한국광물학회지 제 23 권 제 1 호 (2010년 3월)
J. Miner. Soc. Korea, 23(1), 63-71 (March, 2010)

규산염질 암석으로 구성된 석조문화재의 산성비에 의한 손상 임상연구

Modeling Study on Deterioration of Stone Monuments Constructed with Silicate Rock by Acid Rain

도 진 영(Jin Young Do)[1] · 조 현 구(Hyen Goo Cho)[2,*]

[1]경주대학교 문화재학부
(School of Cultural Assets, Gyeongju University, Gyeongju 780-712, Korea)
[2]경상대학교 지구환경과학과 및 기초과학연구소
(Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

요약 : 경주지역 석조문화재 구성암석으로 사용된 경주남산화강암과 석영안산암질 응회암의 산성비에 따른 손상을 예측하기 위하여 인공강우와 인공풍화시험을 적용하였다. pH 4.0 강우는 반응초기에 화강암시편의 표면에 노출된 신선한 광물 입자와 가수분해반응에 의하여 중화되나, 곧 초기산성도로 돌아갔다. 반면 pH 5.6 강우는 경주남산화강암과 반응 시 오랜 시간 동안 중성을 유지하였는데, 약한 산성도로 인하여 암석의 구성 광물이 천천히 지속적으로 가수분해되어 나타나는 결과로 보인다. 풍화된 경주남산화강암과 반응한 산성비의 산성도는 pH 5.6 강우의 경우 신선한 암석에 비해 더 오랫동안 중성을 유지하였다. 응회암과 반응한 산성비는 전체적으로는 화강암과 유사한 경향을 보이나, pH 4.0 강우의 산성도가 낮아지는 시점이 화강암에 비해 늦다. 이는 응회암과 화강암의 조직과 구성광물성분이 다르기 때문이며, 미립 내지 유리질 석기가 많은 응회암이 화강암에 비해 강우와 반응하는 성분이 더 많아서 이러한 차이를 나타낸다. 무게감소율과 강도감소율을 예측한 결과, 신선한 경주남산화강암보다 응회암이 같은 조건의 환경에서 2배 가까이 감소하였다.

주요어 : 경주남산화강암, 석영안산암질 응회암, 석조문화재, 산성비, 인공풍화

ABSTRACT : The artificial rains having different pH and weathering simulation test were performed for Gyeongju Namsan granite and dacitic tuff to predict the role of acid rain in the deterioration of stone monuments located in Gyeongju area. The pH 4.0 rain reacted with the fresh granite showed near neutral pH at the early stage due to the hydrolysis of minerals in the rock surface. But the pH changed back to the initial pH in the later stage. On the other hand, the pH 5.6 rain showed the neutral pH for a longer time than the experiment with pH 4.0 rain, reflecting slower reaction of minerals due to the weaker acidity. When the pH 5.6 rain reacted with the weathered granite, the water showed neutral pH longer than the case of the fresh granite. The similar tendencies were observed in the experiment of dacitic tuff, except that the pH 4.0 rain reacted with dacitic tuff took a longer time to go back to the initial pH as compared with the case of granite. These results may due to the differences in mineral composition and texture of two rocks. Dacitic tuff contains more fine-grained or

*교신저자: hgcho@gsnu.ac.kr

glassy groundmass than granite and is more reactive with weaker acid rain. It was predicted that the weight loss and strength decrease rate of dacitic tuff would be approximatetly twice relative to those of granite in the same experimental environment.

Key words : Gyeongju Namsan granite, dacitic tuff, Stone monument, acid rain, weathering simulation

서 론

유럽의 석조물은 산성비에 취약한 석회암과 대리석으로 주로 구성되어 있기 때문에, 석조유산이 많은 서구 각국에서는 20세기 전반부터 산성비에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 이와 더불어 산성비의 심각성에 대해 보고된 바를 토대로 환경개선을 위한 적극적인 노력이 대대적으로 진행되었으며, 지금도 철저히 규제하고 있다(Coote *et al.*, 1989; HMSO, 1989; Butlin *et al.*, 1995).

산성비에 의한 석조문화재의 피해연구는 사례연구와 실험실 연구 등으로 진행되고 있으나, 다양한 원인으로 손상된 석조물에서 오염된 환경이 얼마만큼의 역할을 하고 있는지는 이제까지의 많은 연구를 통하여서도 정량적으로는 밝혀지지 않았다(Haneef *et al.*, 1992; Nord and Tronner, 1995; Kim *et al.*, 2008).

우리나라에서도 오래된 석조물이 많은 경주지역이 대기환경적으로 양호하지 못하다는 환경학자들의 우려가 발표되면서 석조물의 손상과 환경오염과의 연관성에 대한 연구가 2000년대 들어 범정부적인 차원에서 본격적으로 시작되었다(이승일, 2000, 2002; 정종현 외, 2008).

그러나 환경부에서 제시한 우리나라 전 지역 강수의 산성도(표 1. 2008년도에 연평균 pH 4.9, 지역별로는 pH 4.5~6.1)를 볼 때 산성비에 의한 영향성 연구는 경주지역 뿐만 아니라 전국에 대해 실시해야 할 필요가 있다(환경부, 2008).

