

충격공진시험을 이용한 국내 노상토의 함수비 변화에 대한 동결·융해에 따른 강성도 변화 측정

Stiffness change measurement for subgrade soils of changing water content at
freezing and thawing using impact resonance test

이재환* · 권기철**

Lee, Jaehoan · Kweon, Kichul

1. 서론

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승한다. 이와 같은 조건에서 국내도로의 동결심도를 고려한 설계는 1970년대에 시작하였다. 결계개발 5개년 계획 하에 건설을 할 때 건설부 도로조사단의 외국기술자들에 의해서 동결지수 선도를 발표하였다. 이 자료를 기초로 일본의 데라다가 발표한 동결심도 계산식을 사용하여 동결심도를 산정하였다.

1980년 30여년간의 기상자료를 토대로 동결지수와 동결지수선도를 발표하였으며 이를 사용하여 데라다공식으로 동결심도를 산정하다가 1980년대 후반에 IBRD차관 도로 건설시에 배운 미공병단교범의 동결심도 산정을 도로설계에 사용하기 시작하였다. 또한 동결심도산정식을 국내 실측자료를 이용하여 초기에는 데라다공식으로 수정했으며, 1990년에는 상관식을 발표하였지만 많은 문제점을 가지고 있다. 국내에서 도로포장두께를 설계할 때 공사구간에 대한 동결지수를 구하고 도로의 계획고에 의한 수정동결지수를 산정한다. 또한 설계 교통량에 의한 포장의 소요 구조 두께를 산정한, 포장의 소요구조두께가 동결심도내에 위치하면 동결심도만큼 동상방지층을 사용한다.

그러나, 도로는 다양한 재료와 단면으로 구성된 구조물이기 때문에 계절적 및 재료적 물성특성 뿐만 아니라 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력 정도를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재, 기존 동상방지층 설계법에 따르면, 동상방지층은 포장체의 구조적 적정성과는 무관하게 온도조건에 따른 동결깊이에 따라 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용하다 보니 포장설계의 부실 내지는 과다설계의 우려가 있다.

본 논문에서는 위와 같은 포장구조 설계의 문제점에 대하여 노상토의 동결·융해과정에서 강성도 변화를 시료의 함수비 변화에 따라 측정하고 분석해 보았다. 더 나아가 기온의 변화에 따른 강성도 변화를 동결지수 또는 열전도율과 연계하여 실제 도로설계에서 적용가능성까지 확인해보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 충격공진시험

충격공진시험은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 조건에서의 탄성과전달이론에 근거하여, 시편에 발생시킨 응력파(압축파 또는 전단파)에 대한 공진특성으로부터 미소변형률 영역의 Young계수와 전

* 동의대학교 토목공학과 박사과정 · 051-890-1968(E-mail : dkrehd072@nate.com)

** 동의대학교 토목공학과 정교수 · 051-890-1617(E-mail : gckweon@deu.ac.kr)

단탄성계수를 결정할 수 있고, 아울러 포아송비도 결정할 수 있는 동적인 시험방법이다.

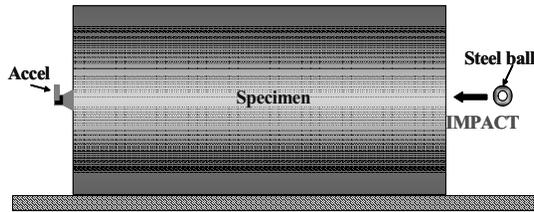


그림 1. 충격공진시험의 시료 거치 형상

시편은 그림 1에서와 같이 항온챔버에서 시험을 수행해야하는 특성상 항온챔버의 바닥에 수평으로 놓아두고 그 상태에서 한쪽은 가속도계를 다른 쪽은 쇠구슬로 신호를 발생시켰다.

충격공진시험 결과의 대표적 일례는 그림 2와 같이 주파수반응곡선을 얻게 되고 이로부터 탄성계수와 감쇠비를 결정한다. Sun(1993) 및 Vaghela 등(1995)의 연구에 따르면 시료의 길이가 직경의 2배 이상인 경우에 압축파와 전단파에 의한 1차 모드의 공진주파수(f_1)를 신뢰성있게 결정할 수 있다.

