

# 차원 축소된 표면파 투과 함수와 인공신경망을 이용한 콘크리트 구조물의 균열 깊이 평가 기법

## Dimensionality Reduced Wave Transmission Function and Neural Networks for Crack Depth Estimation in Concrete Structures

신 성 우†      윤 정 방\*

Shin, Sung-Woo      Yun, Chung-Bang

(논문접수일 : 2007년 3월 23일 ; 심사종료일 : 2007년 5월 18일)

### 요 지

현장에서 콘크리트 구조물의 균열 깊이를 추정하기 위한 자기 보정 표면파 투과 측정과 측정된 투과 함수의 차단주파수를 이용하는 기존의 방법은 측정 조건에 따른 투과 함수의 변동성이 매우 커서 실제로 적용하기가 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 차단주파수와 같이 특정 주파수를 선정하여 균열 깊이를 추정하는 방법 대신에 측정된 자기 보정 표면파 투과 함수 자체를 균열 깊이 추정에 이용하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 다양한 균열 깊이에서 측정된 자기 보정 표면파 투과 함수를 주성분 분석법을 이용하여 차원을 축소한 후, 축소된 투과 함수를 인공신경망의 입력으로 사용하여 이로부터 균열 깊이를 추정하는 방법을 제시 하였다. 한편, 제안된 방법의 유효성을 판단하기 위하여 서로 다른 균열 깊이를 가진 5개의 실험체에 대하여 실험적인 연구를 수행하였으며, 실험 결과 제안된 방법이 콘크리트 구조물이 균열 깊이 평가에 매우 유효한 방법임을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 균열 깊이, 자기보정 표면파 투과 기법, 주성분 분석, 인공신경망

### Abstract

Determination of crack depth in field using the self-calibrating surface wave transmission measurement and the cutting frequency in the transmission function (TRF) is very difficult due to variations of the measurement conditions. In this study, it is proposed to use the measured full TRF as a feature for crack depth assessment. A principal component analysis (PCA) is employed to generate a basis of the measured TRFs for various crack cases. The measured TRFs are represented by their projections onto the most significant principal components. Then artificial neural networks (NNs) using the PCA-compressed TRFs is applied to assess the crack in concrete. Experimental study is carried out for five different crack cases to investigate the effectiveness of the proposed method. Results reveal that the proposed method can be effectively used for the crack depth assessment of concrete structures.

**Keywords** : crack depth, self-calibrating surface wave transmission, principal component analysis, neural networks

### 1. 서 론

콘크리트의 균열은 구조물의 심각한 성능 저하와 파괴를 유발할 수 있으며, 따라서 이러한 균열 손상의 조기 탐지 및 평가, 보수는 구조물의 건전성을 확보함에 있어서 매우 중요

한 부분이다 (ACI Committee, 1982). 한편, 최근에 콘크리트 구조물의 수명 연장과 내구 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 (Metha, 1995), 이와 관련하여 구조물의 손상에 대한 정량적 평가 방법에 관한 연구가 큰 관심사가 되고 있다 (Popovics, 2004). 이에 따라 본 연

† 책임저자, 정회원 · 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터  
연수연구원, 공학박사

Tel: 042-869-8295 ; Fax: 042-869-8290

E-mail: shinsw@kaist.ac.kr

\* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, 공학박사

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시  
면 2007년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

구에서는 콘크리트 구조물에서의 균열 깊이를 정량적으로 추정하는 패턴인식적 접근 기법을 개발하고자 한다.

