

□ 論 文 □

도로의 동결심도에 관한 예측

A Study on Prediction of Frost Penetration Depth for Road

남 영 국

(인천대학교 토목공학과 교수)

김 성 환

(쌍용엔지니어링 도로부 사원)

目 次

- | | |
|------------------|------------------|
| I. 서론 | 4. 테라다식 |
| II. 흙의 동결 | 5. 공병단 도표에 의한 방법 |
| III. 흙의 열적 성질 | V. 동결심도의 분석 및 고찰 |
| IV. 동결심도 | 1. 분석방법 |
| 1. 열전도 이론에 의한 예측 | 2. 분석결과 |
| 2. 수정 Berggren식 | VI. 결론 |
| 3. 국립건설시험소식 | 참고문헌 |

요 약

우리나라는 전면적의 약 95%가 계절적 동결지역에 속하며 동상과 융해로 인해 도로등 지반구조물은 피해를 입는다. 본 논문에서는 국립건설시험소의 10년간 실측자료중 지역별로 대표하여 15개 도시 528개 지점을 선정하여 최대동결지수를 4개그룹(250이하, 250~400, 400~600, 600이상)으로 분류하여 분석하였다. 또한 동결심도 계산에 동결지수외에 흙의 함수비와 건조밀도를 각각 추가로 고려하여 새로운 산정식을 제안하였다. 그리고 지역에 따른 과다산정을 막기 위하여 동결지수 분류별로 4그룹으로 세분화하여 경제적인 설계가 가능하도록 하였다. 새 제안식과 기존식을 비교하여 보았을 때 새 제안식이 기존식보다 전반적으로 크게 산정되나 그 지역의 함수비나 건조밀도를 추가로 고려하였으므로 보다 합리적인 산정식이라 할 수 있다.

I. 서론

흙이나 암석같은 물질은 지표면의 온도가 0°C 이하로 될 때 동결상태에 있게 된다. 우리나라는 남해안 일부지역과 제주도를 제외한 전역(전면적의 약 95%)이 매년 凍結과 融解를 반복하는 계절적 동결지반에 속한다. 그러므로 우리나라와 같이 계절적 동결지반에 속하는 지반에도 도로와 같은 지반구조물을 축조할 경우에는 凍害로 인한 공학적 문제가 발생하지 않도록 안전한 설계를 위하여 정확한 동결심도의 추정이 필요하다.

본 논문은 1980년부터 1989년까지 10년간 국립건설시험소에서 우리나라 전국에 걸쳐 조사한 동결심도 실측치와 동결지수 자료를 이용하여 15개 도시를 선정하고 이를 동결지수 크기별로 4등급으로 분류하였다. 그리고 실측자료를 이용하여 열전도율에 의한 수정 Berggren식, 테라다식, 미 공병단의 도표에 의한 방법, 국립건설시험소식을 비교하였다.⁴⁾⁹⁾¹⁰⁾

또 국립건설시험소식과 테라다식을 동결지수 크기별 분류에 맞는 식으로 나타냄으로써 보다 합리적인 식으로 표현하고자 한다. 또한 실측자료를 이용하여 동결심도 산정에 동결지수외에 함수비 및 건조밀도를 각각 추가로 고려하여 새로운 算定式을 제안하고자 한다.

II. 흙의 동결

0°C 이하의 온도에서 흙 속의 간극수가 얼어 결빙(ice lenses)이 생기고 얼지 않은 부분으로부터 계속 수분을 흡수하여 체적이 팽창된다.²⁾³⁾¹⁵⁾ 이때 언 부분의 토립자 사이의 평균적인 間隙은, 얼기 전에 비하여 확장된다. 또한, 확장

된 토립자 사이의 간극에 흡입된 물은 동결된 얼음으로 남아 있게 된다. 이러한 현상을 凍上이라고 한다. 흙의 동결에 영향을 미치는 요소는 흙의 물리적 특성, 동결온도와 기간, 물의 공급, 기상, 지표면의 被服狀態 등이다.

동결심도는 0°C 이하의 온도와 그 지속시간에 의존하며 이것을 정량화하기 위해 동결지수를 사용한다. 동결지수(Freezing Index)란 동결기간에 걸쳐 기온과 지속일수의 積을 계산해서 최대치와 최소치의 차를 말한다. 동결지수는 평균기온이 0°C 가 되는 날을 기준으로 해서 적당한 날로부터 기온과 지속일수의 積을 누계해서 도표상에 나타내고 곡선에서 最大點과 最小點의 차이로서 얻는다.⁹⁾¹²⁾

Fig. 1은 국립건설시험소에서 1980~1989년 자료로부터 작성한 전국동결지수선도이다.⁷⁾¹¹⁾

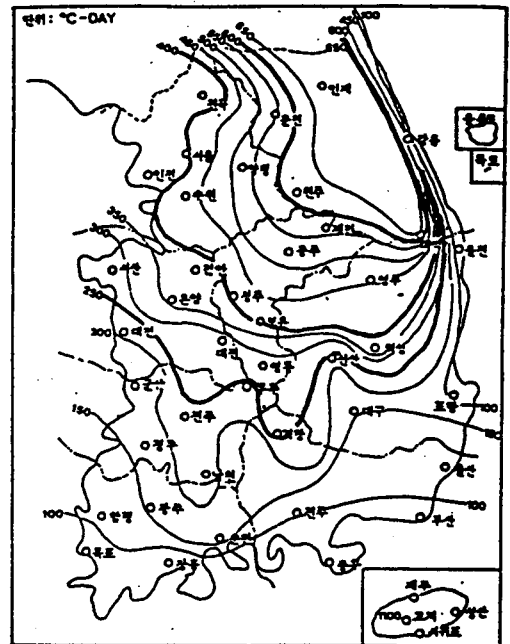


Fig. 1 전국동결지수선도(1980~1989년 자료)

Ⅲ. 흙의 열적 성질

흙의 열적성질에는 열전도율, 열용량, 열확산 계수, 잠열 등이 있다.¹⁾⁵⁾

熱傳導係數(K, thermal conductivity)은 단위 온도차에서 물체의 단위면적을 통하여 단위시간당 흐르는 열의 량으로 표시된다.

어떤 물체의 온도를 1℃ 올리는데 필요한 열의 량을 熱容量(C, heat capacity)이라고 부른다. 단위중량에 대한 것으로 표시할 때 이는 比熱(specific heat 또는 specific heat capacity)이라고 하며 단위체적에 근거를 두었을 때는 體積熱容量(volumetric heat capacity)이라고 하나 보통 열용량으로 알려져 있다.

흙의 熱的舉動은 열전도계수 K뿐 아니라 열용량 C에 의해서 변화하는데 이 두 성질을 비로 표현하면 熱擴散係數(α , thermal diffusibility)가 된다.

融解 潛熱 L(volumetric latent heat of fusion)은 온도변화없이 얼음이 녹을 때나 물이 얼 때 발생하는 흙의 단위체적당 열용량으로 정의하며 단위는 Btu/ft³ 또는 J/m³ 이다.

