

상수도시설 콘크리트 수조구조물에서의 염화이온 침투저항 특성분석

Property Analysis of Waterproofing and Corrosion-Resistant Performance in Concrete Water Supply Facilities

곽규성¹ · 마승재² · 최성민³ · 오상근^{4*}

Kyu-Sung Kwak¹ · Seung-Jae Ma² · Sung-Min Choi³ · Sang-Keun Oh^{4*}

(Received June 18, 2015 / Revised June 24, 2015 / Accepted June 24, 2015)

The purpose of this study is to understand the necessity for waterproofing and corrosion-resistant technique application on concrete water tank used in water supply. Relevant research materials and regulation were collected, reviewing for the case studies of sample structures aged over 20 years, and experimental studies on chloride conduction for the high performance concrete and penetration properties of water repellency of liquid type materials. The result is that the concrete water tank in the water supply is needed for waterproofing and corrosion-resistant material coating to maintain long term durability due to the constant environmentally induced degradation deterioration often caused by chloride attack.

키워드 : 방수, 방식, 수조구조물, 상수도시설, 염소이온

Keywords : Waterproofing, Corrosion resistant, Water tank, Water supply, Chloride ion

1. 서론

지금까지 국내에서는 먹는 물을 생산 공급하는 하는 상수도 시설 및 공동주택의 음용수 저장용 콘크리트 구조물에 대한 방수·방식 성능 동시 확보를 위한 확실한 개념 정립이 미약하고, 관련 설계지침의 미비로 수조용 콘크리트 구조물의 안전성과 내구 수명(품질)의 문제가 사회적으로 많은 논란의 대상이 되고 있다.

또한 기 시공되어 사용 중인 공동주택의 음용수 저수조, 상수용 정수 시설 및 배수지의 사례를 보아도 대상 구조물 및 부위의 환경에 대한 정확한 분석 없이 일관된 방식 설계가 이루어짐으로써 유지관리의 어려움(적정 기술의 도입, 보수비용 등)이 커지고 있다.

콘크리트 구조물을 관리하는 관리자 입장에서 방수/방식처리

또는 콘크리트의 수밀성 강화여부에 상관없이 결과적으로 물이 들어오지 않는 것을 요구한다는 조건 하에서 콘크리트가 완전히 수밀적 성능을 확보한다면 방수/방식공사는 불필요하게 될 것이다. 그러나 현실적으로 콘크리트는 완벽한 품질로 시공되기 어렵고 그에 따라 방수/방식에 대한 의존도가 더욱 높아지고 있지만 여전히 콘크리트 기술자(현장 시공자)는 변함없이 이러한 문제에 대해서는 무관심한 편이다.

즉, 일정 강도 및 두께를 확보한 콘크리트는 이론적으로는 물이 거의 새지 않기 때문에 방수 상에는 문제가 없는 것처럼 인식될 수도 있지만 현실은 전혀 반대의 경향을 보이는 것이다. 예를 들어 건축물의 경우 옥상층에는 거의 100%라고 말해도 좋을 정도로 방수층이 시공되어 있고, 지하층의 경우도 대부분 방수시공이 되어

* Corresponding author E-mail: ohsang@snut.ac.kr

¹삼성물산 건설부문 빌딩 ENG팀 차장 (Ph.D in Engineering, Samsung C&T Corporation, Field of Construction Engineering, General Manager of Building ENG Team)

²서울과학기술대학교 일반대학원 건축과 석사과정 (Architectural Engineering Department Masters Student, Seoul National University of Science and Technology)

³서울과학기술대학교 건설기술연구소 연구교수 (Ph.D in Engineering, Researcher Professor, Institute of Construction Technology, Seoul National University of Science and Technology)

⁴서울과학기술대학교 건축학부 교수 (Ph.D in Engineering, Professor of Architectural Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

Table 1. Quality examination of watertight concrete material

Type	Item	Test Evaluation Method	Cycle Parameters	Evaluation Standard
Waterproofing Material	KS F 4926 Quality Criteria	Manufacturer Testing Report Sheet Confirmation or KS F 4926 Method	Manufacturer instructed construction, more than 1cycle/month and longterm storage	KS F 4926 requirements met
Expander	KS F 2562 Quality Criteria	Manufacturer Testing Report Sheet Confirmation or KS F 2562 Method		KS F 2562 requirements met
Compressive Strength Evaluation Case	KS F 2405 Method		Mix ratio change, 1cycle/day or structure importance, by construction scope 150 m ³ /1cycle	Section 2, Chart 2.35 requirements met
Water-Bonding Material Ratio	1) Continuous Data Analysis Method via Non-hardening Concrete Unit-Amount Cement 2) Continuous Data Method via Aggregate Surface Water Amount of Concrete Material			Section 2, Chart 2.34, value requirements met

있지만 일부 그 사용 용도에 따라 방수층을 시공하지 않는 경우는 유도처리로 대신 하고 있는 실정이다. 특히, 수조 구조물은 지중에 매립되는 토목구조물이지만 그 형태나 제작방법은 건축물과 동일하므로 이러한 점을 간과해서는 안 된다.

이러한 문제에 대해 그 동안 우리나라에서는 일본, 미국, 유럽 등 외국 사례를 그대로 받아들여 적용하려는 경향이 큰 관계로 전문 기술자들 사이에서도 상반된 견해가 일고 있고, 이로 인해 관련 기술 발전의 저해 및 실무 적용에 있어서 많은 혼선을 빚고 있다.

따라서 상기와 같은 실정을 감안하여 우리나라의 음용수조 구조물(상수조 등)의 각 시설물별 방수·방식에 대한 성능을 동시에 만족하여야 할 필요성을 정립하는 것이 이 연구의 목적이다.

이를 위해, 이 논문에서는 국내·외 관련 문헌 자료 및 규정 등에 대한 고찰과, 20년 이상된 현장의 사례 조사, 수밀콘크리트와 침투 방지재의 염소이온 투과에 대한 실험적 평가 등을 통하여 결론을 도출하고자 한다.

