

Fall cone test의 함수비를 이용한 잔적토의 풍화도 측정

Estimation of Degree of Weathering in Residual Soil Using Water Content from Fall Cone Test Result

손 영 환¹ Son, Young-Hwan
김 성 필² Kim, Seong-Pil
장 병 옥³ Chang, Pyoung-Wuck

Abstract

Weathered soils appear from the rock and its weathering result. In accordance with the degree of weathering the rock may become soft rock, weathered rock and residual soil. In general, classification method for determining the degree of weathering are performed by chemical method and N-value. But these method have some problems. So, this research is to suggest an appropriate physical method to determine the degree of weathering of weathered soils. A new classification method for determining the degree of weathering is suggested, based upon the results from fall cone test. According to the proposed physical method using fall cone apparatus, the measured values of the samples from the same area show distinctive difference of weathering. For the checking, we selected two areas. As a result, the relationship between CWI and water content according to penetration is expressed as an equation in Ilsan and Incheon area. And it proved to be a good method to determine the degree of weathering.

요 지

풍화토는 암석으로부터 풍화되어 그 산물로 나타난다. 또한, 풍화정도에 따라 연암, 풍화암, 잔적토에 이르기까지 그 산물은 다양하다. 일반적으로 풍화정도의 결정은 화학적 방법이나 표준관입시험의 N-value를 이용한다. 그러나 이러한 방법은 약간의 단점을 가지고 있으며, 이에 본 연구에서는 교란시료와 물리적인 방법인 Fall cone test를 이용하여 풍화정도를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. Fall cone test 결과, 동일한 지역에서 풍화정도의 차이를 확인할 수 있었으며, 관입량에 따른 화학적풍화지수(CWI)와 함수비의 관계는 하나의 방정식으로 표현할 수 있었다.

Keywords : Degree of weathering, Disturbed soil, Chemical Weathering Index(CWI), Fall cone test

1. 서 론

풍화토는 암석이 풍화되어 나타나는 결과물로서 풍화정도에 따라 연암, 풍화암, 풍화토와 최종적으로 점토화 된 것까지 성질이 변화한다. 풍화단면이 육안으로 쉽게 보이는 토취장이나 절토사면 지역에서는 풍화의 정

도나 지층별 구성 등의 판단이 상대적으로 쉬우나, 심도가 깊어질 경우 육안으로의 관찰이 불가능하게 되며 이러한 판단이 어렵다.

특히, 잔적토는 풍화가 진행되어 최종적으로 나타나는 경우이며, 일반적인 풍화토의 경우처럼 풍화정도에 따른 구분을 명확하게 하고 있지는 않은 실정이다. 또

1 정회원, 위스콘신대학교 연구원 (Member, Post Doctor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Univ. of Wisconsin-Madison)

2 정회원, 서울대학교 지역시스템공학 연구원 (Member, Post Doctor, Dept. of Rural System Engrg., Seoul National Univ. agsoil@hotmail.com, 교신저자)

3 정회원, 서울대학교 지역시스템공학 교수 (Member, Prof., Dept. of Rural System Engrg., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

한, 기존의 풍화도 판별방법은 주로 화학적 방법에 의존하거나, 표준관입시험의 N치를 기준으로 결정하고 있다. 그러나 N치를 기준으로 한 풍화도의 결정은 신뢰성이 떨어지고, 화학적 방법은 범용적으로 적용하고 있으나 특수한 분석기기와 전문가의 분석이 필요하므로 보다 간편하고 신속하게 적용할 수 있는 물리적인 방법이 필요하다.

이에 본 연구에서는 교란된 시료를 이용하여 풍화도 결정의 기준이 될 수 있는 보다 간편하고 신속한 물리적인 방법으로 Fall cone test를 제시하였다.

2. 문헌고찰

2.1 Fall cone test

Fall cone test는 Casagrande 방법에서 발생하는 단점을 보완하기 위해 여러 학자들에 의해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이에 대한 대안으로 개발되었다(Houlsby, 1982; Koumoto and Houlsby, 2001; Wood, 1982; Wood, 1985). 영국과 스웨덴 그리고 캐나다에서는 Fall cone을 이용하여 액성한계를 결정하는 방법을 관련 규정에 포함시키고 있으며, Casagrande 방법에 비해 더 신뢰할 수 있는 방법으로 여겨지고 있다 (Koumoto and Houlsby, 2001).

2.2 화학적 풍화지수(CWI)

화학 조성의 변화에 따라 풍화도를 측정하는 가장 대표적인 방법으로 Sueoka(1988)가 제시한 CWI(Chemical Weathering Index)를 사용하고 있으며, 이는 지질학적, 공학적 목적으로 풍화도를 분류하는데 사용되고 있다. 그 외 많은 연구자들이 화학적 풍화지수를 제시한 바 있으나, 이러한 화학적 풍화지수의 결정에는 특수한 장치와 기술이 필요하므로 많은 시간과 비용의 제약이 있다. Sueoka는 화학분석을 통해 풍화에 예민한 광물을 분석하여 화학적 풍화지표로 삼았으며, 이를 CWI로 표현하였다. CWI는 풍화가 진행되면서 화학성분이 풍화에 의해 잔류·증가된다는 관점에서 제안된 것으로 풍화의 과정을 설명하고 있다.

