

수중 콘크리트 구조물의 수심별 강도 추정에 관한 연구

이지성* · 한상훈** · 박승희***

Lee, Jisung*, Han, Sanghun**, Park, Seunghee***

A Study on Compressive Strength Estimation of Underwater Concrete Structures According to Water Depths

ABSTRACT

Harbor facilities require long-term durability and safety, and also maintain the performance requirement until the durability life. However, existing harbor facilities are becoming superannuated with durable years and durability is declined by erosion of the sea and damage from sea. In addition, harbor facilities will be in demand for the expansion of harbor and offshore structures with rising economic power by enhancement of domestic industry and increase of import and export. Therefore, in this study, two kinds of nondestructive test (NDT) techniques (schmidt rebound hammer and ultrasonic sensor) are verified for the effective maintenance of underwater concrete structures including harbor facilities. Sea field applicability of Schmidt hammer and ultrasonic sensor was verified by comparing field test result with sea field test result and also deduced the compressive strength estimation equation by depth of the water. On the basis of the sea field test result, compressive strength estimation equation which was deduced by multiple regression analysis indicated highest accuracy compared to other equations, especially it will be more likely to be used in underwater because of the depth of water correction. In the future, if schmidt hammer and ultrasonic sensor which were invented as waterproofing are used with ROV (Remotely Operated Vehicle), it will be possible to make a diagnosis of high reliability for underwater concrete structures and set up a ubiquitous concept of NDT system.

Key words : Underwater concrete, Nondestructive test, Schmidt hammer, Ultrasonic sensor

초 록

기존의 항만구조물은 사용연수가 증가함에 따라 노후화가 진행되고 있으며 바닷물의 침식 등에 의한 콘크리트 염해 등으로 인해 내구성이 저하되고 있다. 더불어 수출입 증가에 따른 항만시설의 확충과 해상구조물의 수요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 항만구조물을 비롯한 수중 콘크리트 구조물의 효율적인 유지관리를 위해 수중화된 슈미트해머와 초음파센서의 현장 실험결과를 통해 수중 비파괴검사 장비의 현장 적용성을 검증하고, 수심별 강도 추정식을 도출하였다. 다중회귀분석을 통해 도출된 복합 강도 추정식은 수심에 대한 보정이 이루어져 있어 추후 수중에서의 활용성이 매우 높을 것으로 기대된다. 또한, 향후 활발히 개발되고 있는 수중 ROV에 본 연구에서 수중화한 슈미트해머와 초음파센서를 탑재시켜 수중 콘크리트 구조물의 진단에 활용한다면 신뢰도 높은 수중 콘크리트 구조물의 상태진단과 자동화를 통한 상시감시를 이루어 온라인상으로도 모니터링이 가능한 유비쿼터스 개념의 통합된 비파괴검사 시스템 구축이 가능할 것으로 판단된다.

검색어 : 수중 콘크리트, 비파괴검사, 슈미트해머, 초음파센서

* 성균관대학교 미래도시융합공학과 석사과정 (Sungkyunkwan University · ezsung@naver.com)

** 종신회원 · 한국해양과학기술원 연안공학연구본부 책임연구원 (Korea Institute of Ocean Science & Technology · shhan@kordi.re.kr)

*** 종신회원 · 교신저자 · 성균관대학교 건축토목공학부 부교수 (Corresponding Author · Sungkyunkwan University · shparkpc@skku.edu)

Received December 10, 2014/ revised February 17, 2016/ accepted March 16, 2016

$$F_C = 329.4 V_P - 1081.7 \quad \text{山田知夫 외 식} \quad (7)$$

$$F_C = 92.5 V_P^2 - 508 V_P + 782 \quad \text{J.Pyzniak 식} \quad (8)$$

$$F_C = 172.5 V_P - 499.6 \quad \text{谷川 외 식} \quad (9)$$

$$F_C = 0.546e^{0.0009 V_P} \quad \text{한국해양과학기술원} \quad (10)$$

여기서, F_C : 압축강도(MPa), V_P : 초음파속도(km/sec)이다.

