

全國 凍結깊이 分布와 동결깊이 및 凍結指數와의 相關關係

The Distribution Frost Penetration Depth and Relationship between Frost Penetration and Freezing Index in South Korea

金 翔 圭* · 朴 常 吉** · 朴 方 勳**
 Kim, Sang Kyu · Park, Sang Kil · Park, Bang Hun

Abstract

The National Construction Research Institute of Korea has measured the depth of the frozen ground covering all the areas of South Korea during ten years ranging through 1980. The measurements were made for the frozen ground at random but intended for the most frost-susceptible soils. The soils of the frozen ground were sampled and then classified into four groups according to the frost design soil classification system suggested by the Corps of Engineers of the United States.

The contours of the maximum depth of the frost penetration are drawn on a map with data collected during the ten years. Also isolines of the design freezing index are shown on another map using the meteorological information of 1980-1989 and compared with those investigated in 1980 by Highway Survey Team of the Ministry of Construction, Korea.

It is known that the maximum depth of the frost penetration is related to freezing index values. An empirical formula expressing the relation is suggested, in which the depth is proportional to the one-third power of the air freezing index values.

요 지

국립 건설 시험소에서 1980년 부터 1989년에 이르기까지 10년 동안 전국에 걸쳐 凍結된 지반의 깊이를 조사하였다. 그 위치는 無作為로 선정하였으나 동결이 심한 지반에 대해 조사하도록 노력하였다. 조사지점의 凍結土를 채취하여 미 공병단의 凍結土 分類方法에 따라 분류하였다.

동결 깊이 조사자료를 근거로 하여 全國 最大 凍結깊이 線圖가 작성되었다. 한편, 기상자료를 이용하여 포장설계에 이용할 수 있도록 설계 동결지수선도를 작성하고, 1980년에 도로조사단에서 작성한 資料와 비교 분석하였다. 동결깊이는 공기동결지수의 3乘根에 비례하는 새로운 경험식을 提案하고 다른 경험식과 비교하였다.

*正會員 · 東國大學校 工科大學 土木工學科 講師

**正會員 · 國立建設試驗所 土質課長

***正會員 · 國立建設試驗所 土質係長

1. 서 론

凍上은 흙속에 있는 물이 얼어서 일어난다. 地盤이 凍結되면 그 흙속에 있는 물이 얼어 체적이 팽창될 뿐만 아니라 (9%의 체적증가) 凍結되지 않은 地盤의 물을 흡입하여 凍結시킴으로서 地盤은 더욱 팽창한다. 실험에 의하면, 아래에서 吸入된 물이 얼어 氷層 즉 아이스 렌즈(ice lense)를 형성하므로 체적이 더욱 커진다는 사실이 밝혀 졌다. 이와같이 형성된 아이스 렌즈는 그 아래 물의 供給源이 있으면 흙의 간극과 흡입자의 흡착수막을 통해서 平衡이 이루어 질 때까지 계속해서 물을 빨아 들여 이것을 증대시킨다.

흙이 아이스 렌즈를 형성하게 되는 과정을 微視적으로 보면 대단히 복잡하다. 凍結土로의 물의 흡입은 地盤內의 溫度, 흙의 熱傳導率과 融解潛熱, 흡입자의 被膜水層等 여러가지 열역학적인 인자들에 의해 결정되기 때문이다. 이러한 모든 因子들을 망라하여 凍結理論을 정립하려는 시도는 오래전부터 계속되었고(예 : Takagi^(21, 22); Miller⁽²⁰⁾), 이 이론을 바탕으로 하여 동결깊이를 추정하는 공식도 여러 개 발표되었지만(Neumaun식, Stefan식, 수정 Berggren식등) 공식에 포함되는 定數決定의 복잡성때문에 수정 Berggren식을 제외하고는 이와 같은 이론식이 실제적으로 널리 活用되지 못하고 있다.

우리나라에서 氣象資料를 이용하여 경험적으로 각 지역의 동결깊이를 결정하려는 시도는 20년전 전부터 있어 왔다. 1967년에 국립건설연구소⁽¹⁾에서는 13개 測候所의 氣象資料를 이용하여 凍結指數를 계산하고 設計凍結指數線圖를 발표한 바 있다. 그 후 안상진·백영식⁽¹⁴⁾은 수원 농업 기상측후소에서 1967년-1970년에 걸쳐 실측한 동결자료를 근거로 하여 동결깊이와 동결지수의 相關關係式을 구하고 20개 지역에 대한 土質別 凍結깊이 推定式을 발표하였다. 그 후에도 계속해서 안상진⁽¹³⁾은 氣象資料로부터 최장 34년간간의 年度別 동결지수를 정리하였고, 또한 이미 발표된 여러 경험식으로 구한 동결깊이와 실측치를 비교 분석한 바 있다.

도로조사단⁽¹¹⁾에서는 외국 기술자의 도움을 받아 도로 포장설계를 위하여 全國 凍結指數線圖를 발표하였다. 이 線圖의 凍結指數는 "F-day로 구하였고

건설연구소의 자료⁽¹⁾에 비해 더 자세하게 작성되었다. 그 후, 다시 도로조사단⁽¹²⁾에서 우리나라 22개 측후소와 農業氣象觀測分室 70개소등 모두 92개소에서 얻은 1949-1978년의 기상자료로부터 凍結指數를 구하고 設計凍結指數線圖를 작성하여 그림 1.1과 같이 제시하였다. 현재까지의 동결지수에 관한 자료로서는 이것이 과거 30년간의 기상자료를 이용하여 가장 정교하게 작성된 最近의 것이며, 그동안 도로포장 설계에 많이 活用되어 왔다. 한국 동력자원연구소에서는 1974년 4월-1984년 3월의 87개 지구 氣象資料를 근거로 하여 우리나라의 설계 동결지수선도를 발표하고, 수정 Berggren식을 이용하여 이론적으로 동결깊이를 구할 수 있는 자료를 제시하였다(한대석, 박덕원⁽¹⁵⁾). 한편, 홍원표·김명환⁽¹⁶⁾은 국립건설 연구소에서 동결깊이를 실측한 1980-1984년의 5년간 자료를 이용하여 동결지수로 부터 동결깊이를 산정할 수 있는 새로운 經驗式을 제

