高温에서의 콘크리트와 鐵筋의 膨脹 및 收縮

Thermal expansion and Shrinkage of concrete and Steel bar

吳 昌 熙*
Oh Chang Hee
孫 章 烈**
Sohn Jang Yeul
金 和 中***
Kim Wha Jung

Abstract

The success of analyzing the behavior of reinforced concrete structures at elevated temperature greatly depends on how accurately certain thermal properties, especially themal expansion, specific heat and density thermal conductivity can be determined in a wide temperature range.

In this paper, in order to predict the behavior of reinforced concrete structure in fire hazards, thermal expansion characteristics of normal concrete are formulated through experimental investigation.

1. 序 論

鐵筋콘크리트 構造物의 火害 特徵은 拘束되어 있는 部材의 熱膨脹에 의한 보의 휨압축破壞, 기둥의 剪斷破壞와 部材 內部의 溫度 差로 인한 爆裂 等이라 하겠다.

종래의 硏究[2]에 의하면 콘크리트의 熱膨張은 700℃에서 變形이 約 1% 이상 되기 때문에, 高溫時의 最大應力에 의한 콘크리트의 變形(0.2~1%)을 고려하여 보면, 그 熱變形만으로도 拘束되어 있는 콘크리트 部材는 破壞된다.

그러므로, 火災時의 鐵筋콘크리트 構造物의 擧動을 豫測하려면 콘크리트의 熱膨張 特性을 반드시 파악할 필요가 있다. 그러나, 이제까지의 硏究는 콘크리트의 熱膨張에 영향을 주는 要因分析에 대한 것이 대부분이며, 高溫 時의 콘크리트의 熱膨張 特性을 定量化하려는 硏究는 적다. 이 論文에서는 보통콘크리트의 熱膨脹 特性을 實驗에 의하여 溫度上昇과 溫度下降 過程으로 나누어 定式化한다.

2. 實驗裝置

사진1~3은 加熱爐, 熱膨張計, 溫度調節裝置, 記錄裝置를 나타낸다.

*漢陽大學校 建築工學科, 敎授, 工學博士
**漢陽大學校 建築工學科, 副敎授, 工學博士
***慶北大學校 建築工學科, 專任講師, 工學博士

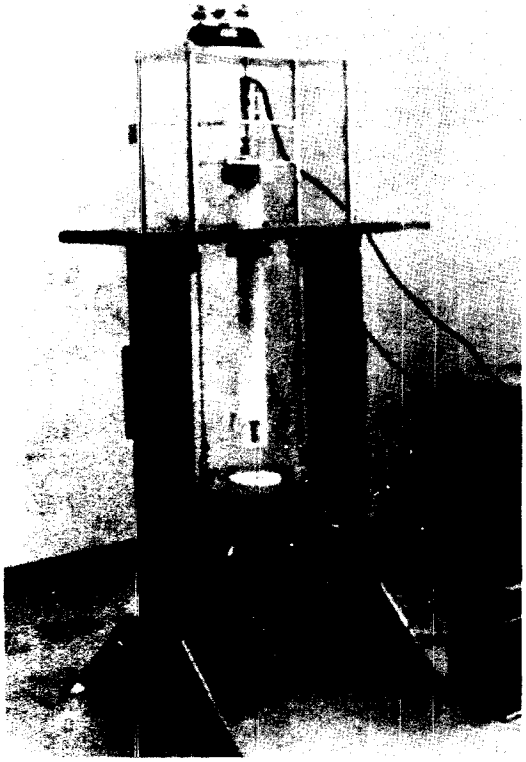
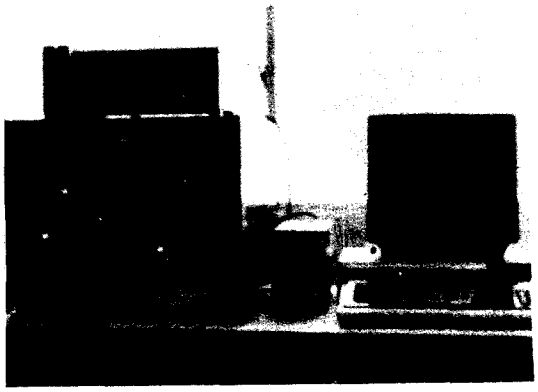