즉, 풍화의 제 1단계에서 K₂O, CaO, Na₂O, MgO, FeO 등의 알카리 또는 알카리 토류금속이 용탈되고, 제 2단계에서 SiO₂가 서서히 용출되고, 제 3단계에서는 Al₂O₃나 Fe₂O₃, TiO₂가 집적된다. 또한, 동시에 강열감량(H₂O)이 급격히 증가된다. 그리고 알카리 및 알카리 토

류금속, SiO₂, R₂O₃+H₂O의 3성분 좌표로 생성 연대가 다른 암석의 화학성분을 조사하면 거의 동일한 mole 단위의 Al₂O₃+Fe₂O₃+TiO₂+H₂O 양을 갖고 있다. 따라서 Al₂O₃+Fe₂O₃+TiO₂+H₂O(±)의 성분합계를 풍화의 진행 정도를 정량적으로 나타내는 지표로 보고, CWI를 정식화하여 제안하였다. 특히, Sueoka의 CWI는 암반 및 풍화토에 대하여 풍화과정 전체를 표현할 수 있으며, 비교적 간단한 경험적 표현을 목표로 제안된 것이다. 이에 본 연구에서는 Sueoka가 제안한 CWI를 풍화도의 기준으로 사용하였다. Sueoka(1988)가 제안한 CWI는 아래 식(1)로 구할 수 있다.

$$CWI = \left(\frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(\pm)}{All\ Chemical\ components} \right)_{mole} \times 100(\%) \quad (1)$$

2.3 풍화도

풍화는 암석에서 흙으로의 물리, 화학적 변화이다. 그러므로 풍화정도를 확인하기 위해서는 물리적, 역학적, 광물적, 화학적인 것 등 많은 종류의 방법이 가능할 것이다. Iliev(1966)는 탄성과 속도를 V_0 , 풍화암의 탄성과 속도를 V_w 로 하여 풍화도 $K = V_0 - V_w / V_0$ 의 식으로 제안한 바 있다. 또한, Mendes(1966) 등은 암석 조직변화의 관점에서 풍화도를 표현하였는데, 이는 암석 조직중의 변질광물을 %로 나타낸 것이다. 이와 유사한 방법으로 Lumb(1962)는 화강암 중의 장석의 변질, 용탈도에 착안하여 풍화도를 제안한 바 있다. 그리고 Lee(1988) 등은 풍화내구성 지수가 화강암의 풍화도를 표현하는데 적합함을 규명한 바 있으며, Irfan(1978) 등은 흡수율, 슈미트헤머 반발치 및 접하중 강도 등으로 화강암의 정량적인 풍화지수를 제안한 바 있다. Murata(1987) 등은 감열감량(Loss of Ignition)을 이용하여 풍화도를 판정하였는데, 이는 풍화진행시 점토광물이 증가한다는 데 착안한 것으로 지수가 클수록 풍화도가 높음을 뜻한다. 모암과 풍화암의 석영과 장석의 함유 중량비로 Lumb(1962)가 풍화지수를 표현하였으며, Irfan(1978) 등은 미소암석학적 지수로 풍화도를 산정하였는데, 광물학적 변화와 조직, 균열, 간극의 특성을 포함하고 있으며, 지수가 작을수록 풍화도가 높음을 의미한다.

한편, 국내에서도 많은 연구자들에 의해 풍화도에 관한 연구가 수행되었는데, 박(1999) 등은 CWI와 강열감량(Li), SiO₂, 파쇄비, SAR 간의 관계가 좋은 대응을 보여, 이들 모두 풍화정도를 판단하는 지표가 될 수 있다

고 하였으며, 이(2003) 등은 화강풍화암에 대한 흡수율 및 풍화내구성지수 시험결과를 이용하여 풍화도를 나타내었으며, 이를 근거로 대상 지역의 화강풍화암을 3등급의 풍화도로 구분할 수 있는 풍화도 분류방법을 제시한 바 있다. 또한, 권(1998) 등은 풍화도의 주요 구성 광물인 석영이 장식 또는 운모보다 풍화저항력이 크다는 것과 풍화대의 두께가 구성 조암광물에 크게 영향을 받는다고 한 바 있다.

3. 재료 및 시험 방법

본 연구에서는 일산 및 인천지역에서 채취된 시료를 이용하여 XRF(X-선 형광분석, X-ray fluorescence spectroscopy)분석, Fall cone test를 실시하였다.

3.1 재료

일산지역의 시료는 채취 위치별로 LC-1~LC-5로 명기하였으며, 인천지역 시료는 채취위치에 따라 I-1~I-9로 명기하였다.

3.2 시험 방법

본 연구에서는 지화학분석을 통해 각 시료별 화학적 풍화지수를 산정하고, Fall cone test를 통해 관입량별 함수비와 화학적 풍화지수의 상관관계를 확인하였다.

먼저, 흙 입자의 화학적 조성을 분석하고 화학적 풍화지수인 CWI(Chemical Weathering Index)를 구하기 위하여 노건조시킨 흙을 곱게 갈아 XRF 분석을 수행하였다.

Fall cone test는 0.425mm체의 통과시료를 적당량의

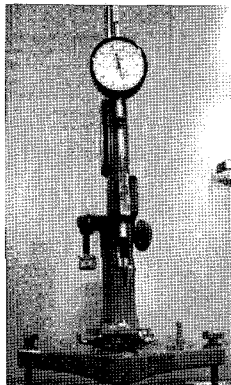


사진 1. Fall cone test

표 1. Physical properties of soils of Ilsan area

Soils	Depth(m)	W_{fied} (%)	Specific Gravity(G_s)	USCS
LC-1	5.2	61.5	2.59	CH
LC-2	5.8	41.1	2.63	CL
LC-3	6.3	28.7	2.65	CL
LC-4	7.3	44.3	2.62	CH
LC-5	8.0	59.3	2.60	CH

표 2. Physical properties of soils of Incheon area

Soils	Depth(m)	W_{fied} (%)	Specific Gravity(G_s)	USCS
I-1	5.2	43.5	2.59	CL
I-2	6.2	36.1	2.62	CL
I-3	9.4	46.3	2.53	CH
I-4	10.1	27.0	2.60	CL
I-5	11.0	30.0	2.62	CL
I-6	11.7	27.0	2.63	CL
I-7	12.7	34.1	2.59	CL
I-8	14.2	29.0	2.60	CL
I-9	15.8	18.4	2.64	CL

