

# 나노 센서를 이용한 구조물 건전성 감시 기법

## Structural Health Monitoring Based On Carbon Nanotube Composite Sensors

강인필<sup>1</sup> 이종원<sup>2</sup> 최연선<sup>3</sup> Mark J. Schulz<sup>4</sup>  
Inpil Kang Jong Won Lee Yeon-Sun Choi Mark J. Schulz

---

### ABSTRACT

This paper introduces a new structural health monitoring using a nano sensor. The sensor is made of nano smart composite material based on carbon nanotubes. The nano sensor is fabricated as a thin and narrow polymer film sensor that is bonded or deposited onto a structure. The electrochemical impedance and dynamic strain response of the neuron change due to deterioration of the structure where the sensor is located. A network of the long nano sensor can form a structural neural system to provide large area coverage and an assurance of the operational health of a structure without the need for actuators and complex wave propagation analyses that are used with other methods.

---

### 1. 서론

나노기술에 의해 새롭게 등장하고 있는 기능성 나노 재료들은 (functional nanomaterials) 그들이 지닌 우수한 기계적, 전기적 및 전기화학적 성질로 많은 연구 그룹들에 의해 활발히 연구 개발되어 지고 있다. 그 중에서 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNT) [1]는 육각형 벌집 모양의 탄소 구조가 긴 튜브 형상의 이음매가 없는 연속형 구조로 이루어져 우수한 재료적 성질을 지님과 더불어 전왜성 (piezoresistivity), electrokinetics, electrochemical effects 등 다양한 지능형 재료로서의 가능성을 보이고 있다. 이 중에서 나노튜브의 전왜성은 구조물의 변위를 측정할 수 있는 새로운 지능형 재료로써 구조물의 건전성 감시 (structural health monitoring, SHM) 용 센서로서 개발 가능성을 보이고 있다.

---

<sup>1</sup> 비회원·건국대학교 인공근육연구센터, 연구교수

<sup>2</sup> 정회원·한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터, 선임연구원

<sup>3</sup> 비회원·성균관대학교 기계공학부, 교수

<sup>4</sup> 비회원·University of Cincinnati Smart Structures and Bio-Nano Lab, 부교수

Wood [2]는 폴리머와 결합되어 있는 CNT가 인장응력을 받고 있을 때에 그 전기적 특성이 변화하고 있음을 Raman spectroscopy 분석에 의해 실험적으로 입증하였다. Watkins [3]는 구조물의 미세한 스트레인과 크랙을 측정 할 수 있는 마이크로센서를 리소그래피 (lithographic) 방법에 의해 개발을 하였다. Kang [4]은 CNT 복합재료를 이용한 스트레인게이지를 개발하였고 이를 이용한 매크로 스케일 구조물의 건전성 감시법을 제시하였다.

이러한 나노기능성재료들에 기반한 지능형 재료의 개발은 복합재료 형태로 개발이 가능하므로 다양한 크기와 형태의 CNT 구조물용 센서의 개발을 실현 할 수 있다. 즉 기존의 스트레인게이지와 같은 형상으로 개발이 가능할 뿐만 아니라 액상형의 분무형 센서, 장신의 스트립 형태의 센서로 MEMS(micro electrical mechanical system) 와 같은 마이크로 크기의 미세 구조물의 계측뿐만 아니라, 그 길이가 수미터에 이르는 구조물의 거동을 감시할 수 있어 다양한 크기의 구조물용 거동 측정 센서로서 이용 될 수 있으리라 기대가 된다. 따라서 본 연구에서는 CNT 복합재료를 이용하여 연속형 (continuous) 스트레인게이지를 제작하여 이를 이용한 구조물의 크랙과 파손을 검출하는 SHM 기법을 논의하였다.