본 연구의 목적은 현재와 같은 산성 강우 조건하에서 경주지역 석조물의 손상이 얼마나 빠른 속도로 진행될 것인 가를 예측하는 것과 이와 같은 연구 결과를 토대로 타 지역 석조문화재에 대한 손상을 예측할 수 있는 기술을 개발하는 데 두고 있다. 경주지역의 석조문화재는 남산화강암과 토함산화강암, 그리고 응회암 등의 규산염질 암석(silicate rock)으로 주로 구성되어 있다. 이러한 규산염질 암석은 탄산염질 암석에 비하여 상대적으로 산성비에 덜 취약한 것으로 알려져 있어 석조문화재의 보존 차원에서는 다행스러운 일이기는 하나, 산성비에 취약한 점 때문에 연구가 활발히 진행되어 풍부한 연구 결과를 가진 탄산염질 암석에 비해 비교할 만한 연구결과가 없는 점이 이 연구의 어려움 중 하나이다. 그리고 현재 강우의 산도로서 발생하는 손상을 예측하여야 하기 때문에, 제한된 기간 동안 뚜렷한 결과를 얻어내기 위하여 강우의 산도를 극한값으로 조절하여 연구하는 것도 의미가 없다. 따라서 산성비에 의한 경주지역 석조물의 손상을 평가하기 위하여 석조물 구성 암석과 동일한 암석을 대상으로 경주지역 강우와 유사한 강우, 청정한 강우, 그리고 산성 강우를 적용한 후 온습도변화를 이용한 인공풍화시험을 병행하여 손상을 가속화시킨 후, 암석시료에 나타내는 손상 결과를 비교하였다. 강우 적용에 따른 암석 시편의 강도 변화와 무게 변화를 통하여 손상도를 예측하였으며, 암석과 반응한 강우의 산성도 변화로부터 간접적으로 암석의 변화를 추정하였다.

연구 방법

2005년도에 측정된 경주지역 강우의 산성도와 함유이온성분을 바탕으로 유사한 범위의 pH 5.6 강우를 제작하여, 경주지역 석조문화재 대표적인 구성 화강암인 경주남산화강암과 감은사지삼층석탑 구성암인 석영안산암질 응회암(dacitic tuff)에 적용하고, 경주지역 온습도변화를 적용한 인공풍화시험을 거쳐 손상을 가속화시켰다. 경주남산화강암은 알칼리화강암으로서, 주구성광물은 석영과 퍼사이트이며, 소량의 흑운모와 Na-각섬석을 포함하고 있다. 석영안산암질 응회암은 반상조직을 가지며, 반정은 주로 사장석, 흑운모, 각섬석으로 구성되며, 석기는 미정질 내지 유리질로 이루어져 있다. 측정된 경주지역의 강우는 pH 4.93~6.39로 산성비의 기준인 pH 5.6 아래로 떨어지는 경우도 잦기 때문에 pH 4.0의 강우를 제작하여 극한값과도 비교하였다(도진영 외, 2009). 제작 강우의 pH와 함유이온성분 및 그 농도는 이전 논문에 수록되어 있다. 이와 더불어 탈이온화된 pH 7.0의 증류수를 암석시편에 적용시켜 산성화된 오염강우와 반응했을 때

Table 1. Annual average acidity (pH value) of rainfall in Korea (from "Annual Report of Ambient Air Quality in Korea", 2008, Ministry of Environment Korea)

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Seoul	4.9	5	4.8	4.7	5.0	4.8	4.5	4.4	4.7	4.8	4.8
Busan	4.7	4.8	4.9	5.0	6.2	4.9	5.0	4.8	5.7	5.5	4.8
Daegu	5.4	5.6	5.8	6.0	5.6	4.8	5.3	5.3	5.5	5.6	4.8
Inchon	4.4	4.6	5.0	4.7	4.8	4.7	4.7	4.5	5.4	4.8	4.9
Gwangju	4.8	5.2	5.2	5.0	5.1	5.0	5.2	4.8	5.2	4.9	5.3
Daejeon	4.7	5.0	4.7	4.9	5.1	4.7	4.8	4.6	4.8	4.7	4.7
Ulsan	4.9	5.0	5.0	5.1	-	-	5.0	5.2	5.0	5.2	4.7

의 차이를 비교하였다.

산성도를 조절한 인공강우를 큰 크기(2 × 5 × 10 cm)와 작은 크기(2 × 2 × 0.5 cm)로 제작된 시편 3개씩에 적용하여 얻은 결과의 평균값을 취하였다. 인공풍화만을 3회를 실시한 후 인공강우와 인공풍화 동시적용 3회 순으로 하여 인공풍화시험을 총 200회 하였고, 큰 크기의 시료에는 15 ml, 작은 크기의 시료에는 2 ml의 인공강우를 암석시편이 충분히 젖어 흘러내릴 만큼의 양으로 적용하였다.

암석 풍화에 관한 규격화된 온습도 인공시험법이 없기 때문에 기존의 연구자들의 연구 방법을 참조하였다(Bortz *et al.*, 1993; 김성수, 1999). 본 연구에서는 경주의 기온을 참고하여 -10℃ ~30℃의 온도 범위에서 시험을 실시하였으며, 자세한 온도 범위는 기존 논문에 수록되어 있다(도진영 외, 2009).