2. 국내·외 관련 자료 조사 및 문헌 고찰

2.1 콘크리트 방수·방식의 관련 규정 검토

2.1.1 국내의 콘크리트 표준시방서 검토

수조용 콘크리트 구조물에 있어서의 수밀 구조 형성이란 수조용 구조물에 물이 직접 접촉하였을 때 구조물 외부에서 혹은 내부에서 물이 침입하지 못하게 하거나, 새어나가지 않도록 하기 위한 작업의 말한다. 일반적인 콘크리트 방수·방식은 콘크리트의 내부 혹은 외부 표면에 피막(멤브레인층)을 붙이거나 발라서 근본적으로 콘크리트 표면에 물 혹은 화학적 영향이 미치지 않도록 하거나, 물의 투과를 방지하려 하 것을 말한다.

그러나 대체로 콘크리트 관련 기술자들(현장 시공자, 설계자 등)

은 콘크리트가 소정의 강도와 시공 품질을 확보한다면 콘크리트 표면에 보호 피막(멤브레인층)을 설치하지 않아도 충분히 방수·방식 성능을 유지할 수 있다고 판단하여 설계단계에서 대체로 무관심하여 왔다.

최근 개정된 「콘크리트표준시방서 제6장 수밀콘크리트」에서는 수밀콘크리트에 대하여 “높은 수밀성이 필요한 콘크리트 구조물은 투수, 투습에 의하여 안전성, 내구성, 기능성, 유지관리 및 외관 변화 등의 영향을 받는 구조물로서 각종 저장 시설, 지하구조물, 수리구조물, 저수조, 수영장, 상하수도시설, 터널 등 압력수의 영향을 받는 구조물을 말한다(1.1 적용범위 (2)항)”로 정의하고 있다.

그러나 이러한 수밀 콘크리트는 재료적 특성 및 시공상 발생하는 결함부의 존재와 관련하여 근본적 수밀 처리가 어려워 다음 (1)~(7) 및 Table 1과 같이 근본적인 방수 조치의 필요성을 기술하고 있다.

(1) 수밀콘크리트 구조물의 시공은 설계 내용을 충분히 검토하여 균열, 콜드조인트, 이어치기부, 신축이음, 곰보, 재료분리 등 외부로부터 물의 침입이나, 내부로부터 유출의 원인이 되는 결함이 생기지 않도록 주의를 하여야 한다. 따라서 시공을 할 때는 시공이음의 위치, 신축이음의 구조 및 간격, 온도균열 발생의 유무, 주변 차량통행 및 시설물에 의한 진동 및 거동, 부등침하 등 구조체의 변형에 미치는 영향 등을 사전에 검토하여야 한다(1.2 일반사항 (2)항).

(2) 수밀을 요하는 콘크리트 구조물에서는 그 이음부 및 거푸집 긴결재 설치 위치가 누수의 원인이 되기 때문에 이들 부위에서의 수밀성 확보를 위하여 특히 주의해야 하고, 또한 필요에 따라 방수공을 실시하여야 한다(1.2 일반사항 (3)항).

(3) 수밀콘크리트 구조물의 설계 상 반드시 시공이음, 신축이음 등을 두어야 할 경우에는, 이음부를 대상으로 별도의 방수공을 계획하여 책임기술자의 승인을 얻어 시공 후 누수문제가 발생하지

않도록 관리하여야 한다(1.2 일반사항 (4)항).

(4) 거푸집의 긴결재로 사용한 볼트, 강봉, 세퍼레이터 등의 아래쪽에는 블리딩 수가 고여서 콘크리트가 경화한 후 물의 통로를 만들어 누수를 일으킬 수 있으므로 누수에 대하여 나쁜 영향이 없는 재질의 것을 사용해야 한다(2.3 거푸집 (1)항).

(5) 소요품질을 갖는 수밀콘크리트를 얻기 위해서는 온도수축 및 팽창에 의한 균열 발생 및 반복 거동을 조절할 수 있도록 적당한 간격으로 시공 이음을 두어야 하며, 그 이음부의 수밀성에 대하여 특히 주의해야 한다. 따라서, 시공 이음을 둘 때에는 이 부위에서의 누수를 방지하기 위하여 방수공도 같이 검토하여야 한다(3.1 콘크리트의 시공 (1)항).

(6) 콜드조인트는 누수의 원인이 되어 수밀을 요하는 구조물의 기능을 손상시키므로 콘크리트는 될 수 있는 대로 연속으로 쳐서 균일한 구조물을 만들어야 한다(3.1 콘크리트의 시공 (2)항).

(7) 수밀콘크리트는 누수 원인이 되는 건조수축 균열의 발생이 없도록 시공하여야 하고, 0.1mm 이상 폭의 균열이 발생된 경우 누수를 방지하기 위한 방수공을 검토하여야 한다(3.1 콘크리트의 시공 (3)항).

상기 내용과 같이 콘크리트표준시방서 상의 기술내용을 살펴보면 콘크리트의 수밀구조 형성과 관련한 현실적 어려움과 방수의 필요성을 충분히 인식할 수 있다.

일반적으로 수밀콘크리트는 통상의 수밀성 관점으로 본다면 재료 자체성능은 매우 우수하다. 어느 정도 방수성능을 가지는가를 말한다면 원칙적으로 수밀콘크리트(설계기준강도 30MPa, 40MPa)는 방수층을 필요로 하지 않는 정도라고 말해도 좋을 것이다. 그러나 상기 (1)~(7)항에서 언급된바와 같이 콘크리트가 원칙적으로 수밀재료인데도 방수/방식과 같은 처리를 해야 할 필요성은 구조물을 짓는 방법에 기인하는 것과 더불어 콘크리트에 생기는 누수로 연결되는 시공상의 결함 때문이다. 이 결함은 두가지면에서 문제를 발생시킨다. 첫 번째는 내부 혹은 외부로 물이 침투하는 것이고, 두 번째는 콘크리트 구조체 내부에서 물의 침투, 확산에 의한 철근부식, 수산화칼슘 용출 등의 내구성에 악영향을 미치는 것이다. 특히 콘크리트 구조물의 장기적 내구 안전성을 고려한다면 두 번째는 더욱 고려하여야 할 중요한 사항이 된다.

