

적산온도방식에 의한 고유동콘크리트의 강도관리에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Strength Control of
High Fluidity Concrete by Maturity



김무한*

Kim, Moo-Han



남재현**

Nam, Jae-Hyun



김규용***

Kim, Gyu-Yong



길배수****

Khil, Bae-Su



한장현*****

Han, Jang-Hyun

ABSTRACT

The strength development of concrete is influenced by temperature and cement type which greatly affect hydration degree of cement. There is not pertinent concrete strength management method in our nation.

There are several methods for estimating the in-place strength of concrete. One such method is the maturity concept. The maturity concept is based on the fact that concrete gains strength with time as a result of the cement hydration and, thus the strength of concrete is related to the degree of hydration of the cement in concrete. The rate of hydration, as in any chemical reaction, depends primarily on the concrete temperature during hydration. Thus, the strength of concrete is function of its time-temperature history.

This goals of the present study are to investigate a relationship between strength of high-fluidity concrete and maturity that is expressed as a function of an integral of the curing period and temperature, predict strength of concrete.

Keywords : maturity, equivalent age, strength management, hydration degree, curing temperature, temperature history, high fluidity concrete, strength prediction

- * 정회원, 충남대학교 공과대학 건축공학과 교수
- ** 정회원, 대전대학교 공과대학 건축공학과 교수
- *** 정회원, 일본 건설성 건축연구소 제 2 연구부
- **** 정회원, 대전대학교 공과대학 건축공학과 대학원
- ***** 정회원, 충남대학교 공과대학 건축공학과 대학원

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2000년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

건설재료로서 콘크리트는 자유로운 설계형태의 표현, 내구성, 내화성, 저비용의 유지관리비 등의 이유로 지금까지 많이 이용되어 왔으며, 최근 콘크리트 기술의 급속한 발전에 따라 고강도·고유동성을 갖는 콘크리트가 개발되었으며, 그 대표적인 콘크리트가 고유동콘크리트라 할 수 있다.⁽¹⁾

고유동콘크리트는 보통콘크리트와 비교하여 다양한 재료를 사용하게 되고, 재료의 구성성분도 매우 다양하다. 또한 최근에는 특수한 시멘트가 개발되어 이에 대한 대응방법이 고려되는 등, 고유동콘크리트의 종류와 그 성능 및 품질의 범위가 매우 다양하므로 고유동콘크리트의 강도를 비롯한 성능은 보통콘크리트와는 달리 많은 요인에 의해 영향을 받는다 할 수 있다.⁽²⁾

따라서 고유동콘크리트의 강도는 온도와 시멘트 종류 및 사용량에 의해 큰 영향을 받기 때문에 우리나라와 같이 4계절의 온도변화가 뚜렷한 기후 조건인 경우 다양한 외기온도 변화에 대응한 세심한 강도관리가 필요하다.

그러나 지금까지 우리나라에서의 구조체 콘크리트 강도관리는 표준양생한 공시체의 압축강도를 이용한 강도추정에 의한 강도관리를 해왔다. 이 경우 구조체 콘크리트의 온도는 외기환경조건에 큰 영향을 받으므로 표준양생한 공시체의 압축강도를 이용해 콘크리트의 강도를 관리한다는 것은 부적합하다.⁽³⁾

따라서 본 연구에서는 온도와 재령의 관계인 적산온도 방식에 의한 고유동콘크리트의 강도관리에 관한 연구로써 양생온도별 고유동콘크리트의 강도발현 성장 및 기존의 2가지 적산온도함수의 적용성을 검토하여 고유동콘크리트의 강도예측을 통한 다양한 외기온도 조건을 고려한 합리적인 고유동콘크리트의 강도관리에 관한 적합한 자료를 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 적산온도의 기본 이론

콘크리트의 강도발현에 대한 양생온도의 영향을 연구한 결과 양생온도와 재령으로 콘크리트 강도를 예측하기 위한 함수가 제안되었다. 이 함수는 기준온도에 따른 시간과 양생온도의 곱을 적

[The measured temperature history during curing]

