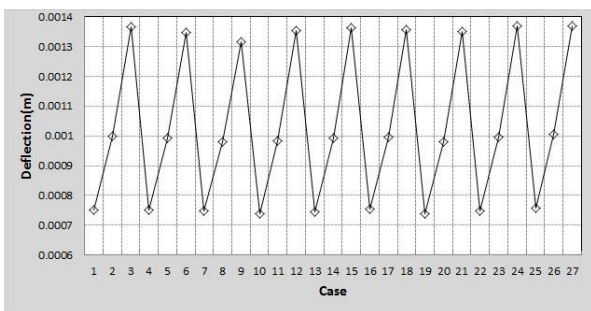


가 일어나는 하중의 반복횟수를 구한 값은 다음 Table 4와 같다.

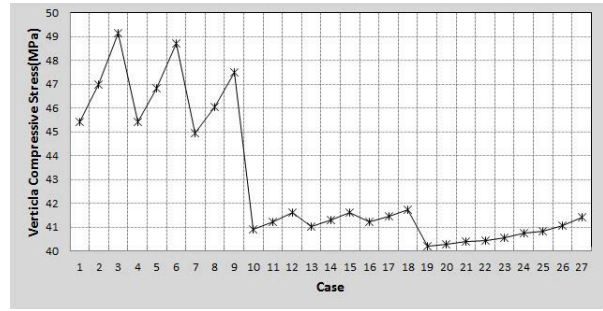
Table 4. Results for Number of Load Repetitions

	AI	Shell (50%)	Shell (95%)	U.S. Army	TRRL	Belgian
Case1	6,86E+07	5,13E+07	8,77E+07	2,09E+07	3,36E+07	5,15E+07
Case2	5,02E+07	3,89E+07	6,63E+07	1,20E+07	2,55E+07	3,80E+07
Case3	3,60E+07	2,88E+07	4,92E+07	6,54E+06	1,90E+07	2,75E+07
Case4	4,61E+08	2,82E+08	4,81E+08	1,19E+08	1,81E+08	3,28E+08
Case5	3,44E+08	2,17E+08	3,70E+08	6,94E+07	1,39E+08	2,47E+08
Case6	2,50E+08	1,63E+08	2,79E+08	3,84E+07	1,05E+08	1,81E+08
Case7	2,98E+09	1,49E+09	2,55E+09	6,50E+08	9,35E+08	2,01E+09
Case8	2,23E+09	1,15E+09	1,97E+09	3,82E+08	7,25E+08	1,52E+09
Case9	1,63E+09	8,70E+08	1,49E+09	2,12E+08	5,49E+08	1,12E+09
Case10	2,24E+07	1,89E+07	3,22E+07	7,53E+06	1,25E+07	1,73E+07
Case11	1,57E+07	1,37E+07	2,34E+07	4,15E+06	9,12E+06	1,23E+07
Case12	1,07E+07	9,75E+06	1,66E+07	2,16E+06	6,51E+06	8,45E+06
Case13	1,37E+08	9,55E+07	1,63E+08	3,94E+07	6,20E+07	1,01E+08
Case14	9,77E+07	7,05E+07	1,20E+08	2,20E+07	4,59E+07	7,26E+07
Case15	6,77E+07	5,08E+07	8,67E+07	1,16E+07	3,32E+07	5,08E+07
Case16	9,48E+08	5,36E+08	9,16E+08	2,29E+08	3,41E+08	6,60E+08
Case17	6,85E+08	4,01E+08	6,85E+08	1,30E+08	2,56E+08	4,81E+08
Case18	4,80E+08	2,92E+08	4,99E+08	6,95E+07	1,87E+08	3,41E+08
Case19	8,38E+06	7,85E+06	1,34E+07	3,07E+06	5,26E+06	6,68E+06
Case20	5,55E+06	5,43E+06	9,27E+06	1,61E+06	3,65E+06	4,47E+06
Case21	3,57E+06	3,66E+06	6,25E+06	7,97E+05	2,48E+06	2,91E+06
Case22	6,67E+07	5,01E+07	8,55E+07	2,04E+07	3,28E+07	5,01E+07
Case23	4,60E+07	3,59E+07	6,13E+07	1,11E+07	2,36E+07	3,49E+07
Case24	3,08E+07	2,51E+07	4,28E+07	5,68E+06	1,66E+07	2,36E+07
Case25	5,92E+08	3,53E+08	6,02E+08	1,49E+08	2,25E+08	4,18E+08
Case26	4,21E+08	2,60E+08	4,43E+08	8,34E+07	1,66E+08	3,00E+08
Case27	2,90E+08	1,86E+08	3,18E+08	4,39E+07	1,20E+08	2,09E+08

러팅의 깊이를 구하는 경우 위 Eq. (5)에서 40kN이 작용하는 경우 표면의 처짐과 기층과 표층 사이에서 발생하는 응력의 크기를 요구한다. 이를 적용하기 위해 FEM 결과에서 축방향을 기준으로 응력이 가해지는 부분의 Element와 인터페이스의 Node에서의 처짐 및 응력을 구하였다. 다음 Fig. 4는 이에 대한 결과를 나타낸 것으로 압축에 대한 절대 값으로 표현하였다.