Photo 1. General view of the testing machine



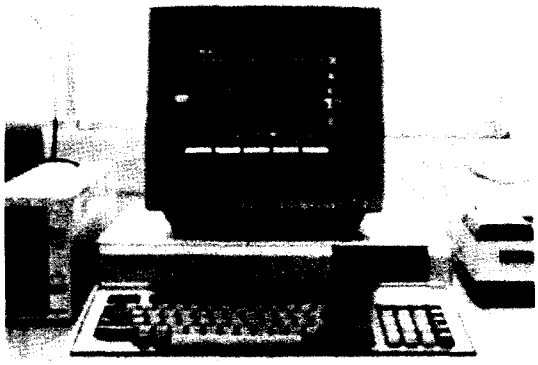


Photo 3. Temperature controller and recording system

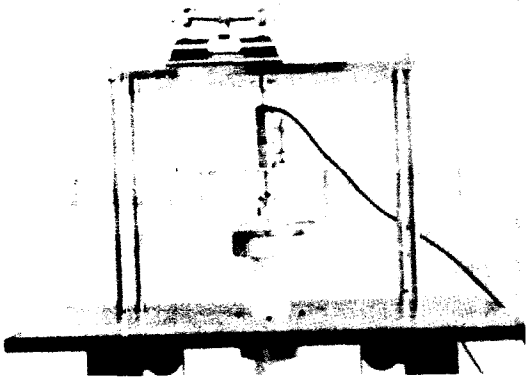


Photo 2. Details of thermal expansion meter

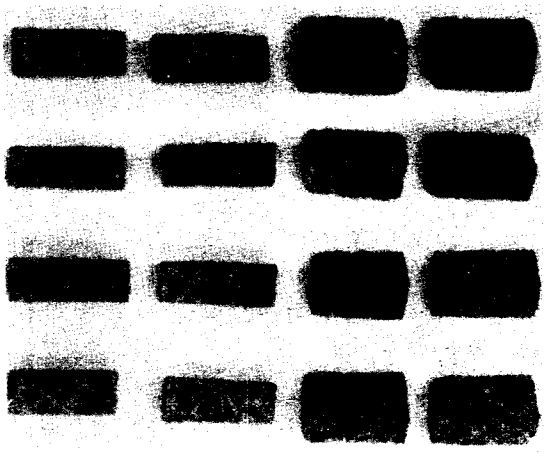


Photo 4. Shape of specimens

2-1 試驗體의 形狀과 加熱裝置

試驗體는 加熱條件 관계로 약 2 × 2 × 5 cm 또는 圓柱(ϕ5 cm)의 1/4, 높이 5 cm의 크기로 잘라서 使用했다(사진 4 참조).

加熱裝置는 圓筒型管狀式의 電氣爐를 利用했다. 電氣爐의 크기는 外徑 30cm, 內徑 8cm이며 試驗體를 中心으로 電氣爐는 上下로 움직이게 되어 있다.

2－2 熱膨張張計

熱膨張張計는 石英glass의 參照管, 石英glass의 測定棒, 差動transformer으 構成되어 있다.

差動transformer는 測定棒과 직접 연결되어 있으며, 試驗體에 加해지는 荷重을 적게 하기 위하여 測定棒과 差動transformer의 棒무게를 저울에 의해 調節하도록 되어있다. 또한, 測定棒이 水平方向으로 움직이는 것을 拘束하기 위해 plate spring을 付着시켰다.

石英glass의 熱膨張은 콘크리트의 約 1/35이므로, 콘크리트의 熱膨張 測定에 있어서 無視할 수 있는 範圍이다. 또, 參照管과 測定棒에 있어서 同質의 石英glass를 使用한 것은 石英glass의 膨脹에 의한 實驗結果의 差를 減少시키기 위해서이다. Fig. 1은 熱膨張計의 詳細圖를 나타낸다. 만약, 參照管과 測定棒이 같은 温度

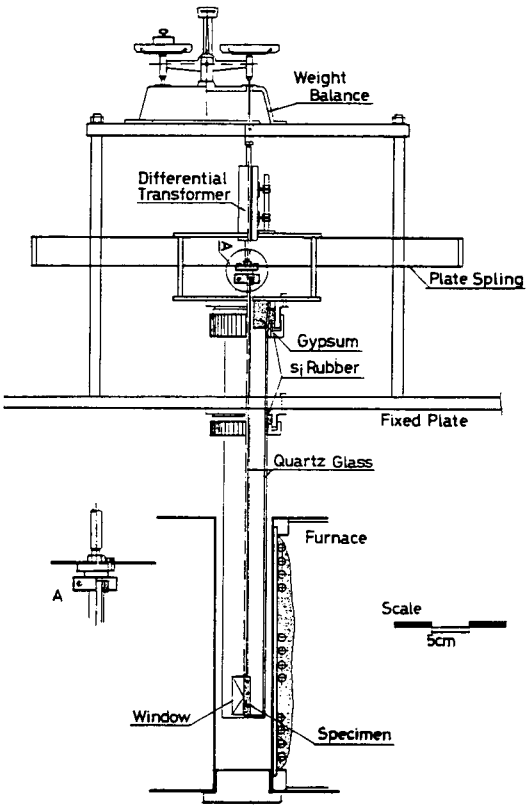


Fig. 1. Details of dilatometer

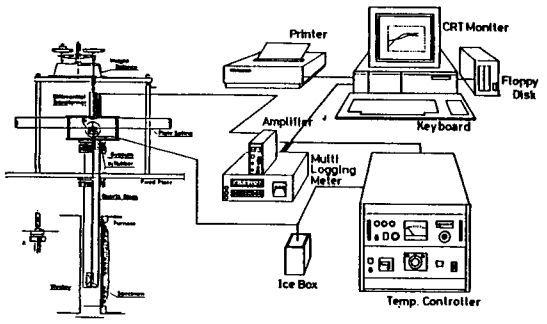


Fig. 2. Schematic diagram of thermal expansion testing system.

를 받는다면 測定棒의 膨張은 參照管의 膨張에 의해서 自動的으로 實驗結果로부터 제거되지만, 試驗體 크기에 대한 參照管의 膨張은 實驗結果에 영향을 주게 된다. 이 영향을 補正하기 위해 試驗體로서 同質의 石英glass를 使用하여 實驗하였다. 그 結果를 Fig. 3에 나타낸다. 温度下降 過程에서는 參照管의 영향이 적었기 때문에 無視하였다.

