

국내 화강풍화토 지반의 풍화도 평가방법

Evaluation Methods of Weathering Degree for
Korean Decomposed Granite Soils

박 병 기*¹

Park, Byong-Kee

이 광 찬*²

Lee, Kwang-Chan

Abstract

In this study, decomposed granite soil samples were taken from 16 different regions and their weathering properties were investigated by testing their physical and chemical properties. According to the results, the Chemical Weathering Index (CWI) ranges from 15.5 to 30 in general and 12 out of the 16 regions show over 20 in CWI. The 12 regions are categorized into complete granite soil areas by Sueoka's classification. CWI, Li, SiO₂, ΔS/S and SAR are all correlated significantly and used as indicators by which the degree of weathering can be judged. The degree of weathering can be measured especially through Li or SiO₂ which is considered as an easy approach of geotechnical classification. Also, the relationship between the value of N and Li is regarded as a good indicator in estimating the degree of weathering.

요 지

본 연구는 16개 지역 화강풍화토를 대상으로 물성시험과 화학시험을 실시하여 화강토의 풍화특성을 파악하였다. 그 결과, 화학적 풍화지수(CWI)가 15.5~30의 범위내에 있고 CWI가 20이상인 화강토가 12개 지역이 해당되며 Sueoka의 분류법에 의하면 완전풍화토로 분류되었다. 특히 화학적 풍화지수(CWI)와 강열감량(Li), SiO₂, 파쇄비(ΔS/S), SAR간의 관계가 좋은 대응을 보여 이들 모두 풍화정도를 판단하는 지표가 될 수 있으며 이 가운데 특히 Li나 SiO₂에 의한 풍화도의 판정은 지반 공학적으로도 쉽게 접근할 수 있는 분류법으로 생각되었다. 그리고 N치와 Li의 관계도 풍화의 정도를 판단하는 좋은 지표가 될 수 있다고 본다.

Keywords : Weathering Degree, Chemical Weathering Index, loss of Ignition, Undisturbed Decomposed granite soils

*1 정회원, 전남대학교 공과대학 토목공학과 명예교수

*2 정회원, 전남대학교 공기연 특별연구원

1. 서 론

우리나라의 건설현장에서 쉽게 만나게 되는 흙 가운데 하나가 화강토이다. 화강풍화토는 모암인 화강암(경우에 따라 화강암질 편마암)이 원지반에서 직·간접으로 대기나 물의 작용을 받아 풍화되어 잔적된 흙으로서 대부분 석영, 장석, 운모와 유색광물로 구성되어 있으나 모암의 분포지역이나 채취장소 및 심도에 따라 각 광물의 성분량이 다르다. 이 성분 가운데 풍화정도에 따라 석영은 풍화에 대해 안정성이 높으나, 그 외의 장석류나 유색광물은 화학적 성질에 따라 쉽게 변질되어 점토화의 과정에 이르게 된다.

그 외에 물리적 성질로서 큰 특징의 하나는 화강풍화토가 물에 접촉하면 안정성이 저하되어 함수비가 많아짐에 따라 전단강도 등이 급격히 감소되는 경향을 보인다. 이러한 풍화과정은 장기간에 걸쳐서 일어나는 현상이고 현지점의 풍화정도에 따라 공학적 성질에 큰 차이가 발생하므로 풍화정도를 측정하여 이에 적합한 공학적 성질을 판단하여야 한다. 그러나 화강암의 조성광물은 천태만상이고 풍화작용도 지질학적 변천과정과 환경에 좌우되므로 이와 같은 판단은 불가능하다. 따라서 현실적으로는 현재의 공사시점에서 이를 성토재료(교란시료)로 이용할 경우와 자연상태로 두고 이용하는 경우(사면절토, 기초지반과 같은 불교란상태)로 나누어 검토할 수밖에 없다.

흔히 현장에서 화강풍화토는 성토재료나 기초지반으로서 양호하다고 인정되고 있으나, 언급한 바와 같이 조성광물의 함유량과 풍화정도에 따라 그 공학적 성질이 크게 달라지며, 대부분의 화강토는 통일분류법에 의하면 SM, SC 등에 속하여 역학적 거동은 사질토나 또는 모래와 점토의 중간적 성격을 띠고 있는 것으로 판단하고 있다. 이러한 분류적 특성 때문에 화강토는 그 토립자가 물리적으로나 화학적으로 불안정하여도 안정된 흙으로 인식되기 쉽고, 이와 같은 점이 고려되어 현재는 특수토로

간주되고 있다.

전술한 바와 같이 모암의 구성성분에 따른 풍화작용과 밀접한 관계가 있으므로 풍화작용의 성격과 풍화의 정도를 판단하여, 공학적 성질과 결부시키는 일은 매우 중요한 일이다. 현재까지 화강풍화토의 풍화정도를 평가하는 지표로서는 화강풍화토의 물리적 성질의 변화를 잘 나타내고 있다고 보는 강열감량법(Ignition Loss), 화학적풍화지수(CWI), X선 회절 분석법, 간극율의 변화 등 여러 가지 방법이 제안되고 있다. 이와 같은 관점에서 본 연구는 전국 16개소 현장에서 화강풍화토를 채취하여 이미 제안된 풍화도 판정법에 의해 국내 화강풍화토지반의 풍화특성이나 풍화정도를 파악하는데 연구목적이 있다.

2. 화강풍화토의 풍화 Mechanism 및 지표

2.1 화강풍화토의 근원

우리 나라에서 화강풍화토는 필자가 사는 호남 지방에서는 화강암질계 또는 편마암계 풍화 화강토인 이른바 화강풍화토를 비롯하여 안산암계 풍화 잔적토, 응회암 풍화 잔적토, 또 많지는 않지만 유문암 화강풍화토, 이암 화강풍화토가 산재하고 있으며 이는 한국 전역에서도 지질학적 특성으로 보아 비슷할 것으로 보인다. 화강풍화토계는 사질토에 가까운 것을 곳곳에서 볼 수 있으나 그 외 나머지는 석영질이거나 점성토에 가깝다. 이들을 공사목적으로 절취하게 되면 급속도로 열화 되어 당초 지반 조사시의 강도 평가와 크게 어긋나 설계변경을 하지 않을 수 없는 경우를 우리는 흔히 본다. 또한 전남 지방을 중심으로 보면 가장 대규모로 존재하는 화강암질계의 화강토, 다음으로 산지에서 흔히 눈에 보이는 모래분이 매우 적은 붉은 색 또는 황갈색의 안산암 풍화 잔적토로서 경상도에서도 광범위하게 분포되고 있으며 흔히 큰 규모는 아니지만 반암(班岩) 풍화토가 관입되어 있는 경우가 많다. 또한, 전남