강우와의 반응에 따른 암석시편의 변화를 측정하였다. 시편의 무게변화를 측정하여 강우와의 반응에 의한 암석의 손실량을 계산하였으며, 시험에 따른 무게변화량을 외삽법으로 예측하였다. 시험 진행에 따른 강도변화를 살펴보기 위해 암석시편의 초음파전달속도를 가로, 세로, 높이 방향에서 10회 측정하여 그 평균값 구하고 환산식에 대입하여 일축압축강도를 추정하였다(도진영 외, 2009). 시험 중에 측정함으로써 강우와의 반응에 따른 암석의 약화 변화를 살펴보았으며, 외삽법으로 변화량을 예상하였다.

암석시편과의 반응에 따른 인공강우의 변화를 통하여 암석시편의 변화를 알아보기 위하여, 암석시편과 반응한 후 변화된 인공강우의 산성도 변화를 pH meter로 측정하여 인공강우가 암석에 미치는 영향을 확인하였다. 그리고 암석시편과 반응한 후 변화된 인공강우의 구성성분 변화를 이온크로마토그래피법으로 측정하여 인공강우가 암석의 용해에 미치는 영향을 확인하였다.

연구 결과

인공강우의 산도변화 및 이온성분변화

암석과 반응한 강우의 pH 변화

제작한 인공강우의 초기 산성도는 pH 4.0, pH 5.6, pH 7.0이다. 강우를 암석시편에 적용한 후 흘러내린 강우를 모아서 인공풍화시험 30회 후, 60회 후, 85회 후, 그리고 200회 종결된 후에 모아진 강우의 pH를 측정하여 반응 전 강우의 pH와 비교하였다. pH 7.0 강우는 120회 후에 측정된 값으로 다른 산성도 강우와는 처리횟수에서 차이가 있다.

시험 후 규산염질 암석과 반응한 강우의 산성도는 모두 변화하였다(그림 1).

신선한 경주남산화강암(G1)에 처리한 pH 4.0의 강우는 30회 후에 pH 5.91, 60회 후에는 약간 더 높아졌다. 그러나 처리 85회 후 부터는 pH 4.19 값으로 떨어졌으며, 시험횟수가 거듭되어 200회까지 처리된 다음에는 pH 4.04로 낮아져 시작 점인 pH 4.0에 거의 도달했다. pH 5.6 강우는 30회 처리 후에 이미 거의 중성(pH 6.84)을 띠었으며, 85회 후에는 pH 7.01. 200회 후에는 더 상승하여 pH 7.17을 기록, 암석과의 반응으로 인하여 중성화되는 경향을 보였다. G1과 반응한 중성(pH 7.0)의 탈이온수는 120회 후에 pH 6.92로 약간 낮아졌다. 즉 pH 4.0 강우는 신선한 경주남산화강암과 반응직후 중화되며, 곧 초기산도로 복귀하는 반면, pH 5.6의 강우는 반응직후부터 중화되나 반응이 진행되어도 중성을 지속하는 시간이 pH 4.0 강우에 비해 길다.

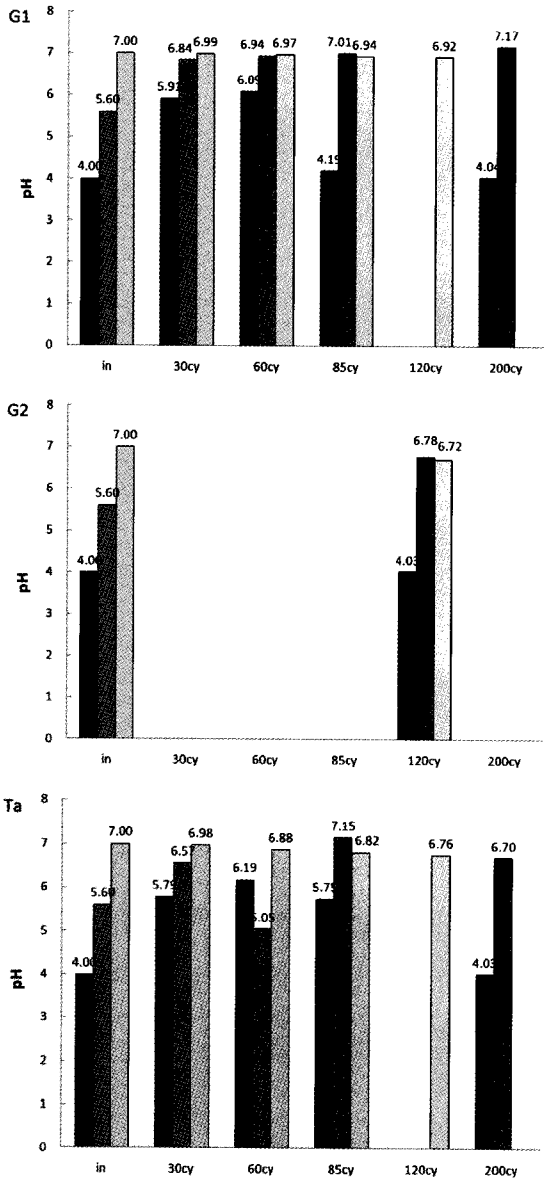


Fig. 1. Acidity (pH) change of artificial rain after reaction with tested rock samples (G1; fresh Gyeongju Nasam granite, G2; weathered Gyeongju Nasam granite, Ta; dacitic tuff).

