

Fiber Optic Cable을 이용한 콘크리트 균열탐사

Crack Detection of Concrete Using Fiber Optic Cables

조남소*, 김남식**†

Nam-So Cho* and Nam-Sik Kim**†

초 록 본 연구에서는 광섬유 케이블을 이용한 콘크리트 구조물의 균열 탐사 방법을 개발하였다. 광통신 분야에서 광섬유 케이블의 손상을 탐지하기 위해 널리 사용하고 있는 광신호 분석기인 OTDR과 일반 통신용 광섬유 케이블을 사용하여 콘크리트의 표면 및 내부에 발생한 균열의 탐사 실험을 수행하였다. 콘크리트가 균열 하중에 부과되어 초기 균열을 발생시킬 때 미리 부착된 광섬유가 균열의 위치에서 균열 거동을 함께 함으로써 손상을 입게 되어 균열의 발생 유무와 위치를 찾고자 하였다. 균열을 탐사하는데 있어 광섬유의 탈피 정도가 균열 탐사 여부를 결정짓는 가장 주요한 인자라고 파악하였으며, 예비 실험을 포함한 4차례의 실내 검증 실험을 통하여 균열을 탐사할 수 있었다. 이 연구 결과는 콘크리트 구조물의 균열 관리와 유지관리 차원에서의 활용도가 크다고 판단된다.

주요용어: 광섬유 케이블, 콘크리트, 균열 탐사, OTDR

Abstract Crack detection technique for concrete structures has been developed in this study. Experimental tests were carried out to detect a surface and internal crack, employing common fiber optic cables and OTDR(optical time domain reflectometry), an optical signal analyzer which is widely used to detect damages at fiber optic cables in the field of optical engineering. While initial concrete crack is ready to occur under cracking force, the occurrence and location of the crack are simultaneously detected to give the same damage to fiber optic cables which have been attached to and/or embedded into concrete in advance. It is obtained through successive tests that the principal factors for crack detection is the covering state of fiber optic cable, and total 4 tests including a preliminary test were conducted and the crack detection technique was verified. The practical usefulness would be expected at crack management and maintenance of concrete structures.

Keywords: Crack Detection, Concrete, Fiber Optic Cables, OTDR

1. 서 론

콘크리트에 발생한 균열은 직·간접적으로 구조물의 성능 저하를 야기시키며 현재의 노후도를 나타내는 주요 인자임에도 불구하고, 현실적으로 이를 용이하게 탐사하기란 쉽지 않다[1].

현재의 탐사 방법으로는 육안 검사, 균열 게이지를 이용한 균열 폭의 측정 및 초음파 탐사 등이 있

다. 육안검사의 경우 조사자가 일일이 대상 구조물을 둘러보며 균열의 유무와 위치를 파악해야하는 불편한 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 방

(접수일: 2007. 2. 26, 심사완료일: 2007. 3. 26) * 현대건설 기술개발원, ** 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학부, † Corresponding author: School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, (E-mail: nskim@pusan.ac.kr)

법의 신뢰성이 더 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 기존의 균열 탐사 방법의 단점을 보완하고, 좀더 효율적으로 콘크리트 구조물의 유지관리를 수행할 수 있는 균열 탐사 방법을 제안하였다. 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 적용상의 문제점이 발생할 수 있다. 근래 광섬유를 이용하여 구조물의 거동을 측정하려는 사례들을 찾아 볼 수 있는데, 주로 적용 가능성에 대한 연구를 진행하고 있다[2,3]. 일례로 FBG (fiber bragg grating) 센서를 사용하여 실용적으로 교량의 처짐 곡선을 추정하려는 연구가 수행된 바 있으며[4,5], 본 연구와 유사하게 OTDR과 광섬유 케이블을 이용하여 모르타르 보의 균열을 탐사하고 균열 폭을 측정하려는 연구도 진행되었다[6].