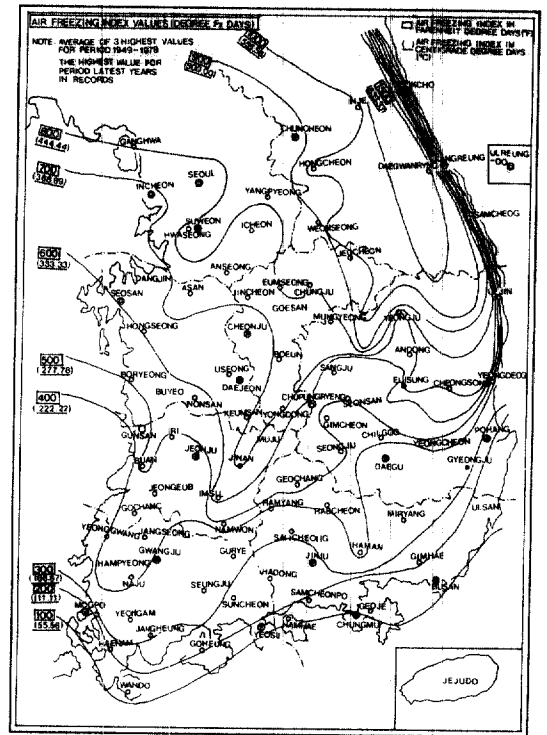


그림 1.1 1949-1978년의 氣象資料를 이용하여 작성한 전국 동결지수 선도 (도로조사단⁽¹²⁾)

안하였다.

사실상, 흙의 동결은 微視的으로 보면 열역학적 현상이므로 토목공학 이외의 분야에서도 많은 관심을 가지고 있다. 공업진흥청은 대한물리학회⁽⁶⁾에 동결에 관한 연구를 의뢰하여 Yatanabe식⁽⁷⁾을 이용, 우리나라 각 지역의 동결깊이를 직접 구하고 동결깊이 분포도를 발표한 바 있다.

위에서 설명한 바와 같이 凍結에 관련된 연구는 여러 연구자에 의해 수행되었으나 도로조사단⁽⁸⁾에서 작성한 凍結指數線圖가 포장설계에 이용되고 있을 뿐, 다른 연구결과는 거의 활용되지 못하고 있다. 동결에 관한 더욱 實際的인 연구를 위하여 국립건설시험소에서는 동결깊이 측정을 위한 10개년 계획을 세우고 1980년부터 1989년까지 전국에 걸쳐 광범위한 동결깊이 조사를 실시하였다. 이 조사를 행하는데 있어서는 외국에서 사용되고 있는 정교한 測定器具(예 : Gandahl⁽⁷⁾)를 쓰지 못하여 正確度가 다소 떨어지고 측정위치를 임의로 선택하였는데 문제점은 있지만, 장기간에 걸쳐 여러가지 토질에 대하여 광범위한 實測資料를 수집하였는데 큰 의미를 부여할 수 있으며 이것은 앞으로 우리나라 동결깊이의 연구에 귀중한 자료로 활용될 수 있다는 것은 두 말할 나위가 없다.

건설시험소에서는 每年 실측한 동결깊이 자료를 정리하여 조사자가 독자적으로 調查報告書를 작성 발표하여 왔으나^(2,7) 이제 이들을 모두 종합하여 정리하고 전국의 동결깊이의 분포와 凍結指數와의 相關關係等을 정립할 시점에 이른 것 같다. 이 연구는 이러한 목적으로 수행되며, 연구 결과는 동결에 관련된 設計資料로서 이용될 수 있을 것이다.

2. 凍結에 影響을 끼치는 要素

어떤 要素들이 凍結에 影響을 끼치는가 하는 것은 실험적인 측면에서 많이 연구되었다. 이 要素들은 다음과 같이 열거될 수 있다.

- (1) 흙의 物理的 特性
- (2) 積算氣溫
- (3) 물의 공급
- (4) 氣象 (降水, 바람, 日射)
- (5) 地表面의 被覆狀態

이상으로 열거한 각 항목에 대해 다음 절에서 더 자세히 설명한다.

2.1 흙의 物理的 特性

미 공병단의 寒冷地域研究 및 技術實驗室(U. S. Army Cold Regions Reserch And Engineering Laboratory)에서 어떤 흙이 가장 동상을 받기 쉬운 흙인가에 대하여 흙의 입경과 그 분포를 여러가지로 바꾸어 광범위한 시험을 수행하였다. 일반적으로 0.02mm보다 더 가는 粒經을 가진 흙의 함량이 중량비로 전체 흙의 3%를 넘으면 포장설계를 목적으로 하는 경우 그 흙은 동결 가능한 흙으로 규정한다. 그러나 粒經이 均等한 모래질의 흙은 0.02mm 이하의 粒經을 가진 흙의 함량이 10%가 되어도 동상이 일어나지 않을 수 있다고 한다.

凍結 可能한 흙은 미국 공병단에 의하여 동결 가능 정도의 순서로 F1, F2, F3, F4의 4群으로 分類된다(表2.1 참조). 이중 F1군은 凍結 可能性이 있는 자갈질 흙인데 0.02mm보다 가는 입경을 3~10% 포함한 것이다. 자갈질 흙이 0.02mm보다 가는 입경을 10%~20% 포함하고 있거나, 모래인 경우 3~15% 포함하고 있으면 이 흙은 F2군으로 分類한다.

자갈질의 흙이 0.02mm보다 가는 입자를 20%이상 가지고 있거나 모래인 경우 이것을 15%이상 가지고 있으면 이 흙은 F3군으로 분류한다. 또한 塑性指數가 12%이상인 흙도 F3군에 속한다. 동상을 가장 많이 받는 흙은 F4군인데 여기에 속하는 흙은 실트, 塑性指數가 12%이상인 점토, 대단히 가는 실트질 모래(0.02mm 입경이하의 함량 15%이상), 稿狀粘土(varved clay)등이다.

표 2.1은 동결이 흙의 입경에만 관련되는 것으로 가정에서 분류한 것이지만 흙의 凍結은 흙의 밀도와 함수비에도 관련된다. 미 공병단의 연구에 의하면 (Linell et al. ⁽¹⁸⁾), 동일한 凍結指數에 대해 밀도가 클수록 동결깊이는 증가하고 흙의 함수비가 크면 동결깊이는 줄어든다. 따라서 흙이 동결되는 깊이는 흙의 粒經이 가장 많이 影響을 끼치나, 밀도와 初期含水比도 影響을 준다는 사실을 알 수 있다.

