

## Microstrip Patch Antenna를 이용한 탄소섬유시트 보강콘크리트의 박리 탐사

### Delamination Detection of FRP Sheet Reinforced Concrete Using Microstrip Patch Antenna

임홍철\*<sup>†</sup>, 이효석\*\*, 이상균\*\*\*, 송영철\*\*\*

Hong-Chul Rhim\*<sup>†</sup>, Hyo-Seok Lee\*, Sang-Kyun Woo\*\*\* and Young-Chul Song\*\*

**초 록** 중심주파수가 15 GHz이고, 대역폭이 1 GHz인 마이크로 스트립 패치 안테나를 이용하여, 탄소섬유시트로 보강된 콘크리트의 계면박리를 탐사하는 실험을 실시하였다. 개발된 안테나의 성능을 비교하기 위하여, 중심주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz인 상용 horn 안테나를 이용하여 비교실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시편은 600 × 600 × 50 mm 의 크기를 가지며, 그 표면에 1.5 mm 두께의 FRP 시트를 3 mm 두께의 에폭시로 부착하였으며, 5, 10, 15 mm 두께의 박리를 인공적으로 형성하였다. 실험결과 5, 10, 15 mm 박리 모두 측정이 가능하였으며, 측정은 보강구역과 무보강구역을 구분하여 이루어 졌다.

**주요용어:** 박리, 탐사, FRP 시트, 콘크리트, 마이크로웨이브, 패치 안테나

**Abstract** A series of experimental work has been conducted to evaluate the capability of microstrip patch antenna system in detecting delamination in fiber reinforced Plastic (FRP) sheet reinforced concrete. For that purpose, a prototype microstrip patch antenna was developed with 15 GHz center frequency and 1 GHz bandwidth. For the comparison, a horn antenna with 15 GHz center frequency and 10 GHz bandwidth was used for the measurements of the same specimens. The laboratory size specimens have the dimensions of 600 mm (length) × 600 mm (width) × 50 mm (thickness) with a series of delaminations of 300 mm (length) × 300 mm (width) × 5, 10, 15 mm (thickness). FRP of 1.5 mm thickness and epoxy of 3 mm thickness were placed on the top of artificially created delamination to represent actual FRP reinforced concrete condition. In all cases, the delamination has been successfully identified. Also, it was shown that imaging results in microstrip patch antenna were improved by signal processing.

**Keywords:** Delamination, Detection, FRP Sheet, Concrete, Microwave, Patch Antenna

#### 1. 연구 목적과 배경

탄소섬유시트 (fiber reinforced plastic sheet, 이하 FRP 시트)는 건축, 토목 구조물의 구조보강제로 널리 사용되고 있다. 건축 구조물에서는 보, 슬래브

의 하부 내력성능 보강용으로[1,2], 토목 구조물에는 교량 상판 하부 보수, 또는 터널내부 보강에 활용되고 있다[3,4]. FRP 시트는 강재에 비해 경량이며, 부식이 없고, 설치가 상대적으로 용이한 이유로 보강재로서 그 사용이 늘어나고 있다.

반면, FRP 시트를 이용한 보강은 콘크리트와 부착된 FRP 시트와의 박리로 구조물의 파괴가 발생할 수 있다[5]. FRP 시트와 콘크리트의 박리는 육안으로 확인이 어렵고, 박리의 폭이 작아, 시공 후 밀착여부를 판별하는데 어려움이 따른다. 또한, 시간이 경과함에 따라, 초기박리가 있을 경우, 이의 진행을 사전에 탐사하는 것이 구조물의 안전성 확보를 위해 필요하다.

현재 박리탐사방법은 크게 초음파 탐상법과 전자기파 측정법으로 나뉘고 있다. 초음파탐상법의 경우, 사용기기가 단순하여 사용이 간편하고, 전자기파의 측정 장비에 비해 가격이 저렴하지만, 측정부위에 대해서 약 5~10 cm 일정한 격자로 측정해야 하므로 측정시간이 길어 질 수있다[6]. 전자기파 측정법의 경우, 측정에 소요되는 시간이 초음파방법에 비해 짧고, 넓은 면적을 한 번에 측정할 수 있지만, 고가이며, 측정데이터를 처리, 해석 하는데, 기술적 어려움이 존재한다[7,8].

