히팅슬립폼을 적용한 수직구 구조물의 상승속도에 관한 연구

고엄식[1*] · 이상훈[2] · 박종필[3] · 지광습[4] · 김창용[5]

[1]정회원, 주식회사 네오시티 대표이사, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정
[2]비회원, 주식회사 네오시티 차장
[3]비회원, 주식회사 네오시티 대리
[4]비회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 정교수
[5]정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

A study on the slip-up speed of a shaft using heating slip form

Eomsik Ko[1*] · Sanghun Lee[2] · Jongpil Park[3] · Goangseup Zi[4] · Changyong Kim[5]

[1]CEO, Neocity Co., Ltd., Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University
[2]General Engineer, Neocity Co., Ltd.
[3]General Engineer, Neocity Co., Ltd.
[4]Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University
[5]Senior Research Fellow, Korea Institute of Construction and Building Technology

***Corresponding Author :** Eomsik Ko, kosan007@neocity.co.kr

Abstract

Slip form method is applied to many cases of a shaft these days because it is safer, more economical and faster than cast-in-place method. Slip-up height of the method is approximately 2.5 to 4.0 m/day. If the temperature of concrete is outside the range of 10 to 30°C, the effects of changes in strength or elastic characteristics are significant. Therefore, it is difficult for slip-up speed to be higher than 3 m/day during winter construction. In addition, concrete has heat caused by hydration, which causes temperature cracking of hardened concrete. Therefore, temperature control of concrete curing is necessary for the continuous slip-up of slip form. In this study, the rebound hardness, time of ultrasonic waves propagation, heat of hydration, and external temperature are measured by developing heating panels and test devices for the continuous slip-up. Based on this, heating slip form is manufactured; this was applied to “Kimpo sites” and “Sinwol sites”. The compared slip-up speed samples were 1.9 m/day or 0.200 m/hr on average at Gimpo sites (08:00~17:30) and 2.0 m/day or 0.210 m/hr at Sinwol sites.

Keywords: Shaft, Slip form method, Temperature crack, Heating slip form, Slip-up speed

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(6)811-823(2019)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.6.811

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received September 4, 2019
Revised October 4, 2019
Accepted October 8, 2019

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

최근에는 수직구 구조물 시공방법으로 현장타설 공법 대비 시공속도가 빠르며, 안전하고 경제적인 연속상승 슬립폼 공법이 다수의 현장에 적용되고 있다. 슬립폼 공법으로 시공 가능한 높이는 2.5~4 m/day로 알려져 있는데, 콘크리트 온도가 10~30°C의 범위 밖에서는 강도 변화나 탄성 특성의 변화에 미치는 영향이 크므로 동절기 공사에서는 3 m/day 이상의 시공속도를 내기가 어렵다. 또한, 콘크리트는 수화 작용으로 인해 수화열이 발생하는데, 이는 콘크리트의 온도 균열을 초래한다. 따라서 슬립폼 연속상승시 콘크리트의 온도 제어 양생이 필요하며, 본 연구에서는 히팅 패널 및 시험용 연속상승 장치를 개발하여 반발경도, 초음파 전파시간, 수화열 및 외부온도를 측정하였다. 이를 기반으로 히팅슬립폼을 제작하였으며, "김포 현장"과 "신월 현장"에 히팅슬립폼을 적용하였다. 김포현장은 주간(08:00~17:30) 평균 1.9 m/day 또는 0.200 m/hr, 신월 현장은 2.0 m/day 또는 0.210 m/hr를 목표 상승속도 값으로 비교하였다.

주요어: 수직구, 슬립폼 공법, 온도 균열, 히팅슬립폼, 상승속도

1. 서 론

최근 국내 도심지 수직구 구조물은 급기 및 배기구, 대피통로 계단, 엘리베이터, 배전시설, 신호통신설비, 유지관리 시설 등(Shin et al., 2019)을 포함한 복잡한 구조물로 접속 터널의 시공에 따른 도심지 전체 공사기간이 매우 부족한 것이 현실이다. 또한 국내 도심지 수직환기구는 지하철도와 지하도로에 건설 또는 계획 중에 있으며(Lee and Moon, 2016), 지하 심도가 40~100 m에 이르는 수직구와 본선 터널 연결 횡갱 접속부 시공에 따른 어려운 공정을 보다 효과적인 공기단축, 원가절감, 품질 및 안전성 확보를 위해 다양한 기술개발 연구가 이루어지고 있다.

