

[논문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society
for Nondestructive Testing
 Vol. 20, No. 4 (2000. 8)

콘크리트 동결-융해 손상의 비파괴 평가를 위한 One-Sided 응력과 속도 측정기법의 적용에 관한 연구

Application of One-Sided Stress Wave Velocity Measurement Technique to Evaluate Freeze-Thaw Damage in Concrete

이준현*, 박원수**

Joon-Hyun Lee* and Won-Su Park**

초 록 동결-융해 피로로부터 발생하는 손상이 콘크리트의 열화 및 붕괴를 초래하는 중대한 문제가 된다는 것은 이미 널리 알려져 있다. 일반적으로 동결-융해 피로가 지속되면 콘크리트의 미시조직에 내부응력과 크랙을 유발시킨다. 본 연구에서는 콘크리트에서의 동결-융해 손상을 평가하기 위해 종파와 표면파속도를 동시에 측정하는 one-sided 응력과 속도측정기법이라는 새로운 기법을 사용하였다. 상업용 시험장치를 이용하여 ASTM C666에 따라 제작된 400×350×100mm 크기의 콘크리트 시편에 동결-융해 손상을 발생시켰다. 1사이클은 온도변화를 -14에서 4℃로 하였고, 4~5시간이 소요되었다. 매 5사이클마다 one-sided 응력과 속도측정기법에 기초하여 종파 및 표면파속도를 측정하였다. 동결-융해 손상이 증가함에 따라 종파 및 표면파속도의 변화가 있었고 이것은 동결-융해 피로 손상과정을 보다 유효하게 나타낸다는 것을 입증하였다. 또한 one-sided 기법에 의해 측정된 종파속도의 변화를 투과법을 이용하여 측정된 결과와 비교하였다.

주요용어: 콘크리트, 동결융해, one-side 기법, 응력과 속도

Abstract It is well recognized that damage resulting from freeze-thaw cycles is a serious problem causing deterioration and degradation of concrete. In general, freeze-thaw cycles change the microstructure of the concrete ultimately leading to internal stresses and cracking. In this study, a new method for one-sided stress wave velocity measurement has been applied to evaluate freeze-thaw damage in concrete by monitoring the velocity change of longitudinal and surface waves. The freeze-thaw damage was induced in a 400×350×100mm concrete specimen in accordance with ASTM C666 using a commercial testing apparatus. A cycle consisted of a variation of the temperature from -14 to 4 degrees Celsius. A cycle takes 4-5 hours with approximately equal times devoted to freezing-thawing. Measurement of longitudinal and surface wave velocities based on one-sided stress wave velocity measurement technique was made every 5 freeze-thaw cycle. The variation of longitudinal and surface wave velocities due to increasing freeze-thaw damage is demonstrated and compared to determine which one is more effective to monitor freeze-thaw cyclic damage progress. The variation in longitudinal wave velocity measured by one-sided technique is also compared with that measured by the conventional through transmission technique.