본 연구에서는 전자기파 방법을 사용하여[9-11], FRP 시트와 콘크리트의 박리를 찾아내는 실험을 수행하였으며, 그 측정 시스템을 개발하는데 목적이 있다. 전자기파를 이용한 측정은 콘크리트와 FRP 시트 박리 폭을 감지할 수 있는 안테나의 주파수와 대역폭을 찾는 것이 필요하다. 일반적으로 쓰이는 안테나는 그 주파수가 900 MHz ~ 1.5 GHz로 mm 단위의 박리를 찾기에는 해상도가 낮다. 따라서, 10 ~ 15 GHz 대역의 고주파수 안테나를 사용하고, 이에 필요한 신호처리 기법을 함께 연구, 개발하였다.

본 연구에 적합한 안테나로는 horn 안테나와 microstrip patch 안테나를 들 수 있는데 안테나 이득 및 대역폭에서는 microstrip patch 안테나보다 horn 안테나가 우수하다. 따라서, microstrip patch 안테나의 경우에 많은 안테나소자를 배열시켜 설계함으로써 이러한 단점을 극복하였다. 이번 실험에서는 microstrip patch 안테나와 비교실험을 위한 상용 horn 안테나를 이용하여 실험을 실시하였다. Microstrip patch 안테나는 중심주파수 15 GHz, 대역폭 1 GHz의 조건을 가진 안테나이며, 비교실험을 위한 horn 안테나의 조건은 중심 주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz를 가진 상용 도파관용 안테나를 사용하였다.

본 실험에서는 5, 10, 15 mm 박리를 가진 3개의 FRP sheet 보강시편을 측정하고, 실험에 대한 결과 값을 신호처리 프로그램을 이용하여 분석한 결과, 시

편의 보강된 부분에 대한 박리의 유무를 확인하였다.

## 2. Microstrip Patch 안테나 제작

### 2.1. Microstrip Patch 안테나의 특성

현재 범용적으로 사용되는 안테나는 horn 안테나 계열인 ground penetrating radar (GPR) 안테나이나, 본 연구에서는 microstrip patch 안테나를 사용하여 박리 측정을 진행하였다. Horn 안테나의 경우 10 GHz의 microstrip patch 안테나 대비 넓은 대역폭을 가졌으며, 높은 이득률을 가져서 측정에 대한 신뢰도가 높다. 그러나 patch 안테나에 비해 높은 가격이 단점이다. 사용하는 microstrip patch 안테나는 horn 안테나 대비 1/2~1/3의 낮은 가격이 장점이지만, 1 GHz의 낮은 대역폭과 낮은 이득률이 측정에서 단점이므로, 이를 각 patch 안테나를 배열시켜 설계함으로써 개선하였다. 일반적인 microstrip patch 안테나와 horn 안테나의 특성을 Table 1에 비교하였다.

Table 1 Characteristics of patch and horn antennas

사 용 도	변수	Microstrip Patch Antenna [실험사용 값]	Horn Antenna [실험사용 값]
탐 사 성 능	Center Frequency (중심주파수)	[15 GHz]	[15 GHz]
해상도	Frequency Bandwidth (대역폭)	Low [1 GHz]	High [10 GHz]
감도	Gain (이득)	일방향 [18~20 dB]	양방향 [23 dB]
편이성	크기	horn 안테나의 1/2 크기	
경제성	가격	저가 [horn 안테나의 1/3~1/2 가격]	고가

회로망에서 생성된 전자기파는 전선을 통해 안테나로 공급된다. 이때, microstrip patch 안테나에서 변환된 전자기파가 매질에 도달하게 되고, 매질의 각층에서 투과와 반사가 이루어지는데, 반사된 전자기파를 안테나에서 흡수하는데 걸리는 시간의 차이로서 박리의 유무를 예측할 수 있다. 측정 시스

템에 대한 설명은 Fig. 1과 같다.

