

Horn Antenna를 이용한 콘크리트 보강재의 박리탐사 실험

Delamination Detection of Retrofitted Concrete Using Horn Antenna

임홍철*[†], 조영식**

Hong-Chul Rhim*[†] and Young-Sik Cho**

초 록 최근 탄소섬유, 유리섬유 등 보강재의 사용이 증가함에 따라 내구성저하의 원인이 될 수 있는 콘크리트와 보강재 사이의 박리탐사 필요성이 대두된다. 본 연구에서는 중심주파수가 15 GHz이고, 대역폭이 10 GHz인 horn antenna 를 이용하여, 탄소섬유 및 유리섬유시트 보강 콘크리트 박리를 탐사하는 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시편은 길이 600 × 폭 600 × 두께 100 mm 의 크기를 가지며, 그 표면에 1.5 mm 두께의 탄소섬유 유리섬유를 에폭시로 부착하였다. 또한, 시편의 중앙에 길이 50 mm × 폭 50 mm 크기의 박리를 콘크리트 표면 밑에 각각 두께 2, 4, 6 mm로 만들어 매립하였고, 콘크리트 표면 위에 2 mm 두께로 만들어, 인공박리를 제작하였다. 제작된 시편은 섬유의 종류에 따라 각각 4종류씩 총 8개의 시편이 제작되었다. 실험 결과는 그래프의 면적차이를 이용한 결과처리방법으로 처리하였고, 실험 결과 탄소섬유와 유리섬유시편에 매립된 인공 박리를 찾아내어, 향후 콘크리트/보강재 박리탐사시스템 개발에 도움이 되는 자료를 제공할 것이다.

주요용어: 박리, 탐사, 탄소섬유, 유리섬유, 콘크리트, 혼안테나

Abstract In accordance with the increased usage of reinforcing materials such as carbon fibers and glass fibers, delamination detection between concrete and the reinforcing material is needed as such delaminations may be a major cause for strength reduction or failure of a structure. In this work, 15 GHz center frequency with 10 GHz band width horn antenna was used to detect delamination between concrete and carbon fibers or glass fibers. The specimens measured 600 (length) × 600 (width) × 100 (thickness) mm, and glass fibers and carbon fibers with a thickness of 1.5 mm were attached on the specimens' surfaces using epoxy. In addition, artificial delaminations of size 50 (length) × 50 (width)mm were placed in the middle of the specimen with thickness of 2, 4, 6 mm respectively together with a 2 mm delamination projecting upwards from the surface of the concrete. Therefore a total of 8 specimens were used, 4 specimens for glass fiber reinforced concrete and 4 for carbon fiber reinforced concrete, containing delaminations as described above. The experiment results were derived by using the difference of area under the curved graph. According to experimental results artificial delaminations were identified in both fiber reinforced and carbon reinforced specimens and these results could contribute to further development of delamination detection technology.

Keywords: Delamination, Detection, Carbon Fiber, Glass Fiber, Concrete, Horn Antenna

1. 연구목적과 배경

탄소섬유 및 유리섬유를 이용한 FRP (fiber reinforced plastic, 이하 FRP)는 강재에 비해 경량이며, 부식이 없고, 역학적 성능이 뛰어나고 시공성도 우수하여[1], 슬래브의 하부 내력성능 보강용으로, 토목 구조물에는 교량 상판 하부 보수, 또는 터널내부 보강용으로 그 사용이 증가하고 있다[2,3].

성능평가를 위한 검사방법에 관한 연구는 주로 부착강도에 미칠 수 있는 인자에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 성능평가를 위한 시험법의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 가장 대표적인 시험법으로 직접인장시험법 및 삽입법, 일면·이면전단시험법, 휨형 시험법등이 있다. 이중 이면전단시험법은 시험체 제작이 간단하면서 안정된 박리거동이 얻어져 널리 사용되고 있다[1]. 하지만 콘크리트와 FRP 보강재에 관한 연구는 주로 부착강도에 관한 연구로 FRP와 콘크리트와의 박리탐사는 그 사용성 증대에 비하여 아직 초기단계에 있는 실정이다. 콘크리트와 FRP의 박리는 시공불량, 환경의 영향 등으로 발생할 수 있으며 구조물에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. FRP와 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[4].