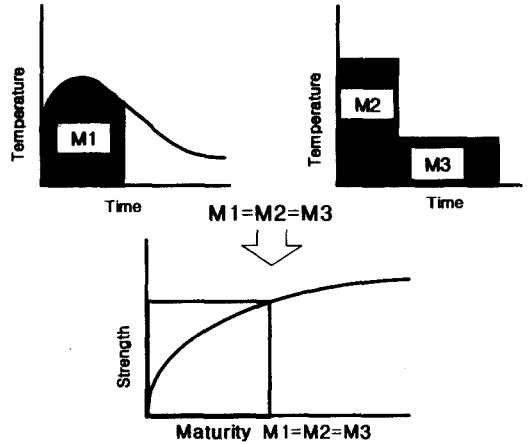


Fig. 1 Maturity function

분하여 나타낸 것으로 어느 범위의 적산온도 내에서는 양생온도와 양생기간이 다르더라도 양생온도와 양생기간의 곱인 적산온도, 즉 다시 말하면 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 시간축과 온도축력의 범위까지의 면적이 같다면 동일한 강도가 얻어진다는 실험적 연구결과를 바탕으로 적산온도를 이용한 임의 재령에서의 콘크리트 강도예측이 가능하다는 이론이다.

적산온도는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$M = \sum \alpha \Delta t \tag{1}$$

여기에서 α 는 재령환산 계수를 나타내며, t_n 는 재령, 즉 경과시간을 나타낸다.

2.1 강도예측을 통한 강도관리

구조체 콘크리트의 강도를 추정하기 위해서는 사전 실험을 통한 적산온도에 따른 최적의 강도예측식이 필요하며, 또한 Maturity meter를 이용한 구조체 콘크리트의 온도응력을 측정해야 한다. 측정된 온도를 이용해 구조체 콘크리트의 시간 T까지의 적산온도 M을 계산하여 이를 실험실내 실험을 통한 강도예측식에 적용하여 경과시간 T에서의 강도를 예측할 수 있다.

따라서 구조체 콘크리트의 강도를 조기에 판정할 수 있으며, 구조체 콘크리트의 강도발현 성장

에 따른 적절한 배합수정 및 양생방법의 조정을 신속히 할 수 있다는 측면에서 적산온도에 의한 강도 추정을 통해 온도변화에 따른 콘크리트 강도관리를 적절히 수행할 수 있다.

2.2 Nurse-Saul 함수를 응용한 재령환산계수

온도와 시간의 함수인 Nurse-Saul의 기본적인 적산온도 식은 식(2)와 같다.^(5,6)

$$M = \int_0^t (T - T_0) \cdot dt \quad (2)$$

- M : 적산온도(°C · h 또는 °C · day)
- T : Δt 기간의 콘크리트 양생온도(°C)
- T₀ : 기준온도(일반적으로 -10°C)
- Δt : 시간 간격(hr 또는 day)

이를 이용해 Rastrup은 재령환산계수를 다음과 같은 식(3)으로 나타내었다.⁽⁷⁾

$$\alpha = \frac{(T - T_0)}{(T_r - T_0)} \quad (3)$$

T_r : 등가재령의 기준이 되는 온도 (°C)

2.3 Arrhenius식을 응용한 재령환산계수

콘크리트의 경화속도는 온도에 큰 영향을 받으며 온도가 높게되면 경화가 촉진되고 저온의 경우에는 경화속도가 저하된다는 실험적 결론을 토대로 등가재령은 화학 반응속도식의 일종인 Arrhenius 식을 도입하여 양생온도에 따른 시멘트의 수화반응속도와 콘크리트의 강도발현과의 관계를 연구하여 20°C에서의 반응속도를 1로 가정한 것이다.