## 2. 탄소나노튜브를 이용한 스트레인 센서

구조물용 나노센서는 CNT 지능형 복합 재료 (smart nanocomposite material) 를 이용하여 개발되었으며, CNT 복합 재료는 Polymethyl methacrylate (PMMA) 등과 같은 고분자 재료에 CNT를 10% 내외의 소량으로 혼합하여 개발하였다. 복합재료에 의한 나노센서의 제작방법은 나노소재의 분산, 혼합 및 curing과 같은 복잡한 공정이 요구가 되나 센서의 크기와 두께 및 감도는 CNT와 혼합되는 고분자 기저재료 (matrix) 를 그 응용 대상에 적합하도록 특성을 조절하여 자유롭게 설계 제작 되어질 수 있다 [4]. 또한, 나노센서는 복합재료속에 균일하게 분포가 된 CNT를 구조물 위에 그림 1 (a)에 도시한 바와 같이 분무시키거나 필름 형태로 제작하여 기존의 금속형 (foil) 스트레인게이지와 같은 부착 방법으로 이용이 가능하다. 넓은 영역에서 발생하는 스트레스를 측정하기 위하여 제작된 전왜성을 지닌 연속 센서는 마치 인체 속에 섬유 형태로 분포되어 있는 감각 기관인 신경과 유사하므로 이를 모방하여 뉴런 (neuron) 이라 명명 하였다. CNT 나노센서의 스트레인 측정 특성은 CNT 분말 자체의 전왜성과 더불어 이들이 구속되어 있는 기저재료 내에서 접촉 저항의 변화에 크게 의존하여 발생한다고 추정 된다 [5]. 그림 1 (b)는 뉴런의 스트레인 측정 특성을 도시한 것으로서 뉴런의 저항 변화를 신호처리 시스템을 통하여 변위인 스트레인에 대한 전압 응답특성으로 변환 시켜 보여 주고 있다.

이 뉴런은  $1.56 \text{ mV}/\mu\epsilon$  의 감도를 보였으며, 이는 현재 상용으로 이용되는 gauge factor 2 ~ 5 범위의 금속형 스트레인게이지의  $2\sim 5 \text{ mV}/\mu\epsilon$  보다는 다소 낮은 감도를 보이고 있다. 그러나 나노센서는 복합체에 혼합하는 CNT의 함량 조절을 통하여 상용화 게이지에 준하는 감도를 얻을 수 있다.

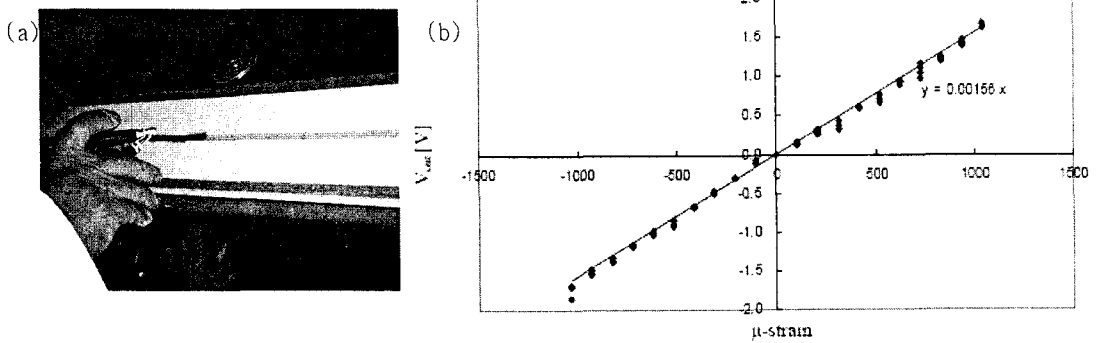


그림 1. 탄소나노튜브 복합 소재 나노 센서: (a) 분무식에 의해 3m 길이의 빔에 제작되는 나노 센서; (b) 뉴런(30cm)의 전왜성에 의한 스트레인 응답 특성