광양, 경남 하동 일대에는 니암 화강풍화토가 산재하고 절개시 공기 중에 노출되면 특유의 팽창성과 함께 굴착 직후부터 질리가 발생하여 비탈면의 경사를 수정하지 않을 수 없는 경우도 있다. 그 외에 현무암(玄武岩) 풍화 잔적토는 제주도 일대에 넓게 분포되고 지질학자에 의하면 경기도 연천, 동두천 일대에 회갈색 또는 회청색편 화강토가 분포하고 있다고 한다. 경상도에는 사암 풍화 잔적토가 Shale(頁岩) 잔적토와 혼존하고 있다고 하나 전남 지방에는 거의 볼 수 없는 것이 특징이다. 따라서 모두 모암의 조직이 역력히 보이지만 손가락으로도 부실 수 있을 만큼 풍화가 완전히 진전되고 있는 흙이며 이들을 총칭하는 흙을 가리켜 화강 풍화토(즉 화강토)의 근원이라고 생각된다.

2.2 화강풍화토의 풍화 Mechanism

화강풍화토는 그 모암의 종류에 따라 풍화 생성물이 당연히 다르고 모든 암석은 그 풍화 과정을 물리적·화학적·생물학적 풍화 과정으로 구분하는데 마그마에서 암석으로 생성된 과정에서 응결, 수축 과정에서 발생한 균열에 침투된 물의 동결, 심한 온도 차이에 의한 암석 내부에 발생하는 온도 경사, 암석에 포함된 결정체의 이방적 열팽창, 건습의 반복등 붕괴 촉진 현상이 일어나면 균열은 더욱 진전되고 이들 경계면에서 부터 화학적 풍화로 이어진다. 화강암이나 심록 화강암등 거정질 암석은 암반 중에 발생한 무수한 균열로 분리되어 더욱 세립질로 분해되어 가면서 오랜 지질학적 시간에 걸쳐 암괴 → 사질토 → 실트 → 점토 까지 연속적으로 풍화되어 가면서 심층풍화대로 존재하는 이른바 화강풍화토가 생성된다. 당연히 동일화 심층풍화대에서도 대기에 노출된 쪽은 보다 더 풍화가 진전되어 이른바 Saprolite나 Laterite화 된다. 변성암의 풍화 잔적토도 특히, 편마암의 경우도 화강풍화토와 비슷한 과정을 거친다. 다만 암괴상태보다는 바로 암반에서 사질토 → 실트 → 점토로 풍

화가 진전되고 안산암 풍화 잔적토는 균열이 다소 적게 발생하지만 본래 석영질을 소량 포함하고 있으므로 암반에서 바로 실트 → 점토로 풍화과정을 거친다. 또한, 지각내부의 마그마 특히 규산(SiO_2)을 풍부하게 포함한 마그마가 지각 속에서 서서히 냉각 고결되어 화강암이 생성되고 그 후 화강암은 지각의 용기나 침식작용으로 최종적으로 지표에 노출된다. 따라서 지각 심부에서 받았던 거대한 응력이 차츰 해이되면서 암석덩어리가 팽창되고 균열(절리) 발생이 촉진된다. 이와 같이 응력의 제거에 의한 팽창작용 때문에 발생한 균열의 성장은 조립질 광물로 이루어진 화강암에서 전형적으로 나타난다. 이와 같이 균열이 발생하면 암반에 침투된 물의 동결작용, 심한 기온차이에서 오는 암석내의 온도경사 각 결정체의 이방적(anisotropic) 열팽창, 건습의 반복등 붕괴 촉진 현상에 의하여 기계적인 파괴작용(풍화작용)을 받으며 특히 지표근방이 심하여 간극율이 차츰 커진다. 이와 같은 물리적 풍화작용과 더불어 CO_2 개스를 충분히 함유하고 있는 물은 균열이나 간극을 따라 침투하고 사장석이나 흑운모 같은 불안정한 광물이 산화·환원·탄산화 등의 화학반응에 의하여 규산의 + ion의 용탈·수화작용을 촉진한다. 이와 같은 화학적 풍화작용은 구성결정 입자간의 결합력을 약화시키고 약 10% 정도의 간극율을 갖는 화강풍화암이 생성되는데 이때의 화학적 풍화단계는 아직은 미약하고 화학성분의 용탈이나 점토화 작용은 그리 크지 않다. 특히 Leneuf, Aubert, Iisima의 연구 보고에 의하면 화강암 풍화대의 깊이나 풍화정도는 암석이 놓인 물리적·화학적 조건보다는 풍화를 받는 시간에 따라 정해지고 Kinomiya의 추정에 의하면 지표에서 약 2m 깊이에 있는 신선한 화강암이 화강풍화토로 되는데는 600만년 이상이 걸린다고 한다. 한편, 이와 같은 거시적으로 볼 때 심층풍화대의 풍화정도는 위쪽에서의 간극율의 증가나 다소의 화학적 풍화의 진전은 노출되어 풍화가 촉진되지만 전반적으로 깊은 곳까지 염류 용탈

이나 2차 광물의 생성이 있음을 볼 때 별도의 Mechanism에 의해 풍화작용이 이루어진 것이며 이를 “화강암 풍화작용”이라고 보며 또는 결정입자 또는 결정체간의 온도 경사에 의한 이방성 팽창·수축·열수작용 등이 풍화의 주 원인이라고 보는 견해도 있다. 결국 화강암이 오랜 시간의 용탈·분해작용을 받으면 입자간의 이완·분리가 촉진되고 세립화 되고 최종적으로 점토화가 촉진되는 과정에서 2차 광물이 생성되는데(Illite, Vermeaculite, Gibbsite, Kaolinite, 가수흑운모(백운모) 이들을 총칭하여 “화강풍화토의 풍화 Mechanism”이라고 한다.