Keywords: concrete, freeze-thaw, one-side technique, stress wave velocity

1. 서론

최근 국내에서 발생한 삼풍백화점 및 교량 붕괴사고 등과 같은 대형 구조물 붕괴사고들과 관련하여 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위한 안전관리 기술의 확보가 국가적으로 매우 중요한 연구과제로 대두하고 있다. 일반적으로 콘크리트 구조물은 구조물의 특성상 초기 또는 사용 중에 발생하는 부재 각 부분의 내부결함 및 손상도를 평가하는데 있어서 종래의 파괴적인 방법의 적용에 큰 제약을 받기 때문에 비파괴적 기술개발이 요구된다. 특히 콘크리트는 종래의 강(steel) 부재와는 달리 콘크리트 자체가 가지고 있는 복잡한 재료특성 때문에 종래의 강 부재에 적용한 기술들로서 부재 내부의 재료특성을 외부로부터 모니터링 하는 데는 많은 어려움이 있다. 지금까지 콘크리트의 비파괴검사 기술로는 슈미트햄머 등과 같은 표면경도 시험법[1-2], 레이더 및 적외선 등의 전자파를 이용한 방법[3-4], 초음파[5], 충격반향법(Impact echo)[6-7], 표면파기법(SASW)[8], 음향방출[9] 등의 탄성파를 이용한 기법 등 다양한 방법들이 이용되고 있으나 이들 각 방법들의 장단점 및 적용상의 한계점 등으로 인하여 목적에 맞는 적절한 방법의 선택이 매우 중요하다. 한편, 탄성파를 이용한 one-sided technique은 주로 콘크리트 포장도로와 같은 검사대상체의 한쪽면 만이 접근 가능한 콘크리트 구조물의 비파괴 평가를 위해 종파와 표면파를 동시에 측정하는 방법으로 일반적인 초음파 기법과는 달리 비교적 검사 대상체가 크고 두꺼우며 넓은 구조물에 대하여 적용이 가능하며 검사대상면의 반대쪽으로는 접근이 용이치 않은 구조물 또는 검사 대상면 이외의 면의 형상이 불규칙하여 초음파 투과법이나 반사법을 적용할 수 없는 경우 one-sided technique은 한쪽면에서 비교적 신뢰성 높은 응력과 속도의 추정을 가능하게 한다. 특히 이 기법은 구조물의 한쪽면에서 종파(creeeping L-wave)와 표면파의 검출이 동시에 가능한 이점이 있어 콘크리트 구조물에 존재하는 표면 근처의 결함 및 내부 손상도를 평가하는데 매우 유익한 수단으로 보고되고 있다[10-12]. 한편 콘크리트 구조물들은 자연환경 상태하의 온도차에 의한 동결, 융해에 의한 반복적인 열피로 손상을 받게 되며 이로 인하여 콘크리트 내부에서 모세관 기공(capillary pore) 및 이로 인한 응력집중에 기인하여 발생하는 내부균열의 발생 및 성장으로 인하여 콘크리트의 현저한 강도특성 저하를 유발시게 되며 따라서 최근 콘크리트의 동결, 융해에 의한 비파괴 손상평가 기술의 필요성이 강하게 대두되고 있다.

본 논문에서는 one-sided technique을 이용하여 콘크리트의 동결, 융해에 의한 피로 손상도의 비파괴평가 적용 가능성에 대하여 연구하였으며 특히 이들 결과들을 종래 콘크리트의 비파괴평가에 일반적으로 많이 이용되고 있는 초음파 투과법의 결과와 비교 검토함으로써 그 유용성을 검토하였다. 나아가 one-sided technique에 의한 동결, 융해에 의한 피로 손상도 평가에 있어서 종파와 표면파 중 어느 탄성파 모드(mode)가 효과적인가에 대하여도 고찰하였다.

2. One-Sided Technique의 기본원리 및 신호처리 기술

2.1. One-Sided Technique의 기본원리

일반적으로 탄성체에 충격력이 작용하면 탄성체 내부에는 Fig. 1과 같이 원주형파(cylindrical wave)가 표면을 따라 종파, 횡파, 표면파 성분을 가지고 전파되며, 또 탄성체 내부로는 종파, 횡파 성분을 가지는 구형파(spherical wave)가 전파하게 된다. 따라서 one-sided technique에서는 표면을 따라 전파하는 원주형파의 수직변위 즉, 크리핑 L-wave 및 표면파를 센서로 검출하게 된다. 한편 표면을 따라 전파되는 종파는 충격점으로부터의 거리 r 에 대하여 $\frac{1}{r}$ 에 비례하여 빠르게 감쇠되지만 표면파는 $\frac{1}{\sqrt{r}}$ 에 비례하여 감쇠함으로서 보다 먼 거리에 에너지 손실이 적게 전파하게 된다.

