Jour. Korean Inst. Mining Geol.
Vol. 23 No. 2, p.221-232, 1990.

풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구

김 영 화*·홍 순 호**

A Quantitative Study on the Variational Features of Rock Properties Followed by Weathering in Granites

Yeonghwa Kim* and Soon Ho Hong**

Abstract : Upon the basis of the measurements of index properties and ultrasonic velocities as well as the determination of degree of weathering mainly based on microscopic observation, relatively fare correlation has been found between the degrees of weathering and the physical properties of rocks, particularly between degrees of weathering and maximun water content. A significantly better correlation has been obtained between degree of weathering and P wave velocity by grouping rock samples according to rock facies. This study presented the range of physical parameters corresponding to each degree of weathering in granites.

서 론

암석의 풍화도에 관한 연구는 풍화에 미치는 영향 요인이 다양한 만큼 여러분야에서 다양한 연구성과가 집적되어 왔으며 초기의 연구가 조암광물의 조성에 관한 지질학적 연구(Ruxton and Berry, 1957)와 암석의 역학적 성질의 변화에 관한 연구 (Judd and Habber, 1961 ; Deere, 1968)들로 이루어진 반면에 최근에는 대체로 역학적 특성을 중심으로 각 풍화특성 상호간의 관련성 쪽으로 접근하는 경향을 보여왔다 (Barton, 1971 ; Inoue and Ohomi, 1981). 그 중에서도 공극율(Hamrol, 1961)과 흡수율(Duncan, 1969)등에 의한 기본 물성연구와 지진파속도의 변화특성 연구(Press, 1966 ; Balakrishna and Ramana, 1967 ; Iliev, 1970)등이 관심의 대상이 되고 있으며 Microcrack에 관한 연구(Feves et al., 1977)도 주목을 받고 있다. 국내에서도 함수율의 변화에 따른 지진파속도의 변화 특성에 관한 연구 (김영화, 1978)와 암석의 역학적 특성에 관한 연구(이희근 등, 1983 ; 이경운, 김민규, 1988) 및 화강암의 풍화에 따른 각종 지질공학적 특성변화 연구 (이수곤, 1989 ; Lee and De Freitas, 1989) 등이 있다.

그러나 풍화에 대한 연구는 대체로 화학적 풍화의 관점에서 연구되어 왔으며 비교적 정량적 접근이 용이한 물리적 풍화와의 상관성이 뚜렷이 제시되지 못하고 있는 입장이다. 따라서 이 연구에서는 주로 암석물리학적 관점에서

1) 암석의 물리적 특성 상호간에 존재하는 상관성을 규명.
2) 풍화의 진행에 따른 각 물리적 성질의 변화특성을 추적하여 물리적 풍화에 큰 영향을 미치는 풍화 관찰 요소를 발견하고, 아울러 화학적 풍화정도를 대변할 수 있는 효과적인 물리정수의 규명.
3) 풍화에 따른 물리적 성질의 상관성을 높이기 위하여 암석학적 특성차가 풍화에 미치는 영향을 추적하여 궁극적으로 화강암 풍화등급의 정량화 시도 등을 목적으로 하였다.

방법 및 자료

실험시료준비

이 연구의 실험을 위한 시료의 채취는 경북 대덕군 중산면(Suite 1), 경남 거창군 주상면 (Suite 2), 경남 밀양군 원동면 (Suite 5), 경남 울주군 언양면 (Suite 6), 경남 울주군 삼남면 (Suite 9), 경남 양산군 양산읍 (Suite 10) 및 경북 문경군 당포리 (Suite 11) 등 경상 남·북도 7개 지역에서

* 강원대학교 (Department of Geophysics, Kangweon National Univ., Chuncheon, Kangweondo 200-701, Korea)
** 강원대학교 (Department of Geology, Kangweon National Univ., Chuncheon, Kangweondo 200-701, Korea)

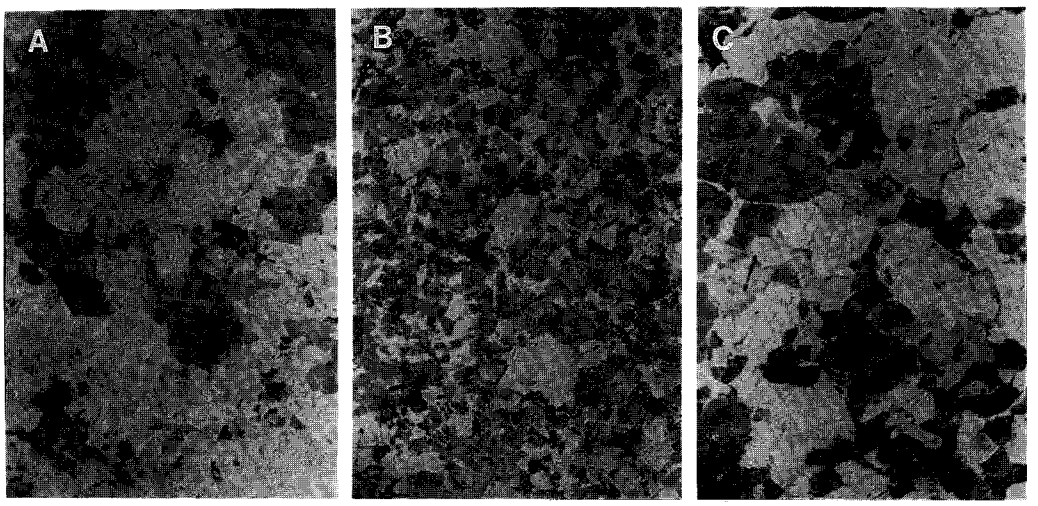


Fig. 1. Photomicrographs of granite samples of Groups 1(A), 2(B) and 3(C)after staining. Grains of quartz, K-feldspar and plagioclase are shown as dark, grey and white, respectively.

총 49개의 화강암 시료를 채취하였다.

육안과 현미경관찰 결과, 전체시료는 암상에 따라 3개의 그룹으로 구분이 가능하였는바 암상 중에서 입도차이가 가장 현저하여 Suite 1과 Suite 2가 속한 Group 1이 중립질화강암으로, Suites 5, 6, 9의 Group 2가 세립질화강암, Suites 10, 11의 Group 3이 조립질화강암으로 분류되었다 (Fig. 1). 이들 중 Group 1에 속하는 Suites 1, 2와 Group 2의 Suites 6, 9 그리고 Group 3에서 Suites 10, 11의 sample

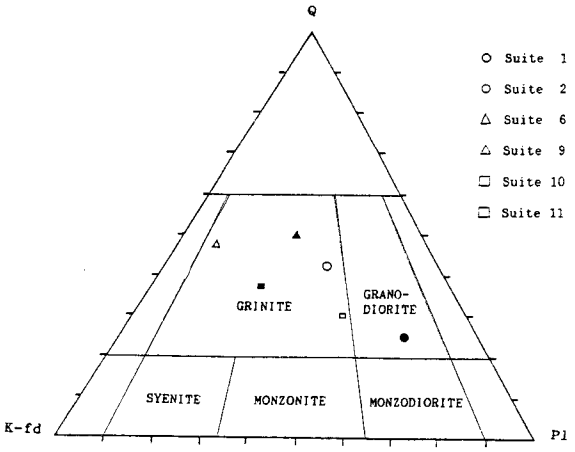


Fig. 2. General classsification of granitic rocks in the study area (after Streckiesen, 1974).

을 선정하여 model분석하고 Q-K-fd-Pl의 삼각Diagram으로 표시한 결과 Fig. 2 에서 같이 Granodiorite범위에 속한 Sutie 2의 경우를 제외하고는 모두 Granite의 범위에 속하였다. 모드 조성상에 있어서 Group별 차이는 뚜렷이 발견되지는 않았으나 Groups 2, 3에 속하는 시료가 Group 1에 속하는 시료보다는 상대적으로 사장석의 양이 적고, 정장석의 양이 많게 나타나는 경향을 보인다.

