



적산온도를 통한 동절기 콘크리트의 초기강도 예측에 관한 연구

박성현* · 전찬경 · 양승규 · 김동석 · 박대병

<쌍용C&E(주) 기술서비스팀>

1. 서 론

동절기 콘크리트 시공시 콘크리트 타설 후 초기재령에 0°C 부근의 낮은 기온에 노출되면 응결경화반응이 심각하게 지연된다. 심할 경우에는 콘크리트 초기강도 발현 지연 및 장기강도 저하를 초래하므로 이를 고려하지 않는 동절기 콘크리트 시공은 부실공사의 원인이 되기도 한다. 이에 국토교통부에서는 ‘22. 1월 아파트 붕괴 재발 방지를 위한 「부실시공 근절 방안」 중 한중콘크리트 적용 기온의 구체적 기준 및 거푸집 등 가시설 해체에 관한 세부 내용을 향후 표준시방서에 구체화하겠다는 계획을 발표하였다.

현재 콘크리트 표준시방서(KCS 14 20 40, 한중콘크리트)에는 동절기 콘크리트 피해를 방지하고자 구조물의 노출조건을 고려하여 양생 종료 시의 소요 압축강도 표준과 이를 확보하기 위해 정온상태(5°C, 10°C)에서의 양생일수 표준을 Table 1과 같이 규정하고 있다. 하지만 실제의 동절기 기온은 영상권에서 영하권까지 극심한 기온 변화가 하루에도 반복되어 콘크리트의 품질에 악영향을 미친다. 따라서 동절기 실제 기온변화를 고려하여 소요 압축강도를 확보하기 위한 동절기 양생기준을 구체화할 필요가 있다고 판단하였다.

본 연구에서는 콘크리트 온도와 양생기간의 함수인 적산온도를 활용하여 시멘트 종류, W/B 및 양생온도별 재령에 따른 강도 발현특성을 검토하였다. 이를 통해 겨울철 소요 압축강도를 확보하기 위한 시멘트 종류별 양생기간을 제안하며, 실내 양생 및 실외 양생한 공시체 강도를 비교하여 초기 보온양생의 중요성을 확인하고자 하였다.

2. 적산온도 개념 및 활용

콘크리트의 강도발현은 시멘트의 수화반응에 의해 영향을 받으며 수분이 충분히 존재하는 환경에서 콘크리트 강도는 재령과 온도의 함수로서 나타낼 수 있다. 따라서 콘크리트 재령별 강도와 양생온도 및 재령의 관계를 적절히 표현할 수 있으면 다양한 양생환경하에서도 콘크리트에 대한 강도예측이 가능하다. 따라서 콘크리트의 적산온도 방식을 활용하면 거푸집 탈형, 한중콘크리트의 보온 양생 기간을 결정하는 등 공정상 관리지표로 활용할 수 있다.

적산온도(Maturity)란 콘크리트의 강도 증진에 있어서 양생온도와 양생시간이 미치는 영향을 정량적으로 표현한 함수로서 다음 식(1)과 같은 Nurse-Saul의 적산온도식으로 표현할 수 있다. Nurse와 Saul은 “콘크리트는 동일한 적산온도에 도달할 경우 그 온도이력에 관계없이 거의 동일한 강도를 갖는다”라는 이론을 토대로 경험적인 요인들을 반영하여 제안한 식으로 우리나라 콘크리트 표준시방서(KCS 14 20 40, 한중콘크리트)에도 해당 식이 제안되어 있다.

$$M = \sum_0^t (\theta + A) \Delta t \quad \text{식(1)}$$

여기서, M : 적산온도(°D·D(일), 또는 °C·D)
 θ : Δt시간 중의 콘크리트 평균 양생 온도(°C)
 A : 정수로서 일반적으로 10°C가 사용
 Δt : 시간(일)

