

# 혼화재를 조합 사용한 초지연 콘크리트의 응결시간 추정

## Estimation of the Setting Time of the Super Retarding Concrete Combining Mineral Admixtures

한민철\*

Han Min Cheol

### Abstract

This study provides the setting time prediction method of super retarding concrete incorporating mineral admixtures at the same time including fly ash(FA), blast furnace slag(BS) based on maturity method. The setting time was retarded, as super retarding agent contents increase and curing temperature decreases. In addition, apparent activation energy by Arrhenius function was ranged from 24~35KJ/mol with slightly difference along with mixture proportion. This value is smaller than existing value 30~50 KJ/mol. It is indicated that equivalent age using setting time can be a proper method to predict setting time and it also exhibited comparable relativity between prediction value and measurement value. Therefore, this study provided setting time prediction value with super retarding agent contents and mineral admixture combination. Setting time prediction equation provided herein is possibly valid for estimating precise setting time of the super retarding concrete at the job site.

키워드 : 겔보기 활성화 에너지, 혼화재료, 응결시간, 등가재령, 초지연제

Keywords : Apparent Activation Energy, Mineral Admixture, Setting Time, Equivalent Age, Super Retarding Agent

### 1. 서론

현재 건축 구조물 기초 매트부위의 매스콘크리트 시공시 수화열 저감을 위하여 재료, 배합, 시공 및 구조적차원에서 다양한 공법 들이 개발되어 활용되고 있다.

이러한 공법 중 최근 재료적 측면에서 당류계 초지연제의 응결시간차를 활용하는 방법으로 수화열 저감을 성취하는 공법이 개발된 바 있었는데, 이 공법은 실무현장에서 매스콘크리트의 수화열 균열 억제 등 품질 및 시공성 개선을 위한 방안으로 그 효과가 입증되고 있다.<sup>1),2)</sup>

그런데, 실무 레미콘 사에서는 콘크리트 배합시 콘크리트의 수화열 저감, 성능향상 및 경제성 확보 등의 측면에서 플라이애시(FA) 및 고로슬래그 미분말 (BS) 등의 각종 광물질 혼화재를 치환하여 사용하고 있는데, 이 경우 초지연제와 혼합 사용시, 예상 목표 응결지연 시간에 변동이 예상되며 이로 인한 문제점이 발생할 수 있어 주의가 요망된다. 특히 우리나라 실무현장에서는 4계절의 변화가 뚜렷하여 혼화재와 초지연제를 혼합하여 사용시 이러한 외기온 변화 및 수화열 영향 등을 받게 되므로, 다양한 온도 환경에서의 정확한 응결시간 예측은 품질관리 및 후속공정의 원활화를 위해 매우 중요한 사항이다.

이와 관련하여 한 등은 콘크리트의 온도와 재령의 관계를

복합적으로 이용하는 적산온도 방식에 의한 응결시간 예측방법을 제안한 바 있다.<sup>3),4)</sup> 그러나, 그 연구에서는 OPC와 FA의 단독 사용에 의한 결과를 제시하고 있는데, OPC, FA 및 BS 등 3성분계 결합재 사용시 등가재령의 산정에 있어 겔보기 활성화 에너지의 차이가 있어 보다 정확한 예측을 위하여는 이러한 재료의 복합사용에 따른 영향을 고려할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 혼화재의 조합사용에 따른 초지연제 콘크리트의 양생온도별 응결시간 변화를 실험하고, 이의 결과를 토대로 적산온도 방법에 의한 응결시간 예측식을 제안함으로써 혼화재 조합사용에 따른 초지연 콘크리트의 품질관리에 기여하고자 한다.

### 2. 이론적 고찰

#### 2.1 적산온도

본 연구에 적용하고자 하는 적산온도식은 Freisleben-Hansen에 의한 Arrhenius 화학반응속도 식을 이용한 등가재령식 (1)이다.

$$t_e = \int_0^t \exp \frac{Ea}{R} \cdot \left( \frac{1}{Tr} - \frac{1}{T} \right) dt \dots\dots\dots (1)$$

\* 정회원, 청주대 건축공학과 전임강사, 공학박사

여기서,

$E_a$  : 겉보기 활성화 에너지(KJ/mol)

R : 기체 상수(8.341J/mol · K)

$t_e$  : 등가재령

$T_r$  : 20°C에서의 절대온도(293K)

T : 양생온도( $t+273K$ )

