

반발경도와 초음파속도를 이용한 수중 콘크리트 구조물의 압축강도 예측 기술

Compressive Strength Estimation Technique of Underwater Concrete Structures using Both Rebound Hardness and Ultrasonic Pulse Velocity Values

신은석¹⁾ 이지성²⁾ 박승희^{3)*} 한상훈⁴⁾
Eun-Seok Shin Ji-Sung Lee Seung-Hee Park Sang-Hun Han

Abstract

As the earth's current global warming has caused elevation of sea water temperature, size of storms is foreseen to increase and consequently large damages on port facilities are to be expected. In addition, due to the improved processing efficiency of port cargo volume and increasing necessity for construction of eco-friendly port, demands for various forms of port facilities are anticipated.

In this study, two kinds of nondestructive evaluation (NDE) techniques (rebound hardness and ultrasonic pulse velocity methods) are investigated for the effective maintenance of smart green harbor system. A new methodology to estimate the underwater concrete strengths is proposed and its feasibility is verified throughout a series of experimental works.

Keywords : Underwater concrete structures, Rebound hardness test, Schmidt hammer, Ultrasonic pulse velocity method, Material property evaluation

1. 서론

항만은 우리나라 수출입화물의 90% 이상을 처리하고 있으며, 2002년 기준으로 항만과 관련된 물류비용은 약 20조 원으로 전체물류비용의 27%를 차지하고 있다. 하지만 현재 우리나라는 항만시설의 25% 이상이 1960~1970년대에 개발된 것으로서 항만시설물의 노후화가 빠르게 진행되고 있다. 기존에 압축 성장기에 대규모로 건설된 항만들은 사용연수가 증가함에 따라 구조물의 노후화가 진행되고 있으며 바닷물의 침식 등에 의한 콘크리트의 염해로 인한 부식 등으로 내구성이 저하되고 있다. 따라서 기존 수중 콘크리트 구조물의 강도관리 및 진단기술의 중요성은 날로 증가하고 있다 (Hwang et al., 2007).

하지만 검사 장비 및 측량장비의 첨단화로 인해 진단의 정밀도가 최대한 확보된 육상 진단과 달리 해중 진단의 경우에

는 탁도로 인한 시계 확보의 어려움, 수중 영상 및 정밀 위치 파악의 어려움으로 인해 진단의 효율성이 상당히 낮고 지금까지 대부분의 국내 수중 진단의 경우에는 잠수부를 활용한 채래식 방식으로 이루어지고 있는데, 잠수병 때문에 작업 시간이 극히 제한되어 정밀한 진단이 어렵다. 또한, 해상 조건이 열악할 경우 작업의 효율성이 떨어지는 문제가 발생하고 있다 (Smith, 1986).

더구나 관리·감독자가 작업과정을 직접 확인하지 못하고 작업자인 잠수부에만 의존하며 진행된 진단은 부실진단의 가능성을 내포하고 있다.

따라서 항만시설물 수중부의 상태진단과 유지관리를 위해 안전성과 효율성을 확보한 장비의 개발이 필요하다.

수중부 진단 기계화 장비는 항만 및 연안 구조물에 대한 정밀 상태진단 및 유지관리를 이외에도 연안 환경 및 재해 관련 관측 조사, 해양 구조물 정밀 설계를 위한 해양 조사

1) 정회원, 성균관대학교 u-City 공학과 석사과정
2) 정회원, 성균관대학교 미래도시융합공학과 석사과정
3) 정회원, 성균관대학교 건축토목공학부 조교수, 교신저자
4) 정회원, 한국해양과학기술원 연안개발 에너지연구부 책임연구원

* Corresponding author : shparkpc@skku.edu

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

등 다양한 분야에서 활용 가능한데 본 연구는 수중 항만 콘크리트 구조물의 효율적인 유지관리를 통한 비용절감 및 안정성 증대를 위해 반발경도법과 초음파기법을 통합화한 수중 콘크리트 구조물의 강도예측기법을 개발하고자 하며 본 연구에서 개발된 장비는 추후 수중 진단 기계화 장비중의 하나인 ROV (Remotely Operated Vehicle) 시스템에 탑재되어 실제 수중 콘크리트 구조물의 강도 모니터링에 활용될 것이다.

