

철근의 부식 방지를 위한 다양한 콘크리트 보수재료들의 성능평가

Performance Evaluation of Various Concrete Repair Materials to Corrosion Prevent of Rebar

김태균^{1*} · 박종섭²

Tae-Kyun Kim^{1*} · Jong-Sub Park²

(Received November 7, 2023 / Revised November 10, 2023 / Accepted November 11, 2023)

Structures in our surroundings deteriorate over time due to environmental and chemical factors, resulting in a decrease in their performance. The primary causes of degradation in concrete structures are carbonation, salt damage, and freeze-thaw cycles. Various maintenance methods exist to address these degradation issues. However, research and technological development for existing maintenance methods have been ongoing, but the accuracy and effectiveness of repair materials and techniques have not been extensively validated. Therefore, in this study, we conducted a material performance evaluation of various manufacturers' repair materials. Based on this evaluation, we applied corrosion inhibitors and epoxy, which are the methods most closely related to crack repair, to assess the durability performance against carbonation, salt damage, and freeze-thaw cycles. The results show approximately a two-fold performance improvement against carbonation and salt damage, and a 5% enhancement in repair performance against freeze-thaw cycles. Thus, it is considered effective in preventing rebar corrosion when appropriate maintenance is carried out according to environmental and chemical factors during structural repairs.

키워드 : 콘크리트 보수, 부식, 균열보수, 표면피복, 단면복구

Keywords : Concrete repair, Corrosion, Crack repair, Surface coating, Surface restoration

1. 서론

우리 주변의 사회기반시설물들은 대부분 철근콘크리트(RC : Reinforced Concrete) 및 프리스트레스트 콘크리트(PSC : Prestressed Concrete) 구조물로 이루어져 있다(Yang et al. 2018; Park et al. 2011). 그리고 이를 구성하고 있는 재료 중 강재와 시멘트는 가장 많은 비중을 차지한다(Mehta and Monteiro 2006). 이러한 구조물들은 시간이 지남에 따라 환경적, 화학적 요인에 의해 열화 현상이 발생한다(Sidney et al. 2003). 그리고 균열 발생 시 구조물은 더욱 빠르게 열화 현상을 촉진 시키며 성능저하로 인하여 인명피해 및 재산피해를 초래한다(Kim et al. 2021). 콘크리트의 다양한 열화현상 원인 중 대표적인 것들은 탄산화, 염해,

동결융해 현상을 나타낼 수 있다(Cheng et al. 2016). 탄산화의 경우 콘크리트가 경화하는 과정에서 강알칼리성을 나타내며 철근이 부식되는 것을 방지해준다(Faella et al. 2016). 그러나 시간 경과에 따라 대기 중 이산화탄소와 산성비가 콘크리트 표면으로 침투하면서 콘크리트 내부의 수산화칼슘과 화학반응을 일으켜 탄산칼슘으로 바뀌며 알칼리성이 점차 낮아지게 되며 산성화가 된다(Otieno et al. 2020). 이로 인하여 철근의 부동태피막이 약해지며 부식을 촉진한다(Liu et al. 2020). 염해는 철근콘크리트 내부 염화물 및 외부 침투 염화물에 의해서 일정 농도 이상의 한계가 발생하게 된다면 철근 표면의 부동태피막이 파괴되어 철근이 부식한다(Yu et al. 2017; Xia et al. 2023). 철근 부식은 체적을 팽창시키며 콘크리트 균열을 발생하고 내하성능을 저하시킨다(Sun et al.

* Corresponding author E-mail: ssida24@naver.com

¹한국건설기술연구원 구조연구본부 연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Daehwa-Dong, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 10223, Republic of Korea)

²한국건설기술연구원 구조연구본부 연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Daehwa-Dong, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 10223, Republic of Korea)

2020). 마지막으로 동결융해는 높은 W/C, 흡수율이 좋은 골재, 콘크리트 내부 수분 등에 의해 동결과 융해의 반복적인 영향으로 체적이 팽창하여 균열이 발생한다(Wu et al, 2016; Taheri et al, 2021). 동결융해 현상으로 콘크리트 구조물은 표면에 스케일링, 미세균열, 팝 아웃과 같은 형태로 열화 현상이 발생하기도 한다 (Meng et al, 2020; Lee et al, 2018).

