특 집

콘크리트 구조물의 비파괴검사와 복합기술을 이용한 강도 및 결함추정기술

Compressive Strength and Damage Prediction in Concrete Structures Using Non-Destructive Test and Composite Technology

조영상*
Young-Sang Cho

1. 서 론

건설 분야에서는 1994년 10월의 성수대교 붕괴 사고, 1995년 6월 삼풍백화점 붕괴 사고 전까지는 진단 및 비파괴 검사에 대하여는 법제도나 비파괴 검사기술에 대한 연구 개발이 부진한 실정이었다. 성수대교 붕괴이후 시설물의 안전관리에 관한 특별법이 1995년 1월 5일에 제정되었고, 동법시행령이 1995년 4월 20일에 제정되었으며 동법에 관한 시행규칙이 1995년 6월 3일에 제정되었다. 그 후 건설교통부 산하 한국시설안전공단에서 안전점검 및 정밀안전진단에 관한 세부지침이 발간되어 실무에 적용되어 왔다. 관련법의 정비와 더불어 비파괴 검사 및 계측에 관한 연구 및 실무적용이 학계와 산업체에서 활발하게 진행되어 오고 있다.

최근에 와서 기존 콘크리트 구조물의 노후화와 각종 기능저하현상이 증대됨에 따라 콘크리트에 대한 신뢰도, 안정성, 유지관리, 내구성 향상과 품질관리에 대한 문제점들이 나타나고 있으며, 이에 대한 종합적인 품질평가의 중요성이 제기되고 있다. 그러나 콘크리트는 물리적 성질이 매우 다른 이질성 재료이면서 비균질성 복합재료로 구성되며, 배합, 타설 및 양생조건에 따른 특성의 차이와 구조물 축조 후 현장여건의 변화 등 변수 인자가 많다. 따라서 콘크리트 구조물의 강도추정이나 내부결함 탐사와 같은 콘크리트 구조물 진단시스템의 개발 및 적용이 절실한 요망되고 있다.

현재 세계의 건설 분야에서 사용되고 있는 비파괴 검사의 종류는 슈미트 해머, 코어 테스트, 윈저 프로브(winsor probe), 인발법, 공진 주파수법, 초음파 속도법, 충격반향기법, 표면파 기법, 펄스반향기법, 임펄스 응답기법, 토모그래피(tomography), 크로스 홀 기법(cross hole method), 전자파 기법(GPR), 방사선, 적외선, 음향방출법, 초음파법, 자장/전기법, 에디커런트(eddy current method), 콘크리트 피복두께 측정, 철근위치 추정(Ferro Scan), 철근부식 및 중성화 추정, MT, UT 및 기타 방법들이 쓰이고 있다. 항시감시 계측 분야에서도 연구와 산업체 적용이 활발히 진행되고 있다. 광섬유센서와 형상메모리 합금 센서 등 스마트 센서에 관한 연구와 산업체 적용도 활발히 진행되고 있다.

많은 비파괴 검사방법들이 있지만 건설분야에서는 비파괴검사 및 진단방법으로 쉬미트 해머, 철근위치 추정장비(ferro scan), 초음파 속도법 등 비교적 사용이 간편한 검사기법외에는 활성화되어 있지 않은 것으로 보인다. 그러나 응력파(Stress wave)를 사용한 비파괴검사법인 충격반향기법(impact echo method), 표면파 기법(spectral analysis of surface wave method), 펄스반향기법(pulse echo method), 충격응답기법(impulse response method) 등이 연구단계를 걸쳐 건설의 여러 분야에서 사용되고 있고 북미나 유럽에서는 법제화가 되어 있다. 그러나 우리나라에서는 건설분야에서 실무적용 및 법제화나 사용 지침이 마련되어 있지 않다. 또한 효과적인 비파괴검사법에 의한 강도및 결함 추정을 위하여 반발경도 및 초음파속도법과 공시체 압축강도와의 다중상관계 분석에 의한 복합기술을 사용하기도 한다. 본고에서는 초기재령 및 기존 콘크리트 건축구조물에 대하여 응력파를 사용한 비파괴검사 방법들과 인공신경망을 이용하여 강도 및 결함추정을 할 수 있는 기술에 대하여 알아 보고자한다.

