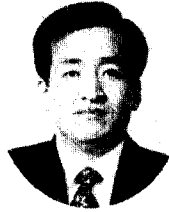


積算溫度方式을 이용한 高性能콘크리트의 強度推定方法

The Estimating Method of Strength Development of High Performance Concrete by the Maturity Method



권영진*



김무한**

1. 序 論

콘크리트의 강도발현은 시멘트의 수화반응에 의하여 나타나는 것으로, 수분이 충분히 존재하는 환경에서는 콘크리트의 강도는 재령과 온도의 함수로서 나타낼 수가 있다. 따라서 콘크리트의 강도와 온도·재령의 관계를 적절히 표현할 수가 있으면, 현장 콘크리트의 강도예측은 가능하고, 콘크리트의 강도발현에 대응한 시공을 행할 수가 있다. 콘크리트의 압축강도와 온도·시간함수의 관계에 관해서는 많은 연구가 행해지고 있으나, Bergstrom, Saul등⁽¹⁾에 의해 제안되고, 일본의 洪에 의해 체계화된 적산온도방식⁽²⁾과 Hansen, Pedersen등⁽³⁾에 의한 Arrhenius식을 도입한 등가재령(equivalent age)에 의한 표현등이 있다. 또한 이러한 온도·시간의 함수를 사용한 강도증진곡선식에 관하여도 많은 연구발표가 있다. Cheng⁽⁴⁾은 지수함수, 쌍곡선함수, 대수함수에 관하여 비교·검토하고 있고, Carino⁽⁵⁾는 기준강도를 고유치 datum temperature를 사용함으로써 강도

예측의 정도를 높일 수 있다고 하여 독자의 곡선식을 제안하고 있다. 이러한 강도증진곡선에 대하여 이웃 일본에서는 洪에 의해 2개의 대수곡선으로 회귀시키는 방법이 실용화되어 물시멘트비의 결정, 기포집 존재기간의 결정 및 임의 재령의 강도추정등에 적용되고 있다⁽⁶⁾. 그후 金등⁽⁷⁾은 3차 회귀곡선으로 이 관계를 제안하고, 또한 鎌田등⁽⁸⁾은 이것을 발전시켜 성장곡선의 일종인 로지스틱(logistic)곡선을 응용한 방법을 제안하고 있으며 최근에는 강도발현을 고려한 시공지원 시스템을 개발하고 그 활용에 관하여 보고하고 있다.

한편 국내에서는 金이 처음으로 본 적산온도방식을 소개하고 체계화시키고 있으며, 金의 지도로 권이 그 적용성을 보고하고 있으나,^(9,10) 실용화를 위해서는 더욱 광범위한 연구가 필요한 실정이다.

최근 콘크리트 기술의 급속한 발전에 따라 고품질·고성능의 콘크리트가 개발되고 있다. 통상의 콘크리트보다 수배의 강도를 발현하는 고강도 콘크리트와 현장시공에서 다짐을 필요로 하지 않는 고유동 콘크리트가 그 대표적인 것으로 이러한 기술적인 전개와 그 이용은 향후의 콘크리트공학의 발달에 큰 역할을 할 것으로 생각된다.

* 정회원, 쌍용 안전기술사업단, 보수사업팀 과장, 공학박사
 **정회원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

이러한 고강도 콘크리트 및 고유동 콘크리트 개발의 기초가 되는 기술적인 성과는 1960년대에 개발된 고성능감수제이다. 콘크리트의 콘시멘트를 일정하게 하고 단위수량을 저감시키는 방법과 단위시멘트량 및 단위수량을 일정하게 유지한 상태에서 콘시멘트를 증진시키는 방법으로 고성능감수제의 활용방법은 대별된다. 따라서 전자의 방법으로는 낮은 물시멘트비의 고강도 콘크리트를 제작할 수가 있고, 후자의 방법으로는 유동성이 좋은 콘크리트를 제작할 수가 있다. 고유동 콘크리트는 후자의 목적을 보다 적극적으로 발전시킨 것이고, 이와 같은 단계에서는 유동성 뿐만 아니라 재료분리에 대한 저항성이 요구된다.

