

도로포장의 동상 특성 및 동결심도

이경하¹⁾ · 김형배²⁾

I. 서 언

동절기가 되면 도로포장이나 구조물의 시공에서 동결과 융해작용에 의해 포장의 강도를 약화시키고 구조물에도 영향을 미친다. 동상은 도로의 노상에서 생긴 서릿발이 한기와 접하는 방향으로 성장하여 노면이 융기하는 현상이다. 이것에 의한 도로의 파손형태로는 동상이 도로의 횡단방향에 균일하지 못하게 발생하고 거의 중앙에서 최대로 되기 때문에 주행방향에 포장의 커다란 균열이 일어나는 것이 일반적이다. 동상현상에 의한 도로의 또 하나의 파손형태로는 봄에 지중의 서릿발이 융해하여 노상, 노반의 지지력이 저하하는 것이다. 이런 종류의 파손은 동절기의 지하 깊은 곳에서부터 다량의 물이 서릿발 발생부분에 흡입되어지고 있지만 봄에는 그 융해수가 하층의 동결층에 의해 배수를 방해받고 있는 사이에 노면 위를 많은 중차량이 통과하여 포장 하면의 인장응력이 과대하게 발생되어 포장 노면에 국부적인 침하와 틈이 갈라지는 현상이 생기는 것이다.

지반 동결과 관련된 연구결과와 활용분야는 지하공간 개발이나 하저터널공사, 건물의 부등침하 보수공사, 도로 및 철도 하부의 횡단 매설과 공사 등의 사고방지를 위한 인공동결공법, 그리고

LNG 저장탱크 주변의 동결팽창제어기술로 활용될 수 있어 기대 효과가 매우 크다.

본 고에서는 도로포장의 동상특성 및 동결심도 이론과 동결심도 추정방법을 소개하고자 한다.

II. 동상에 의한 도로의 피해

동상현상에 의한 도로 피해형태로는 점토질 노상 등에서 발생하는 서릿발에 의하여 노상이 팽창하는 것과 봄의 융해기에 지중의 빙층이 지표면으로부터 융해하여 노상, 노반의 지지력을 저하시키는 것의 2종류로 나눌 수 있다.

2.1 동상 등에 의한 피해

동상 등에 의한 피해는 노면에서의 동상량이 주로 도로의 횡단방향에 불균일하게 발생하여 거의 중앙에서 최대로 되어, 도로의 중앙선 부근에 큰 균열이 나타나는 것이다. 이러한 현상은 도로의 길어깨 부근은 퇴설에 의하여 포장구조가 단열되는 반면 중앙부분은 제설과 많은 교통차량의 통과로 단열효과를 상실하기 때문이다. 동결심도와 동상량이 길어깨 부분에 비하여 크게 되고, 포장면에 인장응력이 발생하여 파괴된다.

1) 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원
2) 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

또, 피복이 비교적 얇은 횡단면에는 파이핑 현상이 있어 복토재료가 동상을 일으키는 때에는 횡단구조물의 내측으로부터 한기가 스며들어 냉각되고 기타 부분보다 동상량이 커져 도로의 횡단방향 노면에 블록형의 변형을 수반하는 크랙이 생길 수가 있다.

터널의 콘크리트 복공의 동상피해는 암석이 이암이나 혈암과 같은 연질에서 비중이 작고 흡수성이 클 때 일어나기 쉽다. 한기가 터널의 갱구로부터 들어가기 때문에 그 연장이 수백 m 이하의 비교적 작은 것에 피해가 나타나는 것이 많다.

도로의 횡단토공에서 비동결성 재료 두께가 급변하는 장소에서는 겨울기간에 동상량의 차가 커지고 길어깨부의 포장이 파괴되는 것이 있다. 또, 길어깨 부분의 제설을 완전히 행하면 동상량이 커져서 길어깨 또는 차도단의 포장을 잡아 다니면서 올라오는 균열이 발생하는 오목형의 요철이 된다. 또, 길어깨 부분의 요철이 2월부터 4월까지 걸쳐서 대낮에 고인 물이 밤에 빙층으로 변화되는 원인이 되고 교통안전에 위험이 된다.

2.2 융해기의 노상·노반 지지력 저하에 의한 피해

봄의 융해기에는 노상토 중의 서릿발로부터 빙층이 주로 지표면으로부터 녹아서 그 부근의 토층은 포화상태가 된다. 특히, 융해수가 또 하층에 남아있는 동결층에 끼어서 지하에 침투하기 쉽다. 다시 한번 토중에 다수의 빙층이 생성되고 융해 후에는 그 밀도도 작게 되어 그 부분의 지지력이 크게 저하된다.

이와 같은 상태에서 많은 중차량이 공용하면 아스팔트 포장 또는 콘크리트포장 하면의 인장응력과 노상토의 수직변형이 증대하여 포장이 파괴되고, 아스팔트 포장의 경우에는 노면에 차바퀴 흔적 부분에 거북등 모양의 균열이 발생하고 침

하가 일어난다. 따라서, 노상의 연화, 노상 지지력 저하의 원인을 요약하여 열거하면 다음과 같다.

- ① 동결진행 과정에서 지하로부터 모관수가 생겨서 과잉수에 의하여 토층의 함수량은 현저하게 증대한다.
- ② 빙층의 융해과정에 있어서 잔존하는 하층의 동결층이 차수층과 같이 배수를 방해한다.
- ③ 노상토의 조직은 상주(霜柱)의 발생에 의하여 분리되고, 그 밀도는 저하한다.
- ④ 교통하중에 의한 노상토의 이화(泥化)가 촉진되고 포장은 파괴되고 때로 분니(噴泥) 현상이 일어난다.
- ⑤ 포장노면의 균열로부터 표면수가 침투하여 노상·노면의 지지력이 다시 저하하여 파괴를 진행시킨다.

