

## 자연환경하에서 암석의 풍화특성과 풍화암석의 강도평가

강대완<sup>1)</sup>, 오바라 유조<sup>2)</sup>, 히라타 아츠오<sup>3)</sup>, 강성승<sup>4)\*</sup>

### Weathering Characteristics of Rock under Natural Environment and Strength Evaluation of Weathered Rock

Dae Wan Kang, Yuzo Obara, Atsuo Hirata, Seong-Seong Kang

**Abstract** Wave velocity was measured to define the weathering characteristics of rock and the strength evaluation of weathered rock on a target of the Aso gravestones with various sizes under the natural environment. As a result, the size correction method which was changed sample of the different size to one of the same size for evaluating wave velocity was proposed, and also suggested the NET (Normalized Elapsed Time) as a new weathering index of rock. In addition, the strength of the weathered rock was estimated from the weathering classification of rock using the NET. Wave velocity of welded tuff was high and didn't show velocity degradation, on the other hand, one of andesite was low and showed velocity degradation. The degree of weathering between rocks of the different size is considered to be comparable, applying the NET based on the  $V_p/V_0$ -NET curve. Furthermore, the classification of rock weathering stages using the NET based on the  $S_c/S_0$ -NET curve was available, and the estimation of strength for the weathered rock was also possible.

**Key words** Weathering characteristics, Strength evaluation, Wave velocity, Size correction method, NET(Normalized Elapsed Time)

**초 록** 자연환경하에 있는 암석의 풍화특성과 풍화된 암석의 강도평가를 위하여 다양한 크기의 아소 가족묘 비석을 대상으로 탄성과 속도를 측정하였다. 그 결과 크기가 다른 시료를 동일한 크기로 환산하여 탄성과 속도를 평가하는 크기 보정법과 새로운 암석 풍화지표로서 NET(Normalized Elapsed Time)를 제안하였다. 또한 NET을 이용한 암석 풍화 분류로부터 풍화암석에 대한 강도를 추정하였다. 용결응회암의 경우 탄성과 속도는 높고 속도 저하는 거의 나타나지 않았지만, 안산암의 경우 탄성과 속도는 낮고 속도저하 현상이 관찰되었다.  $V_p/V_0$ -NET 곡선에 근거한 NET를 이용할 경우 크기가 다른 다양한 암석에 대해 같은 크기로 풍화정도를 비교할 수 있을 것으로 판단된다. 또한  $S_c/S_0$ -NET 곡선에 의한 NET을 이용하여 암석의 풍화단계 분류가 가능하였으며, 이것으로부터 풍화 암석에 대한 강도추정도 가능하였다.

**핵심어** 풍화특성, 강도평가, 탄성과 속도, 크기 보정법, NET(Normalized Elapsed Time)

## 1. 서 론

자연환경하에 노출된 암석은 바람과 강우, 건조와 습

윤, 한랭과 온화한 기후 등의 원인에 의해 풍화가 서서히 진행되는 것으로 알려져 있다. 구조물의 재료로서 암석에 풍화가 발생될 경우 재료 그 자체의 강도저하는 물론이고 구조물의 기능 약화를 가져올 수 있다. 하지만 암석에 대한 풍화는 장기간에 걸쳐 나타나기 때문에 암석 풍화에 대한 적절한 측정법과 분석법이 요구된다. 즉, 암반 구조물의 안정성을 확보하고 장기적인 보존을 위해서는 암반의 풍화를 일으키는 메커니즘 규명과 함께 풍화특성 및 평가법을 확립하는 것이 중요하다. 현재까지 암석의 풍화특성을 밝히기 위한 다양한 방법들

<sup>1)</sup> 조선대학교 에너지자원공학과 박사과정

<sup>2)</sup> 일본 구마모토대학 대학원 자연과학연구과 교수

<sup>3)</sup> 일본 소조대학 에코디자인학과 교수

<sup>4)</sup> 조선대학교 에너지자원공학과 교수

\* 교신저자 : kangss@chosun.ac.kr

접수일 : 2011년 10월 7일

심사 완료일 : 2011년 12월 1일

게재 확정일 : 2011년 12월 1일

이 소개되었고 이를 활용한 연구가 수행되었다(김영화와 홍순호, 1990, Chigira, 1990, Jayaverdena et al., 1994, 정형식과 유병옥, 1997, 김성수와 박형동, 1999, 박진철과 백환조, 2000, Nicholson and Nicholson, 2000, 박연준 외, 2003, 장현식 외, 2004, 권오일 외, 2007, 엄정기와 신미경, 2009, 조태진 외, 2009, 송원경 외, 2009). 이 연구를 위한 예비 연구로서 풍화촉진시험법의 하나인 동결융해시험을 이용하여 사암과 안산암을 대상으로 동결융해 반복횟수에 따른 중량, 탄성과 속도, 일축 압축강도 변화 등의 결과가 강성승 외(2011)에 의해 보고된 바 있다. 이 연구에서는 자연환경하에 있는 암석의 풍화특성과 풍화암석의 강도평가를 위하여 첫째, 다양한 크기를 갖는 아소 가족묘 비석을 대상으로 탄성과 속도를 측정하고, 이에 크기가 다른 비석에 대해 동일한 크기로 환산하여 탄성과 속도를 계산하는 크기 보정법을 제안하고자 한다. 둘째, 암석의 풍화정도를 나타내는 새로운 풍화지표로서 탄성과 속도를 이용한 NET (Normalized Elapsed Time)을 제안하고자 한다. 마지막으로 NET을 이용하여 암석의 풍화 단계를 분류한 후 이것으로부터 풍화 암석에 대한 강도를 추정하고자 한다.