특히, 최근 콘크리트 구조물들 중 교량을 포함한 다수의 노후 구조물 수는 급격히 증가하는 추세이고 보수보강을 통해 열화현상에 대응하여 수명 연장의 필요성이 절실히 대두되고 있으며 향후 막대한 국가예산의 소요가 불가피하다(Korea Authority of Land & Infrastructure Safety 2019). 기존의 보수보강 공법에 대한 연구 및 기술개발은 꾸준히 진행되어 왔으나 보수재료와 기술의 정확성 및 실효성 검증은 크게 이루어지지 않고 있다. 이 연구에서는 많은 보수 및 보강 공법 중에서 콘크리트 균열 및 내구성능과의 가장 밀접한 관련이 있는 보수재료에 대하여 알아보고 적용하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 다양한 종류의 업체별 보수재료를 사용하여 보수 시공 공법에 사용할 수 있는 균열보수, 단면복구, 표면피복 공법에 따라 재료성능을 검토하고 및 내구성능 평가를 수행하였다.

2. 콘크리트 보수방법

콘크리트 보수공법은 국토안전관리원에서 시설물의 보수보강에 따르면 재료의 성질에 따라서 균열보수공법, 단면복구공법, 지수공법, 표면피복공법, 포장보수공법, 신축이음장치보수공법, 교량받침보수공법으로 구분하고 있다(Korea Authority of Land & Infrastructure Safety 2019). 본 연구에서는 가장 많이 사용되는 균열보수(2종류), 단면복구(2종류), 표면피복(1종류) 재료를 선정하여 사용하였다.

2.1 표면피복 공법 및 재료성능평가

구체보호공법에 사용되는 재료는 보수 목적과 구조물의 환경에 따라 다르지만 CO₂, 수분, 염화물 이온 등과 같은 이물질의 침투를 방지 또는 제어하는 성능을 가져야 하고 내후성, 콘크리트와의 부착성, 균열 추종성, 내알칼리성 등 구조물의 내부 또는 외부의 악영향에 저항하는 성능이 필요하며 시공시에는 작업성이 우수해야 한다. 그리고 표면피복공법에 사용 되는 재료는 침투성 흡수 함침제, 침투성 고화제, 무기질 침투성 방수제와 같은 재료들이 사용된다. 본 연구에서는 콘크리트 표면피복 공법에 사용 된 보수재료는 1종류이며 Table 1과 같이 비중시험, 투수시험을 수행한다.

Table 1. Surface coating method and specification

Test specification	Test contents
KS M 3821	Testing methods for specific gravity of epoxide resins and hardeners
KS F 4919	Cement-polymer modified waterproof coatings

2.2 단면복구 공법 재료성능평가

일반적으로 콘크리트 구조물의 보수는 여러 가지 성능저하 요인에 의하여 균열이 발생하거나 박라박락 또는 철근부식 등과 같은 형태로 손상된 콘크리트 구조물의 기능을 회복시키는 것을 목적으로, 사용 초기 시점에 부여된 콘크리트 고유의 기능성을 유지 또는 향상시켜 구조물 사용 기간 중에 문제점이 발생하지 않도록 콘크리트의 성질을 회복시키는 행위를 말한다. 보수공법은 사용재료나 개발 원리에 따라 수십 가지 이상의 공법이 적용되고 있으며, 콘크리트의 구체 손상부위에 대한 처리 방법에서 구체복원의 경우 단면복구(보수)방법이 있다. 본 연구에서 콘크리트 단면복구 공법에 사용 된 보수재료는 2종류이며 Table 2와 같이 휨강도, 압축강도, 부착강도 재료성능 평가를 실시한다.

Table 2. Surface restoration method and specification

Test specification	Test contents	
KS F 4042	Polymer modified cement mortar for maintenance in concrete structure	Flexural strength
		Compressive strength
		Bond strength

2.3 균열보수 공법 재료성능평가

주입공법에 사용되는 주입재료는 주로 수지계와 시멘트계가 많이 사용되고 있다. 이 중에서도 에폭시수지계가 가장 일반적으로 사용되고 있다. 에폭시수지 주입공법은 주입성, 경화속도, 접착성 등의 면에서 우수한 특징을 가지고 있으나 습윤면에서 소요의 접착성을 확보할 수 없고, 탄성계수와 열팽창계수 등이 콘크리트와 달라 여러 가지 문제점이 있다. 한편 시멘트계 주입재는 탄성계수, 열팽창계수 등의 물성이 기존 콘크리트와 유사한 특성을 가지고 있으며, 습윤면에서 부착성이 뛰어나고 국부적인 철근부식 억제의 효과가 있으며 비교적 값이 싼 장점이 있다. 그러나 미세한 균열(0.05 mm 정도)에는 주입이 어렵고 전반적으로 경화시간 및 접착성이 떨어지는 문제점이 있다. 이처럼 수지계 주입재와 시멘트계 주입재의 특성을 살펴본 결과, 각각의 주입재료가 장단점을 지니고 있으므로 철근콘크리트 구조물의 보수재료 선정 시에는 사용

목적을 명확히 설정한 후 재료의 특성을 감안하여 선택하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 균열보수 공법에 사용 된 보수재료는 2종류이며 Table 3과 같이 휨강도, 압축강도, 부착강도 재료성능 평가를 실시한다.

