

풍화도 변화에 따른 화강풍화토의 파쇄특성

Particle Crushing Properties of Decomposed Granite Soil due to Changes in the Degree of Weathering

이강일¹, 윤영구^{2*}, 이재욱³

Kang-Il Lee¹, Young-Goo Yoon^{2*}, Jae-Wook Lee³

¹Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Republic of Korea

²Non-member, M.S, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Republic of Korea

³Non-member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, the characteristics of particle crash of decomposed granite soil sampled at Pocheon area were presented. The degree of weathering was artificially achieved by means of hydrofluoric acid. Weathering index was firstly determined by the analysis of mineral composition. Then, particle distribution, permeability tests were conducted. The results showed that weathering effects on particle crash over entire particle sizes. Comparative analysis on specific surface between D_{10} and D_{50} indicated that the smaller the particle size, the more the particle crash. In addition, the most particle crashing due to compaction appeared around the optimum moisture content. The incremental ratio of specific surface appeared to decrease as weathering proceeds, which means that the higher the weathering index the less the particle crash.

요 지

본 연구는 포천에서 채취된 화강풍화토를 불산용액을 이용하여 인공적으로 풍화를 진행시켜서 풍화도 변화에 따른 화강풍화토의 입자파쇄 특성을 연구하였다. 이를 위해 조성광물 분석을 통한 풍화지수 결정 후, 입도분석, 표준다짐시험 및 변수위 투수시험을 실시하였다. 본 연구결과는 풍화가 진행되면서 전체입경분포에서 입자파쇄가 진행되었으며, 입경 D_{10} 과 D_{50} 에 대한 비표면적을 비교한 결과 입경 D_{50} 이하의 작은 입경분포에서 입자파쇄가 활발하게 진행된 것으로 나타났다. 또한 다짐에 의한 입자파쇄 결과는 최적함수비 부근에서 입자파쇄가 최대치를 보였고 풍화가 진행됨에 따라서 비표면적 증분비가 감소하는 것으로 보아 풍화지수가 높을수록 입자파쇄에 둔감한 것으로 나타났다.

Keywords : Particle crushing, Decomposed granite soil, Degree of weathering, Weathering index

1. 서 론

화강풍화토는 기본적으로 화강암질 암석이 풍화되어 세립화된 것으로 이들 암석은 풍화의 진행과정에서 입자간의 이완분리에 의해 본래의 암석으로서 결집력을 잃고 변질되는데 풍화정도에 따라 암석에 가까운 실트질 모래

에서 점토질까지 넓은 범위의 입경분포를 갖는다. 이때 화강풍화토는 물리적, 화학적 풍화작용에 의해 1차 광물인 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석 등을 포함하는 암석이 풍화에 따라서 1차광물중 석영, 정장석 등은 안정되고 나머지가 2차광물인 Kaolinite, Illite, Montmorillonite, Halloysite, Vermiculite, Gibbsite 등으로 분리되기 때문에 퇴적토와는 다른 토질공학적 성질을 나타낸다. 특히 화강풍화토는 모암의 분포지역이나 채취장소 및 심도에 따라 각 광물의 성분량이 다르며 풍화작용도 지질학적 변천

Received 15 Jan. 2013, Revised 26 Feb. 2013, Accepted 5 Mar. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kayin12@naver.com (Y. G. Yoon)

과정과 환경에 좌우되므로 정밀한 접근에 있어서 한계를 가진다(Park, 1973).

화강풍화토는 겉보기에 고결상태에 있고, 단단해 보이지만 충격이나 기타의 교란작용을 받으면 쉽게 입자가 파쇄되어 구조적으로 불안한 상태를 보인다. 도로건설, 택지 조성 등 여러 가지 토목공사에 쓰이는 화강풍화토의 위와 같은 성질은 사면의 안정, 제체 및 뒷채움 재료로서의 활용성, 기초 지반의 침하 등 여러 측면에서 그 중요성이 인식된다. 지반 내에서의 수분의 존재는 입자파쇄의 활성화를 촉진시키고, 그 결과 압축성의 증가와 전단강도의 저하를 일으키는 요인이 되기도 한다. 실제로, 화강풍화토를 재료로 한 성토지반에서 지반침하가 심각한 문제로 대두되는 경우는 주로 화강풍화토 지반의 함수비 변화에 따른 압축특성의 민감한 변화의 결과로 추정하고 있다. 또한, 최근 국내에서의 이상기후에 따른 여름철 장마, 태풍, 집중호우, 그리고 폭우를 동반한 국지성호우 발생이 빈번해지면서 전국적으로 여러 곳에서 토사유실, 사면붕괴 및 산사태가 발생한 바 있다. 이와 같은 사례는 우기시 강우 침투에 의해 사면 내 함수량이 증가함에 따라 전단강도의 감소가 유발되어 발생된 경우라고 할 수 있다.

이러한 관점에서 본 연구는 화강풍화토의 풍화가 지속될 때의 입자파쇄 특성을 알아보기 위해서 포천지역에서 채취한 화강풍화토에 단계적으로 인위적인 풍화를 진행시켜서 각각의 풍화도를 다르게 시험시료를 준비하였다. 인위적인 풍화를 진행시키기 위해서 사용된 용액은 교란된 토립자의 상대적인 풍화도 비교에 가장 널리 쓰이는 불산(FCL) 용액을 10% 농도로 희석시켜서 사용하였다. 시료별 풍화 지속시간은 0일, 10일, 30일, 60일 및 100일로 다르게 구분하였고, 동일조건에서의 입도분석시험, 표준다짐시험, 변수위 투수시험을 실시하고 각각의 시험 결과에 따른 비표면적 비교를 통해서 화강풍화토의 공학적 거동과 풍화진행에 따른 입자파쇄특성에 대하여 연구하였다.