Ⅳ. 동결심도

1. 열전도 이론에 의한 예측

1) 정상상태 이론⁸⁾

Fourier(1955)에 의해 제안된 고체상을 흐르는 열의 기본 해석식은 아래 식 1과 같다.

$$\frac{dQ}{dt} = K \cdot A \cdot \frac{dT}{dz} \dots \dots \dots (1)$$

식 속의 dQ/dt는 열전도비, K는 비례 상수

(재료의 열전도계수), dT/dz는 두께 z에 대한 온도 T의 변화율이다. 물체 내를 흐르는 열이 정상상태 (steady state) 에 도달하면 열흐름은 일정해지고 온도 또한 평형을 이룬다. 따라서 온도는 위치 함수로서 시간과는 무관하게 된다. 각 상태의 열전도계수가 同(K_f = K_u)하다고 가정하면 동결심도 D_f는 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다. 즉,

$$D_f = \frac{T_f - T_2}{(T_1 - T_2)/z} = \frac{T_f - T_2}{i} \dots \dots \dots (2)$$

각 층의 열전도 계수는 K_u(비동결 상태), K_f(동결상태)이고, 동결온도와 지표온도의 차이를 T_f - T_s, 비동결도의 온도변화도를 i_u 라 할 때 열전도의 連續性 原理에 따라 식 2를 적용하면 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$K_f \cdot A \cdot \frac{T_f - T_s}{D_f} = K_u \cdot A \cdot i_u \dots \dots \dots (3)$$

$$D_f = \frac{T_f - T_s}{i_u} = \frac{K_f}{K_u} \dots \dots \dots (4)$$

2) F. Neumann의 이론⁸⁾

Neumann은 습윤상태의 등방성 반무한체(물, 얼음 또는 흙)에 대한 두 개의 편미분 열전도방정식을 제안했는데 초기온도(T₀)는 양의 값이며 일정하다고 가정하고 아래의 두 식으로 나타내었다.(식중의 첨자 '1'은 동결상태, '2'는 비동결상태를 의미함)

- 동결토층 (0 < z < D_f)

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \dots \dots \dots (5)$$

- 비동결토층 (z > D_f)

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \dots \dots \dots (6)$$

熱的 均衡에 대하여 설명하면 다음과 같다.

$z = D_f$ 즉, 동결면의 열적균형은 온도가 0℃ 일 때라고 보고 동결이 진행되면서 발생하는 얼음이나 흙의 동결잠열(latent heat of fusion) Q_L 을 주어진 흙의 함수비(w), 건조밀도(γ_s), 단면적(A) 등에 대하여 표현한 후 時間變化(dt)에 따른 동결깊이의 변화를 고려하여 나타내면, 식 7과 같다.

$$Q_L = L \cdot \gamma_s \cdot w \cdot A \cdot dD_f \dots \dots \dots (7)$$

열적 균형상태를 간단한 대수합의 관계식으로 나타내면 식 8과 같다.⁸⁾¹¹⁾

$$\begin{aligned} & -K_1 \cdot \left[\left(\frac{\partial T_1}{\partial z} \right)_{z=D_f} \cdot A \cdot dt \right] \\ & = -L \cdot \gamma_s \cdot W \cdot A \cdot dD_f - K_2 \left[\left(\frac{\partial T_2}{\partial z} \right)_{z=D_f} \cdot A \cdot dt \right] \\ & \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

2. 수정 Berggren식³⁾

수정 Berggren식은 열전도 이론을 바탕으로 동결심도 계산에 동결지수를 하나의 변수로 이 용한 수학적 방법으로 그 식은 다음과 같다.¹⁰⁾

$$\begin{aligned} Z &= \lambda \left(\frac{172800 \cdot k \cdot T_1 \cdot t}{L} \right)^{1/2} \\ &= \lambda \left(\frac{172800 \cdot k \cdot F}{L} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

여기서,

- Z : 동결심도 (cm)
- k : 열전도율(동결시와 미동결시의 평균치) (cal / cm · s · ℃)
- L : 흙의 용해잠열 (cal / cm³)
- W : 함수비 (%)

γ_s : 건조밀도 (g/cm³)

F : 동결지수 (℃ · days) (= $T_1 \cdot t$)

λ : 보정계수

μ : 용해 파라미터 (Fusion parameter)

3. 국립건설시험소식⁷⁾

1980년~1989년 사이에 전국 1,358 개소에서 관측한 동결 관입 깊이 조사 자료를 토대로 작성된 상관식은 다음과 같다.

$$Z = 14F^{0.33} \dots \dots \dots (10)$$

4. 테라다식¹⁰⁾

계산만으로 정밀도가 높은 동결심도를 구하기는 대단히 어렵지만 기상관측자료로부터 동결심도를 구하는 데는 통상 테라다의 식이 사용된다.

$$Z = C\sqrt{F} \dots \dots \dots (11)$$

여기서,

- Z : 동결심도 (cm)
- F : 동결지수 (℃ · day)
- C : 흙의 열적 정수(함수비, 건조밀도, 동결전후의 지표면 온도등에 따라 결정)

5. 미공병단 도표에 의한 방법¹⁹⁾

설계 노선의 설계 동결지수의 산정은 대상 지역의 인근 측후소에서 관측한 월 평균 대기 온도와 크기의 지속 기간에 대한 30년 기록(최소 10년 기록)을 토대로 미공병단 제정 'TM 5-818-2'에서 제시되는 절차에 의해서 작성되는 누가 온도·일 곡선에 의해서 결정한다. 최대 동결 관입 깊이의 산정은 미공병단 제정 'TM

5-852-6'에서 제시된 절차에 의해서 작성된 도표에 의하여 구한다. 따라서, 도표의 동결심도와 설계동결지수의 상관도표에 주어진 곡선들은 포장면에 쌓인 눈과 얼음의 영향을 무시할 수 있는 지역에서 동결 관입 깊이를 산정하는 데 적용될 수 있다. 이 곡선들은 포장층이 30cm 두께의 콘크리트 포장이거나 양호한 기층 재료의 두께가 15~25cm의 아스팔트 포장을 기준으로 하여, 수정 Berggren식과 여러 다른 실제 지형 조건에서 얻어진 관측값과 이론 계산값을 비교해서 유도된 보정계수를 적용해서 작성된 것이다. 이 곡선들에 의해 얻어지는 동결관입깊이는 0°C 온도가 주어진 밀도와 함수비를 가지는 균질한 재료가 무한깊이로 있을 때 설계 동결지수 조건에서 동결관입하게 되는 최대 깊이를 산정해 준다.

이 값들을 적용하는 데 있어서, 30cm 두께보다 얇은 콘크리트 포장이나 다른 형식의 포장 사용으로 인한 변동은 무시한다.

