

풍화잔류토의 생성모델의 제안

A Proposal of a Model for the Generation of Weathered Residual Soils

민 덕 기¹ Min, Tuk-Ki

이 완 진² Lee, Wan-Jin

Abstract

A new fragmentation model, called the GRS (the generation model of weathered residual soils) model, was proposed in this study. This model could identify the formation of a residual soil. This model is based on the phenomena that as the soil was weathered more highly, soil particles were smaller and pores were more expanded simultaneously. The possibility of fragmentation, P_F , which was based on the fractal theory, was introduced in this model. There were some fundamental notions in the GRS model that soil particles were generated as the rock is fragmented, and the fragmentation of the rock was performed step by step. The P_F of the rock was not constant at each fragmentation steps. As a result of application on the GRS model, there were more residue where P_{Fi} s were small at any particle size. There was a S-shape of PSD curve at the concave shape of P_{Fi} s, and the PSD curve goes to a gaped graded curve at the convex shape of P_{Fi} s. The shape of PSD curve was concave in the case of small P_{Fi} s. The value of P_{Fi} increased with the coefficient of uniformity (C_u) and the fragmentation fractal dimension (D_f), but had no relation with the coefficient of gradation (C_c).

요 지

본 연구에서는 풍화잔류토의 생성을 특성화시키는 새로운 분열모델을 제안하였으며, GRS모델이라고 명명하였다. GRS 모델은 풍화가 많이 진행될수록 흙 입자의 크기가 작아지고 흙 속의 간극이 많아진다는 사실에 착안하였으며, 프랙탈 이론으로부터 도출된 P_F (분열가능성)로써 풍화잔류토의 생성과정을 표현할 수 있다. 암석이 분열됨으로써 흙 입자들이 생성되며 암석의 분열은 단계별로 진행되지만 각 단계별 분열가능성은 일정하지 않다는 것이 GRS모델의 기본개념이다. GRS모델의 적용성을 검증한 결과, 입자들의 잔류량이 많은 입경에서 P_{Fi} (분열단계별 분열가능성)가 작게 산출되었고, 입도분포가 양호할수록 크게 산출되었다. 일반적인 흙에서 나타나는 S자형상의 입도분포곡선은 P_{Fi} 가 높은 오목형상에서 나타났으며, P_{Fi} 의 변화형상이 볼록하면서 높은 값을 가질 경우에는 빈입도의 입도분포특성을 나타내었다. 전반적으로 P_{Fi} 가 작은 경우에는 P_{Fi} 의 변화형상에 관계없이 큰 입자의 잔류량이 많은 오목한 형상의 입도분포곡선을 나타내었다. P_{Fi} 의 평균값은 균등계수(C_u)와 분열프랙탈차원(D_f)에 비례하여 증가하였으나, 곡률계수(C_c)와는 무관하였다.

Keywords : Fractal theory, GRS model, Particle size distribution, Possibility of fragmentation

1 정희원, 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, tkmin@ulsan.ac.kr)

2 정희원, 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 박사수료, 기술사 (Member, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, P.E.)

1. 서론

최근 국내의 토목공학분야에 새롭게 접목되고 있는 이론 중의 하나가 프랙탈(fractal)이론이다. 이를 이용한 연구성과로, 민과 이(2003, 2004) 및 민 등(2004)이 주로 분열프랙탈이론을 이용하여 흙의 입도분포특성의 분석, 체 분석시험의 규준에 대한 고찰, 흙 입자의 파쇄성을 표현하는 파쇄율(C_R)의 제안 등의 연구를 수행하였으며, 천과 김(2001)이 스펙트럼분석기법을 프랙탈이론에 적용시켜 암 절리면 거칠기에 대한 경험식을 도출하였고, 구조분야에서 콘크리트의 균열을 프랙탈차원으로 분석한 연구와 수자원 분야에서 하천의 모습을 프랙탈차원으로 표현한 몇몇의 연구가 있으나, 아직까지는 활성화되지 못하고 있다.

외국의 경우 토질과학(soil science), 농업(tillage)분야 등에서 프랙탈을 이용한 연구가 활발히 진행되었는데, Vallejo(1996)는 암밀시험중에 있는 점토시료의 조직(fabric)에 대해 연구한 결과 암밀진행에 따라 간극의 크기와 모양이 다르게 나타난다는 것을 보여주었고 시료를 통과하는 유량을 간극 표면의 거칠기에 대한 프랙탈차원으로 표현하는 경험식을 도출하였으며, Vallejo와 Stewart(2001)는 slaking을 표면장력으로 해석하고, 이 표면장력을 간극의 크기와 연관시킨 다음, slaking의 발생가능성을 간극의 크기에 대한 프랙탈차원으로 해석하는 연구를 수행하였다.

Gori와 Mari(2001) 및 Chan과 Page(1997)는 각각 모래와 구리분말에 대한 전단시험을 수행한 결과 입자표면의 프랙탈차원이 증가할수록 내부마찰각이 증가하였으며, Bonala와 Reddi(1999)는 Rieu와 Sposito(1991)의 이론을 근거로 하여 입자들의 크기 분포에 대한 분열프랙탈차원을 점착력과 간극의 지름과의 관계로 정립하는 식을 도출하였다. 또한, Erzan과 Gungor(1995)은 클러스터의 응집과정을 프랙탈차원으로 잘 표현할 수 있다고 하였으며, Moore와 Donaldson(1995)은 입자사이의 공간이 메워질수록 강도가 커지고 압축성이 작아지는데, 공간이 메워질수록 표면프랙탈차원이 커진다고 하였다. Gimenez 등(1998)은 흙의 입도분포특성과 밀도가 투수특성과 흙 입자의 함수능(water retention)에 영향을 주며, 입자표면의 거칠기는 간극구조와 관련이 있다고 하였다.

프랙탈이론을 이용한 연구중 지반공학과 관련하여 가장 활성화된 분야는 투수성에 관한 것으로서, Gimenez

등(1997)과 Rieu와 Sposito(1991) 등 많은 연구성과가 있으며, 이들 연구의 공통점은 흙의 간극특성을 프랙탈차원으로 표현하여 함수능과 투수특성을 예측하고 있다는 것이다.

이와 같이 기존의 연구결과들은 흙의 공학적 특성이 흙의 구조와 관련이 있으며, 흙의 구조는 프랙탈차원으로 표현할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 흙의 구조적 특성은 그 생성에 기인되는 것이 일반적이다. 흙은 크게 퇴적토와 풍화잔류토로 구분되며, 퇴적토는 흙 입자들이 뭉쳐서 생성되는 반면, 풍화잔류토는 신선한 암석이 풍화작용을 받아 여러 크기의 알갱이로 쪼개어져 생성된다. 일반적으로, 점토를 위주로 한 퇴적토에 대한 많은 연구성과가 있는 반면, 풍화잔류토에 대해서는 그러지 못하며, 더욱이 풍화잔류토의 생성과정을 다룬 연구는 거의 없는 실정이다. 그러므로, 본 연구에서는 프랙탈이론을 이용하여 풍화잔류토의 생성과정에 대해 분석하고자 한다.

