

화강암의 풍화현상에 수반되는 물성변화의 특성

A study on the variation of rock properties of weathered granites

김 영 화 (Kim, Yeong Hwa)

강원대학교 지구물리학과

장 보 안 (Jang, Bo An)

강원대학교 지구물리학과

요약/Abstract

암석의 풍화 등급 정량화의 한 시도로써 각종 물리적 특성치의 변화 양상을 추적하고 이를 기존의 육안이나 현미경 관찰에 의한 풍화등급과 상호 비교 분석하였다. 이용된 물리적 특성치는 비중, 공극율, 초음파 종파속도 및 일축압축 강도였으며, 암석 관찰에 의한 풍화등급과의 상관은 공극율과 종파속도가 비중과 일축압축 강도에 비하여 상대적으로 좋은 상관도를 보여 심한 압상 차이만 조정된다면 공극율과 종파속도가 알려지고 있는 이상으로 효과적인 풍화 기준이 될 수 있을 것으로 나타났다.

Granite core samples and bulk samples were first subjected to petrographic examination to determine weathering degrees. Secondly, their physical or mechanical properties including specific gravity, porosity, sonic wave velocity and uniaxial compressive strength were measured. The results were correlated to investigate the influences between properties including physical and mechanical properties, weathering degrees, and rock textures. Porosity and P wave velocity were found the most useful indices in determining the weathering degrees of granites.

서언

암반, 암석의 기초공학적 성질을 좌우하는 가장 중요한 요소 중의 하나라고 할 수 있는 풍화의 정도(Weathering Degree)에 관한 연구는 조암광물의 조성에 관한 지질학적 연구(Ruxton and Berry, 1957)를 위시하여 암석의 역학적 성질의 변화에 관한 연구 (Judd and Huber, 1961; Deere, 1968)와 종파속도와 역학적 특성을 중심으로한 각 풍화 특성 상호간의 관련성(Hamrol, 1961; Press, 1966; Balakrishna and Ramana, 1967; Duncan, 1969; Iliev, 1970; Barton, 1971; Inoue and Ohomi, 1981)등에 이르기까지 다양한 연구성과가 보고되고 있다.

국내에서도 함수율의 변화에 따른 지진파 속도의 변화특성에 관한 연구(김영화, 1978)와 암석의 역학적 특성에 관한 연구(이희근 외, 1983; 김경운 외, 1989) 및 화강암의 풍화에 따른 각종 지질공학적 특성변화연구(이수곤, 1989; Lee and De Freitas, 1989; 김영화, 홍순호, 1990)등이 보고되어 있다.

특히 김영화와 홍순호(1990)는 지진파 속도를 중심으로 공극율, 비중, 최대 함수비 등 물리적 특성치에 의한 풍화도의 정량화를 시도하였으며 그 중에서 지진파속도와 최대함수비가 효과적인 풍화지수임을 보고하였다.

본 연구에서는 시료수의 확대와 시

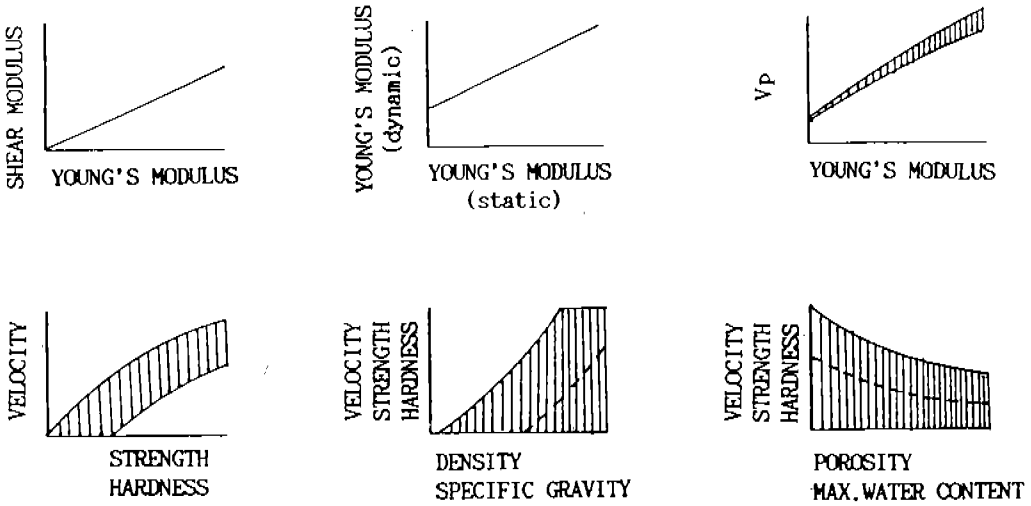


Fig.1 Relationship between physical properties of rocks (modified after Judd and Huber, 1961).

험 방법의 추가에 의하여 김영화와 홍순호 (1990)의 연구결과를 재검토하고 풍화지수의 관점에서 지진파속도, 압축강도, 공극율(또는 최대함수비)의 역할을 상호 비교하므로써 화강암의 풍화도 기준으로서의 각 물리적 특성치의 가능성과 그 한계를 알아 보고자 하였다.

