

특집

구조물 안전 진단

구조물 안전성 모니터링의
미래와 기술적 도전

고 봉 환*

(동국대학교 기계로봇에너지공학과)

1. 머리말

재난을 미리 예측하고 그 원인을 사전에 제거하는 것은 쉽지 않다. 다만, 재난을 발생시킬 소지가 있는 원인을 미리 찾아내고 재난 발생 시 적극적이고 효과적인 대처방안을 마련하는 것이 최선의 방법일 것이다. 사회기반 시설물 특히, 댐이나 교량 등은 지진이나 테러 등의 재난으로 부분적 손상이 발생했을 때, 그 구조물의 건전성(structural integrity)을 정확하고 신속히 파악해야 된다. 이러한 판단을 근거로 빠른 시일 내에 시설물의 정상적 가동 여부를 결정할 수 있으며, 인근 주민들의 대피나 시설물에 대한 접근을 봉쇄할 수도 있다. 최근 통계에 따르면 국내에는 도로에 가설된 교량만 총 21,117개가 있으며, 그 중에는 연장 500 m 이상의 대형 교량(long-span bridge)이 440개에 이른다. 성수대교 붕괴 참사 이후로 1995년 시설물안전관리에 관한 특별법이 제정되었고, 이에 따라 서울시는 20여개의 한강 다리에 대해 매일 수시 점검, 매년 2회씩 정기점검 및 격년제 전문기관 정밀진단을 실시하여 교량마다 안전 등급을 부여하도록 하고 있다. 그러나 이러한 검사법은 엄청난 인력과 시간을 요구하는 육안검사나 X선 등을 이용한 국부적 비파괴검사 등으로 한정되어 있다. 결국, 기존의 사회기반 시설물 안정성 평가 방법은 주

로 일정-중심(schedule-based)의 육안 검사(visual inspection)가 대부분이었다. 이러한 평가 방법의 근본적인 문제점은 비용뿐 만 아니라 구조물 전체를 검사하는데 소요되는 시간 및 검사자의 개인적 경험에 의존할 수밖에 없는 평가결과 등에 있다.

최근 들어 주요 사회기반 시설물에 대한 구조물 안전성 감시(structural health monitoring: SHM) 체계의 필요성이 점점 증대되고 있다. 사회기반 시설물은 그 스케일, 접근성 및 상대적으로 긴 설계수명 등을 고려할 때, 자율적인 감시 시스템의 도입이 필요하다. 왜냐하면, 교량, 댐, 도로망, 가스관, 전력망 등은 지진이나 홍수 등 자연적 재해 이외에도 시설의 노후에 의한 사고 발생요인이 존재하기 때문에 정기적인 관리 및 안정성 평가가 필요한데 많은 인력과 엄청난 검사비용이 발생하고 특히, 재난 발생 시 신속한 피해 평가가 요구된다는 측면에서 검사원 등 인력에 의존하는 중앙 집중식 감시 시스템은 효율적이지 못하다. 이보다는 분산된 무인 원격 감시(unmanned remote monitoring)와 같은 자율적인 SHM 체계가 적합하다고 할 수 있다. 이 글은 SHM과 관련된 두 가지 기술적 도전에 대해 소개하고자 한다. 첫째는 지능형 무선센서와 관련된 고찰 내용이고, 두 번째는 구조물-물입형 나노패치 센서의 활용과 관련된 내용을 소개하고자 한다.

* E-mail : bkoh@dongguk.edu / (02) 2260-8591

2. 진동기반 결함 탐지법의 문제점

대표적인 SHM기법으로는 진동기반 결함 탐지법(vibration-based damage detection)을 들 수 있다. 이는 감시대상 구조물에 자연적인 또는 인공적인 진동을 발생시켜 결함으로 인한 구조물의 동적 특성의 변화를 각종 센서를 통해 감지함으로써 구조물에 존재하는 결함의 위치 등을 찾아내는 기법이다. 진동기반 결함 탐지법은 센서로 측정 가능한 구조물의 동적 특성에 기초하기 때문에 검사자의 개인적 경험에 의존하지 않고, 무인 원격 모니터링이 가능하며, 적절한 센서 배치를 통해서 구조물 전체의 건전성을 실시간으로 평가 가능하다는 장점이 있다. 특히, 진단 비용이나 소요되는 시간 면에서 육안 검사보다 월등하다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 아직 교량이나 댐 등의 대형 구조물에는 진동기반 결함 탐지법이 적극적으로 활용되지 못하고 있다. 그 원인을 분석해 보면 다음과 같다.

