

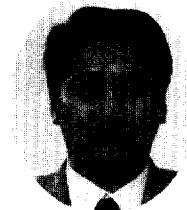
온도조건하의 콘크리트

고온하에서의 콘크리트 성상변화

Property Changes of Concrete at High Temperatures



정 상 진*



이 영 도**

1. 서 론

우리나라에서 콘크리트의 내열성에 관한 연구는 철근콘크리트 구조물에서 화재의 피해를 입은 경우에 재사용 가능성의 내력을 가지고 있으나 없느냐의 실제적 문제의 해결방안을 연구하는 데서 시작되었다고 할 수 있다.

이후 콘크리트의 내열성에 관한 여러 부분의 연구가 수많이 진행되어 왔으나 그것들은 화재를 당해 일시적인 고온가열의 조건 하에 있는 구조물에 대한 것이 주류를 이루었다.

그러나 근래에 들어 공업의 발달과 더불어 종래와는 다른 의미의 콘크리트 내열성이 문제가 되고 있다. 그것은 용광로, 각종 전해로, 원자력 압력용기 등에서 볼 수 있는 것과 같이 높지 않은 온도 범위내에

서 정온 온도상태로 장기간 가열되는 콘크리트 구조물에 미치는 영향에 관한 것이다.

이전에는 이 정도의 높지않은 온도범위에서 장기간 가열된 콘크리트 구조물에 미치는 영향은 적을 것이라고 생각했지만, 실제로는 내력의 저하에 따른 열화현상이 확인되고 있다.

화재시 콘크리트가 단기간에 고온하에 노출되면 급격한 열팽창에 의해 박락과 폭열등이 문제가 된다. 일반적인 내화성은 차열, 화염의 차단, 성능유지, 소방주수 등에 대한 강도유지 등이 화재시에 부재가 요구되는 기능에 대한 종합적 평가지표가 된다.

이 때문에 콘크리트 구조재료의 내화성은 화재시에 발생하는 팽창, 수축, 강도저하 등의 물성 변화외에 부재의 치수와 형상에도 영향을 받는다.

그러나 현재의 여러가지 조건에 따른 콘크리트의

* 성희원, 단국대학교 건축공학과 교수

** 성희원, 단국대학교 건축공학과 박사과정

성상에 관해서는 상당부분 미해명 요소가 있으며, 그에 대한 연구도 많이 진행되지 않는 것이 현실이고, 연구결과 또한 배합방식, 골재조건 등에 따라 일정하지 않는 것으로 나타나고 있다.

여기에서는 화재를 입어 단기간 고온가열을 받은 콘크리트의 성상과 300℃ 이하의 온도범위에서 장기간 가열에 노출된 콘크리트의 성상에 대한 기존연구 자료를 바탕으로 분석 정리하였다.

2. 고온노출 콘크리트의 물성

고온에 의한 콘크리트의 성질변화는 보통 50℃로 가열되었을 때 거의 변화가 없으나 60℃~70℃ 이상으로 가열되면 콘크리트내의 시멘트 페이스트가 성질변화를 일으킨다. 또한 150℃ 이상 가열되면 온도와 시간에 따라 역학적 성질이 뚜렷하게 변화된다.

충분히 수화반응이 진행된 시멘트 경화체가 가열되면 약 105℃에서 유리수와 겔수(gel water)가 없어진다. 더욱 가열되면 화학적으로 결합되어 있는 물의 일부가 탈수되기 시작하며, 약 250℃~350℃에서 칼슘 실리케트 수화생성물은 그 보유수분의 약 20%를 잃어버리고 400℃~700℃가 되면 칼슘 시리케트의 보유수분 대부분이 없어짐과 함께 수산화 칼슘도 탈수되어 분해된다. 이 분해에 의해 생석회가 수분을 흡수하여 팽창을 일으키며 시멘트 경화체가 붕괴된다.

또한 시멘트 경화체는 100℃ 이후까지는 팽창하나

그 이상의 온도가 되면 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 화합물 및 칼슘 시리케트의 탈수에 의해 약 2%의 수축을 보인다.

한편 불탈이나 콘크리트가 가열된 경우에는 상기의 시멘트 경화체의 성질 이외에 골재 등의 사용재료 특성이나 콘크리트내의 연행된 공기등이 그 재료특성의 변화에 영향을 준다.