이러한 도심지 수직구의 기존공법을 개선하여 슬립폼 공법, 조립식 철제 계단 및 PC 슬래브를 사용한 공법은 기존 현장타설 공법보다 공기가 대폭 단축할 수 있다(Ko and Shin, 2015). 특히 슬립폼 공법의 경제성은 슬립폼 시스템의 상승 속도를 빠르고 적절하게 유지하는데 달려있다(Kim et al., 2012). 현재까지 슬립폼 공법으로 시공 가능한 높이는 2.5~4 m/day 정도(Korea Occupational Safety & Health Agency, 2011)로 알려져 있는데, 콘크리트 온도가 10~30°C (Korean Agency for Technology and Standards, 2008)의 범위 밖에서는 강도 변화나 탄성 특성의 변화에 미치는 영향이 크므로 동절기 공사에서는 3 m/day 이상의 시공속도를 내기 어렵다. 따라서 콘크리트는 경화가 충분히 진행될 때까지 경화에 필요한 온도조건을 유지하여 저온, 고온, 급격한 온도 변화 등에 의한 유해한 영향을 받지 않도록 필요에 따라 온도제어 양생을 실시하여야 한다. 온도제어 양생을 실시할 경우에는 온도제어방법, 양생 기간 및 관리방법에 대하여 콘크리트의 강도 및 배합 성분, 구조물의 형상 및 치수, 시공 방법 및 환경조건을 종합적으로 고려하여 적절히 정하여야 한다(Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2016).

콘크리트의 고온 양생은 저온 양생보다 초기강도는 높고 장기강도는 낮아진다. 이러한 고온이력을 경험한 경우에는 부재내부와 표면부의 온도차, 최고온도로부터 외기온과 평행할 때까지의 온도 강하량이 원인이 되어 온도응력이 잔류하고 콘크리트 내에 미세한 균열을 발생시켜, 콘크리트의 내구성능 저하와 공용수명의 단축을 초

래한다(Kim et al., 1998; Ko et al., 1998; Min et al., 2009).

온도제어방법은 초기재령에서 콘크리트 강도가 매우 중요한데, 양생초기 소요강도가 발현되지 않은 상태에서 거푸집을 탈형하거나, 동바리를 제거하였을 경우 구조물이 붕괴하는 등 심각한 문제가 발생할 수 있기 때문이다(Koh et al., 2014). 콘크리트의 강도 발현을 평가하기 위한 가장 근본적인 이론은 성숙도 이론으로 콘크리트의 강도 발현에 영향을 미치는 인자는 양생 시간 및 온도로 정의된다(Carino and Lew, 2001). 따라서 적정 온도를 유지할 수 있는 온도 제어 시스템이 요구되며, 본 연구에서는 시공속도 향상을 고려하여 경제성이 양호하고 시공성이 우수한 온도 제어 시스템에 관한 연구를 수행하였다.

2. 히팅슬립폼의 개요

기존 온도 제어 장치의 시공방법은 크게 콘크리트 라이닝용 강재 거푸집 내부에 온도 제어 장치를 설치한 현장 타설 방식(당진-대전 고속도로공사, 수원 R5 프로젝트 등), 전열선을 콘크리트 구조물 내부 철근에 부착한 방식, 그리고 온수 배관을 사용한 방식이 있다. 또한 최근 한국철도기술연구원에서 마이크로웨이브를 이용한 콘크리트 양생용 균일한 발열 시스템 및 이를 이용한 콘크리트 구조물의 시공방법을 제안하였다(Koh et al., 2014).

슬립폼의 일반적인 시공속도는 공사시기, 작업환경, 근로자 숙련도, 레미콘 및 자재 운반 등에 따라 다소 차이가 있지만, 보통 2.5~4.0 m/day 정도이다. 본 연구에서 개발한 히팅슬립폼은 저온 콘크리트의 양생 강도를 조기에 발현하고 연속상승 슬립폼의 시공속도를 1일(주·야간) 4 m 이상 달성하여 기존 일반 슬립폼 대비 공사 기간 단축과 더불어 경제적인 시공법으로 개발하기 위한 목적이 있다. 그러나 현재 대부분의 레미콘 공급업체는 08시에서 17시 까지만 공급하기 때문에 레미콘 운송시간을 고려시 08시 30분 전후에 콘크리트 타설을 시작하여 17시 전후에 콘크리트 공급이 완료되어 대부분의 소규모 구조물 현장에서는 주·야 공급이 어려운 실정이다. 따라서 주간작업(08:00~17:30, 일 9.5시간) 기준으로 김포 현장[1]의 상승속도는 1.9 m, 신월 현장[2]은 2.0 m를 목표 상승속도 값으로 정하였다.

Fig. 1은 개발된 히팅슬립폼의 단면도이다. 상부 작업공간(3층)은 철근(수직 + 수평) 조립, 자재 적재, 잭로드를 조립을 할 수 있으며, 콘크리트 호퍼(hopper) 및 펌프카 장비를 사용하여 레미콘을 공급한다. 또한, 상부작업대에는 안전 난간대가 설치되어 있다. 중간 작업공간(2층)에서 수평철근 조립과 콘크리트 타설 작업이 이루어지며, 중간작업대 하부의 거푸집 마감면에 히팅슬립폼 부착면이 있다. 히팅슬립폼의 상승용 유압장치는 중간작업 내의 콘크리트 구조물 연속상승용 유압잭이 설치된 Yoke에 연결되며, 중간작업대 중앙에 위치한 분전반까지는 중간작업대 천정부를 통하여 연결된다. 하부 작업공간(1층)은 콘크리트 노출면의 마감과 브래킷 설치 작업이 가능하다.

