

광섬유 센싱에 의한 지능형 설비 안전진단 시스템

金 昌 鍾 (수원대 전기전자정보통신공학부 교수)
張 胤 相 (수원대 기계공학과 교수)

1. 서론

최근 몇 년 사이에 발생한 교량과 대형 건물의 붕괴는 토목 구조 분야뿐만 아니라 전기 설비 분야에 종사하는 관계자에 있어서도 비상한 관심거리가 아닐 수 없다. 전기 설비에 있어서의 고장 진단 등의 유지 보수의 문제는 결국 원칙적으로는 안전진단의 문제로 공통적인 현상이기 때문이다. 전기설비와 전기안전 그리고 설비의 유지보수에 종사하는 자에게 있어서도 설비 안전의 문제는 유의해야만 하는 분야이므로 설비안전 진단의 최신 기술에 대한 이해를 높이는 기회가 되기를 기대하며 구조물 설비의 지능형 안전 진단 시스템을 소개하고자 한다.

규모가 크고 사용기간이 길며 막대한 공사비와 사회간접자본의 투자가 수반되는 건설 구조 설비와, 열악한 환경에서 첨단소재를 사용하는 고가의 항공기와 같은 기계 구조물은 구조물의 철저한 사후 유지 관리 및 안전성의 확보가 중요한 과제이다. 구조물을 항상 안전한 상태로 유지하기 위해서는 구조물을 정밀하게 진단하여 이상 여부를 확인하고 구조적 또는 안전상으로 문제가 되기 전에 미리 조치를 취하여야 한다. 이러한 구조물의 종합적 관리에는 많은 자금과 인력 동원이 요구되어 미국의 경우 1992년 한 해 동안 약 2억 달러가 부식에 의해 문제가 생긴 건설 구조물의 구조검사, 보강 및 교체에 사용되었다¹⁾. 건축 및 기계 구조 설비를 유지 관리하기 위한 내

구성 진단의 한 방법으로 최근 비파괴 검사법이 크게 주목을 받고 있다. 그러나 적외선, X-선 등을 이용한 기존의 비파괴 진단 방법은 기본적으로 off-line 방법이며 설비의 구조와 형태 및 주위환경의 영향으로 인한 사용처의 제약과 함께 사용 방법의 난이성, 측정 오차 및 측정자료의 해석 방법 등에 문제가 있다. 그러나 현 방법의 최대의 취약점은 진단에 지능성이 결여되어 있다는 것으로 즉, 진단을 위한 신경망이 구조물 자체에 포함되어 있지 않으므로 인하여 실시간 대처가 부족하고 측정 및 데이터 오차가 존재하여 즉각적인 측정과 진단이 불가능하다는데 있다.

이러한 배경에서 최근 미국을 중심으로 구조물 설비에 센서를 내장한 smart structure 구축의 필요성이 사회적 기술적 추세로 등장하고 있다. smart structure란 구조물 내부에 삽입한 센서에 의하여 진단신경망을 구축하고, 측정 데이터를 위한 최첨단 신호처리장치를 갖추어 상태를 정확히 진단하는 각종 건축 및 토목, 기계적 구조물을 의미한다²⁾. smart structure에서는 구조물의 응력, 변형률, 피로 등의 기계적 성질과 온도 및 부식상태등을 실시간으로 측정하여 종합진단을 수행한다. 이 개념은 구조물 재료의 제조 또는 구조물 구성시 센서를 내장하는 것으로 시공 또는 제조 후에 행해지는 현재의 비파괴검사에 의한 안전관리와 기본적으로 차이가 있다. 센싱 시스템을 구조물에 미리 구축함으로써 실시간 이상

상태의 감지에 의한 즉각적인 보수에 의해 적은 안전진단 비용으로 상태악화 방지가 가능하고 재시공 비용을 절약할 수 있다. 즉, 문제가 생긴 후의 사후보전(corrective maintenance) 또는 상태와는 상관없이 정기적으로 행해지는 정기보전(preventive maintenance)보다 더욱 지능적인 상태감시에 의한 보전(condition-based maintenance)과 예측보전(predictive maintenance)가 이 smart structure 에서는 가능하다는 것이다.

smart structure 구축에는 광섬유(fiber-optic) 센서가 최신 기술로 각광받고 있다. 그 이유는 신기술발전에 따라 광섬유 센서가 전기적 센서에 비하여 전자장 간섭에 대한 강한 내력, 작은 사이즈, 경 중량 및 유연성, 고온에서 작동 및 절연체, 넓은 주파수대역 등의 장점을 갖고 있기 때문이다^{2,3)}. 광섬유에 의한 smart structure 구축은 구조물 재료의 제조 단계에서 센서를 재료 내부에 장착하는 기본적인 개념의 특성 때문에 주로 복합재료(composite)의 제조 및 성능 모니터링과 안전 진단용으로 연구되었고 따라서 복합 재료를 많이 사용하는 항공기 및 우주선 발사체 구조에 주로 적용되었다. 근래에는 복합재와 제조특성이 유사한 콘크리트 구조물 설비 및 철골 교량용으로도 개발 적용되고 있으며 실제 구조물에서 예비 성능 실험을 하고있는 단계이다.

이러한 배경에서 본 논문은 국내에 smart structure에 의한 구조물 설비의 종합관리 개념을 소개하고 smart structure 적용을 위한 광섬유 센서 시스템을 제시하여 이 기술의 조속한 정착과 실적용에 기여하는데 목적이 있다. 본 글에서는 이러한 목적에 따라 광섬유 센싱에 의한 지능형 설비관리 시스템을 적용하기 위한 시스템의 설계방법 및 여러 조건을 소개하며 특히 광섬유 센서에 대한 선택 규정 및 센서에 의한 신호의 해석 및 실험적 적용 방법을 제시하고자 한다. 아울러 smart structure가 적용된 대표적인 설비재료인 복합재 내에서의 감시대상인 여러 가지 물리량의 기계적 상황과 광섬유를 통한 빛의 관계를 설명하고 구미에서 실제로 적용하거나 적용 준비단계에 있는 몇가지 사례를 소개하여 설비진단의 최신기술을 습득하고 나아가 본 진단 방법

의 국내 적용을 조기에 실현할 수 있는 기본 자료로 활용되도록 하고자 한다.