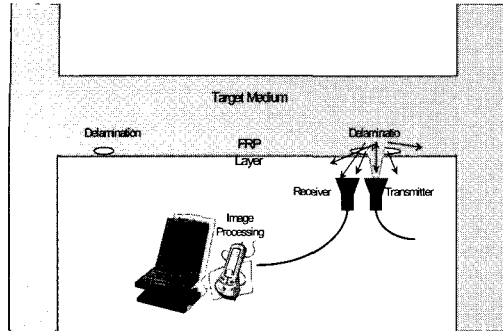


Fig. 1 Schematic diagram of microstrip patch antenna measurement

### 2.2. Microstrip Patch 안테나의 설계

Microstrip patch 안테나의 크기 결정은 가로 x 세로로 결정 되는데, 안테나의 크기는 측정 대상인 시편의 크기보다 작게 제작해야 하고, 해상도를 증가시키기 위해서 정렬한 patch의 면적과 배치형태를 고려했을 때, 4 x 8 array의 150 mm x 80 mm 크기로 이루어져 있다.

안테나 설계 시 결정해야 할 두 번째 특징은 안테나 측정 시, 각 patch 사이의 시간적인 차이 없이 동시에 전자기파의 송출 (feeder synchronize)이 가능하여야 한다. 전자기파의 송출은 feeder를 통해서 보내는데, 각 patch는 feeder를 통해 전달받은 전자기파를 동시에 방출 되도록 동기화가 필요하였다. 높은 지향성과 낮은 부엽 (side lobe)을 갖기 위해서는 적절한 간격으로 배열 안테나간의 거리를 정해 주어야 하는데, 일반적으로 사용하는 방법인 유전율이 2에서 2.5인 경우 안테나가 송출하는 파장의 0.75에서 0.9사이의 이격 거리를 갖도록 설계를 하였다(Fig. 2 참조).

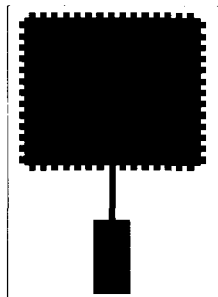


Fig. 2 Shape of microstrip patch antenna

Microstrip patch 안테나 제작 시 고려해야 할 특성과, 설계 시에 고려해야 할 사항에 대해서 조사하고, 설계를 진행하는 종합적 과정은 Fig. 3과 같다.

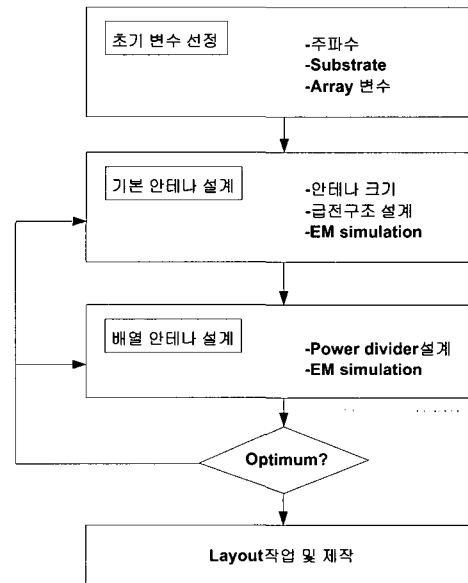


Fig. 3 Flow chart for antenna design

### 3. 시험체의 전자기적 특성

레이더를 이용한 구조물의 비파괴 검사는 전자기파가 구조물에 부딪혔을 때 발생하는 반사 등의 현상을 분석함으로써 이루어지는데, 전자기파는 진공이나, 공기 중에서 빛의 속도  $c$ 로 진행하지만, 유전체 속에서는 식 (1)과 같이 유전율이 큰 매질일수록 속도( $v$ )가 느려지게 된다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{1}$$

여기서  $v$  : 전자파 투과속도,  $c$  : 빛의 속도,  $\epsilon$  : 매질에 대한 유전율이다

이러한 현상은 전자기파를 통하여 측정하는 것에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 레이더를 이용한 콘크리트의 비파괴검사 과정에서 전자기적 성질을 규정하는 것은 검사의 정밀도와 신뢰도를 높이는 데 필수적이다.

