

# 풍화에 의한 퇴적암의 물리-화학적 변화

## Physical and Chemical Variation of Sedimentary Rocks due to Weathering

김영수\* · 허노영\*\* · 정우섭\*\*\* · 예대호\*\* · 이재호\*\*\*\*

Kim, Young-Su · Heo, No-Young · Jeong, Woo-Seob · Rui, Da-Hu · Lee, Jea-Ho

### Abstract

A study on mineral composition and chemical component governing of weathering process is necessary to know the weathering characteristics of sedimentary rocks. In this study, a mineral and chemical component analysis, and physical and engineering characteristic tests were conducted to find out the characteristics of sedimentary rocks in Daegu, according to the weathering degree of sedimentary rock. Test results show that the mineral composition of rock, such as Albite (Ab), Muscovite (Ms), Magenetite (Mt) and the chemical composition of  $A_2O_3$ , CaO,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ , MgO and so on are closely related to the weathering. Based on the test results, we illustrated the quantitative application of weathering decision for the sedimentary rocks.

**Keywords :** Sedimentary rock, Weathering indices, Chemical weathering, Uniaxial compressive strength

### 요 지

퇴적암의 풍화특성을 파악하기 위해서는 풍화과정을 지배하는 암석의 광물조성과 화학성분에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 풍화정도에 따른 퇴적암의 특성을 고찰하기 위해서 대구지역에 분포하고 있는 퇴적암을 채취하여 화학 및 광물성분 분석과 물리 및 역학특성 시험을 실시하였다. 화학적풍화지수와 감열감량, 흡수율과 일축압축강도, 풍화지수와 일축압축강도가 좋은 상관관계를 나타내었으며 모암에 함유된  $Al_2O_3$ , CaO,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ , MgO 등의 화학성분과 조장석(Albite, Ab), 백운모(Muscovite, Ms), 마그네타이트(Magenetite, Mt)등의 광물성분이 풍화와 밀접한 관계가 있었다. 이 시험결과를 토대로 하여 퇴적암에 적용할 수 있는 정량적인 풍화도판정법의 적용성을 제시하자고 하였다.

**주요어 :** 퇴적암, 풍화지수, 화학적 풍화, 일축압축강도

\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회원 · 가야 ENG. 지반공학부  
\*\*\* 경북대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\*\* 경북대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\*\*\* 일본 고베대학교 박사과정

## 1. 서론

대구지역은 지질학적으로 중생대 백악기 하양군층에 해당되며 이 하양군층은 후기 화산활동에 의한 퇴적분지로 역암, 사암, 혈암, 이암 등과 같은 쇄설성 퇴적암이 주로 기반암을 형성하고 있다(김영수 등, 1995). 이러한 퇴적암은 자연적·인위적 작용에 의하여 장시간 지표에 노출되면 물리, 화학적인 풍화작용을 받아 풍화가 되기 쉽다. 그 특성으로는 잘 발달된 층리면을 따라 투수성이 매우 크며, 특히 풍화로 인한 강도의 열화현상이 뚜렷하게 나타난다. 퇴적암은 풍화도에 따라 각종 물리, 역학적 성질이 달라질 수 있다. 비록, 국내에는 화강암에 대한 연구는 활발히 진행되어 설계자료로 활용하고 있지만 퇴적암에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 대구지역에 주로 분포하고 있는 풍화도에 따른 퇴적암의 각종특성을 정량적으로 파악하기 위하여 광물·화학성분분석과 각종 물리, 역학적 시험을 실시하였다. 이 시험결과를 토대로 하여 퇴적암에 적용할 수 있는 풍화관정법과 풍화도에 따른 암석의 각종 공학적 성질에 대한 상관관계를 고찰하였다.

## 2. 퇴적암의 풍화 Mechanism 및 풍화지수

### 2.1 퇴적암의 풍화 Mechanism

풍화작용은 물리적 풍화와 화학적 풍화로 대별되는데 물리적 풍화는 암석의 화학적 조성이나 광물학적조성의 변화가 없이 단지 원래 암석이 작게 파쇄 되는 것을 말한다(박병기, 1973). 일반적으로 자연환경 하에서는 물리적 풍화와 화학적 풍화가 동시에 일어나므로 두 가지 풍화작용의 상호작용을 분리하기는 어렵다. 물리적 풍화의 주요 원인으로서는 상재하중의 제거에 따른 압력의 감소, 물의 동결 및 용해, 온도변화, 식물의 작용 등을 들 수 있다. 특히 이 지역의 암반은 퇴적되면서 형성된 층리면에 따라 강도에 커다란 차이를 보이는 이방성의 특성을 가진 암반으로 각 결정체의 열팽창, 건습의 반복, Slaking현상에 의한 물리적 풍화작용으로 인한 흡수율과 유효간극율이 증가한다. 이와 같은 물리적 풍화작용과 더불어 화학적 풍화작용은 산화작용, 수산화작용, 및 탄산염화작용 등이 있다. 산화작용이란 산소가 각종 물질과 화합하는 것으로 산화제일철이

산화제이철로 변화하는 것이 좋은 예이며, 수산화작용이란 주로 빗물 등과 같은 탄산가스를 포함하는 물과 반응하여 생기는 현상으로 조암광물인 장석류는 Kaolinite로, 각섬석 및 감람석은 사문석·활석으로 혹은모는 녹니석으로 각각 변한다. 마지막으로 탄산염화작용은 탄산가스를 용해하고 있는 물이 규산염류를 분해하여 탄산염류를 발생시키는 작용으로 정장석에서는 탄산가스를 포함한 물에 의하여 알칼리 장석성분이 탄산염류로 용탈하여 Kaolinite로 변화한다(Ollier, 1979). 퇴적암의 화학성분분석으로 알다시피 퇴적암의 산화칼슘은 화강암에 비해 훨씬 높다. 퇴적암에는 결정체암석에서 나타내는 모든 종류의 장석이 존재한다. 장석은 칼슘이 많은 사장석이 변질이 빠르고 칼륨장석은 변질을 많이 받지 않으므로 비교적 안정하다. 그러나, 풍화는 장기간에 걸쳐 이루어지므로 위와 같은 작용으로 급격하게 변화하지는 않는다(Ollier, 1979).

### 2.2 화학적 풍화지수

퇴적암의 풍화특성을 연구하는데 있어서 일반적으로 사용되고 있는 방법은 흡수율의 변화, 풍화지수, 강열감량(Loss of Ignition, LOI)에 의한 방법이 있다. 풍화된 정도를 정량적으로 판단하기 위하여 많은 연구가 진행되었고 그 결과 많은 풍화지수가 제안되었다. 크게 암석학적인 여러 가지 특성을 기준으로 제시된 풍화지수와 화학적 풍화에서 나타나는 특성을 기준으로 하는 화학적 풍화지수로 구분된다.

