

단순회귀분석에 의한 배수성 아스팔트의 투수계수 산정모델 제안

Proposal for the Estimation of the Hydraulic Conductivity of Porous Asphalt Concrete Pavement using Regression Analysis

장영선 Jang, Yeongsun
김도완 Kim, Dowan
문성호 Mun, Sungho
장병관 Jang, Byungkwan

정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 석사과정 (E-mail: jangys1679@hanmail.net)
정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 석사과정 (E-mail: marinater@hanmail.net)
정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 조교수 · 교신저자 (E-mail: smun@seoultech.ac.kr)
정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학부 석사과정 (E-mail: sheraphim@nate.com)

ABSTRACT

PURPOSES : This study is to construct the regression models of drainage asphalt concrete specimens and to provide the appropriate coefficients of hydraulic conductivity prediction models.

METHODS : In terms of easy calculation of the hydraulic conductivity from porosity of asphalt concrete pavement, the estimation model of hydraulic conductivity was proposed using regression analysis. 10 specimens of drainage asphalt concrete pavement were made for measurement of the hydraulic conductivity. Hydraulic conductivity model proposed in this study was calculated by empirical model based on porosity and the grain size. In this study, it shows the compared results from permeability measured test and empirical equation, and the suitability of proposed model, using regression analysis.

RESULTS : As the result of the regression analysis, the hydraulic conductivity calculated from the proposal model was similar to that resulted from permeability measured test. Also result of RMSE (Root Mean Square Error) analysis, a proposed regression model is resulted in more accurate model.

CONCLUSIONS : The proposed model can be used in case of estimating the hydraulic conductivity at drainage asphalt concrete pavements in fields.

Keywords

drainage asphalt concrete pavement, regression analysis, hydraulic conductivity, porosity

Corresponding Author : Mun, Sungho, Assistant Professor
Department of Civil Engineering, 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.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

1.1. 개요

현재 도로의 포장에는 불투수성 포장이 주로 사용되고 있으나 배수성 포장은 1950년대 영국에서 개발되어 80년대 초부터 유럽과 미국을 중심으로 개발되었다(이

석근, 2008).

국내에서도 1990년대 처음 도입되어 현재까지 배수성 포장에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 서울시 및 주요 대도시 등의 보도를 중심으로 한 생활관련 도로, 광장 및 주차장 등에 사용되고 있다. 배수성 포

장은 투수성을 가지는 아스팔트 표층 아래 불투수층을 설치하여 우수를 포장의 가장자리로 배수하는 포장의 형태이다. 이는 공극의 역할이 매우 중요하며, 아스팔트 혼합물이 가지는 공극률에 따라 투수계수의 변화가 나타나기 때문이다. 본 연구에서는 배수성 포장의 투수성을 높이기 위하여 기존에 제시된 투수성 아스팔트에 사용되었던 골재의 입도와 배합설계가 아닌 새로운 입도와 배합 조건을 사용하여 배수성 아스팔트 혼합물을 제작하여 투수계수 산정을 위해 투수시험을 실시하였다. 또한 투수계수 산정에 사용한 실험모델과 여러 연구에서 제시하였던 투수계수 산정 경험적 모델에 적용하여 비교하였고, 경험적 모델을 이용하여 산정된 투수계수 값을 통해 결과적으로 단순회귀분석을 이용하여 기존의 경험적 모델에 공극률만 고려된 새로운 투수계수 산정모델을 제안하였다.

2. 배수성 아스팔트 혼합물 제작

2.1. 입도선정

2.1.1. 골재입도 및 배합설계

본 연구에서는 기존의 아스팔트 혼합물이 가지는 낮은 투수성을 향상시키고자 기존의 혼합물에 사용되는 입도와 배합조건은 달리하여 배수성 아스팔트 혼합물을 제작하였다. 기존의 입도와는 상이하게 SMA 골재를 배합하여 혼합물을 제작하였다. SMA 골재는 형상이 기존의 배합 시 사용되는 일반 쇄석과 비교하여 둥근 형상을 지니고 있기 때문에 골재와 골재사이의 공극형성이 우수할 것으로 판단하여 적용하였다. 연구에서 사용한 SMA 골재는 19mm, 13mm, 10mm를 사용하였으며 Fig. 1은 Table 1의 입도분포를 토대로 작성한 입도분포곡선이다. 검은 점선은 상한입도와 하한입도를 나타내며, 파란색실선은 설계입도, 빨간색 실선은 실제배합 입도이다. 설계입도와 실제배합입도의 차이가 작은 것을 그래프에서도 확인할 수 있다.