Freiesleben-Hansen과 Pederson은 Arrhenius 방정식이 온도 -10~80°C의 범위에서 Saul-Nurse 함수보다 콘크리트 강도에 대한 온도의 영향을 잘 설명하고 있다는 실험결과를 발표했다.⁽⁸⁾ 이러한 Arrhenius 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\alpha = \exp[E/R \cdot (1/T_s - 1/T_a)] dt \quad (4)$$

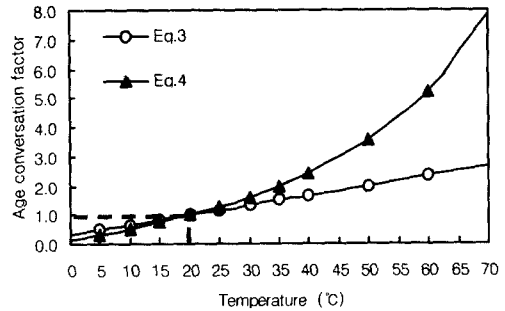


Fig. 2 The age conversion factor used to compute equivalent age

여기에서,

T_a : 양생온도(°K)

T_s : 273(°K)

E : 활성화에너지에서 화학반응에너지로써의 수화열인 시멘트 고유의 값(실험값)

33.5 + 1.47(20 - T_a) KJ/mol (T_a ≤ 20°C)

33.5 KJ/mol (T_a ≥ 20°C)

R : 8.314 J/mol(기체상수)

2.4 재령환산계수 비교

Table 1과 Fig. 2는 온도에 따른 재령환산계수를 식(3)과 식(4)로 계산하여 비교한 것이다.

Nurse-Saul 함수를 응용한 재령환산계수는 온도에 따른 콘크리트의 반응속도를 1차 함수로 나타내고 있으며 Arrhenius 함수를 응용한 식(4)는 지수함수의 형태를 보이고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 1 Age conversion factor vs. curing temperature

| Temp. (°C) | T+10 | $\frac{T+10}{20+10}$ | $\exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_a}\right)\right)$ |
|------------|------|----------------------|---|
| 0 | 10 | 0.333 | 0.151 |
| 5 | 15 | 0.500 | 0.292 |
| 25 | 35 | 1.167 | 1.260 |
| 30 | 40 | 1.333 | 1.574 |
| 40 | 50 | 1.667 | 2.408 |

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

임의재령에서의 콘크리트 강도에측를 통한 고유동콘크리트의 강도관리를 위한 연구의 일환으로 적산온도의 적용에 있어 고려해야 할 변수를 도출하기 위해 Table 2와 같은 양생온도조건(5, 10, 20, 30℃)과 콘크리트 제조시 많이 이용되고 있는 보통포틀랜드시멘트와 고유동콘크리트 제조시 수화열 저감을 위해 많이 이용되고 있는 결합재(O.P.C-FA30, H.B.C, B.S.C)를 이용하여 실험을 실시하였다.

Table 2 Experimental Program

| Experimental part | | | Analytical part |
|-------------------|-------------------|----------------|-----------------------------|
| Binder type* | Curing temp. (°C) | Item of test | Using functions |
| O.P.C | 5 | Comp. strength | · Nurse-Saul · Arrhenius |
| O.P.C-FA30 | 10 | | |
| H.B.C | 20 | | |
| B.S.C | 30 | | |

* O.P.C : Ordinary Portland Cement
H.B.C : High Belite Cement
B.S.C : Blast Furnace Slag Cement

분석적인 부분에 있어서는 등가재령 함수로써 Nurse-Saul의 식을 응용한 함수와 Arrhenius 식을 응용한 함수를 이용하였으며 이를 이용한 적산온도와 고유동콘크리트 강도와의 관계를 검토한 후 고유동콘크리트의 압축강도를 예측하였다.

3.2 사용재료

본 실험에 사용된 각종 재료의 물리적 성질은 Table 3 및 4에 나타낸 바와 같이 시멘트는 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 시멘트 및 베라이트 시멘트를 사용하였으며, 혼화재로는 폴리카르본산계인 국내 K사의 고성능AE감수제와 충남 보령화력발전소에서 생산된 플라이애

Table 3 Physical & chemical properties of cement

| Cement type | Specific gravity | Fineness (cm/g) | Setting time (h:m) | | Chemical compound | | |
|-------------|------------------|-----------------|--------------------|-------|-------------------|------------------|--------------------------------|
| | | | Initial | Final | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ |
| O.P.C | 3.15 | 3.200 | 4:50 | 7:05 | 64.8 | 24.2 | 3.1 |
| H.B.C | 3.20 | 4.130 | 6:00 | 9:40 | 63.2 | 25.3 | 2.7 |
| B.S.C | 2.98 | 4.000 | 3:40 | 7:05 | 52.4 | 26.1 | 9.0 |

시를 사용하였다. 골재로서 잔골재는 금강에서 채취한 강모래를 사용하였으며 굵은골재로는 대전 산 부순자갈을 사용하였다.