III. 동상특성

3.1 동상에 영향을 주는 조건

0°C 이하의 낮은 온도에서 흙 속의 간극수가 없어 빙정(Ice Lens)이 생기고 얼지 않은 부분으로부터 계속 수분을 흡수하면서 체적이 팽창되는 현상을 동상이라고 말하는데 보통 동결이 진행됨에 따라 동결층의 함수비는 증가하고 동결면 아래의 흙은 함수비가 감소한다. 동상성이 작은 흙이나 큰 구속응력을 받을 때는 간극수를 배수하는 경우도 있다.

통상 토질, 온도, 수분을 동상의 3요소라고 부르며 동상에 영향을 미치는 요소를 다음과 같이 구분할 수 있다.

(1) 토질

동상량은 흙의 입경에 따라서 달라진다. 경험적으로 입경이 0.1mm 이상 되는 사질토에서는

동상이 거의 발생하지 않는 것으로 알려져 있으며 따라서 동상방지 대책의 하나인 치환공법에서는 치환용 재료로서 모래를 사용하고 있다.

토립자의 입경이 0.05~0.1mm 일 때에는 본격적으로 동상이 발생하며 그 이하로 갈수록 동상성이 강해지다가 다시 줄어든다. 즉, 입경 0.002~0.005mm 의 범위내에서 가장 동상성이 강하고 입경이 0.002mm 이하일 경우 토립자 사이의 간극이 좁아 투수성이 약화되고 동결면으로 수분 공급이 잘 이루어지지 않아 동상이 발생될 가능성이 줄어든다.

(2) 비표면적

토립자 구조는 점토광물에 따라 달라지며 어떤 흙에서는 같은 입경일지라도 입자형상이 다른 경우가 있다.

따라서 입경만으로 정확히 동상성을 판별하기가 어려울 때가 있는데 이 때는 토립자의 비표면적(1g중의 토립자 표면적의 합계)이 동상성 판정의 지표가 된다. 일반적으로 비표면적이 클수록 움직이지 않는 물의 양이 많아지므로 동상성이 크다.

(3) 간극수의 성질

간극수의 정도가 달라지면 동결면으로의 흡수량에 변화가 생기고 동상률이 달라지는데 고지(高地) 등은 점토에 Carboxyl Methyl Cellulose 용액을 섞어 점도 증가에 따른 동상률의 감소효과를 입증하였다.

(4) 선행하중의 영향

자계(子戒) 등은 교란된 점토를 과압밀시킨 시료와 정규압밀시킨 시료의 동상률을 비교하였는데 과압밀시료의 동상률이 정규압밀시킨 시료의 동상률보다 작게 나타났다. 자계(子戒) 등은 이 현상에 대해 압밀에 의해 미동결부의 투수계수가

작게 되어 흡수량이 감소하기 때문으로 풀이했다.

(5) 동결융해 이력의 영향

자계(子戒) 등은 일정 상재압력을 받을 때 일정동결속도로 동상시험을 실시한 후 공시체에 상재압력을 작용시킨 그대로 융해하는 과정을 되풀이하였는데 동결융해를 반복할 경우 동상률이 감소하는 것을 밝혔다.

또한 이 경향은 과압밀점토보다 정규압밀점토에서 더욱 뚜렷이 나타났다.

(6) 상재압

상재압이 작용하면 동결면으로 수분 이동속도를 감소시켜 동상률이 감소하는데 Penner와 Uedo는 동상속도와 상재압 및 온도와의 기본 관계식을 제시하였다.

$$\frac{dh}{dt} = R = a \exp(b \frac{h}{t})$$

여기서, $\frac{dh}{dt}$ = 동상속도 (mm/min)

h : 동상량(mm)

t : 시간(min)

a, b : 흙의 종류에 따른 상수

P : 상재압(kg/cm²)

T : 온도(°C)

◦ Leda Clay에 대하여

$$\frac{dh}{dt} = R = 5.7 \times 10^{-3} (0.507 P / T)$$

◦ Mackenzie Vally Soil에 대하여

$$\frac{dh}{dt} = R = 4.4 \times 10^{-3} (0.968 P / T)$$

고지(高志)는 동상률과 상재압(σ), 동결진행 속도 사이에는 다음 식과 같은 관계가 있음을 밝혔다.

$$\zeta = \zeta_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \frac{\sqrt{V_0}}{V} \right)$$

- 여기서 ζ : 동상률(%)
- σ : 상재압(kg/cm²)
- V : 동결진행속도(mm/h)
- ζ_0, σ_0, V_0 : 실험으로부터 구해지는 정수

또한 고지(高志)는 상재압(σ)이 어느 한계를 지나면 동결면으로 향하는 수분이동속도(V)가 마이너스가 되어 동결면으로 흡수되지 않고 동결면으로부터 배수현상이 일어난다고 밝혔으며 이 한계압력(σ_c)을 차단압이라고 칭했다. 고지(高志)의 실험결과 한계압력(σ_c)은 Silt질흙에서 1~2kg/cm², 점토에서 3~5kg/cm² 이었다.

사. 온도

기온이 너무 낮으면 렌즈모양의 얼음층이 생기지 않고 콘크리트 모양의 동결상태로 되어 거의 동상이 일어나지 않는다. 즉, 동결의 진행이 빨라 동결면으로의 수분 보급이 충분하지 않아 동상이 잘 발생하지 않는 것이다.

3.2 동상성의 판단 기준

동상성의 판정방법은 통상의 토질시험에 의하여 정상적으로 구하는 방법과 동상시험에 의하여 상재압 또는 동상속도를 각각 변화시켜 구하는 정량적 방법이 있다.

흙의 동상성은 입도분포, 입경, 토립자 형상 등에 관련한 것이기 때문에 이것들을 직접 또는 이것과 관계하는 양을 측정하는 것에 의하여 판정

할 수 있다.

