

콘크리트의 凍結融解作用에 대한 對策

韓 基 成

〈仁荷大學校工科大学教授·工博〉

1. 머리 말

지난 4월 어느날 우연한 기회에 “알 수 없는 韓國人”이란 冊”을 읽게 되었다. 그 안에서 나의 주목을 끈 것은 1970年代에 北韓에서 있었던 이야기로 “6個年 主體經濟計劃”에 따라 外國의 設備導入으로 建設된 시멘트工場에 관한 것이었다. 그것은 日本人이 본 北韓의 經濟批判으로서 그 本文의 일부를 옮겨 보기로 한다.

“가장 전형적인 예를 하나 들지요. 순천(順川)에 시멘트공장을 하나 만들었습니다. A.O. 스미드라는 회사가 설계건설을 담당했지요. 그런데 실제로 한진 모(母)회사가 아니고 일본에 「일본 스미드」라는 자(子)회사가 있어 여기서 전부 사람을 보냈지요. 저는 이 「일본 스미드」로부터 브리핑을 받은 적이 있습니다.

어떤 일이 있었는가——. 3백만톤의 생산능력을 갖춘 시멘트공장인데요. 그 시멘트를 넣기 위해 세계 연속으로 달린 사일로가 세계 즉 아홉개를 만들었습니다.

그런데 그 사일로를 공사하는 시기가 마침 겨울이었습니다. 겨울에 콘크리트를 집어 넣을 때는 증기로 덥히게 되어 있습니다. 덥히지 않으면 굳어버리지만 강도가 없습니다. 스미드측은 현장에서 시공하는 사람들에게 시끄럽도록 덥히기 위한 보일러를 만들어 놓으라고 야단을 해도 보일러는 끝내 없었습니다. 겨울에 노르마에 쫓

겨 급하게 해치웠기 때문에 완성된 사일로 9개는 어느 것이나 전부 시멘트를 부으면 밀이 빠져 버립니다. 그들은 시끄럽게 「그것은 우리들의 스펙(仕様書)대로 하지 않았기 때문이다」라고 그 때마다 편지를 써 크레임을 내지요. 그것들을 복사한 방대한 제록스가 남아 있습니다. 그런데 시멘트가 밀이 빠지면 평양측에서 「일본 스미드」측에 대해 너희들의 스펙대로 했는데도 그 꼴이 됐다면서 손해를 변상하라고 해옵니다. 이에 대해 곧 제록스된 것을 다시 복사해서 평양에 보냈더니 평양측은 한마디도 대꾸가 없었다는 겁니다.

그래서 할 수 없으니까 하나는 도괴(倒壞)해 버렸으므로 나머지 2개를 개수했습니다. 일본으로부터 후판(厚板) 5천톤을 긴급 수입해서 곁에다 둘러쌌지요. 그 5천톤 구입소식이 한국의 중앙정보부 귀에 들어가 중앙정보부측은 북한이 후판 5천톤을 사가지고 전차(탱크)를 만든다고 야단법석이었지요” 라는 내용이였다. 이것이 사실이라면 참으로 한심스러운 일이고 北韓의 工業과 土木建築의 水準을 짐작하게 한다.

그러면 우리 韓國의 실정은 어떠한지 다시한번 돌이켜 보지 않을 수가 없다. 모든 콘크리트 工事が 示方書대로 原資材의 選定, 配合, 施工 및 養生 등을 제대로 하고 있다고 자신있게 이야기 할 수 있는지 의심스럽다.

콘크리트 構築物이란 오랜 세월동안 自然의 氣象條件下에 노출되어 風力, 雨水, 霜雪, 日光 등

에 의한 乾燥, 濕潤, 加熱, 冷却, 凍結, 融解 등의 作用을 받게 된다. 이러한 가혹한 氣象條件에 견딜 수 있는 耐久性을 얻기 위해서는 시멘트·콘크리트를 다루는 技術者, 技能者, 施工者들의 세심한 配慮가 요망되는 것이다.