2. 비파괴검사기법

응력파를 사용하는 비파괴 검사법 중 콘크리트강도추정과 결함추정에 비파괴 검사법인 충격반향기법(impact-echo method)과 표면파기법(SASW method)에 대하여 알아 보고자 한다.

* 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수
ycho@hanyang.ac.kr

2.1 충격반향기법

실험체의 표면에 기계적 충격을 가하면 구형의 파면을 가지고 실험체 내부로 전파되는 체적파(P, S파)와 실린더 형태의 파형을 가지고 실험체 표면을 따라 전파되는 표면파(R파)가 발생한다. 이때 체적파는 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층간의 경계면을 만나면 반사되어 응력파가 발생한 표면으로 돌아온다. 이때 감진기가 충분히 충격원 근처에 위치한다면 균열, 공동과 같은 매질내의 불연속체나 이질 매질층간의 경계면에서 반사된 P파의 속도가 S파의 속도보다 빠르기 때문에 표면에서 감지되는 파형은 반사된 P파에 의한 파형으로 볼 수 있다.

한편, 〈그림 1〉과 같이 표면에 도달한 파는 표면에서 반사되어 다시 매질속으로 전파되며 이러한 파는 다시 불연속층에서 반사된다. 이와같이 표면과 균열, 공동과 같은 불연속체 사이 또는 표면과 이질 매질층사이의 다중반사에 의한 공진상태가 유발된다. 이때 실험체의 치수를 알고 있을 경우 구성재료의 강성도 결정을 통한 콘크리트의 불량도를 추정할 수 있고 재료의 압축파 전파속도를 알고 있다면 반사파의 도달시간을 측정하여 실험체 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다.

충격반향기법의 신호처리는 시간영역(time-domain)해석과 주파수영역(frequency-domain)해석 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 가늘고 긴 말뚝이나 피어기초에서는 충격파가 콘크리트 속으로 충분히 전달될 수 있도록 상대적으로 저주파의 파를 사용한다. 이러한 파는 실험체내의 반사체에 적당한 각도로 부딪히면 표면으로 돌아와 가속도를 유발하며 이러한 표면변위를 시간영역상에서 해석하여 실험체의 건전도를 평가한다.

2.2 표면파 기법(SASW method)

표면파기법이란 표면파의 분산특성을 이용하여 〈그림 2〉와 같이 구성재료의 파속도와 강성을 파악하는 현장 실험법이다. 표면파의 에너지는 깊이방향으로 표면으로부터 지수함수적인 감쇠를 나타내며 파의 에너지의 대부분은 거의 한 파장에 해당하는 깊이안에 존재한다. 그러므로 충격시 발생되는 표면파의 속도는 한 파장에 해당하는 강성에 영향을 받게 된다.

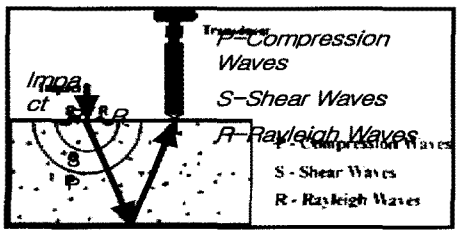

그림 1. 충격반향기법(Impact-Echo Method)

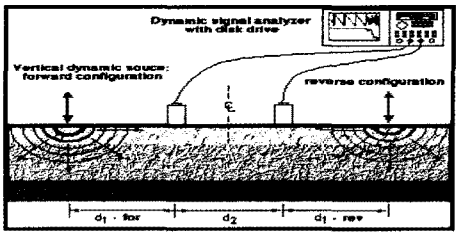

그림 2. 표면파 기법(SASW Method)

다층구조의 구조체에서 SASW(spectral analysis of surface wave)실험을 하게 되면 첫번째 층 두께보다 짧은 파장을 가지는 파에 의한 입자거동은 첫번째 층에만 국한되므로 파의 속도는 첫번째층의 강성도에만 영향을 받게 된다. 그러나 파장의 길이가 증가함에 따라 입자의 거동은 첫번째 층 하부재료까지도 포함하게 된다. 따라서 층상구조매질에서 파의 전파속도는 파장의 길이에 따라 변하는 분산특성을 갖게 된다. 그러므로 파장길이에 대한 표면파속도를 측정하여 각 층의 강성도를 추정하는 것이 가능하다.