(1) 흙의 종류, 입도분포 및 입경에 의한 판정으로 등의 분야에서 정성적인 동상성 판정기준이 정해지는 것은 거의가 흙의 종류, 입도분포를 기준하는 것이다. 표 1에서 Gaskin이 노상에 있어서 7개국의 동상판정기준과 각 방면에 있어서 연구결과를 보여주고 있다.

흙의 종류 및 해당 입경에 의해 도로 및 철도의 시공에서 정성적으로 동상작용 가능성 여부를 판정하는 기준을 몇몇 국가에서 제정하여 사용하고 있다. 동상을 일으키지 않는 재료의 특성으로는 다음의 사항이 요구된다.

- ① 모래 : 0.074mm체를 통과하는 양이 6% 이하
- ② 부순모래 : 0.074mm체를 전부 통과하고 4.76mm체를 통과하는 양이 15% 이하

(2) 흙의 모관력, 원심함수당량에 의한 판정 흙의 모관력을 기준하는 것 또한 표 1에 나타나 있다. Willis 등은 흙의 액성한계 LL, 소성한계 PL, 수축한계 SL, 원심함수당량 W_c 에 의하여 판정기준을 제안하고 있다. 원심함수당량은 흙의 보수력을 표시하는 것으로 토립자의 흡착수 등에도 관련되고 동상에도 특히 관련된다. Willis의 판정기준에 의한면 동상을 일으키지 않는 흙은 다음의 조건을 포함한다.

- ① 사질토 : $W_c < 12\%$
- ② 점성토 : $LL > 50\%$
 $PI > (LL - 14)/1.6$
 $SL < 21 - 1.1\sqrt{LL - LL^2}/800$

IV. 동결심도 이론 및 경험식

4.1 동결심도 이론

표 1. 세계 여러 나라의 동상성 판정기준

국가명	해당입경이하의 함량(%)			기타조건	동상 가능성	비고
	20 μ m	75 μ m	기타			
핀란드	10이하			모관상승고가 10cm 이상	무	
영국		10이하		PI가 15이상 PI가 20이상	무 무 무	투수성이 좋은 점성토 투수성이 나쁜 점성토 비점성토
노르웨이	3이하 5이하 6이하 3~12 12이상 12이상		200 μ m이하가 50이상 200 μ m이하가 50이하이고 2 μ m이하가 40이상		무 무 무 무 약간 중 대	일반도로의 노반 자갈도로의 노반 보도의 노반 저급도로의 노반
스웨덴		16이하 16~43		모관상승고 1 μ m이하 모관상승고 1~1.5 μ m 모관상승고 1.5 μ m 이상	무 중 대	
미국 스위스	1.5이하 1.5~3 3이상				무 중 대	자갈, 입도가 좋은 모래 실트질 모래
서독			63 μ m이하가 5이하 63 μ m이하가 15이하	균등계수 15이상 균등계수 6이상	무 무	
Beskow			62 μ m이하가 25이하 또는 125 μ m이하가 35이상		유	
Caagrande	10이상 3이상			균등계수 5이상 균등계수 15이상	유 유	

동결심도는 토질, 지하수, 일사량, 적설량 등에 의해 크게 변화하기 때문에 계산에 의해 정도가 높은 동결심도를 구하기는 곤란하다. 그러나 이것을 열전도론에 입각하여 계산하는 식으로 일반적인 것이 Stefan과 Neumann의 식이 있다. 토질이 균질한 단층계 지반의 동결심도를 계산하는 Stefan 식은 다음과 같다.

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{48k_m FI}{L}}$$

여기서,

Z : 동결심도

k_f : 동결열전도율

n : 지표면 동결지수로의 수정계수

FI : 공기동결지수($^{\circ}F \cdot \text{day}$)

L : 용해잠열(BTU/ft³) ($= 144 \frac{w}{100} \gamma_d$)

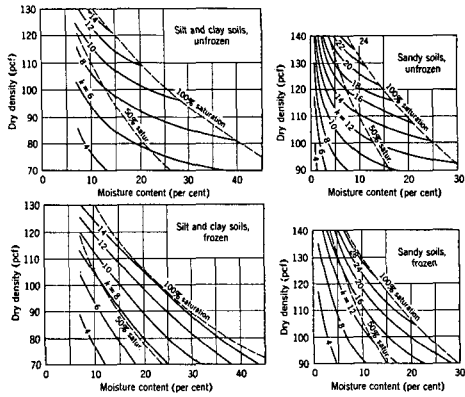


그림 1. 흙의 열전도율

수정 Berggren 이론에서는 온도변화의 영향을 고려하여 흙의 열용량과 비동결토의 열전도이론이 포함된 열확산 이론을 적용하였다. 수정 Berggren 식은 다음과 같다.

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{48k_{avg}nFI}{L}}$$

λ : $f(\mu, \alpha)$ 보정계수

$$\mu = \frac{nFI}{d} \left(\frac{C_{avg}}{L} \right)$$

$$\alpha = |T - F| \frac{d}{nFI}$$

$$C_{avg} = r_d \left(0.17 + 0.75 \frac{W}{100} \right)$$

d : 동결기간

T : 연평균기온

T_F : 빙점온도 (0°C 또는 32°F)

k_{avg} : 동결시와 미동결시의 평균열전도율
($Btu/ft^3 \cdot F$)