2. 화강풍화토의 공학적 특성과 풍화도 판정

2.1 화강풍화토의 공학적 특성

2.1.1 다짐 및 투수특성

화강풍화토의 다짐특성은 여타의 흙과 마찬가지로 다짐에너지가 증가하면 최대건조밀도가 증가하고 최적함수비는 감소한다. Park et al.,(1996, 1997)의 연구에 의하면

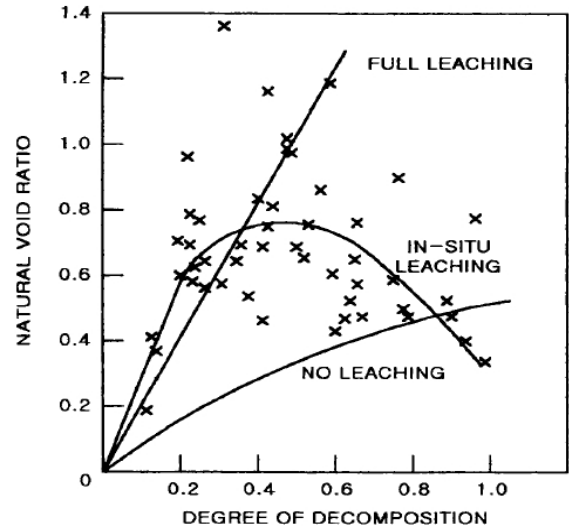


Fig. 1. Degree of weathering vs. Void ratio (Lump, 1962)

Proctor 다짐법으로 다짐시험을 할 경우에는 25회 다짐을 전후로 하여 다짐곡선의 형태가 달라진다고 하며 이것을 입자파쇄의 한계점이라고 판단하였다. 25회 이상으로 다지면 전체적인 파쇄는 발생하지 않고 석영 등의 조립부분의 기계적 파쇄와 중간입자의 파쇄가 미소하게 발생하기 때문에 전체적인 건조밀도를 증가시키는 효과가 작다고 하였다. 또한, 화강풍화토의 다짐곡선과 투수성의 관계에서 OMC를 기준으로 습윤측에서 투수계수가 최소를 나타내고 그 이후에는 약간 증가하는 경향을 보인다고 하였다. 또한, 투수계수는 OMC의 습윤측과 건조측의 시료를 시간의 경과에 따라 투수시험을 한 결과 OMC상태의 시료는 큰 변화가 없으나 건조측 시료는 투수계수가 증가하고 습윤측 시료는 감소한다고 보고하고 있다. 이와 같이 수면하에서 장기간의 시간경과는 풍화에 의한 풍화도의 진척을 의미하는데, Lump(1962)의 연구에 의하면 Fig. 1과 같이 화강풍화토는 풍화가 진행될수록 간극비가 증가하여 용탈현상(leaching action)이 발생하게 되면 유수에 의한 세립분이 유출되어 발생한 균열에 의하여 할렬(hydraulic fracturing) 현상이 발생할 수도 있다고 지적한 바 있다.

2.1.2 파쇄특성

화강풍화토가 일반적인 흙과 다른 하나는 특유의 입자파쇄성인데, 일반적으로 토질역학의 기본 가정에서 토립자는 비압축성, 비파쇄성인 재료로 가정하고 있으나 실제 구속압력이나 파괴하중에 따라 부분적인 파쇄가 발생하고 있다. 토립자에 발달한 미세균열이나 입자내의 간극이 파쇄의 주된 원인으로 보는 것과 석영질 외의 운모나 장석이

세립화 되어 가는 과정을 파쇄의 내적 원인으로 보는 견해가 있으며 입도분포, 입경모양, 강도 및 구속압력과 간극수의 유무가 화강풍화토의 파쇄성을 결정하는 요인으로 보고 있다. 다음의 Fig. 2에서 보인바와 같이 입자가 크면 접촉면이 넓어져 접촉압력이 집중되기 때문에 파쇄 효과가 크게 나타나고 있다.

Park(1974)에 의하면 500g의 시료를 1.5m 높이에서 낙하시켜 파쇄시험을 한 결과 낙화횟수가 50회 이상에서 세립화를 보였으며 100회 부근에서 조립재료의 파쇄효과가 나타나는데, 이러한 경우는 Proctor 다짐의 파쇄효과와 유사하다는 연구결과를 보고한 바 있다. 결국, 50회 부근에서는 운모와 장석분이 세립화 되므로 다짐에너지가 아주 큰 경우를 제외하고는 운모와 장석이 파쇄의 주체라고 하였다.

Miura et al.,(1975, 1984)의 연구에 의하면 초기밀도가 다른 모래를 대상으로 배수시험을 실시한 결과, 등방압축이나 전단과정중에 입자파쇄 메커니즘이 차이가 있음을

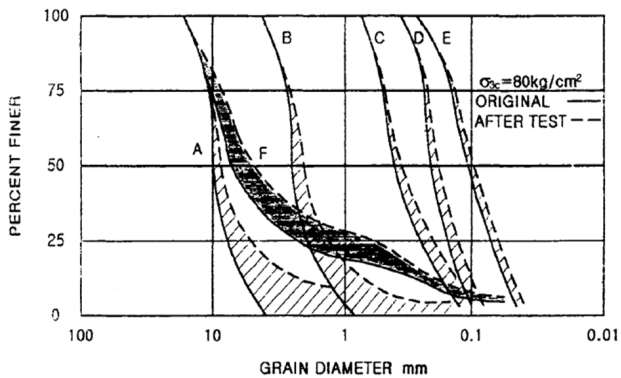
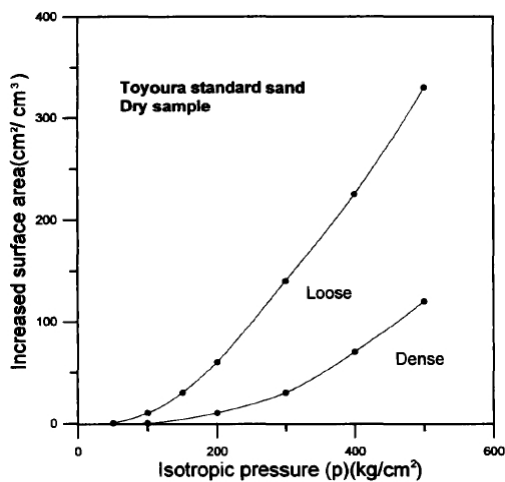
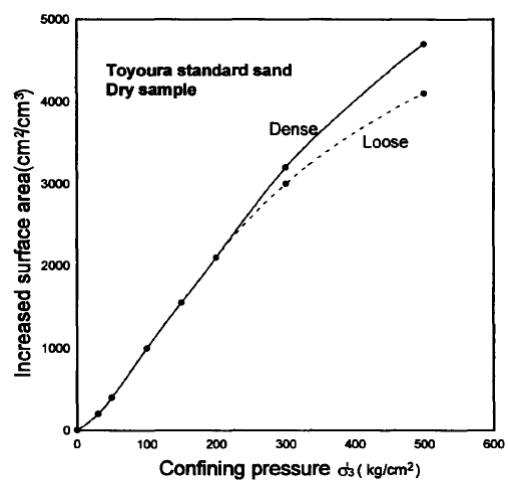