시편제작 및 물리적 특성치 결정

이 연구에 이용된 화강암 시료는 중생대 쥐라기에 속하는 충청남도 공주부근의 한 시추공에서 채취한 21개의 시료(이하 쥐라기 화강암: J granite)와 중생대 백악기에 속하는 경상분지 일원의 7개 지역 노두로부터 채취된 49개의 화강암 시료(이하 백악기 화강암: C granite)이다. 백악기 화강암은 김영화와 홍순호(1990)의 연구에서 이용된 시료로서 중립질이며 사장석의 양이 상대적으로 우세한 소위 혹은 운모 화강암(C1 granite)을 위시하여 세립

질(C2 granite)에서 조립질(C3 granite)에 이르기까지 입도와 모드 조성 등에서 약간의 차이를 보이는 여러 암상의 화강암으로 구성된다(김영화, 홍순호, 1990). 쥐라기 화강암 시료는 암상이 백악기의 C1 화강암과 비슷하며 입자의 크기가 약간 큰 중·조립질 화강암에 속한다.

물성측정을 위한 시편제작은 지름 32mm, 높이 60mm 내외의 Core sample로 제작되었다. 암석의 물리적 특성치 결정은 지진파속도 측정을 위시하여 공극율, 진비중, 압축강도 측정에 의하여 이루어졌다. 공극율, 진비중 등의 Index property 측정은 수침법을 이용하였으며 압축실험에서는 직경과 높이의 비를 1:2로 한 Core 시료에서 일축압축강도를 구하였다. Seismic velocity 측정은 Sonic viewer를 사용한 초음파 Pulse법에 의하여 전체 시료에 대한 건조상태의 P파 속도를 구하였다.

이와 같이하여 얻어진 화강암의 물리적 특성치는 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1 Summary of physical properties of weathered granites

No.	S.G.	Prsty	Vp	Strngth	W.D.	Remarks	No.	S.G.	Prsty	Vp	W.D.	Remarks
1	2.89	1.01	4.70	947.52	1.0	J	36	2.83	1.52	4.72	1.70	C2
2	2.64	0.77	4.40	520.45	1.0	J	37	2.61	1.46	4.80	2.20	C2
3	2.88	0.91	4.60	511.70	1.0	J	38	2.57	2.36	4.68	2.50	C2
4	2.65	1.12	4.20	698.81	1.0	J	39	2.48	2.56	4.61	2.70	C2
5	2.78	0.47	5.30	651.70	1.0	J	40	2.55	3.70	2.52	3.10	C2
6	2.67	0.53	5.10	804.09	1.0	J	41	2.67	3.67	3.00	3.10	C2
7	2.67	0.65	4.70	438.60	1.0	J	42	2.67	1.50	4.76	2.00	C2
8	2.70	1.20	4.00	586.08	2.0	J	43	2.74	1.44	5.09	2.20	C2
9	2.65	1.42	4.30	362.84	2.0	J	44	2.56	1.41	5.04	2.20	C2
10	2.69	1.10	4.40	436.36	2.0	J	45	2.37	1.25	4.97	2.20	C2
11	2.66	1.00	4.70	431.34	2.0	J	46	2.59	2.02	4.80	3.00	C2
12	2.64	1.60	3.80	589.10	2.0	J	47	2.77	2.89	3.74	2.70	C2
13	2.53	4.84	2.90	346.98	3.0	J	48	2.63	1.78	4.89	2.60	C2
14	2.64	3.18	3.30	433.21	3.0	J	49	2.69	0.84	5.48	1.70	C2
15	2.59	2.33	3.80	504.32	3.0	J	50	2.61	1.07	4.81	1.80	C2
16	2.61	1.44	3.80	435.41	3.0	J	51	2.70	1.29	5.15	2.20	C2
17	2.64	3.57	2.90	220.91	3.0	J	52	2.64	1.63	4.54	2.70	C2
18	2.78	3.02	3.50	294.55	3.0	J	53	2.57	2.05	4.67	2.60	C2
19	2.55	5.60	2.60	171.23	4.0	J	54	2.47	2.73	3.76	2.70	C2
20	2.56	7.67	2.70	150.83	4.0	J	55	2.54	3.83	3.62	2.80	C2
21	2.64	5.08	2.50	361.01	4.0	J	56	2.74	1.04	5.38	1.90	C3
22	2.670	1.603	3.71	-	2.4	C1	57	2.72	1.08	5.40	1.90	C3
23	2.578	1.331	3.87	-	2.4	C1	58	2.61	1.25	5.32	1.80	C3
24	2.438	1.810	4.03	-	2.5	C1	59	2.61	1.53	5.33	2.20	C3
25	2.396	3.554	2.31	-	3.0	C1	60	2.51	1.51	4.96	2.30	C3
26	2.687	1.709	4.21	-	2.5	C1	61	2.65	1.39	5.07	2.20	C3
27	2.684	1.142	4.09	-	1.8	C1	62	2.50	4.04	3.11	3.20	C3
28	2.600	0.944	4.12	-	1.7	C1	63	2.65	1.12	4.81	1.30	C3
29	2.437	2.468	3.58	-	2.2	C1	64	2.57	1.14	4.85	1.90	C3
30	2.538	2.228	3.58	-	2.0	C1	65	2.54	1.12	5.03	1.20	C3
31	2.677	3.077	3.27	-	2.4	C1	66	2.63	1.15	4.98	1.80	C3
32	2.607	1.815	3.80	-	1.9	C1	67	2.58	0.92	5.32	1.50	C3
33	2.624	2.025	3.65	-	2.4	C1	68	2.53	1.81	4.98	2.00	C3
34	2.676	1.816	3.97	-	2.0	C1	69	2.53	3.08	4.22	2.60	C3
35	2.577	2.314	3.54	-	2.2	C1	70	2.60	2.11	4.42	2.10	C3

S.G. : Specific Gravity Prsty : Porosity Strngth : Compressive Strength
 W.D. : Weathering Degree
 J : Jurassic granite C1-C3 : Cretaceous (Group 1-3) Granite.