증류수와 혼합한 후 각 함수비별 관입량을 구하였으며 Feng (2000)이 제안한 직경 60mm, 높이 20mm의 황동 링을 제작하여 시험에 사용하였다. 사진 1은 Fall cone 시험기와 시료를 황동 링에 setting한 후 cone을 관입시키는 모습을 나타낸 것이다. 이 방법은 시험을 위한 시료 준비가 간편하며 시료 내부에 공기가 혼입되는 것을 방지할 수 있다. 실험은 스웨덴식 Fall cone 시험 장치(60°, 60g)를 이용하였으며, 원시료의 경우 자연 함수비 상태의 흙에 증류수를 가하였으며, 각 함수비에 대한 관입은 3회 이상 실시하여 평균값으로 함수비에 대한 관입량을 구하였다. 이후 시료에 증류수를 첨가하여 함수비를 증가시키면서 시험을 반복하여 실시하였으며, 결과를 정리하여 관입량과 함수비의 관계 그래프를 작성하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 일산지역

4.1.1 XRF 분석 결과

일산지역의 잔적토 시료에 대한 XRF 분석결과는 표 3과 같다.

4.1.2 Fall cone test 결과

LC-1~LC-5 시료에 대한 Fall cone test 결과를 그림 1에 나타내었다.

일산 잔적토시료의 Fall cone test 결과를 이용하여 관입량과 함수비의 관계를 표 4와 같이 구하였으며, 이들 관계식을 이용하여 관입량별 함수비를 표 5와 같이 구하였다.

표 5의 결과와 같이 풍화도가 높을 경우 동일한 관입량에 대한 함수비는 크게 나타났다. 즉, 관입량 10mm를 기준으로 할 경우 풍화도가 가장 큰 LC-4 시료의 경우는 75.77%, LC-1 시료의 경우는 71.30%, LC-5 시료의 경우는 70.59%, LC-3 시료의 경우는 63.75%, LC-2 시료의 경우는 60.30%로 나타났다. Fall cone test 결과를 이용하여 LC-1~LC-5의 시료에 대한 관입량과 함수비

표 3. Results of XRF of llsan area

unit : %

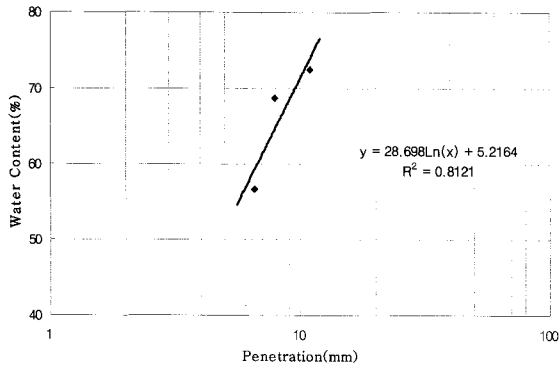
Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	L.O.I.	CWI
LC-1	63.63	17.06	0.82	7.81	1.04	0.25	0.05	2.09	0.08	0.10	7.92	40.31
LC-2	66.35	16.21	0.91	5.41	1.23	0.59	1.32	2.83	0.03	0.04	4.86	29.03
LC-3	69.71	14.26	0.79	7.69	0.94	0.31	0.32	1.44	0.02	0.06	4.50	30.41
LC-4	57.04	14.64	0.73	18.82	0.82	0.20	0.02	1.07	0.04	0.11	6.55	45.20
LC-5	62.17	16.09	1.15	10.57	1.76	0.43	0.14	1.73	0.03	0.03	6.09	38.05

표 4. Regressive equation of water content against penetration of llsan area

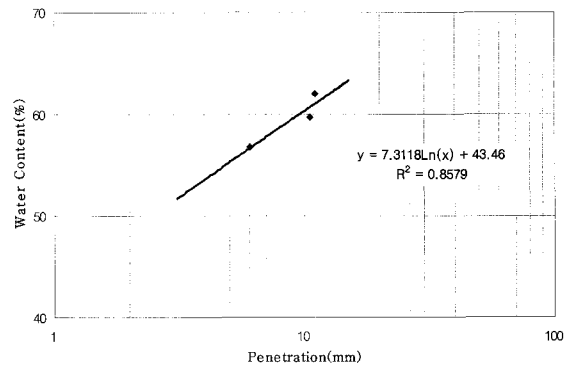
Sample	Regressive Equation	R ²	Remarks
LC-1	$y = 28.698\ln(x) + 5.22$	0.8121	x : penetration(mm) y : water content(%)
LC-2	$y = 7.312\ln(x) + 43.46$	0.8579	
LC-3	$y = 22.437\ln(x) + 12.09$	0.9634	
LC-4	$y = 18.04\ln(x) + 34.23$	0.9899	
LC-5	$y = 19.699\ln(x) + 25.23$	0.8283	