암석의 물성측정

물성측정을 위하여 지름 32㎜, 길이 50㎜내외의 Core sample로 제작하였으며, Core sample은 접촉면의 접촉상태를 높이기 위하여 1200 mesh의 연마제를 사용하여 상·하면의 수평도를 ±5／1,000까지 유지시켰다. 암석의 일반물성 측정은 공극율, 진비중, 포화단위 체적중량, 건조단위 체적중량, 최대함수비 등을 측정하였다.

특히 Seismic velocity 측정은 일본 OYO사의 Model 5217A Seismic viewer를 사용하였다. 전시료에 대한 탄성파 측정은 포화상태의 P파, 건조상태의 P파, 그리고 건조상태의 S파를 측정하였으며, 측정방법으로는 Osciloscope상에 나타나는 파형에 대하여, 시료를 통과하는데 소요되는 시간을 μ-sec 단위로 읽어 이를 시료의 길이로 나누어서 탄성파속도를 구하였다. 이 경우 관측오차를 줄이기 위하여 처음 측정된 시료를 기억장치에 기억시켜 놓은 다음, 다른 Channel을 통하여 측정된 파형을 Osciloscope상에서 비교,

반복하였다.

여기서 포화상태란 시료를 수중에 넣어Vacuum pump로 계속 진공을 시켜 더 이상 무게의 변화가 생기지 않았을 때를 '포화상태'라 하였으며, 건조상태란 105℃의 Oven에서 72시간 건조시킨 상태를 '건조상태'라 하였다.

각 암석 Sample에 대한 측정결과, 포화 P파속도의 범위가 4.6~5.9 km/sec, 건조P파속도의 범위는 2.3~5.5km/sec, S파속도의 범위는 1.4~3.3 km/sec 로 분포되어 나타나고 있으며 공극률의 분포범위는 0.837~3.830% 이고, 밀도는 2.367~2.826 g/㎤. 이며, 최대함수비는 0.314~1.726%의 범위로 나타났다. 이 중에서 공극율(Porosity), 최대 함수비(Max. Wc), 진비중(SG) 포화P파속도(Vp sat)

Table 1. Results of index test.

Sample No.	Porosity (%)	Max. Wc. (%)	SG	Vpsat (m/sec)	Vpdry (m/sec)	ΔVp (m/sec)	Group
H1-1	1.603	0.610	2.670	5402	3711	1691	1
H1-2	1.331	0.523	2.578	5646	3868	1778	1
H1-3	1.810	0.756	2.438	5568	4033	1535	1
H1-5	3.554	1.538	2.396	4728	2307	2422	1
H1-6	1.709	0.647	2.687	5740	4213	1527	1
H2-1	1.142	0.431	2.684	5554	4089	1465	1
H2-2	0.944	0.367	2.600	5656	4122	1534	1
H2-3	2.468	1.038	2.437	5077	3578	1501	1
H2-4	2.228	0.898	2.538	5118	3575	1543	1
H2-5	3.077	1.186	2.677	5024	3267	1757	1
H2-6	1.815	0.709	2.607	5568	3802	1767	1
H2-7	2.025	0.788	2.624	5265	3646	1620	1
H2-8	1.816	0.691	2.676	5345	3971	1374	1
H2-9	2.314	0.919	2.577	5102	3544	1558	1
H5-1	1.524	0.548	2.826	5777	4720	1057	2
H5-2	1.462	0.568	2.614	5677	4800	877	2
H5-3	2.362	0.943	2.565	5468	4682	786	2
H5-5	2.555	1.057	1.481	5462	4605	857	2
H5-6	3.703	1.509	2.548	4631	2519	2111	2
H5-7	3.673	1.430	2.667	4811	3000	1811	2
H6-1	1.501	0.571	2.669	5480	4761	718	2
H6-2	1.436	0.533	2.735	5604	5085	519	2
H6-3	1.414	0.560	2.560	5697	5038	659	2
H6-4	1.245	0.532	2.367	5520	4972	548	2
H6-5	2.022	0.798	2.585	5343	4795	549	2
H6-6	2.889	1.075	2.767	4959	3743	1216	2
H6-7	1.775	0.686	2.634	5456	4885	571	2
H9-1	0.837	0.314	2.685	5903	5476	427	2
H9-2	1.065	0.412	2.614	5541	4813	728	2
H9-3	1.289	0.483	2.698	5600	5153	447	2
H9-4	1.633	0.628	2.642	5442	4540	902	2
H9-5	2.051	0.816	2.567	5447	4674	779	2
H9-6	2.732	1.139	2.466	5040	3763	1278	2
H9-7	3.837	1.565	2.544	4955	3623	1331	2
H10-1	1.039	0.383	2.742	5815	5375	440	3
H10-2	1.083	0.403	2.719	5869	5404	464	3
H10-4	1.246	0.484	2.607	5836	5323	513	3
H10-7	1.534	0.597	2.611	5830	5333	497	3
H10-8	1.512	0.612	2.508	5680	4955	725	3
H10-9	1.389	0.533	2.645	5697	5067	630	3
H10-10	4.043	1.672	2.520	4575	3114	1461	3
H11-1	1.122	0.428	2.650	5622	4814	809	3
H11-3	1.318	0.520	2.569	5557	4851	706	3
H11-5	1.115	0.445	2.536	5913	5030	882	3
H11-7	1.152	0.443	2.628	5812	4977	836	3
H11-9	0.920	0.359	2.584	5879	5315	564	3
H11-10	1.810	0.730	2.525	5654	4982	673	3
H11-11	3.079	1.255	2.541	5392	4222	1170	3
H11-13	2.114	0.832	2.596	5356	4421	935	3

및 건조P파속도 (Vp dry), 포화상태와 건조상태의 P파 속도차 (△Vp)의 분포양상을 Table 1에 표시하였다.

풍화도 관찰

현미경에 의한 풍화의 관찰결과 정장석이 대부분 Margin을 따라 풍화현상이 시작되었거나 약하게 풍화되고 있음을 보였으며Texture의 보존정도와 탈색 내지 변색정도도 양호하게 나타나고 있다. 사장석은 많은 부분에 심하게 풍화를 받아 지저분하게 나타나며 Crack 발달과 함께Texture가 파괴되어 나타남을 볼 수 있다. Biotite역시 Margin과 Cleavage를 따라 풍화가 진행되고 심하게 탈색 내지 변색된 것까지 볼 수 있었으며, 한편 대부분의 석영은 일정한 방향성을 보이는 여러 종류의 Crack을 보여주고 있다. 본 연구에서는 Irfan and Dearman(1978)이 분류한 화강암의 풍화도의 분류기준 중에서 광물입자의 탈색 내지 변색 정도, 흑운모와 장석의 화학적 분해정도, Texture의 보존정도 및 Crack발달 상태를 기준으로 하여 다음과 같이 풍화의 등급을 설정 하였다.

* 1등급(Fresh; F) : 모든 광물이 신선하고 풍화흔적이 전혀 없음(Fig. 3A).

* 1.5등급 (F / SW) : 균열면에 따라 풍화가 약하게 진행.

* 2등급 (Slightly weathered; SW) : 균열면에 따라 풍화가 비교적 진행된 상태로서 부분적으로 암석내부의 흑운모와 사장석에서 풍화의 흔적이 관찰되기 시작하고 정장석이 풍화를 받아 Clay화 되어감. 또한 광물 내에서 Crack이 발달 하기 시작 하였음(Fig. 3B).

* 2.5등급 (SW / MW) : 2등급과 3등급의 점이적 영역.