## 2. 조사지역

조사지역은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 일본 큐슈 구마모토 지역의 아소 칼데라 내에 위치한 아소 가족묘 공원에 해당된다. 이 지역의 과거 5년간 평균 강수량과 평균 온도기후상태를 정리하면 Table 1과 같다. 연간 강수량은 2,000 mm 이상이며, 특히 봄에서 여름 사이에 집중되며 겨울에 가장 적다. 평균 기온은 최고 8.3°, 최저 -0.5°로서 낮을 때는 빙점 이하의 온도를 나타내어 동결융해의 반복 현상을 받은 환경하에 있었을 것으로 추정된다.

아소 가족묘 공원의 비석 배치상태를 나타내면 Fig. 2와 같다. 가장 오래된 묘의 비석은 1650년에 세워진 것으로 나타났다. 현재까지 세워진 묘의 비석들 중 연대를 알 수 있는 것은 65개였다. 이들 비석 중 이 연구에서는 비석 표면의 굴곡이 심하거나 균열이 크게 발달하여 탄성과 속도 측정이 불가능한 21개를 제외한 44개의 비석을 연구 대상으로 하였다. 비석에 사용된 암석은 용결응회암, 안산암-A, 안산암-B 등 3종류로 구분할 수 있다. 용결응회암은 약간 붉은 빛을 띠며 층리는 거

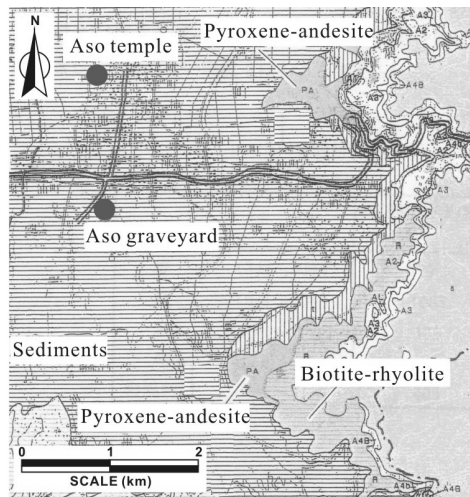
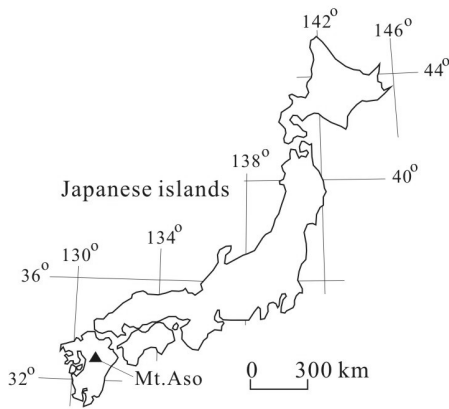


Fig. 1. General geology of study area.

Table 1. Average total rainfall for 5 years and average temperature

	Average total rainfall for 5 years (mm)	Average maximum temperature (°C)	Average temperature (°C)	Average minimum temperature (°C)
Spring (3~5)	777.5	12.1	10.7	5.9
Summer (6~8)	1065.0	25.4	21.6	18.1
Fall (9~11)	375.0	18.6	13.7	9.3
Winter (12~2)	283.7	8.3	3.7	-0.5

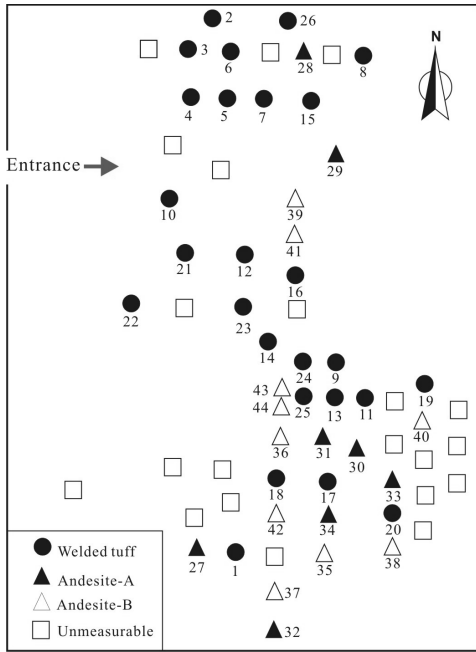


Fig. 2. Arrangement of Aso gravestone.

의 관찰되지 않고 공극도 적다. 안산암-A는 백색을 띠며 암석 표면을 관찰할 때 공극이 적은 반면, 안산암-B는 백색을 띠지만 안산암-A와 비교할 때 암석 표면의 공극이 많이 관찰되는 것이 특징이다.

### 3. 측정 방법

비석의 탄성과 속도를 측정하기 위한 시스템은 Fig. 3으로 나타낼 수 있다. 즉, 탄성과 속도 측정 시스템은 크게 3부분인 초음파 펄스 발생기, 디지털 오실로스코프, 송수신용 진동기 등으로 구성되어 있다. 초음파 펄스 발생기에 의한 펄스 출력은 송수용 진동기로 보내지고, 시료 내에 탄성파로 전파된다. 시료 내부에서 감쇄된 신호 성분 수신용 진동기에 의해 전기신호로 변환된 후 초음파 펄스 발생기와 내장된 프리앰프로 증폭되어 오실로스코프에 송신되어 저장된다. 측정에 사용된 진동기의 공진주파수는 1 MHz이다. 탄성과 속도는 한 개의 비석에 대해 1~3개의 측정점을 설정하여 측정되었다. 그 결과를 정리하면 Table 2와 같다.