Fig. 2. Effect of contact area on particle crush (Matsuo and Nishida, 1979a,b)



(a) Increase of surface area by uniform compression



(b) Increase of surface area during shearing

Fig. 3. Drained test on particle crush of weathered granite soil (Miura and Yamanoguchi, 1975)

지적인 바 있다. 그 중 등방압축에 의한 입자파쇄는 큰 입자간의 접촉점의 표면 여각부가 손실되어 세립분의 증가로 나타나는 메카니즘이며 전단에 의한 입자파쇄는 입자간의 마찰저항이나 입자간의 상호 맞물림의 영향으로 입자자체가 분해되어 세립분이 증가하는 과정으로 나타난다고 보고하였다. 이러한 결과를 Fig. 3에 나타냈는데 (a)는 등방압축에 의한 표면적의 증가로, (b)는 전단과정에 의한 표면적의 증가로 나타냈으며 입자파쇄의 차이점이 발견되어 주목된다. 다만, 이 시험은 모래에 대한 시험결과이지만 큰 구속압이나 전단력에 의해 석영도 파쇄 된다는 점이 특이하며 화강풍화토에서도 이와 같은 현상이 발생하리라는 것은 확실하다.

2.2 화강풍화토의 풍화도 판정

2.2.1 물리적 풍화도의 판정

본 연구에서는 물리적 풍화도 판정에 강열감량(Ignition Loss, Li)을 사용했다. 이 방법은 화강풍화토 뿐만 아니라 토립자가 2차 광물을 함유하고 있는 경우에는 그 함유량을 연소시켜 감량되는 양으로서 풍화의 판정에 이용하려는 방법이다. 이는 2차 광물을 포함한 풍화의 진척에 의해 생성된 물질이 고열에 의해 감량되는 것을 척도로 삼기 때문에 매우 유용한 방법으로 이용되고 있다. 본 연구에서는 강열감량 법을 이용하여 풍화 단계별 시료에 대하여 상대적인 풍화 진행정도를 알아보기 위하여 시행되었으며 강열감량(Li)<2.0%이면 신선암 내지 약풍화암, 2.0%<Li<4.0%는 중풍화토, 4.0%<Li는 강풍화토로 분류된다.

Table 1. Method of chemical weathering index determination (Tugrul and Gurpinar, 1977)

Proponent and Notation	Equation using chemical components
Ruxton ratio, RR (Ruxton : 1968)	$RR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$
Weathering Index of Parker, WIP (Parker : 1970)	$WIP = \frac{2Na_2O}{0.35} + \frac{MgO}{0.90} + \frac{2K_2O}{0.25} + \frac{CaO}{0.70}$
Vogot Ratio, VR (Vogot : 1927, Roaldset : 1972)	$VR = \frac{Al_2O_3 + K_2O}{MgO + CaO + Na_2O}$
Modified Weathering Potential Index, MWPI (Vogel : 1973)	$\frac{Na_2O + K_2O + CaO + MgO}{Na_2O + K_2O + CaO + MgO + SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \times 100(\%)$
Chemical Index of Alteration, CIA (Nesbitt and Young : 1982)	$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100(\%)$
Chemical Weathering Index, CWI (Sueoka : 1988)	$CWI = \left(\frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(\pm)}{All\ Chemical\ Components} \right) \times 100(\%)$
Ignition Loss, Li	$Li = \frac{Loss\ by\ Ignition}{Mass} \times 100(\%)$

2.2.2 화학적 풍화도의 판정

화학적 풍화지수를 판정하는 방법에는 Table 1에 제시한바와 같이 다양한 방법이 있으며 그중에서도 Sueoka (1988)의 CWI(Cheical Weathering Index)는 암반 및 풍화도에 대하여 풍화과정 전체를 표현할 수 있고, 공학적 목적에도 적합하고, 비교적 간단한 경험적 표현을 목표로 제안된 것이다. 그는 여러 나라의 화학적 분석결과를 토대로 하여 다음과 같은 고찰을 통해 CWI법을 제안하고 있는데 매우 광범위한 내용을 포괄하고 있어 풍화의 과정을 지시적으로 설명하는데 의미가 깊다. CWI에 의한 풍화도 판정에 대한 내용은 다음과 같다.

- ① 여러 시료의 화학성분 분석 결과를 검토해 보면 풍화의 제1단계에서 먼저 K_2O , CaO , NaO , MgO , MnO , FeO 의 알칼리 또는 알칼리 토류금속이 용탈되고 제2단계에서 SiO_2 가 서서히 용출되고, 제3단계에서는 Al_2O_3 나 Fe_2O_3 가 집적된다. 동시에 강열감량 ($H_2O(\pm)$) 이 급격히 증가된다.
- ② 알칼리 및 알칼리 토류금속인 $SiO_2, R_2O_3 + H_2O(\pm)$ 의 3성분 좌표로서 생성 연대가 다른 화강암의 화학성분을 조사하면 거의 동일한 1몰(*mole*)단위의 $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 H_2O(\pm)$ 양을 갖고 있다.
- ③ 미국에서 5000개, 일본에서 1200개 화강암의 화학성분을 분석하여 연구한 결과로는 Al_2O_3 의 성분이나 Fe_2O_3 의 성분은 다른 성분과는 달리 거의 일정한 값이고 각각 14~16%, 1.5~2.5% 범위에 있다. 위와 같은

사실에 입각하여 화강암질 암석에서는 Al_2O_3 , Fe_2O_3 성분은 알칼리, 알칼리 토류금속이나 SiO_2 의 화학성분과 비교할 때 그 함유량의 분산이 적고 거의 일정하며 TiO_2 성분도 거의 일정하다.

그러나 풍화가 진행 되면 이들 값이 증가되고 강열감량도 급격히 증가되고 그 변화가 명확히 된다는 것을 구체적으로 1몰당의 중량으로서 설명하고 있다. 즉, CWI에 쓰이는 분자는 풍화에 의해 지반 내에 잔류하여 증가되는 화학성분으로 풍화에 의해 화학성분이 용탈되는 관점이 아니라 어떤 성분이 풍화에 의해 잔류 증가된다는 관점에서 풍화의 진행 정도를 정량적으로 나타내는 지표로 정식화하였다. 본 연구에서는 CWI를 화학적 풍화도 판정에 이용하였다.