Table 4 Properties of using materials

| | | | |
|-----------|-------------------|--|----------------------|
| Admixture | Fly-ash | Specific gravity : 2.31 Fineness : 3.228(cm/g) | |
| | Super plasticizer | Component : Polycarboxylic ether Specific gravity : 1.04~1.06 | |
| Aggregate | Fine aggregate | Gmax: 2.5mm | Spec. gravity : 2.60 |
| | | F.M: 2.60 | Absorption : 1.66 |
| | Coarse aggregate | Gmax: 5mm | Spec. gravity: 2.56 |
| | | F.M: 6.61 | Absorption : 1.88 |

3.3 고유동콘크리트의 배합

본 실험에서의 고유동콘크리트 배합은 수 차례의 시험비빔을 통하여 Table 5와 같이 W/B 30%, 단위결합재량 500kg/m³, 잔골재율 50%로 하였다. 결합재는 보통포틀랜드 시멘트, 베라이트 시멘트, 고로슬래그 시멘트와 플라이애시를 결합재 중량 대체하여 사용하였다.

Table 5 The mix proportion of high-fluidity concrete

| W/B (%) | Type of cement | s/a (%) | Repla. of fly-ash (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | |
|---------|----------------|---------|-----------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | | | W | C | FA | S | G |
| 35 | O.P.C | 50 | 0 | 175 | 500 | 0 | 804 | 802 |
| | | | 30 | | 350 | 150 | 776 | 773 |
| | H.B.C | | 0 | | 500 | 0 | 808 | 805 |
| | B.S.C | | 0 | | 500 | 0 | 793 | 790 |

3.4 콘크리트의 비빔 방법 및 공시체 제작

콘크리트의 비빔은 Fig. 3과 같이 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 고유동콘크리트를 제조하였다.

공시체의 제작은 $\phi 10 \times 20$ cm의 실린더형 몰드를 사용하여 각각의 재령별 3개씩 제작하였다.

3.5 압축강도시험방법

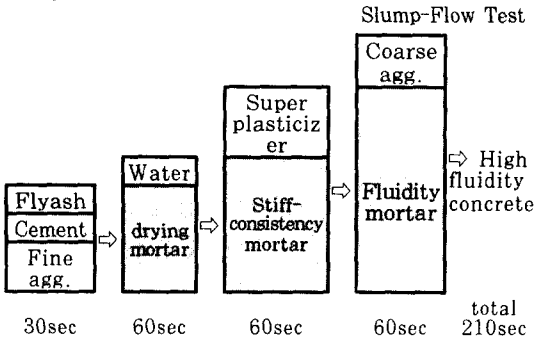


Fig. 3 Mix method

압축강도 시험은 KS F 2405 의 규정에 따라 200ton 용량의 만능재료시험기를 이용하여 압축 강도를 측정 한 후 그 평균값을 구하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 고유동콘크리트의 강도발현 성상

각각의 결합재 종류별 양생온도에 따른 강도발현 성상을 Fig. 4에 나타내었다.

모든 결합재에서 양생온도 5℃와 10℃의 강도발현 성상은 비슷하게 나타났으며 10℃이상의 온도에서의 콘크리트 강도는 양생온도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

4.1.1 O.P.C의 강도발현

결합재로서 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 고유동콘크리트의 경우 양생온도 20, 30℃에서의 1일 압축강도가 200 kgf/cm² 이상의 높은 강도발현 성상을 내고 있으며, 재령 28일 압축강도가 500 kgf/cm²의 고강도 영역의 강도수준을 나타내고 있다.