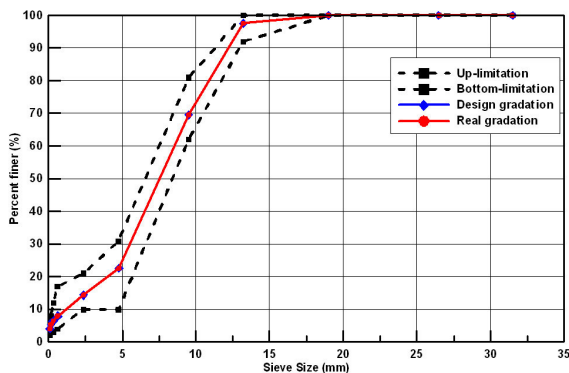


Fig. 1 Grain-size Distribution Curve

Table 1. Gradation of Porous Asphalt Mixture

Sieve Size (mm)	Percent Passing (%)			
	Up-limitation	Bottom-limitation	Design Gradation	Real Gradation
31.5	100	100	100	100
26.5	100	100	100	100
19	100	100	100	100
13.2	100	92	97.6	97.59
9.5	81	62	69.6	69.58
4.75	31	10	22.6	22.58
2.36	21	10	14.4	14.42
0.6	17	4	8.0	7.97
0.3	12	3	6.5	6.51
0.15	8	3	5.5	5.53
0.075	7	2	4.2	4.18

2.1.2. 아스팔트 혼합물 제작

연구에서 제작되어진 아스팔트 혼합물은 KSF 2377에 명시되어있는 방법으로 마샬다짐기를 사용하지 않고 선화다짐시험기를 이용하여 지름 100mm, 높이 60mm의 원통형 시편을 제작하였다. 마샬다짐 시 충격으로 인한 골재의 균열은 투수성능평가에 영향을 미칠것으로 판단하였기 때문이다. Fig. 2는 연구에서 제작한 아스팔트 혼합물 시편의 모습이다. 각각의 공극률을 달리하여 같은 제작방법으로 10개의 시편을 제작하였다.



Fig. 2 Porous Asphalt Concrete Pavement Specimens

2.2. 투수계수 산정

연구에서 수행된 실내 투수 시험은 KSF 2494에 명시되어 있는 시험방법에 의거하여 수행하였으며, 본 시험은 도로 포장용 배수성 아스팔트 혼합물의 투수성을 실내에서 평가하는 방법이다. 투수계수 측정결과 Table 2와 같은 결과를 실험을 통해 측정하였으며, 투수계수는 공극률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있다.

Table 2. Result of Air Voids and Hydraulic Conductivity

Conductivity (cm/sec)	Air voids (%)
0.002	10.93
0.022	13.48
0.003	13.56
0.012	15.58
0.042	15.59
0.006	15.91
0.101	19.31
0.109	21.47
0.149	21.68
0.471	32.67

3. 투수계수 산정 모델

3.1. 경험식 모델 적용 및 결과

본 연구에서 최종적인 목적은 공극률이 고려된 투수계수 산정 모델의 제안이다. 투수계수를 결정하는 경험적 모델에 의한 방법은 골재의 유효입경 d_e 와 공극률 n_e 을 고려하여 제안된 여러 가지 공식들 중 본 연구의 조건과 부합되는 몇 가지 공식을 나타낸 것이 Table 3이다.

Table 3. Hydraulic Conductivity for Empirical K Models

Expressions for K models	References
$K = \frac{1.1}{\mu} \cdot \left(\frac{n_e}{1-n_e}\right)^2 \cdot d_e^2$	Zunker
$K = \frac{\rho g}{\mu} \cdot 0.01 \cdot n_e^{3.287} \cdot d_e^2$	Slichter
$K = \frac{\rho g}{\mu} \cdot \frac{d_e^2 \cdot n_e^3}{180 \cdot (1-n_e)^2}$	Kozeny-carman

Table 4는 Table 3의 각각의 모델에 투수계수를 결정하는 경험적 모델에 적용된 변수들을 나타낸 표이다. Table 4에서 유효입경(d_e)이란 골재의 입자 크기가 입도분포곡선(grain-size distribution curve) 상에서 통과중량 백분율의 10%에 해당하는 입경을 말하는 것으로서, Fig. 1에서 확인할 수 있다. 유체의 밀도(ρ)와 점성계수(μ)는 15°C에서의 값을 사용하였으며 균등계수(η)는 입도분포곡선(grain-size distribution curve) 상에서 통과중량 백분율의 10%입경에 대한 통과중량 백분율 60% 입경의 비로 정의되는 계수로서 입도분포의 상태를 나타낸다. Fig. 1의 그래프에서 확인할 수 있다. d_{10} , d_{60} 의 해당하는 크기를 적용하였다. Table 5는 각각의 투수계수 산정모델에 적용한 결과를

나타낸 표이다.