암석의 본질적인 성질의 변화를 정량화하기 위하여 제안된 풍화지수는 암석의 공학적성질과 밀접한 관계를 가진다(Gupta & Lao, 2001). Hodder & Hetherington(1991), Knill(1993)에 의해 제안된 것처럼 풍화에 관련된 화학적 변화과정을 더욱 이해하기 위해서는 지반공학적인 거동에 관한 영향을 이해하는 것이 필수적이다. 주성분원소의 변화를 이용하여 화학적 풍화의 정도를 나타내는 지수들이 제안되어 왔는데 Reiche(1943)는 풍화가능지수(Weathering Potential Index)와 Product Index같은 화학적 풍화지수를 제안하였다.

$$WPI = \frac{K_2O + Na_2O + CaO + SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + MgO - H_2O}{K_2O + Fe_2O_3 + TiO_2} \times 100 \quad (1)$$

$$PI = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Al_2O_3 + FeO + Fe_2O_3 + TiO_2} \times 100 \quad (2)$$

WPI의 감소는 이동할 수 있는 양이온(Mobile cations)의 감소를 의미하며 수산화물(Hydroxyl water)의 증가를 의미한다. 반면에 Product Index (PI)의 감소는 풍화 시작에 따라 실리카의 함유정도가 감소하는 것을 나타낸다. Ruxton(1968)은 알루미나(Alumina)가 일정하다는 가정 하에서 계산된 총 요소손실중량을 측정해 주지 못한다는 것을 발견했다. 그는 실리카의 손실을 총 요소손실로 보았고 알루미나는 풍화하는 동안 그대로 있다고 가정했다.

$$SAR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \times 100 \quad (3)$$

Parker(1970)에 의해 제안된 Weathering Parker Index(WP)는 풍화인자로 사용되는 산소와 함께 주요 알칼리원소와 그들의 결합강도의 크기에 근거한다. 또한 여기서 가수분해는 규산암 풍화의 주요한 동인이며 다음과 같이 표현된다.

$$WP = \left( \frac{2Na_2O}{0.35} \right) + \left( \frac{MgO}{0.90} \right) + \left( \frac{2K_2O}{0.25} \right) + \left( \frac{CaO}{0.70} \right) \quad (4)$$

Miura(1973)는  $Fe^{+2}$  와  $Fe^{+3}$  상태에서 철성분 이동 사이의 차이점을 검토했고 Miura지수(MI)를 제안하였다.

$$MI = \frac{MnO + FeO + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{Fe_2O_3 + Al_2O_3 + 3H_2O} \times 100 \quad (5)$$

Jayaverdena & Izawa(1994)는  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  사이의 가능한 관계들을 가정하였고 Silica-Titania Index(STI)로 언급되는 화학적 풍화지수를 선택하였다.

$$STI = \frac{SiO_2 / TiO_2}{SiO_2 / TiO_2 + SiO_2 / Al_2O_3 + Al_2O_3 / TiO_2} \times 100 \quad (6)$$

Nesbitt & Yong(1982)는 화학적변질지수(Chemical Alteration Index)를 제안하였다.

$$CAI = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100 \quad (7)$$

화강암의 조암광물인 장석, 흑운모, 각섬석, 및 휘석에 대한 CAI값은 약 50 정도이다. 2차광물인 점토광물 카올리나이트(Kaolinite), 깁사이트(Gibbsite), 녹니석의 CAI가 100이며 일라이트(illite), 스멕타이트(Smectite)는 70-85의 값을 가지므로 CIA는 1차광물과 2차광물의 비율을 반영하여 화학적 풍화의 정도를 나타낼 수 있다.

### 3. 시험 방법

#### 3.1 시료 채취 장소 및 성형

그림 1에서와 같이 본 연구에서 사용한 이암과 알코즈사암A는 대구 북구 산격동, 염기성 응회질 사암은 침산동, 이질사암, 이암, 이회암은 지하철2-7공구, 흑색세일은 지하철2-15공구에서 채취하였다. 암석의 공학적 특성에 관한 시험에 사용한 시료는 블록상태의 원석을 NX사이즈의 원형 코어를 성형하여 사용하였다(Brown, 1981).

#### 3.2 화학성분 및 광물성분 분석

연구 대상 암석에 대하여 화학성분 분석 및 광물구성비를 파악하기 위해 X-선 회절분석(XRD)시험과 X-선 형광분광법(XRF) 측정시험을 각각 실시하였다(한봉휘, 1986). XRD시험의 원리는 X선이 한 물질을 통과하게 되면, 그 물질이 순수한 상태로 존재하든지 혼합물의 한 성분으로 존재하든지 항상 독특한 X선 회절 무늬를 띄게 되므로 이 회절무늬를 정성 분석하면, 그 물질의 구성광물을 알 수 있다. 그리고, 암석의 화학성분 분석은 일정량의 시료를 분쇄기에 넣어 250mesh로 분쇄한 후에 시료와 Flux( $Li_2B_4O_7$ )의 비를 1 : 10으로 혼합한 후에 백금 도가니에 넣어 1100°C로 가열하여 시료를 용융시킨 후 실온에서 꺼내어 Bead를 제작한 후 XRF측정기(Phillips 1401/10, 40kv, 30ma)로 화학성분 분석을 하였다. 강열감량치는 100°C일때의 중량에서 1000°C로 구웠을 때 중량차이를 100°C 일 때의 중량으로 나누어 표시한 것으로 풍화에 따른 점토 화에 의해 결정수가 증대되는데 착안한 것이다(Matsuo & Yamaouchi, 1975).

#### 3.3 물리적 역학적 특성

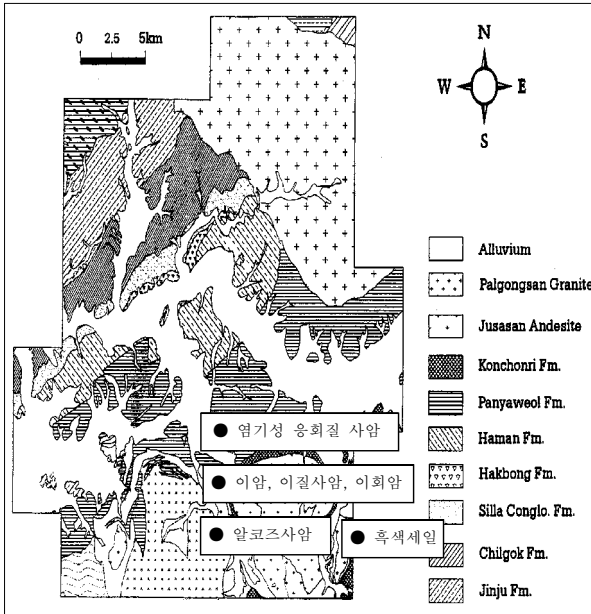


그림 1. 시료 채취 위치도(대구지역)

ISRM(1979)에서 제안한 방법으로 풍화정도에 따른 암석의 비중, 유효간극율, 흡수율, 탄성파속도를 측정하였다. 역학시험으로는 ISRM(1981)에 제안한 방법으로 일축압축시험을 실시하였으며 탄성계수는 일축압축시험시 스트레인게이지를 부착하여 측정하였다. 각각의 시험결과는 5번을 하여 평균값을 채용하였다.

