

항만 상치 콘크리트 품질 관리를 위한 비파괴 스캐닝 기법 비교 연구 Comparative Study on NDT Techniques for Evaluation of Concrete Quality Exposed to Marine Environment

송호민* · 민지영**
Homin Song* and Jiyoung Min**

요지 : 부두 안벽의 주요 재료인 콘크리트는 염해 환경에 직접적으로 노출되어 있으며, 특히 상치 콘크리트는 선박 계선 및 상·하역 작업이 반복적으로 이루어지는 특성 상 품질 저하 속도가 상대적으로 빠르다. 콘크리트 품질은 「시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에 의해 점 단위 샘플링을 통해 평가되며, 샘플링 위치에서의 결과값이 점검단위를 대표한다. 본 논문에서는 대면적에 해당하는 상치 콘크리트를 대상으로 다양한 비파괴 스캐닝 기법을 적용하여 면적 단위 품질 관리 방안을 검토하였다. 그 결과, 계선 작업 구간에서 열화가 집중적으로 발생함을 초음파 어레이 이미징 및 GPR 스캐닝 결과로부터 확인할 수 있었으며, 기존의 샘플링 기반 초음파 속도(UPV), 반발경도 값을 통해서도 품질 저하와 관련한 정확한 판단이 어려웠다.

핵심용어 : 해양환경, 콘크리트, 품질관리, 비파괴검사, 스캐닝 계측

Abstract : Concrete, the primary material used in quay walls, is directly exposed to saline environments. Coping concrete, particularly in areas where periodic berthing and loading/unloading occur, is prone to rapid quality deterioration. Current facility safety and maintenance guidelines assess concrete durability at specific points through sampling, which are intended to represent the entire inspection unit. This paper explores quality management strategies from an areal perspective by applying various non-destructive scanning methods to extensive areas of coping concrete. Ultrasonic array imaging and ground-penetrating radar scanning images revealed significant quality degradation in berthing operation areas, whereas sampling-based ultrasonic pulse velocity and rebound hardness values were less effective in detecting this degradation.

Keywords : marine environment, concrete, quality maintenance, nondestructive testing, scanning measurements

1. 서 론

항만시설물의 주요 건설 재료인 콘크리트는 염해 환경에 직접적으로 노출되어 내륙 구조물 대비 열화 진전 속도가 빠르다(Han et al., 2011). 선박의 계선 및 상·하역 작업이 반복적으로 수행되는 부두 안벽 상치 콘크리트는 상부 및 전면부에 작용하는 하중에 의해 다수의 균열이 발생한다. 체체 하중으로 지지되는 안벽 구조물 특성상, 상치 콘크리트에 발생하는 균열은 중대한 결함에 포함되지 않으나, 해상 물류 서비스를 제공하는 시설물의 기능적인 측면에서는 주기적인 관리가 필요한 항목이다. 콘크리트 표면에 발생한 균열을 따라 내부로 염수가 침투할 경우, 동결융해와 철근 부식 등으로 팽창압이 발생하여 외부에서 육안으로 검출하기 어려운 내부 손상을 초

래하며 콘크리트의 품질을 저하시킨다(Mehta et al., 2006; Johnson, 2015; Park and Lee, 2022). 이는 결과적으로 부두 사용성과 항만 운영에 영향을 미친다.

현재 「시설물의 안전 및 유지관리 세부지침(성능평가 편)」에서는 콘크리트 상태 안전성능을 균열, 파손, 박리 등에 대한 외관조사와 내구성능을 반발경도, 침투염분량, 탄산화깊이 측정을 통해 평가한다. 내구성능은 지침에 의해 일정 수량 샘플링하여 점(point) 단위로 평가하므로, 조사 위치에서의 결과값이 전체 점검단위를 대표한다. 즉, 상태 안전성능은 육안으로 확인되는 손상을 중심으로 점검하고 내구성능과 연계하여 평가하지 않으므로, 점검 대상 부재의 내·외부 손상에 의한 내구성능 저하, 혹은 내구성능 저하에 의한 내·외부 손상 발생 등과 같은 종합적인 검토가 어렵다.

*가천대학교 토목환경공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University)

**한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원Corresponding author: Jiyoung Min, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0629, Fax: +82-31-910-0255, amote83@kict.re.kr)

일반적으로 콘크리트는 시멘트 페이스트, 골재, 공기 등으로 이루어진 비균질(heterogeneous) 재료이며, 철근 콘크리트 부재의 경우 내부에 철근을 포함하고 있어 내부 손상 탐상에 어려움이 있다(Saint-Pierre et al., 2016). 반발경도법 및 초음파 속도법(Ultrasonic Pulse Velocity, UPV)을 활용한 강도 추정법, 초음파 속도법을 활용한 균열 깊이 추정법 등은 앞선 세부지침에 제시된 재래식 기법에 해당하며, 최근에는 ICT 기술이 발전함에 따라 콘크리트, 강재 등 매질의 비파괴검사(nondestructive testing, NDT)를 위한 다양한 장비 및 기법들이 제안되고 있다. 항만 콘크리트의 열화 상태를 보다 정확하고 종합적으로 평가하기 위해서는 외관조사 및 다양한 비파괴검사 기법을 종합 활용한 내부 탐상이 함께 수행되어야 할 것이다. 한 예로 미국 캘리포니아 주 San Mateo County의 Werder Pier 리모델링을 위해 NDT 기법 등을 종합하여 부재 상태를 정량적으로 점검한 사례가 있었다(CMA, 2004). 노후 항만시설물 리모델링 시 건전도 및 유용 가능 여부를 평가하기 위해서는 비파괴검사, 재료 검사를 비롯한 정량적인 평가가 수행되어야 한다(Yi et al., 2011).