(a) Surface Deflection



(b) Vertical Compressive Stress

Fig. 4 KICTPAVE Displacement and Stress Results

이 결과는 다시 러팅 깊이를 구하기 위해 사용된다. 러팅 깊이 예측모델은 다시 파괴에 달하는 총 하중 반복 횟수를 요구한다. 다음 Fig. 5는 앞의 Eq. (5)를 사용하여 도출한 결과이다.

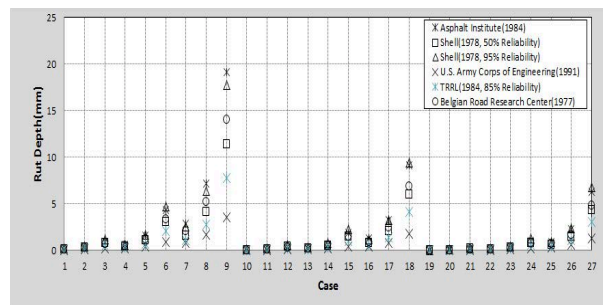


Fig. 5 Rut Depth Results

## 5. 신뢰성 구간 선정 및 평가

본 연구에서는 도로에서 발생하는 소성변형의 깊이 및 피로파괴에 영향을 미치는 재하되는 하중의 수에 대한 예측모형을 사용하여 이 값들을 구하였다. 본 장에서는 러팅 깊이와 재하 하중의 수에 대한 2차 모멘트 신뢰성 지수인 값을 도출하여 신뢰구간을 찾고 이 신뢰구간 범위 내에 있는 재하 하중 수와 러팅 깊이를 도출하고자 한다.

두 가지의 변수를 사용하여 신뢰구간을 동시에 표현하는 경우 값의 선정으로 인해 이에 대한 분산의 곱으로 안전범위를 2차원적으로 표현이 가능하다. 이 과정에서 신뢰지수인 값은 다변량 정규밀도함수(Bivariate Normal Density Function)에서 다음 Eq. (8)과 같은 관계를 갖게 된다.

$$f_{x_1, x_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{\beta^2}{2}} \quad (8)$$

여기서,  $x, \sigma$  는 각 변수 및 변수에 대한 분산을 나타내며,  $\rho$  와  $\beta$  는 상관계수 및 신뢰지수를 의미한다.

기존연구에서 신뢰지수인  $\beta$  값은 아래 Eq. (9a) 및 (9b)와 같이 나타내었다(Veneziano 1974; Ditlevsen 1981). 이 신뢰도 지수값은 2차원적으로 표현되는 경우 변수들에 대한 공분산과 평균값의 영향을 받기 때문에 신뢰구간에 대한 효율적인 접근이 가능하다.

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{(x - \mu)^T C^{-1} (x - \mu)} \quad (9a)$$

또는

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{\left[ \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right]^T [R]^{-1} \left[ \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right]} \quad (9b)$$

여기서,  $x, \mu$  및  $C$  는 각각 랜덤 변수, 변수들의 평균 및 공분산 행렬을 의미하며,  $R, \sigma$  및  $F$  는 상관 행렬, 변수에 대한 표준편차 및 비안전지역으로 구분한다.

두 신뢰도 지수 계산식은 단지 상관 행렬이 공분산 행렬보다 쉽게 계산되기 때문에 다른 것이며, 통계적인 의미를 담고 있지 않다. 이 신뢰도 지수로 인하여 변수들의 값이 비안전지역인  $F$  에 근접하지 않게 최소값으로 계산함으로써, 적절한 안전범위구간을 지정해 주는 것이 목적이다. 신뢰도 지수를 구하기 위한 목적함수는 피로에 의해 파괴가 발생하기까지의 재하 하중의 수를 예측하는 함수와 러팅 깊이에 대한 예측모델로 구성하였다. 본 연구에서 사용한 목적함수는 다음 Eq. (10)과 같다.

$$g(X) = N_f(\epsilon_v) - Rd(d, \sigma_c, N_f) \quad (10)$$

본 연구에서는 6가지 방법론에 의해 구해진 피로파괴가 일어나는 하중 재하의 수의 평균, 표준편차, 공분산을 구해 최종적인 각 상황 별 러팅 깊이와 하중 재하의 수를 찾고자 하였으며, 신뢰도 계수 값에 대한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Reliability Index Results