#### 4. 시험결과에 대한 고찰

##### 4.1 광물구성

각종 암석의 광물구성비를 파악하여 표 1과 같은 결과를 얻었다. 광물구성비는 알코즈사암, 응회질 사암, 이질 사암

에서는 석영(Quartz, Qz)이 11.59~29.65%, 정장석

표 1. 암석의 광물 구성비(%)

Mineral	Qz	Or	Ab	An	Co	Wo	Hp	Bi	Ms	Mt	Tn	Ap	
Mudstone	(A)	20.32	7.05	32.8	24.3	-	1.8	-	3.0	2.7	1.5	0.91	0.21
	(B)	19.54	8.04	40.0	22.47	-	2.91	-	3.5	-	1.92	1.25	0.36
	(C)	25.53	4.11	26.82	32.78	-	-	-	4.25	2.73	1.99	1.41	0.38
Arkose sandstone A	(A)	17.91	15.3	34.41	15.32	-	-	-	2.57	8.53	1.5	1.6	0.25
	(B)	19.91	13.03	39.38	17.54	-	4.4	-	2.73	-	1.6	1.1	0.32
	(C)	29.65	7.69	35.40	10.54	-	-	-	2.33	11.67	1.39	1.15	0.18
Tuffaceous sandstone	(A)	11.59	-	36.30	17.17	-	-	10.56	15.74	-	3.67	1.6	0.42
	(B)	13.21	-	3.31	15.37	-	-	15.32	10.56	-	3.21	1.12	0.84
	(C)	14.51	-	31.74	21.36	0.71	-	14.93	9.11	-	3.58	1.79	2.24
Arkose sandstone A	(A)	11.35	16.41	27.21	15.21	-	9.78	-	18.52	-	2.12	1.68	0.41
	(B)	13.41	14.39	25.23	14.32	-	11.42	-	16.68	-	2.70	1.34	0.51
	(C)	16.62	14.16	17.00	24.74	-	7.77	-	14.99	-	2.70	1.42	0.60
Black shale	(A)	20.21	-	32.73	8.24	1.73	-	-	30.18	2.84	2.02	1.56	0.39
	(B)	24.98	-	24.00	20.14	0.06	-	-	20.96	6.49	1.36	1.62	0.39
	(C)	27.81	-	27.32	16.81	-	-	-	25.32	7.98	3.31	1.93	0.32
Chalk marl A	(A)	12.88	7.65	28.41	15.88	-	12.38	-	18.88	-	2.27	1.32	0.34
	(B)	19.52	6.58	20.21	29.12	-	4.46	-	16.7	-	1.55	1.41	0.45
	(C)	21.31	9.25	19.25	17.56	-	9.12	-	14.47	-	1.95	1.73	0.21
Chalk marl B	(A)	0.18	-	29.35	12.97	-	15.21	-	16.98	-	2.57	0.89	0.37
	(B)	0.11	-	24.87	21.51	-	4.1	-	12.68	-	2.38	3.75	0.43
	(C)	0.45	-	31.54	29.21	-	9.71	-	17.81	-	3.45	5.21	0.35
Mudr sandstone	(A)	14.07	2.28	18.49	15.80	-	23.77	-	22.18	-	1.9	1.09	0.42
	(B)	16.46	0.62	16.11	21.33	-	18.53	-	21.55	-	1.30	3.80	0.30
	(C)	19.37	2.15	23.12	17.28	-	26.87	-	19.21	-	2.21	2.31	0.51
비고: Qz: quartz      Or: orthoclase      Ab: albite An: anorthite      Co: corundum      Wo: wollastonite Hp: hypersthene      Bi: biotite      Ms: muscovite Mt: magnetite      Tn: sphene      Ap: apatite													

(Orthoclase, Or) 0.62~15.3%, 조장석(Albite, Ab) 16.11~39.38%, 회장석(Anorthite, An) 10.54~24.74%, 흑운모(Biotite, Bi) 2.33~22.18%, 그리고, 백운모(Muscovite, Ms)는 1.67 % 정도 함유되었다. 이 암과 이회암은 석영이 0.11~25.53%, 정장석 4.11~8.04%, 조장석 19.25~40.0%, 회장석 12.97~32.78%, 흑운모 3.00~18.88%, 그리고, 백운모가 2.73% 정도 함유되었다. 흑색세일은 석영이 20.21~27.31%, 조장석이 24.00~32.73%, 회장석이 8.24~20.14%의 범위로 함유되었으며 특히, 흑운모는 20.96~30.18%, 백운모는 2.84~6.49%로 다른 시료들보다 많이 함유되어 있다. 이암과 알코즈사암, 흑색세일은 다른 시료와 비교해서 조장석과 백운모를 많이 함유하고 있으며, 이암을 제외한 전 시료에서 마그네타이트는 감소되는 것으로 나타났다. 광물성분 중 조장석과 백운모, 마그네타이트는 풍화와 밀접한 관계가 있다고 사료된다.

암석의 화학성분에 대한 분석결과는 표 2와 같이 나타났다. 그 결과 대구지역 퇴적암은 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO가 주 성분이며, 각각 46.54~71.55%, 10.23~17.59%, 2.34~18.83%로 나타났다. 그리고, FeO는 1.03~5.65%, K<sub>2</sub>O는 0.90~3.93%로 나타났다.

화강암의 화학성분(임길재, 2000)과 본 연구의 퇴적암의 화학성분을 비교하면 화강암의 SiO<sub>2</sub>는 70.44~74.67%와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 13.82~18.48%, CaO는 0.52~2.05% 이다. 앞절에서 제안한 풍화지수식을 사용하여 구하여진 퇴적암과 화강암의 주성분으로 풍화지수를 구하였다(표 3과 표 4). 그리고 퇴적암의 풍화지수와 화강암의 풍화지수를 살펴보았다. 구한 풍화지수의 결과에서 퇴적암과 화강암의 풍화지수를 비교하면 WP와 CIA 의 지수는 퇴적암의 풍화정도를 뚜렷하게 나타내는 것을 알 수 있다.