그리고 pH 7.0 강우는 반응이 진행되어도 약간 산도가 떨어지나 거의 변화가 없다.

이는 암석의 구성성분이 산성비 또는 중성비와 반응하여 중화되는 것으로, 결국 암석이 화학적 풍화에 의하여 변질되었음을 의미한다. 강우의 산성도가 강할 경우에는, 초기에는 암석의 표면에 드러난 반응에 취약한 사장석이나 알칼리장석과 같은 광물 입자의 가수분해 반응에 의하여 산성도가 약화되지만, 강우가 닿을 수 있는 곳의 입자가 더 반응할 수 없을 때까지는 강우의 산성도가 그대로 유지되는 것으로 보인다. 암석 표면에 드러나 있는 사장석이나 알칼리장석 입자들이 가수분해반응에 의하여 반응한 이후, 광물 입자 사이의 결합력이 약해지므로 암석으로부터 이탈되는 경향이 크기 때문에 강한 산성을 띠는 비의 산성도는 일정기간은 산도변화를 보이지 않는 것으로 판단된다.

대기 조건하에서 발생하는 Leinster granite의 손상을 화학적인 관점에서 살펴본 연구에서는 빗물의 변화가 초기 25주 동안에 발생하였다고 보고하였다(Sweevers *et al.*, 1995). 암석시편이 시험을 위해 절단되는 과정에서 표면의 약화가 발생하였기에 이러한 변화를 가져왔으며, 즉 암석시편이 안정화단계에 이르는 시간 동안에 급격한 변화가 일어난다고 보았다.

산성비가 내려 남산화강암과 반응하는 경우를 정리해보면, 강우가 내리고 짧은 시간 내에 암석의 화학적 풍화가 급격하게 발생하다가 어느 정도 경과하면, 즉 더 이상 표면에 노출된 광물의 가수분해반응이 여유롭지 않고, 또는 더 깊은 곳까지 침투해 들어가는 데 시간이 걸리면 더 이상 반응할 암석의 구성성분이 적어 암석과 반응하여도 강우의 산성도는 변화가 없는 것으로 보인다.

풍화된 경주남산화강암(G2)과 반응한 pH 4.0의 강우는 120회 처리를 거친 결과가 신선한 암석의 200회 결과와 유사한 수치를 보였다. pH 5.6의 강우는 중성으로, pH 7.0 강우는 약하게 산성화되었으나 신선한 암석에 비해 그 정도는 크다. 이러한 결과는 광물-물반응의 기존연구에서 풍화암인 경우, 물과 반응하였을 때 오히려 pH의 급격한 감소가 나타났다가 다시 상승하는 결과와 유사하다. 이것은 풍화산물인 이차광물 때문으로, 카올리나이트, 일라이트와 같은 점토광물에 의해 증가된 알루미놀 등이 pH를 떨어뜨리는 역할을 하며 급격한 pH의 감소 이후의 상승은 광물표면에서 H^+를 흡착하기 때문인 것으로 해석하였다(이수재, 1996).

이러한 경향은 응회암에서도 유사하게 나타난다. 산성도가 강할 때 보다 한계 산성비와 반응하였을 때 암석의 용해는 지속적으로 더 일어날 수 있음을 결과를 통해 살펴볼 수 있다. 다만 강한 산성비와의 반응에 비해 암석의 용해가 서서히 일어나기 때문에 80회 이후에도 지속적으로 암석과 반응하여

Table 2. Change of ion contents of artificial rain after reaction with rock specimens

	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
Rain pH 4.0	46.1	9.0	0.2	0.1	95.4	66.1	9.4
G1 pH 4.0-200*	50.1 ± 0.2	10.2 ± 5.7	0.3 ± 0.0	1.4 ± 0.0	89.9 ± 5.2	8.2 ± 0.6	10.0 ± 0.2
G2 pH 4.0-120**	55.4 ± 0.5	5.6 ± 0.4	0.4 ± 0.1	1.46 ± 0.3	85.6 ± 1.8	8.2 ± 0.2	9.9 ± 0.3
Ta pH 4.0-200	52.3 ± 2.5	5.5 ± 1.8	0.6 ± 0.1	2.6 ± 1.8	89.2 ± 7.9	8.6 ± 0.5	11.2 ± 1.0
Rain pH 5.6	69.5	1.1	-	0.2	94.5	61.8	9.4
G1 pH 5.6-200	68.8 ± 1.1	2.0 ± 0.3	0.3 ± 0.1	2.0 ± 0.2	87.6 ± 4.7	12.6 ± 0.8	9.2 ± 0.4
G2 pH 5.6-120	61.3 ± 1.4	1.7 ± 0.6	0.3 ± 0.0	1.9 ± 0.6	87.5 ± 0.7	12.0 ± 0.3	8.1 ± 0.6
Ta pH 5.6-200	68.4 ± 0.9	3.5 ± 1.1	0.5 ± 0.0	2.7 ± 0.6	87.4 ± 2.7	15.5 ± 1.3	10.6 ± 0.9
Rain pH 7.0	0.1	0.1	-	0.1	-	0.1	0.1
G1 pH 7.0-120	1.9 ± 0.6	1.3 ± 0.4	0.3 ± 0.0	0.4 ± 0.1	-	-	-
G2 pH 7.0-120	3.2 ± 0.2	2.3 ± 0.2	0.3 ± 0.0	0.5 ± 0.2	-	-	0.1 ± 0.0
Ta pH 7.0-120	2.9 ± 0.2	3.1 ± 0.9	0.3 ± 0.1	1.6 ± 0.2	-	-	0.1 ± 0.0