그러나 두께가 30cm 이상인 콘크리트 포장의 경우에는 30cm를 초과하는 두께 2.5cm마다 10°F·일 만큼의 값을 빼서 설계동결지수를 결정하여, 도표의 동결심도와 동결지수의 상관도표에서 최대 동결관입깊이를 결정한다.

V. 동결심도의 분석 및 고찰

1. 분석 방법

국립건설시험소에서 1980년부터 1989년까지 10년간에 걸쳐 전국의 57개 도시 1358개소의 동결심도 실측 결과중 지역별로 대표하여 15개 도시 528개소를 선정하였다. 또한 10년간 최대 동결지수의 크기별로 Table. 1과 같이 4그룹으로 분류하고 실측치를 Log-Log Scale에 나타내어

각 그룹별로 국립건설시험소식과 테라다식의 C 값을 적절하게 세분화하여 결정하였다. 또 기존의 여러 예측식으로 산정한 동결깊이와 실측치를 비교하였다. 미공병단식은 포장설계 도표에 의해 산정하였다. 미공병단 도표에 의한 방법은 도로와 같은 다층지반의 동결심도 계산이므로 다른 산정식과의 엄밀한 비교는 어려우나 概略的 비교는 가능할 것이다. 국립건설시험소식과 테라다식을 비롯한 대부분의 경험식들이 동결심도를 동결지수의 함수로 고려하고 있으며 이는 건조밀도나 함수비와 같은 다른 인자는 고려치 못하고 있다. 본 논문에서는 동결지수의 산정에 있어서 동결지수와 함수비, 그리고 동결지수와 건조밀도의 관계에 대하여 규명해 보았다. 또한 새 산정식과 기존의 예측식들을 비교하여 새 산정식의 타당성을 검토하였다.

Table. 1 선정도시의 동결지수 크기별 분류

동결지수분포	지역	80~89년간 최대 동결지수(°C·days)
250이하	부 산	35
	목 포	74
	광 주	166
	전 주	245
250~400	대 전	298
	서 산	299
	인 천	345
	서 울	386
400~600	청 주	435
	영 주	447
	수 원	495
	춘 천	563
600 이상	인 제	663
	원 주	666
	횡 계	903

2. 분석결과

1) 실측치와 기존식의 비교

Fig. 2은 10년간의 실측치를 Log-Log Scale에 나타내어 동결지수 분류별로 국립건설시험소식과 테라다식의 C값의 크기를 결정하였다.

① 국립건설시험소식(14F^{0.33})

국립건설시험소식은 동결지수 250이하에서는 10, 250~400에서는 11, 400이상에서는 14로 400이하의 도시에서는 과다 산정되고 있음을 알수 있다.

② 테라다식

테라다식은 보통 4를 쓰도록 제안하고 있으나 본 논문에서 분석한 결과로는 Fig. 2와 같이 400이하의 도시에서는 5, 400이상의 도시에서는 최대 5.5이상을 사용하여야 안전한 설계가 된다고 판단된다. 국립건설시험소식과 테라다식은 동결지수가 증가할수록 C값이 증가하는 경향이 뚜렷하다. 그러므로 동결지수가 낮은 도시에서는 국립건설시험소식과 테라다식을 일률적으로 적용할 필요는 없다.

Fig. 3~6은 기존식에 의한 산정치를 동결심도 실측치와 비교한 것이다. Fig. 2와 마찬가지로 각 그룹별로 비교하였을 때 (a)의 수정 Berggren식은 동결지수 250이하의 도시에서는 기준선에 분포함으로써 실측치와는 잘 일치한다고 볼 수 있으나 안전한 설계는 될 수 없다. 그러나 동결지수 250이상의 그룹에서는 중심선의 윗쪽에 분포해 설계시 안전한 산정이 가능하다. (b)의 토균별 보정계수를 사용한 테라다식은 거의 모든 도시에서 불안정한 설계가 될 수 있다. (c)의 미공병단 도표에 의한 방법은 전 지역에 걸쳐 몇몇 지점을 제외하고는 中心線의 윗쪽에 분포함으로써 비교적 안전한 설계가 가능하다. 그림 (d)는 국립건설시험소식을 실측치와 비교한 것으로 전도시에 걸쳐 안전한 설계가 가능하나 과다산정 여부에 대해 검토가 필요하다.

2) 동결심도와 동결지수 및 건조밀도 상호간의 관계

동결심도 산정에 기존의 동결지수와 흙의 공학적 성질중의 하나인 함수비(w)와 건조밀도(γ_d)의 함수로 각각 나타내고자 하였다. Fig. 7은 F/w에 대하여 15개 도시의 동결심도 실측치를 Log-Log Scale에 나타내고 上限線을 긋고 최대 동결심도식을 식 12와 같이 구하였다.

$$Z = 10(F/w)^{0.3} \dots \dots \dots (12)$$

Fig. 8은 식 12이 전국에 동일하게 적용될 경우 과다 산정되는 것을 막기위해 동결지수 분포별로 최대동결심도식을 식 13~16와 같이 구하였다. 동결지수의 값이 작은 도시의 그룹일수록 C값이 감소하는 경향이 뚜렷하다.

$$Z = 6(F/w)^{0.3} (250이하) \dots \dots \dots (13)$$

$$Z = 8(F/w)^{0.3} (250\sim 400) \dots \dots \dots (14)$$

$$Z = 9(F/w)^{0.3} (400\sim 600) \dots \dots \dots (15)$$

$$Z = 10(F/w)^{0.3} (600 이상) \dots \dots \dots (16)$$

Fig. 7과 같이 F/ γ_d 에 대하여서도 15개 도시의 동결심도 실측치를 Fig. 8과 같이 Log-Log Scale에 나타내고 상한선을 긋고 최대동결심도식을 식 17과 같이 구하였다.

$$Z = 6.5(F/\gamma_d)^{0.5} \dots \dots \dots (17)$$

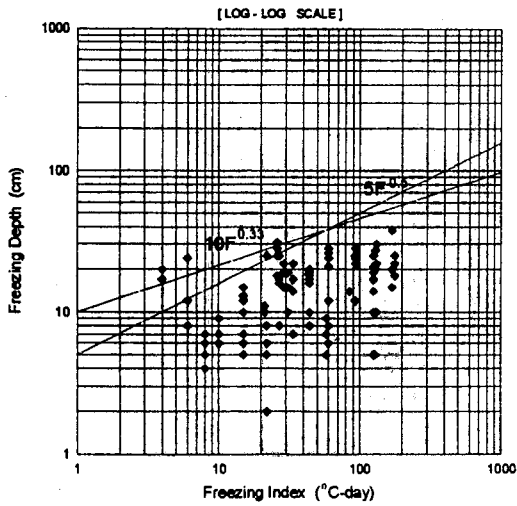
Fig. 9와 같은 방법으로 식 17이 전국에 동일하게 적용될 경우 과다 산정되는 것을 막기위해 동결지수 분포별로 최대동결심도식을 식 18~21과 같이 구하였다.(Fig. 10참조)