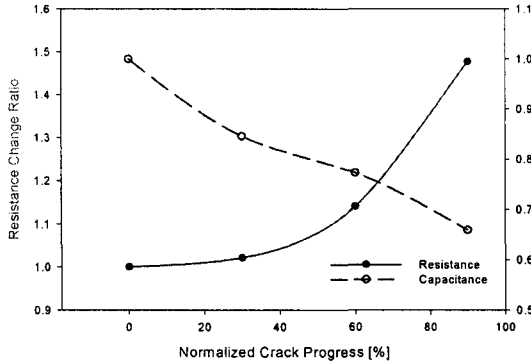
### 3. 나노센서를 이용한 구조물의 손상 측정

#### 3.1 나노센서에 의한 크랙 측정

구조물에 발생하는 크랙을 센서로 검출하는 대표적인 사례는 스트레인 게이지를 이용하여 크랙에 기인하여 발생하는 응력 집중에 의한 검출법 [6] 과 크랙의 전파에 의한 센서 자체의 파손 저항의 측정 방법 [7] 등이 있다. 전자의 방법은 크랙의 발생으로 인하여 그 끝단에 발생하는 응력 집중을 스트레인 게이지로 검출하는 방법으로, 크랙이 발생할 예상 지점 근처에 게이지를 부착시켜 응력 변화의 측정을 통하여 간접적으로 검출한다. 그러나 센서의 부착 위치가 크랙의 발생 지점에서 멀리 떨어져 있으면 센서 감도의 한계로 인하여 측정이 불가능하다. 후자의 방법 역시 크랙의 예상 발생 위치에 센서를 부착시킨 후에 만약 크랙이 발생하면, 성장 크기에 따른 센서의 파손 정도를 저항의 변화 등을 측정함으로써 크랙의 유무 또는 성장을 검출한다.

나노센서를 이용한 크랙의 검출법은 두 가지 방법의 특징을 동시에 지니고 더불어 연속 센서라는 센서의 부착 범위가 길다는 잇점으로 인하여, 한 개의 센서가 넓은 영역을 감시할 수 있다는 추가적인 특징을 지닌다. 그러나, 연속 센서라는 특성의 단점은 크랙이나 특정 신호가 발생하였을 경우 그 발생의 위치를 하나의 단위 센서로서는 추정하기 어려운 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 하나의 단위 센서가 넓은 영역의 크랙 발생과 전파를 감지하여 다수의 포인트 측정 센서를 사용하는 경우 보다는 신호 처리 시스템을 간단히 구성할 수 있으므로 대형 구조물과 같이 측정 범위가 넓은 대상의 크랙 유무와 전파에 기존의 센서보다는 유리한 장점을 지닐 수 있다고 사려 된다. 그림 2에서는 나노 연속센서인 CNT 뉴런에 의한 크랙 측정 실험의 예를 도시하였다.

(a)



(b)

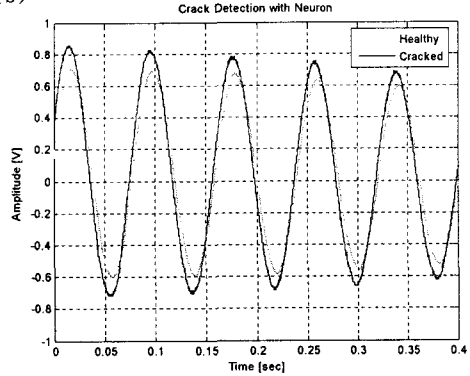


그림 2. 빔 위에 설치된 뉴런의 크랙 발생에 의한 전기적 특성 변화 실험: (a) 크랙 진전에 의한 뉴런의 저항과 정전 용량의 변화 특성; (b) 동적 하중시의 크랙 진전에 따른 뉴런의 전압과 위상 변화 측정

그림 1(a)는 빔의 종방향을 따라 설치가 되어 있는 뉴런을 횡방향으로 인위적으로 절개함으로써 크랙의 전파를 모사하면서 그 변화를 살핀 실험의 결과이다. 여기서 normalized crack propagation은 뉴런의 폭을 기준으로 하여 환산한 크랙의 길이비를 의미하며, 100%는 크랙이 뉴런을 횡방향으로 관통하여 뉴런이 끊어진 상황이다. 이때 크랙이 진전됨에 따라 뉴런의 파손이 발생하며 이로 인하여 뉴런의 전기적인 특성인 저항과 정전 용량의 변화를 야기 시킨다. 그림 1(b)는 자유 진동하는 외팔보에 장착된 뉴런의 동적 응답을 측정된 결과이다. 크랙이 50% 진전됨에 따라 그 전기적 특성이 변화함으로써 원래의 건전한 상태보다는 저항이 증가함과 동시에 정전 용량이 줄어들므로 휘스톤 브리지로 구성된 측정 시스템의 전기적 응답 신호의 크기와 위상 변화를 발생시킴으로 크랙의 진전 여부를 측정할 수 있었다.