이를 위한 기초단계로서 콘크리트와 FRP 시트, 에폭시의 전자기적 특성을 측정하였다. 물질의 대

표적인 전자기적 재료 성질로는 유전율과 손실계수 등이 있으며, 본 연구에서는 실험에 직접적으로 사용되는 계수인 유전율에 대해서 1~25 GHz의 고주파수대역에 걸쳐서 측정하였다.

### 3.1. 콘크리트의 유전율 측정 결과

콘크리트의 전자기적 특성은 수분함유량에 의해서 영향을 받으므로, 수분함유량을 다르게 한 시편에 대하여 개방 동축 선로 측정기 (open-ended coaxial probe)와 회로망 분석기(network analyzer)를 이용하여 측정하였다. 콘크리트의 전자기적 특성을 위한 수분함량 상태기준은 Table 2와 같다.

Table 2 Moisture content of concrete specimens

Specimen Condition	Moisture Content(%)	Moisture Control
Dry 1 (절건 상태)	0	48시간동안 105℃에서 노건조 시킨 상태
Dry 2 (기건 상태)	약 2.6	대기 중에서 건조 (상대습도 57%,기온22℃)
Wet 1 (습윤 상태)	약 6.3	젖은 수건으로 싸서 24시간동안 보존한 상태
Wet 2 (포화 상태)	약 8.6	수조에서 24시간동안 담근 후 바로 꺼낸 상태

콘크리트 시편은 지름 100 mm 두께 15 mm 로 제작하였다. 콘크리트 시편의 두께가 최소 5 mm 이상이면 시편 뒷면에 있는 물질의 영향을 받지 않지만, 시편의 수분조절과 제작과정에서의 오차를 생각하여 두께를 15 mm로 제작하였다(Fig. 4).



Fig. 4 Concrete specimens for measuring dielectric constant

이번 실험에서 시편개수는 상태별로 4개씩 만들어 5회 측정을 하여 그 평균값을 비교하였다. 주파수 대역은 고주파수 대역 (10~20 GHz)으로 표시하였다. 콘크리트 시편은 수분함량에 따른 결과와 시편강도에 따른 결과를 나눠서 측정하였다(Fig. 5).

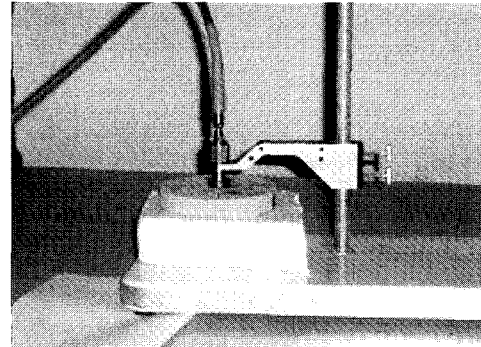


Fig. 5 Measurement of concrete dielectric constant

네 가지 (절건, 기건, 습윤, 포화상태) 수분함량에 따른 유전율은 Fig. 6과 같다. 수분함유량이 높을수록 유전율이 높게 나왔다. 그러나 절건 및 기건 상태인 경우에는 거의 차이가 나지 않았다. 이중 실험에서 사용되는 시편의 강도는 21 MPa로서 기건상태로 약 4.0의 유전율을 도출 할 수 있었다. 따라서 실험에 사용하는 유전율은 콘크리트의 경우 4.0을 사용 하였다. 또한 실험에서 사용할 시편인 기건상태의 시편의 경우 주파수 대역의 변화에 유전율은 차이가 없었다.

