

콘크리트와 열

金 和 中

〈경북대 공과대학 건축공학과 박사〉

1. 序 論

時代의 變遷에 따라 建築材料의 多樣性과 使用 範圍는 넓어지고 있으며, 그에 따라 材料의 特殊還景에서의 使用要求가 높아지고 이는 現在, 建築構造材料의 代表的인 콘크리트는 高溫, 低溫에서 그 使用이 增加하고 있다. 특히 科學技術의 進歩와 함께 콘크리트는 原子爐 容器, L PG 탱크등 과혹한 溫度條件 下에서 使用되고 있는 실정이다. 콘크리트는 열의 使用에 의해 복잡한 영향 받아, 경우에 따라서 손상을 입거나 파괴하기도 한다.

따라서, 本 解説에서는 熱作用 下에서의 콘크리트의 거동을 理解하기 위하여 콘크리트에 작용하는 열의 종류와 그 實體를 알아보고자한다. 이 解説은 1, 2로 나누어 소개한다.

(1) 氣象條件에 의한 熱의 作用

콘크리트 構造物은 外氣溫의 變動, 直射光線, 風雨등의 氣象條件에 의해 끊임없이 熱의 영향을 받고 있다. 따라서, 構造物은 콘크리트 構造物 뿐만아니라 일반적으로 이러한 복잡한 溫度變化를 받아 構造物 전체가 溫度變化에의 膨脹, 收縮의 연속적인 作用을 받는다.

韓國의 氣溫은 특수 지역에 있어서, 最高 35℃에서 最低 -25℃ 정도로서 약 70℃의 溫度 폭을 나타내며, 일반지역에서는 이보다도 훨씬 적은 온도폭의 경향이다. 따라서, 콘크리트가 通常 받는 溫度는 이러한 溫度範圍로 한정된다

고 할 수 없다.

한 여름에 바람이 없는 狀態에서 태양의 강한 直射光線을 정면으로 받을 때는 주위의 氣溫을 훨씬 넘는 溫度에까지 上昇한다. 그런데, 그 직후에 소나기 등의 갑작스런 氣溫變化가 일어나는 경우에 高溫加熱된 콘크리트는 비와 바람의 作用에 의해 急冷된다. 이와 같은 熱의 作用을 받으면, 콘크리트 内部의 급격한 溫度구배가 反轉되어 構造體 전체가 變形을 일으키게 된다.

熱의 作用은 단지 熱膨脹만을 일으키는 것이 아니고, 이와 동시에 콘크리트의 乾燥收縮과 시멘트水和物의 變化에 영향을 주는 것은 말할 것도 없다. 완성된 콘크리트 構造物은 매일 이러한 氣象條件에 의한 熱의 作用을 받아 變形과 이에 따른 内部應力이 반복적으로 발생하며, 또한 乾燥收縮과 같은 自己變形의 作用과도 合成되어 균열이 발생하거나 表面이 劣化한다.

콘크리트에 作用하는 氣象條件 중에서 凍結 용해의 반복적인 溫度變動이 作用할 때에는 構造物의 種類와 위치, 含水狀態등의 여러 條件에 따라 달라지지만, 콘크리트는 파손된다. 이 凍害는 얼음이 생성될 때 생기는 壓力에 의한 内部應력과 溫度차이에서 생기는 溫度의 變動에 의한 壓力變化에서 오는 應力이 그 원인으로 생각되지만, 이 밖에도 콘크리트는 熱傳導가 별로 좋지 않으므로 冷却面과 内部에 容積變化의 차가 생겨, 그것에 의한 應力이 加해지기 때문이라고 생각된다.

凍害 중에서 분화구와 같은 구멍이 뚫린點食은 주로 吸水率이 높은 굵은 骨材나 死石에 의하여 발생하며, 이러한 현상은 凍害의 초기에 발생한다. 이러한 현상이 더욱 진행되면 시멘트모르타르와 骨材가 表面에까지 드러나서 剝離되는 層狀剝離현상을 일으킨다.

(2) 水和熱의 作用

시멘트의 水和作用에 의해 생기는 發熱을 水和熱이라한다. 바뀔말하면 응결, 경화 중에 발생하는 총발열량이라고 할 수 있다. 수화는 材畵에 관계없이 계속 진행된다. 그러나, 대개 1년 정도에서 전체의 90% 이상을 發熱한다. 포오틀랜드시멘트가 물과 완전히 반응하기까지는 平均 120cal/g의 熱量을 발생한다고 한다. 이 포오틀랜드시멘트의 水和熱은 상당한 熱量이지만, 실제로 특별한 경우에만 熱의 발생이 感知된다. 이는 포오틀랜드시멘트와 물의 반응이 서서히 진행되기 때문이다.

熱의 發散이 저해되면, 담등의 거대한 構造物의 内部에 불필요한 溫度上昇이 일어나게 된다. 그 결과 溫度上昇에 相應하여 발생한 熱膨脹이 構造物에 나쁜 영향을 미친다. 熱에 의한 膨脹은 壓縮이나 引張應力을 일으키지만, 콘크리트의 材畵이 짙으면, 크리이프變形에 의해 이를 추종할 수 있다. 그러나, 溫度가上昇한 거대한 構造物이 冷却하기 시작할 때에는 콘크리트는 상당히 硬化되어 있고, 또 상당한 溫度구배도 존재하고 있으므로, 膨脹에 의하여 作用하는 引張應力으로 콘크리트의 表面에 균열이 발생하게 된다.

반대로, 寒中콘크리트工事에서는 보온거푸집을 使用하여 水和熱을 유효하게 이용할 수도 있다.

시멘트의 수화열에 의한 發熱量은 表-1과 같다.

콘크리트 内部의 溫度上昇을 계산하는 데는 熱의 손실이 없다고 생각되는 경우, 다음 식으로 近似하여 구할 수 있다.

$$t_B = \frac{C \times W_e}{(C+G) \times C_1 + W \times C_2}$$

表-1 各材畵에서의 水和熱 (cal/g)

시멘트의 種類	1日	3日	7日	28日
水和熱의 높은 시멘트 Z 475	50~65	70~85	85~90	90~100
普通의 시멘트 Z 275, Z 375	30~50	50~70	60~80	75~100
水和熱의 낮은 시멘트	15~35	40~60	45~65	55~80

W_e 는 시멘트의 수화열이며, 表-1의 값에서 구해진다. C, G, W 는 각각 單位시멘트量, 單位骨材量, 單位數量이고, C_1 는 시멘트 및 骨材의 平均比熱로서 보통 0.2이며, C_2 는 물의 比熱로서 1.0이다.