콘크리트에서의 균열 깊이를 비파괴적으로 측정하는 통상적인 방법은 초음파의 전달 시간차이를 측정하여 이로부터 균열 깊이를 추정하는 전파시간 기반의 방법(Time-of-flight of Diffracted Wave Method; TOFD)이 있으나(Su & Lin, 1996; Sansalone 등, 1998; Wu 등, 1995), 측정의 신뢰성이 높지 않아 현장에서는 거의 사용하지 않고 있는 실정이다. 한편, 최근에 자기 보정 기법을 이용한 표면파 투과법이 균열 깊이 측정을 위하여 개발되었으며(Hevin 등, 1998; Popovics 등, 2000; Song 등, 2003; Yang 등, 2005), 이 방법이 콘크리트에서의 균열 깊이 산정에 있어서 기존의 TOFD 방법보다 결과에 대한 정확성과 신뢰성이 높은 방법임이 입증되었다(Song 등, 1999). 표면파 투과법을 이용하여 콘크리트 균열 깊이를 산정하기 위한 앞선 연구들은 주로 자기보정 표면파 투과 함수의 특정한 계수 값에 해당하는 주파수를 선정하여 해당 주파수와 균열 깊이와의 상관 관계식을 구하고, 이를 이용하여 균열 깊이를 평가하는 방법을 사용하였다(Hevin 등, 1998; Popovics 등, 2000; Song 등, 2003). Hevin 등은 표면파 투과 함수를 측정하고 이 함수의 계수 값이 주파수에 따라 감소하게 될 때 감소가 끝나는 주파수를 차단 주파수(Cutting Frequency)라 정의하였으며, 차단 주파수를 이용하여 균열의 깊이를 산정하려고 하였다(Cutting Frequency Method). 즉, 실험체의 레일리파 속도를 측정하여 이를 차단 주파수로 나눈 후 파장을 구하고, 각 균열 깊이에 대한 차단 주파수의 파장과 실제 균열 깊이와의 상관 관계식을 도출하여 균열 깊이를 평가하고자 하였다. 한편, Scala & Bowles(2000)는 항공기에 사용되는 알루미늄 합금 블록의 표면 균열 깊이를 측정하기 위하여 표면파 투과함수의 계수가 급격하게 감소하는 부분을 선형 근사하고, 이 선형 근사된 직선이 주파수축과 만나는 점을 절단 주파수(Interceptor Frequency)로 정의한 후, 절단 주파수와 각 균열 깊이의 상관관계를 구하여 균열 평가에 이용하였다. 그러나 이와 같이 투과 계수의 특정한 주파수에서의 변화 특성을 이용하는 방법들은 균열과 관련된 주파수를 선정하기 위한 계수 값의 변화가 명확한 경우에만 적용할 수 있다는 단점이 있다. 즉, 측정된 표면파 투과 함수가 측정상의 오차나 잡음의 영향으로 오차가 포함되어 있을 경우에는 절단 주파수나 차단 주파수의 선정이 어렵거나 경우에 따라서는 불가능할 수도 있으며, 만약 선정이 가능하다고 하더라도 이를 이용하여 구한 균열의 깊이는 큰 오차를 수반하게 된다(신성우 등, 2007).

본 연구에서는 자기 보정 표면파 투과 함수의 특정 주파수

성분을 균열 깊이에 이용하는 앞선 방법과는 달리 측정된 투과 함수를 균열 깊이 평가에 직접 이용하는 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 측정된 표면파 투과 함수를 주성분 분석법(Principal Component Analysis; PCA)을 이용하여 투과 함수의 크기(차원)를 축소한 후, 축소된 투과 함수(주성분)를 인공 신경망의 입력으로 사용하여 이로부터 자동적으로 균열 깊이를 추정하는 방법이다. 이를 위하여 우선 제안된 방법의 이론적인 부분을 우선 살펴보고, 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위한 다양한 균열 깊이를 가진 콘크리트 실험체에 대한 실험 과정과 결과를 알아본 후, 결과 분석을 통하여 제안된 방법의 효용성을 알아보았다.

## 2. 균열 깊이 추정 기법

### 2.1 자기 보정 표면파 투과 측정법

실험을 통한 표면파의 투과 함수 측정은 그림 1과 같이, 점가진원에 의하여 생성된 파동을 균열 면을 기준으로 전방과 후방의 표면에 부착한 두 개의 센서를 통하여 계측하고 이를 주파수 영역에서 신호 처리 함으로써 얻을 수 있다. 그러나, 이 경우 센서와 구조체 사이에 상대적인 움직임 없이 일체로 거동할 경우에는 일관성 있는 결과를 얻을 수 있지만, 실제로는 센서와 구조체의 접촉상태에 따라 측정 결과에 변동이 있게 된다. Achenbach 등(1992)은 이를 해결하기 위하여 자기 보정 기법(Self-calibrating Technique)을 제안하였으며, 표면파 투과 함수 측정에 있어서 매우 유효한 방법임을 입증하였다. 이후에 이 기법은 Hevin 등(1998), Popovics 등(2000), Song 등(2003)에 의하여 콘크리트의 균열 문제로 확장 적용되었다.

센서들과 동일선상에 위치한 A점에 충격을 가하면 가진된 파동은 고체 내부와 표면을 따라 진행하여 가진 위치와 가까운 센서(B점)와 표면 균열을 거쳐 C점에 위치한 센서에서 탐지된다. A점에서 가진되어 B점에서 획득된 신호의 주파수

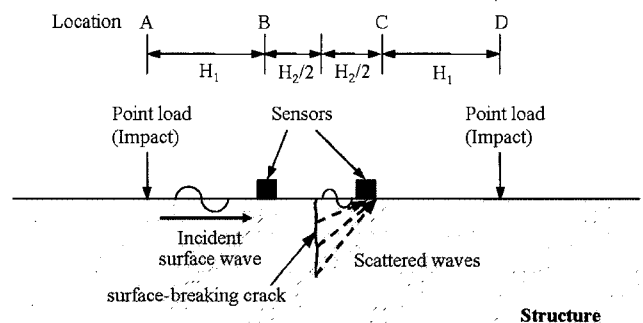


그림 1 자기 보정 표면파 투과 측정법 적용을 위한 실험 구성

영역 응답과 C 점에서의 응답은 다음과 같다.

