

블루투스 기반 응결계 및 강도 추정계를 활용한 콘크리트 응결 및 초기 압축강도 추정

Estimation of Setting Time and Early Compressive Strength of Concrete Using Bluetooth-Based Setting and Strength Estimators

○인 요 한*
In, Yo-Han

정 지 만**
Jeong, Ji-Man

백 성 진**
Baek, Seong-Jin

이 강 산**
Lee, Kang-San

김 종***
Kim-Jong

한 민 철****
Han, Min-Cheol

Abstract

This study examined the applicability of a wireless communication-based estimator developed by the research team, which was integrated with a mobile application, for measuring the setting and early compressive strength of concrete. The analysis demonstrated that, when applied to early-stage quality control such as surface finishing and formwork removal, the wireless communication-based estimator provides high accuracy and ease of use, thereby enabling effective management of concrete setting and early-age strength.

키워드 : 무선통신, 응결, 압축강도, 애플리케이션, BSM, BSTM

Keywords : Wireless Communication, Setting, Compressive Strength, application, Bluetooth Setting time Meter, Bluetooth Strength Meter

1. 서론

1.1 연구의 목적

건설 현장에서는 콘크리트 타설 이후 응결 및 초기 압축강도 발현 시점이 공정 진행과 품질 확보에 중요한 영향을 미친다. 응결시간 측정은 콘크리트 표면 마감 시기 결정의 핵심 지표가 되며, 초기 압축강도 측정은 거푸집 해체 시기와 초기 동해 방지를 위해 5MPa 도달 시점을 확인하기 위해 필요하다. 그러나 KS 규정에서 제시하는 응결시간 측정 및 구조체 콘크리트 압축강도 확인 방법은 장비 사용의 비효율성과 현장 적용의 번거로움으로 인해 실무 초기 품질관리에서 어려움이 존재한다. 이에 따라 응결 및 초기 압축강도를 정량적으로 판단할 수 있는 자동화 기반 품질관리 기술의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존 연구결과를 바탕으로(Han., 2019). 개발된 무선통신 기반 애플리케이션을 활용하여, 콘크리트의 응결 및 압축강도를 KS 측정 장비와 본 연구팀에서 개발한 BSM(Bluetooth Setting time Meter; 이하 BSM으로 칭함) 및 BSTM(Bluetooth Strength Meter; 이하 BSTM 으로 칭함)과 비교 분석함으로써 효율적인 품질관리 방법을 제안하고자 한다.

2. 이론적고찰

2.1 추정계 개발과정

본 연구에서의 BSM 및 BSTM은 기존 고무경도계 기반 장비의 한계, 즉 시멘트 페이스트 유입으로 인한 장비 손상 문제와 콘크리트 전용 장비로의 부적합성 등을 해결하기 위해 총 4단계의 개발 과정을 거쳐 완성되었다.

1단계	측정침 봉형상 연구	기존의 고무경도계 측정침 사용시 시멘트 페이스트 유입으로 인한 기기고장을 유발하여, 시멘트 페이스트 유입을 방지하고자 원기둥 형태의 침상을 개발함.
-----	------------------	--



a) 반구형



b) 침상형



c) 원기둥형

* 청주대 대학원 석사과정

** 청주대 대학원 박사과정

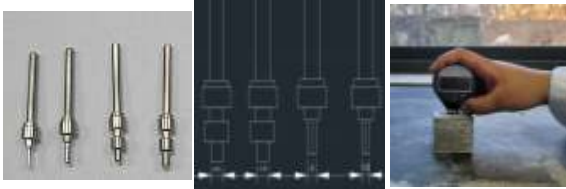
*** 청주대 건축공학과 조교수, 공학박사

**** 청주대 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural
Engineering, Cheongju University, dygks7422@naver.com)

이 논문은 2025~2026년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것임.

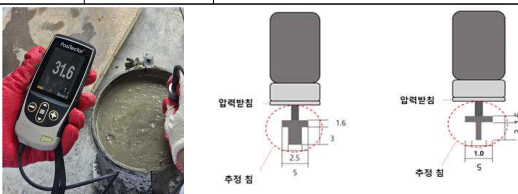
2단계	추정침 직경 연구	원기둥 형태의 측정침 개발 이후 응결 및 강도를 추정하기 위하여 Ø 1.5, 2.0, 2.38, 2.83mm 직경의 추정침을 개발 하였으며, Ø 1.5mm 및 2.0mm의 추정침을 채택하였고, 이를 모르타르 영역에서 실험함.
-----	-----------------	--



