

터널 지보용 슛크리트의 유해이온에 대한 열화특성

Deterioration Properties of Shotcrete as Tunnel
Supporter was Exposed to Harmful Ions

정 호 섭* 김 동 규**
Jung, Ho-Seop Kim, Dong-Gyou

Abstract

Shotcrete have become a deterioration which was exposed to harmful environments. In this study, in order to evaluate the deterioration properties of shotcrete, visual examination, compressive strength, adhesive strength, microstructural analysis were investigated up to the 60th weeks of exposure. The attack solutions for test are sodium sulfate and hydrochloric acid solution with different concentrations, respectively. From the results, although the compressive strength of shotcrete specimens and the adhesive strength between specimens and rocks were high at the early immersion age, they rapidly dropped in the subsequent phases, especially in 5% sodium sulfate and pH1 hydrochloric acid solution. With continued exposure, various harmful ions penetrated into the shotcrete specimen, reacted with the cement hydrate, and generated expansion substances. It was verified that the shotcrete specimens suffered a serious deterioration by chemical attack.

요 지

유해 환경하에 노출된 슛크리트는 시간이 경과함에 따라 각종 유해이온의 침식으로 인하여 열화하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 환경에 노출된 슛크리트의 열화특성을 평가하기 위하여 황산염 및 산에 대한 화학적 침식에 대하여 유해이온에 각각 60주 동안 침지한 슛크리트 코어 공시체를 대상으로 외관조사, 압축강도, 부착강도 및 기기분석을 실시하였다. 그 결과 용액의 종류에 관계없이 침지재령 60주에서 균열, 박리 등으로 인한 표면손상이 심각한 상태였으며, 압축 및 부착강도는 초기재령에서는 수중양생한 공시체보다 상회하는 결과를 보였으나 장기재령에서는 역전되는 현상을 보여주었다.

Keywords : Chemical attack, Deterioration, Harmful ions, Shotcrete, Visual examination, XRD

핵심 용어 : 화학적침식, 열화, 유해이온, 슛크리트, 외관조사, X-ray 분석

* 정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원

** 정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원

E-mail : dgkim2004@kict.re.kr 031-910-0238

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 산업의 발전에 따라 교통량의 증가와 국가 전역의 생활권화에 따른 도로, 지하철, 철도, 통신구 건설 등 다양한 형태로 건설되고 있다. 이에 따라 사회간접자본의 확충을 위한 지하공간의 개발이 활발히 진행되고 있을 뿐만 아니라 이러한 지하공간의 이용은 점차 용도의 다양화, 대심도, 장대화 추세에 있다. (한국건설기술연구원, 2007; 정호섭 외, 2007)

터널공사시 굴착직후 초기에 터널주변지반을 안정시키기 위하여 터널 구조물의 주지보재로서 사용되는 숏크리트는 1980년대 서울지하철 3, 4호선 NATM공법이 처음 적용되면서부터 최근에 이르기까지 토목·광산분야에 널리 이용되고 있다. (이규필 등, 2005) 숏크리트는 반영구적인 지하구조물로서 장기적인 사용성 및 안정성의 개념에서 그 역할이 매우 중요하게 부각되고 있다. 한편 숏크리트를 비롯하여 시멘트 콘크리트는 경제성, 시공성 및 내구성이 우수한 재료로 널리 알려져 오고 있으나 시멘트 콘크리트를 이용한 구조물의 수명은 공용기간이 경과함에 따라 주변 환경과 내부의 화학적 변화 등에 따라서 내구성이 저하하게 된다. (Mehta, 1983; Moon 등, 2003) 이와 같이 노출환경에 따른 다양한 성능저하는 시간이 경과함에 따라 구조적인 성능저하로 진전되며 최종적으로는 구조물의 안전에 큰 문제를 야기하게 된다. (Moon 등, 2004; Jung 등, 2007; 김성수, 2004). 국내 철도 및 도로 등의 터널구조물은 안전관리를 위한 지침 및 매뉴얼이 각 기관별로 제정되어 있으나, 터널구조물 배면 부분의 접근이 불가능한 특수성으로 인하여 육안으로만 관측 가능한 콘크리트 라이닝의 상태평가에 국한되어 있어 터널구조물의 안전관리를 위한 구조적 안정성을 객관적으로 판단하기 어렵다.

터널구조물의 특성상 주변의 토양과 수질 및 대기환경에 영향을 받게 되며, 특히 이와 같은 환경하에서의 화학적 침식에 대한 대책을 마련하고 적절한 유지관리를 시행하는 것이 구조물의 목표내구수명을 확보하는데 필수적이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 터널구조물이 위치하게 될 환경조건에 대하여 현장에서 타설한 숏크리트를 대상으

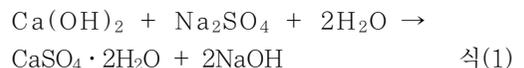
로 코어를 채취하여 콘크리트에 유해한 황산염 및 산환경 대한 숏크리트의 저항성을 평가하기 위하여 각각의 용액농도를 변화시켜 60주간 침지시켜 침지제령별 외관손상에 대한 평가와 압축 및 부착강도의 저하원인 등을 기기분석을 통하여 알아보고자 하였다.