$$Z = 6(F/\gamma_d)^{0.5} (250 이하) (18)$$

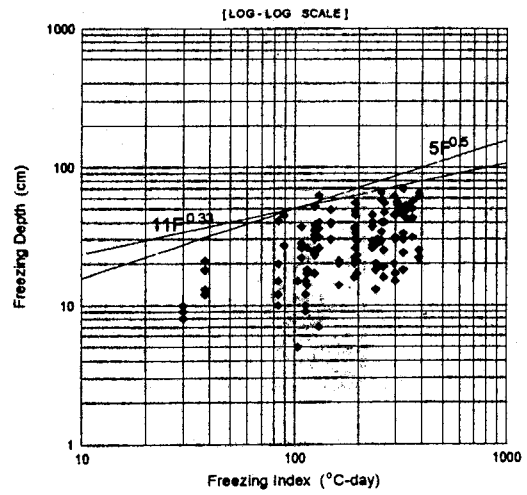
$$Z = 6(F/\gamma_d)^{0.5} (250\sim 400) (19)$$

$$Z = 6.5(F/\gamma_d)^{0.5} (400\sim 600) (20)$$

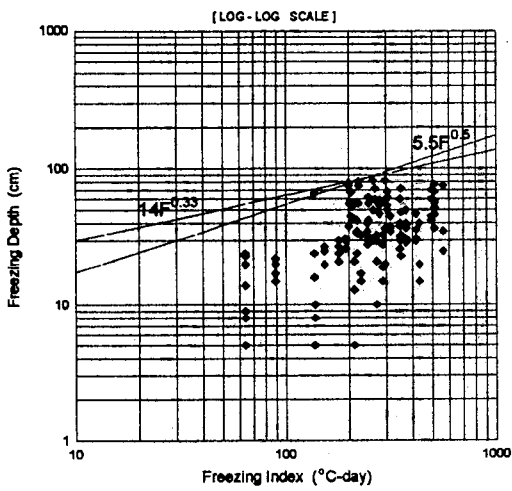
$$Z = 6.5(F/\gamma_d)^{0.5} (600 이상) (21)$$