2.3 수중 콘크리트 비파괴검사 기술 동향 분석

현재 전 세계적으로 다양한 방법의 비파괴검사가 개발되고 있으나, 우리나라의 수중 비파괴 검사 적용사례는 극히 드문 실정이며 기술과 장비의 해외 의존도가 높고, 회사마다 결과가 다르게 나오는 등 신뢰성이 떨어지는 경향이 있다. 따라서 신뢰도 높은 검사를 위한 비파괴검사 기술과 장비, 해석기술개발에 관한 연구가 필요한 상황이다. 또한, 최근 비파괴검사의 동향은 센서의 미세화와 검사의 자동화를 통한 상시감시를 이루어 온라인상으로도 모니터링이 가능한 유비쿼터스 개념의 통합된 비파괴 검사 시스템을 구축하는 것이다. 따라서 기존의 수중 비파괴검사로 주로 이용되는 초음파 속도법과 반발경도법의 자동화와 온라인상으로도 볼 수 있도록 장비와 해석기술의 개발 및 적용이 필요하다.

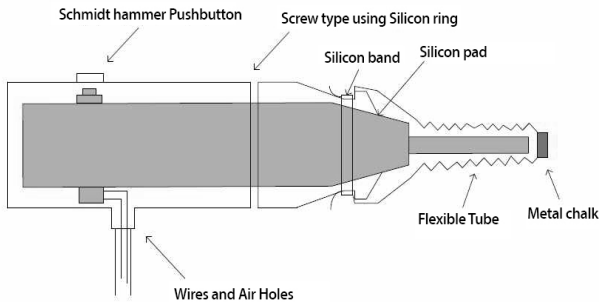


Fig. 1. Design Diagram for Schmidt Hammer's Waterproof Case



Fig. 2. Schmidt Hammer with a Waterproof Case

3. 비파괴검사 장비의 수중화 및 방수성능 개선

3.1 슈미트해머의 수중화 및 방수성능 개선

수중 현장에서 구조물의 강도측정을 위해 그림처럼 기존의 슈미트해머를 수중에서도 사용하기 위한 방수케이스가 필요하지만 다수의 해양 및 항만구조물에는 수중부가 존재함에도 불구하고 수중 부에 대한 강도를 측정할 수 있는 기구는 거의 전무하다. 이에 수중에서도 비파괴검사를 실시할 수 있도록 지상 슈미트해머에 대한 방수케이스를 그림의 설계 과정을 거쳐 제작하였다(Shin, 2014)(Figs. 1 and 2).

한편, 기존의 자석으로 타격봉과 고정시켰던 초크부가 타격 시 자석이 깨져나가 타격봉과의 밀착력이 떨어져 문제가 발생하여 자석대신 그림과 같이 고무와 스프링을 결합하여 타격봉과 초크부를 고정시키고, 고무자바라가 수압으로 인해 사용성이 떨어지는 것을 방지하고자 그림과 같이 고무자바라를 강화시킬 수 있는 강화링을 제작하였다. 또한, 현장 실험 시 높은 수압으로 인해 미세한 틈 사이로 물이 침투하는 것을 방지하기 위해 방수성능이 뛰어난 레진과 에폭시를 이용하여 슈미트해머 방수케이스의 방수성능을 개선시켰다.

3.2 초음파센서의 수중화 및 방수성능 개선

일반 현장에서 사용되는 기존 초음파센서의 헤드는 BNC케이



Fig. 3. Ultrasonic Sensor with a Waterproof Case



Fig. 4. Details of Waterproof Case for Ultrasonic Sensor

블로 연결되어 있어서 수중에서는 사용이 불가능하기 때문에 수중에서도 사용하기 위해 기존의 초음파 탐촉자 헤드에 직접 케이블을 연결시켜 우레탄폼으로 방수처리 후 매립하였다. 또한, 기존의 케이블 매립형 센서는 센서의 헤드가 물에 잠겼을 때 초음파신호가 물속에서 산란되어 정확한 계측이 어려워 초음파 센서의 상부면을 덮을 수 있는 수중케이스를 제작하였다(Shin, 2014)(Figs. 3 and 4).