Table 1. 소요 압축강도를 얻는 양생일수 표준(KCS 14 20 40 한중콘크리트)

| 시멘트 종류 구조물 노출 상태 | | 보통포틀랜드 시멘트 | 조강포틀랜드 시멘트+축진제 | 혼합시멘트 B종 |
|----------------------------------|------|---------------|-------------------|-------------|
| (1) 계속해서 또는 자주 물로 포화되는 부분 | 5°C | 9일 | 5일 | 12일 |
| | 10°C | 7일 | 4일 | 9일 |
| (2) 보통의 노출상태이고 (1)에 속하지 않는 부분 | 5°C | 4일 | 3일 | 5일 |
| | 10°C | 3일 | 2일 | 4일 |

Table 2. 실험계획

| 구분 | | 실험수준 |
|------|----------|--|
| 실험인자 | 결합재(B) | OPC 100 % (이하, OPC) OPC 50 %+SP 40 %+FA 10% (이하, TBC) |
| | W/B (%) | 45, 55 |
| | 타설온도(°C) | 10 |
| | 양생온도(°C) | 4, 10, 20, 실외 대기온도 |
| 측정항목 | | 콘크리트 압축강도, 온도 |

Table 3. 콘크리트 배합표

| W/C (%) | S/a (%) | 단위 재료량 (kg/m ³) | | | | | SP (C×%) |
|---------|---------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
| | | W | B | S1* | S2* | G | |
| 45.0 | 48.5 | 176 | 391 | 596 | 249 | 911 | 0.9 |
| 55.0 | 50.2 | 176 | 320 | 638 | 266 | 911 | 0.9 |

* S1 : 부순모래, S2 : 바닷모래



Pic. 1. 공시체 실내 양생 전경



Pic. 2. 공시체 실외 양생 전경

Table 4. 회차별 실험진행 조건 및 압축강도 측정 재령

| 회차 | 배합 | 양생온도 | 압축강도 측정 재령 | | | | | |
|----|------------------------------------|------------------------|------------|----|----|----|-----|-----|
| | | | 1D | 3D | 5D | 7D | 14D | 28D |
| 1차 | W/B (45, 55)% 결합재 (OPC, TBC) | 실내 4°C ^{주1)} | - | ○ | ○ | ○ | ○ | - |
| | | 실내 20°C ^{주2)} | ○ | ○ | - | ○ | ○ | ○ |
| | | 실외 (2/24~3/3) | - | - | - | ○ | - | - |
| 2차 | W/B (45, 55)% 결합재 (OPC, TBC) | 실내 10°C ^{주1)} | - | ○ | ○ | ○ | ○ | - |
| | | 실내 20°C ^{주2)} | ○ | ○ | - | ○ | ○ | ○ |
| | | 실외 (3/18~3/25) | - | - | - | ○ | - | - |

주1) 공시체 제작 후 14일까지 해당 양생온도(4°C, 10°C)에서 기중양생 실시

주2) 공시체 제작 후 3일까지 해당 양생온도(20°C)에서 기중양생하며, 이후 표준양생 실시

3. 실험 개요

3.1 사용재료 및 실험계획

본 실험에 사용된 시멘트는 밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3 670 cm²/g인 당사 보통 포틀랜드 시멘트(이하, OPC)를 사용하였으며, 혼합시멘트(Ternary Blended Cement, 이하 TBC)는 앞서 언급한 보통 포틀랜드 시멘트 50%와 밀도 2.94 g/cm³, 분말도 4 140 cm²/g인 슬래그미분말(SP) 40%,

밀도 2.32 g/cm³, 분말도 3 610 cm²/g인 플라이애시(FA)를 10% 혼합하여 사용하였다.