최근에는 콘크리트와 보강재의 박리를 탐사하기 위하여 국·내외적으로 전자기법 및 초음파법을 이용하여 박리를 탐사하려는 연구가 주를 이루고 있다[5-9]. 전자기법은 측정 속도가 빠르고 영상화가 용의하다는 장점이 있다. 초음파법은 측정기기가 단순하고, 국부적 결함을 찾는 데 용이하다는 장점이 있다. 하지만 전자기법은 측정장비가 복잡하고 결과처리에 숙련이 필요하며, 초음파법은 측정속도가 느리고 경계조건의 영향을 많이 받는다는 단점이 있어 이를 보완하려는 연구가 진행되고 있다 (Table 1).

전자기법을 이용한 연구로는 콘크리트와 FRP 보강재의 박리를 탐사하기 위하여 적외선 카메라를 이용한 결함 탐지에 대한 연구가 시도된 적이 있다 [5]. 이 연구에서는 보강구조물에 일정한 온도를 가한 후 적외선 카메라를 이용하여 균열부위를 영상화시켜 찾는 방법을 사용하였다. 또한 박리표면에

전자기파의 초점을 맞추는 유전렌즈를 이용하여 박리를 탐사하는 실험이 실시되었다[6,7]. 적외선 온도기록 검사법을 사용하여 섬유 보강재의 박리 탐사를 시도하였으나[8], 이 방법은 지속적인 열에 의존한 측정방법 때문에 부정확한 결과를 보여주었고 공극의 발생여부만 확인될 뿐 공극의 위치 및 깊이를 탐사할 수 없었다. 초음파를 이용한 박리탐사 연구로는 단층촬영기법으로 섬유 보강판과 콘크리트 표면의 박리를 탐사하는 연구가 수행되었으나 [9]. 콘크리트 내부의 골재의 영향으로 인하여 촬영 영상의 구분이 불명확하여 단지 정성적인 평가만 가능하였다.

이에 본 연구에서는 전자기파 중 마이크로웨이브를 이용한 horn antenna를 사용하여 탄소섬유 또는 유리섬유로 보강된 콘크리트와 보강재의 박리탐사에 그 목적이 있다.

Table 1 Comparison with electromagnetic and ultrasonic testing

| | Electromagnetic | Ultrasonic |
|---------|--|--|
| Merit | <ul style="list-style-type: none"> - Rapid detection - Easy imaging | <ul style="list-style-type: none"> - Simple measuring Equipment - Easy to detect local defects |
| Demerit | <ul style="list-style-type: none"> - Complicated equipment System - Skill required for equipment operation and data analysis | <ul style="list-style-type: none"> - Slow detection - Influenced by boundary effect |

2. 시편 제작 및 안테나 선정

2.1. 콘크리트 시편

콘크리트 시편은 Fig. 1, 2와 같이 길이 600 mm × 폭 600 mm × 두께 100 mm 의 크기로 제작되었다. 무근콘크리트이며 진동다짐 후 기건 양생 하였다. 시편은 탄소섬유시트와 유리섬유시트의 두 종류, 박리는 4 가지 박리조건으로 총 8개의 시편이 제작되었다. 박리는 스티로폼으로 제작하였다. 길이 50 mm × 폭 50 mm 크기로 콘크리트 표면 밑에 2 mm, 4 mm, 6 mm 박리를 매립하였으며, 표면 위에 2 mm 박리를 돌출시켜 제작하였다. 4 가지 박리조건은 실제 보강재와 콘크리트에서 일어날 수 있는 mm 단위의 박리를 모사하였다. 여기서 스티

로폼은 유전율이 "0"에 가까워 인위적인 박리를 구현하기에 알맞다. 시편의 제작은 박리 삽입 후 탄소섬유와 유리섬유를 부착하기 위하여 연마기를 이용하여 표면을 정리하고, 정리된 표면에 에폭시를 도포하였다. 미리 시편의 크기와 같게 재단한 시트에 에폭시를 함침 시키고 이를 에폭시가 도포된 표면에 부착한 후 밀착시켜 시편을 완성하였다.