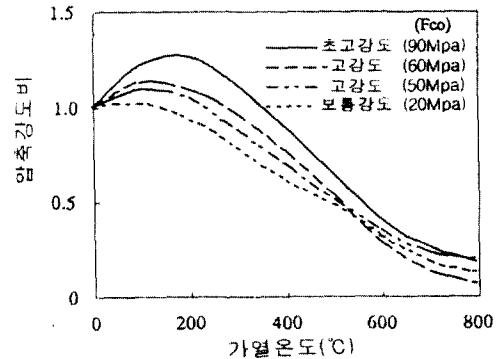


그림 1 압축강도비와 가열온도

2.1 압축강도

화재를 입은 콘크리트의 압축강도는 그 화재온도의 100℃~300℃ 범위에서 화재를 입지 않은 콘크리트보다 높게 나타나고 400℃ 이상의 고온시에는 전반적으로 낮게 나타났으며 800℃에서는 1/10 이하로 나타났다.

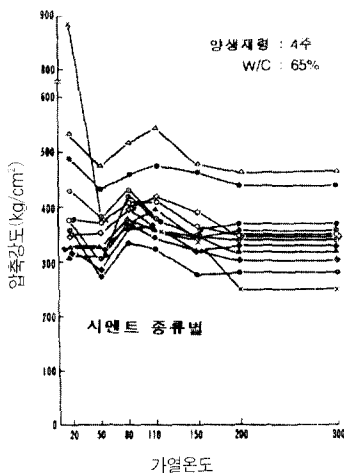


그림 2 압축강도와 가열온도

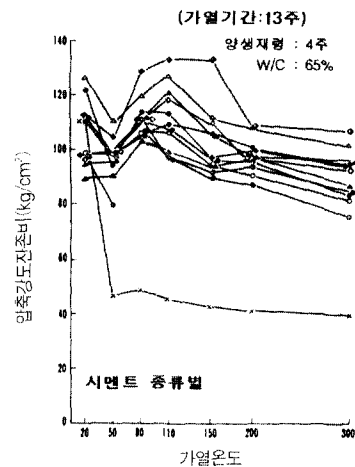


그림 3 압축강도잔존비와 가열온도

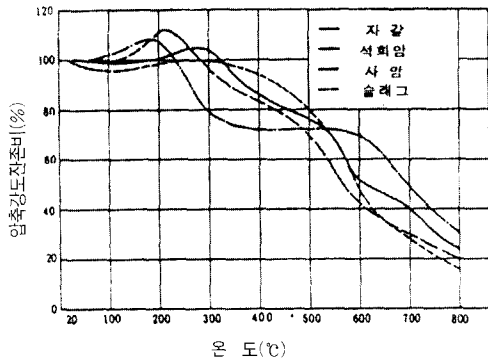


그림 4 골재별 압축강도잔존비와 가열온도

이것의 특징중에서 100°C~300°C 범위에서 화재를 입지않은 콘크리트보다 강도가 높게된 원인으로 건조수축에 의한 것인시멘트의 수화반응이 촉진된 것인지는 연구자에 따라 다른 견해를 가지고 있으며 지금까지 명확하게 밝혀지지 않고있다. 그림1은 강도의 종류에 따라 가열받은 콘크리트의 압축강도 변화에 대하여 나타내고 있다.

그림 2, 그림 3에서는 가열기간 13주 일때의 가열 온도에 따른 압축강도 잔존비에 대하여 나타내고 있다.

가열온도와 압축강도와의 관계(그림 2)에서는 시멘트 종류별 전반에 걸쳐 장기간 가열에서 20°C 양생에 비하여 50°C 가까이에서 강도저하 현상이 일어났으며, 80°C~110°C에서는 다시 강도가 회복되었고 110°C이상 온도가 상승함에 따라 강도가 저하되었다.

가열기간과의 관계에서 강도변화가 현저한 것은 가열기간 초기이며 가열온도가 150°C 이상이 되면 가열기간의 차이에 따른 강도변화는 작아지고 가열초기의 상태가 지속된다.

시멘트 종류에 따라 강도의 차이가 있으며 높은 강도를 나타내는 시멘트로서 초조강시멘트 및 조강시멘트가 있고 낮은 것으로는 CSA시멘트가 있다.

알루미늄시멘트(긴급공사용)는 20°C 양생에 비하여 50°C 근처에서 강도가 반감되며, 온도의 상승에 관계없이 일정한 강도를 나타내고 이 강도저하는 낮은 온도에서도 가열초기에 나타난다. 압축강도의 저하와 동시에 휨강도 역시 저하되고 기타의 시멘트와 비교하여 현저하게 저하되며 장기의 고온에서는 보

통시멘트의 1/3~1/2정도가 된다.

