

광섬유 케이블을 이용한 콘크리트 구조물의 균열 탐사

Crack Detection of Concrete Structures Using Optical Fiber Cables

조 남 소*
Cho, Nam So

김 남 식**
Kim, Nam Sik

ABSTRACT

Crack detection technique for concrete structures has been developed in this study. The technique utilizes OTDR(Optical Time Domain Reflectometry) method that is widely used in the field of optical engineering. At present, some techniques, such as the naked eye inspection, inspection by crack gauge, ultra sonic detection and so on, are used for crack detection. However, these are not economical and are often time-consuming works.

This method employs a common optical fiber as a means of crack detection. The optical fiber is fully attached to concrete surface, and a crack on concrete could be detected to synchronize with the crack on optical fiber. The experimental verification was performed for concrete beams and the initial crack on the beam was detected under cracking force.

1. 서론

콘크리트에 발생한 균열은 직·간접적으로 구조물의 성능 저하를 야기시키며 현재의 노후도를 나타내주는 주요 인자임에도 불구하고, 현실적으로 이를 용이하게 탐사하기란 쉽지 않다. 현재의 탐사 방법으로는 육안 검사, 균열 게이지를 이용한 균열 폭의 측정 및 초음파 탐사 등이 있다. 육안검사의 경우 조사자가 일일이 대상 구조물을 둘러보며 균열의 유무와 위치를 파악해야하는 노동 집약적인 요소가 있으며, 균열 발생이 치명적인 원자력 발전소와 같은 구조물의 경우 접근이 곤란하여 조사 자체가 어려운 경우도 있다. 또한 균열 게이지를 사용하는 방법은 이미 균열이 발생한 위치를 대상으로 균열 폭의 확대를 측정하는 것이며, 초음파 탐사 역시 구조물 평가로 이용하기에는 탐사 방법의 신뢰성이 더 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 기존의 균열 탐사 방법의 단점을 보완하고, 좀더 효율적으로 콘크리트 구조물의 유지관리를 수행할 수 있는 균열 탐사 방법을 개발하였다. 이 방법은 광통신 분야에서 주로 사용하는 광통신용 측정장비인 OTDR(Optical Time Domain Reflectometry)과 광섬유 케이블을 이용하여 균열을 탐사하는 방법이다.

현재 이 방법은 광통신 분야에서 수십에서 수백 km에 이르는 광통신 케이블의 손상 감지를 위해 상용화되고 있으나, 토목 건축 분야로의 직접적인 적용에 있어서, 대상 구조물이 상이하기 때문에 적

* 현대건설 주식회사 기술연구소 주임연구원

** 현대건설 주식회사 기술연구소 책임연구원

용상의 문제점이 발생할 수 있다. 이렇게 광섬유를 이용하여 구조물의 거동을 측정하려는 사례들을 찾아 볼 수 있는데, 주로 적용 가능성에 대한 연구를 진행하고 있다.^[1]

본 연구에서도 체계적인 균열 탐사를 위한 적용방법에 관한 연구를 진행하였다. 즉 균열 탐사에 결정적인 영향을 주는 광섬유 케이블의 부착 방법에 대한 연구를 수행하였으며, 별도의 균열 감지 부분, 즉 센서화한 부분을 만들지 않고 시중에서 쉽게 구할 수 있는 통신용 광섬유 케이블을 사용하여 실질적이고도 간편한 균열 탐사 방법을 제시하였다. 이 방법이 가능한 이유는 광섬유가 센서로서의 역할뿐만 아니라 리드선으로서의 역할도 수행하는 intrinsic 특성을 갖고있는데서 기인한다. 따라서, 광섬유 케이블이 부착된 전 길이에서 균열을 탐사하게 되므로, 광범위한 구역에서의 손상 감지 뿐만 아니라, 원격 모니터링이 가능하기 때문에 접근이 곤란한 구조물에서도 균열을 탐사할 수 있다.