잔골재는 밀도 2.66 g/cm³, 조립률 3.0 인 부순모래(S1)와 밀도 2.60 g/cm³, 조립률 1.8인 바닷모래(S2)를 70% 대 30% 비율로 혼합 사용하였으며, 굵은골재는 밀도 2.69 g/cm³, 조립률 6.7 의 쇄석을 사용하였다. 혼화제는 PC계 고성능감수제와 AE제를 적정 작업성을 확보하기 위해 배합별로 적정 첨가하였다. 본 실험의 실험계획은

Table 2와 같으며, 콘크리트 배합조건은 목표 공기량(4.5 ± 1.5 %), 목표 슬럼프(150 ± 25) mm 으로 콘크리트 배합표는 Table 3과 같다.

3.2 실험방법

실험은 시멘트 종류 및 콘크리트 배합별로 공시체를 제작한 후 양생 온도별 강도발현 특성을 파악하기 위해 Table 4의 조건으로 총 2회 실험을 진행하였다.

양생조건은 실내 양생의 경우, 항온 실험실에서 기중 양생 후 재령별로 강도측정을 실시하였다. 실외 양생의 경우, 골재 치장 내 일부 공간을 활용하여 직사광선을 피하고 통풍이 원활한 조건에서 재령 7일까지 기중양생

후 강도를 측정하였다. 또한 각 실험수준별로 제작한 공시체 내에 온도계측 센서를 매립하여 재령 7일까지 콘크리트의 온도를 측정하여 적산온도를 산출하였다.

4. 실험 결과

4.1 양생온도 및 배합조건별 강도 특성 검토

양생온도 및 배합조건별 콘크리트 강도 발현 특성은 Fig. 1과 같다. 일반적인 콘크리트 강도 발현 패턴과 유사하게 양생온도가 높을수록, W/B가 낮을수록 재령이 경과할수록 초기강도가 급격하게 증가하는 것을 확인하였다.