2. 기존 수중 콘크리트 진단 기술

2.1 수중 콘크리트 진단 기술 동향

콘크리트 항만 시설물은 육상에 노출된 부분뿐만 아니라 수중에 잠긴 부분에 대해서도 검사를 수행하여야 하나, 현재는 대부분 잠수부의 육안검사 또는 사진촬영 및 판독을 통하여 이러한 검사가 이루어지고 있어 정량적인 평가를 위한 기법 또는 시스템의 개발이 필요한 실정이다. 최근에는 ROV를 이용하여 수중 콘크리트 시설물에 대한 평가를 전문가 시스템과 연동하여 수행하는 것에 관한 연구가 진행 중에 있다. 다음의 Fig. 1은 ROV를 활용한 수중 콘크리트 시설물의 진단 시스템의 개념도를 보여주고 있다. 현재 연구에서는 음향, 탄성파, 그리고 Side Scan Sonar, Radar 등을 이용하여 수중 구조물에 대한 비파괴검사를 할 수 있는 방법을 연구 중에 있다 (Hedayati et al., 2009).

본 논문에서는 간단하면서도 신뢰성 있는 현장비파괴 진단법 중의 하나인 반발경도법과 초음파속도법을 활용하고자 하였고 이를 위해 최근 활발히 개발되고 있는 ROV 시스템에 탑재될 수 있는 슈미트해머와 초음파센서의 수중케이스를 개발하였다.

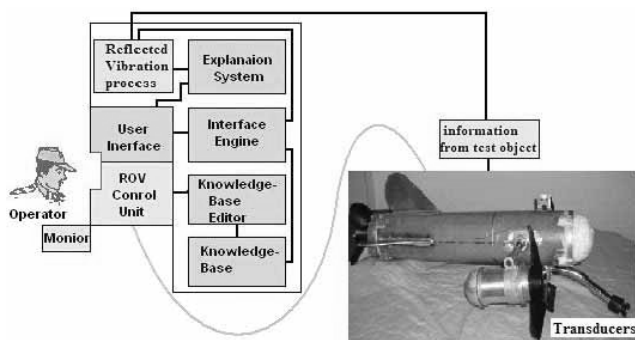


Fig. 1 ROV system concept

2.2 반발경도를 이용한 콘크리트 강도예측기술

반발경도법은 콘크리트 표면경도를 측정하여, 이 측정치로부터 콘크리트의 압축강도를 판정하는 검사방법이다. 반발경도법은 타격법 중의 하나의 방법이며, 콘크리트의 표면을 해머로 타격하여 표면의 손상 정도나 반발 정도를 측정하므로 이 시험법은 코어채취에 의한 강도측정방법에 비해 시험방법이 간편하고 비파괴로 측정할 수 있기 때문에 콘크리트 재령에 따른 강도증진을 확인하고자 하는 경우나 코어채취가 불가능할 경우, 많은 개소에서 강도추정이 필요한 경우 등에 이용되고 있다.

반발경도법에는 낙하식 해머법, 스프링식 해머법, 회전식 해머법, 슈미트해머법 등 여러 종류가 있으나 슈미트해머법이 가장 널리 사용되고 있다. 슈미트 해머법은 콘크리트의 강도에 따라 반발경도가 변화하는 점을 이용한 방법으로 시험방법이 간편하고 국제적으로 표준화된 장점이 있으나 압축강도의 범위가 10~60MPa이고 굵은 골재의 최대직경이 40mm 이하인 콘크리트 구조물을 대상으로 하며 콘크리트 표면부의 품질과 타격조건에 따라 영향을 받으므로 콘크리트 구조체 내부의 강도를 명확히 측정하기는 곤란하다 (Shin, 2006).

반발도 측정결과를 바탕으로 한 콘크리트 강도추정의 방법으로 다음 식 (1)~(4)는 반발경도법을 이용한 강도추정식이다 (Hong and Cho, 2011; Department of Structure Civil Soil, 2001).

$$\text{일본 재료 학회 } F_c = 13R - 184 \quad (1)$$

$$\text{동경도 시험 } F_c = 10R - 110 \quad (2)$$

$$\text{일본 건축학회 } F_c = 7.3R + 110 \quad (3)$$



Fig. 2 Rebound hardness test

U.s Army 시험소 $F_c = 0.0932R^2 + 8.0R - 120.6$ (4)