즉, 고강도 콘크리트 또는 구체콘크리트 등과 같은 수밀콘크리트를 사용할 경우라도 국부적으로는 수밀구조물을 형성시킬 수 있더라도 전체적인 측면에서는 균열부, 이머치기부, 세퍼레이터 주변, 곰보 등의 수밀처리를 위한 획기적인 대안(재료 및 시공기술의 확보 등)이 없이는 사실상 현재 국내 기술수준으로는 완전한 수밀구조를 형성하는게 근본적으로 어렵다는 것이다. 따라서 이러한

점을 감안할 때 상수도 구조물의 콘크리트 구조물에 대한 방수/방식처리는 반드시 필요한 것이라 할 수 있다.

2.1.2 외국의 관련 규정 검토

외국의 경우는 미국, 유럽, 일본 등이 각각 국가별로 콘크리트에 대한 방수·방식 처리 방법이 상호 다르지만, 그것에 대한 분명한 이유와 배경이 정리되어 있기 때문에 구조물의 환경조건, 용도, 적용 부위 등에 따라 적절히 대응하고 있다.

예를 들어, 미국(ACI Code)이나 영국(BS Code)에서는 특별히 내산성(내부식성)을 요구하는 곳을 제외한 일반구조물은 콘크리트 자체의 재료 및 시공 상의 품질 향상(수밀성 및 강도 확보)을 통하여 방수·방식효과를 낼 수 있도록 규정하고 있어, 특별한 방수·방식 조치는 취하고 있지 않다. 일본의 경우는 수조구조물의 경우 수밀콘크리트의 제조를 통한 방수성능과 함께 화학적 영향에 대한 방식 성능도 동시에 확보하도록 하여 구조물의 사용 환경 및 요구 성능 조건에 맞도록 조치하고 있다.

(1) 방수 분야

미국 ACI 규정에 따르면 사용재료 및 배합조정 등을 통하여 콘크리트의 품질개선이 가능하며 효과적으로 수밀성을 확보하기 위해서는 다음 사항이 준수되어야 한다고 규정하고 있다.

- a. 콘크리트 배합시 잘 다져야 한다.
- b. 균열 폭이 극히 작도록 한다
- c. 이음부는 되도록 적게 하여 정확히 설계·시공한다.
- d. 꼭 필요한 곳은 불투수성 라이닝(멤브레인) 공법으로 시공한다.

일반적으로 콘크리트 구조물에서는 콘크리트의 투수계수가 $1 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 정도로 불투수체에 가깝기 때문에 상기조건에 준하여 시공시 품질관리만 철저히 한다면 방수효과면에서 상당한 효과를 기대할 수 있으나, 상기 ACI 규정에서도 d항에서 보는 바와 같이 부득이한 경우에는 방수의 필요성을 인정하고 있다.

또한, ACI 350R-83에서는 “콘크리트의 수밀성에 대해 규정하고 콘크리트의 다짐, 크랙의 최소화, 적절히 설계 시공된 조인트 등 양질의 콘크리트가 방식 처리보다 더 경제적이고 신뢰할 만하다.”고 규정되어 있다.

영국의 BS5337(1976)에서는 콘크리트의 내구성과 불투수성에 대해 규정하고, 골재 분리가 없는 완벽한 다짐이 수밀성 가장 중요하며 보통의 콘크리트는 충분한 불투수성을 유지하지만, 용존 염소가 콘크리트에 심각한 부식을 야기할 수 있기 때문에, 허용 이상의 침식이 예상될 때 불투수성 보호 피복(방식재)이 필요하다고

규정하고 있다.

일본의 토목학회 콘크리트표준시방서(JACE-1996 제정)에서는 수밀을 요하는 콘크리트 구조물(투수, 투습에 의한 구조물의 안전성, 내구성, 기능성, 유지관리, 외관 등이 영향을 받는 구조물로서 각종 저장구조물, 지하구조물, 수리구조물, 저수조, 풀, 상하수도시설, 터널 등을 말한다)에서는 물시멘트비를 55% 이하로 하도록 되어있고, 필요에 따라 방수제 등의 혼화재료를 사용하며, 특히 수밀상 문제가 되고있는 이어치기부의 시공계획, 거푸집 연결제 사용시의 주의점 등을 명시하고 있다.

(2) 방식 분야

미국의 ACI 규정에는 화학약품이 용수 중에 포함된 경우를 대비한 방식의 도입에 대해서 일부 언급하고 있으나, 일반용수나 생활하수가 주를 이루는 일반정수장이나 도시하수처리장에는 거의 적용되지 않는다고 나타내고 있다. 그러나 예외적인 경우, 즉 H₂S(황화수소) 가스의 발생이 우려되는 곳에서는 이에 대비한 대책으로서 방식공사의 필요성을 인정하고 있다.

일본의 경우는 오래 전부터 상수도 처리 콘크리트 구조물에는 방식처리를 하도록 규정하고 있다. 음용수, 오폐수, 공장용 화학수 등 화학적 수질 정도에 따라 방식의 정도도 다르게 규정하고 있어, 방식의 필요성을 강조하고 있다.

2.2 콘크리트 수밀성 연구 자료 분석

콘크리트의 균열은 구조물의 누수를 유발하는 가장 큰 원인이 되고 있고, 화학적 부식과 기타 열화의 빠른 확산에도 큰 영향을 미친다. 이러한 균열부분의 수밀성과 누수문제의 상관관계에 대해 일본동경대학교의 연구결과에는 다음과 같이 기술하고 있다.