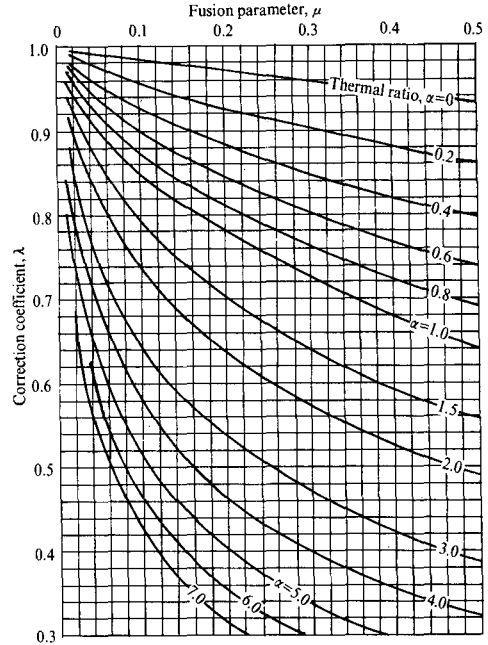


그림 2. 보정계수 λ

V_0 : 연평균대기온도-32° F

t : 동결기간(일)

F : 동결지수(° days)

L : 용해잠열(Btu's/feet3)

C : 체적열(volumetric heat, 아스팔트

콘크리트 : 21, 시멘트콘크리트 : 28)

다층토에서는 동결심도식은 다음과 같고 단층토와 다른 점은 동결깊이를 가정하여 계산된 동결깊이와 일치할 때까지 반복계산하는 것이다.

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{48nFI}{\left(\frac{L}{K}\right)_{eff}}}$$

$$\left(\frac{L}{K}\right)_{eff} = \frac{2}{x^2} \left[\frac{Z_1}{K_1} (L_1K_1/2 + L_2K_2 + \dots + L_iK_i) \right]$$

$$+ \frac{Z_2}{K_2} (L_2 Z_2/2 + L_3 Z_3 + L_i Z_i) + \dots + \frac{Z_i}{K_i} \left(\frac{L_i Z_i}{2} \right)$$

Z_i : 각층의 깊이

L_i : 각층의 융해잠열

x : 가정동결깊이

4.2 동결심도 추정방법

동결심도를 추정하는 방법은 주로 경험적인 방법에 의존해 왔다. 동결심도를 추정하는 경험식은 지금까지 수많은 공식이 나와 있다. 하지만 이 공식들은 지역적인 제한성을 내포하고 있어서 일반적으로 사용하기에는 어려운 점이 많다. 본 고에서는 지금까지 나와있는 동결심도 추정 경험식을 설명하고자 한다.

1) Shannon 식

1945년 미국의 Shannon은 비포장도로에 있어서 3m를 굴토하여 일정한 깊이마다 온도측정기를 설치하고 일부는 단열재로서 열의 전도를 차단하여 외부온도의 변화에 따른 지중온도 변화를 측정 분석함으로써 다음과 같은 식을 발표하였다.

$$Z = -2 + 5\sqrt{F} \quad (cm)$$

여기에서 동결지수 F 는 $^{\circ}C \cdot day$ 의 단위를 사용하고 있으며 식에서 동결심도는 동결지수만의 함수로 표시되었으며 일정지역에 국한하였다.

2) Brown 식

Brown은 1964년에 캐나다의 비포장도로에 있어서 강관 파이프를 일정한 깊이마다 묻고 흙이 동결시 팽창으로 인해 파이프에 가해지는 압력을 측정분석하여 다음과 같은 추정공식을 발표하였다.

$$Z = -50 + 7\sqrt{F} \quad (cm)$$

3) 일본식

일본의 「아스팔트포장 요강」, 「공항아스팔트 포장 설계」 등에서는 수정 Berggren의 식을 다음과 같이 간단히 변형하여 이론식을 구성하는 열전도율이나 융해잠열 같은 동결지수 이외의 인자를 C 로 표시하였다.

$$Z = \gamma \sqrt{\frac{48 K_f n F I}{L}} = C \sqrt{F I}$$

여기서

$$C = \gamma \sqrt{\frac{48 K_f n}{L}}$$

이 식에서 지반의 열적 정수, 함수비, 건조밀도, 동결기간, 동결지수 등으로부터 결정되는 C 값을 선택해서 동결지수와 동결심도의 관계를 구할 수 있다. 지반을 구성하는 토질의 함수비가 15%, 건조밀도가 $1.8g/cm^3$ 이고, 동상에 저장성이 큰 균질한 재료를 사용한다고 가정하였다. 이 때, $Z = C\sqrt{F}$ 의 관계식에서 C 값을 역산하여 구하고 동결지수가 $100 \sim 1100^{\circ}C \cdot day$ 에 대한 값을 표 2에서 3.7~5.2의 범위로 나타냈다.

표 2. 동결심도 추정식에서의 C값

동결지수	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
$Z = C\sqrt{F}$	3.7	4.1	4.4	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.0	5.1	5.2

4) 미공병단 포장설계법

미공병단은 동결에 대비하여 포장두께를 결정하도록 다음 3가지 방법을 제안하였다.

- ① 완전방지법(Complete protection method)
- ② 노상동결관입허용법(Limited subgrade frost penetration method)
- ③ 감소노상강도법(Reduced subgrade strength)

method)

이상의 방법에 대해서 좀더 세부적으로 기술하고자 한다.

① 완전방지법(Complete protection method)

이 방법은 동결작용으로 인한 포장표면의 변형을 완전히 방지하고자 할 때 적용한다. 이것은 표층아래 충분한 두께의 비동결성 재료의 기층을 씌우므로써 가능하다.

이 방법은 노상 재료가 F_3 또는 F_4 이거나 함수비가 수평방향으로 심하게 변하거나 또는 다음에 설명할 노상 관입허용법으로는 포장의 동상이나 균열을 방지할 수 없는 특별한 경우에 적용한다.