예를들면, 보통시멘트와 자갈, 모래를 使用한 보통 배합된 콘크리트가 斷熱狀態로 방치되어 있으면, 材畵 3일까지에 약 30℃ 溫度가上昇한다. 그러나, 이와 같은 값은 실제 거대한 構造物의 중심부에 대해서만 얻어지는 近似值이고, 이외의 경우에는 콘크리트 表面에서의 放熱에 의해 이론적인 溫度보다 낮아진다.

(3) 火災에 의한 熱의 作用

철근콘크리트(RC조)인 건물이 火災를 받으면, 콘크리트 表面은 1000℃ 전후의 高溫까지 加熱된다. 물론, 그렇게 긴 시간이 아니고 보통 1~3시간 정도에서 실내의 加熱物이 완전히 연소하여 진화된다. 그러나, 창고건물의 火災에 있어서는 수일간 계속 연소하여 결국 철골 Turss-RC조인 창고가 도괴해 버리는 예도 있다. (사진-1 참조)

火災時에 있어서 실내 溫度와 時間간의 관계는 실내의 可燃物量 및 質, 개구부의형상, 치수, 실내의 마감재료나 주변의 콘크리트 種類에 따라 크게 變動하며 일반적으로 말할 수 없으나 이 중에서 주로 개구부의 크기에 따라 最高溫度가 좌우된다. 즉, 가연물량이 같은 건물에 火災가 발생하면, 개구부가 큰건물이 화재의 최고 온도는 높고, 화재계속시간은 짧게된다.

그림-1은 標準耐火建物에서의 火災溫度時間曲線으로서 使用되고 있는 各國의 耐火試驗標



사진 1. 광고의 화재

準溫度加熱曲線을 나타내고 있다. 그러나 이곡선은 實火災와의 대응 생각하여 볼때 여러가지 모순점을 내포하고 있다. 火災에 의한 加熱로 콘크리트는 表面에서 상당한 깊이까지 100℃ 이상으로 溫度가 上昇하여 材質의 劣化와 熱膨脹에 의해 많은 피해를 받게 된다.

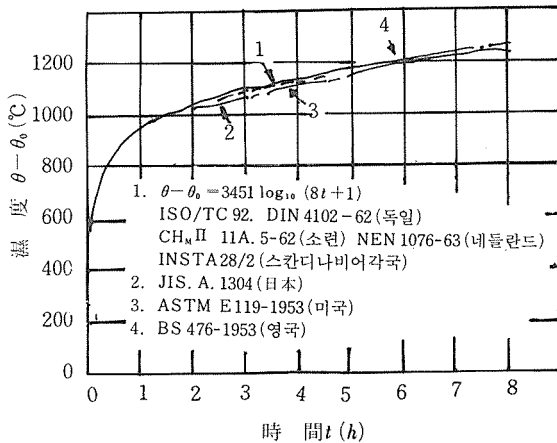


그림 -1 標準加熱溫度曲線

(4) 高溫構造物에서의 熱作用

高溫하에서 사용되는 콘크리트 構造物은 종래에 煙突등 극히 한정되었으나, 최근에는 原子力發電所의 放射線遮蔽壁, 壓力容器, 격납容器, 海水淡水化裝置의 콘크리트 탱크등 70~100℃ 이상의 高溫狀態에서 사용되는 경우가 증가하고 있다.

이와 같이 일반적인 溫度條件과 다른 溫度에서 사용되는 콘크리트는 溫度구배와 溫度上昇에 의한 熱應力이 발생하므로, 力學的性質 뿐만 아니라 熱的性質도 중요하다. 참고로 RC조의 煙突 설계로 이용되는 각종 煙突의 排煙溫度를 表-2에 나타낸다. 排煙溫度가 높을 경우, 熱은 각종 斷熱材를 매개로 하여 콘크리트에 作用하게 되며, 보통콘크리트의 最高溫度는 50~60℃ 이하로 억제된다.

(5) 低溫構造物에 있어서 熱의 作用

LNG, LPG, 액체질소 등의 低溫液체를 저장하기 위한 탱크 및 그 기초, 탱크의 防液堤, 수

表-2 各種煙突排煙溫度

業種別	設備名	排煙溫度(℃)
火力發電所	石炭火力	130
	重油火力	130
	LNG火力	97~99
	Diesel	400~580
	Gas Turbine	400~500
製鐵所	製鋼用平爐	300~600
	製鋼用電氣爐	120
	鑄鐵用溶銑爐	300
非鐵金屬	鉛再製鍊爐	390
	黃銅溶解爐	20~30
	알미늄二次製鍊爐	40
化學工業	各種合成爐	240~250
쓰레기燒却爐	Batch 式	150~500
	連續 式	200~250

注) 表中, 排煙溫度는 煙突入口의 溫度를 나타냄.
즉 排煙脫硫의 方法(濕式·乾式吸收法等)에 의
해 變動한다.

송용의 배치등 低溫의 액체에 의해 장기적으로 冷却되거나, 순간적으로 접촉할 우려가 있는 構造物에 콘크리트가 使用되고 있다. 이들 低溫 액체 LNG가 -162°C , LPG가 -188°C , 액체 질소가 -196°C 로서 상당히 低溫이다. 또 -20°C ~ -40°C 정도의 低溫에서 生鮮食品을 저장하기 위한 냉동창고도 RC조로 구축되고 있다. 低溫의 作用下에서는 高溫이 作用하는 경우와 같이 材質이 劣化할 우려는 없으나, 熱應力에 의한 均열이 증대한 문제가 된다.

2. 콘크리트의 傳熱

자연계에서는 溫度差가 생기면, 물체에서 에너지가 이동해 가는 性質이 있다. 熱이란 외관상 溫度의 차이만으로 한 물체에서 다른 물체로 이동하는 狀態의 에너지에 대하여 주어진 명칭이다. 따라서, 여기서는 移動의 意味가 포함되어 있다. 그러나, 특히 그 자체만을 깊이 주목할 때 우리는 그 현상을 傳熱이라고 한다.