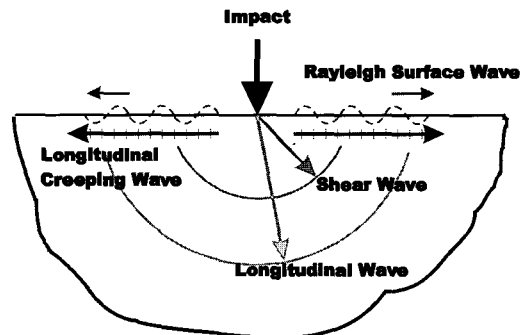


Fig. 1 The wave mode characteristics generated by impact

Fig. 2는 동결, 융해 사이클이 5 사이클 지난 후의 콘크리트 시험편에서 측정된 파형을 나타낸 것으로 측정 파형에서 첫 번째의 미약한 교란은 종파의 도착에 의한

것이며 종파 도착 후 따라오는 파형의 첫 번째 큰 (+)의 피크는 표면파에 의한 것이다. 따라서 수신파형에서 두 수신센서 사이의 종파와 표면파의 전파시간(flight time), $\Delta t_{L,R}$ 을 측정하고 알고있는 수신센서 사이의 거리, X를 이용함으로써 종파와 표면파 속도가 다음 식에 의해 결정된다.

$$V_{L,R} = \frac{X}{\Delta t_{L,R}} \quad (1)$$

여기서, 첨자 L은 종파, R은 표면파를 나타낸다.

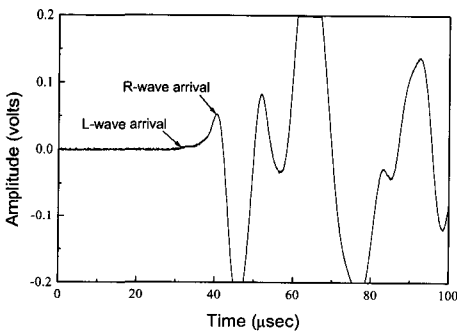


Fig. 2 Typical example of waveform obtained by one-sided measurement technique (after 5 cycles)

2.2. Labwindow를 이용한 자동화된 신호처리

본 연구에서는 슬레노이드 충격봉의 충격에 의해 발생, 전파되어 두 수신센서에서 수신된 신호들에서 종파속도와 표면파속도를 동시에 계산하기 위한 신호처리 및 전체 해석과정을 자동화하여 개발된 Labwindow에 기초한 컴퓨터 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 one-sided technique의 충격에 의해 물체의 표면에서 발생하는 응력파의 속도 계산 및 그 신호처리과정을 컴퓨터 모니터 상에서 자동적으로 보여주도록 설계되어 있다. 표면을 따라 전파되는 종파는 표면파에 비해 매우 작은 에너지를 가지고 전파되기 때문에 수신센서에 수신된 신호에서 진폭을 확인하기가 쉽지 않다. 따라서 보다 분명한 신호를 얻기 위한 방법으로 10개의 개별적인 시간영역 신호를 발생시킨 후 컴퓨터 프로그램 상에서 적절한 신호처리를 한다.

신호는 슬레노이드 충격봉의 시편 표면상에서의 충격에 의해 발생되고 시편의 표면을 따라 전파한다. 높은 해상도를 얻기 위해, 각각의 숫자화된 신호가 0.01μs의 최대 샘플링 시간 구간(sampling time interval)으로 8192 포인트를 구성하도록 취해진다. 충격점에 보다 가까운 수신센서(receiver 1)와 보다 먼 곳의 수신센서(receiver 2)로부터 신호들이 디지털 오실로스코프로 보내지고 디지털 오실로스코프상에서 일관되게 발생하는 신호들은 데이터 전송장치(GPIB interface)를 거쳐 컴퓨터로 전송된다. 수신센서로부터 수신되어 컴퓨터로 입력된 신호들은 10개의 신호들을 중첩하여 모니터 상에 보여준다. 각 파형에서 일관되지 않은 잡음 레벨을 줄이고 신호의 S/N비(signal to noise ratio)를 향상시키기 위해 10개의 신호 모두를 일반적인 신호형태의 평균 시간값(첫번째 (+)의 피크)에 관한 시간축을 따라 이동시키고 합한다. 이러한 신호들의 이동과 합하는 과정에서 각 신호들의 첫 번째 (+) 피크의 도착시간을 일치시키기 위해 각 채널에 대해 허용할 수 있는 시간영역은 사용자에게 의해 입력된다. 그 후 두 수신센서에서 수신된 10개의 모든 신호들의 첫 번째

