

풍화에 의한 화강암의 물리적 특성 변화

정문헌¹, 이주호¹, 손병현^{1*}
¹한서대학교 환경공학과

Changes in the Physical Properties of Granite by Weathering

Moon-Hun Jung¹, Joo-Ho Lee¹ and Byung-Hyun Shon^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Hanseo University

요약 대부분의 석조문화재는 외부 환경에 노출되어 있어 외관이 크게 변형되어졌고, 특히 최근의 산업화와 환경 오염물질의 영향으로 풍화가 가속화되고 있다. 해수에 신선한 화강암을 침수시켰을 때 암석 표면의 구성광물(Ca, K)은 대부분 신선한 화강암(fresh granite)보다 낮은 농도값을 나타내어 해수에 의한 풍화의 영향 정도를 확인할 수 있었다. 실험 전후의 화강암의 물리적 특성 분석 결과, 강제 풍화시킨 시료의 밀도는 평균 2.580-2.582 g/cm³으로 신선한 화강암(평균밀도는 2.600 g/cm³)에 비해 약간 낮은 값을 보였다. 또한 강제풍화시킨 화강암의 흡수율은 0.526~0.616%로서 신선한 화강암에 비해 1.3-1.6배 정도 높게 나타났다. TiO₂ 광촉매를 화강암에 코팅한 후 산성용액과 해수에 의한 강제풍화시 흡수율과 밀도 변화가 많이 저감되어 석조문화재의 풍화를 예방하는 효과가 있을 것으로 나타났다.

Abstract Because the stone cultural properties located outdoors, they have been altered and deteriorated in external appearance due to environmental factors. Damage to stone cultural properties is accelerated particularly due to recent industrial development and environmental pollution. When fresh granite was dipped into the seawater, the mineral compositions(Ca, K) of the granite surface were lower than those of the fresh granite and density of the weathered granite was steadily decreased from 2.600 g/cm³ to 2.580-2.582 g/cm³. Also, absorption capacity of the weathered granite was steadily increased from 0.392% to 0.526~0.616%. In the case of TiO₂ was coated to the granite, the change of density and absorption ratio of TiO₂ coated granite were decreased. Therefore, the TiO₂ coating considered to be a viable method to assist in the conservation of stone cultural properties from environmental contaminants.

Key Words : Absorption ratio, Stone cultural properties, Density, Physical property, Granite

1. 서론

석탑, 석불, 부도, 비석, 당간지주 등 국내의 석조문화재는 삼국시대 이래로 조선말까지 축조된 것으로서 대부분 실외에 설치되어 있어 자연적인 풍화현상으로 원래의 모습과 형태가 크게 훼손되어지고 있다[1]. 풍화의 주요한 원인은 수분, 해수의 염분, 기온변화, 수분의 동결-융해, 생물서식 및 환경오염물질 등이며, 이들 요인 중에서 한 가지 현상이 영향을 미치는 것이 아니라 이들이 동시에 복합적으로 영향을 미친다. 최근에는 산성비 및 환경오염물질이 석조문화재의 훼손을 가속화시키고 있어 석

조문화재의 보존에 관한 과학적 연구가 시급히 요구되고 있는 실정이다.

석조문화재의 훼손에 영향을 주는 대기오염물질로는 SOx, NOx, CO₂ 및 에어로졸 등으로서 이들은 지상에 건조된 상태 또는 빗물 및 수분에 녹은 상태로 침적하게 된다. 이와 같은 산성 강하물은 특히 대리석의 풍화를 촉진시키는 것으로 알려져 있다[2]. 산성비는 석조물과 반응하여 구성광물들을 용해하여 점토광물을 침전시키며, 또한 빗물에 용존해 있는 SOx 성분은 장석이 용해되어 생성된 Ca, Mg, Na와 결합하여 황화염(석고 등)을 침전시킨다[3]. 석재에 피해를 주는 염은 주로 황산염, 질산

이 논문은 2008년도 한서대학교 교비 학술연구 지원 사업에 의하여 연구되었음

*교신저자 : 손병현(bhshon@hanseo.ac.kr)