熱의 이동에는 두가지 기본형태가 있다. 물

체를 통한 熱의 이동은 고체, 액체, 기체 모두가 熱傳導에 의해 생긴다. 미시적으로 말하면, 물체内部의 분자나 전자가 에너지로 전달되는 것이며, 우리 눈에는 熱이 하나로 흐르고 있듯이 보이는 것이 특징이다.

또, 물체는 熱放射에 의해 그 内部 에너지를 전자파의 형태로 주위에 放出되고, 또 도달되는 전자파를 흡수하여 内部에너지를 회복하는 作用을 가진다. 따라서, 溫度가 다른 물체간에는 그것들이 서로 교환하는 에너지差의 공제형으로서, 高溫물체에서 低溫물체로의 溫度差에 따른 에너지이동, 즉 傳熱현상이 나타난다. 물체의 溫度가 대단히 높을 경우는 그 内部의 熱이동에 熱傳導가 공존하고 있는 경우도 있다.

즉, 공기와 물등의 유체가 흐르는 장소에서는 물체의 일부가 다른 부분에 대하여 상대적으로 이동하여 그 결과 熱이 전달된다. 이를 對流라 한다. 또 溫度가 다른 壁面과 유동체간에 생기는 熱교환을 熱傳達이라 한다. 고체 중에서는 입자狀態를 달리하면, 이와 같은 이동은 생기지 않으므로, 對流는 주로 기체, 액체 중의 傳熱이라고 생각해도 좋다. 그러나 순수하게 對流傳熱만이 생기는 것이 아니고, 熱傳導와 양자가 동시에 발생하는 것이 보통이며, 이를 구별하는데 어려움이 많다.

콘크리트와 같이 内部에 공극을 가지고, 또 자유수나 결정수등 여러 형태로서 수분을 가지는 재료에 있어서 傳熱機構를 보면,

- 1) 재료 자체의 熱傳導
- 2) 内部에 함유하고 있는 기체의 熱傳導
- 3) 内部에 함유하고 있는 기체의 對流에 의한 傳熱
- 4) 재료 양면의 熱放射에 의한 傳熱
- 5) 수증기의 分壓差에 의한 傳熱

등에 의해 熱이동이 생긴다. 이 외에 火災時와 같이 상당한 高溫이 作用할 때는 수분의 증발등에 의한 傳熱이 부가된다.

콘크리트에서의 傳熱문제는 금속재료등과 달리 극히 복잡하고 난해하다.

- (1) 定常熱傳導와 熱傳導率

물체에서 熱이 흐르는 경우, 물체内部의 溫度분포가 時間적으로 변하지 않을 때를 定常熱傳導라 한다. 이 경우 물체내의 單位面積을 單位時間에 통과하는 熱量 q (Kcal/m²h)는 일반적으로 熱이 흐르는 방향의 溫度구배 $(T_2 - T_1)/\ell$ (°C/m)에 비례하고, 다음과 같이 쓸 수 있다.

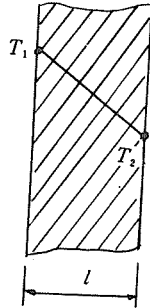


그림-2

$$q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\ell}$$

우측의 부호는 熱이 흐르는 방향에 溫度구배가 負가 되기 때문이고, q 를 正으로 나타내기 위하여 붙인 기호이다. 상기의 관계를 Fourier의 법칙이라 한다. 여기서, 비례상수 λ (Kcal/mh°C)를 熱傳導率이라 하며, 물질에 따라 결정되는 값이다. λ 의 값이 큰 물질일수록 熱의 양도체이다.

상온에서 콘크리트 및 이와 관련한 재료의 熱傳導率은 表-3과 같다.

(2) 熱傳導率

일반적으로 고체表面은 유체에 접해 있으며, 양자간에는 熱傳導가 생긴다. 이는 정지물체내의 熱傳導와는 약간 다르다. 지금, 그림-3과 같이 溫度 T_1 인 물체表面이 溫度 T_0 인 유체에 접하고 있다고 하자. 이 때 유체와 물체表面간에는 溫度差 $(T_0 - T_1)$ 가 熱傳導를 일으키는 구동력이므로, 물체表面 A를 통하여 單位時間當 유입되는 熱量 Q에 대하여 다음 식으로 나타낸다.

$$Q = hA(T_0 - T_1)$$

上式에서 정의되는 h (Kcal/mh°C)를 熱傳導率

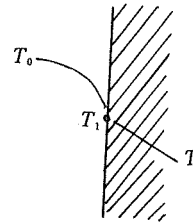


그림-3

이라 한다. 熱傳導率 h 는 熱傳導率과 같이 유체의 물질만으로 결정되지 않고, 여기서 생기는 對流의 정도에 따라 크게 달라진다. 그림-4에 콘크리트 벽면의 h 를 풍속과 표면상태와의 관계로 나타냄.

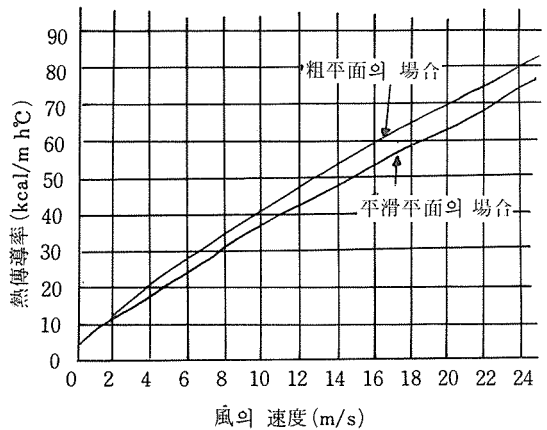


그림-4 콘크리트의 表面의 熱傳導率

(3) 非定常熱傳導와 溫度傳導率

溫度傳導率은 定常熱傳導에 대해서는 고려할 필요가 없다. 그러나, 非定常熱傳導에 있어서는 중요한 物性值이다.

지금, 일정한 溫度에 있는 물체의 表面에 갑자기 加熱되었다고 하자. 加熱面에서 침입한 熱은 우선 그 부근에 축열되어 溫度를 上昇시킨다. 따라서, 이 溫度變化에 대하여 생각해 보면, 처음 加熱에 의해 表面부근에서의 溫度上昇은 인접부분에서 溫度上昇을 유발시키고, 그 溫度上昇은 또 다음 부분으로 전달된다. 이렇게 서서히 먼쪽으로 전파되어 간다.