첫째, 결함에 대한 동적 특성 변화의 민감도(sensitivity)가 낮아 손상의 위치를 정확하게 파악하기에 매우 힘들다는 점이다. 특히, 대형 붕괴사고를 방지하기 위해 조기에 탐지해야만 하는 최소한의 결함 상태를 환경적인 요인과 구분하기 힘들 정도로 결함에 대한 민감도가 낮은 경우가 많이 있다. 둘째, 기존의 진동기반 구조물 결함 감시 방법들은 독립된 개별 센서의 위치가 구조물의 특정위치에 고정되어 있고 대형복합 구조

물과 같이 넓은 영역을 감시하기 위해서는 대량의 센서들이 배치 및 운용되어야만 했다. 즉, 다수의 고정식 센서로부터의 측정되는 방대한 양의 데이터를 일괄 처리해야만 하고, 고장과 훼손에 대비해 개별 센서의 기능을 지속적으로 유지 및 관리해야 하는 새로운 문제가 야기될 수밖에 없었다. 셋째, 센서의 배치가 불연속적이므로 구조물의 불특정 위치에 발생 가능한 결함을 감지하기에는 한계가 있다. 현실적으로 연속적 형태의 진동신호 센서가 존재하지 않으므로 특정 지점에만 설치 가능한 개별센서 방식의 결함 탐지 기법들은 그 기술적 한계에 봉착하여 그 효용성에 대한 입증에 어려운 실정이다. 즉, 기존의 이산(discrete) 개념의 센서로는 대형복합 구조물의 안정성 상시 모니터링 체계 구축은 불가능하다.

물론, 위에서 언급된 문제점은 구조물에 설치되는 센서의 밀도를 높임으로써 어느 정도 해결될 수 있다. 센서의 위치가 손상 부위에 가까울수록 측정치의 변화가 크므로 센서의 배치에 따라서 손상에 대한 구조물의 동적 특성이 민감해진다. 그러나 센서의 수가 증가함에 따라, 그 센서와 데이터 획득 시스템(data acquisition system) 사이를 연결하는 배선이 복잡해지고 수집된 데이터에 대한 처리가 힘들어지게 된다. 예를 들어 댐이나 가스관 등은 스케일 측면에서 센서 배선이 물리적으로 불가능한 정도로 복잡도가 증가되는 경향이 있다. 더욱이 재난발생시 전력공급의 두절이 쉽게 예상되므로 유선에 기초한 중앙 집



그림 1 미국 Missouri주 Bill Emerson 교량

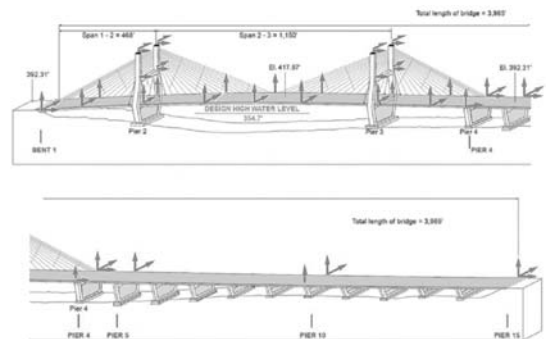


그림 2 Bill Emerson 교량에 설치된 가속도 센서 배치도

중식 센서망은 재난에 대비한 기반시설물의 적극적 의미의 안정성 평가 시스템 구축에 적합하지 않다고 볼 수 있다. 그림 1과 2는 미국 Missouri 주 Cape Girardeau에 위치하고 있는 Bill Emerson 교량과 이에 부착된 가속도 센서들의 위치를 보여주고 있다.