본 논문에서는 안벽 상치 콘크리트를 대상으로 표면 이미징, 지표투과 레이더(ground-penetrating radar, GPR) 및 초음파 어레이 이미징 등 최신 비파괴 스캐닝 기법, 기존 UPV 및 반발경도법을 이용하여 검사를 수행하였다. 이를 통해 상치 콘크리트의 품질을 면적 단위로 검사하여야 하는 필요성 및 각 기법을 통해 평가 가능한 항목을 검토하였다. 특히 빈번한 열화 발생 구간인 계선작 작업 구간에서의 콘크리트 품질 저하, 외부 균열이 발생한 경우 콘크리트 내부 품질 상태

에 대한 결과를 각 기법별로 비교·분석하였다.

2. 실험 개요

2.1 대상 시설물 및 검사 구역

대상 시설물은 인천항에 위치한 케이슨식 안벽으로, 5만 톤급 2개 선석, 3만 톤급 1개 선석으로 구성된 연장 총 850 m인 구조물이며, 케이슨 1함(폭 38.6 m)에 상치 콘크리트 2개가 현장타설되었다. 본 논문에서 검사를 수행한 선석은 매주 6일간 격일로 2종의 선박이 교차로 접안하여 상·하역을 수행하고 있어 타 선석 대비 선박 접안 횟수가 많았으며, 부두 운용 중 외부 충격, 마찰에 의한 케이슨 전면부 파손 및 철근 노출, 방충재 체인 및 레진패드 탈락 등 손상 발생 이력이 있었다.

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 상치 콘크리트 상부에 셋시 등 적재물이 없는 영역에 대하여, 계선주가 위치한 선형 방향을 따라 연장 57.6 m에 대하여 검사를 수행하였다. 해당 연장은 30 cm 간격으로 총 192개 구역으로 분할하였으며, 각 구역에서 계측을 수행하였다. 수행한 검사기법을 Fig. 2에 나타내었다. GPR, 초음파 어레이 이미징, UPV, 반발경도법을 사용하였고, 각 기법을 통해 콘크리트 내부 손상, 철근 부식으로 인한 층분리 상태 유무, 피복 콘크리트 재료의 균질성 등을 점검하였다. 한편, 검사 구역을 대상으로 코어링을 수행하여 콘크리트 탄산화 깊이, 깊이별 침투염분량을 측정하여 염해 및 탄산화 수준을 함께 확인하여 「시설물의 안전 및 유지관리 세부지침(성능평가 편)」 대로 내구성능을 평가하였다.

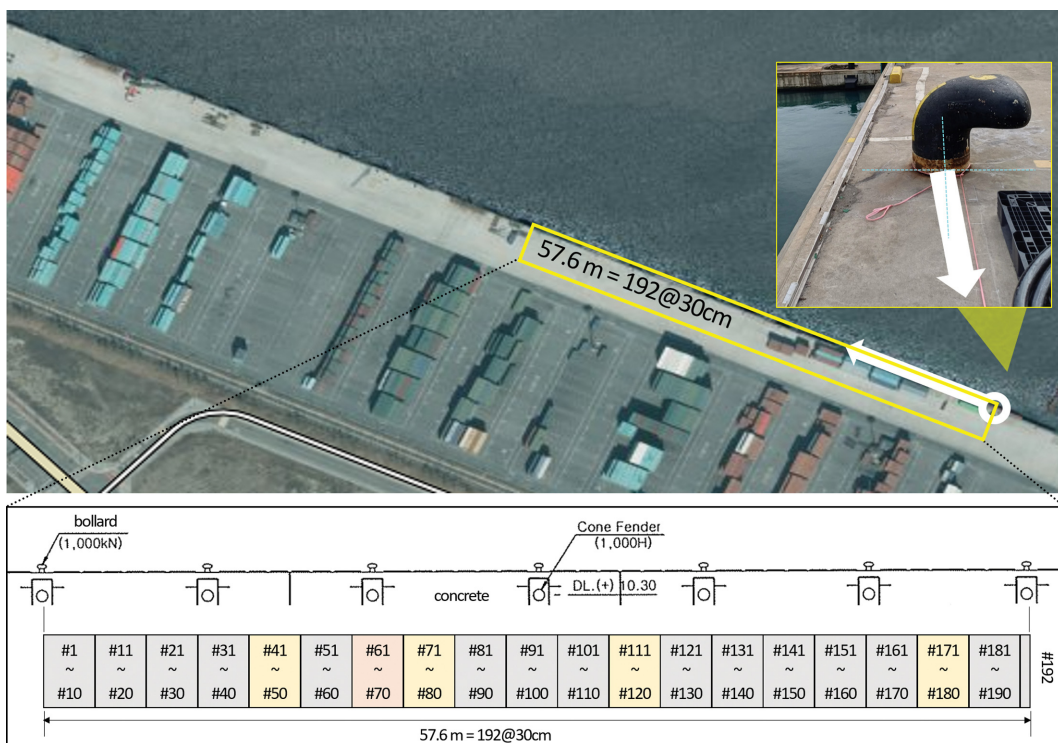


Fig. 1. Target structure and inspection line division.