2.2.1 균열 부분의 수밀성과 누수

균열에서의 누수 문제는 많은 연구자와 국가에서 나름대로 허용균열 폭을 두고 관리하고 있다. 그러나 연구자가 다르고 시험체와 시험 조건이 각기 상이하기 때문에 누수량에 관한 데이터는 꼭 일치하지는 않지만 많은 데이터를 종합적으로 판단하면 누수가 발생하지 않는 균열의 한계 폭은 대략 0.05~0.15mm 정도라고 말하고 있다. 그러나 실제의 구조물에서는 0.15mm 이상의 균열 폭은 빈번히 관찰되기 때문에 누수의 위험성이 매우 높은 상태에 있고, 0.15mm 이하의 균열이라 할지라도 지하 구조물, 수조, 해안 구조물 등 수압의 영향을 받는 경우는 이들 균열도 언제든지 누수의 영향을 받는다. 즉, 균열로부터의 누수는 균열 폭, 균열의 깊이,

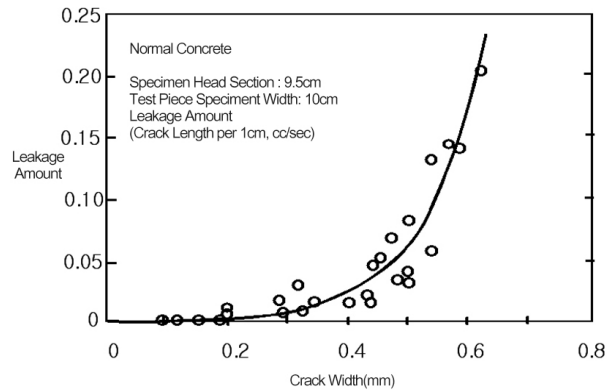


Fig. 1. Leakage crack width and leakage amount

콘크리트 부재의 두께, 가해지는 수압의 영향을 복합적으로 받으며, 특히 큰 영향을 미치는 것은 균열의 폭이기 때문에 그 영향에 관한 실험 결과를 Fig. 1에 나타낸다. 이것은 10cm 두께의 콘크리트 옥상 슬래브의 위에 빗물이 9.5cm 쌓인 상태를 가정한 것이다. 균열 폭이 0.05mm 정도부터 누수가 발생하기 시작해 누수량은 균열 폭의 약 4승에 비례하여 증가하는 결과를 나타내고 있다.

2.2.2 이어치기부의 수밀성과 누수

콘크리트의 이어치기 부분도 수밀성에 대해서는 약점이 된다. 이어치기부분은 시공설계에 따라서 계획적으로 만들어지는 경우와 작업의 상황상 한번의 타설 구획 내에서 타설 시간의 간격에 의해 발생한 2종류가 있다. 전자에서는 새로운 콘크리트를 타설하는 동안 먼저 타설된 콘크리트면의 엄격한 처리를 사전에 하기 때문에 어느 정도의 수밀성 확보가 가능하다. 그러나 후자의 경우는 별도의 조치 없이 시공되어지는 결과에 맡겨지기 때문에 타설 간격(시간)이 수밀성에 큰 영향을 미쳐 타설 간격이 길어지면 콜드조인트가 되고 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 수밀성 측면에 있어 중대

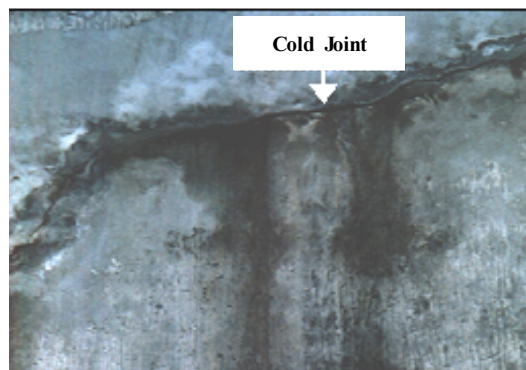


Fig. 2. Cold joint leakage

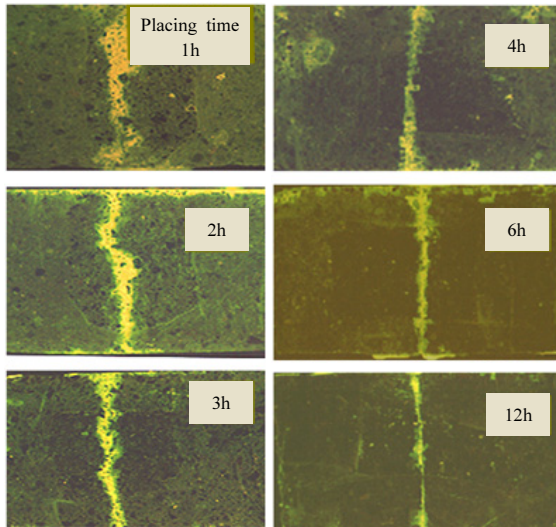


Fig. 3. Fluorescent solution outlining waterleakage crack pathing in joint area

한 결함부가 된다.

이어치기부에 형광염료를 녹인 용액을 투과시키고 그 후에 블랙램프를 이용해서 발광에 의해 물의 투과경로를 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 중앙부 이어치기 부분을 따라 수용액이 깨끗하게 투과한 모습이 보이는데 (밝게 보이는 부분) 이러한 부분은 이어치기 시간 간격이 길어짐에 따라서 그 투과 폭이 작게 되는데, 이것은 이어치기 부분이 충분히 일체화되지 않았기 때문에 많은 물이 좁은 범위를 투과하는 것을 나타낸다. 이것은 물이 통과하기 쉽게 되어있는 것을 의미하는 것이다.

2.2.3 세퍼레이터(폼타이) 주위의 수밀성과 누수

세퍼레이터 주위도 누수가 많은 부분의 하나이다. Fig. 4는 세퍼레이터로부터의 누수사례이며, 이와 같이 세퍼레이터 주변에 누수가 발생하기 쉬운 이유 중 하나는 세퍼레이터 밑은 블리딩과 콘크리트의 침하에 의해 공극이 생기기 쉽기 때문이다.

그러면 기존의 연구에서 세퍼레이터 부분은 어느 정도 누수가 발생하기 쉬운 것인가를 시험을 한 결과, 거푸집의 윗부분에 있는 세퍼레이터 주위에는 누수가 많이 발생해서 수밀성을 기대하지 못하고, 밑부분에서는 누수가 매우 적게 나타났다. 이는 타설하는 콘크리트의 물시멘트비의 영향도 커, 물시멘트비가 큰 콘크리트에서는 누수가 발생하기 쉬운 것을 제시하였다.

특히 거푸집의 위부분에서는 거의 대부분 공극이 생기기 때문에 세퍼레이터 부분은 방수상의 취약점으로서 작용하고 있다.