* 3등급 (Moderately weathered; MW) : 흑운모와 사장석의 풍화가 많이 진행되었으며, K-장석이 풍화받은 흔적이 관찰되며 광물내에Texture의 파괴가 진행되었고, Crack의 빈도 역시 암석 전부분에 걸쳐 증가 되면서 나타나고 있음(Fig. 3C).

* 3.5등급 (MW / HW) : 3등급과 4등급의 점이적 영역.

* 4등급 (Highly weathered; HW) : 이 등급 이상의 시료는 이번 실험에서 제외되었다.

이상과 같은 풍화도 관찰결과는Fresh한 것부터 Moderately weathered to highly weathered의 상태까지 나타나고 있으며 그 결과를 Table 2로 나타냈다. Table 2에서는 주로 현미경 관찰에 의하여 4개에 걸친 각 항목별 풍화등급을 결정하고 그 평균값을 전체의 풍화등급으로 결정하였다. De-

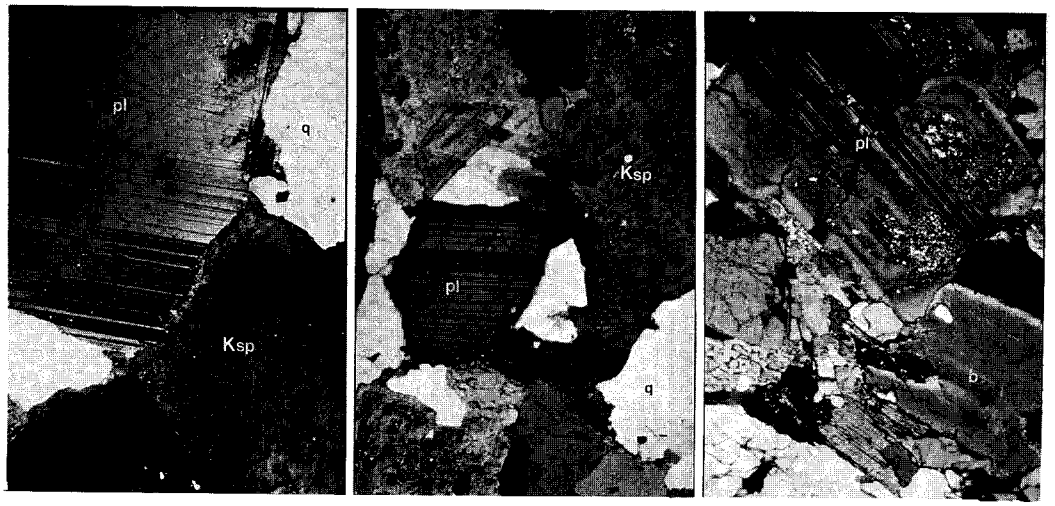


Fig. 3. Observation of degree of weathering on the microscope(q : quartz, pl : plagioclase, Ksp : K-feldspar, b : biotite). (A) Fresh rock, (B) Sligthly weathered rock and (C) Moderately weathered rock.

Table 2. Summary of the estimated degree of weathering based on microscopic observation.

SAMPLE	DECOMPOSITION				DISCOLORATION				TEXTURE			CRACK	DEGREE OF WEATHERING
No.	Or	Pl	Bt	MEAN	Or	Pl	Bt	MEAN	Or	Pl	MEAN		
H1-1	1.5	3	3	2.50	2.5	2.5	2	2.33	2.5	2	2.25	2.32	2.42
H1-2	2.5	2.5	2.5	2.50	2	2	2	2.00	2.5	2	2.25	2.26	2.38
H1-3	1.5	3	2.5	2.33	2	2.5	2.5	2.33	2	3	2.50	2.67	2.45
H1-5	3	3	3	3.00	–	–	–	–	–	–	–	–	3.00
H1-6	1.5	3	2.5	2.33	2.5	2.5	2	2.33	2.5	3	2.75	2.51	2.48
H2-1	1.5	2.5	1.5	1.83	1.5	2	1.5	1.67	1.5	2	1.75	1.97	1.81
H2-2	1.5	2	1.5	1.67	1.5	2	1.5	1.67	1.5	2	1.75	2.04	1.78
H2-3	1.5	2.5	2	2.00	–	–	–	–	2.5	2.5	2.50	2.15	2.22
H2-4	1.5	2.5	2	2.00	1.5	2	2	1.83	2	2.5	2.25	2.04	2.03
H2-5	2	3	2	2.33	2	2	2	2.00	3	2.5	2.75	2.43	2.38
H2-6	2.5	2	1.5	2.00	1.5	1.5	1.5	1.50	2	2.5	2.25	1.67	1.86
H2-7	1.5	2.5	2.5	2.17	2	2	2	2.00	3	2.5	2.75	2.42	2.34
H2-8	2	2	2	2.00	2	2	1.5	1.83	2	2	2.00	2.24	2.02
H2-9	1.5	3	2	2.17	2	2	2	2.00	2.5	2.5	2.50	2.25	2.23
H5-1	1.5	2.5	2	2.00	1.5	1.5	1.5	1.50	1.5	1.5	1.50	1.78	1.70
H5-2	2.5	2.5	2	2.33	2.5	1.5	2	2.00	2	2	2.00	2.44	2.19
H5-3	3	3	2.5	2.83	2	2.5	2.5	2.33	2.5	2	2.25	2.52	2.48
H5-5	2.5	3	2.5	2.67	–	–	–	–	–	–	–	–	2.67
H5-6	3.5	3	3	3.17	2.5	3	3	2.83	3	3	3.00	3.27	3.07
H5-7	3.5	3	3	3.17	3	3	3	3.00	3	3	3.00	3.17	3.09
H6-1	2.5	2.5	1.5	2.17	2	2	2.5	2.17	1.5	1.5	1.50	2.18	1.99
H6-2	1.5	3	3	2.50	2.5	2	2	2.17	2.5	2	2.25	1.89	2.20
H6-3	1.5	2.5	3	2.33	2	2	2.5	2.17	2.5	2	2.25	1.92	2.17
H6-4	2.5	2	2.5	2.33	2	2	2	2.00	2.5	2.5	2.50	1.84	2.17
H6-5	2.5	3	3	2.83	3	2.5	2.5	2.67	3	2.5	2.75	3.62	2.97
H6-6	3	3	3	3.00	3	3	2.5	2.83	3	2.5	2.75	2.25	2.71
H6-7	–	–	–	–	2.5	3	2.5	2.67	3	2	2.50	2.49	2.55
H9-1	2	2	1.5	1.83	1.5	1.5	1.5	1.50	2	1.5	1.75	1.73	1.70
H9-2	2	1.5	2.5	2.00	1.5	1.5	1	1.33	2	1.5	1.75	2.18	1.82
H9-3	2.5	2	2.5	2.33	2	2	2	2.00	2.5	2	2.25	2.29	2.22
H9-4	2.5	2.5	2	2.33	1.5	2	2	1.83	2.5	2.5	2.50	2.38	2.26
H9-5	3	2.5	2.5	2.67	2.5	2.5	2.5	2.50	3	2.5	2.75	2.33	2.56
H9-6	2.5	3	2.5	2.67	2	2	2.5	2.17	3	3	3.00	2.80	2.66
H9-7	3	3	3	3.00	2.5	2.5	2	2.33	3	3	3.00	2.82	2.79
H10-1	1.5	2.5	2.5	2.17	1.5	1.5	2	1.67	2	2	2.00	1.65	1.87
H10-2	1	2.5	2.5	2.00	1.5	1.5	2	1.67	2.5	1.5	2.00	1.75	1.86
H10-4	1	2.5	2	1.83	–	–	–	–	–	–	–	–	1.83
H10-7	1.5	3	1.5	2.00	2.5	2	2.5	2.33	2.5	2	2.25	2.14	2.18
H10-8	–	3	2	2.50	1.5	2	2	1.83	3	2.5	2.75	2.20	2.32
H10-9	1.5	2.5	1.5	1.83	1.5	2	2	1.83	3	2.5	2.75	2.52	2.24
H10-10	3	3	3	3.00	3	2.5	2.5	2.67	3.5	3	3.25	3.81	3.18
H11-1	1	1.5	1.5	1.33	1	1.5	1.5	1.33	1.5	1	1.25	1.26	1.29
H11-3	1.5	2	2	1.83	1.5	2	2	1.83	2	2	2.00	–	1.89
H11-5	1	1	1	1.00	1	1	1.5	1.17	2	1	1.50	1.18	1.21
H11-7	1.5	2	2	1.83	1.5	2.5	2.5	2.00	2.5	1.5	2.00	1.52	1.84
H11-9	1	1	2	1.33	1	2	2	1.50	1.5	2	1.75	1.20	1.45
H11-10	2	2.5	2.5	2.33	1.5	2	2	1.83	2.5	2.5	2.50	1.47	2.03
H11-11	3	3	2	2.67	2.5	3	3	2.83	3	2.5	2.75	2.15	2.60
H11-13	2	2	2.5	2.17	2	2	2	2.00	2	2	2.00	2.08	2.06