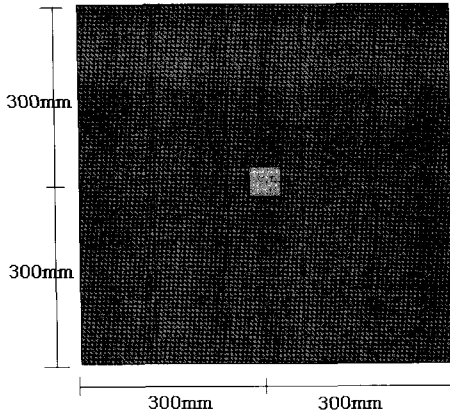


Fig. 1 Plan view of artificial delamination placed at the center of fiber reinforced specimen

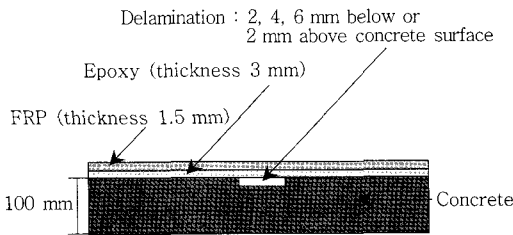


Fig. 2 Section of specimen

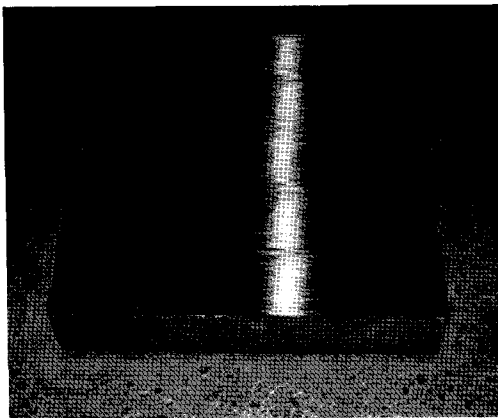


Fig. 3 Carbon fiber reinforced specimen

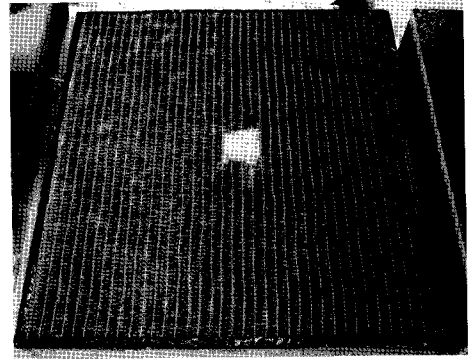


Fig. 4 Glass fiber reinforced specimen

2.2. 콘크리트와 보강재의 전자기적 특성

전자기파는 시간에 따라 변하는 전계와 자계가 서로 연결되어 공간이나 매질을 진행하게 된다. 이는 각 매질이 가지는 전자기적 특성이 서로 다르기 때문에 나타나는 현상으로서 전자기파를 이용한 비파괴 검사에서는 이러한 특성을 분석하여 대상체의 결함 및 강도, 두께 등을 측정하게 된다. 따라서 대상체의 전자기적 특성을 확인하는 것은 매우 중요하다. 이를 위하여 콘크리트, 탄소섬유 및 유리섬유, 에폭시의 전자기적 특성인 유전율과 손실계수를 1 ~ 25 GHz 대역에서 측정하였다. 실험은 개방 동축 선로 측정기 (open-ended coaxial probe)와 network analyzer를 이용하여 측정하였다[10]. Network analyzer에서 발생하여 동축선로를 따라 종단에 도달한 전자파는 프로브의 종단부와 동축선로와의 임피던스차이에 의해 반사된다. 여기서 측정된 반사계수로 종단의 임피던스를 계산하고, 이를 유전율로 환산하게 된다.

콘크리트의 전자기적 특성의 측정은 절건 상태, 기건 상태, 습윤 상태, 포화상태의 4가지 상태를 고려하여 측정하였으며, 콘크리트의 강도는 10, 18, 21, 24, 28, 36, 45, 55, 65 MPa의 총 9종으로 실험을 실시하였다. 실험 결과 수분함량이 높을수록, 강도가 높을수록 유전상수가 높게 측정되는 경향을 보였다(Fig. 5).