3. 시험내용

3.1 시료특성

본 연구에서 사용된 시료는 경기도 포천지역의 풍화토 사면에서 교란된 시료를 채취하였으며 시험에 사용될 시료의 균일성을 확보하기 위하여 No.4체를 통과한 시료를 실험실로 반입하여 완전건조 후 사용하였다. 채취한 시료의 기본적인 물리적 특성은 Table 2와 같이 자연함수비가 3.1%이며 다짐시험을 통해 얻은 최대건조단위중량과 최적함수비는 각각 18.76kN/m³, 12.63%이다. 또한 Fig. 4와 같은 입도분포곡선을 보이고 있으며 통일분류법상 SW에 해당한다.

Table 2. Physical properties of weathered granite soil in Pocheon area

Type		Value
Gravity (G_s)		2.73
Passing quantity of No.200 (%)		1.6
Grain size distribution	D_{60} (mm)	2.018
	D_{30} (mm)	0.793
	D_{10} (mm)	0.308
	Coefficient of uniformity (C_u)	6.6
	Coefficient of curvature (C_c)	1.0
Nature water content (W_n , %)		3.1
Maximum dry density (γ_{dmax} , KN/m^3)		18.76
Optimum moisture content (OMC, %)		12.63
USCS		SW

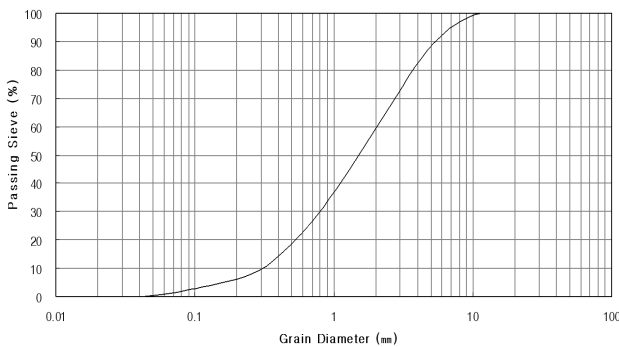


Fig. 4. Particle distribution curve of weathered granite soil in Pocheon area

3.2 시험내용

화강풍화토는 풍화 정도에 따라 흙 입자의 간극이 발달되어 있고, 특유의 입자파쇄성으로 인하여 함수량과 하중 변화에 매우 민감한 구조적 특성을 가지고 있다. 화강풍화토의 풍화진행에 따른 역학적 특성을 파악하기 위해 채취한 시료를 불산(FCL) 10% 용액에 10일, 30일, 60일, 100일 동안 담가서 시간이 지남에 따라 단계적으로 풍화를 진행시켰으며 이에 따른 각각의 시료에 대하여 입도시험, 표준다짐시험(A다짐), 변수위투수시험을 실시하였다. 다짐 함수비와 그에 따른 투수특성을 연관 지어서 검토하였으며 입자의 파쇄성에 대해 알아보기 위하여 시험 전·후로 입도시험을 실시하였고 그 결과를 토대로 화강풍화토의 파쇄 영향에 대해 풍화단계별로 비교분석하였으며 풍화가 진행됨에 따라서 입자파쇄의 경향이 어떠한 양상을 보이는지도 고찰하였다.

4. 시험결과 고찰

4.1 풍화도 판정

Table 1은 기존의 다양한 화학적 풍화지수를 나타내 수식을 정리한 것으로 대부분 화학성분을 이용하여 그 지수를 평가하고 있다. 따라서 본 연구에서 풍화도 판정은 이와 같은 수식을 준용하면서 주로 풍화가 진행된 각 시료에 대하여 강열감량(Li)과 Sueoka(1988)가 제안한 화학적 풍화지수(CWI)를 사용하여 화강풍화토의 풍화정도를 판단하는 지표로 사용 하였다.

4.1.1 강열감량 시험결과로 부터 풍화도 평가

강열감량은 풍화도 평가방법 중 가장 쉽고 유용한 방법이다. 통상적으로 강열감량이 $Li < 2.0\%$ 인 경우는 신선암 내지 약풍화암이고, $2.0\% < Li < 4.0\%$ 인 경우는 중풍화토, $Li > 4.0\%$ 인 경우는 강풍화토로 분류하고 있으며 이들 값과 표준관입시험 N값과의 대응관계는 $N > 50$, $N = 20 \sim 50$, $N = 2 \sim 20$ 인 경우로 대응관계가 성립되며 $Li > 2\%$ 인 경우는 거의 구성광물이 분리되어서 손으로 만지면 쉽게 부서지는 상태이다.

Table 3은 강열감량시험 및 ICP-OES(유도결합 플라즈마 발광분광기) 분석시험기를 이용한 화학시험 결과를 나타낸 것이다. 이 시험 결과에 의하면 화학물질의 조성성분은 풍화진행 전의 경우 SiO_2 가 60.8%를 대부분 차지하고 다음으로 Al_2O_3 가 24.7%로 두 화합물을 합산할 경우 약 85%를 차지하였다. 그러나 풍화진행 일수가 증가하면서 Al_2O_3 는 증가하고 SiO_2 는 감소해가고 풍화진행일수가 100일이 되는 시점에서는 Al_2O_3 는 50.8%이고 SiO_2 는 9.8%가 되어 석영성분이 거의 소멸되어가는 특성을 나타내었다.

또한 강열감량시험 결과는 시험 전 시료(0일)에서 부터 풍화진행 일수가 60일 경과한 시료까지의 시험결과 Li가 2.24~3.62로 중풍화토에 해당하고 풍화가 100일이 경과된 시료의 Li는 4.51로 강풍화토에 해당되는 것으로 평가 되었다.