Table 3. Crack repair method and specification

Test specification	Test contents	
KS F 4923	Epoxy adhesives for repairing of concrete structure	Flexural strength
		Compressive strength
		Bond strength
KS M 3015	Testing methods for thermosetting plastics	

2.4 균열보수재료 내구성 성능평가

본 연구에서는 균열과 내구성능의 밀접한 관계를 더욱 깊이 알아보기 위해서 앞선 재료 실험에서 보수재료로 가장 많이 활용되는 함침제(Kwon et al. 2007)와 에폭시(Issa and Debs 2007; Cusson and Mailvaganam 1996)를 선정하여 콘크리트 탄산화, 염해, 동결융해 내구성 실험을 실시하고 비교 분석한다. 함침제(균열 및 표면침투)는 균열 및 표면 전체 보수와 에폭시(균열)균열의 채움과 같이 Fig. 1과 같은 효과를 나타낼 것이다.

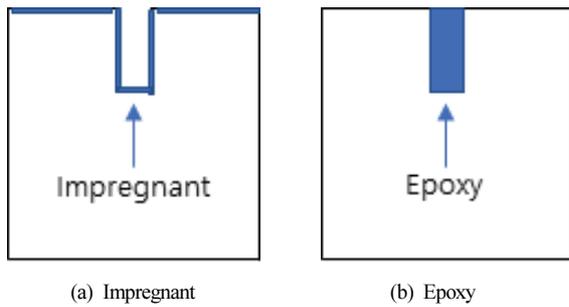


Fig. 1. Concrete repair effect

2.4.1 콘크리트 내구성 시험체

콘크리트 시험체는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 를 사용하며 Fig. 2와 같이 2 mm 두께의 인위적 균열을 최외측에서 중앙까지 50 mm의 노치를 둔다. 그리고 보수재료는 함침제(Repair impregnant : RI), 에폭시(Repari epoxy : RE), 에폭시+함침제(REI)의 변수로 설정하며 컨트롤 시험체로 무보수 시험체(Non-repair : NR)를 준비한다. 또한, 콘크리트 압축강도는 40 MPa을 기준으로 하며 배합은 Table 4와 같다.

Table 4. Concrete mix proportion

f_{ck} (MPa)	W/C (%)	Unit (kg/m ³)			
		Water	Cement	Sand	Gravel
40	36	170	305	906	924

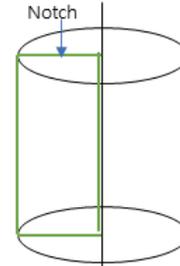


Fig. 2. Concrete notch

2.4.2 촉진탄산화 시험

촉진 탄산화 시험은 KS F 2584(콘크리트 촉진 탄산화 시험 방법)에 따라서 실험하였다. 실험체 탈형 후 일정기간 양생한 시험체를 KS 규격에 준하여 온도 40 °C, 상대습도 60 %, 이산화탄소 농도 5 %의 조건의 탄산화챔버에 넣어 재령 1, 4주 후 할렬하여 페놀프탈레인 1% 분무기를 사용하여, 색 변화에 따라 탄산화 침투 깊이를 측정한다. 또한 측정된 침투깊이와 탄산화 깊이 예측식 식 (1)을 이용하여 재령별 탄산화 속도계수를 산출하였다.

$$C_t = A \times \sqrt{t} \tag{1}$$

여기서, C_t 는 탄산화 깊이(mm), A 는 탄산화 속도계수(m/y), t 는 시간(week) 을 나타낸다.

2.4.3 염화물 침투 시험

염화물이온 침투저항성 시험은 NT BUILD 492(Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments)에 따라서 실시하였다. 채취한 코어시험체를 표면에서부터 약 50 mm씩 깊이별 3개의 시험체를 절단한 후, 진공포화 후 시험용 아크릴셀 과 전압발생기를 이용하여 가압 전압은 30 V, 통전시간은 12시간 으로 설정하여 촉진시험을 실시하였다. 촉진시험 종료 후 할렬하여 0.1 N 질산은 용액을 분무 후 염화물 이온이 침투한 깊이를 측정하였다. 또한, 침투 깊이, 온도, 시간, 전압값 등의 측정치를 이용하여 식 (2)~(3)와 같은 식으로 염화물 이온 확산계수를 산출

하였다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (2)$$

$$E = \frac{U-2}{L}, \quad \alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right) \quad (3)$$

여기서, D_{nssm} 는 불안전상태의 염화물 확산계수, z 는 이온의 원자가(염소이온의 경우 = 1), F 는 패러데이 상수, U 는 적용한 볼트의 절대 값, R 은 기체상수, T 는 처음과 끝의 양극 용액의 평균 온도, L 은 시편의 두께, x_d 는 염소이온의 침투깊이, t 는 실험 지속시간, erf^{-1} 는 error function, c_d 는 질산은에 의해 변색된 부분의 염소이온 농도, c_0 는 음극쪽 셀의 염소이온 농도로 나타낼 수 있다.