Table 4. Hydraulic Conductivity for Empirical K Models

Parameters					
μ	dynamic viscosity (g/cm · sec)	0.99913	d_e	effective aggregate size (cm)	0.112
ρ	fluid density (g/cm ³)	0.0117	η	coefficient of uniformity of aggregate	0.124
g	gravitational acceleration (m/sec ²)	9.81	n_e	air voids(%)	Table 2.
d_{10}	grain diameter with 10% size finer than(cm)	0.112	d_{60}	grain diameter with 10% size finer than(cm)	0.903

Table 5. Comparison of Measured Hydraulic Conductivity K(cm/s) for Empirical K Models

Measured k		Calculated K(cm/s) based on Empirical Model K		
		Zunker	Slichter	Kozeny-carman
Mean	Air voids (%)	k	k	k
0.002	10.93	0.018	0.007	0.010
0.022	13.48	0.029	0.015	0.019
0.003	13.56	0.029	0.015	0.019
0.012	15.58	0.040	0.023	0.031
0.042	15.59	0.040	0.023	0.031
0.006	15.91	0.042	0.025	0.033
0.101	19.31	0.068	0.047	0.065
0.109	21.47	0.088	0.067	0.094
0.149	21.68	0.090	0.069	0.097
0.471	32.67	0.278	0.266	0.449

3.2. 실험적 모델, 경험적 모델에 대한 적합성 판정

3.2.1. 개요

회귀분석이란 특정 그 현상에 영향을 미칠 수 있는 변수들 사이의 관계를 분석하고 모형화하기 위한 통계적 기법이다. 회귀분석에서는 특정 현상과 그 현상에 영향을 미칠 수 있는 변수들 사이의 함수관계를 표현할 수 있는 모형을 이론적 근거나 경험적 판단에 의해서 설정하고, 변수들의 관측된 자료에 의해서 함수관계를 추정

한 다음, 추정된 모형을 이용해서 추정 혹은 예측을 하는데 사용되어진다. 따라서 회귀분석은 사회, 과학, 물리학 등 거의 모든 학문분야에 널리 사용되고 있는 통계적 분석 방법일 것이다(김희술, 2002). 본 연구에서 실시한 실험에 의하여 독립변수(Independent Variable)로부터 반응변수(Response Variable)를 산정하였다. 이 과정에서 실험에 의한 반응변수와 실험모델에 의한 투수계수가 어느 정도 정확성을 갖는지에 대해 판단하여 볼 필요가 있다. 실험에 의한 반응변수는 독립변수에 의해 종속되는데 이러한 독립변수에 대한 반응변수의 추세는 회귀분석(Regression Analysis)으로 판명되어질 수 있다. 실험에 의해서 판단되어진 반응변수들에 대한 회귀분석을 실시하여 본 연구에서 수행된 실험에 대한 회귀모형을 선정하고자 한다. 또한, 이러한 회귀모형은 연구에서 선정한 경험적 모델과 상관관계분석(Correlation Analysis)을 통하여 경험적 모델을 기준으로 한 적합성이 판단되어질 수 있다.

회귀분석은 2변량사이의 경향을 모델로 산정하는 방법으로 변량들의 관계를 확률변수의 함수로 표현하고 이를 평균항과 분산항으로 나타내는 것이다. 이러한 회귀모형을 이용하여 한 변량의 독립변수에 기초하여 다른 종속변수의 통계치를 구할 수 있는 추정자(Predictor)로 활용될 수 있다. 회귀분석을 수행하기 앞서 Fig. 3과 같이 산포도(Scatter Diagram)작성하였다.