3. 인공신경망

인공신경망 모델은 생명체의 신경조직에서 착안하여 모델화한 정보처리시스템으로서 단순한 소자들의 병렬, 분산 연결구조를 가지고 있으며, 외부로부터 받아들이는 입력에 대하여 동적반응을 일으키면서 필요한 출력을 생성시킨다. 즉, 생명체의 특수한 정보처리기능을 부분적이나마 모방하고자 하는 의도에서 개발되었다. 인공신경망은 〈그림 3〉과 같이 두뇌의 기본 구성요소인 뉴런(neuron)을 모방한 연산모델을 가지고 있다.

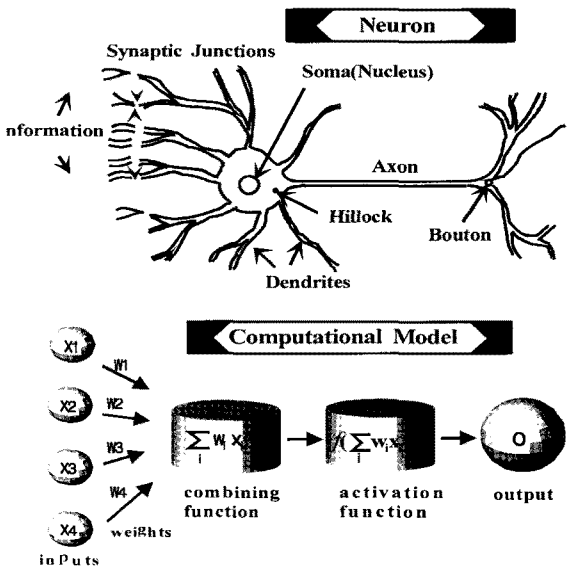

그림 3. 뉴런의 구조와 연산모델

인공신경망 알고리즘은 생물의 신경전달 과정을 단순화하고 이를 수학적으로 해석한 모델로써, 복잡하게 얽혀있는 뉴런(neuron-신경세포 : 신경망에서는 네트워크를 이루는 최소단위)을 통과시켜가면서 뉴런끼리의 연결강도를 조절하는 일종의 학습(training)과정을 통해 수많은 자료를 기억시킨다. 이러한 과정은 사람이 학습하고 기억하는 과정과 비슷하며, 이를 통해 추론, 분류, 예측 등을 수행할 수 있다.

4. 콘크리트 건축구조물의 비파괴 실험

4.1 강도추정 실험

콘크리트의 강도를 추정하기 위해서는 다양한 비파괴 검사법과 실험계획이 있을 수 있다. 여러 방법중 압축파를 사용하는 충격반향기법과 표면파기법을 사용할 수도 있다. 표면파기법은 매질이 층을 이루는 경우에 분산곡선(dispersion curve)을 이용하여 매질의 강성이나 물성을 파악하는데 유리하지만 건축구조물에 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 비파괴 검사 자체로서 강도추정을 할 수 있지만 비파괴 검사를 통하여 많은 데이터를 수집하여 인공신경망을 이용하여 학습을 통하여 데이터베이스화하여 강도를 추정할수 있는 방법들이 연구되고 실용화 단계에 있다. 예를 들면 다른 압축강도와 배합비를 가진 모의 부재 실험체를(예 : 180 kgf/cm^2 - 400 kgf/cm^{2}범위) 가급적 많은 실험체를 만든다. 180 kgf/cm^2 - 400 kgf/cm^{2}범위의 콘크리트 강도를 추정하기 위하여는 실제 상황의 다양한 콘크리트 강도를 가진 실험체를 제작하여 각각의 충격반향기법 및 표면파기법의 비파괴검사를 수행하여 그 결과를 인공신경망에 학습하여 본 강도구간내의 실제강도를 정확히 추정할 수 있도록 데이터베이스화 한다.