2.4.4 동결융해 시험

동결융해 저항성 시험은 KS F 2456(급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)을 준용하여 공기 중에서 동결하고 수중에서 융해하는 시험방법으로 4시간동안 온도범위 $-18^{\circ}\text{C} \sim +4^{\circ}\text{C}$ 로 동결융해 하는 것을 1 사이클로 하여 0, 100, 200, 300 사이클 동안 시험하고, 공명 진동에 의한 콘크리트의 동 탄성계수 및 동 푸아송비의 시험방법에 따라서 상대동탄성계수 및 내구성지수 측정 계산하였다. 추가적으로 300 사이클 이후 압축강도 시험을 실시하여 강도 감소율도 확인하였다. 동탄성계수는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$p_c = \left(\frac{n_c^2}{n_o^2}\right) \times 100 \quad (4)$$

3. 보수재료 성능 및 내구성 실험결과

3.1 표면피복 재료 성능평가

3.1.1 비중시험

콘크리트 표면피복 공법에 사용 된 보수재료는 Z사의 침투성 함침제를 사용하였다. 비중시험은 침투성 함침제를 비중컵에 넣고 비중을 측정하였으며 비중컵으로 25 °C에서의 시료 무게와 동일한 부피의 25 °C에서의 증류수의 무게를 측정하여 그 무게 비로부터 시료의 비중을 구하고 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{G_s - G}{100} \quad (g) \quad (5)$$

여기서, S 는 시료의 비중, G_s 는 시료를 넣은 비중컵의 무게(g), G 는 빈 비중컵의 무게(g)를 나타내며 실험결과는 Table 5와 같이 결과를 나타낸다. 침투성 함침제의 비중은 0.826으로 나타났다.

Table 5. Test results of impregnation specific gravity

Category	Impregnation		
	1	2	3
Specific gravity cup weight (g)	183.3		
Specific gravity cup + distilled water weight (g)	283.1		
Specific gravity cup + Impregnation weight (g)	265.61	265.74	265.83
Impregnation specific gravity	0.825	0.826	0.827
Impregnation specific gravity avg.	0.826		

3.1.2 투수시험

내투수성 시험은 $\varnothing 100 \times 200$ mm 의 원형 공시체를 높이 50 mm 로 절단하여 완전히 건조시킨 후 양방향으로만 수분을 침투시키기 위하여 측면을 에폭시 수지로 도막처리하여 밀봉하였다. 이후 투수시험 전에 무게를 측정하고 에어컴프레서에 연결된 투수시험 장치에 0.3 N/mm²의 기압을 3시간동안 가한 후에 시험체를 분리하고 가볍게 닦은 후 투수시험 후의 무게를 측정하여 흡수율을 측정하였다. Table 6은 투수시험결과를 도출한 것이다. 일반강도와 고강도 콘크리트를 구분하였다. 투수량의 경우 20 MPa, 40 MPa 강도는 함침제 유무에 따라 각각 대략 2.5 배, 4.2 배 감소한다.

Table 6. Test results of impregnation water permeability

Category	Impregnation		Non-impregnation	
	20 MPa	40 MPa	20 MPa	40 MPa
Application of impregnation (24hr) (g)	819.31	906.45	818.36	907.35
Weight after hydraulic pressure (g)	824.34	907.54	831.63	911.67
Water permeability (g)	5.0	1.1	13.3	4.3

3.2 단면복구 재료 성능평가

3.2.1 휨강도 및 압축강도 시험

휨강도 시험편은 제조된 시료를 40 mm × 40 mm × 160 mm

몰드에 천천히 부어 온도 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 습도 $65 \pm 10 \%$ 에서 양생을 실시한다. 시료를 몰드 안에 부은 후 24시간 경과 후 탈형하고 재령 28일에 휨강도를 측정한다. 실험결과 A 및 B 업체의 휨강도는 각각 7.6, 7.7 MPa로 상당히 유사한 형태의 결과를 나타낸다. 이것은 표준규격에 제시된 6.0 MPa를 모두 상회하는 결과를 나타낸다. 압축강도 결과는 A 및 B 업체 각각 47.9, 45.4 MPa로 나타나며 표준규격 20 MPa를 모두 상회한다.