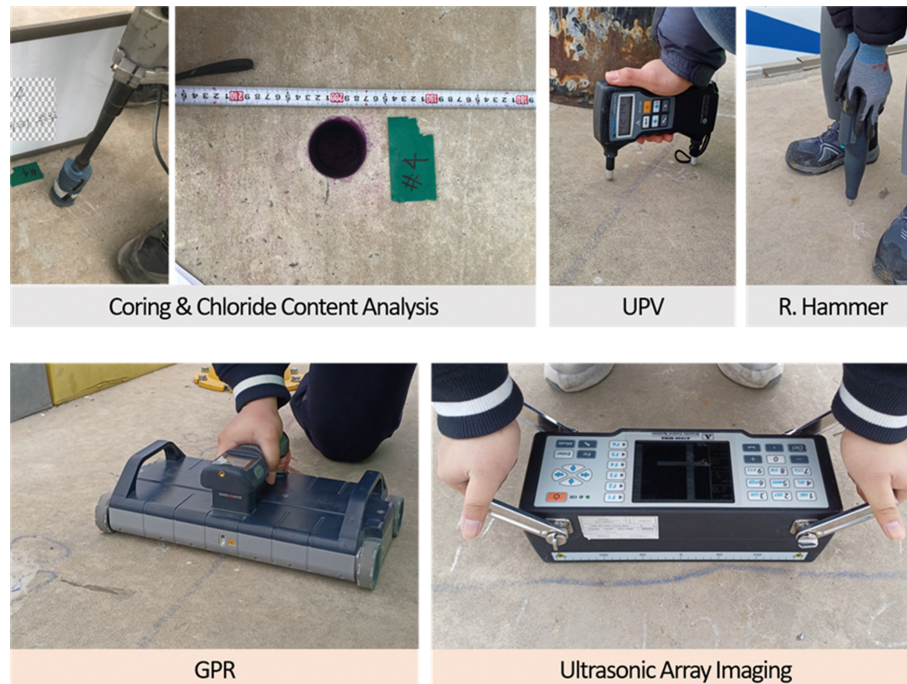


Fig. 2. Various testing methods for concrete quality evaluation.

Table 1. Overview of equipment used in this study to acquiring NDT data

NDT methods	Model	Manufacturer
Ultrasonic array imaging	A1040-MIRA	Acoustic Control Systems
GPR	GP8100	Proceq
UPV	UK1401	Acoustic Control Systems
Rebound hammer	OS8000	Proceq
Photography	Galaxy-A34	Samsung

2.2 다중 비파괴검사법

대상 시설물의 192개 분할 구역에 대하여 표면 영상, 초음파 속도, 반발경도, GPR B-scan 및 migration 영상, 초음파 어레이 이미징을 확보하였다. Table 1은 본 논문의 비파괴검사 데이터 획득에 사용된 장비의 모델명과 제조사를 정리한 것이다.

(1) 초음파 어레이 이미징은 다채널 초음파 배열에서 측정된 초음파 신호를 분석하여 매질 내부 단면을 시각화하는 기술이다(Lee et al., 2022a) 매질에 입사된 초음파는 서로 다른 재료의 경계면에서 반사 및 투과되는데, 다채널 초음파 배열을 활용하여 획득한 신호 세트를 이미징 알고리즘 중 하나인 TFM(total focusing method)을 이용하여 내부 반사체를 시각화할 수 있다. 초음파 어레이 이미징은 특히 내부 반사체의 위치와 크기를 정확하게 파악하는 데 유용하다. 본 연구에서 사용된 다채널 초음파 배열 장비(A1040-MIRA, ACS)의 경우 12개 탐촉자 유닛, 각 유닛은 4개의 초음파 탐촉자로 구성되며, DPC(dry point coupling) 기술이 적용되어 기존 장비 대비 측정 속도를 향상시켰다.

(2) GPR은 고주파 대역(수 MHz~GHz)의 전자기파를 매질 내부로 방사하고, 전자기파가 서로 다른 유전상수를 가진 매

질 경계면에서 반사된 신호를 수신하여 분석하는 비파괴검사 기법이다(Lee et al., 2022b). 콘크리트 내부의 불균질성 물질에 의해 반사된 신호의 진폭과 반사파 도달 시간 등을 분석하여 콘크리트 구조체 내부 상태와 결함을 탐지한다. 여기서, 유전상수는 진공에서의 유전율에 대한 대상 매질에서의 상대적인 유전율의 비를 의미한다. 전자기파 신호를 계측 순서대로 쌓은 B-scan 데이터에 migration 알고리즘 중 하나인 SAFT(synthetic aperture focusing technique)를 적용하여 내부 반사체를 시각화할 수 있다. GPR은 콘크리트 내부의 철근 배치, 공극, 그리고 재료의 비균질성을 탐지하는 데 효과적인 것으로 보고되었다.

(3) 초음파 속도법(UPV)은 콘크리트 내부의 결함 및 재료 특성을 평가하는 비파괴검사 기법으로, 이 방법은 초음파 발신기와 수신기를 일정 간격을 두고 시험체 표면에 밀착한 후 초음파 신호가 콘크리트 내부를 통과하는 속도를 측정한다. 측정된 초음파 전파 속도는 콘크리트의 강성, 밀도, 탄성계수 등의 물리적 특성과 밀접한 관련이 있다(AIJ, 1983; Akashi, 1988; Han and Kim, 1999; Kim et al., 2016). 일반적으로 초음파 전파 속도가 빠를수록 콘크리트의 품질이 우수하고, 속도가 느릴수록 내부에 결함이 있거나 재료가 열화된 것

로 판단한다.