충격반향기법과 표면파기법을 통해 압축파(P파)속도와 표면파(R파)속도를 구하기 위해 다양한 배합비를 가진 다수의 모의 부재 실험체를 만든다. 실험체의 한 예로 〈그림 4〉의 1 m × 1 m × 0.2 m의 슬래브 모의부재 실험체를 다음과 같이 제작하여 모의부재 실험을 수행 할 수 있다.

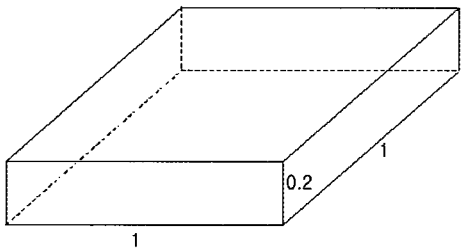

그림 4. 실험체모형(단위 : m)

4.2 결함추정 실험

콘크리트 두께, 공동, 이질재, 철근위치 등 결함추정을 위한 실험체는 콘크리트 압축강도를 정하여(예 : 350 kgf/cm^{2}g), 적합한 실험체 크기로(예 : 1.2 m × 1.2 m × 0.2 m 등) 실험체를 제작한다, 두께 추정예로 슬래브형 실험체에 2 cm의 높이 차이를 주어 〈그림 5〉와 같이 제작하여 두께 추정 실험을 할 수 있다.

슬래브 실험체의 높이는 각각 10, 12, 14, 16, 18, 20 cm이며 각 높이에서 비파괴검사기법인 충격반향기법을 이용하여 최대주파수를 찾아 콘크리트 슬래브 두께를 추정 할 수 있다. 또한 실험체의 각 높이에서 실험을 실시하여 주파수 영역(Frequency-domain) 데이터를 인공신경망에 학습하여 콘크리트 두께추정을 실시하였다. 사용된 비파괴검사장비는 동적신호 해석기(spectral analyzer) 사용할 수 있다.

4.3 실험값 측정

콘크리트 강도추정의 중요성은 건축공사에서 거푸집 탈형과 지주 제거시기 결정에 중요한 요소가 될 수 있으므로 초기강도 발현에 대한 자료를 제공하기 위하여 〈그림 4〉의 실험체에서 16, 20, 24시간, 2, 3, 7, 28일에 충격반향기법과 표면파기법을 통해서 압축파 속도와 표면파 속도를 측정하고 압축파속도와 표면파속도의 측정과 함께 같은 시간마다 콘크리트 실린더를 이용 콘크리트 압축강도시험을 실시한다.

또한 콘크리트 압축강도에 많은 영향을 미치고 양생조건을 알아보기 위하여 콘크리트 양생과정에서의 온도와 습도를 측정 관리 한다.

충격반향기법과 표면파기법의 비파괴실험은 동적신호 해석기를 사용하고 콘크리트 압축강도실험은 200 ton UTM기등을 사용할 수 있다. 또한 온도와 습도 데이터 측정을 위해서 T&D사의 TR-72U모델 등을 사용 할 수 있다. 콘크리트 결함에 대하여는 비파괴검사장비인 동적신호 해석기를 사용하여 슬래브 실험체의 각 높이에서 실험을 통해 〈그림 6〉의 시간영역(time-domain) 데이터를 획득하였으며 이를 다시 FFT변환을 거쳐 〈그림 7〉의 주파수영역데이터로 변환하였다.

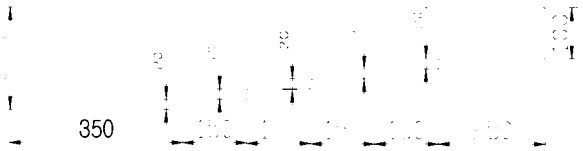

그림 5. 콘크리트 구조물 두께추정용 실험(단위 : mm)