동상을 완전히 방지하기 위한 표층과 비동결성 기층을 합친 두께는 기층의 건조단위 중량과 함수비를 알면 그림 3을 보고 바로 결정할 수 있다. 이 깊이는 앞서 설명한 Berggren의 수정공식을 이용하여 30cm두께의 콘크리트 포장에 대해 계산한 것인데 15cm 내지 22.5cm 두께의 양질의 기층을 가진 아스팔트 포장에도 잘 맞는다고 한다.

② 노상동결관입허용법(Limited subgrade frost penetration method)

이 방법은 노상상태가 수평방향으로 심하게 변하지 않거나 흙이 균질한 경우에 보편적으로 적용되는 설계방법이다.

동결깊이가 노상으로 얼마쯤 관입된다 하더라도 동상으로 인한 용기량이 포장파괴를 일으킬만한 양이 아니라면 노상의 동결을 어느 정도 허용하는 것이 경제적이다.

이 방법으로 포장두께를 결정하는 방법은 다음과 같다.

- (1) 동결이 시작되기 직전, 기층의 노상의 평균 함수비와 기층의 단위중량을 측정한다.
- (2) 설계동결지수의 값을 이용하여 앞의 그림

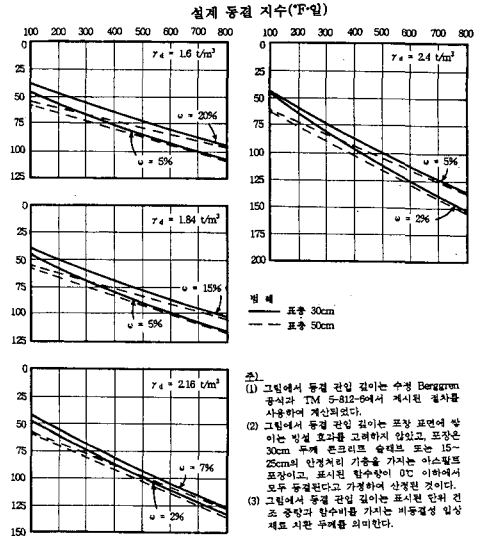


그림 3. 동결관입깊이와 동결지수의 상관도표(동결지수 800 °F이하)

3으로부터 동결관입깊이 a 를 결정한다.

- (3) 동결을 완전히 방지할 수 있는 기층의 두께 C 를 결정한다.
- (4) 기층과 노상의 함수비의 비를 결정한다.

즉, $r = \frac{\text{노상의 함수비}}{\text{기층의 함수비}}$

여기서 $r > 2$ 이면 $r = 2$ 로 가정한다.

- (5) 그림 4로부터 비동결성 기층의 설계 두께 b 를 결정한다.

이 방법에 의하면 기층 아래에 있는 보조기층의 두께만큼 동결하나 이 때문에 포장이 과도하게 부풀어오르거나 포장표면에 균열이 생기거나 하는 일은 없다. 그러나 한 가지 유의할 것은 비동결 기층의 두께를 확보하기 위하여 아래 부분의 기층 10cm는 필터층으로 설계되어야 한다. 노상이 기층의 필터요구조건을 만족시킬 때에는 필터층을 따로 둘 필요가 없다.

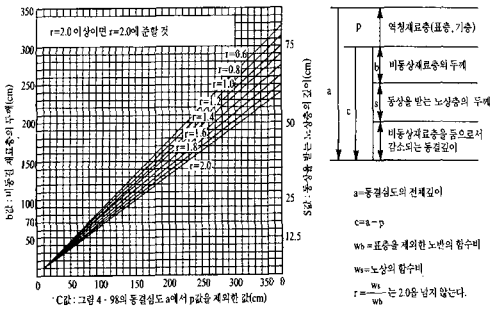


그림 4. 비동결성 재료층의 결정도표

현재 우리나라에서는 도로포장 설계시 이 방법을 사용하고 있다.

③ 감소노상강도법(Reduced subgrade strength method)

동결작용을 받았던 흙이 해빙될 때에는 노상이 얼기 전보다 더 많은 물을 머금고 있으므로 강도가 훨씬 감소된다. 이와 같이 감소된 노상의 강도를 근거로 하여 포장두께를 결정하는 것이 감소노상강도법이다. 이 방법은 노상이 수평방향으로 균질할 때에는 F_1, F_2, F_3 군에 대해 강성포장과 가요성포장에 다같이 사용될 수 있으며 동상이 약간 있어도 중요성이 덜한 가요성포장부에 있어서는 F_4 군의 흙에도 적용할 수 있다.

이 방법으로 표층과 기층을 합친 두께를 결정하기 위해서는 동결성을 근거로 흙을 분류한 다음 설계지수를 추정해야 한다. 이 값은 8.2ton의 등가단축하중으로 표시한 교통량과 그 구성에 의존하며 아스팔트 포장에 대해서는 6을 사용한다.

이 방법으로 설계하면 앞서 설명한 노상동결관입허용법으로 설계한 것보다 통상 동결깊이가 얇게 나온다. 만일 이 방법으로 설계한 두께가 노상동결관입허용법이나 완전방지법으로 결정한 값을 넘어서면 그 중 작은 값을 동결깊이로 결정한다. 다만, 이 깊이는 비동결상태로 간주하여 구한 두

께보다는 같거나 커야 한다.