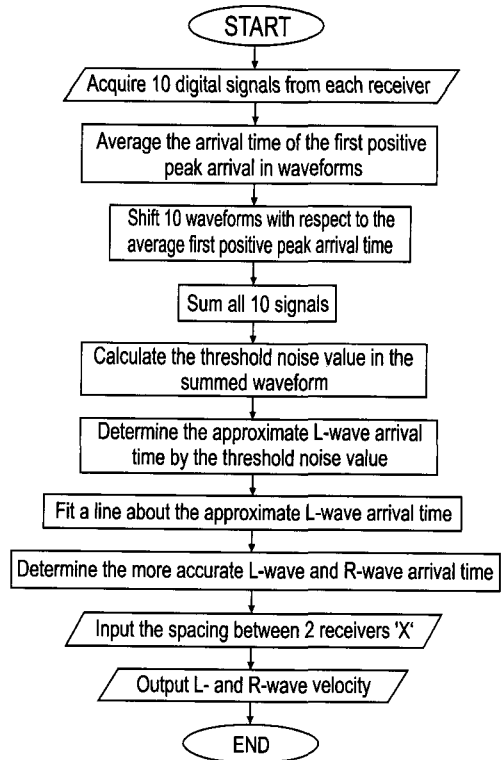


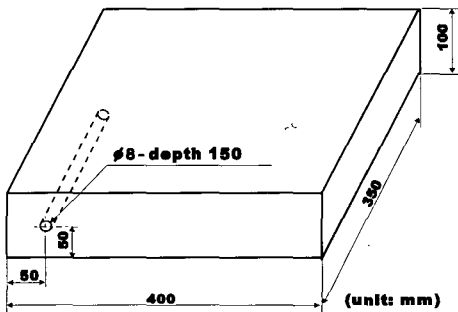
Fig. 3 The flowchart of computer program for automated data analysis

째 (+)의 큰 피크(표면파 신호)의 평균도착시간이 결정되고 모든 신호들이 첫 번째 (+) 피크의 이 평균도착시간으로 이동되어진다. 이 이동된 신호들은 그때 각 수신센서에 대해 하나의 합해진 신호를 만들기 위해 더해진다. 이때 합해진 신호들의 S/N비는 향상되게 되며 향상된 이들 신호들로부터 종파 도착시간을 보다 정확하게 계산하기 위한 조사 기법의 적용 및 이들 결과를 이용한 각각의 속도 측정이 이루어지게 된다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 자유화된 신호처리 프로그램의 전체과정을 나타내는 것으로 이에 관련된 보다 자세한 내용은 본 연구자의 논문[11]을 참조하기 바란다.

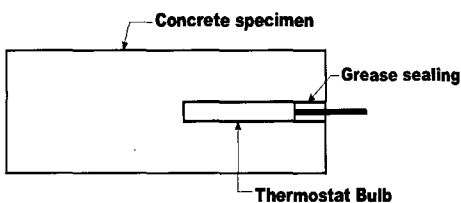
3. 재료 및 실험방법

3.1. 시편제작

본 연구에서 사용된 시편은 일반적으로 건설현장에서 널리 사용되는 포틀랜드 시멘트로 시멘트 : 모래 : 자갈 : 물이 1.8 : 3.6 : 6.5 : 1의 비율로 배합되어 있다. 또 시험편의 크기는 one-sided technique에서 발생하는 응력파의 전파시 가장자리 및 바닥면으로부터의 반사효과를



(a) Dimension of specimen



(b) Cross section of freeze-thaw control specimen

Fig. 4 Concrete specimen for freeze-thaw test

제거하기 위해 가로×세로×두께를 400×350×100mm로 제작하였다. 또 one-sided technique에 장애가 되지 않도록 하면서 시편 내부의 온도를 측정하기 위한 온도측정 센서를 삽입하기 위하여 시편 두께 방향의 중심에 드릴로 직경 8mm, 깊이 150mm의 구멍을 가공하였다. Fig. 4(a)는 실험에 사용된 시험편의 규격을 나타내고, Fig. 4(b)는 실험에서 freeze-thaw 과정의 온도 측정을 위해 시험편에 온도측정용 센서(thermostat)를 설치한 단면을 나타내고 있다.