여기서, F_c : 압축강도 (MPa), R : 반발경도

2.3 초음파속도를 이용한 콘크리트 강도예측기술

초음파 속도법은 매질을 통과하는 음파의 속도와 탄성물 성치 사이의 관계를 이용하여 콘크리트 부재의 압축강도를 평가한다. 실험체 내에서의 초음파 펄스의 도달 시간과 초음파 센서간 거리로부터 초음파의 전달 속도를 결정할 수 있으며, 이 속도를 이용하여 균열, 비정상 단면의 위치 등을 평가할 수 있다. 한편 초음파 속도법의 경우 부재의 양쪽에 센서를 설치하여 직접 부재 내부를 통과하는 음파의 속도를 이용하는 직접법과 두께가 깊어 부재 양쪽에 센서를 설치하는 대신 동일한 표면에 센서를 설치하여 속도를 결정하는 간접법이 있다. 일반적으로 현장 비파괴 시험 시에는 직접법을 실시하기 어려운 환경이 많으므로, 일반적으로 간접법을 실시하여 그 값을 보정해 주고 있으며, 원주형 시편 또는 직사각형 시편과 같이 소형 시편에 적용하는 경우에는 센서를 양쪽 끝에 설치하여 직접법으로 초음파의 속도를 구할 수 있도록 한다. 직접법의 경우 신뢰도가 매우 높은 편이나 간접법의 경우 오차가 증가하는 것이 일반적이므로, 이 경우에는 평가 결과의 정확성에 있어 평가자의 숙련도가 중요한 요인이 될 수 있다 (Yi et al., 2011).

초음파 속도법에서 발진자와 수신자의 배치에 따라 직접법, 사각법, 간접법 등의 종류가 있으며 이 가운데 직접법이 가장 신뢰성이 있다. 본 논문에서는 수중이라는 특수성과 ROV에 적용시키기 위해 간접법으로 초음파속도를 계측하였다.

초음파 속도 측정결과를 바탕으로 한 콘크리트 강도추정은 식 (5)~(8)까지의 강도추정식이 주로 사용된다 (Hong and Cho, 2011; Department of Structure Civil Soil, 2001).

일본 건축학회 $F_c - 215 V_p - 620$ (5)



Fig. 3 Ultrasonic pulse velocity test

山田知夫 외 $F_c = 329.4 V_p - 1081.7$ (6)

J.Pyszniak $F_c = 92.5 V_p^2 - 508 V_p + 782$ (7)

谷川 외 $F_c = 172.5 V_p - 499.6$ (8)

여기서 F_c 는 압축강도 (MPa), V_p 는 초음파 속도 (km/sec)이다.

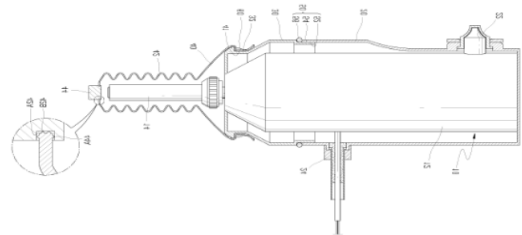
3. 수중 콘크리트 비파괴 검사를 위한 수중 콘크리트 강도예측기법 개발

3.1 슈미트해머 기술의 수중화 방안

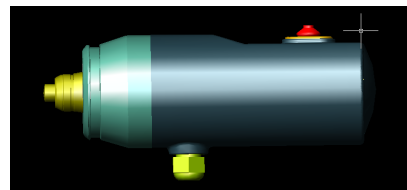
현장에서 구조물의 강도측정을 위해서 사용하는 Fig. 4(a)에 있는 기존의 슈미트 해머를 수중에서도 사용하기 위한 케이스가 필요한데 다수의 해양 및 항만구조물의 수중부가 존재함에도 불구하고 이 부분에 대한 강도를 측정할 수 있는 기구는 거의 전무하다. 이에 수중에서도 비파괴 검사를 실시할 수 있는 있도록 육상 슈미트해머에 대한 방수케이스를 Fig. 4(c), (d)의 설계 과정을 거쳐 Fig. 4(b)와 같이 기존의 슈미트해머에 수중 케이스를 씌워서 수중에서 사용하고자



(a) Schmidt hammer before waterproof (b) Schmidt hammer after waterproof



(c) Design drawing that Schmidt hammer's underwater case



(d) 3D design drawing that Schmidt hammer's underwater case

Fig. 4 Schmidt hammer

하였다.

3.2 초음파 검사 기술의 수중화 방안

일반 현장에서 사용되는 Fig. 5의 (a)에 나와있는 기존의 초음파 탐촉자의 헤드는 BNC케이블로 연결되어 있어서 수중에서 사용할 수 없기 때문에 수중에서 사용하기 위해 기존의 초음파 탐촉자 헤드에 직접 케이블을 연결시켜 우레탄폼으로 방수처리 후 매립하였다. Fig. 5의 (b)는 매립된 후의 초음파 탐촉자의 사진이다.