* Or :Orthoclase, Pl : Plagioclase, Bt : Biotite

composition이나 Discoloration, 조직의 보존정도에 대한 각 항목별 풍화등급의 기준은 상당히 주관적이긴 하나 Irfan and Dearman(1978)에 충실하고자 노력하였으며 Crack 발달 상태에 의한 풍화등급은 Crack 빈도에 중점을 두고 Decomposition이나 Discoloration, 조직의 보존정도에 의한 풍화등급의 평균치 사이에서 구해진 회귀방정식을 임시기준으로 하여 빈도별 등급이 결정되었다.

물성 측정치의 상관성

각 물성치 중에서는 역시 지금까지 대표적인 물리적 풍화기준으로 알려지고 있는 지진파속도와 공극율 또는 최대함수비와의 사이에서 비교적 높은 상관관계가 얻어졌다. Velocity와 최대함수비와의 상관관계는 (Fig. 4) 포화P파속도의 경우 상관계수 −0.90으로써 가장 좋은 상관관계를 보여주고 있으며 건조P파속도는 상관계수 −0.79로써 포화P파속도보다 낮은 상관도를 보이나 최대함수비 증가에 따라 속도 감소가 뚜렷한 것이 특징이고, S파속도의 경우는 상관계수가 −0.68로 가장 낮게 나타나고 있다. 공극율에 대한 Velocity의 변화양상(Fig. 5) 또한 최대함수율에 대한 Velocity의 변화양상과 대동소이 하여 상관계수 -0.90으로 비교적 좋은 포화P파속도-공극율 관계를 보여주고 있으며, 단지 건조P파속도와 S파속도의 경우는 최대함수비의 경우와 비교할 때 흩어짐 현상이 약간 크게 나타난다. 그러나 또하나의 주요물성인 밀도는 0.3 내외의 낮은 상관계수로 포화P파속도, 건조P파속도, S파속도의 어느 것과도 좋은 상관을 보여주지 못하고 있어 (Fig. 6) 앞에서의 공극율 또는 최대함수비와 속도간의 좋은 상관성과는 대조를 이루고 있다.

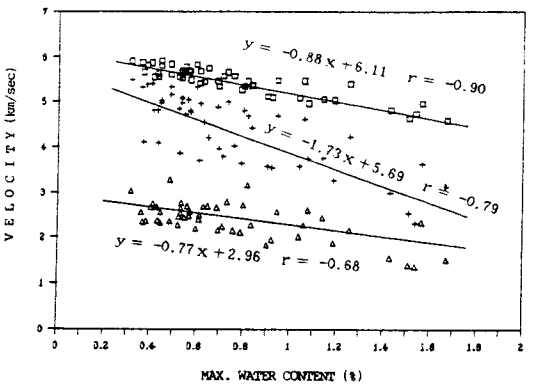


Fig. 4. Effect of max. water content in weathered granite on saturated P-wave (square). dry P-wave (cross) and S-wave(triangle) velocities. The regression equations are shown with their correlation coefficients(r).

이상의 결과는 우선 지진파속도가 암석의 실질부분의 밀도 보다는 공극의 양에 더 크게 영향을 받고 있음을 보여주고 있으며 공극의 양적 효과는 포화P파속도 보다는 건조P파속도에서 현저히 나타나고 있다. 아울러 지진파속도−공극율 또는 지진파속도−최대함수비의 상관관계에서 나타나는 흩어짐은 대체로 실질부분의 밀도효과와 암석의 이방성, 특히 공극의 형태에 기인한 것으로 판단된다. 물성선택에 있어서 공극의 양적영향과 실질부분의 밀도효과를 함께 반영시킨다는 입장에서 볼 때 최대 함수비 쪽이 공극율보다는 더 효과적일 것으로 예상될 수 있으며 P파속도−공

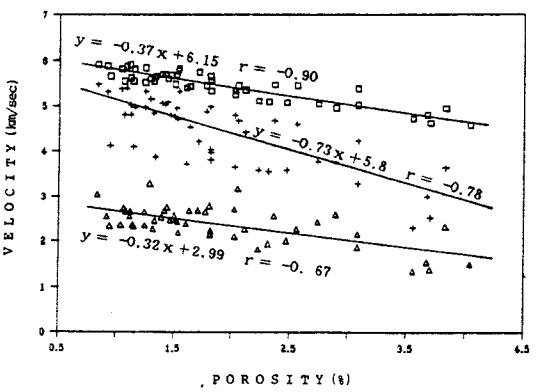


Fig. 5. Effect of porosity in weathered granite on saturated P-wave(square), dry P-wave (cross) and S-wave (triangle) velocities. The regression equations are shown with their correlation coefficients (r).

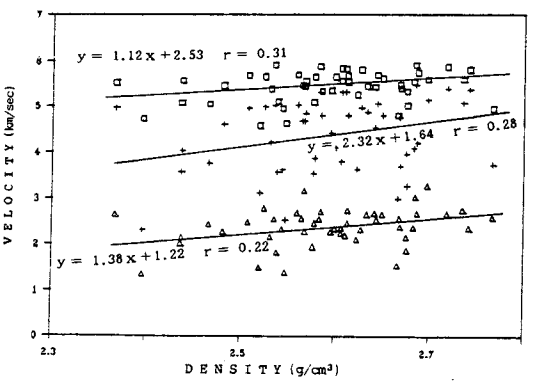


Fig. 6. Effect on density in weathered granite on saturated P-wave (square), dry P-wave (cross) and S-wave(triangle) velocities. The regression equations are shown with their correlation coefficients (r).

극을 관계에 비하여 P파속도-최대함수비 관계에서 미미하나마 상대적으로 나은 상관도가 얻어졌음이 이를 지지하고 있다.