본 연구에서는 보다 체계적인 균열 탐사를 위해 적용방법에 관한 연구를 진행하였다. 즉 균열 탐사에 결정적인 영향을 주는 광섬유 케이블의 피복에 대한 민감도 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 특성을 갖고 있는데서 기인한다[7]. 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[8].

한편 이 때 사용한 광섬유 케이블은 근본적으로 빛을 전달 매체로 이용하기 때문에 전자기적인 노이즈의 영향을 받지 않으며, 가볍고 가격이 매우 저렴하고, 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 활용될 수 있

어 토목/건축 계측용으로의 무한한 잠재력을 갖고 있다[9].

2. 실험 장비 및 방법

광섬유 계측 기술은 최근에 각광받기 시작한 새로운 계측 기술이므로 여러 가지의 요소 기술이 필요한 것이 사실이다. 특히 실제의 적용에 있어서 피측정체와의 부착 특성은 계측의 가부에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 이러한 부착 특성에 따른 균열의 탐사 여부를 광섬유 케이블의 피복 탈피 정도에 대해 시행착오를 거듭하여, 수 차례의 균열 탐사 실험을 통해 규명하였다[10,11].

2.1. 탐사 원리 및 실험 장비

균열의 유무 및 위치를 탐사하는 수단으로 광섬유 케이블을 사용하였다. 광섬유는 정보의 전달 매체로 빛을 이용하는데 이러한 빛은 광섬유의 코어(core)를 통해 전달된다. Fig. 1은 광섬유를 이용한 균열 탐사의 원리를 보이고 있다. 광섬유에 손상이 없을 경우 광원에서 발사된 빛은 광섬유를 따라 전달되다가 광섬유의 끝단에서 반사가 이루어지는데, 만약 광섬유의 중간 부분에 균열과 같은 손상이 발생하게 되면 빛은 더 이상 진행하지 못하고 이 부분에서 반사가 일어나게 된다. 이때 반사되어온 빛의 경과시간을 측정하여 균열이 발생한 위치를 얻을 수 있게 된다.

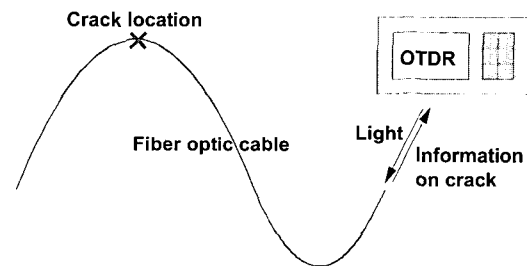


Fig. 1 Principle of crack detection

Fig. 2는 실험에서 사용한 OTDR 장비와 광섬유 케이블을 보이고 있다. 850 nm대의 광원을 사용하였고 Rayleigh 산란방식을 이용하였으며 최대 측정 가능한 해상도는 250 mm이다. 한편 광섬유 케이블은 멀티모드의 광섬유를 사용하였다.

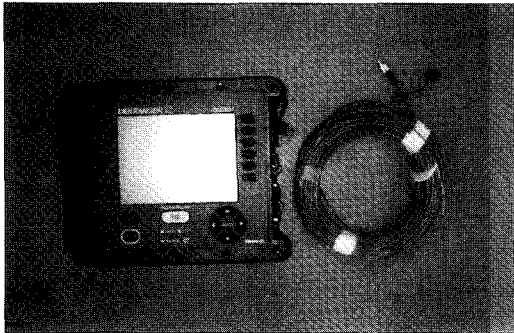


Fig. 2 OTDR & fiber optic cable

2.2. 실험 방법

광섬유를 통한 콘크리트의 균열 탐사 특성을 파악하기 위하여, 1회의 예비 실험을 수행하였으며, 이를 토대로 3회의 본 실험을 수행하여 균열 탐사 적용성을 규명하고자 하였다.