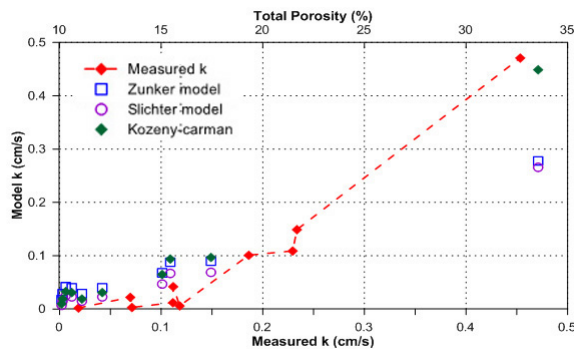


Fig. 3 Scatter Diagram of Measured K and Empirical K

회귀모형은 선형회귀, 로그회귀, 비선형회귀 등 다양한 방법으로 표현되어질 수 있다. 하지만 연구에서는 공극률과 입도가 고려된 경험적 모델에 기초한 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석을 수행하기 위해 실험적 반응변수와 산정된 경험적 모델에 의한 투수계수의 경향을 파악해 볼 필요가 있다. 이에 대하여 연구에서 생성하고자 하는 회귀모형은 경험적 모델에 기초하여 산정

하고자 한다. 따라서 선정한 경험적 모델과 연구를 통해 생성할 회귀모형은 다음 Table 6과 같은 관계를 갖는다고 할 수 있다. 경험적 모델은 균등계수, 유효입경, 점성계수 등의 다양한 변수에 의해 산정되지만 생성할 회귀모형은 하나의 독립변수인 공극률에만 의존하게 된다. 이 방법으로 산정한 회귀모형은 다른 변수가 주어지지 않고 공극률만 주어진 경우의 실험적 모델이라 할 수 있다. 이러한 실험적 모델을 산정하기 위해 α, β, γ 를 결정하도록 한다. 이는 기본적인 회귀모형의 산정으로 경험적 모델과 직접적으로 상관관계를 비교할 수 있다.

Table 6. Relation Between Expression Model and Regression Equation Model

References	Expressions for K Models	Regression Equation Model
Zunker	$K = \frac{1.1}{\mu} \cdot \left(\frac{n_e}{1-n_e}\right)^2 \cdot d_e^2$	$K = \alpha \left(\frac{n_e}{1-n_e}\right)^2$
Slichter	$K = \frac{\rho g}{\mu} \cdot 0.01 \cdot n_e^{3.287} \cdot d_e^2$	$K = \beta n_e^{3.287}$
Kozeny-carman	$K = \frac{\rho g}{\mu} \cdot \frac{d_e^2 \cdot n_e^3}{180 \cdot (1-n_e)^2}$	$K = \gamma \frac{n_e^3}{(1-n_e)^2}$

회귀모형은 종속변수에 대한 경향과 경험적 모델에 기초한 함수에 의거하여 다양한 모델로써 통계적 추정자로 활용되어질 수 있다. 이와 관련하여 본 연구에서 생성할 수 있는 회귀모형은 기초하고 있는 경험적 모델의 특성에 따라 다양하게 분석되어질 수 있다. 경험적 모델 중 Zunker의 경험적 모델과 Kozeny-Carman의 경험적 모델은 독립변수의 함수관계가 분수로 이루어져 있기 때문에 Eq. (1)과 (2)와 같은 역함수의 관계를 갖는다.

$$Y = \alpha(X^2 - 2X + 1) \quad (1)$$

$$Y = \gamma(X^3 - 2X^2 + X + \xi) \quad (2)$$

여기서 종속변수 Y와 독립변수 X는 기존 투수계수의 종속변수와 공극률의 독립변수의 역수를 의미한다. 또한 회귀모형을 선정하는 과정에서 발생하는 변수(ξ) 값은 최종적으로 선정되어질 회귀모형의 실제 회귀계수와 관계가 있다(상기 식의 회귀계수는 최종 회귀모형에 산정되어지는 계수의 역수관계를 갖는다). Slichter의 경험적 모델에 기초하는 회귀모형은 일반 비선형회귀(Non-Linear Regression)로 구성되어지기 때문에 비선형회귀분석만을 통하여 β 값을 산정하도록 한다.

3.3. MATLAB을 이용한 회귀모델 산정

3.3.1. Zunker의 경험적 모델에 기초한 회귀모델 산정

(1) 단일 독립변수에 의한 회귀모델

상기 Table 6에서 언급한 바와 같이 이 모델 산정 방식은 투수계수를 독립변수로 판단하기보다 $n_e/(1-n_e)$ 의 함수식을 독립변수 X 로 판단하여 이에 대한 회귀계수를 산정하는 방법이다. 그 결과로 다음과 같은 Eq. (3)을 산정하였다.

$$Y = \alpha X^2 \quad (3)$$

이를 수행한 결과 회귀계수 및 회귀모델은 Table 7과 같으며 Fig. 4와 같은 결과를 얻게 되었다.