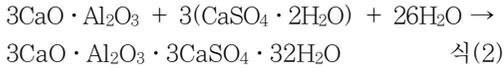
2. 시멘트경화체의 성능저하기구

2.1 황산염 침식

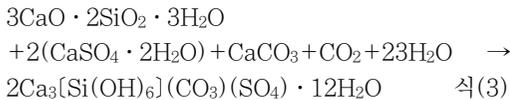
콘크리트 구조물이 황산염용액에 노출되거나 황산염을 포함한 토양이나 지하수 및 해수 중에 위치할 경우에 콘크리트는 황산염침식에 의해 열화된다. (문한영, 김성수, 1992) 즉 황산염 환경하의 콘크리트는 공극을 통하여 침투한 황산이온(SO_4^{2-})과 시멘트 수화물과의 반응으로 콘크리트 조직에 유해한 반응생성물이 팽창(expansion) 및 연화(softening)작용으로 인하여 콘크리트의 성능을 저하시키며 심할 경우 균열발생 및 조직 붕괴를 유발한다. 황산염에 의한 시멘트경화체의 열화는 황산염의 종류에 따라 각각의 양이온과 음이온의 성질에 따라 침식의 정도가 달라진다. (Al-Amoudi, 1992; ACI, 1997) 일반적으로 황산염, 황산마그네슘 및 해수의 작용으로 분류할 수 있으며, 일반적인 황산염에 대한 침식 메커니즘으로서는 황산이온이 경화체 내부로 확산, 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과의 반응에 따른 석고의 생성, 또한 최종적으로 에트링가이트($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)를 생성하여 시멘트 경화체는 팽창파괴 된다. (Mehta, 1983; Moon 등, 2003)

황산나트륨에 의한 성능저하 메커니즘은 다음과 같다. 공장폐수, 지하수, 산성토양 및 화산지대 등에는 황산염이 포함되어 있는 경우가 많으므로 콘크리트 구조물에 접할 경우 황산이온은 시멘트 경화체 내부로 침투한 후 식(1)과 같이 시멘트 수화물 중 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 이수석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)를 생성하여 콘크리트를 열화시킨다. 또한 식(2)와 같이 에트링가이트를 생성하여 팽창작용을 일으키게 된다.





특히 황산나트륨에 의한 시멘트 경화체의 성능저하는 에트링가이트에 의한 팽창이 주요 원인으로 보고되고 있으며, 아울러 석고에 의한 연화현상도 성능저하의 한 원인으로 지적되고 있다.(Lee, 등, 2008) 황산이온에 의하여 콘크리트 표면의 시멘트페이스트 부분이 침식되어 용해되는 토포케미칼반응으로 시멘트 경화체의 성능저하가 생기며 콘크리트의 강도저하 현상 및 체적변화에 의한 팽창이 발생하여 콘크리트의 품질을 크게 떨어뜨린다. 그래서 시멘트 경화체의 황산염 침식에 대한 저항성을 향상시키기 위하여 황산이온의 시멘트 경화체 중의 황산을 억제시키며, 물-시멘트비를 낮출 뿐만 아니라 결합재의 포졸란물질을 적절하게 혼합하여 사용하는 것이 효과적이라고 알려져 있다.(Moon 등, 2004) 이와 같이 시멘트 경화체속으로 황산이온이 침투, 확산하여 황산이온과 시멘트 수화물의 반응으로 에트링가이트와 석고 등의 성능저하물질을 생성하며, 이러한 반응생성물의 팽창 및 연화작용으로 인하여 시멘트 경화체의 조직구조가 파괴되며 균열이 발생된다.(Brown and Taylor, 1999) 한편 황산염 침식의 결과로 생성되는 반응생성물중 Thaumacite는 조직구조학적으로 Ettringite와 매우 유사하여 두 물질을 구별하는 것이 곤란하며 다음 식(3)의 반응식으로 생성된다고 알려져 있다.



이러한 Thaumacite는 경화한 콘크리트의 표면에 점착성을 상실하게 하는 연화현상 및 강도감소현상을 일으키는 주요원인으로 알려져 있으며 콘크리트의 성능저하에 결정적인 악영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.(Hartshorn, et. al., 1999, Crammond, 2003).