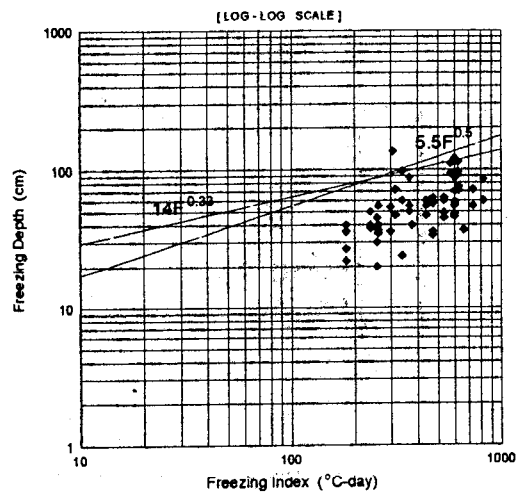
(a) 동결지수 250 이하



(b) 동결지수 250~400

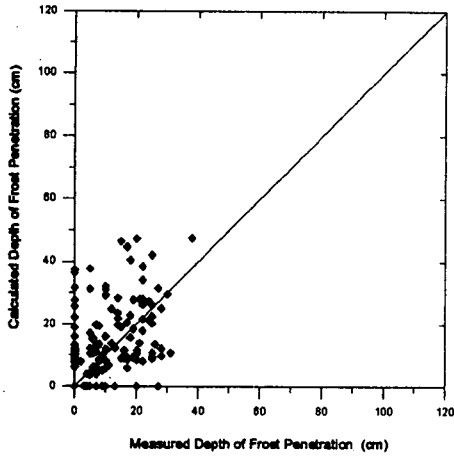


(c) 동결지수 400~600

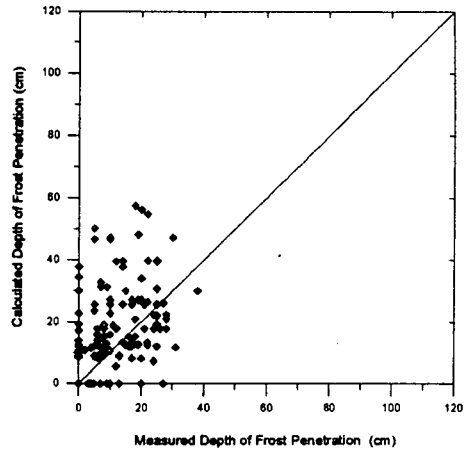


(d) 동결지수 600 이상

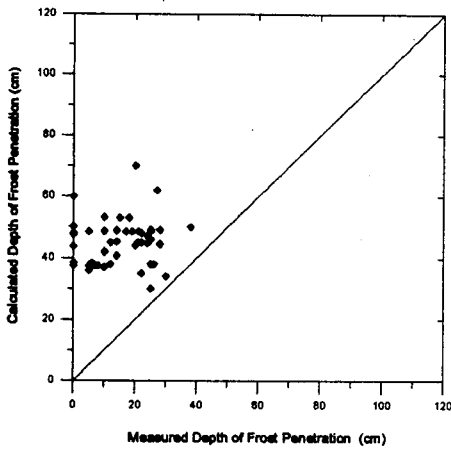
Fig. 2 동결지수 분류별 동결깊이와 동결지수의 상관관계



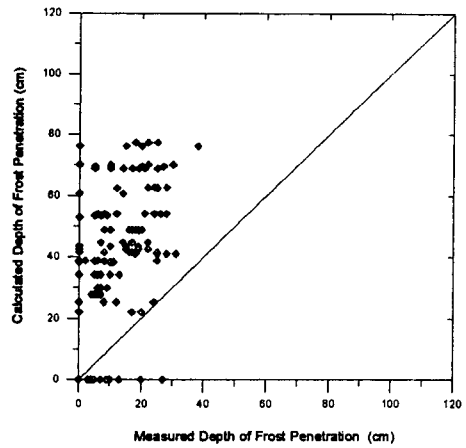
(a) 수정 Berggren식



(b) 테라다식

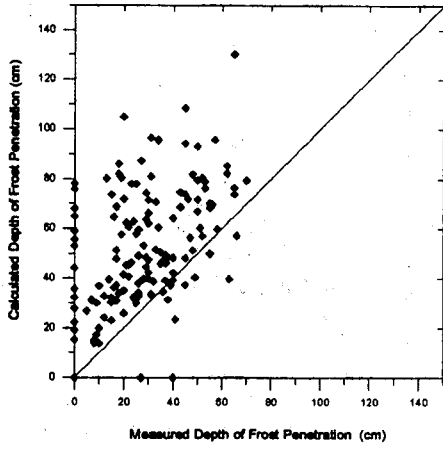


(c) 미공병단 방법

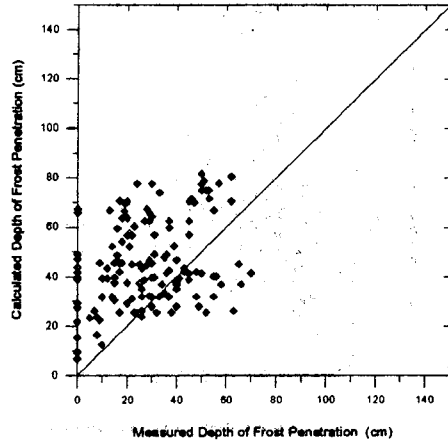


(d) 국립건설시험소식

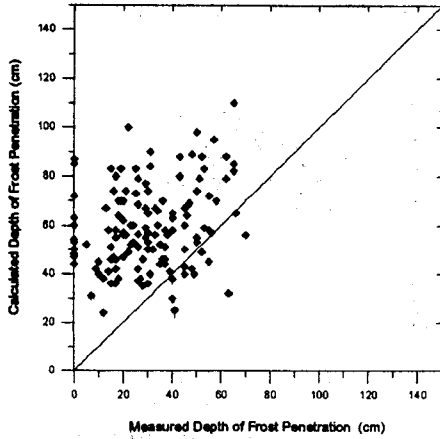
Fig. 3 동결지수 250이하에서의 실측치와 기존식의 비교



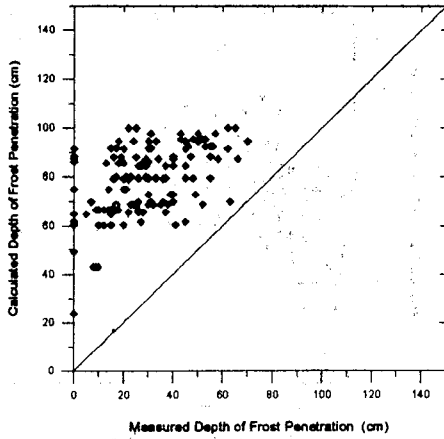
(a) 수정 Berggren식



(b) 테라다식

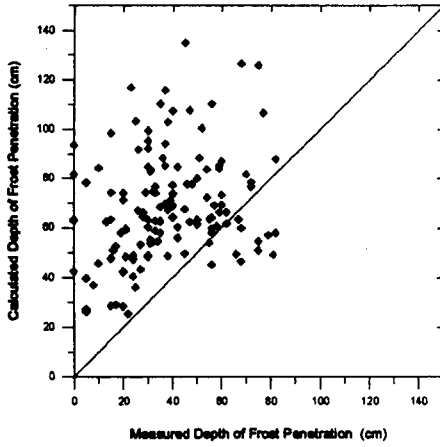


(c) 미공병단 방법

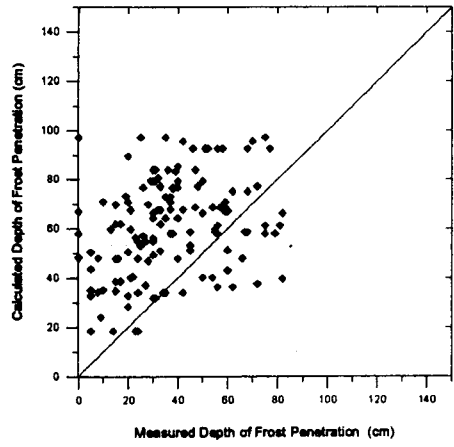