Table 7. Coefficient of Regression and Regression Model of Zunker Model

Coefficient of Regression(α)	Regression model
1.9022	$Y = 1.9022X^2$

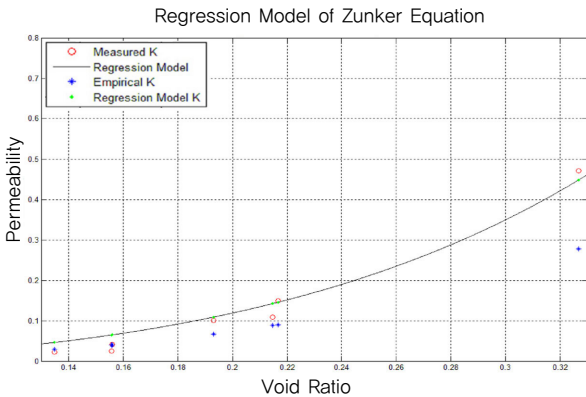


Fig. 4 Regression Analysis of Measured K and Zunker Model K

(2) 독립변수 역수에 의한 2차 방정식 회귀모델

이는 반응변수와 독립변수의 역수로 구성된 회귀모델을 산정한 후, 경험적 모델을 역수로 구성하여 변수의 역수로 구성된 회귀모델과 어떠한 상관관계를 가지고 있는지 확인하고자 한다. 이때 실험에 의해 측정된 투수계수의 역수를 통계적 종속변수 Y 로 판단하며, 공극률의 역수를 독립변수 X 로 판단한다. 이에 대해 Eq. (4)와 같은 회귀모델을 산정하였다.

$$Y = \alpha_2 X^2 + \alpha_1 X + \alpha_0 \quad (4)$$

이를 수행한 결과 회귀계수 및 회귀모델은 Table 8과 같으며 Fig. 5와 같은 결과를 얻게 되었다.

Table 8. Coefficient of Regression and Reciprocal of Statistical Regression Model of Zunker Model K

Coefficient of Regression			Reciprocal of Statistical Regression Model
α_2	α_1	α_0	
2.1474	-12.0209	17.9036	$Y = 2.1474X^2 - 12.0209X + 17.9036$

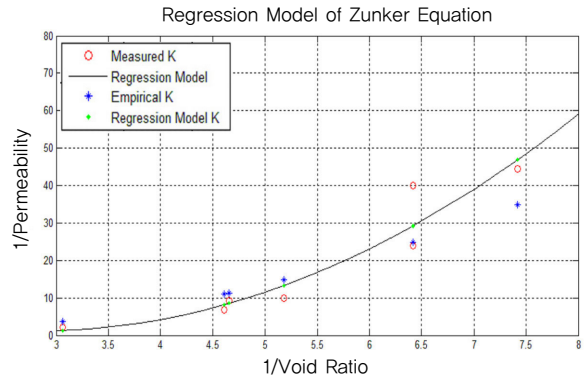


Fig. 5 Reciprocal of Statistical Regression analysis of Zunker Model K

3.3.2. Slichter의 경험적 모델에 기초한 회귀모델 산정

Slichter의 경험적 모델은 비선형통계함수를 이용하여 다음 Eq. (5)와 같은 회귀모델을 산정하였다.

$$Y = \beta X^{3.287} \quad (5)$$

이를 수행한 결과 회귀계수 및 회귀모델은 Table 9와 같으며 Fig. 6과 같은 결과를 얻게 되었다.

Table 9. Coefficient of Regression and Regression Model of Slichter Model

Coefficient of Regression(β)	Regression model
18.8184	$Y = 18.8184X^{3.287}$

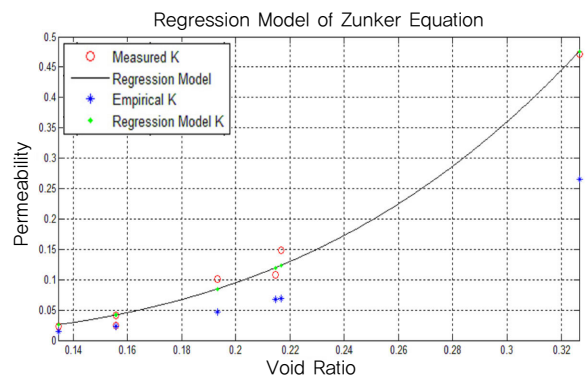


Fig. 6 Regression analysis of Measured K and Slichter Model K

3.3.3. Kozeny-Carman의 경험적 모델에 기초한 회귀모델 산정

(1) 단일 독립변수에 의한 회귀모델

상기 Table 6에서 언급한 바와 같이 모델 산정방식은 투수계수를 독립변수로 판단하여 이에 대한 회귀계수를 산정하는 방법으로 다음 Eq. (6)과 같은 회귀모델을 산정하였다.

$$Y = \gamma \frac{X^3}{(1-X)^2} \quad (6)$$

이를 수행한 결과 회귀계수 및 회귀모델은 Table 10과 같으며 Fig. 7과 같은 결과를 얻게 되었다.