2. 흙 입자들의 분열

가장 간단하게 흙의 구조를 분석하는 방법이 프랙탈이론(fractal theory) 중 하나인 분열프랙탈(fragmentation fractal)이다(Díaz-Zorita, 2002).

분열이란, 한 입자가 외부요인에 의해 작은 조각으로 깨어지는 과정으로써(Perfect, 1997), 분열프랙탈이란, 이러한 조각들로 이루어진 프랙탈물체를 나타내며, 흙이 대표적인 분열프랙탈물체이다. 반면, 흙은 내부에 간극을 포함하고 있기 때문에 프랙탈의 생성알고리즘에서 3차원 간극체로도 분류된다. 따라서, 흙 입자들의 입도분포특성을 다룰 때에는 분열프랙탈로 취급하고, 투수성 등 간극의 특성을 취급할 때에는 3차원 간극체로 흙을 취급하는 것이 일반적이다.

신선한 암석덩어리가 풍화작용을 받게 되면, 흙 입자들로 쪼개어지며 풍화작용도 외부요인중 하나이므로, 암석이 풍화되어 흙 입자들로 쪼개어지는 과정이 분열에 해당되며, 자기유사성 프랙탈물체중 Turcotte's cube (조각)모델에 비유된다. 또한, 자연상태의 풍화잔류토는 암석상태에 비해 간극이 커지는 것이 일반적이기 때문에, 자기유사성 프랙탈물체중 반복알고리즘에 의해 계속적으로 간극이 증가되는 Menger sponge(3차원 간극체)모델에 비유된다(Perfect와 Kay, 1995).

따라서, 본 논문에서는 신선한 암석이 풍화작용에 의

하여 여러 가지 크기의 흙 입자들로 쪼개어짐과 동시에 새로운 간극이 생성되는 과정을 분열이라고 정의하였으며, Turcotte's cube와 Menger sponge 모델을 동시에 적용시켜서 흙의 생성과정을 나타내었다.

그림 1(a)는 단위길이 L_0 를 가진 프랙탈물체로써, V_{p0} 는 초기 전체부피를, V_{ps0} 는 입자(solid)들의 초기 부피를, V_{pv0} 는 간극(void)의 초기 부피를 나타내며, 전체 조각은 1개이고, 그 길이는 r_0 이다. 이 초기상태에서 1단계 분열 과정을 거친 상태가 그림 1(b)이다. 1단계 분열 후의 전체 단위길이는 $L_1 (= L_0 \times P_{F1})$ 이고, 생성되는 조각의 개수는 $N_1 = (L_1/r_1)^d = (b_1)^d$ 이 된다. 여기서, d 는 위상차원으로써, 길이를 나타낼 때는 1, 면적을 나타낼 때는 2, 부피를 나타낼 때는 3이 된다. 또한, P_F 는 분열가능성을 나타내는 것으로써, 흙이 임의의 단계에서 다음단계로 분열될 때의 비율을 의미한다. $P_F = 1$ 이면 $L_{i-1} = L_i(r_{i-1} > r_i)$ 이고, $P_F < 1$ 이면 $L_{i-1} > L_i(r_{i-1} > r_i)$ 이며, $P_F = 0$ 이면 $r_{i-1} = r_i(L_{i-1} = L_i)$ 가 된다. 그림에서 S는 solid(흙 입자)를 나타내고, V는 간극(pore)을 나타내는 것으로써, 분열과 동시에 입자와 간극이 생성된다는 보여주고 있다.

그림 1(c)는 분열 m 단계 후의 상태로써, 전체 단위 길이는 $L_m (= L_{m-1} \times P_{Fm})$, 생성되는 조각의 개수는 $N_m = (L_m/r_m)^d = (b_m)^d$ 이 된다. 따라서, 각 분열단계별 생성되는 조각의 개수는 다음과 같다.

$$N_i = (L_i/r_i)^d = (b_i)^d \quad (1)$$

식 (1)은 프랙탈물체가 단위길이, L_i 를 b_i 등분하여 분열되면서 길이 r_i 를 가진 작은 조각들이 생성된다는 것을 의미하며, 이때, b_i 를 비례계수라 한다. 결정론적 자기유사성 프랙탈의 경우 비례계수는 다음의 식과 같

이 된다.

$$b^i = \frac{r_0}{r_i} ; i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$b = \frac{r_0}{r_1} = \frac{r_1}{r_2} = \dots = \frac{r_{m-1}}{r_m} = \text{const} \quad (3)$$

흙이 분열될 때 흙 입자와 함께 간극도 생성되므로, 입자가 생성되는 비율을 Λ 라 하면, 입자의 생성개수는 $N \cdot \Lambda$ 이 되며, 프랙탈차원 D_m 으로 표현하면, 다음의 식과 같이 된다.

$$D_m = \frac{\log(\text{생성자개수})}{\log(\text{비례계수})} = \frac{\log(N \cdot \Lambda)}{\log(b)} \quad (4)$$

여기서, D_m : mass fractal 차원

식 (4)는 $N \cdot \Lambda = b^{D_m}$ 이 된다. 여기서, $N \cdot \Lambda$ 는 그림 1(b)와 (c)에서 각각 S의 개수가 된다. 식 (1)과 (3)에서 $N = b^d$ 이므로, 다음이 성립된다.

$$\Lambda = b^{D_m - d} \quad (5)$$

식 (5)에서 $\Lambda = 1 - \Gamma$ 이고, Γ 는 간극이 생성되는 비율이다. 흙의 부피에 대해 식 (5)에서 $d=3$ 이 되고, Γ 에 대한 일반식은 다음과 같이 된다.

$$\Gamma = 1 - \Lambda = 1 - b^{D_m - d} \quad (6)$$

$$\Gamma_i = 1 - [b^i]^{D_m - 3} \quad (7)$$

식 (6), (7)은 분열시 단계별 생성되는 간극율로써, 기존의 연구결과들(Perfect와 Kay, 1995; Rieu와 Sposito, 1991)과 동일한 형태이다. 여기서, 결정론적 자기유사성의 경우 b 가 일정하기 때문에 D_m 은 임의의 흙에 대해