## 4.2 화학성분

표 2. 암석의 화학성분비(%)

Oxide		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	FeO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
Mudstone	(A)	67.77	0.49	11.65	1.22	0.07	0.10	1.62	5.88	4.08	2.32	0.14	4.22
	(B)	60.01	0.55	16.01	1.69	0.07	0.07	2.12	6.10	4.09	1.59	0.16	7.13
	(C)	56.71	0.59	17.45	1.67	0.14	0.03	2.36	6.42	2.62	1.16	0.16	8.08
Arkose sandstone A	(A)	71.55	0.55	10.23	0.69	0.07	0.07	1.36	6.10	4.09	1.59	0.16	2.93
	(B)	62.22	0.49	15.20	1.42	0.07	0.10	1.62	5.88	4.08	2.32	0.14	6.42
	(C)	62.25	0.50	17.59	1.20	0.40	0.07	1.03	2.38	3.57	2.09	0.08	6.92
Tuffaceous sandstone	(A)	56.08	0.73	14.08	3.35	0.11	7.26	3.15	4.78	3.86	1.59	0.19	5.75
	(B)	55.89	0.60	14.49	2.22	0.09	3.30	2.67	8.81	2.63	3.93	0.23	4.48
	(C)	54.00	0.80	14.32	3.20	0.50	6.20	3.00	5.90	3.30	0.90	1.00	5.78
Arkose sandstone A	(A)	56.68	0.73	12.48	3.05	0.11	7.26	3.15	4.78	3.86	1.59	0.19	5.75
	(B)	55.89	0.60	13.49	2.42	0.09	3.30	2.67	8.81	2.63	3.93	0.23	5.58
	(C)	54.44	0.62	15.07	2.36	0.14	3.07	2.08	8.91	1.73	3.64	0.26	6.3
Black shale	(A)	56.36	0.70	14.88	1.81	0.05	4.95	5.65	2.34	3.42	3.17	0.22	5.83
	(B)	56.04	0.70	16.61	1.18	0.12	3.75	2.91	4.39	2.42	2.39	0.17	7.09
	(C)	50.93	0.59	14.10	2.02	0.08	3.50	3.11	9.41	2.95	3.07	0.15	6.48
Chalk marl A	(A)	54.93	0.59	13.60	2.12	0.07	3.50	3.11	8.42	2.71	3.56	0.12	9.59
	(B)	53.91	0.60	15.54	1.32	0.07	2.77	2.77	7.88	2.00	2.56	0.19	8.32
	(C)	46.54	0.49	11.87	1.70	0.19	4.67	2.31	14.80	1.93	2.56	0.19	7.22
Chalk marl B	(A)	49.60	0.41	11.56	2.35	0.24	7.26	2.38	15.53	3.13	1.72	0.17	5.05
	(B)	47.05	1.67	12.94	2.12	0.09	7.00	3.18	14.47	2.58	1.25	0.19	6.32
	(C)	46.10	0.41	13.56	2.35	0.24	8.26	2.38	18.83	3.13	1.72	0.17	14.53
Mudr sandstone	(A)	54.04	0.49	11.37	1.70	0.19	4.67	2.31	14.80	1.93	2.56	0.19	5.23
	(B)	52.93	1.66	12.20	1.14	0.43	4.31	1.93	13.80	1.64	2.18	0.13	6.59
	(C)	47.41	1.06	14.90	2.15	0.15	6.58	4.32	7.77	4.79	2.28	0.34	7.23

표 3. 암종에 따른 퇴적암의 각종 풍화지수

Rock	No	PI	SAR	WP	MI	CAI	STI
Mud-stone	(A)	88.23	9.89	72.21	26.76	36.94	86.79
	(B)	83.04	6.37	66.7	16.48	45.05	83.43
	(C)	80.98	5.52	50.27	13.37	50.31	81.83
Arkose sandstone(A)	(A)	90.15	11.89	66.7	35.92	34.38	87
	(B)	84.73	6.96	72.21	17.98	43.32	84.54
	(C)	83.79	6.02	56.68	10.76	58.6	83.28
Tuffaceous sandstone	(A)	81.45	6.77	81.04	34.83	45.68	82.6
	(B)	82.25	6.56	88.56	39.95	37.12	83.14
	(C)	80.87	6.41	70.06	32.93	45.53	81.71
Arkose sandstone(B)	(A)	82.88	7.72	81.04	35.39	42.7	83.3
	(B)	82.87	7.04	88.56	33.47	35.46	83.61
	(C)	81.96	6.14	77.47	27.36	39.64	82.45
Black shale	(A)	79.33	6.44	77.55	29.39	52.88	82.48
	(B)	80.97	5.74	63.76	20.52	53.36	81.6
	(C)	80.78	6.14	86.43	30.75	35.83	82.4
Chalk marl (A)	(A)	82.29	6.87	86.43	30.42	35.00	83.45
	(B)	81.29	5.90	67.55	19.89	43.28	82.21
	(C)	82.40	6.67	89.75	35.52	26.54	83.32
Chalk marl (B)	(A)	83.20	7.29	89.36	45.45	24.69	84.73
	(B)	79.27	6.18	79.88	36.62	28.84	75.84
	(C)	80.46	5.78	102.82	56.78	27.77	85.03
Mudr sandstone	(A)	84.86	8.08	83.25	41.65	25.71	85.03
	(B)	83.54	7.38	73.81	30.71	28.81	76.88
	(C)	77.23	5.41	101.11	34.07	37.86	78.66

표 4. 풍화에 따른 화강암의 각종 풍화지수

No	PI	SAR	WP	MI	CAI	STI
KW1	88.36	9.05	68.62	72.06	53.61	89.49
KW2	88.38	9.14	68.10	63.33	54.66	89.41
KW3	88.01	8.67	67.29	47.58	55.85	88.8
KW4	88.20	8.52	69.01	46.18	56.21	89.04
BS1	88.73	9.46	69.64	76.41	52.53	89.92
BS2	88.63	9.19	66.80	63.03	54.8	89.11
BS3	88.12	8.49	67.36	33.4	56.96	89.01
BW1	86.80	7.78	74.03	84.31	52.53	86.17
BW2	86.71	7.77	71.84	73.95	53.42	86.11
BW3	86.93	7.85	70.55	61.59	54.01	86.25
BW4	86.63	7.65	71.25	56.77	54.07	86.03
HA1	86.91	8.01	72.82	76.74	52.55	86.55
HA2	86.69	8.03	71.41	69.86	53.2	86.45
HA3	87.21	8.01	70.55	64.48	54.81	86.62
HA4	87.01	7.89	70.09	42.16	53.76	86.90

풍화지수를 이용하여 그림 2와 그림 3과 같은 상관관계를 구하였다. 그림 2는 WP지수와 CAI의 상호관계를 비교한 것으로 상관계수 0.67로서 CAI가 증가할수록 WP가 감소하는 경향을 보인다. 그림 3은 WP와 강열감량의 관계로서 상관계수는 0.768로서 강열감량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 특히, WP가 증가함에 따라 LOI가 감소되는데 이는 풍화 진행정도가 적은 암석일수록 LOI가 작음을 의미한다.