Fig. 3은 광섬유 케이블과 광섬유의 구조를 보이고 있다. 광섬유 케이블은 크게 광섬유와 이를 보호하는 외부 피복으로 구성되어 있다. 외부 피복은 광섬유와 직접 맞닿은 1차 PVC, 실밥 형태의 kevlar, 그리고 최외곽 보호재인 2차 PVC로 구성되어 있다. 광섬유는 빛의 통로가 되는 코어(core)와 이를 보호하는 cladding 및 코팅재로 이루어져 있다.

광섬유 케이블의 구조에서 알 수 있듯이, 실질적인 균열을 탐사하게 되는 코어는 여러 겹의 보호재로 덮여 있어서 피층정체의 손상이 코어까지 전달되기에는 피복재들 사이 또는 코어와 피복재 사이의 손상 전달이 제대로 이루어지지 못할 가능성을 내포하고 있다고 예측되었다.

따라서 예비 실험을 통해 이러한 문제점을 직접 확인하였고 본 실험에서는 이들 피복재를 제거해 가며 시행오차 방법을 통해 균열 탐사 실험을 진행하였다.

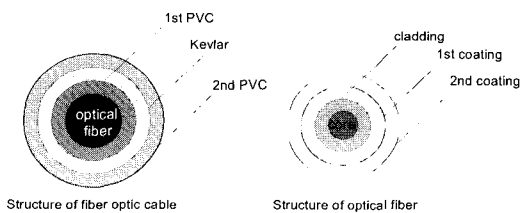


Fig. 3 Structure of fiber optic cable

3. 균열탐사 실험 및 결과분석

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

3.1. 예비 실험 결과

예비 실험에서는 광섬유 케이블을 콘크리트 실험체에 적용할 때의 문제점과 균열 탐사로의 연관성을 고찰하기 위한 예비적 성격의 실험이다. 철근 콘크리트보 실험체를 제작하여 어떠한 피복도 제거하지 않은 광섬유 케이블을 내부 매설 및 표면 부착하여 실험한 결과, 공칭 강도에 해당하는 하중을 재하하였음에도 불구하고 광섬유 케이블을 통한 손상은 발견되지 않았다. 이는 예상한 바와 같이, 콘크리트보에 발생한 균열이 광섬유 케이블의 손상으로 이어지지 못하였다는 것을 나타내는 결과로서, 광섬유 케이블의 여러 피복 사이에서 슬립이 발생하기 때문인 것으로 판단하였다.

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

3.2. 균열탐사실험 - Test #1

예비 실험의 결과를 토대로 광섬유 케이블의 2차 PVC와 kevlar를 제거하여 사용하였다. 2개의 철근 콘크리트보 실험체를 제작하였으며, 각 실험체 당 3개의 광섬유 케이블을 설치하였다. Fig. 4는 실험체 및 광섬유 케이블의 설치 개략도이며,

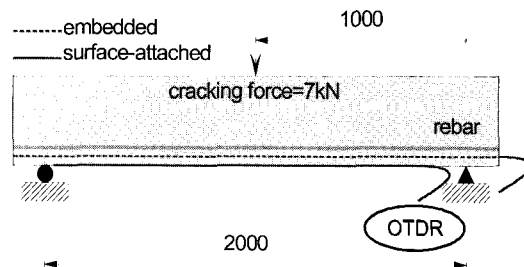


Fig. 4 Experimental Test #1

Table 1은 이번 실험에서 적용한 부착방법을 나타낸다. Member1은 kevlar까지 제거한 광섬유 케이블을 내부 매설 및 표면 부착하였고, 예비실험과의 비교를 위해 예비실험과 동일한 상태의 광섬유 케이블을 부착하였다. Member2는 kevlar까지 제거한 케이블만을 사용하였다.