한편 이 때 사용한 광섬유 케이블은 근본적으로 빛을 전달 매체로 이용하기 때문에 전자기적인 노이즈의 영향을 받지 않으며, 가볍고 가격이 매우 저렴하며, 구조물에 매설을 하더라도 부피가 작아 구조적인 간섭이 적다. 또한 통신용 장비의 장점을 살려 네트워크가 가능하며, 멀티플렉싱을 통한 신경망 구축이 용이하기 때문에 종합적으로 구조물의 성능을 평가할 수 있는 용도로 사용할 수 있어 토목·건축 계측용으로의 무한한 잠재력을 갖고 있다.^[2]

2. 실험 장비 및 방법

광섬유 기술은 최근에 각광받기 시작한 새로운 계측 기술이기 때문에, 여러 가지의 요소 기술이 필요한 것이 사실이다. 특히 실제의 적용에 있어서 모재와의 부착 특성은 계측의 가부에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 이러한 부착 특성에 따른 균열의 탐사 여부를 부착 방법에 따른 시행착오를 거듭하여, 수 차례의 균열 탐사 실험을 통해 규명하도록 한다.

2.1 탐사 원리 및 실험 장비

균열의 유무 및 위치를 탐사하는 수단으로, 광섬유 케이블을 사용하였다. 광섬유는 정보의 전달 매체로 빛을 이용하는데 이러한 빛은 광섬유를 통해 전달된다. 그림 1.에서 보이는 바와 같이, 광섬유를 통한 균열 탐사의 원리를 보이고 있다. 광섬유에 손상이 없을 경우 광원에서 발사된 빛은 광섬유를 따라 전달되다가 광섬유의 끝단에서 반사가 이루어지는데, 만약 광섬유의 중간 부분에 손상이 발생하게 되면 이 부분에서도 빛의 반사가 일어나게 되며, 균열이 발생하여 절단이 되었을 때는 더 이상 빛이 전달되지 못하고 균열 부분에서 전반사 되어 되돌아온다. 이때 반사되어온 빛의 시간을 측정하여 균열이 발생한 위치를 측정할 수 있게 된다.

그림 2.는 실험에서 사용한 OTDR 장비와 광섬유 케이블을 보이고 있다. 850nm대의 광원을 사용하였으며, 최대 측정 가능한 해상도는 250mm이다. 따라서 균열이 발생한 위치를 ±250mm의 오차를 갖고 측정할 수 있다. 한편 광섬유 케이블은 멀티모드의 광섬유이다.

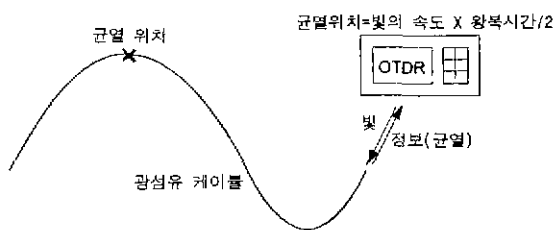


그림 1. 균열 탐사 원리

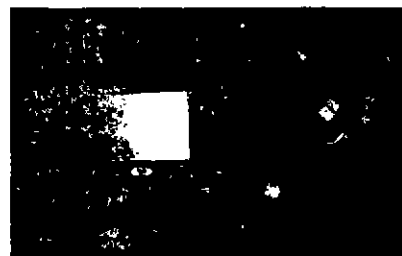


그림 2. OTDR 및 광섬유 케이블

2.2 실험 방법

광섬유를 통한 콘크리트의 균열 탐사 특성을 파악하기 위하여, 1회의 예비 실험을 수행하였으며, 이를 토대로 3회의 본 실험을 수행하여 균열 탐사 메커니즘을 규명하도록 하였다. 예비 실험에서는 균열 탐사의 파라미터로서 광섬유 케이블의 피복이 영향을 준다는 것을 알게 되었고, 이에 따라 본 실험에서는 피복의 탈피 정도에 따른 시행착오를 거쳐 콘크리트의 균열 탐사 실험을 계속 진행하였다. 또한 콘크리트 표면에서의 균열 뿐 만 아니라, 내부에도 광섬유 케이블을 매설하여 내부 균열에 대한 탐사 실험도 병행하였다. 그림 3.은 광섬유 케이블과 광섬유의 구조를 보이고 있다.