물성 측정치의 상관성 추적

물성(物性) 사이에 나타나는 일반적인 상관 관계는 Fig.1에서 나타나는 바와 같이 직선관계, 곡선관계 및 Zone의 형태등으로 분류될 수 있다. 그러나 이론적으로 양호한 상관관계가 기대되는 몇몇 탄성계수 상호간이나 탄성계수와 특정한 물성간의 관계를 제외한 대부분의 경우는

Zone 형태를 보인다(Judd and Huber,1961). 암상이 비교적 단순하고 물성적으로 비교적 등방 균질한 것으로 간주되는 화강암의 경우라 하더라도 각 물리적 특성치의 상당히 흩어진 Zone형태의 상관성을 보인다. 그러나 선택되는 물리적 특성치의 종류에 따라서 상관의 정도가 크게 달라지며 이는 다시 암상에 따라서 크게 영향을 받는것으로 나타난다(김영화, 홍순호, 1990).

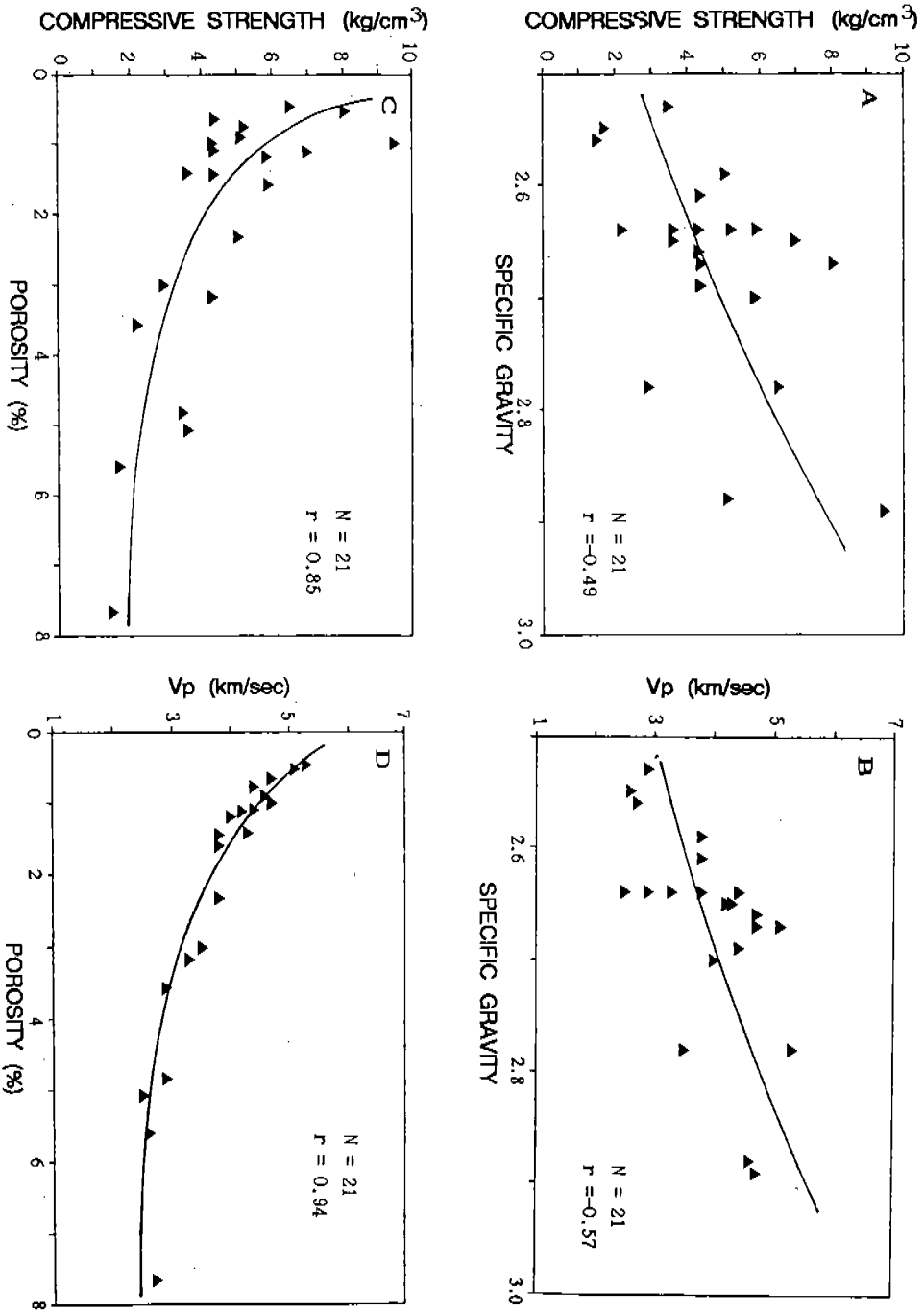


Fig. 2 Relation between compressive strength and specific gravity(A), between P wave velocity and specific gravity(B), between compressive strength and porosity(C) and between P wave velocity and porosity(D) from J granite.