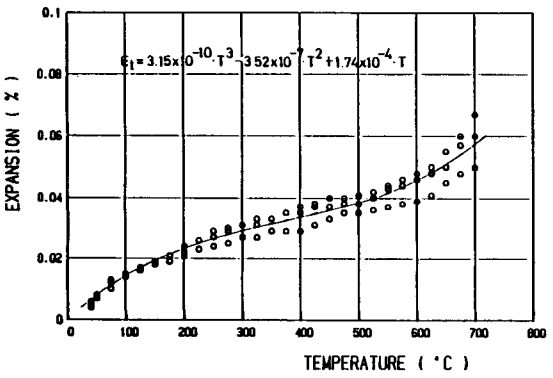


Fig. 3. Thermal expansion data and approximate curve for silica glass

2－3 温度調節裝置와 記錄裝置

温度調節裝置의 温度 設定 範圍는 0～1200℃이며, 制御方式은 PID式 實効値 帰環型이다.

温度와 熱變形의 測定値는 Computer에 의하여 1分 간격으로 記錄된다. 測定棒에 의해서

檢出된 變形은 差動transformer에 의해 直流電流로 變換되어 앰프를 통하여 增幅된다. 增幅된 電流는 AD變換機에 의하여 數値化되어서 Computer에 傳送된다. 温度의 경우는 熱電體에 의해 檢出된 電流가 얼음통, 温度調節裝置, AD變換機, Computer 順으로 傳送된다. Computer에 傳送된 電流는 温度와 變形으로 變換 處理되어, CRT畵面에 表示됨과 同時에 printer 및 floppy disk에 記錄되어진다(Fig. 2 참조)

3. 實驗方法

實驗에 있어서 콘크리트의 熱膨張에 가장 큰 영향을 주는 要因은 종래의 硏究[2]에서 보면 加熱速度의 問題이다. 따라서, 加熱速度에 의한 試驗體의 內部温度分布를 豫測하기 위해 有限要

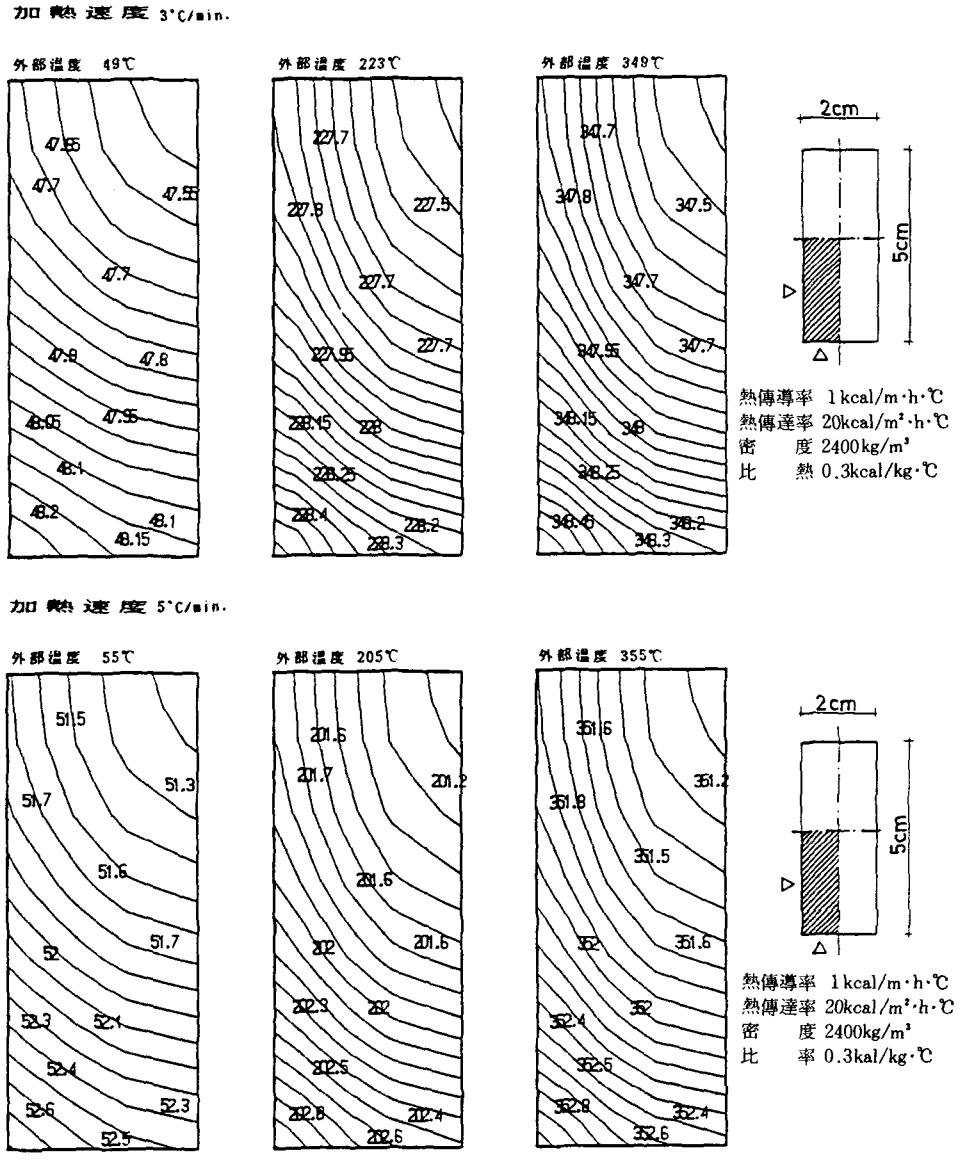


Fig. 4. Calculated temperature distribution of concrete.