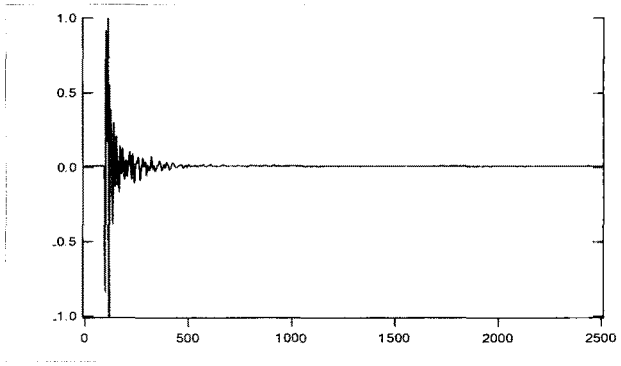

그림 6. 시간영역(Time-domain) 그래프

4.4 강도 및 결함추정의 인공신경망 학습

인공신경망학습에 사용된 알고리즘은 다변수 비선형 문제에 가장 적합하고 대표적인 오류역전파학습알고리즘(error back-propagation training algorithm)을 이용할 수 있다.

4.4.1 강도추정 뉴런수결정

오류역전파학습알고리즘은 입력층, 은닉층, 출력층으로 나누어져 있고 뉴런수 결정의 예로 콘크리트 강도에 영향을 미치는 배합비정보 7개, 온도와 습도데이터 116개(타설일부터 타설후 28일까지 평균온도·최저온도·최고온도·평균습도) 그리고 충격반향기법과 표면파기법에 의해 측정된 P파속도와 R파속도 각 7개, 총 137개를 입력층으로 하고 출력층은 16, 20, 24시간, 2, 3, 7, 28일의 콘크리트 실린더시험에 의한 콘크리트 압축강도 7개로 할 수 있다.

4.4.2 강도추정 학습패턴결정

학습패턴결정의 예로 콘크리트 설계강도 180 kgf/cm^2 5개, 210 kgf/cm^2 6개, 240 kgf/cm^2 6개, 270 kgf/cm^2 7개, 300 kgf/cm^2 6개, 350 kgf/cm^2 7개, 400 kgf/cm^2 7개, 총 44개의 학습패턴으로 학습을 할 수 있다.

학습을 위해서 학습패턴들을 0.9 이하가 되도록 스케일링할 수 있고 최대허용에러는 스케일링한 값의 최소 자리수 제곱의 절반에서 결정할 수 있다.

4.4.3 강도추정 인공신경망 학습

〈그림 8〉과 같은 신경망구조를 통해 기본배합정보 7개, 비파괴검사에 의한 P파속도 7개, R파속도 7개, 그리고 양생기간의 온도와 습도데이터 116개, 총 137개를 입력뉴런으로 16, 20, 24시간, 2, 3, 7, 28일의 콘크리트 압축강도를 출력뉴런으로 하여 인공신경망을 학습할 수 있다.

4.4.4 결함추정 학습패턴결정 및 학습

콘크리트 두께 10 cm 10개 , 12 cm 10개, 14 cm 10개, 16 cm 10개, 18 cm 10개, 20 cm 10개의 충격반향기법을 통해 얻은 총 60개의 주파수영역그래프를 학습패턴으로 학습을 하였다. 〈그림 9〉는 콘크리트 두께 10 cm에 대한 10개의 학습패턴이다.