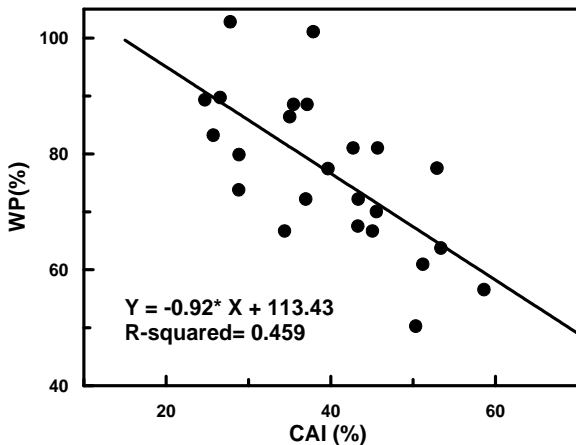


그림 2. 풍화지수(WP)와 풍화지수(CAI)

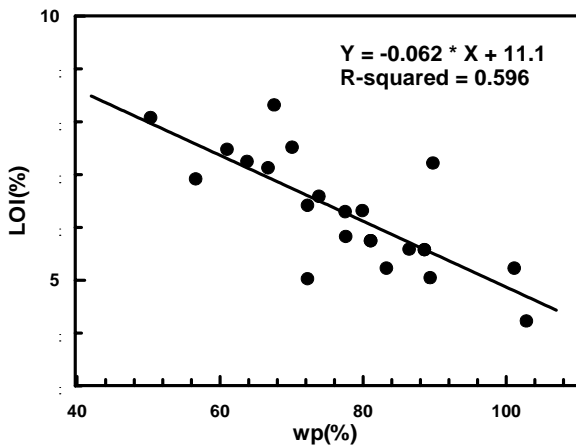


그림 3. 풍화지수(Wp)와 LOI

그리고 풍화에 따른 암석의 화학성분 분석에서는 SiO<sub>2</sub> 성분이 증가함에 따라 CaO성분은 감소하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분은 영향이 크지 않음이 나타났다(그림 4와 그림 5). 임길재의 연구를 분석하면 화강암의 경우 CaO성분의 양은 퇴적암에 비해 많이 적지만 SiO<sub>2</sub>가 증가함에 따라 CaO는 감소하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 퇴적암과 달리 감소하는 좋은 상관성이 나타났다(그림 6과 그림 7). 즉 퇴적암의 풍화는 CaO의 영향이 많

이 미치는데 화강암은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분의 영향이 많이 미치는 것을 알 수 있다. 풍화지수의 경우 퇴적암과 화강암의 성분비 차이에 의하여 다른 값을 가지고 있다.

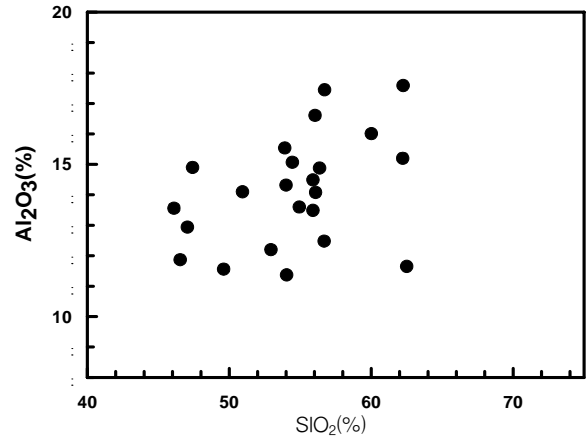


그림 4. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분과 SiO<sub>2</sub> 성분

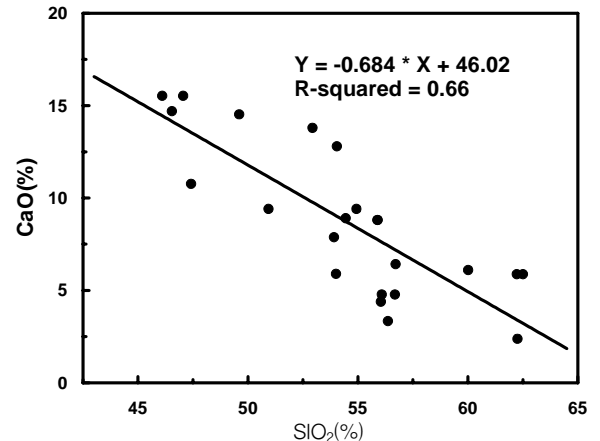


그림 5. CaO 성분과 SiO<sub>2</sub> 성분

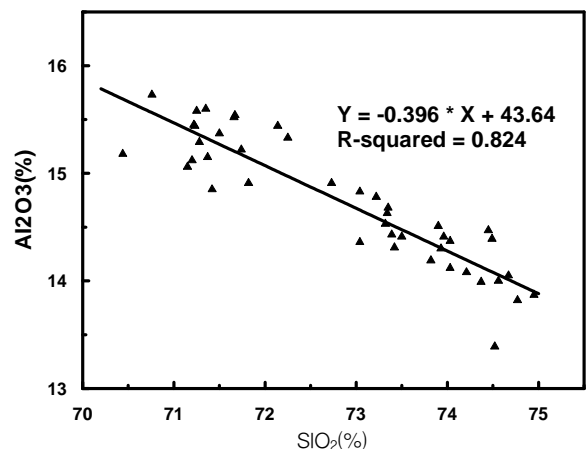


그림 6. 화강암의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>성분과 SiO<sub>2</sub>성분

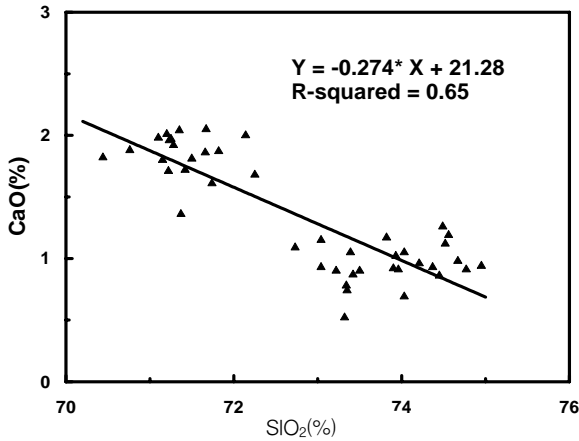


그림 7. 화강암의 CaO성분과 SiO<sub>2</sub>성분

### 4.3 물리적 역학적 특성

풍화정도에 따른 퇴적암의 기본 물성치 실험 결과는 표 5에 나타냈다. 흡수율은 시료내의 광물입자간의 간극, 광물자체의 미세 균열에 의해 흡수되는 모든 수분의 함량이 측정되므로 동일 암석에 대한 풍화도의 지표로도 널리 활용되어 암석의 역학적 성질에 미치는 특성 중 가장 먼저 고려되어야 할 특성이다. 신선하고 치밀한 암석의 경우 흡수율이 1%에도 달하지 않는 경우가 많으며 풍화에 따라 증가한다.