### 4. 탄성과 속도 크기 보정

탄성과 속도를 측정한 비석 두께와 경과 시간과의 관

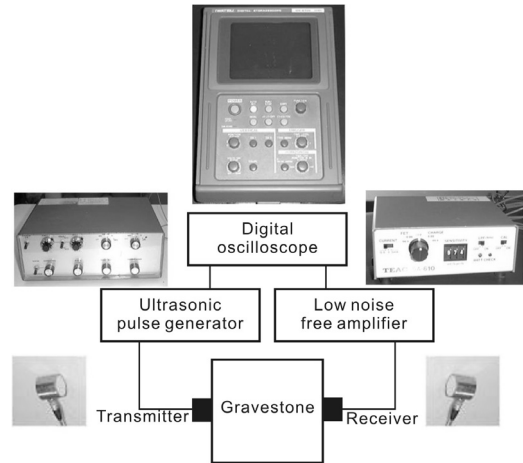


Fig. 3. Measurement system of wave velocity.

계를 나타내면 Fig. 4와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 측정된 비석들의 두께는 6 cm ~ 24 cm 사이에 분포한다(Table 2). 동일한 자연환경하에서 세워진 같은 암종의 비석에 대한 풍화정도가 같다고 가정하면, 비석에 발달한 풍화대의 두께도 동일하다고 할 수 있다. 하지만, 풍화대의 두께가 같을지라도 중심부분의 두께가 다르기 때문에 같은 시대의 비석일지라도 크기가 다르므로 탄성과 전파속도도 다르게 나타난다. 따라서 탄성과 속도 결과를 같은 크기로 환산하여 그 차이점을 검토해야 할 필요성이 있다. 이를 위하여 이 연구에서는 Fig. 5와 같이 풍화모델을 이용하여 탄성과 속도 크기를 보정하였다. 암석은 표면에서 내부로 풍화가 진행되기 때문에 암석표면에는 풍화대, 그 보다 안쪽에는 신선한 코아부분이 존재한다. 풍화대의 두께를  $L_w$ , 풍화대의 탄성과 속도 평균치를  $V_w$ , 코아부분의 탄성과 속도를  $V_0$ , 탄성과 속도를 측정한 거리를  $L_1$ , 그리고 평균 탄성과 속도를  $V_{1m}$ 이라 할 때 이들의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{L_1}{V_{1m}} = 2 \frac{L_w}{V_w} + \frac{L_1 - 2L_w}{V_0} \tag{1}$$

또한 크기가  $L_2$ 로 다른 암석에서도 같은 두께의 풍화대가 존재하기 때문에 이들은 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$\frac{L_2}{V_{2m}} = 2 \frac{L_w}{V_w} + \frac{L_2 - 2L_w}{V_0} \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)를 연립하여 정리하면 식 (3)과 같다.

**Table 2.** Classification of welded tuff, andesite-A and -B and results of wave velocity measured in Aso gravestone

Welded tuff					
No.	Year (Elapsed time)	Thickness (cm)	Time ( $\mu$ s)	Velocity (m/s)	Changed velocity to 20 cm (m/s)
1	1963 (61)	21.55	42	5131	5121.95
		17.18	34.5	4980	5016.12
2	1917 (80)	6.32	14.5	4357	4931.31
		10.5	23	4565	4871.26
3	1916 (81)	12.23	25.5	4796	4962.78
		10.52	23.5	4477	4812.65
4	1916 (81)	10.75	24	4479	4805.49
		9.5	21.5	4419	4819.28
5	1915 (82)	8.74	19.5	4482	4884.29
		8.74	19.5	4482	4884.29
6	1914 (83)	17.03	38.5	4423	4529.28
		18.74	43.5	4308	4357.3
7	1907 (90)	7.5	16.5	4545	4961.61
		10.98	24	4519	4856.61
8	1904 (93)	7.57	16.5	4591	4978.07
9	1894 (103)	11.8	24	4917	5048.08
		9.28	18	5156	5205.75
10	1893 (104)	12.48	28.5	4379	4670.3
		10.48	23.5	4460	4803.84
11	1877 (120)	9.51	19	5005	5130.71
		9.53	18.5	5151	5202.53
12	1863 (134)	17.16	38	4517	4607.28
		14.32	32	4475	4670.82
13	1839 (158)	17	34	5000	5035.97
		6.76	15.5	4361	4911.71
14	1820 (177)	8.98	20.5	4380	4820.38
		9.6	20.5	4683	4961.61
15	1816 (181)	21.55	44.5	4843	4813.75
		22.9	47	4872	4822.04
16	1810 (187)	11.13	24.5	4543	4831.47
		13.28	28.5	4661	4842.61
17	1765 (232)	15.18	32.5	4671	4798.35
		16.42	35.5	4625	4726
18	1765 (232)	8.08	15.5	5213	5234.95
		10.21	20.5	4980	5108.87
19	1704 (293)	6.4	15	4267	4889.41
		14.21	32.5	4372	4594.68