〈그림 10〉과 같은 신경망구조를 통해 주파수영역 데이터

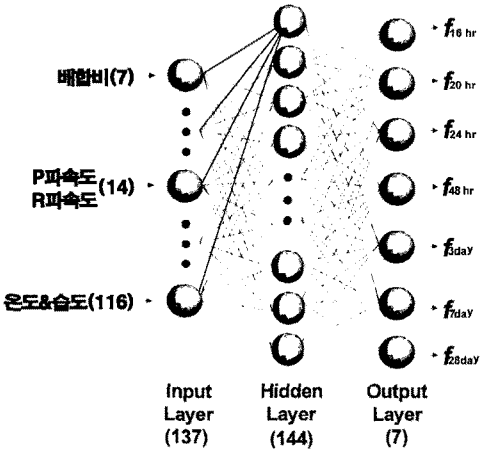

그림 8. 인공신경망 구조

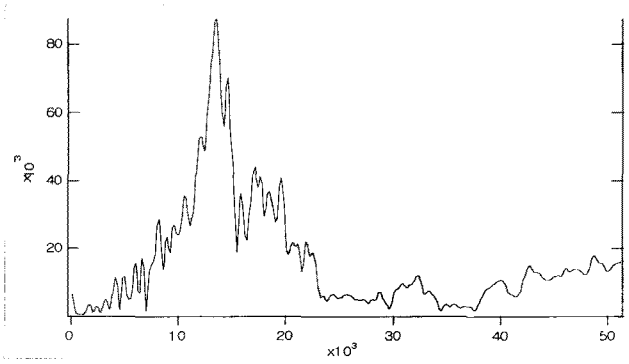

그림 7. 주파수영역(Frequency-domain) 그래프

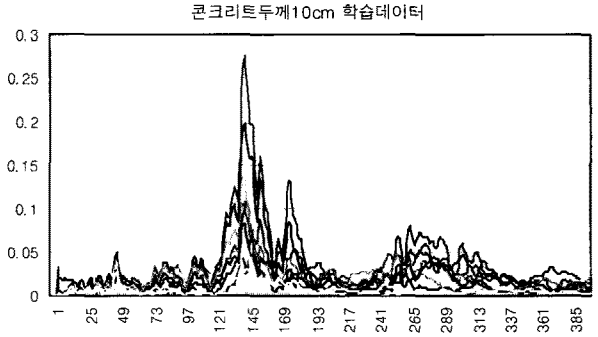

그림 9. 콘크리트 두께 10 cm 학습데이터

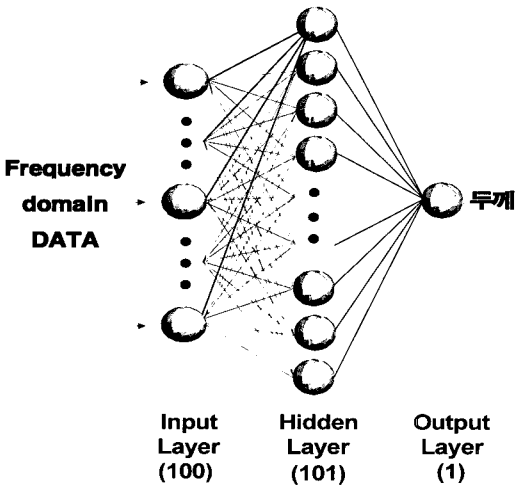

그림 10. 인공신경망 구조

100개를 입력뉴런으로 콘크리트 실험체의 두께를 출력뉴런으로 하여 인공신경망을 학습할 수 있다.

4.5 테스트

강도추정에 대하여는신경망모델의 추정도를 점검하기 위하여 학습된 인공신경망에 테스트패턴으로서 44개 배합비중 원하는 배합비(예 : 3개)를 선정하여 테스트를 실시할 수 있다.

결함추정에 대하여는 신경망모델의 추정도를 점검하기 위하여 학습된 인공신경망에 테스트패턴으로서 콘크리트 실험체의 각 두께 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 m, 18 cm, 20 cm마다 1개의 테스트패턴 주파수영역 데이터를 비파괴실험에 의해 획득하여 테스트를 실시할 수 있다.

5. 콘크리트 강도추정 실험결과

5.1 비파괴실험결과

강도실험에 대하여 44개의 배합비를 가지고 1 m × 1 m × 0.2 m의 슬래브 모의부재 실험체를 제작하여 양생기간중 16, 20, 24시간, 2, 3, 7, 28일에 비파괴검사기법인 충격반향기법과 표면파기법을 실시하여 P파속도와 R파속도를 측정하였다. 〈그림 11〉은 270 kgf/cm^{2}의 재령별 P파와 R파속도의 예를 그래프화한 것이다. 〈그림 12〉은 비파괴검사기법인 충격반향기법을 이용한 결함추정예로 콘크리트 추정두께와 실제두께를 비교한 것이다.