3. 스마트 무선센서관련 기술

분산된 감시 체계(decentralized monitoring system)는 소수의 고성능 유선센서(wired sensor)에 의존하지 않고 대량으로 배치된 스마트 무선센서 네트워크(wireless sensor network: WSN)를 이용하여 구조물에 발생한 손상을 그 주변에 위치한 센서 그룹에 의해 자율적으로 파악되도록 하는 감시 체계를 말한다. 지역적으로 그룹화된 감시망을 통해 원격감지(remote sensing)가 구현되므로 재난 발생으로 인한 복구 및 대응 인력 투입의 규모를 효율적으로 미리 파악하고 신속하게 배치할 수 있는 장점이 있다. 특히, 사회 기반 시설물 중에 재난에 의한 파급효과가 크고 꾸준한 모니터링이 필요하고 판단되는 부분에 집중적으로 센서의 배치 밀도를 높임으로써 지능적이고 특화된 센서 신경망 구축이 가능하다. WSN를 구성하는 무선센서는 센서부와 채취한 정보를 간단하게 처리할 수 있는 계산부, 가공된 정보를 전달하기 위한 통신 모듈과 배터리로 구성된다. WSN의 기본 목적은 특정한 물리적 환경, 예

를 들면 교량이나 도로망 또는 임야 등지에 대량으로 배치된 스마트 센서들이 자율적인 네트워크 그룹을 형성하며 개별 센서로부터 감지된 데이터를 스스로 처리하고 그룹내에 이웃하는 센서들과 정보를 교환함으로써 공동의 목적 즉, 그 대상물을 감시, 평가 및 제어하고자 하는 것이다. MEMS, 마이크로프로세서 및 무선네트워크 기술의 발달로 센서의 물리적 크기가 인치-단위에서 밀리미터 또는 마이크로-단위 이하로 줄어들고 적절한 연산기능을 가진 다기능 저가의 무선모듈이 널리 보급됨으로써, 센서의 기능별로 그룹화되고 분산된 감시 체계의 실현이 가능하게 되었다. 그림 3은 가속도 센서를 탑재하고 배터리로 작동되는 Xbow사의 MicaZ 모듈이 부착된 3차원 트러스 구조물을 보여주고 있다.

WSN를 구성하는 센서들은 유지·보수 없이 장기간 독립적으로 기능을 수행하여야 하므로 자체 전력관리에 대한 대책이 필요하다. 이를 위해 적절한 duty-cycle을 통해 에너지 소모를 최소화할 수 있는 네트워크 기술이 필요하고 태양열 및 풍력 등을 이용한 자율적인 전력획득이 요구된다. 기존의 중앙 집중적 유선 통신망으로 접근이 곤란했던 기반 시설물, 특히, 교량, 댐, 도로망, 가스관 등과 그 물리적 경계가 불분명한 홍수, 산불, 산사태 등의 자연재해를 감시할 수 있는 기능은 WSN의 최대 장점이라고 할 수 있다. 특정 지역에 저가의 스마트 무선센서들을 대량으로 배치 또는 살포될 수 있으며, 특별히 개별 센서들에

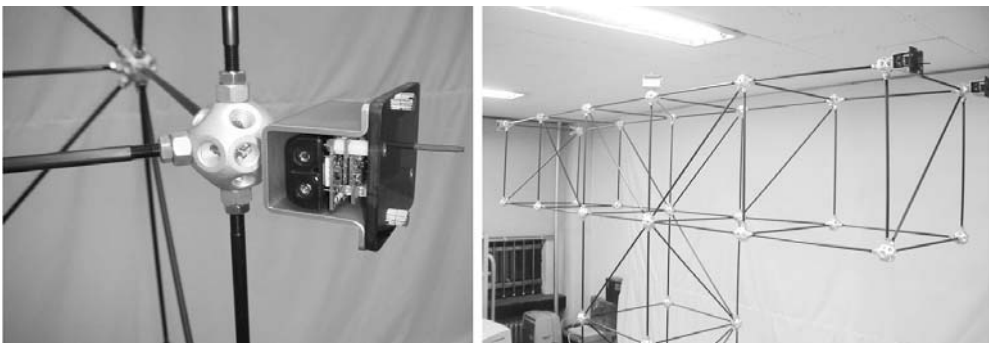


그림 3 3차원 트러스 구조물에 부착된 Xbow사의 MicaZ 무선센서

대한 중앙 관리가 불필요하다. 자연 또는 인적 재난과 관련하여 감시 가능한 센서들의 종류와 그 기능은 아래와 같다.