2. Smart Structure 시스템의 설계

2.1 Smart structure와 감시대상

다른 센싱시스템과 마찬가지로 smart structure에 의한 설비관리 시스템도 사용목적이 정확하게 정의되어야 적절한 시스템을 구성할 수 있다. smart structure의 적용목적 또는 관리대상은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- * 제조과정의 감시
- * 설비운전시 부하와 환경 변수의 측정
- * 경년열화 감시를 위한 구조의 강도 판정

이러한 관리대상을 smart structure에 필요한 정도를 결정하기 위하여 감시의 계층구조로 표시하면 표 1과 같다. 즉, 상태 감시(status and condition monitoring)가 가장 하부에 있으며 이것은 센서에 의하여 smart structure의 기능 테스트를 담당하게 되는 것이다. 이 기능은 전기나 기계 기기에 대한 합격/불합격 판정과 같은 테스트이다. smart structure에 성능 테스트를 적용하는 것은 smart sensor에 의하여 하중, 기계적 변형률, 온도, 습도 데이터라고 해석할 수 있다. 계층 구조의 가장 상부는 상태예측 및 진단 감시기능이다. 이것은 smart structure에서는 실시간 성능

표 1. 감시계층 구조와 smart structure의 적용

감시 계층 구조		smart structure 적용
예측 감시	Component가 언제까지 안전하게 견딜 것인가	In-service 성능 수명 및 경년 열화 판정
진단 감시	Component에 이상이 있다면 그 원인은 무엇인가	
성능 감시	Component가 얼마나 잘 돌아가고 있는가	부하와 환경
상태 감시	Component가 적절히 일을 수행하고 있는가	기능 테스트
상황 감시	Component가 일을 하고 있는가	

검사 및 수명과 열화 진단을 포함하는 것이 된다. 이러한 상부 구조의 기능을 수행하기 위해서는 센서의 정확한 보정(calibration)이 요구되며 효과적이고 바른 자료해석 방법이 요구된다.

2.2 센싱시스템의 설계

설비의 관리대상이 결정되면 센서 및 센싱시스템을 설계한다. 기본적으로 smart structure는 한 세트의 센서를 복합재 또는 금속, 콘크리트 등의 구조물 재료내의 한 판넬 구조에 설치하고 이 센서가 판넬 주의 또는 내부의 상태에 따른 환경 상태량들을 감시하게 되는 구조이다. 이 주위환경 정보가 주파수, 상(phase), 또는 강도(intensity)의 변수를 이용하여 광섬유 센서를 통과하는 빛으로 변환된다. 그러면 여러 개의 센서로부터 나온 출력이 광/전자 변환을 위해 multiplex 되어서 컴퓨터로 들어가게 된다. (그림 1 참고).

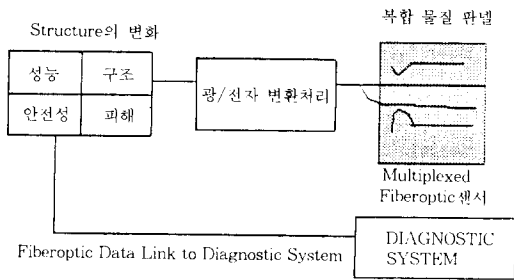


그림 1. 광섬유 내장에 의한 smart structure의 실현 구조

smart structure의 설계자는 목적에 따라서 센서의 형태와 종류를 결정해야한다. 그러면 광섬유 설계자는 시스템 설계자의 필요와 의도를 맞추어 줄 수 있는 전체 디자인을 배열하고 설계하게 된다. 시스템 설계시의 고려사항으로는 첫째, 센서가 내장되는 물질의 종류와 형태, 둘째, 선택된 재질과 호환성이 있고 적합한 성능을 제공하는 광섬유 코팅의 종류와 방법, 셋째, 센서의 종류, 넷째, 필요한 감지요소의 수와 호환성이 있는 multiplexing 기술, 다섯째, 마지막 신호처리에서의 요구사항을 간단하게 해결 수 있는 광프로세스의 방법들이 있다. 이러한 시스템의 설

계를 위해 고려해야 할 사항은 표 2와 같이 정리된다. 이 중에서 광섬유 센서 및 구조물 재료의 기계적 상황과 빛의 관계 등은 다음 장에서 자세히 설명한다.

표 2. smart structure system설계시 고려사항

시스템 구성 요소	시스템 Architecture	신호처리	Multiplexing	광섬유 센서	구조물 재료 (복합재)
고려 사항	<ul style="list-style-type: none"> * 안전상태 감시 * 성능 감시 * 피해 관리 * 구조 및 기타 	<ul style="list-style-type: none"> * 전기신호 * 광신호 * 다중 채널 * 다중 센싱 	<ul style="list-style-type: none"> * TDM * WDM * FM * Coherence * Polarization * Couplers * Stars 	<ul style="list-style-type: none"> * 변형률 * 온도 * 진동 * 음향 * 전자기장 * 회전 * 가속도 * 형태 * 호환성 	<ul style="list-style-type: none"> * Fiber coating * 커넥터 * 방향 * 재질 열화 * Epoxy * Polyimides * 티타늄 * 알루미늄 * 세라믹 * 탄소-탄소

2.3 신호처리 시스템

위에서 설명한 광섬유 센싱 시스템을 고려하여 물질내에 내장된 광섬유센서로 부터의 광/전기적 신호처리를 위한 시스템은 다음과 같이 구성된다. 그림 2에서 나타난 각 부의 기능은 다음과 같다.

1. FM Modulator/Pulsar : 레이저의 주파수/펄스 비율을 변화시키기 위한 VCO(voltage controlled oscillator)로서 컴퓨터의 D/A에 의하여 전압을 조정한다.
2. 광검출기(Photo Detector) : 빛을 받아서 그 에너지를 아날로그 전압으로 변환하며 Wideband 증폭기를 사용한다.
3. 광증폭기(Photo Amplifier) : 검출기 Stage의 출력을 증폭하는데 Wideband low-noise의 증폭기를 사용한다.
4. Mixer : Wideband 증폭기로부터 원하는 주파수를 선택하기 위해 사용하며 노이즈를 줄이는데 도움이 된다.
5. Tuned Amplifier : mixer로부터의 입력을 scan하는데 사용하는데 수동 또는 컴퓨터에 의하여 조절할 수 있다.

