



탄소섬유 보강 콘크리트의 박리 탐사 실험

임흥철^{1)*} · 정행철¹⁾ · 우상균²⁾ · 송영철²⁾

¹⁾연세대학교 건축공학과 ²⁾한국전력공사 전력연구원

Experiments on the Detection of Delamination in FRP Reinforced Concrete

Hong-Chul Rhim^{1)*}, Hang-Chul Jung¹⁾, Sang-Kyun Woo²⁾, and Young-Chul Song²⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Korea Electric Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

ABSTRACT With a growing concern about the state of infrastructure worldwide, the demand for the development of reliable nondestructive testing techniques (NDT) is ever increasing. Among possible NDT techniques, microwave method is proven to be effective in fast and non-contact inspection of concrete structures and inclusions inside concrete. It is also found that the microwave method has a potential in detecting the delamination between fiber reinforced polymers (FRP) plate and concrete. On the other hand, ultrasonic method can be another way to find the delamination. In this paper, the research work needed for the development of a reliable microwave method and ultrasonic method is studied in the measurements of concrete specimens reinforced with FRP. Concrete specimens are made with FRP and artificial delamination inside. A microwave measurement system with horn antennas with high center frequency and broad frequency bandwidth are used to image inside concrete specimens for the detection of debonding between concrete and FRP. Also, ultrasonic method is used for the same condition. Both results are compared with each other.

Keywords microwave, ultrasonic, concrete, FRP, delamination

1. 서 론

최근에는 노후화된 콘크리트 구조물의 보수, 보강 분야의 투자가 급격히 늘어나면서 인성을 가지며 내구성을 가지는 신소재의 개발이 절실한 실정이다. 현재 많이 쓰이는 보수보강 공법으로는 콘크리트 증타 공법, 철판 압착공법, 탄소섬유 보강공법 등이 있다. 이 중 최근에는 고강도이면서 경량화 소재로써 시공성이 우수한 탄소섬유 (fiber reinforced polymers, 이하 FRP)를 이용한 보강 공법이 많은 각광을 받고 있다¹⁾. 그러나 탄소섬유의 경량성, 내구성, 내부식성 등 여러 장점에도 불구하고 에폭시 수지에 의한 표면부착방법은 구조적, 시공적, 환경적 요인으로 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 즉, 보강 단부의 응력집중현상, 부실시공, 온도의 영향 등으로 에폭시와 콘크리트 사이에 부착성능 저하로 인한 계면박리의 발생이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다.

박리의 발생은 결과적으로 탄소섬유가 충분한 성능을 발휘하기 전에 취성 파괴되어 보강효과를 기대할 수 없게 될 뿐만 아니라 계면박리에 의한 균열은 육안으로는

식별이 어려워 쉽게 찾아낼 수가 없다.

최근 연구 동향을 살펴보면 새로운 부착기법 및 보강 형태의 변화를 통하여 보강효과 향상에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있다²⁾. 성능평가에 대한 연구로는 초음파를 이용한 단층촬영기법으로 박리탐사를 시도한 적이 있고³⁾ 또한 적외선 카메라를 이용하여 결합탐지를 시도한 적이 있다^{4,5)}. 그러나 보강 후의 박리 발생 여부에 대한 연구는 그 중요성에 비하여 활성화가 부족한 실정이다. 따라서 박리 발생 여부를 검사할 수 있는 효과적인 비파괴 검사 기법의 개발이 절실한 상황이다.

그러나 탄소섬유보강 구조물에서 일어나는 계면박리에 의한 균열은 일반 철근콘크리트의 균열과는 다른 양상을 나타낸다. 즉, 계면박리에 의한 균열은 초기에는 mm 단위로 매우 미세하게 시작하여 점점 커지며 콘크리트 표면에서 발생하므로 기존 비파괴검사 기법과는 다른 접근이 필요하게 된다. 따라서 최근 연구의 동향은 미세한 균열을 찾기 위한 신뢰성 있는 검사방법의 적용 및 향상된 결과를 얻을 수 있는 분석방법의 개발 위주로 하고 있다⁶⁾.

본 연구에서는 먼저 검사의 정밀성과 신뢰성이 우수한 전자기파법을 이용한 비파괴 검사 기술을 이용하였다. 기존 GPR (ground penetration radar) 안테나 대신 이득이

*Corresponding author E-mail : hcrhim@yonsei.ac.kr

Received December 9, 2004, Accepted December 31, 2006

©2007 by Korea Concrete Institute

높고 광대역의 특성을 가진 혼 안테나 (horn antenna, 안테나 사양은 중심 주파수 $F_c = 15$ GHz, 주파수 대역폭 $B = 10$ GHz, 이득 $Gain = 70$ dB)를 사용하여 연구를 수행하였다. 추가적으로 초음파 장비를 이용한 실험을 실시하여 두 가지 기술의 비교분석을 통하여 효율적인 성능 평가 기법을 제안하였다.