(d) 국립건설시험소식

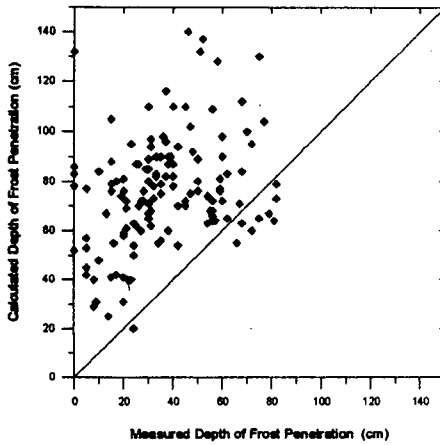
Fig. 4 동결지수 250~400이하에서의 실측치와 기존식의 비교



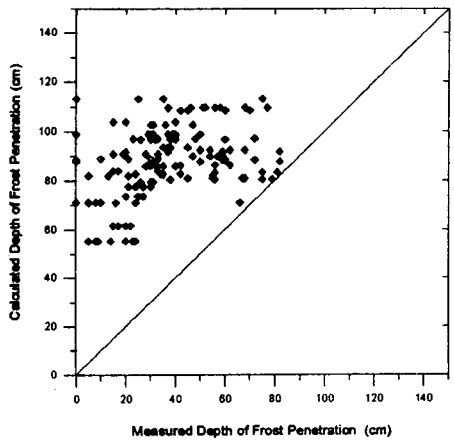
(a) 수정 Berggren식



(b) 테라다식

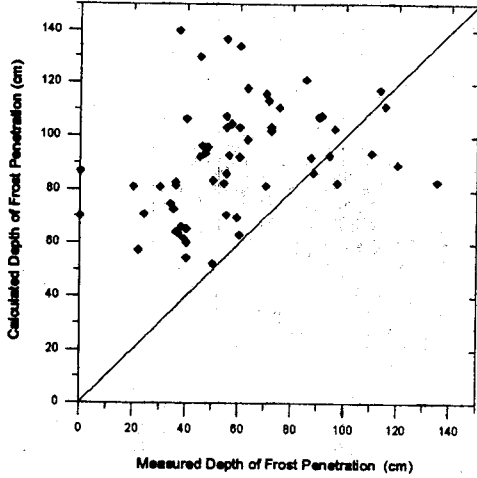


(c) 미공병단 방법

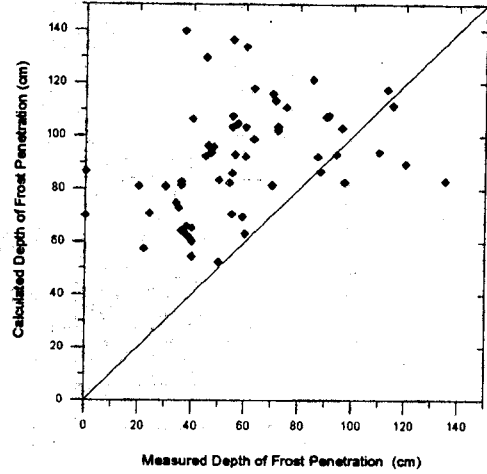


(d) 국립건설시험소식

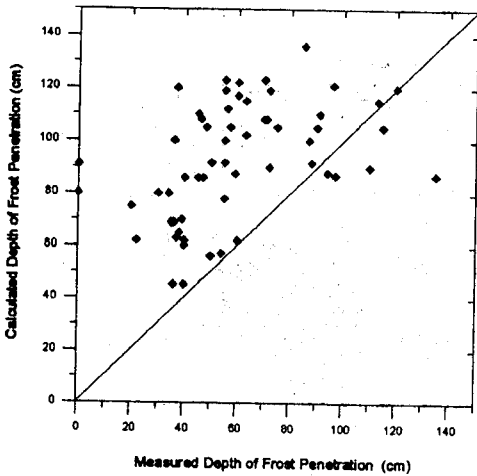
Fig. 5 동결지수 400~600이하에서의 실측치와 기존식의 비교



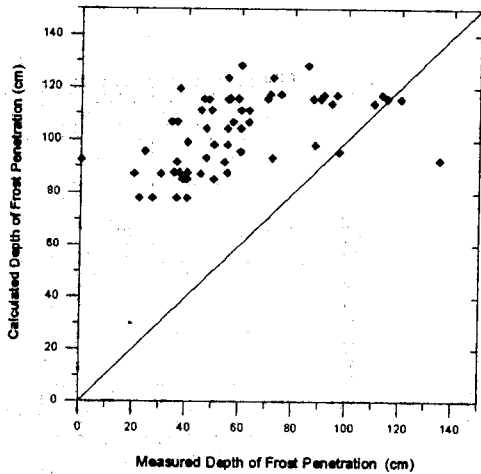
(a) 수정 Berggren식



(b) 테라다식



(c) 미공병단 방법



(d) 국립건설시험소식

Fig. 6 동결지수 6000이상에서의 실측치와 기존식의 비교

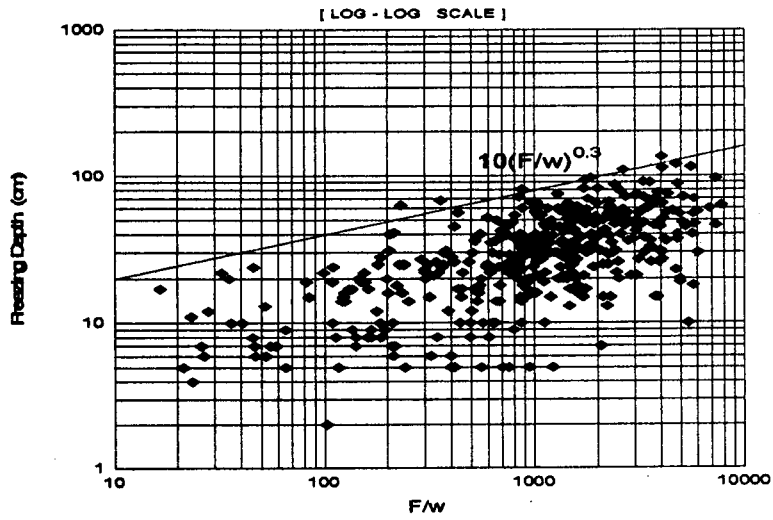


Fig. 7 동결심도 실측치와 F/w의 상관관계

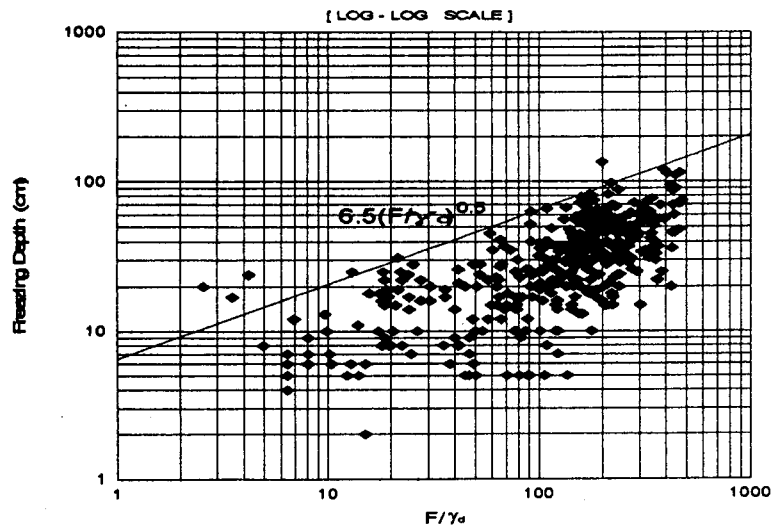
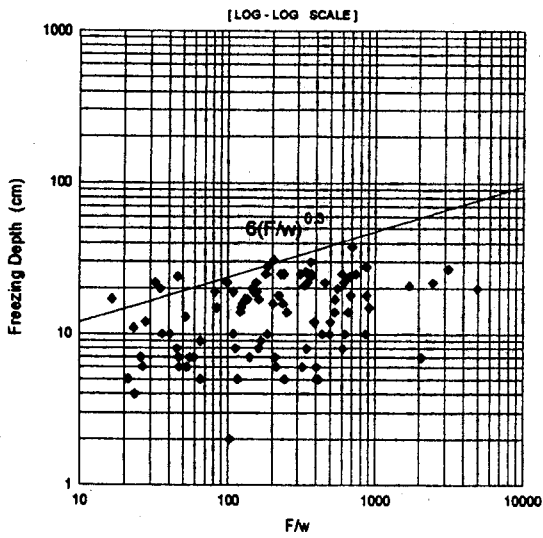
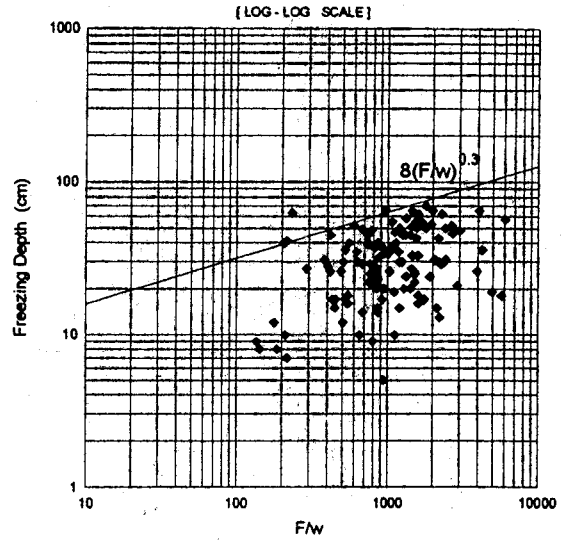