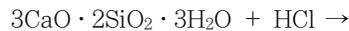
2.2 산 침식

한편 시멘트경화체가 산(酸)환경에 노출되게 되면

포틀랜드시멘트의 수화생성물 중 다량으로 존재하는 알칼리성의 수산화칼슘을 비롯하여 수경성 화합물은 산과 반응하여 분해된다.(Lea, 1998) 즉 수산화칼슘이 산과 접하게 되면 중화하여 각종 염류가 생성되고 콘크리트는 이러한 염의 용출과 결정화 등에 의해 침식, 성능저하 되는 이외에 콘크리트 중의 C-A-H와 C-S-H까지도 분해된다. 이처럼 콘크리트를 침식시키는 산은 크게 황산, 염산, 초산, 인산, 크롬산, 불산 및 아황산 등의 무기산과 유산, 구연산 등의 유기산으로 나눌 수 있으며 다소의 차이는 있지만 대부분의 콘크리트는 이들 산에 의한 침식을 받는다.

염산, 황산, 질산과 같은 강산에 의한 콘크리트의 침식은 우선 표면부분의 연화로 나타난다. 산과 접촉하는 부분의 시멘트경화체는 산에 의해 분해되어 고화능력을 잃고, 이상(泥狀)의 연한 조직이 박리 또는 유수에 의해 제거되면 산에 침식되기 어려운 골재만 노출되며, 콘크리트 표면은 씻어낸 것과 같은 형태가 된다. 침식이 더욱 진행되면, 콘크리트는 노출된 골재를 유지할 수 없게 되고, 골재의 이탈이 생긴다. 이와 같은 경과를 반복하면서 콘크리트의 표면은 점차 줄어들게 된다.

산에 의한 성능저하는 표면의 연화부분을 지속적인 흐름작용이 가해짐에 따라 현저히 촉진된다. 즉 유수중이나 표면의 세정, 동결융해에 의한 박리 등의 작용이 가해지는 곳에서는 성능저하의 진행은 현저히 빨라진다. 염산의 경우 수용성의 CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 와 난용성의 CaSO_4 등을 생성하고 규산과 알루미늄 등을 용해시켜 실리카와 알루미늄겔을 생성하며 골재까지도 침식시킨다. 염산과 시멘트 수화물의 반응을 화학식으로 나타내면 식(4)~(6)과 같다.



이와 같은 반응에 의해 시멘트수화물은 분해되어 결합능력을 잃게 된다. 반응에서 생성되는 CaCl_2 는 물

에 수용성이므로 용이하게 용출되며, SiO₂나 Al₂O₃는 겔상태로 존재한다. 황산의 경우에는 Ca(OH)₂와 반응하여 석고(CaSO₄·2H₂O)를 생성한다. 이 때 생성되는 석고는 물에 대한 용해도가 비교적 낮아 황산의 농도가 낮을 경우 초기에는 수화생성물의 용출을 억제하여 산이 콘크리트로 침투하는 것을 막아주지만 생성된 석고가 시멘트 중의 C₃A나 그 수화물과 반응하여 에트리נג가이트를 생성하면서 현저한 체적팽창을 발생하게 하여 콘크리트의 균열을 유발시킨다.

3. 실험개요

3.1 사용재료

(1) 시멘트 : 시멘트는 KS L 5201의 규정에 적합한 1종 보통포틀랜드시멘트이며 비중은 3.15, 비표면적은 312m²/kg의 것을 사용하였다.

(2) 골재 : 경북 경산지역에서 생산되는 골재를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 1과 같다.

(3) 혼화재료 : 혼화재료는 알루미늄에이트계 급결제와 콘크리트 타설시 작업환경 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 나프탈렌계 유동화제를 사용하였고, 물리적 성질은 Table 2와 같다.

(4) 실험용액 : 본 연구에서 사용된 용액은 시약급 약품을 사용하여 황산염 및 산의 농도를 각각 3, 4단계로 변화시켜 제조하였으며 용액의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 2주마다 새로운 용액으로 교체하였

다. 용액의 농도는 다음과 같다.

- 황산염(Na₂SO₄) : 1%, 2% 및 5%(3단계)
- 산(HCl) : pH1, pH2, pH3 및 담수(4단계)

3.2 실험방법

(1) 외관조사 : 각각의 실험 용액에 침지한 쏫크리트 코어 공시체의 성능저하 상태를 육안으로 평가하기 위하여 외관 조사를 재령별로 실시하였다.

Al-Amoudi 등(1992)의 연구에서 제시한 총 6등급으로 분류된 화학적 침식에 의한 외관등급기준 및 손상상태를 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림에 의하여 산용액의 농도별 침식을 받은 쏫크리트 공시체의 외관 상태 및 성능저하 정도를 평가하였다.