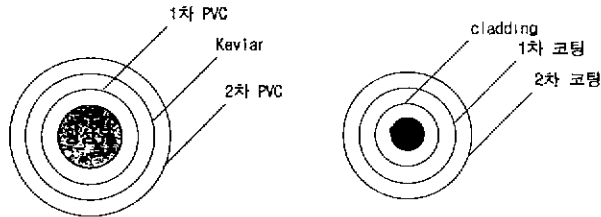


그림 3. 광섬유 케이블의 구조

3. 실험 결과

균열 탐사 결과를 도출하기 위하여 예비 실험을 포함하여 총 4차례의 실험을 수행하였다. 각 각의 실험은 선행한 실험의 결과를 근거로 더 개선된 균열 탐사 방법을 찾으려 하였다.

3.1 예비 실험 결과

이번 실험에서는 광섬유 케이블을 콘크리트 실험체에 적용할 때의 문제점과 균열 탐사로의 연관성을 고찰하기 위한 예비적 성격의 실험이었다. 철근 콘크리트보 실험체를 제작하여 광섬유 케이블을 매설 및 표면 부착하여 실험한 결과, 공칭 강도에 해당하는 하중을 재하하였음에도 불구하고 광섬유를 통한 손상은 발견하지 못하였다. 이는 콘크리트보에 발생한 균열이 광섬유의 손상으로 이어지지 못하도록 광섬유 케이블의 외측 피복과 광섬유 사이에서 슬립이 일어나기 때문인 것으로 판단되었다.

따라서 광섬유 케이블의 피복이 균열 탐사를 위한 결정적인 변수임을 확인하였으며, 본 실험에서는 피복을 제거하면서 콘크리트의 균열과 광섬유의 손상이 동시에 일어날 수 있는 상태, 즉 최적의 균열 탐사 상황을 구현하도록 실험을 수행하였다.

3.2 1차 실험 결과

예비 실험의 결과를 토대로 광섬유 케이블의 2차 PVC와 KEVLAR를 제거하여 사용하였다. 2개의 철근 콘크리트보 실험체를 제작하였으며, 각 실험체 당 3개의 광섬유 케이블을 사용하였다. 그림 4.는 실험체 및 광섬유의 설치 개략도이다. 이번 실험에서 적용한 부착방법은 표1.에서 보이는 바와 같다.

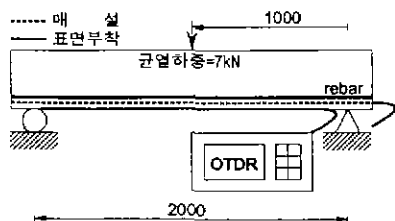


그림 4. 1차 실험 개략도

표1. 1차 실험시의 광섬유 케이블의 부착 위치 및 방법

구분	부착 위치		피복 상태	
	매설	표면부착	w/o kevlar	w/2차 PVC
부재1	○		○	
		○	○	
		○		○
부재2	○		○	
	○		○	
		○	○	

두 실험체에 대해 균열 탐사 실험을 수행한 결과, 피복의 제거에 관계없이 내부에 매설한 경우 파괴 하중에서도 광섬유의 손상은 발견되지 않았다. 이러한 이유로는 2차 PVC이외에도 1차 PVC와 광섬유 사이에서도 슬립이 발생하기 때문이며, 또한 콘크리트 내부에서는 광섬유의 1차 PVC와 콘크리트와의 부착이 제대로 이루어지지 않았기 때문이었다.

한편 표면 부착한 경우라도 균열 하중에서의 손상은 발견되지 않았지만, 실험체에 상당한 균열이 진전되어 파괴에 이르렀을 때는 광섬유의 손상 징후를 감지할 수 있었다. 이와 같이 미흡하나마 손상의 가능성을 확인할 수 있었던 이유는 표면 부착의 경우, 사용한 접착제가 콘크리트와 동일한 거동을 갖게 하도록 하는 매개역할을 하기 때문이다.

전체적으로 실험체의 초기 균열을 탐사할 수는 없었으며, 예비 실험과 마찬가지로 1차 PVC와 광섬유를 외부의 손상으로부터 보호하는 역할을 한다고 판단되었다. 따라서, 피복을 더 제거하여 광섬유의 균열 민감도를 증가시킬 필요가 있으며, 광섬유와 콘크리트가 동일한 균열 거동을 갖게 하는 부착 방법이 중요하다는 것을 확인하였다.