Table 1 Installation of fiber optic cables (Test #1)

Member	Location of fiber		State of covering	
	Embedded	Surface-attached	without kevlar	nothing removed
Member1	●		●	
		●	●	●
Member2	●		●	
	●	●	●	

두 실험체에 대한 균열 탐사 실험을 통해 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 5는 member2에 대한 결과 그래프로서 하중 단계에 따른 빛의 반사 위치를 보여준다. 빛이 반사된 위치는 항상 광섬유 케이블의 단부로 일정하며, 이 결과는 kevlar의 제거와 관계없이 내부에 매설한 경우 파괴 하중에서도 광섬유의 손상은 발견되지 않는다는 것을 알려준다. 이러한 주요 원인은 2차 PVC이외에도 1차 PVC와 광섬유 사이에서도 슬립이 발생하기 때문이라고 판단하였다.

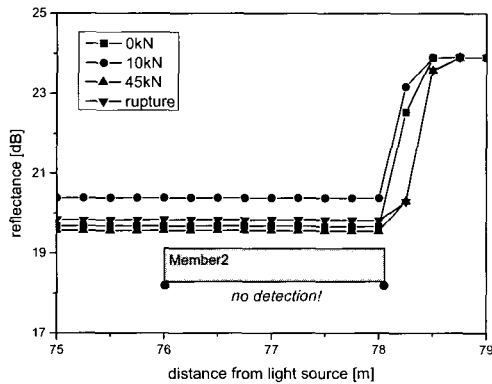


Fig. 5 Results from embedded & w/o kevlar

한편 표면 부착한 경우에서도 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 내부 매

설과는 달리, 표면 부착의 경우 비록 큰 하중에서이지만 접착제의 사용이 1차 PVC와의 결속을 지속적으로 유지하였기 때문이라고 평가할 수 있으며, 손상 전달의 매개역할을 한다고 판단할 수 있었다.

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

3.3. 균열탐사실험 - Test #2

Test #2에서는 Test #1과 유사한 4개의 실험체를 제작하였는데, 두 실험체에는 1차 실험과 흡사한 실험 상황을 재현하여 1차 실험에 대한 확인 절차를 거쳤다. 나머지 두 실험체에 대해서는 1차 PVC와 1, 2차 코팅을 모두 제거한 광섬유를 적용하였다. 이때 균열에 대한 민감도를 직접적으로 비교하기 위하여 2차 PVC와 kevlar만을 제거한 광섬유도 함께 설치하였다.

이번 실험에서는 광섬유를 내부에 매설한 경우에 대한 실험은 수행하지 않았다. 1차 PVC만 제거하더라도 콘크리트 타설 시 그 생존을 확신할 수 없었기 때문이다. Test #2에서 적용한 부착방법은 Table 2에서 보이는 바와 같다.

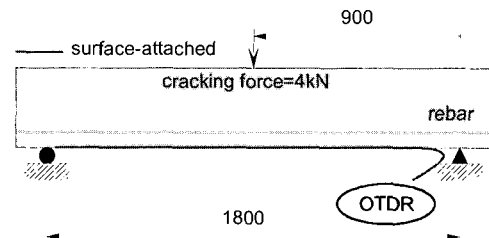


Fig. 6 Experimental Test #2

Table 2 Installation of fiber optic cable (Test #2)

Member	Location of fiber		State of covering	
	Embedded	Surface-attached	without 1st coating	without kevlar
Member1		●		●
Member2		●		●
Member3		●	●	
Member4		●	●	

Member1과 member2에 대한 실험에서는 Test #1의 결과와 동일하게 초기 균열을 탐사할 수 없었고 과도한 하중이 재하된 후에 어느 정도의 손상 유무를 판별할 수 있었다. Member3은 피복상태가 다른 2종류의 광섬유를 적용한 실험체이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 1차 코팅까지 제거한 광섬유에서는 5 kN에서 광섬유의 균열을 탐사하였는데 비해 kevlar까지 제거한 광섬유에서는 파괴하중에 도달했을 때에 비로소 균열을 탐지할 수 있었다. Fig. 8은 member3의 밑면에 발생한 균열을 보이고 있다. 이 때 육안으로 관찰한 결과, 균열부의 광섬유가 절단되어 있었으며, 따라서 절단이 된 상태로 콘크리트의 균열을 탐사한 것을 알 수 있었다.