3.2.2 부착강도시험

부착강도 시험은 시험용 밀판을 연마한 후 안쪽치수 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 의 금속제 또는 합성 수지제 형틀을 넣고 시료를 형틀과 동일한 높이까지 채워 성형한다. 그 후 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 습도 $65 \pm 10 \%$ 에서 양생하고, 성형 후 24시간 경과한 후에 탈형하여 다시 재령 28일까지 양생시킨 것을 부착강도 시험체로 한다. 시험체의 정해진 양생이 끝난 시험체를 양생실 내에 수평하고 놓고 시료 도포면에 접착제를 바른 후, 상부 인자용 지그(강철제)를 가만히 올려놓고 가볍게 문질러 접착시킨 후, 하부 인자용 지그(강철제) 및 강철제 받침판을 사용해서, 시료면에 대해 수직 방향으로 인장력을 가해 최대 인장하중을 구한다. 그 결과 A 및 B 업체 각각 1.1, 1.4 MPa의 부착강도가 나타나며 품질기준 1.0 MPa를 모두 상회한다.

3.3 균열보수 재료 성능평가

3.3.1 인장강도 시험

Fig. 3과 같이 시험체는 A사 및 B사 제품으로서 각각 에폭시 함침수지의 주제와 경화제를 혼합한 직후 성형하여 각각 5개씩 인장시험을 실시하였으며, 1 mm/min로 하였다.



Fig. 3. Tensile strength test and specimen shape

실험결과 A 및 B 업체의 인장강도는 각각 13, 36 MPa로 나타난다. 규격에 따르면 15 MPa를 상회하도록 나타나지만 A 업체의 경우 미비하게 낮은 결과 값을 나타낸다. 이것은 에폭시 혼합 시 기포로 인하여 인장시험편 강도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.3.2 압축강도 시험

Fig. 4와 같이 시험체는 A사 및 B사 제품으로서 각각 에폭시 함침수지의 주제와 경화제를 혼합한 직후 성형하여 각각 5개씩 압축시험을 실시하였으며, 1 mm/min로 하였다. 실험결과 A 및 B 업체 압축강도는 각각 24, 54 MPa로 나타난다. 이것은 기준 50 MPa에 A 업체는 미치지 못하지만 인장강도와 마찬가지로 내부 기포로 인하여 제대로 된 성능을 발휘하지 못한 것으로 판단된다.



Fig. 4. Compressive strength test and specimen shape

3.3.3 휨강도 시험

휨강도 시험은 Fig. 5과 같이 진행하며 제하속도 및 시험체 개수는 압착 및 인장강도와 동일하게 진행한다. 그리고 실험결과 A 및 B 업체의 휨강도는 각각 28, 66 MPa로써 인장강도 및 압착강도 시험결과와 같이 A 업체의 성능이 많이 떨어지나 휨강도 역시 기포의 영향이 큰 것으로 판단된다.



Fig. 5. Flexural strength test and specimen shape

3.3.4 접착강도 시험

시험체는 Fig. 6과 같으며 각각 3개씩 제조한다. 그리고 접착강도 하중 역시 1 mm/min로 설정하였다. 실험결과 A사 및 B사 제품은 각각 9.6, 10.2 MPa로 유사하게 나타났다. 이러한 원인은 콘크리트와 배합과 마찬가지로 동일 배합일지라도 타설일자가 다른 경우 오차가 발생할 수 있듯이 인장강도, 휨강도, 압착강도와 다른 날자에 시험체를 제작함으로써 외부적 요인이 달랐을 것으로 판단된다.

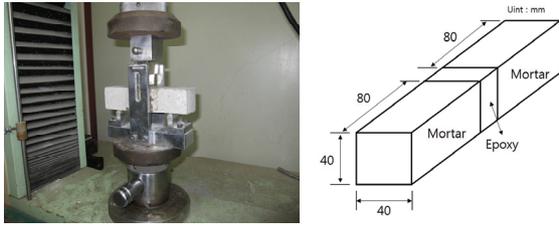


Fig. 6. Bond strength test and specimen shape

3.4 내구성 실험 결과

3.4.1 콘크리트 압축강도

Fig. 7은 콘크리트 압축강도 결과를 나타낸 것이다. 콘크리트 배합 검증 차원에서 노치가 없는 시험체 압축강도 결과 40.1 MPa 이 나오는 것을 확인할 수 있었다. NR, RE, RI, REI 시험체는 각각 33.6, 35.5, 33.9, 35 MPa로 나타난다. 보수재료 중 함침제의 경우 강도에는 크게 영향을 미치지 않으나 에폭시가 보수재료 사용 시 보수를 하지 않는 시험체 보다 미세하게 2 MPa 정도의 강도 증진 효과를 나타낸다.