Table 2. Continued

Welded tuff					
No.	Year (Elapsed time)	Thickness (cm)	Time ( $\mu$ s)	Velocity (m/s)	Changed velocity to 20 cm (m/s)
20	1701 (296)	17.18	35.5	4839	4893.39
		18.13	38.5	4709	4754.9
21	1690 (307)	14.64	31	4724	4853.25
		19.85	43.5	4563	4567.7
22	1687 (310)	8.98	20.5	4380	4820.38
		6.94	15.5	4481	4953.41
23	1683 (314)	13.4	30	4467	4697.99
		11.12	23	4835	5010.74
24	1678 (319)	12.24	24.5	4996	5091.53
		13.39	25.5	5251	5250.66
25	1654 (343)	22.12	47	4650	4655.29
		19.3	41.5	4651	4669.26
26	1650 (347)	9.95	21	4738	4982.21
		9.11	19.5	4672	4969.83
Andesite-A					
27	1965 (32)	20.9	55	3800	3789.47
		20.3	55.5	3657	3652.35
		20.21	55	3675	3670.97
28	1912 (85)	20.6	55.5	3712	3702.43
		20.53	55.5	3699	3690.62
29	1834 (163)	15.08	42.5	3548	3659.78
		15.49	39.5	3922	3949.77
		16.6	42.5	3906	3929.65
30	1833 (164)	16.43	43.5	3777	3823.01
		17.28	45.5	3798	3830.24
		18.26	45.5	4013	4016.36
31	1824 (173)	13.52	36.5	3704	3809.52
		14.46	41	3527	3657.71
		15.4	43	3581	3679.31
32	1822 (175)	17.1	43.5	3931	3947.85
		18.97	47	4036	4036.88
		20.35	53	3840	3836.13
33	1781 (216)	11.38	33.5	3397	3650.7
		13.49	35	3854	3915.88
34	1767 (230)	18.04	51	3537	3581.69
		18.21	52	3502	3544.86
Andesite-B					
35	1800 (197)	15.67	35.5	4414	4432.41
		15.3	37	4135	4215.46

Table 2. Continued

Andesite-B					
36	1793 (204)	18.34	41.5	4419	4425.87
		17.85	42	4250	4275.53
37	1726 (271)	15.65	38.5	4065	4152.25
		16.1	40	4025	4109.59
		15.7	39	4026	4118.99
38	1722 (275)	12.57	29.5	4268	4350.98
		15.48	36.5	4241	4296.97
39	1721 (276)	15.75	37.5	4200	4260.35
		15.95	41	3890	4000
		16.32	40.5	4030	4108.65
40	1715 (282)	15.42	36	4283	4331.09
41	1707 (290)	16.3	37.5	4347	4374.24
		16.44	41	4010	4089.05
		16.47	43.5	3787	3896.1
42	1704 (293)	15.31	37	4138	4217.43
43	1655 (342)	18.51	45	4113	4139.83
		18.5	46	4022	4054.05
		18.6	47	3957	3991.13
		18.63	48.5	3841	3880.15
44	1655 (342)	18.28	45	4062	4096.49
		18.32	45.5	4026	4062.29

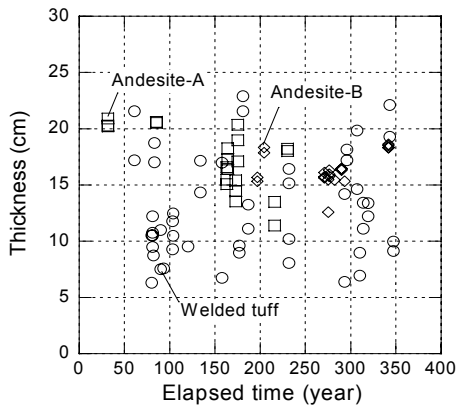


Fig. 4. Relationship between thickness and elapsed time in welded tuff, andesite-A and andesite-B.

$$V_{2m} = \frac{V_0 V_{1m} L_2}{(V_0 - V_{1m})L_1 + V_{1m}L_2} \quad (3)$$

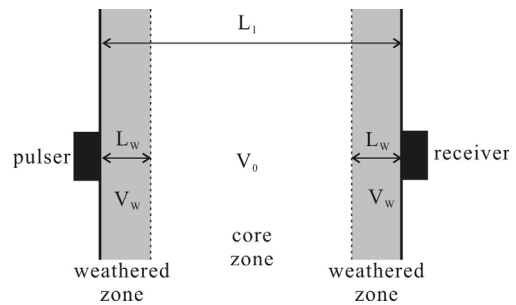


Fig. 5. Schematic diagram of weathered zone and core zone in rock.

식 (3)에서 알 수 있듯이 크기가 다른 비석의 평균 탄성파 속도는 풍화를 받지 않은 신선한 코어부분의 탄성파 속도  $V_0$ 와 밀접한 관계를 갖는다. 하지만, 시료 표면 부근의 풍화대 두께  $L_w$ 와 풍화대의 탄성파 속도 평균치  $V_w$ 는  $V_{1m}$ 에 포함되므로 따로 고려할 필요가 없다.

다양한 크기의 측정 대상 시료를 20 cm로 환산하여 계산된 탄성과 속도를 정리하면 Table 2와 같다.