3.2. 실험방법

3.2.1. 동결, 융해 피로시험

본 연구는 one-sided technique 및 초음파 투과법을 이용하여 동결, 융해 피로를 받고 있는 콘크리트 시편의 피로손상 정도를 비파괴적으로 평가하기 위한 것으로 콘크리트 동결, 융해 피로시험장치는 ASTM C666-84에 규정된 콘크리트의 동결, 융해 피로시험장치를 사용하였다. 본 시험장치는 콘크리트 시편을 동결시키기 위한 냉동장치, 융해시키기 위한 물(water) 공급장치, 시편의 온도 측정을 위한 센서, 동결, 융해 피로조건을 자동적으로 조정하기 위한 콘트롤러, 그리고 시편을 넣는 챔버 등으로 구성되어 있다. 한편 동결, 융해 피로조건은 챔버 내에서 콘크리트 시편을 공기중에서 -14℃까지 동결시키고 물속에서 +4℃까지 융해시키면서 1사이클을 완성하는 피로조건으로 실험을 진행하였다. 1사이클에 대한 동결시간은 210분이고 융해시간은 66분으로 하여 276분이 소요되었고 매 5사이클이 진행된 후 그 피로손상 정도를 측정하였다. Fig. 5에 동결, 융해 1사이클에 대한 시험 데이터를 나타내고 있다.

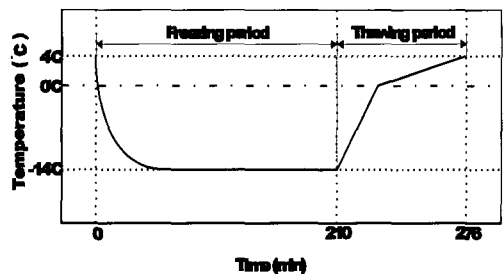


Fig. 5 Typical data record of 1 cycle from freeze-thaw apparatus

3.2.2. One-Sided Technique에 의한 탄성과 속도 측정

One-sided technique에 의한 콘크리트의 종파와 표면파 측정은 Fig. 6에 보여주는 측정시스템을 구축하여 실험을 행하였다. 본 측정장비는 공진주파수 80kHz, 해상도 3Hz~10kHz(±5%) 그리고 5.6mm의 직경을 가진 두 개의 가속도센서를 수신센서로 사용하며 수신센서와 시편 표면사이의 커플링 매개체로는 왁스를 사용하였고, 파형을 얻고 관찰하기 위해 디지털 오실로스코프를 사용하였다. 오실로스코프로 전송된 파형을 컴퓨터로 전송하기 위해 고속 데이터 전송기기(GPIB interface: AT-GPIB / TNT(PnP), 1.5Mbyte/s)를 사용하였다. push-type 12V 직류 솔레노이드가 충격 발생원으로 사용되었다. 솔레노이드의 충격봉의 공칭 축방향의 힘은 11N이다. 그러나 한번 친 후 충격봉을 원위치로 복귀시키기 위해 스프링이 솔레노이드의 충격봉에 부착되어 있어서, 솔레노이드의 실제 힘은 11N보다 작아진다. 충격봉의 직경은 2.4mm이고 실제 시편의 표면과 접하는 부분은 직경이 1.8mm이다. 한편 반복적인 동결, 융해 사이클에 대한 종파, 횡파속도 변화특성을 측정하기 위하여 매 5사이클마다 동결, 융해 피로시험장치에서 시편을 꺼낸 다음 one-sided technique에 의해 시편의 표면을 따라 전파하는 종파성분의 creeping wave의 속도와 표면파 속도를 동시에 측정하였으며 또 one-sided technique에 의해 측정된 콘크리트의 종파속도와 초음파 투과(through transmission)법에 의하여 구한 종파속도와 비교검토하였다. One-sided technique에 의한 종파 및 표면파 속도 측정은 충격 발생원과 두 수신센서 사이의 거리를 각각 50mm로 하여 시편 주변부의 영향을 피하기 위해 시편 중앙부위에서 Fig. 6과 같이 설치한 후 측정하였다.