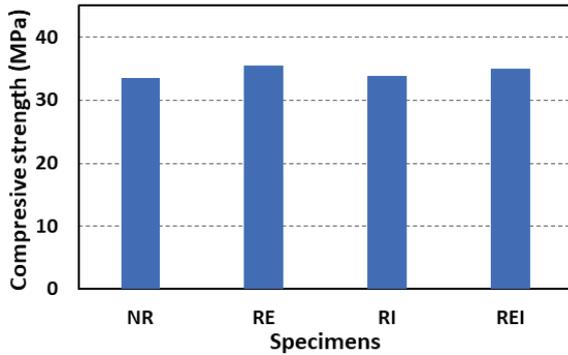


Fig. 7. Compressive strength test results

3.4.2 콘크리트 촉진탄산화

Fig. 8 ~ 9는 콘크리트 탄산화 깊이와 속도계수를 나타낸 것이다. 콘크리트 탄산화 측정은 양생 후 1주, 4주차에 각각 측정하였다.

1주차 탄산화 깊이 NR, RI, RE, REI 는 각각 3.6, 4.4, 2.1, 1.6 mm 로 나타나고 4주차 탄산화 깊이 NR, RI, RE, REI 는 각각 4.9, 6.1, 7.6, 5.8 mm 로 나타났다. 1주차의 경우 함침제 효과로 인하여 RI, REI 시험체는 NR 시험체 보다 대략 1.5배 정도 적게 침투하는 효과를 나타낸다. 그러나 4주차 에서는 모든 보수 조건이 크게 효과가 없는 것으로 나타난다. 이것은 함침제의 효과가 시간이 지남에 따라 미비해지는 것으로 판단된다.

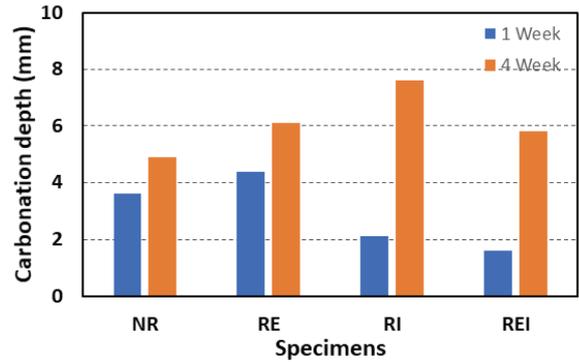


Fig. 8. Carbonation depth test results

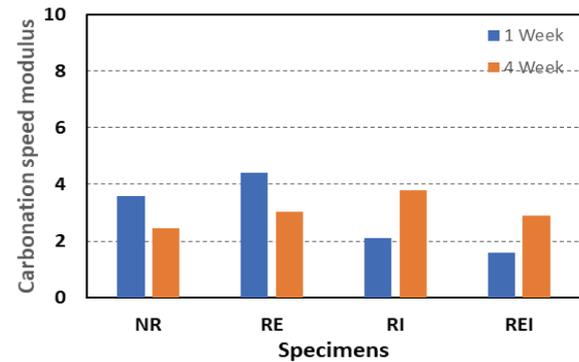


Fig. 9. Carbonation speed modulus results

3.4.3 콘크리트 염화물 침투

Fig. 10은 콘크리트 염화물 침투 깊이를 나타낸 것이다. NR, RE, RI, REI 시험체는 각각 15.52, 16.64, 6.45, 8.07 mm 로 나타났다. 염해 침투 역시 탄산화와 동일하게 보수재료 중 함침제가 포함된 변수가 염해 침투가 적게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 에폭시와 함침제 보수재료 비교 시 대략 2 ~ 2.5배 까지 침투 깊이가 차이나는 것을 확인할 수 있다.

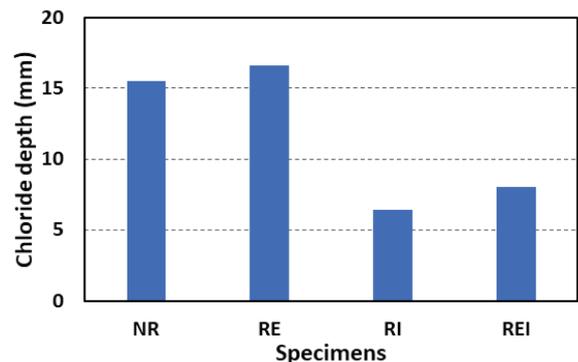


Fig. 10. Chloride depth test results

3.4.4 콘크리트 동결융해

Fig. 11 ~ 12는 콘크리트 동결융해 상대동탄성계수와 동결융해 완료 후 콘크리트 압축강도를 나타낸 것이다. 동결융해 300 사이클 완료 후 상대동탄성계수는 NR, RI, RE, REI 는 각각 84.9, 88.2, 93, 92.2 % 로 에폭시 보수재료가 함침제 보수 효과 보다 대략 5 % 정도 높게 나타난다. 또한, 동결융해 후 압축강도 결과 에폭시 보수 시험체가 무보수 및 함침제 보수 시험체 보다 대략 10 % 정도 강도가 높게 나타난다.