이는 공기중에서 음파가 전달되는 狀態와 유

表-3 콘크리트등의 熱定數³⁾

材 料		傳 導 單 位			抵 抗 單 位		密 度 (乾燥 狀態) ρ (kg/ m ³)	比 熱 (乾燥 狀態) c (kcal/ kg· deg)	
		熱傳導率(平均溫度 20℃) λ (kcal/m·h·deg)			溫度傳導 率(氣乾 狀態) $\kappa = \lambda / \rho \cdot c$ (m ² /h) $\times 10^{-4}$	熱傳導比 抵抗(氣 乾狀態) $r = 1 / \lambda$ (m·h·de g/kcal)			
名 稱	摘 要	乾燥狀態	氣乾狀態 (相對濕 度75%)	濕潤狀態 (相對濕 度95%)					
銅 板		320	320	320	3930	0.0031		8900	0.092
黃 銅		95	95	95	1210	0.011		8500	0.092
亞鉛도금鋼板		38	38	38	428	0.026		7860	0.11
알루미늄板		180	180	180	3120	0.0056		7700	0.21
大 理 石		2.4	2.4	2.4	42.8	0.42		2670	0.21
花 剛 岩		3.0	3.0	3.0	53.4	0.33		2810	0.20
大 谷 石		1.1	1.2	1.2	25.1	0.87		1900	0.21
콘크리트		1.0	1.4	1.4	25.3	0.74		2200	0.21
振動다짐콘크리트		1.6	1.9	2.0	32.8	0.53		2400	0.21
輕量 콘크리트	벽돌부심모래, 보통자갈 탄재모래 보통자갈	0.55	0.72	0.76	13.4	1.4		1980	0.24
		0.55	0.72	0.76	14.4	1.4		1780	0.25
	耐火石모래 보통자갈	0.45	0.59	0.53	11.9	1.7		1720	0.26
輕量블록(實質部)		0.39	0.44	0.47	11.4	2.3		1380	0.25
모르타르		0.66	1.2	1.3	20.3	0.81		2020	0.27
石綿시멘트板	JIS A 5410. 石綿시멘트板厚 6mm. 熱傳導率은 -6.6~+68 %의 增減있음.	0.54	1.1	1.2	22.9	0.92	0.0055	1680	0.18
土		0.46	0.54	0.58	11.7	1.9		1890	0.20
자갈		0.20	0.42	0.50	11.5	2.4		1700	0.20
모 래		0.34	0.53	0.60	13.9	1.9		1850	0.20
荒木田土		0.64	0.75	0.81	19.6	1.3		1510	0.21
入荒木田土		0.52	0.67	0.78	14.1	1.5		1710	0.22
土壁(마감)		0.50	0.59	0.64	18.0	1.7		1280	0.21
砂壁(마감)		0.40	0.47	0.51	13.3	2.1		1390	0.21
석 회		0.53	0.64	0.69	16.6	1.6		1320	0.25
Plaster		0.44	0.53	0.58	9.36	1.9		1940	0.25
普通벽돌	JIS R 1250 熱傳導率은 바 두께 21cm 당의 影響에 의 해 0~20%의 增加가 있다.	0.24	0.27	0.29	8.01	3.7	7.8×10^{-2}	1520	0.20
"		0.47	0.53	0.56	14.4	1.9	4.0×10^{-2}	1660	2.20
耐火벽돌	JIS R 2102	0.85	0.96		22.1	1.0		1950	0.21
타 일	JIS A 5209	0.76	0.76	0.76	12.8	1.3		2280	0.26
"		1.1	0.1	1.1	17.6	0.91		2400	0.26
板유리	JIS A 3201, 3202. 두께 3mm	0.68	0.68	0.68	14.1	1.5	4.41×10^{-2}	2540	0.19
抗 火 石		0.24	0.24	0.24	10.8	4.1		921	0.24
氣泡콘크리트		0.15	0.15	0.16	7.21	6.5		710	0.27
"		0.070	0.072	0.075	6.82	14		350	0.27
保温벽돌		0.10	0.12		7.82	8.5	0.57	625	0.21
岩 綿	JIS A 9501	0.038	0.038	0.038	9.14	26		200	0.20
유 리 綿	JIS A 9505	0.036	0.036	0.036	8.91	28		200	0.20
	JIS A 9504	0.040	0.040	0.040	6.61	25		300	0.20

사하다. 지금, 상술의 溫度波의 이동속도에 대하여 생각해 보면, 첫째로 多量의 熱이 흘러들어 가서 그 부분의 溫度를 높일수록 이동속도가 빨라질 것이다. 그리고, 이는 Fourier 법칙에서 물체의 熱傳導率 λ 에 비례한다. 둘째로 동일 熱量이 흐르더라도 그 溫度上昇은 물체의 熱容量 $c\rho$ (c 는 比熱 (Kcal/kg°C), ρ 는 密度 (kg/m³))에 반비례한다. 따라서, λ 를 $c\rho$ 로 나누어 얻어지는 量

$$k = \lambda / c \cdot \rho$$

은 溫度波의 이동속도에 관계하는 量으로 생각할 수 있다. 그리고, 물체의 熱傳導의 良否를 나타내는 λ 를 熱傳導率이라 부르는 것에 대해, k 는 소위 溫度의 傳導 良否를 생각한 것이므로, 溫度傳導率이라 부른다. 이 값이 클수록 溫度變化가 빠르다. 表-3에 열전도율과 함께 각종 재료의 溫度傳導率을 나타냈다.

3. 콘크리트의 熱定數

콘크리트의 熱膨脹率, 熱傳導率, 溫度傳導率 등의 熱定數는 溫度의 函數이고, 그 값은 일정하지 않다. 이는 콘크리트 内部의 여러 형태의 수분이 포함하고 있으므로, 이들 수분은 溫度에 의해 극히 복잡한 舉動을 하고, 熱定數에도 큰 영향을 미친다. 溫度가 일정하더라도 熱定數는 하나의 값으로 결정되지 않는다.

콘크리트의 熱定數 측정에는 여러 방법이 있으나, 측정방법에 따라서도 熱定數에 상당한 차이를 보이며, 동일 측정방법이라도 試驗條件에 따라 定數值가 크게 變動하는 것도 있다. 이하에 주요 熱定數에 대하여 몇가지 예를 든다. 이들 값은 금속의 熱定數와 같이 정확한 것이 아니고, 상당한 폭을 가진 값이라고 이해해 주기 바란다.