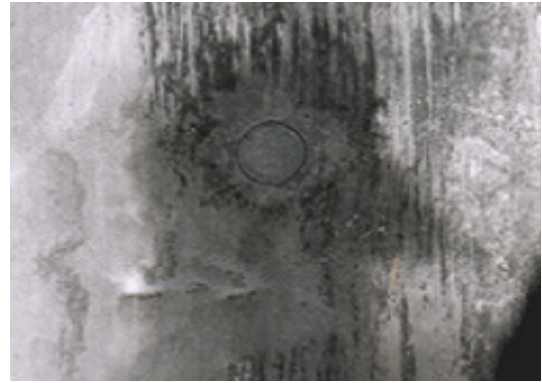


Fig. 4. Leakage in separator area (form tie)

2.3 콘크리트 수조구조물의 방수/방식관련 환경 고찰

2.3.1 콘크리트를 부식시키는 화학환경

콘크리트의 침식은 탄산에 의한 중성화, 칼슘 및 기타 알칼리 성분의 용출, 염산에 의한 침식으로 나타난다. 콘크리트의 부식은 표면으로부터 내부로 진행된다. 부식된 콘크리트의 특징은 다음과 같은 현상으로 나타난다.

(1) 외관으로 나타나는 현상

- | | |
|------------------|-------------------|
| a. 골재의 노출, 탈락 | g. 액상 겔의 침출 |
| b. 표면 박리 | h. 팽윤 |
| c. 분상화(粉狀化) | i. 균열발생 |
| d. 연화(軟化) | j. 결정의 석출 |
| e. 녹의 침출 | k. 콘크리트의 각임(가늘어짐) |
| f. 팝 아웃(Pop-Out) | l. 철근의 노출, 부식 |

(2) 외관으로 나타나지 않는 현상

- | | |
|------------|-------------|
| a. 강도저하 | d. 중성화 |
| b. 탄성계수 저하 | e. 철근부식(내부) |
| c. 팽창 및 수축 | f. 공극률의 증가 |

다음의 Table 2는 콘크리트를 부식시키는 환경조건이다.

2.3.2 음용수 저장 시설의 콘크리트의 취약화 사례

현재 수처리 기반 시설의 현황을 보면, 대부분 콘크리트 구조물로 형성되어 있고, 이러한 콘크리트 수조구조물은 수처리를 위해 사용하는 화학약품(염소 등)에 취약한 특성을 가지고 있다.

음용수 저장(상수도 등) 시설의 콘크리트 취약화 사례를 검토하

Table 2. Types of gas penetrating concrete

Corrosion Rate	Type	Concentration (g/L)	
Extreme Corrosion	Sulfurous Acid Gas	SO ₂	0.1~0.5
	Hydrogen Fluoride	HF	0.05~0.2
	Nitrogen Monoxide	NO	0.025~0.125
	Hydrogen Chloride	HCl	0.01~0.05
	Chloride	Cl ₂	0.001~0.005
Severe Corrosion	Sulfur Dioxide	SO ₂	0.02~0.1
	Hydrogen Fluoride	HF	0.01~0.05
	Hydrogen Sulfide	H ₂ S	> 0.01
	Nitrogen Monoxide	NO	0.005~0.025
	Hydrogen Chloride	HCl	< 0.01
	Chloride	Cl ₂	< 0.001
Normal Corrosion	Aluminum Fluosilicate	SiF ₄	> 0.001
	Sulfur Dioxide	SO ₂	< 0.02
	Hydrogen Fluoride	HF	< 0.01
	Hydrogen Sulfide	H ₂ S	< 0.01
	Nitrogen Monoxide	NO	< 0.005

기 국내·외 정수장의 실태를 조사하였다.

(1) 기상부(氣相部)

콘크리트는 시멘트의 수화에서 생성된 수산화칼슘에 의해 공극 수는 pH12.50이상의 강알칼리성을 보인다. 공극 내의 수산화칼슘은 공기 중의 이산화탄소와 결합하여 탄산칼슘을 생성하므로 pH가 저하된다(시멘트페이스트가 완전히 중성화되면 pH8.30이 되는 것으로 알려져 있다). 이 반응에는 물의 개재가 필요하기 때문에 건조한 콘크리트 내에서는 중성화가 진행되지 않으며, 습도가 높고 공극에 물이 고여 있는 상태에서는 탄산가스의 확산이 저해되기 때문에 중성화가 일어나기 어려워진다. 중성화가 가장 진행되기 쉬운 상대습도는 50~60%이다. 상수도시설의 기상부는 상시 물과 접하는 부분은 아니지만 그래도 습도가 비교적 높아 환경조건에 따라서는 중성화가 진행되어 Fig. 5, 8과 같이 콘크리트 내의 철근의 부식취약화로 이어진다. 소독에 사용하는 염소제는 액중에서 기체가 되어 기상부로 방출된다. 방출된 염소가스는 결로수가 없는 상태의 콘크리트면에서는 콘크리트 내에 침투하여 중성화를 촉진함과 동시에, 콘크리트 내의 철근을 부식시킨다. 건전한 콘크리트 내의 철근은 알칼리환경에 있으므로 철근표면은 부동태피막을 형성하여 부식이 일어나지 않는다. 그러나 경화 후 염화물이 외부에서 침입하여 철근표면에 염소이온이 도달하면 부동태피막이 파괴되어 부식이 발생한다. 염소이온량이 많아지면 부식은 철근전체에 미치며 콘크리트표면에 용출되거나 균열 또는 박리가 일어났다.

또한 Fig. 4와 같이 천정부 등에서 콘크리트의 피복이 염소에 의해 취약화 되어 피복두께가 부족하거나 균열과 같은 결함이 발

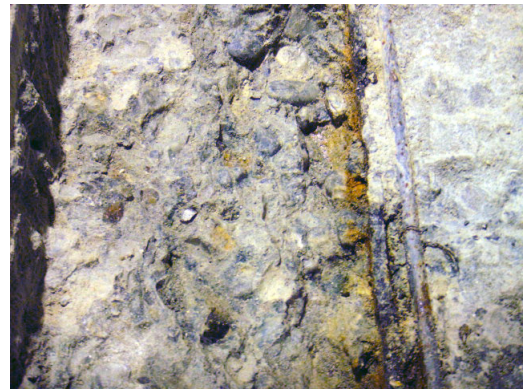


Fig. 5. Peeled-off concrete (lack of cover layer) due to reinforcing steel corrosion



Fig. 6. Concrete interior exposure and reinforcing steel corrosion (elution)

생되면 철근부식이 더욱 촉진된다. 기상부에 결로수가 있는 경우는 염소가 결로수에 용해되어 염산 등이 되어 침식이 일어난다.