2. 연구 배경 및 내용

2.1 전자기파법을 이용한 연구

GPR을 이용한 전자기파법은 높은 정밀성 및 신뢰성으로 인하여 콘크리트의 균열탐사에서 사용이 점차 확대되고 있다. GPR은 송신용 레이더 안테나에서 전자기파를 구조물에 발신하여 반사되어 오는 전자기파의 분석을 통해 거리 및 균열여부를 분석하는 방법이다. 이 방법은 주파수 대역의 변화를 통하여 해상도와 탐사심도를 조절할 수 있기 때문에 다른 장비에 비하여 적용성 및 정밀성이 우수하다^{7,8)}. 또한 전자기파는 철근에 대한 반사가 매우 민감하기 때문에 철근 위치 및 간격에 대한 정밀한 검사도 가능하게 된다⁹⁾. Fig. 1은 안테나를 이용한 FRP 보강 구조물의 검사방법을 나타내고 있다.

기존 GPR 안테나가 갖는 일반적인 문제점은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데 첫 번째로 표면반사에 의한 안테나 효율이 감소하는 문제이다. 안테나 표면에서 원하지 않는 반사가 생성되고 이러한 표면반사는 안테나 효율을 감소시키는 것뿐만 아니라 물체를 불확실하게 탐지할 수 있다. 또한 본 연구에서는 균열의 위치가 표면 가까이에서 나타나므로 표면반사가 심하면 신호의 구별이 어려워진다. 이를 해결하기 위해서는 지향성과 이득이 높은 안테나를 사용하여야 한다. 두 번째로 GPR 안테나의 낮은 주파수 대역이다. 이번 실험에서는 시편내부로 많은 에너지를 방사시켜야 하고 동시에 20 mm 이내의 균열을 탐지하여야 한다. 이번 실험에서 필요한 resolution에 관한 대략적인 식은 다음과 같다.

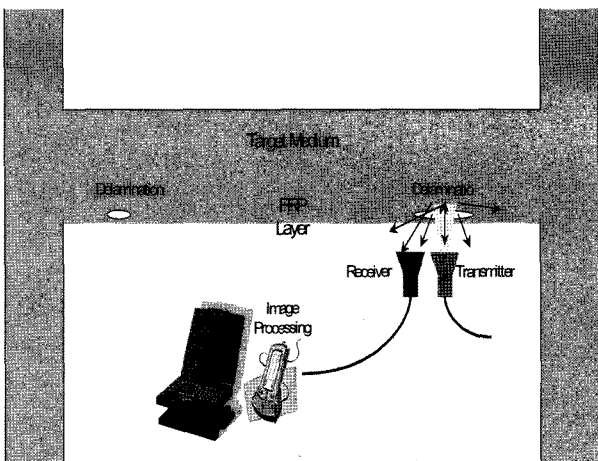


Fig. 1 Measurement setup using microwave

$$\Delta r = \frac{v}{4B} \quad (1)$$

B : bandwidth $v : 3 \times 10^8$ m/sec

만약 B가 10 GHz이면 $\Delta r = 7.5$ mm가 되고 대략적으로 박리의 크기가 10 mm 이내라고 하면 이론적으로는 resolution은 만족하게 된다. 또한 주파수를 더 높이면 효과적인 결과가 예상되나 주파수를 높일수록 투과성능이 떨어지는 점을 고려하여 적정 주파수 대역을 설정하여야 한다. 이번 실험에서는 중심주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz의 안테나를 사용하였다.

2.2 전자기파 모델링

FRP 보강 구조물의 박리 탐사에 안테나를 적용함에 앞서 전자기파의 컴퓨터 모델링 기법으로 탐색 가능한지 알아볼 필요가 있다. 모델링 기법은 유한차분 시간 영역법의 수치적인 해법을 이용하여 FRP로 보강된 콘크리트의 박리 유무에 따른 결과를 비교하여 전자기파를 이용한 방법이 얼마나 효율적으로 적용 가능한지를 판단하는 것이다. 모델링 기법에서 사용하는 입사파는 실제 안테나에서 입사하는 사인파의 유형이며 일반식은 다음과 같다.

$$P(t) = \cos(\omega t) e^{\left(\frac{-2(t-t_0)^2}{T^2}\right)} \quad (2)$$

T : 펄스 폭(pulse width) (sec)

t_0 : 시간 이격 (sec)

ω : 중심 주파수 (Hz)

또한 각 매질의 전자기적 특성인 유전율은 실험을 통하여 얻은 신뢰성 있는 값을 적용하여야 하며 이는 전자기파의 속도에 영향을 주고 다음 식으로 나타낸다.

$$v_c = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

v_c : 유전체 내에서 입사파의 속도 (m/sec)

C_0 : 빛의 속도(0.3×10^9 m/sec)

ϵ_r : 유전체의 유전율

즉, 유전율에 따라서 전자기파의 속도가 변하므로 정확한 값을 적용하여야만 모델링의 신뢰성이 커질 수 있다. 이러한 값을 적용하여 이론적으로 모델링을 한 선행 연구에서는 실제 안테나에서 나오는 사인파를 이용하여 박리 두께 (5 mm, 3 mm, 1 mm) 변수에 따른 모델링을 수행한 결과 박리 유무에 따른 반사파의 신호를 구별하는데 성공하였다. Fig. 2는 모델링을 통한 시간 영역에서의 반사파의 양상을 나타내고 있다.

실제 실험에서는 원하지 않는 반사파 (잡음)가 많을 것이며 시편의 상대도 균일하지가 않으므로 모델링과는 다른 결과가 예상되나 모델링을 통하여 가능성을 확인하게 되었다.