또한, 수중에서 초음파의 산란을 막기 위하여 Fig. 5(c), (d)과정을 거쳐 센서의 하부면을 제외한 방수케이스를 제작하였다.

3.3 복합법에 의한 강도예측 기술

본 논문에서는 슈미트해머를 사용하여 계측된 반발경도 값과 초음파 탐촉자를 사용하여 계측된 초음파속도를 조합하여 콘크리트 강도를 추정하고자 한다. 이를 복합법이라고 하는데 강도추정의 정확도 및 신뢰도를 높이는 실험법이다. 각종 비파괴 실험값을 조합시키는 방법으로는 2종 실험법 조합과 3종 실험법 조합이 있으며, 단일법과 비교 할 때 상관계수 및 결정계수가 높은 강도 추정 시 높은 신뢰성의 확보가 가능하다.

실제로 기건상태의 콘크리트 강도 추정에는 복합법이 주류를 이루고 있으며, 초음파 속도법 및 반발경도법이 상세하게 규정된 복합 추정식이 사용되고 있다. 다음 식 (9)~(12)는 기건상태의 콘크리트에서 많이 이용되고 있는 복합법에 의한 강도 추정식이다 (Hwang et al., 2002; Department of

Structure Civil Soil, 2001).

$$\text{일본 건축학회 } F_c = 8.2R + 269 V_P - 1094 \quad (9)$$

$$\text{Bellander } F_c = 1.11(0.00082R^3 + 11.03 V_P - 32.7)^{0.942} \quad (10)$$

$$\text{谷川 외 } F_c = 9.9R + 79.2 V_P - 273 \quad (11)$$

$$\text{明石 외 } F_c = \frac{V_P}{(195 - 13.2R + 0.316R^2 - 0.00257R^3)} \quad (12)$$

4. 실험연구를 통한 제안기술 검증

4.1 실험절차 및 방법

본 실험에 사용되는 콘크리트 공시체의 배합강도는 25MPa와 44MPa 사이이며 양생은 수중양생을 하였다. 반발경도의 실험용 공시체의 규격은 20×40×15 (cm)이며 초음파속도의 실험용 공시체의 규격은 15×40×15 (cm)이다. 본 실험은 재령 28일 차에 실시되었으며 각각의 배합비는 다음 Table 1과 같다.

4.1.1 수중 초음파속도 계측 시험

초음파 시험기는 스위스 Proceq사의 초음파 시험기 (TICO)를 사용하였고 탐촉자의 주파수는 54kHz이다. 또한, 시험 전 교정기로 검증하여 오차율을 줄였고 계측 시 실험실의 온도는 약 25℃였다.

콘크리트 공시체를 사용하여 간접법으로 초음파 탐촉자간 거리 200mm, 2회 측정 후 오차율을 줄이기 위해 그 평균값

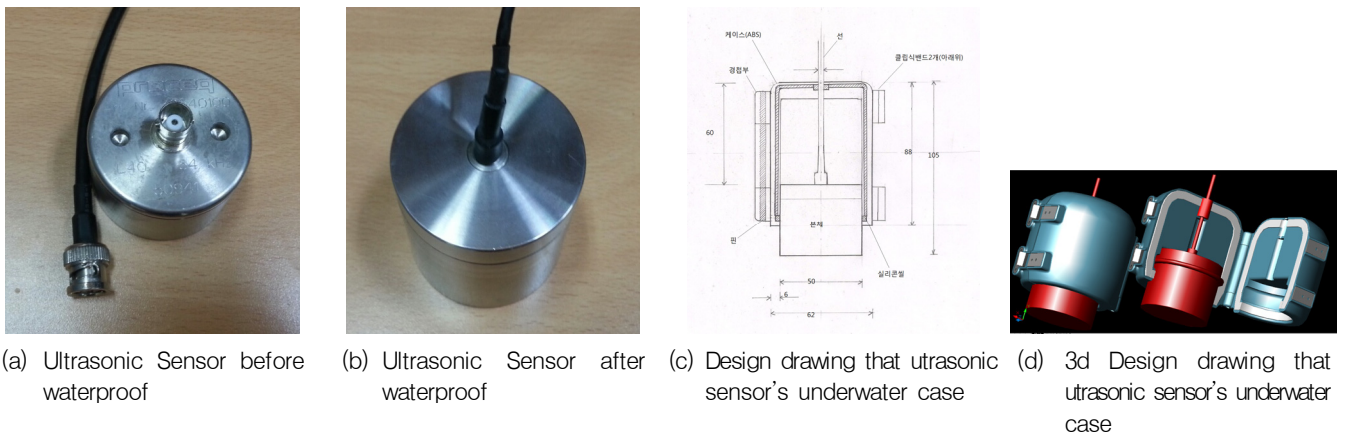
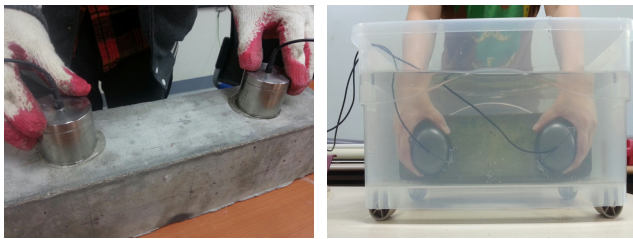