$$Y_{AB}(f) = S_A(f)T_{AB}(f)R_B(f) \quad (1)$$

$$Y_{AC}(f) = S_A(f)T_{AB}(f)T_{BC}(f)R_C(f) \quad (2)$$

여기에서,  $Y_{AB}(f)$ 와  $Y_{AC}(f)$ 는 각각 B점과 C점에 위치한 센서로부터 획득된 파형의 푸리에 변환이며,  $S_A(f)$ 는 가진원에 의한 A점에서의 주파수 응답이고,  $R_B(f)$ 와  $R_C(f)$ 는 B점과 C점을 지나가는 파동을 각각의 점에 위치한 센서로 측정하였을 때의 센서의 주파수 응답이다.  $T_{AB}(f)$ 는 파동의 A점과 B점 사이에서의 투과함수(Transmission Function: TRF)이며, 마찬가지로  $T_{BC}$ 는 B점과 C점 사이의 TRF이다(Hevin 등, 1998; Popovics 등, 2000; Song 등, 2003).

한편, 식 (1)과 식 (2)에서의  $S$ 와  $R$ 은 각각 충격 가진원의 미지의 변동에 따른 효과와 센서의 종류와 구조체와의 미지의 접촉상태에 따른 효과를 포함하고 있으므로 이를 제거하고  $T_{BC}$ 만을 구하여야 한다. 이를 위해 동일한 충격 가진원을 이용하여 D점에서 가진하여 C점과 B점에서의  $Y_{DC}(f)$ 와  $Y_{DB}(f)$ 를 구하고,  $T_{BC}$ 와  $T_{CB}$ 를 대칭 조건을 적용하여  $T_{BC} = T_{CB}$ 로 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$|T_{BC}(f)| = \sqrt{|T_{BC}(f)T_{CB}(f)|} = \sqrt{\frac{Y_{AC}(f)Y_{DB}(f)}{Y_{AB}(f)Y_{DC}(f)}} \quad (3)$$

식 (3)은 신호의 강도, 접촉 상태, 거리 등에 대한 정보가 필요 없으므로 이러한 요인에 대한 추가적인 보정 과정이 필요하지 않기 때문에 자기보정(Self-calibrating)이라 한다.

## 2.2 차원 축소를 위한 주성분 분석 기법

주성분 분석 기법(Principal Component Analysis: PCA)  $k$ -차원의 데이터 집합을 주성분 (Principal Components: PCs)을 이용하여  $p$ -차원으로 근사화( $p < k$ )할 수 있는 유용한 기법이다. 본 연구에서는 측정된 TRF인  $T_{BC}(f)$ 를 신경망의 입력으로 사용할 수 있도록 PCA를 이용하여 크기를 줄였다.

우선 여러 균열 깊이에 대하여 측정된  $k$ 개의 주파수 성분을 가진 총  $n$ 개의 TRF를 이용하여 TRF 행렬  $[T(f)]_{n \times k}$ 을 만든다. 이 때 행렬의 구성 성분인  $t_{ij}(f)$ 는  $i$ 번째 TRF의  $j$ 번째 주파수성분을 나타낸다. 다음으로 이 행렬의  $j$ 번째 주파수성분에 대한 평균 벡터  $\bar{T}_j$ 와 표준편차 벡터  $S_j$ 를 구한 후

에, 이를 이용하여 정규화 TRF 행렬  $[\hat{T}(f)]_{n \times k}$ 을 다음과 같이 구한다.

$$\hat{t}_{ij}(f) = \frac{t_{ij}(f) - \bar{T}_j}{S_j \sqrt{n}} \quad (4)$$

또한, 이 정규화 TRF 행렬의 상관행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$[C]_{k \times k} = [\hat{T}]_{k \times n}^T [\hat{T}]_{n \times k} \quad (5)$$

한편, 주성분은 이 상관 행렬의 고유치 해석을 통하여 구하며, 이 때  $i$ 번째 주성분은  $i$ 번째 고유치에 해당하는 고유벡터로 정의 된다. 첫 번째 주성분은 고유치 값들 중에 가장 큰 값에 해당하는 고유벡터이며, 원래의 신호에서 최대의 변화량과 방향을 가지는 가장 중요한 성분이다. 두 번째는 첫 번째 주성분과 직교하고, 그 다음으로 중요한 성분을 의미한다(Jolliffe, 2002).

