

## 우르미아호의 콘크리트 내구성

## Concrete Durability in Urmia Lake



장봉석\*

Bong-Seok Jang

본 기사는 Concrete International Vol.29, No.6 (June 2007)에 실린 Concrete Durability of Urmia Lake by A. Ramezani-pour, F. Farridafshin, and N. E. Mousavi 를 번역한 것으로 물속에 염분량이 극단적으로 많은 경우에는 용존 산소량의 부족 등으로 저품질의 콘크리트도 좋은 내구성을 가지며, 내부의 철근도 부식되지 않는다는 것을 실제 구조물의 분석을 통하여 밝혀냈다. 이는 염해 내구성 연구에서, 고농도의 소금물을 사용하는 촉진시험 방법에 대하여 다시 한 번 검토해 볼 필요가 있음을 상기시키는 것이라 하겠다(역자주).

우르미아호는 면적 약 4,500~6,000km<sup>2</sup>, 평균 수심 6m 의 중동 최대의 호수이다. 이란 북서부 산악지대의 낮은 기온변화와 높은 염도(약 300g/L)로 매우 극심한 환경조건을 가지고 있다 <그림 1>. 호수의 중간을 가로지르는 우르미아호의 둑길 (causeway)은 100년 사용수명으로 설계되어, 이렇게 독특한 환경에 노출되는 콘크리트의 내구성에 관심이 높아졌다.<sup>1)</sup>

해양 환경에서, 염소이온은 물과 산소가 존재하면 철근의 부식을 촉진시키는 것으로 알려져 있다. 염화물 농도가 매우 높은 이런 환경에서 코팅되지 않은 철근의 부식속도는 클 것이라고 많은 사람들이 자연스럽게 추정할 것이다. 놀랍게도, 우르미아호에서는 이것이 사실이 아닌 것으로 밝혀졌다.<sup>2,3)</sup>

본 연구에서는, 콘크리트 내구성에 영향을 평가하고 새로운 둑길 구조물의 설계 기준을 정하기 위하여 우르미아호의 가혹한 환경에 노출된 콘크리트 구조물에 대한 연구를 수행하였다. 코팅되지 않은 철근과 보통 콘크리트로 제작되어 약 14년째 호수에 놓여있는 4개 시험체를 대상으로 하였다. 코팅되지 않은 철근의 염해 저항성 메커니즘, 모르타르의 동결융해저

항성 그리고 황산염 침해에 대한 이론적 검토도 포함하였다.

## 1. 환경 조건

호수의 평균 기온은 여름철 35°C에서 겨울철 -30°C범위에서 변화하며, 일교차는 약 10°C 이다. 가을과 겨울의 평균 최저 기온은 약 -12°C임에도 호수는 높은 염분량 때문에 전혀 얼지 않는다. <표 1> 에서 알 수 있듯이, 호수 물에 염화물과 황산염 함량이 매우 높다. 우르미아호의 평균 염분량과 용존산소량을 페르시아만(부식되기 좋은 환경으로 잘 알려짐)과 비교하여 <표 2>에 나타내었다. 이 표는 우르미아호의 물이 페르시아만의 약 8배의 염분을 갖는 것을 나타내고 있다.

콘크리트가 습윤과 건조가 반복되는 높이와 주기도 철근 콘크리트의 성능에 대한 환경조건 영향을 결정하는 데에 중요한 인자이다. 콘크리트가 비말대(splash zone)에 있는지 여부는 또 다른 영향 인자이다. 대부분의 다른 해수환경과 다르게, 좁은 면적으로 인하여 우르미아호는 조수간만이 없다.

시험체가 비말대에 위치하는 시간을 결정하기 위하여, 시편 상부의 높이와 과거 호수의 수위를 비교하였다. 바람과 파도 등과 같은 다양한 요인에 의한 불확실성을 고려하기 위하여, 비말대는

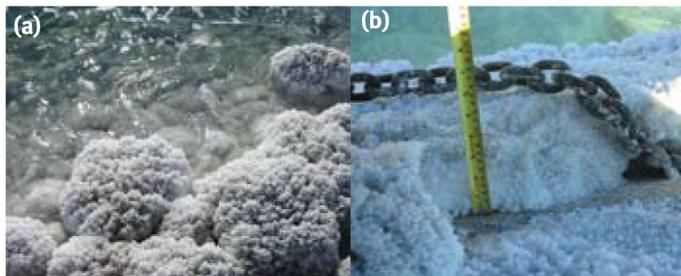


그림 1. 우르미아호의 높은 염도로 소금 결정이 생긴 모습 (a) 자갈에 소금 결정이 생긴 모습, (b) 콘크리트 시험체에 생긴 약 100 mm 두께의 소금 결정