4. 수중 비파괴검사 장비 현장실험 및 결과

4.1 현장실험 준비

현장실험에 사용되는 콘크리트 공시체의 배합강도는 30~45 MPa이며 양생은 일반 공기 중에서 양생 하였다. 실험용 공시체의 규격은 거제도 한국해양과학기술원 남해분원 현장까지의 이동을 고려해 300 x 150 x 200 (mm)의 크기로 서로 다른 강도를 가진 3개의 공시체를 제작하였고, 공시체를 지상에서 수중으로 내리기 위해 쇠파이프를 공시체 상부에 삽입하였다. 본 실험은 재령일 28일차에 실시되었으며 각 공시체의 배합비는 아래 Table 1과 같다. 기준이 되는 실제 강도값을 측정하기 위해 시편 제작시 동일한 배합비의 콘크리트 표준 공시체를 강도별로 3개씩 제작하였고, 본연구의 수중시험일과 동일한 재령일 28일에 UTM을 이용하여 압축강도를 측정하였습니다(Fig. 5).

Table 1. Concrete Mixing Design Contents

Design Strength (MPa)	Water (kg)	Cement (kg)	Sand (kg)	Gravel (kg)	SP admixture (g)
30	3.795	7.59	19.67	10.65	37.95
40	3.795	8.83	17.98	22.40	44.13
45	3.795	10.84	16.47	22.5	108.43

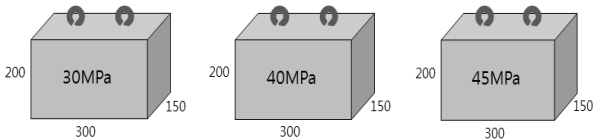


Fig. 5. Experimental Specimens for Field Tests

4.2 슈미트해머 및 초음파센서 현장실험 방법

슈미트 해머는 스위스 Proceq사의 DIGI SCHMIDT (ND)를 사용하였고, 측정 지점은 끝단으로부터 10 cm 이상 떨어진 곳으로 측정하였다. 타격점 상호간의 간격은 3 cm를 표준으로 하며, 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하였다. 수중에서의 반발경도 값을 각 공시체마다 수심별로 20개씩 취득하였다. 초음파센서는 스위스 Proceq사의 초음파 시험기(TICO)를 사용하

였고 초음파센서의 주파수는 54 kHz이다. 간접법으로 초음파센서 간 거리 200 mm, 한 면당 1개소에 대해 1회 측정 후 오차를 줄이기 위해 그 평균값을 초음파속도로 하였고, 수중에서의 초음파 속도를 각 공시체마다 수심별로 20개씩 취득하였다. 현장 수중실험을 진행하기 전, 슈미트해머와 초음파센서의 지상 계측값과 수중에서의 계측값을 비교하기 위해 지상에서 공시체마다 반발경도 값과 초음파 속도를 각각 20회씩 계측하였다. 공시체 상부에 삽입한 쇠파이프를 밧줄로 연결하여 공시체를 수중으로 내리고, 잠수부가 직접 슈미트해머와 초음파센서를 사용하여 공시체의 반발경도 값과 초음파속도를 측정하였다. 수심 2 m, 4 m (총 수심 4 m)에서 각각 실험을 진행하였다(Figs. 6 and 7).