素法을 利用하여 計算하였다. 그 結果를 Fig. 4에 나타낸다. 加熱速度 3℃/分의 경우는 試驗體의 表面溫度와 內部 中心部의 溫度 差가 約 1℃ 內外이며, 加熱速度 5℃/分의 경우는 約 1.5℃의 差가 생긴다. 그러므로, 實驗方法은 溫度上昇인 경우, 試驗體를 每分 3℃의 比率로 加熱하면서 1分 간격으로 溫度와 熱變形을 測定하였다. 溫度下降인 경우에는 溫度調節裝置가 溫度를 低下시키는 機能을 갖고 있지 않기 때문에 電源을 끄고 電氣爐를 밑으로 내려가면서 손으로 約 2℃/分의 比率로 溫度下降을 조절했다.

4. 試驗體

實驗에 使用한 各種시멘트, 骨材의 物理的 性質 및 콘크리트의 配合을 Table. 1～3에 나타낸다.

Table. 1 Cement의 試驗成積

種類	比重	比表面積 cm²/g	凝結(分) 始發	凝結(分) 終結	安全性	壓縮強度(kg/cm²) 3日	7日	28日
A	3.15	3250	138	207	OK	115	230	370
B	3.16	3180	160	228	OK	144	245	418
C	3.16	3210	148	195	OK	155	252	410
D	3.15	3000	195	320	OK	174	209	321

Table. 2 骨材의 試驗成積

種 類	絶乾比重	吸收率	單位容積重量	粗粒率	實績率
A細骨材	2.60	2.75%	1.500kg/l	2.47	69.0%
粗骨材	2.66	2.64%	1.520kg/l	5.85	68.0%
B細骨材	2.40	2.75%	1.589kg/l	2.56	68.9%
粗骨材	2.63	1.28%	1.656kg/l	5.86	64.2%
C細骨材	2.59	1.02%	1.789kg/l	2.65	69.1%
粗骨材	2.64	0.55%	1.534kg/l	6.70	58.1%
D細骨材	2.58	1.20%	1.642kg/l	2.78	63.4%
粗骨材	2.61	1.53%	1.744kg/l	8.82	66.8%

A：日本의 多摩川産, B：日本의 千葉産
C：日本의 靑梅産, D：韓國의 漢江産

Table. 3 Concrete의 調合

種 別	重量調合比 C	S	G	W/C (%)	SLUMP (cm)	試驗時의壓縮强度(kg/cm²)	材令 (月)
A－1	1	2.8	2.9	65	15.1	325.0	144
A－2	1	1.9	2.0	45	6.6	524.0	144
A－3	1	2.6	2.7	60	16.4	300.0	156
B 2	1	3.6	3.6	66	18.0	260.0	10
C－1	1	2.75	3.28	58	16.0	296.0	6
C－2	1	1.56	2.47	41	14.5	457.0	6
C－3	1	1.03	1.93	32	15.4	675.0	6
D－1	1	2.10	3.07	50	10.0	240.0	1
D－2	1	2.06	3.00	55	10.0	220.0	1
D－3	1	2.00	2.92	60	20.0	198.0	1

5. 實驗結果와 考察

5－1. 시멘트 페이스트와 모르타르의 熱膨張

시멘트 페이스트와 모르타르의 熱變形에 대한 實驗結果는 Fig. 5, 6과 같다.

이 결과에서, 시멘트 페이스트는 150℃ 이하의 溫度에서 膨張하고, 이 이상의 高溫이 되면 收縮으로 變化한다. 收縮比率은 300～600℃ 까지 變化가 없으나 600℃를 中心으로 작아지는 경향이 있다. 이 원인은, 150℃ 이하에서의 膨脹은 수분의 증발에 의한 空隙累積容積의 증대, 700℃까지의 收縮은 硅酸石灰水和物과 水酸石灰의 脫水에 의한 것으로 생각된다.

溫度 下降時에서는 700℃에서 溫度를 低下시키면 700℃에서의 收縮보다 커지는 경향이 있다. 그 變化는 적으며 直線的이다.

시멘트 모르타르의 膨張은 100～200℃ 사이에서 水分증발에 의해, 그 膨張率이 적어지지만, 그후 500℃까지는 같은 膨張率을 갖는다. 그러나, 500～600℃에 있어서는 膨張率이 돌연 커지고, 600℃ 이상에서는 거의 膨張의 變化가 없다. 이는 모래의 主成分인 石英이 573℃에서 α 石英으로부터 β 石英으로 結晶變化하기 때문이다.

溫度 下降에 있어서 모르타르의 수축은 溫度上昇時의 膨張曲線과 같은 경향으로 變化한다. 100～200℃에서는 膨張曲線과 다르게 둔화현상이 없어지고, 500～600℃에서는 모래의 主成分

인 石英이 β石英으로부터 α石英으로 變化하는 현상이 보인다.