(1) 線膨脹率

常溫에서 서서히 溫度를 올리면, 보통콘크리트는 膨脹한다. 콘크리트의 溫度變化에 의한 伸縮은 骨材와 시멘트페이스트의 伸縮으로 나눌 수 있다. 그림-5, 6에 각종 骨材의 熱膨脹을

나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 骨材의 種類에 따라 熱膨脹은 크게 상위한다. 콘크리트에 차지하는 骨材의 量을 생각하면, 콘크리트의 熱膨脹은 骨材의 熱膨脹에 크게 지배된다고 볼 수 있다.

또한, 시멘트페이스트의 伸縮과 몰탈의 팽창은 그림-7, 8과 같다. 시멘트페이스트는 100°C 전후에서 한번 膨脹한 후, 溫度上昇과 더불어 收縮해 간다. 이는 脫水에 起因한 것이고, 加熱속도에 따라 그 曲線은 變動한다. 시멘트페이스트의 이러한 收縮으로 콘크리트의 熱膨脹이 骨材 자체보다 약간 적은값을 가진다. 몰탈의 열팽창은 100°C - 200°C 사이에서 수분의 증발에 의해 팽창이 약간 둔화되며, 500°C 이후에는 갑자기 커지는 경향이 있다. 이현상은 사암 콘크리트의 경우 거의 같은 현상을 나타내고 있다. (그림-9) 여기서 500°C - 600°C 변화는 골재의 석영 성분 때문에 지배되는 현상으로 석영은 573°C에서 α 석영에서 β 석영으로 크게 팽창한다. 그림-10은 온도를 상승시켜 하강시킬 때 콘크리트의 수축현상을 나타내는 실험결과이다. 600°C에서 온도를 하강시키면 잔유변형이 생기지만 400°C의 열부터의 경우는 100°C 근방에서 원점으로 되돌아와 그후 계속하여 수축한다. 이것은 콘크리트 내부의 수분의 증발정도 및 결정 변화에 의한 것이라 생각된다.

또, 低溫일 때, 콘크리트의 膨脹收縮에 대해서는 아직 실험자료가 없으므로, 정확하게 말할 수 없으나, Monfore와 Lentz의 실험에 의하면, 콘크리트의 線膨脹率은 +2 ~ -18°C의 溫度範圍에서 常溫보다 약간 증대하고 -101 ~ -157°C에서는 반대로 상당히 작아져서 常溫의 반정도가 된다. 이러한 경우도 骨材의 種類와 含水量에 따라 그 값은 상당히 달라진다.

(2) 熱傳導率 및 溫度傳導率

콘크리트의 熱傳導率 및 溫度傳導率 (熱傳導率/熱容量)을 溫度에 의한 變化를 단적으로 나타내기 위하여 그림-11 및 그림-12에 보통콘크리트에 관한 값을 나타내고 있다. 100 ~ 200°C 및 550°C 전후에서는 이들 값이 감소하고 있는