5.2 콘크리트 실린더 테스트결과

44개의 배합비를 가지고 ∅10 × 20 cm의 원주형 공시체를 KS F 2403의 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법에 준

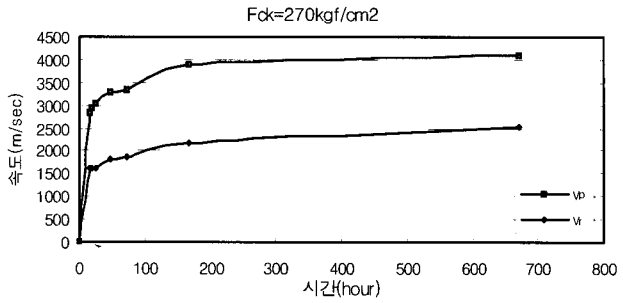

그림 11. 270 kgf/cm^2 실험결과

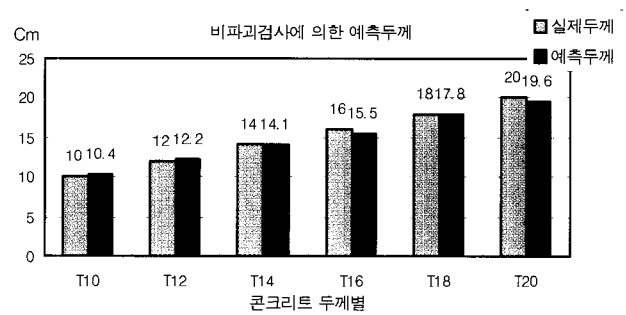

그림 12. 비파괴검사에 의한 예측두께

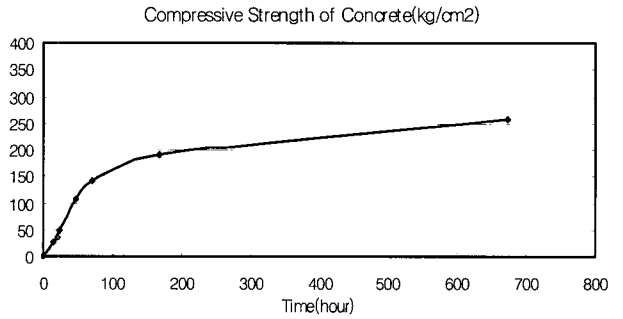

그림 13. 270 kgf/cm^2 실험결과

하여 제작하여 200 ton UTM(universal test machine)을 사용하여 콘크리트 압축강도를 측정하였다. 〈그림 13〉은 270 kgf/cm^2 콘크리트 실린더 테스트 결과이다.

5.3 인공신경망 테스트 결과

강도추정에 관하여 학습된 인공신경망에 3개 패턴에 대하여 테스트를 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다. 테스트패턴은 콘크리트 압축강도 210 kgf/cm^2, 270 kgf/cm^2, 350 kgf/cm^{2}에 대하여 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

〈그림 14〉은 콘크리트 압축강도 270 kgf/cm^{2}에서 콘크리트 실린더 시험에 의한 실제 콘크리트 압축강도와 인공신경망에

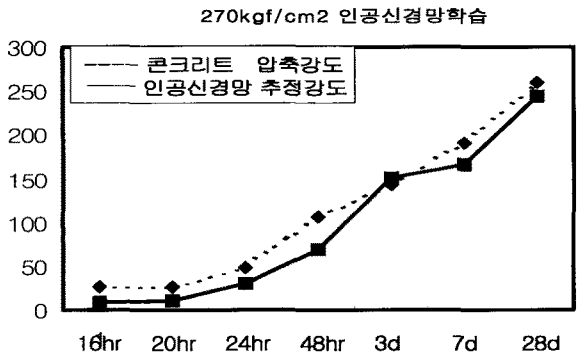

그림 14. 인공신경망 추정강도

의한 콘크리트 추정강도를 비교한 그림이다.