본고에서는 전술한 고강도·고유동 콘크리트의 압축강도 발현을 적산온도 방식을 활용하여 추정하는 방법에 관하여 기술한 것이다. 단 여기에서 서술하는 고강도콘크리트 및 고유동 콘크리트란 보통포틀랜드시멘트만을 이용하고 별도의 혼화재를 사용하지 않은 고강도 콘크리트와 고로슬래그 미분말 등을 혼입한 粉體系의 고유동 콘크리트로 한정하였다.

2. 콘크리트의 強度推定方法

2.1 積算溫度방식과 等價材齡에 의한 방법

콘크리트강도의 추정을 목적으로 콘크리트의 강도를 양생온도와 시간의 함수로서 나타내는 방법에는 전술한 바와 같이 대별하여 2가지의 방법이 있다. 그 하나는 콘크리트의 강도를 온도의 시간에 따른 적산치로 나타내는 것으로 적산온도방식(maturity method)으로 불리워지고, 다른 하나는 화학반응을 기술하는 Arrhenius의 식을 이용하여 기준으로 되는 온도에서 양생된 콘크리트의 재령으로 환산시켜 콘크리트의 강도를 나타내는 것으로 등가재령에 의한 방법(equivalent age method)이다.

2.2 적산온도와 초기온도 보정항

적산온도는 일반적으로 (1)식으로 나타낼 수 있

다.

$$M = \int_0^t (T - T_0) dt \quad (1)$$

여기에서 M : 적산온도

T : 실제의 콘크리트의 온도

T₀ : 기준온도

기준온도(T₀)에 관해서는, 일본건축학회 표준 사양서에서는 洪의 제안을 기초로 하여 Saul에 의한 T₀ = -10℃를 채용하여 寒中 콘크리트의 시공 체계를 구축하고 있다.

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta + 10) \quad (2)$$

여기에서 M : 적산온도(°D · D)

θ : 일평균기온(°C)

여기에 T₀ = -10℃로 하는 개념은 寒中 콘크리트 분야를 중심으로 세계적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 그 값은 광범위한 콘크리트에 일반적으로 적용될 수는 없다. Carino는 이 값이 시멘트의 화학조성, 입도등에 따라 상이하기 때문에 이용하기 위해서는 최적치를 구하여야 한다고 보고⁽¹¹⁾하고 있으며, 모르타르에 의해 최적치를 구하는 방법이 ASTM C 1074⁽¹²⁾에 기술되고 있다. 또한 金燈도 이 값이 물시멘트비, 시멘트종별에 따라 달라지는 것을 보고⁽⁷⁾하고 있다.

To = -10℃로 한 경우, 동일 적산온도시 초기 재령에서의 콘크리트의 강도는 고온으로 양생한 경우에 크게 되는 경향이 있다. 여기에서 초기온도 보정항(C)이 제안되어 (2)식은 아래와 같이 된다.⁽¹³⁾

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta + 10) + C \quad (3)$$

$$C = -25 + 1.25\theta \quad (4)$$

(보통 포틀랜드 시멘트의 경우)

여기에서 C : 초기온도 보정항

θ : 초기재령시의 온도(°C)

(3)식은 저온에서 양생된 경우, 그 온도에 따라 실제로 얻어진 적산온도를 보정하는 것으로 그 보정항은 초기재령시에는 강도식에 영향을 주나 장

기적으로는 무시할 수 있는 값으로 된다.

적산온도의 기준치(T_0)를 콘크리트별로 최적치를 구하므로써 그 추정정도는 향상된다. 그러나 그 결과 온도의 효과는 콘크리트 종류별로 달라지게 되고 그 영향정도를 예측하는 것은 곤란하게 된다. 기준 온도치(T_0)를 사용하기 위해서는 실용성을 고려하여 적합하게 사용되는 것이 요망된다.