6. Detector/Amplifier : Tuned 증폭기로부터의 출력을 구분하고 증폭한다.

7. Personal Computer : 시스템을 감시하고 데이터를 저장한다.

컴퓨터는 검출기/증폭기로부터 나오는 출력을 감시한다. 컴퓨터는 샘플을 테스트하는 동안 일어나는 변화에 대하여 적응할 수 있도록 프로그램 되어 있으며 광검출기(photo detector)에 의하여 취하여진 광시스템으로부터의 데이터를 검색한다. 또한 각 실험의 데이터를 저장하며 저장된 정보를 이용하여 실험이 진행됨에 따라 더욱더 많고 정확한 정보를 빠르게 얻을 수 있도록 한다. 이 시스템은 운전 한계는 laser source에 가하는 최대 주파수와 mixer의 sharpness에 의하여 조절된다.

시스템 구성시 몇 가지 주의사항을 살펴보면 다음과 같다. 우선 광섬유와 시스템간의 기계적 연결은 견고하게 행하여야 한다. 외부의 이상 진동은 최소화되어야 하며 진동의 크기는 기록하여 추후 자료 분석시 고려하도록 한다. 구조물재료의 감지영역으로부터 광섬유를 통한 광로(opti-

cal path)도 주의해서 조절되어야 한다. 이렇게 하므로 신호 대 노이즈의 비율 즉, SNR(signal to noise ratio)를 증가시킬 수 있다.

컴퓨터나 또는 phase-lock loop 아날로그 시스템을 이용하여 레이저의 작동 주파수에 의한 변형률의 방향 즉, 인장 또는 압축을 결정할 수 있다. 주파수가 어떤 제한량 안에서 증가된다면 광섬유의 두께가 줄어든 것이며, 이것은 인장 변형률이 작용하고 있음을 의미한다. 반대로 주파수가 감소된다면 광섬유 두께가 증가한 것이며, 압축하중 또는 굽힘에 의한 압축 변형률이 작용하고 있는 것이다.

3. 광섬유 센서와 측정

3.1 광섬유 센서

구조물 재료의 특성에 맞는 광섬유 센서나 광시스템을 선택하기 위해서는 우선 기본 광섬유 형태와 빛 전송 특성을 알아야 한다. 기본적인 광섬유 및 전송특성에는 그림 3에서 보여주듯이 step-index single-mode, graded-index multi-

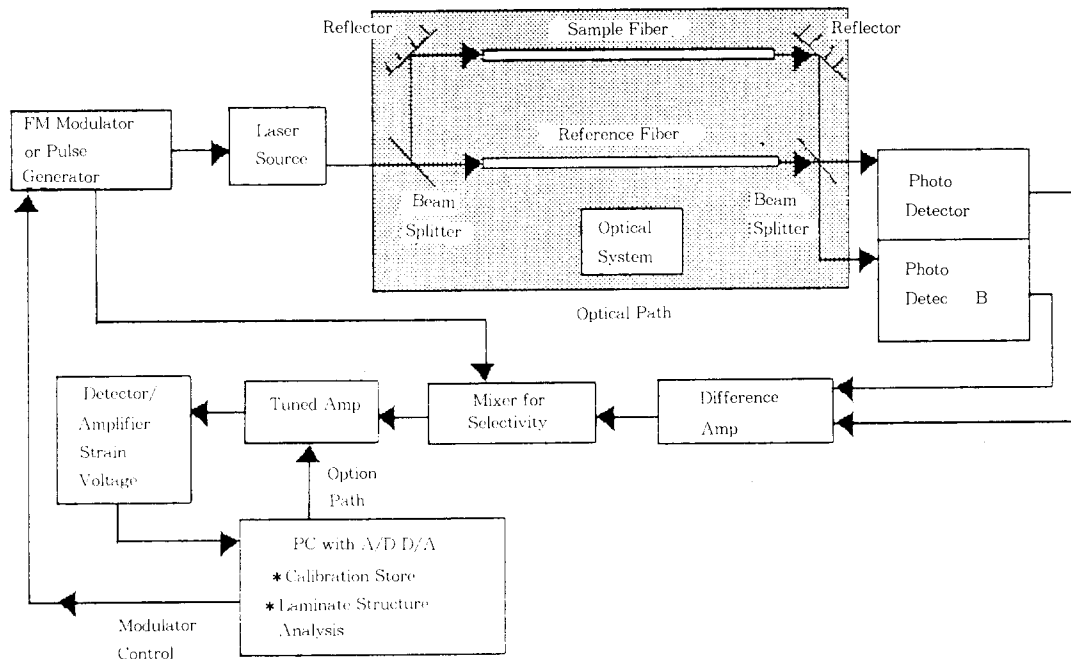


그림 2. 광섬유 센싱을 이용한 신호처리 시스템

mode, 그리고 step-index multi-mode의 세 가지가 있다. 이 세 가지형을 통하여 빛이 지나갈 때에 빛의 전송형태는 cladding glass(외부)와 core glass(내부)의 상대적인 반사율(refractive index)의 차이에 의하여 결정된다. 이러한 차이 때문에 전송된 빛은 광섬유에서 반사되어 다른 특성의 wave guide 특성을 나타내게 된다. 그러므로 wave guide와 광로 (optical path)가 측정용 광섬유를 결정할 때 중요한 요건이 된다.

그 다음 단계는 기계적 측정량을 전달하는 광섬유 센서 시스템의 정보매체를 선택 하여야 한다. 많이 사용되고 있는 3가지 형태의 광 정보매체에는 강도(intensity), 편광(polarization), 그리고 상 간섭(phase interferometric)등이 있다. 이 세 가지 정보의 성질과 적용분야에 대한 비교는 표 3과 같다.

광섬유 센서는 또한 섬유 자체가 센서의 역할을 하며 전달되는 빛에 영향을 미치는 intrinsic과 광섬유가 단지 센싱하는 끝단으로부터 빛을 보내고 받는 통로의 역할을 하는 extrinsic의 두 가지 형태로 구분할 수 있다. intrinsic-based 광섬유 센

서는 압력, 변위, 변형률 등을 측정하기에 적절하며 extrinsic 센싱은 진동, 표면상태, 가속도, 압력 등을 측정하기에 적당하다.

이상과 같은 센서의 종류 외에도 코팅, 재질에 따른 특별한 장착방법의 사용, 그리고 디자인의 한계 등에 따라 적절한 섬유센서를 선택하여야 한다. 예를 들어 광섬유센서를 재료 물질 안에 내장시킬때 복합재의 경우 센서가 내장될 재질이 탄소-에폭시의 경우 섭씨 200도, 탄소-탄소 복합재는 2,000도에서 결합하므로 이런 고온까지 견딜 수 있어야 한다. 또한 성공적인 센서 내장을 위하여 가장 중요한 것은 사용하는 코팅물질의 재질인데 복합재의 경우 탄소-에폭시 복합재의 결합제와 성분이 유사한 polyimide 코팅이 많은 성공을 보이고 있다. 표 4는 변형률이나 온도를 측정하려는 목적에서 사용될 수 있는 광섬유 센서의 종류이다.