* Number of treatment : 200 cycle
** Number of treatment : 120 cycle

강우의 산성도는 약화되는 결과를 보이지만 200회 이후의 pH 값은 다시 하강하여 pH 4.0에서와 유사한 경향을 띤다. 다만 이렇게 되는 데까지 걸리는 시간이 pH 4.0 강우에 비해 더 소요되는 것은 시험결과상 분명하게 드러나고 있다. 응회암과 반응한 산성비는 전체적으로는 화강암과 유사한 경향을 띠고 있으나 차이점은 있다. 85회 처리까지에서도 산성비에 의해 지속적으로 많이 반응을 하여 산도가 쉽게 떨어지지 않다가 200회 종료시점에서는 급격히 낮아져 시작 pH 4.0과 유사해졌다. 이는 응회암의 조직과 구성광물성분이 화강암과는 다른데서 해석이 가능하다. 미정질 내지 유리질의 바탕질이 많은 응회암은 화강암에 비해 강우에 의해 화학적 풍화에 반응하는 광물질 성분이 더 많아서 이러한 차이를 나타내는 것으로 보인다.

강우의 산도에 따른 규산염질 암석의 반응을 정리하면, 산성도가 강한 강우는 초기에 급격한 산도 변화를 보이는데 이는 암석의 용해가 급속히 초기에 이루어짐을 의미하고, 한계 산성비는 지속적으로 중성적인 산도를 유지하는데 이는 암석의 용해가 서서히 지속적으로 일어났기 때문으로 볼 수 있다. 규산염질 암석의 종류에 따른 반응 결과, 화강암에 비해 바탕질이 많은 응회암은 강우에 의해 화학적 풍화를 일으키는 광물 성분이 더 많아서 동일 조건의 화강암에 비해 강우의 산도가 중성을 더 오래 유지한다고 할 수 있다.

암석과 반응한 강우의 함유이온성분변화

규산염질 암석시편과 반응한 인공강우의 함유이온성분에도 변화가 있다(표 2).

경주남산화강암과 반응한 강우의 이온성분은 정도의 차이는 있지만 함유량에서 변화를 보였다. 가장 큰 변화를 보인 성분은 Na^+로, pH 4.0 강우와 30회 처리를 거친 후에 2배에 이르는 양으로 증가하였다가 처리회수가 증가하면서 약간 감소하기는 하였지만 초기산성비에 비해 큰 값을 보였다. 남산화강암과 반응한 pH 4.0 강우 내 Ca^{2+}이나, K^+, Mg^{2+}의 함량도 월등히 증가하고 있다. 화강암과 반응한 탈이온수에서도 40배에 가까운 Na^+가 검출되었으며, 풍화암에서는 60배에 달하는 양이 검출되었다. 이러한 경향은 K^+에서도 유사하게 나타나고 있다. 처리회수가 증가하여 200회에 이르러서는 암석과 반응한 강우의 구성 음이온성분들의 함량이 모두 감소하였다. 이는 강우 중의 음이온들이 풍화가 진행되어 약해진 광물의 표면에 흡착되는 것에서 기인하는 것으로 해석하였다(Sweevers *et al.*, 1995).

응회암과 반응한 인공강우의 함유성분에도 큰 변화가 발생하였다. 응회암은 화강암과는 달리 산성도가 큰 강우와 반응시에 Na^+이 지속적으로 증가하고 있는 결과가 나타났다. pH 5.6 강우와의 반

응에서는 초기에 급격한 함량의 증가를 나타내었으며, 약간의 감소를 보이다가 다시 증가하고 있다. 산성비와 반응 초기에 Ca^{2+}이 급격히 증가하였으며, 약산성비와의 반응 초기에도 급격한 K^{+}의 증가를 보인다. pH 7.0 강우와의 반응에서는 양이온이 40~60배로 급격하게 증가하였다.

인공강우와 인공풍화 시험에 따른 시편의 변화

강우와의 반응으로 인한 암석시편의 무게변화

인공강우와 인공풍화시험을 진행하는 동안 나타난 시험편의 무게변화는 다음과 같다.

신선한 경주남산화강암(G1)은 200회 인공풍화만을 시험했을 때, 무게가 0.25 wt% 감소하였으며, 85회 후까지 0.21 wt%에 비해 감소되는 정도는 작아졌다. 산성 강우 pH 4.0, pH 5.6과 반응한 후에는 0.32 wt%가 줄었는데 같은 수치이지만 감소경향은 약간 차이가 있다. pH 4.0은 85회 이후 약 0.3%가 줄어들고 이후의 감소율이 적은 반면, pH 5.6과는 85회 때 0.23%, 200회 때 0.32%로 85회 이후 줄어드는 비율이 pH 4.0보다 더 높았다. 즉 신선한 경주남산화강암은 (G1) 초기의 무게변화량이 크며, 강우의 산성도에 따라 무게변화량의 추이가 다르다. pH 4.0 강우는 초기변화량이 크고 이후 감소율이 적은 반면, pH 5.6은 초기변화량이 크기는 하나 이후에도 지속적으로 감소하였다.