2.3 화강풍화토의 풍화지표

표 1은 일본과 홍콩의 여러학자들의 현재까지 화강풍화토의 풍화도 판정법을 제안한 것인데(9)인데, 이 가운데 Sueoka, N ishida와 Aoyama 그리고 Matsuura와 M ukushiro 등의 분류법(11)은 공학적 관점에서 주목할 만한 방법이다. 이들의 풍화도 판정의 공통점은 탄성과 속도(V_p , 표에서 숫자이고 단위는 km/sec임)를 이용하고 이 중 Nishida와 Aoyama은 간극비와 비중, 습윤밀도를 이용하고 이를 다시 4개의 지반으로 분류하고 있으며 Matsuura와 M ukushiro은 화강풍화토 지반을 지표로부터 표층, 제1풍화대, 제2풍화대, 제3풍화대, 암반 등으로 분류하고 있으며 Nosaki는 표준관입시험치인 N를 이용하고 있는 것이 특징이다. 특히 앞으로 이 분야의 응용연구가 기대되지만 협소한 지역이나 화강풍화토가 관입 상태로 존재하는 경우 등에는 많은 문제점이 내포되어 있다고 보고되고 있다. 이들 분류법 가운데 필자들은 Sueoka의 CWI(즉 Chemical Weathering Index)에 의한 분류 방법을 관심을 갖고 있으며 Sueoka에 의하면 화강풍화토가 전 세계적으로 분포되고 있으며 풍화환경에 따라 동종의 모암조직을 갖고 있어도 풍화양식이나 풍화정도가 다르기 때문에 화학적인 조암

광물의 변화로서 구분할 수밖에 없다고 보고 있다. 이런 관점에서 화학분석을 통해 간편하게 풍화에 예민한 광물을 분석하여 화학적 풍화지표로 삼아 세계 여러 나라의 화강토와 비교하며 풍화정도를 정의하려는 의도에서 표 2를 제안하였다(9)(13). 또한 그는 지구상의 기후후구에 따라 같은 암석일지라도 남극대륙에서는 물리적 풍화에 의한 암석의 세립화가 주종을 이루며, 온대 기후후구에서는 기후의 영향을 받아 화강암 지형이 잘 보존되어 있거나 적색 토화된 지층으로 남아 있으며 경사가 급한 산악지형에서는 사질, 실트질이 많은 화강풍화토가 잔적토로서 존재하고 또한 열대나 아열대에서는 적색토(Lateritic Soil)가 일반적이지만 지형이나 지사의 영향으로 고결된 경우는 Laterite가 된다고 한다.

특히 Sueoka의 CWI 방법은 암반 및 화강풍화토에 대하여 1)풍화 과정 전체를 표현할 수 있고, 2)공학적 목적에도 적합하고, 3)비교적 간단한 경험적 표현을 목표로 제안된 것인데 풍화가 진행되면 $H_2O(\pm)$ (강열감량)가 급격히 증가되고 이를 mole 단위의 중량으로 표현하면 그 변화가 명확히 된다는 것을 구체적으로 설명하고 있는 것이 지반공학 차원에서 흥미롭다. 따라서, $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(\pm)$ 의 성분 합계를 mole%로 풍화의 진행 정도를 정량적으로 나타내는 지표로 보고 CWI를 다음과 같이 정식화하여 제안하고 있다(9).

$$CWI = \frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(\pm)}{\text{all chemical components}} \times 100(\%)$$

즉 윗식의 의미는 즉 분자량은 풍화가 진행되면서 지반 내에 잔류하여 증가되는 화학성분으로서 풍화에 의해 화학성분이 용탈되는 관점이 아니라 어떤 성분이 풍화에 의해 잔류 증가된다는 관점에서 제안된 것이다. 표 2(a)에 화학적 풍화지수값에 따른 7단계의 풍화도 분류인데 CWI에 의한 풍화의 분류 중 $CWI < 15$ 는 신선한 화강암이고, $15 < CWI < 20$ 은 풍화암으로서 이를 다시 3단계로 약풍화(Ⅱ), 중풍화

(Ⅲ), 강풍화(Ⅳ)로 나누고 $20 < CWI < 40$ 은 완전풍화토(Ⅴ)로 분류한 것이 특징이다. 따라서 화강토는 대부분 강풍화 화강암에서 완전풍화토에 해당된다. 그리고 $CWI > 20$ 이상은 화학적

풍화가 주종을 이루는 단계로서(표 2(c).)모암의 형태는 잔존하거나 부분 소실된 상태이고 잔존하더라도 손으로 만지면 쉽게 부서진다. 이 단계를 Saprolite라고 부르고 $CWI < 40$ 까지

표 1. 화강풍화토의 분류법

Tanka	Kimiya	Kakitani	Matsuura Mukushiro	Oshima	Nosaki	Tanaka Okimura	Ito Kujime	Sueoka	Nishida Aoyama	Deer Putton	Hong Kong	
D (Residual Soil)	Zone VII 0.2~0.3	surficial soil. R. 0.3	surficial soil 0.3	$D_L < 1.2$	M_3 N=2-20	I	M_L	VI	IV	U	I-A	VI
	Zone VI 0.5~0.8	chemical weathering C_1	I Zone 0.7		$D_M < 1.5$	M_3 N=20-50	II	M_M	V	III	M	I-B
	Zone V	C_2 0.5		III			II		L		I-C	IV
	Zone IV	C_3 1.5		IV			III		I		I-C	III
D, CL 1.5	1.0~1.2	physical weathering P_1	II Zone 1.5	D_H	M_2 N>50	V	M_L	II	I	Weathered red rock	II-A	III
CM 1.5~2.5	Zone III		III Zone 2.0	C_L 2.3-3.3							II	II-B
CH 2.5~4.0	Zone II 2.5~4.0	P_2 3.0		fresh rock 4.5								III
A, B 4.0	Zone I 5.0~5.5	non weathering F. 4.0										

표 2.(a) 화학적 풍화지수에 의한 암석분류와 공학적 특성

CWI(%)	Classification*	Extent of weathering	Classification of weathered granite	Cohesion and Porosity
13-15	I	Fresh rock	• Fresh rock	
15-20	II	Slightly weathered	• Weathered granite	
	III	Moderately weathered	• Granular disintegration sand	
	IV	Highly weathered	• Masado soil • Saprolite	
20-40	V	Completely weathered	• Lateritic soil	
40-60	VI	Residual soil	• Laterite or bauxite	
60-90	VII	Weathered hard pan(as cemented)		

★Dearman. et al(1978)

표 2(b). 화학적 풍화지수를 사용한 화강풍화토 분류

Type of residual soil	Definition of term
Grandular disintegration sand	Sandy residual soil derived from granite having smaller than 30% CWI
masado	Sandy and silty residual soil derived from granite having smaller than 40% CWI
Saprolitic soil	Residual soil which exhibits clear inherited structure features and lead to easy identification of the parent rock, in case of granite origin, having moere than 20% CWI
Lateritic soil	It belongs to horizons A or B of well drained profiles developed under humid tropical climites, its clay fractionis consituted essentially of minerals of the kaolinite group and of iron or aluminum hydrated oxides, it is a soil a physical sense and has more than 40% CWI
Laterite	It belongs to horizons A or B of well drained profiles developed under humitropical(sometime temperate) climites, it is constituted essentially of minerals of sesquioxide iron and aluminum, it is cemented or pisolithic and having more than 60% CWI