Fig.2는 암반 분류에 있어서 대표적인 두 물리적 특성치인 압축강도와 P파속도에 대한 Index Property의 관계를 동일 암상의 주라기 화강암 시료 21개를 대상으로 한 결과로써 비교적 높은 상관도의

Zone 형태를 보여 주고 있다. 물리적 특성치간의 상관도 분석 결과는 적용 model의 종류에 따라 상관계수가 크게는 0.1까지 차이를 보이나 대체로 Reciprocal Model에 가장 잘 부합되었다. 진비중에 대한

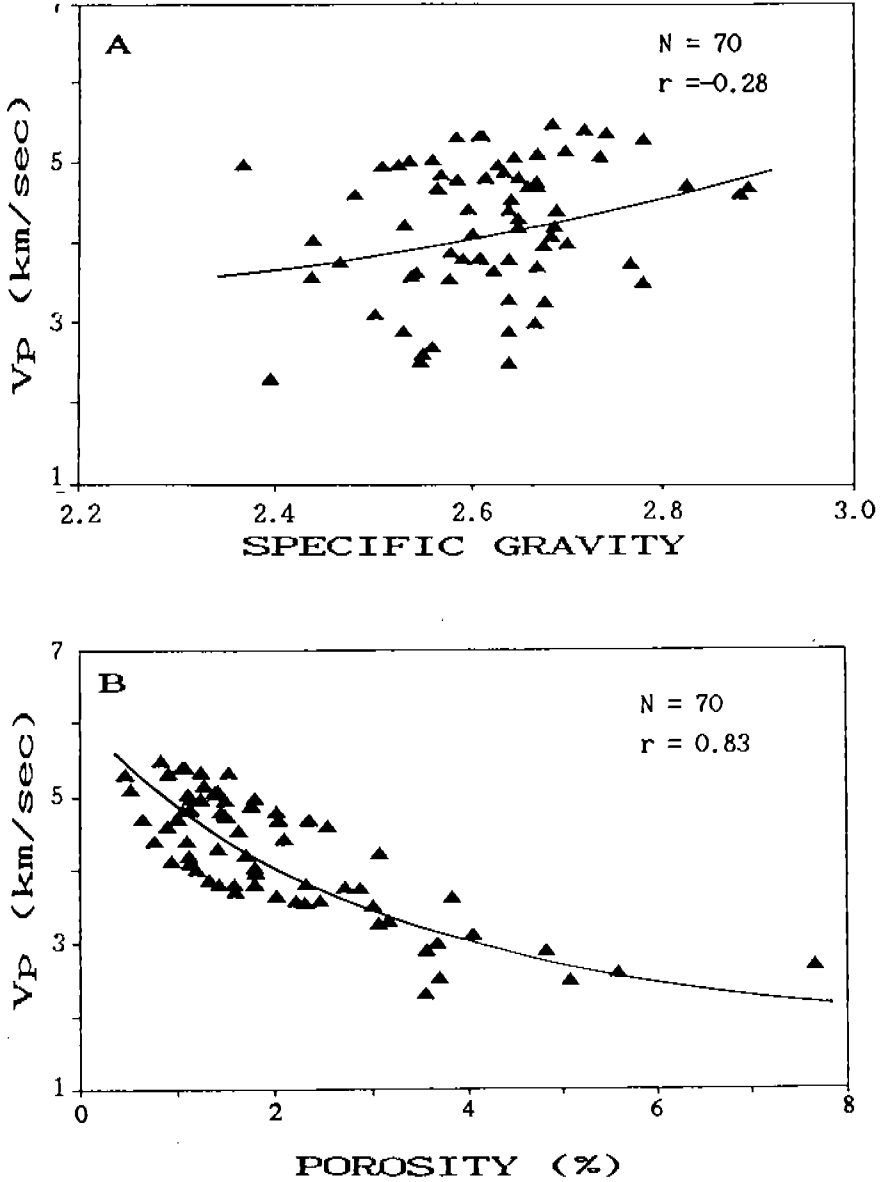


Fig.3 Relation between P wave velocity and specific gravity (A) and between P wave velocity and porosity (B) from the whole data.

압축 강도(Fig.2A) 및 P파 속도의 상관 관계 (Fig.2B)는 상관계수가 각기 -0.49와 -0.57로 나타났으며 공극율에 대한 압축강도 (Fig.2C) 및 P파속도와와의 관계(Fig.2D)는 상관계수가 각기 0.85와 0.94로 나타나고 있어

비중과 공극율 사이에 현저한 차이가 있음을 보이고 있다.