풍화된 경주남산화강암(G2)에서는 강우의 산도에 관계없이 처리회수 대비 신선한 암석에 비해 감소율이 증가하였다. 120회 처리까지의 시험을 거치면서 무게변화가 크지 않고, 또 화강암의 구성입자가 커서 광물알갱이 하나의 이탈에 의해 무게가 좌우되기 때문에 예측은 현재로서는 어렵다.

Micro catchment units라는 시험대를 설치하여 화강암 시편의 run off water를 받은 후, 떨어져 나온 암석의 이탈물을 3년간 모아 무게를 측정한 결과, 화강암에서의 무게손실은 무시할 정도로 매우 미미하다는 연구결과가 보고되어 있다(Sweevers *et al.*, 1995). 대기 하에서의 결과이기는 하나 화강암의 높은 풍화저항성으로 인하여 짧은 기간 내에 현저한 변화가 발생하는 것을 기대하기는 어렵다는 것을 암시한다.

응회암의 무게변화량은 화강암의 거의 두배에 가까운 결과를 보였다. 큰 광물입자보다는 바탕질이 많은 암석조직에서 기인한 것으로 보인다.

산성비, 인공풍화에 의한 암석시편의 무게 감소가 차후 중장기적으로 이러한 조건에서 어떻게 될지에 대한 예측을 그래프를 통해 계산하였다.

석조물의 손상율을 예측한 연구는 무게변화율을 통해 주로 이루어졌다. 산성강하물에 의한 건축물과 건축재료의 영향을 NMEP (National Materials Exposure Programme, 1986)에서 8년간 진행하여 발표한 보고에서 산성강하물에 의한 재료의 손상율이 아래와 같이 제시되었다(Butlin *et al.*, 1995).

$$\text{손상율} = a[SO_2] + b[H^+] + [\text{rainfall}] + d$$

석회질 암석에 대해서는 더욱 구체적으로

$$\text{연 표면침식율(mm)} = 8.4 + 1.36\,(SO_2) + 0.0048\,(\text{Rainfall}) + 29\,(H^+)$$

$R^2 = 0.73$, (SO_2 : mg/m^3) (Rainfall, mm) (H^+, g/m^2)

이라는 수식이 제기되었으며, 이는 가스상태의 강하물을 우선 고려하였을 때의 결과로서 본 연구의 결과처리법으로 응용할 수 있다.

Roekens and van Grieken (1989)도 사질석회암으로 무게손실율과 표면침식율에 의한 손상율을 아래와 같이 예측하여, 방해석 주구성 광물의 암석에서는 19±5 μm/year가 손실될 수 있음을 밝혔다.

$$\text{총 연간무게손실율} = C(\text{tot}) \times r(y) \times [\text{ground area}]$$

r(y) ; 연간 침전물량

$C(\text{tot}) = [CaCO_3\ \text{당량}] \times [Ca^{2+}] + C(\text{tsp})$

$[Ca^{2+}]$; run off 중의 농도

$$\text{년 침식율, } R\ (g/m^2 \cdot \text{year}) = E \times r(y) / r(si)$$

$E = C(\text{tot}) \times [\text{run off 포집부피}] / [\text{반응면의 면적}]$

r(si) ; 포집기간 중의 침전량

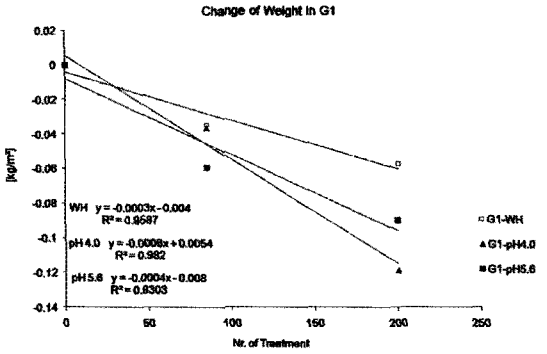
$$\text{년 표면침식율}(\mu m/\text{year}) = R/d$$

d ; 암석밀도

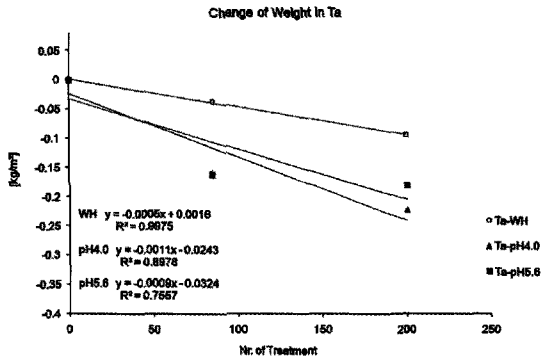
$$\text{총무게손실량} = R \times \text{강수노출면}$$

Vleugels and van Grieken (1994)은 방해석 손실량로부터 총 칼슘 손실량을 측정하여 1,830~1,890 mg/year이 손실됨을 보고하였으나, 실험실시 40주 이후로는 손실되는 양이 줄어들었다고 하였다.