Table 10. Coefficient of Regression and Regression Model of Kozeny-carman Model

Coefficient of Regression(γ)	Regression model
6.3240	$Y = 6.3240 \frac{X^3}{(1-X)^2}$

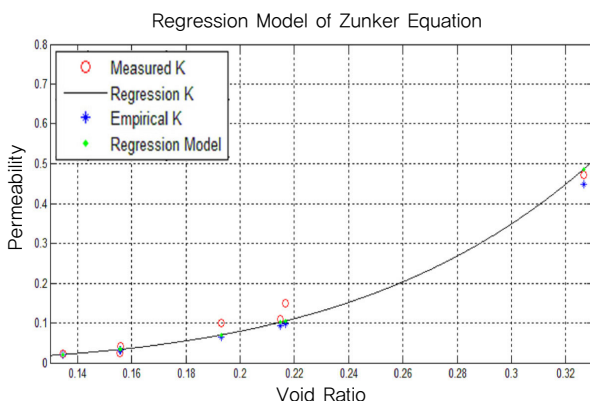


Fig. 7 Regression analysis of Measured K and Kozeny-carman Model K

(2) 독립변수 역수에 의한 2차 방정식 회귀모델

Zunker 경험적 모델에 기초한 회귀모델을 산정해서 수행했던 과정을 이용하여 Eq. (7)과 같은 회귀모델을 산정하였다. Table 11은 회귀계수와 회귀모델을 나타내며 Fig. 8은 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

$$Y = \gamma_3 X^3 + \gamma_2 X^2 + \gamma_1 X + \gamma_0 \quad (7)$$

Table 11. Coefficient of Regression K and Reciprocal of Statistical Regression Model of Kozeny-carman Model

Coefficient of Regression			
γ_3	γ_2	γ_1	γ_0
-0.7836	14.3415	-72.2841	111.6876
Reciprocal of Statistical Regression Model			
$Y = -0.7836X^3 + 14.3415X^2 - 72.2841X - 0.7836$			

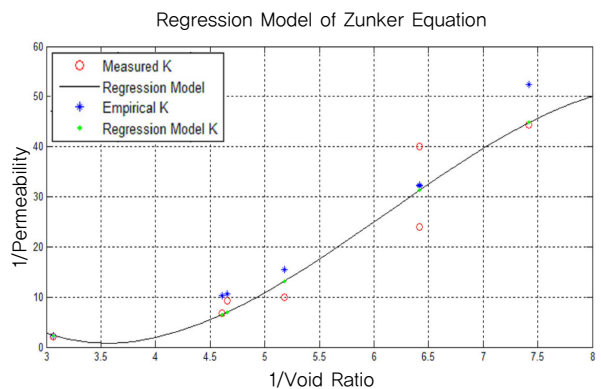


Fig. 8. Reciprocal of Statistical Regression analysis of Kozeny-carman Model K

4. 상관분석

4.1. 개요

독립변수인 공극률에 의해서 측정되어진 투수계수는 실험에 의해서 판정되어진 결과이기 때문에 경험적 모델에 의한 투수계수와 양자간 관계를 이루고 있는지 검정해 볼 필요가 있다. 또한, 실험에 의해 결정되어진 투수계수를 이용하여 회귀모델을 구성하였는데, 이 회귀모델(경험적 모델에 기초한)과 경험적 모델이 어떠한 관계를 갖고 있는 지 파악하기 위해 회귀모델과 경험적 모델의 상관관계분석 및 RMSE(Root Mean Square Error)분석을 실시한 후, 경험적 모델의 계수와 회귀모델의 계수를 비교하였다.