표 5. Water content against penetration depth of llsan area

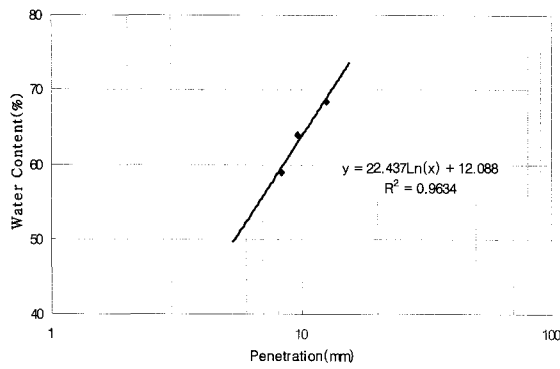
Penetration (mm)	Water Content(%)				
	LC-1	LC-2	LC-3	LC-4	LC-5
5	51.40	55.23	48.20	63.27	56.94
6	56.64	56.56	52.29	66.56	60.53
7	61.06	57.69	55.75	69.34	63.56
8	64.89	58.66	58.74	71.75	66.19
9	68.27	59.53	61.39	73.87	68.51
10	71.30	60.30	63.75	75.77	70.59
11	74.03	60.99	65.89	77.49	72.47
12	76.53	61.63	67.84	79.06	74.18
13	78.83	62.21	69.64	80.50	75.76
14	80.95	62.76	71.30	81.84	77.22
15	82.93	63.26	72.85	83.09	78.58
16	84.78	63.73	74.30	84.25	79.85
CWI(%)	40.31	29.03	30.41	45.20	38.05



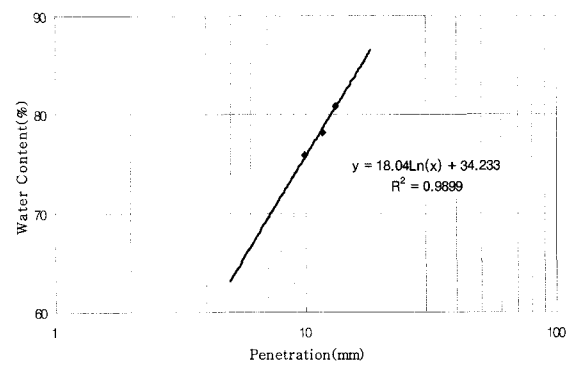
(a) LC-1



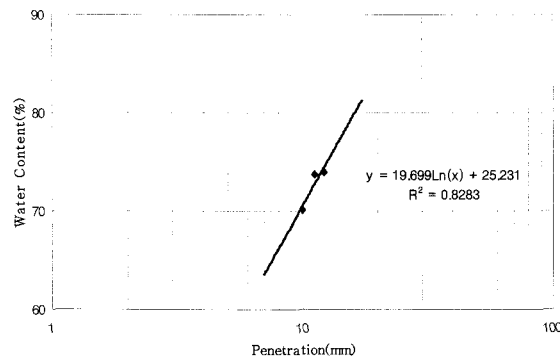
(b) LC-2



(c) LC-3



(d) LC-4



(e) LC-5

그림 1. Relationship between penetration and water content of Ilsan area

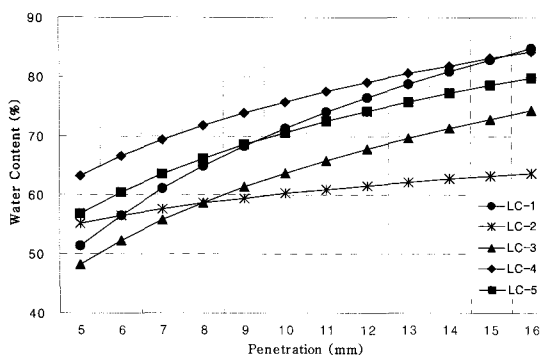
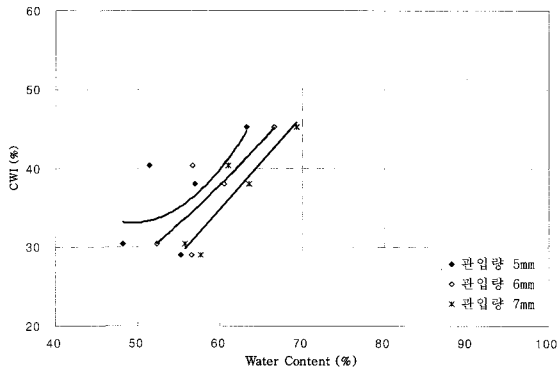


그림 2. Relationship between penetration and water content of Ilsan area

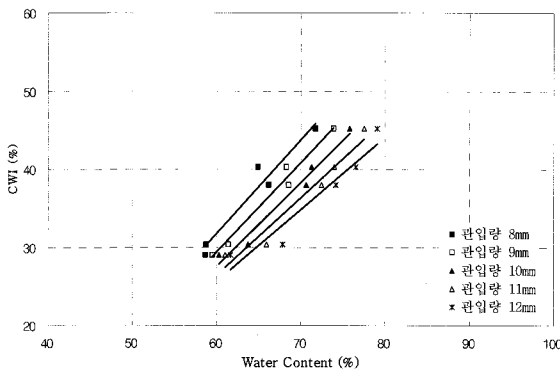
의 관계를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

상기 결과와 같이 일산지역의 잔적토는 관입량과 함수비의 관계에서 풍화도와 상관 관계가 있음을 알 수 있다. 그러나 전 관입량의 범위에서 풍화도에 따라 일정한 규칙을 가지고 변하는 것은 아니었으며, 풍화도에 따른 구분은 일정 관입량의 범위내에서만 가능하였다.

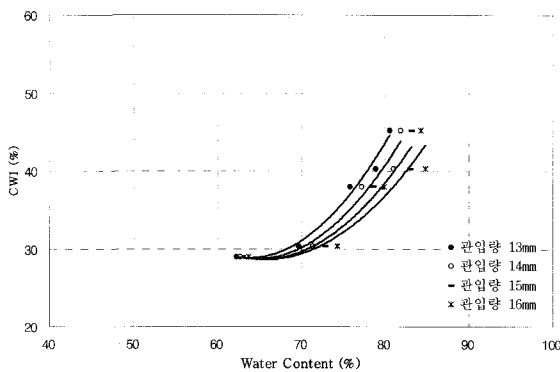
그림 3에서 보면 관입량 5~7mm의 함수비와 CWI의 관계는 다항식으로 추세선을 표시할 수 있었으며, 이때의 상관도는 상당히 낮은 것으로 나타났다. 8~12mm의 관입량에서의 함수비와 CWI의 관계는 선형적으로 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 7mm 관입량에서의 상관



(a) 관입량 5~7mm



(b) 관입량 8~12mm



(c) 관입량 13~16mm

그림 3. Relationship between CWI and water content of all cases of Ilsan area

도는 8~12mm 관입량에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 8~12mm의 경우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 13~16mm의 관입량의 범위에서 함수비와 CWI의 관계는 선형의 추세선을 적용하였을 경우 상관도가 낮게 나왔으며, 다항식으로 추세선을 표시할 수 있었다. 그림 3은 5~7mm, 8~12mm, 13~16mm의 관입량을 기준으로 함수비와 CWI의 관계를 나타낸 것이다.