막대한 量의 시멘트가 콘크리트工事に 사용되고 이들은 우리 世代뿐 아니라 子孫萬代를 위한 귀중한 遺産으로 남겨줄 것들이란 걸 생각할 때 더욱 그 중요성을 인식하게 된다.

여기서는 韓國氣候의 특징과 콘크리트의 凍結融解現象 및 그에 따른 劣化를 防止하고 抵抗性을 높이는 方法에 대하여 여러 사람들의 研究結果를 기초로 평이하게 기술해 보고자 한다.

2. 韓國의 氣候

大韓民國의 위치는 대략 東經 125°에서 130°와, 北緯 33°에서 46° 사이에 있다. 氣候는 大陸性 氣候에 속하여 여름의 酷暑와 겨울의 酷寒이 있고 年中 最高(~35°C) 및 最低氣溫(~-25°C) 차이는 거의 60°C에 달하기도 한다. 또 日較溫度差가 약 30°C 까지 가는 경우도 있어 상당히 심한 편이다. 降水量에 있어서도 地方에 따라 차이가 있기는 하지만 月間 600mm (7, 8月)에서 10mm 미만(12月)의 가뭄이 계속되는 계절도 있다.

콘크리트의 凍害는 地方에 따른 氣象條件에

많은 영향을 받는 것은 명백한 사실이고 寒冷地의 범위를 어느 정도로 하느냐는 등 여러가지로 고려해야 한다. 심한 降水量의 차이도 乾燥와 濕潤의 반복에 따른 콘크리트의 劣化를 가중하게 될 것이며 이러한 가혹조건을 극복하는 콘크리트工事に 대처해 가야 할 것이다. <그림-1>에는 각 지방의 月間 最高 및 最低氣溫과 平均 最高 및 最低氣溫을 표시하였으며 <表-1>에는 각 지방별 月間 降水量을 표시하였다.

3. 콘크리트의 凍結融解現象

콘크리트의 硬化體는 乾燥收縮에 의한 龜裂現象³⁾과 反應性骨材 특히 알칼리反應性骨材와의 反應에 의한 劣化現象⁴⁾ 또는 海水 등 각종 化學鹽類와의 反應에 의한 浸蝕作用⁵⁾ 외에 가혹한 氣象條件에 따른 龜裂 및 劣化現象을 경험하게 된다.