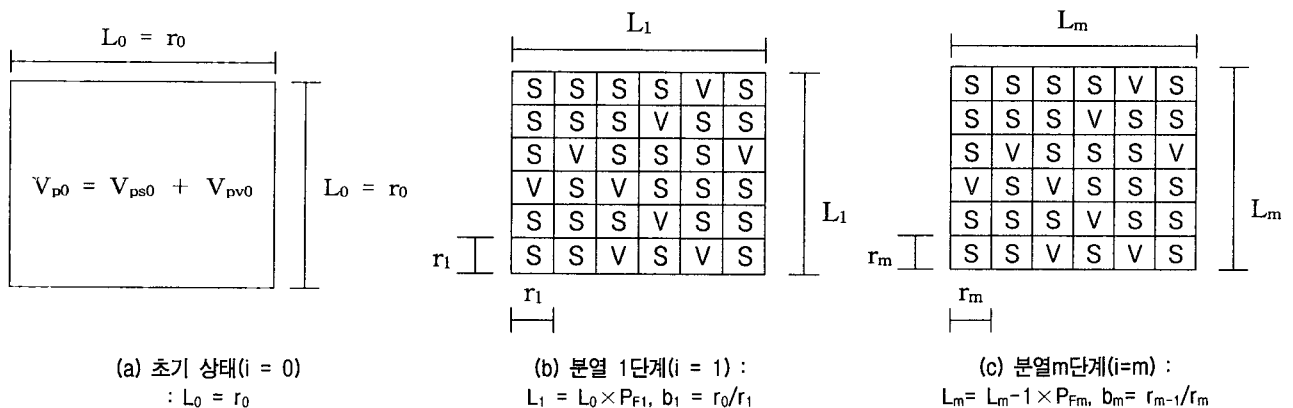


그림 1. 단위 길이 L_i 를 가진 프랙탈의 분열

고유의 값을 가진다. 따라서, Λ 와 Γ 는 일정하며, 식 (4)와 (1)에서 단계별 생성자 개수 N_i 는 일정하게 되고, N_i 가 일정하면 각 단계별 분열가능성인 P_{Fi} 도 일정하게 된다. 이러한 논리는 실제 흙의 적용에 있어서 맞지 않다. 그러므로, 암석으로부터 흙이 생성되는 과정을 보다 쉽게 구현하기 위해서는 분열가능성, P_F 에 대한 새로운 접근방법이 요구된다.

3. GRS모델의 제안

흙과 같은 분열프랙탈물체는 분열프랙탈차원(D_f)으로 표현되며, Tyler와 Wheatcraft(1992)는 D_f 의 범위가 $0 < D_f < 3$ 이라는 사실을 증명하였으나, 기존의 연구들에서 D_f 의 값이 3을 초과하는 경우가 종종 발생하고 있으며(민과 이, 2003; Gimenez 등, 1998; Kozak 등, 1996), Gimenez 등(2002)은 경작토의 D_f 가 3보다 크게 산출되어, 이를 non-fractal 이라고 명명한 바 있다. 이러한 원인은 입자의 분열가능성에 기인한다(Perfect, 1997). 분열가능성이 비례계수와 무관하면, 항상 $0 < D_f < 3$ 의 범위가 되지만, 분열가능성이 비례계수에 좌우될 경우에는 $D_f \geq 3$ 이 도출될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 비례계수와 무관한 분열가능성을 도출하는 새로운 분열모델을 제시하고자 하며, 이 모델은 신선한 모암이 풍화작용을 받아서 작은 흙 입자들로 변화되는 풍화잔류토의 생성을 특성화시킬 수 있으므로, GRS모델(풍화잔류토의 생성모델, a model for generation of weathered residual soils)이라고 명명하였다.

GRS모델을 구성하는데 있어서 기본 이론 및 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 그림 2(a)는 고체덩이(solid, V_{ps0})와 간극(pore, V_{pvi})으로 구성된 초기상태(분열단계 : $i=0$, 전체부피 :

V_{ps0})의 암석을 표현한 것으로서, 이 암석이 풍화를 받기 시작하면 단계별로 분열이 발생된다. 즉, 첫 번째 분열단계는 $i=1$ 로써(그림 2(b)), V_{ps0} 가 작은 크기로 분열되어 새로운 입자(V_{psi})와 간극(V_{pvi})이 생성되었다. 여기서, V_{pvi} 와 분열단계별로 생성된 간극은 분열의 진행과 관계없이 일정하게 유지되며, 흙 입자만 분열된다.

- 2) 입자들이 분열되는 비율을 분열가능성(P_F , possibility of fragmentation)이라고 정의한다. 그림 2(b), (c), (d)는 전 단계의 입자들이 모두 분열된 상태를 보여주고 있으므로, 분열가능성은 $P_{Fi} = 1$ 이 된다. 이 물체의 최종분열단계에서의 입자들의 크기는 모두 동일하게 되지만, 자연상태의 흙은 그림 3과 같이 크고 작은 입자가 공존하고 있으므로, $0 \leq P_{Fi} \leq 1$ 이 된다.
- 3) 흙 입자만 분열되며, 분열시 입자와 간극이 동시에 생성되므로, 임의의 분열단계에서 생성된 부피를 V_{pi} 라고 하면, 다음의 식 (8)과 (9)가 성립된다.

$$V_{pi} = V_{ps,i-1} \times P_{Fi}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

여기서, $V_{ps,i-1}$: 분열 $i-1$ 단계의 흙 입자의 부피

$$V_{pi} = V_{psi} + V_{pvi}, \quad i = 0, 1, \dots, m \quad (9)$$

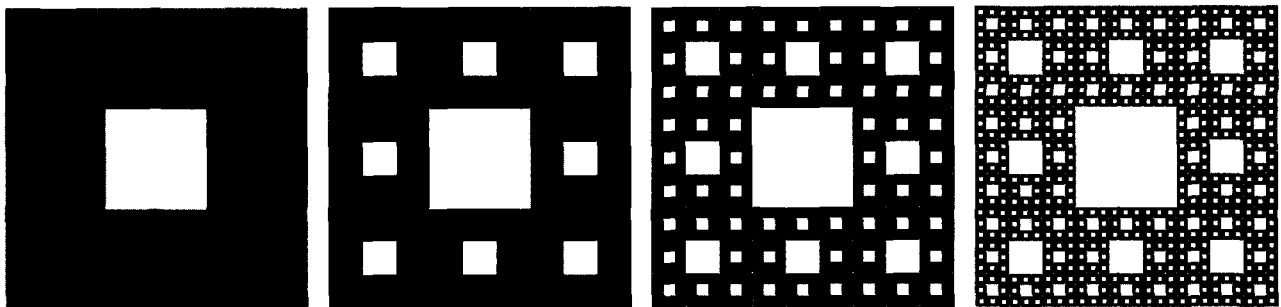
여기서, V_{psi} : 분열 단계별 입자의 부피

V_{pvi} : 분열 단계별 간극의 부피

식 (8)과 그림 3에 의거하여, 다음단계로 분열되지 않고 잔류하는 입자들의 부피는 다음과 같이 표현되며, 아래첨자 #은 '잔류'를 나타낸다.