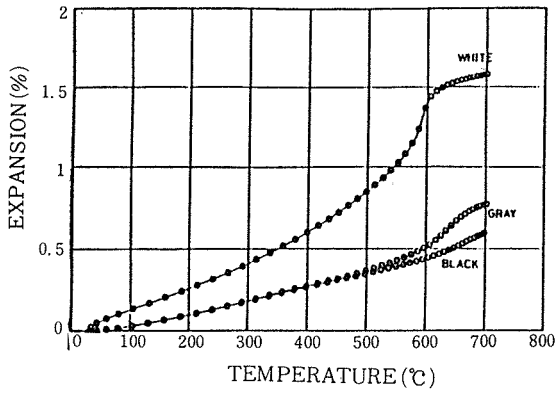


그림-5 색깔이 다른 일반콘크리트용 골재의 열팽창

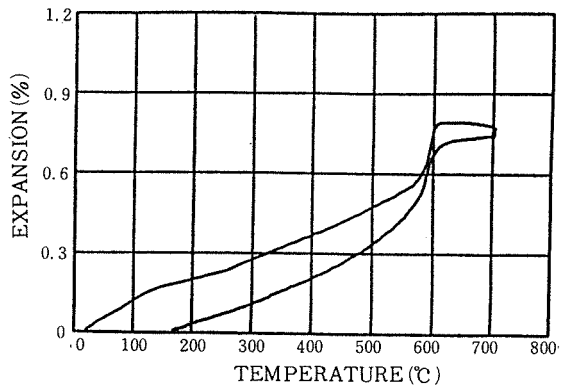


그림-8 몰탈의 열팽창과 온도하강시의 수축

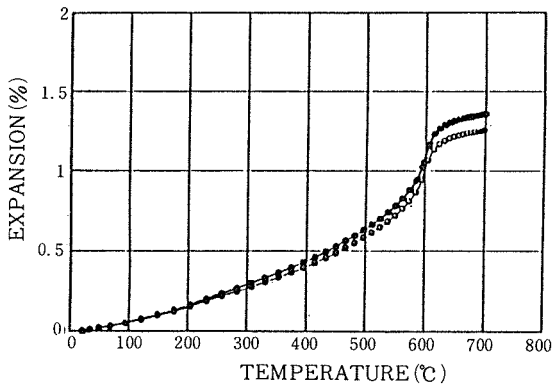


그림-6 일본 TAMA 강산 골재의 열팽창

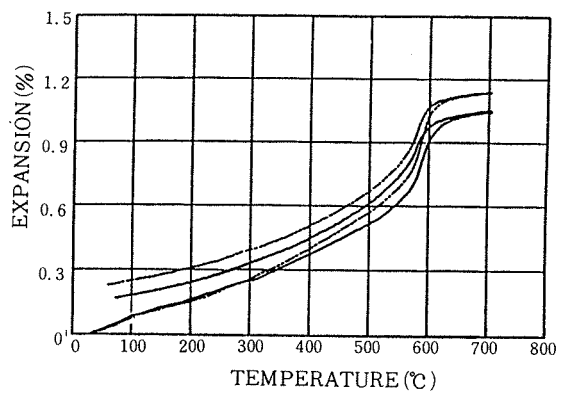


그림-9 보통콘크리트의 열팽창

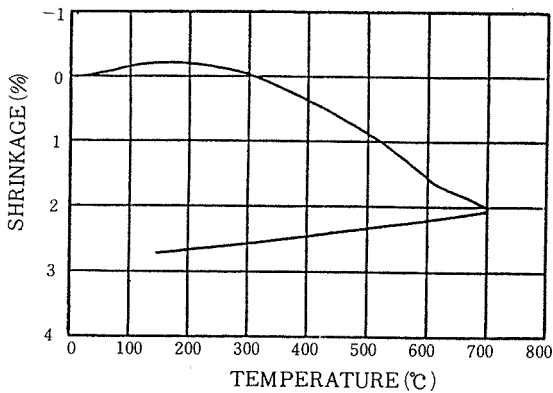


그림-7 시멘트 페이스트의 수축

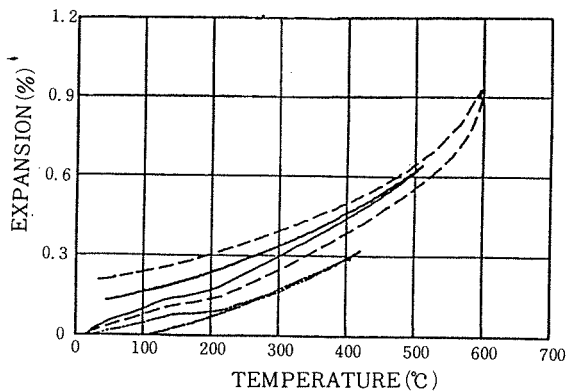


그림-10 보통콘크리트의 열팽창과 온도하강시의 수축

것은 수분(자유수, 결정수 등)의 氣化熱 때문이며, 외관상 熱이 흐르지 않는 것처럼 보이기 때문이다.

실제로 증발한 수증기는 高温인 콘크리트内部에서 이동한 후, 주위의 콘크리트로 熱을 전파한다. 100℃ 정도에서 冷却한 수증기는 다시 액체로 되돌아 갈때, 氣化熱을 放出하여 주위의 콘크리트에 多量의 熱을 전파하므로, 수분에 의한 熱의 이동은 빨라진다. 그러나, 이러한 舉動은 복잡하고 난해하며, 현재로서는 해명되지 않고 있다.

溫度에 의한 콘크리트의 熱傳導率 및 溫度傳導率의 變化는 骨材의 種類에 따라서 달라지지만, 실용상의 측면에서 보면 常溫値와 큰 차이가 없다고 할 수 있다. 그러나, 장기간 高温에서 加熱된 콘크리트는 콘크리트 자체의 性狀이 時間에 따라 變化하므로, 常溫値와 크게 相違할 가능성이 있다.

또, 低温에서의 溫度變化에 의한 熱傳導率의 變化는 表-4와 같다. 이 경우 콘크리트 내부 수분의 영향으로 볼 수 있다. 결국, 동일콘크리트에서도 乾燥狀態에 따라 常溫値부터가 상당히 다르다. 보통콘크리트의 경우, -157℃에서의 熱傳導率을 보면, 濕潤狀態에서는 常溫値의 약 40% 증대하는 데, 乾燥한 狀態의 경우는 약 10% 밖에 증대하지 않는다.

表-4 低温에서의 콘크리트의 熱傳導率

콘크리트의 種類	濕度條件	熱傳導率 (kcal/m·h·℃)				
		+24℃	-18℃	-59℃	-101℃	-157℃
보통 콘크리트	濕潤	2.90	2.90	3.28	3.91	4.03
	氣乾 ^(註1)	2.39	2.52	2.65	3.28	3.15
	絶乾 ^(註2)	2.02	1.89	2.14	2.27	2.27
경량 콘크리트	濕潤	0.74	0.83	0.83	0.81	0.82
	氣乾 ^(註1)	0.69	0.67	0.71	0.71	0.64
	絶乾 ^(註2)	0.54	0.49	0.47	0.45	0.43

註 1) R. H. 50%의 空氣中에 放置

2) +105℃에서 乾燥

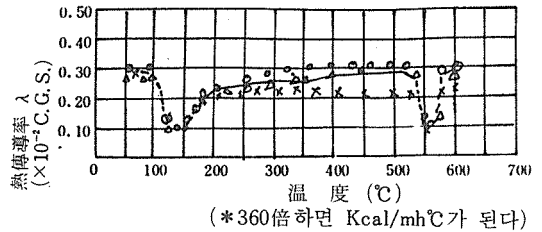


그림-11 보통콘크리트의 열전도율

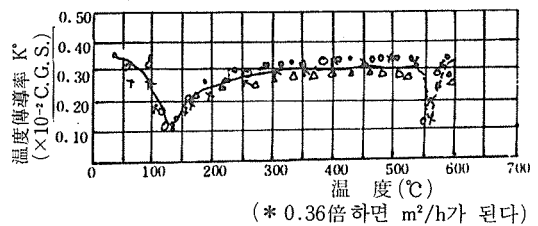


그림-12 보통콘크리트의 온도전도율

4. 熱作用에 의한 콘크리트의 應力

일정한 溫度로 유지된 콘크리트가 외부에서 加熱 또는 冷却의 溫度變化를 받으면, 콘크리트 内部에서는 溫度分布가 생긴다. 이에 따라 콘크리트의 각 부분은 膨脹이나 收縮을 일으켜 보통 熱應力이라는 應力이 발생하여 콘크리트 전체에 變化를 주게 된다.

熱應力은 콘크리트 内部의 溫度變化에 의해 생기는 乾燥 收縮 應力등과 같은 種類의 自己變形應力이다.

콘크리트는 溫度에 따라 變化하기 때문에 콘크리트의 熱定數와 力學的性質은 變化하게 된다. 또, 溫度는 통상 時間에 따라 變化하며, 高温에서는 콘크리트의 크리프變形도 무시할 수 없으므로, 熱應力 해석은 일반적으로 매우 복잡하다.

熱應力에 관한 상세한 설명은 전문서를 참고하고, 이하에서는 그 기본적인 개념에 대하여 간단히 설명한다. 내용을 간단히 하기 위하여 여기서는 콘크리트의 線膨脹率 및 彈性係數를 溫度에 관계없이 일정하게 한다.

우선, 그림-13에서의 (a)와 같이 온도 T_0 , 길이 l_0 인 콘크리트 봉이 자유상태에 있다고 하자. 이 콘크리트의 봉이加熱되어 전체가 일정한 온도 T 가 되었다하면, (b)와 같이 콘크리트의 봉은 온도차 $T-T_0$ 에 의하여熱膨脹이 생겨 Δl 만큼 길어져서, 길이 l 이 된다.