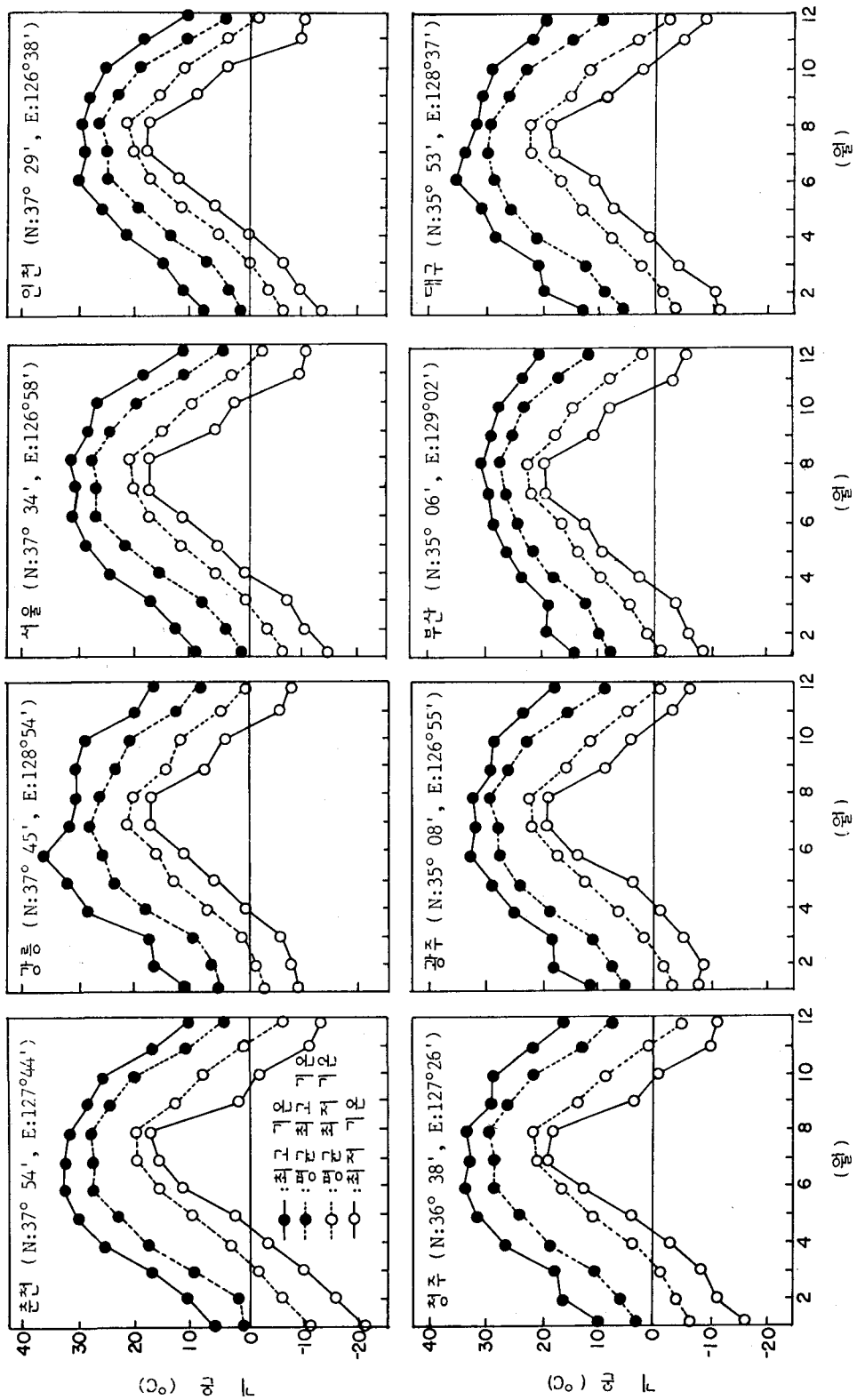
시멘트硬化體는 시멘트가 물과의 水和反應에 의하여 形成된 것으로 그 안에는 CSH로 형성된 cement gel (non-evaporable water 포함)과 gel pore (gel 空隙) 및 capillary pore (毛細管空隙)과 그들 空隙을 채우는 pore water (evaporable water, gel water, capillary water) 등이 있다. 여기서 non-evaporable water는 化學的으로 결합된 水分이고 evaporable water는 物理的인 吸着과 毛細管力으로 보유하고 있

월 별 강 수 량 (1987)²⁾

<表-1>

(단위 : mm)

지방	월별	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
춘	천	40.5	40.5	36.2	51.6	97.2	112.5	438.8	566.8	50.6	10.1	56.1	2.3
강	릉	21.5	126.6	92.4	52.9	79.8	91.5	391.0	256.3	43.4	71.9	127.4	42.5
서	울	43.4	36.2	34.2	55.3	126.6	130.3	651.2	521.8	61.1	21.9	66.8	2.6
인	천	35.2	24.4	32.2	55.0	116.4	105.4	629.9	476.5	50.0	12.8	71.1	1.7
매	전	73.1	60.5	39.5	55.1	84.2	136.0	681.7	580.2	19.1	80.2	67.7	3.4
청	주	64.7	53.3	47.7	46.4	82.4	121.7	536.5	571.7	21.1	44.6	63.8	2.3
광	주	80.1	50.0	71.8	83.5	77.7	154.1	501.7	368.9	45.4	88.3	86.1	3.4
군	산	65.0	47.8	33.2	67.7	52.3	126.6	569.0	611.5	30.1	87.4	72.3	6.2
대	구	44.4	43.9	51.4	42.7	62.3	138.7	275.7	327.2	11.0	44.6	51.8	0.4
부	산	52.7	34.6	76.4	87.5	99.3	189.2	374.3	349.6	39.6	67.0	52.7	-



〈그림-1〉 월별 최고 및 최저기온과 평균 최저 및 최고기온²⁾

는 水分임을 뜻한다.”