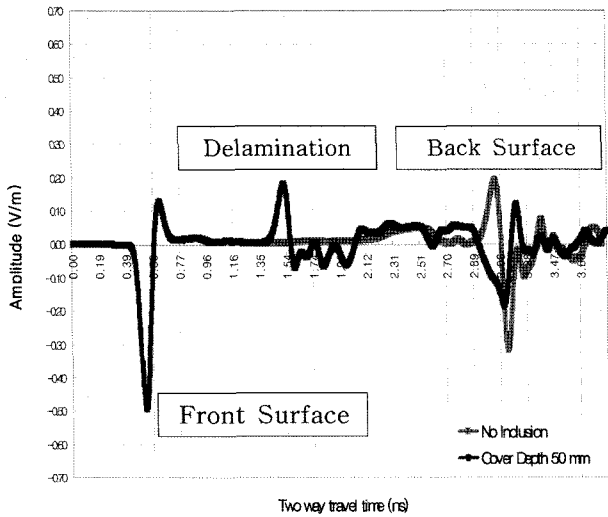


Fig. 2 Microwave modeling for detecting the delamination

2.3 초음파법을 이용한 연구

초음파법은 매질내의 상태에 따라서 초음파의 속도가 달라지는 성질을 이용하는 방법으로 음속을 이용하여 콘크리트의 강도, 두께, 균열 여부를 조사할 수 있다. 장비가 간편하고 검사 결과를 쉽게 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으나 콘크리트 및 철근의 영향으로 결과가 달라질 수 있는 단점을 가지고 있다.

최근에 콘크리트의 균열 탐사로 많이 쓰이고 있는 초음파법의 종류로는 충격력을 가한 후 초음파영역의 탄성파를 검출하는 충격 탐상법 (impact-echo method), 탐촉자 (probe)를 통한 탄성파를 발생시켜 균열을 검출하는 펄스 반사법, 공진주파수를 발생시켜 파의 변화에 의하여 검출하는 공진법 등이 있다¹⁰⁾. 이번 실험에서는 박리 측정용으로 특수 제작된 탐촉자를 이용하여 공진주파수를 보내 파의 변화를 통하여 박리 측정을 실시하였다. 즉 매질의 경계면에서 생기는 진폭의 크기는 음향학적 임피던스에 의하여 결정되며 수신용 탐촉자는 임피던스에 따라서 반응을 보이게 되는데 매질사이에 공극이 존재하게 되면 탐촉자의 반응이 크게 나타날 것이다. 측정 장비로는 최근 상용화된 TR 300 초음파 탐상기를 사용하였고 탐촉자의 주파수는 5 KHz를 사용하였다.

3. 실험 내용 및 결과

3.1 시험체 제작

두께 50 mm, 가로 600 mm, 세로 600 mm 장방형 무근 콘크리트 시편을 Fig. 3과 같이 상태가 다른 4구역으로 나누어 제작하였다. 콘크리트 강도는 28일 압축강도 21 MPa로 제작하였고 수중양생 하였다. 또한 스티로폼은 공기와 유전율이 같으므로 인위적인 박리의 발생으로 볼 수 있다. Zone 1 및 Zone 2는 무보강 콘크리트 시편을, Zone 3 및 Zone 4는 탄소섬유로 보강된 콘크리트 시편을 나타내고 있다. Fig. 4와 같이 인위적인 박리두께를 5 mm,

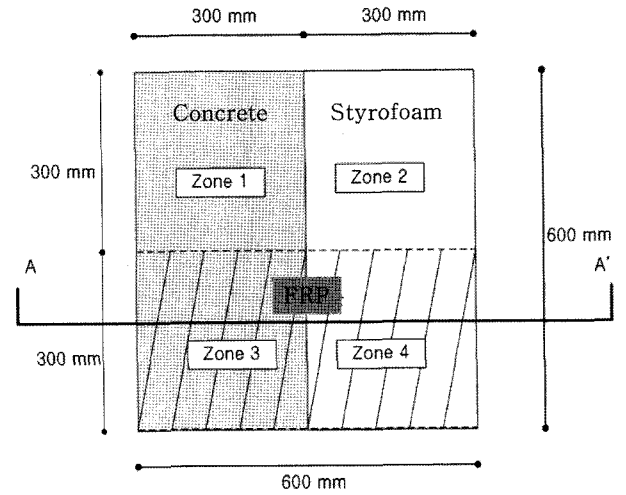


Fig. 3 Specimen plan

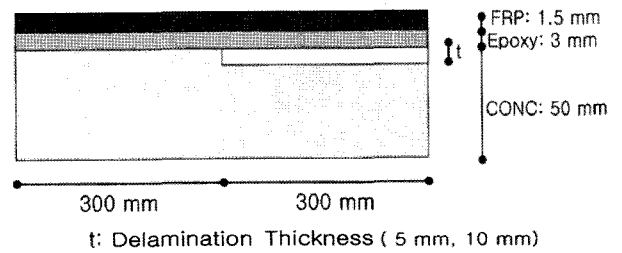


Fig. 4 Specimen section

10 mm로 하여 시편을 제작하였으며 FRP 및 에폭시의 두께는 각각 1.5 mm, 3 mm로 제작하였다.