각기 다른 골재를 사용한 시험체가 200°C까지는 약간의 잔존압축강도의 증가를 보이고 있으나 200°C 이상의 온도에서는 온도상승에 비례하여 잔존강도가 감소되고 500°C 이상에서는 급격한 강도저하율을 나타냈다. 800°C 이상으로 가열되면 잔존강도는 모든 시험체의 20% 정도가 된다. 이에 대한 시험결과를 그림 4에서 나타내었다.

통상 콘크리트는 압축강도에 저항하는 구조재료로 이용되고 있는데 각종 강도특성의 경우에서 고온하의 압축강도 변화에 대한 연구는 아직까지 검증이 필요한 부분이 많이 남아 있다. 압축강도는 기타의 강도나 탄성계수와의 상관관계가 크며 콘크리트의 역학적 성질을 나타내는 종합지표로서 사용하고 있다.

고온하에서의 압축강도 변화는 과거 여러 연구자들에 의해 보고된 것들이 있으며 그중 대표적인 것으로 가열온도와 압축강도잔존율에 관한 관계를 그림-5에 나타내었다.

압축강도 잔존율은 가열개시전(20°C) 공시체 시험

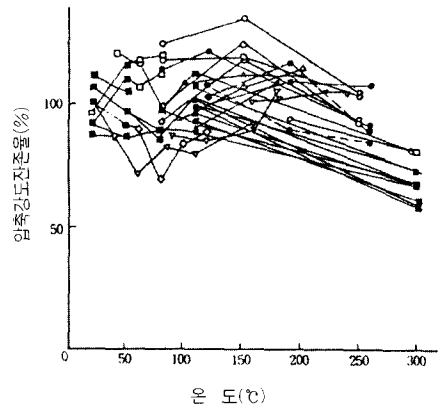


그림 5 압축강도잔존율과 가열온의 관계

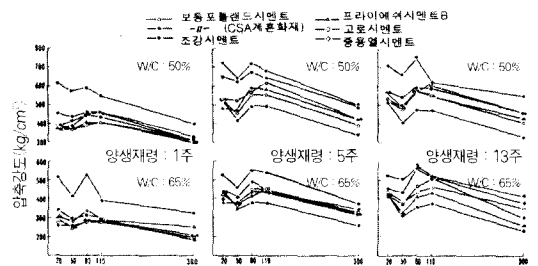


그림 6 압축강도와 가열온도(가열기간 : 100일)

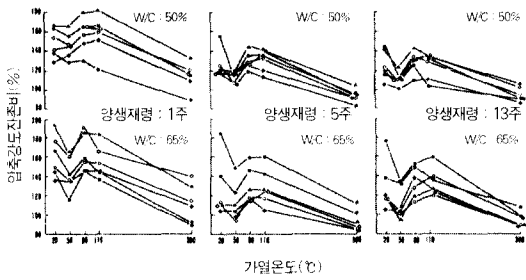


그림 7 압축강도잔존비와 가열온도(가열기간 : 100일)

값에 대하여 일정온도에서 가열한 공시체 시험값의 비를 나타낸 것이다.

그림 5에서 몇 개의 시험체에는 100℃ 이하의 가열 온도에서 2~3할의 강도저하가 확인되고 있으나 이것은 공시체의 급격한 건조가 원인 이라고 보고되고 있다.

60℃ 또는 80℃정도의 가열온도에서 강도저하가 일어나는 것도 온도가 100℃~130℃정도의 가열온도가 되면 강도저하가 적어진다.

가열온도가 60℃~80℃일때 외관상 강도가 낮아지는 영역이 존재하는 것처럼 여겨지나, 그것은 가열 온도 보다는 오히려 중량감소 즉 공시체 내부의 수분 손실량과 관계된 것으로 판단되며 가열온도 외에 습도 및 가열기간에 따라라도 영향을 받는다.

그림 6에서는 6가지 종류의 시멘트를 물시멘트비 50%와 65%로 공시체를 제작하여 양생후 가열하여 실험한 압축강도와 가열온도와의 관계를 나타내고 있으며 그림 7에서는 압축강도 잔존비와 가열온도와의 관계를 나타내고 있다.

가열온도 50℃에서는 20℃양생에 비교하여 강도저하가 나타났으나 80℃~110℃에 걸쳐 강도의 증가를 나타내고 있으며 그 이후 온도의 상승에 따라서 강도는 저하하고 있다.