콘크리트가 아직 굳지 않은 신선한 상태에서凍結하게 되면 硬化한 후에도 強度, 水密性, 耐久性 등의 性能이 현저하게 저하한다. 콘크리트에 사용한 材料의 種類, 配合 등에 따라 다소 다르기는 하지만 콘크리트가 얼기 시작하는 것은 보통 $-0.5 \sim -3.0^{\circ}\text{C}$ 정도이다.” 이것은 콘크리트의 自由水 중에 용해되어 있는 여러가지 鹽類 때문에 氷點이 내려가기 때문이다.

콘크리트의 初期凍結現象은 아직 凝結이 시작되지 않은 콘크리트의 凍結과 凝結은 끝났으나 아직 충분한 強度發現이 되지 않은 때의 凍結로 나누어 생각할 수가 있다.

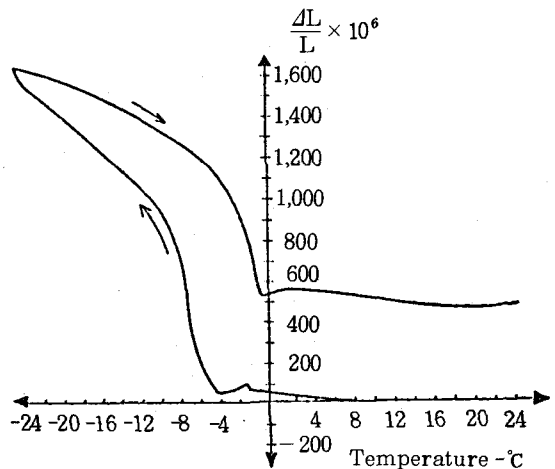
凝結이 시작되지 않은 콘크리트의 凍結은 마치 물로 飽和된 상태의 흙이 凍結하여 부풀어 오를 때와 같다. 이때 低溫이므로 시멘트의 化學反應은 거의 진행되지 않고 凝結도 初結까지 이르지 않았으므로 시멘트의 組織이 파괴되는 일은 없다. 그후 外氣溫度가 상승함에 따라 신선한 콘크리트가 融解된 時點에서 凝結이 시작되므로 그 시기에 再振動에 의한 다지기를 하게 되면 정상적인 凝結·硬化作用을 하게 되어 強度나 耐久性에 그리 큰 영향을 주지 않는다. 그러나 再振動을 하지 않든가 또는 불충분한 경우에는 콘크리트 안에 空隙을 남기게 되므로 당연히 強度가 떨어진다.”

콘크리트의 凝結은 끝났으나 아직 충분한 強度發現이 되지 않은 時期에 凍結한 경우는 콘크리트 중의 自由水가 凍結하여 膨脹함으로써 콘크리트 硬化體에 큰 體積增加가 일어나고 그때의 組織弛緩이나 破壞 때문에 硬化후 콘크리트의 強度, 水密性, 耐久性 등이 현저하게 떨어진다. 그러나 콘크리트의 強度가 충분히 發現된 때에는 凍結의 膨脹壓에 대한 충분한 抵抗성과 콘크리트 중에 존재하는 自由水의 대부분은 시멘트와 結合하여 있든가 또는 gel 間隙 중에 존재하므로 콘크리트의 凍結에 의한 손상은 그다지 크지 않다.

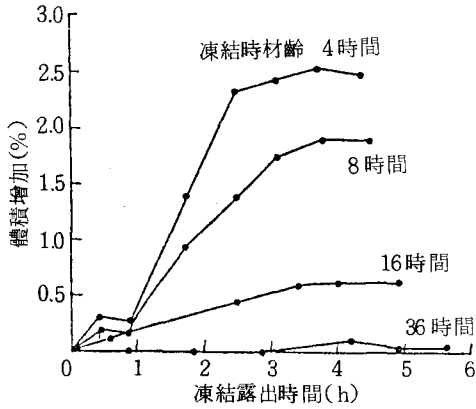
시멘트硬化體에 대한 凍害 mechanism은 원칙적으로 물이 얼음이 되면 부피가 약 10% 증가한다고 하는 사실에 기인한다. 물이 飽和되어 있는 보통의 시멘트硬化體에서는 凍結溫度