표 5. 풍화정도에 따른 암석의 물리·역학적 성질

Rock type	Properties	Sp. gravity	Water content	Porosity (effective)	Absorption	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	P wave velocity (km/sec)	E <sub>150</sub> 10 <sup>5</sup> kg/cm
Mudstone	(A)	2.64	1.48	5.73	2.33	572	4.65	1.39
	(B)	2.62	1.51	5.82	2.49	578	4.68	1.39
	(C)	2.61	1.79	6.31	3.20	521	4.56	1.37
Arkose sandstone(A)	(A)	2.651	0.50	2.34	0.88	705	4.86	1.59
	(B)	2.63	1.19	5.41	2.07	534	4.46	1.47
	(C)	2.63	1.24	5.85	2.95	509	4.37	1.46
Tuffaceous sandstone	(A)	2.65	1.19	4.43	2.80	724	4.91	1.86
	(B)	2.63	1.12	3.96	2.36	659	4.75	1.58
	(C)	2.63	1.23	4.60	2.83	613	4.42	1.39
Arkose sandstone(B)	(A)	2.68	0.19	2.95	1.35	711	4.69	3.01
	(B)	2.68	0.50	3.19	1.62	1072	5.01	3.76
	(C)	2.64	0.82	4.50	2.23	799	4.95	2.33
Black shale	(A)	2.66	1.20	4.70	2.76	808	4.56	1.85
	(B)	2.65	0.28	1.44	0.54	653	4.36	1.72
	(C)	2.62	1.34	5.00	2.78	799	4.31	1.69
Chalk marl A	(A)	2.64	1.04	4.67	2.63	1644	5.73	5.31
	(B)	2.64	1.79	6.02	2.73	1124	5.14	4.54
	(C)	2.52	1.22	5.53	2.20	623	4.75	3.12
Chalk marl B	(A)	2.69	0.22	3.67	0.95	969	4.78	2.24
	(B)	2.68	0.75	4.20	1.25	803	4.75	2.23
	(C)	2.52	1.42	7.15	2.84	593	4.41	2.11
Mudr sandstone	(A)	2.67	0.42	2.06	1.55	1001	5.01	3.76
	(B)	2.65	1.67	6.10	2.00	799	4.95	2.33
	(C)	2.63	0.99	4.77	1.81	659	4.87	2.34



그림 8과 그림 9는 퇴적암의 풍화정도를 나타낼 수 있는 WP 및 CAI 지수와 흡수율의 상관관계를 구하였다. 상관계수가 각각 0.623, 0.685로서 WP가 증가할수록 흡수율이 감소하는 경향이 나타나고 CAI가 증가할수록 흡수율이 감소하는 경향이 나타났다.

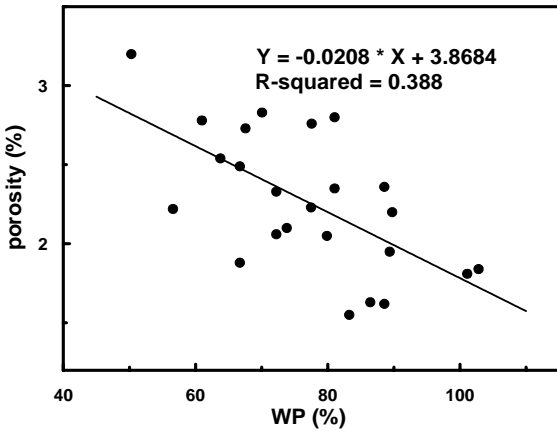


그림 8. 풍화지수(WP)와 흡수율

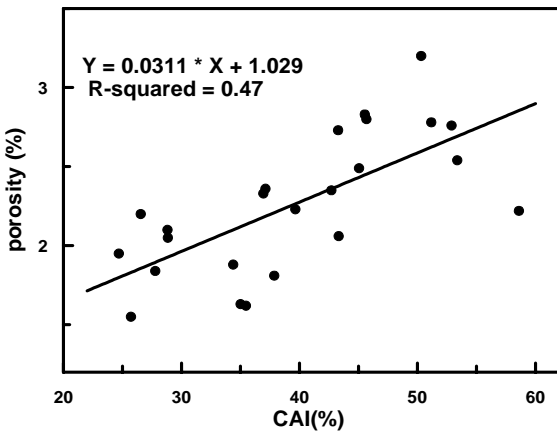


그림 9. 풍화지수(CAI)와 흡수율

그림 10은 흡수율과 일축압축강도의 상관관계를 구하였는데 상관계수가 0.644로서 흡수율이 증가하면 일축압축강도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 그림 11은 흡수율과 LOI의 관계를 나타내는데 LOI의 증가에 따라 흡수율이 증가하는 경향이 나타났다.