Member4에서는 4 kN에서 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, 1차 코팅을 제거함으로

써 콘크리트에 발생한 균열을 탐사할 수 있다는 것을 확인하였다.

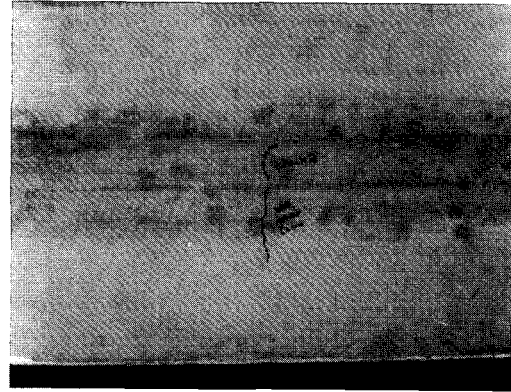
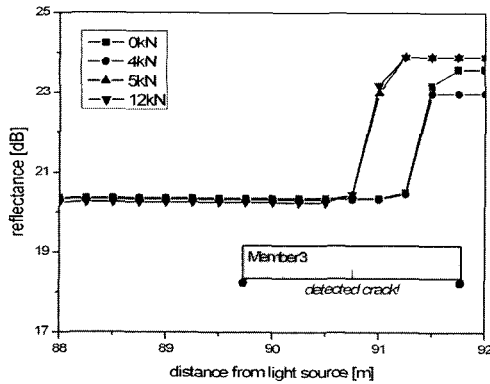
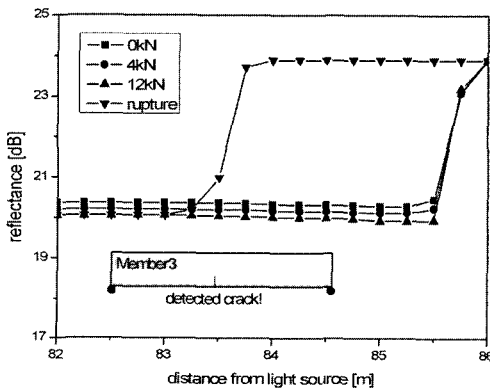


Fig. 8 Cracks at the bottom of member3



(a) Results from surfaced-attached & w/o 1st coating



(b) Results from surfaced-attached & w/o kevlar

Fig. 7 Results of member3

3.4. 균열탐사실험 - Test #3

Test #2의 결과를 보완하고 광섬유를 이용한 균열 탐사 결과를 최종적으로 검증하기 위하여 Test #3를 수행하였다. Test #2와 동일한 실험체를 3개 제작하였고, Test #3에서 적용한 부착방법은 Table 3에서 보이는 바와 같다.

Table 3 Installation of fiber optic cable (Test #3)

Member	Location of fiber		State of covering	
	Embedded	Surface-attached	without 1st coating	without kevlar
Member1		●	●	
Member2		●	●	
Member3		●	●	