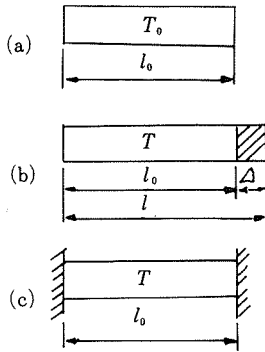


그림-13

여기서, 콘크리트의線膨脹率을 α 라 하면,熱膨脹變形 ϵ 은

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha(T-T_0) \dots\dots\dots (1)$$

가 된다. 콘크리트의 봉은 주변을 구속되지 않기 때문에變形만 생기고,熱應力은 생기지 않는다.

만약, 그림-13의 (c)와 같이 봉이 완전히 고정되어 있다고 한다면, 콘크리트봉이 구속되어 있기 때문에 内部에 應力이 생긴다. 이때 應力 σ 은熱膨脹變形에 負符號를 가진 $-\epsilon$ 만의變形에 의하여 생기므로, 콘크리트의 彈性係數를 E 라 하면,

$$\sigma = -E\epsilon = -E\alpha(T-T_0) \dots\dots\dots (2)$$

가 된다.

다음에 그림-14(a)와 같이 온도 T_0 , 한변의 길이 l_0 이고, 주변이自由인 정사각형 콘크리트판을 생각하자. 이 판이 온도 T 까지 일정하게加熱되면, 그림-14 (b)와 같이 콘크리트의 판은 한변이 $l=l_0+\Delta l$ 의 길이인 정사각형판으로變化한다. 이 경우도 봉과 같이 콘크리트

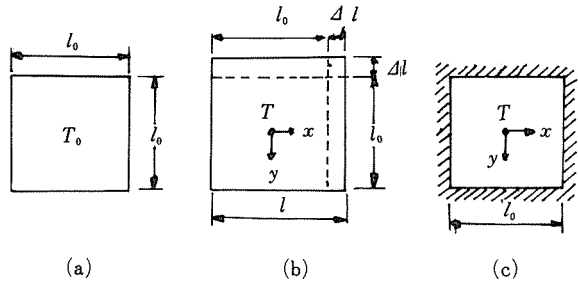


그림-14

의 판에 어떠한 應力도 생기지 않는다. 이때의熱膨脹變形은 x 방향, y 방향으로 동시에 $\epsilon_x = \Delta l/l_0 = \alpha(T-T_0)$ 이다.

그러나, 만약 그림-14 (c)와 같이 이 판이 4변을 완전히 고정되어 있다면 판에는熱應力이 발생하게 된다. 결국, x 및 y 방향의熱膨脹變形 $\epsilon = \alpha(T-T_0)$ 을 저항할 수 있는變形 $\epsilon_x = \epsilon_y = -\epsilon$ 가 판의 内部에 생기기에 따라熱應力이 발생한다.

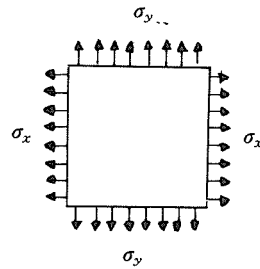


그림-15

材料力學에서 배웠듯이 그림-15와 같은 힘이 판에作用할 때의 應力과變形의 관계는 포아손比를 ν 로서,

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

이다. 따라서, 그림-14 (c)의 경우,

$$\epsilon_x = \epsilon_y = -\epsilon = -\alpha(T-T_0)$$

이므로, 식 (3)은,

$$\left. \begin{aligned} -\alpha(T-T_0) &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \\ -\alpha(T-T_0) &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

가 되고, 이 식을 연립하여 풀면,

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{1}{1-\nu}\alpha E(T-T_0) \dots\dots\dots (5)$$

가 된다. 이것은 일차원(봉)의 경우와 비교하여 $1/(1-\nu)$ 배 만큼 값이 달라져 있다.

동일한 방법으로 3차원의 경우를 생각하면, 한변의 길이 l_0 , 온도 T_0 의 정육면체를 생각하여 이것이 온도 T_0 로 일정하게 가열되었다고 하면, 각 변의 길이 l_0 는 $l = l_0 + \Delta l$ 로 팽창한다. 이 때의 열팽창변형은 봉(일차원) 및 판(2차원)의 경우와 같이 x, y, z 방향에 $\epsilon = \Delta l/l_0 = \alpha(T-T_0)$ 가 된다.

만약, 이 정육면체를 全表面에 걸쳐 완전히 고정되었다고 하면, $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = -\alpha(T-T_0)$ 의 변형이 콘크리트 内部에 생기고, 이에 따라 열응력이 발생한다.

3차원에서의 응력과 변형의 관계는,

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

이므로, 식 (6)에 $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = -\alpha(T-T_0)$ 를 대입하여 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 에 대하여 풀면,

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \frac{1}{1-2\nu}\alpha E(T-T_0) \dots\dots\dots (7)$$

이 된다. 이 값은 일차의 경우와 $1/(1-2\nu)$ 배 만큼 달라진다.

결국, 이상의 내용을 정리하면, 端部가 완전히 고정될 때의 열응력은,

$$\text{일차원의 경우 } \sigma_x = -\alpha E(T-T_0)$$

$$\text{이차원의 경우 } \sigma_x = \sigma_y = -\frac{1}{1-\nu}\alpha E(T-T_0)$$

$$\text{삼차원의 경우 } \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -\frac{1}{1-2\nu}\alpha E(T-T_0)$$

가 된다.

다음으로 임의의 자유형태에 어느 일정한 온도 T_0 인 콘크리트 덩어리를 생각하자. 이 콘크리트가 외부에서 가열되어 어느 순간에 있어서 T 의 온도 분포가 되었다고 한다(그림-16). 이 덩어리 내부의 온도 T 로서 일정하다면, 이 덩어리에는 열응력이 생기지 않지만, 일정하지 않을 경우에는 응력이 발생한다. 이 때 발생하는 열응력을 고찰하여 본다.