Fig. 5 Underwater Ultrasonic Sensor

Table 1 Concrete Mixing Design

Strength (MPa)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Slump (mm)
25	17.3	37.9	74.1	96.2	120
28	16.5	40.1	72.3	98.8	124
32	15.8	44.8	71.5	94.3	110
35	17.3	43.1	67.9	91.1	132
37	18.7	52.8	64.4	90.8	159
40	17.4	55.3	65.0	91.7	147
44	17.1	57.8	66.7	98.8	146



(a) Ultrasonic pulse velocity test in air condition (b) Ultrasonic pulse velocity test in under water condition

Fig. 6 Ultrasonic pulse velocity test



(a) Rebound Hardness Test in air condition (b) Rebound Hardness Test in under water condition

Fig. 7 Rebound Hardness Test

을 초음파 속도로 하였고 공기 중의 초음파속도와 수중에서의 초음파속도를 각 강도 당 20개씩 취득하였다.

4.1.2 수중 반발경도 계측 시험

슈미트해머는 스위스 Proceq사의 DIGI SCHMIDT (ND) 를 사용하였고 계측 시 시험실의 온도는 약 25°C 였다. 반발경도법의 작업양식에 따라 공시체는 10cm 이상의 두께를 가지게 제작하였고 측정 지점은 끝단으로부터 10cm 이상 떨어진 곳으로 측정하였다. 공시체의 크기의 제한 때문에 타격점들이 약 1cm 간격으로 밀집되어 있었다. 20점 이상을 타격한 후 평균값에서 ±20% 이상인 값들은 버리고 나머지 값을 평균값으로 취하였다 (Park, 2003).

Table 2 Testing Results

Design Strength (MPa)	Real Strength (Mpa)	Rebound Hardness (R)		Ultrasonic Pulse Velocity (m/s)	
		in Air	under Water	in Air	under Water
25	24.45	34.3	42.9	4063.5	4092.8
Error Rate (%)		25.3		0.72	
28	28.13	37.2	46.1	4153.5	4181.7
Error Rate (%)		24.1		0.68	
32	31.78	38.9	47.8	4293.5	4325.2
Error Rate (%)		22.8		0.74	
35	34.36	41.2	50.3	4413.1	4445.8
Error Rate (%)		22.1		0.74	
37	37.51	43.1	52.3	4492.2	4521.3
Error Rate (%)		21.4		0.65	
40	40.12	44.6	53.9	4577.4	4605.3
Error Rate (%)		20.9		0.61	
44	43.81	47.1	55.8	4611.5	4641.9
Error Rate (%)		18.4		0.66	

4.2 실험결과

4.2.1 공기 중 계측 값과 수중 계측 값의 비교

실험 결과 방수케이스를 씌우지 않은 슈미트해머의 공기 중 반발경도와 방수케이스를 씌운 슈미트해머의 수중에서 반발경도의 상대오차율은 약 22.14%로 나타났다. 수중 시험 전 예비테스트로 방수케이스를 씌우고 수중에서 타격한 반발경도 값과 방수케이스를 씌우고 공기 중에서 타격한 반발경도 값의 차이가 거의 없었는데 앞서 언급된 22.14%라는 상대오차율은 제작된 케이스의 자체의 영향인 큰 것으로 판단된다. 또한, 배합강도가 증가함에 따라 공기 중의 반발경도와 수중의 반발경도의 상대오차율이 줄어드는 경향을 보이는데 강도가 증가함에 따라 경도가 증가함으로써 초크부에서 타격봉으로 전달되는 타격에너지의 전달률이 향상됨을 추론할 수 있다.