2.3 적산온도를 활용한 강도추정식

압축강도와 적산온도의 관계식으로부터 강도추정식을 유도할 수 있다. 일본건축학회 표준 사양서에는 한랭지의 건축공사를 대상으로 전술의 (2)식의 적산온도식에 따라 물시멘트비의 보정계수가 기술되고 있다.

$$\chi = \alpha \cdot \chi_{20} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\log(M-100)+0.13}{3} \quad (6)$$

(보통 포틀랜드 시멘트의 경우)

여기에서 α : 적산온도 M에 따른 물시멘트비의 보정계수

χ_{20} : 콘크리트의 양생온도가 20℃일 때 재령 28일에서 배합강도를 얻기 위한 물시멘트비

전술한 α 는 실제 콘크리트가 얻는 적산온도에 따른 물시멘트비의 저감계수이고, 직접강도를 산출하기 위한 강도식은 아니다. 여기에서는 적산온도를 대상으로한 축상에서 S자형으로 되는 강도증진의 과정을 하나의 대수곡선으로 표현하고 있으므로 210°D·D(20℃에서 7일) 이상으로 한정된다.

S자를 그리는 성장곡선을 검토한 결과 鎌田 등은 강도증진의 전과정을 로지스틱(logistic)곡선과 고펜퍼쯔(gompertz)곡선에 의한 회기도 제안하였다⁽¹⁴⁾. 강도증진과정을 로지스틱곡선으로 표현하면 (7)식과 같고 고펜퍼쯔곡선으로는 (8)식이 얻어진다.

$$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-K \log M + m)} \quad (7)$$

$$F_c = F_\infty \cdot \exp\{-a(1/M)^b\} \quad (8)$$

여기에서 F_c : 최종강도(시간 t가 무한대일 경우의 압축강도)

M: 적산온도((3), (4)식에 의함)

K, m, a, b: 정수

한편 전술한 Carino는 적산온도와 압축강도의 관계를 쌍곡선식으로 나타내고 있다.

$$\frac{S/S_u}{1 - (S/S_u)} = AM_0 + AM \quad (9)$$

여기에서 S/S_u: 종극강도에 대한 비강도

M, M₀: 적산온도

2.4 等價材齡에 의한 방법

화학반응속도를 기술하는 아레니우스의 식을 응용한 강도식은 표준 온도에서 양생된 콘크리트의 재령을 기준으로 하여 등가재령으로서 (10)식으로 나타낼 수 있다.

$$t_e = \int_0^t \exp\left[-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)\right] dt \quad (10)$$

여기에서 t_e: 등가재령

T: 실제온도(°K)

T_s: 기준온도(°K)

E: 활성화에너지(실험에 의하여 구함)

R: 기체정수(8.314J/mole)

이 방법에서는 기준으로 되는 온도를 미리 정하여 활성화 에너지를 실험에 의해 결정함으로써 실제의 온도조건하에서의 콘크리트의 강도를 기준온도로 양생된 콘크리트의 재령에 대한 등가치로서 얻을 수가 있다. 따라서 기준온도 조건하에서 강도와 재령의 관계를 미리 파악할 수 있으면 이 관계로부터 실제의 온도조건에서의 강도를 얻을 수가 있다.

등가재령에 의한 평가는 적산온도에 의한 강도추정과 비교하여 넓은 온도범위의 콘크리트에 적용가능할 것으로 생각된다.⁽⁵⁾

3. 高強度 콘크리트의 強度發現特性和 積算溫度와의 관계⁽¹³⁾

저물시멘트비의 고강도 콘크리트의 강도발현 또한 시멘트의 수화반응에 의존하므로, 양생온도와 재령에 의한 영향을 크게 받는다. 그림 1은 물시멘트비별로 양생온도에 따라 강도증진의 경향이 다르게 나타나고 있는 것을 보여준다. 동일 적산온도에서 저온으로 양생될 수록 초기재령에서는 강도가 낮게 발현되나, 장기재령에서는 양생온