5. 탄성과 속도 변화

비석의 경과된 시간과 환산된 탄성과 속도와의 관계를 나타내면 Fig. 6과 같다. 용결응회암의  $V_0$ 는 5250 m/s, 안산암-A의  $V_0$ 는 4050 m/s, 안산암-B의  $V_0$ 는 4500 m/s로 계산을 수행하였다. 그림에서와 같이 안산암의 경우 몇 개의 시료를 제외하면(시료 번호 33, 34, 35) 대체적으로 200년을 경계로 안산암-A와 안산암-B로 나누어 볼 수 있다.

6. 풍화 암석의 강도 평가법 및 고찰

동결융해시험에 의한 안산암의 반복횟수와 탄성과 속도  $V_p$ 의 관계를 나타내면 Fig. 7(a)와 같다(강성승 외, 2011). 이것을 탄성과 속도 초기값  $V_0$ 로 나누어 정규화

( $V_p/V_0$ )하면 Fig. 7(b)로 나타낼 수 있다.  $V_p$ 가 95% 감소한 시점의 시료 반복횟수를  $N_{95}$ 로 하여 그 결과를 정리하면 Table 3과 같다. 여기서 Nos. 1 ~ 3은  $V_p$ 가

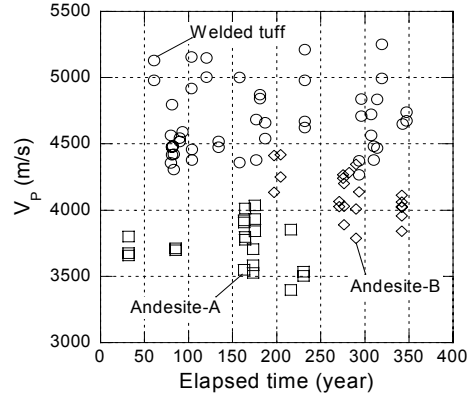


Fig. 6. Relationship between wave velocity and elapsed time in welded tuff, andesite-A and andesite-B.

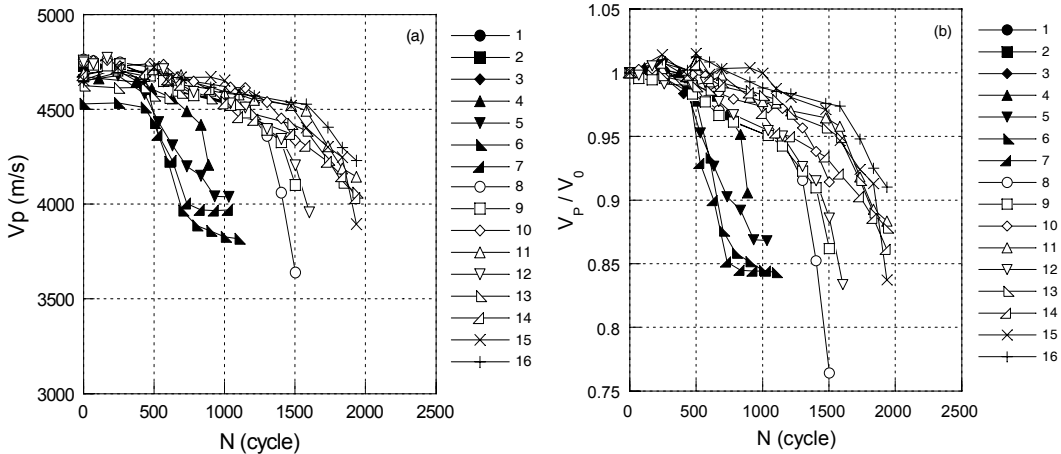


Fig. 7. Relationship of (a)  $V_p - N$  and (b)  $V_p/V_0 - N$  in andesite.

Table 3.  $N_{95}$  of each andesite

Specimen No.	$N_{95}$	Specimen No.	$N_{95}$
4	835	11	1611
5	540	12	1150
6	561	13	1569
7	500	14	1194
8	1044	15	1569
9	1046	16	1725
10	1337		

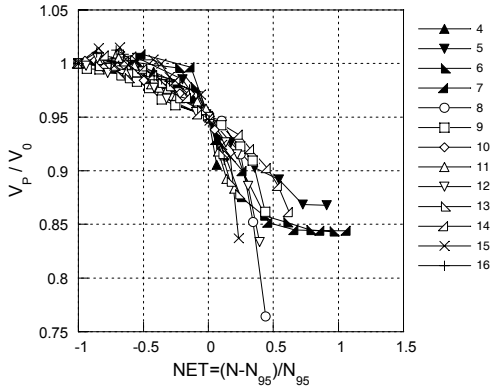


Fig. 8. Relationship between  $V_p/V_0$  and NET (normalized elapsed time) in andesite.

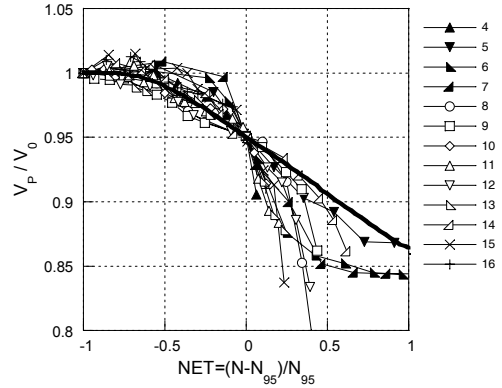


Fig. 10. Relationship between  $V_p/V_0$  and NET (normalized elapsed time) obtained from Figs. 8 and 9.