3.2 전자기파법을 이용한 실험 결과

본 연구에서는 안테나가 시편내부로 많은 에너지를 방사시켜야 하고 동시에 표면에 있는 20 mm 이내의 균열을 탐지하여야 한다. 그러나 기존 GPR 안테나는 표면반사에 의한 안테나 효율이 감소하고 2 GHz 이내의 낮은 주파수 대역을 가지므로 이번 실험에서는 적합하지 않았다. 본 연구에서는 중심주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz의 성능을 가진 혼 안테나를 사용하였다. 박리의 미세한 크기로 인하여 주파수 대역을 높게 잡아야 하지만 주파수가 높아질수록 투과 성능의 효율성이 떨어지는 문제점이 발생하고 측정매질인 FRP가 고주파로 올라갈수록 전자기파를 흡수하는 특성을 가지고 있으므로 이러한 문제점을 고려하여 15 GHz의 적정한 주파수를 선택하였다. 또한 대역폭이 10 GHz 정도의 광대역의 특성을 가지므로 미세 균열에 대한 높은 탐지 능력을 가질 수 있게 되었다. Fig. 5는 혼 안테나를 이용한 실험 모습을 보여주고 있다.

실험 데이터 획득은 안테나와 연결된 Network Analyzer 장비를 이용하였는데 이 장비는 안테나의 반사파의 신호를 분석하는 역할을 하게 된다. 또한 이 장비에 있는 time gating 기능을 사용하였는데 이 기능은 시간영역을 세분화해서 측정할 수 있게 한다. 박리 발생 위치가 표면부근에서 이루어지므로 미세한 시간 단위에서의 분석이 효과

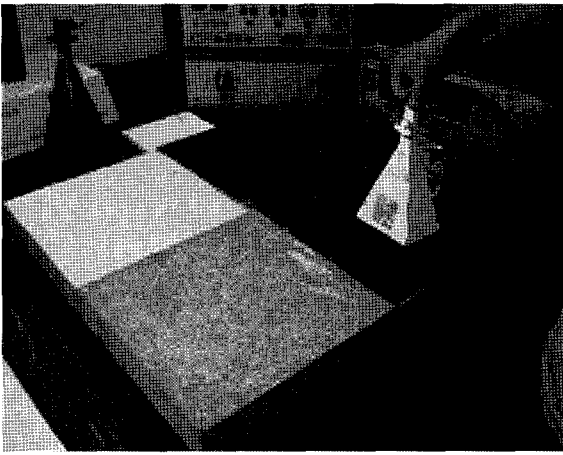


Fig. 5. View of measurement using horn antenna

적이므로 이 기능은 필수적이고도 중요한 역할을 하게 된다. 이번 실험에서는 신호의 식별을 최대화하기 위하여 시간영역을 최소화시켜야 한다. 즉 시편 앞면과 시편 뒷면의 두께가 60 mm 정도로 얇기 때문에 시편의 앞면에서 nano second 단위의 시간영역에서 신호를 분석하는 것이 효과적이라고 판단되었다. 따라서 먼저 시간영역에서 시편의 표면에 해당하는 포인트를 찾는 작업을 하였다. 각 과정 (커넥터 연결, 혼 안테나 연결)의 신호와 동판 측정을 통하여 신호를 습득한 후 각 경우별로 신호를 비교 분석하면 Fig. 6와 같이 시편표면의 시작점을 쉽게 찾을 수 있었다.

Fig. 6에서 보듯이 표면에 동판을 대고 측정할 경우 시

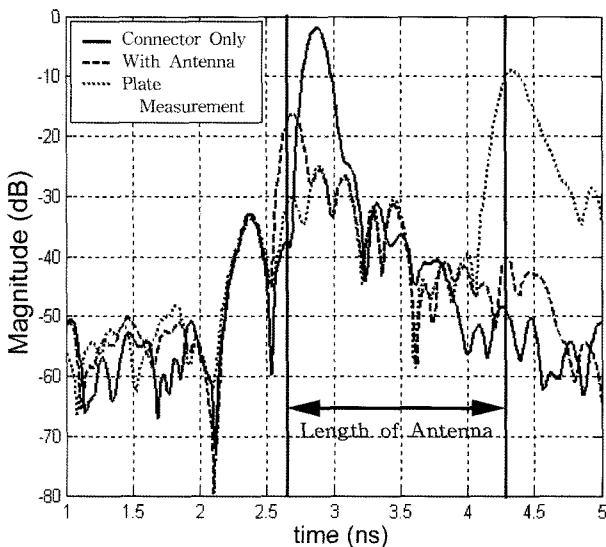


Fig. 6 Measured traveling time of surface

Table 1 Traveling time of each materials

Materials	Thickness(mm)	Dielectric constant(ϵ_r)	Traveling time(ns)	Arrival time(ns)
FRP + epoxy	4.5	3.5	0.056	4.396
Air 5 mm	5	1	0.033	4.429
Air 10 mm	10	1	0.066	4.462
Concrete 5 mm delamination	5	4.5	0.71	5.139
Concrete 10 mm delamination	10	4.5	0.71	5.172

편 표면의 시간은 4.34 ns으로 나타났다. 스티로폼의 유전율은 공기의 유전율과 같고 FRP 및 콘크리트의 유전율을 알면 약산식으로 도달시간을 구할 수 있다.

$$t = \frac{2x}{C} \sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

x : 매질 두께 (m)

C : 빛의 속도 (0.3×10^9 m/sec)

ϵ_r : 각 매질의 유전율

Table 1은 약산식으로 계산한 시편 각 매질의 도달시간을 나타내고 있다. 실험에서 사용된 유전율은 콘크리트의 경우 4.5, FRP + 에폭시의 경우 3.5, 그리고 공기층의 경우는 1.0 으로 적용하였다^{12,13}. 콘크리트의 유전율은 배합 시 사용된 골재의 종류, 수분과 염소이온 함량 정도에 따라 변하므로, 유전율 변화에 따른 심층 조사가 추후 필요하다¹⁴.