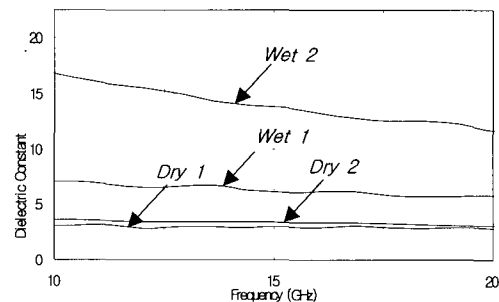


Fig. 6 Dielectric constant of 21 MPa concrete specimen

### 3.2. 탄소섬유 보강시트 및 에폭시 측정 결과

탄소섬유 보강시트 시편의 크기는 120 mm × 120 mm의 정방형으로 제작하였고 얇은 두께 (약

1.5 mm)로 인한 오차요인이 존재하기 때문에 1 ply에서 5 ply까지 겹을 변화시키면서 측정하였다. 또한 에폭시는 지름 100 mm의 원형으로 두께는 30 mm로 제작하여 측정하였다.

탄소섬유 보강시트 및 에폭시를 측정한 결과 탄소섬유 보강시트는 3.5~4 이내 범위, 에폭시는 2.8~3.3 이내 범위의 유전율 값을 나타내었다. 손실계수는 거의 0에 가까운 값을 나타내어 전기적인 손실이 거의 없음을 보여주었다(Fig. 7).

주파수 변화에 따라서 탄소섬유 보강시트의 유전율 및 손실계수는 큰 변화를 나타내지만 에폭시는 거의 변화를 보이고 있지 않다. 즉, 탄소섬유 보강시트는 주파수 변화에 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

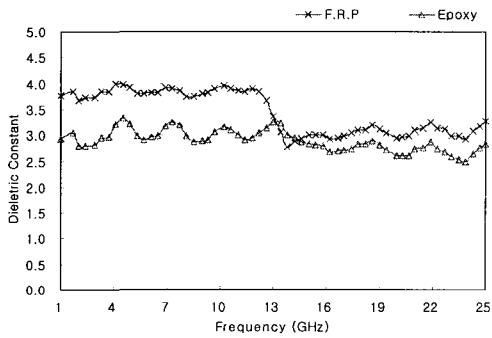


Fig. 7 Dielectric constant of FRP and epoxy

4. 안테나 실험 및 결과

4.1. 시험체 제작

시편의 상태를 Fig. 8, 9와 같이 4구역으로 나누어 박리를 5, 10, 15 mm의 3가지 두께로 삽입하여 각각의 구역에 따라서 실험을 실시하였다. 실험

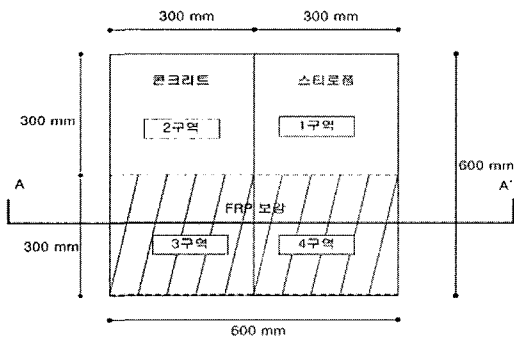


Fig. 8 Plan view of specimen

에 사용된 시료는 Fig. 8과 같이 FRP 시트, 에폭시, 스티로폼, 콘크리트(28일 강도 21 MPa)의 4가지로 구성되며, 이때 박리 제작을 목적으로 사용한 스티로폼은 공기와 유전율이 같으므로 박리가 형성된 구역을 의미한다. 시편의 영역별 구조도는 Table 3과 같다.