\* 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원  
svice@hanafos.com

표 1. 우르미아호 물의 평균 성분 및 특성<sup>2)</sup>

Chemical or property	Quantity
Mg, g/L	7.4
Ca, mg/L	428.9
Na, g/L	96.6
K, g/L	1.7
Fe, µg/L	< 7
Cu, µg/L	< 3
Ba, mg/L	< 1
SiO <sub>2</sub> , mg/L	3.8
Cl <sup>-</sup> , g/L	202.6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , g/L	19.2
Cl <sub>2</sub> , mg/L	< 0.1
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg CaCO <sub>3</sub> /L	1100
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	—
pH	8.1
Density, g/L	1.2
Viscosity (cp) at 19 °C	1.7
Dissolved oxygen, mg/L	0.4
Total solid content, g/L	320.2
Total suspended solids, g/L	7.2
Total dissolved solids, g/L	31
Primary salinity, g/kg	309.3
Secondary salinity	—
Alkalinity, mg CaCO <sub>3</sub> /L	296

표 2. 우르미아호와 페르시아만의 용존산소와 염분량

	Urmia Lake	Persian Gulf
Average salt content(g/L)	320	40
Average dissolved oxygen(ppm)	0.4	6.5

최대와 최고 수위에서 0.5m 위로 가정하였다. 콘크리트 시험체가 호수에 놓여진 14년 동안(1989~2003)의 호수 수위와 시험체의 상부 높이를 <그림 2>에 비교하였다. <그림 2>에서 알 수 있듯이 시험체 상부가 비말대에 놓여진 기간은 총 약 8년 동안이고, 1992년에서 2003년까지는 전부 잠겨 있었다.

2. 시험체

연구용 시험체는 4개의 철근 콘크리트 앵커 구조물을 포함한다<그림 3>. 현지 정보로는 시험체가 1989년에 만들어져 호수에 옮겨진 것이다. 시험체 모두 연구 당시에는 부분적으로 잠겨 있었다. 1번 시험체는 물가에, 2번과 4번 시험체는 호수 안에 놓

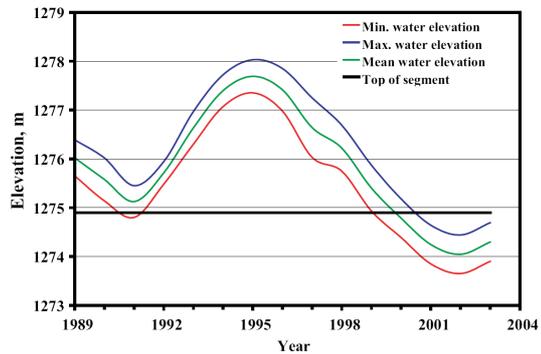


그림 2. 호수와 1,2,4번 시험체 상단의 높이

여졌다. 3번 시험체는 위치는 알려지지 않았지만, 현지조사를 통하여 호수내로 추정하였다.

콘크리트의 배합비는 확인할 수 없었으나, 시험체는 호수 주변 석산의 골재로 혼화재료가 사용되지 않은 보통 콘크리트로 만들어졌음을 시험을 통하여 확인하였다.

3. 시험 항목

각 실험은 시험체에서 실시하였다. 육안관찰을 위하여 철근의 일부를 시험체에서 채취하였다. 2번, 3번 시험체의 여러 위치에 서 염소이온의 침투 프로파일을 조사하였다. 황산염, 탄산화, 밀도 시험은 2번 시험체에서 실시하였다. 2번 시험체에서 채취한 코어로 수행한 압축강도 시험을 보완하기 위하여 반발경도시험을 수행하였다.



그림 3. 1, 2, 4번 시험체의 소금 결정 모습, 추가조사를 위해 빼낸 2, 3번 시험체 모습  
(a) 1번 시험체, (b) 2번 시험체, (c) 3번 시험체, (d) 4번 시험체

#### 4. 시험 결과

<그림 4>에서 알 수 있듯이, 시험체에서 채취한 철근에는 피팅 또는 부식 흔적이 발견되지 않았다. 각 시험체의 다른 부위에서 채취한 철근은 5mm 이하에서 30mm까지 다양한 피복두께를 가졌다.



그림 4. 시험체로부터 채취된 철근, 부식 징후가 전혀 없음.

2번 시험체에서 코어 채취 위치는 <그림 5>에 나타내었다. 이 코어로 압축강도와 화학 시험을 실시하였다.

압축강도 시험 결과는 <표 3>에 나타내었다. 각각의 반발경도 시험의 평균값은 12 정도로 나타났다. 압축강도시험과 반발경도 시험의 결과에서 알 수 있듯이 시험체 제작에는 낮은 강도의 콘크리트가 사용되었다. 콘크리트의 밀도는 2,400 kg/m<sup>3</sup> 이었다.