Table 1에서와 같이 10 mm 박리 시편의 경우 밀면 도달 시간이 5.172 ns으로 시편에 관계된 시간폭은 3.8-5.2 ns으로 볼 수 있다. Figs. 7 및 8은 5 mm 시편의 경우 전체 시간범위에서 측정된 결과이다. 이와 같이 전체 범위에서는 박리의 유무에 따른 구별이 매우 미세하게 보인다. 따라서 time-gating 기능을 사용하여 시편에 관련된 시간폭으로 확대하여 분석할 필요가 있었다.

Figs. 9-12는 time-gating 기능을 이용하여 해당 시간 범위에서 신호를 나타내고 있다. 무보강 구역에서는 스티로폼의 영향으로 인하여 시간이 뒤로 이동됨을 확인하였고 보강 구역에서는 박리의 유무에 따른 신호차가 나타나고 있다.

각 레이어에 대한 반사를 구별하기 위해서는 높은 해상도가 요구되어, 각 반사를 분리 할 수 있어야 한다. 그래서 반사파가 통합적으로 온다고 하더라도, 각 레이어 혹은 박리의 존재 파형이 바뀌어 지기 때문에, 박리 탐사만을 위해서는 각 레이어 구분이 반드시 필요하지는 않다.

3.3 초음파법을 이용한 실험 결과

실험 시편은 전자기파법을 이용한 실험에서 소개한 시편 (박리 두께 5 mm, 10 mm)을 사용하였다. 이번 실험에서는 콘크리트 균열 측정용으로 제작된 상용화 장비인 TR-300을 이용하였다. 탐촉자는 5 KHz의 주파수를 가진

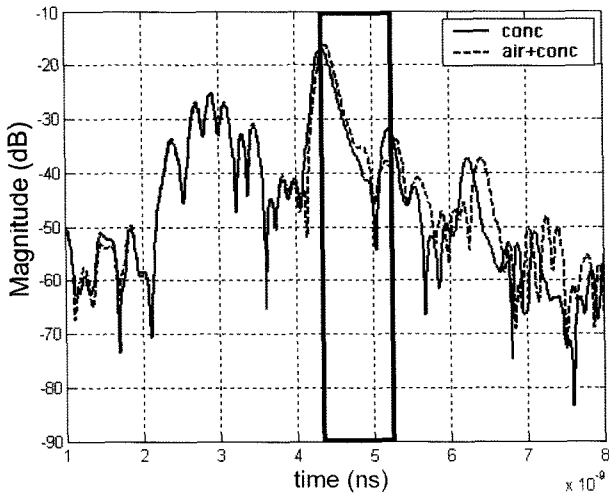


Fig. 7 Measurement of zone 1 and zone 2 (5 mm specimen-total time)

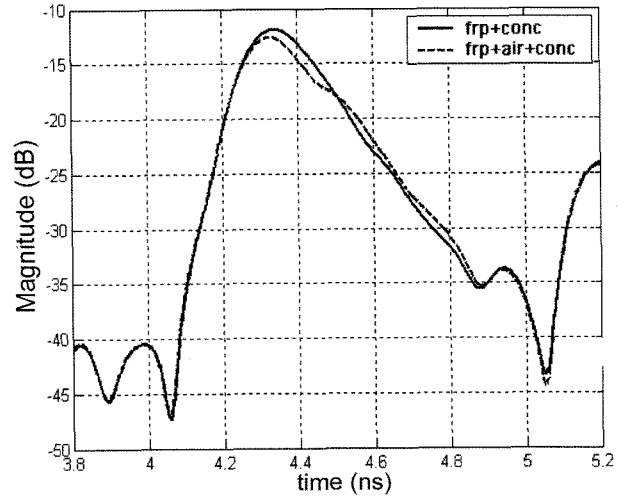


Fig. 10 Measurement of zone 3 and zone 4 (5 mm specimen)

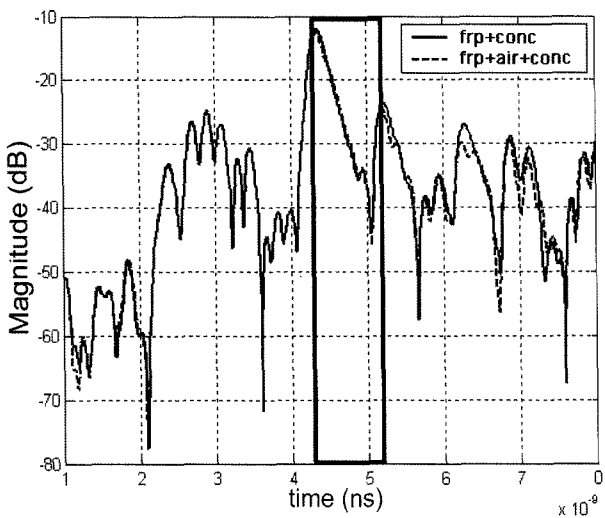


Fig. 8 Measurement of zone 3 and zone 4 (5 mm specimen-total time)