4.1.2 화학적 풍화지수(CWI)로부터 풍화도 평가

화학적 풍화지수를 산정하기 위하여 각 시료에 대하여 Table 3과 같이 화강풍화토의 화학성분 분석시험을 실시하였으며 이러한 시험 결과로부터 화강풍화토의 풍화지수를 산정하기 위하여 Table 1에 제안된 수식을 이용하여 각

Table 3. Chemical component analysis

Chemical component (%)	Weathering time				
	0day	10day	30day	60day	100day
Al ₂ O ₃	24.7	28.3	34.8	43.2	50.8
Fe ₂ O ₃	4.08	5.11	7.60	10.85	14.36
MgO	0.81	0.94	1.27	1.69	2.23
CaO	5.3	10.2	19.4	30.6	39.1
Na ₂ O	8.6	4.9	1.2	0.7	0.4
K ₂ O	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2
TiO ₂	0.44	0.52	0.84	1.76	3.08
P ₂ O ₅	0.10	0.16	0.25	0.41	0.56
MgO	0.55	0.59	0.68	0.86	1.05
SiO ₂	60.8	52.6	44.3	28.8	9.7
Li	2.24	2.47	2.96	3.62	4.51

Table 4. Index of chemical weathering

Weathering time	Weathering index by the proponent notation						
	RR	WIP	VR	MWPI	CIA	CWI	Li
0day	2.46	60.81	1.71	14.43	63.33	25.3	2.24
10day	1.86	46.82	1.79	16.05	64.61	28.9	2.47
30day	1.27	38.38	1.60	20.36	62.48	32.8	2.96
60day	0.67	51.99	1.32	28.66	57.75	38.1	3.62
100day	0.19	62.22	1.22	35.90	56.13	45.4	4.51

각의 제안된 수식의 풍화지수 산정 결과는 Table 4와 같다.

보통 CWI에 의한 풍화도의 분류는 CWI<15는 신선함 화강암이고, 15<CWI<20은 풍화암으로 분류하고 이를 다시 3단계로 약풍화, 중풍화, 강풍화로 나누고 20<CWI<40은 완전풍화토로 분류하고 있다. 이 분류 값에 의하면 본 연구에 사용된 모든 시료는 완전풍화토로 평가 할 수 있다.

CWI에 의한 풍화도 분류는 화강풍화토나 화강암에 포함되어 있는 Al₂O₃, Fe₂O₃, 그리고 TiO₂, H₂O(±)의 몰(mole)량이 풍화에 의해 그 외의 2차광물량과 함께 변화하므로 이들의 크기를 풍화의 지표로 제안한 방법이다. 따라서 풍화가 많이 진행 될수록 CWI값은 증가하고, 이에 반비례하여 SiO₂양은 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한 CWI가 증가함에 따라 Li가 증가하는데 이는 풍화가 진행되면 2차광물량(고령석, 몬모릴로나이트, 견운모, 깁사이트)이 증가하고 있음을 시사하고 있다.

4.2 다짐 및 투수특성

Fig. 5는 각 시료의 풍화지수에 따른 표준다짐시험과 변수위투수시험의 결과를 나타낸 것이다. 도시된 곡선의 변

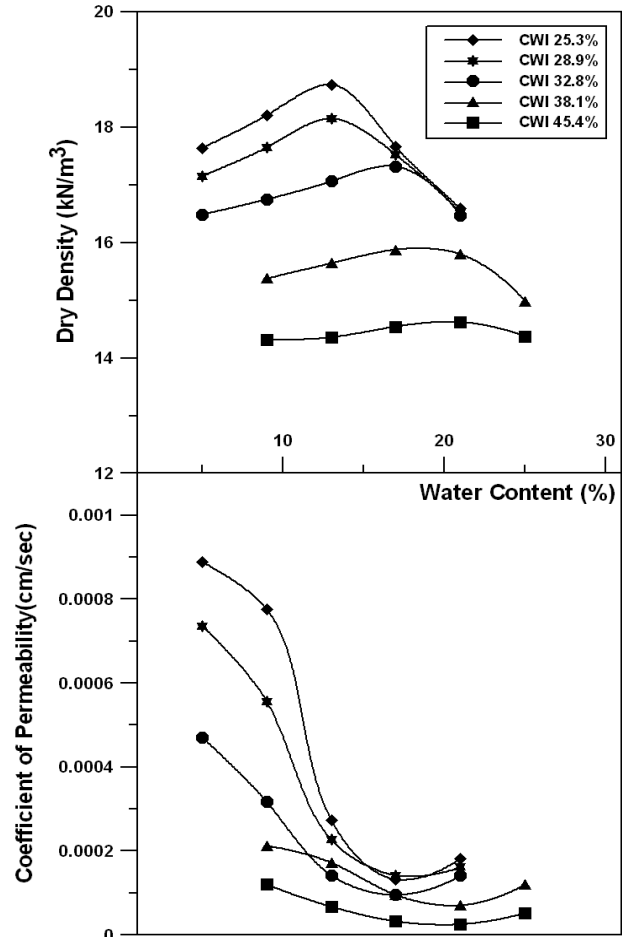


Fig. 5. Variations of compaction curve and permeability according to weathering index

화 양상을 살펴보면 풍화지수가 증가함에 따라서 최대 건조밀도가 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보인다. 이것은 풍화가 진행 되면서 화강풍화토의 입자파쇄에 대한 영향이 점차 증가되고 화강풍화토 입자가 더욱 세립화되며, 다짐시험이 진행될 때 함수량 변화에 따른 간극수의 증가로 인한 입자파쇄 경향이 두드러지게 나타난 결과라고 생각할 수 있다. 또한 모든 시료에 있어서 투수계수가 최적함수비보다 조금 습윤측에서 가장 작게 나타났으며 그 이후에는 투수계수가 소폭 증가하는 경향을 보인다. Lee(1998)에 의하면 이러한 현상은 화강풍화토의 점성구조에 따른 것으로, 다짐에너지가 증가할수록 분산구조로 변화하는 것인데 최적함수비가 되기 전까지는 입자파쇄가 충분하지 않아 이산구조를 이루지만 최적함수비를 기준으로 습윤측에서 평평한 분산구조로 쉽게 변화하는 한계가 되기 때문에 나타나는 현상으로 해석된다.

Fig. 6은 시험에 사용된 시료의 표준다짐시험과 투수시험 후의 결과를 토대로 풍화지수 변화에 따른 최대건조단

위중량, 최적함수비의 관계를 나타낸 것이다. 시험 결과에 의하면 풍화지수 증가에 따라 최대건조단위중량은 직선적으로 감소하고 최적함수비는 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 7에서는 각각의 풍화지수에 대한 투수계수를 도시하였는데, 비교적 건조측에 해당하는 다짐함수비가 5%, 9%인 경우의 투수계수 변화는 풍화진행에 따라서 급격히 감소하는 변화양상을 보였는데 이는 건조측에서 입자파쇄가 활발하게 이루어졌기 때문으로 판단된다. 그러나 나머지 다짐함수비인 13%, 17%, 21%, 25%인 다짐 함수비조건에서의 풍화진행에 따른 투수계수 변화는 큰 변화 없이 풍화도가 증가하면서 점진적인 감소현상을 나타내었다.