## 2.2 겉보기 활성화 에너지( $E_a$ )

활성화 에너지란 반응에 필요한 최소한의 에너지를 의미한다. 그런데, 시멘트의 수화반응은 여러 광물이 동시에 여러 반응의 복합으로 진행되기 때문에 엄밀한 의미에서는 활성화 에너지라고 표현할 수 없고, 겉보기(apparent) 활성화 에너지라 칭한다.<sup>5)</sup> 시멘트의 수화반응에 필요한 겉보기 활성화 에너지를 구하는 방법은 ASTM C 1074에 제시되어 있는데, 이러한 겉보기 활성화 에너지를 이용하여 포틀랜드 시멘트의 수화반응을 설명할 수 있다. 포틀랜드 시멘트는 비빔 후 수시간 경과 뒤, 응결과정 및 장기재령 등 각기 시간에 따라 수화반응의 패턴이 다르기 때문에 각 시간 단계별로 겉보기 활성화 에너지는 다르고 또한 겉보기 활성화 에너지는 시멘트와 혼화재료의 특성에 따라 다르게 나타난다고 알려져 있다.<sup>3)</sup> 몇몇 연구자들은 초기재령에서의 겉보기 활성화 에너지는 33.5~47KJ/mol로 보고하고 있고, 장기재령에서는 10~20 KJ/mol로 보고하고 있으나,<sup>5)</sup> ASTM C 1074에서는 혼화재료를 사용하지 않은 1종 시멘트의 경우 40~45KJ/mol로 보고하고 있다. 한편, ASTM C 1074에서는 먼저 3수준의 온도조건에서 양생한 모르타의 응결 및 압축강도를 각 재령별로 측정한 후(종결시간의 2, 4, 8, 16, 32, 64배 되는 시점)재령의 역수와 강도의 역수를 회귀 분석하여 1차회귀식을 구한 다음, 회귀선의 절편을 기울기로 나누어 반응속도 상수  $k_T$ 를 구한다.

그리고 식 (2)의 양변에 자연로그를 취하고 나서 식(3)과 같은 형태를 얻는다.

$$k_T = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\ln k_T = \ln A - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

상기의 식(3)으로 부터 겉보기 활성화 에너지  $E_a$  값을 얻을

수 있는데, 이는 실험 데이터로부터  $\ln(k_T)$  값과  $1/T$ 의 값을 플롯한 후 직선 회귀로 구하여 얻어진 1차 회귀식의 기울기 값이  $E_a/R$ 값이 되고 이 값으로부터  $E_a$ 값을 얻을 수 있다.

## 2.3 적산온도를 이용한 응결시간 예측

적산온도를 응결시간 예측에 적용하기 위해서는 몇 가지의 절차와 가정이 필요하다. 우선, 초결과 종결시점까지의 겉보기 활성화 에너지를 구해야 하는데, 겉보기 활성화 에너지는 초결과 종결의 시점에서도 시멘트 수화 반응에 의한 미세구조가 어느 정도 생성된다고 가정하여 구하게 된다.<sup>6)</sup>

즉,  $a_i$ 를 초결에서의 수화도라고 표현하고,  $a_f$ 를 종결에서의 수화도라고 하면, 다음과 같은 가정을 한다.

1) 초결  $t_i$ 에 소요되는 시간은  $a_i$ 에 도달하는 시간과 같다.

2) 종결  $t_f$ 에 소요되는 시간은  $a_f$ 에 도달하는 시간과 같다.

여기서, 수화반응이 빨리 일어날수록 초결과 종결시간은 짧아지기 때문에 초결과 종결에 도달하는 시점은 수화반응속도 상수(rate constant :  $k_T$ )와 반비례한다고 할 수 있다( $k_T \propto 1/t_i$ ).

상기의 조건과 가정하에서 Arrhenius 함수에 의한 초결과 종결시점에서의 겉보기 활성화 에너지를 구할 수 있는데, ASTM C 1074에서 제안하고 있는 방법을 이용하여,  $\ln(k_T)$  대신  $\ln(1/t_i)$ 로 대체하고, 이를 절대온도(T)의 역수와의 함수 관계식을 구하고 이를 회귀 분석하여 초결과 종결에서의 겉보기 활성화 에너지를 구하게 된다.

이러한 방법으로 산정된 겉보기 활성화 에너지( $E_a$ )는 Freisleben-Hansen의 등가재령 식에 대입하면 초결과 종결시점에서의 등가재령을 산정할 수 있을 것으로 사료된다.<sup>6)</sup>

## 3. 실험계획 및 방법

### 3.1 실험계획

본 연구의 실험계획 및 배합사항은 표 1과 같다.

먼저, 플레인 콘크리트는 W/B 50% 1수준에 대하여 목표슬럼프 150±25 mm, 목표공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 하