3.2 Interferometric Fiber-Optic Systems

위의 표 4에서 볼 수 있듯이 복합재내에 내장되어 사용될 광섬유 센서 중에는 간섭(interferometric)시스템을 이용한 것이 사용 가능성이 높다. 광섬유 기술에서 사용되는 간섭방법에는 Mach Zehnder Homodyne, Mach Zehnder heterodyne, Michelson, 그리고 Sagnac system의 4종류가 있다. 그림 2에서 처럼 주파

표 3. 광섬유 센서의 정보종류 및 적용

광 섬유 정보	측정 대상	적용 분야	embedded 센서 적용가능성
Intensity	기계적인 변수들, 방사능, 온도, 화학 및 의약적 변수들	transducer, 압력 기록기, 유량계, Spectrometer	대단히 높음
Polarization	전기적 변수	전류 transducer, 전압 transducer	낮음
Phase Interferometric	변형률, 압력, 온도변화	자력계, Gyroscope, 전류 검출기	높음

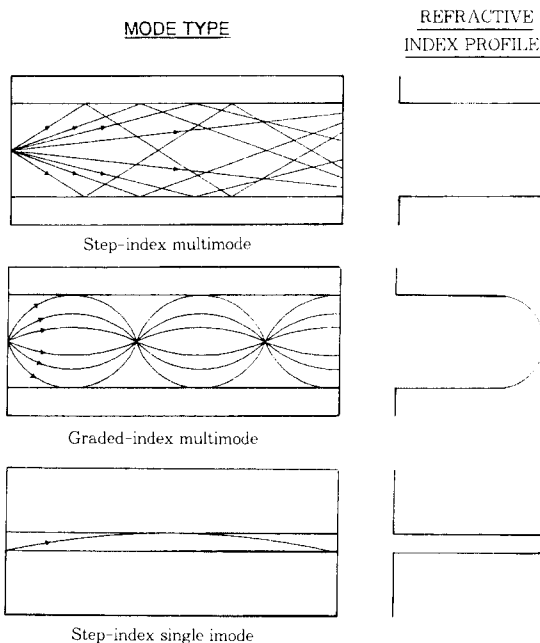


그림 3. 광섬유 및 빛 전송형태

수 분리가 부착된 Mach Zehnder 광섬유 heterodyne 수신기 시스템은 beam 분리기로부터 beam 분리기까지의 광로가 같고 보정을 위해서 기준광섬유가 사용되고 있다. 신호 광섬유는 재료내에 내장된 센서이다. 이 시스템에서는 광주파 Shifter를 사용하여 주파수에 약간의 차이가 나도록 만들어서 광검출기(photo detector)가 기준(reference)과 beam 신호사이에 beat를 생성하도록 하고 있다. 이 beat주파가 광신호에 실려서 모든 상변조(phase modulation)을 포함하고 있다. 종래의 FM 수신기술에 의하여 이상변조(phase modulation)을 검출하게 된다.

4. 재료(복합재)의 기계적 상태 및 측정대상

지금까지 지능형 설비관리 시스템을 위한 광섬유 센싱 시스템 및 센서의 설계방법 및 여러 조건들을 소개하였다. 그러나 하드웨어적 센서 시스템을 설치하는 것은 smart structure를 구현하는데 있어서 단지 일부에 불과하다. 더 중요한 부분은 이러한 잘 계측된 데이터의 홍수 속에서부터 정확한 예측을 가능케 하는 소프트웨어의 개발 부분이다. 실제의 적용문제에서 계측된 광/전기적 데이터가 복잡한 3차원의 응력장과 같은 기계적 상태(behavior)를 나타내게 되므로 이들 간의 관계 규명이 진단 상태에 의한 구조의 상태 파악에 필수적이다. 이러한 기술은 smart structure를 효과적으로 사용하는데 주요한 단계인 데이터 보정기술이라 하여, 여기서 보정(calibra-

tion)이란 구조물 요소로부터 오는 여러 데이터에서 필요한 정보를 취하는 하나의 분석 과정을 말한다. 본 장에서는 smart structure가 적용되고 있는 대표적인 설비재료인 복합재의 예를 통해 감시대상인 여러 가지 물리량의 기계적 상황과 광섬유를 통한 빛의 관계를 설명한다.

4.1 복합재와 광섬유 센서

최근에 개발된 구조 설비용 복합재는 기본적으로 적층(lamination)의 구조를 갖고 있어서 감시 및 진단을 위한 내장된 센서의 사용의 알맞은 재료이다. 또한 주어진 설계 및 하중조건에 적용하기 위해 구조가 방향성을 갖는 특징이 있다. 이러한 구조적인 복합재와 복합재에 내장된 센서와의 결합체를 smart structure 외에도 smart skin 또는 smart composite라고 부르며 내부의 신경망에 의해 응력, 변형률, 충격, 피로, 감쇄, 파괴, 층분리, 온도 및 그밖에 다른 조건들을 감시할 수 있는 것이다.

복합 재료의 역학은 직교성(orthotropic) 및 이방성(anisotropic)재료의 탄성 응력-변형률 분석과 고전적인 적층 이론에 근거하고 있다. 복합재 적층구조의 실질적인 기계적 성질은 규정할 수 있고 또 측정 가능하다. 하지만, 구조의 integrity에 대한 평가 그리고 복합재 구조의 사용 중 성능 감시에서, 각 층 및 층간의 응력과 변형률을 결정하기 위해서는 총체적인 상태를 측정하는 것이 바람직하다. 구조의 integrity를 테스트 할 때에는 적층구조의 각 층에서의 최대응력과 층내에서의 응력의 분포를 알아야 할 필요가 있다. 이 응력의 크기가 설계 여유에 그리고 수명 및 성능 예측의 결정에 사용되는 것이다. 또한 복합재 구조물을 성형 제작하기 위해서는 다방향성의 복합재의 중합(polymerization)에 대하여 온도/시간 제조사이클(cure cycle)이 적용되어져야 한다. 이 열처리되는 복합재의 각 층에서 열에 의한 잔류응력을 유도 시킨다. 잔류 열응력의 크기와 방향(수직과 전단 방향)은 복합재 구조의 강도와 수명 성능에 영향을 줄 것이다.