상관 행렬은 정방 행렬이므로  $k$ 개의 고유벡터(주성분)를 얻을 수 있으며, 이로 구성된 고유벡터 행렬  $[\Phi]_{k \times k}$ 을 이용하여 정규화 TRF행렬을 다음과 같이 주성분 공간으로 투영할 수 있다.

$$[q]_{n \times k} = [\hat{T}(f)]_{n \times k} [\Phi]_{k \times k} \quad (6)$$

한편,  $p$ 개의 주성분만을 이용한 정규화 TRF 행렬의 근사적인 복원은 다음 식을 이용한다.

$$\begin{aligned} [\hat{T}] &= [q][\Phi]^T = \left[ [q_1]_{n \times p} [q_2]_{n \times (k-p)} \right] \left[ [\Phi_1]_{k \times p} [\Phi_2]_{k \times (k-p)} \right]^T \\ &\approx [q_1]_{n \times p} [\Phi_1]_{p \times k}^T = [\hat{T}_R] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 알 수 있듯이 원 신호로의 복원 성능은 몇 개의  $p$ 를 사용하는가에 따라 달라지게 되며, 따라서 성공적인 복원을 위해서는 적절한  $p$ 의 선택이 매우 중요하다(Jolliffe, 2002).

## 2.3 균열 깊이 추정을 위한 인공 신경망 기법

인공 신경망 기법은 훈련 패턴 등을 이용하여 인공신경망을 구성하는 시냅스의 연결 강도를 결정하고, 이를 바탕으로 입력과 출력 간의 사상 관계를 형성하도록 하는 패턴인식 기법이다. 이를 위하여 다양한 종류의 인공 신경망이 제안되었

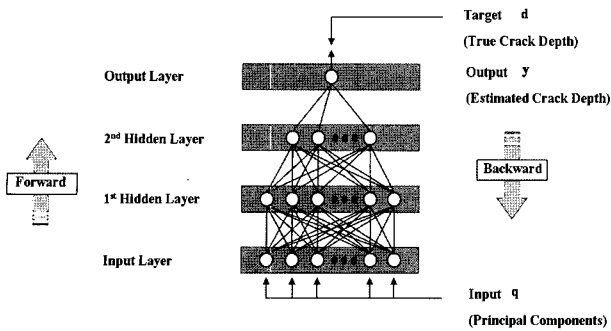


그림 2 다층 퍼셉트론 인공 신경망

으며, 본 연구에서는 그 중에서 가장 널리 사용되고 있는 오차 역전파 학습 알고리즘을 적용한 다층 퍼셉트론(그림 2)을 적용하였다(Haykin 1999). 입력 패턴은 식 (7)에서와 같이 PCA로 차원 축소된 TRF, 즉  $[q]_{n \times p}$  이며, 시험패턴은 훈련에 사용되지 않은 패턴을 이용하였다. 한편, 출력은 대응하는 균열 깊이이다.

### 3. 실험적 연구

#### 3.1 자기 보정 표면파 투과 함수 측정 및 차원 축소

제안된 방법의 유효성을 검증하기 위하여 균열이 없는 실험체를 포함하여 총 5개의 실험체를 제작하였다. 재료적 특성을 고려하지 않고 균열 깊이만을 변수로 하였기 때문에 하나의 배합 (물:시멘트:잔골재:굵은골재 = 1:0.5:2.44:3.33, 중량비)을 이용하여 모든 실험체를 타설하였고, 28일간 증기 양생하였다. 실험체는 폭, 높이, 길이가 각각 20, 16, 60(cm)에 해당하는 보 형태이며, 균열은 0.2mm의 두께를 가진 알루미늄 박판을 이용하여 인공적으로 생성하였고 깊이는 각각 0, 2, 4, 6, 8(cm)이다. 알루미늄 박판은 응결이 완료된 시점에서 제거하였다. 한편, 표면파 투과 함수 측정을 위한 실험 구성은 그림 3과 같으며, 두 개의 센서 사이의 간격 ( $D_2$ )는 30mm로 하였고(Song 등, 2003), 충격 위치와 근접 센서의 간격 ( $D_1$ )은 다양한 패턴을 얻기 위하여 30~60(mm)사이에서 간격을 변화하면서 신호를 획득하였다. 센서는 접촉식 초소형 가속도계(PCB-353B)를 사용하였고, 충격 하중은 재현성이 우수한 BB-총을 이용하였다(Shin 등, 2007). 노트북과 GPIB로 연결한 오실로스코프를 신호 저장 및 처리 장치로 구성하였다.

5개의 균열 깊이에 대하여 각각 100개의 TRF를 측정하였으며, 그림 4는 각각의 균열 깊이에 대한 100개 TRF의 평균을 나타내었다. 기존의 절단주파수 방법이나 차단주파수 방법을 적용하기 위해서는 특정 주파수 성분을 선택하고 이