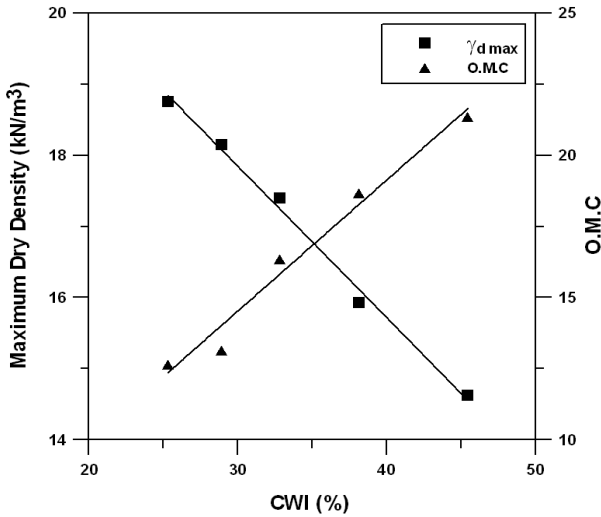


Fig. 6. Compaction characteristics with weathering index variation

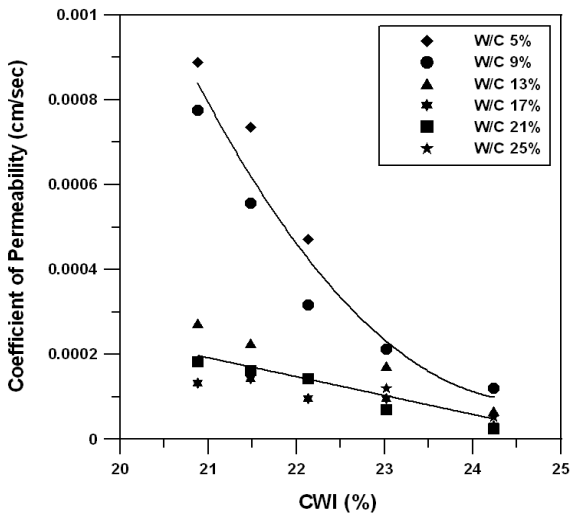


Fig. 7. Permeability characteristics with weathering index variation

4.3 입자파쇄특성

4.3.1 풍화진행에 따른 입자파쇄

본 연구는 각 시료에 불산용액을 이용하여 인위적으로 풍화를 진행시켰기 때문에 풍화 진행기간에 따라서 입자파쇄 현상이 다르게 나타날 것으로 판단된다. 따라서 이러한 실험과정에서 발생하는 입자파쇄 특성에 대해서 알아보기 위하여 입도분석을 실시하였으며, 그 실험결과는 Fig. 8과 같다. 실험결과에 의하면 풍화지수(CWI)가 높아질수록 동일 입경에서의 통과 백분율이 점점 높아지는 것으로 나타났다. 이는 풍화가 진행될수록 화강풍화토의 입자파쇄 경향이 더욱 두드러지게 나타난다는 것을 알 수 있다.

Table 5는 입도시험에 사용된 각 시료별 물리적 성질을 나타냈으며 이를 통해서도 입자파쇄 경향을 알아 볼 수 있다. 표에서처럼 시료별 No.200체 통과율과 균등계수 그리고 곡률계수의 변화를 살펴보면 화강풍화토의 풍화지수가 높아질수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 입도분석 결과와 마찬가지로 화강풍화토의 풍화가 진행되면서 흙입자가 잘게 부서졌음을 의미하며, 풍화지수와 입자파쇄의 연관성을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

Table 5. Physical properties according to weathering index

CWI (%)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	Passing quantity of No.200 (%)
25.3	0.3076	0.7925	2.0184	6.6	1.01	1.6
28.9	0.2388	0.7161	1.7989	7.5	1.19	3.6
32.8	0.0910	0.5152	1.5276	16.8	1.91	8.4
38.1	0.0561	0.3999	0.9840	17.5	2.90	11.5
45.4	0.0391	0.2582	0.7161	18.3	2.38	15.7

Table 6. Specific surface area per unit volume according to weathering index

Contents	Chemical weathering index (CWI, %)					
	25.3	28.9	32.8	38.1	45.4	
D ₁₀ (mm)	0.3076	0.2338	0.091	0.0561	0.0391	
D ₅₀ (mm)	1.4825	1.3274	1.1092	0.7112	0.5649	
Specific surface area (cm ² /cm ³)	A	195.1	251.3	659.3	1069.5	1534.5
	B	40.5	45.2	54.1	84.4	106.2