에서 상당한 膨脹이 일어나고, 그에 따른 組織의 破壞를 일으키지만 이때 얼음이 직접 破壞原因이 되는 것은 아니고 얼음 때문에 壓縮된 물 때문에 높은 水壓이 발생하고 이것이 組織의 膨脹을 일으킨다고 추정되고 있다.” 融解되면 凍結에 의한 膨脹은 어느 정도 회복되나 완전하지는 않다. 이 殘存하는 凍結膨脹이 결국 組織을 弛緩시키는 근거인 것이다. 콘크리트가 다시 새로운 물로 飽和되면 발생한 微細龜裂에 물이 차게 된다. 이와 같이 하여 凍害作用은 凍結融解 cycle의 반복으로 그 破壞力이 증대되어 마침내 붕괴해 버리는 것이다.

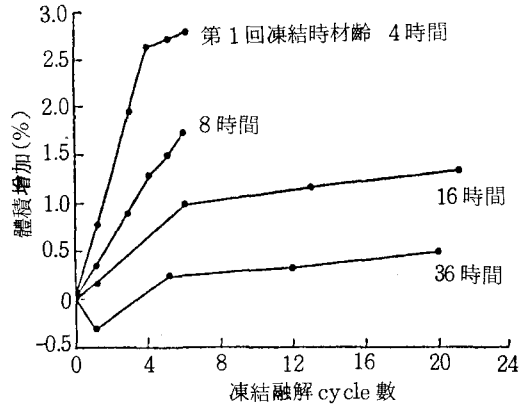
凍害의 정도는 시멘트硬化體 중의 얼 수 있는 물, evaporable water의 양에 따라 달라진다. 얼지 않는 물이란 물론 化學的으로 結合되어 있는 물, non-evaporable water이다. gel water는 結合력이 강하므로 溫度가 몹시 낮지 않으면 얼지 않는다. 따라서 실제로는 凍害溫度範圍 내에서 capillary water만이 얼 수 있는 물로 간주된다. 더구나 시멘트硬化體 중의 capillary water는 表面張力を 받고 있어 capillary system이 微細할수록 강한 表面張力の 영향을 받는다. 따라서 물은 우선 큰 capillary 안에서



〈그림-2〉 Dilation of saturated hardened paste specimen due to one cycle of freezing and thawing. No entrained air. Water/ cement ratio = 0.65. Paste 79 per cent hydrated. 6)



〈그림-3〉 凍結時材齡과 凍結露出時에 따른 보통 포틀랜드시멘트의 體積增加⁴⁾



〈그림-4〉 第1回凍結時材齡과 凍結融解 cycle 數에 대한 콘크리트의 體積變化⁴⁾

얼고 溫度가 내려가면 그보다 작은 capillary 부분이 얼게 된다. 점점 溫度가 내려감에 따라 얼음이 되어가는 과정은 시멘트 硬化體의 凍結에 의한 膨脹을 plot 하여 감으로써 추적할 수 있다. 이것을 〈그림-2〉⁹⁾에 표시하였다. 이 그림에서 보면 처음에는 급격히 그리고 나서 서서히 膨脹이 진행되다가 -25°C 에서는 약 1.6 mm/m에 달한다. 融解가 끝난 뒤에도 이 膨脹의 1/3은 “殘存凍結膨脹”으로 남게 된다. 실제적으로는 W/C를 0.4 이하로 하여 시멘트 硬化體 중에 capillary water를 남지 않게 하면 凍結膨脹現象을 최소화할 수 있게 된다.

그러나 乾燥收縮 등 여러가지 要因으로 시멘트 硬化體 안에 龜裂이 발생되어 있다면 이 안에 물이 스며들게 되어 凍結에 의한 龜裂은 더욱 심해져 마침내 붕괴현상에 이르기까지 한다.