한편, 백악기 화강암을 포함한 전체 시료를 대상으로 하면 물리적 특성치 상호간에 나타나는 상관도는 비교적 동일

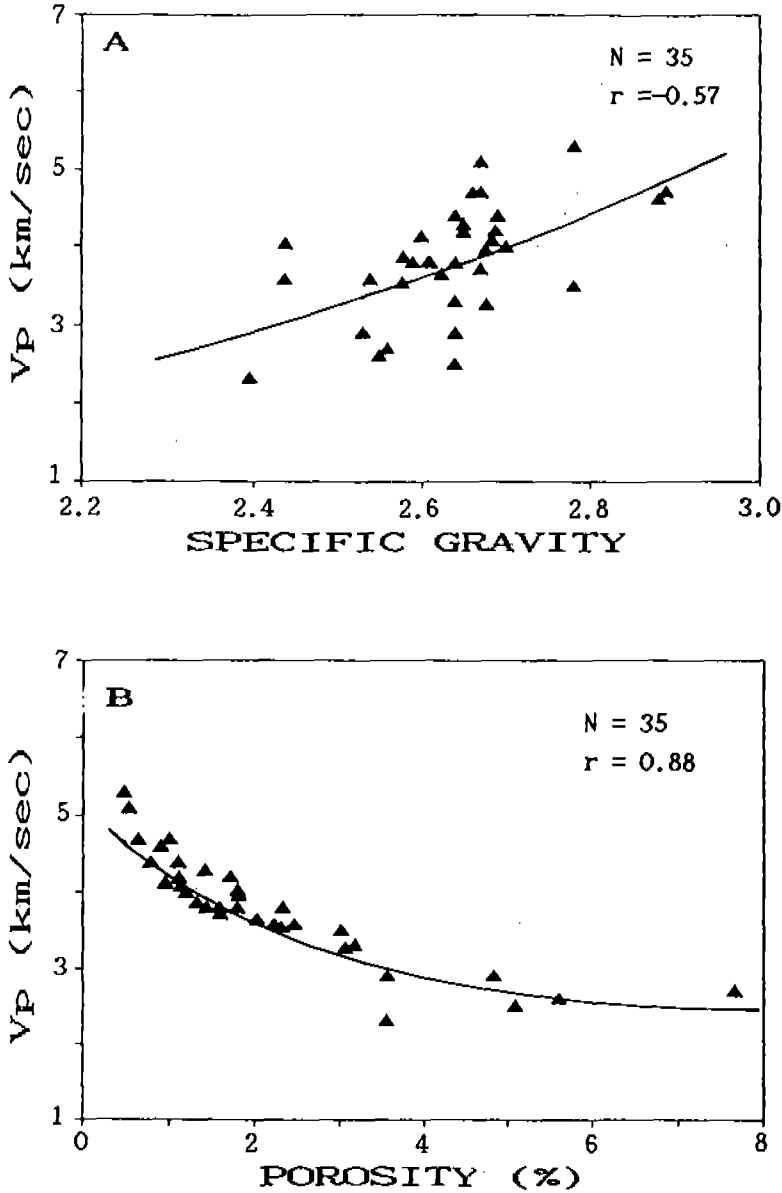


Fig.4 Relation between P wave velocity and specific gravity (A) and between P wave velocity and porosity (B) from J and C1 granites.

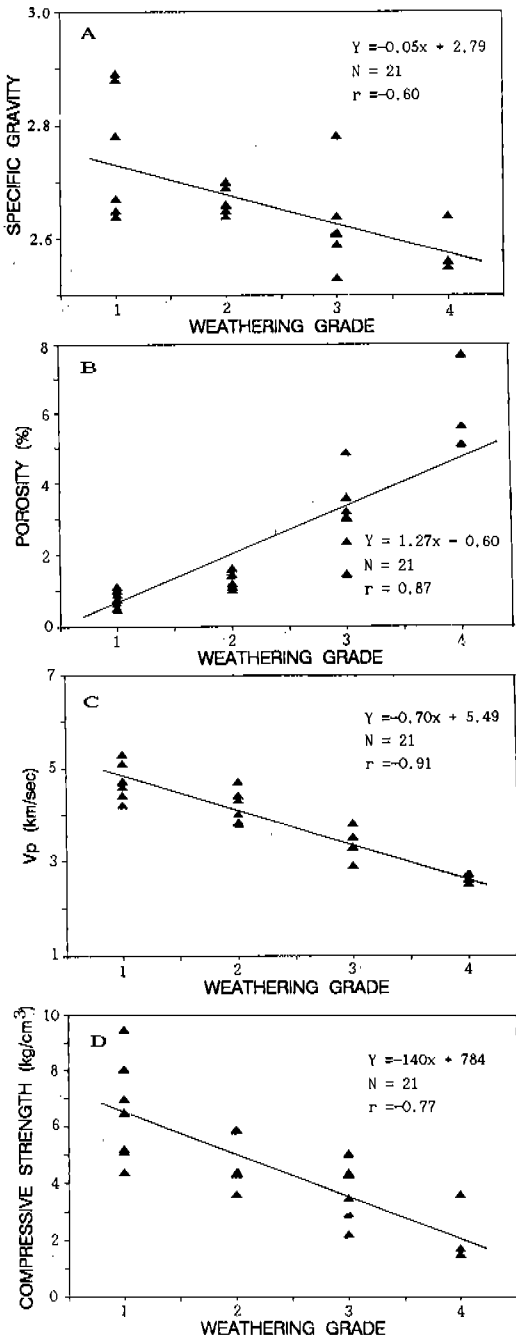


Fig. 5 Effect of weathering grade in J granite on specific gravity(A), porosity(B), P wave velocity(C) and compressive strength(D). The regression equation is shown with its correlation coefficient(r).