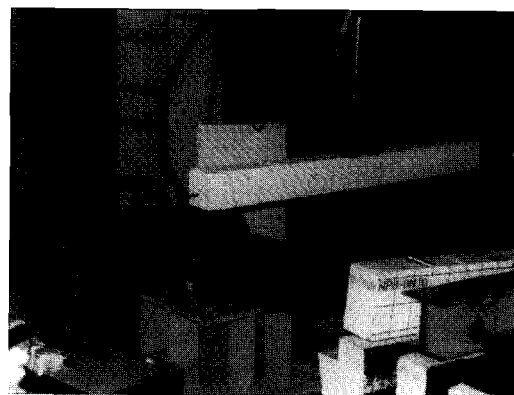


Fig. 9 View of experimental tests

Fig. 10은 member1과 member3에 대한 실험 결과를 나타내는 그래프이다. Member1은 실제로 4.5 kN에서 균열이 발생하였다. 그러나 이 균열은 보의 측면에서 발생하였는데 광섬유가 설치되어 있는 보 밑면의 단면 중심까지 전파되지 않았기 때문에 광섬유를 통한 손상은 발견할 수 없었다. 5 kN 하중이 재하되었을 때 균열이 비로소 광섬유의 위치까지 전파되었고 이때 부재에 부착되었던 광섬유도 함께 절단됨으로써 콘크리트의 균열을 탐사할 수 있었다. Fig. 10(a)에서 보이는 바와 같이, 초기 균열의 위치는 광섬유 끝단으로부터 약 750 mm에서 발생한 것으로 측정되었다. 실제로 균열은 보의 중앙에서 발생하였으며 균열 위치를 비교적 정확히 찾을 수 있었다. 그 후 6 kN에서 두 번째의 균열이 첫 번째 균열부에서 광원 쪽으로 약 210 mm 떨어진 곳에서 발생하였지만 OTDR의 측정 해상도 때문에 탐사할 수는 없었다. 그러나 8 kN의 하중 하에서 첫 번째 균열부로부터 광원 쪽으로 485 mm 떨어진 곳에서 발생한 세 번째 균열은 탐사할 수 있었다.

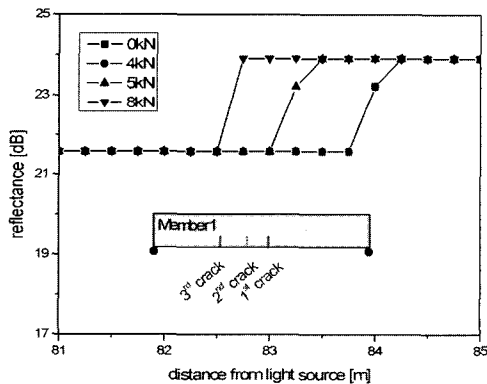
Member3에 대한 결과는 Fig. 10(b)에 나타내었다. 3 kN에서 발생한 초기균열을 OTDR을 통해 탐사하였으며, 6 kN에서 발생한 두 번째 균열 역시 확인할 수 있었다.

따라서 Test #3를 통하여 Test #2의 실험결과를 보완하였으며, OTDR과 광섬유 케이블을 이용한 콘크리트보 실험체의 균열 탐사를 검증하였다. 비록 사용한 OTDR의 해상도로 인해 근접한 위치의 균열은 탐사할 수 없었으나 광섬유 케이블을 그물망처럼 네트워크를 구성하는 등의 설치 방법을 개선한다면 인접한 균열의 탐사 뿐만 아니라 기존 균열의 진전 상황도 측정할 수 있으리라 사료된다[12].