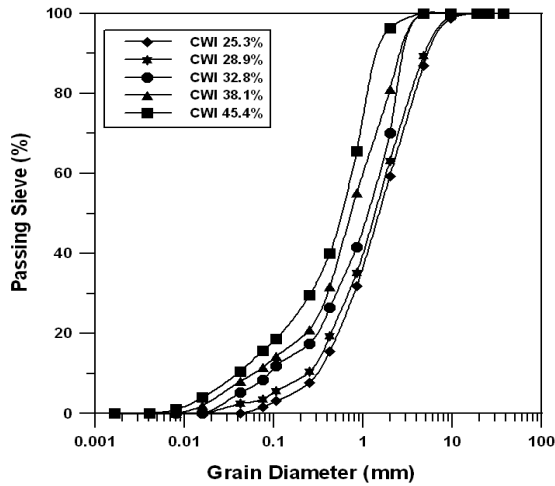


Fig. 8. Particle distribution curve according to weathering index

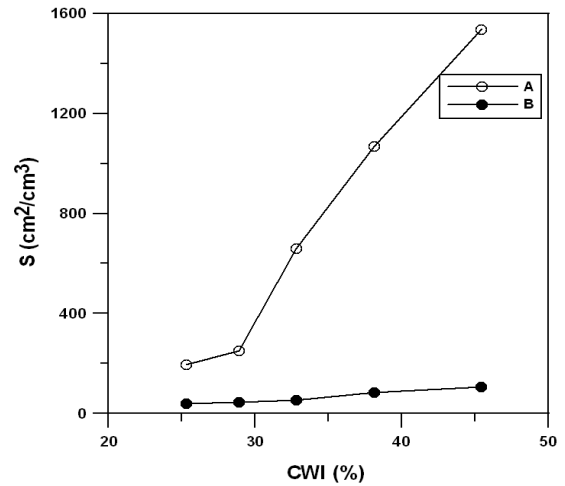


Fig. 9. Variation of specific surface area according to weathering index

또한 Table 6은 풍화 진행에 따른 풍화토의 파쇄특성을 알아보고자 본 연구에 사용된 각기 다른 풍화도를 가지고 있는 시료들의 입경분포를 토대로 비표면적을 나타낸 것이다. 비표면적은 입도분포곡선에서 입경 D_{50} 과 입경 D_{10} 을 기준으로 하여 단위체적에 포함된 모든 토립자는 구(球)로 가정하고 단위체적당 비표면적($S = \pi D^2 / \pi D^3 / 6$)을 계산 하였으며, 비표면적 A, B는 각각 입경 D_{10} 과 입경 D_{50} 을 기준으로 산정하였으며 그 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 풍화지수에 따른 비표면적의 변화 양상을 살펴보면 A는 풍화지수가 증가함에 따라서 큰 폭으로 증가하는 반면에 B는 풍화지수가 최소에서 최대가 될 때까지 약 1.5배의 비표면적 증가량을 보이고 있다. 이를 통해서 풍화진행에 따른 입자파쇄는 입경 D_{50} 이하의 작은 입경에서 더 활발히 진행되었는데 이는 인공적으로 풍화시킨 불산용액으로 인해서 1차 광물에서 2차 광물로 변화는 과정이 더욱 촉진되었기 때문으로 판단된다.

4.3.2 다짐에 의한 입자파쇄

Table 7은 각 시료별로 표준다짐시험을 실시한 후 시험에 사용된 화강풍화토의 입자파쇄 특성을 고찰하기 위하여 입도시험 결과를 균등계수, 곡률계수 및 No.200체 통과율의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 풍화도가 다른 각각의 시료가 최적함수비 부근에서 균등계수가 가장 높아지는 것을 알 수 있었으며, 최적함수비 상태에서 가장 건조밀도가 크므로 입자파쇄의 영향도 가장 큰 것으로 판단된다.

Table 8은 풍화가 진행된 각 시료들의 표준다짐시험 실

Table 7. Comparison of particle crushing (after compaction)

CWI (%)	W_n (%)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	Cu	Cc	Passing quantity of No.200 (%)	W_{opt} (%)
25.3	5	0.064	0.305	0.968	14.9	1.49	4.3	12.6
	9	0.060	0.290	0.925	15.5	1.53	5.4	
	13	0.055	0.276	0.881	16.1	1.58	7.2	
	17	0.057	0.286	0.911	16.0	1.58	8.9	
	21	0.059	0.295	0.942	16.0	1.57	9.6	
28.9	5	0.068	0.347	1.179	17.2	1.63	7.5	13.3
	9	0.065	0.336	1.153	17.5	1.66	8.4	
	13	0.062	0.326	1.126	17.9	1.70	9.8	
	17	0.061	0.332	1.144	18.5	1.73	10.6	
	21	0.063	0.341	1.168	18.2	1.71	11.5	
32.8	5	0.071	0.431	1.390	19.5	1.87	11.0	16.3
	9	0.071	0.428	1.380	19.6	1.88	11.2	
	13	0.070	0.425	1.371	19.7	1.89	11.5	
	17	0.066	0.426	1.377	20.9	2.00	12.7	
	21	0.068	0.431	1.393	20.5	1.96	13.8	
38.1	9	0.067	0.410	1.324	19.9	1.90	13.2	18.6
	13	0.066	0.406	1.310	19.9	1.91	13.5	
	17	0.066	0.401	1.295	19.9	1.91	13.8	
	21	0.063	0.404	1.305	20.6	1.97	14.3	
	25	0.065	0.408	1.319	20.3	1.94	14.8	
45.4	9	0.062	0.390	1.259	20.2	1.94	15.4	21.3
	13	0.061	0.384	1.239	20.2	1.94	15.8	
	17	0.060	0.377	1.219	20.2	1.94	16.1	
	21	0.061	0.382	1.233	20.2	1.94	16.0	
	25	0.062	0.385	1.245	20.0	1.92	15.8	

시 후, 함수비 변화에 따라 비표면적($S = \pi D^2 / \pi D^3 / 6$) 공식에 A는 입경 D_{10} 에 B는 입경 D_{50} 에 해당되는 비표면

Table 8. Specific surface areas per unit volume according to weathering index (after compaction)

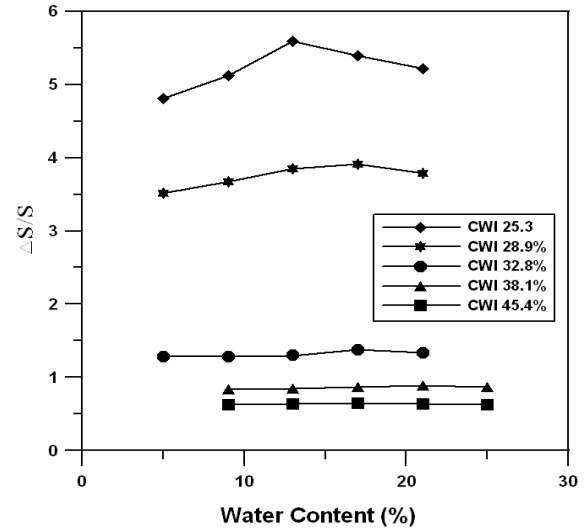
CWI (%)	W _n (%)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	Specific surface area (cm ² /cm ³)		W _{opt} (%)
				A	B	
25.3	5	0.064	0.761	937.5	78.8	12.6
	9	0.060	0.728	1000.0	82.4	
	13	0.055	0.693	1090.9	86.6	
	17	0.057	0.717	1052.6	83.7	
	21	0.059	0.741	1016.9	81.0	
28.9	5	0.068	0.943	882.4	63.6	13.3
	9	0.065	0.925	923.1	64.9	
	13	0.062	0.904	967.7	66.4	
	17	0.061	0.918	983.6	65.4	
	21	0.063	0.936	952.4	64.1	
32.8	5	0.071	1.097	845.1	54.7	16.3
	9	0.071	1.089	845.1	55.1	
	13	0.070	1.082	857.1	55.5	
	17	0.066	1.087	909.1	55.2	
	21	0.068	1.100	882.4	54.5	
38.1	9	0.067	1.045	895.5	57.4	18.6
	13	0.066	1.034	909.1	58.0	
	17	0.065	1.022	923.1	58.7	
	21	0.063	1.030	952.4	58.3	
	25	0.065	1.042	923.1	57.6	
45.4	9	0.062	0.994	967.7	60.4	21.3
	13	0.061	0.978	983.6	61.3	
	17	0.06	0.963	1000.0	62.3	
	21	0.061	0.973	983.6	61.7	
	25	0.062	0.983	967.7	61.0	

적의 변화를 A, B로 나타낸 것이고, 비표면적 A, B의 증분비($\Delta S/S$)와 다짐함수비의 관계를 Fig. 10에 나타내었다.