결합재 종류별로는 포틀랜드시멘트(OPC) 단독 배합 대

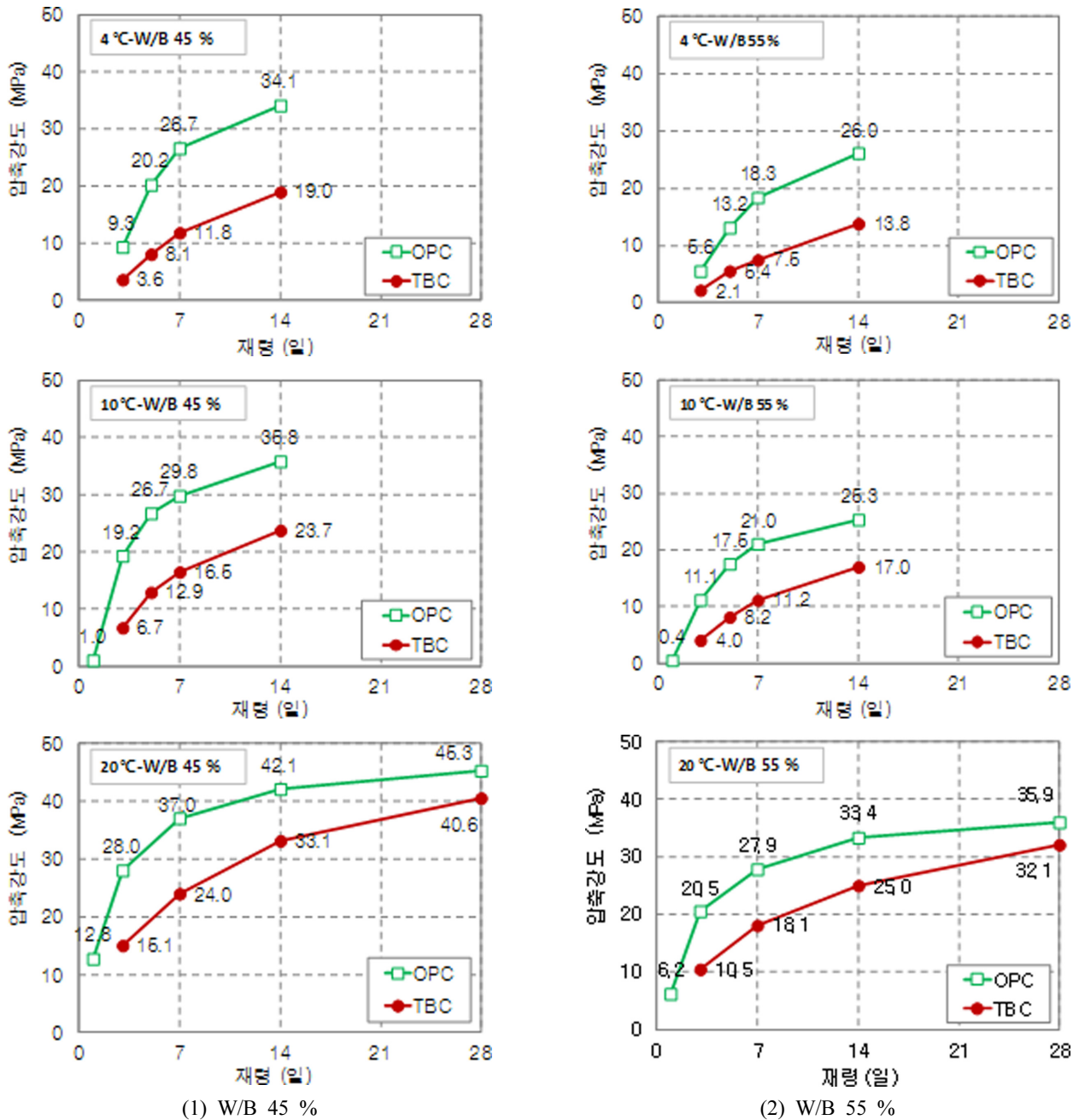


Fig. 1. 양생온도 및 배합조건별 강도발현 특성

비 슬래그미분말(SP), 플라이애시(FA)를 총 결합재량의 50 % 치환한 혼합시멘트(TBC) 배합이 양생온도가 낮을수록 초기 재령에서 강도 발현이 지연되는 것으로 확인되었다. 특히, 4°C와 같은 저온조건에서는 OPC 배합 대비 TBC 배합의 7일 강도가 (41~45)% 수준이며, 20°C 양생조건에서는 (62~66)% 수준으로 나타났다.

W/C비에 따라서는 양생온도가 같더라도 W/C가 낮을 경우, 즉 고강도 배합에서 포틀랜드시멘트(OPC) 배합과 혼합시멘트(TBC) 배합의 강도 차이가 (2~5)% 수준으로 완화되는 것으로 확인되었다.

따라서 기온이 낮은 동절기에는 혼합재 사용비율이 높을수록 초기강도 확보에는 취약한 것으로 판단되므로, 동절기 콘크리트 제조시에는 가능한 한 혼합재의 사용비율을 저감하고 고강도 배합의 콘크리트를 제조해야 구조물의 강도 및 내구성이 확보될 것으로 판단된다.

4.2 적산온도와 강도발현 관계 검토

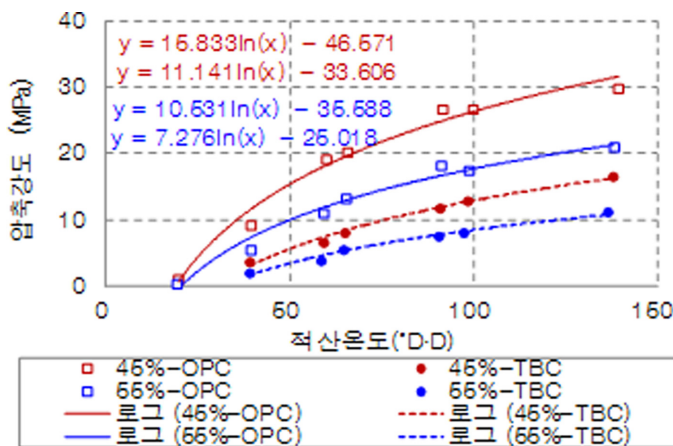
배합조건별 콘크리트 공시체 제조 후 양생온도를 구별하여 콘크리트의 강도 발현 특성을 검토하였다. 이와 병행하여 공시체 내에 온도 센서를 매립하여 콘크리트의

온도를 계측하였으며, 계측 결과를 토대로 재령별 적산온도를 산출하였다.