공기 중의 초음파속도와 수중의 초음파속도의 상대오차율은 0.68%로 매우 작게 나타났는데 이는 물을 커플런트로 사용하여 초음파속도를 계측하여도 무관함을 알 수 있다.

4.2.2 수중에서의 콘크리트 강도 추정식 도출

위 결과를 바탕으로 수중에서의 반발경도와 수중에서의 초음파속도 그리고 실제 압축강도를 기반으로 일반회귀 분석을 하여 반발경도를 기반으로 하는 식 (13)과 초음파속도를 기반으로 하는 식 (14) 도출하였고 이중회귀분석을 통하여 반발경도와 초음파속도를 복합적으로 사용하는 식 (15)을

도출하였다.

$$F_c = 8.7097e^{0.027R} \quad (13)$$

여기서 R은 수중 반발경도이다.

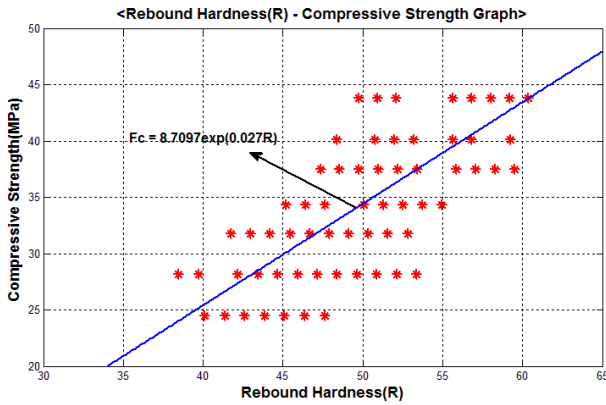


Fig. 8 Rebound Hardness – Compressive Strength

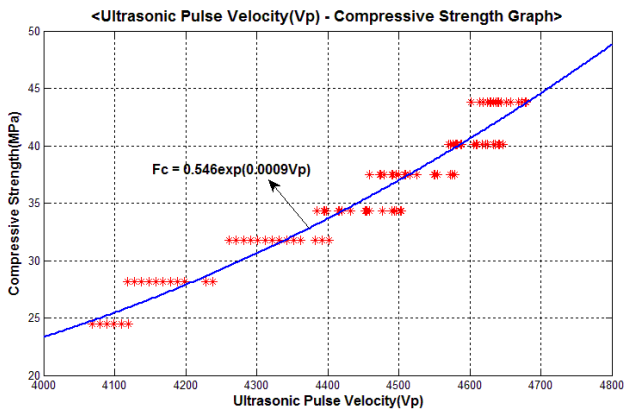


Fig. 9 Ultrasonic Pulse Velocity – Compressive Strength

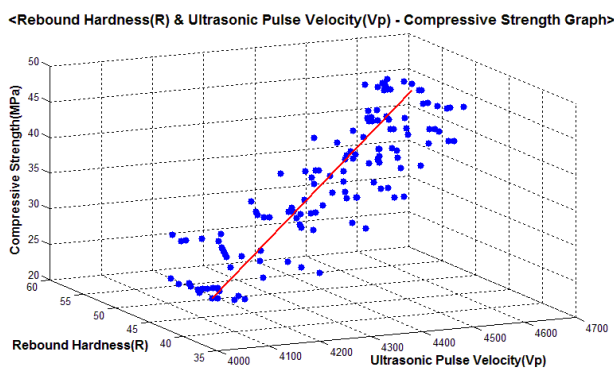


Fig. 10 Rebound Hardness & Ultrasonic Pulse Velocity – Compressive Strength

$$F_c = 0.546e^{0.0009V_p} \quad (14)$$

여기서 Vp는 수중 초음파속도이다.

$$F_c = -1.34R + 0.013V_p + 3.28 \times 10^{-4}R \cdot V_p - 27.53 \quad (15)$$

여기서 R은 수중 반발경도이며 Vp는 수중 초음파속도이다.

4.2.3 기존의 식과 비교 및 분석

위의 회귀분석에서 도출된 3가지 식에서 얻어진 추정강도 값과 기존 강도 추정식에서 도출된 추정강도 값의 실제 강도 값과 추정강도 값의 그래프는 Fig. 11과 같다. 각각의 비교 그래프에서 실선은 실제강도 값의 추세선을 나타내고 있으며 이를 통해 추정강도 값과의 차이를 알 수 있다.