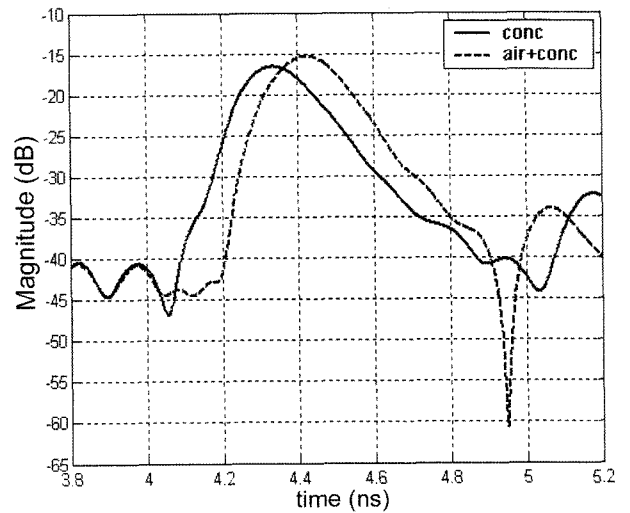


Fig. 11 Measurement of zone 1 and zone 2 (10 mm specimen)

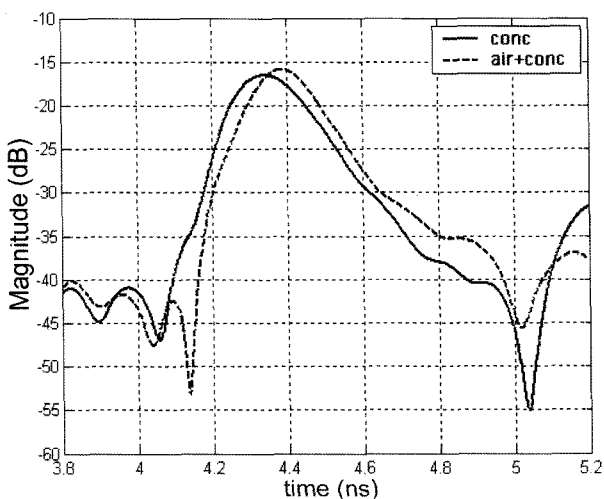


Fig. 9 Measurement of zone 1 and zone 2 (5 mm specimen)

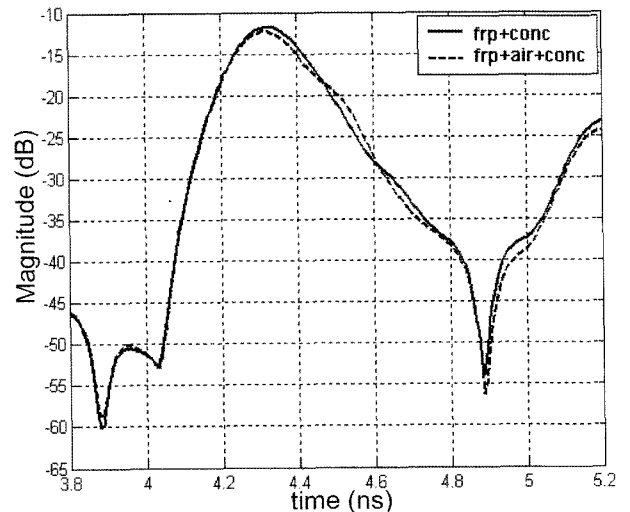


Fig. 12 Measurement of zone 3 and zone 4 (10 mm specimen)

송수신용 탐촉자를 이용하여 실험을 실시하였다. 이 탐촉자는 박리측정용으로 특수제작된 것으로 매질의 임피던스 차에 의하여 수신용 탐촉자에서 신호를 받아들여

된다. 탐촉자 간의 거리는 선행 연구에서 100~200 mm가 적절한 유효탐상거리로 판명된 것을 참고로 시편 크기를 고려하여 100 mm로 정하였다¹¹⁾. 상태별로 구분된 각 구

역마다 도달 파형의 진폭변화에 대한 비교 분석을 통하여 결과를 나타내었다. 그 결과 무보강 구역 (Zone 1, Zone 2)에서는 도달파형이 극히 미소하였고 보강이 잘 된 구역 (Zone 3)에서도 FRP와 콘크리트의 음향학적 임피던스가 비슷하여 도달파형이 미소하게 나타났다. 그러나 보강이 제대로 안 된 구역 (Zone 4)에서는 임피던스의 차에 의하여 수신용 탐촉자에서 받은 도달파형이 큰 진폭을 나타내었다. 이러한 결과로 박리 유무에 대한 평가가 가능하였다.

그러나 박리 두께별 (5 mm, 10 mm)로는 별 차이를 보이지 않았다. 즉 도달파형의 진폭만으로는 박리의 크기 및 위치에 대한 정보를 얻을 수가 없었고 또한 탐촉자의 이격 거리 및 탐촉자의 측정 각도에 따라서 결과물이 많은 차이를 보이고 있으므로 적절한 변수를 산정하고 결과 그래프를 분석하는 연구가 추후에 진행되어야 할 것이다.

Fig. 13은 TR 300을 이용한 실험 모습을 보여주고 있으며 Figs. 14~16은 각 상태별 결과를 보여주고 있다.