$$V_{ps\#0} = V_{ps0} - V_{p1} = V_{ps0} \times (1 - P_{F1}),$$

$$V_{ps\#1} = V_{ps1} - V_{p2} = V_{ps1} \times (1 - P_{F2}),$$



(a) $i = 0$ 단계 : 초기상태

(b) $i = 1$ 단계 분열

(c) $i = 2$ 단계 분열

(d) $i = 3$ 단계 분열

그림 2. 흙 입자의 분열

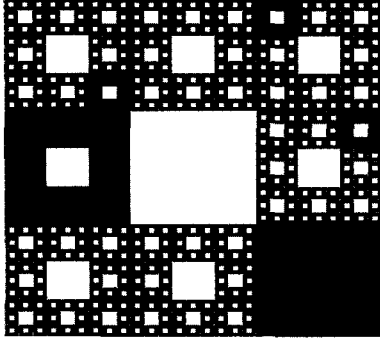


그림 3. $i = 3$ 단계 분열(P_{Fi} 를 고려한 경우)

$$\begin{aligned}
 V_{ps\#2} &= V_{ps2} - V_{p3} = V_{ps,2} \times (1 - P_{F3}), \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 V_{ps\#m} &= V_{psm} - V_{p,m+1} = V_{ps,m} \times (1 - P_{Fm+1}) \\
 \Rightarrow \\
 V_{ps\#i} &= V_{psi} - V_{psi} \cdot P_{F,i+1} \\
 &= V_{psi} \times (1 - P_{F,i+1}) \quad (10)
 \end{aligned}$$

4) 분열되지 않은 입자들은 잔류하기 때문에, 식 (10)에 의거하여, 분열 m 단계에서 존재하는 입자들의 부피, $V_{st,m}$ 는 다음과 같다.

$$V_{st,m} = \sum_{i=0}^m V_{psi} \times (1 - P_{F,i+1}) \quad (11)$$

단, $P_{F,m+1} = 0$

5) 분열 m 단계에서 흙 입자들의 무게를 $W_{st,m}$ 이라 하고, 이 흙을 체 분석시험하여 맨 상위체부터 순서대로 체에 남는 흙 입자들의 무게를 $W_{s\#0}, W_{s\#1}, \dots, W_{s\#m}$ 이라 하면, $W_{st,m}$ 은 다음과 같이 표현된다. 단, 입자의 비중 G_s 는 일정하다고 가정한다.

$$\begin{aligned}
 W_{st,m} &= \sum_{i=0}^m W_{s\#i} = \sum_{i=0}^m \{W_{psi} \times (1 - P_{F,i+1})\} \\
 &= G_s \cdot \gamma_w \cdot \sum_{i=0}^m \{V_{psi} \times (1 - P_{F,i+1})\} \\
 &= G_s \cdot \gamma_w \cdot V_{st,m} \quad (12)
 \end{aligned}$$

6) m 단계에서의 전체 간극비를 $V_{vt,m}$ 이라고 하면, 분열에 의하여 생성된 간극의 부피, ΔV_v 는 다음과 같다.

$$\Delta V_v = V_{vt,m} - V_{pv0} = \sum_{i=1}^m V_{pvi} = \sum_{i=1}^m \Gamma_i \cdot V_{pi} \quad (13)$$

$$\text{여기서, } \Gamma_i = \frac{V_{pvi}}{V_{pi}}$$

7) 분열가능성이 비례계수와 무관할 경우, 식 (7)에 의하여 Γ_i 를 구할 수 없으며, P_{Fi} 는 V_{psi} 의 함수이므로, V_{pvi} 를 구하기 위해 다음과 같이 가정하였다.

$$V_{pvi} = \eta_i \times \Delta V_v, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

$$\eta_i = \frac{W_{s\#i}}{W_{st,m} - W_{s\#0}} \quad (15)$$

$$\text{여기서, } \sum_{i=1}^m \eta_i = 1$$

식 (14)를 적용하여 V_{pvi} 를 구하면, 원래 모델에서의 도했던 값과는 다르게 산출된다. 그러나, 모든 흙에 대해 똑 같이 적용할 경우, 식 (14)와 (15)가 새로운 기준이 될 수 있다. 따라서, 본 모델에서의 V_{pvi} 는 분열되지 않고 잔류하는 흙의 무게인 $W_{s\#i}$ 에 해당하는 간극의 부피라고 정의되며, 이때의 간극의 부피는 분열에 의해 생성된 부피, ΔV_v 만을 고려한다.

8) 암석의 단위중량 γ_R 과 흙의 단위중량 γ_t 및 암석의 비중 G_s 를 측정된 후 다음과 같이 V_{p0}, W_{ps0}, V_{pv0} 및 $V_{vt,m}$ 을 산출한다.

$$V_{p0} = \frac{1}{\gamma_t} \times W_{st,m} \quad (16)$$

$$W_{ps0} = \gamma_R \times V_{p0} \quad (17)$$

$$V_{pv0} = \left(G_s - \frac{\gamma_R}{\gamma_w} \right) \times V_{p0} \quad (18)$$

$$V_{vt,m} = \left(G_s - \frac{\gamma_t}{\gamma_w} \right) \times V_{p0} \quad (19)$$

9) $W_{s\#0}$ 는 체 분석시험에 의한 측정값이므로, 식 (10), (12) 및 (17)에 의하여, P_{Fi} 이 구해진다. 식 (8), (16) 및 (18)에 의하여 V_{pi} 이 구해지고, 식 (14)와 (9)에 의하여 각각 V_{pvi} 과 V_{ps1} 을 구할 수 있다. 이러한 과정을 반복하여 P_{Fi} 를 구한다.