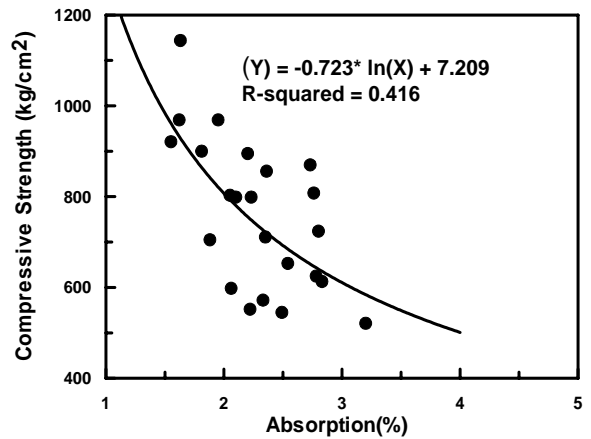


그림 10. 흡수율과 일축강도

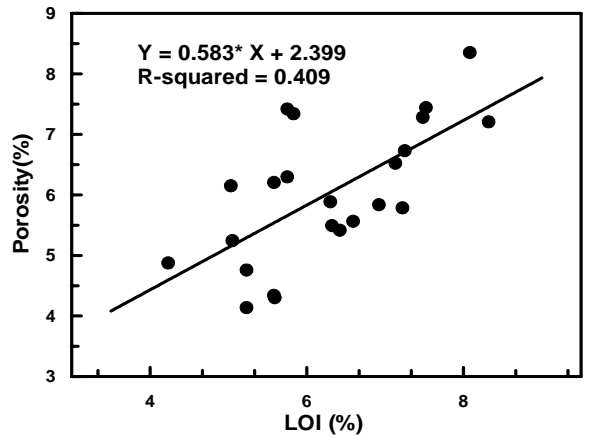


그림 11. 흡수율과 LOI

풍화정도에 따른 퇴적암의 역학적실험 결과는 표 5에 나타냈는데 각각의 상관관계는 그림 12 및 13과 같다. 그림 12는 일축압축강도와 탄성계수의 관계로서 상관계수는 0.83로서 좋은 대응을 이루며 일축강도가 증가할수록 탄성계수가 증가하는 경향을 나타낸다. 그림 13은 일축압축강도와 P-파속도의 대응으로 상관계수는 0.701로서 직선적인 관계로 나타났다. 일반적으로 일축압축강도와 P-파속도 및 탄성계수는 상관성이 있는 것으로 판단되어 지는 바 위의 물성치는 퇴적암의 역학적 특성에 사용될 수 있다. 위의 역학적 특성 중 현장에서 사용하기 쉬운 일축압축강도를 통해 앞에서 구한 WP와 CAI의 상관성을 유도하였다. 그림 14와 그림 15는 풍화지수와 탄성계수의 대응관계를 나타내는데 상관계수는 비록 낮지만 WP의 증가에 의해 증가하고 CAI에 의해 감소하는 경향을 보인다