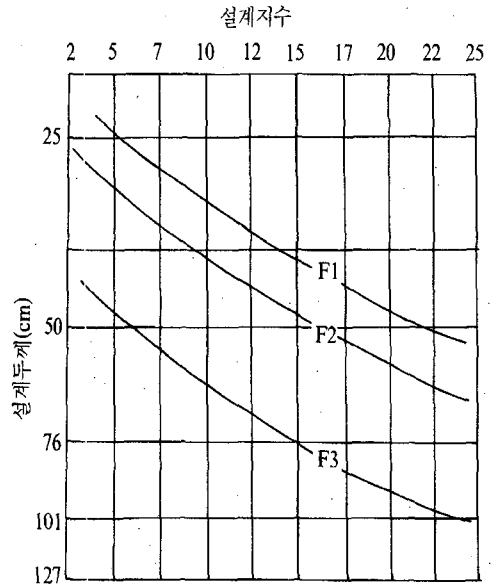


그림 5. 노상강도감소법에 의한 표층 및 비동결성기층의 두께 결정

5) 국내의 동결심도 추정방법

우리나라에서 기상자료를 이용하여 각 지역의 동결 깊이를 결정하려는 시도는 20여년 전부터 있어 왔다. 1967년에 국립건설연구소에서는 13개 측우소의 기상자료를 이용하여 동결지수를 계산하여 설계동결지수선도를 발표한 바 있다. 그 후 수원농업기상측후소에서 1967~70년에 걸쳐 측정 자료를 수집하여 동결지수와 상관 관계식을 구하고 20개 지역에 대한 토질별 동결 깊이를 발표하였다.

도로조사단에서는 1974년에 도로포장설계를 위하여 기상자료를 기초로 하여 전국동결지수선도를 발표하였다. 이 동결지수선도의 동결지수는 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 로 구하였고 국립건설연구소의 자료에 비해 더 상세하다.

그 후 도로조사단에서는 1980년에 우리나라 22

개 측후소와 농업기상관측분실 70개소 등 모두 92개소의 기상자료로부터 동결지수를 구하고 이전의 자료와 1978년까지의 자료를 보충하여 실제 동결지수선도를 발표하였다.

국립건설연구소에서는 동결깊이 측정을 위한 10개년 계획을 세우고 1980년부터 1989년까지 전국에 걸쳐 모두 24개 지구 118개소를 조사하였다. 우리나라에서는 대략 동결이 12월 중순에 시작하여 그 다음해 2월 중순에 끝나므로 조사는 동결이 종결되는 2월 중순경에 하였다.

일단 동결된 흙은 동결선 가까이에서는 상당한 시일이 지난 후에 녹으므로 동결깊이를 측정하는데 있어서 조사일시에 큰 오차는 생기지 않는다.

1980년대에는 79~80년의 동결 자료에 의해 동결심도와 동결지수와의 관계식을 다음과 같이 구하였다.

$$Z = -6 + 5.2\sqrt{F}$$

그 후 1989년에 10개년에 걸쳐 관측한 동결관입깊이 조사자료를 토대로 동결심도식을 다음과 같이 구하였다.

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

V. 시험도로에서의 동결심도 연구

5.1 시험도로 건설개요

국내 시험도로는 행정구역상 경기도 여주군 가남면 안금리부터 삼승리에 걸쳐 현재 건설되고 있으며 2002년 12월에 준공될 예정이다. 시험도로는 그림 6과 같이 4차로의 고속도로 본선에 부가적으로 총 연장 7.7km에 걸쳐 편도 2차선으로 건설되며, 구간내 포장은 2830m의 콘크리트포장과 2710m의 아스팔트포장으로 구성되고, 3개의 교량과 3개의 지반구조물을 포함하게 된다. 따라서, 시험도로 내 연구는 포장, 구조, 지반, 교통, 재료, 환경등 도로에 관련된 모든 연구를 종합적이고

집약적으로 추진하고 있다. 그림 6은 시험도로의 평면도이다. 시험도로에는 계측기 및 계측시스템을 설치하여 포장 내부의 변형률, 변위, 온도, 함수량과 콘크리트 포장 슬래브의 조인트부 이격거리, 다우웰바 변위등의 측정이 가능하며 포장노면 자동측정장비를 사용하여 주기적으로 노면 평탄성, 소성변형, 미끄럼 저항, 구조적 능력 평가까지도 실험이 가능토록 건설된다. 또한, 현장에 인접하여 교통량 측정 및 기온, 강우량, 지중온도, 풍향, 풍속, 습도, 기압, 일사량등을 측정할 수 있는 자동기상관측기가 설치될 예정이다.

그림 7은 시험도로의 횡단면도를 나타내고 있으며 시험도로 건설의 추진일정은 본선구간의 추진일정에 맞추어 계획되어 있고, 시험도로의 완공은 본선구간의 완공시기인 2002년 12월로 예정되어 있다.

5.2 동결심도계 매설

동결심도계는 지반의 동결과 융해를 알아보기 위한 것으로 원통형의 probe로 장착되어져 있는 conductors 사이의 전기적 저항을 측정한다.

본 연구에서는 중부내륙고속도로 제 1공구에 2001년 12월 3일에 온도계와 함께 매설하여 12월 18일, 19일에 걸쳐 측정하였다.

동결심도측정을 위한 매설방법은 다음과 같은 방법으로 수행하였다.