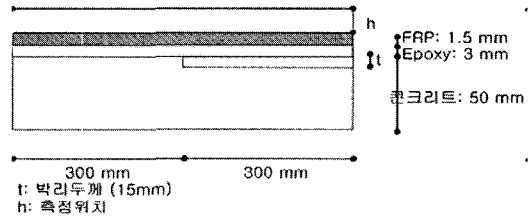


Fig. 9 Section of specimen

Table 3 Composition of each measurement zone

1구역	스티로폼+ 콘크리트
2구역	콘크리트
3구역	F.R.P+콘크리트
4구역	F.R.P+스티로폼+콘크리트

4.2. Microstrip Patch 안테나 실험결과

자체제작한 중심주파수 15 GHz, 대역폭 1 GHz의 4 x 8 microstrip patch 안테나를 사용하여 15 mm에서 박리가 작은 순서로 시편 실험을 진행하였다. 그리고 무보강된 구역의 시편 중 박리가 있는 부분과 없는 부분에 대한 차이를 측정 한 후, FRP 시트 보강된 구역의 박리가 있는 부분과 없는 부분에 대한 차이를 조사하였다. Fig. 10은 microstrip patch 안테나를 이용하여 박리탐사를 실시한 모습이다.

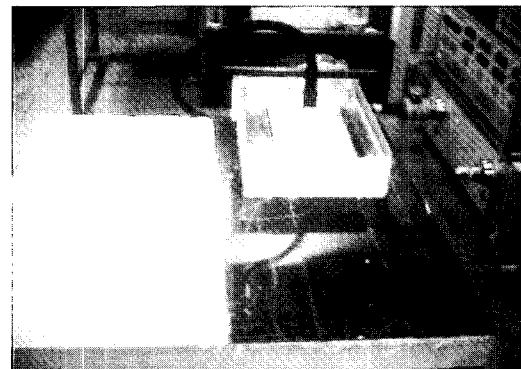


Fig. 10 Measurement using microstrip patch antenna

5, 10, 15 mm 박리를 가진 시편 중 3가지 시편 모두에서 보강부위의 박리측정이 가능하였으며, 박리두께가 두꺼워 질수록 박리측정이 결과가 더 명확하였다. 또한 무 보강 구역과 보강구역 모두 박리측정이 가능 하였고, 무보강구역에 비해 보강구역이 측정결과와의 차이가 감소함을 확인하였다. Fig 11, 12 는 실험 중 가장 측정 차이가 작았던 5 mm 박리의 측정 실험결과이다. 박리의 유무에 대해서 보강구역 과 무보강 구역 모두 차이를 확인 할 수 있었다.

5 mm 의 박리두께를 가진 시편의 무보강구역에 대한 microstrip patch 안테나의 측정결과는 다음과 같다. (Fig. 11) 콘크리트 두께가 50 mm 인 1구역 에서 측정한 결과값이 Fig 11에서 실선으로 나타나 있고, 5 mm 의 박리를 가진 2구역의 측정값이 점선으로 나타나 있다. Fig. 11에서 확인 할 수 있는 것처럼 전 영역에서 뚜렷한 차이를 볼 수 있다.

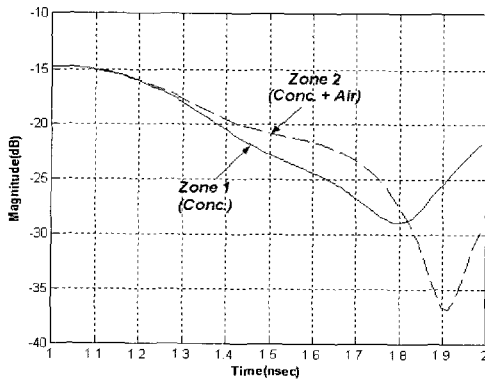


Fig. 11 Microstrip patch antenna measurement result of zone 1 and zone 2 (5 mm delamination specimen)

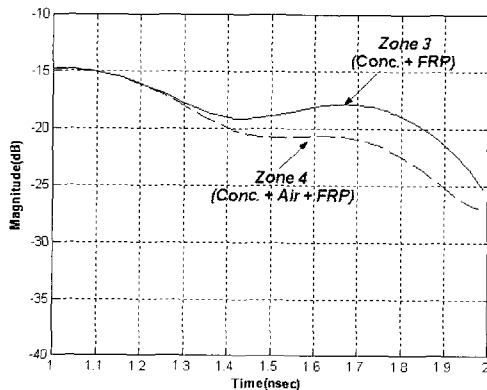


Fig. 12 Microstrip patch antenna measurement result of zone 3 and zone 4 (5 mm delamination specimen)