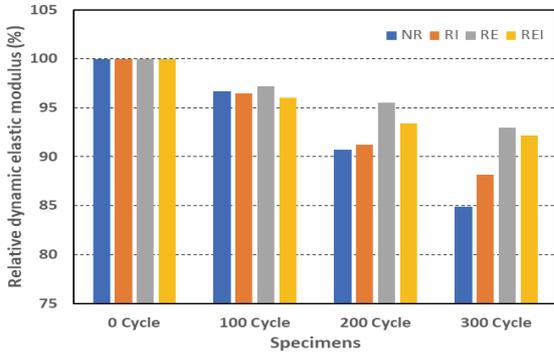


Fig. 11. Freeze-thaw relative dynamic elastic modulus

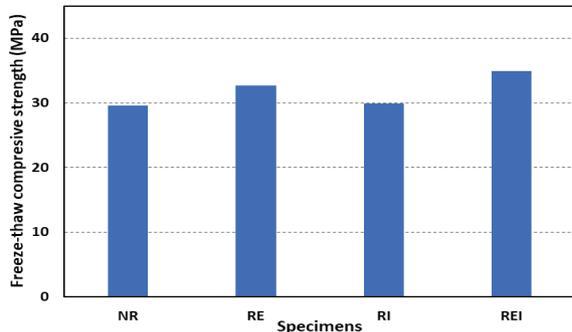


Fig. 12. Freeze-thaw compressive strength test results

4. 결론

본 연구에서는 다양한 보수공법에 활용 가능한 보수재료들의 재료성능 평가를 실시 후 균열과 보수재료의 밀접한 관계를 알아보기 위해 대표적 보수 재료인 함침제와 에폭시를 활용하여 탄산화, 염해, 동결융해의 내구성능 평가를 수행하고 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 콘크리트 보수 재료들의 재료 성능평가 시 제조사들의 규격 및 KS 규정에 따라 대부분의 성능을 만족하는 것을 확인할

수 있다. 그러나 동일한 보수재료 혼합과정일지라도 주변 환경에 의해 성능이 달라질 수 있다.

2. 탄산화 및 염화물 침투의 경우 에폭시보다 함침제가 1.5 ~ 2.5 배까지 저항성능이 높게 나타나는 것은 이산화탄소와 염해가 화학적 작용에 의해 침투하는 것을 효과적으로 막아주는 효과가 있으며 에폭시의 경우 콘크리트 표면과 에폭시 계면사이로 침투하는 현상을 나타낸다.
3. 동결융해 내구성능은 에폭시가 함침제 시험체 보다 5 % 정도 효과적인 보수 성능을 나타내는 것은 동결융해의 경우 화학작용보다 순수 물의 침투로 인하여 발생하는 것으로서 함침제는 물에 대한 저항성능이 없으며 에폭시의 부착력이 물의 침투를 막아주는 역할을 한다.
4. 함침제 및 에폭시는 환경적, 화학적 요소에 따라 사용하는 것이 효과적이며 함침제의 경우 시간이 지남에 따라 효과가 미비하게 나타나며 성능이 저하됨으로써 일정 간격으로 시공을 하게 된다면 이산화탄소와 염해로부터 철근의 부식 방지 효과를 더욱 극대화 시킬 것으로 판단된다.
5. 추후 보수재료 연구에서는 더 많은 종류의 보수재료와 보수 공법에 따라 균열 폭 및 형상을 다양하게 설정하여 연구를 수행할 것이다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230108-001, 친환경 Carbon Eating Concrete(CEC) 제조 및 활용 기술 개발).

References

Cheng, Y., Zhang, Y., Jiao, Y., Yang, J. (2016). Quantitative analysis of concrete property under effects of crack, freeze-thaw and carbonation, *Construction and Building Materials*, **129**, 106-115.
 Cusson, D., Mailvaganam, N. (1996). Durability of repair materials, *Concrete International-Design and Construction*, **18(3)**, 34-38.
 Faella, C., Lima, C., Martinelli, E., Pepe, M., Realonzo, R. (2016).

- Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: an experimental study, *Cement and Concrete Composites*, **71**, 85–96.
- Issa, C.A., Debs, P. (2007). Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete, *Construction and Building Materials*, **21(1)**, 157–163.
- Kim, T.K., Park, J.S., Kim, S.H., Jung, W.T. (2021). Structural behavior evaluation of reinforced concrete using the fiber-reinforced polymer strengthening method, *Polymers*, **13(5)**, 780.
- Korea Authority of Land & Infrastructure Safety. (2019). Study on the Maintenance and Reinforcement Guidelines(Plan) for Infrastructure(Bridges, Tunnels, etc.), Jinju, Gyeongnam, Korea [In Korean].
- KS F 2456. (2023). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KS F 2584. (2010). Standard Test Method for Accelerated Carbonation of Concrete, Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KS F 4042. (2022). Polymer Modified Cement Mortar for Maintenance in Concrete Structure, Korean Standards Association, Korea.
- KS F 4919. (2018). Cement-Polymer Modified Waterproof Coatings, Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KS F 4923. (2022). Epoxy Adhesives for Repairing of Concrete Structure, Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KS M 3015. (2018). Testing Methods for Thermosetting Plastics, Korean Standards Association, Korea.
- KS M 3821. (2018). Testing Methods for Specific Gravity of Epoxide Resins and Hardeners, Korean Standards Association, Korea.
- Kwon, S. J., Park, S. S., Lee, S. M., Kim, J. H. (2007). A study on durability improvement for concrete structures using surface impregnant, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **11(4)**, 79–88 [in Korean].
- Lee, H.G., Bae, S.H., Lee, H.J., Choi, Y.W., Cho, B.S. (2018). Mechanical properties and resistance to freezing and thawing of concrete using air-cooled ferronickel slag fine aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(4)**, 319–323 [in Korean].
- Liu, P., Yu, Z., Chen, Y. (2020). Carbonation depth model and carbonated acceleration rate of concrete under different environment, *Cement and Concrete Composites*, **114**, 103736.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006). *CONCRETE (Microstructure, Properties, and Materials)*, 3rd ed. McGraw Hill, New York, NY, USA.
- Meng, C., Li, W., Cai, L., Shi, X., Jiang, C. (2020). Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete: Resistance to sulfate attack and freezing-thawing, *Construction and Building Materials*, **262**, 120055.
- NT BUILD 492. (1999). Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Korean Standards Association, Finland.
- Otieno, M., Ikotun, J., Ballim, Y. (2020). Experimental investigations on the effect of concrete quality, exposure conditions and duration of initial moist curing on carbonation rate in concretes exposed to urban, inland environment, *Construction and Building Materials*, **246**, 118443.
- Park, J.C., Lee, S.W., Kim, S.B., Kim, J.H.J. (2011). Performance evaluation of RC slabs strengthened by stiff type polyurea, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, **31(6A)**, 457–464 [in Korean].
- Sidney, M. Francis, Y. David, D. (2003). *CONCRETE*, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Sun, L.F., Jiang, K., Zhu, X., Xu, L. (2020). An alternating experimental study on the combined effect of freeze-thaw and chloride penetration in concrete, *Construction and Building Materials*, **252**, 119025.
- Taheri, B.M., Ramezani-pour, A.M., Sabokpa, S., Gapele, M. (2021). Experimental evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete, *Journal of Building Engineering*, **33**, 101617.
- Wu, H., Liu, Z., Sun, B., Yin, J. (2016). Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC), *Construction and Building Materials*, **117**, 63–71.
- Xia, J., Chen, K., Hu, S., Chen, J., Wu, R., Jin, W. (2023). Experimental and numerical study on the microstructure and chloride ion transport behavior of concrete-to-concrete interface, *Construction and Building Materials*, **367**, 130317.
- Yang, D.H., Kwon, M.J., Eom, G.H., Kim, S.J., Kim, J.H.J. (2018). Experimental evaluation of 2-span arch deck RC composite structure, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **30(4)**, 353–363 [in Korean].
- Yu, H., Da, B., Ma, H., Zhu, H., Yu, Q., Ye, H., Jing, X. (2017). Durability of concrete structures in tropical atoll environment, *Ocean Engineering*, **135**, 1–10.

철근의 부식 방지를 위한 다양한 콘크리트 보수재료들의 성능평가

우리 주변의 구조물들은 시간이 지남에 따라 환경적, 화학적 요인에 의해 열화 현상이 발생하며 구조물의 성능저하 현상이 나타난다. 콘크리트 구조물의 가장 큰 열화 현상 원인으로 탄산화, 염해, 동결융해 현상이 있다. 이러한 열화현상에 대하여 다양한 보수공법이 있다. 그러나 기존의 보수 공법에 대한 연구 및 기술개발은 꾸준히 진행되어 왔으나 보수재료와 기술의 정확성 및 실효성 검증은 크게 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 다양한 제조사의 보수재료에 관하여 재료 성능 평가를 수행하였고, 이를 바탕으로 균열과 가장 밀접한 공법에 사용되는 함침제와 에폭시를 적용 하여 탄산화, 염해, 동결융해에 대하여 내구성능 평가를 수행한다. 이 결과 탄산화와 염해는 대략 2배의 성능 개선과 동결융해의 경우 5 %의 보수 성능 향상을 나타낸다. 이처럼 추후 구조물 보수 시 환경적, 화학적 요인에 따라 적절한 보수를 실시한다면 철근 부식을 방지하는데 효과적일 것으로 판단된다.