(2) 액상부(液相部)

액상부(수중)에는 이산화탄소가 물에 용해하여 일어나는 탄산(약산)이 포함되어 있다. 탄산은 콘크리트 내의 칼슘에 작용하여 물에 불용성의 중성 탄산염(CaCO₃)을 형성하여 콘크리트 조직을 밀실하게 하는데 탄산이 더 작용하면 가용성의 산성염(Ca(HCO₃)₂)이 되므로 콘크리트가 침식된다.

수돗물의 소독에 사용되는 액화염소나 차아염소산나트륨을 포함한 물에 콘크리트가 장기간 접촉하고 있으면 콘크리트표면이 침식되어 Fig. 7과 같이 열화부분이 나타난다. 이것은 시멘트경화체가 산에 의해 분해되어 고착력을 잃고 연화 조직층이 생성되기 때문이다. 또한 유수 등에 의해 콘크리트표면의 열화층이 유출되면 Fig. 5와 같이 산에 침식되기 어려운 골재가 노출된다. 또한 침식이 진행되어 노출된 골재가 유지력을 잃으면 골재가 탈락되어 침식이



Fig. 7. Concrete weakening due to chloride and carbon (surface peeling by slight touch)



Fig. 8. Concrete aggregate exposure

진행된다. 또한 콘크리트구조물에 균열 등의 결함개소가 있는 경우, 침식성의 물이 내부에 침투함에 따라 철근도 부식된다.

음용수조 시설 중 수조 내부의 표면 마감, 보수에 자주 사용되는 EVA(에틸렌 아세트산공중합체) 등을 이용한 폴리머시멘트 모르타르는 수조 내에 장기간 놓여 있으면 폴리머시멘트모탈 내의 알칼리 또는 콘크리트 내의 알칼리작용을 받아 카르보산염과 알코올로 분해되어 폴리머시멘트 모르타르를 연화·취약화시켜 박리된다. 따라서 수조 내에 사용하는 바탕조정재에는 내알칼리성이 우수한 2액 반응경화형 에폭시수지계 폴리머디스퍼션을 사용한 바탕조정재를 사용하는 것이 필수조건이다.

2.4 음용 수조 구조물의 방수/방식 환경에 대한 고찰

상수도 구조물의 실제 현장의 실태를 살펴보면 시공시 외부 수위의 증가, 익스펜션조인트 시공의 어려움, 콘크리트 자체의 공극량, 건조수축 및 온도변화에 따른 구조물의 신축팽창 작용과, 타설

불량 및 양생관리의 부족에 따른 결함 발생 등 다수의 균열 유발 요인 및 누수 요인이 상존하고 있어, 콘크리트 구조물에서의 완전한 수밀성(방수)을 기대하기는 어려움이 많다. 또한 음용수조 구조물은 그 자체에 있어서 수처리 과정상 여러 가지 화학약품을 사용하고 있기 때문에 콘크리트의 부식에 영향을 주고 있다. 또한 수밀 구조에 대한 실험적 근거자료 검토 결과 누수가 시작되는 균열의 크기는 약 0.05~0.15mm 정도이며, 이어치기부, 폼타이, 곰보부 등에서 누수가 쉽게 발생할 수 있음이 확인되었으며 해외 관련 규정 검토 결과 일본(JACE)과 미국(ACI)에서도 상수도 구조물에 대한 방수/방식의 필요성을 인정하고 있으며, 특히 화학물질을 사용하는 구조물은 반드시 방수제 및 각종 혼화제 등을 사용하도록 규정하고 있다. 수밀구조에 대한 실험적 근거자료 검토 결과 누수가 시작되는 균열의 크기는 약 0.05~0.15mm 정도이며, 이어치기부, 폼타이, 곰보부 등에서 누수가 쉽게 발생할 수 있음이 확인되었다. 따라서 콘크리트 자체의 재료적인 특성의 강화 또는 철저한 시공 관리에 의한 수밀성의 확보는 구조물 방수(수밀성 확보)을 위한 필수 조건일 뿐, 근본적인 방식대책으로는 미흡하다. 상수도 구조물의 종합적 안전성 확보와 깨끗한 음용수 생산 및 공급을 위해서 안전성을 저해하는 요인을 사전에 배제하고 콘크리트 구조물의 내구 년한을 증가시키기 위해서는 적절한 형태의 방수 방식 동시성능을 갖도록하는 설계와 공사가 필요하다.

3. 염소이온 투과 속도에 대한 실험적 평가

3.1 시험목적

방수/보호재가 도포된 철근 콘크리트 구조물이 콘크리트 및 철근의 부식원인이 되는 염소이온의 침투를 어느 정도 차단할 수 있는지를 평가한다.

3.2 시험방법

콘크리트의 부식에 영향을 미치는 염소이온이 콘크리트 침투하는 깊이 및 침투량과 관련하여, 수밀콘크리트라 할 수 있는 콘크리트 밀판(설계기준강도 30MPa, 40MPa)을 대상으로 침투방지재를 도포한 것과 도포하지 않은 것을 비교하여 염소이온 침투저항 성능을 파악하고자 한다. 시험체를 통과하는 전압(mV)이 클수록 전하량(Q)이 증가하므로 콘크리트 및 철근 부식의 염려가 크다. 시험체에서 전하량이 크게 나타날수록, 철근 및 콘크리트 부식이 빠르게 진행된다고 평가할 수 있다.

3.2.1 전기전도도에 의한 염소이온 침투 저항성 시험

시험방법은 먼저 지름 10mm, 두께 50mm의 콘크리트 바탕체에 방수/보호재를 도포하고 소정의 기간 동안 양생시킨 후 실험을 실시하는 동안 전해질 용액이 새지 않도록 예폭시를 옆면에 도포 한다. 시험편을 시험셀에 장착한 후 전원은 60V의 직류를 ±0.1V 정도로 안정적으로 공급하며, 전류의 측정은 기지(既知)의 저항체를 회로에 연결하여 전압을 측정함으로써 얻을 수 있다. 확산셀에 들어가는 전해질 용액은 Applied Voltage Cell의 (-) 전극에 3.0%의 NaCl 용액을 채우고 (+) 전극에는 0.3N의 NaOH 용액을 채운다.