또한 O.P.C의 경우 양생온도 5, 10℃는 압축 강도 발현 성상이 비슷하게 나타나고 있음을 보여주고 있어 저온의 환경에서는 콘크리트 강도발현에 대한 온도의 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다. 그러나 20℃ 이상의 온도에서는 콘크리트 강도발현에 대한 온도의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

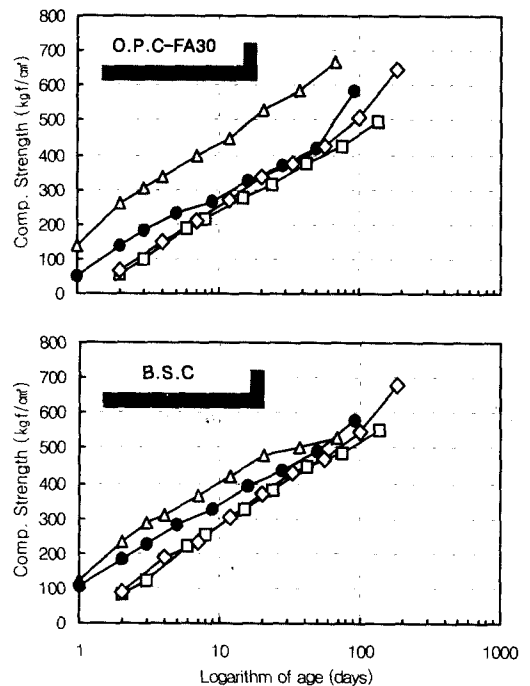
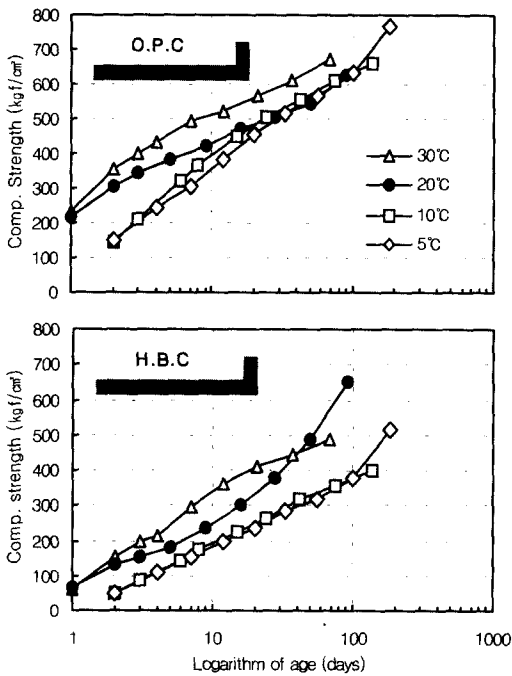