5 mm 박리를 가진 시편의 보강구역에 대한 microstrip patch 안테나의 측정결과 역시 명확한 측정이 가능하였다(Fig. 12). 콘크리트 두께가 50 mm 인 3구역 에서 측정한 결과값이 Fig. 12에서 실선으로 나타나있고, 5 mm 의 박리를 가진 4구역의 측정값이 점선으로 나타나 있다. 1.3 ns 구역부터 2.1 ns까지의 구역에서의 차이가 확인 가능하였다.

4.3. Horn 안테나 비교 실험결과

Microstrip patch 안테나의 측정에 대한 신뢰도를 높이기 위해 현재 상용화 되어있는 도파관용 안테나를 사용하여 실험을 진행하였다(Fig. 13). Horn 안테나의 경우 microstrip patch 안테나와 비교해서 중심 주파수는 15 GHz로 같지만, 대역폭이 10 GHz로 microstrip patch 안테나의 10배의 광 대역폭을 가짐으로서 명확한 측정값을 예상할 수 있었다. 결과는 microstrip patch 안테나와 마찬가지로 5, 10, 15 mm 박리를 가진 세 가지 시편 모두에서 측정이 가능하였고, 얇은 박리를 가진 시편을 진행할수록 차이 값이 감소하는 것을 확인하였다. 또한 microstrip patch 안테나에 비하여 수치상으로 명확한 차이를 확인할 수 있었다.

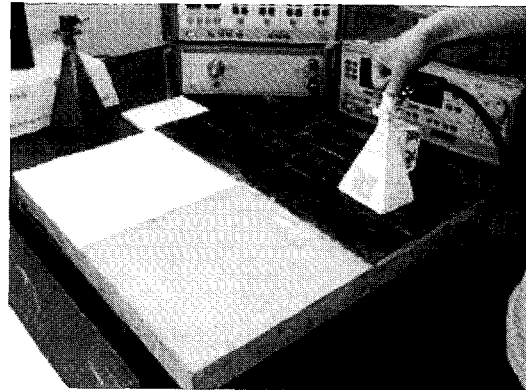


Fig. 13 Measurement using horn antenna

Fig. 14, 15는 5 mm 박리를 가진 시편에서 horn 안테나를 이용한 측정 결과를 나타낸다. Fig 14는 5 mm 의 박리두께를 가진 시편을 나타낸 것으로서, 콘크리트 두께가 50 mm 인 2구역 에서 측정한 결과 값이 실선으로 나타나있고, 5 mm 의 박리를 가진 1구역의 측정값이 점선으로 나타나 있다. Fig에서 확인 할 수 있는 것처럼 뚜렷한 차이를 볼 수 있다.

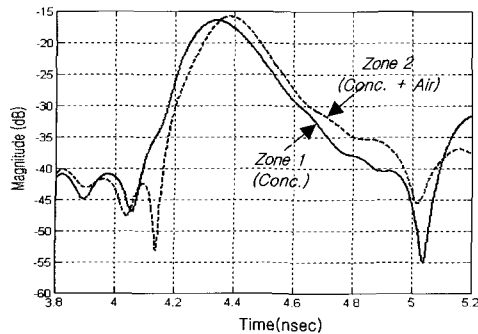


Fig. 14 Horn antenna measurement result of zone 1 and zone 2 (5 mm delamination specimen)

Fig. 15는 5 mm 박리시편의 FRP sheet보강 부분을 나타낸 그래프이다. 구역3이 실선, 구역4가 점선을 나타내고 있다. 4.4 ns 부분에서, 또한 4.7 ns 부분에서 분명한 차이를 확인 할 수 있다.