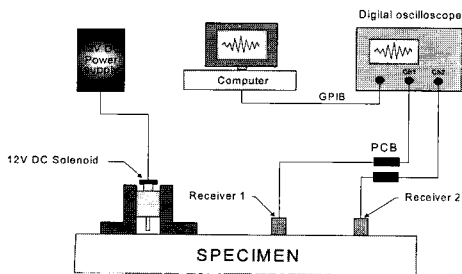


Fig. 6 Schematic diagram of experimental set-up

또한 초음파 투과법에 의한 종파속도 측정은 주파수 54kHz의 탐촉자 및 콘크리트용 초음파 측정장치(C.N.S. Electronics Ltd. PUNDIT)를 이용하였으며 측정위치는 콘크리트 시험편에서 4개 위치를 선정하여 각 속도를 측정한 후 측정치의 평균값을 종파속도로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

일반적으로 콘크리트 시험편이 동결, 융해 사이클을 받게 되면 동결, 융해의 피로를 받으면서 융해과정에서의 수분을 포집하면서 소량의 무게 변화를 나타내게 된다. 따라서 본 연구에서는 반복적인 동결, 융해 사이클의 증가에 따른 콘크리트 시편의 무게변화를 5g 단위로 측정할 수 있는 전자저울을 사용하여 측정하였다. Fig. 7은 동결, 융해 사이클의 증가에 따른 콘크리트 시편의 무게 변화를 나타낸 것으로 측정결과에서 보여주는 바와 같이 반복적인 동결, 융해 사이클의 증가와 더불어 콘크리트의 무게가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 콘크리트 시험편이 동결, 융해의 반복적인 피로를 받으면서 시험편 내부에 다수의 미소균열 등의 발생으로 인하여 수분을 포집할 수 있는 공간이 점점 증가하고 있다는 것을 보여주고 있으며 이는 피로손상의 진전에 따라 콘크리트 조직 사이에 변화가 일어나고 있음을 나타내고 있다. 한편, 이와같은 콘크리트의 동결, 융해손상에 대하여는 뒤의 Fig. 10의 시험편 내부의 전자현미경 관찰결과에서 보여준다.

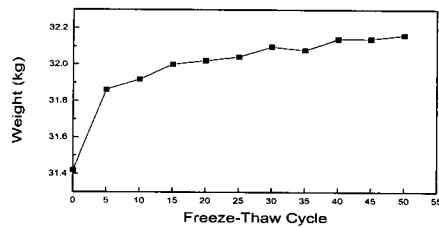


Fig. 7 The variation of the weight due to change to change of freeze-thaw cycle

Fig. 8은 one-sided technique에 의해 측정된 종파와 표면파의 속도 변화를 동결, 융해 사이클 수에 따라 나타낸 것으로 각 사이클 수의 변화에 따른 종파 및 표면파의 속도 변화를 동결, 융해 사이클이 작을수록 초기 콘크리트 시편의 종파, 표면파 속도값으로 무차원시켜 나

타내었다. Fig. 8의 실험결과에서 보여주는 바와 같이 종파 및 표면파 속도는 동결, 융해 사이클 수의 증가와 더불어 모두 감소하는 경향을 나타내고 있으면서, 특히 종파의 경우 표면파와 비교해 동결, 융해 사이클의 증가에 따른 속도 변화가 현저함을 보여주고 있다. 이는 콘크리트 시편에 있어서의 반복적인 동결, 융해 사이클의 증가에 따른 내부손상을 one-sided technique을 이용하여 비파괴적으로 평가하고자 할 경우 콘크리트 시편의 표면을 타고 진행되는 종파, 즉 creeping 종파의 속도 변화 측정이 매우 효과적임을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