1) Kimpo city railway 5 project (#25) the shaft construction (2017)
2) Sinwol rainwater impound drainage facility; maintenance the shaft construction (2018)

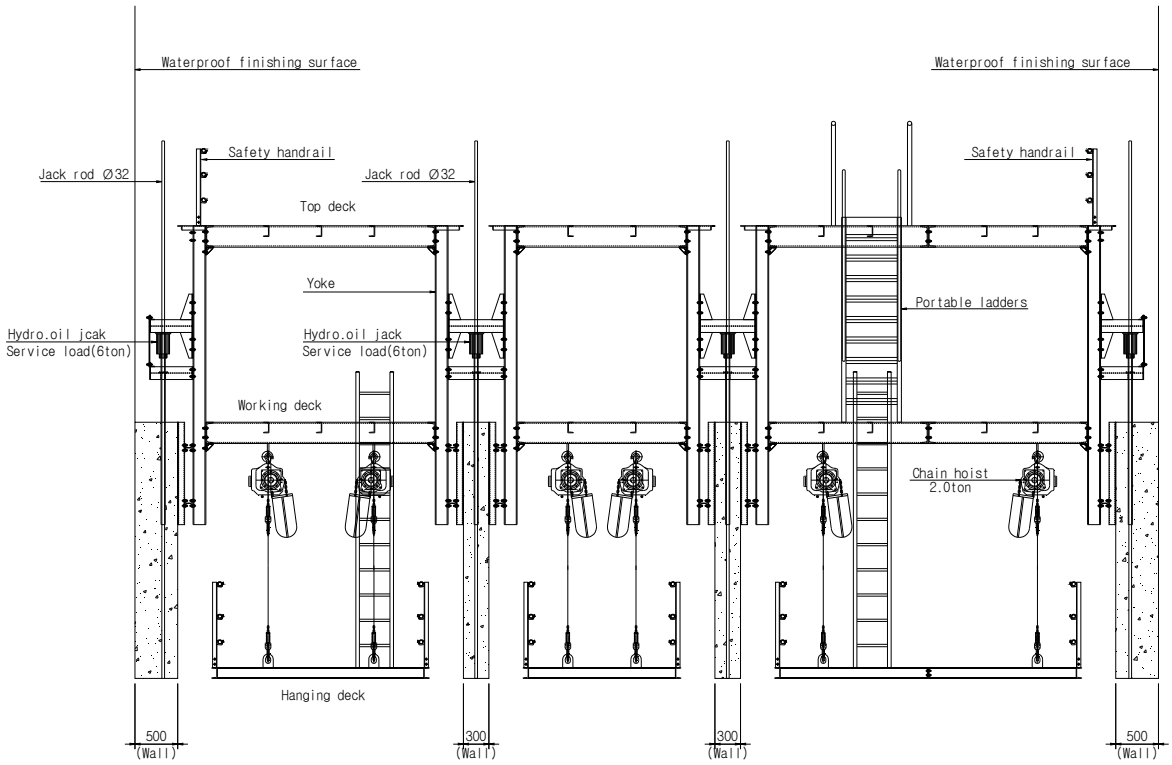


Fig. 1. Standard sectional view of the shaft using heating slip form

3. 히팅슬립폼 제작 및 시험

3.1 히팅 패널 및 시험용 연속상승 장치

기존의 히팅시스템(거푸집 및 양생장치)은 정상 히팅이 이루어지지 않는 경우, 히팅시스템의 이상유무를 파악하기가 매우 힘들다. 특히 발열 거푸집은 거푸집 판재와 발열구조체가 일체로 결합된 구성으로 일반 거푸집과 별도로 제작되어야 하므로 비용 및 관리 측면에서 부담이 크고 구역별로 온도제어가 불가능하므로 효율적인 히팅이 이루어지지 못함으로써 경화 속도가 느리고 불필요한 전력의 사용이 증가된다. 또한 정상 히팅이 이루어지지 않는 경우 고장 위치와 고장시기를 파악하기가 매우 힘들다는 문제가 있다.

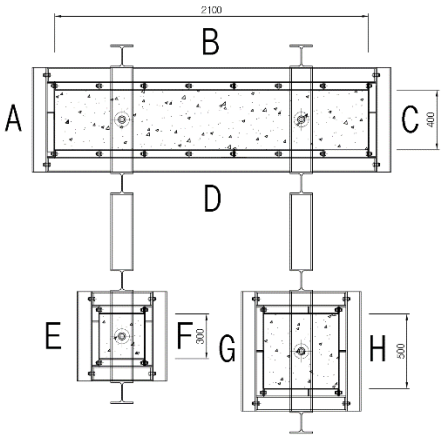
본 연구를 통해 제작된 히팅 패널은 콘크리트 벽체의 양생을 면상발열체를 사용하여 균일한 콘크리트의 양생과 온도 제어 시공이 가능하다. 또한, 거푸집에 탈부착이 가능하도록 제작되어 정비가 간편하고 유지관리 비용이 적게 소요되는 장점이 있다(Fig. 2).