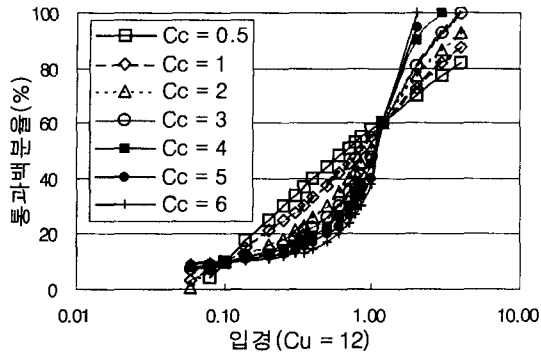
4. GRS모델의 적용

4.1 입도분포곡선을 이용한 P_{Fi} 의 분석

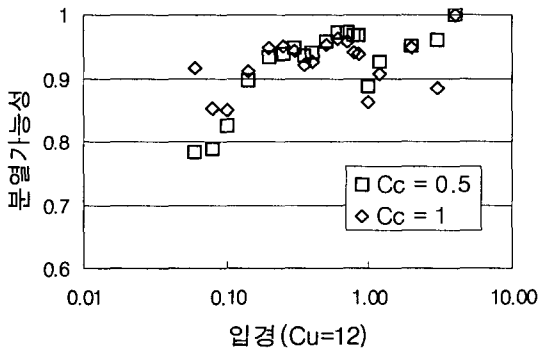
본 모델은 γ_R, γ_t 및 G_s 의 측정 및 체 분석시험을

수행하면, 신선한 모양이 풍화작용을 받아서 흙으로 변화되는 과정을 P_{Fi} (분열가능성)로써 정량적으로 표현할

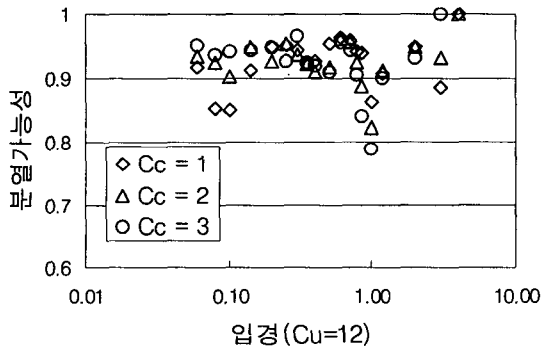
수 있으므로, 모델을 검증하기 위하여, γ_R , γ_t 및 G_s 가 일정하다고 가정한 다음, 입도분포특성을 이용하여 P_{Fi} 의 경향에 대해 분석하였다.



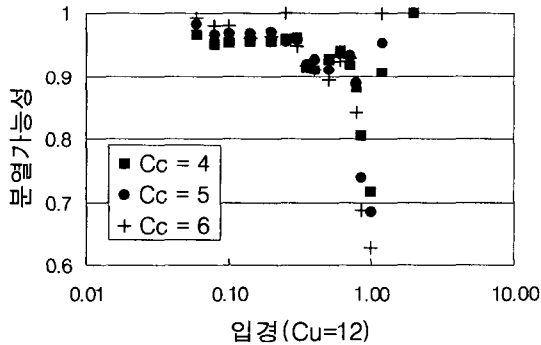
(a) $C_u = 12$ 일 때의 입도분포곡선



(b) $C_c \leq 1$ 일 때의 P_{Fi} 분포 특성



(c) $1 \leq C_c \leq 3$ 일 때의 P_{Fi} 분포 특성



(d) $C_c > 3$ 일 때의 P_{Fi} 분포 특성

그림 4. $D_{10} = 10\text{mm}$ 이고, $C_u = 12$ 인 입도분포곡선과 P_{Fi}

4.1.1 곡률계수의 변화에 따른 P_{Fi} 의 경향

그림 4(a)는 $C_u=12$ 이고 C_c 가 0.5~6인 입도분포곡선이며, 그림 4(b)~(d)는 (a)의 입도분포곡선을 GRS모델에 적용시켜 산출한 P_{Fi} 를 입경별로 나타낸 것으로서, $C_c=0.5$ 를 제외하고는, $D_{60}=1.2\text{mm}$ 의 바로 아래 입경인 1.0mm에서 최소의 P_{Fi} 를 나타내었다. 이는 다른 입경보다 1.0mm 입경을 가진 입자들의 잔류량이 많다는 것을 의미하는데, 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 1.2mm와 1.0mm사이의 통과백분율의 차이가 다른 부분보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

일반적으로, 입도분포곡선이 대각선형태에 가까운 $C_c \leq 1$ 일 경우(그림 4(b)), 입경이 작은 부분에서의 P_{Fi} 가 상대적으로 작게 산출되어 이 부분에서의 입자들의 잔류량이 많이 분포하는 모습을 보이고 있다. 양호한 입도분포를 나타내는 $1 \leq C_c \leq 3$ 의 경우(그림 4(c)), 전반적으로 중간 크기의 입경 부근에서 최소의 P_{Fi} 를 나타내었으며, D_{30} 과 D_{60} 의 차이가 작아지는 $C_c > 3$ 의 경우(그림 4(d)), D_{60} 근처에서의 P_{Fi} 가 $C_c \leq 3$ 의 경우에 비해 월등히 작아졌으며, 다른 입경들에서의 P_{Fi} 는 상대적으로 크게 나타났다.

그림 5는 하나의 입도분포곡선에 대한 P_{Fi} 의 평균값과 C_c 와의 관계를 나타낸 것으로서, P_{Fi} 의 평균값은 C_c 의 값에 관계없이 거의 일정한 값을 보여주고 있다.

4.1.2 균등계수의 변화에 따른 P_{Fi} 의 경향

그림 6(a)는 $C_c=2$ 이고, C_u 가 각각 4, 6, 12인 입도분포곡선을 나타내었다. 그림 6(b)는 (a)의 입도분포곡선

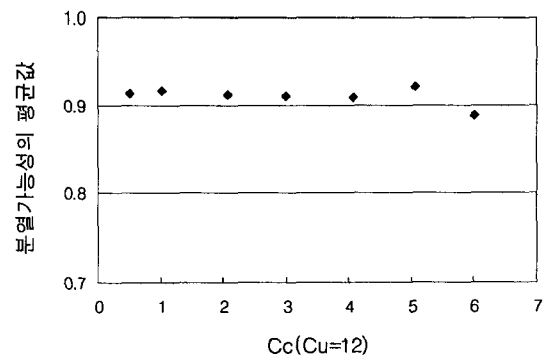
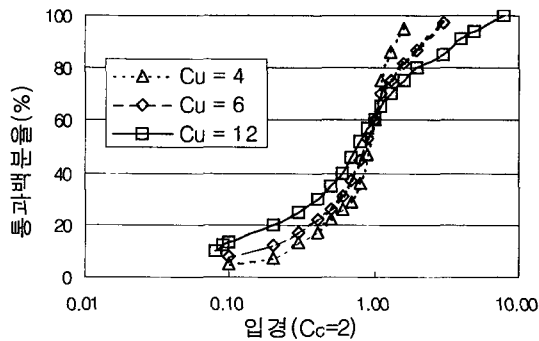


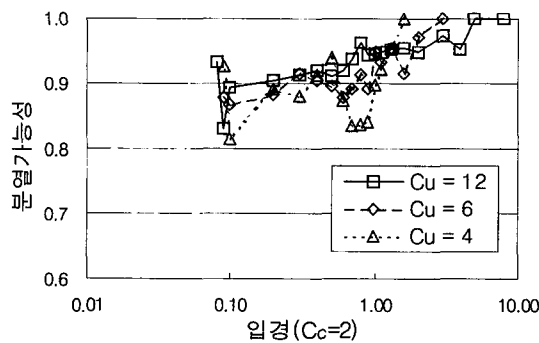
그림 5. P_{Fi} 의 평균값과 C_c 와의 관계

을 본 모델에 적용시켜 산출한 P_{Fi} 를 입경별로 나타낸 것이다. 전반적으로, 입경이 작은 곳에서 큰 곳으로 갈수록 P_{Fi} 가 커지고 있으나, $C_u=4$ 의 경우 1.0mm 근처에서 상대적으로 많은 잔류량을 함유하고 있어서 P_{Fi} 가 작게 산출되었다.