4.2. 상관관계분석

본 연구에서 제안한 회귀모델의 조건부 표준편차의 크기가 매우 작다고 판단되어질 경우 실험에 의한 투수계수의 회귀모델은 독립변수에 대하여 실제 투수계수의 적절한 예측자라 판단할 수 있다. 이렇듯 독립변수에 대한 투수계수의 예측 평균값의 정확도는 상관계수에 의해 확인이 가능하다. 이를 표현하는 R^2 값은 상관계수의 제곱 값을 나타내며, 서로 다른 방법으로 결정되어진 두 반응변수들의 변화에 대한 확률적 의미를 갖는다. 여기

서 종속변수들은 표준정규분포를 이룬다고 가정하였다. 다음 Table 12은 본 연구의 실험에 의한 투수계수 값과 경험적 모델로 인해 제시되는 투수계수 값에 대한 상관 분석 결과이다.

Table 12. Analysis of the Correlation Coefficient of Permeability by Empirical Formula and Experimental Coefficient of Permeability

Correlation Factor of Empirical Formula		
Zunker	Slichter	Kozeny-Carman
0.9934	0.992	0.98

상관분석결과 경험식에 의한 투수계수와 실험에 의한 투수계수의 결과 값의 변화에 대해 일치하는 정도가 매우 우수한 것으로 분석되었고, 그 결과 실험값과 경험식 값은 매우 일치하는 것으로 판단하였다. 또한 실험에 의해 결정된 회귀모델의 정확성을 판단하기 위해 회귀모델과 경험적 모델의 상관관계를 분석하였다. Table 13은 실험에 의한 회귀모델과 경험적 모델의 상관관계 분석을 실시하여 그 결과를 나타낸 Table이다.

Table 13. Regression analysis of Empirical Models and Measured Regression Model

Empirical Model K	Regression model	Correlation coefficient
Zunker Model K	Empirical Regression model	1
	Regression model of inverse independent variable	0.994
Slichter Model K	Empirical regression model	1
Kozeny-Carman Model K	Empirical regression model	1
	Regression model of inverse independent variable	0.982

4.3. RMSE(Root Mean Square Error) 분석

상관관계분석결과 실험에 의한 투수계수, 회귀모델, 경험적 모델의 변화 추세는 매우 일치하는 것으로 판단하였다. 하지만 Fig. 4~Fig. 8을 보면 알 수 있듯이 회귀모델과 실험에 의한 투수계수 값, 경험적 모델 결과 값이 모두 상이한 것을 볼 수 있다. 따라서 결과 값들에 대한 추세는 매우 우수하다고 판단할 수 있으나 그 차이에 대한 검증이 필요하며 이를 위해 RMSE 분석을 실시하였다. RMSE 값은 Eq. (8)과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (K_{v,n} - k_{v,n})^2} \quad (8)$$

여기서, N 은 실험을 실시한 공극률의 횟수를 나타내며, K 는 회귀모델에 의한 투수계수 결과 값을 k 는 경험적모델에 의한 투수계수 결과 값을 나타낸다. v 는 해당 실험의 독립변수인 공극률을 나타내며, n 은 이에 대한 실험 순번을 나타낸다. 이에 대한 RMS 오차가 어느 정도인지를 판단한 결과 다음 Table 14~15와 같은 결과를 얻게 되었다.

Table 14. RMSE value of Measured K and Regression Model

Empirical Model K	regression model	RMSE
Zunker Model K	Empirical regression model	0.0251
	regression model of inverse independent variable	4.8234
Slichter Model K	Empirical regression model	0.0139
Kozeny-Carman Model K	Empirical regression model	0.0218
	regression model of inverse independent variable	4.5184

Table 15. RMSE value of Measured K and Empirical Model

Empirical Model K	Regression Model	RMSE
Zunker Model K	Empirical regression model	0.0780
	regression model of inverse independent variable	7.2507
Slichter Model K	Empirical regression model	0.0874
Kozeny-Carman Model K	Empirical regression model	0.0264
	regression model of inverse independent variable	5.7994

5. 결론

상관관계분석과 RMSE분석을 수행한 결과 본 연구에서 개발한 회귀모델은 경험적 모델과 비교한 경우 매우 우수한 것으로 판단하였으며, RMSE값을 비교한 경우 경험적 모델에 기초한 회귀모델이 경험적 모델보다 오차가 작은 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 실험에 의한 투수계수의 회귀모델의 검증을 완료하였으며, 경험적 모델의 변수는 본 연구에서 다음 Table 16과 같이 결정하였다.