한편 앞에서 상대적으로 높은 상관관계를 보인 Velocity-최대함수비 관계는 시료의 암상차에 따라 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났는바 Group별 구분을 실시하여 상관도 변화과정을 추적해보았다. Group별 상관도 비교를 위해서는 Velocity중에서 상대적으로 상관도가 떨어지며 변화폭이 큰 건조P파속도를 이용하였으며 암상구분은 앞에서 설명된 바와같이 Group 1, Group 2 및 Group 3으로 3구분하였다. 그 결과 상관계수 -0.79로 나타났던 건조P파속도-최대함수비와의 상관관계는 Groups 1, 2, 3으로 구분했을 때(Fig. 7) 상관계수가 각기 -0.91, -0.90 및 -0.93으로 현저히 증가하는 것으로 나타났다. 아울러 전체 자료의 Regression line을 경계로하여 볼 때 Group 1이 Regression line의 하부에 분포하는 반면 Group 2와 3에 속하는 자료는 Regression line의 상부에 분포하고 있어 뚜렷이 구분되면서 서로 다른 물리적특성을 지니고 있음을 보여준다고 할 수 있다. 이는 Group 1에 속하는 화강암의 경우 Group 2와 3에 속하는 화강암에 비하여 공극의 양적 팽창에 대한 지진파속도의 감소가 급격함을 의미한다. 아울러 Group 1이 일반적으로 풍화대가 깊게 나타나는 소위 중립질 혹운모화강암류에 속하는 사실과 연관시킬 수 있을 것으로 생각되며 최대함수비 증가가 풍화에 따른 공극의 양적 변화를, 지진파 속도감소가 풍화로 인한 암석의 물리적 특성변화를 대표한다고 할 때 Group 1에 속하는 중립질 화강암의 경우에는 공극의 양적 변화에 대하여 물성저하 현상이 상대적으로 민감하게 나타남을 의미하는 것으로 보여진다.

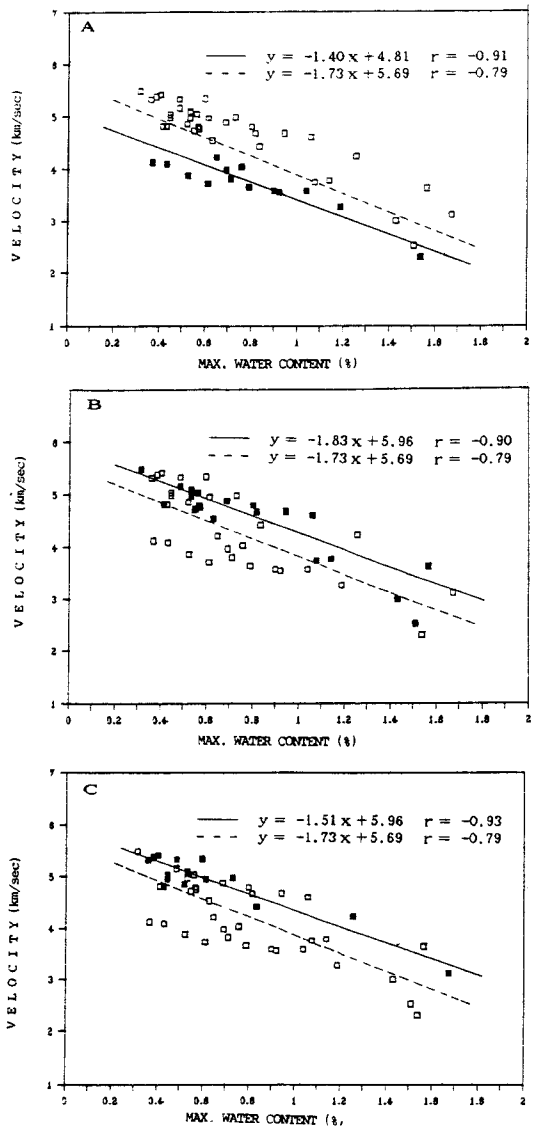


Fig. 7. Relation between siesmic velocity and max. water content for Groups 1(A), 2(B) and 3(C). Solid square and solid line represent the data set of each group and its regression line, respectively. While open square and dotted line represent total data set and its regression line, respectively.

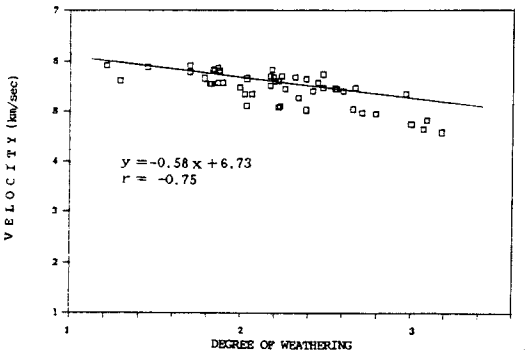


Fig. 8. Relation between saturated P-wave velocity and the degree of weathering. The regression equation is shown with its correlation coefficient (r).

풍화와 암석의 물성 변화

지금까지의 연구결과 풍화도와 비교적 밀접한 관련을 가지고 있을 것으로 기대되는 P파속도 및 최대함수비를 이용하여 Table 2에서 나타난 풍화등급과의 상관관계를 살펴보았다. 포화P파와 풍화도와의 관계는 상관계수 −0.73으로 비교적 높게 나타나지만 속도변화의 폭이 작은 문제점을

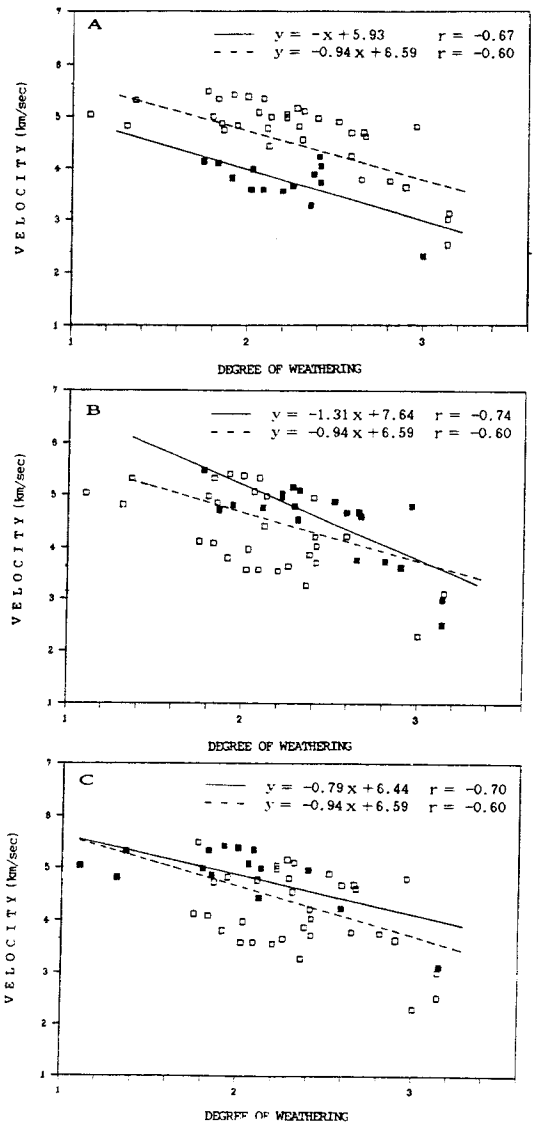


Fig. 9. Relation between dry P-wave velocity and degree of weathering for Groups 1(A), 2(B) and 3(C). Solid square and solid line represent the data set of each group and its regression line, respectively. While open square and dotted line represent total data set and its regression line, respectively.