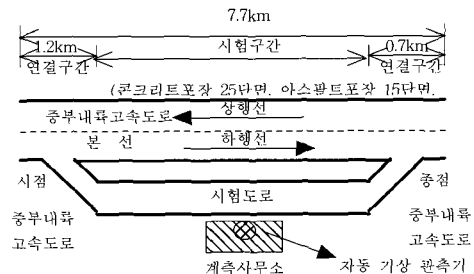


그림 6. 시험도로 평면도

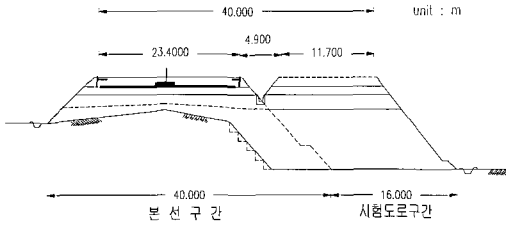


그림 7. 시험도로 횡단면도

- (1) probe의 직경보다 좀더 크게(15cm정도) 적정한 깊이로 구멍을 뚫는다.
- (2) 구멍으로부터 readout station까지 리드 선을 놓기 위한 도랑을 판다.
- (3) 구멍에 probe를 삽입한다. probe의 윗부분은 지면으로부터 적어도 6in(15.24cm)정도 아래로 되게 덮는 것이 필수적이다. 만약 probe가 표면 위로 붙쑥 나온다면 표면에 눈이 녹고 비가 올 경우 probe와 지반사이에 물이 들어올 것이고 측정이 제대로 이루어질 수 없다.
- (4) 표면으로부터 probe의 윗부분까지의 깊이를 측정한다.
- (5) 천공과정 동안에 제거된 노상토를 사용하여 구멍을 다시 메운다. 여기서 다시 채워지는 재료가 probe의 sensor ring 부분과 접촉이 되는지를 확인하는 것이 중요하다. 만약 필요하다면 작은 막대 등으로 재료가 다시 채워지는 동안 여러층으로 나누어 다져서 probe와 지반간의 전기적 접촉을 원활하도록 유도한다.
- (6) 도랑에 케이블을 놓고 다시 메운다. 주의할 점은 케이블 설치시 케이블에 손상이 가지 않도록 해야한다. 케이블에 손상이 가면 제대로 된 결과를 추정할 수가 없기 때문이다. 이 케이블은 따뜻한 날씨동안에 설치되어야 한다. PVC 보호관은 혹독한 추위에 부서지기 쉽고 취급하는데 있어 손상이 야기

될 수 있다.

- (7) probe의 설치는 초기치 데이터를 얻기 위해 지반이 얼기 전에 매설해야한다. 즉, 지반이 동결되기 전에 지반이 안정되는 충분한 시간을 가져야 한다.

다음의 그림 8~15는 중부내륙고속도로 제 1공구에서 시행한 동결심도계 매설사진을 나타낸 것이다.

5.3 동결심도계를 이용한 동결여부의 측정

동결심도계는 지반의 동결여부를 알아보기 위한 것으로 원통형의 probe에 모두 36개의 전극이 장착되어져 있으며 이들 사이의 저항률(resistivity)를 측정하여 해당 토질에 대