(4) 반발경도 시험법은 콘크리트 표면의 반발도를 측정하여 콘크리트의 압축강도를 추정하는 비파괴검사 기법이다. 이 방법은 슈미트해머(Schmidt hammer)라고도 불리는 반발도 측정 장비를 사용한다. 슈미트해머는 스프링에 의해 해머가 콘크리트 표면에 충격을 가하고, 반발된 해머의 높이를 측정하여 반발도를 결정한다. 반발도 값은 콘크리트의 표면 경도와 밀접한 관련이 있으며, 이를 통해 압축강도를 간접적으로 추정할 수 있다. 반발경도 시험법은 간편하고 신속하게 수행할 수 있어 현장에서 널리 사용되며, 초기 동결융해 손상 탐지 등에도 활용된다(Yi et al., 2011; Park et al., 2022). 그러나 이 방법은 제안식의 종류, 타격자의 숙련도, 타격 에너지의 크기 등 다양한 요인에 의해 추정 결과가 영향을 받을 수 있다.

위에서 소개한 비파괴검사 기법 이외에 측정 구역에 발생한 균열, 파손 등의 기록을 위하여 일반 휴대폰 카메라를 사용하여 구역별 표면 영상을 함께 촬영하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 염화물 침투량 및 탄산화 깊이를 통한 내구성능 등급

대상 콘크리트 구조물 내부로의 염화물 침투량 및 탄산화 깊이를 측정하기 위하여 건식비트를 사용하여 50 × 100 mm 콘크리트 코어를 채취 후 페놀프탈레인 1% 용액을 구멍에 분사하여 변색 깊이를 측정하였다. 깊이별 염화물 침투량 분석을 위해 105 mm까지 깊이 구간별로 나누어 드릴링하여 분말 시료 확보하였다.

Table 2는 깊이별 염화물 침투량 측정 결과이며, 이로부터 계산된 염화물 확산계수는 $1.19 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 철근부 전 염화물 침투량이 2.5 kg/m^3 가 되는 시점이 30년을 초과하여 기존 세부지침 상 ‘평가등급 a’에 해당하였다. 탄산화 깊이는 3.8 mm, 탄산화 속도계수는 1.900, 잔여 깊이 116.2 mm로 마찬가지로 ‘평가등급 a’에 해당하였다. 즉, 염화물 침투량 및 탄산화 깊이로부터 판단된 대상 구조물 콘크리트 내구성능은 a등급으로, 염해 및 탄산화 관점에서 사용연한 중 내구성능은 확보한 것으로 평가되었다.

3.2 초음파 어레이 이미징

Fig. 3은 구역 #71~#80과 구역 #111~#120에서 획득한 초음파 어레이 이미지 데이터의 예시이다. Fig. 3(a)와 (b) 모두 공간상 15 혹은 20 cm 간격으로 배근된 철근이 높은 진폭을 가지며 명확하게 관찰되었다. Fig. 3(a)는 일부 구간에서 피복 및 철근 위치 인근에서 강도가 높은 초음파의 산란이 관

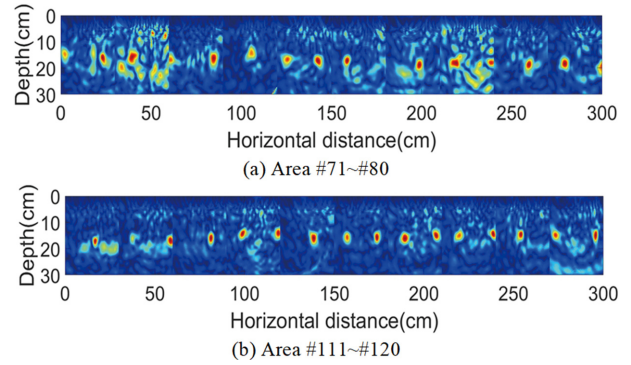


Fig. 3. Examples of ultrasonic array image obtained from the test structure.

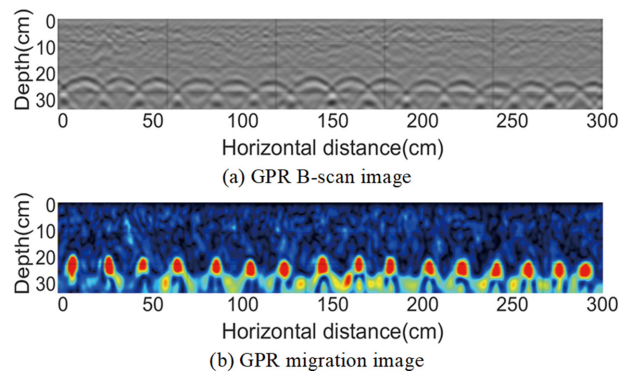


Fig. 4. Examples of GPR (Area #171~#180).

찰되어, 콘크리트의 열화가 의심되었다. 반면, Fig. 3(b)는 철근 외에는 특별한 초음파의 산란이 관찰되지 않아 상대적으로 건전한 상태인 것으로 판단되었다.