- 온도 센서: 구조물 화재 및 산불 감시
- 모션 센서: 산사태 감시 및 주요 시설물 등에 대한 보안
- 화학/바이오 센서: 가스관 누설, 독극물 감시 및 화재 유형 파악
- 습도 센서: 홍수 및 침수 피해 감시
- 진동 센서: 지진 및 테러로 인한 교량, 댐 구조물 등의 피해 평가
- 자력 센서: 전력선 피해 감시
- 광 센서: 일조량 측정을 통한 duty-cycle 변경

위에 열거된 센서기능들은 하나의 센서 모듈에 전부 또는 일부가 탑재될 수 있으며, 채취된 측정치가 분석되고 가공되어 이웃하는 센서로 무선 전송될 수 있다. 뿐만 아니라 대량으로 배치된 센서들은 자연 재해 등으로 유선 통신망이 두절되거나 일부 센서들이 파손 되더라도 자율적인 센서 그룹의 재배치(re-configuration)를 통해 충분히 그 기능을 복원하고 감시 체제를 유지할 수 있다. 예를 들면, 수백 또는 수천 개의 독립적인 센서들

이 감시 지역별로 살포되어 자체적으로 그룹화된 스마트 센서 네트워크를 형성할 수 있다. 이렇게 그룹화된 센서망은 특별한 비상 상황이 발생하지 않는 동안은 절전모드 상태를 유지하다가 재난 발생 시 정보 수집 모드로 전환하여 측정되는 물리량을 수집, 저장 및 판단하여 릴레이 방식으로 가까운 데이터 수집 모듈로 재난 상황을 실시간 송신하는 기능을 수행할 수 있다.

최근 SHM관련 연구자들이 무선센서를 활용한 구조물 결함탐지와 관련된 연구를 진행되어 왔다. 그 중 하나는 효율적 센서배치를 위한 클러스터링 기법과 5~6개의 센서 모드로 구성된 소규모 센서 그룹의 멤버십(membership) 및 duty-cycle에 대한 고려와 센서 그룹 내 마스터(master) 센서 역할의 변화를 활용하여 결함의 위치를 실시간 추적하는 알고리즘이다. 좀 더 구체적으로 살펴보면 클러스터내의 센서사이에 정보를 교환하고 그 중 마스터 센서의 역할을 수시로 변경함으로써 결함에 가까운 위치로 네트워크 경계(perimeter)를 이동시켜 가는 방식인데 그림 4와 5와 같이 개별 센서의 주변 정보를 공유함으로써 자율적으로 결함의 위치를 찾아내는 알고리즘을 개발하였다.

4. 구조물-몰입형 나노센서 패치의 가능성

미국에서는 최근 들어 보잉 787 초대형 여객기나 아파치(Apache), 치누크(Chinook) 군용헬기 등의 상시적 결함감시를 위해 나노 센서패치 등의 개발을 위한 연구가 시도되고 있다. 현재로는 구조물의 결함탐지를 위해 나노 센서패치 개발이 부분적으로 이루어졌으나, 감시 대상 시스템에 센서 패치가 구조적으로 결합된 후 전체를 하나의 시스템으로 평가하여 결함 탐지능력을 검증한 연구 사례는 알려진 바 없다. 결론적으로 감시 대상 시스템의 위상학적 결함-민감도 분석 결과를 바탕으로 나노 센서패치를 설치/부착하고, 이를 통해 결함탐지 능력을 검증하는 형태의 체계화된 연구가 절실히 필요하다고 판단된다. 예를 들

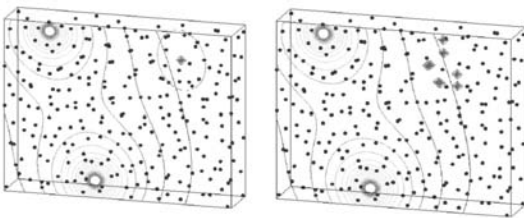


그림 4 두 결함 위치와 활성화한 무선센서(좌), single-hop으로 주변센서 활성화(우)

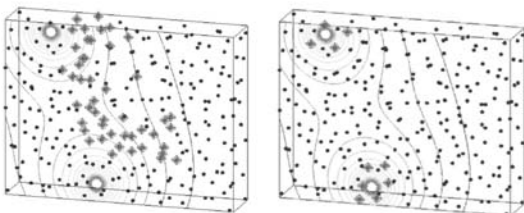


그림 5 활성화한 센서그룹과 결함추적 과정(좌), 최종 결함 추적 완료(우)