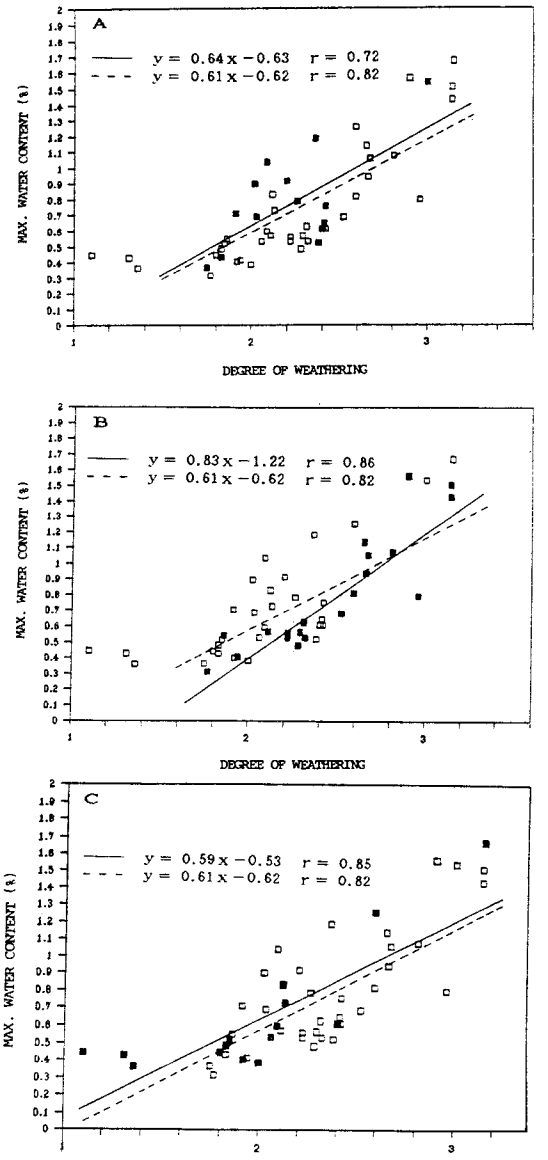


Fig. 10. Relation between max. water content and degree of weathering for Groups 1(A), 2(B), and 3(C). Solid square and solid line represent the data set of each group and its regression line, respectively . While open square and dotted line represent total data set and its regression line, respectively.

보이고 있다 (Fig. 8). 이에 비하여 건조P파와 풍화도의 관계는 (Fig. 9) 상관계수 자체는 −0.60으로 포화P파의 경우보다 낮게 나타나지만 풍화도의 증가에 따라 속도차가 뚜렷하여 실제 풍화기준으로 활용하기에는 유리한 것으로 기대되며 특히 Group별 구분에 의해서 현저한 상관도 증가현상이 인지된다. 즉 Group 1에 속하는 시료의 건조P파속도−풍화도 관계가 Fig. 9A에 나타나는 바와같이 상관계수가 −0.67로 향상되면서 전체 Scattergram의 아랫부분을 점유하는 데 비하여 Group 2와 3은 상관계수가 -0.74와 −0.70으로 비교적 좋은 상관도로써 대체로 Scattergram의 윗쪽영역을 차지하고 있다 (Fig. 9B, C).

최대함수비와 풍화도와의 관계(Fig. 10)는 전체 상관계수 0.82로써 P파속도와 풍회도의 관계 보다 좋은 상관도로 풍화도가 증가할수록 최대 함수비가 함께 증가함을 보인다. 그러나 최대함수비−풍화도의 상관관계는 암상차에 따른 Group별 세분에 의해서는 별로 상관도 증가가 인지되지 않는 특성을 보인다. 이는 최대함수비가 공극의 형태보다는 단순히 공극의 양을 주로 반영하는 파라메타임을 감안할 때 암상차이가 큰 변수가 되지 못하리라는 추론이 가능하며 이 점은 역으로 최대함수비가 풍화정도를 나타내는 가장 보편적인 기준이 될 수 있는 가능성을 시사해주고 있는 것으로서 최대함수비를 변질지수라고 부르는 것과도 잘 통한다고 하겠다.

한편 지금까지의 연구결과 비교적 상관성이 좋으며 비교적 좋은 풍화등급 기준으로 기대되는 건조P파속도 및 최대함수비를 대상으로하여 각종 항목별 풍화등급과의 상관성을 살펴보았다. 최대함수비의 경우에는(Fig. 11) 화학적 분해정도 (Fig. 11A)와 조직의 보존정도 (Fig. 11B)에서 상관계수 0.76 내외의 좋은 상관관계를 보이는데 비하여 Crack 빈도 (Fig. 11C)와 탈색 내지 변색정도 (Fig. 11D)가 0.7이하의 상대적으로 낮은 상관도를 보인다. 건조P파속도에 대해서는 화학적 분해정도나 조직의 보존정도에 의한 풍화등급 (Fig. 12A, B)보다는 Crack발달에 의한 풍화등급(Fig. 12D)은 최대함수비의 경우와 마찬가지로 가장 상관성이 낮게 나타난다. 전반적으로 1등급부근에서의 흩어짐 현상이 크고 2등급 이후에서야 어느 정도 좋은 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타난다.

이상의 결과로 미루어 볼 때 화학적 분해정도는 최대함수비와, Crack의 발달은 지진파속도와 상대적으로 강한 상관관계를 보인다고 하겠으며 조직의 보존정도는 양측 모두 비슷하게 관련있는 것으로 나타난다. 이에 비하여 일반적으로 좋은 풍화기준으로 알려지고 있는 탈색 내지 변색정도는 지진파속도와 최대함수비의 어느 것과도 크게 연관되지 않는 것으로 나타나 흥미로운데 이는 탈색 내지 변색정

Table 3. Summary of physical properties grouped by degree of weathering.

	Fresh (F)	Slightly Weathered (SW)	Moderately Weathered (MW)
Max.Water Content (%)	0.411 0.359~0.445	0.693 0.484~1.186	1.537 1.430~1.672
Porosity (%)	1.025 0.920~1.122	1.672 1.245~3.077	3.743 3.554~4.043
Specific Gravity	2.590 2.536~2.650	2.595 2.437~2.735	2.533 2.396~2.667
VP_{sat} (m/sec)	5805 5622~5913	5482 5077~5830	4686 4575~4811
Vp_{dry} (m/sec)	5053 4814~5315	4361 3267~5333	2735 2307~3114
ΔVp (m/sec)	751 546~882	1120 447~1788	1951 1461~2422

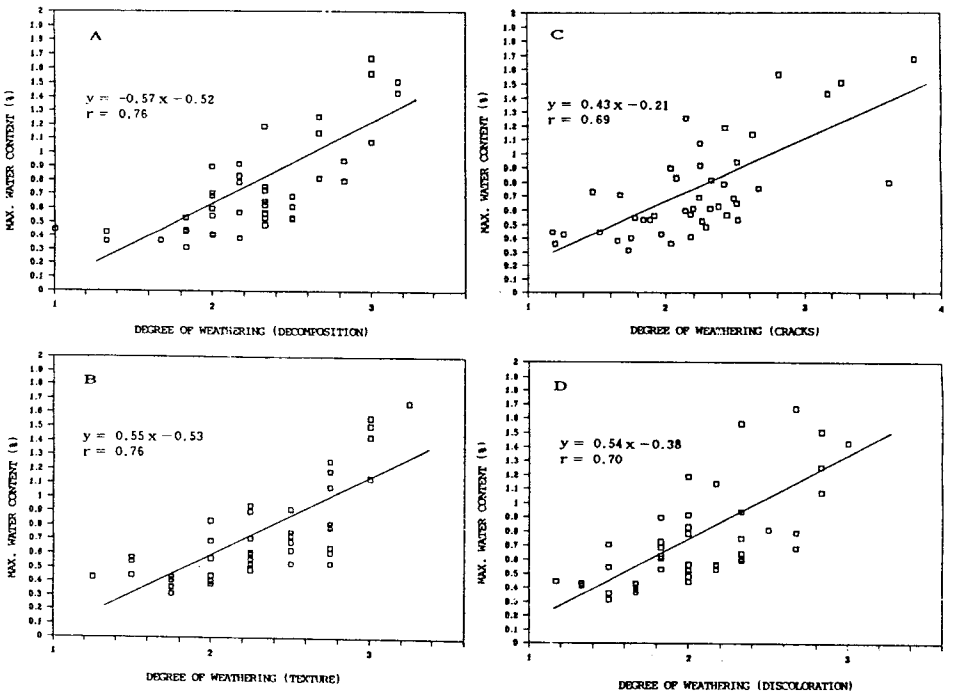


Fig. 11. Max. water content against degree of decomposition(A), presence of original texture (B), crack frequency (C) and degree of discoloration (D) in weathered granites.