(a) Heating panel 3D modeling

(b) Heating panel sample

Fig. 2. Heating panel 3D modeling and sample

Fig. 3은 히팅슬립폼 부분 시험용 도면 및 시험체로 연속상승 장치이며, 반발경도, 초음파 전파시간, 수화열 및 외부온도를 측정할 수 있도록 제작하였다.



(a) Plan

(b) Test specimen

Fig. 3. Plan and test specimen for the partial test of heating slip form

3.2 온도에 따른 히팅 패널의 강도시험 결과

Table 1은 시험체 A~H까지의 데이터의 평균값을 정리한 것이다. 시험 방법으로는 KS A 0511 (온도 측정 방법 통칙), KS F 2730 (콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발경도 시험방법), KS F 2731 (콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스 속도 시험방법)을 준수하여 시험을 진행하였다.

Table 1. Average value of the heating panel quality test data

Test specimen	Surface temperature (°C)	Heat of hydration (cal/g)	Compressive strength (MPa)	Time of ultrasonic waves propagation (μs)
A	15.9	21.2	1.6	47.0
B	20.0	-	2.2	47.5
C	17.6	18.9	1.9	46.3
D	18.5	-	2.0	48.3
E	12.0	5.3	1.0	47.5
F	9.5	-	1.2	47.4
G	14.8	-	1.5	48.7
H	15.8	19.5	1.5	44.8
Test method	KS A 0511 (2005)		KS F 2730 (2008)	KS F 2731 (2008)

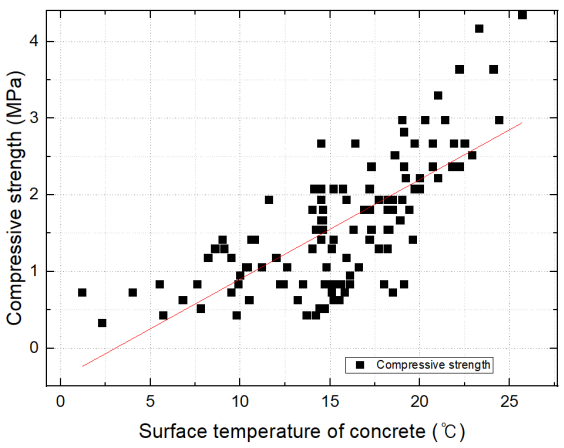
시험에 사용한 장비로 Fig. 4(a)는 P사의 Schmidt OS-120 모델로 반발경도 측정기, Fig. 4(b)는 A사의 UK1401 모델로 초음파 전달시간 및 속도 측정기, Fig. 4(c)는 F사의 IR-803 모델로 적외선 온도계를 사용하여 측정하였다.

(a) SCHMIDT OS-120 (b) Ultrasonic tester UK1401 (c) IR-803

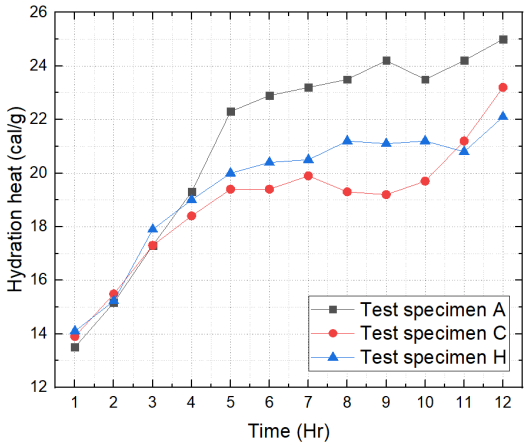
Fig. 4. Heating panel measuring equipment

Reichverger and Jaegermann (1980)은 슬립폼 공법의 경우 콘크리트의 초기강도가 0.1~ 0.2 MPa 이상일 때 거푸집의 탈형이 이루지면 상대적으로 변형이 작다는 실험결과를 제시하였다. Fig. 5(a)는 온도에 따른 압축강도를 나타내며, 본 연구 데이터의 산출식은 식 (1)과 같다. 여기서 x는 콘크리트의 표면온도를 의미한다. 대체적으로 콘크리트의 표면온도가 상승할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈으며, 최소 압축강도가 0.33 MPa로써 초기강도를 모두 만족하였다.