복합재의 각 층 및 층간의 이러한 열적, 기계적 응력과 변형률을 측정하고자 하는 목적에 근

표 4. 변형률 및 온도 측정 센서의 종류

센서의 종류	Multiplex 가능성	센서내장의 용이성
SAGNAC Interferometer	높음	높음
Mach-Zehnder Interferometer	매우 높음	높음
Evanescent Polarization	낮음	보통
Optride	낮음	보통
Michelson Interferometer	높음	높음
Dual Mode	낮음	높음
OTDR	보통	보통
Etalon	조금 높음	보통

거하여 이러한 적용에 가장 적합한 광섬유센서를 결정하기 위하여 조사를 실시하여 optical time domain reflectometry (OTDR)을 사용한 광섬유 센서 그룹을 고려하였다. Multimode bundle로 된 광섬유센서는 유연하여 섬유가 복합재내에 잘 위치되어 층내에서 또는 층과 층사이에서 센싱이 가능하게 된다. 여러 개의 송신/수신 섬유로 구성된 이 분리형 센싱 시스템의 광섬유는 길이가 각각 달라져서 왕복 지연 시간(delay time)의 차이가 발생한다. 즉, OTDR 레이저로부터 나온 하나의 입력펄스는 여러 다른 귀환펄스로 나타나게 되는데 이 귀환펄스의 크기는 각 센싱 포인트의 변형률과 관계가 있는 것이다.

복합재 구조내에 내장되어 있는 광섬유 센서를 정확히 보정하기 위해서는 표준(benchmark) 보정이 필요하다. 다음은 보정에 주요 요소가 되는 항목들의 리스트이다.

1. baseline비교를 위해서는 reference fiber가 필요하다.
2. 측정된 변형률-광 상관 관계가 결정되어야 한다.
3. 복합재에서 균일한 응력을 나타내는 단순 하중 조건이 사용되도록 한다. 단축 인장과 압축, 4점 굽힘 또는 일정한 응력범이 권장할 만하다.
4. 복합재 제조시의 열 사이클에 의한 잔류응력이 센서의 보정에서 충분히 고려되어야 한다.

4.2 내장센서의 변형률-광 성질 관계

복합재에서 내장된 광섬유 센서를 사용하는 가장 중요한 목적중 하나는 외부하중에 의한 광섬유의 변형률 응답을 측정하는 것이다. 많은 연구가 최근 10여 년간에 행하여져서 센서의 변형률과 광섬유의 광학적 전송량과의 관계를 규명하였다. 복합재 층간의 광섬유를 사용하면 광섬유의 응답으로 전체 섬유길이에 대한 변형률의 평균값을 측정할 수 있다. 광섬유를 통한 편광이 주응력(principal stress) 및 최대 전단응력과 관련이 있는 쌍굴절(birefringence)을 생성하게 되는 것이다. 응력/변형률과 빛의 일반적 관계는 Brennan에 의해 다음과 같이 표시되었다.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2(n_1 - n_2)}{n^3(c_{11} - c_{12})}$$

여기서 σ_1, σ_2 은 주응력, n 은 섬유의 평균 굴절률, c_{ij} 는 응력-광 관계계수, n_1 은 주광섬유굴절률을 의미한다.

복합재에 광섬유를 내장하는 다른 방법은 같은 길이의 분할된 광섬유를 붙여서 사용하는 방법이다. 이러한 분할된 광섬유는 여러 군데의 단절된 위치의 변형률을 측정할 수 있다. Zimmerman등은 분할된 한 구간에서의 변형률 $\epsilon_{i,i}$ 을 다음과 같이 표시하였다.

$$\epsilon_{i,i} = \left(\frac{\Delta t_i - \Delta t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \left(\frac{1}{1+a} \right)$$

여기서는 i 는 분할된 구간 번호, t_{i-1}, t_i 는 광원으로 반사된 빛의 근원 반사펄스, a 는 n 대 ϵ_i 곡선의 기울기이다.

4.3 Twin-Core 광섬유 센서

twin-core 광섬유 센서는 하나의 광섬유센서에 의하여 미세한 변형률(microstrain)과 온도를 측정할 수 있는 광학적 특성을 내장하고 있다. 이러한 특성을 갖고 있는 twin-core 센서를 이용하여 복합재 재료에 대하여 실험한 보고도 있다. 이 센서의 기본 개념은 각 core는 core의 지름이상으로 떨어진 지름 2 내지 4 μ m core의 single-mode waveguide 역할을 하는 것이다. 그림 4에 twin-core센서의 기능적 특성이 제시되어

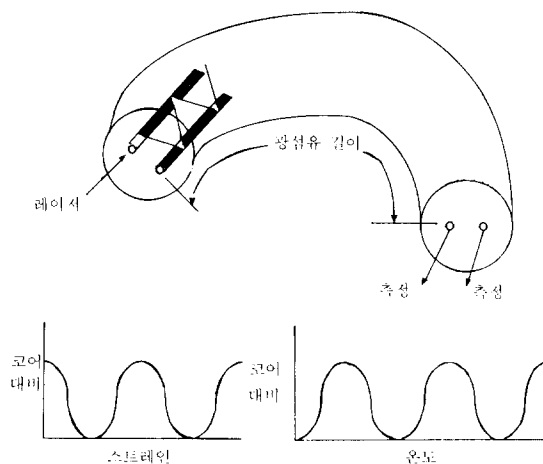


그림 4. 스트레인과 온도 측에 적용된 twin-core 광섬유 센서

있다. 레이저를 두 core중 하나에 인가하면 두 모드가 여기되어 다른 phase 속도 즉 다른 전파 상수에 의하여 전파된다. 이렇게 하면 간섭이 생겨서 두 core사이에서 이른바 “cross talk”라는데 이루어진다. 검출시스템은 각 core로 부터 중첩된 광전력을 측정함으로써 이 “beat phase”를 결정하게 된다. 이 검출된 출력은 미세 변형을 빛 온도와 상호 연관시킬 수 있다. beat-phase shift($\delta\beta$)는 파장길이 (λ), 온도(T), 변형률(ϵ),의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta\beta = A(T, \lambda)T + B(T, \lambda)\epsilon$$

여기서 A는 열/광 그리고 응력/광 효과의 함수, B는 축 및 전단방향의 광탄성 변화의 함수이며 서로 독립적이다. twin-core 광섬유 센서에서의 보정을 위한 가장 중요한 점은 이미 파장길이를 알고 있는 두 개의 광파를 광섬유에 인가하여 각 파장에서 동시에 상변화를 측정할 수 있도록 해야 하는 것이다. 그리하여 윗식을 이용하여 T 와 ϵ 에 대한 두 개의 연립방정식을 만들고 해를 구한다. 이 해가 기계적 하중과 일정 온도상태에 있는 복합체의 해석을 위한 benchmark문제의 보정값으로 사용된다.