관입량 7mm 이하와 13mm 이상에서 선형의 추세선과 잘 일치하지 않는 현상에 대한 원인은 첫째, 관입량 7mm 이하의 경우는 Fall cone test시 시료와 증류수가

고르게 혼합되지 않아, 혼합된 시료 중 일부에서 덩어리를 형성하게 되며, 이는 cone 관입시 일정한 값을 측정하는데 방해하는 현상에 기여하는 것으로 판단되며, 둘째, 관입량 13mm 이상을 요구하는 함수비는 상당히 높은 상태이므로 cone 자체의 무게 및 약간의 충격만으로도 많은 관입이 발생하게 된다. 이러한 이유로 관입량 8~12mm인 경우에 비해 상대적으로 신뢰성 있는 측정값을 얻기가 어려울 것으로 판단되므로 관입량의 범위는 8~12mm로 한정하여 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

관입량 5~16mm에서의 CWI와 함수비의 관계에 대한 회귀분석 결과를 정리하면 표 6과 같다.

표 6과 같이 일정범위의 관입량에서 함수비와 CWI의 관계는 직선식으로 표현할 수 있으며, 8~12mm의 범위에서는 다음의 형태로 단순화시킬 수 있다.

$$CWI(\%) = a \cdot w(\%) + b \quad (2)$$

이때, w : 함수비 (%)

a, b : 계수

식(2)의 계수 a 는 0.925~1.200의 범위로 나타났으며, b 의 경우 (-)29.89~(-)40.27의 범위로 나타났다. 또한, 표 6의 정리된 식으로 구할 수 있는 CWI의 범위는 21.01~89.32%이다. 그러나, 관입량 8mm 미만과 13mm 이상에서 얻어진 식은 상대적으로 상관도가 떨어지고, 일관성 있는 값을 얻기 위해 관입량 8~12mm에서 구한 값으로 풍화도를 판정하는 것이 합리적일 것이다. 뿐만 아니라 8~12mm 관입량의 범위에서 풍화도의 차이를 잘 표현하였다. 또한, 잔적토(점성토)의 경우 cone의 10mm 관입량에서의 함수비를 액성한계로 규정하고 있으므로, 관입량 10mm에서의 함수비를 적용할 경우 풍화도 뿐만 아니라 액성한계까지 함께 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 인천지역

4.2.1 XRF 분석 결과

인천지역에서 채취한 심도별 연속시료의 XRF 분석 결과는 표 7과 같다.

4.2.2 Fall cone test 결과

동일 지점에서 연속으로 채취한 I-1~I-9 시료에 대한

표 6. Regressive equation of CWI vs. water content of Ilsan area

Penetration(mm)	Regressive Equation	R ²	Remarks
5	$CWI = 0.06w^2 - 5.94w + 179.86$	0.4810	w : Water content(%) CWI : Chemical Weathering Index(%)
6	$CWI = 0.01w^2 - 0.18w + 12.04$	0.6603	
7	$CWI = 1.174w - 35.58$	0.8435	
8	$CWI = 1.200w - 40.27$	0.9451	
9	$CWI = 1.156w - 40.04$	0.9805	
10	$CWI = 1.082w - 37.33$	0.9767	
11	$CWI = 1.002w - 33.68$	0.9536	
12	$CWI = 0.925w - 29.89$	0.9227	
13	$CWI = 0.06w^2 - 7.11w + 255.29$	0.9816	
14	$CWI = 0.05w^2 - 6.73w + 246.75$	0.9580	
15	$CWI = 0.05w^2 - 6.06w + 226.66$	0.9276	
16	$CWI = 0.04w^2 - 5.29w + 202.41$	0.8941	

표 7. Results of XRF of Incheon area

unit: %

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	L.O.I.	CWI
I-1	62.25	15.52	0.90	6.93	1.62	0.53	1.72	2.76	0.04	0.11	8.09	36.44
I-2	64.18	17.37	0.97	5.68	1.00	0.25	1.01	2.41	0.03	0.12	6.70	34.09
I-3	59.66	17.11	0.94	8.35	1.68	0.46	1.64	3.14	0.09	0.11	5.97	33.77
I-4	66.83	15.10	1.15	5.34	1.15	0.66	1.45	3.12	0.08	0.08	4.70	27.39
I-5	67.63	15.47	1.10	4.29	1.16	0.53	1.42	3.36	0.05	0.07	5.09	27.96
I-6	68.99	14.21	1.16	4.57	1.06	0.70	1.63	3.74	0.05	0.07	3.97	24.31
I-7	63.56	16.04	0.86	5.59	1.13	0.70	1.41	2.59	0.08	0.10	7.57	35.14
I-8	66.55	15.12	1.06	4.28	0.96	0.56	1.36	3.48	0.04	0.07	6.17	30.65
I-9	70.12	13.04	0.97	6.21	0.27	0.15	0.47	4.40	0.05	0.17	3.77	23.95