Fig. 4 Development of compressive strength with age

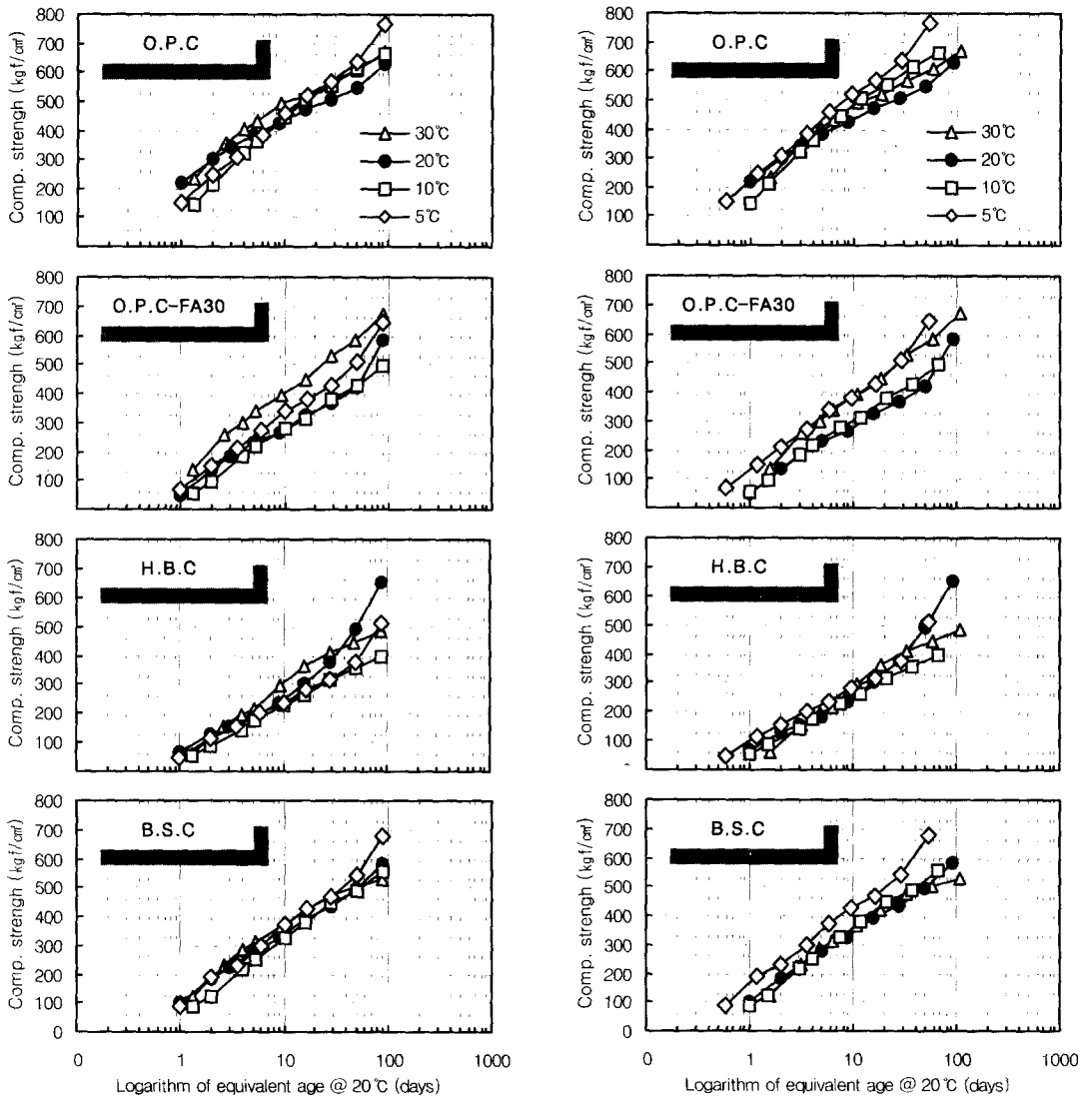
4.1.2 O.P.C-FA30의 강도발현

결합재로 플라이애시를 시멘트의 중량 대체 30%한 고유동콘크리트에서의 양생온도별 강도발현 성상을 보면 양생온도 20~5°C에서의 강도발현은 양생온도에 관계없이 비슷한 수준을 보여주고 있으나 양생온도 30°C에서는 높은 강도발현수준을 보여주고 있으며 O.P.C를 결합재로 이용한 고유동콘크리트와 비슷한 강도발현 성상을 보여

주고 있어 서중콘크리트 공사시 플라이애시를 첨가함으로써 콘크리트 수화열 저감뿐만 아니라 경제적인 측면에서 유리할 것으로 사료된다.

4.1.3 H.B.C의 강도발현

고비라이트시멘트를 이용한 고유동콘크리트의 압축강도는 다른 결합재에 비해 모든 양생온도에서 약 100kgf/cm² 정도 낮은 강도발현 수준을 보



(a) The traditional function

(b) The function based upon the Arrhenius equation

Fig. 5 Compressive strength verse maturity

여 주고 있다. 또한 H.B.C의 경우 10℃ 이상의 온도에서 콘크리트의 강도발현은 양생온도에 큰 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

4.1.4 B.S.C의 강도발현

고로슬래그 시멘트를 이용한 고유동콘크리트의 강도는 양생온도에 따라 일정한 강도발현 수준을 보여주고 있으며 재령 50일 이후에는 양생온도에 관계없이 비슷한 수준의 강도를 보여주고 있다.