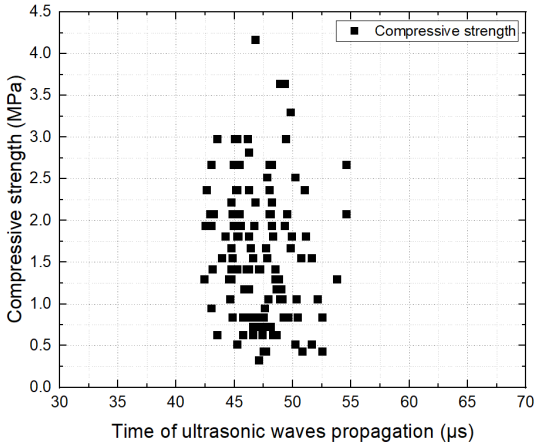
$$y = -0.39484 + 0.12977x \tag{1}$$



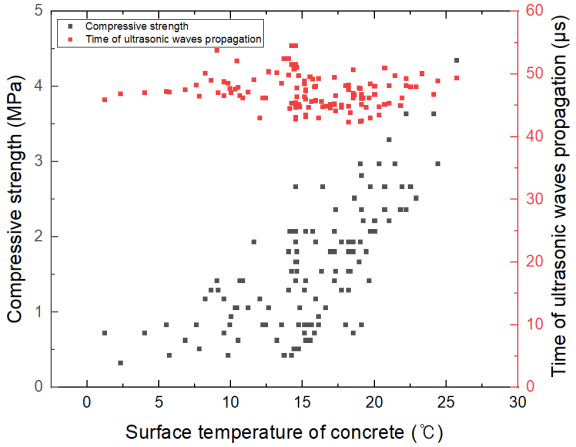
(a) Compressive strength according to temperature



(b) Change of heat of hydration according to time



(c) Compressive strength according to ultrasonic waves propagation time



(d) Compressive strength and ultrasonic waves propagation time according to temperature

Fig. 5. Result of continuous slip-up test

Fig. 5(b)는 타설 후 시간에 따른 수화열 변화이며, 시험체 A, C, H의 1시간 후 수화열은 13.5~14.1 cal/g이며, 12시간 후에는 22.1~25.0 cal/g로 나타났다. 타설 후 4시간까지는 비슷한 거동으로 수화열이 상승하였으며, 이후에는 시험체마다 미세한 거동의 차이를 보였다. 이는 타설 강도 및 높이, 시험체의 크기, 작업조건 등 여러 가지 변수가 작용한 것으로 판단된다. 참고로, 시험체 E의 경우 데이터의 손실로 도시하지 않았음을 밝힌다.

Fig. 5(c)는 초음파 전파 시간과 압축강도의 관계를 나타내며, 본 연구에서는 콘크리트의 초기강도에서 초음파 전파시간의 범위는 42.0~54.6 μs임을 확인하였다. 이를 속도로 환산하면 UK1401 장비의 센서간 거리가 150 mm이므로 속도는 3,080~3,348 m/s이며, 콘크리트의 초음파 속도 범위인 2,000~5,400 m/s을 만족한다(Ultrasonic tester UK1401. User manual). 그러나 초음파 측정을 통해 초음파 시간 및 속도의 범위는 확인할 수 있었으나, 초음파 전파시간과 압축강도의 명확한 상관관계는 규명할 수 없었다.

Fig. 5(d)는 표면온도와 초음파 전파 시간 및 압축강도의 관계를 나타내며, 온도가 상승하면 압축강도는 증가하였으며, 초음파 전파 시간은 앞서 언급한대로 초기강도에서는 일정한 범위 내에 존재함을 확인하였다.

콘크리트의 초기강도는 온도가 상승할수록 증가하는 경향을 보이므로 장기강도에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 온도를 증가시키면 시공속도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 히팅슬립폼 제작

히팅슬립폼을 콘크리트 구조물의 규격별로 구분 및 분리하여 부분 제작시험을 진행한 결과, 적절한 온도제어 양생은 콘크리트의 초기강도에 영향을 미치고 슬립폼 상승속도에 중요한 부분임을 알 수 있었다. 이를 토대로 열전달 속도를 증진하는 콘크리트면 접촉부 히팅패널을 아연도금강판을 사용하여 히팅슬립폼을 제작하였다. Fig. 6은 제작된 히팅장치의 시공 및 코팅 작업 전경이다.