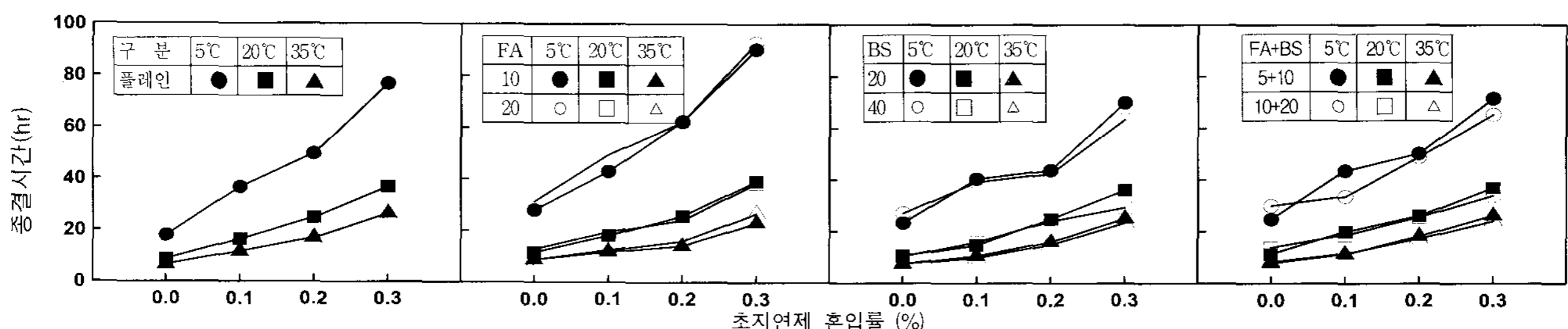


그림 1. 혼화제 치환 및 초지연제 혼입률 변화에 따른 양생온도별 종결시간

였고, 혼화재 치환 및 초지연제 혼입률을 조합한 총 44배치에 대하여 AE감수제 사용량을 변화시켜 배합설계 하였다. 실험사항으로 응결시간 측정은 양생온도 5, 20 및 35℃ 의 3수준에 대하여 측정하도록 실험계획 하였다.

표 1. 실험계획 및 배합사항

| W/B (%) | W (kg/m <sup>3</sup> ) | S/a (%) | 혼화재 치환율 (C×%) | 초지연제 혼입률 (C×%) | AE 감수제 (%) | 질량배합 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |    |     |
|---------|------------------------|---------|---------------|----------------|------------|---------------------------|-----|-----|----|-----|
|         |                        |         |               |                |            | C                         | S   | G   | FA | BS  |
| 50      | 185                    | 48      | Plain         |                | 0.2        | 371                       | 798 | 905 | -  | -   |
|         |                        |         | FA            | 10             | 0.1        | 334                       | 793 | 900 | 37 | -   |
|         |                        |         |               | 20             | 0.08       | 296                       | 788 | 895 | 74 | -   |
|         |                        |         | BS            | 20             | 0.08       | 296                       | 796 | 903 | -  | 76  |
|         |                        |         |               | 40             | 0.06       | 224                       | 793 | 900 | -  | 151 |
|         |                        |         | FA+BS         | 5+10           | 0.07       | 315                       | 796 | 903 | 18 | 38  |
|         |                        |         |               | 10+20          | 0.05       | 268                       | 790 | 897 | 37 | 76  |

\* FA:플라이애시 BS:고로슬래그 미분말

### 3.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 A사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 충북 청원군 옥산산 강모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 충북 청원군 옥산산 25mm 부순 굵은 골재를 사용하였다. 또한, 혼화재로 플라이애시는 분급 정제된 보령 화력산, 고로슬래그 미분말은 국내산을 사용하였다. 혼화제로 AE 감수제는 나프탈렌계를 사용하였으며, 초지연제는 본 연구팀에서 개발한 당류계를 사용하였다. 각각의 물리적 성질은 표 2~6과 같다.

표 2. 시멘트의 물리적 성질

| 밀도 (g/cm <sup>3</sup> ) | 분말도 (cm <sup>2</sup> /g) | 안정도 (%) | 응결시간(분) |     | 압축강도(MPa) |      |      |
|-------------------------|--------------------------|---------|---------|-----|-----------|------|------|
|                         |                          |         | 초결      | 종결  | 3일        | 7일   | 28일  |
| 3.15                    | 3,265                    | 0.07    | 232     | 429 | 24.5      | 33.1 | 43.9 |

표 3. 고로슬래그의 물리적 성질

| 밀도 (g/cm <sup>3</sup> ) | 분말도 (cm <sup>2</sup> /g) | 화학적 성분(%) |                 |      |        |
|-------------------------|--------------------------|-----------|-----------------|------|--------|
|                         |                          | MgO       | SO <sub>3</sub> | 강열감량 | 염화물 이온 |
| 2.91                    | 4,463                    | 5.73      | 2.58            | 0.47 | 0.001  |

표 4. 플라이애시의 물리적 성질

| 단위 수량비(%) | 밀도                   | 분말도                  | 압축강도 | SiO <sub>2</sub> | 강열감량 | 습분  |
|-----------|----------------------|----------------------|------|------------------|------|-----|
|           | (g/cm <sup>3</sup> ) | (cm <sup>2</sup> /g) | 비(%) | (%)              | (%)  | (%) |
| 99        | 2.30                 | 3,368                | 97   | 98               | 3.6  | 0.3 |

표 5. 골재의 물리적 성질

| 구분   | 밀도                   | 조립률 | 흡수율  | 단위용적 질량(kg/m <sup>3</sup> ) | 0.08mm체 통과량(%) |
|------|----------------------|-----|------|-----------------------------|----------------|
|      | (g/cm <sup>3</sup> ) | (%) | (%)  |                             |                |
| 잔골재  | 2.55                 | 2.9 | 1.80 | 1,520                       | 1.5            |
| 굵은골재 | 2.67                 | 6.9 | 0.69 | 1,567                       | 0.2            |

표 6. 초지연제의 물리적 성질

| 초지연제 구성성분 | 성분                    | 색상 및 형태 | 밀도 (20℃) |
|-----------|-----------------------|---------|----------|
| 주성분       | Sucrose               | 흰색, 고상  | 1.60     |
| 증점제       | Poly ethylene oxide   | 흰색, 분말  | 1.00     |
| AE제       | Sodium lauryl sulfate | 연황색, 액상 | 1.04     |