접수일 09년 06월 18일

수정일 09년 07월 24일

게재확정일 09년 08월 19일

염, 염산염, 그리고 탄산염 등이며, 석재 내부로 유입되는 염의 종류에는 석재 자체의 성분, 지하수에 용해된 형태, 해안지방에서는 해수의 분무, 도시환경에서는 겨울철 제설제 그리고 석재표면처리제 등을 통해서 석재로 유입된다. 석재에 피해를 주는 염의 양이온은 주로 암석 자체로부터 기인하는 반면, 음이온은 대부분 외부의 영향에 의해 침착되거나 또한 산성비와 같이 오염된 대기에서 기인한다[4]. 이와 같이 외부의 물리적/화학적 오염원이나 자연적인 풍화작용으로 화강암의 물리적 특성이 변화되어 지는데 암석의 강도에 크게 영향을 미치는 밀도와 수분흡수율의 변화정도를 파악하여 화강암의 풍화 정도를 파악하고자 한다. 또한 장기적으로는 석조문화재의 보존이 연구의 최종 목적이므로 보존방법의 일환으로 sol-gel 법을 이용하여 제조한 TiO₂ 코팅 sol[5]을 석조문화재에 코팅하여 광촉매의 코팅이 화강암의 밀도와 수분흡수율의 변화에 어느 정도 효과적인지도 살펴보고자 한다.

2. 연구내용 및 범위

본 연구에서는 석조문화재와 동일 재질의 화강암을 이용하여 인위적으로 제조한 산성수와 해수에 신선한 화강암을 침수하여 시간의 경과에 따른 실험시료의 물리적 특성을 분석하였다. 실험시료의 채취는 경주에 위치한 석재회사에 의뢰하여 국제암반공학회에서 제안한 6단계의 기준 중에서 F(Fresh) 등급의 화강암 석재를 선택하였다. 시료의 형태는 실험의 특성과 물성분석에 맞게 정육면체 형태로 제작하였으며, 실험 전·후의 분석은 한서대학교 기술혁신센터에 의뢰하여 X-선 회절분석기(XRD, model : D/MAX 2200+ULTIMA)를 이용하였고 밀도와 수분흡

수율은 한국공업규격 KS-F 2518, 2519(석재의 물리적 시험법)에 준하여 실시한다.

산성비의 성분에는 황산화물(SO_x)에 기인한 황산, 질소산화물(NO_x)에 기인한 질산, 염산, 탄산 등이 혼합되어 있는데 산성수에 관한 실험에서는 연속적으로 침수하는 방식[7]이 가장 합리적이라고 생각되어, 본 연구에서도 원하는 산성도(pH 4, 시약용 염산을 이용)를 제조한 후 연속적으로 석재를 침수하는 방식을 사용하였으며, 침수를 마친 석재 시료는 즉시 증류수로 산을 제거하여 염이 형성되는 것을 방지하였다. 또한 해수의 염분에 의한 강제풍화실험은 경주 인근 해역에서 채취한 바닷물에 시료를 연속적으로 침수 후 화강암의 물리적 특성 변화를 관찰한다. 본 실험에 사용된 신선한 화강암의 조성과 해수의 수질화학적 특성은 표 1, 표 2와 같다. 해수의 pH는 7.42로 약알칼리성이며 전기전도도는 45.1 mS/cm을 나타내었다. 양이온은 기초과학지원연구원 대덕본원의 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, X-series (X5, X7), VG Elemental Ltd.)를 이용하여 분석하였으며, Ca²⁺ 321 mg/L, K⁺ 410 mg/L, Mg²⁺ 939 mg/L, Si⁺ 0.54 mg/L, 그리고 Na⁺ 0.96%가 검출되었다. 또한 석조문화재의 보존에 광촉매 코팅이 어느 정도 영향을 미치는지 규명해 보고자 TiO₂ sol을 제조하여 신선한 화강암에 코팅한 후 실험 전·후의 물리적 특성 변화도 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 풍화된 화강암의 물리적 특성