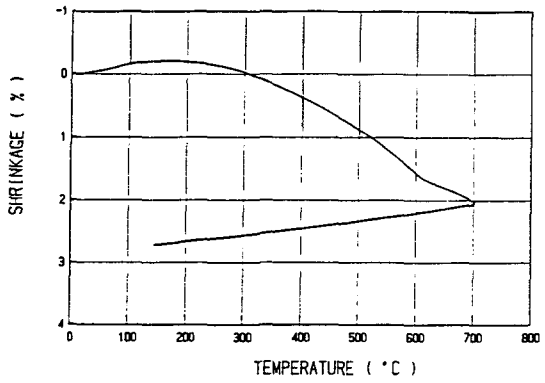


Fig. 5. Thermal strain for cement paste in heating and cooling process

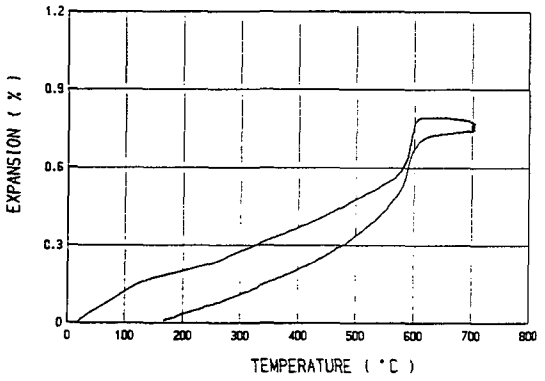


Fig. 6. Thermal strain for standard sand mortar in heating and cooling process.

5-2. 骨材의 熱膨張

骨材의 熱變形에 대한 實驗結果는 Fig. 7, 8과 같다. 보통 콘크리트에서 使用되고 있는 骨材는 그 종류가 다양하고 鑛物組成도 복잡하므로, 熱에 있어서 그 팽창은 매우 다르다. 色이 다른 3종류의 骨材에 대한 熱膨張 實驗에서 熱膨張의 크기는 骨材의 色이 百色일수록 커지며 黑色일수록 작아진다. 이는 骨材의 成分 中에 石英成分이 많아지면 骨材의 色은 희게 되므로, 콘크리트에 使用되고 있는 骨材의 熱膨張은 石英 含有量에 의해서 決定되는 것을 나타내고 있다.

日本의 多摩川産 骨材의 熱膨張은 Fig. 8에서와 같이 500℃까지의 熱膨張率의 變化는 그다지 크지 않으나, 500℃를 넘으면 石英의 Jump에 의해 돌연 커진다. 또한, 温度 下降時의 收縮은 常温이 되어도 처음상태로 되돌아 가지않고, 90% 정도만 回復되는 경향을 나타낸다.

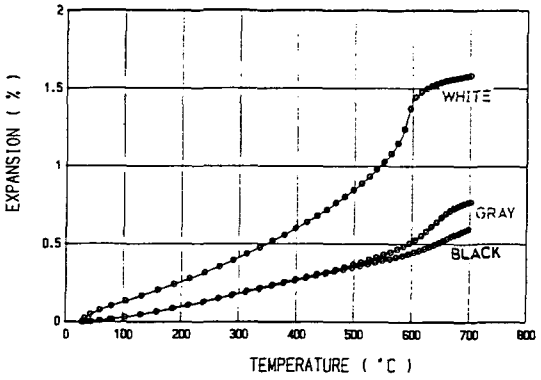


Fig. 7. Thermal expansion data and curves for CHIBA aggregate

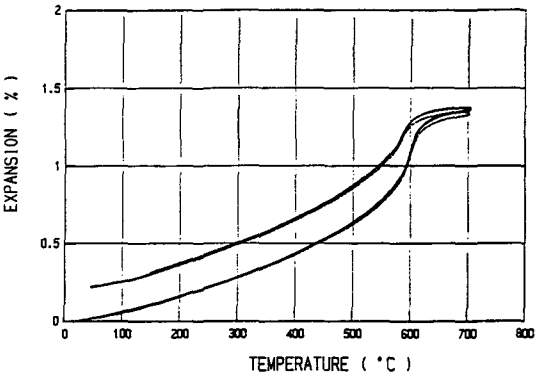


Fig. 8. Thermal expansion curves for TAMA RIVER aggregate in heating and cooling process

5-3. 콘크리트의 熱膨張

高温에 있어서 콘크리트의 팽창은 骨材의 鑛物成分 및 콘크리트 内部의 水分 含有量에 의해 支配된다.

各種 콘크리트에 대한 實驗結果를 Fig. 9~13

에 나타낸다. 이들 그림내의 式은 熱變形을 温度의 함수로서, 최소 2승법에 의한 近似 多項式이다.