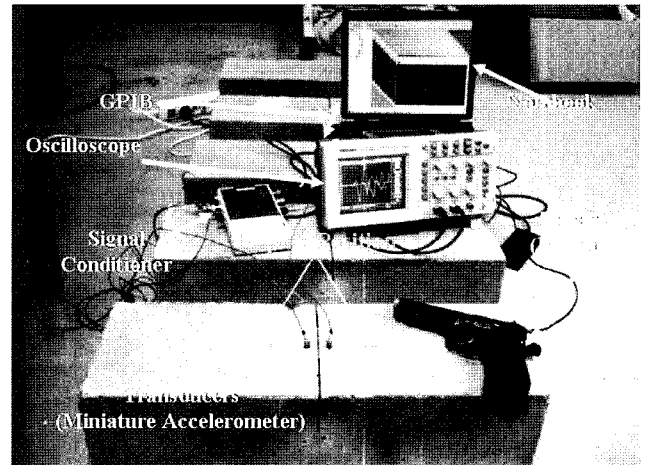


그림 3 실험 구성

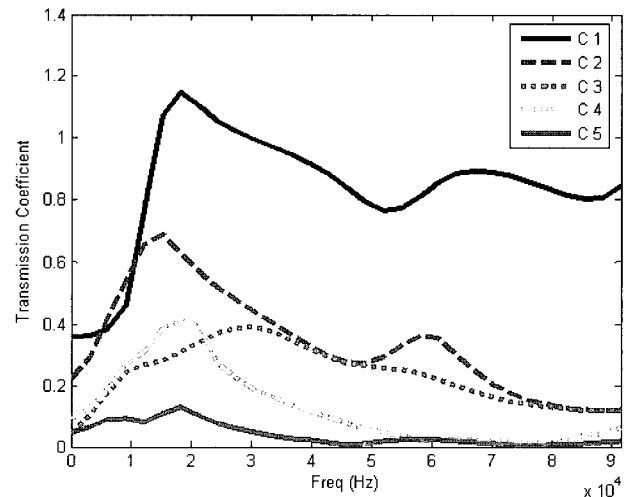


그림 4 각 균열 깊이에 대한 평균 표면파 투과 함수

로부터 균열 깊이와의 상관 관계를 파악하여야 하나, 그림에서 알 수 있듯이 주파수를 특정하기가 매우 어려움을 알 수 있으며, 이는 균열 깊이 추정에 있어서 표면파 투과 함수를 이용한 패턴 인식적 접근법을 제한하는 계기가 되었다.

한편, 인공신경망의 입력을 위한 차원 축소된 표면파 투과 함수를 구하기 위하여 하나의 TRF 당 512개의 주파수 성분으로 구성된 총 500개의 TRF로 -균열 깊이 당 100개-(500×512)의 TRF 행렬을 구성하였으며, 이 행렬을 식 (4)를 이용하여 정규화 TRF 행렬로 재구성하였다. 주성분은 정규화 TRF 행렬의 상관 행렬을 고유치 해석을 통하여 구하였으며, 주성분의 개수에 따른 상대 복원 오차(Jolliffe, 2002)를 표 1에 정리하였다. 표에서 알 수 있듯이 주성분의 개수가 많아지면 복원에 따른 상대 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다.

12개의 주성분과 48개의 주성분을 사용하여 균열 깊이 2 cm에 해당하는 경우(C1)와 4cm에 해당하는 경우(C2)의 TRF를 복원한 결과를 각각 그림 5(a), (b)에 나타내었다.

표 1 주성분의 개수에 따른 상대 복원 오차

주성분의 개수 ( $p$ )	상대 복원 오차
1	32
12	10
24	5
48	1

그림에서 알 수 있듯이, 48개의 주성분을 이용하여 원신호를 복원하였을 경우, 거의 완벽하게 원신호를 재현하고 있음을 알 수 있으며, 이 때의 상대 복원 오차는 1%이하였다. 한편, 12개의 주성분을 사용한 경우에도 원신호의 재현이 매우 우수하게 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 이 때의 상대 복원 오차는 10%이하였다. 이로부터, 주성분 분석법을 이용하면 512개의 주파수 성분을 가진 TRF를 매우 적은 수(예를 들자면 15-50개)의 주성분만으로도 중요한 정보의 손실 없이 효율적으로 원래의 신호를 재현할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결론은 특히 인공신경망의 적용에 있어서 수렴성에 관한 매우 중대한 시사점을 내포하고 있다. 만약 표면파 투과 함수를 차원 축소하지 않고 인공신경망에 직접 이용하면, 인공 신경망의 입력의 크기는 주파수의 개수와 일치하는 512개의 입력 노드가 필요하게 되고, 따라서 인공신경망 전체의 크기도 매우 커지게 된다. 이러한 경우에는 인공신경망의 수렴이 불가능하게 되거나, 수렴이 된다고 하더라도 훈련을 위해서는 매우 많은 수의 패턴을 준비하여야 한다. 그러나, 주성분 분석법을 이용하면 인공신경망의 입력 크기를 획기적으로 줄일 수 있을뿐만 아니라, 이에 따라 인공신경망 전체의 크기도 줄일 수 있게 되어 수렴성이 개선되고, 따라서 매우 효율적인 균열 깊이 추정이 가능하게 된다.

