

산성비에 의한 콘크리트 열화의 메카니즘에 대한 고찰

Investigation on the Mechanism of Concrete due to Acid Rain

고 경 태*	이 종 석**	김 도 겸***	김 성 욱***	이 장 화****
Koh, Kyung Taek	Lee, Jong Suk	Kim, Do Gyeong	Kim, Sung Wook	Lee, Jang Hwa

ABSTRACT

Concrete structures such as buildings and bridges etc in urban areas may be damaged due to exposure to cloud water with high acidity for a long time. Acid precipitation with a pH level raining between 3.0 and 5.0 will affect concrete. A pH level of rain acid in Korea is between 4.3 and 5.3. However, few studies have been systematically investigated for the effect of rain acid on concrete structures.

Therefore, this study is investigated the domestic situation of acid rain and the effect of acid rain on concrete deterioration by existing literatures as a study to analyze the effect of rain acid on concrete structures.

1. 서론

최근 세계적으로 산성비에 의한 환경파괴가 심각한 문제가 되고 있다. 현재까지 산성비에 의한 피해는 산림, 토양 및 호수 등의 파괴가 현저하고 토목과 건축에 관계되는 구조물은 주로 석회암을 이용한 석조물의 표층 열화가 나타나고 있고, 특히 국내에서도 유적지 건물에서 산성비에 의한 피해가 보고되고 있다.

산성비가 환경에 주는 영향은 화학적인 과정으로 산성비에 의해 구조물에 열화현상이 발생하기까지는 상당한 시간이 필요한 것으로 판단된다. 그러나 최근 들어 콘크리트 구조물의 내구성을 중요시 하면서 콘크리트의 내구성이 향상되어 구조물의 장수명화가 실현되고 있다. 따라서 고성능 콘크리트에 대해서도 산성비에 의한 열화도 염해, 탄산화 등과 같이 다른 열화요인과 마찬가지로 고려해야 할 것으로 판단된다. 그러나 국내에서 산성비가 콘크리트 구조물에 미치는 영향에 대해서 체계적으로 검토한 사례가 없다.

따라서 본 연구에서는 산성비가 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 분석할 목적으로 기존의 문헌을 통해 국내의 산성비 현황과 산성비가 콘크리트 열화에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 국내의 산성비 현황

산성비는 일반적으로 화석연료의 연소에 의해 발생하는 대기오염물질인 NO_x와 SO_x에 의해 산성화된 비를 나타내며, 보통 pH 5.6 이하를 산성비이라고 부르고 있다. 그림 1은 국립환경연구원에서 '04년

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원
**** 정회원, 한국건설기술연구원 기획조정실 실장

(1월~10월)에 전국 31개 습성강화물 측정지점에서 강우를 채취하여 결과로서 전국 산성비의 pH 분포를 나타낸 것이다. 국내 평균 pH는 약 산성인 4.8로 '03년 pH 4.9, '99~'02년의 pH 5.0~5.1 보다는 다소 낮은 값을 보이고 있으며, 이 결과로부터 강우의 산성도는 특별한 대책이 없는 한 더욱 낮아질 것으로 분석된다. 전국 주요 도시의 pH는 4.3~5.3 범위를 나타내었으며, 대도시의 경우 서울과 인천이 부산, 대구, 광주 등 다른 대도에 비해 다소 낮게 나타났다.