이와 같은 연구결과는 문화재 자체에서 실행되는 것으로서, 화강암과 같이 풍화저항성이 큰 암석

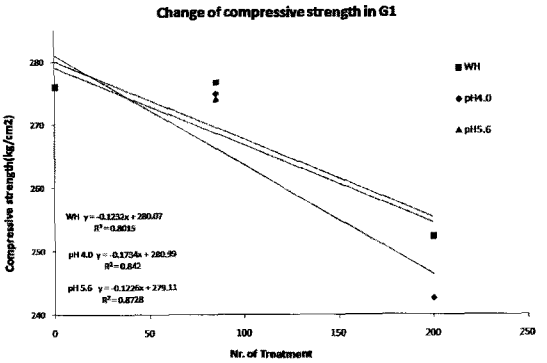


(a) Change of weight in G1 (Gyeongju Namsan granite)

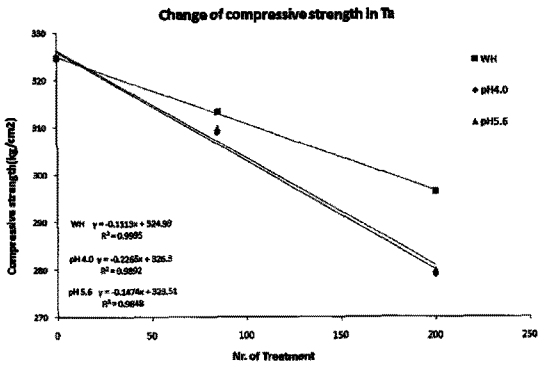


(b) Change of weight in Ta (Decitic tuff)

Fig. 2. Weight reducing rates and fit equations of rock specimens reacted with artificial rain.0



(a) Change of compressive strength in G1 (Gyeongju Namsan granite)



(b) Change of compressive strength in Ta (Dacitic tuff)

Fig. 3. Reducing rates of compressive strength and fit equations of rock specimens reacted with artificial rain.

에서는 본 연구에서와 같이 손상을 가속화시키는 방법이 고려되어야 결과를 얻어낼 수 있다. 강우와 인공풍화에 의한 가속화시험에 따른 암석시편의 무게감소율과 그 경향을 그림 2에 표현하였다. 도출된 식에 의하면, 신선한 경주남산화강암 G1이 인공풍화만을 받을 경우 매회 0.0003 kg/m^{2}의 무게 감소가 발생한다. pH 4.0의 강우와 인공풍화시험을 거친 경우에는 매회 0.0006 kg/m^{2}의 무게변화가 나타나 강우에 접하지 않았을 때보다 무게가 두배로 줄어들며, pH 5.6 강우에서는 매회 0.0004 kg/m^{2}의 변화가 있을 것으로 예측된다. 응회암은 인공풍화만을 받을 경우 매회 0.0005 kg/m^{2}의 무게감소가 발생하였다. pH 4.0의 강우와 인공풍화시험을 거친 경우에는 매회 0.0011 kg/m^{2}의 무게변화가 나타나 강우에 접하지 않았을 때보다 무게가 두배로 줄어들 것과, pH 5.6 강우에서는 매회 0.0009 kg/m^{2}의 변화가 있을 것으로 예측된다.

강우와의 반응으로 인한 암석시편의 일축압축강도변화

강우처리와 인공풍화시험에 따라 암석의 일축압축강도에도 변화를 보였다.

인공강우와 인공풍화 200회 거친 화강암의 추정 압축강도는 수치만으로 보기에는 추이를 가려내기가 쉽지 않다. 따라서 시험회수에 따른 데이터를 이용하여 그 변화값을 그래프상에 나타내어 그 변화량을 예측하였다. 그림 3a는 신선한 경주화강암(G1)의 강도감소율과 함께 그 경향을 표현한 것이다. 나타난 식에 의하면, 인공풍화만을 받을 경우 매회 0.1232 kg/cm^{2}의 강도 감소가 발생한다. pH 4.0의 강우와 인공풍화시험을 거친 경우에는 매회 0.1734 kg/cm^{2}의 변화가 나타나 강우에 접하지 않았을 때보다 강도감소율이 70% 크다. pH 5.6 강우와 인공풍화시험에서는 매회, 0.1226 kg/cm^{2}의 변화가 있음을 의미한다.

응회암에서는 인공풍화만을 거친 시편의 강도도 처리전에 비해 현저하게 감소되었으며, 강우를 처리한 모든 시편에서 변화가 있었다(그림 3b). 인공풍화만을 받을 경우 매회 0.1113 kg/cm^{2}의 강도 감소가 발생한다. pH 4.0의 강우와 인공풍화시험을 거친 경우에는 매회 0.2307 kg/cm^{2}의 변화가 나타나 강우에 접하지 않았을 때보다 강도감소율이 두 배 이상 크다. pH 5.6 강우와 인공풍화시험에서는 매회, 0.2265 kg/cm^{2}의 변화가 예측된다.