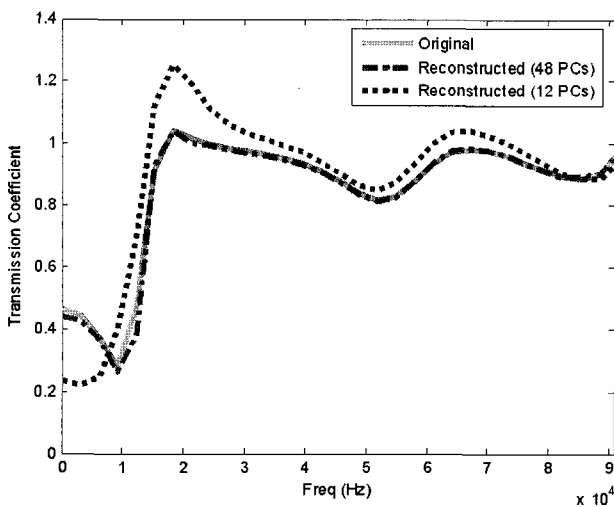
### 3.2 인공 신경망을 이용한 균열 깊이 추정

차원 축소된 표면파 투과 함수인 주성분을 인공신경망의 입력으로 하여 인공신경망을 이용한 균열 깊이 추정을 수행하였다. 본 연구에서는 비교를 위하여 12개와 48개의 주성분을 사용하여 두 개의 신경망을 구성하였으며, 각각의 신경망의 구조를 표 2에 나타내었다. 한편, 입력 층의 노드 개수는 사용한 주성분의 개수와 일치하며, 출력 값은 해당 균열 깊이이다. 균열 깊이 추정을 수행하기 위하여 우선 훈련 패턴을 이용하여 신경망을 훈련시키고, 미리 정해진 수렴값에 도달하면 훈련을 종료한 후, 훈련에 사용되지 않은 시험 패턴을 이용하여 균열 깊이 추정을 수행하였다.

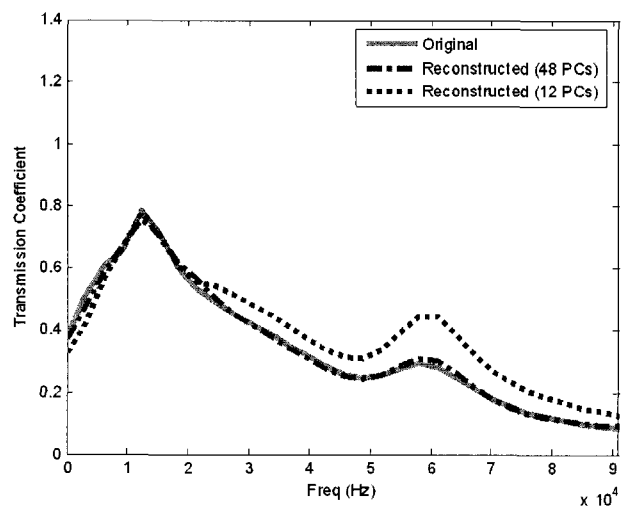
우선, 신경망을 이용한 균열 깊이 추정의 유효성을 알아보기 위하여, 각 균열 깊이 별로 총 100개의 TRF 중에 75개를 훈련을 위한 패턴으로 사용하고, 남은 25개를 이용하여 균열 깊이 추정을 수행하였으며, NN1에 대한 결과를 그림 6(a)에 NN2에 대한 결과를 그림 6(b)에 나타내었다. 그림 6(a)는 NN1에서의 출력이고, 그림 6(b)는 NN2에서의 출력을 나타내었다. 그림에 나타났듯이, 12개의 주성분을 사용한 경우에는 평방평균오차(RMS) 5%이내로 균열 깊이가

표 2 인공신경망 구조

Layer	Number of Nodes	
	12 PCs (NN1)	48 PCs (NN2)
Input	12	48
1 <sup>st</sup> Hidden	12	24
2 <sup>nd</sup> Hidden	9	15
Output	1	1