FRP 보강재와 에폭시의 전자기적 특성 측정은 1 ~ 40 GHz 대역에서 이루어 졌다. 실험 결과 FRP 보강재의 유전율 변화폭은 2.8 ~ 4 이내 범위로 주파수 대역에 대하여 변화가 크게 발생하였다. 특히 12 GHz ~ 14 GHz 대역에서의 유전율 변화가 크게

발생하였다. 에폭시의 유전율 변화폭은 2.8 ~ 3.3 이내 범위의 유전율 값을 내었고, 주파수 대역에 따른 유전율 변화가 거의 없는 것으로 나타났다 (Fig. 6).

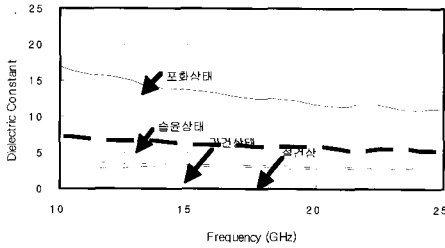


Fig. 5 Dielectric constant of 21 MPa concrete specimen

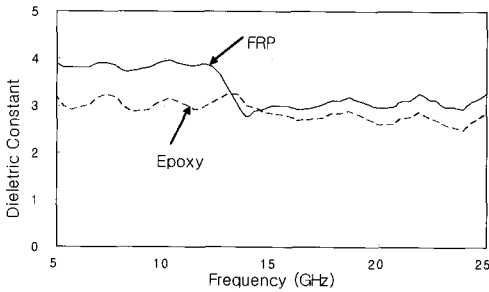


Fig. 6 Dielectric constant of FRP and epoxy

2.3. 안테나 선정

실험에서 사용된 안테나는 중심주파수 15 GHz, 대역폭이 10 GHz의 성능을 가진 상용의 도파관용 혼안테나를 사용하였다. 혼안테나는 가로 10 cm × 세로 10 cm 이다. 여기서 박리의 미세한 크기로 인하여 주파수를 높게 잡아야 하지만 주파수가 높아질수록 투과성능의 효율이 떨어지므로 콘크리트 및 FRP, 에폭시의 전자기적 특성을 바탕으로 중심주파수 및 대역폭을 선정하였다.

Horn antenna의 해상도(range resolution)는 콘크리트 및 FRP, 에폭시의 전자기적 특성을 바탕으로 식 (1)로 결정된다[11].

$$\Delta r = \frac{v_c}{2B} \tag{1}$$

여기서 Δr : Range resolution (m)

B : Bandwidth (GHz)

v_c : 유전체내에서 입사파의 속도 (m/sec)

식 (1)에서 v_c 는 식 (2)로 결정되어 진다.

$$v_c = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2}$$

여기서 C_0 : 빛의 속도(0.3×10^9 m/sec)

ϵ_r : 유전체의 유전 상수

Horn antenna 의 중심주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz의 값과 FRP의 유전율을 넣어 계산하면 해상도는 8.66 mm가 된다. 안테나의 중요한 특성 중 하나는 감소계수와 투과 깊이이다. 안테나의 감소계수는 파의 진행 시 에너지 감소를 결정짓는 요소로 공기 중의 투자율과 유전상수의 상관관계로 결정된다, 투과깊이는 감소계수의 역수로 콘크리트 내에서 약 30 cm 정도까지 투과가 가능한 것으로 나타나있다[12].

실험 data의 획득은 안테나와 연결된 network analyzer 장비를 이용하였다(Fig 7).

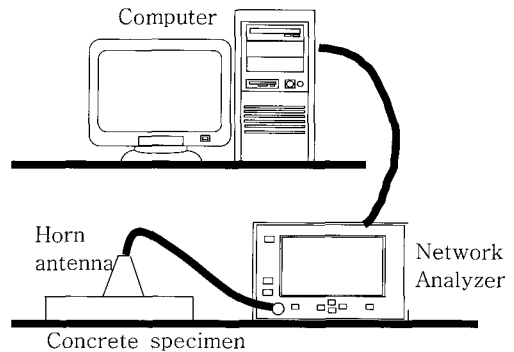


Fig. 7 Experimental set up

Network analyzer에서 표시되는 그래프는 S11 파라미터로 반사파를 측정하여 보여주게 되는데 시편 매질에 따른 시간분석을 통하여 박리의 유무를 확인할 수 있게 한다. 또한 이 장비에 있는 time-gating 기능을 사용하였는데 이 기능은 시간영역을 세분화해서 측정할 수 있게 한다. 박리 발생위치가 표면부근에서 이루어지므로 미세한 시간단위에서의 분석이 효과적이므로 이 기능은 필수적이고 중요한 역할을 하게 된다. 만약 이 기능이 사용하지 않을 경우 시간의 단위가 너무 광범위해지기 때문에 신호의 구별이 불가능할 수도 있다. 박리의 미세한 크기로 인하여 주파수 대역을 높게 잡아야 하지만 주파수가 높아질수록 투과성능의 효율