시험 중 30분마다 저항에 걸리는 전압을 6시간까지 측정하여 기록을 하는데, 이때 전압은 0.1mV까지 측정이 가능해야 하고 측정된 전압값은 다음 식에 의하여 전류값으로 환산한다(KS F 2711 준용).

측정은 30분 간격으로 6시간 동안 저항 양단에 걸리는 전압을 측정하고 이를 전류로 환산한 후 다음 식을 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 다음 식 1을 이용하여 산정한다.

$$I = V/R = V/1.0 \tag{1}$$

여기서 I = 전류 (Amperes, A)
 V = 전압 (Volts, V)
 R = 저항 (Ohms, Ω)

3.2.2 침지 후 염화물이온 침투깊이 측정 시험

염화이온 침투저항 시험은 준비된 시험체를 KS M 8115에서 규정하는 염화나트륨 2.5% 수용액에 7일간 침적한다. 이때 수용액의 온도는 20±2℃로 한다. 그 후, 시험체를 꺼내어 24시간 상온에서 건조하여 실험체를 2분할하고, 2분할한 시험체의 단면에 KS M 8009에서 규정하는 질산은 0.1N 수용액을 분무하고, 연속하여 KS M 8430에서 규정하는 우라닌 1% 수용액을 분무하여 발색부분의 깊이를 측정하여 염화 이온 침투깊이를 확인한다.

3.3 시험결과

3.3.1 염소이온 침투 저항성 시험 결과

일반강도와 고강도 콘크리트에 대한 염소이온 투과시험결과는 다음 Table 3과 Fig. 9와 같다.

방수/보호재를 도포한 시험체를 대상으로 KS F 2711에 따라 시험체 한쪽에 염화나트륨(NaCl)수용액을, 다른 한쪽에 수산화나트륨수용액(NaOH)넣고, 전류를 흐르게 한 후 시험체를 통과한 염소

Table 3. Chloride ion penetration resistance testing result (conductivity method)

Item	Charge Pass Amount (C)		
	30 MPa	40 MPa	
PLAIN	10,264	8,575	
Concrete Surface Coating Liquid Form Absorption Preventing Material	A	4,450	6,684
	B	4,875	5,162
	C	1,151	2,153
	D	7,037	5,714
Silicate-based powdered waterproofing coating (E)	10,178	5,217	
Concrete Waterproofing (F)	6,031	5,623	

※ Standard(KS F 2711): 4000 Above-High, 2000~4000-Normal, 1000~2000-Low, 100~1000-Very Low, 100 Below- Can disregard

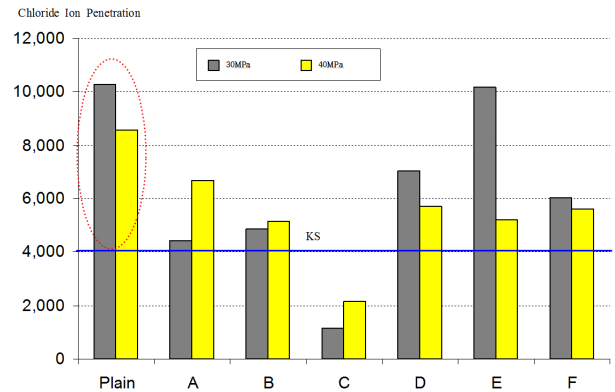


Fig. 9. Chloride ion penetration resistance testing result (conductivity method)

이온이 흐르는 전하량을 측정된 결과 규산질계 분말형 도포방수재의 전하량은 콘크리트 밀판의 통과 전하량과 거의 차이가 나지 않았으나 구체방수재는 30MPa에서는 34%, 40MPa에서는 41%, 흡수방지재를 도포한 시험체의 경우 30MPa에서는 무도포 콘크리트 밀판보다 31~89%, 40MPa에서는 22~75% 까지 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다.

3.3.2 침지 후 염화물이온 침투깊이 측정 시험 결과

콘크리트에 대한 침지 후 염화물 침투깊이 측정 시험 결과는 다음 Table 4와 같다.

방수/보호재를 도포한 시험체를 대상으로 질산은 0.1N 수용액을 분무하여 발색부분의 깊이를 측정된 결과 규산질계 분말형 도포방수재의 경우 염소이온 침투깊이가 30MPa 32.6mm, 40MPa 19.2mm로 콘크리트 밀판(Plain)의 침투깊이 30MPa 21.4mm, 40MPa 16.0mm 보다 더 깊이 침투 된 것으로 나타났다. 흡수방지

Table 4. Chloride ion penetration depth measurement

Item		Corrosion Depth (mm)			
		30 MPa		40 MPa	
		Chloride Ion	Anti Absorptive	Chloride Ion	Anti Absorptive
Plain		21.4	-	16.0	-
Concrete Surface Coating Liquid Form Absorption Preventing Material	A	N/A	7.1	N/A	4.4
	B	N/A	7.4	N/A	6.0
	C	N/A	8.4	N/A	5.0
	D	N/A	5.2	N/A	4.4
Silicate-based powdered waterproofing coating (E)		32.6	-	19.2	-
Concrete Waterproofing (F)		15.5	-	9.5	-

※ Standard (KS F 4930): chloride ion: 3.0 mm below(anti absorber depth of seepage: 2.0 mm more than)

재를 도포한 시험체의 경우는 흡수방지재의 침투깊이가 염소이온의 침투깊이보다 높아 측정이 불가 하였다.