도에 의한 차는 적어지는 경향을 알 수 있다. 또한 저물시멘트비의 고강도 콘크리트일수록 보통 콘크리트 보다 초기재령에서의 강도가 증진하는 경향이 빠르게 나타나고 있어 보통 콘크리트와는 강도증진 성상이 다른 것을 알 수 있다. 압축강도와 적산온도의 관계에서는 그림2에 나타낸 바와 같이 전술한 바 있는 성장곡선의 1종인 고펜레쓰 곡선식을 이용한 경우가 로지스틱곡선을 적용한 경우보다 추정정도가 높은 것으로 판단되고 초기 양생온도의 영향을 고려한 강도 증진 곡선식과 아울러

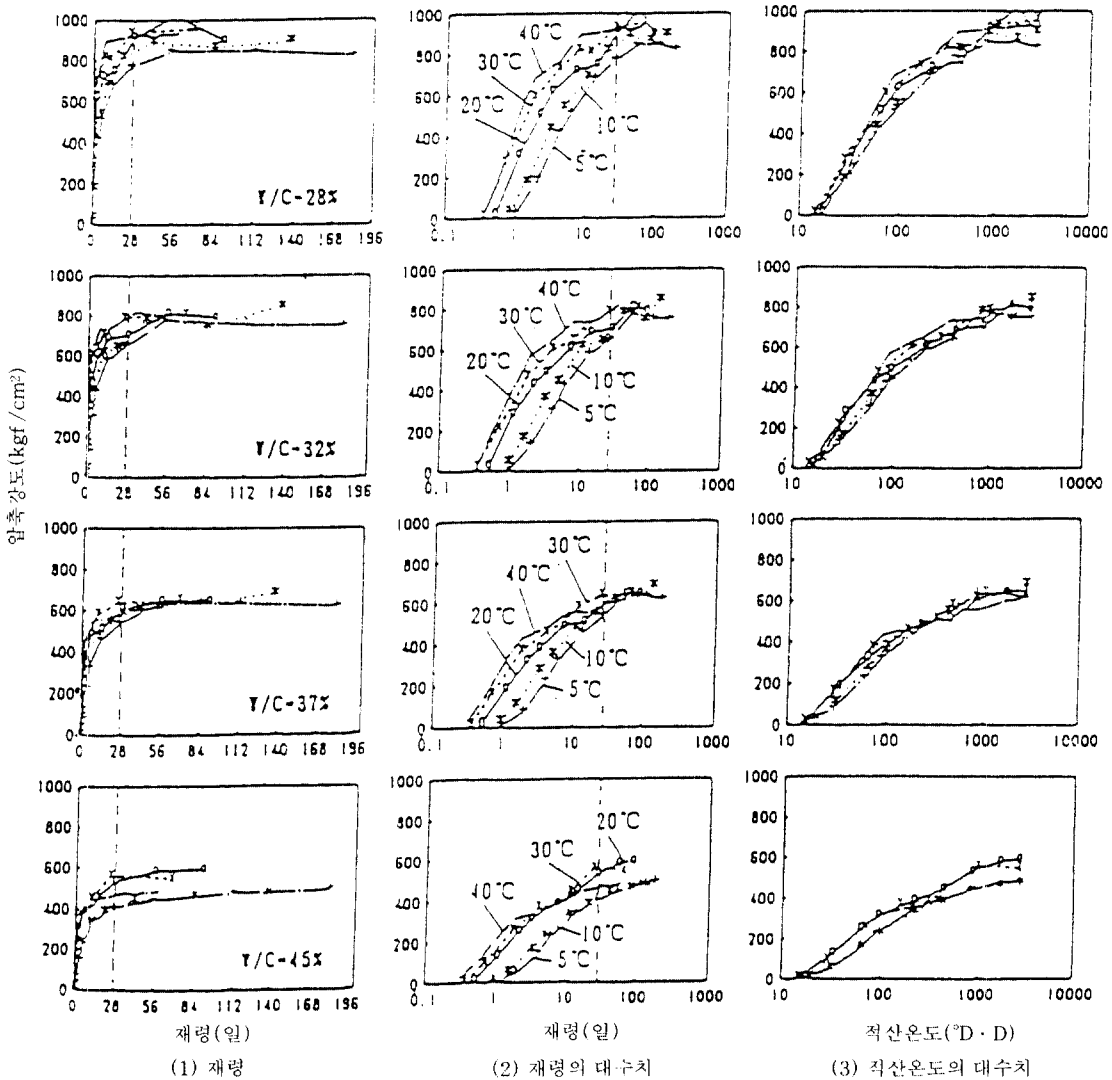


그림 1 고강도콘크리트의 강도증진 경향

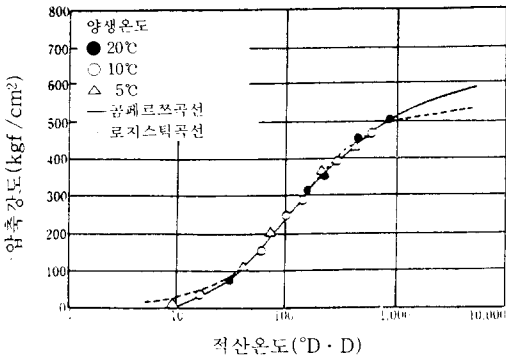
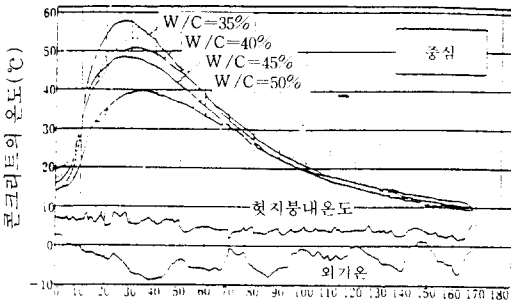


그림 2 고펜페르프곡선과 로지스틱곡선에 의한 압축강도 증진의 검토



타설후의 경과시간(시간)

그림 3 기동부재의 온도이력 곡선

표 1과 같이 기온에 의한 강도의 보정치가 제안되고 있다⁽¹⁵⁾.

고강도 콘크리트의 경우, 경화후의 콘크리트의 성능을 저하시키지 않고, 양호한 워커빌리티를 얻기 위하여 고성능감수제를 사용하여, 종래의 보통 콘크리트보다 적은 단위수량으로 저물시멘트비를 실현시켜 고강도 콘크리트를 제작하는 방법이 기본적인 제조기술이나, 그 결과로서 콘크리트의 단위

표 1 기온에 의한 보정치(보통 포틀랜드시멘트)의 참고치

관리재령 (일)	콘크리트의 타설로부터 n일까지 기간의 예상 평균기온의 범위(°C)			
	3 이상	3 이상 8 미만	6 이상 13 미만	3 이상 6 미만