인공풍화 석재의 풍화에 따른 암석의 물성변화를 측정하기 위해 실험 전 후의 밀도, 흡수율을 측정하였으며 표

[표 1] 신선한 화강암의 조성 및 물리적 특성

	조성(wt%)							밀도(g/cm ³)	기공도(%)	흡수율(%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O			
신선한 화강암	66.20	18.66	1.57	0.65	0.84	8.23	2.75	2.60	0.49	0.39

[표 2] 해수의 특성

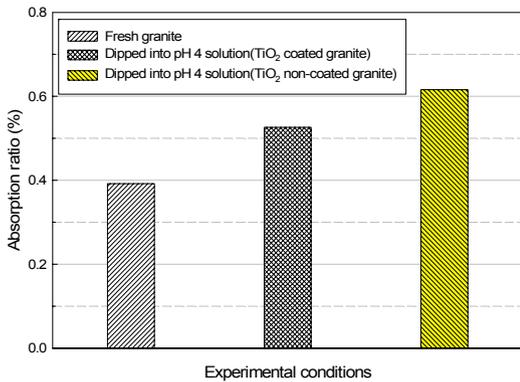
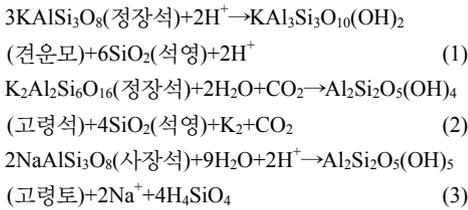
pH	양이온(mg/L, 단 Na는 %)								전도도(mS/cm)
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	
7.42	<0.1	321	<0.02	410	939	<0.01	0.96	0.54	45.1

[표 3] 강제 풍화시킨 화강암의 물리적 특성 변화

물리적 특성	신선한 화강암	pH 4 용액에 침수한 TiO ₂ 코팅 화강암	pH 4 용액에 침수한 TiO ₂ 코팅하지 않은 화강암	일반적인 화강암 ^{8,9)}
밀도 (g/cm ³)	2.600	2.580	2.582	2.50-2.81
흡수율 (%)	0.392	0.526	0.616	0.34-0.35

3과 같다. 풍화작용을 받지 않은 일반적인 화강암의 밀도는 2.50-2.81(평균 2.64) g/cm³이며 본 실험에서 사용한 신선한 화강암의 평균밀도는 2.60 g/cm³이었다. pH 4인 용액에 강제 풍화시킨 시료의 밀도는 TiO₂ sol로 코팅한 경우 2.582 g/cm³, TiO₂ sol로 코팅하지 않은 경우에는 2.580 g/cm³으로 신선한 화강암에 비해 약간 낮은 값(약 7.8%)을 보였다. 이는 인공적인 풍화에 의해 공극과 절리가 발달하였기 때문으로 사료되며 또한 강제풍화로 인해 조암광물의 입자결합이 약해지고 암석의 강도가 낮아졌음을 의미한다[8,9].

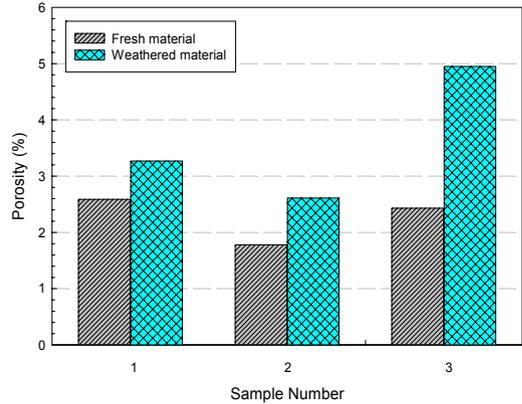
암석의 풍화는 여러 가지 화학작용이 복합적으로 작용하여 암석의 성분, 성질 및 조직을 파괴한다. 수소이온에 의한 가수분해와 수화반응으로 암석의 이차광물을 생성시키는 주요 반응은 식 (1), (2), (3)과 같이 장석이 고령석이나 견운모 형태로 변화하는 것으로 알려지고 있으며, 특히 화강암류의 풍화는 장석류의 변질에서 시작된다고 김 등¹⁰⁾은 발표하였다.