3단계	콘크리트 응결 및 압축강도 측정 추정계 개발	콘크리트 경화에 미치는 영향인자를 선별한 후 응결 및 초기강도 측정사항에 최적화된 스프링 type 선정 및 추정침 직경을 개발하고 자 Ø 5.0, 1.0, 1.5, 2.0 mm 추정침 직경에 따라 콘크리트 영역에서 실험을 실시함.
-----	---	--



4단계	무선통신 기반 콘크리트 응결 및 압축강도 추정계 개발	최종 개발된 BSM($\varnothing 2.5\text{mm}$), BSTM($\varnothing 1.0\text{ mm}$)은 원기둥형 침상을 이용해 콘크리트 또는 모르타르 표면의 경도값을 측정함으로써 응결 경향을 추정할 수 있도록 설계되었다. 해당 기기는 HD값 기준 0~110의 측정 범위를 가지며, 이를 통해 응결 및 강도상태를 정량적으로 판단할 수 있다. 또한, 무선통신 기능과 애플리케이션 연동을 통해 실시간 측정값 확인, 자동 저장, 데이터 추출이 가능하며, 기존 KS장비의 한계를 보완한 현장 중심의 실시간 응결 및 압축강도 추정 기기이다.
-----	---	---



2.2 무선통신 기반 애플리케이션

무선통신 기반 추정계는 사진 1과 같이 애플리케이션과 연동되어, 측정된 경도값을 실시간으로 확인하고 저장할 수 있는 디지털 플랫폼을 제공한다.

해당 애플리케이션은 Bluetooth 통신을 기반으로 작동하며, 자동 데이터 저장, 그래프 기반 시각화, 파일 변환 등 다양한 기능을 지원한다.

특히, 현장 관리자는 모든 콘크리트 타설 구간의 응결 및 강도 상태를 실시간으로 확인하기 어렵기 때문에, 이 애플리케이션은 현장 작업자가 측정한 데이터를 실시간으로 공유 및 저장함으로써 응결 및 초기강도 상태에 따른 후속 공정 결정에 대한 대응력과 정확성을 크게 향상시킬 수 있다.

또한, 애플리케이션을 통해 수집된 데이터는 사진 2와 같이 추후 품질관리 기록으로 활용 가능하며, 공정 중 발생할 수 있는 응결 지연, 과도한 초기 건조, 블리딩 등의 문제를 사전에 인지하고 적절한 표면 마감 시점을 설정하는 데 유용하다.

이와 같이, 본 연구진에서 개발한 애플리케이션은 정량적 응결 데이터 기반의 현장 의사결정을 지원함으로써, 콘크리트 시공 품질의 표준화 및 자동화된 관리체계 구축에 기여할 수 있다.

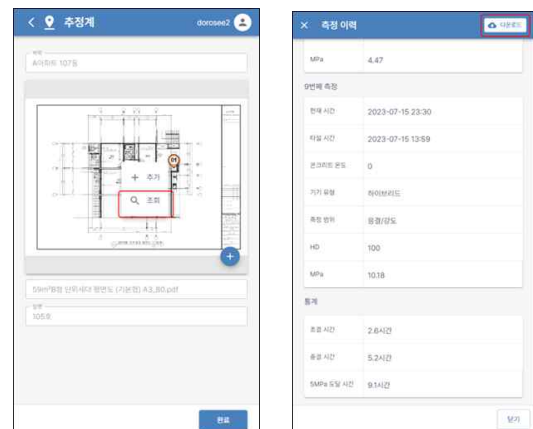


사진 1. 애플리케이션

국정개요					
2023년 기준 1월 18일 기준					
1. 행정동	신정1동·신정2동	2. 지명	신정동		
3. 법정동	신정동	4. 면적(㎡)	2023-01-18 15.99		
5. 인구 (주민등록인구)	8,811	6. 세대수(세대)	2023-01-18 18,328		
7. 총세대수(세대)	8,811	7. 총세대수(세대)	2023-01-18 22,447		
7-1. 아파트 세대수(세대)	-	8. 아파트세대비율(%)	1.00		

사진 2. 애플리케이션을 통해 측정된
데이터를 파일로 확인한 모습

3. 실험 계획 및 방법

본 연구의 실험 계획은 표 1과 같고, 콘크리트의 물리적 특성을 고려하여 무선통신 추정계의 침의 직경은 $\varnothing$ 2.5mm 및 1.0 mm 2수준으로 하였으며, 보다 효율적인 초기 품질 관리 방법을 평가하기 위하여 무선통신 추정계를 본 연구진에서 개발한 애플리케이션과 연동하여 실험을 진행하였다.