2.2 凍結溫度와 期間

흙이 어는 깊이는 0° C이하의 溫度와 그 지속기간에 의존한다. 이것을 正量的으로 표시하기 위하여 凍結指數(freezing index)라는 용어를 사용한다. 日平均氣溫(03시, 09시, 15시, 21시에 측정한 기온의 평균온도)과 任意의 基準溫度와의 차이를 1일

表 21 凍結可能性을 근거로 한 흙의 分類(Linel dt al. (18))

凍結土群	흙의 種類	統一分類法에 의한 土質의 種類	0.02mm보다 가는 입경의 비율(%)
F1	자갈	GW, GP, GW-GM, GP-GM	3-10
F2	자갈	GM, GW-GM, GP-GM	10-20
	모래	SW, SP, SM SW-SM, SP-SM	3-15
F3	자갈	GM, GC	20이하
	모래	SM, SC	15이상
	점토	CL, CH (PI)12)	-
F4	실트	ML, MH	-
	대단히 가는 실트질 모래	SM	15이상
	점토	CL, CL-ML (PI)12)	-
	기타 세립 퇴적토	CL, ML, SM; CL, CH, ML; CL, CH, ML, SM	-

의 기간으로 곱한 것을 度日(degree-day)이라고 한다. 임의의 기준온도는 32° F 또는 0° 를 취하므로 일평균온도가 零上이라면 正, 零下이면 負가 된다.

매일의 度-일의 累計를 동결 기간동안에 걸쳐 그리면 한 곡선이 얻어지는데 곡선의 꼭지와 바닥과의 차이를 凍結指數(freezing index)로 정의한다. 포장의 동결깊이를 決定하는데 쓰여지는 設計凍結指數(design freezing index)는 30년간의 기상자료에서 추위가 가장 심하였던 30년간(즉 凍結指數의 최대 3년치)의 平均凍結指數를 設計凍結指數로 삼는다.

氣象臺에서는 氣溫을 지표면 위 15m에서 측정한다. 이 기상자료로 부터 구한 동결지수를 空氣凍結指數(air freezing index)라고 한다. 만일 지표면에서의 온도를 기준으로 동결지수를 구하였다면 이것을 地表面 凍結指數(surface freezing index)라고 말한다. 一般的으로 지표면의 온도는 기상대에서 측정되는 온도보다 높으므로 지표면 동결지수는 空氣凍結指數보다 낮은 값을 보인다.

2.3 물의 供給

물의 공급원이 凍結線(지중온도가 0°C인 선)과 가까이 있으면 흙의 동상은 물의 영향을 받는다. 물의 공급원은 지하수위 뿐만 아니라 침투수, 상수도관의 누수, 停滯된 물등도 될 수 있다. 凍結線 아래에 있는 물은 毛細管作用으로 이동하기 때문에

물의 공급원이 동상에 영향을 끼칠 수 있는 거리는 흙입자의 크기와 밀접한 관계가 있다.

물의 공급이 차단되었을 때에는 흙의 含水比가 그 흙의 포화도의 70%이하라면 유해한 水層의 발생은 거의 무시할 수 있다고 한다. McGaw⁽¹⁹⁾는 지하수위의 깊이와 동상량과의 관계를 규명하기 위해 자갈질 모래로 부터 모래질 점토에 이르는 4가지 시료에 대하여 실내시험을 행하였다. 그의 시험결과에 의하면 凍上比(原試料 두께에 대한 동상량)는 모든 흙에 있어서 수위의 깊이는 물론 凍上速度에도 의존한다고 한다. 즉 地下水位를 일정하게 두었을 때 동상비는 동결속도가 빠를 수록 증가하고 凍結速度가 일정하게 되었을 때에는 水位를 낮출수록 감소하였다.

2.4 氣象

雪, 降雨, 바람, 日射條件等 氣象에 따라 동결깊이는 달라진다. 예를 들면 同一한 空氣凍結指數에 대하여 陽地와 陰地에서의 동결깊이는 많은 差異를 보인다. 陽地에서는 日射時間이 길어 地表面 凍結指數가 後者에 비해 낮아지기 때문이다. 바람은 地表面의 濕度를 除法시키며 이로 말미암아 土中の 含水比를 變化 시킨다.

2.5 地表面의 被覆狀態

地層은 裸地인 單層系의 경우도 있고 도로포장처럼 콘크리트 또는 아스팔트가 표층을 이루고 그 아래 基層, 補助基層, 路床이 있는 多層系인 경우도

있다. 특히 다층계의 경우에는 각 층을 이루는 재료의 熱傳道率과 融解潛熱의 차이 때문에 실제의 동결 깊이를 산정하는데 있어서는 더욱 어려운 문제가 있다. 도로에 있어서 아스팔트 포장, 콘크리트 포장에 비해 더 熱을 吸水할 수 있기 때문에 같은 동결조건에서는 그 깊이는 훨씬 더 낮은 것이 보통이다. 地表面에 눈이 쌓여 있거나 잔디, 草木등이 두껍게 덮여 있을 때에도 동결깊이는 줄어든다.

3. 凍結깊이의 調査

3.1 조사위치의 선정

우리나라의 동결깊이를 實測하기 위하여 국립건설시험소에서 최초로 행한 조사는 1979년 2월에 수행되었다. 이때에는 서울지방과 그 근교를 중심으로 모두 16개소에 대해서만 실시하였으나 그 이후 동결조사 10개년 계획을 세우고 1980년도에는 전국 27개지구 118개소를 조사하였다. 1985년 이후 조사 위치는 45개 지구로 擴張되었으며 1989년 2월까지 조사된 총수는 모두 1,358점에 달한다.

처음에 調査位置는 임의로 정하였으나 가능한한 細粒質의 토질과 지하수위가 높은 곳을 선택하도록 노력하였다. 1985년도 이후에도 조사위치를 고정시켜 매년 동일한 장소에서 동결깊이를 實測하였다.

3.2 調査日時와 凍結깊이 調査方法

우리나라에서는 대략 동결이 12월 중순에 시작하여 그 다음 해인 2월 중순경에는 거의 끝나므로 조사시기는 凍結이 종결되는 2월 중순에 남부지방부터 먼저 조사를 시작하도록 계획하였다. 일단 동결된 흙은 기온이 상승하면 지표면에서 부터 融解되기 시작하나 凍結線 가까이에서는 상당한 시일이 지난 후에 녹으므로, 동결깊이를 측정하는데 있어서는 조사일시가 몇일 늦더라도 큰 오차는 생기지 않는 것으로 판단된다.