현재 개발된 뉴런의 스트레인 감도는 아직은 크랙이 뉴런 몸체에 접근하기 전에 그 응력 집중에 의한 스트레인의 증가를 측정하기에는 다소 떨어지므로, 현재로서는 크랙이 뉴런을 파손할 경우에만 측정이 가능한 한계를 지니고 있다. 그러나 뉴런의 스트레인 감도 향상 개발이 이루어지면 크랙이 뉴런에서 다소 떨어져서 발생하거나 근처에 접근하여 뉴런의 파손이 일어나기 전에도 측정이 가능할 것으로 기대하고 있다.

### 3.2 나노센서에 의한 구조물의 단면 파손 측정

뉴런은 지능형 나노재료의 전쇄성을 이용하여 구조물에서 발생하는 정적 및 동적 스트레인을 효과적으로 검출할 수 있으므로, 본 논문에서는 동적 스트레인에 의한 구조물의 진동 측정과 이를 이용한 구조물 파손에 의한 단면 변화의 측정법을 소개하고자 한다. 뉴런의 스트레인 감지 기능은 구조물의 진동 신호를 효과적으로 검출할 수 있었다. 크랙이나 부식 등에 의한 구조물의 국부적인 손상은 구조물의 단면 감소 등을 야기시켜 구조물의 국부 강성의 변화를 발생시키고, 이러한 변화는 결과적으로 진동하는 구조물의 고유진동수의 변화를 가져 온다 [8]. 따라서 뉴런을 이용하여 구조물의 고유진동수의 변화를 측정하면 구조물의 파손을 감시할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 그림 3 (a)에 도시한 단면이 손상된 외팔보의 1차 고유진동수를 측정하였다. 구조물

의 고유진동수의 변화 측정에 의한 강성 변화에 추정을 위하여는 고차 모드의 고유 진동수 역시 측정을 하여야 하나, 본 연구에서는 실험실에서 자작된 신호처리 회로를 사용하는 등 초기 수준의 연구 단계인 한계로 인하여 50Hz 이상의 주파수 영역은 측정에 어려움이 있었으므로, 구조물의 주요 진동 범위인 1차 고유진동수를 중심으로 측정을 하였고, 이러한 결과를 유한요소해석 (finite element analysis, FEA)과 비교를 하였다.

그림 3(b)에 도시하였듯이, FEA를 위하여 외팔보를 임의적으로 10개의 요소로 나누었으며, 이 중에서 상대적으로 큰 변위가 발생하는 2번째 요소에 인위적인 단면 손상을 각각 5.78, 11.08, 17.40, 20.96, 25.26 그리고 30.05% 씩 각각 6경우로 발생 시켰다. 이러한 조건에서 외팔보에 초기 변위를 준 후에 자유 진동의 50Hz 이하의 응답을 5초 동안 측정을 하였다. 그림 3(c)는 실험 결과와 FEA에 의한 외팔보의 단면 감소율의 변화에 따른 구조물의 1차 고유진동수의 변화 결과를 비교 도시한 것이다.

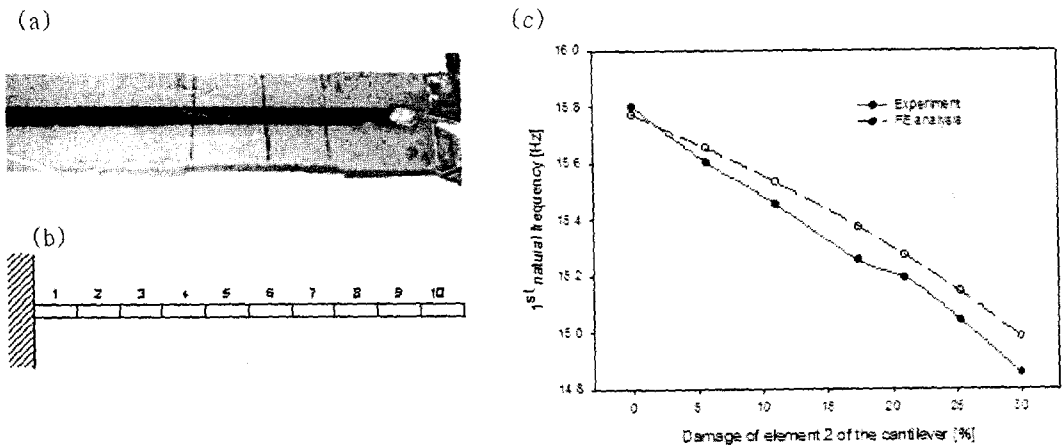


그림 3. 뉴런에 의한 구조물의 단면 파손 측정: (a) 외팔보의 인위적인 단면 훼손; (b) 외팔보의 유한요소 해석 모델; (c) 손상정도에 따른 1차 고유진동수의 실험과 이론적 모델의 변화 비교