이 떨어지는 문제점이 발생하므로 이 사항을 고려하여 적절한 주파수를 선택하였다. 또한 대역폭 10 GHz 정도의 광대역의 특성을 가지므로 미세균열에 대한 높은 탐지 능력을 가지게 된다.



Fig. 8 Measurement using horn antenna

3. 실험 결과

3.1. 탄소섬유 시편 실험결과

Horn antenna를 이용한 박리탐사실험은 탄소섬유시트로 보강된 박리가 없는 구역을 reference로 4구역 측정하였고, 콘크리트와 탄소섬유시트사이 에 인공박리가 삽입되어 있는 중앙부를 측정, 비교하였다. 본 실험에서는 중심주파수 15 GHz, 대역폭 10 GHz의 고주파수 광대역의 특징을 갖는 horn antenna를 사용하여 실험을 실시하였다. Fig. 9 ~ Fig. 12 는 탄소보강 섬유시편의 측정결과를 나타 낸 것이다.

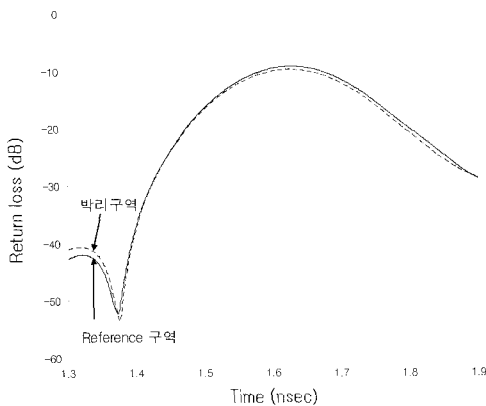


Fig. 9 Horn antenna measurement result of carbon fiber specimen (2 mm below concrete surface)

결과 그래프에서 알 수 있듯이 reference-구역에 비하여 박리 구역에서의 그래프 형태가 이동한 것을 확인할 수 있다. 이는 인공으로 제작된 박리에 의하여 입사파의 반사가 지연된 것으로 볼 수 있다. 하지만 그 차이가 미미하여 결과처리방법의 고안이 필요하다.

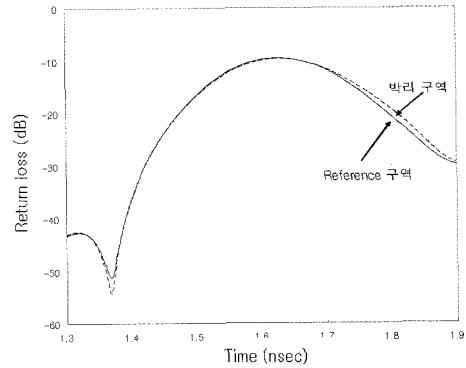


Fig. 10 Horn antenna measurement result of carbon fiber specimen (4 mm below concrete surface)

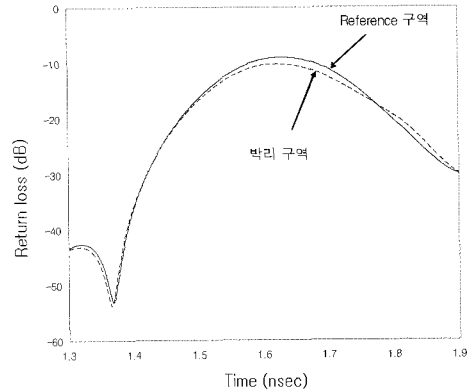


Fig. 11 Horn antenna measurement result of carbon fiber specimen (6 mm below concrete surface)