91	3 이상	-	-	-
56	8 이상	3 이상 8 미만	-	-
42	13 이상	6 이상 13 미만	3 이상 6 미만	-
28	18 이상	12 이상 18 미만	7 이상 12 미만	3 이상 7 미만
T_n (kgf/cm ²)	0	30	60	90

시멘트량이 높아지게 된다. 시멘트의 수화반응은 발열반응이고, 양생온도가 높은 경우에 그 반응은 촉진된다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 단위 시멘트량이 높은 고강도 콘크리트에서는 구조체 내부의 온도상승이 크게 되고, 초기의 강도발현에는 유리하게 된다. 그러나 과도한 온도상승은 구조체 콘크리트의 장기강도의 증진을 둔화시키고, 온도 균열 발생의 원인으로 되기 때문에 고강도 콘크리트를 한층 콘크리트에 적용시킨 콘크리트 공사에서는 온도요인에 대한 주의 및 검토가 필요한 것으로 판단된다.

4. 高流動 콘크리트의 凝結性狀과 強度發現特性⁽¹⁶⁾

고유동콘크리트를 제조하기 위해서는 단위결합재량과 고성능(AE)감수제의 사용량이 증가하는 것 뿐만 아니라 사용하는 혼화재의 양도 증가되는 점 등을 특징으로서 들 수가 있다. 혼화재로서 고로슬래그미분말 등을 사용하는 경우는 일반적으로 응결시간이 늦어진다. 여기에 고성능감수제를 다량으로 사용하는 경우에는 더욱 응결시간이 늦어질 가능성이 크다. 이 경우에는 초기재령에서 압축강도의 발현이 상대적으로 저하될 가능성이 높고, 따라서 고유동콘크리트의 강도증진의 경향이 보통콘크리트 및 고강도콘크리트와 비교하여 상이할 가능성이 크다.