측정된 구조물의 진동 응답은 FE 해석과 근사한 결과를 보여 주었다. 따라서 CNT 뉴런은 저주파수 영역에서 구조물의 진동수를 효과적으로 측정할 수 있으므로, 진동 응답을 통한 구조물의 파손 여부를 측정할 수 있으리라 기대한다.

#### 4. 나노센서를 이용한 구조물의 건전성 감시

SHM의 개발은 자연재해 혹은 노후로 인한 구조물 및 기계의 손상을 감지하여 큰 재해를 미연에 방지 하거나, 유지 보수에 소요되는 비용을 줄일 수 있을 것이다. 그러나 교량, 건물, 비행기, 대형 터빈의 블레이드, 선박 등 복잡한 구조물은 어느 부위에서나 손상이 발생할 수 있으며, 이들을 위한 SHM 에서는 장거리의 (long span) 센서 배치나 여러 종류의 구조물의 상태 변수들이 측정되어야 하므로 많은 어려움이 산재되어 있다. 대상 구조물에 여러 종류의 센서와 구동기를

부착하여 손상을 진단하는 SHM 시스템은 측정 대상 부분에 충분한 센서들을 배치하면 데이터 처리 시스템을 위한 복잡한 배선, 측정비용의 상승, 계측 시스템의 부착에 의한 구조물의 하중 증가 및 복잡화 등의 제반 문제들로 인하여 대형 구조물에는 적용이 어려울 수가 있다. 특히, 최근에 많이 개발되고 있는 복합재료 구조물의 건전성 감시에 있어서 주요 관심 사항인 피로의 분포도, 내면의 부식, 표면 및 접합층에서의 크랙, 박리, 화학적인 손상, 피로에 의한 크랙의 전파 등은 전형적인 내재된 손상이므로 구조물의 표면에 부착하여 진동 신호나 wave에 의한 표면 측정 신호로는 검출에 어려움이 있다. 나노센서는 경량의 필름 형태나 혹은 섬유 형태로 제작이 가능하므로 복합소재를 이용한 구조물의 내부에 센서 층으로 포함이 된 sensor embedded structure의 개발이 용이하다. 따라서 이들 뉴런은 감시 대상인 구조물에 조밀한 밀도로 넓은 영역에 네트워크 형태로 배치되어 구조물의 손상에 의한 재해 등을 예방 할 수 있으리라 기대한다. 이러한 SHM 기법은 경량의 복합소재 형태의 센서에 의존하므로 구조물에 무게증가, 응력 집중 혹은 고주파 성분의 waveform의 저장을 위한 거대한 저장 장치등 기존의 연구와는 달리 대상 구조물에 가하는 부담을 줄일 수가 있다.

그림 4 (a)는 장신의 CNT 뉴런의 네트워크로 구성된 structural neural system (SNS)을 도시하였으며, 그림 4 (b)는 SNS가 복합재료 구조물에 센서층으로 삽입이 되는 예를 도시하였다.

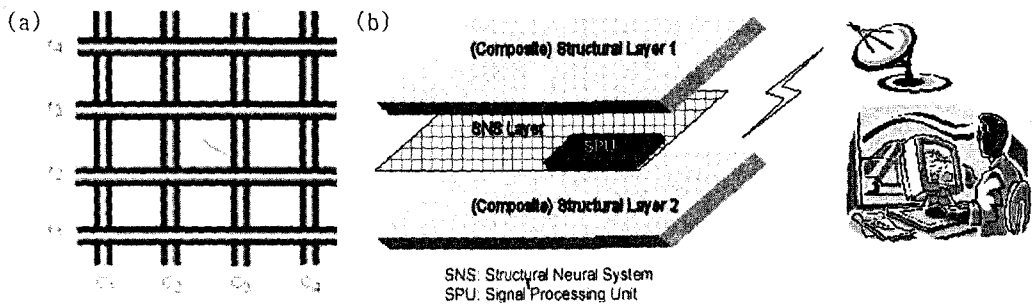


그림 4. Structural neural system (SNS) 과 그의 응용: (a) SNS 네트워크;  
(b) 신호처리 회로를 포함한 SNS를 이용한 복합소재 구조물의 SHM의 응용 예