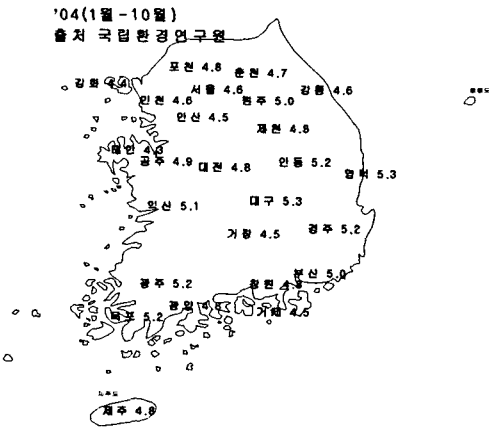


표 1은 강우의 주요 이온성분 평균농도이다. 강우 중 주요 산성물질로 알려진 SO_4^{2-} , NO_3^- 이온성분의 농도는 서울, 인천을 비롯한 수도권 지역이 다른 지역에 비해 비교적 높게 나타났다. 현재 국내 산성비에 의한 콘크리트 구조물의 열화를 파악하기 위해 산성비의 성분을 황산 : 질산 = 2 : 1로 혼합한 용액을 사용하는 것이 적정한 것으로 판단된다. 또한 산성비 중에서 Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ 는 해양으로부터 날아온 비래염분으로 추정된다.

표 1 전국 강우의 주요 이온성분 평균농도(mg/l)

구분	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H^+
서울	3.09	2.08	1.00	1.11	0.35	0.32	0.38	0.06	0.03
인천	3.49	2.09	1.33	1.46	0.48	0.34	0.42	0.07	0.02
부산	2.12	1.23	2.22	0.46	0.77	1.17	0.50	0.09	0.11
대전	2.28	1.50	1.90	0.77	0.60	0.23	0.29	0.05	0.02
대구	1.68	1.19	1.32	0.60	0.56	0.51	0.45	0.05	0.01
광주	1.48	1.05	0.88	0.56	0.39	0.24	0.26	0.07	0.01
제주	2.12	1.46	2.62	0.39	1.22	0.28	0.33	0.15	0.02

3. 산성비가 콘크리트에 미치는 영향

3.1 산성비에 의한 콘크리트 열화과정

그림 2는 산성비에 의한 콘크리트 열화과정을 나타낸 것이다. 콘크리트의 내부에 존재하는 세공용액의 pH는 통상인 경우 12 이상의 값을 가진다. 그러나 산성비가 콘크리트 내부로 침투하여 작용할 경우 처음에 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과의 중화반응이 발생하여 콘크리트 내부에 존재하는 세공용액의 pH는 저하되고 시멘트 페이스트를 구성하는 규산칼슘수화물(C-S-H)은 분해된다. 시멘트 페이스트가 표면으로부터 침식됨으로써 외관적으로는 잔

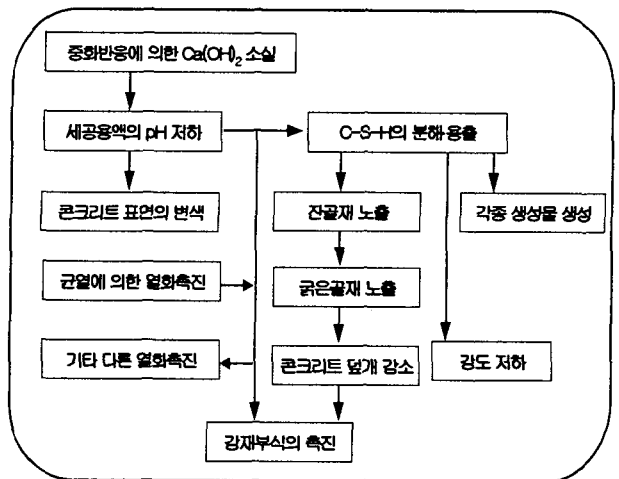


그림 2 산성비에 의한 콘크리트 열화과정

골재와 굵은골재를 노출시키고 부착력이 저하되는 등 최종적으로 콘크리트 덮개가 감소하여 철근콘크리트에서는 pH 저하가 철근위치까지 도달함으로써 철근부식이 발생할 가능성이 있다. 이러한 현상은 균열의 존재함으로써 촉진되는 것으로 관측된다. 또 pH 저하에 따라 금속 종류가 용출되어 콘크리트 표면에 변색이 발생하고 또한 각종 생성물이 생성된다.