암상의 주라기 화강암 시료만의 결과에 비해서는 전반적으로 크게 떨어짐을 보인다. Fig.3은 그 중에서 지진파속도와 진비중, 지진파속도와 공극율 상호간의 관계로서 P파속도와 비중의 관계(Fig.3A)를 보면 상관계수가 Fig.2B의 -0.57에서 -0.28로 상관도의 저하현상이 뚜렷하며 P파속도와 공극율의 상관관계(Fig.3B)는 상관계수가 0.83으로 앞에서의 P파속도와 진비중의 관계처럼 심하지는 않지만 역시 상관도의 저하 현상이 뚜렷이 나타나고 있다. 역으로 말하자면, 전체 시료로 부터 주라기 화강암만으로 대상을 제약했을때 P파속도와 진비중과의 관계가 상관도 -0.28에서 -0.57로, P파속도와 공극율과의 관계가 상관도 0.83으로 부터 0.94로 상관도의 증가 현상이 현저함을 알 수 있다.

이와 같은 상관도 변화는 암상 차이에서 기인되는 것으로 판단되는데 이는 전체 시료로 부터 암상이 비슷한 주라기 화강암 시료와 백악기의 C1 화강암 시료를 따로 분리시켜 얻어진 상관도(Fig.4)가 주라기 시료만의 결과(Fig.2)와는 크게 차이가 나지 않는 반면에 전체 시료의 경우 (Fig.3)와는 큰 차이를 보인다는 사실에서 잘 나타나고 있다. 즉 비슷한 암상만을 분리시킴으로써 상관도가 각기 -0.57과 0.88로서 동일암상의 상관도 -0.57과 0.94에 대체로 근접하는 결과가 얻어졌다.

물리적 특성치 사이의 상관관계 연구에서 나타난 특징 중의 하나는 비중이 가지는 낮은 상관도에 비하여 공극율이 강도 및 지진파속도에 대하여 높은 상관도를 보이는 것으로 이는 김영화와 홍순호(1990)의 연구에서도 나타난 현상으로 본 연구를 통하여 일관성있게 나타나고 있다. 이는 압축강도와 지진파속도, 특히 지진파속도가 암석의 실질 부분의 밀도 보다는 공극의 양에 더 크게 영향을 받고 있음을 보여주고 있으며 공극의 양적 효과는 포화 P파속도 보다는 건조 P파속도에서 현저히 나타나고 있

다. 아울러 지진파속도-공극율의 상관관계에서 나타나는 흠어짐은 대체로 실질부분의 밀도 효과와 암석의 이방성, 특히 공극의 형태에 기인한 것으로 예상된다.

물성 비교에서 나타난 또 하나의 현상은 압축강도에 비하여 P파속도의 경우가 Index Property와 보다 양호한 상관관계를 보이고 있다는 점이다. 이는 암석속에 내재된 Joint나 Microcrack의 존재에 기인하는 것으로 암석속의 Discontinuity가 지진파속도나 Index Property에 있어서는 하나의 주요 영향요소에 불과함에 비하여 압축강도 결정에서는 결정적인 요인으로 등장함에 기인된다고 할 수 있다.

풍화에 따른 암석의 물성 변화

화강암의 풍화도 결정은 우선 육안 관찰과 현미경 관찰결과를 절대 기준화하여 사용하였으며 이를 물성 측정치와 비교하는 방법을 적용하였다. 풍화등급의 결정은 김영화와 홍순호의 풍화등급 기준(1990)을 그대로 사용하였다.

앞에서 결정된 각 물리적 특성치들과 현미경과 육안관찰 결과 나타난 풍화등급과의 관계는 Fig.5, 6, 7에 나타나 있다. 물리적 특성치와 풍화도와의 상관관계를 나타내는 회귀방정식의 적용은 대체로 Linear Model로 잘 만족되었다. Fig.5는 주라기 화강암 시료만을 대상으로 한 결과이며 Fig.6은 주라기·백악기 화강암 시료를 합하여 구한 결과이다. Fig.5에서는 시료 수가 적으며 풍화도 결정에 있어서 중간 등급이 무시 되었음에도 불구하고 비교적 좋은 상관 관계가 나타났다. 그 중에서 비중이 풍화도와의 상관계수 0.60으로 가장 낮게 나타나며(Fig.5A), 공극율과 P파속도의 경우가 풍화도와의 상관계수 0.87(Fig.5B)과 -0.91(Fig.5C)로서 매우 높게 나타난다. 압축강도는 상관계수 -0.77(Fig.5D)로서 공극율과 P