4.1 高流動 콘크리트의 凝結性狀

고유동 콘크리트에서 콘크리트로서의 배합으로부터 조골재를 제외한 성분으로 모르타르를 제작하고 비빔온도 20°C 조건에서 응결 시험을 행한 결과를 그림 4에 나타낸다. 그림4에는 보통모르타르와 비교하여 고유동 모르타르에서 명료하게 응결시간이 지연되는 경향을 알 수 있다. 또한 그림 5에는 비빔을 조골재를 포함한 콘크리트로서 행하고, 그 후 웨트스크린닝으로 조골재를 제거한 모르타르에 의한 결과이다. 처음부터 모르타르로 비빈 경우와 비교하여 보통 콘크리트와 고유동 콘크리트의 응결시간의 차는 적어지는 경향이고, 이

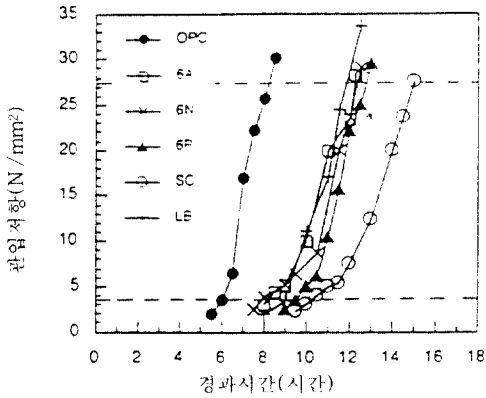


그림 4 보통 모르타르와 고유동 모르타르의 응결시험결과

발레	결합재	고성능(AE)감수제	비고
●	OPC	-	보통콘크리트
□	고로슬래그미분말	아미노설폰산	고유동콘크리트
×	"	나프타린	
▲	"	폴리카본산	동콘크리트
○	슬래그시멘트B종	"	
+LB	슬래그시멘트B종 + 석회석분말	"	

유동 콘크리트의 차는 적게 나타나고 있어, 고유동 콘크리트 응결시간의 온도의존성은 실용적으로 장애가 될 정도는 아닌 것으로 판단된다. 한편 비빔온도가 10℃로 됨으로서 고유동 콘크리트의 슬럼프플로우의 값이 초기치에 비교하여 90%로부터 60% 정도의 범위로 저하하는 결과로 되었다. 타 연구보고⁽¹⁷⁾에서도 온도가 저하함으로서 고유동 콘크리트의 유동성이 저하하는 것이 보고되고 있으나 이 유동성의 저하를 고성능(AE)감수제 증량으로 대처한 경우, 응결이 더욱 지연될 가능성이 크다. 고유동콘크리트의 응결성상, 특히 온도 의존성에 관하여 더욱 연구를 행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

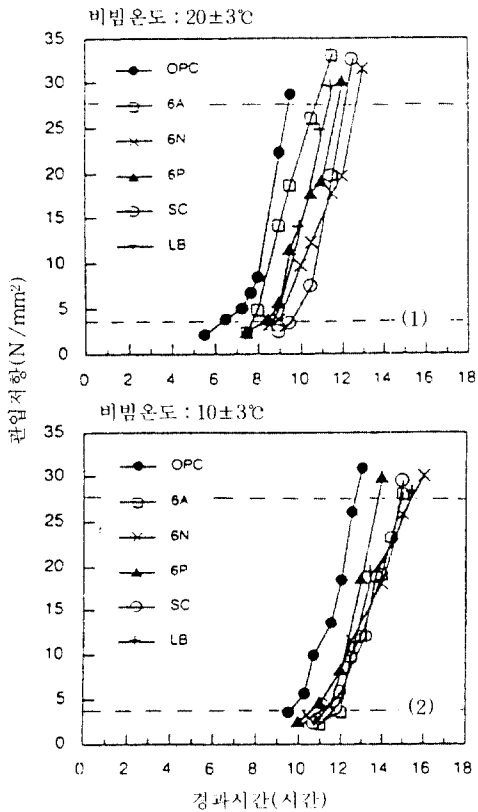


그림 5 보통 콘크리트와 고유동 콘크리트의 응결시험결과 (웨트스크린을 한 모르타르에 의한 시험)