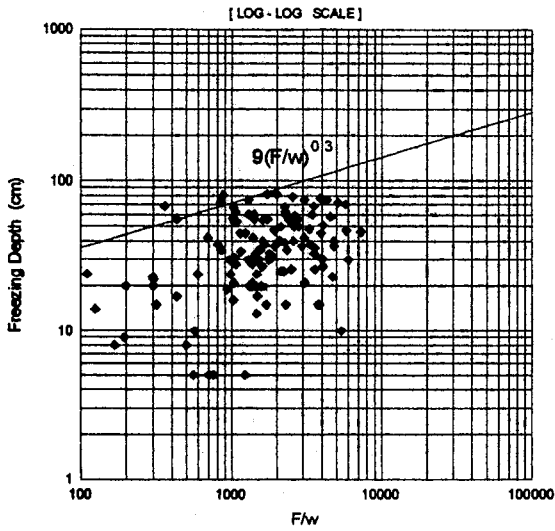
Fig. 8 동결심도 실측치와 F/γ_d의 상관관계



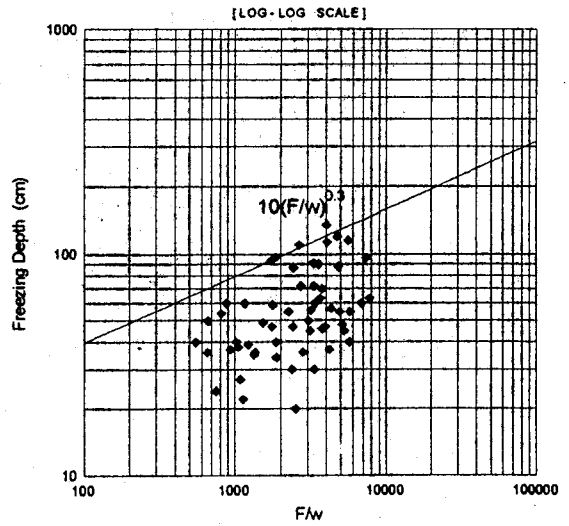
(a) 동결지수 250 이하



(b) 동결지수 250~400

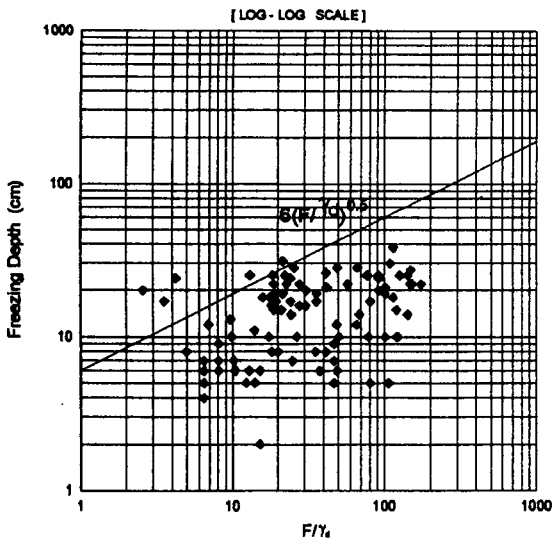


(c) 동결지수 400~600

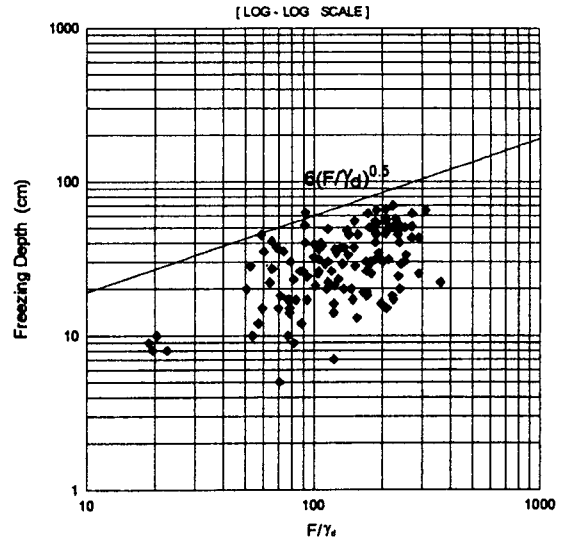


(d) 동결지수 600 이상

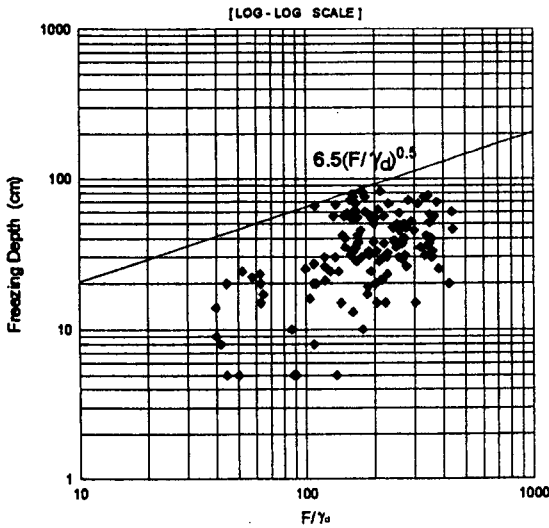
Fig. 9 동결지수 분류별 동결심도와 F/w의 상관관계



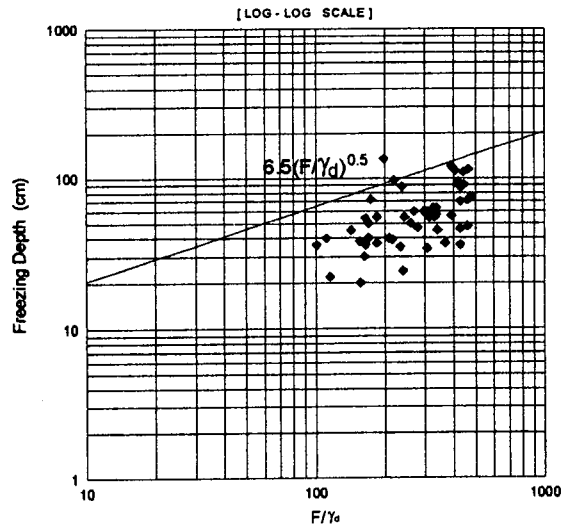
(a) 동결지수 250 이하



(b) 동결지수 250~400



(c) 동결지수 400~600



(d) 동결지수 600 이상

Fig. 10 동결지수 분류별 동결심도와 F/γ_0 의 상관관계

Table. 2은 동결지수 분류별로 세분화된 국립건설시험소식, 테라다식, 신산정식을 정리하였다.