표 2(c). 화학적 풍화지수, 기후지방 및 풍화생성물의 관계

CWI(%)	15 20 30 40 50 60 70 80 90									
	Fresh rock	Weathered granite	Residual soil	Lateritic soil	Laterite					
Polar region(e.g. the Antarctic Continet)	[Redacted]									
Tottori city, Japan(35.5° N)	[Redacted]									
Kitsugi, Japan(35.5° N)	[Redacted]									
Hong Kong, etc.(23° N)	[Redacted]									
Kanduna, Nigeria(10° N)	[Redacted]									
Dariling Range, Australia(33° S)	[Redacted]									
Category of weathering near the ground sur	Physical weath-ering(mostly granulated)		Chemical weathering pseudochemical		Chemical weathering reddishly pseudochemical			hardpan or oxide flat		

에 마사토도 포함되며 화강풍화토는 대부분 이 범위에 든다. 한편, 강열감량과 표준관입시험치 N의 대응관계 중 $Li < 2.0\%$ (즉 $N > 50$)는 신선암 내지 약풍화암이고, $2.0\% < Li < 4.0\%$ (즉

$N = 20 \sim 50$)는 중풍화토, $Li > 4.0\%$ (즉 $2 \sim 20$)는 강풍화토로 분류된다(13). 이들 중 $Li > 2\%$ 에서는 거의 구성광물이 분리된 상태이고 손으로 만지면 쉽게 부서진다. 표 2(b)는 화강토의 중

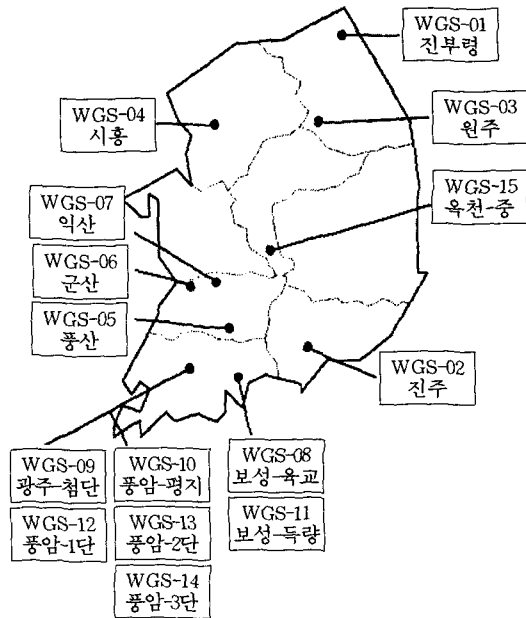


그림 1. 전국 16개소 화강풍화토 채취 위치도

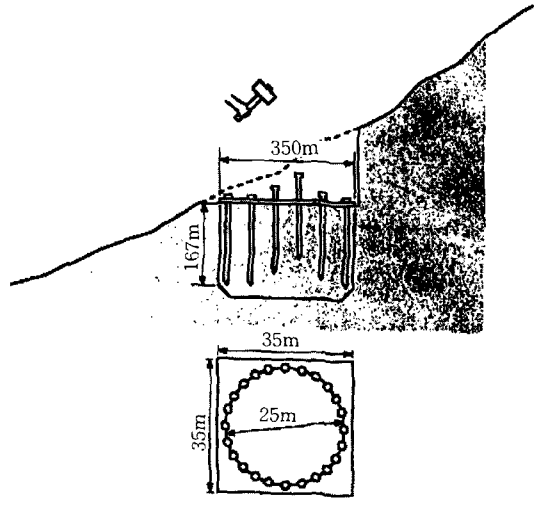


그림 2. 불교란 화강풍화토 채취방법

류 및 이에 대한 정의를 나타내고 그리고 표 2(c)는 세계의 화강풍화토의 풍화진행 정도를 CWI와 관련지은 것이다.

3. 시료채취 및 시험

3.1 시료 채취

그림 1은 전국 16개 현장에서 화강풍화토를 채취한 위치를 나타내고 불교란 시료는 그림 2의 방법을 이용하였다. 이는 아크릴판에 일정한 간격으로 구멍을 뚫어 못을 박아 채취하였으며 동시에 함수비의 증발을 막기 위해 주변을 조심스레 록으로 보호하였으며 그리고 교란시료는 인근에서 채취하여 실험실로 반입하여 여러 시험을 실시하였다.

3.2 시험

16개소 현장에서 채취된 시료의 풍화정도를 파악하기 위해 화학적 구성 성분 분석 및 강열감량 시험, 입도분석 등을 실시하였으며 특히 입도 시험은 모든 경우 비표면적(Surface Area, 즉 Sw라고 약칭)이 산출되며 이들 상호간의 관련성을 검토하여 풍화도 판정에 이용하였다. 그리고 표 3은 16개소 화강풍화토의 물리적 성질을 나타내고 입도 분석은 본 연구에서 매우 중요한 요소이므로 되도록 시험자의 오차를 줄이기 위하여 74 μ 이상의 입경은 KS-2302를 엄수하고 그 이하의 입경분석은 자동 입도분석기(Malvern)에 의해 동일조건 아래서 시험을 실시하였다. 모든 시료는 초기입경분포가 표준이 되므로 일률적으로 비닐포대에 500gr씩 넣어 공기를 빼고 밀폐한 후 2m 높이에서 30회 낙하시켜 초기처리를 한 것을 비교기준으로 하였다. 또한 16개소 지역별 화강풍화토의 화학성분을 분석 의뢰하여 얻은 결과(ICP K-1분석)는 표 4와 같으며 이들을 풍화도 판정에 이용하였다.

4. 시험결과 및 고찰

화강토(화강암질계의 화강풍화토, Decomposed Granite Soil)는 기본적으로 화강암질 암석이 풍화되어 세립화된 것으로 이들 암석(화강암계 암석)은 풍화되면 암석으로서의 고결력을 잃고 최종적으로는 흙으로 환원되며 그