시멘트 종류별로, CSA시멘트는 압축강도의 잔존비가 낮은 온도에서 높게 나타나고 있는 것에 비하여 높은 온도에서는 보통시멘트와 비슷하게 나타나고 있다.

전반적으로 압축강도의 잔존비가 높은 것은 플라이애시B종 및 고로시멘트A종이다. 물시멘트비가 잔존비에 미치는 영향은 적으며 가열전의 양생재령은 5주 및 13주에서 압축강도잔존비의 차가 작은 것에 비

하여 1주에서의 압축강도잔존비 증가는 급격하다.

2.2 탄성계수

고온하의 콘크리트 탄성계수는 압축강도와 같이 온도가 높아짐에 따라 저하량이 커진다. (그림 8) 또한 저하율이 압축강도의 경우보다 크며, 온도가 400℃에서는 상온의 30%, 500℃에서는 20% 정도까지 낮아지고 있다.

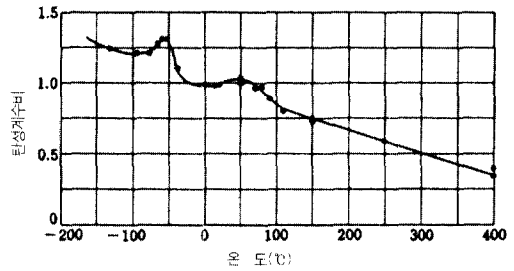


그림 8 탄성계수비와 온도

그림 9에 탄성계수의 잔존율과 가열온도에 관하여 나타내었다. 100℃이하의 가열온도에는 가열전의 약 30%까지 감소한다.

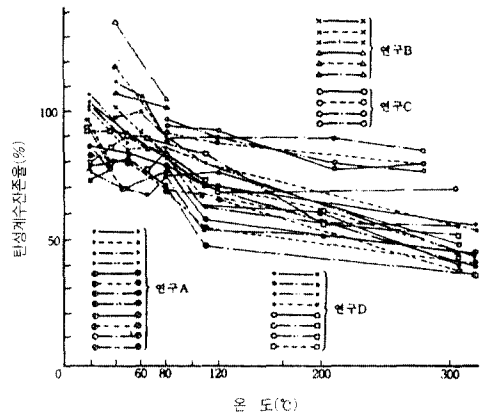


그림 9 탄성계수잔존율과 가열온도의 관계

가열온도가 100℃ 이상의 범위에서는 탄성계수는 기타의 특성에 비교하여 급격한 감소를 나타내며 가열온도가 300℃가 되면 탄성계수 잔존율은 약 40%가 된다.

2.3 인장강도

RC구조에서 콘크리트의 인장강도는 무시하고 설계되는 경우가 많이 있는데 구조설계상 콘크리트의 인장강도는 큰 문제가 되지 않는다.

그러나 구조물에 따라 기능유지 및 내구성의 관점에서 균열의 발생이 문제되는 경우도 있고 부재에 작용하는 열응력이나 고온하에서 발생하는 변형의 평가 등과 함께 인장강도의 평가도 중요한 문제가 된다.

그림 10에 인장강도 잔존율과 가열온도와의 관계를 나타내었다.

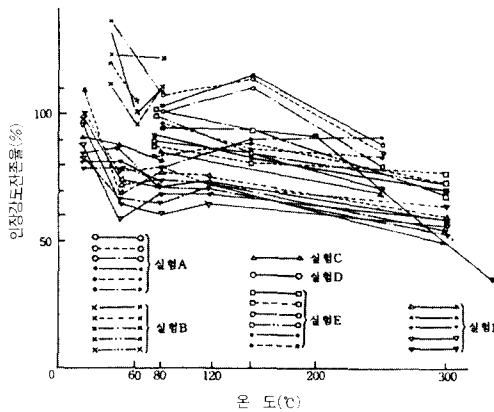


그림 10 인장강도잔존율과 가열온도의 관계

인장강도는 압축강도 등에 비해 공시체 내부의 잠재적 결함에 민감하기 때문에 가열에 따른 영향을 많이 받는다고 사료되며 그림에서와 같이 60°C~100°C 정도의 가열온도 범위에서 가열개시 전 인장강도의 60%정도가 되는 경우도 있다.

2.4 길이 변화율과 열팽창

여러 종류의 시멘트를 사용하여 물시멘트비 65%의 표준공시체를 제작하여 가열하고, 그 가열온도와 길이변화에 대한 관계를 그림-11에 나타내었다.