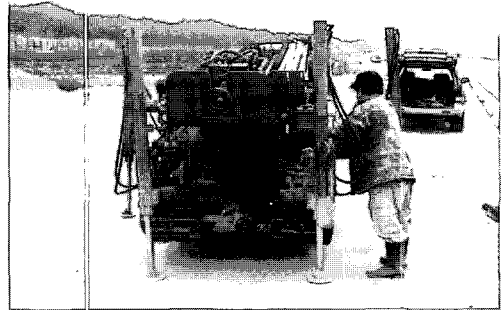


그림 8. 보링장비 설치 1

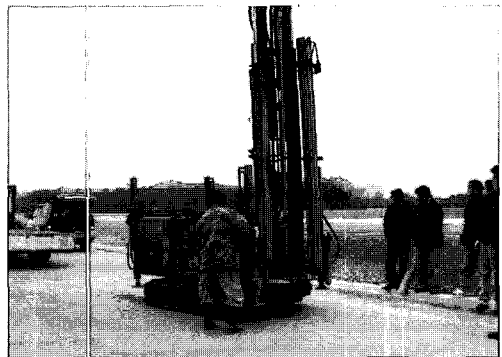


그림 9. 보링장비 설치 2

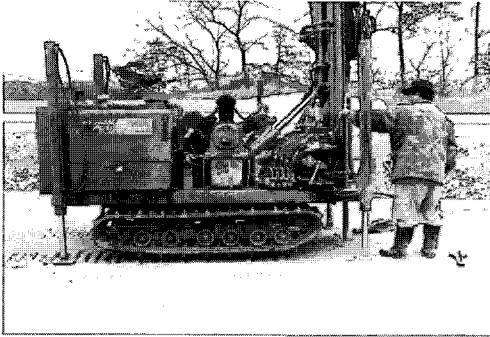


그림 10. 보링 위치 잡기

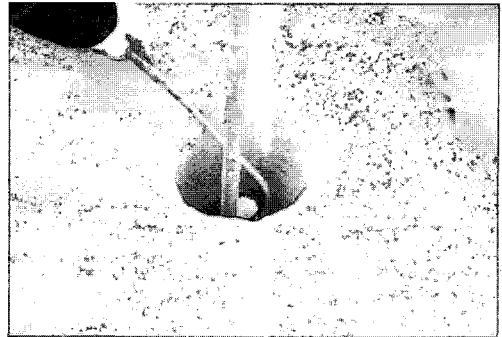


그림 13. 흙을 채운 후 다지는 장면

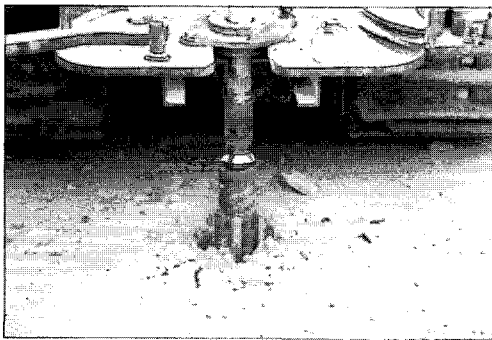


그림 11. 보링장면

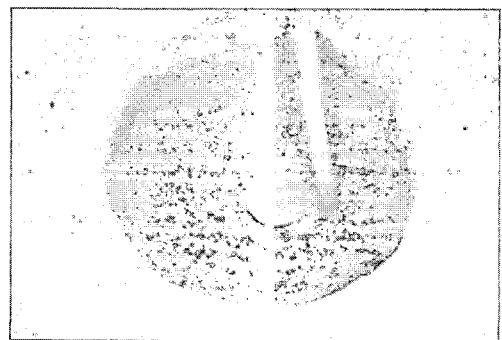


그림 14. 매설후 동결심도계

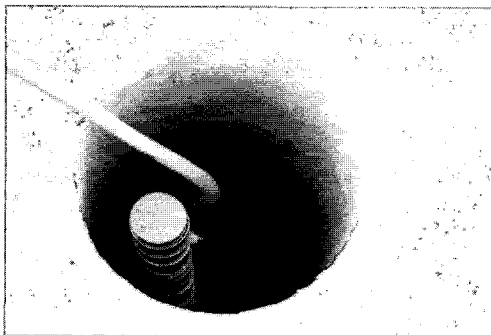


그림 12. 동결심도계 매설

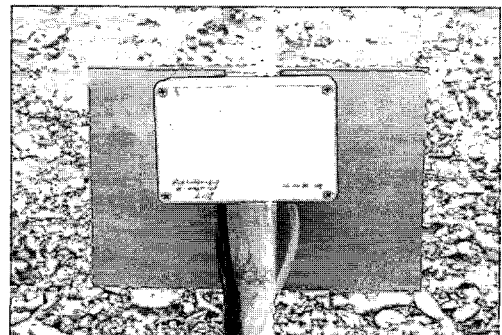


그림 15. 데이터 수집함 설치

하여 일정 저항률값 이상이 나오면 ice lens 가 형성되어 있음을 의미하는 것이다. 시험도 로에서는 미국의 LTPP Seasonal Monitoring Program에서 적용된 계측시스템과 유사하게

본 동결심도계 뿐만 아니라 온도계 및 함수 계를 함께 설치하여 노상의 동결 및 그에 따 른 포장파손을 정밀하게 조사할 것이다.

그림 16은 동결심도계와 온도계를 이용하

여 동결여부를 결정하는 과정을 개념적으로 보여 주고 있다. 그림에서도 나타나듯이 동결심도의 측정은 단순히 포장하부구조의 온도가 0°C 미만인가만을 가지고 할 것이 아니라 동결심도계를 이용하여 실제로 ice lens가 발생했는지 여부를 함께 고려하여야 할 것이다. 즉, 온도조건이외에 노상의 함수조건 및 해당 노상토의 동결민감성까지 함께 고려될 때 포장설계에서 필요로 하는 진정한 의미의 동결심도추정이 가능할 것으로 판단된다.

VI. 향후추진계획

흙의 동결토와 동결융해토의 역학특성에 대해 외국문헌을 조사분석하고 동결심도이론과 동결심도 추정방법에 대하여 고찰하였다. 동결심도는 포장두께설계에 영향을 미치는 만큼 동결심도의 산정은 매우 중요하다고 할 수 있다. 현재 여러 동결심도 산정방법이 제시되어 있으나 국내 기후환경여건에 적합한 동결심도 산정모델을 개발하여야 한다.

지금의 기후여건은 국내는 물론이고 지구 전체적으로 온난화현상이 진행되고 있다. 지구 온난화현상은 산업화현상에 따른 오존층의 파괴에서 비롯되는 것으로 풀이된다. 전세계적으로 이에 대한 문제점을 인식하고 기후협약을 맺어 이산화탄소의 배출을 규제하고 있다.

그렇지만 이러한 대책을 세운다고 하여도 지구 온난화를 지연시킬수는 있으나 이전의 기후여건으로 돌아가기는 어려울 것이다.

따라서 과거에 적용하였던 동결지수선도는 현재의 기후변화추세에 맞추어 개정하는 것이 바람직하므로 이에 대한 연구가 진행중이다. 새로 개정되는 동결지수선도로써 포장두께설계를 하면 동결심도가 감소되어, 그만큼 동상방지층의 두께가 감소되므로 도로건설 공

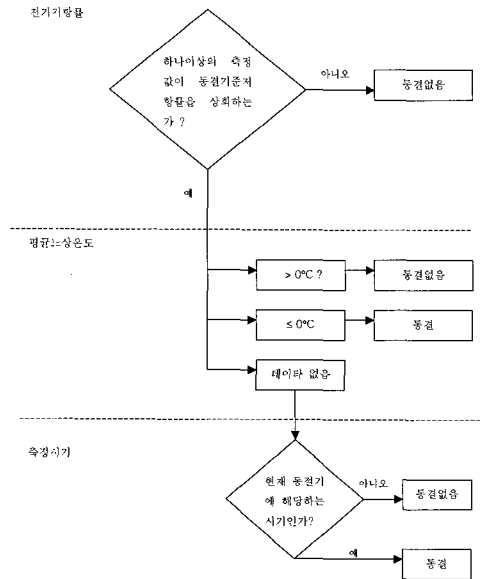


그림16. 동결심도계 및 온도계 이용한 동결여부 결정 순서도

사비 예산의 절감이 기대된다고 할 수 있다.

참고문헌

1. 土質工學會, '土の凍結', 1989.
2. Yuxiang & Wang Changsheng, 'Ground Freezing 92', A. A. BALKEMA, ROTTERDAM/BROOKFIELD, 1992.
3. 국립건설연구소, '우리나라 각 지방의 동결깊이 조사보고서', No.401, 1980
4. 안상진, 백영식, "우리나라의 동결지수와 동결심도에 관한 연구", 대한토목학회지 제 18권 제4호, 1971.
5. 건설부 도로국 도로조사단, '동결지수에 관한 조사보고서', 1980.
6. 건설기술연구원, '동토지역 기초구조물의 최적설계 시공기 145법 개발 연구', 1993.
7. E. J. Yoder, M. W. Witzczak, 'Principles of Pavement Design', Wiley Interscience, 1975
8. Argue, G. H. and Deney, B. B. 'Estimating the Depth of pavement Frost and Thaw Penetration', Transportation Research Record, 1974.
9. Phuken, A., 'The Frost Penetration problem in highway Engineering, Rutgers University Press', 1955.