표 3. 16개소 화강풍화토의 물리적 성질

구분	비중	최대 입경 (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	#200 통과량 (%)	균등계수 (Cu)	곡률계수 (Cc)	비표면적 (cm ² /cm ³)	USCS
WGS-1	2.68	5	1.10	0.16	0.48	0.80	4	7	1.3	75	SW
WGS-2	2.64	6	1.20	0.14	0.38	0.84	2	9	0.9	71.42	SP
WGS-3	2.74	4	1.00	0.15	0.41	0.77	4	7	1.1	81.1	SW
WGS-4	2.68	3	1.40	0.032	0.46	0.96	4	44	4.7	62.5	SW
WGS-5	2.67	6	1.60	0.06	0.50	1.13	4	27	2.6	53.1	SW
WGS-6	2.69	7	0.39	0.005	0.14	0.27	12	81	10.5	222	SM
WGS-7	2.66	3	0.70	0.026	0.14	0.42	-	27	1.1	142.8	SW
WGS-8	2.71	6	1.00	0.006	0.28	0.80	-	167	3.3	75	SW
	2.72	5	1.80	0.014	0.70	1.50	6	129	19.4	40	SW
WGS-9	2.64	10	0.65	0.09	0.17	0.40	8	7	0.5	150	SW
WGS-10	2.69	5	0.50	0.02	0.10	0.70	16	25	1.0	85.7	SM
WGS-11	2.68	4.8	0.62	0.026	0.19	0.72	8	24	2.2	83.3	SW
WGS-12	2.69	4.8	0.78	0.022	0.25	0.57	4	35	1.7	105.2	SW
WGS-13	2.69	6.0	0.83	0.022	0.24	0.55	5	38	3.1	109.1	SW
WGS-14	2.68	5	0.88	0.022	0.22	0.60	3	40	0.8	100	SP
WGS-15	2.66	5.5	0.78	0.030	0.31	0.65	10	26	4.1	92.3	SW
WGS-16	2.66	4.8	0.80	0.037	0.37	0.70	14	16	4.6	85.7	SM

$$\ast \text{비표면적}(S) = \frac{\pi D^2}{\pi D^3} (\text{입경 } D_{50} \text{ 기준})$$

표 4. 16개소 화강풍화토의 화학성분 분석결과

구분	지역	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SiO ₂	Li (%)	CWI (%)	WPI (%)	PI (%)	SAR
WGS-01	진부령	15.96	3.83	0.92	1.63	3.17	3.65	0.51	0.16	0.05	67.22	2.90	21.58	-1.32	85.71	7.16
WGS-02	진주	17.04	2.02	0.30	1.15	2.95	4.14	0.21	0.06	0.05	70.73	1.35	16.53	3.02	86.61	7.06
WGS-03	원주	16.45	5.17	1.60	3.70	3.00	3.17	0.74	0.22	0.08	64.40	1.47	18.37	7.32	84.11	6.66
WGS-04	시흥	15.70	3.48	0.49	0.63	2.70	4.60	0.25	0.07	0.06	69.86	2.15	18.88	-0.26	86.69	7.56
WGS-05	풍산	15.94	3.59	0.52	2.08	2.85	2.93	0.55	0.15	0.03	68.94	2.42	20.03	-0.49	86.09	7.35
WGS-06	군산	16.31	4.46	0.45	0.21	0.54	5.39	0.52	0.09	0.05	68.61	3.37	23.73	-7.52	85.48	7.15
WGS-07	익산	18.85	2.73	0.44	0.24	0.63	4.42	0.39	0.04	0.04	67.86	4.36	27.16	-12.08	84.55	6.12
WGS-08	보성-육교	17.42	8.72	2.07	0.93	0.97	2.44	0.96	0.14	0.09	62.91	3.35	26.73	-5.50	81.55	6.14
WGS-09	광주-첨단	16.64	2.04	0.32	0.51	2.58	4.86	0.18	0.05	0.06	71.66	1.10	15.48	3.33	87.02	7.32
WGS-10	풍암-평지	19.07	5.17	1.20	1.49	1.40	2.95	0.71	0.09	0.09	0.09	2.51	28.37	-9.04	82.29	5.67
WGS-11	보성-득량	19.47	5.15	1.09	0.21	0.69	4.11	0.53	0.09	0.07	0.07	4.76	30.40	-13.60	82.21	5.56
WGS-12	풍암(1단)	19.63	5.33	1.59	1.77	1.17	2.98	0.61	0.07	0.08	0.08	4.79	30.16	-10.44	81.57	5.37
WGS-13	풍암(2단)	17.31	4.55	1.52	2.90	2.44	2.82	0.57	0.16	0.08	0.08	2.29	21.00	2.21	84.14	6.42
WGS-14	풍암(3단)	19.95	6.20	1.99	2.63	2.19	2.86	0.74	0.10	0.11	0.11	1.89	22.70	4.05	80.76	5.23
WGS-15	옥천(중)	18.50	6.85	1.79	2.09	1.97	2.23	0.80	0.15	0.07	0.07	2.54	23.98	-0.25	81.77	5.79
WGS-16	옥천(하)	13.76	5.16	1.35	2.23	2.07	1.49	0.47	0.14	0.04	0.04	4.0	23.61	-6.88	86.97	8.56

가운데서 화강암은 가장 풍화되기 쉬운 대표적인 암석이다. 화강토에 있어서 가장 큰 공학적인 특징중의 하나는 흡입자가 외력에 의하여 쉽게 파쇄된다는 것이며, 풍화의 정도에 따라서 공학적 성질이 매우 다르게 나타난다는 점이다.

화강토의 풍화의 특성을 연구하는데 있어서 일반적으로 사용되고 있는 방법은 비표면적(ΔS)의 변화, 화학적 풍화지수(CWI)에 의한 것, 강열감량(Li)에 의한 것 등이 있다. 여기서 풍화라함은 시료가 모암에서 얼마만큼 자연작용에 의하여 변화되었는가를 의미하는 것으로 그 내용은 풍화에 의해 모암의 물리적, 화학적 변화가 어떻게 일어나며, 어떠한 형태로 잔류 광물이 존재하고, 이것이 지반 공학적으로 어떤 상태이고, 어떤 관련을 갖고 있는가를 논의하려는 목적을 갖고 있다. 그러나 아직까지는 완벽한 통일된 견해를 갖는 방법은 없다. 이와 같은 풍화 연구에 대한 상론은 현재 가장 널리 쓰이고 관련성이 깊다고 판단되는 강열감량(즉 Li, Loss of Ignition)과 화학적 풍화지수(즉 CWI, Chemical Weathering Index)을 이용한 결과를 주로 논의한다. 그림 3(a)는 우리나라 16개소 화강토는 불변이라고 보고 화학구성분량의 분포와 CWI의 관계를 삼각좌표

로 나타내고 그림 3(b)는 16개소 화강풍화토의 CWI를 나타내는 것인데 본 연구의 화강풍화토는 대부분 강풍화 화강암에서 완전 풍화토로 분류되고 거의 풍화암을 지나 풍화토에 해당되며 특히 CWI>20 이상의 완전 풍화토에 대응되는 것이 12개소이다. 그리고 CWI>20 이상은 화학적 풍화가 주종을 이루는 단계로서 모암의 형태는 잔존하나 손으로 쉽게 부서진다. 특히 Li와 CWI와의 상관 관계가 아직 밝혀져 있지 않지만 본 연구 사용된 16개소 화강토의 관계를 그림 4(b)에 나타낸다. 그러나 CWI 방법은 화강풍화토나 화강암에 포함되고 있는 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 그리고 TiO_2 의 mole량이 풍화에 의해 그 외의 2차 광물양과 함께 변하므로 이들의 크기를 풍화의 지표로 제안한 방법이다. 주요광물별 CWI의 관계도 일정한 경향을 보이는데 가장 많이 함유된 SiO_2 와 CWI와의 관계를 그림 4(a)에 보인다.