그림 7은 C_u 를 P_{Fi} 의 평균값과의 관계로 나타낸 것으로서, 그림에서 C_u 가 6까지는 P_F 가 증가하였다가 그 이후에는 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 C_u 가 6보다 작을 경우에는 D_i 가 증가하다가 C_u 가 6 이상일 경우에는 D_i 가 수렴한다(민과 이, 2003)는 결과와 유사한 경향을 띄고 있다.



(a) $C_c = 2$ 일 때의 입도분포곡선



(b) $C_c = 2$ 일 때의 P_{Fi} 분포 특성

그림 6. $D_{10} = 10\text{mm}$ 이고, $C_c = 2$ 인 입도분포곡선과 P_{Fi}

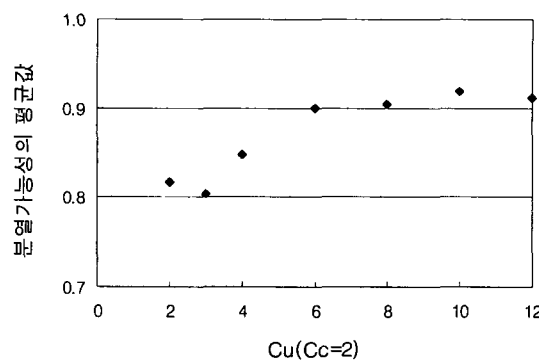


그림 7. P_{Fi} 의 평균값과 C_u 와의 관계

그림 8은 본 연구에서 분석한 70여개의 입도분포곡선에 대한 평균 P_{Fi} 와 D_i 를 나타낸 것으로서, D_i 와 P_{Fi} 가 직선적인 비례관계라는 것을 보여주고 있다. D_i 가 증가할수록 입도분포가 양호한 상태를 나타내므로(민과 이, 2003), P_{Fi} 의 평균값이 클 경우 입도분포가 상대적으로 양호하다는 것을 의미한다.

4.2 P_{Fi} 의 변화에 따른 입도분포곡선의 형상

P_{Fi} 가 크면 분열이 많이 발생되어 i 단계에서의 흙 입자들의 잔류량이 적어지며, P_{Fi} 가 작으면 흙 입자들의 잔류량이 많아진다. 즉, P_{Fi} 의 값에 따라 해당 입경에서의 잔류량이 결정되므로, P_{Fi} 의 값에 따라 흙의 입도분포특성이 결정된다. 또한, P_{Fi} 가 클수록 흙 입자의 분열이 많이 발생된다는 것은 풍화의 진행이 활발하다는 것을 의미한다. 따라서, 궁극적으로 P_{Fi} 는 풍화정도를 결정하는 계수로써 사용된다. 그림 9는 P_{Fi} 가 일정한 경우의 입도분포곡선을 나타내고 있다. 입도분포곡선이 전반적으로 오목한 형태를 띄고 있으며, P_F 가 클수록 작은 크기의 입자들이 많이 생성되고, P_F 가 작을수록 큰 입자들이 많이 생성되고 있다.

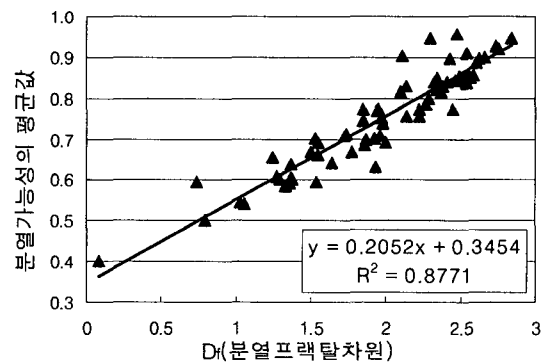


그림 8. P_{Fi} 의 평균값과 D_i 와의 관계

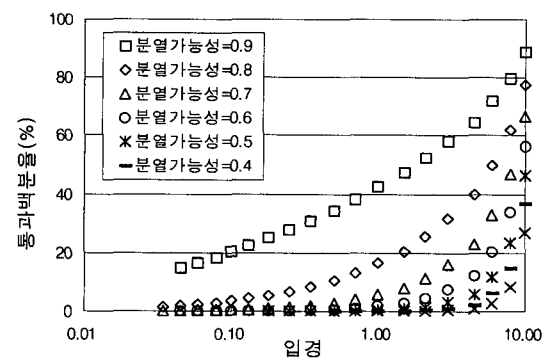
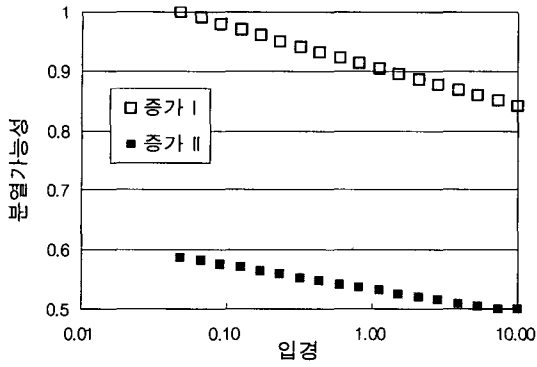
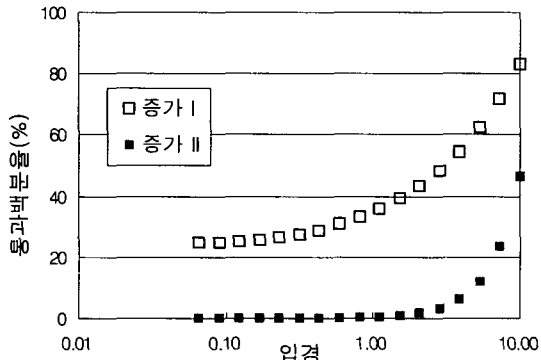