### 3.3 실험 방법

본 연구의 실험 방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합하였다. 굳지 않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402, 슬럼프 플로우는 KS F 2594에 의거 실시하였다. 공기량 및 단위 용적 질량은 KS F 2421 및 2409의 규정에 따라 실시하였고, 응결시간은 KS F 2436의 프록터 관입저항 시험방법에 의거 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 콘크리트의 기초물성

초지연제와 혼화재의 조합사용에 따른 슬럼프 및 공기량은 배합설계를 실시하였음에 따라 모두 목표 슬럼프 150±25mm 및 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하는 것으로 나타났다.

### 4.2 응결 특성

그림 1 및 표 7은 혼화재 치환 및 초지연제 혼입률 변화에 따른 양생온도별 종결시간을 나타낸 것이다. 전반적으로 초지연제 혼입률이 증가할수록 양생온도가 낮을수록 응결시간이 지연되는 것으로 나타났고, 초지연제 무혼입의 경우 혼화재 치환 콘크리트는 치환률이 많아질수록 응결시간은 지연되는 것

표 7. 초지연제 혼입률별 종결시간

| 초지연제 혼입률(%) | 종결시간(hr) |      |      |      |
|-------------|----------|------|------|------|
|             | 5℃       | 20℃  | 35℃  |      |
| 플레인         | 0        | 17.8 | 8.6  | 6.5  |
|             | 0.1      | 36.5 | 16.3 | 11.4 |
|             | 0.2      | 49.6 | 24.8 | 16.8 |
|             | 0.3      | 76.8 | 36.7 | 26.3 |
| FA 10       | 0        | 27.8 | 11.5 | 8.6  |
|             | 0.1      | 42.8 | 17.9 | 11.6 |
|             | 0.2      | 62.2 | 25.2 | 13.9 |
|             | 0.3      | 90.1 | 39.4 | 22.9 |
| FA 20       | 0        | 31.3 | 12.7 | 8.5  |
|             | 0.1      | 49.4 | 19.4 | 12.3 |
|             | 0.2      | 62.1 | 23.8 | 15.7 |
|             | 0.3      | 92.7 | 38.2 | 26.5 |
| BS 20       | 0        | 23.1 | 10.5 | 7.4  |
|             | 0.1      | 40.4 | 14.6 | 10.5 |
|             | 0.2      | 43.7 | 24.8 | 15.8 |
|             | 0.3      | 69.9 | 35.9 | 24.9 |
| BS 40       | 0        | 26.9 | 10.3 | 7.4  |
|             | 0.1      | 39.2 | 15.7 | 9.6  |
|             | 0.2      | 42.3 | 23.9 | 14.7 |
|             | 0.3      | 63.4 | 29.1 | 23.3 |
| FA+BS 5+10  | 0        | 24.7 | 11.1 | 7.7  |
|             | 0.1      | 43.6 | 19.9 | 11.1 |
|             | 0.2      | 50.3 | 26.0 | 18.2 |
|             | 0.3      | 71.6 | 36.9 | 26.2 |
| FA+BS 10+20 | 0        | 29.9 | 13.7 | 8.2  |
|             | 0.1      | 33.5 | 18.6 | 11.4 |
|             | 0.2      | 48.9 | 25.5 | 17.2 |
|             | 0.3      | 65.4 | 33.8 | 23.9 |

으로 나타났는데, 플레인 배합의 경우 양생온도 5℃의 경우 종 시간은 18시간이 소요되었고, 20℃의 경우 8시간, 35℃의 경우 6시간 전후에서 종결이 측정되었다. 이후 초지연제 혼입률이 증가함에 따라 종결시간은 비례적으로 지연되었는데, 5℃의 경우 초지연제 혼입률 0.3%에서는 76시간 전후에서 종결이 측정되어 대략 60시간 정도 지연됨을 알 수 있었고, 20℃ 및 35℃의 경우 역시 저온 조건보다는 덜하지만 대략 플레인 배합의 3~5배정도 종결시간이 지연됨을 확인할 수 있었다.

한편 초지연제 동일 첨가량에서 FA치환을 제외한 모든 혼화재 치환 콘크리트의 응결시간은 초지연제 혼입률이 소량일 때는 플레인 보다 지연되었지만, 초지연제 혼입률이 높아질수록 혼화재를 사용하지 않은 동일조건의 초지연제 혼입 콘크리트에 비하여 1~3시간 정도 단축되는 것으로 나타났다. 이는 초지연제가 혼화재에 흡착되어 응결촉진을 일으켰거나, 혹은 잠재수경성 반응에 초지연제가 소비되어 응결촉진 작용을 일으키는 등 단독 혹은 복합작용일 것으로 사료된다.