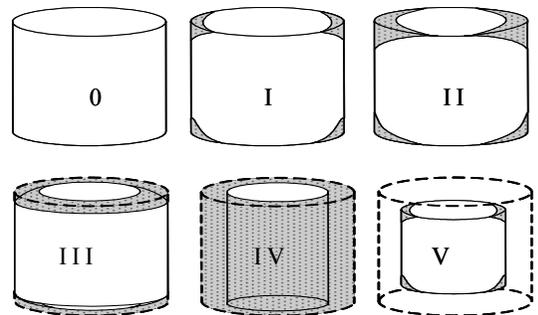


Fig. 1 경화체의 외관 등급 기준(Al-Amoudi, 1992)

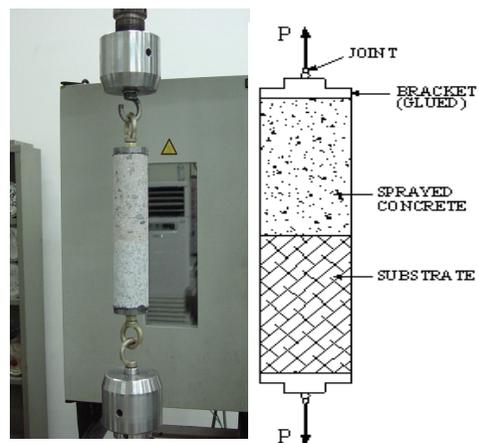


Fig. 2 직접인장시험

Table 1 골재의 물리적 성질

	Gmax (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.
Fine agg.	-	2.60	1.20	2.80
Coarse agg.	13	2.59	0.80	7.30

Table 2 혼화제의 물리적 성질

Main component	Naphtalene acid based compound	Aluminate alkali based compound
Appearance	Dark brown liq.	White powder
Solid content	40±2%	-
Specific gravity	1.2±0.05	1.5
pH	8±1	13

(2) 압축강도 : 실험 용액에 침지한 $\phi 5.5 \times 110 \text{mm}$ 원주형 코어공시체의 상·하부면을 켈핑을 한 후 KS F 2405, KS F 2422규정에 의해 각 재령별 압축강도를 5개씩 측정하여 평균값을 사용하였다.

(3) 부착강도 : 원주형 코어공시체를 ASTM D 2936과 C 1404/C 1404M에 근거하여 glued type 방법으로 부착강도를 측정하였다(Fig. 2 참조).

(4) XRD 분석 : 실험용액에 침지한 코어공시체의 반응생성물을 판정하기 위하여 X선 회절분석을 실시하였으며, 이 때 측정조건은 CuK(Ni, filter) 35kV, 20mA, Scanning Speed $2^\circ/\text{min}$, Full Scale 140cps, $2\theta = 5 \sim 60^\circ$ 로 하였다.

(5) ESEM 및 EDAX 분석 : 본 연구에 사용된 유사형 전자현미경(SEM)은 philips XL30 ESEM이며, 동시에 에너지분산형 분석장치 EDS형 전자현미경 분석기(EPMA)로 성분분석을 실시하였다.

3.3 실험배합

현장의 배치 플랜트를 이용하여 물, 골재 및 시멘트를 자동 계량하여 혼합하였다. 설계기준강도는 21MPa이며 배합은 Table 3과 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 외관조사결과

2종류의 용액에 침지한 숏크리트 코어공시체의 성능저하상태를 육안으로 비교평가하기 위하여 Fig 1을 기준으로 각각 재령별로 외관조사를 실시하였다. 우선 황산염 용액에 60주간 침지한 숏크리트 코어공시체의 성능저하 상태를 각 재령별 육안으로 평가한 결과를 Table 4에 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 5% 황산나트륨 용액의 경우 침지 재령 4주부터 팽창에 의

한 균열이 발생하였으며, 재령 16주에서는 균열에 의한 박리와 탈락현상이 두드러지게 나타났다. 특히 침지재령 60주에서는 성능저하 V등급으로 탈락에 의한 손상으로 형태를 알아볼 수 없을 정도로 극심한 성능저하 현상이 나타났다.

반면 1%와 2%의 황산나트륨 용액의 경우 5% 황산나트륨 용액 비해 상대적으로 반응속도가 느리게 나타났다. 균열에 의한 박리와 탈락현상이 발생하였다. 외관손상에 의한 성능저하 등급에서도 침지 재령 60주에서는 V등급으로 표면 손상 정도가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다.

한편 동일한 방법으로 산침식을 받은 숏크리트의 침식 저항성을 평가하기 위하여 숏크리트 코어 공시체를 pH 농도를 달리한 4종류의 용액에 60주간 침지한 후 각 재령별 코어 공시체의 외관조사를 실시하였다.

Table 5는 pH농도를 달리한 산용액에 60주간 침지한 숏크리트 공시체의 성능저하를 시각적으로 고찰하기 위하여 숏크리트 코어 공시체의 외관 상태를 나타낸 것이다. pH1 농도에 침지한 숏크리트 코어 공시체의 경우 pH2, 3 농도의 용액에 비하여 상대적으로 변색과 침식 현상이 크게 나타났다.