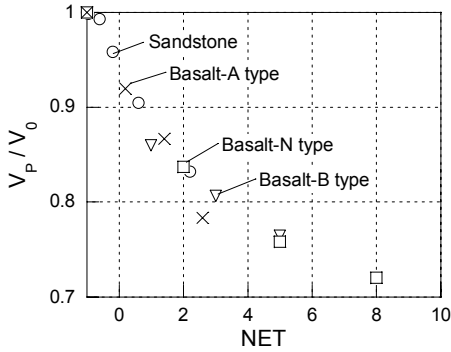


Fig. 9. Relationship between  $V_p/V_0$  and NET (normalized elapsed time) in sandstone and A, B, N types of basalt.

95% 감소하기 전에 시료를 꺼냈기 때문에 표시하지 않았다. 각 시료의  $N_{95}$  반복횟수는 최소 500부터 최대 1725로 매우 불규칙하였다. 여기에서 각 시료의 반복횟수  $N$ 에서  $N_{95}$ 를 뺀 후  $N_{95}$ 로 나누어 정규화한 NET (Normalized Elapsed Time)로 나타내면 Fig. 8과 같다. 각 시료는 (-1, 1)과 (0, 0.95)를 통과하며 불규칙한 분포를 보인다. 비석에 대한 경과시간 정규화는  $(t-t_{95})/t_{95}$ 로 표현할 수 있다.

암중에 따른 풍화정도를 비교하기 위하여 中村康夫와 石塚克己(1984)가 보고한 사암과 현무암의 동결융해시험 결과를 참고하였다. 동결융해시험에 의한 사암과 현무암의 NET와  $V_p/V_0$ 관계는 Fig. 9와 같으며, 여기서 현무암은 중량손실 형태에 따라 A-type, B-type, N-type 등으로 분류된다. 각 암석의  $N_{95}$  반복횟수는 사암의 경우 40, 현무암 N-type의 경우 6, B-type의 경우 4, A-type의 경우 10으로 나타났다. Fig. 8과 9를 함께

도시하면 Fig. 10과 같다. 여기서 곡선은 Fig. 9의 사암과 현무암의 결과를 근사시킨  $V_p/V_0$ -NET 곡선을 가리킨다. 그림에서 알 수 있듯이 NET가 -1.0 ~ 1.0인 범위에서  $V_p/V_0$ 는 암석의 종류나 중량손실에 관계없이  $V_p/V_0$ -NET 곡선을 따라 감소하는 경향을 보인다. 구체적으로 살펴보면, NET -1.0 ~ 0인 범위에서 측정 결과는 대부분 근사 곡선 윗부분에 표시되는 반면, 0 ~ 1.0인 범위에서는 근사 곡선 아랫부분에 집중됨을 알 수 있다. NET>0인 범위의 측정 결과 분포는  $-1 \leq \text{NET} \leq 0$ 보다 더 불규칙한 분포를 보였다. 따라서 암석의 풍화정도는  $V_p/V_0$ 가 0.95 이하가 되면 암석의 종류에 따라 다르게 나타나는 것으로 파악된다.

동결융해시험에 의한 사암의 NET와  $S_c/S_0$ 관계를 나타내면 Fig. 11(a)와 같다. 그림에서 Open circles는 중량감소가 큰 시험편, closed circles는 중량감소가 적은 시험편을 각각 가리킨다(강성승 외, 2011). 여기서  $S_c/S_0$ 는 평균 일축압축강도  $S_c$ 를 초기값  $S_0$ 로 나눈 것으로서 초기값  $S_0$ 는 82.7 MPa이며 평균 일축압축강도는 강성승 외(2011)가 보고한 논문의 Fig. 8과 같다. 이것을 다시  $S_c/S_0$ 의 평균값으로 하여 근사시키면 Fig. 11(b)의  $S_c/S_0$ -NET 곡선이 된다. 곡선과 만나는 각 평균값에서 수직선의 범위는 표준편차를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 NET 범위가 -1.0 ~ -0.2까지는 일축 압축강도가 서서히 감소하지만, 그 이후부터는 급격한 변화를 보인다. 이러한 일축압축강도 저하의 양상은 표준편차의 변화 폭 크기와 잘 일치한다. NET=0인 경우  $S_c/S_0$ 가 80% 이하가 될 확률이 약 50%이며, NET가 0.6까지 진행될 경우  $S_c/S_0$ 가 50% 이하가 될 확률이 약 20%가 된다. NET에 의한 풍화정도를 5단계로 나누어



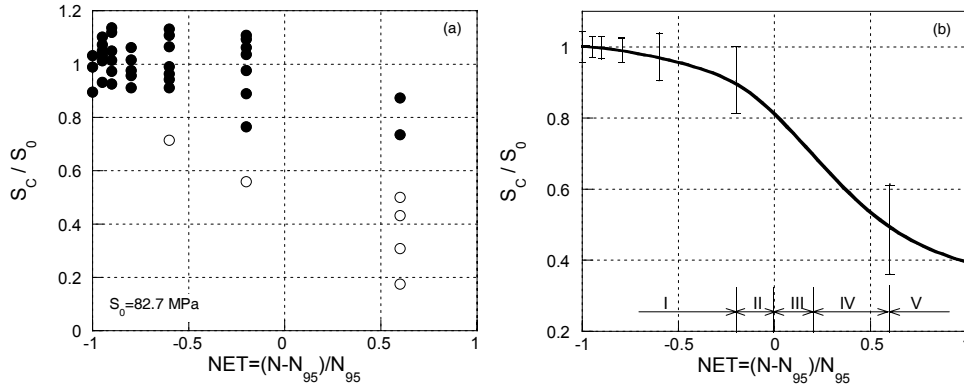


Fig. 11. Relationship between  $S_c/S_0$  and NET (normalized elapsed time) in sandstone (Fig. 11(a) was redrawn from Fig. 8 reported by Kang et al. (2011)).