4.2 적산온도-콘크리트 압축강도 관계

Nurse-Saul 함수를 응용한 적산온도-강도관계를 나타낸 Fig. 5는 O.P.C-FA30을 제외한 모든 결합재에서 콘크리트 강도발현에 대한 온도의 영향이 밀접한 것으로 나타났다. 대체적으로 Freiesleben-Hansen의 식을 이용한 경우 Nurse-Saul 함수를 응용한 등가재령 보다 동일한 등가재령에서 양생온도에 관계없이 비슷한 강도수준을 보여주고 있어 Arrhenius 식을 응용한 Freiesleben-Hansen의 식이 초기재령에서 콘크리트 강도발현에 대한 온도의 영향에 대한 설명을 더 잘 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 등가재령 28일 이후에는 고온의 조건과 저온의 조건에서 양생된 콘크리트 강도가 역전되는 경향이 있는 것으로 나타나 본 실험에서의 강도-적산온도 관계는 등가재령 28일 이전에만 가능할 것으로 사료되며, 강도예측 또한 28일 이전의 강도는 양생온도에 관계없이 동일 적산온도에서 비슷한 강도수준을 보여주고 있어 Arrhenius 식을 이용한 초기재령의 강도예측이 보다 정확히 예측할 수 있을 것이라 사료된다.

4.3 고유동콘크리트의 강도예측

Plowman의 강도예측식은 강도-적산온도 관계에 있어 강도를 적산온도의 로그스케일로 나타냈을 때 직선으로 표현할 수 있다. 그러나 이와 같은 강도-적산온도 관계의 결정적인 결점은 장기재령에서 콘크리트 강도를 예측하기에는 부적합하다는 것이다. 그러나 본 실험에서는 재령 28일 이전의 초기강도예측을 위한 실험으로써 가장 현장에서

이용하기 쉽고 초기재령에서 정확하며 간단하게 콘크리트 강도를 예측할 수 있는 Plowman의 예측식을 이용하였다. Plowman의 예측식은 아래 식(5)와 같다.

$$S = a + b \ln(M) \quad (5)$$

적산온도에 따른 고유동콘크리트 강도데이터를 통계분석 SAS프로그램을 이용한 Plowman 식에 의한 강도예측식을 구하여 그 결과를 Table 6에 나타내었다.

등가재령 28일 이전까지의 고유동콘크리트 강도발현을 등가재령의 로그스케일로 나타냈을 때

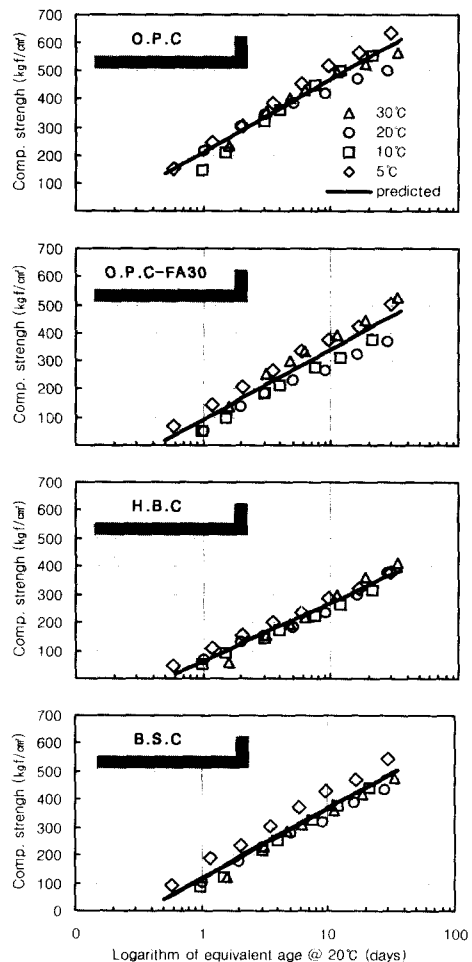


Fig. 6 Compressive strength verse maturity

직선적인 형태의 강도증진 형상을 보여주고 있다. 이러한 Plowman Curve는 콘크리트 초기강도발현 성상을 잘 나타내고 있으며 모든 결합재에서 높은 결정계수 값을 보여주고 있다. 따라서 본 실험에 의한 Plowman의 강도예측식은 고유동콘크리트의 강도관리에 이용 가능할 것으로 사료된다.