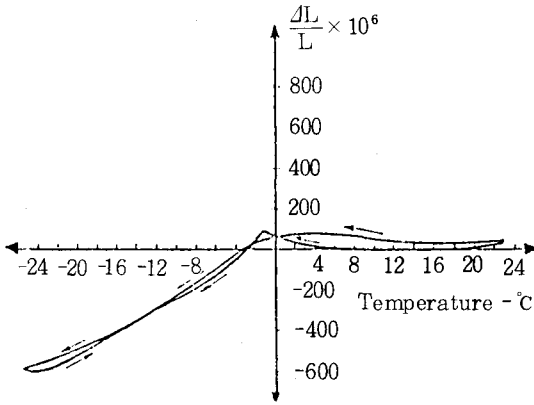
〈그림-3〉⁴⁾은 凍結開始材齡과 凍結露出時間이 膨脹에 미치는 영향을 나타낸 것으로 적어도 16時間 동안 콘크리트를 凍結되지 않도록 보호해 주면 體積增加를 상당히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또 凍結融解의 반복작용에 대한 抵抗性은 최초의 cycle이 作用할 때의 材齡과 밀접한 관계가 있어 10時間 이내의 材齡이 아주 짧은 때에 凍結融解의 반복작용을 받으면 심한 體積膨脹이 일어남을 알 수 있다(〈그림-4〉), 또 〈그림-3, 4〉로부터 凍結時의 材齡이 짧은 것일수록 短時間 또는 적은 회수의 凍結

融解 cycle로서 큰 體積膨脹이 나타남을 알 수 있다.

4. 콘크리트의 凍結融解 抵抗性

신선한 콘크리트의 初期凍害는 콘크리트 중의 cement paste가 아직 충분하게 안정된 組織이 되기 전에 일어나는 現象으로 콘크리트에 따라서는 가장 가혹한 조건에서의 損傷이라 할 수 있다. 신선한 콘크리트를 가혹한 氣象條件의 浸蝕에 대처시키기 위해서는 콘크리트의 정상적인 凝結 및 硬化에 필요한 溫度와 濕度를 유지하도록 할 것과 콘크리트 자체를 耐凍害性으로 해야 한다. 耐凍害性 콘크리트로 하기 위해서는 그 配合設計 단계에서 施工이 가능한 범위 내에서 單位水量을 되도록 적게 하고 凍結시의 膨脹을 緩和시키는데 적당한 양의 空氣를 連行시키며 콘크리트를 早強性으로 하는 등의 주의가 필요하다.

凍結融解作用으로부터 콘크리트를 보호하기 위해서는 AE劑나 AE減水劑 등을 첨가하여 콘크리트에 空氣를 連行시키는 方法이 일반적으로서 행되고 있다. 氣泡을 連行시킴으로써 시멘트 硬化體 안에서의 容積變化를 추적하여 plot하여 보면 〈그림-5〉와 같이 되어 〈그림-2〉와는 근본적으로 다른 現象을 보여주고 있다. 溫度가 저하함에 따라 膨脹 대신 收縮하는 現象이 나타나



〈그림-5〉 Dilation of saturated hardened paste specimen due to one cycle of freezing and thawing. 16 per cent entrained air. Water/cement ratio = 0.65. Paste 71 per cent hydrated.⁶⁾

-25°C에서는 약 6 mm/m까지 收縮을 하게 되고 融解가 된 후에는 거의 원상태로 회복되어 있는 것을 알 수 있다. 즉 組織의 弛緩現象이 일어나지 않았음을 나타낸다.

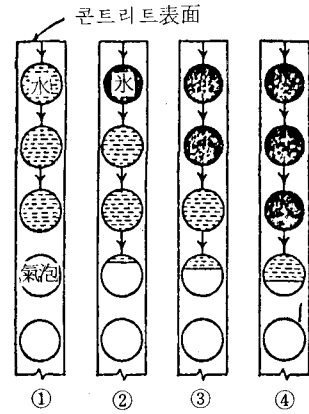
콘크리트의 硬化體에 氣泡을 連行시킴으로써 凍結融解性이 증대하는 것은 自由水의 凍結 때문에 생긴 水壓이 凍結하지 않은 自由水를 가까이 있는 氣泡 속으로 이동시킴으로써 水壓이 完化되기 때문이다. 〈그림-6〉에는 自由水移動에 따른 凍結融解作用의 機構를 표시하였다. 여기서

①은 콘크리트表面이 凍結點 이상인 경우이다.