일반적으로 콘크리트재료가 반복적인 동결, 융해 사이클을 받는 경우, 재료내부의 점진적 피로손상 발생 및 진전에 따라 초음파 속도는 점차적으로 감소하는 것으로 타 연구자의 연구결과[13-14]에서 보고되고 있다. 그러나 이들 연구의 대부분은 종래 일반적으로 사용되어온 종파를 이용한 초음파 투과법에 의한 측정 결과로서 이 측정 방법의 경우 동결, 융해 사이클에 대한 콘크리트 시험편 표면 또는 표면 직하에 주로 발생하는 초기 피로손상의 평가에는 민감하지 않은 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 one-sided technique에 의하여 콘크리트 시험편 표면 근처를 전파하는 creeping 종파의 유용성을 검증하기 위하여 이들 각 파들에 대한 동결, 융해 피로손상에 대한 민감도를 비교, 검토하였다.

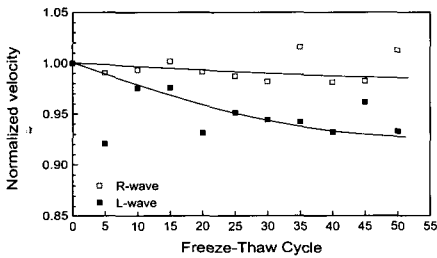


Fig. 8 Comparison of normalized velocity between longitudinal and surface wave velocities

Fig. 9는 one-sided technique에 의하여 측정된 종파 속도와 종래 많이 사용하여왔던 초음파 투과법에 의하여 측정된 종파속도값의 변화를 동결, 융해 사이클 수와의 관계로 나타낸 것으로 반복적인 동결, 융해 사이클의 증가와 더불어 콘크리트 시편에 점차적으로 증가하는 피로손상에 대한 종파속도값의 변화는 종래의 초음파 투과법에 의하여 측정된 결과보다 one-sided technique에 의하여 측정된 결과가 내부 피로손상도에 매우 민감하게

작용하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 one-sided technique에 의해 측정된 종파속도는 앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트 표면을 따라 전파하는 종파에 대한 속도 변화이기 때문에 동결, 융해 피로손상도와 같이 콘크리트 시편의 표면 및 표면 아래 부분에서 먼저 현저한 피로손상을 가지는 경우 시편의 표면을 따라 전파하는 종파가 매우 효과적으로 내부손상과 상호작용을 가지면서 전파함을 보여주고 있다.

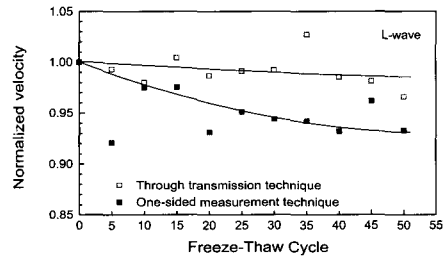
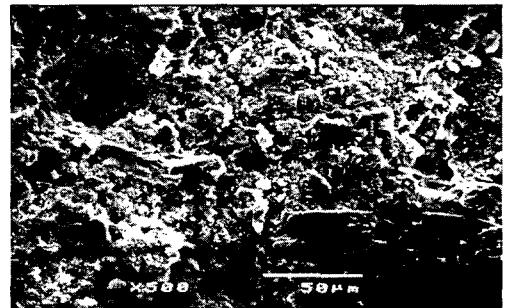
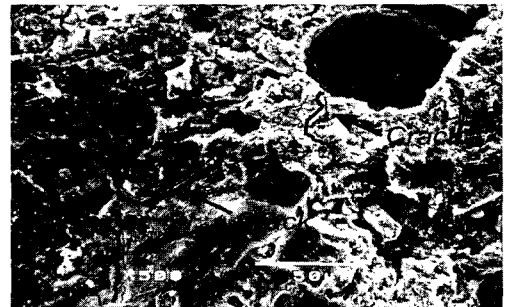


Fig. 9 Comparison of L-wave velocity change due to the increase of freeze-thaw cycles at two different techniques