Table 6 A constant calculated by Plowman equation

| S = a + b log(M) | | | |
|------------------|--------|--------|----------------|
| Type of binder | a | b | R ² |
| O.P.C | 209.98 | 112.61 | 0.9358 |
| O.P.C-FA30 | 90.822 | 108.78 | 0.8860 |
| H.B.C | 61.584 | 91.092 | 0.9593 |
| B.S.C | 117.36 | 109.08 | 0.9293 |

5. 결 론

고유동콘크리트의 강도관리에 관한 적산온도의 적용성에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 결합재량을 다량 사용하는 분체계 고유동콘크리트의 강도는 결합재 종류 및 온도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 강도발현에 대한 온도의 영향은 혼합시멘트를 사용한 고유동콘크리트의 경우 가장 많이 받는 것으로 나타났다.
- 2) 본 실험의 온도 범위인 5~30℃에서는 Arrhenius 함수를 응용한 Freiesleben의 함수가 고유동콘크리트 강도에 대한 온도의 영향을 보다 정확히 설명하고 있는 것으로 나타났다.

- 3) 기존의 강도예측 모델식인 Plowman Curve에 의한 강도예측 결과 높은 결정계수값을 나타내고 있어 초기재령에서의 강도예측에 유용한 식이라 사료된다.
- 4) 향후, 보다 정확한 고유동콘크리트의 강도예측을 위해서는 적산온도 계산시 이용되는 결합재 종류 및 W/C에 따른 국내 시멘트에 대한 활성화에너지에 대한 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김무한, 권영진 : "적산온도방식을 이용한 고성능 콘크리트의 강도추정 방법", 콘크리트 학회지, Vol. 7, No. 5, 1995, pp. 66~73.
2. 日本建築學會 : "建築工事標準仕様書・同解説, (JASS 5 鐵筋コンクリート工事)", 1997, pp. 402~421.
3. 金武漢, : "モルタルおよびコンクリートの積算温度と圧縮強度発現に関する実験的研究", 日本建築学会論文報告集, 第355, 昭和60年 9月.
4. 남재현, 길배수 : "적산온도에 의한 고강도 콘크리트의 강도예측을 위한 예측모델의 적용성 검토", 대한건축학회논문집 17권 7호 1997년 7월.
5. Nurse, R. W. : "Steam Curing of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V.1, No. 2, June 1949, pp. 79-88.
6. Saul, A.G.A : "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure", Magazine of Concrete Research, Vol 2, No.6, March 1951, pp.127~140.
7. Rastrup, E. : "Heat of hydration in concrete", Magazine of Concrete Research, 1954
8. Freiesleben Hansen, P. and Pederson, J. : "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength", Nordisk Betong, 1977, pp.19~34.

요 약

콘크리트의 강도발현은 시멘트의 수화반응에 의해 발현되며 시멘트의 수화는 온도와 시멘트 종류에 가장 큰 영향을 받는다. 그러나 4계절의 온도변화가 뚜렷한 우리나라의 건설현장에서는 다양한 외기환경조건에 대응한 콘크리트 품질관리 및 강도관리가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 적산온도 방식에 의한 고유동콘크리트의 강도관리에 관한 연구로써 양생온도별 고유동 콘크리트의 강도발현 성장 및 기존의 2가지 적산온도 함수의 적용성을 검토한 후 고유동콘크리트의 강도예측을 통한 다양한 외기온도 조건을 고려한 합리적인 고유동콘크리트의 강도관리에 관한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

고유동콘크리트의 결합재 종류별 강도발현 특성은 양생온도에 큰 영향을 받는 것으로 나타나 현장에서 콘크리트 강도관리는 온도의 요소가 포함된 적산온도에 의한 콘크리트 강도관리가 필요할 것으로 사료된다. 또한 콘크리트 강도발현 속도에 있어서 양생온도에 대한 일차함수로 보는 Nurse-Saul 함수보다는 지수함수로 보는 Freiesleben-Hansen의 함수가 콘크리트 강도에 대한 온도의 영향을 보다 더 잘 나타내 주었다. 보다 정확한 고유동콘크리트의 강도예측을 위해서는 Arrhenius 함수에 이용되는 국내 시멘트 및 결합재의 활성화에너지에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

기존의 강도예측 모델식 중 Plowman의 모델식은 현장에서 간단히 이용할 수 있는 식으로 등가재령 28일 이전의 강도예측이 가능할 것으로 사료되며, 이를 이용한 구조체 고유동콘크리트의 강도관리는 유효할 것으로 사료된다.

(접수일자 : 1999. 12. 24)