NET	-0.5	0.0	0.5
Weathering stage	I	II	III
		IV	V

Fig. 12. Classification of rock weathering stage by NET.

분류하면 Fig. 12와 같으며, 각 풍화단계에 따른 일축압축강도와 암석 상태를 정리하면 Table 4와 같다. 따라서 어떤 암석에 대한 NET를 알 면 이상의 결과를 이용하여 대상 암석의 강도추정이 가능할 것으로 판단된다.

비석의 안산암-A와 안산암-B의 경과시간과 탄성파속도 관계에서 곡선의 상한선을 Fig. 13으로 표시할 수 있으며 이때 안산암-A의  $V_0$ 는 4,050 m/s, 안산암-B의  $V_0$ 는 4,500 m/s이다. 따라서  $V_p$ 가  $V_0$ 의 95%로 될 때의 경과시간을  $t_{95}$ 라 하면, 안산암-A의  $t_{95}$ =230년, 안산

암-B의  $t_{95}$ =320년이 된다. 이 값을 이용하여 비석의 NET와  $V_p/V_0$ 의 관계를 나타내면 Fig. 14와 같다. 이때  $NET=(t-t_{95})/t_{95}$ 를 나타낸다. 안산암-A는  $NET=0.0$ , 안산암-B는  $NET=0.1$ 부근까지 진행한다.  $S_c/S_0$ -NET 곡선으로부터 강도를 추정해 보면 일축압축강도는 80% 부근까지 강도 저하가 진행되고 있음을 알 수 있다.

여기에서 단면적  $A_0$ 를 가진 원주형 시편에 일축압축 하중이 작용한다고 하면, 표면에서 풍화대까지는 응력이 미치지 않고 그 나머지 중심부분(일축압축강도  $S_0$ )에만 응력의 영향을 받는다고 가정할 때, 시료의 강도  $S_c$ 는 식 (4)로 표현 할 수 있다. 이때  $P$ 는 최대하중을 나타낸다.

$$S_c = P/A_0 \tag{4}$$

Table 4. Rock conditions according to weathering stage

Weathering stage	Uniaxial compressive strength	Rock conditions
I	100~90%	- Low uniaxial compressive strength degradation - Noticeable low velocity
II	90~80%	- Sudden degradation of uniaxial compressive strength and distinct weight loss - Required the maintenance of rock structures
III	80~70%	- Velocity of less than 90 % and uniaxial compressive strength of less than 80 % - High irregular distribution of weight loss
IV	70~50%	- High irregular distribution of uniaxial compressive strength and weight loss - Degradation of uniaxial compressive strength with weight loss
V	$\leq 50\%$	- Uniaxial compressive strength degradation of less than 50 %, then is lowered the velocity of uniaxial compressive strength degradation - Irrelevant as a material of structures from this point

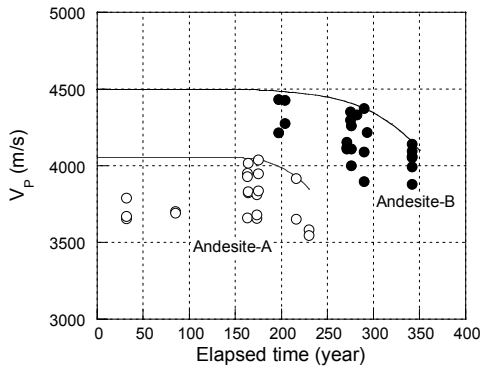


Fig. 13. Relationship between wave velocity and elapsed time in andesite-A and -B.

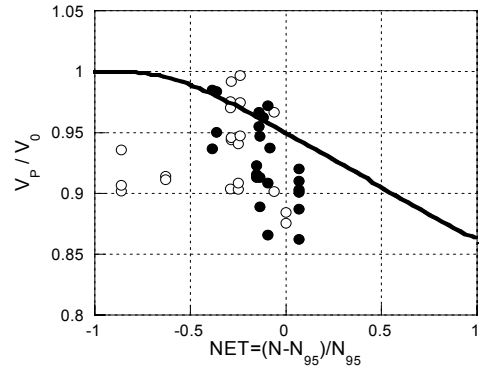


Fig. 14. Relationship between  $V_p/V_0$  and NET (normalized elapsed time) in andesite-A and -B.

한편 최대하중  $P$ 는 시료의 중심부분에만 미치고, 그 단면적을  $A$ 라 하여 나타내면 식 (5)와 같다.

$$P = AS_0 \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 같이 나타내 수 있다.

$$S_c/S_0 = A/A_0 \quad (6)$$

따라서 풍화에 의한 암석의 강도저하는 단면적의 감소도 가져옴을 알 수 있다. 여기서 안산암의 NET는 0.0 ~ 0.1까지 진행되며, 풍화단계는 Fig. 12를 근거로 분류할 때 III에 속한다. 즉,  $S_c/S_0$ 는 0.8 ~ 0.7이 되며, 이것은  $A/A_0$ 도 0.8 ~ 0.7이 되는 것을 나타낸다. 그러므로 암석 중심부분의 단면적이 80 ~ 70 %로 감소되었다고 말할 수 있다. 이것은 풍화단계가 III에 해당하는 No. 43 비석(경과시간 345년, 단면적 18.5 × 18.5 cm)의 경우 표면에서 1.0 ~ 1.5 cm의 풍화대가 존재하는 것을 지시한다.