표면 손상 정도를 관찰한 경우에서도 pH1 농도의 성능저하 등급은 60주에서 IV등급으로 큰 성능저하 현상이 나타남을 확인 할 수 있었다. pH2 용액에 침지한 공시체의 경우에는 침지 재령 16주까지 양호한 상태를 보였으나, 이후 변색 및 침식 현상이 가속화 되어 침지 재령 60주에서 붉은색으로의 변색 및 침식 현상

Table 4 황산염용액에 침지한 시험체의 외관 조사결과

Immersion Period(Weeks)	1%	2%	5%
4	0	0	I
16	I	II	III
32	II	IV	V
60	VI	V	V

Table 3 숏크리트의 배합

f_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m^3)				Admixtures(kg)	
					W	C	S	G	Accelerator	Superplasticizer
21	13	10	45	62	204	453	1132	572	2.27	0.23

Table 5 산용액에 침지한 시험체의 외관 조사결과

Immersion Period(Weeks)	pH1	pH2	pH3	pH7
4	I	0	0	0
16	II	I	0	0
32	III	I	0	0
60	IV	II	I	0

이 크게 나타났다. 표면 손상 정도의 경우에서도 60주에서 II 등급의 성능저하 정도를 확인할 수 있었다.

산용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 경우 알칼리 성분인 수산화칼슘과 직접적으로 반응하여 표면에서의 침식작용이 크게 보였다. 농도가 높을수록 이러한 현상이 크게 나타났으며 숯크리트 공시체 표면은 골재의 노출과 더불어 석고 결정체, 실리카겔 또는 알루미늄하이드록사이드로 추정되는 침식물질이 발생하였다.

4.2 압축 및 부착강도 결과

2종류의 용액에 농도를 달리한 각각의 용액에 침지한 $\phi 55 \times 110 \text{mm}$ 원주형 코어공시체를 KS 및 ASTM 규격에 준하여 압축강도와 부착강도를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3~Fig. 6에 나타내었다.

황산나트륨용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 압축강도를 측정하여 수중양생한 공시체의 압축강도에 대한 비율로서 정리한 것이 Fig. 3이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 초기재령에서 황산나트륨용액에 침지한

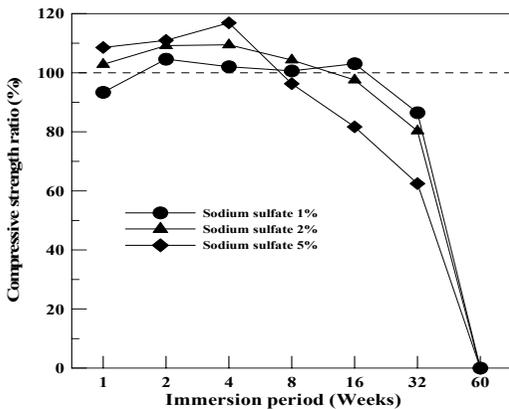


Fig. 3 황산염용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 압축강도비

숯크리트 코어 공시체의 압축강도는 수중양생 숯크리트의 압축강도를 상회하였으며, 이러한 현상은 농도가 높을수록 압축강도 증가 현상이 뚜렷이 나타나 5% 황산나트륨용액의 경우 재령 4주에서 수중양생대비 압축강도가 약 17% 정도 높은 현상을 보였다. 이것은 시멘트 수화반응에 의한 수화생성물과 경화체 내부로 침투한 황산염 이온의 반응으로 인하여 생성된 팽창성 물질이 시멘트 경화체의 조직을 치밀하게 해 준 탓으로 압축강도가 증진되는 경향을 보여 주고 있다. 반면 침지재령 4주 이후 장기재령에서는 압축강도의 경향이 역전되어 농도가 높을수록 강도감소 현상이 크게 나타났다. 이는 장기재령으로 갈수록 팽창성 물질의 과도한 생성으로 인하여 시멘트 경화체의 균열 발생과 더불어 연화현상에 의한 강도감소가 진행된 것으로 사료되며, 침지재령 32주 이후에는 결국 파괴에 이르는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 4는 황산염용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 부착강도를 각 재령별 측정하여 수중양생을 실시한 공시체의 부착강도에 대한 비로서 나타낸 것이다. 부착강도 역시 압축강도와 유사한 경향을 보여주고 있으며 5%황산염 용액에 침지한 숯크리트의 경우 부착강도가 침지재령의 경과에 따라 급격하게 저하하는 것을 보여주고 있으며 침지재령 32주에서는 측정이 불가능할 정도로 표면열화가 심하게 나타났다.