3.3 GPR

Fig. 4는 구역 #171~#180에서 측정한 GPR 데이터의 예시이고, Fig. 4(a)는 B-scan 데이터, Fig. 4(b)는 migration 영상을 나타낸다. 철근과 콘크리트간 유전율 등 전자기적 특성 차이로 인한 반사파가 명확하게 관찰되어 철근 위치 및 배근 상태를 확인할 수 있다. 피복 콘크리트에서 미세하게 작은 진폭의 반사파 성분들이 관찰되었으며, 이는 피복 콘크리트의 열화로 인한 공극률 상승이 원인일 수 있다. Migration 영상에서는 포물선 형태 반사파가 반사파 발생 지점에 집중된 형태로 나타나 직관적인 철근 배근 상태 파악이 용이한 반면, B-scan 영상에서는 피복 콘크리트 부분에서의 반사파가 명확하게 드러나 콘크리트 열화 분석에 용이하였다.

3.4 UPV 및 반발경도

Fig. 5(a)는 상치 콘크리트의 45 m 구간에서 획득한 초음

Table 2. Salinity penetration by depth on the target structure

Depth from surface	mm	0~1.5	1.5~15	15~30	30~45	45~60	60~75	75~90	90~105
Penetrated chlorides	kg/m ³	2.733	4.571	1.012	0.351	1.132	0.084	0.261	0.154

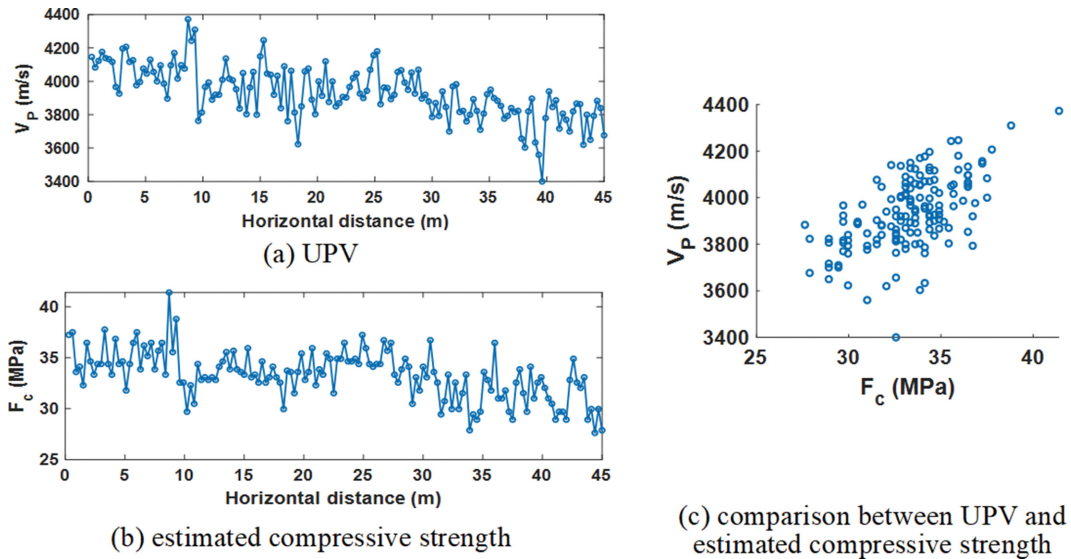


Fig. 5. UPV and estimated compressive strength of the target concrete.

과 속도를, Fig. 5(b)는 동일한 구간에서 슈미트해머를 이용하여 획득한 반발계수를 일본재료학회 강도 추정식(Akashi, 1988)인 Eq. (1)로부터 추정된 압축강도 값을 나타낸다. Eq. (1)에서 R_0 는 반발계수, F_c 는 추정된 압축강도(MPa)이다. 측정된 초음파 속도와 추정 압축강도의 경우 측정 원점에서 멀어질수록 점차 감소하는 경향을 보였으며, 10 m 인근에서 대폭 감소하였다. 전반적으로 두 측정값은 선형에 가까운 상관성을 보여주고 있으나 데이터의 산란으로 인해 구조체의 건전성에 대한 정확한 판단을 내리기에는 어려움이 있었다(Fig. 5(c)). 다만, 초음파 속도의 경우 측정 영역 내에서 3,800 m/s 내외의 값이 확인되었고, 반발계도를 이용한 압축강도의 경우 30 MPa 내외로 확인되어, 이 두 방법에 의해서는 피복 콘크리트의 품질 저하는 없는 것으로 판단된다.

$$F_c = (13R_0 - 184) \times 0.098 \quad (1)$$

3.5 계선 작업에 의한 상치 콘크리트 열화 검토

Fig. 6은 상치 콘크리트 검사 구역 중 계선주를 통과하는 구역(#61~#70)에서 획득한 다중 비파괴검사 결과를 나타낸다. 선박 접안하중으로 인한 계측지점별 차이를 중점적으로 분석하였다. Fig. 6(a)는 표면 촬영 영상으로, 30 cm 간격으로 촬영한 10개의 영상 데이터를 연결한 것이며, 검사 구역 내 표면 손상의 유무를 확인하기 위함이다. 구역 #63과 #64에 계선주가 위치하며, 균열, 파손 등 손상은 빨간색으로 표시하였다.