### 4.3 겔보기 활성화 에너지 산정

표 8은 그림 1의 종결시간 자료를 토대로 Arrhenius 함수에 의한 선형 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 이 회귀식의 기

표 8. 혼화재 치환율 및 초지연제 혼입률별 종결시간의 Arrhenius 회귀분석 결과

| 구분          | 초지연제 혼입률 (%) | 회귀 계수   |           |       | Ea (KJ/mol) |
|-------------|--------------|---------|-----------|-------|-------------|
|             |              | $\ln A$ | $B(Ea/R)$ | 결정 계수 |             |
| 플레인         | 0            | 7.64    | 2908.6    | 0.952 | 24.3        |
|             | 0.1          | 8.40    | 3318.5    | 0.962 | 27.7        |
|             | 0.2          | 7.25    | 3090.9    | 0.982 | 25.8        |
|             | 0.3          | 6.79    | 3077.8    | 0.966 | 25.7        |
| FA 10       | 0            | 8.89    | 3371.7    | 0.935 | 28.1        |
|             | 0.1          | 9.77    | 3745.3    | 0.974 | 31.2        |
|             | 0.2          | 11.32   | 4286.6    | 0.994 | 35.8        |
|             | 0.3          | 9.63    | 3918.8    | 0.990 | 32.7        |
| FA 20       | 0            | 9.98    | 3712.6    | 0.965 | 31.0        |
|             | 0.1          | 10.51   | 3989.2    | 0.973 | 33.3        |
|             | 0.2          | 10.12   | 3940.1    | 0.962 | 32.9        |
|             | 0.3          | 8.47    | 3593.0    | 0.959 | 30.0        |
| BS 20       | 0            | 8.69    | 3274.4    | 0.966 | 27.3        |
|             | 0.1          | 10.34   | 3876.3    | 0.936 | 32.3        |
|             | 0.2          | 6.65    | 2897.1    | 0.998 | 24.2        |
|             | 0.3          | 6.41    | 2951.4    | 0.981 | 24.6        |
| BS 40       | 0            | 10.10   | 3698.3    | 0.938 | 30.8        |
|             | 0.1          | 10.83   | 4015.3    | 0.980 | 33.5        |
|             | 0.2          | 7.07    | 3006.3    | 0.999 | 25.1        |
|             | 0.3          | 6.31    | 2887.3    | 0.925 | 24.1        |
| FA+BS 5+10  | 0            | 8.84    | 3332.2    | 0.968 | 27.8        |
|             | 0.1          | 10.3    | 3908.6    | 0.997 | 32.6        |
|             | 0.2          | 6.60    | 2913.4    | 0.980 | 24.3        |
|             | 0.3          | 6.13    | 2880.0    | 0.977 | 24.0        |
| FA+BS 10+20 | 0            | 9.96    | 3704.7    | 0.993 | 31.0        |
|             | 0.1          | 7.59    | 3086.1    | 0.999 | 25.7        |
|             | 0.2          | 6.90    | 2990.6    | 0.988 | 25.0        |
|             | 0.3          | 6.21    | 2876.4    | 0.978 | 24.0        |