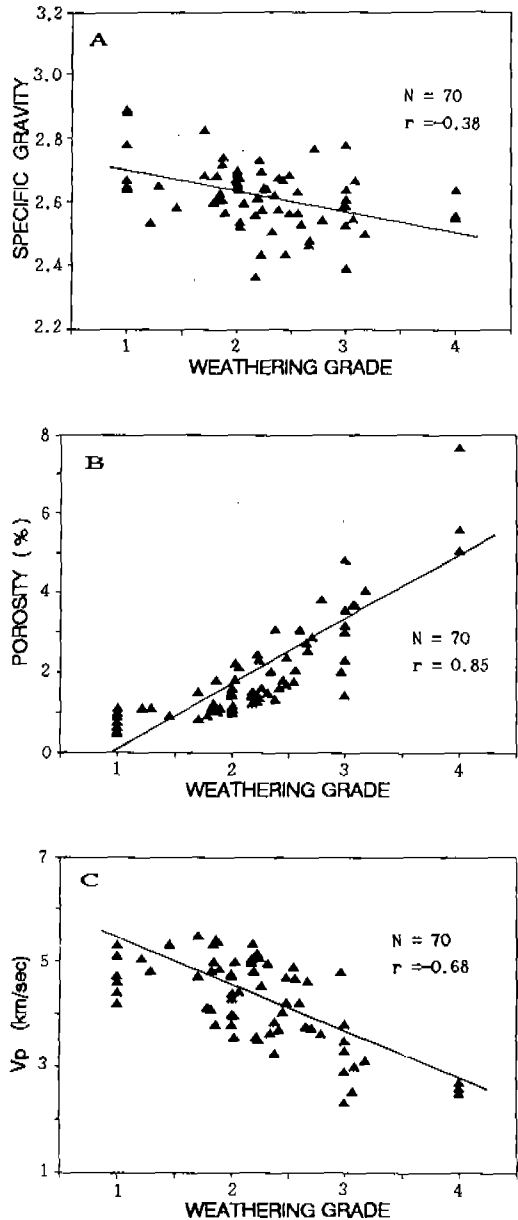


Fig.6 Effect of weathering grade in the whole data on specific gravit(A), porosity (B) and P wave velo(C). The regression equation is shown with its correlatioficie(r).

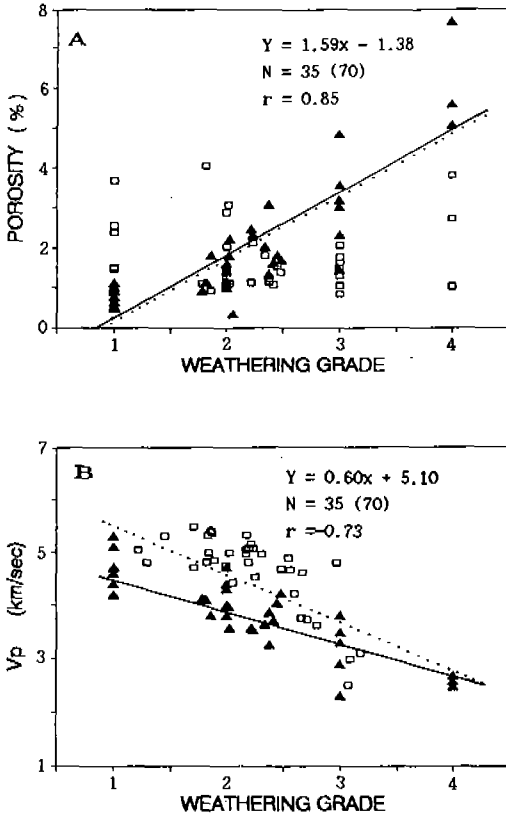


Fig.7 Effect of weathering grade in J and C1 granites on porosity(A) and P wave velocity (B). Solid triangles and solid lines represent J and C1 granites and its regression line, respectively. Open squares represent C2 and C3 granites. Dotted lines represent the regression line for whole data.

파속도에 비하여 풍화도와와의 상관도가 상대적으로 떨어진다.

이와 같은 경향은 전체 화강암의 두 자료를 합하여 구한 Fig.6에서도 비슷하게 나타나, 비중의 경우가 풍화도와와의 상관계수 -0.38로 현저하게 낮아지며 (Fig.6A), 공극율과 P파속도의 경우가 풍

화도와의 상관계수 0.85(Fig.6B), 공극율과 P파속도의 경우가 풍화도와의 상관계수 -0.68(Fig.6C)로서 물리적 특성치 사이의 상관성 연구에서 가장 좋은 결과를 보였던 공극율과 P파속도가 역시 풍화도와도 좋은 상관을 보임을 알 수 있었다. 이와같이 화강암에 있어서의 풍화도와의 상관관계는 비중, 압축강도, 공극율, P파속도의 순서로 상관도가 좋아진다고 할 수 있으며 특히 공극율과 P파속도의 두 요소가 화강암에 있어서 가장 효과적인 풍화기준이 될 수 있음을 보여주고 있다.

한편 단순한 암상의 자료(Fig.5)만으로 비교하는 경우가 암상이 다른 여러 시료를 합하여 비교하게 되는 경우(Fig.6) 보다도 상관도가 높은 현상은 앞에서의 물성 측정치 상호간에 나타난 결과와 동일하였으며 물리적 특성치의 상관성 연구 과정에서 시도되었던 것과 마찬가지로 전체 시료 중에서 중립질이며 사장석 함량이 상대적으로 많은 화강암(J 및 C1 시료)만을 독립시켰을때 비교적 높은 상관도가 얻어졌다. Fig.7에서는 그 중에서도 상관성이 좋은 공극율과 P파속도와의 관계를 보여주고 있다.