조사지점은 미리 圖上에서 계획하였고 현장에서 지형조건, 기상조건, 地下水位, 日射條件等を 자세히 조사하여 기입할 수 있도록 調査臺帳을 만들어 조사지점에 대해 자세히 기록한 다음, 80cm × 40cm의 넓이로 豫想凍結깊이 아래까지 굴착하였다. 동결깊이는 다음과 같은 3가지 경우를 병행하여 확인하였다.

- (1) 매 20cm마다 지중온도계를 삽입하여 영상온도와 영하온도의 경계선을 찾았다. 豫想凍結깊이 부근에서는 훨씬 더 좁은 간격으로 조사하였다.
- (2) 확대경으로 흙덩이를 관찰하여 얼음 結晶의 발생을 확인하여 최대 동결깊이를 찾았다.
- (3) 흙덩이의 硬度를 조사하여 동결된 상부와 동결되지 않은 하부의 경계선을 찾았다.

동결선을 중심으로 凍結土와 非凍結土 사이에 함수비의 급격한 변화가 있을 것이라는 것을 예상하여 20cm깊이 마다 시료를 채취하여 含水比 試驗을 행하였다. 함수비에 추가해서 現場單位重量을 측정하였다. 단위중량 측정은 표토를 除法한 후 스프릿 스폰 샘플러(split spoon sampler)를 해머로 땅속에 관입시켜 시료를 채취하고 무게와 부피를 측정함으로써 가능하였다. 채취된 시료는 실내에서의 物理試驗用으로 사용되었다.

3.3 室內土質試驗 및 分析

여러 위치에서 채취된 시료는 土質試驗室로 운반하여 물리시험을 행하였다. 물리시험의 목적은 각 시료를 미 공병단에서 정한 凍結特性에 의한 분류를 하기 위한 것이다. 시험결과를 이용하여 흙을 F1, F2, F3 및 F4로 분류하였다.

한편, 氣象資料를 이용하여 조사지역에 대한 동결지수를 구하고 1980년-1989년의 最大凍結指數를 종합 정리하여 全國凍結指數線圖를 작성하였다.

동결깊이와 조사 시점까지의 동결지수와와의 상관관계를 구하기 위해 동결깊이 실측 일시까지의 동결지수도 계산하였다.

4. 凍結깊이와 凍結指數와의 상관관계

4.1 전국의 동결깊이 분포

그림 4.1은 1980-1989년의 10년간에 걸쳐 조사한 각 지점의 동결깊이 중 最大値의 等深線을 보인 것이다. 이 等深線圖를 작성하는데 있어서는 먼저, 조사된 지점의 10년중 최대 동결깊이를 적고 동일한 깊이를 따라 선을 圓滑하게 연결하였다.

이 線圖를 보면 서울지방의 동결깊이는 79cm, 인제 135cm, 부산 30cm임을 알 수 있다. 이 자료는 토

群에 상관없이 실측된 最大値이나 동결이 발생하는 가장 有利한 條件등에서 測定되었다고는 꼭 말할 수 없다. 그러나 이 그림은 건물의 基礎地盤, 上下水道管, 地下埋設物의 동결방지를 위한 最小埋設 깊이를 결정하는데 있어서 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

4.2 全國凍結指數線圖

포장설계를 위한 凍結指數線圖는 30년간의 기상자료중 3개의 최대치의 평균을 사용하거나 그 자료가 없으면 10년간의 최대치를 사용하여 작성하게 되어 있다. 그림 42에 보인 전국 동결지수선도는 앞서 설명한 바와 같이 氣象觀測所가 있는 모든 지점에 대해 매년 동결지수를 계산한 다음, 10년중 최대치만을 이용하여 작성되었다.

지구환경의 지속적인 변화로 말미암아 수십년사이에도 기상이 많이 달라질 수 있다는 것은 누구나 실감하고 있는 바이다. 우리나라 凍結指數는 현재까지 도로조사단⁽¹²⁾에서 1949년-1978년의 기상자료를 이용하여 작성된 全國凍結指數線圖를 포장설계

에 적용하고 있으나, 이런 점에서 보면 비록 10년간의 기상자료밖에 이용하지 않았다 하더라도 그림 42의 凍結指數線圖는 최근 기상자료를 근거로 하였다는 점에서 前者를 대신할 수 있을 것으로 판단된다.

表 4.1은 도조사단의 凍結指數線圖(그림 1.1)와 그림 42의 凍結指數線圖와의 변화양상을 알기 위해 전국의 여러 지점을 택하여 그 차이를 계산해 보인 것이다. 이 표에서 그 차이가 -로 표시된 것은 凍結指數가 감소되었음을 의미하고 +로 표시된 것은 증가되었음을 의미한다. 이 표를 자세히 관찰해 보면 몇군데 예외는 있지만, 강능, 군산, 목포, 부산, 서산, 울진등 해안에 가까운 지방에서는 과거에 비해 기온이 증가하였고, 반대로 수원, 영주, 인제, 청주, 춘천등 內陸地方에서는 기온이 감소한 뚜렷한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 가장 큰 감소율은 부산의 82.8%이며, 가장 큰 증가율은 청주의 24.3%이다.

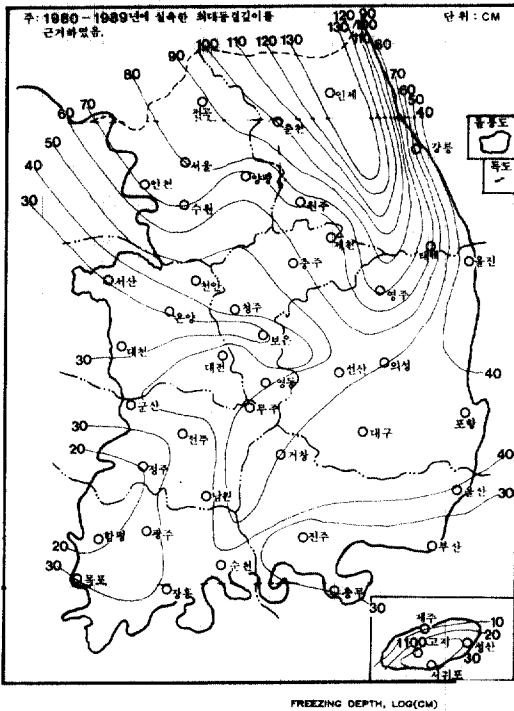


그림 4.1 全國 最大凍結깊이 曲線(1960~1989년 자료)