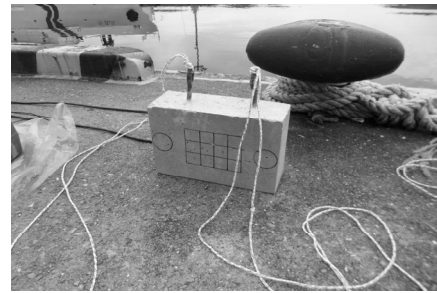


Fig. 6. Field Test Setup



Fig. 7. Field Test Photos

4.3 현장실험 결과

슈미트해머의 현장실험 도중 방수상의 문제가 발생하였다. 슈미트해머가 수중에서 공시체를 타격하는 순간, 초크부에 가해지는 충격으로 인해 고무자바라와 초크부 사이에 미세한 틈이 생기게

Table 2. Results of Experiment by the Depth of the Sea

Design Strength	Real Compressive Strength	Ultrasonic Wave Velocity (m/s)				Rebound Hardness		
		In air (before taping)	In air (after taping)	2M	4M	In air	2M	4M
30	31.35	4297	3080	3036.5	3027	42	-	-
Relative error (%)		-	28.32	29.33	29.55	-	-	-
40	38.91	4529	3305	3268.5	3267	48	-	-
Relative error (%)		-	27.03	27.83	27.86	-	-	-
45	46.2	4676.5	3457.5	3424	3419.5	60	-	-
Relative error (%)		-	26.07	26.78	26.89	-	-	-

Table 3. Results of Experiment by the Depth of the Sea After Correction - Ultrasonic Wave Sensor

Design Strength	Real Compressive Strength	Ultrasonic Wave Velocity (m/s)			
		In air (before taping)	In air (after taping)	2M	4M
30	31.35	4297	4330	4260	4247
Relative error (%)		-	0.07	0.86	1.16
40	38.91	4529	4525	4488.5	4487
Relative error (%)		-	0.09	0.89	0.93
45	46.2	4676.5	4677.5	4644	4639.5
Relative error (%)		-	0.02	0.70	0.79

되었고, 미세한 틈과 수압으로 인해 물이 침투한 것으로 보여진다. 슈미트해머 방수케이스의 방수성능에 대한 예비실험에서 방수성능은 문제가 없었으나, 현장실험의 경우 슈미트해머가 타격하면서 생기는 반발력과 수심에 따른 수압의 영향으로 인해 슈미트해머 방수케이스의 방수성능은 취약한 것으로 판단된다.

한편, 초음파센서 현장실험에서 방수자체의 문제는 없었으나, 해수의 화학적 성질로 인해 초음파속도가 발산하는 값을 나타내었다. 해수는 일종의 전해질로 염화나트륨(NaCl)이 녹아있고, 이것은 Na⁺, Cl⁻로 이온화되어있기 때문에 전류가 흐르게 되면서 초음파속도에 교란을 일으키게 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 해수 중에서 초음파센서 간에 전류가 흐르지 않도록 초음파센서에 절연테이프를 테이핑한 후 다시 실험을 진행하였다. 절연테이프를 테이핑 한 초음파센서를 이용하여 다시 수중에서 실험한 결과, 초음파속도는 발산하지 않고 안정된 계측값을 나타내었다. 초음파센서와 슈미트해머의 현장실험 수심별 결과값은 Table 2와 같다.

하지만 테이핑 후 수심별 결과값을 보면 지상에서 절연테이프를 테이핑하기 전 초음파속도와 절연테이프를 테이핑한 후 초음파속도의 상대오차율은 27.14%로 매우 큰 상대오차율을 나타냈다. 이는 초음파센서의 테이핑한 부분과 공시체 사이에 간격이 발생하였고, 이로 인해 초음파센서 간의 초음파 전달에 영향을 미친 것으로 판단된다. 한편, 지상에서의 계측값과 동일하게 공시체의 강도가