그러나 물성치 중에서 풍화도와 가장 상관성이 좋은 것으로 나타난 공극율과 P파속도를 중심으로 암상 세분에 따른 상관도 변화과정을 추적하면 Fig.7에서 나타난 바와 같이 공극율의 경우에는 암상의 영향에 비교적 둔감한데 비하여 P파속도의 경우에는 암상 세분에 따른 풍화도와의 상관도 증가현상이 매우 뚜렷한 특징을 보인다. 이는 앞의 김영화와 홍순호의 연구결과와도 일치되는 것으로서 특히 P파속도를 풍화 기준으로 사용하는 경우에 지질적 요인을 고려해야 할 필요성이 매우 큰 것으로 나타난다.

토의 및 결론

이상과 같은 일련의 실험과 분석은 화강암의 물리적 특성 상호간에 존재하는 일반적인 상관성이나 풍화도의 기준으로서의 물리적 특성치가 가지는 가능성에 있어서 김영화와 홍순호(1990)의 연구결과를 확인, 보충하는 의미를 지닌다고 할 수 있다. 물론 이러한 접근방법이 만족스럽지만은 못하지만, 현재 풍화에 대한 절대적인 기준이 존재하지 않는다는 의미에서는 이러한 접근이 현 시점에서의 한계라고도 하겠으며, 아울러 풍화기준이 가지는 중요성을 감안한다면 각 특성치의 상관성 비교 중에서 나타난 가능성은 앞으로도 지속적으로 추적할 필요가 크다고 하겠다.

특히 김영화와 홍순호(1990)로부터 본 연구에 걸쳐서 일관되게 좋은 상관관을 보이는 공극율과 P파속도의 경우는 매우 효과적인 풍화기준이 될 수 있는 것으로 나타났다. P파속도의 경우에는 암석학적 특성차에 따라 풍화도와의 상관도가 크게 차이를 보였으며 반면에 공극율의 경우에는 암석학적 특성차에 상대적으로 둔감한 것으로 나타나 앞으로 이 두 물성치의 특성과 관련하여 보다 효과적인 방법으로 더 많은 자료의 집적과 분석이 필요함을 의미하며 이는 향후 정량적인 풍화기준의 설정에 큰 역할을 할 수 있음을 시사하고 있다.

한편 풍화기준으로서의 최대함수비의 존재는 공극율과 거의 같은 정도로, 경우에 따라서는 약간 상회하는 수준으로 좋은 결과를 보이고 있으며, 암석의 공극 부분과 Matrix 부분의 특성이 함께 반영된다는 측면에서 볼 때 이론적으로도 공극율 보다 유리하지만 공극율과의 차이는 실제로 미미하여 본 연구에서는 일반적으로 널리 이용되고 있는 공극율을 대표로 사용하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 화강암의 물리적 특성치 중에서 P파속도와 공극율을 사이에서 가장 좋은 상관관계가 나타났다.

2) P파속도와 공극율은 현미경과 육안관찰에 의한 풍화도와도 가장 좋은 상관도를 보여 암석강도 측정치 이상으로 효과적인 풍화기준이 될 수 있는 것으로 나타났다.

3) 시료가 동일한 암상이거나 암상에 따라 세분이 가능한 경우에는 P파속도를 풍화도 기준으로 함이 가장 효과적이며 그렇지 못한 경우에는 공극율을 풍화도 기준으로 함이 보다 효과적인 것으로 나타났다.

사사

이 연구의 상당부분은 광산지질 23권 2호에 발표된 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구와 함께 학술진흥재단의 지원을 받아 이루어졌음을 밝히며 연구비를 지원해준 학술진흥재단 측에 감사드린다. 아울러 자료정리를 도와준 강원대학교 지구물리학과 이인훈 조교에게 고마움을 표한다.

참고문헌

- 김영화, 1978, 함수율의 변화에 따른 지진파 속도의 변화 특성에 관하여, 서울대학교 석사논문.
 김영화, 홍순호, 1990, 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구, 광산지질, 23권, 221-232.

- 김창호, 1989, 풍화에 의한 화강암의 물성 변화에 관한 연구, 강원대학교 교육학 석사논문.
- 이경운, 김민규, 1988, 국내 화강암의 역학적 특성, 한국과학 기술원 단체 총연합회, 73-86.
- 이희근, 이정인, 양형식, 1983, 우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성 연구(제2집), 대한광산학회지, 20, 101-109.
- Balakrishna, S. and Ramana, Y. V., 1967, Laboratory and field velocity measurements in granites, Indian Geophys. Union, 4, 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, 1-8.
- Deer, D. U., 1968, Geological consideration, Rock mechanics in engineering practice, John Wiley.
- Duncan, N., 1969, Microcracks in crustal igneous rocks: Physical properties, in the Earth's Crust, Geophys. Monogr, Ser., 20, 95-117.
- Hamrol, N., 1969, A quantitative classification of weathering and weatherability of rocks, Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. En., 5 (2), 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., 2(1), 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, 1, 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, 17, 79-90.
- Judd, W. and Huber, C., 1961, Correlation of rock properties by statistical method. Int. Symp. Mining Res., Missouri Sch. Mines, Rolla, Mo.
- Press, F., 1966, 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, 68, 1263-1292.