양생 온도 조건은 5℃, 20℃ 및 35℃ 총 3수준에서 각각 실험을 진행하는 것으로 계획하였다. 먼저, 응결시간은 Proctor 관입저항시험기와 BSM의 관입저항치 및 경도값을 측정하여 분석하고, 초기 압축강도는 거푸집 탈형시기 및 한중 콘크리트 초기동해 방지 기준 5 MPa를 확인하기 위하여 만능재료시험기(UTM)와 BSTM의 측정값과 경도값을 비교하여 평가하였다. 무선통신 추정계 측정 오차를 줄이기 위해 5회 반복 측정 후 평균 경도값(HD)을 사용하였으며, 그 외의 실험은 KS 방법에 의거하여 진행하였다.

표 1. 실험계획

실험요인		실험수준		
배합 사항	슬럼프 (mm)	1	• 180 ± 25	
	공기량 (%)		• 4.5 ± 1.5	
	W/C (%)		• 45	
	결합재 조성비(%)		• OPC 100	
	양생온도(℃)	3	• 5	• 20 • 35
실험 사항	굳지않은 콘크리트	2	• 슬럼프 • 공기량	
	응결시간	2	• Proctor 관입저항시험기 • BSM ($\varnothing$ 2.5 mm) ¹⁾	
	압축강도		• 만능재료시험기(UTM) • BSTM ($\varnothing$ 1.0 mm) ²⁾	

1) Bluetooth Setting time Meter 2) Bluetooth Strength Meter

4. 실험결과 및 분석

4.1 양생온도 변화에 따른 관입저항치 및 BSM 경도치

양생온도 변화에 따른 콘크리트의 응결 시간은 습식 체가름한 모르타르 상태에서 측정하였다. 그림 1은 양생온도별 경과시간에 따른 Proctor 관입저항치를 나타낸 것이며, 표 2는 양생온도별 초결 및 종결시간을 나타낸 것이다. 당연한 결과로 35℃, 20℃ 및 5℃ 순으로 응결시간 속도가 빨라지는 것을 확인하였다. 이는 양생 온도가 올라감에 따라 수화반응이 빨라져서 응결 속도가 증가된 것으로 판단된다.

표 2. 양생온도 변화에 따른 초결 및 종결시간

양생온도 (℃)	시간 (hr)	
	초결	종결
5	12.1	16.8
20	7.6	10.2
35	4.9	6.7

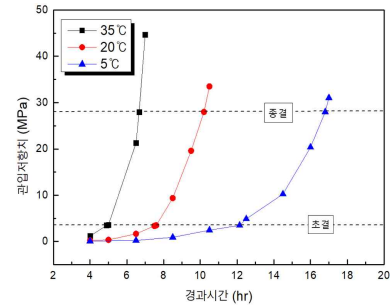


그림 1. 경과시간에 따른 관입저항치 변화

그림 2는 양생온도별 경과시간에 따른 BSM 경도치를 나타낸 것이며, 표 3은 양생온도별 초결 및 종결 시 BSM 경도치를 나타낸 것이다. 양생온도 변화와 관계 없이 BSM은 Proctor 관입저항치의 초결 및 종결 시점에 일정한 경도치 경향을 확인하였다.

표 3. 양생온도 변화에 따른 초결 및 종결시 BSM 경도치

양생온도 (℃)	경도 (HD)	
	초결	종결
5	42.6	78.8
20	43.7	89.8
35	44.4	78.0

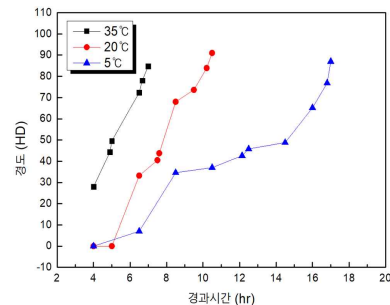


그림 2. 경과시간에 따른 BSM 변화

그림 3은 양생온도 변화조건에서 Proctor 관입저항치와 BSM 측정 경도치간의 상관관계를 나타낸 것이다. 양생온도 변화에 따른 BSM의 결정계수는 0.9로 나타났으며, 실 측정값으로는 43HD 전후일때 초결, 82HD 전후의 값을 활용하면 초결 및 종결시간 판정에 용이하게 사용될 것으로 판단된다.

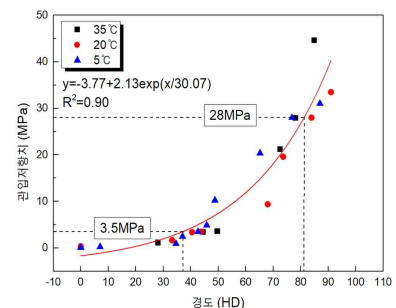


그림 3. BSM 경도치와 Proctor 관입저항치의 상관관계

4.2 양생온도 변화에 따른 만능재료시험기 및 BSTM 경도치

표 4 및 그림 4는 양생온도별 경과시간에 따른 압축강도 5MPa 도달시간을 나타낸 것이다. 당연한 결과로 35℃, 20℃ 및 5℃ 순으로 압축강도 발현 속도가 빨라지는 것을 확인하였다. 이는 양생 온도가 올라감에 따라 수화반응이 빨라져서 강도 발현 속도가 증가된 것으로 판단된다.