높을수록 초음파속도는 큰 값을 나타냈고, 수심(2 m, 4 m)에 따른 초음파속도는 미세한 차이지만 수심이 깊어질수록 작아지는 값을 나타냈다. 테이핑 후 초음파센서의 초음파속도를 보정하여 테이핑 전의 초음파속도와 비교하였다. 각 공시체마다 테이핑 전후의 초음파속도 차이는 30 MPa의 경우 1217 m/s, 40 MPa의 경우 1224 m/s, 45 MPa는 1219 m/s의 차이를 보였다. 초음파속도가 최대차이인 40 MPa의 경우와 최소차이인 30 MPa의 경우만 비교하였을 때, 7 m/s라는 아주 적은 차이가 있었다. 따라서 각 공시체의 테이핑 전후의 초음파속도 차이의 평균을 구하고, 테이핑 후의 초음파속도에 테이핑 전·후의 평균속도차이를 합산하여 초음파속도를 보정하였다. 초음파센서의 절연테이프 테이핑 후의 초음파속도 보정식은 다음 Eq. (11)과 같다.

$$V_p' = V_p + 1220 \tag{11}$$

위 식에서 V_p' 는 보정된 초음파속도, V_p 는 테이핑 후의 초음파속도, 1220 m/s는 3개 공시체 테이핑 전후 초음파속도 차이의 평균값이다. Eq. (11)의 보정식을 사용하여 절연테이프를 감은 후 초음파속도를 보정한 결과값은 Table 3과 같다.

보정된 초음파속도 결과값을 보면 절연테이프 테이핑 전 초음파속도와 테이핑 후 보정식을 사용하여 보정된 초음파속도의 상대오차율은 평균 0.06%로 거의 동일한 값을 나타냈다. 한편, 보정된

초음파속도와 수심 2 m에서의 초음파속도를 비교한 결과, 상대오차율은 평균적으로 0.82%를 나타냈고, 수심 4 m의 경우에는 0.96%의 상대오차율을 나타냈다. 이는 물을 커플런트로 사용하여 초음파속도를 계측하여도 무관함을 알 수 있었다. 또한, 수심(2 m, 4 m)에 따른 초음파속도는 미세한 차이지만 수심이 깊어질수록 수압의 영향으로 인해 초음파속도가 느려지게 되고, 따라서 상대오차율은 커지게 된다.

4.4 수심별 콘크리트 강도 추정식 도출

본 논문에서는 현장실험에서 계측된 반발경도 값과 초음파속도를 조합하여 콘크리트 강도를 추정하고자 한다. 이를 복합법이라고 하는데 각종 비파괴점사의 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. 다음 Eqs. (12)~(16)은 현재 가장 많이 이용되고 있는 복합법에 의한 강도 추정식이다(Hong and Cho, 2011; Shin, 2014). 여기서 R은 반발경도 값, V_p 는 초음파 속도를 나타낸다.

일본 건축학회식

$$F_c = 8.2R + 269V_p - 1094 \quad (12)$$

Bellander 식

$$F_c = 1.11(0.00082R^3 + 11.03V_p - 32.7)^{0.942} \quad (13)$$

谷川 외 식

$$F_c = 9.9R + 79.2V_p - 273 \quad (14)$$

明石 외 식

$$F_c = \frac{V_p}{(195 - 13.2R + 0.316R^2 - 0.00257R^3)} \quad (15)$$

한국해양과학기술원

$$F_c = -1.3371R + 0.0128V_p + 3.2785 \times 10^{-4}R \cdot V_p - 27.5289 \quad (16)$$

하지만 지금까지의 콘크리트 강도 추정식은 지상에서의 반발경도 값과 초음파속도를 기반으로 한 강도 추정식이 대부분이고, 수중 콘크리트 강도 추정식은 한국해양과학기술원의 Eq. (16)이 있지만 수심을 고려하지 않은 도출식이기 때문에 실 해역 현장에서 얻은 결과값을 적용하기에는 어려움이 따를 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 실 해역 현장실험 결과를 바탕으로 수심별 초음파속도, 실제 압축강도를 기반으로 회귀분석을 이용하여 수심별 초음

파속도를 기반으로 하는 Eq. (17) 및 반발경도와 수심별 초음파속도를 복합적으로 사용하는 Eq. (18)을 도출하였다. 이때 초음파 속도 값은 테이핑의 영향을 보정한 초음파 속도값을 의미한다.