표 8. Regressive equations of water content against penetration of Incheon area

Sample	Regressive Equation	R ²	Remark
I-1	$y = 16.969\ln(x) + 14.40$	0.9979	x : penetration(mm) y : water content(%)
I-2	$y = 13.801\ln(x) + 19.53$	0.9804	
I-3	$y = 12.224\ln(x) + 16.20$	0.9993	
I-4	$y = 5.9763\ln(x) + 21.14$	0.9956	
I-5	$y = 10.694\ln(x) + 13.68$	0.9432	
I-6	$y = 11.178\ln(x) + 5.176$	0.9993	
I-7	$y = 12.781\ln(x) + 19.35$	1.0000	
I-8	$y = 12.01\ln(x) + 12.03$	0.976	
I-9	$y = 13.037\ln(x) + 0.90$	0.9975	

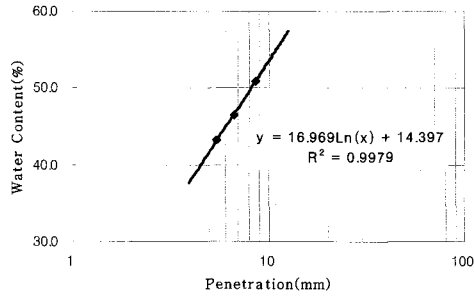
결과를 그림 4에 도시하였다.

인천지역 시료에 대한 Fall cone test 결과를 이용하여 관입량과 함수비의 관계를 정리하면 표 8과 같으며, 관계식을 이용하여 동일한 관입량에서 측정된 각 시료별 함수비는 표 9와 같다. 또한 이를 이용하여 I-1~I-9의 각 시료에 대한 관입량과 함수비의 관계를 그림 5에 도시하였다.

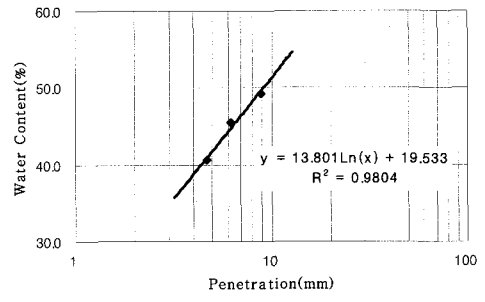
표 9에서와 같이 풍화도가 큰 경우에 동일한 관입량에 대한 함수비는 크게 나타났다. 즉, 관입량 10mm를

기준으로 할 경우 풍화도가 가장 큰 I-1 시료의 경우 53.47%, 가장 작은 I-9 시료의 경우 30.92%로 나타났다.

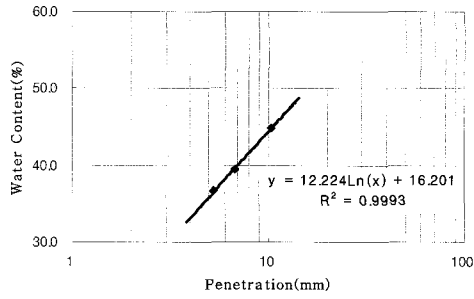
상기 결과와 같이 인천지역에서 채취한 잔적토 역시 관입량과 함수비의 관계를 보면 풍화도와 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 그림 6을 보면 5~16mm의 관입량에서 함수비와 CWI의 관계는 선형적으로 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 특히 8~12mm의 경우 더욱 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그림 6에서도 5~7mm, 8~12mm, 13~16mm의 관입량으로 구분하여 함수비