Fig. 2는 산출된 각 재령별 적산온도와 각 재령별 압축강도의 관계를 나타낸 것으로, 이를 활용하여 콘크리트 배합(W/B, 결합재 종류)별로 거푸집널 해체를 위한 소요강도 도달 일수 예측에 활용하였다. 이때 소요강도 도달 일수는 0.5일 단위로 표현하였으며, 안전성 확보를 위해 0.5일 단위 미만으로 산출된 결과는 0.5일 단위로 올림하여 나타내었다.

소요강도 도달하기 위한 일수 산출결과(Table 6 참조), 앞서 언급한 양생온도 및 배합조건별 강도특성 결과와 유사한 경향으로 W/B가 높아질수록, 양생온도가 낮을수록, 그리고 혼합시멘트를 사용하면 소요강도 도달 일수가 증가하는 경향으로 산출되었다.

특히, 동절기 한중콘크리트 시공 기온인 4°C 에서 14 MPa 도달일수 검토결과 W/B 45% 조건에서 OPC배합은 3.5일, TBC 배합은 8.0일, W/B 55% 조건에서는 OPC배합은 5.5일, TBC배합은 15.5일 정도 소요되는 것으로 나타났다.



[OPC배합의 W/B별 강도-적산온도 관계식]

- 1) 45 % : 강도= 15.833 ln(D ° D) - 46.6
- 2) 55 % : 강도= 11.141 ln(D ° D) - 33.6

[TBC배합의 W/B별 강도-적산온도 관계식]

- 1) 45 % : 강도= 10.531 ln(D ° D) - 35.6
- 2) 55 % : 강도= 7.276 ln(D ° D) - 25.0

그림 2. 재령별 적산온도와 압축강도 관계도

Table 5. 압축강도 시험에 의한 거푸집널의 해체 기준(KCS 14 20 12 거푸집 및 등바리)

| | |
|--------------------|---------------------------------|
| 부재 | 콘크리트 압축강도 |
| 확대기초, 보, 기둥 등의 측면 | 5 MPa 이상 |
| 슬래브 및 보의 밑면, 아치 내면 | 설계기준압축강도의 2/3이상 또는 최소 14 MPa 이상 |

Table 6. 적산온도 활용 거푸집널 해체 기준 도달에 필요한 양생기간(예시)

| 결합재 | W/B | 양생온도별 4 MPa 도달 소요기간(일) | | | 양생온도별 14 MPa 도달 소요기간(일) | | | 비고 (표준양생 28일 강도, MPa) |
|-----|-----|------------------------|------|------|-------------------------|------|------|--------------------------|
| | | 4°C | 10°C | 20°C | 4°C | 10°C | 20°C | |
| OPC | 45% | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 3.5 | 2.5 | 1.5 | 45.3 |
| | 55% | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 5.5 | 4.0 | 2.5 | 35.9 |
| TBC | 45% | 3.5 | 2.5 | 2.0 | 8.0 | 5.5 | 4.0 | 40.6 |
| | 55% | 4.5 | 3.5 | 2.5 | 15.5 | 11.0 | 7.5 | 32.1 |