Fig. 6(b)는 초음파 어레이 이미지로, 인근 콘크리트 대비 계선주 인근 균열부에서 강한 강도의 초음파 산란이 관찰되었다. 계선작업으로 인하여 다른 영역에 비해 높은 하중이 인가되는 점을 고려할 때, 계선주 인근의 피복 콘크리트 공극률, 즉 열화 수준이 상대적으로 높을 것으로 판단된다. 또

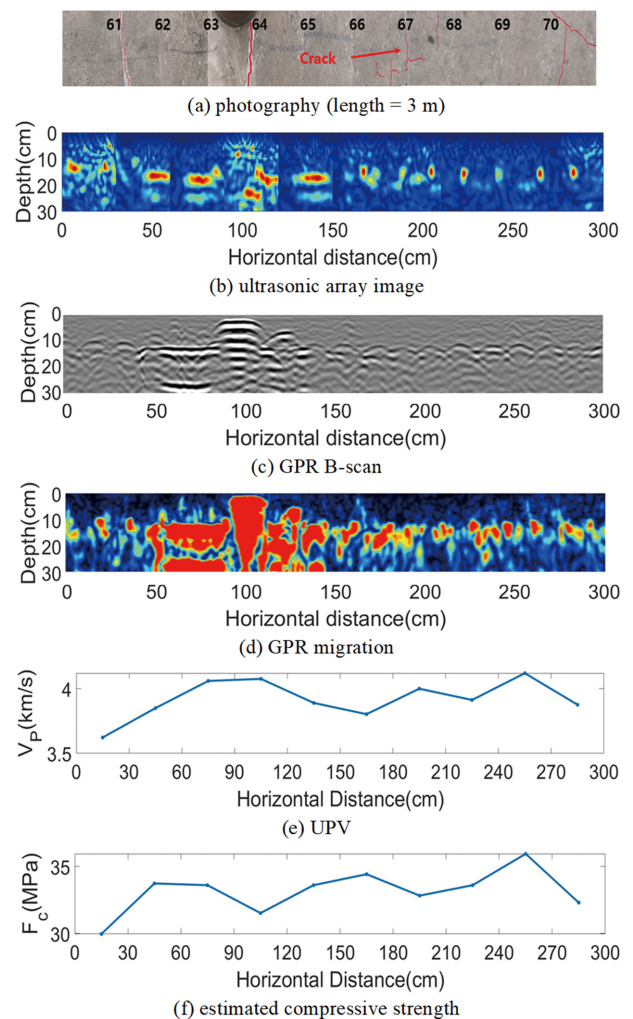


Fig. 6. Comparison of NDT results (Area #61~#70).

한, 균열이 위치한 구역 #61, #67, #70의 경우, 철근 위치에 산란파가 관찰되어 열화가 발생한 것으로 추정된다. 한편, 구

역 #62~#65 영상으로부터 깊이 약 15 cm 부근에 폭 약 100 cm의 층상 반사체가 있음을 확인하였다.

Fig. 6(c)는 GPR의 B-scan 영상, Fig. 6(d)는 GPR의 Migration 영상이다. GPR 데이터로부터 Fig. 6(b)에서 관찰되는 층상형 반사체는 계선주 하부 고정판(폭 100~136.5 cm) 및 앵커볼트(길이 약 130 cm)에 의한 것으로 판단된다. GPR 데이터는 계선주 하부 고정판 및 앵커볼트에 의한 반사파를 명확하게 보여주고 있다. 또한 나머지 영역에 대하여 피복두께 위치에서 반사파가 관찰되므로 열화로 인한 공극률이 높을 것으로 판단된다.

Fig. 6(e)는 같은 구역(#61~#70)에서 획득한 UPV 데이터를 나타낸다. 상대적으로 많은 산란파가 관찰된 균열 발생 구역 #61에서는 3,623 m/s의 낮은 속도를 가졌으며, 그 외 구역에서는 3,800 m/s 이상의 속도값을 보여주었다. UPV는 균열이 발생하지 않은 위치에서 측정하였기 때문에 계선주 위치(#63, #64)에서는 오히려 속도가 크게 나타났다.

Fig. 6(f)는 슈미트해머의 반발경도로부터 추정된 압축강도이다. 전체적인 프로파일은 UPV와 유사하며, UPV와 마찬가지로 구역 #61에서 다소 낮은 값을 가진다. 슈미트해머는 콘크리트 표면에서의 반발도를 측정하는 후 경험식을 통해 압축강도를 간접 추정하는 것이므로, 추정된 압축강도의 절대값보다는 인근 콘크리트와의 상대적인 비교가 의미있다고 판단된다. 균열이 발생한 위치와 상대적으로 낮은 값을 가지는 위치가 서로 일치함을 확인하였다.

Fig. 6으로부터 초음파 어레이 이미징과 GPR 조합을 통하여 계선주 하부 반사체, 주철근 인근 열화, 피복 콘크리트의 열화, 철근 배근 상태 등을 시각적으로 확인할 수 있는 반면, 기존 점검방법인 슈미트해머, UPV는 이와 같은 분석에 어려움이 있었으며 검사 지점에 대한 단일 값만을 제공하여 콘크리트 내부 품질을 분석하는 데에 한계가 있음을 확인하였다.

Fig. 7은 상치 콘크리트 검사 구역 중 계선주가 포함되지 않은 구역(#41~#50)에서 획득한 다중 비파괴검사 결과이다. Fig. 7(a)는 표면 촬영 영상으로, #41, #46, #49, #50 구역에서 균열이 관찰되었다.