A시리즈의 多摩川産 骨材를 使用한 콘크리트의 熱膨張은 多摩川産 骨材의 열팽창(Fig. 8)에 비해 各 温度에 있어서 작은 값을 나타내고 있다. 이는 시멘트의 高温 收縮의 영향이 큰 것을 알 수 있다. A-1, A-2 및 A-3 콘크리트

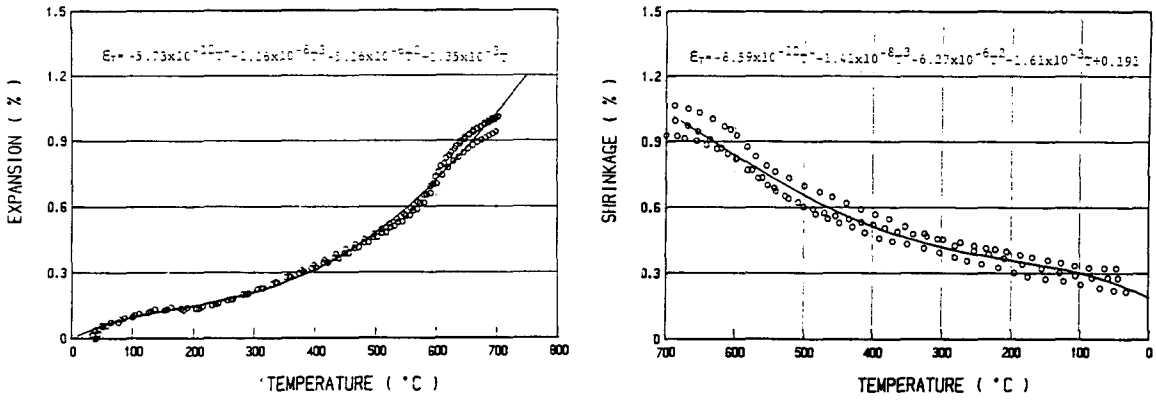


Fig. 9. Thermal strain data and approximate curve for A-2 concrete

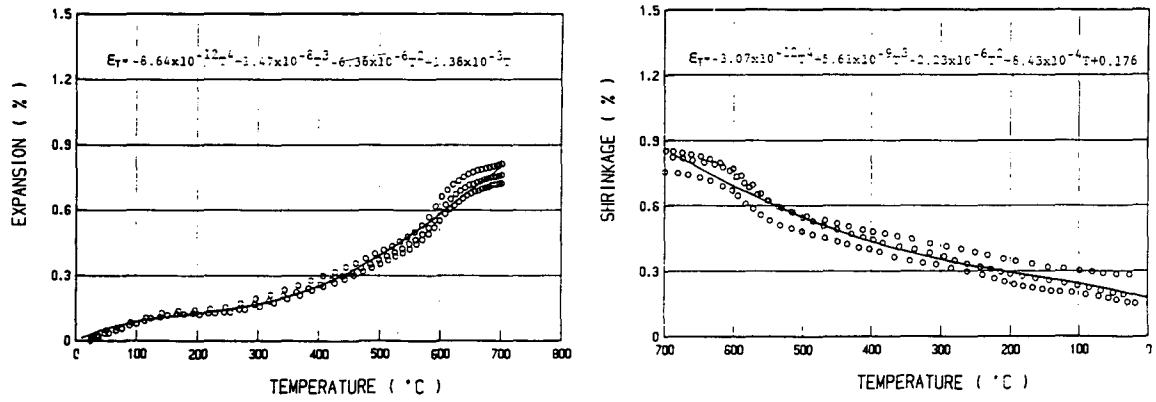


Fig. 10. Thermal strain data and approximate curve for A-1 concrete

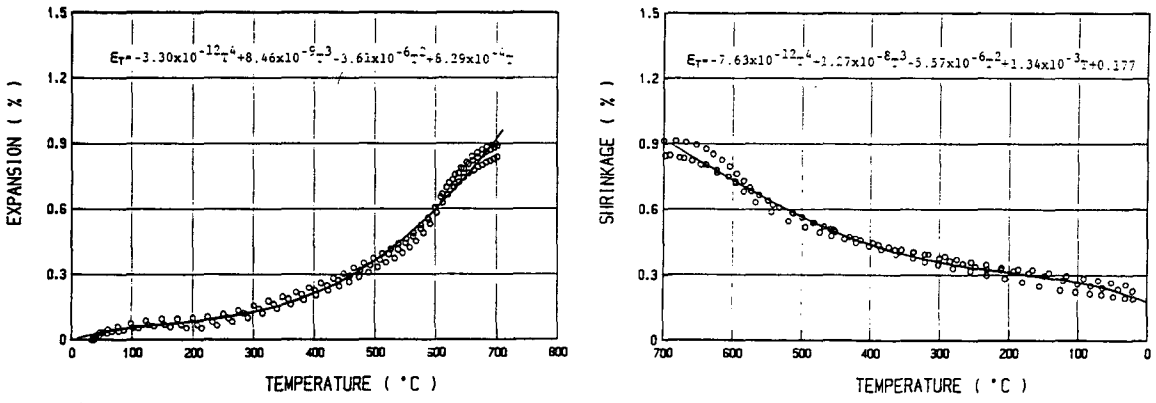


Fig. 11. Thermal strain data and approximate curve for A-3 concrete

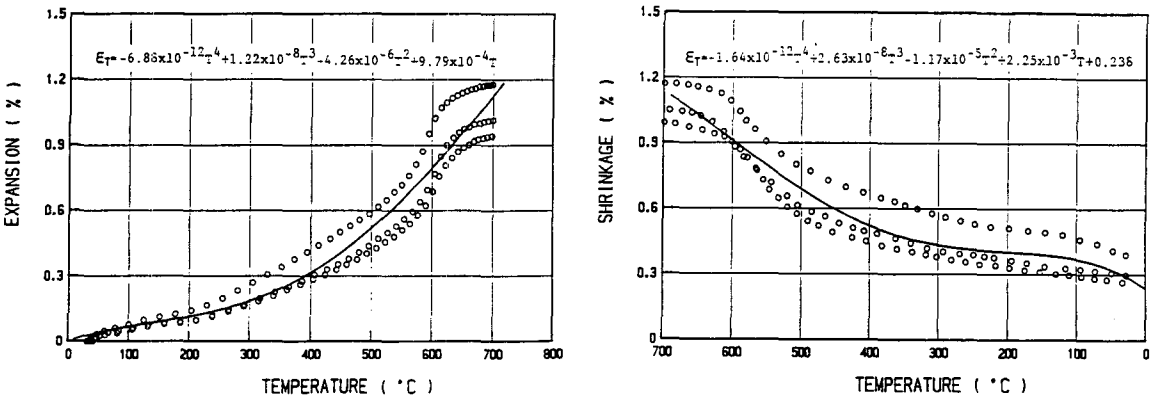


Fig. 12. Thermal strain data and approximate curve for B concrete

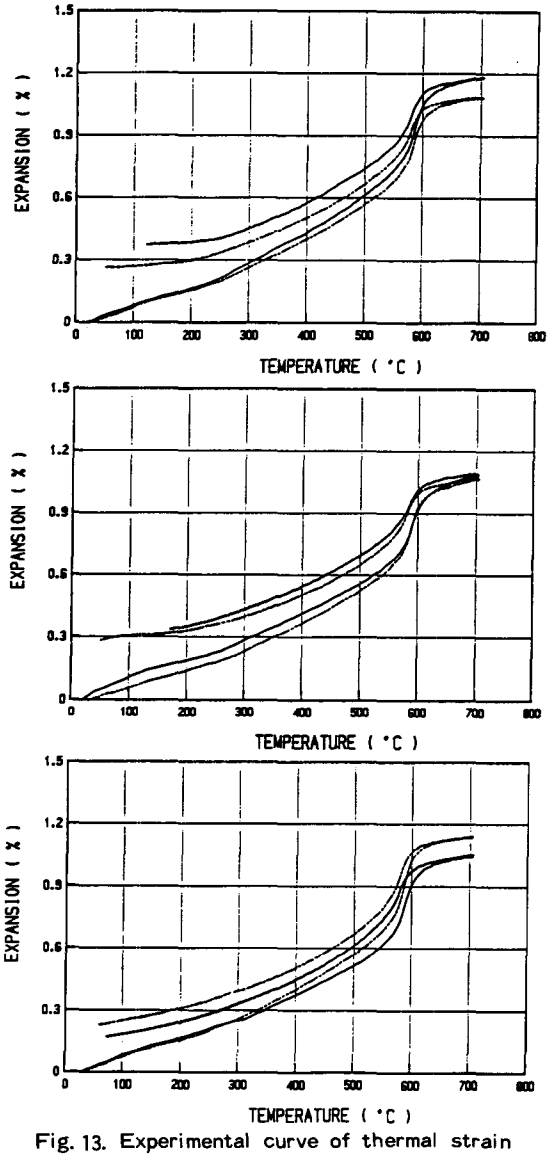


Fig. 13. Experimental curve of thermal strain