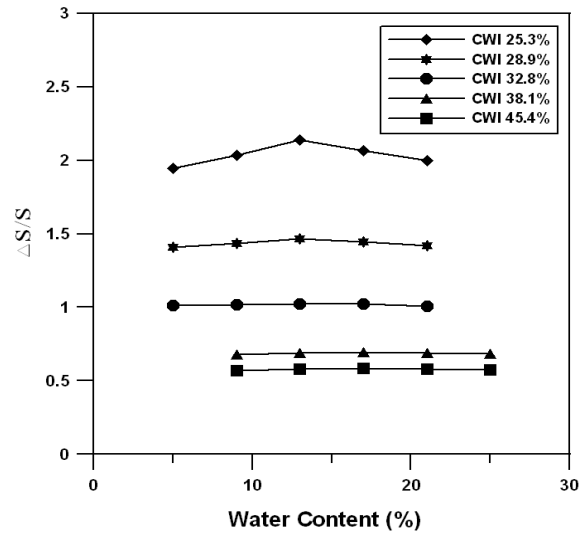
Table 8의 결과에 의하면 모든 시료의 비표면적과 입경 변화가 최적함수비 부근에서 최대치를 나타내고 있으며, 이러한 경향을 Fig. 10에서도 동일하게 나타나고 있는데 이것은 최적함수비 상태에서 가장 큰 파쇄현상을 일으키는 것이라고 판단할 수 있다. 또한 풍화가 진행된 시료일수록 비표면적 증분비의 변화 양상이 점차 감소하면서 입자파쇄에 둔감해지는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 포천에서 채취된 화강풍화토를 인공적인 풍화기법을 이용하여 풍화도 변화에 따른 화강풍화토의 입자파쇄특성을 연구하였으며 이를 위해 입도시험과 조성광



(a) Specific surface area A



(b) Specific surface area B

Fig. 10. Variations of compaction water content and specific surface area

물 분석을 통한 풍화지수 결정 후 표준다짐시험 및 투수시험 등을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 화학적풍화지수(CWI)를 이용하여 풍화진행기간에 따른 각 시료별 풍화지수를 판정한 결과는 각각 25.3%, 28.9%, 32.8, 38.1%, 45.4%로 나타났으며, 풍화가 진행될수록 CWI는 증가하고 강렬감량(Li)을 이용한 물리적 풍화지수와 주요조성광물인 SiO_2 량은 감소하는 경향을 보였다.
- (2) 풍화진행에 따른 입자파쇄 특성은 풍화가 진행되면서 전체입경분포에서 입자파쇄가 진행되었으며 입경 D_{10} 과 D_{50} 에 대한 비표면적을 비교한 결과 입경 D_{50} 이하의 작은 입경분포에서 입자파쇄가 활발하게 진행된 것

으로 나타났다.

- (3) 다짐에 의한 입자파쇄 특성은 최적함수비 부근에서 입자파쇄가 최대치를 보였고 풍화가 진행됨에 따라서 비표면적 증분비가 감소하는 것으로 보아 풍화지수가 높을수록 입자파쇄에 둔감한 것으로 판단된다.
- (4) 다짐 및 투수특성은 풍화지수가 증가함에 따라서 각 시료의 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보였다. 또한 투수계수는 풍화지수가 증가함에 따라서 점차로 감소하는 경향을 보였으며, 최적함수비 부근에서 최소가 되고 최적함수비 보다 습윤측에서 소폭으로 증가하는 경향을 보였다.

Acknowledgement

This work was supported by the Daejin University Research Grants in 2013

References

1. Lee, K. C. (1998), *Geotechnical Characteristics of Decomposed Granite Soils Related to the Degree of Weathering*, Ph.D Thesis, Chonnam National University, pp.89-203.
2. Lump, P. (1962), "The Properties of Decomposed Granite", *Geotechnique*, Vol.12, No.2, pp.226-243.
3. Matsuo, S. and Nishida, K. (1979a), "Physical Properties of Weathered Granite Soil Particles and Their Effect on Permeability", *Soils and Foundations*, Vol.19, No.1, pp.13-22.
4. Matsuo, S. and Nishida, K. (1979b), "Physical Properties of Soil Particles and Their Effect on Hydraulic Conductivity of Unsaturated Decomposed Granite Soils", *Soils and Foundations*, Vol.21, No.4, pp.1-12.
5. Miura, N. and Yamanoguchi, T. (1975), "Effect of Water on the Behavior of a Quartz-Rich Sand under High Stresses", *Soils and Foundations*, Vol.15, No.4, pp.23-34.
6. Miura, N., Hyodo, M. and Yasufuku, N. (1984), "Compressive and Shear Characteristic of Undisturbed Decomposed Granite Soils Paying Attention to the Degrees of Weathering", *Proceedings of JSCE*, No.382, III-7, pp.131-140.
7. Park, B. K. (1973), "A Study on Physical Properties of Weathered Granitic Soils in Kwangju District", *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.21, No.4, pp.37-50.
8. Park, B. K. (1974), "A Study on Shear Characteristics of Weathered Granite Soil", *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.22, No.3, pp.55-66.
9. Park, B. K., Lee, J. S., Lee, K. C. and Lim, E. S. (1996), "A Permeability and Compression Properties of Decomposed Granite Soil", *Proceeding of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.3, pp.347-350.
10. Park, B. K., Lee, J. S., Moon, Y. and Shin, H. C (1997), "Characteristics of Weathering and Breakage of Decomposed Granite Soil Considering Weathering Index", *Proceeding of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.3, pp.181-184.
11. Sueoka, T. (1988), "Identification and Classification of Granite Residual Soils Using Chemical Weathering Index", *Symposium on the Weathering Residual Soil*, pp.89-94.
12. Tugrul, A. and Gurpinar, O. (1977), "The Effect of Chemical Weathering on the Engineering Properties of Eocene Basalts in Northeastern Turkey", *Environmental and Engineering Geosciences*, Vol.3, No.2, pp.225-234.