결 론

경주지역 석조문화재 구성암석으로 사용된 경주남산화강암과 석영안산암질 응회암의 산성비에 따른 손상을 예측하기 위하여 인공강우와 인공풍화시험을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

pH 5.6 강우가 화강암과 반응 시 중성근처로 중화되었다. 강우의 산성도가 강할 경우에는 초기에는 암석의 표면에 드러난 반응에 취약한 사장석이나 알칼리장석과 같은 광물 입자의 가수분해 반응에 의하여 중화되나, 강우가 닿을 수 있는 곳의 입자가 더 반응할 수 없을 때까지는 강우의 초기산성도로 돌아간다. 암석 표면에 드러나 있는 사장석이나 알칼리장석 입자들이 가수분해반응에 의하여 반응한 이후, 광물 입자 사이의 결합력이 약해지므로 암석으로부터 이탈되어 새로운 광물 입자들이 노출되면 pH가 다시 올라갈 것으로 추정된다. 풍화된 경주남산화강암과 반응한 산성비의 산성도는 pH 5.6 강우의 경우에 오랫동안 중성을 유지하는데, 약한 산성도로 인하여 암석 구성물질이 천천히 지속적으로 가수분해되어 나타나는 결과로 보인다.

응회암과 반응한 산성비는 전체적으로는 화강암과 유사한 경향을 보이나 화강암에 비해 산성도가 낮아지는 시점이 늦다. 이는 응회암과 화강암의 조직과 구성광물성분이 다르기 때문이며, 유리질 내지 미립질의 석기가 많은 응회암이 화강암에 비해 강우에 의해 가수분해반응되는 성분이 더 많기 때문이다.

무게감소율과 강도감소율을 예측한 결과, 신선한 경주남산화강암보다 응회암이 같은 조건의 환경에서 2배 가까이 감소하였다. 이와 같은 실험법으로 경주지역 석조문화재가 시간의 흐름에 따라 어느 정도 손상될 것인가를 예측할 수 있으며, 시험에 따른 밀도, 공극율, 물흡수율 및 강도 등의 물성측정수치로부터 손상되는 정도를 예상할 수 있을 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 2009년도 국립문화재연구소 보존과학 R&D 사업 지원에 의해 진행되었으며, 부족한 원고를 읽고 유익한 지적을 하여 주신 김강주 교수님과 익명의 심사자에게도 감사드립니다.

참고문헌

김성수 (1999) 인공풍화실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가. 서울대학교 석사학위논문, 82.

도진영, 최기주, 조현구 (2009) 산성비에 의한 경주남산지역 석조문화재의 손상 임상연구. 한국광물학회지, 22, 35-47.

이수재 (1996) 남산화강암의 풍화현상에 대한 광물-물 반응 연구. 서울대학교 박사학위논문.

이승일 (2000) 경주지역 문화재보존을 위한 대기환경질 조사 I. 서라벌대학 논문집, 제18집, 327-344.

이승일 (2002) 신라문화권 지역에서 산성대기오염물질 침적량 추정. 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, 79-80.

정종현, 정민호, 손병현 (2008) 경주지역 석조문화재 풍화훼손 특성. 신라문화, 제30집, 243-272.

환경부 (2008) 대기환경연보, 339p.

Bortz, S.A. and Wonneberger, B. (1995) Durability testing of thin stone. Rock Mechanics, Proc. 35th U.S. Sympo, 373-378.

Butlin, R.N., Yates, T.J.S., Murray, M., and Ashall, G. (1995) The United Kingdom national materials exposure programme. Water, Air, and Soil Pollution 85, 2655-2660.

Coote, A., Lewry, A., and Yates, T. (1989) Acid Deposition and Building Materials. In: Acid Deposition, JWS. Longhurst, Hrsg. (eds), 265-286.

HMSO (1989) The Effects of Acid Deposition on Buildings and Building Materials in the UK. Building Effects Review Group Report.

Haneef, S., Dickinson, C., and Johnson, J. (1992) Simulation of the Degradation of coupled stones by artificial acid rain. Studies in Conservation, 37, 105-112.

Kim, K.Y., Do, J.Y, Kim, Y.J., Youn., M., and Ryu., J (2008) Measurement of Submicron Aerosols in the Urban Area of Seoul and in the National Park Area of

Gyeongju Using PIXE Analysis. Journal of Korean Physical Society, 52, 896-903.

Nord, A.G. and Tronner, K. (1995) Effect of acid rain on sandstone: The royal palace and the riddarholm church, stockholm. Water, Air, and Soil pollution, 85, 2719-2724.

Roekens, E. and van Grieken, R. (1989) Rates of air pollution induced surface recession and material loss for a cathedral in Belgium. Atmospheric Environment, 23, 271-277.

Sweevers, H., Peeters, A., and Van Grieken, R. (1995) Weathering of Leinster granite under ambient atmospheric conditions. Science of the Total Environment, 167, 73-85.

Vleugels, G.J. and van Grieken R.E. (1994) Weathering of treated and untreated limestones in atmospheric exposures. APT Bulletin, 48-51.

접수일(2010년 3월 3일), 수정일(1차 : 2010년 3월 22일), 게재확정일(2010년 3월 22일)