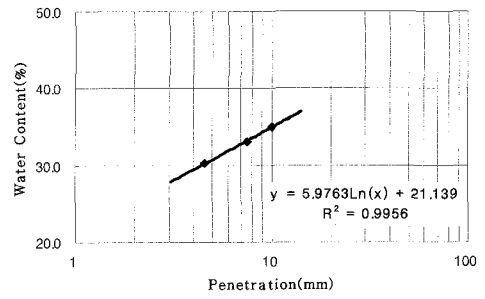
(a) I-1



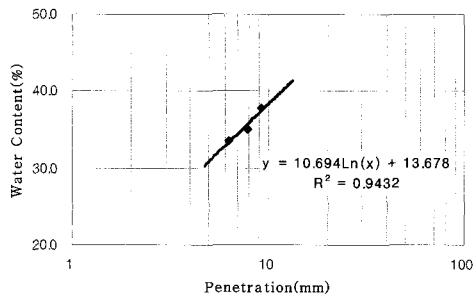
(b) I-2



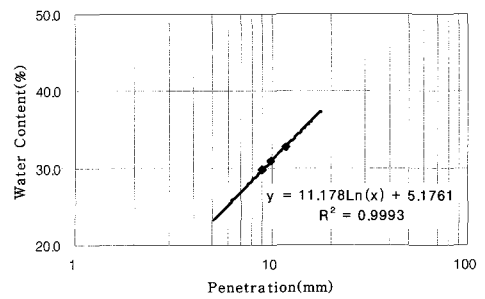
(c) I-3



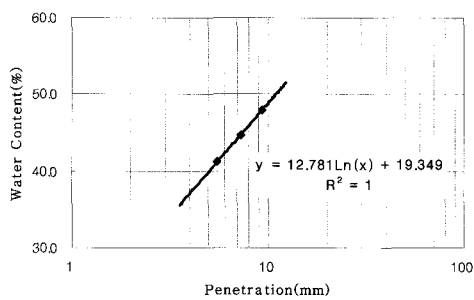
(d) I-4



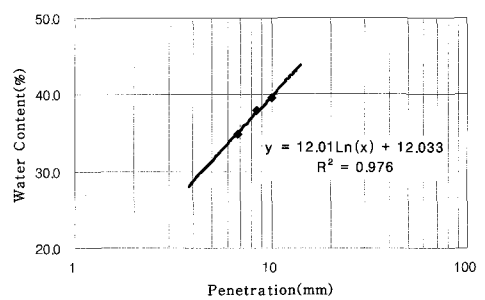
(e) I-5



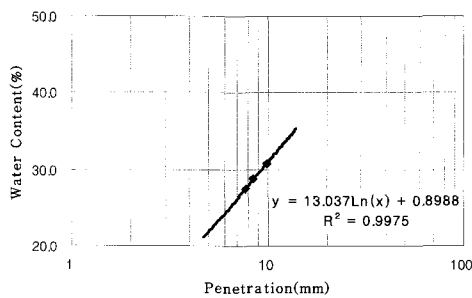
(f) I-6



(g) I-7



(h) I-8



(i) I-9

그림 4. Relationship between penetration and water content of Incheon area

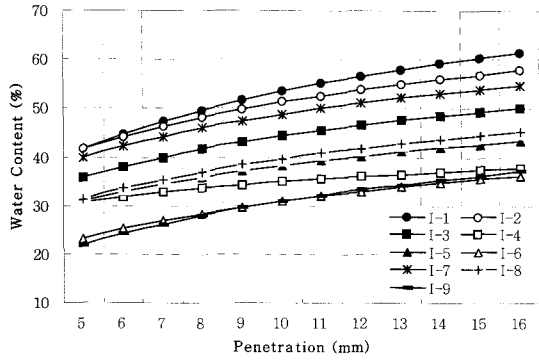
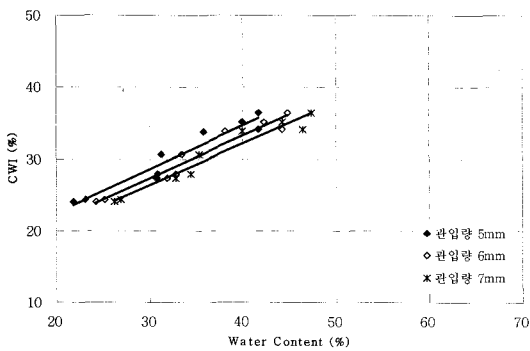
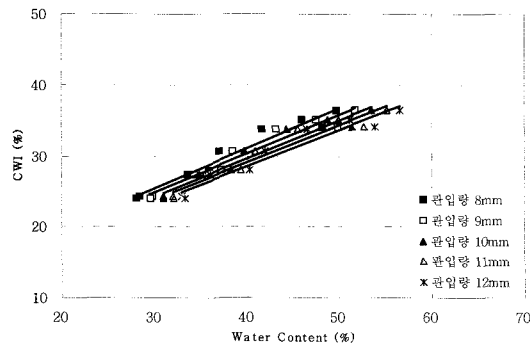


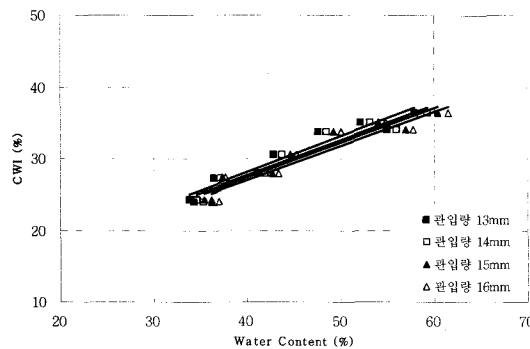
그림 5. Relationship between penetration and water content of Incheon area



(a) 관입량 5~7mm



(b) 관입량 8~12mm



(c) 관입량 13~16mm

그림 6. Relationship between CWI and water content of all cases of Incheon area

와 CWI의 관계를 도시하였다. 결과와 같이, 인천지역 잔적토 시료는 일산지역 잔적토보다 적용성이 양호한 것으로 판단되며, 두 지역의 시료에 대한 Fall cone test 결과를 이용하여 풍화도 결정에 사용하여도 무방할 것으로 사료된다.

각 관입량에 대한 CWI와 함수비의 관계를 회귀식으로 정리하면 표 10과 같다.

표 10에서 같이 관입량에 따른 함수비와 CWI의 관계는 식(2)와 같이 표현할 수 있으며, 이때 계수 a는 0.477~0.613의 범위로 나타났으며, b는 7.94~10.15의 범위로 나타났다. 식을 적용하여 구할 수 있는 CWI의 범위는 주어진 함수비에서 22.26~46.95%로 구해졌다. 그러나 인천지역의 경우도 관입량 8~12mm에서 풍화도를 판단하는 것이 가장 합리적인 것으로 사료된다.

5. 요약 및 결론

일산지역과 인천지역에서 채취한 잔적토 시료에 대해 Fall cone test를 실시한 결과, 동일한 관입량에서 측정된 함수비는 풍화도에 따라 일정한 차이를 보였으며, 풍화도가 클수록 함수비는 큰 값을 나타내었다. 두 지역의 시료에 대한 CWI와 함수비의 관계를 하나의 대표적인 식으로 표현하면 $CWI(\%) = a \cdot w(\%) + b$ 와 같이 나타낼 수 있다. 단, 일산지역 잔적토의 경우 관입량의 범위를 8~12mm로 제한하였다.

위 식에서 계수 a와 b의 값을 지역별로 구분하여 보면 일산지역의 경우 계수 a는 0.925~1.200의 범위로 나타났으며, b는 (-)29.89~(-)40.27의 범위로 나타났다. 인천지역의 경우 계수 a는 0.477~0.613의 범위로 나타났으며, b는 7.94~10.15의 범위로 나타났다. 두 지역의 잔적토 시료에 대하여 Fall cone test를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 잔적토의 경우 풍화도와 함수비는 지역에 따라 일정한 경향을 가지면서 비례관계를 나타내었다.
- (2) 두 지역에 대해서 공통적으로 하나의 관계식으로 표현할 수 있었으며, 동일한 지역에서 상대적인 풍화정도를 판정할 수 있을 것으로 사료된다. 지역적인 풍화도의 차이는 모암의 종류나 특성 그리고 풍화환경 등의 영향에 의한 것으로 판단되며, 이로 인해 Fall cone test의 값이 차이가 발생하는 것으로 사료된다.