[그림 1] 화강암의 수분 흡수율 변화

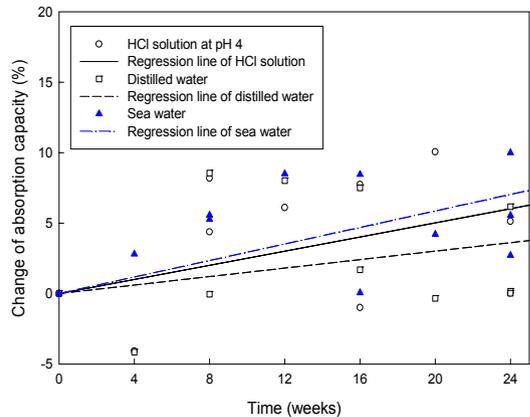
그림 1은 강제인공풍화 석재의 풍화에 따른 석재의 흡수율을 나타낸 것이다. 암석의 흡수율은 공극률과 밀접한 관계가 있는 것으로서(그림 2), 내부의 수분이 침투하여 포화상태일 때의 흡수율을 백분율로 나타낸 것이다. pH 4인 용액에 침수 실험한 시료의 흡수율은 0.526%(TiO₂ coating)~0.616%(TiO₂ non-coating)로 나타나 신선한 화강암(0.392%)에 비해 1.34~1.57배 정도 수분흡수율이 높

아 화강암의 내구성이 낮아질 수 있음을 알 수 있다. 또한 광축매 코팅은 코팅하지 않은 경우보다 흡수율의 감소(약 17%)를 보여 화강암의 표면에 TiO₂를 코팅하면 화강암의 풍화를 예방하는 효과가 있을 것으로 판단된다 [11].



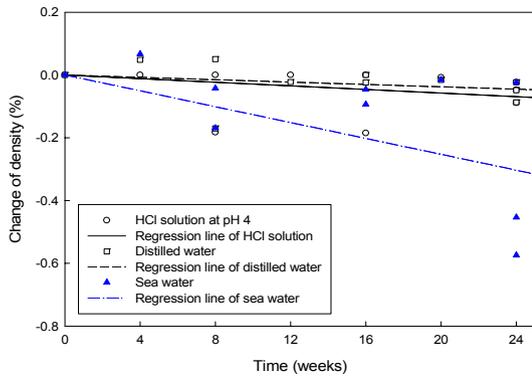
[그림 2] 신선한 화강암과 풍화된 화강암의 기공도 비교

그림 3은 증류수, pH 4인 염산용액 및 바닷물에 화강암 시료를 침수하였을 때 시간의 경과에 따른 수분 흡수율 변화를 나타낸 것이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 시간이 경과함에 따라 수분 흡수율이 계속 증가하는 결과를 확인할 수 있었으며 또한 증류수 < pH 4 용액 < 바닷물 순으로 화강암의 수분 흡수율 변화가 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 염산용액 및 바닷물이 화강암의 풍화에 크게 영향을 미친다는 것을 수치적으로 보여준 것으로서 화강암의 시간의 경과에 따른 특성 변화를 파악할 수 있다.



[그림 3] 침수 시간에 따른 수분 흡수율 변화.

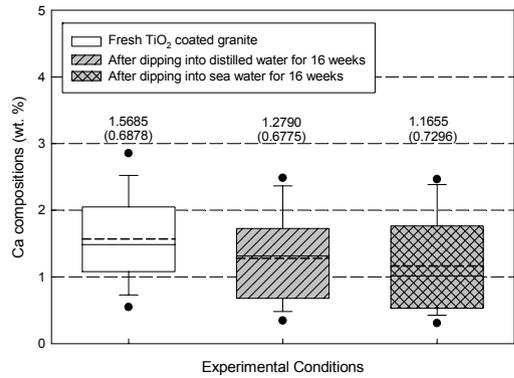
그림 4는 증류수, pH 4인 염산용액 및 바닷물에 화강암 시료를 침수하였을 때 시간의 경과에 따른 밀도 변화를 나타낸 것이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 시간이 경과함에 따라 밀도가 계속 감소하는 결과를 얻었으며, 밀도의 변화율은 수분 흡수율과 마찬가지로 증류수 < pH 4 염산용액 < 바닷물 순으로 화강암의 밀도 변화가 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 염산용액 및 바닷물이 화강암의 풍화에 영향을 미친다는 것을 수치적으로 보여준 것으로서 화강암의 시간의 경과에 따른 특성 변화를 파악할 수 있다.