4.2 高流動 콘크리트의 強度發現과 積算溫度와의 관계

고로슬래그미분말등의 분체계 고유동콘크리트의 강도증진특성을 그림 6에 나타낸다. 양생온도 20℃에서는 고성능(AE)감수제의 종류에 관계없이 물시멘트비 55%의 보통 콘크리트의 결과에 비하여 고강도를 발현하고 있으며, 장기 재령에서는 물시멘트비 37%의 고강도 콘크리트와 동등한 수준의 압축강도가 발현됨을 알 수 있다. 한편 10℃에서는 고유동 콘크리트이 압축강도의 발현은 보통 콘크리트보다는 높게 발현되기는 하지만 고강도 콘크리트에 비하여 강도증진이 저하하고 있다. 결합재로서 고로슬래그미분말을 혼입한 고유동 콘크리트의 경우에 압축강도의 발현율에 미치는 고성능(AE)감수제의 영향은 적고, 그 경향은 양생온도에 따라 상이한 것을 알 수 있다.

또한 그림 7은 결합재 종류와 양생온도별로 압

결과로부터 고유동 콘크리트의 응결지연은 실용적으로는 문제가 될 정도는 아닌 것으로 판단된다. 또한 비빔온도 10℃의 경우는 보통 콘크리트와 고

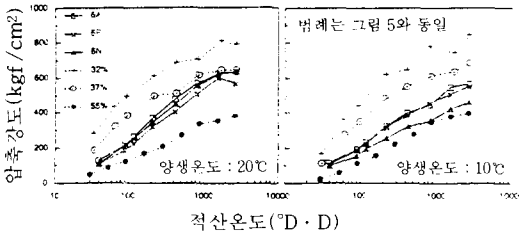


그림 6 고성능AE감수제의 종류별 적산온도와 압축강도의 관계

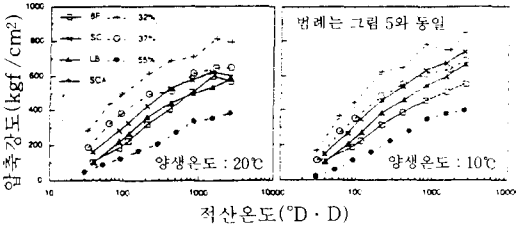


그림 7 결합재 종류별 적산온도와 압축강도의 관계

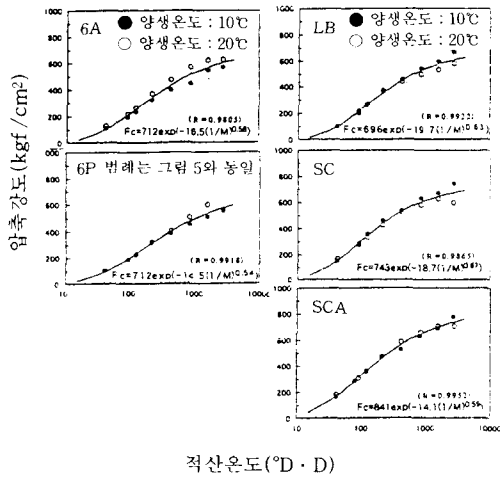


그림 8 고펜페르쯔곡선에 의한 압축강도 증진 곡선의 검토

축강도의 시험결과를 나타낸 것이다. 양생온도 20°C에서는 혼화재의 종류에 관계없이 물시멘트비 55%의 보통콘크리트에 비하여 고강도이고 장기재령에서 강도의 증가도 보여지고 있다. 특히 고로시멘트를 사용한 고유동콘크리트가 압축강도가 높게 발현하고 있고 10°C에도 물시멘트비 37%의 고강도 콘크리트보다도 높은 강도발현을 나타내고 있는 점이 주목된다.