## 7. 결론

자연환경하에서 암석의 풍화특성과 풍화암석의 강도 평가를 위하여 아소 가족묘 비석에 대한 탄성과 속도를 측정하였다. 측정 결과로부터 평가된 암석의 풍화특성과 풍화암석의 강도평가법에 대해 검토하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 자연환경하에서 풍화된 다양한 크기를 갖는 아소 가족묘 비석을 대상으로 탄성과 속도를 측정하였으며, 크기 보정법을 적용하여 크기가 다른 암석에 대해 동일한 크기로 환산하여 탄성과 속도를 계산하였다. 그

결과 탄성과 속도가 높은 용결융회암에서는 속도저하가 거의 없었지만, 탄성과 속도가 낮은 안산암에서는 속도저하 현상이 관찰되었다.

둘째, 암석의 풍화정도를 나타내는 새로운 풍화지표로서 탄성과 속도를 이용한 NET을 제안하였다. NET를 이용할 경우, 크기가 다른 다양한 암석에 대해 같은 크기로 풍화정도를 비교할 수 있을 것으로 판단된다.

셋째,  $S_c/S_0$ -NET 곡선에 근거한 NET을 이용하여 암석의 풍화단계를 분류한 후 이것으로부터 풍화 암석에 대한 강도추정이 가능할 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문은 2011학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드린다. 그리고 이 논문에 대해 세심한 조언을 해주신 두 분의 심사자께 진심으로 감사드린다.

## 참고문헌

1. 강성승, 김종인, 오바라 유조, 히라타 아츠오, 2011, 동결융해시험에 의한 사암 및 안산암의 풍화특성 평가, 터널과 지하공간, 21, 145-150.
2. 광진철, 백환조, 2000, 풍화에 의한 국내 편마암체의 지질공학적 물성의 변화, 한국자원공학회지, 37, 262-271.
3. 권오일, 백용, 임성빈, 서용석, 2007, 국내 주요 암종별 사면의 동결-융해에 의한 열화심도 계산, 대한지질공학회지, 17, 3, 359-365.
4. 김성수, 박형동, 1999, 인공풍화실험을 이용한 석재 물성의 변화 연구, 한국자원공학회지, 36, 141-149.
5. 김영화, 홍순호, 1990, 풍화현상에 수반하는 화강암의 물성 변화에 관한 연구, 한국자원공학회지, 23, 2, 221-232.
6. 박연준, 유광호, 양광용, 우익, 박찬, 송원경, 2003, 동결-융

- 해 시험에 의한 화강암의 풍화 특성 연구, 터널과 지하공간, 13, 3, 215-224.
7. 송원경, 우익, 김복철, 2009, 풍화가속실험을 통한 독도 암체의 풍화특성 분석, 터널과 지하공간, 19, 4, 318-327.
  8. 엄정기, 신미경, 2009, 경남 함안군 백악기 이암의 동결-융해에 따른 물성변화 및 미세균열 발현특성, 터널과 지하공간, 19, 2, 146-157.
  9. 장현식, 장보안, 이준성, 2004, 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 셰일의 동결-융해에 따른 지질공학적 특성 변화, 대한지질공학회지, 14, 4, 401-416.
  10. 정형식, 유병옥, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구, 한국지반공학회, 13, 6, 71-93.
  11. 조태진, 이상배, 황택진, 원경식, 2009, 풍화진행에 따른 한라산조면암의 역학적 특성변화, 터널과 지하공간, 19, 4, 287-303.
  12. 中村康夫, 石塚克己, 1984, 岩石の耐久性試験の比較, 応用地質 第25巻 第4号, 171-181.
  13. Chigira, M., 1990, A mechanism of chemical weathering of mudstone in a mountainous area, Engineering Geology, 29, 119-138.
  14. Jayaverdena, U. de S. and Izawa, E., 1994, A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from SriLanka, Engineering Geology, 36, 303-310.
  15. Nicholson, D. T. and Nicholson, F. H., 2000, Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, Earth Surface Processes and Landforms, 25, 1295-1308.

**강 대 완**



1982년 조선대학교 자원공학과 공학사  
2009년 순천대학교 조경학과 이학사  
2011년 순천대학교 조경학과 이학석사

E-mail: kdwk0602@hanmail.net  
현재 조선대학교 에너지자원공학과 박사과정

**오바라 유조**



1987년 Nagoya University, Eng. Dr.

E-mail: obara@kumamoto-u.ac.jp  
現在 熊本大學 大學院自然科學研究科 教授

**히라타 아츠오**



1992년 Kumamoto University, Eng. Dr.

E-mail: hirata@ce.sojo-u.ac.jp  
現在 崇城大學 Eco-design學科 教授

**강 성 승**



1993년 조선대학교 자원공학과 공학사  
1996년 강원대학교 자연대학 지구물리학과 이학석사  
2000년 Kumamoto University 토목공학과 Ph.D.

Tel: 062-230-7112  
E-mail: kangss@chosun.ac.kr  
현재 조선대학교 에너지자원공학과 교수