표 4. 양생온도 변화에 따른 5MPa 도달시간

양생온도 (℃)	5MPa 도달시간 (hr)
5	36.8
20	14.5
35	9.38

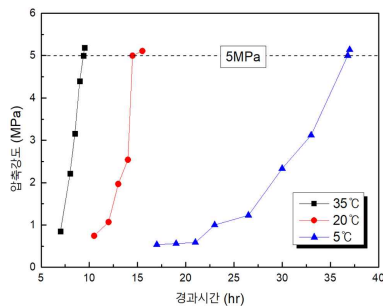


그림 4. 경과시간에 따른 만능재료시험기 변화

그림 5는 양생온도별 경과시간에 따른 BSTM의 경도치를 나타낸 것이고, 표 5는 양생온도별 5MPa 도달시점 BSTM 경도치를 나타낸 것이다. 양생온도 변화와 관계 없이 BSTM은 만능재료시험기의 5MPa 도달 시점에 일정한 경도치 경향을 확인하였다.

표 5. 양생온도 변화에 따른 초결 및 종결시 BSTM 경도치

양생온도 (℃)	경도 (HD)
5	99.6
20	95.6
35	99.1

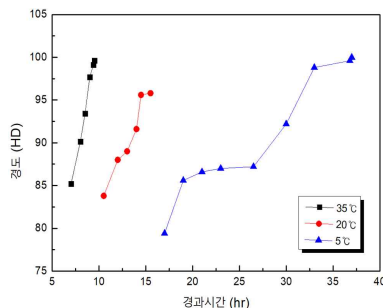


그림 5. 경과시간에 따른 BSTM 변화

그림 6은 양생온도 변화조건에서 만능재료시험기와

BSTM 측정 경도치간의 상관관계를 나타낸 것이다. 양생온도 변화에 따른 BSTM의 결정계수는 0.84로 나타났으며, 실 측정값으로는 99HD 전후일때 값을 활용하면 5MPa 도달시간 판정에 용이하게 사용될 것으로 판단된다.

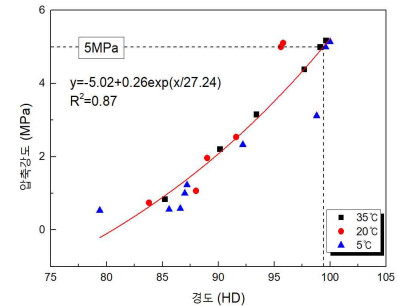


그림 6. BSTM 경도치와 만능재료시험기의 상관관계

5. 결론

본 연구에서는 효율적인 초기 품질 관리 방법을 평가하기 위하여 무선통신 기반 추정계를 애플리케이션과 연동 후 양생온도 변화에 따라서 BSM 및 BSTM을 기존 측정 장비와 상호비교하여 분석하였는데, BSM 및 BSTM 모두 KS 기준 측정장비와 비교하였을 때 회귀분석한 결정계수 (R^2)값이 각각 0.9, 0.89로 높은 상관성을 확인하였다.

이상을 종합하면 무선통신 추정계(BSM 및 BSTM)가 현장 적용에 용이하고 신뢰성 있는 효율적인 품질 관리 방안으로 활용 가능한 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. 한민철, 한인덕, 신용섭. 고무경도계를 이용한 콘크리트의 응결시간 추정 가능성 분석. 한국건설순환자원학회 논문집 Vol.7 No.4 [2019] p.358-366
2. 한수환, 백성진, 한준희, 김종, 한민철. 응결시간 측정횟수 변화에 따른 하이브리드 추정계 경도치의 영향분석. 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표대회 2022년도 논문집 제26권 1호 통권 49권 p.78
3. 박재웅, 정준택, 임군수, 한준희, 김종, 한민철. AI 기반 콘크리트 마감 자동화 시스템용 응결추정계의 물시멘트비에 따른 응결 추정 평가. 한국 건축시공학회 가을학술발표대회 2023년도 논문집 제23권 2호, 통권 제 45집 p.17-18
4. 박재웅, 정준택, 백성진, 임군수, 김종, 한민철. Measurement Box에 탑재된 콘크리트 응결추정계의 현장 적용. 한국 건축시공학회 가을학술발표대회 2024년도 논문집 제24권 2호, 통권 제47집 p.193-194