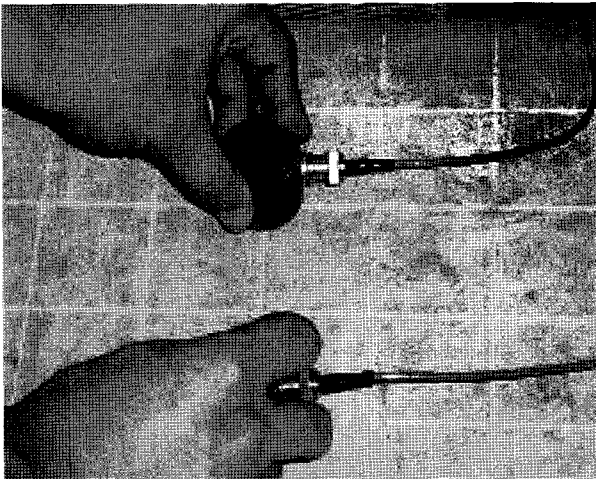


Fig. 13 View of measurement using TR-300

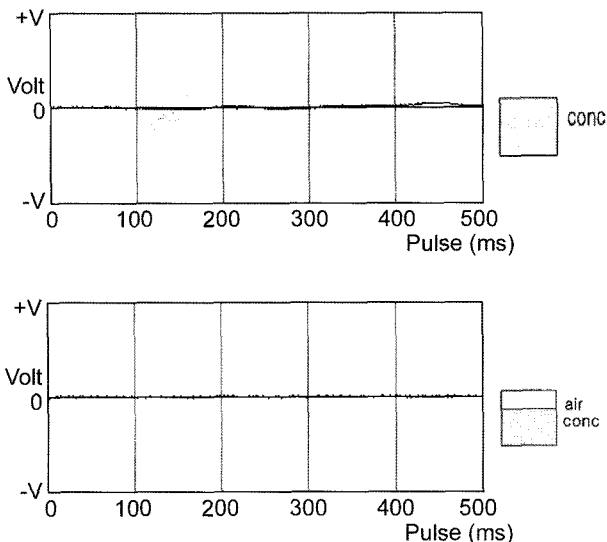


Fig. 14 Measurement of zone 1 and zone 2 (5 mm specimen)

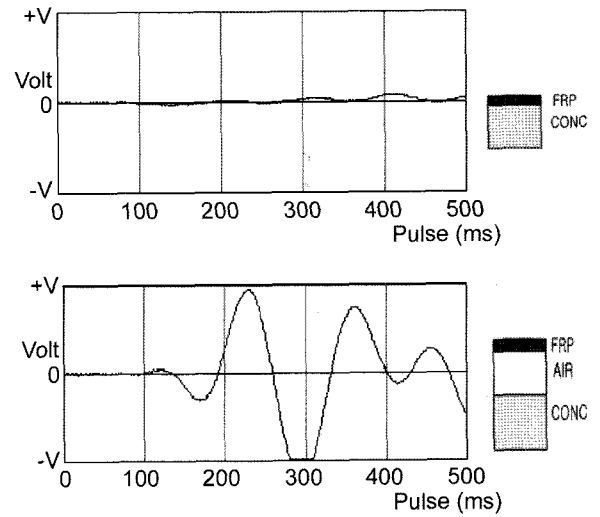


Fig. 15 Measurement of zone 3 and zone 4 (5 mm specimen)

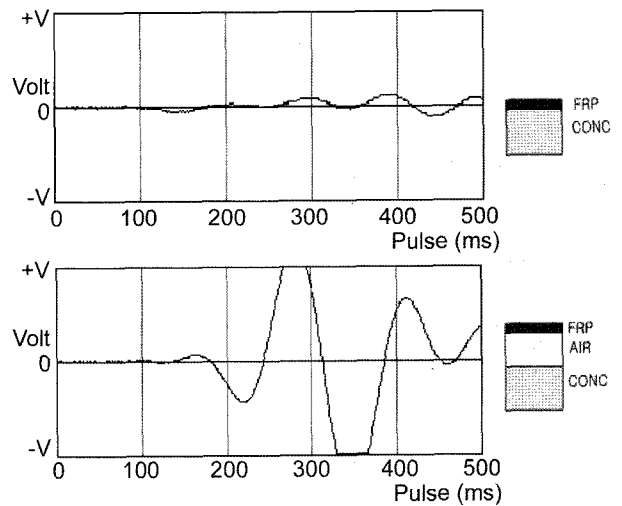


Fig. 16 Measurement of zone 3 and zone 4 (10 mm specimen)

4. 결 론

본 연구에서는 인위박리시편을 통하여 전자기파법과 초음파법을 이용하여 탄소섬유 보강 콘크리트의 박리를 탐사하는데 성공하였고 효율적인 비파괴 검사기법을 위한 기초를 마련하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 전자기파법의 경우 기존 GPR 안테나 대신 고주파 및 광대역의 특성을 가진 혼 안테나를 이용하여 측정을 실시하였다. 또한 초음파법의 경우에는 공진 주파수법을 이용하여 박리측정용으로 제작된 TR-300 장비를 사용하여 측정을 실시하였다.
- 2) 중심 주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz의 성능을 가진 혼 안테나 측정 결과 박리 예상 구역에서 신호의 차이를 보이고 있어 박리 유무의 구별이 가능하였다. 단, 박리의 크기를 판별하기 위해서는 안테나의 성능을 높이는 연구가 필요할 것으로 예상된다.
- 3) 초음파 장비 (TR-300)를 이용하여 측정한 결과 박