(a) Construction of heating system (b) Coating of heating system

Fig. 6. Complete view of the heating system

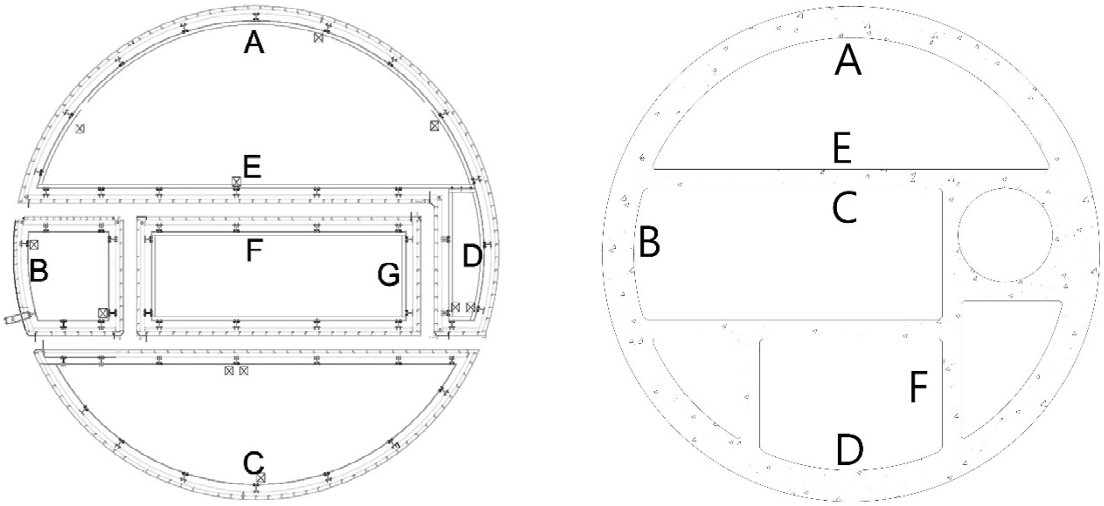
4. 현장적용을 통한 히팅슬립폼 성능 검증

4.1 시공속도 측정 및 분석

시제품의 현장 적용을 위해 "김포 현장"과 "신월 현장"에 히팅슬립폼을 적용하였다. 김포 현장은 높이 65.8 m, 내경 11 m, 외경 12 m이며, 신월 현장은 높이 48.7 m, 외경 7.9 m, 내경 6.3 m이다.

히팅장치를 적용한 히팅슬립폼의 현장적용 시 시공속도를 확인하기 위하여 임의의 연속된 날짜를 선택하여 상승 높이를 분석하였다. Fig. 7은 각 현장별 측정 위치를 나타내며, Table 2는 임의의 연속된 날짜에 대한 측정위치별 평균온도, 슬립폼 상승 속도 및 높이이다. 벽체두께는 300 mm이며, 누적타설 길이의 경우 김포현장은 61.4 m, 신월현장은 46.7 m이다. 시공 이음부에는 지수재를 설치하여 누수를 방지하였으며, 데이터 측정은 타설, 철근조

립 및 유압작동, 하부면 마감 등의 작업시간을 감안하여 1시간 30분 단위로 총 7회 측정하였고 레미콘 운송시간을 고려하여 주간작업(08:00~17:30, 일 9.5시간)을 진행하였다.



(a) Measuring location of the "Kimpo" site (b) Measuring location of the "Sinwol" site

Fig. 7. Temperature and strength measurement location according to slip-up

Table 2. Data according to slip-up of heating slip form

Days (day)	Average temperature by measurement location (°C)		Elevation height (m)		Slip-up speed (m/hr)	
	Kimpo	Sinwol	Kimpo	Sinwol	Kimpo	Sinwol
1	18.1	21.3	2.0	1.5	0.211	0.158
2	12.8	20.9	2.0	1.2	0.211	0.126
3	12.8	21.8	1.6	1.6	0.168	0.168
4	12.2	27.3	1.6	1.9	0.2	0.200
5	17.1	28.4	1.9	1.9	0.211	0.200
6	21.3	28.4	2.0	2.0	0.200	0.211
7	13.3	28.3	1.9	2.0	0.200	0.211
8	19.2	28.2	1.9	2.1	0.179	0.221
9	20.1	32.2	1.7	2.1	0.189	0.221
10	21.7	32.8	1.8	2.1	0.189	0.221
11	17.4	32.7	1.8	2.2	0.211	0.232
12	21.8	33.2	2.0	2.2	0.189	0.232
13	22.5	33.6	1.8	2.2	0.211	0.232

Table 2. Data according to slip-up of heating slip form (continue)