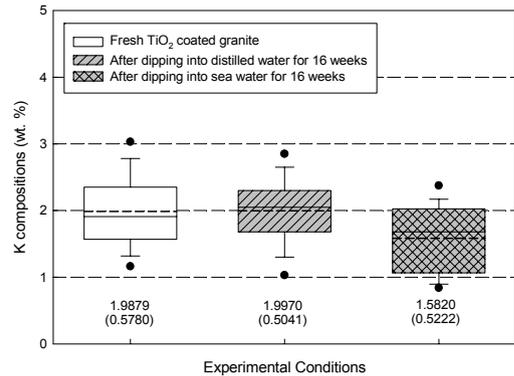
[그림 4] 침수 시간에 따른 화강암의 밀도 변화.

그림 5와 그림 6은 해수와 증류수에 TiO₂로 코팅한 화강암을 16주 동안 침수실험 후 암석 표면의 구성성분 중 Ca와 K의 변화를 나타낸 것으로서, 시료당 20회의 측정을 수행한 후 통계적으로 분석하였다. 통계처리는 상자그림(box plots)을 이용하였다. 상자그림에서 상자의 하한(lower limit)과 상한(upper limit)은 각 자료의 25번째 백분위값(percentile)과 75번째 백분위값을 의미하고 상자와 연결하는 선을 구레나룻(whisker)이라고 한다. 위구레나룻과 아래구레나룻은 각각 최대값(90번째 백분위값)과 최소값(10번째 백분위값)을 의미한다. 또한 상자 안의 굵은 점선을 평균(mean), 실선은 중앙값(median)을 의미하며, 상자그림의 위와 아래에 원형 검은 점은 각각 자료의 95번째 백분위값(percentile)과 5번째 백분위값을 나타낸 것이다.

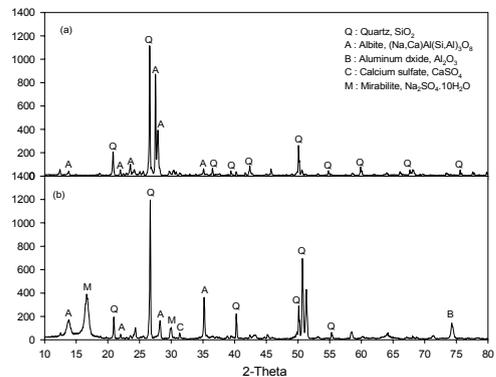
그림 5와 6에서 볼 수 있듯이, 암석 표면의 구성광물 주 Ca와 K 모두 신선한 화강암보다 증류수나 해수에 침수한 후에 분석한 시료에서 낮은 농도값을 보였다. Ca의 경우 암석표면의 Ca성분이 용액속으로 용해 제거되는 것을 보여주는 것으로서 이는 신선한 화강암과 풍화가 진행된 화강암의 일반적인 경향과 일치하는 결과를 얻었다 [12].



[그림 5] 화강암 표면에서의 Ca 성분의 변화



[그림 6] 화강암 표면에서의 K 성분의 변화



[그림 7] 신선한 화강암(a)과 해수에 20주간 침수한 화강암(b)의 XRD 그래프.

그림 7은 신선한 화강암과 해수에 20주 동안 침수한 화강암 표면의 XRD 그래프를 나타낸 것이다. 신선한 화강암 표면의 주성분은 석영과 조장석이었으나 침수 실험 후의 표면은 석영과 조장석 외에 Al₂O₃와 기타 성분으로 성분의 변화가 있음을 확인할 수 있다. 즉, 화강암 표