3.3 2차 실험 결과

2차 실험에서는 총 4개의 실험체를 제작하였는데, 두 실험체에는 1차 실험과 유사한 실험 상황을 재현하여 1차 실험에 대한 확인 절차를 거쳤다. 나머지 두 실험체에 대하여서는 1차 PVC와 1,2차 코팅을 모두 제거한 광섬유를 적용하였다. 이때 균열에 대한 민감도를 직접적으로 비교하기 위하여 2차 PVC와 KEVLAR만을 제거한 광섬유도 함께 사용하였다.

이번 실험에서는 광섬유를 내부에 매설한 경우에 대한 실험은 수행하지 않았다. 2차 실험에서 적용한 부착방법은 표2.에서 보이는 바와 같다.

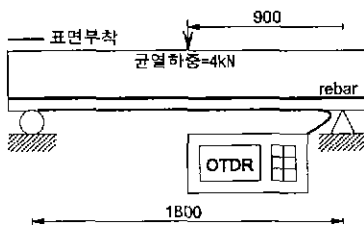


그림 5. 2차 실험 개략도

표2. 2차 실험시의 광섬유 케이블의 부착 위치 및 방법

구분	부착 위치		피복 상태	
	매설	표면부착	w/o 1차코팅	w/o kevlar
부재1		○		○
부재2		○		○
부재3		○	○	
		○		○
부재4		○	○	

부재1은 4kN에서 광섬유의 이상을 발견할 수 있었으며, 부재2에서는 8kN에서 손상을 찾을 수 있었다. 1차 실험보다는 균열하중에 근접하여 균열의 징후를 탐사할 수 있었으나, 역시 초기 균열을 명확히 발견할 수 있다고 설명하기에는 부족한 결과이었다.

부재3은 피복상태가 다른 2종류의 광섬유를 적용한 실험체이다. 2차 코팅까지 제거한 광섬유에서는 5kN에서 광섬유의 균열을 탐사하였는데 비해 KEVLAR까지 제거한 광섬유에서는 파괴하중에 도달했을 때 균열을 탐사할 수 있었다. 그림 6.은 부재3의 밑면에 발생한 균열을 보이고 있다. 부재4에서는 4kN에서 실험체에 초기 균열이 발생하였는데 이 때 광섬유에서도 동일한 손상을 동시에 감지할 수 있었다.

따라서 KEVLAR만을 제거한 광섬유는 초기 균열을 감지할 만큼 민감하지 못하다는 것을 검증하였으며, 2차 코팅을 제거함으로써 콘크리트에 발생한 균열을 탐사할 수 있다는 것을 확인하였다. 한편 부재3과 부재4에서 초기 균열을 탐사한 결과가 다소 상이한 것은 부재3에 사용한 접착제의 양에 기인하는 것으로, 접착제의 양이 많으면 균열에 대한 민감도를 저하시켜서 지연된 결과를 나타낸다고 판단되었다.



그림 6. 부재3에서 발생한 균열

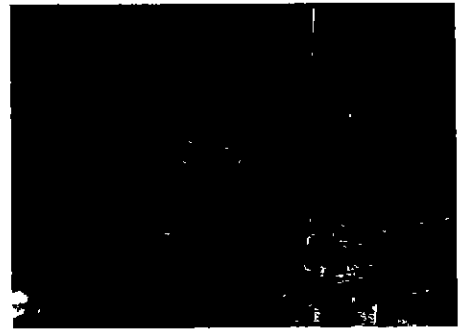


그림 7. 균열 탐사 실험 모습

3.4 3차 실험 결과

2차 실험 결과를 보완하고 광섬유를 이용한 균열 탐사 결과를 최종적으로 검증하기 위하여 3차 실험을 수행하였다. 2차 실험 시와 동일한 실험체를 3개 제작하였으며, 접착제의 사용을 최소화하여 부착하도록 하였다. 3차 실험에서 적용한 부착방법은 표3.에서 보이는 바와 같다.