그림 4(a)는 화강풍화토의 풍화에 대한 상호관계를 나타내기 위하여 CWI와 SiO_2 의 상호관계를 비교하였으며, 또한 그림 4(b)는 CWI와 Li의 관계를 나타낸 것이다. 그림 4(a)에서 보이는 바와 같이 CWI값이 증가할수록 SiO_2 양은 감소하고 풍화가 많이 될수록 CWI

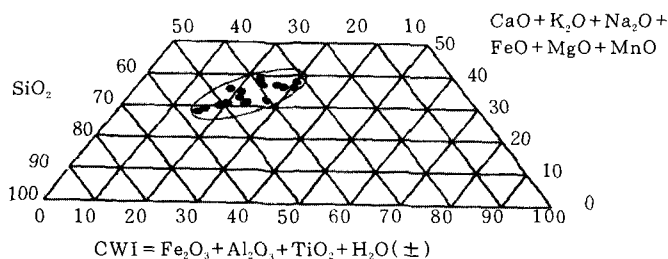


그림3(a). 화강풍화토의 화학적 풍화 분류도

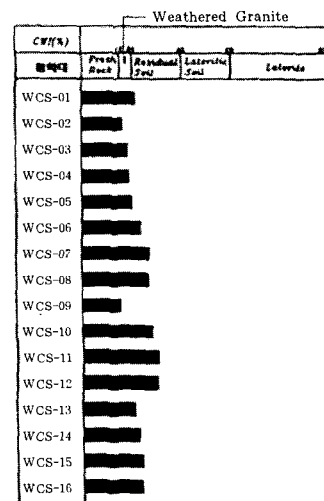


그림3(b). CWI에 대한 풍화도 분류도

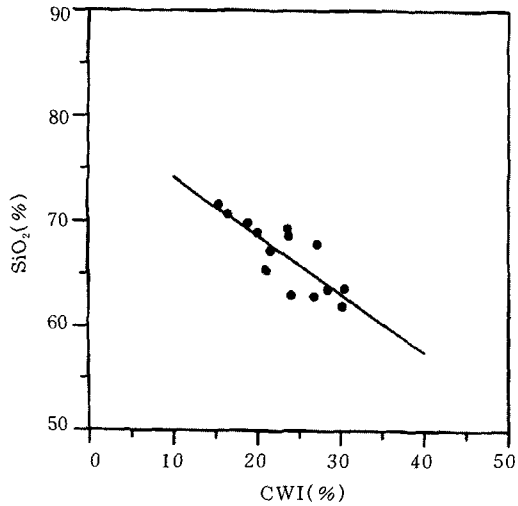


그림 4(a) SiO₂와 CWI의 관계

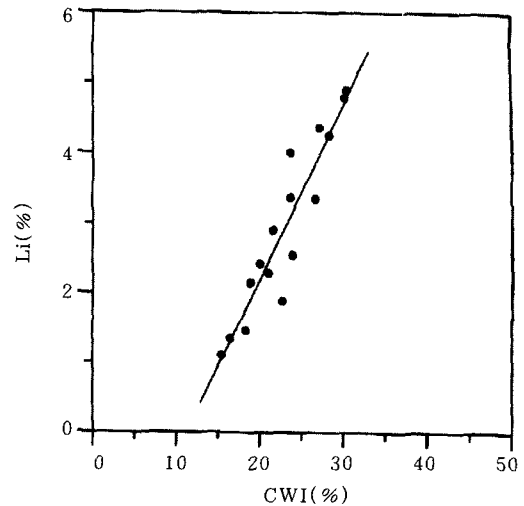


그림 4(b) Li와 CWI의 관계

값은 증가하고 이에 반비례하여 SiO₂ 양은 감소한다는 것을 알 수 있다. 즉 화강토에서 풍화에 대한 저항성이 큰 SiO₂가 풍화가 크게 진행됨에 따라 감소한다는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)에서는 CWI가 증가함에 따라 Li가 증가되는데 이는 풍화가 진행됨에 따라서 Li값이 증가되고 있음을 나타내고 있다. 또한 그림 4(a), (b)에서 판단컨데 SiO₂, Li, CWI와의 관계에서는 상관성이 매우 좋고 풍화의 정도를 나타내는 지표로 모두 적용 가능함을 알 수 있다. 또한 CWI가 20~40%일 경우 풍화 잔적으로 분류되는데 이러한 기준으로 볼 때 본 시험 결과에서는 Li≒2.2이상, SiO₂≒68%이하에서 풍화 잔적으로 분류됨을 알 수 있다(그림 6). 다시 말하면 화강풍화토의 풍화가 진행됨에 따

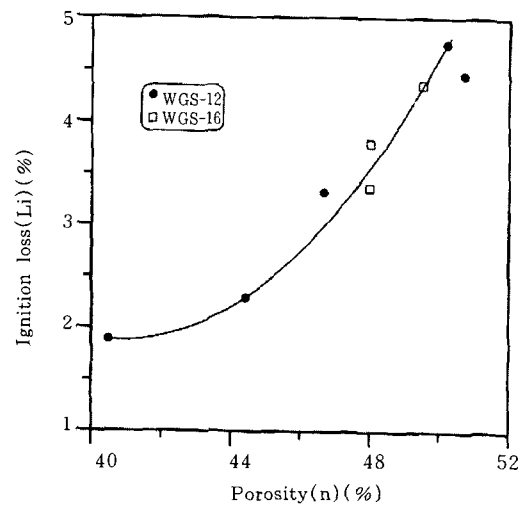


그림 5. Li와 간극률(n)과의 관계

그림 6. 풍화도 분류기준치와 시험치와의 관계

CWI (%)	Fresh rock	Weathered granite		Residual soil		Lateritic soil		Lateritic
		15	20	30	40	60	90	
SiO ₂ (%)		75	68	62.5	60			
Li (%)			2.2	4.2				
n (%)			43.6	48.3				
Δ S/S (%)			75	50				

라서 CWI, Li는 증가하고, SiO₂는 감소된다는 것을 의미한다.