면에서 물리적인 특성(밀도, 수분흡수율 등) 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되고 결국 화강암의 풍화에 진행된다고 말할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 해안선 인근지역에 위치한 석조물의 풍화에 미치는 해수의 영향을 알아보기 위해 해수에 신선한 화강암(TiO_2 로 코팅 한 경우와 코팅하지 않은 경우)을 침수한 후 화강암의 물리·화학적 특성을 조사하였다. 또한 석조문화재 보존 방법의 일환으로 화강암에 TiO_2 광촉매를 코팅한 후 코팅이 화강암의 풍화에 미치는 영향도 조사하였으며, 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 해수에 의한 인공풍화 화강암의 물리적 특성 측정 결과, 인공풍화 전과 후의 밀도와 수분흡수율은 큰 변화를 보이지는 않았으나 해수에 침수한 시료들의 밀도변화와 수분흡수율변화를 통해 해수가 화강암의 풍화에 영향을 미칠 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다.
2. 인공풍화 석재의 수분흡수율 변화는 증류수 보다는 해수에서 흡수율의 변화가 컸으며, TiO_2 코팅하지 않은 화강암이 TiO_2 로 코팅한 화강암보다 흡수율의 변화가 컸다. 이는 신선한 화강암이 해수의 작용으로 흡수율이 높아져 해수에 대한 내구성이 낮아질 수 있고 광촉매 코팅을 한 시료의 흡수율이 코팅을 하지 않은 시료에 비해 흡수율의 증가가 상대적으로 낮아 화강암의 표면에 TiO_2 코팅 처리를 하면 화강암의 풍화를 예방하는 효과가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 한국문화재 보존과학회, “석조문화재 보존관리 연구”, 2001.

[2] 김사덕, 황진주, 강재일 “대리석 문화재에 대한 산성비의 영향”, 한국문화재보존과학회지, 7(19), 1998.

[3] Krivacsy, Z., “Study of Humic-like Substances in Fog and Interstitial Aerosol by Size-exclusion Chromatography and Capillary Electrophoresis”, *Atmospheric Environment*, 34, 4273, 2000.

[4] 도진영, J. Riederer, “석조물 표면의 흑화현상에서 나타나는 염과 그 영향”, 대한지질학회 2002년도 춘계 공동

학술발표회 논문집, 306-308, 2002.

[5] 손병현, 김현규, 정종현, 유정근, 이형근, “화강암의 풍화에 미치는 염분과 산성용액의 영향(Effects of Salts and Acid Solutions on the Weathering of Granite)”, *대한환경공학회지*, 27(1), pp. 101-108, 2005.

[6] E.T. Brown ed., ISRM(International Society for Rock Mechanics), “Rock characterization testing and monitoring”, ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, 1981.

[7] 김성수, “인공풍화 실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가”, 서울대학교 석사학위논문, 1999.

[8] 김영화, 홍순호, “풍화현상에 수반되는 화강암의 물성 변화에 관한 연구”, *광산지질*, 30, 221-232, 1990.

[9] Lee, S. G., “Weathering of granite”, *Journal of the Geological Society of Korea*, 29, 396-413, 1993.

[10] Kim et al., “The change of natural environmental in the Seoul area : environmental mineralogy of the granite weathering.” *Journal of the Geological of Society of Korea*, 30, 284-296, 1994.

[11] 손병현, 김현규, 정종현, 유정근, 이형근, “화강암의 풍화에 미치는 염분과 산성용액의 영향(Effects of Salts and Acid Solutions on the Weathering of Granite)”, *대한환경공학회지*, 27(1), pp. 101-108, 2005.

[12] 14. 손병현, 정종현, 김현규, 여환구, 오광중, “화강암의 풍화에 미치는 환경오염물질의 영향(Effects of air pollutants on the weathering of granite)”, 2004년 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집, 부산 경성대학교, 1361-1363, 2004.

정 문 헌(Moon-Hun Jung)

[준회원]



- 2008년 2월 : 한서대학교 환경공학과 (공학사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 환경공학과 석사과정

<관심분야>
유해가스처리, 산업폐기물처리

이 주 호(Joo-Ho Lee)

[준회원]



- 2008년 2월 : 한서대학교 환경공학과 (공학사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 환경공학과 석사과정

<관심분야>

유해가스처리, 산업폐기물처리

손 병 현(Byung-Hyun Shon)

[정회원]



- 1990년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학사)
- 1994년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학석사)
- 1997년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 환경공학과 정교수

<관심분야>

대기오염제어, 폐기물처리, 이산화탄소 흡수