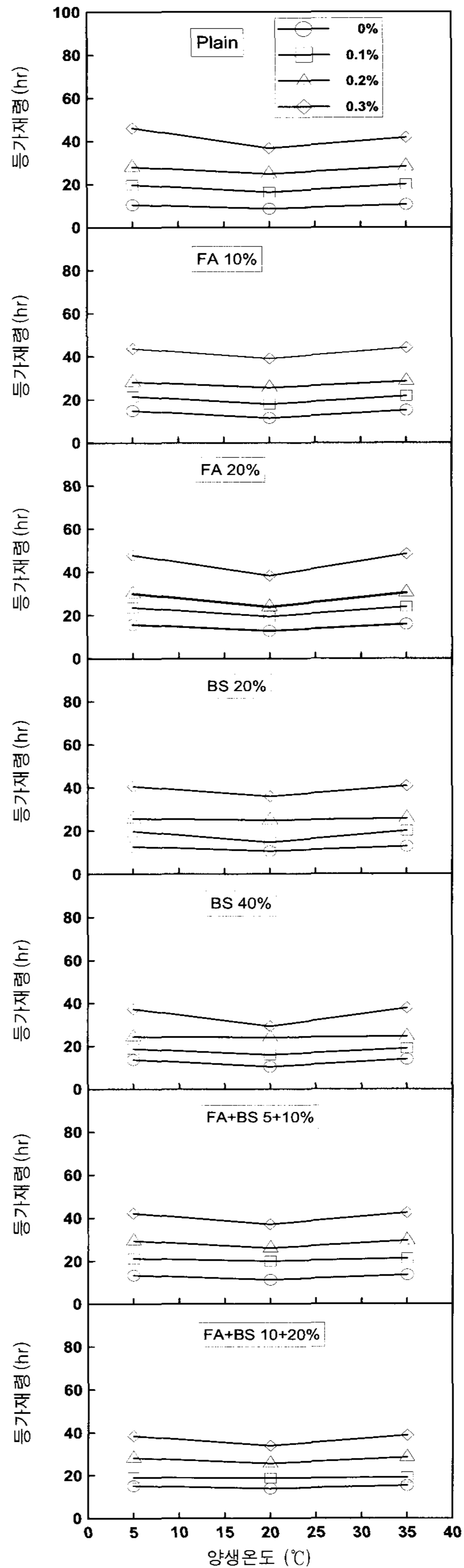


그림 2. 혼화재 및 초지연제 혼입률 변화에 따른 양생온도별 종결시 등가재령

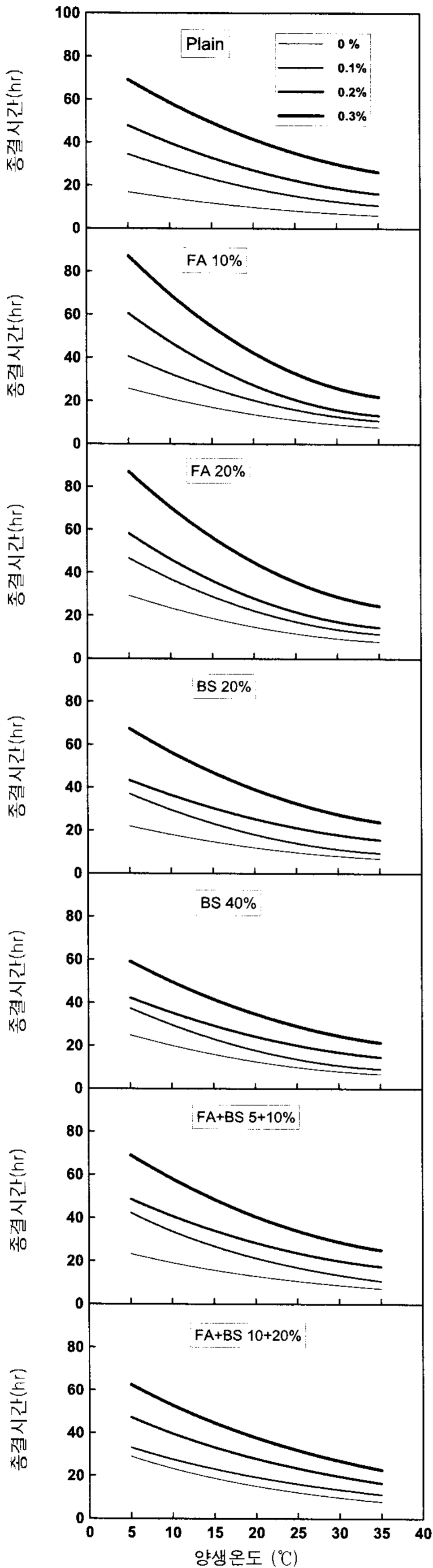


그림 3. 혼화재 및 초지연제 혼입률별 양생온도에 따른 응결시간 추정

울기 값은  $Ea/R$  값으로 기울기 값에 기체상수( $R$ )를 곱하여 겔보기 활성화 에너지( $Ea$ )를 구한다. 대체적으로 겔보기 활성화 에너지는 24~35 KJ/mol의 범위로 나타났는데, 이는 일반적인 조건에서 알려진 겔보기 활성화 에너지 값의 범위인 30~50 KJ/mol의 범위보다 작은 값으로서 이는 초지연제의 사용에 따른 원인으로 판단된다.

#### 4.4 등가재령에 의한 응결시간 예측

그림 2는 표 8의 결과를 토대로 혼화재 및 초지연제 혼입률 변화에 따른 양생온도별 응결 시의 등가재령을 나타낸 것이다. 전반적으로 등가재령은 초지연제 혼입률 별로 양생온도에 관계없이 유사한 값을 갖는 것으로 나타났는데, 이는 적산온도의 개념에 부합하는 것으로 응결시간 예측에 적산온도의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

표 9는 지수함수를 통해 그림 2의 등가재령에 의한 혼화재 치환률 별 응결시간 예측 식을 구한 것이다. 먼저, 플레인 배합에서 응결시간의 경우 혼입률이 작은 범위에서는 작게 나타나지만, 초지연제 혼입률이 증가할수록 여타의 예측식보다 응결시간 값이 크게 증가하는 것으로 나타났고, FA+BS 10+20의 경우 초지연제 혼입률이 낮을 경우는 응결시간 값이 크지만 초지연제 혼입률이 증가할수록 응결시간 증가 경향은 가장 적은 것으로 나타났다.

그림 3 및 표 10은 혼화재 및 초지연제 혼입률 변화에 따른 양생온도별 응결시간을 추정한 결과를 나타낸 것이다. 이는 등가 재령 식으로부터 겔보기 활성화 에너지와 양생 온도를 이용하여 계산한 것으로서, 전반적으로 예측된 응결 시간은 초지연제 혼입률이 증가할수록 양생온도가 낮을수록 증가하는 것으로 나타났다.