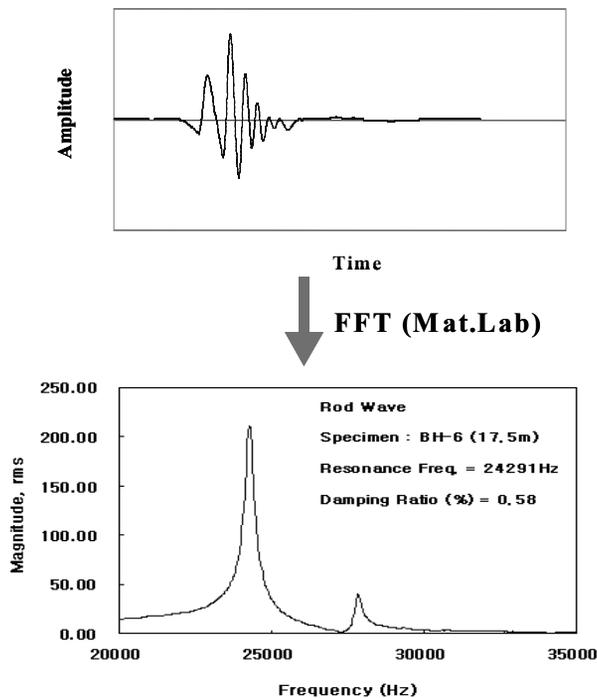


그림 2. 자유단공진주시험 결과의 대표적 일례

단부가 구속되지 않고, end cap이 없는 경우, 측정된 1차 모드의 공진주파수로부터 압축파속도(V_c)는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$V_c = f_1 \cdot \lambda \quad (1)$$

여기서, f_1 : 1차 모드 공진주파수

λ : 파장길이 = 시료길이의 2배 (1차모드의 경우)

충격공진시험에서는 구속응력 재하장치, 가진장치 및 감지기 설치를 위해 end cap과 멤브레인, 가속도계, O-ring, 전단과 발생장치가 시료의 양 단부에 추가질량으로 작용하게 된다. 이러한 경계조건을 고려하기 위하여 식 (2)와 같이 보정계수 β (correction factor)를 적용한다(Vaghela 등, 1995).

$$V = 2\pi \cdot f_r \cdot \frac{L}{\beta} \tag{2}$$

여기서, f_r : 측정된 1차 모드의 공진주파수
 β : 보정계수
 V : 시편 내 파의 전파속도
 L : 시편의 길이

식 (2)에서 보정계수, β 는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\tan\beta = \frac{(\mu_1 + \mu_2)\beta}{\mu_1\mu_2\beta^2 - 1} \tag{3}$$

식 (3)에서 압축파 유발시 μ_1 , μ_2 는 식 (4)로, 전단파 유발시 μ_1 , μ_2 는 식 (5)로 정의된다.

$$\mu_1 = \frac{M_1}{M_0} \quad , \quad \mu_2 = \frac{M_2}{M_0} \tag{4}$$

여기서, M_0 : 시편의 질량
 M_1 : 자유단 한쪽의 추가 질량
 M_2 : 또 다른 자유단 쪽의 추가 질량

$$\mu_1 = \frac{I_1}{I_0} \quad , \quad \mu_2 = \frac{I_2}{I_0} \tag{5}$$

여기서, I_0 : 시편의 질량관성모멘트
 I_1 : 자유단 한쪽의 추가질량체의 질량관성모멘트
 I_2 : 또 다른 자유단 쪽의 추가질량체의 질량관성모멘트

식 (3)에서 $\mu_1=0$, $\mu_2=0$ 인 경우는 자유단-자유단 조건이 되고, $\mu_2=\infty$ 이면 (고정단) - (자유단 + 추가질량) 조건으로 공진주파수와 동일한 경계조건이 성립한다.