5. 적용사례

외부 환경의 변화로 인한 구조물의 변화를 자동적으로 감지하고 대응하는 차세대구조물 재료에 대한 연구는 구미에서 수십년 전부터 이루어져왔다. 전기적인 센서의 단계를 넘어서 광섬유 센서에 의한 대형 구조물 설비의 감지 진단 시스템은 약 15년전 부터 개념이 도입되어 연구되기 시작하였고 새로운 센서 및 신호처리 시스템이 개발됨과 더불어 계속 발전하였다.

우주항공 비행체

우주항공 비행체와 발사체는 이륙 전 또는 비행중에 그 구조의 관리를 확실하게 할 필요가 있다. 최첨단의 발달된 고가의 장비가 갖추어진 비행체일수록 이러한 요구는 더욱 증대된다. 이러한 비행체에 내장된 센서는 비행중의 환경 성능 변수를 측정하고 그 외에 필요한 기관의 성능을 측정하게 된다. 이러한 센서 시스템을 도입하면

지상체류 시간과 보수에 걸리는 시간이 줄어지고 성능을 향상시킬 수 있다. 비행기를 이륙시키기 전에 그 상태를 감시하는 것은 시간과 돈이 많이 들고 또한 인간의 실수가 유발 될 수 있는 분야이기 때문이다. 비행체 및 발사체에 적용 가능한 광섬유 센서의 몇 가지 기능을 보면 다음과 같다. 우주항공 분야에서 광섬유 센싱의 가능성은 1980년대 말에 구조물의 변형률, 진동등 기계적 특성 및 화학적 성분 평가방법으로 NASA와 미국의 항공사 등에 의해 소개되었으며 특히 맥도널 더글러스에서는 광섬유 센서를 이용한 smart structure에 대하여 많은 연구 내용을 발표하였다. 1988년에 광섬유 센서를 이용한 항공기 및 우주선 발사체 구조물의 smart structure가 소개되어 광학 센서 및 신호처리 장치의 구성이 보고되었고 그후 1989년에는 광섬유 미세굽힘센서로 쓰이는 섬유들의 서용 및 경제성이 평가 발표되는 등 많은 적용연구가 이 분야에서 발표되고 있다^{3,4)}.

콘크리트 구조물

콘크리트 재료는 복합재와 기본적으로 성형과정이 동일하여 쉽게 센서를 내장시킬 수 있다. EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer)센서는 건설구조물의 크랙발생 및 전파를 감지하는데 사용되고 있다. 두개의 센서의 multiplexing에 의한 시스템을 구성하여 콘크리트 시편의 변형률을 측정하는 원리가 제시되기도 하였다.⁵⁾

교량 및 철도의 철골 구조물

1995년 미국 버몬트대학의 연구진은 교량 및 철도의 부식상태 및 염소의 침투현상을 광섬유 시스템을 사용하여 감지하는 새로운 기법을 소개하였다. 겨울철 염소제빙제에 의한 구조물 내외부의 부식 상태 및 염소성분의 침투현상은 하나의 광섬유를 통하여 광원으로부터 전파된 빛이 검사표면에 반사되어 다른 섬유를 통한 그빛의 분광상태를 감지함으로써 감지가 가능하다. 현재 감지 및 진단 시스템 구성하고 실험실 차원에서 평가를 마친 연구진은 실제로 미국의 버몬트주의 3개 다리에서 적용중이다¹⁾.

6. 결론

콘크리트와 철골 등 기존의 재질과 복합재 등 새롭게 도입되고 있는 설비재료 이루어진 구조물의 안전 진단은 구조에 대한 수명 예측과 함께 중요한 설비관리 항목으로 자리잡을 것이다. 센서를 신경망으로 이용하여 온라인으로 상태를 측정하고 진단하며 예측하는 기술은 이러한 사회적인 필요성을 기술적으로 충분히 만족시킬 수 있을 만큼 발전하였기 때문에 곧 구조물에도 도입될 것이 확실시되고 있다. 본 논문에서는 국내에서는 아직 연구가 활발히 이루어지지 않고 있는 smart structure의 국내 적용을 조기에 실현할 수 있도록 기본 자료를 제시하는 목적하에 smart structure에 의한 구조물 설비의 종합 관리 개념과 smart structure 적용을 위한 광섬유 센서 시스템을 소개하였다. 광섬유 센싱에 의한 지능형 설비관리 시스템을 적용하기 위한 시스템의 설계방법과 광섬유 센서에 대한 선택 규정 및 센서에 의한 신호의 해석 및 실험적 적용방법을 제

시하였다. smart structure가 적용된 대표적인 설비재료인 복합재의 해석을 통하여 응력, 변형률, 온도 등 감시대상인 물리량의 상태와 광섬유를 통하여 나타나는 빛의 정보와의 관계를 설명하였다. 마지막으로 구미에서 우주항공분야와 건설편에서 실제로 적용하거나 적용 준비단계에 있는 몇 가지 사례를 소개하였다.

참 고 문 헌

1. Fuhr, P. L., et al., "Fiber Optic Corrosion Sensin for Bridges and Roadway Surfaces," SPIE, Vol.2446, 1995.
2. Smith, S. H., A. A. Boiarski, and D. G. Rider, "A Calibration Approach for Smart Structures Using Embedded Sensors "Experimental Techniques, 1992.
3. Udd, E., "Embedded sensors make structures," 'smart', " Laser Focus/The magazine of Electro-Technology, May 1988.
4. Udd, E., "Embedded Fiber Optic Sensors in Large Structures," SPIE, V.1.1588, 1991.
5. Bhatia, V., et al, "Applications of Absolute Fiber Optic Sensors to Smart Materials and Structures," 10th Optical Fiber Sensors Conference, 1995.

◆ 著 者 紹 介 ◆



김 창 중(金昌鍾)

1957년 4월 8日生. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸. 1982년 서울대 대학원 전기공학과 졸(석사). 1983~1985년 LG산전 연구소 연구원. 1989년 TEXAS A & M 대학 전기과 졸업(박사). 1990~1992 TEXAS A & M 대학 및 TEES(텍사스 주립연구소)연구교수. 현재 수원대 전기과 교수. 당 학회편수위원.