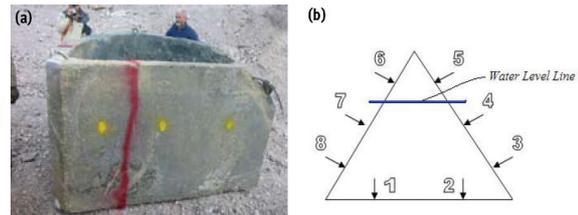


그림 5. 2번 시험체의 시험 (a)수위선(붉은 선), 반발경도와 코어채취 위치(노란 점) 사진, (b)반발경도와 코어채취 위치도

2번 시험체에서 채취한 코어로부터 확인한 염소이온 프로파일은 <그림 6>에 나타내었다. 시험체의 상부에서 채취한 코어에서는, 콘크리트의 염소이온량은 콘크리트 중량비로 약 1%로 매우 높게 나타났다. 이는 높은 투수성을 갖는 낮은 품질의 콘크리트임을 보이는 것이다. 시험체의 바닥부에서 채취한 시료에서는 염소이온량이 매우 낮게 나타났다. 이는 호수 바닥의 점착성 퇴적물이 콘크리트를 보호했기 때문으로 생각된다. 각 위치에서 깊이 따른 염소이온량이 상대적으로 일정한 것도 콘크리트의 투수성이 매우 크다는 것을 나타낸다. 3번 시험체의 염화물 침투 프로파일도 조사하였으며, 2번 시험체와 유사하게 나타났다.

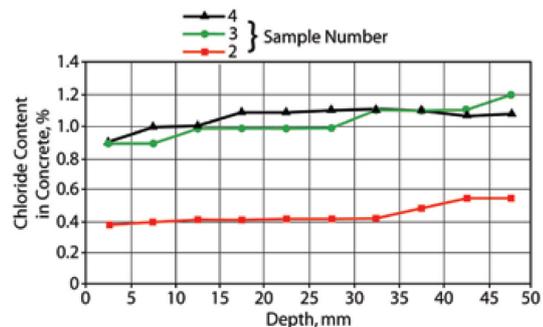


그림 6. 염소이온 침투 프로파일, 2번 시험체(콘크리트중량비, %)

2번 시험체에서 채취한 시료의 황산염 침투 프로파일을 <그림 7>에 나타내었다. 황산이온량 또한 매우 높게 나타났으며, 이 또한 높은 투수성을 갖는 낮은 품질의 콘크리트임을 나타내는 것이다. 염화물 침투 프로파일과는 달리, 황산염 침투 프로파일은 채취된 시료의 위치에 관계없이 유사하게 나타났다.

#### 5. 검토 의견

탄산화시험 결과, 4번 위치에서 탄산화 깊이 5mm 이었으나, 2번, 3번 위치는 탄산화가 일어나지 않았다. 4번 위치는 14년이라는 상당한 시간인 본 연구기간 동안 잠겨있었고<그림 5>, 2번과 3번 위치는 시험체가 호수에 있는 전체기간 동안 잠겨있었다. 큰 탄산화 깊이는 시험체의 상부에서 예상할 수 있을 것이다.

이들 콘크리트 시험체의 상부는 약 8년 동안 비말대에 놓여있었고 매우 작은 철근 덮개를 가졌음에도 불구하고, 눈에 보이는 부식이 관찰되지 않았다. 이 관찰결과는 시험체가 낮은 강도, 높은 투수성의 콘크리트로 만들어졌음을 고려하면 매우 이상한 것이다.

표 3. 콘크리트 압축강도(2번 시험체)

Point no.	Core dimensions(mm)		Density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength(MPa)	
	Height	Diameter		Cores	Rebound hammer
1	122	94	2,450	16.6	0.0
6	120	94	2,380	15.9	15.0
7	137	94	2,380	17.3	-
8	115	94	2,390	19.7	12.0
5	-	-	-	-	24.0
Average			2,400	17.4	15.3

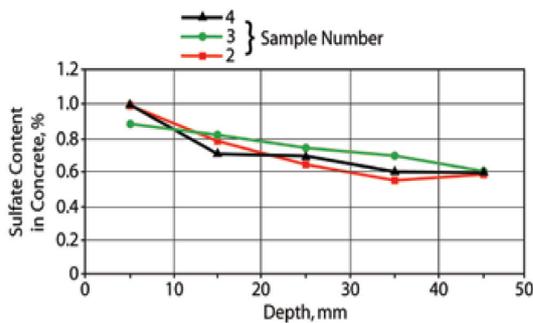


그림 7. 황산염 침투 프로파일, 2번 시험체(콘크리트중량비 %)

<표 2>에 나타내었듯이, 호수 물의 용존산소량이 매우 작아서 단면의 침지된 부분에서 부식이 뒷받침되지 못했을 것이다. 호수 물의 낮은 용존산소량에 대한 주된 이유는 화학의 간단한 이론(용액중에 많은 양의 용매가 녹아 있는 경우에, 다른 용매가 용해될 수 있는 용액의 용해용량이 감소한다)으로 설명될 수 있다. 즉, 호수의 물에 대단히 높은 염류량이 산소의 용해능력을 현저하게 감소시킨다.