충격공진시험이 수행되는 변형률 크기를 실험적으로 측정하는 것은 불가능하여 시험이 수행되는 정확한 변형률 크기를 알 수 없다. 그러나 충격공진시험과 같은 탄성파시험 기법에서 사용하는 탄성파의 크기는 매우 작기 때문에 시편이 경험하는 변형률 크기는 선형한계변형률 이하의 매우 작은 변형률 크기 범위에 있다. 한편, 선형한계변형률 이하의 변형률 크기에서는 탄성계수가 일정한, 즉 최대탄성계수를 갖게 된다. 따라서 충격공진시험이 수행되는 변형률 크기는 선형한계 변형률 이하의 어느 크기로 가정하여도 무방하다.

2.2 OMC 변화에 따른 충격공진시험

OMC 변화에 따른 시편의 동결융해동안의 강성도 변화 과정을 측정하기 위하여 추가질량체와 멤브레인,

O-ring을 이용하여 시편에 진공압을 재하하고, 시험의 특성상 동결·융해과정을 측정해야하므로 시편을 그림 3에서와 같이 항온챔버내의 챔버바닥에 수평으로 거치하여 시험을 실시하였다.



그림 3. 시편거치 및 시험 모습

시험장비의 재원으로는 충격하중원은 쇠구슬을, 이때의 반응은 PCB 353B15 가속도계와 PCB 480E09 신호안정기를 사용하였으며, 신호 획득은 GRAPHTEC WR1000, 신호영역 신호를 주파수영역으로의 전환과 공진 주파수 및 감쇠비의 결정은 Mat .Lab 으로 제작한 프로그램을 이용하였다.

아직 시험이 시작하는 단계이므로 한 개의 시료로 국한하여 실시하였으며 00현장의 노상토를 직경이 100mm, 높이는 200mm로 5층 봉다짐으로 시편을 제작하였고(그림 4(a)), 시편조건은 다짐도 95%로 동일한 상태에서 함수비를 OMC와 OMC±2%의 조건을 3가지로 달리하여 시험을 실시하였다. 시편의 양쪽 단부에 석고처리를 하여 단부에 Cap을 설치하였고, 이때 구속응력 재하를 위하여, 그림 4(b)와 같이 멤브레인도 설치하여 시편을 세팅하였다. 본격적인 시험에 앞서 석고양생을 위하여 구속응력은 최초 진공으로 21Kpa로 재하하여 1시간이상 대기하였다.



(a) 시편성형과정



(b) 가속도계 설치 및 시편 세팅

그림 4. 시험 준비 과정

동결·융해에 따른 충격공진시험을 위하여 항온챔버에서 -10°C 에서 10시간을 동결하는 과정에서 정해진 시간 단위로 강성도의 변화를 측정하였고, 10시간 후 $+20^{\circ}\text{C}$ 로 10시간동안 융해과정을 정해진 시간 단위로 측정하였다.

3. 시험결과

본 시험의 결과는 그림 5와 같이 초기에서의 공진주파수는 OMC+2%의 시편이 가장 강성도가 낮고, OMC-2%의 시편이 강성도가 높게 나타난다. 즉, 함수비가 낮으면 초기 강성도가 높게 나타나는 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 간극사이의 수분이 파의 전파를 교란하는 것으로 생각되어 진다.

그림 5에서 기울기는 동결속도를 나타낸다. OMC+2%의 시편의 동결속도가 OMC-2%의 시편의 동결속도보다 완만한게 나타난다. 즉, 함수비가 높으면 동결속도가 느려지는 특성을 나타내고 있다. 수분이 많으면 수분이 얼기 위한 잠열의 시간이 늘어나므로 함수비가 높으면 동결속도가 느리게 나타난다고 생각되어 진다.

한 가지 특이한 점은 동결이 완료되었을 때의 강성도는 OMC+2%가 가장 높게 나타나고 OMC-2%에서 가장 작게 나타내는 동결전의 초기 강성도에서의 특성과 역전되는 현상이 나타났다. 이것은 간극사이의 수분이 동결되면서 간극을 채우면서 파의 전달을 더 용이하게 하는 현상에서 나타났다고 생각된다. 그리고 용해 시 다시 초기와 같은 강성도의 특성을 나타냈다.