Table 16. Result of Regression Equation

References	Expressions for K models	Regression Equation
Zunker	$K = 1.17935 \left(\frac{n_e}{1-n_e} \right)^2$	$K = 1.9022 \left(\frac{n_e}{1-n_e} \right)^2$
Slichter	$K = 10.50851 n_e^{3.287}$	$K = 18.81841 n_e^{3.287}$
Kozeny-Carman	$K = 5.838061763 \frac{n_e^3}{(1-n_e)^2}$	$K = 6.3240 \frac{n_e^3}{(1-n_e)^2}$

이 연구는 배수성 아스팔트 혼합물의 투수 성능을 평가하는 주요인자인 투수계수를 공극률만을 고려하여 쉽게 산정할 수 있도록 단순회귀분석을 이용하여 투수계수 산정모형을 개발하였다. 개발된 투수계수 산정모형과 실험을 통해 측정된 투수계수, 그리고 각 경험적 모델에 의해 산출된 투수계수를 비교분석하여 모델의 적합성을 검증하였다. 투수계수 산정모형의 개발을 위해 배수성 아스팔트 혼합물을 공극률을 다르게 하여 10개의 시료를 제작하여 실험을 하였으며, 공극률이 고려되었던 기존에 제안된 경험적 모델에 적용하여 분석하였다. 그 결과 연구에서 제작한 배수성 포장 아스팔트와 유사한 아스팔트 혼합물의 경우 연구에서 개발한 모델을 이용하여 투수계수를 산정할 수 있다. 연구에서 개발된 모델은 실험을 통해서 직접 산출한 투수계수와 거의 근접한 것으로 평가되었기 때문이다.

연구결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 연구에서 제작된 아스팔트 혼합물은 배수성 아스팔트 혼합물로 분류되며, 기존의 입도와 상이하게 SMA 골재를 적용하여 공극률의 서로 다른 10개의 시편을 제작하였다.
2. 기존의 입도와 공극률이 고려된 투수계수산정 경험식에 적용하여 비교분석한 결과 공극률이 증가함에 따라 투수계수도 커지는 경향을 분석하였다. 적용된 투수계수 경험식 Zunker 모델, Slichter 모델, Kozeny-Carman 모델 중 Zunker 모델이 실험을 통해 측정된 투수계수와 가장 유사한 경향을 보였다.
3. 상관관계 분석결과 본 연구에서 개발한 모델과 경험적 모델의 반응계수 변화 추세를 일치하는 것으로 나

타났으며 독립변수의 역수에 기초한 회귀모델은 다른 변화 추세를 나타내었으나 일치하는 정도가 매우 우수한 것으로 판단하였다.

4. 본 연구에서 제안한 투수계수 산정모형은 기존의 공극률이 고려된 경험식을 이용하여 개발되었으며, 실험에 의해 산정된 투수계수와 유사한 결과를 보임으로써 적합성이 검증되었다. 그러므로 연구에서 제안한 투수계수 산정모형은 배수성 포장 아스팔트의 투수계수를 산정할 경우 이용이 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부[미래창조과학부]의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. [No.2011-0030848]

References

- Kim, heesul, Ko, taejo, Kim, sunho, Kim, hyungsik, Jung, Jongwoon., 2002, Research on the thermal deformation modeling using by regression analysis, *Korea Society of Manufacturing Technology Engineers*. Vol 10, pp. 47~55.
- Jun, Dukchan, Song, youngsuk, Han, Shinin., 2010. Proposal of Models to Estimate the Coefficient of Permeability of Soils on the Natural Terrain considering Geological Condition. *The Journal of Engineering Geology*, Vol.20 No.1, pp. 35~45.
- Lee, Moonse, Ryu, Jechein, Lim, Heuideae, Park, Joowhan, Kim, Kyeingsu., Proposal for the Estimation Model of Coefficient of Permeability of Soil Layer using Linear Regression Analysis, 2008, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.18 No.1, pp. 27~36.
- Lee, Soohyung, Yoo, Inkyoon, Kim, Jewon, 2011. A study on the Structural Design of Permeable Asphalt Pavement, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*. Vol. 13. pp. 39~49.
- Kwon, Junbum, 2008. *Relationship between Void Ratio and Coefficients of Permeability of Porous Asphalt Pavement*. Master Thesis, Kyunghee University, Korea.
- Kim, Hyeongseok, 2009. *Development of Modified Asphalt Binder for Porous Pavement*. Master Thesis, Sejong University, Korea.
- Kim, Taekyun, 2010. *Development of Anisotropic Non-linear Permeability Constitutive Model and its Application to the Hydraulic Soil-structure Interaction Problems*. Master Thesis, Konkuk University, Korea.

(접수일 : 2013. 4. 18 / 심사일 : 2013. 4. 18 / 심사완료일 : 2013. 5. 8)