호수의 물에 대단히 높은 염류량은, 모세관 흐름과 증발을 통하여 비말대의 콘크리트 시험체에 염소 관련 화합물의 침전을 뒷받침한다. 이들 프리텔염, 염화칼슘 같은 이들 화합물은 우선적으로 침전되어 보다 큰 공극들을 막는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> 물속에 낮은 용존산소량과 함께 공극과 모세관의 막힘이 철근에 음극과 양극의 형성을 막았을 것으로 생각한다. 콘크리트 시험체는 높은 황산염저항성도 보이고 있다. 이것 또한 호수 물의 높은 염소이온량에 의한 것으로 여겨진다. 황산염 침해가 일어나기 위한  $C_3A$ 를 거의 남기지 않아, 프리텔염의 형성은 콘크리트 내의  $C_3A$ 를 대부분을 소모하여 황산염 침해로부터 보호하여 준다. 콘크리트 시험체 내부로 염의 깊은 침투는 콘크리트의 내구성에 또 하나의 긍정적인 영향을 준다. 다량의 염류가 빗물도 동결되는 것을 방지해주기 때문에, 이 지역의 매우 추운 겨울동안에도 콘크리트는 동결융해에 의한 손상에 잘 견딜 수 있다.

## 6. 독일의 콘크리트

이 고찰의 결과는 우르미아호의 특이한 환경이 비록 염소이온의 침투가 심각하여도 철근의 부식을 촉진시키지 않는다는 것을 보여 준다. 본 연구에서 조사한 시험체에 사용된 높은 투수성을 갖는 상대적으로 낮은 품질의 콘크리트일지라도 이 환경에서 매우 내구적임을 나타내고 있기 때문에, 우르미아호의 독일의 건설에는 비싼 고성능 콘크리트 배합이 필요하지 않은 것으로 추천되었다. 물속에 매우 높은 염류량은 철근 콘크리트를 부식, 황산염 침해 그리고 동결융해 작용으로부터 보호하는 긍정적인 역할을 한다.

## 참고문헌

1. *Investigation on Concrete Mix Design and Aggregate*, Iran Marine Industrial Co.(SADRA), Urmia Lake Causeway Project, Iranian Ministry of Roads and Transportation, 2004.
2. Mousavi, M. E., Faridafshin, F., and Ramezani-pour, A. A., "Effects of the Highly Corrosive Environment of Urmia Lake on the Fully-Submerged, Semi-Submerged, and Exposed Concrete—An Approach to Production of High-Performance Concrete(HPC)," *Proceedings of 7th International Conference of Concrete Technology in Developing Countries*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004, pp. 103 ~ 114.
3. Faridafshin, F., Mousavi, M. E., and Ramezani-pour, A. A., "Concrete Durability at Highly Severe Environment of Urmia Lake," *Proceedings of the 2nd fib Congress*, Naples, Italy, 2006.
4. Suryanvansi, A. K., and Swamy, R. N., "Influence of Penetrating Chlorides on the Pore Structure of Structural Concrete," *Cement, Concrete, and Aggregates*, ASTM International, Vol. 20, No. 1, June 1998, pp. 169 ~ 179.

## ◇◇◇ 원고 모집 안내 ◇◇◇

「콘크리트학회지」는 콘크리트 관련 학문과 기술에 대한 정보를 제공하기 위해 발행되고 있습니다. 본 학회지를 통해서 연구 결과, 경험한 사례 등을 콘크리트 관련 기술자들과 함께 나누길 원하시는 분께서는 다음과 같은 형태로 참여하실 수 있습니다. 여러분의 옥고를 기다리겠습니다.

- 원고 주제 : 포토에세이(사진, 서예, 시 등), 특집기사, 기술기사, 공사기사, 원로와의 대화, 해외번역기사, 해외연구소 소개, 국제학술대회 참가기, 현장탐방, 논문, 우리회사소개 등
- 원고 분량 : 글씨크기 11pt, 줄간격 160%, A4용지 4매 ~ 6매 내외
- 보내실 곳 : E-mail : [mjh@kci.or.kr](mailto:mjh@kci.or.kr)