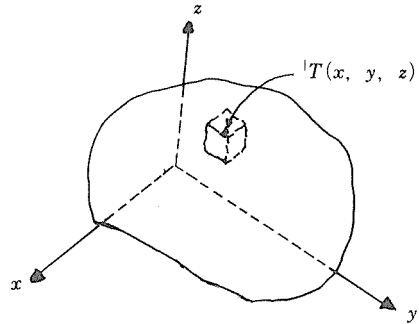


그림-16

우선, 이 콘크리트를 동일 크기로 미소한 정육면체로 분해한다. 이 하나의 요소(element)의 중심좌표를 (x, y, z) 라 하면, 이 미소한 정육면체의 中心溫度는 $T(x, y, z)$ 이고, 실용상 이 요소 内部에서는 온도가 일정하다고 하면, 중심 온도 $T(x, y, z)$ 로 이를 대표시킬 수 있다.

콘크리트의 덩어리는 하나하나 분해되어 있고, 각각 온도가 다르므로, 이들 미소 요소는 각각 中心溫度에 의해 변형하고, 각각 다른 크기의 정육면체가 된다. 결국, 미소 요소를 元狀態로 결합시켜 보면, 이들 요소는 틈없이 잘 연결될 수 없다.

그런데, 이번에는 열팽창한 각 요소에 이 팽창변형을 완전히 구속할 수 있도록 外力을 작용시키게 한다. 그 힘은 전에 구한 3차원 완전구속인 경우의 열응력

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \frac{1}{1-2\nu}\alpha E[T(x, y, z) - T_0] \dots\dots\dots (7')$$

와 같다. 결국, 이 만큼의 힘을 각 미소 정육면체에 작용시키면, 이들 요소가 T_0 의 온도에서

$T(x, y, z)$ 의 溫度로 上昇하더라도 그 크기는 변하지 않는것이 된다. 식(7')의 힘을 각 要素에 作用시킨 후 全要素를 연결시키면, 이번에는 빈틈없이 元狀態로 연결시킬 수 있다.

그러나, 각 要素에는 그 장소의 溫度 $T(x, y, z)$ 에 따라 식(7')과 같은 外力이 作用하고 있는 것이 된다.

한편, 콘크리트의 덩어리에는 溫度分布가 생길 뿐이고, 外力은 일체 作用하지 않으므로, 이 外力은 해제하여 줄 필요가 있다. 이를 위해서는 각 要素가 연결되어 있는 狀態에서 각 要素에 식(7')으로 나타내고 있는 값과 크기는 같고 부호가 반대인 힘을 作用시켜 줄 필요가 있다.

만약, 이 때의 應力 성분 $T(x, y, z)$ 를 해석할 수 있으면, 이 應力分布와 식(7')에 의한 應力分布와 합쳐서 여기서 고려하고 있는 溫度分布 $T(x, y, z)$ 인 콘크리트에 생기는 熱應力을 찾아낼 수 있다. 그러나 $T(x, y, z)$ 를 구하는 것은 아주 특수한 경우를 제외하고는 상당히 어렵다.

구체적인 예로서 그림-17 (a)와 같은 최초 일정한 溫度 T_0 인 콘크리트판이 加熱되어 溫度分布 T 가 생길 때의 熱應力에 대하여 생각해 본다. 溫度分布는 x 축방향에는 변화가 없고, x 축에 관한 偶函數로 한다. 판을 微小한 폭 y , 길이 $2l$ 인 직육면체의 要素로 분해하여 앞에서 서술한 순서로 생각해 보자.

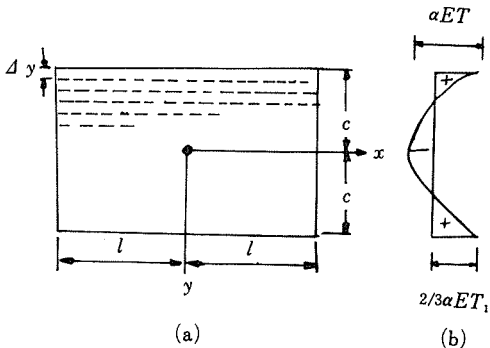


그림-17

우선, x 방향의 熱膨脹變形 $\alpha(T-T_0)$ 를 완전히 구속해 버리기 때문에 x 축 방향의 應力,

$$\sigma'_x = -\alpha E(T-T_0) \dots\dots\dots (8)$$

를 판의 각 직육면체 콘크리트의 端部 ($x=\pm l$)에 作用시킨다. y 축 방향의 伸縮은 自由이므로, 식(8)의 힘 作用에 따라 y 방향의 힘은 생기지 않는다. 식(8)의 힘 作用에 따라 溫度上昇 ($T-T_0$)에 의한 x 축방향의 판膨脹은 완전히 구속된다. 그러나, 판에는 外力이 作用하지 않으므로, 식(8)인 應力으로 판의 단부에 分布하는 크기 $\alpha E(T-T_0) = -\sigma'_x$ 의 힘을 作用시킬 때에 판内部에 생기는 應力과 합쳐서 구할 필요가 있다.

이들 힘의 합력은

$$\int_{-c}^{+c} \alpha E(T-T_0) dy \dots\dots\dots (9)$$

이고, 판의 端部에서 충분히 떨어진 장소에서는 이 힘은 거의 일정한 分布가 되며,

$$\frac{1}{2c} \int_{-c}^{+c} \alpha E(T-T_0) dy \dots\dots\dots (10)$$

가 된다. 결국, 판의 端部 ($x=\pm l$)에서 상당히 떨어진 점에서는 주변 自由 판의 熱應力은,

$$\sigma_x = \frac{1}{20} \int_{-c}^{+c} \alpha E(T-T_0) dy - \alpha E(T-T_0) \dots\dots (11)$$

가 된다. 溫度分布를 拋物線으로 가정하여,

$$T = T_1 \left(1 - \frac{y^2}{C^2}\right) \dots\dots\dots (12)$$

이라고 하면, 식(11)은,

$$\sigma_x = \frac{2}{3} \alpha E T_1 - \alpha E T_1 \left(1 - \frac{y^2}{C^2}\right) \dots\dots\dots (13)$$

가 된다. 이 應力分布를 그림-17 (b)에 나타낸다. 판의 端部에서는 應力이 흐려져 생기고, 식(13)과는 다르다. 이 해석은 매우 복잡하므로, 흥미있는 분은 彈性力學에 관한 책을 참고하기 바란다.

끝으로 이해설은 일본 콘크리트 공학협회 콘크리트 공학 잡지 (Vol. 17, No. 8, 1979年)에 그 내용이 대부분 실린 것으로 번역하여 수정 가필한 것이다. 자료를 제공하여 주신 일본 동경대학 교수 古村福次部 선생에게 감사를 드린다.