표 9. Water content against penetration depth of Incheon area

Penetration (mm)	Water Content(%)								
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9
5	41.71	41.74	35.87	30.76	30.89	23.17	39.92	31.36	21.88
6	44.80	44.26	38.10	31.85	32.84	25.20	42.25	33.55	24.26
7	47.42	46.39	39.99	32.77	34.49	26.93	44.22	35.40	26.27
8	49.68	48.23	41.62	33.57	35.92	28.42	45.93	37.01	28.01
9	51.68	49.86	43.06	34.27	37.18	29.74	47.43	38.42	29.54
10	53.47	51.31	44.35	34.90	38.30	30.91	48.78	39.69	30.92
11	55.09	52.63	45.51	35.47	39.32	31.98	50.00	40.83	32.16
12	56.56	53.83	46.58	35.99	40.25	32.95	51.11	41.88	33.29
13	57.92	54.93	47.55	36.47	41.11	33.85	52.13	42.84	34.34
14	59.18	55.95	48.46	36.91	41.90	34.68	53.08	43.73	35.30
15	60.35	56.91	49.30	37.32	42.64	35.45	53.96	44.56	36.20
16	61.45	57.80	50.09	37.71	43.33	36.17	54.79	45.33	37.05
CWI(%)	36.44	34.09	33.77	27.39	27.96	24.31	35.14	30.65	23.95

표 10. Regressive equations of CWI vs. water content of Incheon area

Penetration(mm)	Regressive Equation	R ²	Remarks
5	$CWI = 0.613w + 10.15$	0.9337	w : Water content(%) CWI : Chemical Weathering Index(%)
6	$CWI = 0.597w + 9.38$	0.9459	
7	$CWI = 0.581w + 8.88$	0.9505	
8	$CWI = 0.565w + 8.54$	0.9508	
9	$CWI = 0.551w + 8.32$	0.9487	
10	$CWI = 0.537w + 8.17$	0.9452	
11	$CWI = 0.525w + 8.07$	0.941	
12	$CWI = 0.514w + 8.00$	0.9363	
13	$CWI = 0.504w + 7.96$	0.9314	
14	$CWI = 0.494w + 7.94$	0.9264	
15	$CWI = 0.486w + 7.93$	0.9215	
16	$CWI = 0.477w + 7.94$	0.9166	

(3) 두 지역의 풍화도를 표현한 식에서 계수 a값의 범위는 0.477~1.200의 범위를 가지고, 풍화도가 높을수록 a의 값은 커지는 경향을 보였다. 특히, 일산지역 잔적토의 경우 CWI 값의 범위가 29.03~45.20%로 일반 풍화토에 비해 풍화도가 높으므로, 상대적으로 a값은 크게 나타났다.

(4) 인천지역 잔적토의 경우에는 a값의 변화가 상대적으로 적음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 권오순, 정충기 (1998), “풍화에 따른 풍화토의 특성변화”, *한국지반공학회지*, 제14권, 제5호, pp.53-66.
2. 박병기, 이광찬(1999), “국내 화강풍화토 지반의 풍화도 평가방법”, *한국지반공학회지*, 제15권, 제1호, pp.127-140.
3. 이종규, 장서만(2003), “화강 풍화암의 풍화도 및 강도정수의 평가”, *한국지반공학회지*, 제19권, 제2호, pp.227-236.
4. Feng, T. W. (2000), “Fall-cone penetration and water content relationship of clays”, *Geotechnique*, Vol.50, No.2, pp.181-187.
5. Hously, G. T. (1982), “Theoretical analysis of the fall cone test”, *Geotechnique*, Vol.32, No.2, pp.111-118.
6. Iliew, I. G. (1966), “An Attempt to Estimate the Degree of Weathering of Intrusive Rocks from their Physico-Mechanical Properties”, *Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mechanics*, Vol.1, pp.109-114.
7. Irfan, T. Y. and Dearman, W. R.(1978), “Engineering classification and index properties of weathered granite”, *Bull. Inst. Ass. Engineering Geol.*, Vol.17, pp.79-90.
8. Koumoto, T. and Hously, G. T.(2001), “Theory and practice of the fall cone test”, *Geotechnique*, Vol.51, No.8, pp.701-712.
9. Lee, S. G. and Freitas, M. H.(1988), “Quantitative definition of highly weathered granite using the stake durability test”, *Geotechnique*, Vol.38, No.4, pp.635-640.
10. Lumb, P. (1962), “The Properties of Decomposed Granite”, *Geo-*

- technique*, Vol.12, No.3, pp.226-243.
11. Mendes, F. M., Barros, L. A. and Rodrigus, F. P. (1966), "The Use of Modal Analysis in Mechanical Classification of Rock Masses", *Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mechanics*, Vol.1, pp.217-223.
 12. Murata, H. Hyodo. M. and Yasufuku, N. (1987), "Compressive and Shear Characteristic of Undisturbed Decomposed Granite Soils Paying Attention to the Degree of Weathering", *Proceeding of JSCE*, No.382, III-7, pp.131-140.
 13. Wood, D. M. (1982), "*Cone penetrometer and liquid limit*", Cambridge University Engineering Department, Technical notes, pp.152-157.
 14. Wood, D. M. (1985), "*Some fall cone tests*", Cambridge University Engineering Department, Technical notes, pp.64-68.

(접수일자 2007. 5. 8, 심사완료일 2007. 12. 11)