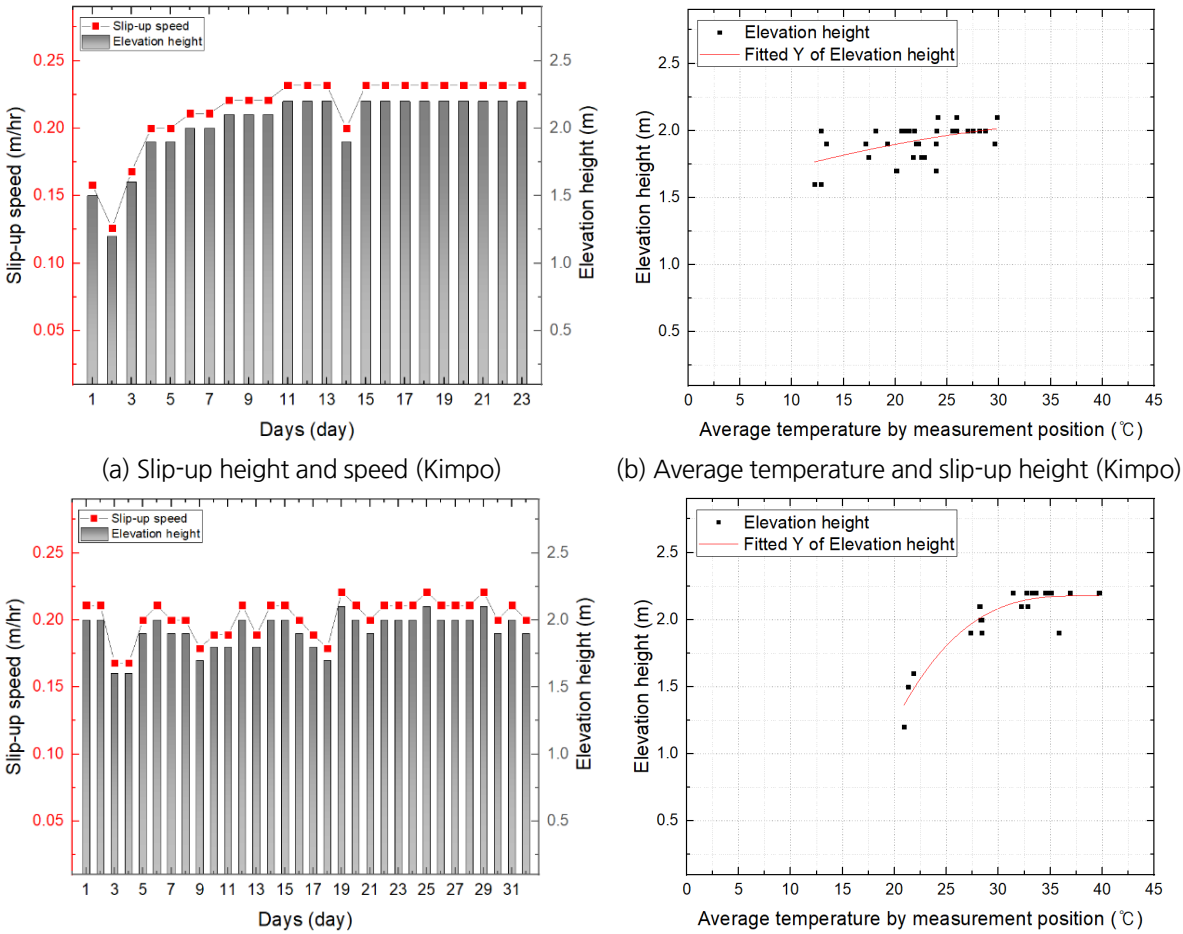
Days (day)	Average temperature by measurement location (°C)		Elevation height (m)		Slip-up speed (m/hr)	
	Kimpo	Sinwol	Kimpo	Sinwol	Kimpo	Sinwol
14	20.6	35.8	2.0	1.9	0.211	0.200
15	20.8	39.7	2.0	2.2	0.200	0.232
16	23.9	36.9	1.9	2.2	0.189	0.232
17	22.8	34.9	1.8	2.2	0.179	0.232
18	23.9	34.5	1.7	2.2	0.221	0.232
19	29.8	34.6	2.1	2.2	0.211	0.232
20	28.1	35.0	2.0	2.2	0.200	0.232
21	29.6	31.4	1.9	2.2	0.211	0.232
22	27.0	35.0	2.0	2.2	0.211	0.232
23	27.5	35.1	2.0	2.2	0.211	0.232
24	28.7		2.0		0.221	
25	25.9		2.1		0.211	
26	24		2.0		0.211	
27	25.5		2.0		0.211	
28	25.9		2.0		0.211	
29	24.1		2.1		0.221	
30	22.0		1.9		0.200	
31	21.1		2.0		0.211	
32	22.2		1.9		0.200	

주간 타설시 김포 현장은 1.9 m/day 또는 0.200 m/hr, 신월 현장은 2.0 m/day 또는 0.210 m/hr를 목표 상승속도 값으로 비교하였다.

각 현장의 연속된 데이터를 분석한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8(a)는 김포 현장의 주간 평균 상승 높이 및 속도를 나타낸다. 상승 높이는 약 1.919 m이고 시간당 평균 0.202 m/hr의 속도를 나타내며, 평균 온도는 약 22.2°C이다(Fig. 8(b)). 시공 초반부에는 저조한 상승속도를 보였지만, 4일차부터는 목표 상승속도 값에 부합하는 속도를 보였다. 따라서 김포 현장은 콘크리트 표면온도 약 22.2°C에서 1.9 m/day 또는 0.200 m/hr의 목표 상승속도 값을 만족하였다.

Fig. 8(c)는 신월 현장의 주간 평균 상승 높이 및 속도를 나타낸다. 상승 높이는 약 2.030 m이고 시간당 평균 0.214 m/hr의 속도를 나타내며, 평균 온도는 약 31.4°C이다(Fig. 8(d)). 마찬가지로 신월 현장도 2.0 m/day 또는 0.210 m/hr의 당초 목표 상승속도 값을 만족하였으며, 콘크리트의 표면온도는 김포현장대비 약 9.2°C 정도 높았다. 이는 김포 현장의 공사시기가 2017년 11월 22일부터 2018년 1월 3일까지로 동절기 공사였으며, 신월 현장은

2018년 5월 14일부터 2018년 6월 18일까지의 (준)하절기 공사의 영향을 피할 수 없었다. 따라서 공사시기, 작업환경, 근로자의 숙련도, 레미콘 및 자재 운반 등 현장 여건을 감안한 결과를 제시하면 김포 현장보다 신월 현장의 온도가 높았고, 시공속도가 증가되는 것을 확인하였다. 이는 히팅슬립폼을 통한 콘크리트의 온도제어 효과로 볼 수 있으며, 한국산업안전보건공단의 슬립폼 안전작업 지침에서 제시된 슬립업 속도기준(2.5~4 m/day)의 최대값인 4 m/day 정도의 상승속도를 가능하게 하였다고 판단된다.