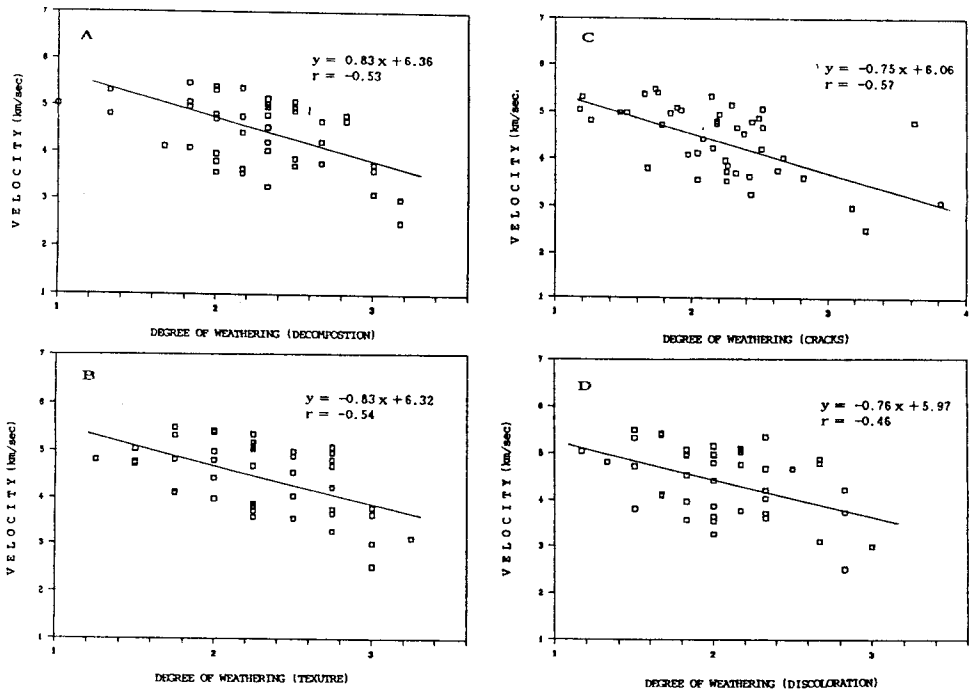


Fig. 12. Dry P wave velocity against degree of decomposition(A), presence of original texture (B), crack frequency(C) and degree of discoloration (D) in weathered granites.

도가 한반도의 화강암의 풍화기준이 되지 못한다는 기존의 연구결과(Lee and Freitas, 1989)와 일치한다고 볼 수 있다.

이와같이 풍화에 따른 각종 물리적 성질은 상당한 진폭을 가지고 흩어져 있는 경향을 보이나 최대함수비, 공극률, 포화P파속도, 건조P파속도, 속도차(△Vp)등이 분명한 Trend를 보이면서 변화하고 있음을 보였으며 풍화도에 따른 각 항목별 값의 변화는 Table 3에서 보이는 바와 같이 요약되었다. Table 3에서는 풍화등급 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5중에서 중간분류기준인 1.5, 2.5, 3.5, 등급을 제외시키고 일반적 암반분류기준(Dearman, 1976)인 Fresh rock(1등급), Slightly weathered rock (2등급), Moderately weathered rock (3등급) 만을 고려한 것으로 객관적 풍화분류기준으로 사용될 수 있는 가능성이 충분함을 보인다. 그 중에서도 밀도, S파속도 등은 너무 흩어진 정도가 심하여 풍화기준으로 활용하기가 곤란한 것으로 나타났으며, 반면 최대함수비와 공극률의 분포는 풍화도를 가늠할 수 있는 비교적 확실한 기준으로 나타났으며, 포화P파속도 및 건조P파속도 또한 비교적 좋은 관계를 보이고 △Vp와 앞에서의 각 물성치로부터 유도된 탄성계수들이 풍화기준으로 활용될 수 있는 가능성을 보였다. 더우기 앞에서 설명된 바와같이 암상에 따른 각 Group별 구분에 의해서 풍화도-물성간에 상관도가 증가됨을 감안한다면 그 가능성은 더더욱 커질 것으로 기대된다.

토의 및 결론

이상과 같은 일련의 실험과 분석은 화강암의 물리적 특성 상호간에 존재하는 일반적인 상관관계와 암석의 물리적 풍화와 화학적 풍화가 가지는 의미 내지 그 상호관계의 추적에 도움이 되었다. 그러나 풍화문제에 접근하고자 할 때, 특히 풍화등급의 정량화를 시도하고자 할 때 부딪히는 가장 큰 어려움은 어떠한 형태로든 간에 존재해야 할 객관적인 기준이 없다는 근본적인 문제점으로 부터 본 연구 또한 크게 벗어나지 못하는 한계를 드러내었다. 풍화현상 자체만 하더라도 화학적풍화와 기계적풍화로 풍화현상 내지 풍화형태가 다르며 어떠한 현상에 중점을 두어야하는지도 여전히 어려운 문제로 남아있다. 본 연구에서는 부득이 현미경 및 육안관찰에 의한 풍화도를 기준으로 하여 포화P파속도, 건조P파속도, S파속도, 최대함수비, 공극율, 밀도 등 암석의 물리적 특성치와 비교하면서 해결의 실마리를 찾고자 하였다. 현미경 및 육안관찰에 의한 풍화도는 연구자에 따라 심한 기준의 차이를 보이고 무엇보다도 관찰자의 주관이 크게 작용하는 등 절대적인 풍화기준과는 거리가 먼 것이 사실이다. 그러나 X-ray나 Microprobe 등을 통한 정량적 접근이 아직까지 큰 성과를 보여주지 못하는 시점에서 육안이나 현미경관찰 결과가 최소한 화학적풍화를 대변하는 가장 보편적인 기준으로 활용될 수 밖에 없는 어려움이 있다. 이에 비하여 물리적 특성치는 비교적 객관적이며 정량적 기준이 된다는 측면에서는 매력적이라 할 수 있으나 각 물성치의 특성이 서로 다르게 나타나는 경우가 많아 어느 항목을 어떻게 적용시켜야 하는 문제에 이르면 아직까지는 많은 문제점을 노출시키고 있다.

결국은 절대적기준 부재의 여건 속에서 비록 불완전한 기준이라 하더라도 그들을 상호대비 시키는 과정을 통하여 절대에 가까운 기준을 만들어 내는 일에 기대를 걸어야 할 것이다. 이러한 관점에서 풍화 진행의 정도를 달리하는 암석시료를 대상으로하여 비교적 좋은 상관도가 확인된 P파속도와 최대함수비가 알려지고 있는 이상으로 효과적인 풍화기준이 될 가능성이 있으며 현미경 및 육안관찰에 의한 풍화등급과의 비교결과가 그 가능성을 지지하고 있다. 금번연구는 연구 목적상 현미경 및 육안관찰결과를 절대적 기준으로 일시 사용한 것이나 같은 관점에서 P파속도나 최대함수율을 일시적으로 절대기준화 시킨 후 현미경 및 육안관찰 결과를 수정해 보는 노력 또한 의미있을 것이며, 그러므로써 풍화과정 중에서 Fresh rock에서 Slightly weathered rock사이에서의 전반적으로 떨어지는 상관도 문제를 해결할 실마리가 보이던가 최소한 금번연구결과에서 나타난 상관보다는 좋은 상관관계가 나타날 것으로 기대된다. 설혹 그 가능성을 배제한다 하더라도 지금까지의 연구결과 최대함수비를 비롯한 물성치들이 충분히 효과적인 풍화기준으로 활용될 수 있는 것으로 나타났으며 이는 특히 화강암을 암석학적 특성차에 의하여 세분함으로써 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 나타났다.