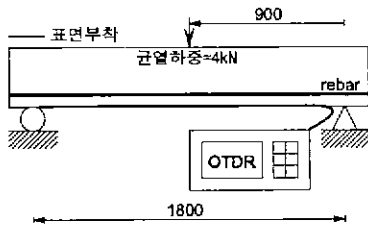


그림 8. 3차 실험 개략도

표 3. 3차 실험시의 광섬유 케이블의 부착 위치 및 방법

구분	부착 위치		피복 상태	
	매설	표면부착	w/o 1차코팅	w/o kevlar
부재1		○	○	
부재2		○	○	
부재3		○	○	

부재1은 실제로 4.5kN에서 균열이 발생하였다. 그러나 균열은 보의 측면에서 발생하였으며, 광섬유가 설치되어 있는 보 밑면의 중앙까지 전파되지 않았기 때문에 광섬유를 통한 손상은 발견할 수 없었다. 5kN 하중이 재하되었을 때 균열이 광섬유의 위치까지 전파되었고 이때 부재에 부착되었던 광섬유도 함께 절단됨으로써 콘크리트의 균열을 탐사할 수 있었다.

그림 9.1에서 보이는 바와 같이, 균열의 위치는 광섬유 끝단으로부터 약 750mm에서 발생한 것으로 측정되었다. 실제로 균열은 보의 중앙에서 발생하였으며 균열 위치를 비교적 정확히 찾을 수 있었다. 그 후 6kN에서 두 번째의 균열이 첫 번째 균열부에서 광원 쪽으로 약 210mm 떨어진 곳에서 발생하였지만 OTDR의 측정 해상도 때문에 탐사할 수는 없었다. 그러나 8kN의 하중 하에서 첫 번째 균열부로부터 광원 쪽으로 485mm 떨어진 곳에서 발생한 세 번째 균열은 탐사할 수 있었다.

부재2는 4.5kN에서 보의 중앙에서 균열이 발생하였으며, 이는 광섬유로 확인할 수 있었다.

부재3은 3kN에서 균열이 발생하였는데 OTDR 측정을 통해 이를 탐사하였으며, 6kN에서 발생한 두 번째 균열을 확인하였다.