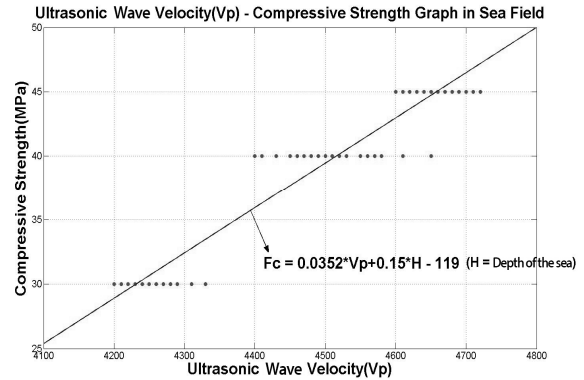


Fig. 8. Ultrasonic Wave Velocity by the Depth of the Sea - Compressive Strength

$$F_c = 0.0352 \times V_p + 0.15 \times H - 119,$$

$$(V_p : \text{초음파속도}, H : \text{수심}M) \quad (17)$$

<Rebound Hardness(R) & Ultrasonic Wave Velocity(Vp) - Compressive Strength Graph>

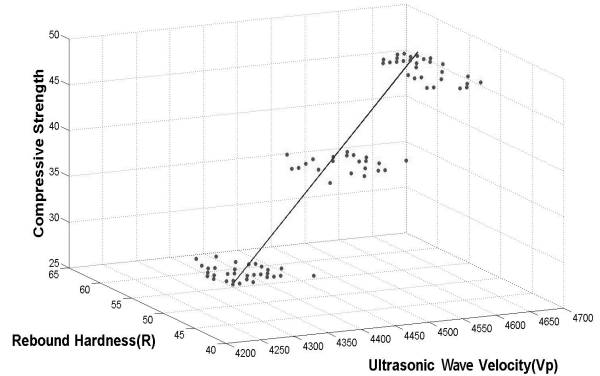


Fig. 9. Rebound Hardness & Ultrasonic Sensor Velocity by the Depth of the Sea - Compressive Strength

$$F_c = 0.0974R + 0.0321V_p + 0.035H - 109.4371,$$

$$(H : \text{수심}M) \quad (18)$$

지상에서의 초음파속도와 수중 수심별 초음파속도의 오차는 크지 않지만, 보다 정확한 강도 추정을 위해 위의 회귀분석을 통해 얻어진 추정강도 값과 기존 강도 추정식으로 도출된 추정강도 값의 실제 강도 상대오차율은 Table 4와 같다.

수심별 초음파속도를 기반으로 하는 강도 추정 오차율은 본 연구에서 새롭게 도출된 Eq. (17)에서 가장 정확한 추정 값을

Table 4. Compressive Strength Estimation Based on Ultrasonic Wave Velocity-Relative Error

Depth of the sea	Compressive Strength (MPa)	Ultrasonic Wave Velocity (m/s)	Equation of Compressive Strength Estimation Based on Ultrasonic Wave Velocity					
			Architectural Institute of Japan	K. Yamada et al.	J. Pysznik	Y. Tanigawa et al.	Korea Institute of Ocean Science & Technology	Eq. (17)
2M	31.35	4260	29.59	32.15	29.66	23.53	25.25	31.25
	Relative error (%)		5.61	2.55	5.39	24.94	19.46	0.32
	38.91	4488.5	34.50	39.68	36.54	27.47	31.01	39.29
	Relative error (%)		11.33	1.98	6.10	29.40	20.30	0.98
	46.2	4644	37.85	44.80	41.78	30.15	35.68	44.77
	Relative error (%)		18.08	3.03	9.57	34.74	22.77	3.10
Average relative error (%)			11.66	2.52	7.02	29.69	20.84	1.47
4M	31.35	4247	29.31	31.73	29.29	23.30	24.96	31.09
	Relative error (%)		6.51	1.21	6.58	25.68	20.38	0.83
	38.91	4487	34.47	39.63	36.49	27.44	30.97	39.54
	Relative error (%)		11.41	1.85	6.22	29.48	20.41	1.62
	46.2	4639.5	37.75	44.66	41.61	30.07	35.53	44.91
	Relative error (%)		18.29	3.33	9.94	34.91	23.10	2.79
Average relative error (%)			12.07	2.13	7.58	30.02	21.30	1.75