Table. 2 제안식의 동결지수 분포별 수정값

동결지수 분포	지역	국립건설 시험소식 ($Z=14F^{0.33}$)	테라다식 ($Z = CF^{0.5}$)	신 제안식 $Z=10(F/w)^{0.3}$	신 제안식 $Z=6.5(F/\gamma_d)^{0.5}$
250 이하	부산 목포 광주	$10F^{0.33}$	$5F^{0.5}$	$6(F/w)^{0.3}$	$6(F/\gamma_d)^{0.5}$
250~400	전주 대전 서산 인천	$11F^{0.33}$	$5F^{0.5}$	$8(F/w)^{0.3}$	$6(F/\gamma_d)^{0.5}$
400~600	서울 청주 영주 수원	$14F^{0.33}$	$5.5F^{0.5}$	$9(F/w)^{0.3}$	$6.5(F/\gamma_d)^{0.5}$
600 이상	춘천 인제 원주 횡계	$14F^{0.33}$	$5.5F^{0.5}$	$10(F/w)^{0.3}$	$6.5(F/\gamma_d)^{0.5}$

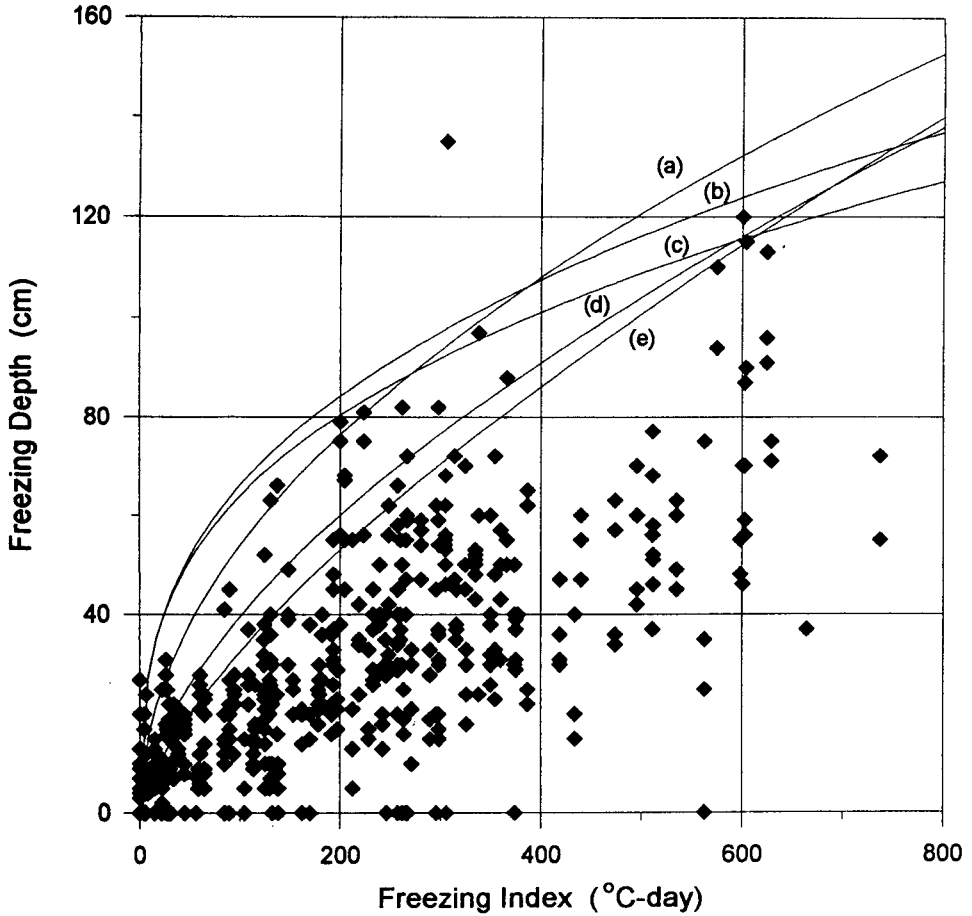
Fig. 11은 실측치에 의한 각 제안식을 비교한 것이다. 신산정식은 기존식 사이에 위치하며 동결지수 400이하에선 국립건설시험소식이나 신산정식이 안전하게 설계될 수 있으며 400~600에서는 신산정식, 국립건설시험소식, 미공병단도표에 의한 방법, 수정 Berggren식등 모두가 적용이 가능하고 동결지수 400이상에선 신산정식이 기존식보다 크게 계산되는 경향이 있으며, 동결지수 600이상에서는 국립건설시험소식이 가장 바람직하다.

VI. 결론

본 논문은 국립건설시험소에서 1980년부터 1989년까지 조사한 자료를 토대로 15개 도시를 선정 최대동결지수를 기준으로 4등급으로 분류하여 분석하고 기존의 동결심도 예측공식들과 실측치를 비교해 보았다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 국립건설시험소식은 선정도시 전지역에 걸쳐 안전한 설계가 가능하나 동결지수가 낮은 지



(a) $6.5(F/\gamma_d)^{0.5}$ (b) $10(F/w)^{0.3}$ (c) 국립건설소식
 (d) 미공병단 도표에 의한 방법 (e) 수정 Berggren식

Fig. 11 실측치에 의한 각 산정식의 비교

역에서는 과다하게 계산되는 경향이 있다.

- 선정지역을 최대동결지수 크기별로 分類하여 국립건설시험소식과 테라다 식의 C값을 세분화하여 제안하였으며 이는 기존식보다 經濟的인 설계가 가능하다.

- 동결심도 계산에 동결지수외에 含水比와 乾燥密度를 각각 고려하여 아래 식과 같이 제안하였다.

$$Z=10(F/w)^{0.3} \dots \dots \dots (22)$$

$$Z=6.5(F/\gamma_d)^{0.5} \dots \dots \dots (23)$$

• 신 제안식의 타당성 檢討를 위하여 타 산 정식과 비교한 결과 안전한 설계는 가능하나 동결지수 40이상에서는 약간 과다산정 되는 경향이 있다. 그러나 그 지역의 함수비나 건조밀도를 고려하였으므로 보다 합리적이다.

참 고 문 헌

- (1) Air Force Afn 88-6(1985), "Pavement Design For Seasonal Frost Conditions" Departments of The Army and The Air Force, Chap.4.
- (2) Andersland, O.B. and D.M. Anderson(1983), Geotechnical Engineering for Cold Regions, McGraw-Hill, New York, pp.1-6, pp.114-130, and pp.276-282.
- (3) Jones, R. H. and Holden, J. T., "Ground Freezing 88", Vol 1, 2
- (4) J. W. Cary, G. S. Campbell and R. I. Papendick(1978), "Is the Soil Frozen or Not? An Algorithm Using Weather Records", Water Resources research, Vol. 14, No. 6, pp. 1117-1122.
- (5) Kersten M. S.(1985), "Laboratory Research for the Determination of the Thermal Properties of Soils", ACFEL Technical Report 23
- (6) M. W. Smith and A. Tvede(1977), "The computer simulation of penetration beneath highways", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 167-179.
- (7) 건설부 국립건설시험 연구소(1985,1989), "동결심도 조사보고서" No 455, No 498.
- (8) 손준익 외 2명(1992), "동결토의 특성과 동토지역에서의 말뚝기초연구" 한국건설기술원.
- (9) 한국도로공사(1992), "도로설계요령", 제5권 포장편.
- (10) 한대석, 박덕원(1985), "한국에서의 설계 동결지수치 분포와 그 응용", 한국동력자원 연구소, pp. 41-79.
- (11) 홍성완 외 3명(1992), "동토지역 기초구조물의 최적 설계 시공기법개발연구 - 1차년도보고서" 한국건설기술연구원.
- (12) 홍원표, 장정기(1993), "우리나라의 동결지수에 관한 연구(Ⅱ)" 자연과학 논문집(제36집), 중앙대학교, 서울.