리유무에 따른 신호가 확실하게 구별이 되었다. 단, 탐촉자의 이격거리 및 측정각도에 따라서 결과물의 차이를 보이고 있어 실구조물에서의 적용을 위해서는 더욱 세밀한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

- 4) 전자기파법 및 초음파법을 이용한 실험을 비교하면 박리 유무에 대한 판정이 가능하였다. 그러나 두 방법 모두 적절한 조합의 측정 매개변수를 선정하여 적용시켜야지만 더욱 정확하고 정밀한 검사가 가능하였다. 향후 연구는 이러한 방향으로 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 2004년도 전력산업기술개발사업비의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 심종성, 김규선, “건설 분야에서의 FRP 사용”, 콘크리트학회 논문집, 12권, 6호, 2000, pp.37~43.
2. 박중열, 조홍동, 한상훈, “탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 보강방법에 따른 휨성능 개선”, 대한토목학회 논문집, 22권, 4-A호, 2002, pp.895~903.
3. Bastianini, F., Di Tommaso, A., and Pascale, G., “Ultrasonic Non-destructive Assessment of Bonding Defects in Composite Structural Strengthenings”, *Composite Structures*, Vol.53, No.4, 2001, pp.463~467.
4. Kunda, T., Ehsani, M., Maslov, K. I., and Guo, D., “C-scan and L-scan Generated Images of the Concrete/GFRP Composite Interface”, *NDT & E International*, Vol.32, No.2, 1999, pp.61~69.
5. 이현호, 이주영, “적외선카메라를 이용한 섬유쉬트 보강공법의 결함검지”, 대한건축학회 논문집, 16권, 10호, 2000,

pp.70~77.

6. Feng, M. Q., Flaviis, F. D., and Kim, Y. J., “Use of Microwaves for Damage Detection of Fiber Reinforced Polymer-Wrapped Concrete Structures”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.128, No.2, 2002, pp.172~183.
7. Buyukozturk, O. and Rhim, H. C., “Radar Imaging of Reinforced Concrete Specimens for Nondestructive Testing”, *Nondestructive Evaluation of Aging Bridges and Highways*, *International Society for Optical Engineering*, Oakland, California, SPIE Vol.2456, 1995, pp.186~194.
8. 임홍철, 이지훈, 손병오, “레이더를 이용한 콘크리트의 두께 측정과 유효 측정범위 설정에 관한 연구”, 한국비파괴검사학회 논문집, 20권, 4호, 2000, pp.296~304.
9. 임홍철, 김우석, “레이더를 이용한 콘크리트 시편 내 수평 배근 간격 탐사”, 한국지진공학학회 논문집, 4권, 2호, 2000, pp.65~71.
10. Uchida, M. and Okamoto, T., “Evaluation of Crack Detection in Reinforced Concrete Structure using Ultrasonic”, *JSCE*, Vol.49, No.662, 2000, pp.223~230.
11. 임홍철, 김연수, 우상균, 송영철, “초음파를 이용한 콘크리트 시편의 피복두께 이하에 위치한 균열깊이 탐사”, 한국구조물진단학회 논문집, 6권, 4호, 2002, pp.181~188.
12. Rhim, H. C. and Buyukozturk, O., “Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range”, *ACI Materials Journal*, Vol.95, No.3, 1998, pp.262~271.
13. 임홍철, 정성훈, “비파괴 시험을 위한 콘크리트의 전자기적 특성의 측정”, 콘크리트학회 논문집, 12권, 3호, 2000, pp.115~123.
14. Alongi, A. J., Clemena, G. G., and Cady, P. D., *Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion Vol. 3: Method for Evaluating the Condition of Asphalt-Covered Decks*, Report No. SHRP/S/FR-92/105, Strategic Highway Research Program, Penetradar Corporation, Virginia Transportation Research Council, and Pennsylvania Transportation Institute, Washington, D.C., 1992, pp.1~84.

요 약 구조물의 성능평가에 대한 관심이 높아지면서 비파괴 검사 기술에 대한 요구는 계속 증가하고 있다. 이 중에서 전자파법을 이용한 비파괴 검사 기술은 콘크리트 구조물의 균열 탐사에 유용하다고 입증되어 왔고 탄소섬유 (FRP)로 보강된 콘크리트 구조물의 계면 박리를 탐사하는데도 효율적으로 쓰일 수 있을 것으로 예상되었다. 또한 초음파법을 이용한 비파괴 검사 기술도 적용 가능할 것으로 예상되었다. 이번 연구의 목적은 전자기파법 및 초음파법을 이용하여 FRP로 보강된 콘크리트 구조물의 박리를 탐사하기 위한 신뢰성 있는 기술을 개발하는데 있다. 기초 실험을 위하여 스티로폼을 이용하여 인위박리 콘크리트 보강시편을 제작하였고 측정을 실시하였다. 전자기파법을 이용한 연구에서는 기존 안테나 대신에 중심 주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz의 성능을 가진 혼 안테나를 사용하였고 초음파법을 이용한 연구에서는 콘크리트 균열용 상용 장비인 TR-300에 박리측정용 탐촉자를 사용하여 측정을 실시하였다. 두 가지 방법 모두 박리의 유무를 판별하는데 성공하였고 더욱 정밀한 결과를 위하여 향후 연구 방향을 제시하였다.

핵심 용어 전자기파법, 초음파법, 콘크리트, 탄소섬유 보강판, 박리