고펜페르쯔곡선에 의해 얻어진 강도증진식을 고

성능(AE)감수제 종류 및 결합재 종류별로 나타낸 것이 그림 8이다. 모든 종류의 고유동콘크리트에서 압축강도와 적산온도의 관계는 상관계수 0.98 이상으로 고유동콘크리트의 압축강도 증진과정은 고펜페르쯔곡선을 사용하여 높은 추정도를 보이고 있어, 전술한 고강도 콘크리트와 아울러 고유동 콘크리트 등의 고성능 콘크리트에서의 강도발현을 해석하기 위해서는 고펜페르쯔곡선의 활용이 유효할 것으로 판단된다.

5. 結 論

고로슬래그미분말을 혼입하므로써 고유동콘크리트의 응결지연은 나타나고 있으나, 그 정도는 온도 의존성과 아울러 실용적으로 문제로 되는 정도는 아닌 것으로 판단된다. 또한 고유동콘크리트의 강도증진의 과정은 고강도 콘크리트와 마찬가지로 고펜페르쯔곡선을 사용한 강도증진곡선식으로 나타낼 수 있으며 결합재별 추정식을 제시하였다. 이 곡선식의 검토결과, 물결합재비 35% 전후의 고유동콘크리트의 압축강도발현은 55%의 보통 콘크리트보다는 빠르고, 37%의 고강도 콘크리트보다는 늦은 경향인 것을 알 수 있었다. 또한 이 결과로부터 필요한 온도보정치가 구해질 수 있어 고강도·고유동으로 대표되는 고성능콘크리트의 한중콘크리트 공사에의 활용도 기대된다.

참 고 문 헌

1. Saul, A. G. A., : Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, Magazine of Concrete Research, Vol. 2, No. 6, 1951 PP. 127-140
2. 日本建築學會, 建築工事標準仕様書・同解説(鐵筋コンクリート工事), 1991
3. Hansen P et al., Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, Nordisk Beton, Vol. 1, 1977, PP. 19-34
4. Guo Chengju, Maturity of Concrete : Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI Material Journal 1989, PP. 341-353
5. Carino N. J., The Maturity Method Theory

- and Application, ASTM Journal of Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 6, No. 2, 1984, PP. 61-73
6. 日本建築學會, 寒中コンクリートの 施工指針・同解説, 1989
 7. 金武漢外, モルタルおよびコンクリートの積算温度と壓縮強度發現に関する研究, 日本建築學會構造系論文報告集, No. 355, 1985, PP. 1-7
 8. 鎌田英治: ロジスティック曲線を使用したコンクリートの 強度推定式の提案, 日本建築學會 構造系論文報告集, No. 367, PP. 1~6
 9. 권영진, 김무한, 콘크리트의 압축강도발현에 미치는 양생온도의 영향에 관한 실험적 연구, ACI 한국분회 논문집, 1988, pp. 85-101
 10. 權寧進 外, 微粉末系高流動コンクリートの低温強度増進特性, 日本建築學會, 高流動コンクリートシンポジウム 1994, pp. 66~69
 11. Carino N. J., Maturity Functions for Concrete Made with Various Cement and Admixtures, ACI Material Journal, Vol. 89, No. 2, 1992, PP. 188-196
 12. ASTM C 1074-87, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.
 13. 鎌田外, 高温域を含む各種養生温度でのコンクリートの強度増進性状, セメント・コンクリート論文集, No., 45, PP. 370-375, 1991
 14. 鎌田外, 高強度コンクリートの低温強度増進特性について, 自然環境とコンクリートの性能に関するシンポジウム論文集, 1993, PP. 49-56
 15. 韓千求外, 高強度コンクリートの壓縮強度 増進性状に関する研究, 日本建築學會大會學術講演梗概集, pp. 387-388, 1992
 16. 權寧進, 高爐スラク微粉末を用いた高強度コンクリートおよび 高流動コンクリートの性状に関する研究, 北海道大學 博士學位論文, 1995
 17. 山川外, 高流動コンクリートの諸性状におよぼす温度の影響, 高流動コンクリート札幌シンポジウム, 1994