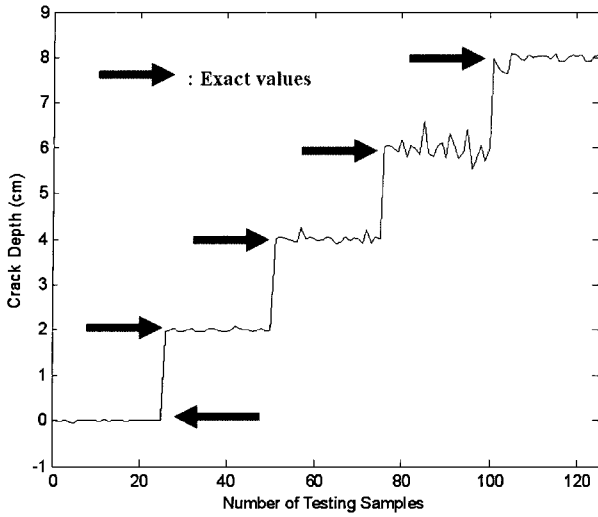


(a) 균열 깊이 0 cm에 대한 경우

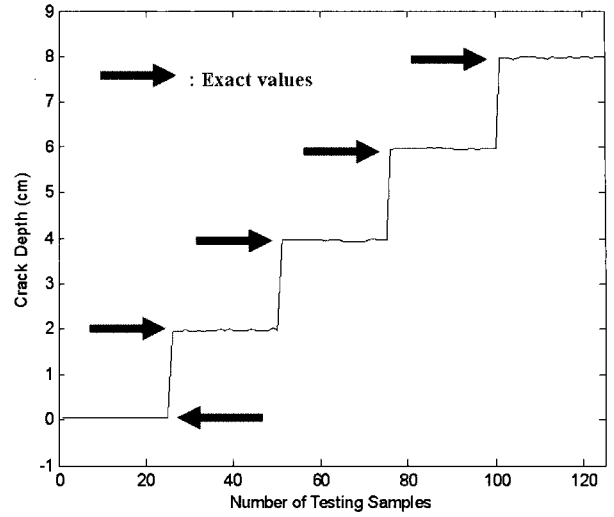


(b) 균열 깊이 2 cm에 대한 경우

그림 5 주성분 개수에 따른 복원 TRF와 원래의 TRF

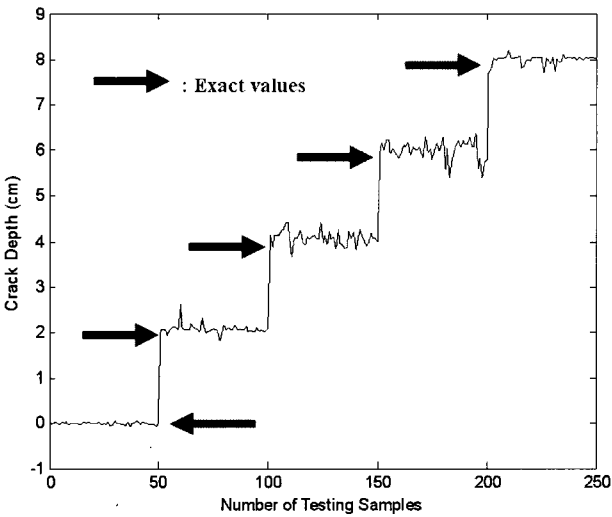


(a) NN1 (12개의 주성분을 사용한 경우)

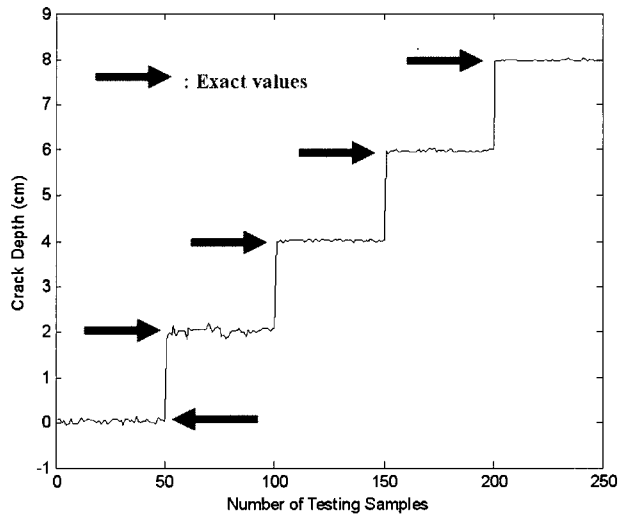


(b) NN2 (48개의 주성분을 사용한 경우)

그림 6 시험 패턴에 의한 인공신경망의 균열 깊이 추정 결과



(a) NN1 (12개의 주성분을 사용한 경우)



(b) NN2 (48개의 주성분을 사용한 경우)

그림 7 훈련 패턴의 개수를 줄인 경우에 대한 인공신경망의 균열 깊이 추정 결과

추정되었고, 48개를 사용한 경우에는 1%이내의 오차로 균열 깊이가 추정되었다. 이로부터, 서로 다른 개수의 주성분을 사용한 두 신경망 모두에서 균열 깊이가 성공적으로 추정됨을 알 수 있으며, 주성분의 개수를 늘리면 추정의 정확도가 크게 개선되지만, 본 연구에서는 매우 적은 수의 주성분인 12개를 사용하더라도 RMS 5%정도로 우수하게 균열 깊이가 추정된다는 것을 알 수 있었다.