면, 감시대상 구조물의 설계 초기단계부터 다기능(multi-functional) 나노소재를 구조물에 위상학적으로(topological) 융합 또는 몰입시킨다. 이를 통해 구조물 전체의 기계적 성질, 특히, 감쇠 특성을 변화시켜 섬유복합재료 구조물에서 흔히 발생하기 쉬운 표면 및 적층결합(delamination damage)에 대한 민감도를 향상시키고, 궁극적으로 구조물에 발생하는 결함에 대해 자가 감지(self-sensing)가 가능하도록 하는 새로운 기술적 패러다임이 도출될 것으로 기대된다.

특히, 현재 개발 중인 보잉 787 드림라이너(Dreamliner)의 경우 중량에 대한 부담 때문에 기체의 20% 이상이 탄소복합재료(carbon fiber composite)를 사용하고 있어 과도한 반복하중으로 발생이 가능한 균열을 초기에 찾아내는 일이 시급한 현안으로 대두되고 있다. 또한, 항공기나

위성체 등에 많이 사용되고 있는 샌드위치 복합재의 경우 적층결합에 의한 내부적 결함을 육안으로 탐지하기는 거의 불가능한 경우가 많다. 또한, 민간 항공기의 연간 평균 1~2회 정도 낙뢰를 경험하게 되는 데, 알루미늄과는 달리 전기전도성이 열악한 복합재료 때문에 낙뢰를 맞은 항공기 표면에 국부적 발열로 인해 구조적 결함이 발생하게 된다. 특히, 일반 금속 구조물과는 달리 섬유강화 복합재료의 경우 표면에 발생한 결함으로 인해 고유진동수 등의 변화는 거의 없으며 오히려 감쇠(damping) 특성이 현저히 변화되는 것으로 알려져 있다.

그림 7(좌)에서 볼 수 있듯이 미국의 네바다대 연구팀은 자체 개발한 화학적 방법을 통하여 균일하게 혼합 및 분산된 미소량(2% weight fraction)의 탄소나노튜브만으로 폴리카보네이트



그림 6 보잉 787 드림라이너(우) 및 아파치(좌) 헬리콥터

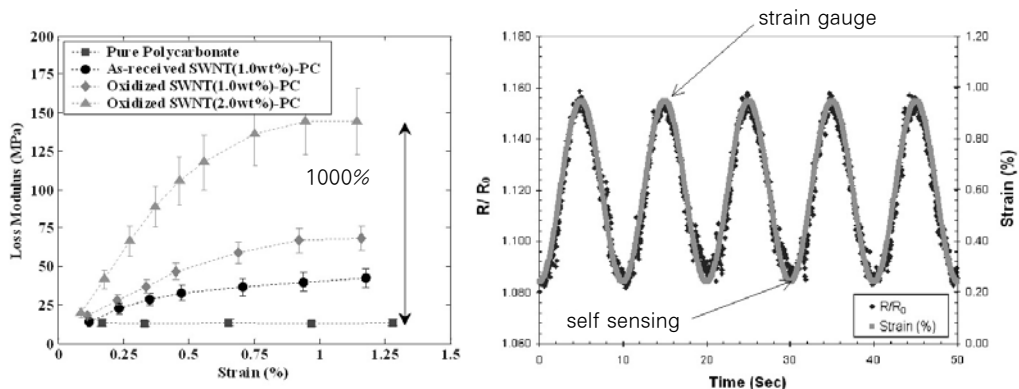


그림 7 네바다대 연구팀이 개발한 나노복합재료의 감쇠 특성 비교(좌) 및 동적하중 하에서 나노복합재료의 거동을 스트레인 게이지와 그 저항 변화의 비교(우)