Fig. 7(b)는 초음파 어레이 이미징 영상으로, 균열 하부 철근 위치 인근에 수평방향으로 손상으로 의심되는 반사체가 존재하는 것으로 추측된다. Fig. 7(c)와 (d)의 GPR의 B-scan 영상, Migration 영상에서도 철근 인근에서 열화가 진행되었을 가능성이 확인되었다. 또한, 원점 기준 수평거리 150 cm 인근에서는 피복 콘크리트에서 반사파가 관찰되었으며, #41번과 #46번 구역의 균열 하부 철근 위치 인근에서 반사파가 관측되어 균열이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 7(e)와 (f)는 초음파 속도와 슈미트해머의 반발경도로부터 추정된 압축강도이다. 초음파 속도의 경우 전 구역에서 3,800 m/s 이상이었으며, 건전한 콘크리트에서 일반적으로 관찰되는 수치에 해당한다. 압축강도 추정치는 전 구역에서 33 MPa 이상으로 유지되었다.

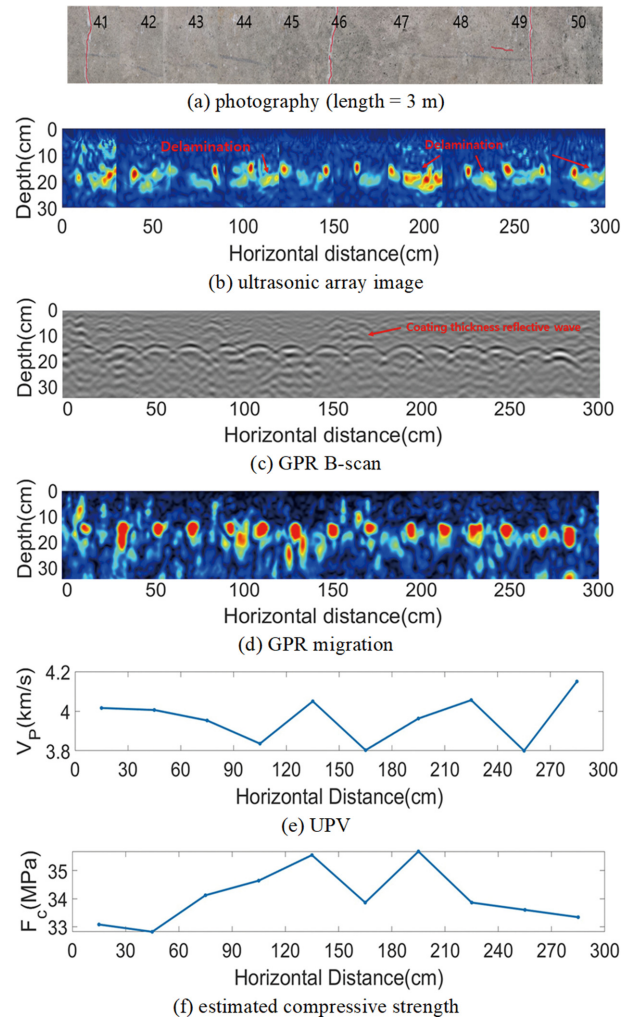


Fig. 7. Comparison of NDT results (Area #41~#50).

3.6 다중 비파괴검사 기법 활용 콘크리트 품질 종합 평가

항만 상치 콘크리트의 품질 관리에 있어서 기존의 UPV 및 슈미트해머를 통한 압축강도 추정치는 표면 인근 콘크리트 품질에 대한 제한적인 정보를 제공하며, 깊이 방향으로의 내부 콘크리트 상태에 대한 구체성 및 대표성을 가지지 못한다. Fig. 6과 7에서 보듯이, GPR은 전자기법 특성상 철근 배근 상태는 명확하게 검출할 수 있으나, 초음파 어레이 이미징에서 검출된 수평 방향으로의 결함 의심 성분 일부는 검출하지 못하였다. 이로부터, 단일 비파괴검사 기법이 아닌 다중 검사 기법을 활용하여 현재 콘크리트 품질에 대한 종합적인 판단을 내려야 함을 알 수 있다. Fig. 7에서 초음파 속도와 압축강도 추정치 모두 150~180 cm 구역에서 인근 대비 작은 값을 가지며, 해당 구역에서 초음파 및 전자기파의 산란이 관찰되었으므로, 피복 콘크리트 내부에 결함이 발생하였다고 평가할 수 있다. 또한 추정 압축강도가 상대적으로 작은 0~50 cm, 200~300 cm 구역에서 철근 인근 초음파 산란이 상당히 발생하였으므로 균열 발생을 의심할 수 있다. 이와 같이 기존의 UPV, 반발경도 등의 측정값에 대한 해석을 위한 보조수단으로써 초음파 어레이 이미징, GPR 등 스캐닝 기반 비

파괴검사 기법을 활용할 수 있다. 단, 단일 기법은 계측 물리량에 따라 검사 범위에 한계가 존재하므로 다중 검사기법을 종합적으로 활용하여 단일 기법이 가지는 한계를 상호 보완함으로써 종합적으로 콘크리트 품질을 평가하고 유지관리를 위한 전략을 수립하여야 한다.

4. 결론 및 제언

상치 콘크리트는 염해 환경에 직접 노출되어 있으며, 특히 선박 계선 및 상·하역 작업이 반복적으로 이루어져 해측 전면부의 경우에는 품질 저하 속도가 상대적으로 빠르다. 콘크리트 품질 평가는 「시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에 따라 외관조사를 통한 균열 등 손상 상태, 탄산화 깊이, 침투염분량 등 내구성을 평가하도록 되어 있다. 그러나 이러한 방식은 다양한 원인에 의한 콘크리트 내·외부 종합적인 품질 저하에 관한 정보를 제공하지 못한다. 내구성 평가는 특히 샘플링을 통해 점 단위로 이루어지며, 조사 위치의 결과값이 전체 점검 단위의 대푯값으로 간주된다.