이상에서 알 수 있는 것처럼 산성비에 의한 콘크리트의 열화로 Ca(OH)₂의 소실, pH의 저하 및 C-S-H 분해 현상이 주로 나타날 것으로 분석된다. 따라서 산성비에 의한 콘크리트의 열화를 평가하는 지표로서 C-S-H 분해에 따른 콘크리트의 침식깊이, Ca(OH)₂ 소실 깊이 및 콘크리트 깊이에 따른 pH의 변화를 측정할 필요가 있다.

3.2 산성비에 의한 콘크리트의 열화모델

그림 3은 산성비에 의한 콘크리트의 열화모델을 나타낸 것이다. 산성비가 콘크리트에 작용한 경우 처음에 산을 흡수하여 포수된 다음에는 표면에 흘러내리기 때문에 산의 작용은 다음과 같이 2가지로 나누어 구분할 수 있다.

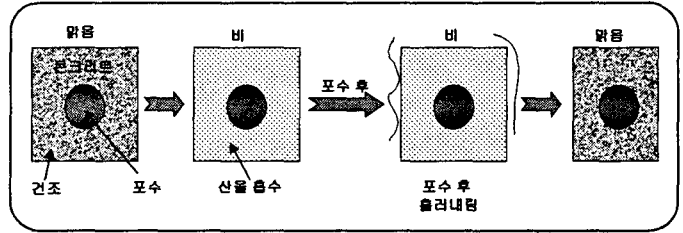


그림 3 산성비에 의한 콘크리트 열화과정

(산의 작용) = (흡수한 산의 영향) + (포수된 다음의 표면에 흘러내리는 산에 의한 영향)

여기서 제 1항은 콘크리트의 건습반복 작용에 의한 영향을 반영하고, 제 2항은 산과 접촉시간에 의한 영향을 반영한다. 또 열화의 진행은 산의 작용에 의한 Ca(OH)₂의 소실과 C-S-H의 분해에 따른 콘크리트의 침식으로 구성되어 있다.

Ueda 등은 이러한 상황을 고려하여 산성비에 의한 열화모델을 흡수에 의한 영향(d_A)과 포수 후의 영향(d_B)을 조합시켜 다음과 같이 산성비에 의한 콘크리트의 침식깊이 d 를 제안하였다.

$$d = bd_A + d_B$$

여기서, b 는 흡수 영향에 의한 기여율이다.

3.3 산성비가 콘크리트의 탄산화에 미치는 영향

산성비는 콘크리트의 탄산화를 촉진하는 경향이 있으며, 그 메카니즘은 그림 4에 나타낸 바와 같이 설명할 수 있다.

- 탄산화가 진행되는 콘크리트 중의 세공용액에는 CaCO₃로부터 유리된 미량의 CO₃²⁻와 HCO₃⁻이 존재한다.
- 산성비가 콘크리트 표면에 작용할 경우 난용성의 CaCO₃와 반응하여 새로운 H₂CO₃가 생성되어 표층부분에서 CO₃²⁻와 HCO₃⁻이 농도가 증가한다.
- 표층부분에 새롭게 생성된 CO₃²⁻와 HCO₃⁻의 대부분은 산성비와 함께 콘크리트 외부로 용출되지만,

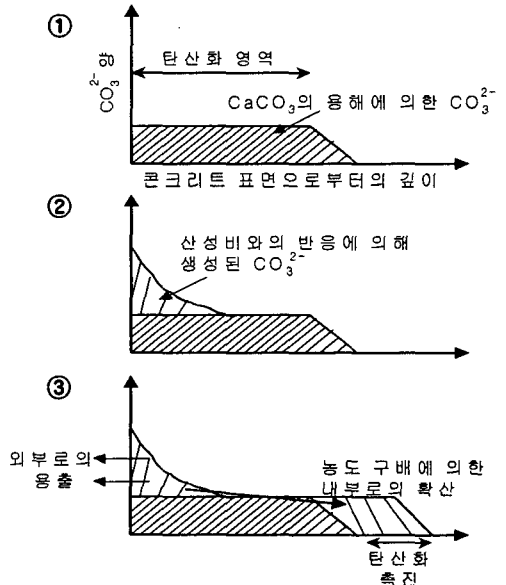


그림 4 산성비에 의한 탄산화 촉진 개념도

그 일부는 콘크리트 내부에도 농도구배에 의해 확산된다. 여기서 CO_3^{-2} 이 탄산화된 부분까지 진행하면 미탄산화 영역의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 CaCO_3 을 생성하기 때문에 그 결과로 탄산화가 촉진되는 것으로 판단된다.