의 熱膨張을 서로 比較하면 骨材量이 적고, W/C가 적은 A-2 콘크리트의 熱膨張이 가장 적으며, A-3, A-1의 順으로 크게 나타나고 있다. 日本의 千葉産 骨材를 使用한 B콘크리트의 熱膨張은 骨材의 熱膨張(Fig. 8)의 平均과 거의 같으며, 시멘트의 收縮의 영향은 없다.

C시리즈의 日本 青梅産 骨材를 使用한 콘크리트의 熱膨張은 高温에 있어서 使用 骨材의 異常膨張으로 다른 콘크리트에 비해 熱膨張이 크다.

D시리즈의 漢江産 骨材를 使用한 콘크리트의 熱膨張은 W/C가 클수록 작다. 이는 콘크리트 內部의 水分에 관계하는 乾燥收縮에 의한 것이라고 생각된다. 温度下降에 있어서 콘크리트의 收縮은 A, B, C시리즈의 全部가 温度上昇時의 熱膨張 變化와 같은 경향으로 收縮하지만, 温度上昇間의 100～200℃에서는 鈍化현상을 나타내지 않고 2次曲線的으로 收縮한다. 또한, 500～600℃의 變化는 温度上昇時의 變化와 反對로 骨材成分의 石英이 β로부터 α로 變化하는 경향을 나타낸다. 그러나, 常温에 있어서 약 0.2～0.3% 정도의 殘留 變形이 생긴다.

Fig. 14는 400℃, 500℃ 및 600℃까지 温度를 上昇시킨후, 다시 이들 温度까지 低下시킬 때의 熱變形 實驗結果를 表示한다.

600℃에서 温度를 低下시킬 경우 常温에서의 殘留 變形은 약 0.2% 內外이며, 500℃에서 温度를 低下시킨 경우는 약 0.15% 정도이다.