장 윤 상(張胤相)

1984년 서울대학교 기계설계학과 (학사). 1986년 서울대학교 대학원 기계설계학과 (석사). 1993년 Texas A&M 대학교 기계공학과 (박사). 현재 수원대학교 기계공학과 전임강사.

논문분야별범위분류

본학회 조명 및 전기설비분야의 논문적용 범위분류를 편수위원회의 심의를 거쳐 아래와 같이 분류하기로 하였사오니 회원여러분께서 논문투고시 참조하시어, 별첨 논문 게재신청서를 작성한 후 논문과 함께 제출하시기 바랍니다.

가. 조명분야 논문범위

대분류	중분류	내용 및 범위
1. 광원분야	광원제조기술	형광체, 봉입기체 및 물질, 금속 및 전극재료, 게터, 유리, 기타 방전램프
	광원이론	백열전구 및 할로젠전구, 형광등, HID램프, 기타 방전램프
	신광원	레이저, 디스플레이 소자, 백라이트, 세라믹스, 기타 신광원 관련 이론과 기술
2. 점등회로 및 장치	회로	점등회로, 조광회로, 인버터회로
	장치	철심안정기, 반도체안정기
	소자	램프전력조절 소자, 시동 소자
3. 조명기구 및 기기	일반조명	백열등기구, 형광등기구, HID등기구
	특수조명	신호, 표지, 디스플레이, 영상, 사진용 기구 및 장치, 방재조명 및 시설
4. 시각	시각생리학, 시각심리학, 색채학, 시각정보	
5. 조명환경의 설계 및 평가	설계	옥내조명설계, 옥외조명설계, 일반설계이론, 주광설계
	평가	환경설계평가, 조도기준, 주광병용시스템 평가
	주광	주광광원의 특성, 주광의 평가, 주광조명이론
6. 광방사의 계측과 응용	계측	광방사의 특성, 측광 및 방사계측, 측색, 수광소자, 측광, 방사기구 및 설비
	응용	광학응용, 자외방사원과 작용효과, 적외방사원과 작용효과, 생물, 생체, 의료, 광화학, 공업, 정보산업
7. 조명관련 법규 및 통계	제정	법규, 규격
	통계	생산 및 보급
8. 원적외선의 방사와 응용	방사	방사이론, 재료, 측정 및 평가
	응용	광학응용, 생체, 의료, 식품, 광화학, 공업

나. 전기설비분야 논문범위

대분류	중분류	내용 및 범위
1. 전원설비	수배전설비	수전방식, 배전제동, 변압기, 개폐장치, 콘덴서 및 고조파필터, 감시 및 제어, 보호장치, 절연 및 기기 특성, 이와 관련된 설비
	예비전원	자가발전설비, 축전지설비, 무정전전원공급시스템, 충전장치 및 직류전원, 이와 관련된 설비
2. 전력부하설비	조명설비	옥내조명시설, 옥외조명시설, 조명설비, 조명방식, 이와 관련된 설비
	동력설비	인버터응용제어, 승강기그룹관리와 제어, 피치제어응용, 고조파억제기법, 전동기속도제어, 관련설비
	특수설비	특수환경용 전기설비, 클린룸전기설비, 전자과 장애대책, 설비방전특성, 항공장애등 시설, 이와 관련된 설비
3. 배전과 배선설비	배전 및 간선설비	배전방식, 간선부설방식, 배전특성, 이와 관련된 설비
	배선설비	에너지절약배선, 인텔리전트화배선, 배선특성, 관련설비
4. 반송설비	승강기 및 에스캐레이터	교통량계산, 승강기시설계획, 승강기운전과 관리, 에스캐레이터시설계획, 감시 및 제어시스템, 관련설비
	주차설비	주차관리와 제어, 주차설비계획, 원격감시시스템, 이와 관련된 설비
5. 구내정보통신설비	일반정보통신설비	전화, 인터넷, 구내무선설비, 전기시계공동수신설비, 안테나, 표시설비, 확성설비, 동시통역장치의 구성과 시스템적 특성, 관련설비
	특수정보통신설비	구내통신망, 화상통신, 위성통신, 사무자동화, 주택자동화의 구성과 시스템적 특성, 이와 관련된 설비
	건물자동화설비	전력감시 및 제어시스템, 전력수요관리기법, 전기에너지관리기법, 인공지능행관리 및 제어, 관련설비
6. 방재설비	방재설비	화재통보설비, 방재센터의 구성과 특성, 누전 및 전기안전 특성, 비상경보 및 방송설비의 구성과 특성
	방법설비 및 방재조명	방법시스템의 구성과 특성, 유도등, 비상조명기구, 피난유도시스템의 구성과 특성, 이와 관련된 설비
	피뢰설비	피뢰방식, 피뢰설비의 계획, 접지 저항의 특성과 계산, 계측시스템의 구성과 특성, 이와 관련된 설비