압축강도만을 변수로 두는 콘크리트 강도 추정식에서 도출된 추정 강도 값들과 실제 강도 값과의 상대오차율은 새롭게 도출된 식 (13)에서 가장 낮아 기존의 추정식보다 정확한

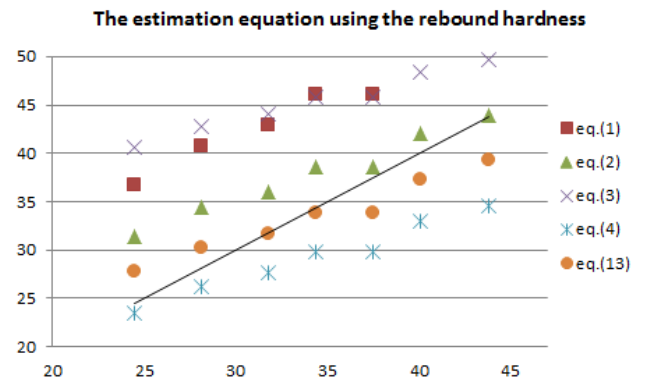


Fig. 11 Estimation strength & Real strength by rebound hardness

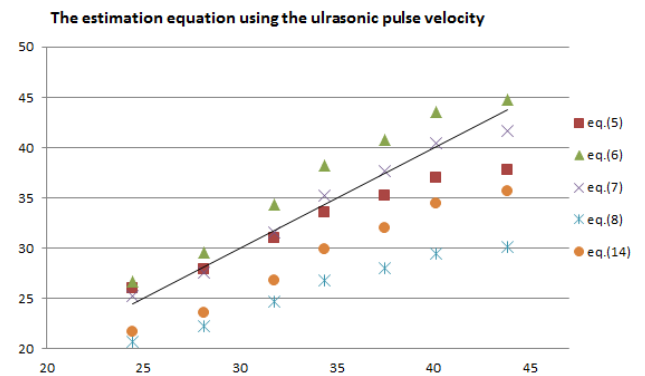


Fig. 12 Estimation strength & Real strength by ultrasonic pulse velocity

The estimation equation using the rebound hardness and the ultrasonic pulse velocity

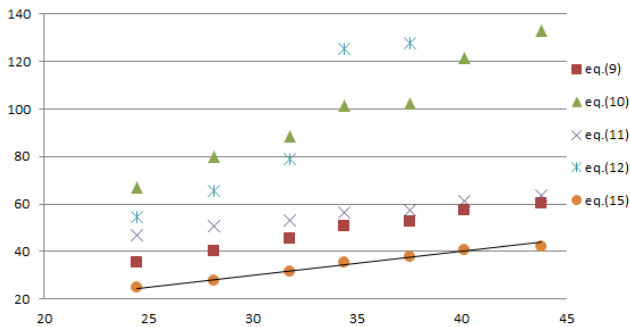


Fig. 13 Estimation strength & Real strength by rebound hardness and ultrasonic pulse velocity

추정 값을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 사용된 반발경도 값이 수중케이스에 의하여 공기 중의 동일 강도일 때의 반발경도 값보다 높아진 상태이며 기존의 추정식들은 공기 중에서의 반발경도를 바탕으로 만들어진 추정식이기 때문이다.

초음파속도를 기반으로 하는 추정식에서 도출된 강도 값들과 실제 강도 값과의 상대오차를 확인해보면 J.Pyszniak식과 山田和夫 및 일본건축학회식이 높은 정확도를 가지고 있었고 새롭게 도출된 식 (14)는 상대적으로 높은 오차율을 가지고 있는데 이는 회귀분석에 이용된 변수들의 평균치와 도출된 추정식의 그래프와 일정간격으로 벌어져있어 누락변수로 인한 편倚의 가능성이 내포되어 있는 것으로 판단된다. 이러한 오차율을 줄이기 위해 다중회귀분석으로 통하여 식 (15)를 도출했고 결과는 Fig. 13과 같다.

복합식을 기반으로 하는 강도 추정 정확도는 새롭게 도출된 식 (15) 정확도가 가장 높았으며 이는 단순 회귀분석을 통하여 도출된 식 (13)과 식 (14)보다 정확하였다. 또한, 높은 정확도를 가지고 있던 기존의 반발경도 기반, 초음파속도 기반의 강도 추정식보다도 높은 정확도를 가지고 있어 수중에서의 활용성이 클 것으로 예측된다.

5. 결론

본 연구는 수중 항만 수중 항만 콘크리트 구조물의 효율적인 유지관리를 통한 비용절감 및 안정성 증대를 위해 지상콘크리트 비파괴검사 장비인 슈미트해머와 초음파센서의 수중 적용성 여부판단을 위해 진행되었고 결과는 다음과 같다.