또한 400℃에서의 경우는 100℃의 근처에서

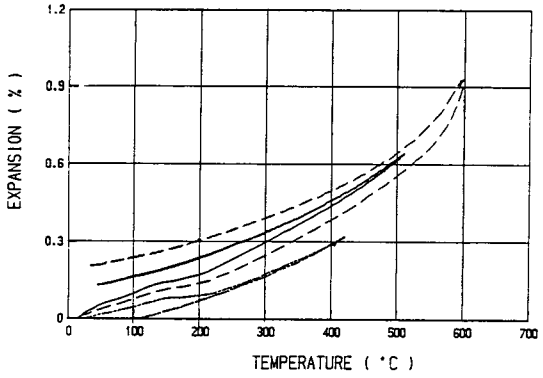


Fig. 14. Thermal strain curves for CHIBA aggregate concrete in heating and cooling process

零이 되고 그後 계속해서 收縮한다. 이것은 콘크리트 內部의 水分증발 程度 및 結晶變化에 인한 콘크리트의 體積이 變化하는 것으로 생각된다.

6. 鐵筋의 熱膨張

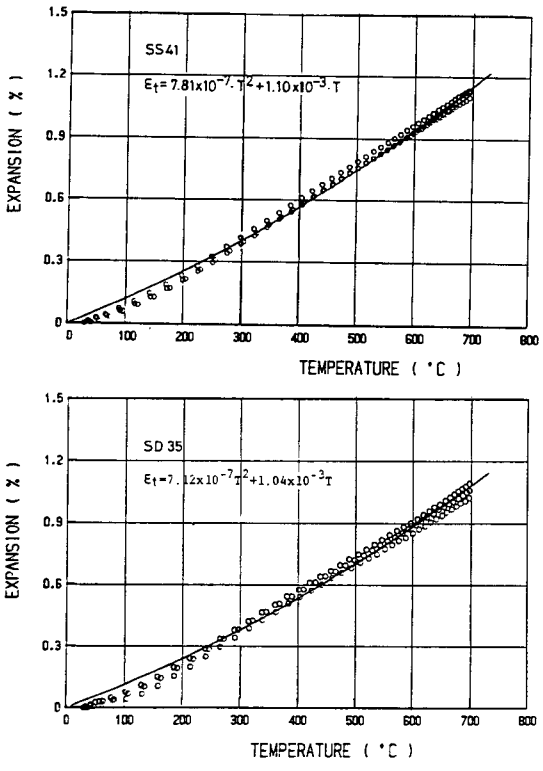


Fig. 15. Thermal expansion data and approximate curve for steel.

SS41과 SD35의 열팽창 實驗結果를 Fig. 15에 表示한다. 鐵筋의 열팽창은 콘크리트와 달리 溫度 上昇과 함께 單調增加한다. 이 경향은 2次 曲線的이며, 크기는 700℃에서 약 1~1.3%가 된다. 이는 콘크리트와 거의같은 熱膨張 變形이다.

7. 結 論

實驗結果에서 다음과 같은 結論을 얻을 수가 있다.

1) 高温에 있어서 콘크리트 및 鐵筋의 熱變形 實驗結果에 基本을 두고 昇温過程과 降温過程으로 分類하여 定式化를 행하였다. 이 식은 高温時에 있어서 鐵筋콘크리트 構造物의 力學的 擧動을 豫測하는데 중요한 역할을 할 것이라고 생각된다(式은 圖中에 表示)

2) 高温에 있어서 콘크리트의 熱膨張은 骨材量이 많을수록 커지는 경향이 있으며, W/C 의 영향은 그 比가 크면 클수록 熱膨張은 작아진다.

3) 温度下降에 있어서 콘크리트의 收縮 變化는 400℃를 中心으로 分類할 수 있다. 즉, 400℃에서 거의 零으로 되돌아 가지만, 그 이상의 温度에서 低下시킬 경우는 얼마간의 殘留變形이 생긴다. 이는 콘크리트 內部의 自由水와 結晶水의 증발 程度 및 骨材의 結晶 變化에 의한 콘크리트의 體積 變化에 기인한 것으로 생각된다.

감사의 말

이 論文의 日本東京工業大學 工業材料 研究所 防災材料 開發部門 古村·安部研究室에서 행한 것이며, 이 論文에 조언해 주신 古村福次郎, 安部武雄 선생님께 깊은 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

1) 呉昌熙 ; "鐵筋コンクリート造火災建物の火害とその補修に関する研究"東京工業大學 博士論文, 昭和60年 7月
2) 原田有 ; "コンクリートおよび鐵筋コンクリート

構造の耐火力に関する研究"東京工業大學博士論文, 昭和36年10月

3) 大岸佐吉 ; "コンクリート耐熱性に関する 研究" 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 昭和47年10月, pp. 149～150.

4. Harmathy, T. Z. & Allen, L. W.; "Thermal properties of selected masonry unit concretes" Journal of the ACI, vol. 70, No. 2, 1973.

5. Harada, T., Takeda, T., Yamane, S. & Furumura, F,; "Strength, Elasticity and Thermal properties of Concrete Subjected to Elevated Temperature" ACI, SP-34, Concrete for Nuclear Rector, Volume 1, ACI Detroit, 1972, pp. 377～406.

6. Crispino, E.; "Studies on the Technology of Concretes under Thermal Conditions" ACI, SP－34, Concrete for Nuclear Rector, Volume 1, ACI Detroit, 1972, pp. 443～479.

7. Loubser, P. J. & Bryden, J. G.; "An apparatus for determining the coefficient of thermal expansion of rocks, motars and concretes" Magazine of Concrete Research, Vol. 24 No. 79, June, 1972, pp. 97～100.