한편 산용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 압축 및 부착강도 결과를 침지재령별로 정리하여 나타낸 것

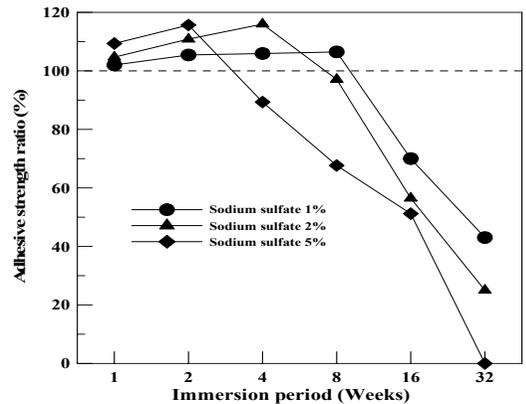


Fig. 4 황산염용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 부착강도비

이 Fig. 5 및 Fig. 6이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 침지재령 4주까지는 염산의 농도와 관계없이 모든 배합에서 유사한 강도 발현 특성을 보여 주었으나 그 이후의 재령에서는 control을 제외한 pH1, pH2 및 pH3 용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 압축강도 발현 특성은 침지재령이 증가할수록 거의 직선적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 pH1 코어 공시체의 경우 침지재령 60주에서 기준 공시체에 비하여 45% 수준으로 절반에도 못 미치는 압축강도 결과를 보여줌으로써 콘크리트가 산 침식에 대하여 저항성이 취약하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 32주간 농도를 각각 달리한 염산용액에 숯크리트 코어 공시체를 침지한 후 재령별로 부착강도

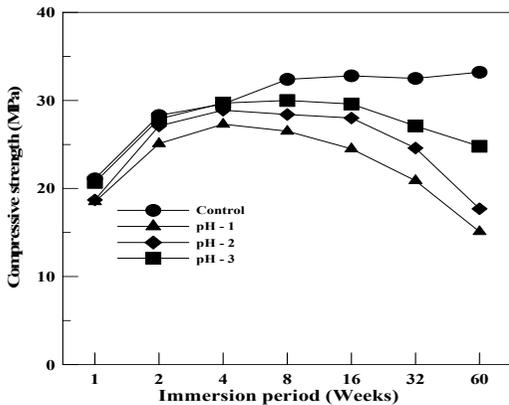


Fig. 5 산용액에 침지한 숯크리트 코어공 시체의 압축강도

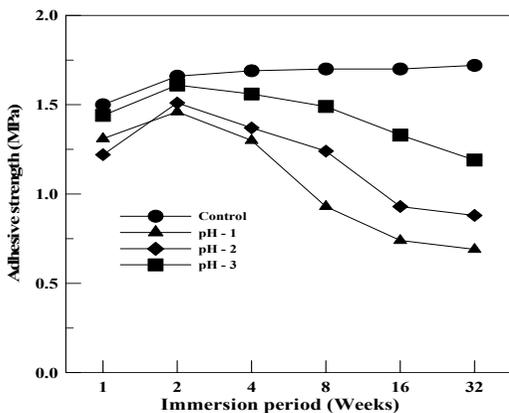


Fig. 6 산용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 부착강도

를 측정하여 나타낸 것으로 침지 재령 2주까지는 부착 강도가 증가하는 현상을 보였으나, 이후로는 침식의 증가로 인하여 부착강도감소 경향이 나타나 침지재령 32주에서는 pH 1의 강도감소가 수중양생대비 약 46% 수준이었다. 산용액에 침지한 숯크리트 부착강도의 경우 압축강도에 비해서 강도감소율이 낮게 나타났다. 이는 산용액에 의한 강도 감소가 암석과 숯크리트 계면사이에 산용액이 침투로 인하여 생긴 부착력 감소 보다 크게 나타나는 것으로 사료된다.

4.3 기기분석결과

3종류의 황산염용액에 각각 60주간 침지한 숯크리트 코어 공시체의 반응생성물을 알아보기 위하여 XRD, SEM 및 EDXA 분석을 실시한 결과를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 7 및 Fig. 8이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 황산염용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 XRD 분석 결과 Ettringite, Thaumasite 및 Gypsum이 검출된 반면 Portlandite의 피크는 소멸되어 숯크리트의 성능저하가 심각함을 알 수 있었다.

Fig. 8은 5%황산염용액에 침지한 경우의 SEM 분석결과로서 다량의 침상 물질이 공시체 내에 존재하였으며, 이 침상 물질을 EDAX 분석결과 Ettringite 및 Thaumasite인 것을 확인할 수 있었다. 5% 황산염용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 경우 반응생성물이 숯크리트 공시체 전반에 퍼져 성능저하 상태가 심각한 수준임을 알 수 있었으며 1%, 2% 황산염용액의 경우에도 반응생성물의 영향으로 시멘트 수화 생성물인 Portlandite 및 C-S-H가 확인되지 않았으며, 수화생성물의 분해로 인하여 성능 저하가 발생한 것으로 사료된다.