그림 9. P_{Fi} 가 일정한 경우의 입도분포곡선

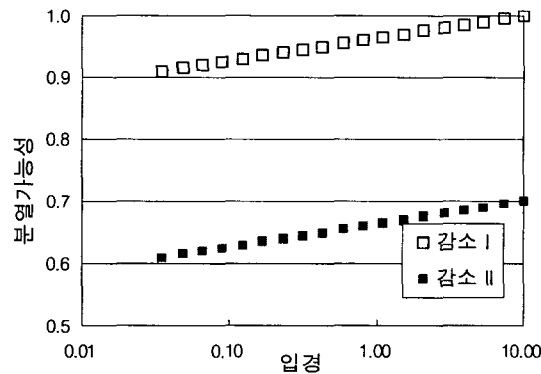


(a) 증가 경향의 P_{Fi}

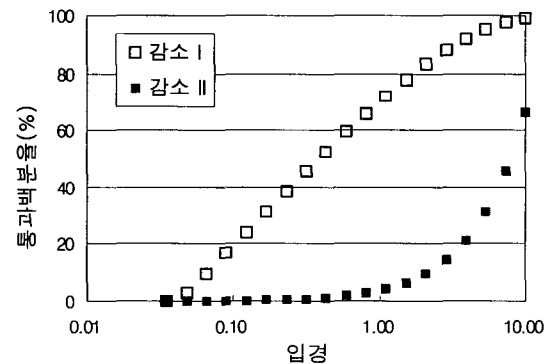


(b) 증가 경향의 P_{Fi} 에 의한 입도분포곡선

그림 10. P_{Fi} 가 증가하는 경우의 모델 적용 결과



(a) 감소 경향의 P_{Fi}



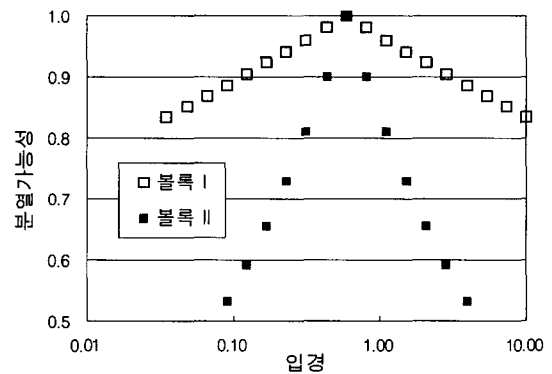
(b) 감소 경향의 P_{Fi} 에 의한 입도분포곡선

그림 11. P_{Fi} 가 감소하는 경우의 모델 적용결과

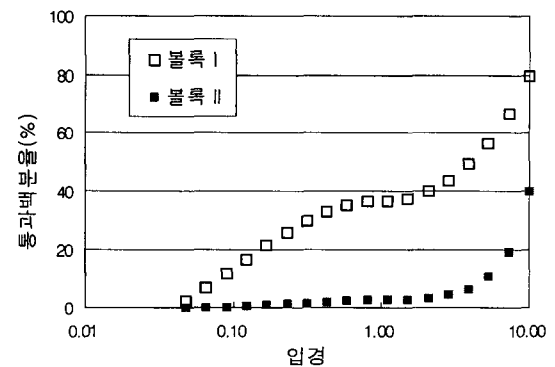
그림 10(a)는 분열이 진행될수록 P_{Fi} 가 증가하는 경향을 나타낸 것으로서, 이에 따른 입도분포곡선을 그림 10(b)에 나타내었다. P_{Fi} 가 작은 '증가 II'의 경우 큰 입자들이 많이 존재하는 반면, P_{Fi} 가 큰 '증가 I'의 경우에는 작은 입자들이 많이 존재하는 것으로 나타났으며, 두 경우 모두 오목한 형태의 입도분포곡선을 보여주고 있다.

그림 11(a)는 분열이 진행될수록 P_{Fi} 가 감소하는 경향을 나타낸 것으로서, 이에 따른 입도분포곡선을 그림 11(b)에 나타내었는데, P_{Fi} 가 큰 '감소 I'은 그림 9와 그림 10(b)에 나타낸 오목한 형태와는 다르게 약간 볼록한 형상의 입도분포곡선을 보여주고 있다. 반면, P_{Fi} 가 적은 '감소 II'는 오목한 형상의 입도분포곡선을 보여주고 있으며, 큰 입자들의 잔류량이 많은 것으로 나타났다. 따라서, P_{Fi} 가 감소할 경우, P_{Fi} 의 값이 크면 입도분포곡선이 볼록한 형상을 보이다가, P_{Fi} 의 값이 감소할수록 오목한 형상과 함께 큰 입자의 잔류량이 많은 입도분포곡선을 나타내는 경향을 보이고 있다.

그림 12(a)는 P_{Fi} 가 증가후 감소하는 볼록한 형상을 나타낸 것으로서, 이에 따른 입도분포곡선은 그림 12(b)와 같다. 볼록 I은 P_{Fi} 가 높은 값을 가지고 있기 때문

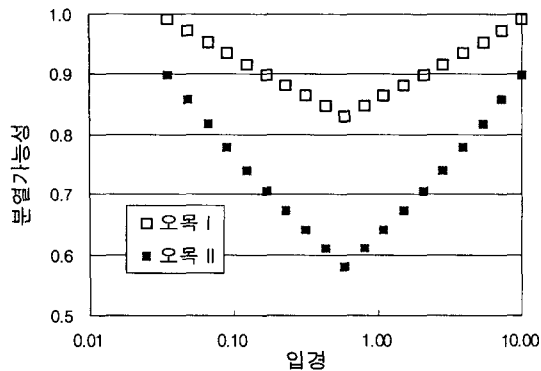


(a) 볼록 형상의 P_{Fi}

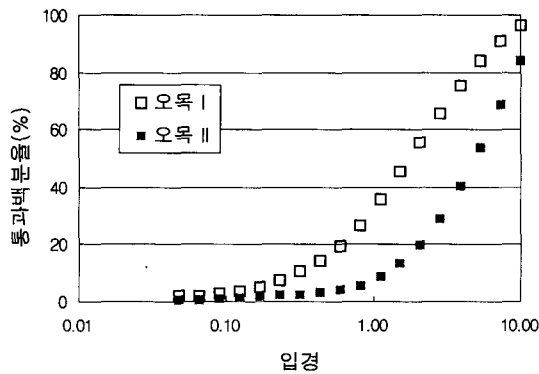


(b) 볼록 형상의 P_{Fi} 에 의한 입도분포곡선

그림 12. P_{Fi} 가 볼록형상일 때의 모델 적용결과



(a) 오목 형상의 P_{Fi}



(b) 오목 형상의 P_{Fi} 에 의한 입도분포곡선

그림 13. P_{Fi} 가 오목형상일 때의 모델 적용결과

에 전체적으로 고른 입도분포특성을 보이고 있지만 중간 크기 입자의 P_{Fi} 가 1.0에 가까운 값을 나타내어, 이 부분에서의 입자들이 거의 존재하지 않는 빈입도의 입도분포특성을 나타내고 있다. 블록 II는 P_{Fi} 가 작아서 전반적으로 큰 입자들이 많이 존재하는 입도분포특성을 보이고 있다.

그림 13(a)는 P_{Fi} 가 감소후 증가하는 오목한 형상을 나타낸 것으로써, 이에 따른 입도분포곡선은 그림 13(b)와 같다. 오목 I은 P_{Fi} 가 높아서 전체적으로 고른 입도분포를 나타낸 반면, '오목 II'는 상대적으로 큰 크기의 입자들이 많이 존재하고 있는 모습을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 프랙탈 이론을 적용하여, 흙 입자가 깨어지는 과정을 표현하는 새로운 분열모델을 제시하였다.