(a) Slip-up height and speed (Kimpo)

(b) Average temperature and slip-up height (Kimpo)

(c) Slip-up height and speed (Sinwol)

(d) Average temperature and slip-up height (Sinwol)

Fig. 8. Field work data

5. 결 론

본 연구에서는 수직구 구조물 고속시공을 위한 히팅슬립폼을 개발하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서는 히팅 패널 및 시험용 연속상승 장치를 개발하였으며, 성능검증을 위하여 반발경도, 초음파 전파시간, 수화열 및 외부온도를 측정하였다. 대체적으로 온도가 상승할수록 압축강도가 증가하였으며, 최소 압축강도가 0.33 MPa로써 초기강도를 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 초음파 전파시간의 범위는 42.0~54.6 μs인 것으로 나타났다.
2. 시험체 A, C, H의 1시간 후 수화열은 13.5~14.1 cal/g이며, 12시간 후에는 22.1~25.0 cal/g로 나타났다. 타설 후 4시간까지는 비슷한 거동으로 수화열이 상승하였으며, 이후에는 시험체마다 미세한 거동의 차이를 보였다. 이는 타설 강도 및 높이, 시험체의 크기, 작업조건 등 여러 가지의 변수가 작용한 것으로 판단된다.
3. 김포 현장의 주간 평균 상승 높이는 1.919 m이며, 상승속도는 0.202 m/hr로 나타났다. 시공 초반부에는 저조한 상승속도를 보였지만, 4일차부터는 목표 상승속도에 부합하는 속도를 보였다.
4. 신월 현장의 일 평균 주간 상승 높이는 2.030 m이고 시간당 평균 0.214 m/hr의 속도를 나타내며, 평균온도는 약 31.4°C이다. 따라서 공사시기, 작업환경, 근로자 숙련도, 레미콘 및 자재 운반 등 현장 여건을 감안한 결과, 김포현장보다 신월 현장의 평균온도가 높았고 시공속도가 증가되는 것을 확인하였다.

콘크리트의 10~30°C의 범위에서는 강도 변화나 탄성 특성의 변화에 미치는 영향이 크지 않지만, 초기강도는 온도가 상승할수록 증가하는 경향을 보인다. 그러나 온도의 상·하한계에 대한 명확한 기준이 부족하며, 추후 초기강도 및 장기강도와 온도의 관계를 규명하는 세부적인 연구가 진행되어 시공속도, 시공효율, 경제성 측면에서 슬립폼 공법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2019년 건설기술연구사업의 '대심도 복층터널 설계 및 시공기술개발(19SCIP-B089438-06)' 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Carino, N.J., Lew, H.S. (2001), "The maturity method : from theory to application", Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, American Society of Civil Engineers, Washington D.C, pp. 19.
2. Kim, H.S., Kim, Y.J., Chin, W.J., Yoon, H.J. (2012), "A study on the determination of slip-up time for slip-form system using surface wave velocity", Korean Society of Civil Engineers, Vol. 32, No. 5D, pp. 483-492.
3. Kim, J.K., Moon, Y.H., Eo, S.H. (1998). "Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature", Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 12, pp. 1761-1773.
4. Ko, E.S., Shin, Y.W. (2015), "A case study on slip form and PC slab assembly method for vertical shaft of rapid-transit railway", Korean Geo-Environmental Society, Vol. 16, No. 4, pp. 37-41.

5. Ko, H.B., Yang, E.I., Eum, S.W. (1998), “The effects of curing temperature history on concrete strength development”, Korea Concrete Institute, Vol. 10, No. 5, pp. 89-100.
6. Koh, T.H., Hwang, S.K., Moon, D.Y., Yoo, J.H., Song, J.W., Ko, J.S. (2014), “Early strength development of concrete cured with microwave heating form”, The Korean Society for Railway, Vol. 17, No. 5, pp. 365-372.
7. Korea Occupational Safety & Health Agency (2011), KOSHA Guide C-38-2011, Korea, pp. 6.
8. Korean Agency for Technology and Standards (2008), Testing method for velocity of ultrasonic pulses to conclude compressive strength of concrete, Korea, pp. 11.
9. Lee, H.S., Moon, H.K. (2016), “Numerical study on the connection type of inner-slab in double deck tunnel”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 5, pp. 441-451.
10. Min, K.H., Jung, H.C., Yang, J.M., Yoon, Y.S. (2009), “Heat of hydration characteristics on high-performance concrete for large dimensional tunnel linings”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 1, pp. 37-45.
11. Ministry of Land Infrastructure and Transport (2016), Concrete standard specification, Korea, pp. 55-56.
12. Reichverger, Z., Jaegermann, C. (1980), “Optimal regime in slip form concreting”, Materials and Structures, Vol. 13, No. 2, pp. 109-113.
13. Shin, Y.W., Min, B.H., Nam, J.B., Lee, S.H. (2019), “A study on structural performance of steel brackets in vertical shaft connected to double-deck tunnel”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 21, No. 3, pp. 363-375.