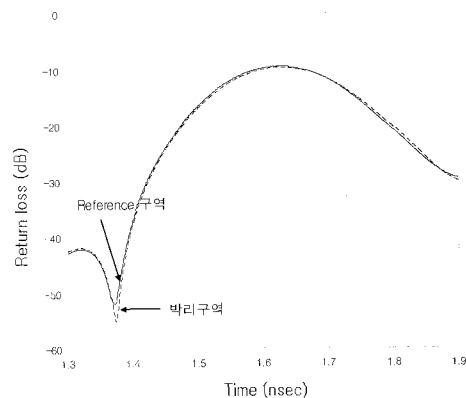


Fig. 12 Horn antenna measurement result of carbon fiber specimen (2 mm above concrete surface)

3.2. 유리섬유 시편 실험결과

실험은 탄소섬유시트로 보강된 시편과 마찬가지로 유리섬유시트로 보강된 구역을 reference로 8구역 측정하였고, 콘크리트와 유리섬유시트사이에서 인공박리가 제작되어 있는 중앙부를 측정, 비교하였다. Fig. 13 ~ Fig. 16은 유리섬유 시편의 측정결과이다. 측정 결과 탄소섬유 시편에 비하여 박리구역에서의 입사파의 반사가 확실히 지연되는 것을 알 수 있다. 이는 유리섬유의 경우 탄소섬유의 경우와는 다르게 전자기파가 저항을 받지 않고 입사되고 반사되었다는 것을 의미한다.

유리섬유 시편의 경우도 탄소섬유 시편과 마찬가지로 그래프의 형태의 변화로 박리의 유무를 확인할 수 있지만 이를 정량적으로 확인할 수 있는 결과처리 방법이 필요하다.

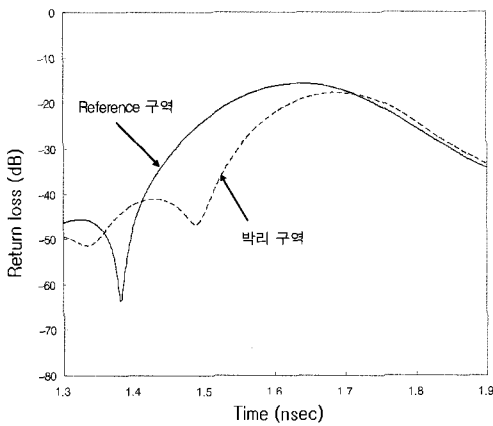


Fig. 13 Horn antenna measurement result of glass fiber specimen (2 mm below concrete surface)

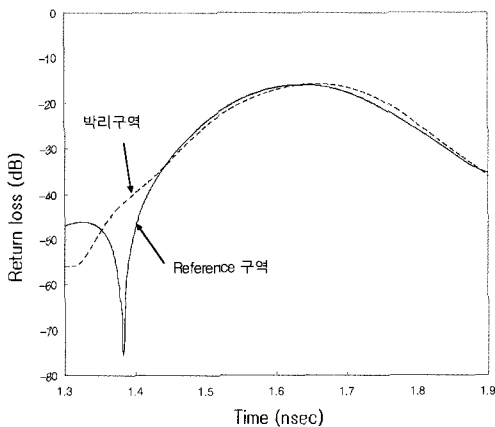


Fig. 14 Horn antenna measurement result of glass fiber specimen (4 mm below concrete surface)

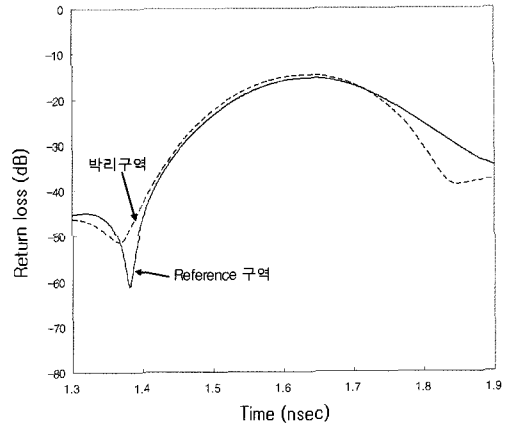


Fig. 15 Horn antenna measurement result of glass fiber specimen (6 mm above concrete surface)