Table 5. Compressive Strength Estimation Based on Rebound Hardness & Ultrasonic Wave Velocity-Relative Error

Depth of the sea	Compressive Strength (MPa)	Ultrasonic Wave Velocity (m/s)	Equation of Compressive Strength Estimation Based on Rebound Hardness					
			Architectural Institute of Japan	U. Bellander	Y. Tanigawa et al.	T. Akashi et al.	Korea Institute of Ocean Science & Technology	Eq. (18)
2M	31.35	4260	40.41	68.26	48.96	57.84	29.56	31.59
	Relative error (%)		28.90	117.74	56.17	84.50	5.71	0.77
	38.91	4488.5	53.53	107.61	59.18	192.86	36.84	39.75
	Relative error (%)		37.57	176.56	52.09	395.66	5.32	2.16
	46.2	4644	61.77	136.70	65.31	86.47	42.37	45.22
	Relative error (%)		33.70	195.89	41.36	87.16	8.29	2.11
Average relative error (%)			33.39	163.40	49.87	189.11	6.44	1.68
4M	31.35	4247	40.01	68.15	48.86	57.66	29.21	31.27
	Relative error (%)		27.62	117.38	55.85	83.92	6.83	0.26
	38.91	4487	53.49	107.60	59.17	192.80	36.80	39.81
	Relative error (%)		37.33	176.54	52.06	395.50	5.42	2.31
	46.2	4639.5	61.65	136.66	65.28	86.39	42.23	45.18
	Relative error (%)		33.44	195.80	51.30	87.0	8.59	2.21
Average relative error (%)			32.80	163.24	53.07	188.81	6.95	1.59

보이는 것으로 확인되었다. 한편, 현장실험을 통해 얻은 계측 값 중 반발경도 값은 슈미트헤머의 방수성능 문제로 현장실험에서 계측하지 못했으나, 수심 별 반발경도 값이 지상에서의 계측값과 같다고 가정하고, 지상에서 계측한 반발경도 값과 수심별 초음파속도를 기반으로 다중회귀분석을 통하여 복합 추정식을 도출하였다. 본 연구에서 도출한 복합 추정식과 기존 복합식으로 도출된 추정강

도 값의 실제 강도 상대오차율은 Table 5와 같다.

복합식을 기반으로 하는 강도 추정 정확도는 새롭게 도출된 Eq. (18)의 정확도가 가장 높았으며, 특히 초음파속도의 수심에 대한 보정이 이루어져 있기 때문에 수중에서의 활용성이 클 것으로 예측된다. 본 Eq. (18)의 경우 본 실험에 사용한 배합비의 콘크리트에 한정적으로 사용가능하지만, 향후 연구를 통해, 다양한 콘크리트

트를 대상으로 복합식을 도출하고 이를 데이터베이스화 한다면 수중 콘크리트 구조물의 강도 추정에 효과적인 방법이 될 것이라 기대한다.

5. 결론

본 연구에서는 수중 콘크리트 구조물의 효율적인 유지관리를 통한 비용절감 및 안전성 증대를 위해 콘크리트 비파괴검사 장비인 슈미트해머와 초음파센서를 수중화 하였으며 수중화한 비파괴검사 장비의 수중 현장 적용성과 수중 콘크리트 구조물의 강도 예측을 위해 진행되었고, 결과는 다음과 같다.