	Reliability Index( $\beta$ )	$g(X)$	Correlation
Case1	2.18656	1E-5	0.999336
Case2	2.03731	1E-5	0.999012
Case3	1.91475	1E-5	0.998624
Case4	2.11253	1E-5	0.999516
Case5	1.99378	1E-5	0.999263
Case6	1.89517	1E-5	0.998948
Case7	1.94160	1E-5	0.999478
Case8	1.86062	1E-5	0.999276
Case9	1.79331	1E-5	0.999016
Case10	2.17209	1E-5	0.99921
Case11	2.01254	1E-5	0.998845
Case12	1.88151	1E-5	0.998417
Case13	2.17397	1E-5	0.999418
Case14	2.03422	1E-5	0.999114
Case15	1.91816	1E-5	0.998743
Case16	2.05527	1E-5	0.99953
Case17	1.95347	1E-5	0.9993
Case18	1.86806	1E-5	0.999006
Case19	2.12878	1E-5	0.999141
Case20	2.12836	1E-5	0.998751
Case21	1.83027	1E-5	0.9983
Case22	2.18671	1E-5	0.999333
Case23	2.03639	1E-5	0.998998
Case24	1.91163	1E-5	0.998595
Case25	2.09418	1E-5	0.999525
Case26	1.98320	1E-5	0.999278
Case27	1.88990	1E-5	0.998964

## 6. 결론

본 연구에서는 KICTPAVE와 피로파괴를 설명하기 위해 파괴 시까지 재하되는 하중의 수에 대한 예측모형과 소성변형을 설명하기 위해 러팅 깊이의 예측모형을 사용함으로써 사례연구방법을 통해 재하 하중의 수 및 러팅 깊이를 계산하였다. 이의 결과에 대하여 2차 모멘트 신뢰성 지수를 활용하여 신뢰구간을 산정하였으며 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. KICTPAVE를 통해 사례연구방법을 적용한 결과, 응력 또는 변형에 대한 결과는 각 상황에 따라 상이하며, 점성토의 경우 그 변형이나 응력의 크기가 상대적으로 크다. 이와 관련하여 점성토지반의 적용 시



- 신뢰도 지수가 낮고, 신뢰구간이 상대적으로 좁다.
2. Table 3의 결과로부터 파괴까지 반복되는 하중 재하 수는 U.S. Army Corps of Engineering 예측모형이 결과적 분산에 가장 일치하지 않는 경향을 보였다.
  3. 신뢰도 지수는 최소 약 1.79에서 최대 약 2.19로 나타났다으며, 이는 각각 Case 9와 Case 22에서 나타났다.
  4. 러팅 깊이에 대한 신뢰도 구간 폭이 가장 넓게 나타난 곳은 Case 9에서 발생하였으며, 피로파괴가 발생하는 경우까지 발생하는 하중 재하의 수의 경우 Case 7에서 신뢰도 구간의 폭이 가장 넓게 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(2014-0357).

#### References

- American Association of State and Highway Transportation Officials(AASHTO; 1993). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State and Highway Transportation Officials(AASHTO; 1998). "Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures Part "-Rigid Pavement Design and Rigid Pavement Joint Design", Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State and Highway Transportation Officials(AASHTO; 2000). "MDM-SI-2, Model Drainage Manual", 2000 Metric Edition. Washington, D.C.: AASHTO.
- Asphalt Institute. (1984). "Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types", Manual Series No. 2(MS-2). May. Lexington, KY: AI.
- B. K. Low and Wilson H. Tang. (1997). "Efficient Reliability Evaluation Using Spreadsheet" Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 7, pp.749-752.
- B. K. Low and Wilson H. Tang. (2007). "Efficient Spreadsheet Algorithm for First-Order Reliability Method", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 133, No. 12, pp.1378-1387.
- Emmanuel O. Ekwulo and Dennis B. Eme. (2009). "Fatigue and Rutting Strain Analysis of Flexible Pavements designed using CBR Methods", African Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 3, No. 12, pp. 412-421.
- Lee, Chang-joon, Kim, Dowan, Mun, Sungho and Yoo, Pyoung-Jun. (2012). "Study on a Prediction Model of the Tensile Strain Related to the Fatigue Cracking Performance of Asphalt Concrete Pavements Through Design of Experiments and Harmony Search Algorithm", Journal of Highway Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 11-17.
- Lee, C. J., Yoo, P. J., Choi, J. and Ohm, B. (2012). "Development of Viscoelastic Finite Element Analysis Code for Pavement Structures", Journal of Highway Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 1-9.
- Lee, S. Y., Lee, H. J., Huh, J. W. and Park, H. M. (2008). "Development of Rutting Model for Asphalt Mixtures using Laboratory and Accelerated Pavement Testing", Journal of Highway Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 79-89.
- Park, J. Y., Park, J. W., Kim, S. H., Liu, J. H. and Jeong, J. H. (2012). "Comparative Analysis in Sensitivity of Cumulative Fatigue Damage of Mechanistic-Empirical Concrete Pavement Design Programs", Journal of Highway Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 15-24.
- Shell. (1951). "Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic". London: Shell.
- Shell. (1978). "Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic". London: Shell International Petroleum.
- Von Quintas, H. L., J. A. Sherocman, C. S. Hughes, and T. W. Kennedy. (1991). "Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System: AAMAS", NCHRP Report, No. 338, March. Washington, D. C.: National Cooperative Highway Research Program, National Research Council.