(1) 본 연구에서 제시한 분열모델은 하나의 큰 덩이가 단계별로 분열을 거치면서 크기가 다양한 작은 입

자들로 쪼개어짐과 동시에 새로운 간극이 생성되는 과정을 분열가능성, P_{Fi} 로써 정량화시킨 것으로써, 분열과정이 풍화잔류토의 생성과정을 모사할 수 있다. 따라서, 본 모델을 GRS(generation of weathered residual soils)모델이라고 명명하였으며, GRS모델은 입도분포특성을 이용하여 그 흙의 생성과정을 모사할 수 있는 장점을 가지고 있다.

- (2) 임의의 입도분포특성을 GRS모델에 적용시킨 결과, 입자들의 잔류량이 많을수록 P_{Fi} (각 분열단계별 분열가능성)가 작게 산출되었고, 입도분포가 양호할수록 P_{Fi} 는 전반적으로 크게 나타났다.
- (3) 여러 가지 P_{Fi} 의 변화 양상을 GRS모델에 적용시킨 결과, S자 형상에 가까운 입도분포곡선은 P_{Fi} 가 높은 오목형상에서 나타났으며, P_{Fi} 가 높은 블록형상에서는 중간 크기의 입자가 적은 빈입도의 입도분포특성을 나타내었다. P_{Fi} 가 높은 감소형상의 경우 블록한 모양의 입도분포곡선을 보였으며, P_{Fi} 가 작은 값을 가진 경우에는 형상에 관계없이 큰 입자의 잔류량이 많은 입도분포특성을 나타내었다. 풍화가 많이 진행될수록 흙 입자들의 크기가 작아지는 반면, 풍화가 덜 진행될수록 큰 입자들이 많이 존재하므로, P_{Fi} 가 작다는 것은 풍화가 상대적으로 덜 진행되었다는 것을 의미하며, P_{Fi} 는 풍화정도를 결정하는 계수로써 사용된다.
- (4) 임의의 입도분포곡선에 대한 평균 P_{Fi} 는 C_u 가 일정하면 C_c 에 관계없이 일정하였고, C_u 가 6이하에서는 C_u 에 비례하여 증가하였으나 6이상에서는 수렴하였다. 또한, 평균 P_{Fi} 는 D_f 와 직선적인 비례관계를 나타내었는데, 이는 평균 P_{Fi} 가 크면 입도분포가 상대적으로 양호하다는 것을 의미한다.

본 GRS모델은 풍화의 물리적인 과정만을 다룬 것으로써, 화학적 메커니즘을 접목할 필요가 있으며, 향후 GRS모델을 실무에 적용할 수 있도록 지속적인 연구의 수행이 필요하다.

참고 문헌

1. 민덕기, 이완진 (2003), "Fragmentation 프랙탈을 이용한 입도분포 분석", 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제2호, pp.199-206.
2. 민덕기, 이완진 (2004), "풍화잔류토에 대한 체 분석시험 규정에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제24권, 제3호, pp.167-175.
3. 민덕기, 이완진, 김중환 (2004), "분열프랙탈이론을 이용한 흙

- 입자의 파쇄성에 대한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제24권, 제 4C호, pp.251-257.
4. 천병식, 김대영 (2001), “암석절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치적 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제1호, pp.85-97.
 5. Bonala, Mohan V.S. and Reddi, Lakshmi N. (1999), “Fractal representation of soil cohesion”, ASCE, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.10, October, pp.901-904.
 6. Chan, Leonard C.Y. and Page, Neil W. (1997), “Particles fractal and load effects on internal friction in powders”, Elsevier, *Powder Technology*, Vol.90, pp.259-266.
 7. Díaz-Zorita, M., Perfect, E. and Grove, J.H. (2002), “Review : Disruptive methods for assessing soil structure”, *Soil & Tillage Research*, Elsevier, Vol.64, pp.3-22.
 8. Erzan, A. and Gungor, N. (1995), “Fractal geometry and size distribution of clay particles”, *Journal of Colloid and Interface Sci.*, Vol.176, pp.301-307.
 9. Gimenez, D., Perfect E., Rawls, W.J. and Pachepsky, Ya. (1997), “Fractal Models for Predicting Soil Hydraulic Properties : a Review”, *Engineering Geology*, Elsevier, Vol.48, pp.161-183.
 10. Gimenez, D., Allmaras, R.R., Huggins, D.R. and Nater, E.A. (1998), “Mass, surface, and fragmentation fractal dimensions of soil fragments produced by tillage”, Elsevier, *Geoderma*, Vol.86, pp.261-278.
 11. Gimenez, D., Karmon J. L, Posadas, A. and Shaw, R. K. (2002), “Fractal dimensions of mass estimated from intact and eroded soil aggregates”, Elsevier, *Soil & Tillage Res.*, Vol.64, pp.165-172.
 12. Gori, U. and Mari M. (2001), “The correlation between the fractal dimension and internal friction angle of different granular materials”, Japanese Geotechnical Society, *Soil and Foundations*, Vol.41, No.6, pp.17-23.
 13. Kozak, E., Pachepsky, Ya A., Sokolowski, S., Sokolowska, Z. and Stepniewski, W. (1996), “A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils”, *Soil Sci. Soc. AM. J.*, Vol.60, pp.1291-1297.
 14. Moore, C. A. and Donaldson, C.F. (1995), “Quantifying soil microstructure using fractals”, *Geotechnique*, Vol.45, No. 1, pp. 105-116.
 15. Perfect, E. and Kay, B. D. (1995), “Applications of fractals in soil and tillage research : a review”, Elsevier, *Soil & Tillage Res.*, Vol.36, pp.1-20.
 16. Perfect, E. (1997), “Fractal models for the fragmentation of rocks and soils : a review”, Elsevier, *Engineering Geology*, Vol.48, pp.185-198.
 17. Rieu, M. and Sposito, G. (1991), “Fractal Fragmentation, Soil Porosity, and Soil Water Properties: I. Theory”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.55, pp.1231-1238.
 18. Tyler, S. W. and Wheatcraft, S. W. (1992), “Fractal scaling of soil particle-size distributions : Analysis and Limitations”, *Soil Sci. Soc. AM. J.*, Vol.56, pp.362-369.
 19. Vallejo, L.E. (1996), “Fractal analysis of the fabric changes in a consolidating clay”, Elsevier, *Engineering Geology*, Vol.43, pp. 281-290.
 20. Vallejo, L.E. and Stewart-Murphy, A. (2001), “Influence of pore wall roughness on the on the slaking of shale”, *Rock Mechanics in the National Interest*, Elsworth, Tinucci & Heasley (eds), Swets & Zeitlinger, ISBN 90-2651-827-7, pp.93-98.

(접수일자 2004. 8. 23, 심사완료일 2004. 12. 4)