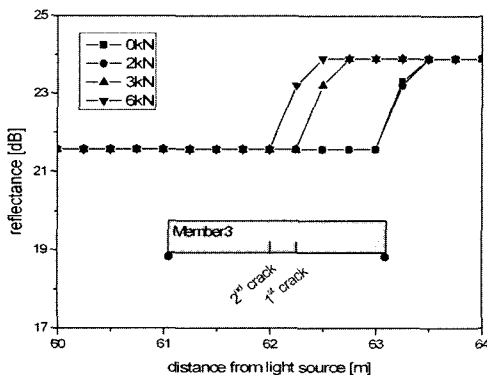
4. 결론

광섬유 케이블을 이용하여 콘크리트와의 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 정도로서, 1차 코팅까지의 피복을 제거하여야 균열 탐사의 민감도를 충족시킬 수 있었다.
- (2) 콘크리트 내부의 균열은 탐사할 수 없었으나 표면에 발생한 균열은 탐사하였다. 표면에 부착한 경우는 접촉제가 콘크리트와의 부착을 보장하기 때문에 초기의 미세 균열을 탐사할 수 있었다. 내부에 매설한 경우는 피복을 1차 코팅까지 제거하지 못하였기 때문이며, 1차 코팅까지 제거한다 하더라도 콘크리트 타설 중 그 생존을 확신할 수 없기 때문에 적용성에 문제점을 갖고 있다. 그러나 매스 콘크리트와 같이 균열 폭이 비교적 크게 발생하는 구조물에 대해서는 매설을 통한 균열 탐사의 가능성은 유효하다고 판단된다.
- (3) 광섬유 케이블을 이용하여 균열의 유무를 확인하고 그 위치를 비교적 정확히 탐사할 수 있으므로, 콘크리트 구조물의 균열 관리나 유지관리에 유용하게 사용될 수 있다고 기대된다. 다만, 본 실험에서 사용한 OTDR의 해상도는 250 mm



(a) Test results from member1



(b) Test results from member3

Fig. 10 Results of Test #3

이기 때문에 인접하여 발생한 새로운 균열을 탐사하기가 곤란한 단점이 있으나, 광섬유 케이블의 네트워크를 구성할 수 있다면 또 다른 균열의 발생 뿐만 아니라, 기 발견한 균열의 진행 상황도 모니터링할 수 있다고 예측되기 때문에 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호:04핵심기술C02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 이 연구의 일부분은 2004년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구정착금)지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김남식, 조남소, "광섬유 센서 기술을 이용한 구조물의 시공 및 장기 예측시스템 개발", 연구 최종보고서 [96CSTR02], 현대건설 기술연구소, (1998)
- [2] W. R. Habel and B. Hillemeier, "Results in monitoring and assessment of damages in large steel and concrete structures by means of fiber optic sensors," *Proceedings of SPIE*, Vol. 2446, pp. 25-36, (1995)
- [3] 이윤재, 서문웅, 권일범, 조재홍, "구조물 이상 탐지용 광섬유센서", 한국지진공학회논문집, 제 10권 6호, pp. 133-135, (2006)
- [4] Nam-Sik Kim and Nam-So Cho, "Estimating deflection of a simple beam model using fiber optic Bragg-grating sensors," *Society for Experimental Mechanics*, EXM44-4, pp. 433-439, (2004)
- [5] 정원석, 김성일, 김남식, 이희업, "Long-gauge 광섬유 센서를 이용한 철도교 PSC 거더의 처짐유추", 한국철도학회논문집, 제9권 4호, pp. 467-472, (2006)
- [6] 임홍철, 이경근, "광학적 시간영역 반사시스템을 이용한 모르타르 보의 균열 탐사", 구조물진단학회논문집, 제4권 3호, pp. 185-195, (2000)
- [7] G. Oscroft, "Intrinsic fibre optic sensors," *Proceedings of SPIE*, Vol. 734, pp. 207~213, (1987)
- [8] 김기수, "스마트 모니터링용 광섬유 센서", 한국지진공학회논문집 제10권 6호, pp. 137-145, (2006)
- [9] R. W. Griffiths, "Structural integrity monitoring of bridges using fiber optics," *Proceedings of SPIE*, Vol. 2446, pp. 127-138, (1995)
- [10] J. Jang, S. Chang, N. Cho and N. Kim, "Crack detection of structures using optical time domain reflectometry(OTDR) method", *Proceedings of SPIE*, Vol. 3988, pp. 339-348, (2000)
- [11] 김남식, 조남소, "광섬유케이블을 이용한 콘크리트 구조물의 균열탐사", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제12권 1호, pp. 896-902, (2000)
- [12] Kist, R., "Fiber-optic sensors for networks," 4th International Conference on Optical Fiber Sensors, pp. 209-225, (1986)