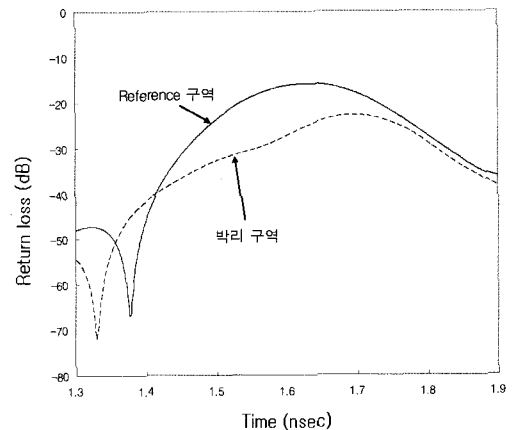


Fig. 16 Horn antenna measurement result of glass fiber specimen (2 mm above concrete surface)

4. 결과 분석

박리 유·무를 확인하기 위하여 그래프 면적의 차이값을 이용한 방법을 고안하여 적용하였다. 이는 실제 적용 시에는 안테나로 대상체의 여러 구역을 측정 후 그래프의 변화가 심하게 발생하는 부분을 박리 구역으로 확인하고, 측정된 결과값을 가지고 reference와 박리구역을 구분한 후, 고안된 방법을 적용하여 박리 유무를 정량적으로 확인하게 된다. 고안된 결과 처리 방법은 다음과 같다.

Fig. 17과 같이 박리가 발생하지 않은 두 지점의 시간에 따른 강도 그래프를 그린다. 그리고 두 지점의 면적차이를 구한다 (Fig. 18). 이때 면적은 절대값으로 주어지게 된다. 이후 박리가 발생한 부분

과 박리가 발생하지 않은 reference 부분과의 시간에 따른 강도 그래프를 그리고 그 값의 차이를 절대값으로 계산한다. 이 후 박리 유무를 결정하기 위하여 Reference 부분끼리의 면적차이를 오차 범위로 설정하고, 오차의 범위와 reference와 박리구역의 면적차이를 상대적인 비로 표현한다. 예를 들어 실험 오차를 반영하여 상대적인 비가 "2" 내외의 차이를 보이면 이를 박리로 판별하게 된다. 여기서 reference와 박리구역의 상대비로 결과값을 잡게 되면 다음과 같은 장점을 가지게 된다.

- 1) 전자기파가 주변 환경적인 영향으로 파의 진행에 영향을 받은 부분을 감안할 수 있다.
- 2) 대상체 마다의 고유한 전자기적 특성을 고려하지 않아도 된다.
- 3) 실험 결과의 처리가 빠르고 간단하다.

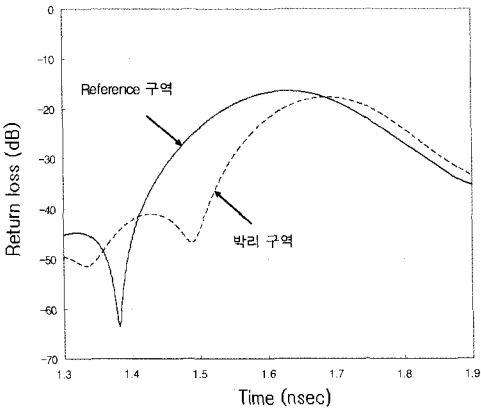


Fig. 17 Comparison with reference and delamination region

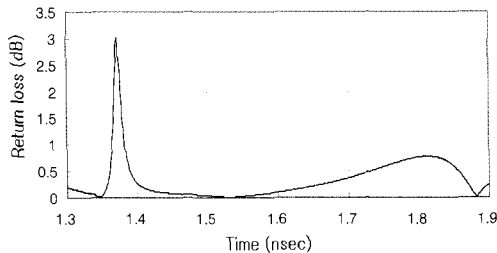


Fig. 18 Subtraction area between reference and delamination region

고안된 결과처리방법으로 탄소섬유 시편의 결과를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 Resulting ratio in carbon fiber specimen

| 보강재 \ 박리두께 | 2 mm 매립 | 4 mm 매립 | 6 mm 매립 | 2 mm 돌출 |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 탄소섬유시트 | 2.4 | 2.0 | 3.3 | 1.8 |
| Fig. No | 9 | 10 | 11 | 12 |

탄소섬유 시편의 실험 분석 결과 시간에 따른 강도 그래프에서 보다 훨씬 명확하게 박리의 유무를 확인할 수 있었다. 하지만 박리 두께 증가와 상대적인 비의 변화는 비례하지 않았다.