표 9. 혼화재 조합 사용에 따른 응결시간 예측식

| 구 분         | 예측식                             | 결정계수       |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 플레인         | $t_e = 10.519e^{4.685 \cdot S}$ | $R^2=0.96$ |
| FA 10       | $t_e = 13.728e^{3.671 \cdot S}$ | $R^2=0.95$ |
| FA 20       | $t_e = 14.796e^{3.556 \cdot S}$ | $R^2=0.92$ |
| BS 20       | $t_e = 11.970e^{3.897 \cdot S}$ | $R^2=0.96$ |
| BS 40       | $t_e = 12.497e^{3.368 \cdot S}$ | $R^2=0.94$ |
| FA+BS 5+10  | $t_e = 13.241e^{3.798 \cdot S}$ | $R^2=0.97$ |
| FA+BS 10+20 | $t_e = 14.358e^{3.142 \cdot S}$ | $R^2=0.98$ |

여기서  $t_e$  : 등가재령 S : 초지연제 혼입률

한편, 표 9의 혼화재 조합별 응결시간 예측 식을 하나의 통합된 식으로 제시하기 위해 다중회귀 분석을 실시하여 다음

식 (4)를 제시하였다.

$$t_e = 13.68 \cdot FA - 5.78 \cdot BS + 88.49 \cdot SRA + 11.41 \quad (4)$$

(R=0.9135)

여기서  $t_e$  : 등가재령

FA: 플라이애시 치환률

BS : 고로슬래그 치환률

SRA : 초지연제 혼입률

$E_a$  : 겔보기 활성화 에너지 (표 10 참조)

R : 가스상수 (8.314J/mol K)

$T_r$  : 20°C에서의 절대온도 (293K)

T : 양생온도 T에서의 절대온도 (K)

그림 4는 본 연구에서 제시한 추정식을 이용하여 종결시간의 실측치와 예측치를 비교한 것으로 그림에서도 알 수 있듯이 실측치와 추정치가 매우 양호한 상관성을 보이고 있는 것으로 나타났다.

따라서 적산온도방법이 혼화재 치환 콘크리트의 응결시간 예측에 매우 유효하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한 실무현장에서 초지연제와 혼화재를 혼합 사용한 초지연 콘크리트의 응결시간 관리에 그림 3과 식 (5)를 이용할 경

표 10. 초지연제 혼입률별 종결시간 예측치

| 초지연제 혼입률(%)    |     | 종결시간(hr) |      |      |
|----------------|-----|----------|------|------|
|                |     | 5°C      | 20°C | 35°C |
| 플레인            | 0   | 16.8     | 9.8  | 6.0  |
|                | 0.1 | 34.4     | 18.6 | 10.7 |
|                | 0.2 | 47.8     | 27.0 | 16.1 |
|                | 0.3 | 69.1     | 41.4 | 26.1 |
| FA 10          | 0   | 25.7     | 13.8 | 7.8  |
|                | 0.1 | 40.6     | 20.3 | 10.9 |
|                | 0.2 | 60.5     | 27.3 | 13.3 |
|                | 0.3 | 87.2     | 42.2 | 21.9 |
| FA 20          | 0   | 29.3     | 14.7 | 7.9  |
|                | 0.1 | 46.6     | 22.3 | 11.4 |
|                | 0.2 | 58.1     | 28.0 | 14.5 |
|                | 0.3 | 86.9     | 44.7 | 24.5 |
| BS 20          | 0   | 21.9     | 12.0 | 6.9  |
|                | 0.1 | 37.0     | 18.1 | 9.5  |
|                | 0.2 | 43.4     | 25.3 | 15.6 |
|                | 0.3 | 67.4     | 39.1 | 23.9 |
| BS 40          | 0   | 24.8     | 12.5 | 6.7  |
|                | 0.1 | 37.3     | 17.7 | 9.0  |
|                | 0.2 | 42.2     | 24.2 | 14.6 |
|                | 0.3 | 59.1     | 34.6 | 21.4 |
| FA+BS<br>5+10  | 0   | 23.4     | 12.6 | 7.2  |
|                | 0.1 | 42.8     | 20.8 | 10.8 |
|                | 0.2 | 48.5     | 28.3 | 17.4 |
|                | 0.3 | 68.9     | 40.4 | 25.0 |
| FA+BS<br>10+20 | 0   | 29.1     | 14.6 | 7.9  |
|                | 0.1 | 33.3     | 18.8 | 11.2 |
|                | 0.2 | 47.6     | 27.3 | 16.6 |
|                | 0.3 | 63.0     | 37.0 | 22.9 |

또한, 이를 양생온도에 따른 소요시간으로 환산하면 식 (5)가 얻어지게 되는데, 즉 식(5)를 이용하여 양생온도와 FA, BS 및 초지연제 사용량을 대입하면 해당 혼화재료의 조합에 따른 종결예상 시간을 산정할 수 있게 된다.

$$t = \frac{13.68FA - 5.78BS + 88.49SRA + 11.41}{\exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (5)$$

여기서  $t_e$  : 등가 재령 (일@20°C)