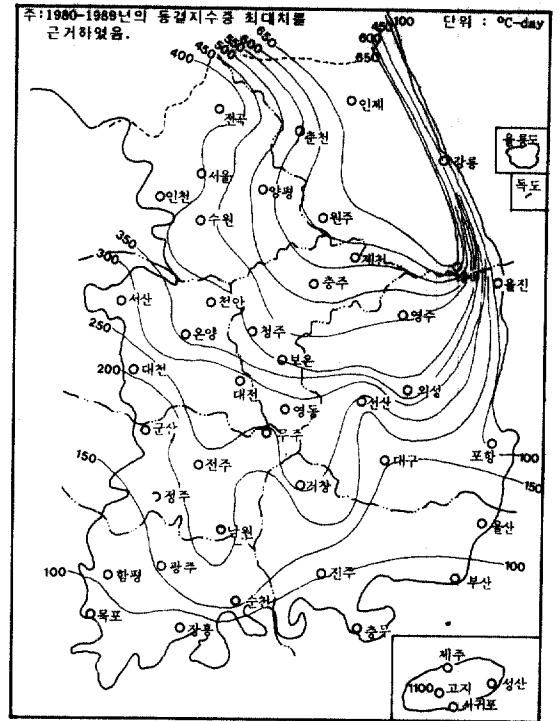


그림 4.2 全國凍結指數線圖(1980-1989년 자료)

表 4.1 道路調査團⁽²⁾과 본 연구에서 작성된 동결지수와
의 比較

지 역	동결지수(°C-day)		차이	비율(%)
	본 연구	도로 조사단		
강 룡	164	172	-8	-4.8
광 주	166	168	-2	-1.2
군 산	177	239	-62	-35.0
남 원	217	258	-41	-18.9
대 구	150	190	-40	-26.7
대 전	298	346	-48	-16.1
목 포	74	101	-27	-36.5
부 산	35	64	-29	-82.8
보 은	428	437	-9	-2.1
서 산	239	341	-102	-42.7
서 울	386	409	-23	-5.9
선 산	225	299	-74	-32.9
속 초	183	212	-29	-15.8
수 원	495	44	+50	+10.1
순 천	155	121	+34	+21.9
영 주	447	397	+50	+11.2
울 진	76	128	-52	-68.4
인 제	663	525	+138	+20.8
인 천	345	373	-28	-8.1
전 주	245	218	+27	+12.4
제 천	569	526	+43	+8.2
진 주	107	139	-32	-23.0
청 주	435	350	+85	+24.3
춘 천	563	457	+106	+23.2
충 주	522	446	+76	+17.0
포 향	92	118	-26	-22.0

4.3 年度別 凍結깊이와 凍結指數와의 相關關係

그림 43은 인제를 대표적으로 선정하여 작성한 年度別 實測 凍結깊이와 凍結指數와의 相關關係를 보인 것이다. 일반적으로 보면 凍結指數가 높으면 동결깊이는 크게 되므로 연도별 동결깊이와 동결지수의 두 곡선은 대략 평행하게 그려져야 하나, 1982년의 實測結果는 이러한 경향을 나타내지 못하고 있다. 다시 말하면 1982년과 1983년 사이의 凍結指數는 다른 해에 비해 낮음에도 불구하고 동결깊이는 오히려 큰 값을 보이고 있다. 그 이유는 여러가지 생각될 수 있으나 여기서는 분명히 밝히지 못하였다. 그러나 전반적으로 보았을 때 最大凍結指數

를 나타내었던 1981년과 1984년의 동결깊이가 10년 중 最大值를 나타냈음을 알 수 있었다.

1980년도 이후 동결깊이 조사자들은 해마다 조사된 자료를 근거로 하여 實測凍結깊이와 凍結指數와의 相關關係를 구하고 그 결과를 式으로 발표하였다(國立建設試驗所⁽²⁻⁷⁾). 表 4.2는 그 결과를 요약하여 보인 것이다. 거의 모든 조사자들은 동결깊이는 空氣凍結指數의 평방근에 비례하는 경험식을 제안하였다.

1984년에는 1980년 이후 5년간의 실측자료를 가지고 동결깊이와 동결지수와의 相關性 分析을 하였다(국립건설시험소⁽⁵⁾; 홍원표 김명환⁽⁶⁾).

이 분석의 특징은 동결지수 400°C-day를 기준으로 하여 각 토구에 대해 상관식을 다르게 표시하였다는 것이다. 全 土群에 대한 관계식은 다음과 같이 제안되었다.

$$Z = 5.5\sqrt{F} \quad (F < 400^\circ\text{C-day}) \quad (4.1)$$

$$Z = 5.0\sqrt{F} \quad (F \geq 400^\circ\text{C-day}) \quad (4.2)$$

여기서, Z: 동결깊이 (cm)

F: 동결지수(°C-day)

1986년의 조사자는 동결깊이가 동결지수의 4승근에 비례하는 公式을 제안하여 실측결과를 가장 충실하게 반영하려는 노력을 보이고 있다. 또한 1983년의 조사자는 回歸分析을 하였다는데 특징이 있으며, 1988년과 1989년은 연도별 분석결과가 제시되지 않았다.