②는 콘크리트表面이 凍結點 이하로 되었을 때로서 表面에 가까운 氣泡 중의 自由水, 浸透水 등이 凍結하여 약 9%의 體積이 증가하고 내부쪽으로는 壓力이 발생한다. 이 壓力에 의하여 凍結하지 않은 自由水는 다음의 氣泡로 이동한다. 이 때문에 壓力이 完化되므로 表面 부근의 콘크리트는 파괴되지 않는다.

③과 ④에서와 같이 自由水의 凍結이 콘크리트의 内部까지 진행하여도 ②와 같은 現象이 된다.

이와 같은 自由水의 移動에 의한 水壓의 完化에는 氣泡間의 거리가 중요하게 되고 이 거리가 긴 경우에는 壓力水가 다음의 氣泡까지 移動하기 어렵기 때문에 固體部分에 引張力이 작용하



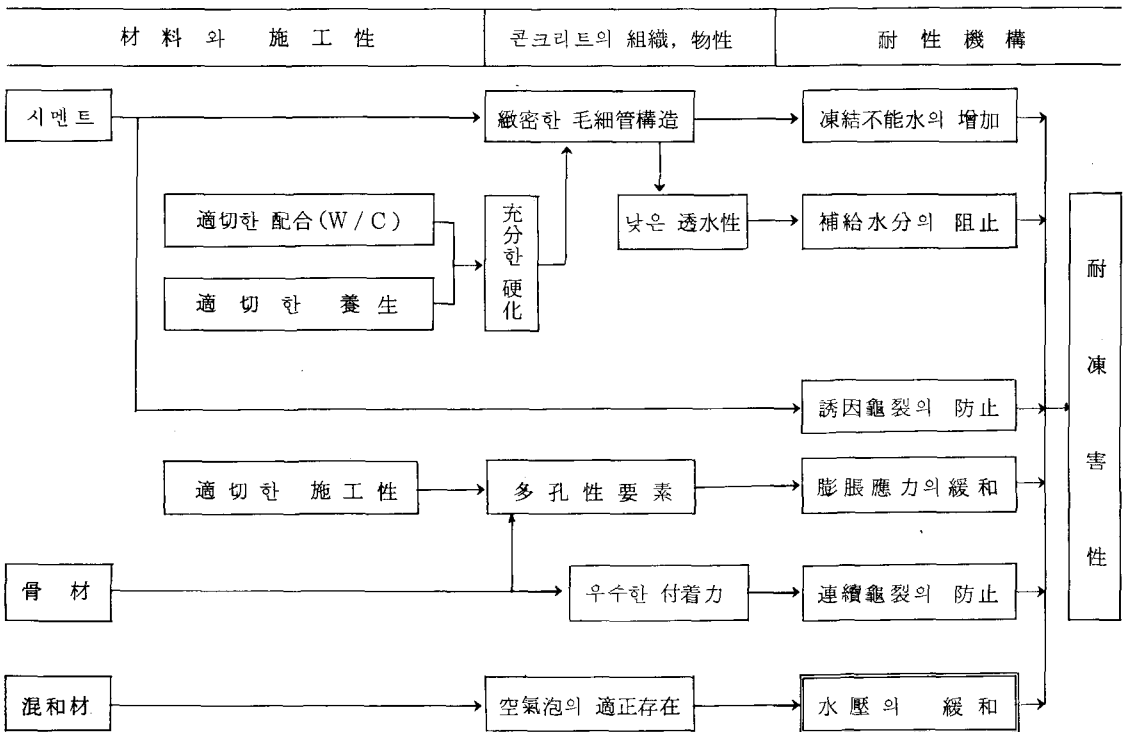
〈그림-6〉 凍結融解作用의 機構⁴⁾

게 된다. 그리고 이 引張力이 固體部分의 引張強度를 초과할 때에 龜裂이 발생한다. 氣泡間의 거리를 나타내는 指標로서는 氣泡間隔係數⁷⁾가 사용되며 일반적으로 氣泡間隔係數가 200~250 μm 정도 이상에서는 콘크리트가 凍結融解作用에 의하여 심한 劣化現象을 나타낸다.