이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 측정된 각종 Physicsl parameters중에서, Seismic velocity와 최대함수비 사이에 비교적 좋은 상관관계를 나타났다.
2. 아울러 P파속도, 최대함수비는 풍화를 가늠하는 효과적인 Parameter로 나타났으며 특히 최대함수비가 현미경 관찰에 의한 풍화등급과 가장 좋은 상관관계를 보였다.

3. P파속도, 특히 건조P파속도는 암석학적 특성차에 의하여 Grouping하는 경우, 보다 효과적인 풍화기준이 될 수 있음을 보였다.
4. Irfan and Dearman의 풍화기준(1978)중에서 광물의 화학적 분해정도와 Crack의 빈도가 물리적 풍화현상과의 상관이 가장 크게 나타났다.
5. K장석 보다는 사장석의 함량이 많은 소위 중립질 혹운모화강암이 타 화강암류에 비하여 풍화의 진행에 따른 물성치 저하가 현저한 것으로 나타났다.
6. 물성 측정에 의한 정량적인 풍화도 구분의 가능성이 보였다.

사 사

이 연구는 문교부 학술진흥재단 자유공모과제인 "풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구"의 일부이며 연구비를 지원해 준 학술진흥재단측에 감사드린다. 아울러 원고 작성을 많이 도와준 강원대학교 지구물리학과 이인훈 조교에게 고마움을 표하고 싶다.

참 고 문 헌

김영화(1978) 함수률의 변화에 따른 지진파 속도의 변화 특성에 관하여. 서울대학교 석사논문.

이경운, 김민규(1988) 국내 화강암의 역학적 특성. 한국과학기술원단체 총연합회, p. 73-86.

이수곤(1989) 서울화강암의 지질공학적 특성. 대한광산 지질학회 제22차 학술발표회.

이희근, 이정인, 양형식(1983) 우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성 연구(제2집). 대한 광산학회지, 20권, p. 101-109.

Balakrishna, S. and Ramana, Y. V. (1967) Laboratory and field velocity measurements in granites. Indian Geophys. Union, v. 4, p. 147-156.

Barton, N. R. (1971) A relationship between joint roughness and joint shear strength. Proceedings of International Symposium on Rock Mechanics (Rock Fracture), Nancy, France, p. 1-8.

Deer, D. U. (1968) Geologiccal consideration. Rock mechanics in engineering pratice, John Wiley.

Duncan, N. (1969) Microcracks in crustal igneous rocks: Physical properties, in the Earth's Crust. Geophys. Monogr, Ser., v. 20, p. 95-117.

Feves, M., Simons, G. and Siegfreid, R. (1977) Microcrack in crustal igneous rocks: Physical properties, in the Earth's Crust. Monogr. Ser., v. 20 p. 95-117.

Hamrol, N. (1969) A quantitative classification of weathering and weatherbility of rocks. Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. En., v. 5, p. 771-774.

Iliev, I. G. (1970) An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physicochemical properties. Proc. Int. Congr. Int. Soc. Rock Mech., v. 2, p. 109-114.

Inoue, M. and Ohomi, M. (1981) Relation uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock. Proc. Int. Symp. of Weak Rock, v. 1, p. 9-14.

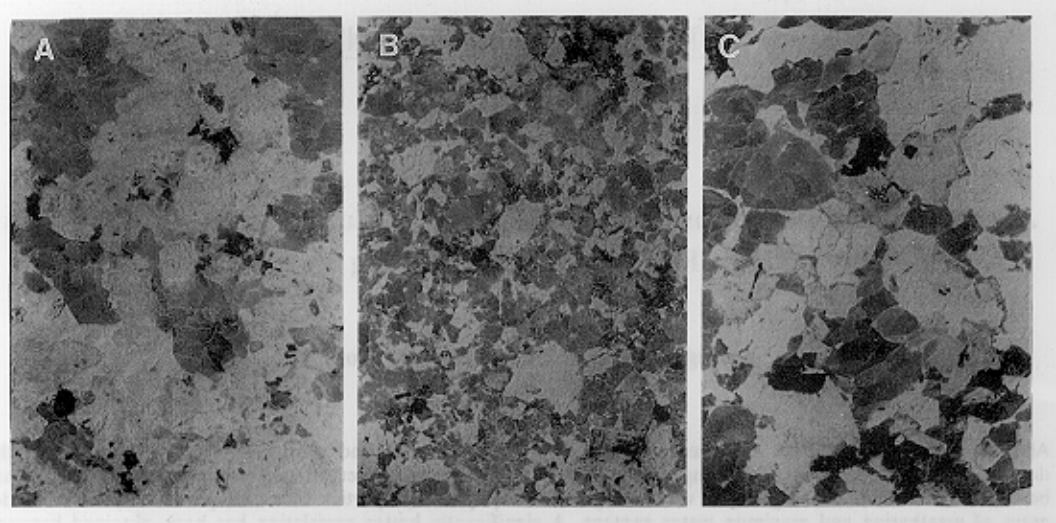
Irfan, T. Y. and Dearman W. R. (1978) Engineering classification and index properties of a weathered granite. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, v. 17 p. 79-90.

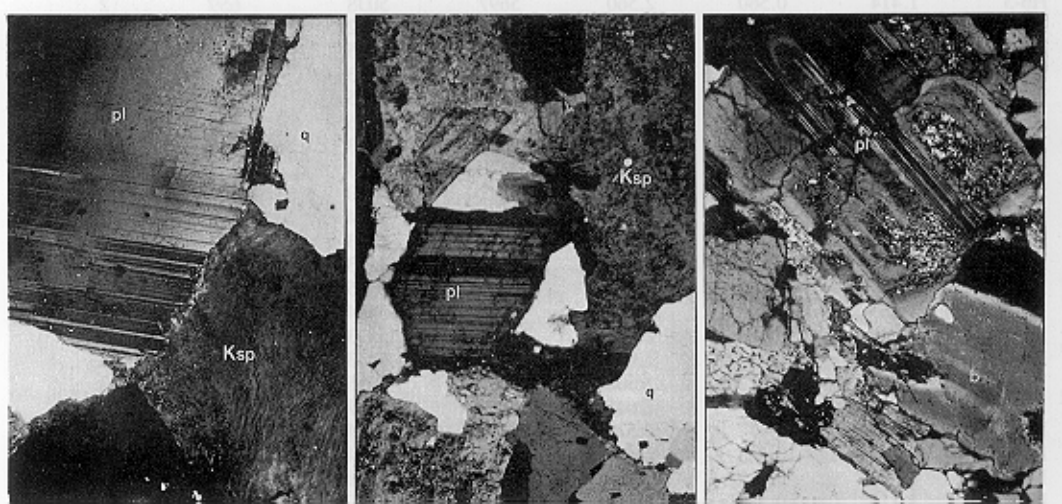
Judd, W. and Haber, C. (1961) Correlation of rock properties by statistical method, Int. Symp. Mining Res., Missouri Sch. Mines, Rolla, Mo.

Lee, S. G. and De Freitas, M. H (1989) A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. Quarterly Jour. Engineering Geology, v. 22, p. 31-48.

Press, F. (1968) Seismic velocities, Handbook of physical constants. Geol. Soc. Am. Memoir, No. 97.

Ruxton, B. P. and Berry Leonard (1957) Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. Bulletin of the Geological Society of America, v. 68, p. 1263-1292.


A
B
C


pl
q
Ksp
Ksp
pl
q
pl
b