4.4 10年間的 資料에 대한 最大凍結깊이와 凍結指數와의 相關關係

1980년-1989년 사이에 조사된 동결깊이와 동결지수와의 명백한 상관관계를 정립하기 위해 모든

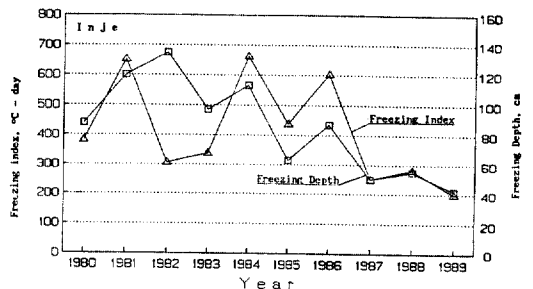


그림 43 인제지역에 대한 年度別 동결지수와 동결깊이와의 關係

表 42 年度別 凍結깊이-凍結指數 相關關係

年 度	土 群				전 체	조 사 자
	F1	F2	F3	F4		
'80					$Z = -6 + 52\sqrt{F}$	申光洸, 金顯圭, 趙重濟
'81		$Z_0 = 3.8\sqrt{F}$	$Z_0 = 4.69\sqrt{F}$			申漢求, 康昌性, 李在珩
'82						
'83		$Z_0 = 24.53 + 3.87\sqrt{F}$	$Z_0 = -3 + 5\sqrt{F}$			安秉立, 金康承, 李在珩
* '83		$Z_0 = 8.16 + 2.94\sqrt{F}$ $Z_2 = 29.78 + 2.94\sqrt{F}$ (65% 信頼度) $Z_2' = 51.40 + 2.94\sqrt{F}$ (95% 信頼度)	$Z_0 = 6.17 + 11.98\sqrt{F}$ $Z_3 = 32.10 + 1.98\sqrt{F}$ (95% 信頼度) $Z_3' = 32.10 + 1.98\sqrt{F}$ (95% 信頼度)			
'84		$Z_0 = 4.5\sqrt{F}$	$Z_0 = 3.7\sqrt{F}$	$Z_4 = 3.9\sqrt{F}$		
'85	$Z_1 = 3.0\sqrt{F}$	$Z_0 = 4.1\sqrt{F}$	$Z_0 = 2.3\sqrt{F}$	$Z_4 = 4.3\sqrt{F}$	$Z = 4.6\sqrt{F}$	
'86	$Z_1 = 15\sqrt[4]{F}$	$Z_0 = 23\sqrt[4]{F}$	$Z_0 = 24\sqrt[4]{F}$	$Z_4 = 17\sqrt[4]{F}$	$Z = 24\sqrt[4]{F}$	鄭光秀, 金重男, 金企泰
'87	상 동	상 동	상 동	상 동	상 동	鄭光秀, 申南浩, 金企泰

* : 회귀분석

Z : 동결깊이

F : 공기동결지수

측정자료를 몇가지 방법으로 圖示하여 보았다.

이론적인 연구를 비롯하여 經驗式을 발표한 많은 연구자들은 동결깊이와 동결지수의 平方根이 線形으로 표시되는 식을 발표하고 있으므로, 여기서도 모든 측정점을 이와 같이 도시하여 보았다. 그러나 이 방법으로는 分散性이 커서 일정한 상관관계를 定立하는 것이 무리라는 사실을 알게 되었다(국립건설시험소[®]).

몇 가지 다른 방법을 시도하여 본 결과 그림 4.4에 보인 바와 같이 凍結깊이와 凍結指數를 모두 對數 눈금으로 측정점을 점 찍었을 때 측정점이 上限線은 대략 직선으로 표시 될 수 있다는 것을 알게 되었다. 이와 같은 도시 방법은 미 공병단에서도 채택하고 있다.

그림 4.4에 점 찍은 여러 측정점에 대하여 여기서는 통계적인 分析의 의미는 없다. 왜냐 하면, 동결깊이를 조사할 때 위치를 無作爲로 선정하였으므로 여기에는 동결이 충분히 발생되지 않은 조건의 지반도 조사 대상에 많이 포함되었기 때문이다. 따라서 동결깊이는 최대치를 채택하여야 하므로 모든 측정점의 上限線만이 상관성을

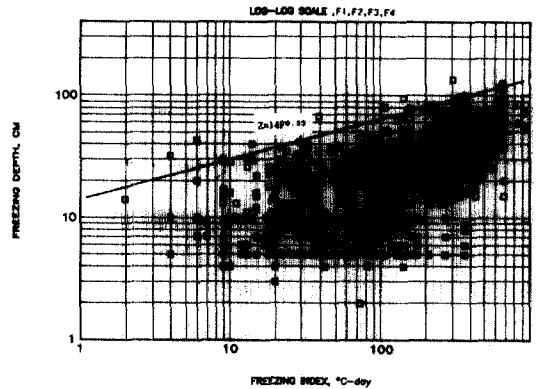


그림 4.4 凍結깊이와 空氣凍結指數와의 相關關係(대수-대수 눈금)

정립하는데 의미가 있다고 볼 수 있다.

몇개의 측정점은 벗어나지만, 측정점의 상한선을 그림 4.4에 보인 바와 같이 그었을 때 이 선의 方程式은 다음 式으로 표시 될 수 있다.