(a) Undamaged



(b) After 50 freeze-thaw cycles

Fig. 10 SEM micrographs of concrete subjected to freeze-thaw cycling

Fig. 10은 콘크리트 시편의 동결, 융해 사이클 주기에 따른 콘크리트 시험편 내부의 피로 손상에 대한 주사전 자현미경 관찰결과를 나타내는 것으로 Fig. 10(a)의 동결, 융해 사이클을 받지 않은 시험편에 비해 Fig. 10(b)에서 보여주는 바와 같이 50사이클의 동결, 융해 사이클을 받은 콘크리트 시험편의 경우 이미 다수의 미소균열이 콘크리트 시편 내부에서 관찰됨을 알 수 있다. 즉 이와 같은 반복적인 동결, 융해 사이클의 증가에 기인한 피로손상은 앞의 Fig. 8, 9의 one-sided technique에 의한 종파, 표면파 속도변화특성에서 보여준 바와 같이 속도값의 감소를 가져오게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 one-sided technique에 의한 탄성과 종파, 표면파 속도 측정을 통하여 콘크리트의 동결, 융해 피로손상의 평가 가능성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 콘크리트의 동결, 융해 피로손상의 평가에는 one-sided technique에 의해 측정된 표면파 속도보다는 종파속도 변화가 매우 효과적임을 보여주었으며 특히 종래 콘크리트의 속도측정에 일반적으로 많이 이용되고 있는 초음파 투과법보다도 one-sided technique이 매우 효과적임을 알 수 있었다. 또 이와 같은 one-sided technique은 콘크리트 구조물에 있어서 한쪽면에서만 측정이 가능한 제약을 가지는 많은 구조물들에 매우 효과적으로 사용될 수 있어 앞으로 많은 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

[1] V. M. Malhotra, N. J. Carino, "Handbook of Non-destructive Testing of Concrete", CRC Press, (1991)
 [2] V. M. Malhotra, "In-situ/Nondestructive Testing of Concrete", ACI SP-82, (1984)
 [3] R. Gabillard, P. Degauque and James R. Wait, "Subsurface Electromagnetic Telecommunication", IEEE Transaction on Communication Technology, (1971)
 [4] Osumi N and Ueno K, "Microwave holographic imaging of underground objects", IEEE Transaction on Antennas & Propagation, AP-33, (1985)
 [5] J.H. Bungey, "The influence of reinforcement on ultrasonic pulse velocity testing", In situ/Nondestructive Testing of Concrete ACI SP82-12, (1984)

[6] Lin, J.M and Sansalone M, "Impact-Echo response of Hollow Cylinder Concrete Structures Surrounded by soil and rock", Geotechnical Testing Journal, Vol.7, No.2, pp. 207-226, (1994)
 [7] Lin Y. and Sansalone M, "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact Echo Method", ACI Material Journal, V.89, No.4, pp. 394-405, (1995)
 [8] Sansalone M. and N.J. Carino, "Stress Wave Propagation Methods", CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete(CRC Press, Boston, 1991) Chap. 12
 [9] 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 On-Line Monitoring", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, pp. 677-682, (1998)
 [10] 이준현, 송원준, J.S. Popovics, J.D. Achenbach, "콘크리트의 응력과 속도측정을 위한 One-Sided Technique 개발", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집 Vol. 9, No. 1, pp. 537-543, (1997)
 [11] 이준현, 송원준, J. S. Popovics, J. D. Achenbach, "콘크리트에서의 One-Sided 응력과 속도측정 기법의 적용에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 544-550, (1997)
 [12] J. S. Popovics, W. J. Song, J. H. Lee and J. D. Achenbach, "One-sided stress wave velocity measurement in concrete", J. of Eng. Mechanics, Vol. 124, No. 12, pp. 1346-1353, (1998)
 [13] Y. H. Kim, "Review of nondestructive testing methods for the concrete structures using elastic waves", Proc. of Safety & NDT '95', (Edited Joon-Hyun Lee et. al), pp. 67-86, (1995)
 [14] N. J. Carino, "Laboratory study of flaw detection in concrete by pulse-echo method", Proc. Int. Conf. on In Sita / Nondestructive Testing of Concrete, pp. 557-579, (1984)