- (1) 공기 중에서 측정된 반발경도 값과 초음파속도 값은 수중에서 측정된 반발경도 값과 초음파속도 값의 각각

22.14%와 0.64%로 나타났다. 반발경도의 경우 수중의 영향이라기 보단 제작된 수중케이스의 영향으로 인한 것이며 초음파속도의 경우 기존의 커플런트 대신에 물을 커플런트로 사용하여도 상관없음을 알 수 있다.

- (2) 실내 수중 시험 결과를 토대로 식 (13), 식 (14), 식 (15)를 회귀분석을 통하여 도출할 수 있었으며 이중 다중회귀분석을 통해 도출된 식 (15)가 가장 높은 정확도를 나타내고 있어 수중에서의 활용성이 높을 것으로 판단된다.
- (3) 향후 활발히 개발되고 있는 수중 ROV (Remotely Control Vehicle)에 본 연구에서 수중화시킨 슈미트해머와 초음파센서를 탑재시켜 수중 콘크리트 구조물의 진단에 이용한다면 반발경도와 초음파속도 측정을 통한 노후화된 시설물의 강도관리에 용이할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국해양연구원의 항만시설물 점검용 장비 기술개발사업 (PM57351)과 국토해양부의 u-City 석·박사 지원 사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Department of Structure Civil Soil (Korea Land & Housing Corporation) (2001), Questionnaire survey for the current situation of the domestic use of non-destructive testing, *Journal of Housing & Urban Research Institute*, 70(3), 171-179 (in Korean).
2. Hedayati, M. R., Amidian, A. A., and Sadr, S. A. (2011), Expert Systems for Human, Materials and Automation, *InTech*, 222-236.
3. Hong, S. W., and Cho, Y. S. (2011), A Study on the Estimation of the Compressive Strength of Concrete Structures using Ultrasonic Puls Velocity Method and Rebound Hardness Method, *Architectural Institute of Korea, AIK*, 27(1), 19-26 (in Korean).
4. Hwang, I. S., Hong, S. D., and Kim, H. D. (2007), Typhoon Disaster and Reconstruction in Overseas, *Korean Society of Civil Engineering, KSCE*, 55(10), 103-110 (in Korean).
5. Hwang, M. Y., Lee, G. Y., Koo, B. H., and Kim, H. K. (2002), *Construction materials and Safety inspection test Boseonggak*, Seoul, 173-185 (in Korean).
6. *Journal of the Korea institute for structural maintenance inspection* (2006), *Non-destructive tests & Measurement Engineering for Structure*, Gumiseogwan, 61-74 (in Korean).
7. Lee, J. D. (2010), *Concrete Structures Non-destructive Tests*, Ilgwang, Seoul, 5-21 (in Korean).

Received : 11/22/2013
Revised : 02/03/2014
Accepted : 02/24/2014

8. Park, S. B. (2003), Construction materials testing, Moonundang, Seoul, 188-190 (in Korean).
9. Smith, A. P. (1986), Underwater nondestructive testing of concrete : an evaluation of technique, Port Hueneme, Calif, 1-16.
10. Yi, J. H., Hang, S. H., and Park, W. S. (2011), Nondestructive Testing for Concrete Harbour Facilities, *Journal of the Korea institute for structural maintenance inspection*, KSMI, 15(3), 4-10 (in Korean).

요 지

본 논문은 기존 수중 콘크리트 구조물의 강도관리 및 진단기술의 중요성은 날로 증가함에 따라 개발되고 있는 ROV (Remote Control Vehicle)에 탑재될 수 있는 비파괴 검사 장비를 개발하여 콘크리트 내부의 강도측정을 하고자하였다. 수중화된 슈미트헤머와 초음파센서를 통하여 수중에 있는 콘크리트 공시체의 반발경도 및 초음파속도를 계측하여 실제 압축강도 값과 비교하였으며 이를 통하여 수중에서의 강도추정식을 도출하였다. 도출된 3가지 식 중에서 반발경도와 초음파속도를 복합적으로 사용하는 복합식이 가장 정확도가 높았으며 이에 따라 실제 수중에서의 콘크리트의 강도를 추정하고자 할 때 활용 가능성도 높아질 것으로 예상된다.

핵심 용어 : 수중콘크리트구조물, 반발경도시험, 슈미트헤머, 초음파속도법, 재료물성치 평가