3.4 시험결과 고찰

염소이온 침투 저항성(전기전도도법) 시험 결과를 통해서 수밀 콘크리트라 할 수 있는 콘크리트의 통과전하량(c)이 30MPa가 10,264, 40MPa가 8,575로 기준치(KS F 2711)의 두 배 이상으로 높게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 침지 후 염화물이온 침투깊이 측정 시험 결과로 볼 때 흡수방지재의 도포가 콘크리트의 내구성을 향상시키는 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

상기 시험결과로 볼 때 평가대상 방수재료들에 대한 장기적인 성능평가가 이루어지지는 않았다는 조건 하에서 시멘트계 방수시공만으로도 콘크리트 구조물의 단기적 열화방지에 어느정도 효과가 있는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 상수도시설 콘크리트 수조구조물의 방식기술 적용 필요성을 집중적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 콘크리트의 부식기구 및 콘크리트의 취약화 사례 검토를 통하

여 방수/방식 처리를 하지 않은 콘크리트 수조구조물이 장기적인 사용과정에서 내구성 유지에 치명적인 손상을 받을 수 있으며, 특히 상수도 시설에 주로 사용되는 염소 소독재의 화학적 작용에 의해 콘크리트가 취약화됨으로써 침식작용과 골재 노출에 따른 피복두께 부족과 철근부식 등의 심각한 하자문제로 직결될 수 있다는 것이 확인되었다.

2. 수밀콘크리트라 할 수 있는 콘크리트(설계기준강도: 30MPa, 40MPa)에 대한 염소이온 투과저항성 시험결과 콘크리트의 통과전하량(c)이 30MPa가 10,264, 40MPa가 8,575로 KS 기준치(4000C 이상: 높음)의 두배 이상 높게 나타나고 있으며, 이는 수밀콘크리트라 할지라도 염소이온의 침투에는 취약할 수 있음을 나타내는 결과이다.
3. 구체방수재 및 흡수방지재 등의 처리를 통하여 수밀 콘크리트의 염소이온 투과저항성을 22~75%까지 성능이 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 일부 제품을 제외하고는 대부분 KS 기준치를 상회하는 것으로 나타남으로써 콘크리트에 침투하는 염소이온을 완벽히 차단할 수 없음을 알 수 있었다.
4. 상기 3항의 결과는 시멘트계 차단제 및 혼화제가 염소이온 투과에 대한 단기적인 저감 효과가 있으나 장기적인 내구성 유지 관점에서는 큰 영향을 미치지 못함을 의미하므로 염소이온 투과를 완전히 차단할 수 있는 고밀도 코팅막을 형성할 수 있는 방수/방식재(예: 멤브레인계, 페넬계, 라이닝계 등)에 대한 적극적인 검토가 필요하다고 판단된다.
5. 콘크리트 구조물의 열화는 다양한 원인에 의하여 이루어지며, 그들 상호간의 복합 작용에 의하여 이루어지는 경우가 많아 그 원인을 명확히 규명하기가 어려운 것은 사실이다. 그러나 상수도시설의 콘크리트 수조구조물의 경우 여러 가지 열화 요인 중 특히 염해를 매개로하여 구조물의 내구성을 저하되는 경우가 많으므로 내구성능 저하 방지의 목적으로써의 방수/방식시공은 필수적이라 할 수 있다.

따라서 구조물 형식 및 환기조건에 따라 산(酸)에 의한 피해가 우려되는 곳에서는 내산성의 방식공사를 도입함으로써 구조물 내구연한 증대 및 안정성 확보에 만전을 기해야 할 것으로 사료되며, 방수/방식재에는 멤브레인계, 페넬계, 라이닝계 등이 있는데 구조물 방수 및 방식공법의 선정에 있어서 고려되어야 할 사항 중, 특히 중요한 것은 필요 개소의 특성에 맞는 효과적인 공법의 선택과 경제성 평가에 있으며, 이와 같은 목적을 달성하기 위해서는 방식을 필요로 하는 구조물의 제반조건에 대한 정확한 이해와 사용제품의 기술적 특성 및 설계사양에 대한 충분한 검토가 선행되어야 한

다. 이와 같이 방수공사를 시행한 구조물은 불투수성 재료를 코팅 (Coating) 또는 라이닝(Lining)하게 되므로 구조물 방수공사도 자연스럽게 달성될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비지원(14RERP-B082204-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Cho, C.H. (2003). A Study on Waterproofing and Anti-corrosive Performance Evaluation of Polyurea Resin Waterproofing Membrane Coating of Velocity per Second Hardening, Seoul National University of Science and Technology, Civil Engineering Masters Thesis Paper, 2-3 [in Korean].

Hanmaek Urban Development, (2010), Research and Establishment of Waterworks Maintenance Methods for Structural Facilities, Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government [in Korean].

Kawk, K.S. (2011). An Experimental Study of the Performance

Grade Establishment of Bond Strength for the Most Suitable Maintenance of Waterproof and Anti-corrosion in the Concrete Structure for Tap Water, Journal of Architectural Institute of Korea, **27(7)**, 149-159 [in Korean].

Kawk, K.S. (2011). Research on the Standardized Selection Criteria for the Methods of Improving the Durability and the Longevity of the Concrete Structures of the Waterworks, Chungnam University [in Korean].

Korean Concrete Society Editing Firm, Concrete Standard Specification, (2009), Ministry of Land Transport and Maritime Affairs [in Korean].

Lee, M.K. (2006). Research on Strategy for Securing Durable Life of Concrete Structures by Efficient Maintenance, Ministry of Construction and Transportation, Korea Institute of Science & Technology Evaluation Planning, 174-175 [in Korean].

Shin Y.K. (2001). Durability Assessment for Deterioration of Reinforced Concrete Structure Due to Chemical Attack, Hanyang University Civil Engineering Masters Thesis Paper, 8-9 [in Korean].

상수도시설 콘크리트 수조구조물에서의 염화이온 침투저항 특성분석

본 논문에서는 국내·외 관련 문헌 자료 및 규정에 대한 고찰과, 20년 이상 된 수조 구조물 현장의 사례 조사를 통해 수밀 콘크리트와 침투방지재의 염소이온 투과에 대한 실험적 평가 등을 통하여 결론을 도출하고, 방수층 및 부식저항기술을 음용수조 구조물(상수조 등)의 각 시설물별 방수·방식에 대한 성능을 동시에 만족하여야 할 필요성을 정립하는 것이다.

이는 수조 구조물들이 방수 및 침투방지재가 확실히 필요하다는 사실을 확인 할 수 있고, 또한 여러 가지의 콘크리트 침식을 발생시키는 요소와 원인들에서부터 장기적인 내구성을 확보할 수 있다.