凍結融解抵抗性에 영향을 미치는 因子로서는 氣泡間隔係數 이외에 콘크리트의 W/C, 骨材의 品質, 鹽化物의 浸入 또는 龜裂의 발생 등을 들 수 있다. W/C가 적은 配合일수록 組織이 치밀하고 凍結水의 絶對量이 적으므로 凍結融解抵抗性이 뛰어난 것이다.

일반적으로 吸水量이 많은 骨材 또는 劈開性이 있는 骨材를 사용한 콘크리트의 凍結融解抵抗性을 상당히 劣化되는 것이다. 또 解水劑로서 사용하는 소금, 鹽化칼슘, 에틸알콜, 에틸렌그리콜 또는 海水 등 鹽分환경하에 있는 콘크리트가 凍結融解作用을 받았을 때는 scaling劣化現象이 일어난다. 콘크리트의 龜裂現象은 乾燥收縮, 과중한 荷重, 심한 溫度應力에 의하여 일어난게 되며 龜裂된 틈 사이로 물이 침투함으로써 凍結融解作用에 따른 콘크리트의 劣化를 촉진하는 原因이 된다.

이상에서 凍結融解作用에 따른 콘크리트의 劣化現象, 凍結融解機構 및 凍結融解耐久性 등에 대하여 기술하였으며 이들을 종합하여 耐凍害性이란 관점에서 이에 관련된 여러가지 要素들을 그림으로 나타내었다(〈그림-7〉).



〈그림 - 7〉 耐凍害성의 여러가지 要素⁸⁾

또한 최근에는 콘크리트의 凍結融解抵抗性を 改善하는 方法으로서 AE劑나 AE減水劑를 사용하는 以外에 특이한 氣泡組織을 形成하여 극히 적은 空氣量으로도 콘크리트의 凍結融解抵抗性を 改善할 수 있는 混和劑를 첨가하는 方法이나 내부에 空隙을 가지는 微粒體를 空氣泡 대신에 混入하는 方法 등도 강구되고 있다.

5. 結 論

土木, 建築, 기타 여러가지 構造物에 필수적 으로 사용되는 시멘트·콘크리트는 그들이 지니는 特殊性 때문에 여러가지 가혹한 조건에 대한 耐久性이 강력히 요청되고 있다.

여기서는 특히 韓國의 특이한 大陸性 氣候에 따른 夏季節의 장마와 酷暑, 겨울의 가뭄과 酷寒, 봄철의 계속적인 乾燥期 등으로 콘크리트의 耐久性에 미치는 영향은 매우 큰 것이다. 이러한 악조건을 극복하고 우리들 後世에게 좀더 견

고하고 훌륭한 遺産을 남기고 싶은 간절한 마음 에서 凍結融解에 의한 耐久性에 대하여 기술해 보았다.

〈參 考 文 獻〉

- 1) 佐藤勝己外 著, 李度珩譯, 태광문화사, 129~132 (1988).
- 2) 中央氣象臺, 氣象月報(1~12), (1987).
- 3) 韓基成, 제 4 회 시멘트심포지움, 18 (1976).
- 4) 岡田清, 콘크리트의 耐久性, 朝倉書店, 東京, 17 (1986).
- 5) 韓基成, 제 15 회 시멘트심포지움, 33 (1987).
- 6) W. Czernin, Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers, Bauverlag GMBH, Wiesbaden und Berlin, 137(1980).
- 7) I. Lyse, et al. : Durability Studies of Concrete, J. ACI., 30, No. 2(1933).
- 8) 시멘트協會(日), 시멘트·콘크리트化學과 그 應用, 22(1987). ♣