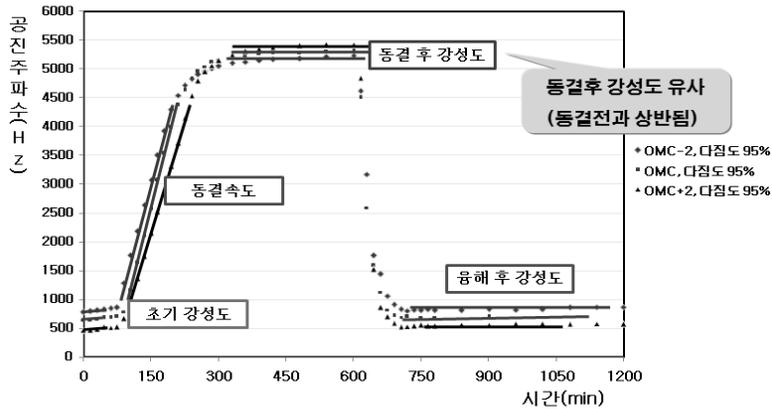


그림 5. OMC 변화에 따른 동결·용해 결과

4. 결론

본 연구에서는 노상토 시편에 대한 동결·용해에 따른 강성도 변화를 정해진 시간에 따라 측정하였으며, 노상토의 시편을 OMC 즉, 함수비의 변화에 따른 조건을 달리하여 시험을 수행하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수분이 간극사이의 파의 전파를 방해하므로 함수비가 낮으면 초기 강성도가 높게 나타나는 경향을 나타낸다고 생각된다.
- (2) 동결속도의 차이는 간극사이의 수분에 의한 동결시간의 차이라고 생각되며, 함수비가 높은 시편의 동결속도가 함수비가 낮은 시편의 동결속도보다 느리게 나타났다고 사료된다.
- (3) 간극사이의 수분이 동결되면서 간극을 채우면서 파의 전달을 더 용이하게 하는 현상에서 나타나서 동결완료 시 강성도는 함수비가 높을수록 크게 나타나는 것으로 생각된다.

본 연구의 결과를 통해서 흙의 동결에서 동결 전의 강성도, 동결속도, 동결 완료 후의 강성도 마지막으로 용해 후의 강성도까지 함수비의 영향이 아주 크게 나타나는 것으로 사료된다. 이런 영향을 입증하기 위해 다짐도 변화에 따른 추가적인 시험이 필요하다고 생각되어지고, 더 나아가 더 많은 연구가 이루어진다면 동결 지수나 열전도율과 연계한 실제 도로설계에 적용까지 가능하다고 생각되어 진다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 “도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치기준 연구”의 과제 일환으로 작성되었습니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2006), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, KPRP-G-06.
2. 김동수, 박형춘, 이광명 (1997) “충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사”, 한국콘크리트학회 논문집, 9권, 2호, pp. 109-119.
3. 오세봉, 권기철, 정순용, 김동수 (2000), “미소변형률 및 대변형률 조건의 거동에 대한 비등방경화 탄소성 구성모델” 한국지반공학회, 제16권, 제1호, pp. 65-73.
4. Jovicic, V., and Coop, M. R. (1997). “Interpretation of bender element tests.” *Geotechnique*, 47(3), 875.
5. Kim D. S., Kweon G. C. and Lee K. H. (1997), “Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Using Free-Free Resonant Column Test”, *Transportation Research Board* 1557, pp.62-69.
6. Kweon G. C. and Kim Y. R. (2006) “Determination of Asphalt Concrete Complex Modulus with Impact Resonance Test,” *Transportation Research Record* 1970, pp. 151-160.
7. Meng, F.Y. *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. Ph.D. Dissertation,
8. Vaghela, J. G. and Stokoe II, K. H. (1995), “Small-Strain Dynamic Properties of Dry Sand from the Free-Free Resonant Column,” *Geotechnical Engineering Report GT95-1*, Geotechnical Engineering Center, University of Texas at Austin.