한편, 인공신경망의 효과적인 적용을 위해서는 훈련을 위한 패턴의 개수가 매우 중요한 문제이다. 따라서, 적은 수의 패턴으로도 균열 깊이 추정이 효과적으로 이루어지는지 알아보기 위하여 훈련 패턴을 50개로 줄여서 훈련을 수행하고, 남은 패턴을 이용하여 균열 깊이를 추정하여 보았다. 이에 대한 결과를, NN1의 경우에 대해서는 그림 7(a)에 NN2는

그림 7(b)에 각각 나타내었다. 그림에서 나타나듯이, 훈련 패턴을 줄인 경우에도 매우 효과적으로 균열 깊이를 추정할 수 있음을 알 수 있으며, 이로부터 제안된 방법이 균열 깊이 추정에 있어서 매우 효율적인 방법임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 균열 깊이 추정을 위하여 차원 축소된 표면파 투과 함수를 이용한 인공 신경망 기법을 제안하였다. 표면파 투과 함수를 측정하기 위하여 자기 보정 기법을 적용하였으며, 측정된 투과 함수의 크기를 축소하여 인공신경망의 입력으로 사용하기 위하여 PCA를 이용한 차원 축소법을 제안하였다. 또한, 차원 축소된 투과 함수를 신경망

의 입력으로 사용함으로써 균열 깊이 추정이 자동적으로 이루어질 수 있도록 하였다. 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위하여 실험적인 연구를 수행하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 즉, PCA를 이용하면 자기 보정된 표면과 투과 함수의 차원을 중요한 정보의 손실 없이 효과적으로 축소할 수 있으며, 이를 신경망의 입력으로 사용하면 신경망의 크기를 줄여 수렴성을 개선시킬 수 있을 뿐만 아니라, 매우 효율적으로 균열 깊이를 추정할 수 있게 된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설 핵심기술 연구개발 사업(과제 번호:05건설핵심-C19)의 재정 지원에 의해 수행되었으며, 이에 사의를 표합니다.

### 참 고 문 헌

- 신성우, 민지영, 윤정방, John S. Popovics(2007) 콘크리트 구조물의 균열 깊이 추정을 위한 스펙트럼 에너지 기법, *비파괴검사학회지*, 27(2), pp.164~172.
- Achenbach, J.D., Komsky, I.N., Lee, Y.C., Angel, Y.C.(1992) Self-calibrating Ultrasonic Technique for Crack Depth Measurement, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 11(2), pp.103.
- ACI Committee 215(1982) Fatigue of Concrete, S.P Shah ed., ACI, OH, p.401.
- Haykin, S.(1999) Neural Networks, Prentice Hall International, NJ, USA, p.571.
- Hevin, G., Abraham, O., Petersen, H.A., Campillo, M.(1998) Characterization of Surface Cracks with Rayleigh Waves: A Numerical Model, *NDT & E International*, 31(4), pp.289~298.
- John S. Popovics(2004) Nondestructive Evaluation of for Civil Engineering Structures and Materials, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 23, p.32.
- Jolliffe, I.T.(2002) Principal Component Analysis, Springer-Verlag, NY, USA, p.605.
- Lin, Y., Su W.(1996) Use of Stress Waves for Determining the Depth of Surface-Opening Cracks in Concrete Structures, *ACI Materials Journal*, 93, pp.494~505.
- Metha, P.K.(1995) Durability - Critical Issues for the Future, *Concrete International*, 19(7), p.69.
- Popovics, J.S., Song, W., Ghandehari, M., Subramaniam, K.V., Achenbach, J.D., Shah, S.P.(2000) Application of wave transmission measurements for crack depth determination in concrete, *ACI Materials Journal*, 97, pp.127~135.
- Sansalone, M.J., Lin, J., Streett, W.B.(1998) Determining the Depth of Surface-Opening Cracks Using Impact-Generated Stress Waves and Time-of-Flight Techniques, *ACI Materials Journal*, 95, pp.168~177.
- Scala, C.M., Bowles, S.J.(2000), Laser Ultrasonics for Surface Crack Depth Measurement Using Transmitted Near-field Rayleigh Waves, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 19, p.327.
- Shin, S.W., Yun, C.B., John S. Popovics, Kim, J.H.(2007) Improved Rayleigh Wave Velocity Measurement for Nondestructive Early-age Concrete Monitoring, *Research in Nondestructive Evaluation*, 18, pp.45~68.
- Song, W., Popovics, J.S., Achenbach, J.D.(1999) Crack Depth Determination in Concrete Slabs Using Wave Propagation Measurements, *Proceedings of the 1999 DAA Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, NJ, USA.
- Song, W., Popovics, J.S., Aldrin, J.C., Shah, S.P.(2003) Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete, *Journal of the Acoustical Society of America*, 113(2), pp.717~725.
- Wu, T.T., Fang, J.S., Lin, P.L.(1995) Detection of the Depth of a Surface-Breaking Crack Using Transient Elastic Waves, *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), pp.1678~1686.
- Yang, Y., Cascante, G., Polak, M.A.(2005) Detection of Depth of Surface-Breaking Cracks in Concrete Pipes, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Canadian Conference on Effective Design of Structures*, Hamilton, Ontario, Canada.