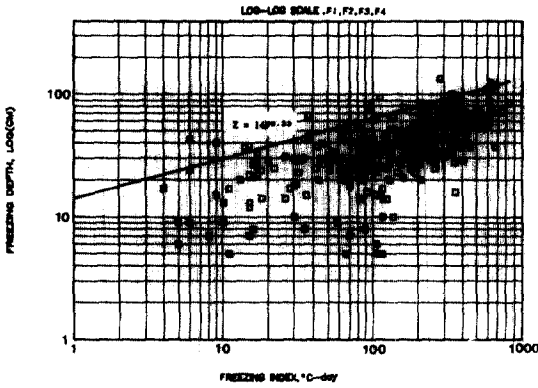


그림 45 10년간 최대동결깊이와 調査時點까지의 동결지수와의 상관관계

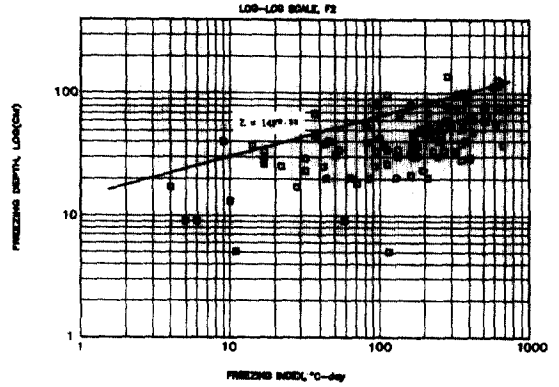


그림 47 F2군에 대한 最大凍結깊이-調査式凍結指數 相關關係

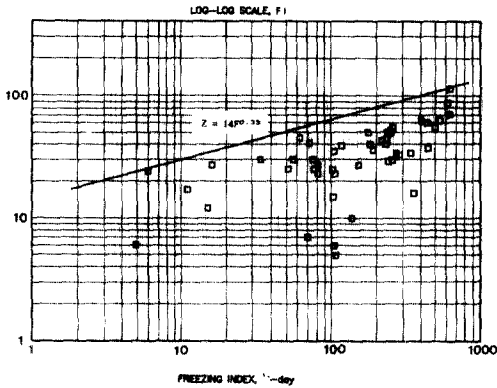


그림 46 F1군에 대한 最大凍結깊이-調査式凍結指數 相關關係

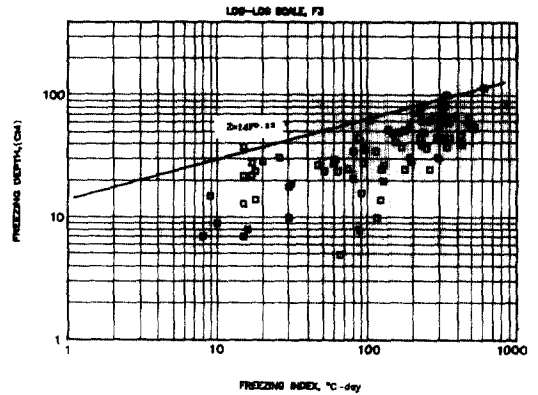


그림 48 F3군에 대한 最大凍結깊이-調査式凍結指數 相關關係

$$Z = 14F^{0.33} \quad (4.3)$$

여기서, F: 공기동결지수(°C-day)

Z: 동결깊이(cm)

동결지수는 주어진 지점에 대한 연도별 최대 동결지수와 동결깊이 조사시까지의 동결지수의 둘로 나누어 생각할 수 있다. 동결깊이와의 상관성을 규명하는데 있어서는 原則적으로 동결깊이를 측정할 시점에서의 것을 기준하여야 할 것이다. 그러나 실제로는 조사시점을 거의 解氷되는 日時로 선택하였으므로 두 동결지수는 큰 차를 보이지 않았다.

식(4.3)으로 표시된 것은 土群에 관계없이 전체적인 측정값을 대상으로 하고 또한 연도별 최대 동결

지수를 근거로 하여 얻어진 상관관계식이다. 複雜性を 피하기 위해, 이번에는 10년간의 최대 동결깊이와 調査時點까지의 동결지수를 근거로 하여 측정값을 찍고 식(4.3)으로 표시된 선을 그었을 때, 이 선도 그림 45에 보이 바와 같이 측정값들이 상한선으로서 適合함을 알 수 있다. 따라서 식(4.3)으로 제안하는 경험식은 우리나라의 기상자료로부터 최대 동결깊이를 推定하는데 적절하다고 생각된다.

한편, 土群別 상관관계를 알기 위해 그림 45의 측정값을 F1, F2, F3, 및 F4 토군으로 分解한다면 그

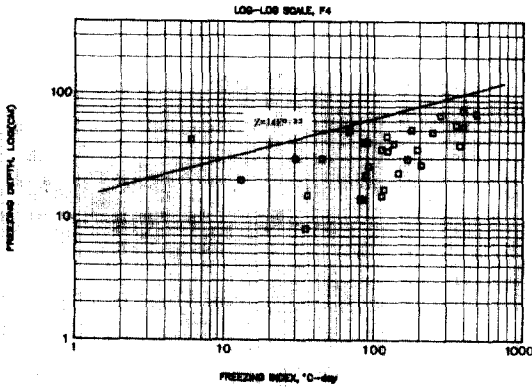


그림 4.9 F4군에 대한 最大凍結깊이—調査時凍結指數 相關關係

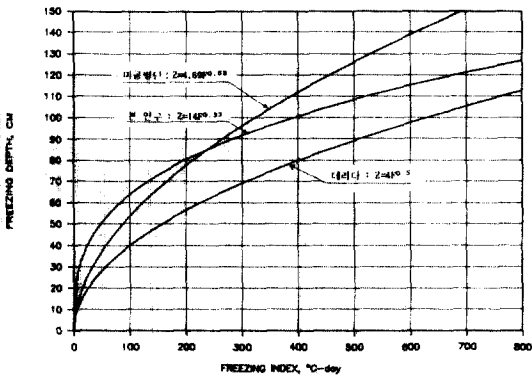


그림 4.10 본 연구에서 얻어진 經驗公式와 다른 經驗公式와의 比較

결과는 각각 그림 4.6, 그림 4.7, 그림 4.8, 및 그림 4.9로 나타낼 수 있다. 이 그림들을 보면 F1군과 F4군의 경험식을 표시하는 선보다 훨씬 아래 분포되나 (그림 4.6과 4.9 참조), F2군과 F3군은 그 가까이 분포한다는 사실(그림 4.7과 4.8 참조)을 알 수 있다. 따라서 우리나라에서 最大凍結깊이가 나타나는 土質은 F2군이고 그 다음은 F3군이 아라는 것이 실측 결과 밝혀진다. 자갈질 흙은 F1군에서는 최대동결깊이가 얻어지지 않는다는 것은 충분히 이해되지만 실트질인 F4군에서 최대치가 생기지 않는다는 사실은 미 공병단의 연구 결과와 모순된다. F4에서 最大凍結깊이가 생기지 않은 이유는 無作

爲로 조사한 凍結土中 F4군이 충분히 포함되지 않았다는 것과, 또한 우리나라에서는 凍結期間이 짧기 때문에 비록 실트질 흙이라고 하더라도 毛細管作用으로 물을 충분히 흡입하기 전에 融解를 시작하기 때문이라고 설명할 수 있을 것 같다.

그림 4.10은 다른 연구기관에서 얻은 상관관계식과 비교하기 위해 한 그림에 데라마(寺田)의 경험식(동결계수는 4를 적용함), 입상토에 대한 미국 공병단의 경험식(대한토목학회¹⁰⁾참조), 본 연구에서 얻어진 경험공식을 한꺼번에 보인 것이다. 식(4.3)으로 구한 凍結깊이는 空氣凍結指數가 240°C-day 이하일 때에는 다른 두 공식보다 크게 계산되나 그 이상에서는 그 중간치를 나타낸다.

실제로 이 공식에서 얻어진 동결깊이와 실측자료를 비교해 보면, 공기 동결계수가 386°C-day인 서울의 最大凍結깊이는 79cm로 實測되었으나 식(4.3)으로서는 100cm로 계산되므로 21cm의 증가를 보이고, 인제에서는 실측치 135cm에 대하여 계산치는 119cm로서 오히려 16cm의 감소를 보이고 있다.