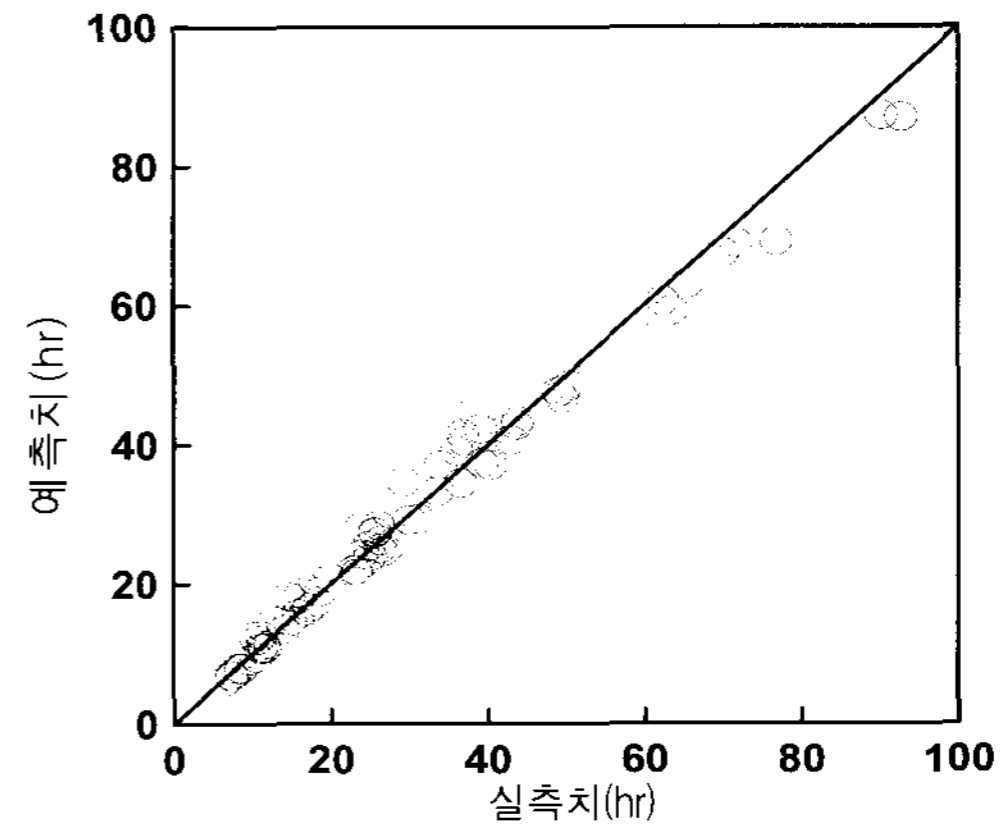


그림 4. 종결시간 실측치와 예측치의 비교

우 보다 정확한 응결시간 추정이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 적산온도방법에 의해 혼화재를 조합하여 사용한 초지연 콘크리트의 응결시간을 추정하는 방법을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 혼화재 치환 및 초지연제 혼입률 변화에 따른 양생온도별 응결시간은 초지연제 혼입률이 증가할수록 양생온도가 낮을수록 지연되는 것으로 나타났다.
- 2) Arrhenius의 함수에 의한 겔보기 활성화 에너지는 배합별로 약간의 차이는 존재하지만 24~35 KJ/mol의 범위로 나타났는데, 이는 일반적인 조건에서의 겔보기 활성화 에너지 값의 범위인 30~50 KJ/mol의 범위보다 작은 값으로 나타났다.
- 3) 혼화재 치환률 및 초지연제 혼입률별 겔보기 활성화 에너지를 등가재령 식에 대입한 결과 양생온도별로 거의

유사한 값으로 나타나 응결시간 예측에 적산온도 개념의 적용이 적합한 방법인 것으로 판단된다.

- 4) 본 연구에서는 등가재량을 이용하여 FA 및 BS 그리고 초지연제 혼입률 변화를 복합적으로 고려할 수 있는 콘크리트의 응결시간 예측 모델을 제시하였는데, 예측치는 실측치와 매우 양호한 상관성을 갖는 것으로 나타나 실무현장에서 응결시간과 관련하여 보다 합리적인 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 한민철, 초지연제 및 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 응결시간 예측, 한국 콘크리트 학회 논문집, 18권 6호, 2006,12, pp.759~767
2. 한민철, 한천구, 적산온도방식에 의한 초지연제 사용 콘크리트의 응결시간 예측, 대한건축학회논문집 구조계 21권 5호, 2005, 5, pp.105~112
3. 한천구, 윤치환, 보통 및 초지연의 부어넣기 방법변화에 따른 매스콘크리트의 수화열 특성, 대한건축학회연합논문집, Vol.4, No.3, 2002.8, pp.35~42
4. 한천구, 한민철, 윤치환, 심보길, 당분류의 초지연제를 이용한 콘크리트의 응결 및 역학적 특성, 한국콘크리트학회논문집, Vol.14, No.4, 2002.8, pp.589~597
5. Carino, N. J., The Maturity Method, CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press., 1991, pp.101~146
6. Schindler, A. K., Concrete Hydration, Temperature Development, and Setting at Early Ages, Ph.D. Dissertation, The university of Texas at Austin, 2002
7. Freislenbe, Hansen, Pederson, J., Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength, Nordisk Betong, 1977, pp.19~34
8. Roberto C. A. Pinto, Kenneth C. Hover, Application of Maturity Approach to Setting Times, ACI Materials Journal, Vol.96, No.6 1999, pp.686~691
9. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM C 1074-93

(접수 2008. 4. 20, 심사 2008. 6. 3, 게재확정 2008. 6. 10)