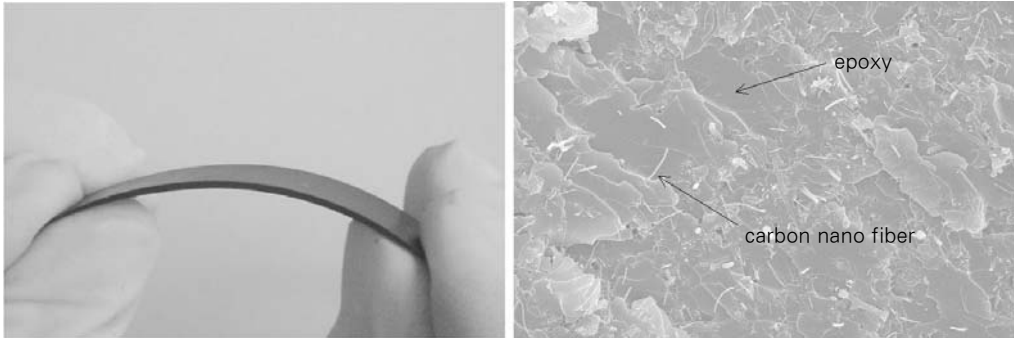


그림 8 네바다대 연구팀이 개발 중인 나노복합재료의 사진(좌) 및 나노복합재료 파단면의 SEM 이미지(우)

의 감쇠특성을 최대 1000% 이상 향상 시켰다. 특히, 이러한 감쇠특성은 탄소복합재료에서 흔히 발생할 수 있는 표면결함 및 매트릭스 사이의 적층결합 등에 민감하게 변화하므로 구조물의 감쇠 특성의 변화를 통해 결함의 유무를 판단할 수도 있다. 기계적 특성 뿐 아니라 탄소나노튜브의 우수한 전기전도성을 이용하여 부도체인 폴리머에 전기전도성을 부여하였고 탄소나노튜브의 압전 저항특성(piezo-resistivity)을 활용하여 재료의 변형 시 발생하는 저항값 차이를 읽음으로써 변형을 감지기능을 구현하였다. 이는 추가적인 스트레인 센서 없이도 구조물 스스로가 기계적 또는 열적 변형을 진단 및 감지하게 한다. 그림 7(우)은 개발된 나노복합재료에 동적 하중 작용 시 스트레인 게이지 신호 및 나노복합재료에서 직접 측정된 저항 값을 모니터링하고 비교 하였다. 전기 전도성이 우수한 나노복합재료를 활용하여 구조물에 발생한 결함을 탐지할 수 있는 센서로서의 기능을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 8과 같이 다기능 나노 센서패치(nano sensor-patch)를 활용하여 구조물의 기계적 특성(damping 증가)을 향상시킬 수 있으며, 기존의 스트레인 센서보다 민감도가 우수한 분산형 센서의 역할도 수행할 수 있다. 나노 센서패치는 첨가제 혹은 폴리머(polymer) 형태로 제작되어 가공성이 뛰어나고 형상이나 크기를 자유롭게 설정할 수 있으므로 기존의 복합재료에 쉽게 접착/융합되며, 대상 구조물의 넓고 복잡한 형상을 효율

적으로 커버할 수 있다. 특히, 섬유강화 복합재료로 만들어진 대부분의 항공기 구조물의 경우 표면이나 적층결합 등으로 인해 감쇠특성이 현저히 변화하는데, 감쇠 민감도가 강화된 나노 센서패치를 결합탐지에 적용하면 결함에 민감한 인자(feature)로 활용될 수 있다. 이를 근거로 대상 구조물에 적절한 결합-민감도 분석(damage-sensitivity analysis)을 수행하여 최적화된 나노 센서패치의 위치와 형상을 결정할 수 있으므로 맞춤형 결함 감시 시스템을 구현할 수 있다.

5. 맺음말

최근 급부상하고 있는 스마트 무선센서와 다기능성 나노재료관련 기술이 기존의 구조물 안전성 감시시스템과 결합됨으로써 기존의 전통적인 센서-시스템 방식의 구조물 결함 탐지법의 물리적 한계가 극복될 것으로 판단된다. 결함의 위치를 효과적으로 찾아내기 위해 다량의 저가 무선센서들이 활용될 수 있으며, 각 센서들에서 취합되는 결함관련 물리량들을 중앙 집중식 데이터 처리과정 없이 센서 그룹 스스로 결함의 유무를 판단할 수 있는 기술이 각광을 받을 것이다. 특히, 나노-센서 결합형 결합탐지 기법은 향후 복합재료가 많이 사용될 항공기, 헬리콥터, 잠수함, 고속철도, 위성 시스템 및 발사체 등에 대한 자율적인 구조물 안전성 감시시스템 구축에 활용될 것으로 기대된다. KSNVE