첫째, 현장실험 결과, 슈미트해머 방수케이스의 경우 공시체 타격 시 가해지는 반발력과 수압에 의해 방수성능이 취약한 것으로 나타났다. 따라서 슈미트해머의 초크부와 본체 부분이 일체형으로 이루어진 슈미트해머 방수케이스에 대한 연구 및 제작이 필요할 것으로 판단된다.

둘째, 초음파센서의 경우 현장실험에서 방수성능에는 문제가 없었으나, 해수의 화학적 성질로 인해 초음파센서 간에 전류가 흐르게 되면서 초음파속도에 교란이 일어났다. 따라서 해수에서 정상적인 초음파속도를 측정하기 위해 전류가 통하지 않는 방수케이스의 제작이 필요할 것으로 판단된다. 한편, 초음파센서에 전류가 흐르지 못하도록 절연테이프를 테이핑 한 후 수심별 초음파속도를 측정한 결과 수심이 깊어질수록 초음파속도가 느려지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수심이 깊어짐에 따라 받게 되는 수압의 영향으로 인해 초음파속도가 느려지게 되는 것을 알 수 있다.

셋째, 현장실험 결과를 토대로 회귀분석을 통하여 수심별 초음파속도 기반 강도 추정식과 반발경도와 수심별 초음파속도 기반 복합 강도 추정식을 도출할 수 있었다. 다중회귀분석을 통해 도출된 Eq. (18)은 다른 복합식들에 비해 가장 높은 정확도를 나타내고 있고, 특히 수심에 대한 보정이 이루어져 있어 수중에서의 활용성이 높을 것으로 판단된다.

넷째, 향후 활발히 개발되고 있는 수중 ROV에 본 연구에서 수중화한 슈미트해머와 초음파센서를 탑재시켜 수중 콘크리트 구조물의 진단에 활용한다면 노후화된 수중 콘크리트 구조물의 강도 관리 및 안전진단에 용이할 것으로 판단된다. 또한, 수중 ROV에 탑재된 수중 비파괴검사 장비를 통해 신뢰도 높은 수중 콘크리트 구조물의 상태진단과 자동화를 통한 상시감시를 이루어 온라인상

으로도 모니터링이 가능한 유비쿼터스 비파괴검사가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부의 U-City 석·박사과정 지원사업으로 지원되었습니다.

References

- Garlich, M. J. (1996). "Underwater non-destructive testing for bridge substructure evaluation." *proc. of Structural Materials Technology: An NDT Conference*, San diego, California, pp. 49-54.
- 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*, Vol. 27, No. 1, pp. 19-26 (in Korean).
- Hwang, I. S., Hong, S. D. and Kim, H. D. (2007). "Typhoon disaster and reconstruction in overseas." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 55, No. 10, pp. 103-110 (In Korean).
- Kim, S. M. (2011). *A study on the estimation of compressive strength of concrete by rebound hardness test*, M.S., YEUNGNAM Univ (in Korean).
- Lee, J. W., Oh, D. H., Kwak, S. K. and Kim, S. T. (2006). "Development of dry process caisson method for maintenance of submerged harbor structure." *Journal of the Korean Institute of Navigation and Port Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 447-455 (In Korean).
- Shin, E. S. (2014). *Compressive strength estimation technique of underwater concrete structures using both rebound hardness and ultrasonic pulse velocity*, M.S., Sungkyunkwan Univ (in Korean).
- Shin, E. S., Lee, J. S., Park, S. H. and Han, S. H. (2014). "Compressive strength estimation technique of underwater concrete structures using both rebound hardness and ultrasonic pulse velocity values." *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 18, No. 4, pp. 118-125 (In Korean).
- Smith, A. P. (1986). *Underwater nondestructive testing of concrete: an evaluation of technique*, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California.
- 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*, Vol. 15, No. 3, pp. 4-10 (In Korean).