또한 그림 5는 광주 풍암지구 불교란 화강 풍화토의 강열감량과 간극율의 관계를 나타낸 것인데 간극율 44%이상에서 강열감량이 급히 증가하여 좋은 대응을 보인다. 그림 6은 풍화

도 분류 기준치와 시험에서 얻은 결과를 회귀 분석하여 그 상관성을 비교한 것인데 CWI, SiO₂, Li, 파쇄비($\Delta S/S$)와 관계에서도 풍화정도를 엿 볼 수 있다. 여기서 $\Delta S/S$ 는 파쇄비로 호칭하는데 S는 비표면적을 의미하고 ΔS 는 비표면적의 변화량을 의미한다.

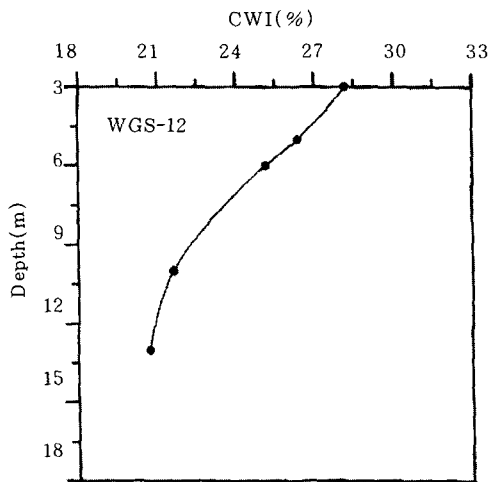


그림 7(a). 깊이에 따른 CWI의 변화

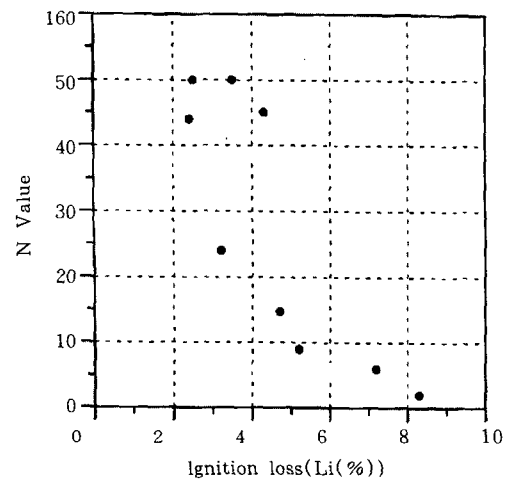


그림 7(c). N치와 강열감량의 상관성

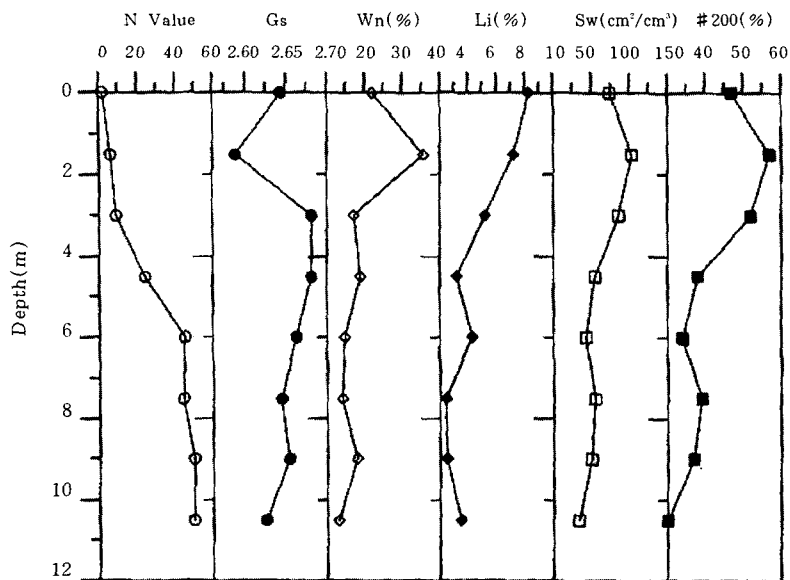


그림 7(b). 깊이에 따른 N치, 강열감량 및 비표면적의 변화

그림 7(a)은 광주 풍암지구 화강풍화토 지반의 깊이에 따른 CWI의 관계를 나타낸 것인데 지표에서 심부로 갈수록 풍화가 덜 진행된 것을 알 수 있으며 그림 7(b)은 광주 풍암지구의 깊이에 따른 동일 풍화대 화강풍화토 지반현황으로서 지표부근에서 심부로 갈수록 풍화진행 상황을 엿볼 수 있으며 그림 7(c)의 N치와 Li관계에서도 $2.0\% < Li < 4.0\%$ 의 N치는 20~50이고 $Li > 4.0\%$ 의 N치는 2~20범위로 좋은 대응 관계를 보인다. 이들 중 $Li > 2\%$ 에서는 거의 구성광물이 분리된 상태이고 손으로 만지면 쉽게 부서진다.

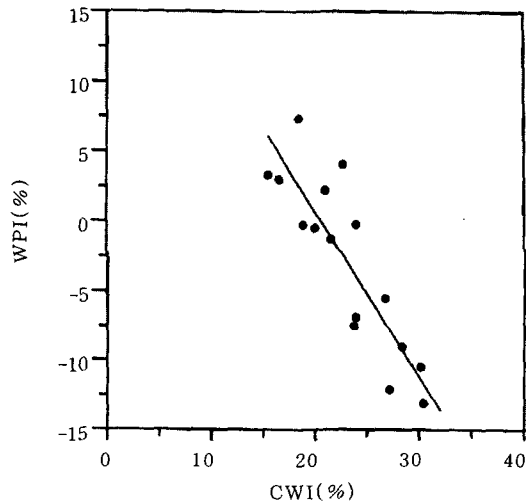


그림 8. CWI와 WPI의 관계

그림 8은 CWI와 풍화가능지수(Weathering Potential Index, WPI)와의 상관 관계를 나타낸다. 여기서 WPI는 Reiche(1943)가 제안한 것으로 화강풍화토가 화학적인 반응에 의하여 풍화의 영향을 얼마나 받고 있는가를 나타내는데 다음과 같이 표현된다.

$$WPI = \frac{(Na_2O + K_2O + CaO + MgO - H_2O) \text{mole}}{(Na_2O + K_2O + CaO + MgO + SiO_2 + Fe_2O_3) \text{mole}} * 100(\%)$$

그림에서 CWI가 증가할수록 WPI가 (-)값으로 감소한다. 즉 WPI가 (+)값은 화학적 풍화에 대한 저항성이 강한 반면에 (-)값은 화

학적으로 풍화에 약하거나 민감하고 CWI도 함께 증가한다.

$$PI = \frac{(SiO_2) \text{mole}}{(SiO_2 + TiO_2 + R_2O_3) \text{mole}} * 100(\%)$$

그림 9는 CWI와 풍화진행지수 PI(Product Index)와의 관계를 나타냈는데 풍화가 덜 진행된 화강암일수록 그 값이 크게 평가되고 풍화가 더 진행된 화강풍화토일수록 그 값이 작게