일반적으로 온도상승에 따라 수축은 증가하고, 장기가열이 되면 20°C 양생에 비교하여 50°C 에서는 수축이 감소했다.

이 때의 수축량은 가열온도 범위내에서 더 적었다. 시멘트의 종류에 따라 수축율이 다르게 나타나고 있

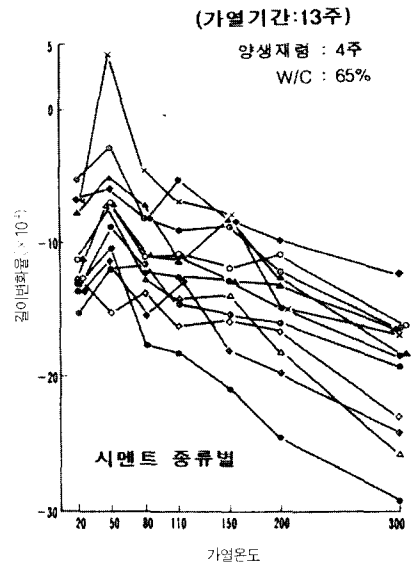


그림 11 길이변화율과 가열온도

다. 수축이 적은 시멘트는 중용열 시멘트로, 수축이 큰 시멘트는 CSA시멘트이다.

CSA시멘트의 경우 가열온도가 80°C 이상이 되면 급격히 수축이 증가하고, 300°C 에서는 보통시멘트의 2배정도 수축한다.

그림-12에서는 양생재령에 따른 길이변화율과 가열온도의 관계를 나타내고있다.

일반적으로 콘크리트는 가열되면 팽창하나 가열시의 변형특성은 콘크리트 내부의 구성재료에 의해 지배된다.

시멘트 페이스트 및 골재는 80°C~90°C까지의 온도에서는 모두 팽창하나 약 110°C 이상이 되면 골재는 팽창을 계속하는 것에 비하여 시멘트 페이스트 부분은 수축으로 전환한다.

이것처럼 고온하에서는 수분손실에 의한 수축과 열팽창이 동시에 진행되므로 실제 이것들의 영향을 분해하여 측정하는 것은 곤란하다.

이 때문에 모르타나 콘크리트의 열팽창 계수는 시멘트와 골재의 구성비 및 골재의 열팽창 특성에 따라 큰 영향을 받는다.

통상의 온도 범위내에서 콘크리트의 열팽창 계수는 $7\sim 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이다.

여러 종류의 골재를 사용한 때의 열팽창계수와 골

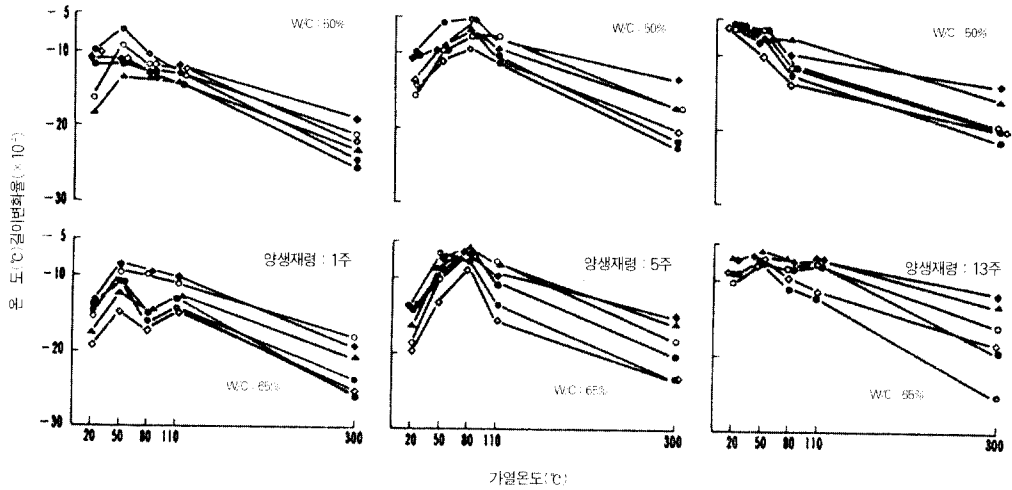


그림 12 길이변화율과 가열온도(가열기간 : 100일)

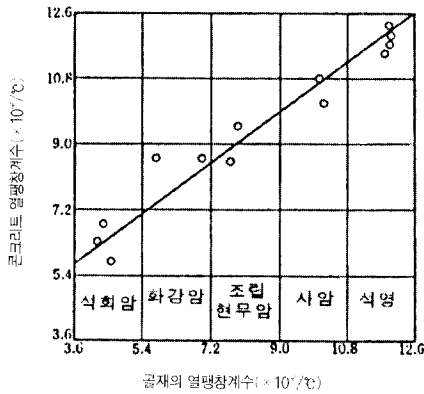


그림 13 콘크리트의 열팽창

재의 열팽창계수의 관계를 그림-13에 나타내었다.