나노센서를 이용한 SNS는 복합소재 구조물에 넓은 영역에 적용이 되어 건전성 감시 시스템으로 활용이 될 수 있으리라 기대가 되며, 향후에는 압전 세라믹 (PZT) 센서이나 금속형 스트레인게이지를 이용한 SHM 시스템과의 실험적인 비교 연구를 진행할 계획이다.

CNT를 포함한 액상형 복합소재의 센서는 그 설치 방법에 있어서도 다양한 응용이 있을 수 있다. 구조물에서 단면 형상이 변화가 심한 연결 분위나 용접 부분은 응력 집중 혹은 부식으로 인하여 크랙이나 파손의 발생이 쉬운 반면에 센서 부착에는 어려움이 있는 부위이다. 그러나 CNT 센서는 브러쉬에 의한 도포나 스프레이 형태로 분무 후 전극만을 연결하여 신호처리를 하면 되므로, 이러한 부위에 상대적으로 적용이 용이할 것으로 사려 된다.

## 5. 결론 및 고찰

나노 소재인 탄소 나노 튜브를 고분자 재료인 Polymethyl methacrylate와 혼합하여 스트레인 센서를 개발 하였고, 이를 이용하여 구조물의 건전성 감시 실험을 하였다. 탄소나노튜브 복합 소재는 액상형으로 제작이 가능하므로 센서를 분무 형태로 구조물에 장착이 가능하였으며, 탄소나노튜브 복합소재는 전왜성을 지녀 구조물의 스트레인을 측정을 할 수 있었다. 구조물에 크랙이 발생하고 전파가 되어 센서에 도달하면, 크랙은 센서를 손상 시켜 전기적인 특성 변화를 가져왔다. 진동하는 구조물에서 크랙이 발생하면 이로 인한 센서의 응답 전압의 크기와 위상의 변화를 측정하여 크랙의 발생을 측정 할 수 있었다. 나노 센서는 구조물의 동적 스트레인을 효과적으로 측정 할 수 있으므로, 구조물의 1차 고유진동수의 변화에 의한 단면 파손을 측정할 수 있었으며, 이 실험의 결과는 유한요소해석과 잘 일치하였다.

나노 센서는 장신의 연속형 센서로 제작이 가능하므로, 센서 네트워크를 구성하여 복합소재 구조물에 삽입이 되면 구조물 내부에서 발생하는 손상도 측정 가능 할 것으로 기대가 된다. 또한 나노 센서는 액상 복합소재로 제작 되어, 불규칙한 표면과 단면 변화가 심한 부위에 도포가 되어 여기서 발생하는 크랙이나 파손을 측정 할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon", Nature Vol.354, No.56, 1991, pp.56-58
2. Wood, J. R. and Wagner, H. D., "Single-wall carbon Nanotube as molecular pressure sensors", Applied Physics Letters, Vol.76, No.20, 2000.
3. Watkins, A. N., Ingram, J. L., Jordan, J. D. Wincheski, R.A., Smits, J.M. and Williams, P. A., "Single wall carbon nanotube-based structural health monitoring sensing materials", NSTI conference- Nanotech, Vol.3, 2004, pp.1.
4. Kang, I., "Carbon Nanotube Smart Materials", 2005.
5. Wang, X. and Chung, D. D. L., "Short-carbon-fiber-reinforced epoxy as a piezoresistive strain sensor", Smart Materials and Structures, Vol.4, 1995, pp.363-367.
6. Tikka, J., Hedman, R. and Silijander, A., "Strain Gauge Capabilities in Crack Detection", The 4th international workshop on Structural Health Monitoring, 2003.
7. [http://www.vishay.com/brands/measurements\\_group/strain\\_gages/mm.htm](http://www.vishay.com/brands/measurements_group/strain_gages/mm.htm)
8. Firswell, M. I. and Penny, E. T., "Crack Modeling for Structural Health Monitoring", Structural Health Monitoring, Vol.1, No.2, 2002, pp.139-148.