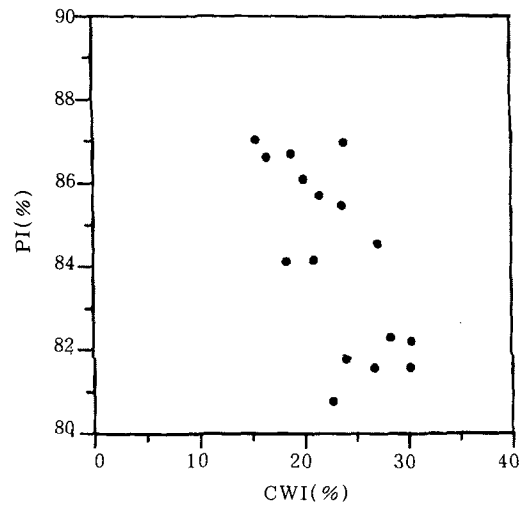


그림 9. CWI와 PI의 관계

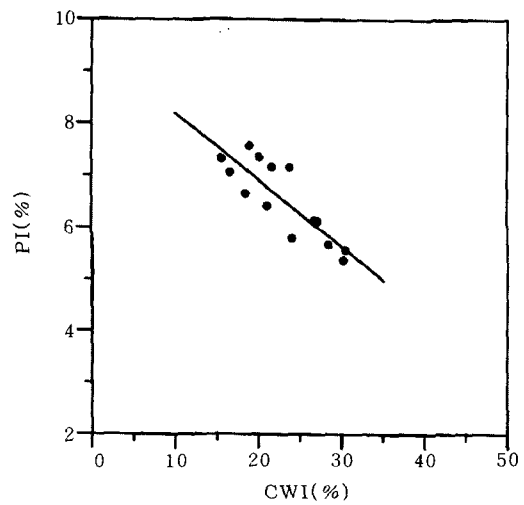


그림 10. SAR과 CWI의 관계

평가되며 CWI와는 상관성이 다소 떨어진다.

그림 10.

그리고 그림 10은 CWI와 SAR과의 관계를 나타낸 것인데 여기서 SAR은 $\frac{(\text{SiO}_2)\text{mole}}{(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{mole}}$ 을 의미한다. 이는 전술한 바와 같이 화강풍화토의 풍화정도는 조성광물인 SiO_2 , Al_2O_3 에 좌우하는데 즉 풍화에 강한 SiO_2 의 양과 풍화에 약한 Al_2O_3 양의 상관 관계를 추정한다면 화강토의 풍화정도를 파악할 수 있을 것으로 보며 특히 SAR에 따라 CWI가 감소하는 경향이 있다. 다시 말하면 풍화가 진행된 화강풍화토일수록 SiO_2 은 감소하는 반면에 Al_2O_3 양은 증가하는 경향이 있다.

5. 결 론

전국 16개 지역에서 채취한 교란 및 불교란 화강풍화토를 대상으로 물성 및 화학성분시험을 통해 얻은 화강풍화토의 풍화특성을 요약하면 다음과 같다.

1) 풍화도 분류의 기본이 되는 화학적 풍화지수와 강열감량, SiO_2 , 파쇄비($\Delta S/S$), SAR간의 상관관계를 얻었으며 이들 모두 풍화정도를 판단하는 지표가 될 수 있다.

2) 화강풍화토로 분류되는 화학적 풍화지수 20이상에 대하여 이와 대응되는 다른 풍화지표는 현재까지 전국 16개소의 화강토에 대해서 강열감량 2.2%, SiO_2 68%, 파쇄비 0.5~0.8이 한계가 아닌가 추정된다.

3) 화학적 풍화지수 값이 증가할수록 강열감량도 증가하고 이에 비해 풍화에 대해 저항성이 큰 SiO_2 량은 감소하는 것으로부터 공학적으로 접근하기 쉬운 강열감량은 화강풍화토 풍화도를 정의하는 좋은 지표가 될 수 있다고 본다.

4) 깊이와 화학적 풍화지수의 관계에서 심부로 갈수록 풍화가 덜 진행된 것을 알 수 있고 그리고 표준관입시험치(N값)와 강열감량 관계에서도 $2.0\% < \text{Li} < 4.0\%$ 의 N치는 20~50이

고 $\text{Li} > 4.0\%$ 의 N치는 2~20범위로 좋은 대응 관계를 보였다.

감사의 글

본 연구는 '95년도 한국과학재단의 특정기초과제(95-0600-02-3) 연구비 지원에 의해 수행되었으며 당 재단에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박병기(1973), "화강암질풍화토의 특성연구 (I)", 대한토목학회지, 제21권, 4호 pp.37 ~ 50
2. 박병기, 강병선, 이강일, 이광찬(1997), "화강토의 전단강도 및 변형특성", 한국지반공학회, 13권, 제4호, pp.177~195
3. 이광찬(1998), "화강토의 풍화도에 따른 토질 공학적 특성", 전남대학교, 박사학위논문, pp.186~194
4. Matsuo, S. and Nishida, K.(1968), "Physical and Chemical Properties of Decomposed Granite Soil Grains", *Soils and Foundations*, Vol. 8, No.4, pp.10~20
5. Miura, N. and Yamaouchi, T.(1975), "Effect of water on the behaviour of a quartz-rich sand under high stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, pp.23~34
6. Miura, N. and O-hara, S.(1979), "Particle-crushing of a Decomposed Granite Soils under shear stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 3, pp.1~14
7. Murata, H, Hyodo, M, Yasufuku, N.(1987), "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
8. Sueoka, T.(1988), "Identification and Classification of Granite Residual Soils Using Chemical Weathering Index." *Symposium on the weathering residual soil*, pp.89~94
9. Sueoka, T.(1989), "The Relationship between

- shear strength and degree of chemical weathering of decomposed granite soils." *The 24th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Tokyo, Japan. Vol. 2, pp.257~258
10. Nishida, K. and Seiichi, T & Hisamaru, T, Katsuhiko, T.(1989), "A Method of In-Situ Shear Test," *The 24th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Tokyo, Japan, Vol. 2, pp.227~228
11. Nishida, K. and Aoyama, Morimoto, H.(1989), "Effect of Disturbance due to Sampling on shear strength of Undisturbed Decomposed Granite Soil," *The 24th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp.689~692.
12. Residuals Soils in Japan(1990), JSCE, pp.5~20
13. Sueoka, T.(1990), "Granitic Residual Soils, Their Global and Local Geotechnical Properties." Residuals Soils in Japan, JSCE, pp.55~61
- (접수일자 1998. 11. 18)