그림 5는 분말 X선회절에 의해 탄산화 시험을 실시한 시험체에 대해 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 CaCO_3 을 정량화한 결과이다. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 용액에 관계없이 탄산화 영역에 존재하지 않고 미탄산화 영역에서 서서히 증가하나, 동일한 깊이에서 증류수에 비해 산성용액이 약간 감소하는 것으로 나타났다. CaCO_3 은 산성용액을 사용한 경우에는 깊이 10mm까지 함유량이 적고 깊이 10mm 이후에서 약간 증가하는 것으로 나타났다. 즉 증류수인 경우에는 CaCO_3 은 탄산화 영역에서 최대도 되지만, 산성용액인 경우에는 pH 전이영역에서 최대가 되는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 산성비가 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 분석할 목적으로 기존의 문헌을 통해 국내의 산성비 현황과 산성비가 콘크리트 열화에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과, 전국 주요 도시의 산성비 pH는 4.3~5.3 범위를 나타내었으며, 특히 수도권 지역이 다른 도시에 비해 다소 낮게 나타났으며, 산성비의 주요성분을 분석한 토대로 국내 산성비에 의한 콘크리트 구조물의 열화를 파악하기 위해 산성비의 성분을 황산 : 질산 = 2 : 1로 혼합한 용액을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단되었다. 그리고 산성비에 의한 콘크리트의 열화로는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 소실, pH의 저하 및 C-S-H 분해 현상이 주로 나타날 것으로 분석된 바 산성비에 의한 콘크리트의 열화를 평가하는 지표로서 C-S-H 분해에 따른 콘크리트의 침식깊이, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 소실 깊이 및 콘크리트 깊이에 따른 pH의 변화를 측정할 필요가 있다. 또한 산성비에 의해 탄산화가 촉진되는 것은 탄산화 영역에서 산성비의 영향으로 새롭게 생성된 CO_3^{-2} 가 콘크리트 내부로 확산되기 때문으로 분석된다.

1사이클 : 건조(CO_2 5%, 온도 30℃, 습도 70%) 74시간
-> 살포(양 2250mm) 22시간

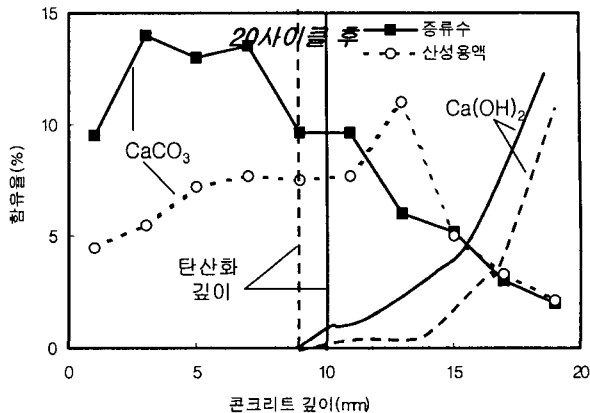


그림 5 탄산화 시험체 내부의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 변화

참고문헌

1. 국립환경연구원 보도자료(www.niger.go.kr), 2005. 1.
2. 上田洋 等, "酸性雨に對する耐久性試験方法の提案", 콘크리트工學年次論文集, Vol.22, No.1, 2000
3. H.L.Kong and J.G. Orbison, "Concrete deterioration due to acid precipitation", ACI Materials Journal, Mar-Apr, 110-116, 1987
4. 久場公司 等, "酸性雨が作用したコンクリートの内部組織の変化に關する基礎的研究", 콘크리트工學年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
5. 小林一軸, "酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に關する基礎的研究", 土木學會論文集, NO.546, V-35, 1997.5