Table 7. 실내양생 공시체의 압축강도와 적산온도

| 회차 | 실내 양생온도 (°C) | 구분 | 압축강도(MPa) | | 적산온도(° D·D) | |
|----|--------------|-----------------|-----------|------|-------------|-------|
| | | | 5D | 7D | 5D | 7D |
| 1차 | 설정온도 : 4.0 | ① OPC-WB45-4°C | 20.2 | 26.7 | 65.6 | 91.5 |
| | | ② OPC-WB55-4°C | 13.2 | 18.3 | 65.2 | 90.7 |
| | 측정온도 : 3.0 | ③ TBC-WB45-4°C | 8.1 | 11.8 | 64.9 | 91.0 |
| | | ④ TBC-WB55-4°C | 5.4 | 7.5 | 64.7 | 90.5 |
| 2차 | 설정온도 : 10.0 | ⑤ OPC-WB45-10°C | 26.4 | 29.8 | 99.7 | 139.4 |
| | | ⑥ OPC-WB55-10°C | 17.5 | 21.0 | 98.8 | 137.9 |
| | 측정온도 : 9.7 | ⑦ TBC-WB45-10°C | 12.9 | 16.5 | 98.4 | 138.2 |
| | | ⑧ TBC-WB55-10°C | 8.2 | 11.2 | 97.4 | 136.4 |

Table 8. 실외양생 공시체의 압축강도와 적산온도

| 회차 | 실외 양생온도 (°C) | 구분 | 압축강도(MPa, 7D) | | 적산온도 (°D·D, 7D) |
|----|--|-----------------|---------------|------|-----------------|
| | | | 실측 | 예측 | |
| 1차 | 평균온도 : 3.3 최저온도 : -2.2 최고온도 : 10.9 | ① OPC-WB45-4°C | 16.6 | 25.4 | 94.3 |
| | | ② OPC-WB55-4°C | 11.1 | 17.0 | 93.4 |
| | | ③ TBC-WB45-4°C | 8.4 | 12.1 | 93.0 |
| | | ④ TBC-WB55-4°C | 5.6 | 7.8 | 91.3 |
| 2차 | 평균온도 : 6.0 최저온도 : 0.8 최고온도 : 12.0 | ⑤ OPC-WB45-10°C | 26.8 | 28.5 | 114.7 |
| | | ⑥ OPC-WB55-10°C | 19.6 | 19.0 | 112.2 |
| | | ⑦ TBC-WB45-10°C | 13.9 | 14.1 | 112.1 |
| | | ⑧ TBC-WB55-10°C | 8.8 | 9.2 | 110.5 |

4.3 동절기 기온을 고려한 실내양생 및 실외 양생 검토

동절기 콘크리트 시공 후 실외 양생 콘크리트의 강도 발현 특성을 파악하기 위해 공시체를 제작한 후 항온조건의 실내 실험실과 동절기 기온 변화 영향을 받는 실외로 구분하여 양생을 진행하였다. 양생기간 동안 각 공시체의 온도를 계측하여 강도 측정 재령까지 공시체가 받는 적산온도를 산출하였으며, 해당하는 강도 및 적산온도 산출값은 Table 7, Table 8과 같다.

실내 항온조건에서 양생한 공시체의 경우, Nurse-Saul의 보고와 같이 동일 배합의 콘크리트가 받는 적산온도가 유사하면 강도는 재령에 관계없이 유사하게 발현하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 실험 ① OPC-WB45-4°C의 7일강도와 실험 ⑤ OPC-WB45-10°C의 5일 강도가 적산온도가 유사하고, 측정강도도 유사한 것을 알 수 있다. 마찬가지로 ③ TBC-WB45-4°C의 7일강도와 실험 ⑦ TBC-WB45-10°C의 5일강도 역시 적산온도와 마찬가지로 유사함을 확인할 수 있다.