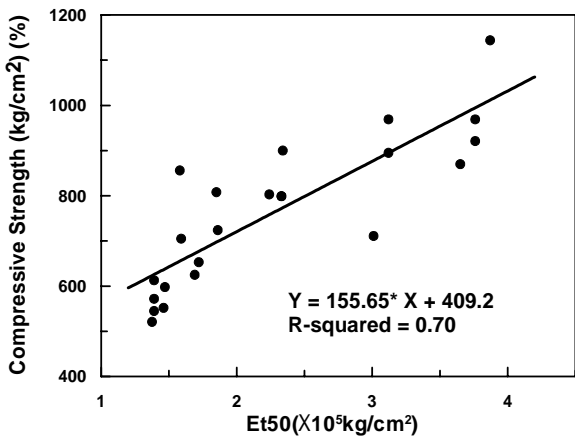


그림 12. 일축압축강도와 탄성계수

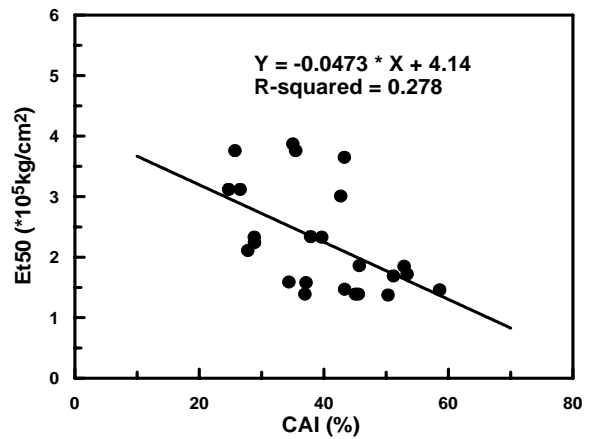


그림 15. 풍화지수(CAI)와 탄성계수

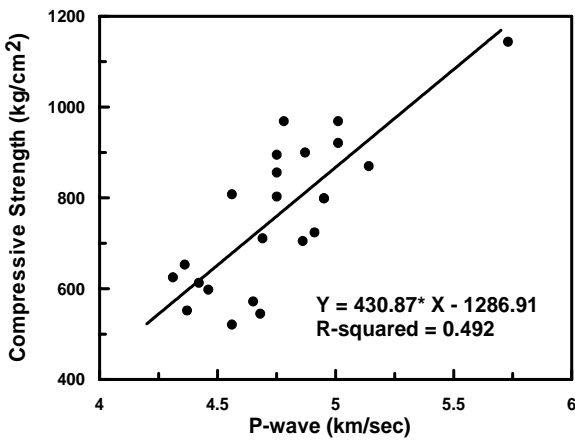


그림 13. 일축압축강도와 P-파속도

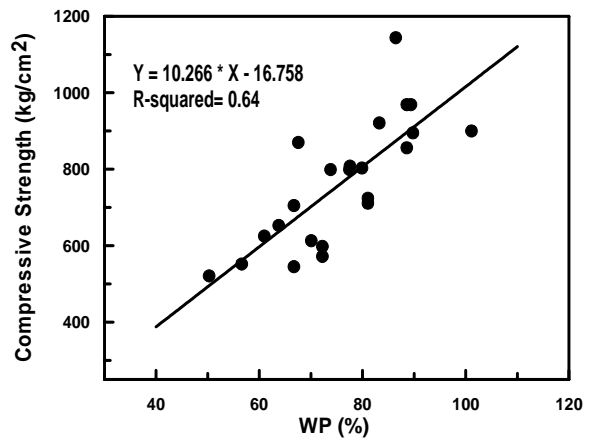


그림 16. 풍화지수(WP)와 탄성계수

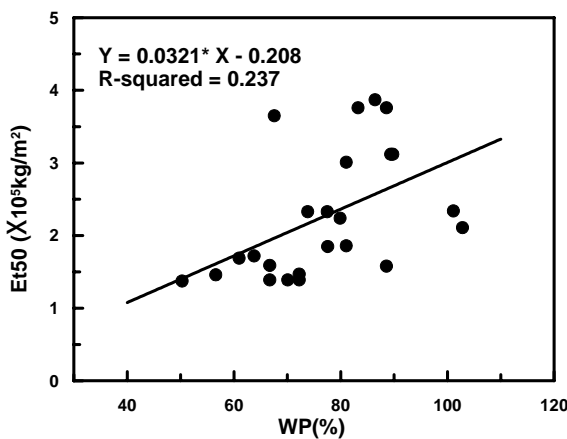


그림 14. 풍화지수(WP)와 탄성계수

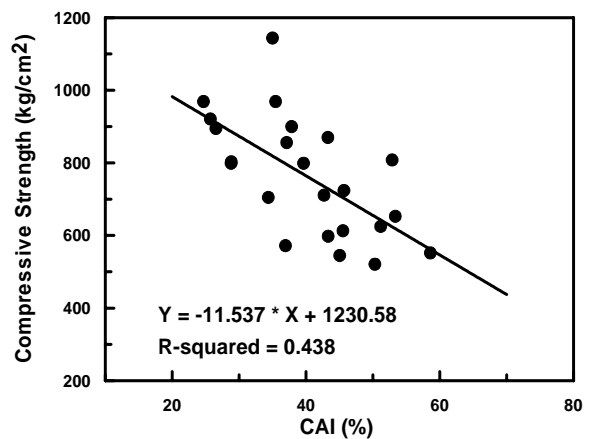


그림 17. 풍화지수(CAI)와 일축압축강도

그림 16과 그림 17은 일축압축강도와 풍화지수의 상관관계를 나타낸다. 상관계수는 0.8로서 좋은 대응을 이루고, WP 풍화지수가 증가할수록 일축압축강도가 증가하고 CAI가 증가할수록 일축압축강도가 감소하는 경향이 보인다.

결론적으로 암석은 풍화가 진행됨에 따라 신선한 암에서 잔적토까지 폭 넓은 범위로 변화하므로 한가지 시험만으로 암석의 일축압축강도를 평가하기란 어렵다. 따라서 화학분석을 통한 WP, CAI 그리고 P-파속도 등을 측정하여 현장에 적합한 일축압축강도를 추정할 필요가 있다.

## 5. 결론

대구지역에서 퇴적암을 대상으로 채취한 풍화정도에 따른 화학 및 광물성분과 물리·역학적특성분석을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 암석의 풍화정도를 파악하는 방법은 흡수율의 변화, 그리고 WP와 CAI지수에 의한 방법이 있다. 일반적으로 퇴적암은 풍화정도가 심할수록 MgO와 FeO, CaO, Na<sub>2</sub>O 등이 감소하므로 이와 관련된 풍화지수, 흡수율이 퇴적암의 풍화정도를 파악하는데 타당성이 있는 것으로 나타났다.
2. 이암과 알코즈사암, 흑색셰일은 풍화지수가 시간경과에 따라 48.83%에서 31.59%의 범위로 감소하였으며, 다른 시료와 비교하면, 조장석과 백운모가 많이 함유되어 있었다. 또한, 마그네타이트는 이암을 제외한 전 시료에서 감소하였다. 이를 통해 광물성분 중 조장석과 백운모, 마그네타이트는 풍화정도와 밀접한 관계가 있다고 사료된다.

3. 풍화지수-흡수율과 강열감량-유효 간극율의 상관관계를 분석한 결과 풍화지수와 흡수율은 직선적으로 감소하였으며, 강열감량과 유효간극율은 강열감량이 증가함에 따라 유효간극율이 감소하는 경향을 나타낸다.
4. 풍화지수-일축압축강도의 상관관계를 분석한 결과 WP지수가 증가할수록 일축압축강도는 증가하고 CAI지수가 증가할수록 일축압축강도는 감소하는 것을 나타낸다.
5. 실험결과에 나타낸바 암석의 강도는 조암광물의 화학성분과 밀접한 상관관계가 있으므로 암석의 구성광물에 대한 분석이 또한 필요하다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 조암광물의 화학성분과 암석의 강도를 결합한 초보 연구로서 암석의 화학성분과 강도의 상관성을 제시하였다. 풍화정도에 따른 퇴적암에 대한 역학적물성과 화학성분분석을 통해 일축압축강도와 풍화지수의 상관성이 있다는 것을 제시하였다. 향후에 암석의 구성화학성분과 강도와의 연구가 계속 이루어질 경우 좋은 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 대학부설연구소 계속-유보과제(과제번호 97-005-E00001)의 연구비를 지원 받아 실시하였으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

(접수일자 : 2002. 2. 18)

## 참 고 문 헌

1. 김영수, 이상복, 정성관 (1995), 퇴적암 풍화토의 공학적 특성, 한국지반공학회지, 제11권, 제4호, pp. 63-74.
2. 박병기 (1973), 화강암질풍화토의 특성연구( I ), 대한토목학회지, 제21권, 4호, pp. 37-50.
3. 임길재 (2000), 화강암의 풍화에 관한 연구, 강원대학교 대학원 자원공학과 박사학위논문, pp. 55-85.
4. 한봉휘 (1986), X선 회절시험의 기초, 동명사.
5. Brown, E. T. (1981), Rock characterization testing and monitoring, ISRM suggested methods, pp. 28-33.
6. Deere, D. U. and Miller, R. P. (1966), Engineering classification and index properties for intact rock, Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, New Mexico.
7. Goodman and Richard, E. (1989), Introduction to rock mechanics, John Wiley & Sons, pp. 55-99.
8. Gupta, A.S and Rao, K. S. (2001), Weathering indices and their applicability for crystalline rocks, Bull. Eng. Geol. Env. Vol, 60, pp. 201-221.
9. Hodder, APW and Hetherington, Jr. (1991), A quantitative study of the weathering of greywacke; Tech Note, Eng. Geol, Vol, 31, pp. 53-3681.
10. 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.
11. ISRM(1979), Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties, Slaking-Durability Index, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol, 16. No. 2, pp. 141-156.
12. ISRM(1981), Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock material, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol, 15. No. 2, pp. 135-140.
13. Jayaverdena U. S and Izawa E. (1994), A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions; a study from Sri Lank, Eng. Geol. Vol. 36, pp. 303-310.
14. Knill, J. L. (1993), Material weathering, Proc. 26th Annu. Conf. of the Engineering Group of the Geological Society, Leeds, pp. 155-158.
15. Matsuo, 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.
16. Mirata. 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.
17. Miura, N. and Ohara, S.(1979), Particle-crushing of a decomposed granite soils under shear stresses, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 3, pp. 1-14.
18. Miura, K. (1973), Weathering in plutonic rocks: Part I, Weathering during the late-pliocene of gotsu plutonic rock, J. Soc. Eng. Geol, pp. 149P..
19. Nesbitt, H. W. and Yong, G.M. (1982), Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, Nature, pp. 715-717.
20. Ollier, C. D. (1979), 著, 松尾一郎監譯: “風化-その理論と 實態” 라테스社, pp. 28-33.
21. Parker, A. (1970), An index of weathering for silicate rocks, Geol. Mag. pp. 501-504.
22. Reiche, P. (1943), Graphic representation of chemical weathering, J. Sediment. Petrol. Vol. 13, pp. 58-68.
23. Ruxton, B. P. (1968), Measures of the degree of chemical weathering of rocks, Journal of Geology, Vol. 5. pp. 518-527.