유리섬유 시편의 경우도 같은 방법으로 결과를 분석하면 다음 Table 3 과 같은 결과값을 얻을 수 있다. 탄소섬유 시편과 마찬가지로 박리의 유·무를 확인할 수는 있었지만 박리의 두께에 대한 정보를 얻지는 못하였다.

Table 3 Resulting ratio in glass fiber specimen

| 보강재 \ 박리두께 | 2 mm 매립 | 4 mm 매립 | 6 mm 매립 | 2 mm 돌출 |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 유리섬유 시트 | 6.9 | 2.3 | 2.9 | 7.3 |
| Fig. No | 13 | 14 | 15 | 16 |

탄소 혹은 유리 섬유는 재료성분에 따라 전자파의 반사, 투과, 흡수율이 다를 수 있다. 그러므로 실제 이 비교방법을 응용할 때에는 해당 검사대상물에 맞는 비율값을 정하는 것이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 중심 주파수가 15 GHz이고 대역폭이 10 GHz인 광대역의 특성을 갖는 horn antenna를 사용하여 탄소섬유 및 유리섬유 시트와 콘크리트 사이에 발생하는 박리를 탐사하기 위한 실험을 실시하였다. 안테나의 선정에 있어 전자기파를 이용한 탄소섬유 시트의 전자기적 특성으로 인하여 입사파의 진행에 영향을 받는다. 이에 고주파 및 광대역의 안테나를 선정하여 이러한 문제를 해결하였다. 실험 결과 탄소섬유 시트와 유리섬유

시트로 보강된 시편 모두, 입사파의 지연으로 인하여 박리가 발생하지 않은 구역과 박리구역의 차이를 시간대역 그래프를 통하여 확인할 수 있었다. 하지만 그 차이가 미미하여 결과분석방법의 고안이 필요하였다. 이에 결과분석 방법을 고안하였고, 결과분석 방법에 의한 평가 시 탄소섬유 및 유리섬유 시트로 보강된 두 종류에 대해 4가지 종류의 박리를 모두 확인하였다. 그러나 박리의 유·무를 확인할 수는 있었지만 박리의 두께에 대한 확인은 불가능하였다. 본 결과는 향후 전자기파를 이용한 박리 탐사 시스템의 구축에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 건설핵심기술 연구개발 사업 '사회기반시설물 중점평가 연구단' (과제번호: 04 핵심기술 C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 고훈범, "FRP 슈트와 콘크리트의 계면에 대한 부착-슬립특성", 대한건축학회논문집 구조계, 제22권, 제10호, pp. 101-108, (2006)
- [2] 최용기, 권오엽, 배규진, 조만섭, "터널보강재로서 FRP재료의 적용성 검토", 대한터널학회논문집, 제3권, 제1호, pp. 11-19, (2001)
- [3] 심종성, 김규선, "건설분야에서의 FRP 사용," 콘크리트학회지 제12권, 6호, pp. 37-43, (2000)
- [4] 고훈범, "FRP 슈트와 콘크리트 부착성능에 관한 기초연구", 대한건축학회논문집 구조계, 제22권, 제8호, pp. 69-76, (2006)
- [5] 이현호, 이주영, "적외선카메라를 이용한 섬유슈트 보강공법의 결합검지", 대한건축학회 논문집, 제16권, 제10호, pp. 70-77, (2000)
- [6] 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, July, (2000)
- [7] 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, February, (2002)
- [8] T. Kunda, M. Ehsani, K. I. Maslov and D. Guo, "C-scan and L-scan generated images of the concrete/GFRP composite interface," NDT & E Int., Vol. 32, No. 2, pp. 61-69, (1999)
- [9] 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)
- [10] 임홍철, 정성훈, "비파괴 검사를 위한 콘크리트의 전자기적 특성의 측정", 대한콘크리트학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 115-123, (2000)
- [11] 임홍철, 손병오, 김유석, "단면형상이 레이더 측정이 미치는 영향 및 영상화 기법에 대한 연구", 대한건축학회 논문집, 제19권, 제6호, pp. 119-124, (2003)
- [12] 임홍철, 이지훈, 손병오, "레이더를 이용한 콘크리트의 두께 측정과 유효 측정범위 설정에 관한 연구", 비파괴검사학회지, 제20권, 제4호, pp. 296-304, (2000)