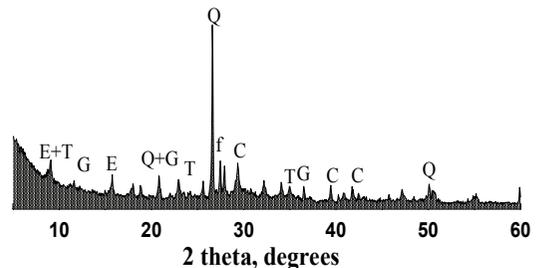


Fig. 7 XRD 분석결과(황산염 5% 용액)

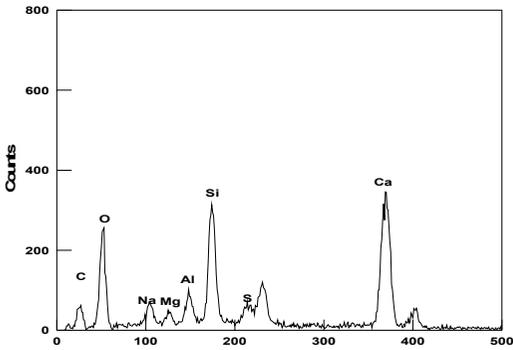
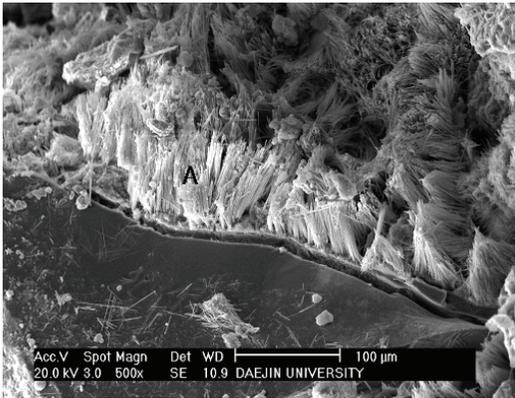


Fig. 8 SEM 및 A부분 EDS 분석결과(황산염 5% 용액)

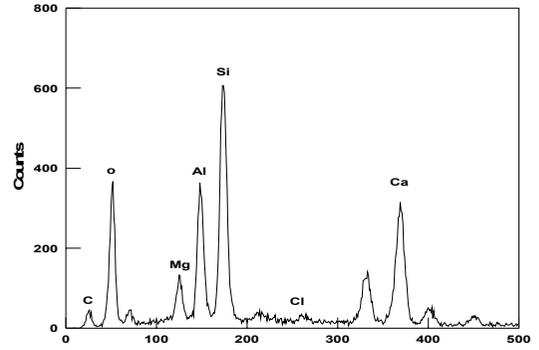
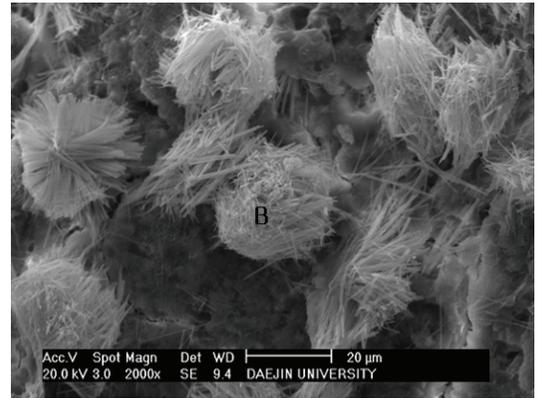


Fig. 10 SEM 및 B부분 EDS 분석결과(pH1)

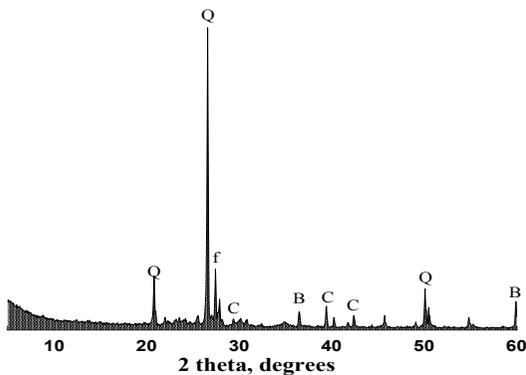


Fig. 9 XRD 분석결과(pH1)

한편 산용액에 60주간 침지한 숯크리트 코어공시체의 반응생성물을 알아보기 위하여 XRD 분석 결과를 나타낸 것이 Fig. 9이다. 수중양생을 실시한 숯크리트

코어 공시체의 XRD 분석 결과의 경우 시멘트 주요 수화생성물질로써 결정성 물질인 Portlandite 피크가 소실된 반면 Quartz 피크가 크게 나와 상대적으로 성능저하물질인 Ettringite와 Thaumasite의 피크가 나타나지 않은 것으로 사료되며 이를 SEM & EDS 분석을 통하여 Ettringite 및 Thaumasite 등의 성능저하 물질이 생성됨을 알 수 있었다(Fig. 10 참조).