결함추정에 관하여는 콘크리트 실험체의 두께추정을 인공신경망에 학습하기 위하여 비파괴검사기법인 충격반향기법에 의해 획득된 주파수영역 데이터를 사용하였다. 그 방법은 주파수영역의 총 400자료점을 100등분으로 나누어 각 4자료점에 대한 평균값을 사용하여 인공신경망에 학습하였다. 따라서, 100개의 지점을 입력뉴런으로 하였고 콘크리트 실제두께를 출력값으로 하였다. 각 두께마다 충격반향실험을 11번 실시하여 10개의 학습데이타 총 60개의 학습데이터를 생성하였고 나머지 1개의 실험데이타를 테스트데이터로 사용하였다. 인공신경망에 의한 콘크리트 두께추정의 결과는 〈그림 15〉와 같다

6. 결 론

응력파를 이용한 비파괴검사법인 충격반향기법과 표면파기법을 사용하여 콘크리트 구조물의 안정성 증대에 필요한 강도추정과 결함추정 기법에 관하여 인공신경망기술을 결합하여 신뢰성을 향상시키는 기법에 관하여 다루었고 요약하면 다음과 같다.

(1) 비파괴 실험인 충격바항기법과 표면파기법을 통해 압축파속도(Vp), 표면파속도(Vr)와 실린더시험에 의한 콘크리트 압축강도와의 상관관계를 확립하고 인공신경망을 이용한 데이터베이스화의 기초자료로 사용할 수 있다.

(2) 콘크리트 재령별 압축강도에 대하여 콘크리트 실린더 시험값이 인공신경망에 의한 추정강도 값과 비교하여 정확도를 향상시킬 수 있다.

(3) 콘크리트 두께 추정시 비파괴검사기법인 충격반향기법을 이용하여 두께추정을 하여, 인공신경망을 사용하여 신뢰도를 높이고 실용성을 높일 수 있다.

(4) 비파괴검사법의 사용법의 보편화 및 단순화를 이룩하고 효과적인 웹기반기술을 발전시켜 실무적용이 활성화되기를 기대한다.

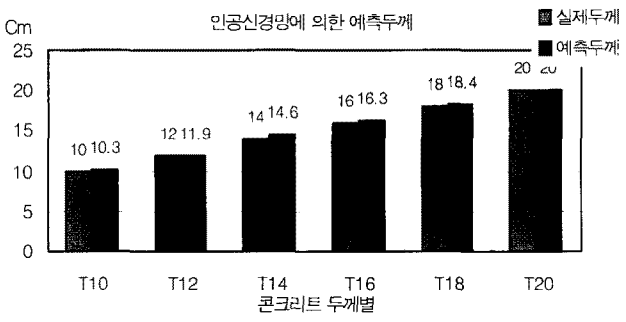

그림 15 인공신경망에 의한 예측두께

참고문헌

1. Y. S. Cho(2003), Non-destructive testing of high-strength concrete using spectral analysis of surface waves, NDT & E International, Vol.36, pp. 229 ~ 235.
2. Rajasekaran and S. C. Lee, Prediction of Concrete Strength Using Serial Functional Network Model, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.16, 2003, pp. 83 ~ 99.
3. Oluokun F. A., Burdette E. G., Harold D. J., Early-age Concrete Strength Prediction by maturity-Another look, *ACI Materials Journal*, Vol.87, No.6, 1990, pp. 565 ~ 572.
4. 김동수, 서원석, 이광명, 콘크리트 지반구조물의 비파괴검사를 위한 충격반향-표면파 병행기법: I 수치해석적 연구, 한국지반공학회논문집, Vol.18, No.4, 2002, pp. 257 ~ 270.
5. 임서형, 강형식, 지남용, 비파괴 시험에 의한 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구, 대한건축학회논문집, Vol.18, No.8, 2002, pp. 51 ~ 58.
6. 한천구, 한민철, 콘크리트의 강도 증진 해석에 의한 측면 거푸집 존치 기산 산정, 대한건축학회 논문집, 구조계, Vol.17, No.6, 2001. 6, pp. 87 ~ 94.
7. 조홍법, 윤상천, 지남용, 배합표에 의한 콘크리트의 압축강도 추정, 대한건축학회 논문집, 구조계, Vol.19, No.4, 2003. 4, pp. 105 ~ 112.
8. Snador Popovics, Analysis of Concrete Strength versus Water-Cement Ratio Relationship, *ACI Material Journal*, Vol.87, No.5, (September-October) 1990, pp. 517 ~ 529.