본 논문에서는 상치 콘크리트의 종합적인 품질 평가를 위해 초음파 어레이 이미징, GPR, UPV, 슈미트해머, 영상 등 다양한 비파괴검사법을 이용하여 인천항 중력식 안벽의 길이 57.6 m 구역에 대해 라인 스캐닝 계측을 수행하였고, 각 기법 간 성능을 비교·검토하였다. 특히, 초음파 어레이 이미징과 GPR의 경우, 상치 콘크리트 구조체 내부 상태의 직관적인 평가를 위해 안벽 표면으로부터 깊이에 따른 영상을 생성하였다.

대상 구조물에서 기존 내구성 평가를 수행한 결과 a등급으로 평가되었으며, UPV와 반발경도법으로는 내부 품질에 관한 명확한 정보를 확인할 수 없었다. 그러나 초음파 어레이 이미징과 GPR을 활용하여 대상 구역에서 비파괴검사 기반 스캐닝을 수행한 결과, 조사 위치에 따른 콘크리트 열화 수준에 차이가 있었으며, 특히 일부 표면균열 하부, 계선주 인근에서는 상대적으로 높은 강도의 초음파 및 전자기파 산란이 관찰되었다. GPR 신호의 경우, 표출 방법에 따라 피복 콘크리트 열화 구분의 정밀도에 차이가 있었고, 초음파 대비 전자기파 신호에서 계선주 하부 고정판 및 앵커볼트에 의한 영향이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과로부터 철근 배근 탐사, 철근 인근 열화, 미지의 내부 반사체 존재 유무 등은 GPR을 통해, 피복 콘크리트의 열화, 공극, 균열 등은 초음파 어레이 이미징을 통해 탐지하는 것이 효과적임을 확인하였다.

단일 기법만으로는 콘크리트 내부 품질에 대한 정확한 판단이 어렵기 때문에, 다양한 비파괴검사 결과로부터 종합적인 상태평가를 수행하고 이를 직관적으로 이해할 수 있게 시각적으로 표현하는 것이 중요하다. 향후 콘크리트 구조체 종류 및 물성, 노출 환경별로 다유형 비파괴시험 데이터를 수집하고 수치해석을 수행하여 데이터베이스를 축적한다면, 기계학습 및 인공지능 모델 등을 활용하여 콘크리트의 품질에

대한 정량적이고 종합적인 평가를 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부 재원 해양수산과학기술진흥원(과제 번호: 20210659)의 지원을 받아 수행되었습니다. 인천항만공사의 실험 협조 및 지원에 진심으로 감사드립니다.

References

- Akashi, T. (1988). Studies on nondestructive testings of concrete. Doboku Gakkai Ronbunshu, 390(8), 1-22 (in Japanese).
- Architectural Institute of Japan (AIJ) (1983). Manual of nondestructive test methods for the evaluation of concrete strength (in Japanese).
- Concept Marine Associates (2004). County of San Mateo Werder Pier Restoration Feasibility Study, March 2004, San Mateo County.
- Han, M.Y. and Kim, D.W. (1999). A study on the pull-out test for non-destructive evaluation of concrete strength. Proceeding of the Korea Concrete Institute, 11(2), 639-642 (in Korean).
- Han, S.H., Yi, J.H. and Park, W.S. (2011). Evaluation of chloride ion penetration characteristics for concrete structures at coastal area. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(1), 11-17 (in Korean).
- Johnson, S. (2015). Degradation mechanisms and inspection techniques for concrete structures in dry storage systems for spent nuclear fuel. EPRI 3002005508, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- Kim, M.W., Oh, H. and Oh, K.C. (2016). Estimating the compressive strength of high-strength concrete using surface rebound value and ultrasonic velocity. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 20(2), 1-9 (in Korean).
- Lee, J.-W. Kee, S.-H. and Lee, K.S. (2022a). Evaluation of debonding defects in railway concrete slabs using shear wave tomography. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 26(3), 11-20 (in Korean).
- Lee, T., Choi, H. and Kang, S.-M. (2022b). Development of a GPR imaging algorithm to detect void-like defects in reinforced concrete elements. Journal of the Korean Society of Nondestructive Testing, 42(4), 302-309 (in Korean).
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. and Ebrary, I. (2006). Concrete: Microstructure, properties, and materials. 3rd ed., McGrawHill, New York.
- Park, J.-S. and Lee, J.-S. (2022). Review of adequacy for on-site application of concrete freeze-thaw damage evaluation method using surface rebound value. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 10(4), 539-546 (in Korean).
- Park, J.-S., Ahn K.-H., You, Y.-J. and Lee, J.-S. (2022). Evaluating the freeze-thaw damage of concrete with respect to water to cement ratio using surface rebound value. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 10(2), 143-151 (in Korean).

Korean).

Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B. and Rivard, P. (2016). Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022-1027.

Yi, J-H., Park, S.H. and Park, W.S. (2011). Evaluation of material properties of concrete harbour facilities using nondestructive testing methods. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(1), 1-10 (in Korean).

Received 5 August, 2024

1st Revised 19 September, 2024

2nd Revised 26 September, 2024

Accepted 30 September, 2024