5. 결론

터널 지보재로 사용되는 숯크리트는 유해환경과 직접적으로 접해 있으므로 시간이 경과함에 따라 유해이온의 침투로 인하여 손상을 받게 된다. 본 연구에서는 2종류의 유해이온의 농도를 달리한 용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 성능저하를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 두 용액에 침지한 숯크리트 코어 공시체의 외관조사 결과 황산염용액의 경우 침지재령 60주에서 용액의 농도에 관계없이 균열, 박리 등으로 인한 표면손상이 심각한 상태를 나타내었다. 또한 산용액의 경우 농도에 따라 다르게 나타났으나 pH1의 경우 성능저하도가 심각하게 나타났다.
- 2) 황산나트륨용액에 침지한 숯크리트의 압축 및 부착강도 결과, 초기재령에서는 수중에 침지한 공시체의 강도결과보다 상회하는 결과를 나타내었으나 침지재령 4주 이후에는 역전되는 현상을 보여주었다. 특히 부착강도의 경우 32주 이후에는 파괴에 이르러 측정이 불가하였다.
- 3) 산용액에 침지한 숯크리트의 압축 및 부착강도결과 침지재령 4주까지는 농도에 관계없이 모두 유사한 결과를 나타내었으나 그 이후 재령에서 거의 직선적으로 감소하는 결과를 나타내었다.
- 4) 황산나트륨용액에 침지한 숯크리트의 경우 침지재령 초기에는 팽창성 물질인 Ettringite의 생성으로 강도증가를 나타난 반면 장기재령으로 갈수록 반응생성물의 과다 생성으로 인하여 팽창파괴와 시멘트경화체의 점착력손실 등 성능저하를 일으켰다. 이를 기기분석을 통하여 Ettringite, Thaumasite 및 Gypsum 등의 생성으로 성능저하가 발생한 것을 알 수 있었다.
- 5) 산침식을 받은 숯크리트의 경우 침상형의 Ettringite의 생성으로 인하여 팽창에 의한 균열과 Thaumasite 및 Gypsum 등의 생성으로 인한 C-S-H의 탈석회화 및 연화 현상에 따른 강도 감소 현상이 일어났으며, 성능저하에 결정적인 악영향을 미치는 것으로 사료된다.

이상의 결과를 토대로 유해환경에 놓이는 터널구조물의 경우 적은량의 유해이온이라 할지라도 장기간 노출되면 시멘트경화체에 손상을 주는 원인이 되므로 화학적 침식에 대한 충분한 검토가 실시되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성수, "터널지보재의 열화특성 연구", 한국건설기술

- 연구원, 2004.
2. 문한영, 김성수, "화학약품용액에 침지한 콘크리트의 열화에 대한 연구", 대한토목학회 논문집, 제12권, 제2호, 1992, pp. 55-66.
3. 정호섭, 김동규, 신휴성, "터널구조물의 누수 및 백화현상에 대한 현장조사", 한국지반공학회 2007가을학술발표회, 2007, pp. 1160-1163.
4. 한국건설기술연구원, "IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발", 첨단도시개발 사업 보고서, 2007.
5. 이규필, 김동규, 배규진, 신휴성, "화학적 침식에 의한 숯크리트의 열화거동 분석-단기거동", 한국터널공학회, 터널기술, Vol. 7, No. 2, 2005, pp. 143-152.
6. ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete", ACI Manual of Concrete Practice. 201.2, 1997, R2-3.
7. Al-Amoudi, O.S.B., "Studies on Soil-Foundation Interaction in the Sabkha Environment of Eastern Province of Saudi Arabia", Ph. D Dissertation, King Fahd University of Petroleum and Minerals, 1992.
8. Brown, P.W. and Taylor, H.F.W., "The role of ettringite in external sulfate attack, in J. Marchand and J. Skalny Materials Science of Concrete Special Volume : Sulfate Attack Mechanism", The American Ceramic Society, Westerville, OH, 1999, pp. 73-98.
9. Crammond, N.J., "The thaumasite form of sulfate attack in the UK", Cement and Concrete Composites, Vol. 25, 2003, pp. 809-818.
10. Hartshorn, S.A., Sharp, J.H. and Swamy, R.N., "Thaumasite Formation in Portland-Limestone Cement Pastes", Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, pp. 1331-1340.
11. Jung, H.S., Lee, S.T. Park, K.P. and Kim, S.S., "Influence of fineness of limestone powder on external sulfate attack", Proceedings of ANDE 2007, Busan, 2007, pp. 177.
12. Lea, F. M., "The chemistry of cement and concrete", 4th ed., Arnold, London, 1998.
13. Lee, S.T., Hooton, R.D., Jung, H.S., Park, D.H. and Choi, C.S., "Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient

-
- temperature”, Cement and Concrete Research, Vol. 38(1), 2008, pp. 68-76.
14. Mehta P.K., “Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement-Another Look”, Cement and Concrete Research, Vol. 13, 1983, pp. 401-406.
15. Moon, H.Y., Lee, S.T., and Kim, S.S., “Sulphate Resistance of Silica Fume Blended Mortars Exposed to Various Sulphate Solutions”, CJCE, Vol. 30, No. 4, 2003, pp. 625-636.
16. Moon, H.Y., Jung, H.S., Lee, S.T. and Kim, J.P., “Sulfate resistance of cement Matrix containing limestone powder”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 16, 2004, pp. 425-432.
- (접수일자 : 2008년 2월 4일)
(심사완료일자 : 2008년 4월 1일)