이에 의하면 콘크리트나 모르타의 열팽창계수는 혼합된 골재의 열팽창계수와 대부분 비례하고 있다.

2.5 부착강도

고온하에서의 콘크리트와 철근의 부착강도에 관한 연구는 많이 진행되지 않고 있으나 그림 -14에 부착강도 잔존율과 가열온도와의 관계를 나타내었다

부착강도에 대하여서는 가열온도에 따라 서로 차이는 있으나 가열중에 발생하는 콘크리트와 철근의 변형거동의 차에 따라 부착의 일부가 파괴되는데, 특히 작은량의 미끄러짐에 대한 부착력의 저하는 현저하게 나타난다.

시멘트와 석회석 및 모르타와 사암의 부착강도에 관한 실험에 의하면 그것들의 부착강도는 시험시의 함수율에 영향을 받기 쉽다고 보고되고 있다.

3. 결 론

화재에 의해 콘크리트가 단기간 고온에 노출 되었을 때와 높지 않은 일정온도 상태로 장기간 가열되었을 때에 나타나는 콘크리트의 여러 가지 성상변화에 대하여 알아보았으나 재료 및 가열, 양생 등의 환경이 다른 상태에서 연구 되어 일정한 결과를 얻을 수 없다고 판단된다.

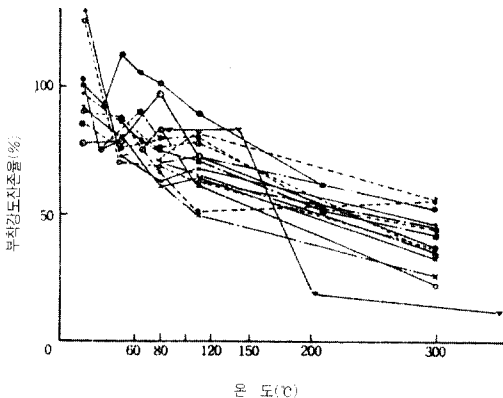


그림 14 부착강도잔존율과 가열온도의 관계

그러나 여러가지가 실험결과를 분석하여 검토한 결과 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

(1) 가열 온도 50℃에서는 20℃와 비교하여 압축강도가 낮아지고 80℃~110℃에서는 강도가 증가하며 110℃이상이 되면 서서히 감소한다.

(2) 잔존압축강도는 시멘트에 따라 차이가 있고 초조강, 조강, 중용열시멘트는 높으며 CSA시멘트 및 플라이애시시멘트는 낮다.

(3) 가열 전의 양생재령에 있어서는 일정재령 이상에서 재령에 따른 영향은 적으나 적은재령의 경우 영향은 크다.

(4) 열팽창에 관하여는 80℃~90℃에서 시멘트페이스트와 골재 모두가 팽창하나 110℃이상이 되면 골재는 팽창을 계속하고 페이스트는 수축한다.

(5) 길이변화율은 시멘트의 종류에 따라 다르게 나타나고 있다.

(6) 탄성계수는 온도가 높아짐에 따라 낮아지며 탄성계수 저하율은 압축강도 저하율 보다 크게나타나고 있다.

1. 岡田清, 六車熙, 콘크리트工學 핸드북, 朝倉書店
2. 太田 福男, 伊藤 尙之, 火害콘크리트의強度特性に関する研究, 日本建築學會大會學術講演集, 1996.9
3. 嵩 英雄, 大野定俊, 高温下の콘크리트の物性, 콘크리트工學, 1984
4. 倉澤眞志, 高温度にさらされる콘크리트のクリーフに関する研究, セメント 콘크리트, NO.236
5. 原田有, 高温度におけるサメントモルタルおよび콘クリートの熱膨脹について, セメント 콘크리트, NO.280
6. 岸谷孝一外, 20~200℃の高温にさらされた콘クリートの諸性質, セメント 콘크리트, NO.315
7. 오창희, 화해건물의 구조내력에 관한 연구, 박사학위논문, 1983
8. 장상진, 일면가열을 받는 메스콘크리트의 강도성상에 관한 연구, 박사학위논문, 1988 