따라서 3차 실험을 통하여 2차 실험 결과를 보완하였으며, 광섬유를 이용한 콘크리트보 실험체의 균열 탐사를 검증하였다

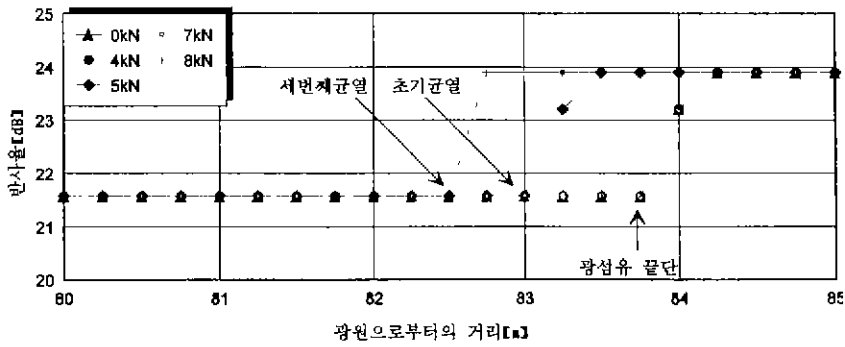


그림 9.1 부재1에 대한 균열 탐사 결과

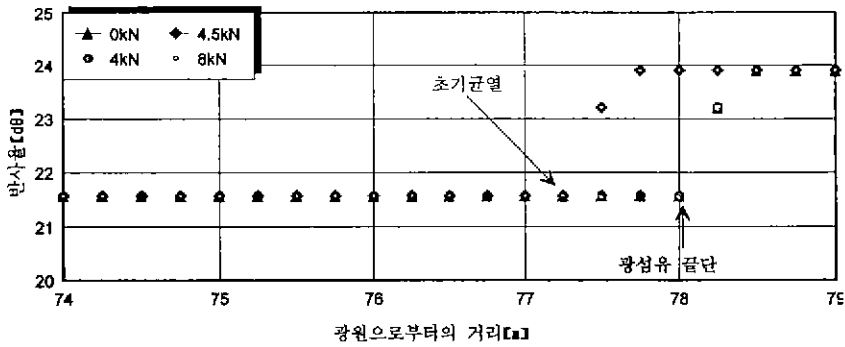


그림 9.2 부재2에 대한 균열 탐사 결과

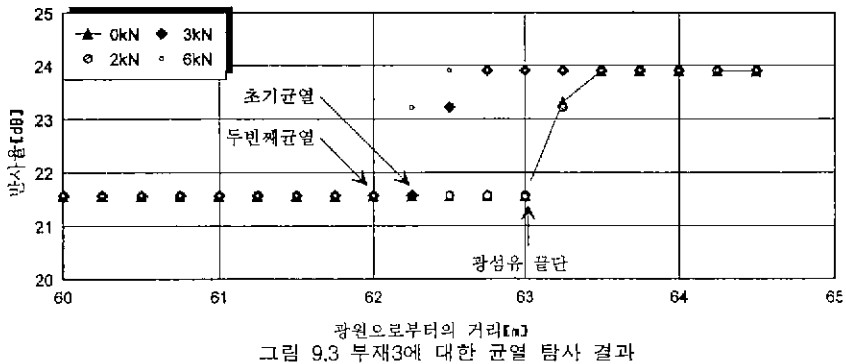


그림 9.3 부재3에 대한 균열 탐사 결과

4. 결론

광섬유 케이블을 이용하여 콘크리트보의 부착 방법에 따른 균열 탐사 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 광섬유 케이블을 이용하여 콘크리트보 실험체에 발생한 초기 균열을 탐사하였다. 균열 탐사의 여부를 결정짓는 가장 중요한 변수는 광섬유 케이블의 피복 정도이며, 접착제의 양에 의해서도 다소의 영향을 받는다.
- ② 콘크리트 내부의 미세 균열은 탐사할 수 없었으나 표면에 발생한 균열은 탐사하였다. 표면 부착한

경우는 접착제가 콘크리트와의 부착을 보장하기 때문에 초기의 미세 균열을 탐사할 수 있었다. 내부에 매설한 경우, 피복을 2차 코팅까지 제거하지 못하였기 때문이며, 또한 콘크리트와 광섬유가 균열 거동을 함께 할 수 있을 만큼의 부착 강도가 발휘되지 않았기 때문이다. 그러나 매스 콘크리트와 같이 균열 폭이 크게 발생하는 구조물에 대해서는 매설을 통한 균열 탐사의 가능성은 유효하다.

- ③ 광섬유 케이블을 이용하여 균열의 유무와 위치를 정확히 탐사할 수 있으므로, 콘크리트 구조물의 안전진단이나 유지관리 업무에 적용가능하며, 특히 접근이 곤란한 구조물의 비파괴 검사 방법으로 활용가치가 크다고 할 수 있다. 또한 콘크리트 구조물 뿐 만 아니라, 강구조물의 균열 탐사에도 그 원리를 적용할 수 있다고 판단된다.
- ④ 본 실험에서 사용한 OTDR의 해상도가 250mm이기 때문에 인접하여 발생한 새로운 균열을 탐사하기가 곤란한 단점이 있었으나, 광섬유 케이블의 네트워크를 구성할 수 있다면 또 다른 균열의 발생 뿐 만 아니라, 기 발견한 균열의 진행 상황도 모니터링할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Wolfgang R. Habel, Bernd Hillemeier, "Results in Monitoring and Assessment of Damages in Large Steel and Concrete Structures by Means of Fiber Optic Sensors", Proc. SPIE, Vol. 2446, pp.25-36, 1995
2. Richard W. Griffiths, "Structural Integrity Monitoring of Bridges Using Fiber Optics", Proc. SPIE, Vol. 2446, pp.127-138, 1995
3. 김남식, 조남소, "광섬유 센서 기술을 이용한 구조물의 시공 및 장기 계측시스템 개발", 현대건설 기술연구소, 연구 최종보고서, 1998. 12.