실험의 유효성 검증을 위하여 실시간 대기온도에 노출되는 실외조건에서 2회에 걸쳐 실내실험과 병행하여 진행하였다. 기온은 1차 실외실험의 경우 최저기온이 -2.2°C(재령 18hr), 2차 실외실험은 최저기온이 0.8°C였다. 수분이 동결하지 않은 2차 실험의 경우, 실외양생 7일재령의 적산온도를 그림 2의 관계식에 적용하여 예측강도를 산출하였으며, 이는 실측강도 대비 (95~105)% 수준으로 유

사하게 예측되었다. 또한 적산온도가 유사한 2회차 실내양생 5일재령의 강도와도 유사함을 확인하였다.

반면, 초기에 영하의 기온 이력을 받은 1차 실외양생 공시체의 경우, 적산온도로 예측되는 강도 대비 실측 강도는 (65~70)% 수준으로 강도발현이 저조하였으며, 이는 적산온도가 유사한 1회차 실내양생 7일재령의 강도와 비교해도 큰 폭의 차이가 있음을 확인했다. 이를 통해 적산온도에 의한 강도예측은 동해를 받지 않은 경우에만 유효함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 동절기 시공하는 콘크리트의 초기강도를 예측하기 위해 통상적인 강도 수준의 콘크리트 배합을 적용하여 양생조건별 강도 특성을 평가하였다. 또한 콘크리트 양생 온도와 재령의 함수인 적산함수를 활용하여 동절기 거푸집 해체를 위한 소요강도 도달 기간을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 포틀랜드시멘트(OPC) 대비 슬래그미분말(SP), 플라이애시(FA)의 치환율이 50% 이상인 혼합시멘트(TBC)를 사용할 경우, 양생 온도가 낮을수록 그리고 낮은 강도의 배합일수록 초기강도 발현이 지연되는 것으로 확인되었다.
- 2) 재령별 콘크리트 강도와 적산온도 관계식을 도출하였으며, 이를 통해 콘크리트 타설 후 거푸집널 해체를

위한 양생온도별 소요강도 도달 일수를 Table 6과 같이 나타내었다. 검토 결과, 혼합시멘트(TBC) 배합이 포틀랜드시멘트(OPC) 대비 콘크리트 표준시방서(KCS 14 20 12, 거푸집 및 동바리)의 측면 거푸집널 해체 기준인 5 MPa 확보를 위해서는 (1~2)일, 밑면 및 아치 내면 거푸집널 해체 기준인 14 MPa 확보를 위해서는 (3~10)일이 타설단계별 공사기간 연장이 필요한 것으로 나타났다.

3) 동일 배합의 콘크리트 공시체를 실내 항온 양생 및 동절기 실외 양생을 비교 실시한 결과, 양생기간 동안 동등수준의 적산온도 조건으로 양생되었다 하더라도 초기 영하의 기온에 노출되어 초기동해를 받은 공시체는 보온 양생된 공시체의 (65~70)% 수준으로 강도가 발현하였다. 이를 통해 한중콘크리트 시공시 초기 보온양생이 중요함을 확인하였다.

4) 동절기에는 낮은 기온으로 인하여 시멘트 급격한 응결지연 및 강도 저하 발생할 수 있으므로 이를 고려하

여 가시설 해체 등을 위한 배합조건 및 온도별 기준 상세화가 필요하다. 이에 본 연구에서 검토한 적산온도를 활용한 강도예측 및 소요강도 도달일수(안)의 활용이 동절기 콘크리트 품질 관리방안으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

<참고문헌>

1. 한민철, 적산온도에 의한 콘크리트 강도 증진 예측 기술, 한국콘크리트학회, pp. 45~51, 2017.
2. 권영진, 김무한 “적산온도방식을 이용한 고성능콘크리트의 강도추정방법”, 한국콘크리트학회지, pp. 66~73, 1995.
3. 한천구, 한민철, 한중콘크리트의 초기 동해 방지를 위한 초기 양생기간의 산정, 한국콘크리트학회논문집, pp. 47~55, 2000.
4. 박성현, 조기교통개방형 포장콘크리트의 강도발현 예측에 관한 연구, 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, pp. 465~466, 2015.