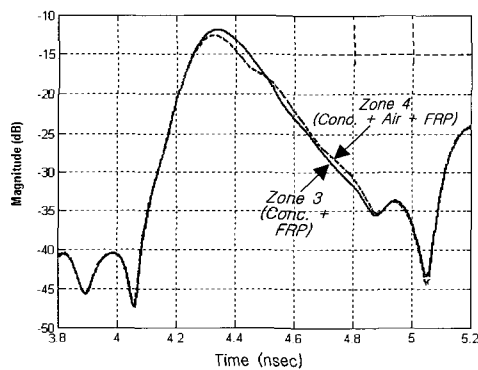


Fig. 15 Horn antenna measurement result of zone 3 and zone 4 (5 mm delamination specimen)

## 5. 결과

본 실험에 대한 연구결과는 아래와 같다.

- (1) 탄소섬유 보강 콘크리트의 계면박리 탐사를 위한 안테나를 설계, 제작하였다. 사용성을 위해 일체형 안테나의 형태로 제작하였고, 표면에 발생한 박리를 측정하고, 명확한 해상도를 얻기 위해 중심주파수 15 GHz, 대역폭 1 GHz의 고주파 광대역 안테나를 제작하였다.
- (2) Microstrip patch 안테나(중심주파수 15 GHz, 대역폭 1 GHz)를 사용한 성능 평가는 5, 10,

15 mm 박리 모두 측정이 가능하였다. 또한 보강구역과, 무 보강구역 모두 명확한 측정이 가능하였다.

- (3) 제작한 microstrip patch 안테나의 비교실험을 위하여 측정한 horn 안테나(중심주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz)를 통해 측정한 결과 microstrip patch 안테나의 결과와 마찬가지로 실험에 사용한 3종류의 시편 모두 명확한 측정이 가능하였다. 대역폭이 광대역 폭으로 측정에 대해서 microstrip patch 안테나보다 명확한 측정결과를 얻을 수 있었다. 그러나 microstrip patch 안테나에서도 명확한 측정이 가능함으로 상대적으로 효율성이 뛰어난 microstrip patch 안테나가 더 적합하다 할 수 있겠다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

- [1] C. Chen and C. Li, "Punching shear strength of reinforced concrete slabs strengthened with glass fiber-reinforced polymer laminates," *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 4, pp. 535-542, (2005)
- [2] 안상호, 이상호, "FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 보강설계", *대한건축학회논문집 구조계*, 제21권, 제5호, pp. 51-58, (2005)
- [3] M. Reed, R. Barnes, A. Schindler and H. Lee, "Fiber-reinforced polymer strengthening of concrete bridges that remain open to traffic," *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 6, pp. 823-831, (2005)
- [4] 최용기, 권오엽, 배규진, 조만섭, "터널보강제로서 FRP재료의 적용성 검토", *대한터널학회논문집*, 제3권, 제1호, pp. 11-19, (2001)
- [5] 고훈범, "FRP 슈트와 콘크리트 부착성능에 관한 기초연구", *대한건축학회논문집 구조계*, 제22권, 제8호, pp. 69-76, (2006)
- [6] F. Bastianini, A. Tommaso and G. Pascale, "Ultrasonic non-destructive assessment of

- bonding defects in composite structural strengthenings," *Composite Structures*, Vol. 53, pp. 463-467, (2001)
- [7] Y. Kim, L. Jofre, F. Flaviis and M. Feng, "Microwave reflection tomographic array for damage detection of civil structures," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 51, No. 11, pp. 3022-3032, (2003)
- [8] S. Bakhtiari, N. Qaddoumi, S. Ganchev and R. Zoughi, "Microwave noncontact examination of disbond and thickness variation in stratified composite media," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 42, No. 3, pp. 389-395, (1994)
- [9] H. Rhim and O. Buyukozturk, "Wideband microwave imaging of concrete for nondestructive testing," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 12, pp. 1451-1457, (2000)
- [10] M. Feng, F. Flavis and Y. Kim, "Use of microwaves for damage detection of fiber reinforced polymer-wrapped concrete structures," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 2, pp. 172-183, (2002)
- [11] M. Feng, C. Liu, X. He and M. Shinozuka, "Electromagnetic image reconstruction for damage detection," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 7, pp. 725-729, (2000)