사실상 실측치와 경험식의 계산 결과가 一致되기를 대단히 어려운 일이라고 생각된다. 왜냐 하면 경험식은 공기동결수지만을 근거로 하고 있으나 실제로는 제 2장에서 언급한 바와 같이 積算氣溫 이외에도 물의 공급원, 적설에 의한 지표면의 被覆等 동결에 영향을 끼치는 조건들이 모두 포함된 것은 아니기 때문이다. 더욱이 기상자료는 측후소가 놓인 위치에 대한 것이며 실측위치에 대한 標高의 補正이 이루어지지 않았다. 따라서 이와 같은 차이는 불가피한 것으로 간주 될 수 있으며, 외국의 문헌에서도 이것이 가끔 보고 되고 있다.

5. 結 論

국립건설시험소에서 1980-1989년의 10년간에 걸쳐 조사된 凍結깊이와 凍結指數資料를 종합 집성하여 정리하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 全國 凍結깊이 線圖를 그림 4.1과 같이 作成하였다. 이것은 1980年-1989年의 10年間에 걸쳐 지점마다 얻어진 最大凍結깊이를 점찍어 동일한 깊이를 따라 연결한 線圖이다

(2) 주어진 地點에 대한 동결깊이와 동결계수와 의 변화를 追跡하기 위해 인제 지역에 대하여 年度別 最大凍結깊이와 凍結指數와의 相關關係를 대표

적으로 提示하였다. 전체적으로 보면 10년중 동결 깊이가 최대이었던 1981년도 또는 1984년도에 동결 깊이도 또한 최대치를 보였다. 그러나 부분적으로는 이러한 傾向이 나타나지 않는 지점도 발견되었다.

(3) 1980-1989년까지 10년간의 기상자료를 이용하여 設計凍結指數線圖를 作成하였다. 이것은 최근의 기상자료를 이용한 것이므로 1949년-1978년 사이의 자료를 이용하여 도로조사단⁽²²⁾에서 작성한 凍結指數線圖를 대신하여 포장설계에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서 작성된 凍結指數線圖를 도로조사단의 자료와 비교하여 보면 해안지방에서는 과거에 비해 기온이 상승하고 내륙지방에서는 오히려 下降하는 뚜렷한 경향을 보이고 있다.

(4) 10년간의 자료를 집성하여 얻어진 最大凍結깊이와 凍結指數와의 관계는 다음의 指數式으로 표시될 수 있다.

$$Z = 14F^{0.33}$$

(5) 土群別로 凍結깊이-凍結指數의 관계를 정리해 본 결과 우리나라에서 가장 동결깊이가 크게 나타나는 土群은 F2군이고 그 다음은 F3군이다. F4 토군이 더 작은 동결깊이를 보인 것은 우리나라에서는 동결기간이 비교적 짧은 것이 그 이유중의 하나로 설명될 수 있다.

감사의 말씀

본 연구는 국립 건설시험소의 연구비 支援를 받아 수행되었다. 시험소 당국의 配慮에 대하여 깊이 감사드리며, 아울러 여기에 제시된 모든 결과는 그 동안 동결깊이 실측에 애쓰신 모든 분들의 勞苦의 結晶으로 이루어졌음을 여기에 적어 두고 싶다. 자료를 分析하고 整理하는데 애써 준 정철호, 이종재, 이성진, 서홍석, 제군에게 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. 國立建設研究所, 한국 동결심도 연구, 건설부 국립 건설연구소, 1967.
2. 國立建設研究所, 우리나라 各地方의 동결깊이 조사보고서, 건설부 국립건설연구소 자료, No. 401, 1980. 9.
3. 國立建設研究所, 全國 凍結深度 調査, 建設部 國立建設研究所 資料 No. 426, 1982. 10.
4. 國立建設研究所, 全國 凍結深度 調査, 國立建設試驗所 資料, No. 438, 1983. 11.

5. 國立建設研究所, 凍結深度 調査 報告書, 建設部 國立建設試驗所 資料, No. 448, 1984. 12.
6. 國立建設研究所, 凍結深度 調査 報告書, 建設部 國立建設試驗所 資料, No. 455, 1985. 12.
7. 國立建設研究所, 전국 동결심도 조사 보고서, 1986, 1987, 1988, 미발표 자료.
8. 國立建設研究所, 동결심도 보고서, No. 498, 건설부 국립 건설시험소, 1989. 12.
9. 大韓物理學會, 국내 지역별 통계적 기상자료작성, 상공부 공업진흥청, 1978, pp.5-24.
10. 대한토목학회, 토목공학 핸드북, 대한토목학회, 1983, p.6-40.
11. 도로조사단, Design Guideline, Roadway, Structures and Soil Materials, 건설부 도로국 도로조사단, 1974.
12. 도로조사단, 동결지수에 관한 조사보고서, 건설부 도로국 도로조사단, 1980.
13. 安相鎭, "우리나라의 동결지수와 동결심도에 관한 연구(제 2보)," 대한토목학회지, 제 20권 제 1호, 1972, pp. 59-71.
14. 安相鎭, 白榮植, "우리나라 동결지수와 동결심도에 관한 연구(제 1보)," 대한토목학회지, 제 18권 4호, 1971, pp. 27-33.
15. 韓大錫, 朴德元, 한국에서의 설계동결지수치 분포와 그 응용, 한국동결자원연구소 연구보고 85-20, 1985, pp. 39-88.
16. 洪元杓, 金明換, "우리나라의 동결심도에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제 8권 제 2호, 1988, pp. 147-154.
17. Gandahl, R., *Determination of the Ground Frost Line by Means of Simple Type of Frost Depth Indicator*, National Swedish Road Research Inst, Rep 30A, Stochol, 1963.
18. Linell K. A., Hennion, F. B., Lobacz, E. F., "Corps of Engineers' Pavement Design in Areas of Seasonal Frost", 1963, pp. 76-120.
19. McGaw Richard, "Frost Heaving versus Depth to Water Table", Highway Research Record, No. 393, 1972, pp. 48-55.
20. Miller, R. D., "Frost Heaving in Non-colloidal Soil", 3rd International Conference on Permafrost, 1978, pp. 708-713.
21. Takagi S., *Principles of Frost Heaving*, V. S. Army Cold Regions Reserch and Engineering Laboratory, Ganover, N. H., 1965.
22. Takagi, S. The Adsorption Force Theory of Frost Heaving, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 3, 1980, pp. 57-81.

23. Yatanabe, Y., "建築과 氣溫", 應用氣象學大系 제 6권,
1962, pp. 159-199.

(接受: 1990. 1. 30)