照明·電氣設備學會誌

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers

Vol.10, No.5, 1996

— 論文目次 —

Contents

-
- (10-5-1) ● 조명에 의한 박물관 전시물의 변색 측정에 관한 연구.....金 燾·金弘範· 43
A Study on the Measurement of the Museum Exhibit's Color Change by
Lighting.....Hoon Kim · Hong-Bum Kim
- (10-5-2) ● 螢光램프의 起動時 過渡特性 모델 解析咸仲杰·白壽鉉· 52
A Transient Model Analysis of a Fluorescent Lamp at Startup Time
.....Jung-Keol Ham · Soo-Hyun Baek
- (10-5-3) ● 초소형 정전유도형 전동기의 개발을 위한 기초 연구李東勳· 57
A Basic Study of Development of Miniature Size Electrostatic Induction
Motor.....Dong-Hoon Lee
- (10-5-4) ● 자기내에서 직류 차단시 아크소호 특성에 관한 연구
.....李東憲·宋炫直·朴元柱·李廣植·李東仁· 66
A Study on the Characteristics of Arc Quenching of DC Interruption in the
Magnetic Field
.....Dong-Heon Lee·Hyun-Jig Song·Won-Zoo Park·Kwang-Sik Lee·Dong-In Lee
- (10-5-5) ● 전지전력저장시스템의 경제성 평가를 위한 분석모델의 연구
.....金應相·金鎬容·高鎭·林成正·金載哲· 75
A Study on Analysis Model for Economic Evaluation of Battery Energy
Storage System
.....Eung-Sang Kim · Ho-Young Kim · Yo Ko · Seong-Jeong Rim · Jae-Chul Kim
- (10-5-6) ● 최소분산제어이론을 이용한 유도전동기의 속도제어.....吳元錫·申泰賢· 83
Speed Control of Induction Motor using Minimum Variance Control Theory
.....Won-Seok Oh · Tae-Hyun Shin
- (10-5-7) ● 개스분석에 의한 주상변압기의 예방진단에 관한 연구
— 자외-가시선 흡수분광광도법에 의한 절연유의 열화도 측정 —
.....郭熙畬·南泳雨·尹英子·南宮漢玉·李東俊· 94
A Study on Preventive Diagnosis of the Pole Transformer by Gas Analysis
— Measurement of Aging of Insulating Oil by UV-Visible Spectrophotometric Method —
.....Hee-Rho Kwak·Young-Woo Nam·Young-Ja Yun·Mi-Ok Namgung·Dong-Zoon Lee
- (10-5-8) ● EMTP를 이용한 수변전계통의 전압보상설비효과 분석기법
.....俣龍泰·權赫一· 101
Voltage Compensation Analysis in Distribution System by EMTP
.....Yong-Tae Sul · Hyuk-Il Kwon
-

THE KOREAN INSTITUTE OF ILLUMINATING
AND ELECTRICAL INSTALLATION ENGINEERS
635-4, Yeogsam-Dong, Kangnam-Ku,
Seoul 135-703, KOREA
TEL. (02) 564-6534~5, FAX. (02) 3453-6041

논문투고규정

1. 원고의 투고자는 회원에 한한다.
2. 원고는 조명 및 전기설비전분야 논문, 기술 보고, 기술자료, 기술해설, 문헌소개, 기타 학술 및 기술상 기여된다고 인정되는 자료로 한다.
3. 원고는 본 학회지에 투고하기 전에 공개 출판물에 발표되지 않았던 것임을 원칙으로 한다.
4. 원고는 수시로 접수하며 투고원고의 접수일은 그 원고가 학회에 접수된 일자로 한다.
5. 논문투고시 투고원고내용의 해당 전문분야를 기재해야 한다.
6. 원고의 채택여부는 본 학회편수위원회의 심사절차에 따르며 편수위원회는 원고의 부분적 수정, 단축, 보완을 요구할 수 있다.
7. 원고작성은 ① 200자 원고지로 작성시: 황서로 작성하되, 그림, 표를 포함하여 50매내의를 기준으로 한다. ② 타자로 작성시: A4 용지에 한줄씩 띄워서 작성하되, 면당 700자를 기준하며, 그림, 표를 포함한 총면수가 14면을 초과하지 않도록 하며, 작으 면에 페이지를 기입한다.
8. 원고는 국문(한문포함) 또는 영문으로 작성하는 것을 원칙으로 한다. 원고는 본문 중에 사용되는 영어는 소문자를 사용하는 것을 원칙으로 한다.(단, 고유명사, 약자는 제외). 문장의 처음이 영어단어로 시작되는 경우에는 첫자를 대문자로 한다.
9. 원고의 제목, 저자명, 소속기관, 직위를 가급적 한문으로 기입하고, 논문은 초록을 국문과 영문으로 작성하여야 한다. 국문초록은 400자내외, 영문초록은 200단어내외를 기준으로 한다.
10. 그림은 인쇄할 수 있도록 200×250mm크기의 트레이싱 페이퍼 또는 백지에 먹으로 깨끗이 그려야 한다. 그림이 인쇄될 때는 폭이 70mm정도 되도록 축소되므로 축소된 후에 글씨의 높이가 최소 2mm가 되고 선의 굵기가 최소 0.1mm가 되도록 주의하여야 한다. 사진의 최소크기는 65×50mm로 한다.
11. 그림과 표는 그림1, 그림2, 표1, 표2... 등으로 표시하고 본문을 읽지 않고도 이해할 수 있도록 상세한 설명을 첨부하여야 한다. 그림의 제목은 그림밑에, 표의 제목은 표위에 기입하

- 며, 설명문은 국문과 영문으로 병기한다.
12. 그림과 표는 일괄적으로 원고 끝에 별첨하고, 본문 중에는 그 위치만 원고 우측에 표시해야 한다.
 13. 인용 및 참고문헌의 색인번호를 본문의 인용처에 반드시 첨자^(1) 2)로 기입하고, 순서는 반괄호(1), 2),...)로 다음과 같이 표시한다.
 - 1) 단행본의 경우: 저자명, 책명, 출판사명, 출판년도, 인용페이지.
 [예1] 1) 홍길동, 전기용용, 문운당, 1987, pp. 56~67.
 [예2] 2) C. Mead and L. Conway, Introduction to VLSI Systems, Addison-Wesley, 1980, pp. 145~188.
 - 2) 논문의 경우: 저자명, 제목, 잡지명, 권호, 인용페이지, 출판년도.
 [예1] 1) 김훈, "고광도 방전등의 아아크 특성에 대한 이론적 고찰", 조명·전기설비학회지, 제4권2호, pp. 117~124, 1990.6.
 [예2] 2) J. J. Lowke, et al., "Theoretical description of ac arcs in Mercury and Argon", Journal of Applied Physics, Vol. 46, No.2, pp. 650~660, 1975.
 14. 논문원고의 모든 단위는 M. K. S. 단위로 하는 것을 원칙으로 한다.
 15. 논문은 논문게재신청서 1부(학회지양식참조), 원고 3부를 작성제출하여야 한다.
 16. 투고규정에 위배된 원고는 접수하지 않는다.
 17. 다음의 경우에는 투고자가 그 실비를 부담하여야 한다.
 - 1) 아-트지에 사진판을 게재하는 경우
 - 2) 불결한 그림을 정정 또는 정서하는 경우
 - 3) 별책을 필요로 하는 경우에는 처음 10부를 증정하고, 그 이상을 필요로 하는 경우
 - 4) 저자와 착오로 편집상 손실이 생긴 경우
 18. 논문의 경우에는 심사료를 투고자가 접수시 납부하고, 채택된 논문은 게재료를 투고자가 부담한다.
 19. 채택된 원고의 저자는 사진 1매와 저자소개서를 제출하여야 한다.
 20. 원고 및 편집에 관한 모든 연락은 본 학회내 편수위원회로 한다.