

지능형 복합재료 기술



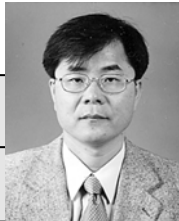
변 준 형

(KIMM 공정연구부)

- '76 - '80 한양대학교 정밀기계공학과 (학사)
- '80 - '82 한국과학기술원 기계공학과 (석사)
- '82 - '86 한국과학기술연구원 연구원
- '86 - '92 미국 Delaware대학교 기계공학과 (박사)
- '92 - '93 미국 Delaware대학교 복합재료센터 연구원
- '93 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

항 병 선

(KIMM 공정연구부)



- '74 - '78 부산대학교 재료공학과 (학사)
- '78 - '86 국방과학연구소 연구원
- '86 - '88 Univ. of Dayton 재료공학과 (석사)
- '88 - '94 Univ. of Dayton 기계공학과 (박사)
- '94 - 현재 한국기계연구원 책임연구원 (부장)

1. 서 론

생물체는 수백만 년의 진화과정을 거쳤기 때문에 최적설계의 산물이며 지구상 가장 정교한 물체이다. 이러한 생물체의 속성을 모방한 재료를 개발함으로써 혁신적인 기술을 창조할 수 있는 재료가 지능재료 (smart materials)이다. 기존 재료개념에 바탕을 둔 최적설계 제품은 온도, 습도, 기계적 하중 등과 같은 동적인 환경 변화에 대응하여 재료거동을 능동적으로 변화시키지 못하는 수동적인 재료인 반면에, 새로운 개념의 지능재료는 재료 자체에 센서기능과 작동기능을 가짐과 동시에 감지된 외부 환경에 어떻게 반응할 것인지 결정할 수 있도록 하는 프로세스 기능을 가진 능동적인 재료이다. 즉, 지능재료란 감지된 주위환경 변화에 따라 지능적으로 기능을 발휘하는 재료시스템으로 정의할 수 있으며, intelligent, sense-able, 다기능 (multifunctional), 혹은 적응(adaptive) 재료라고도 일컬어진다.

지능재료는 다음과 같은 생물학적인 시스템을 모델로 하고 있다. 즉, 그림 1을 보면, 신경계로 작용하는 감지계 (sensor system) 와 근육과 같이 작용하는 작동계 (actuator system) 및 시스템을 제어하는 두뇌와 같이 작용하는 실시간 프로세서 (real-time processor)로 구성되어 있다. 이 기술과 관련한 구조물 종류를 크게 분류하면, Type I 은 수동적 감지 구조로서 구조적으로 집적화된 마이크로센서를 가지

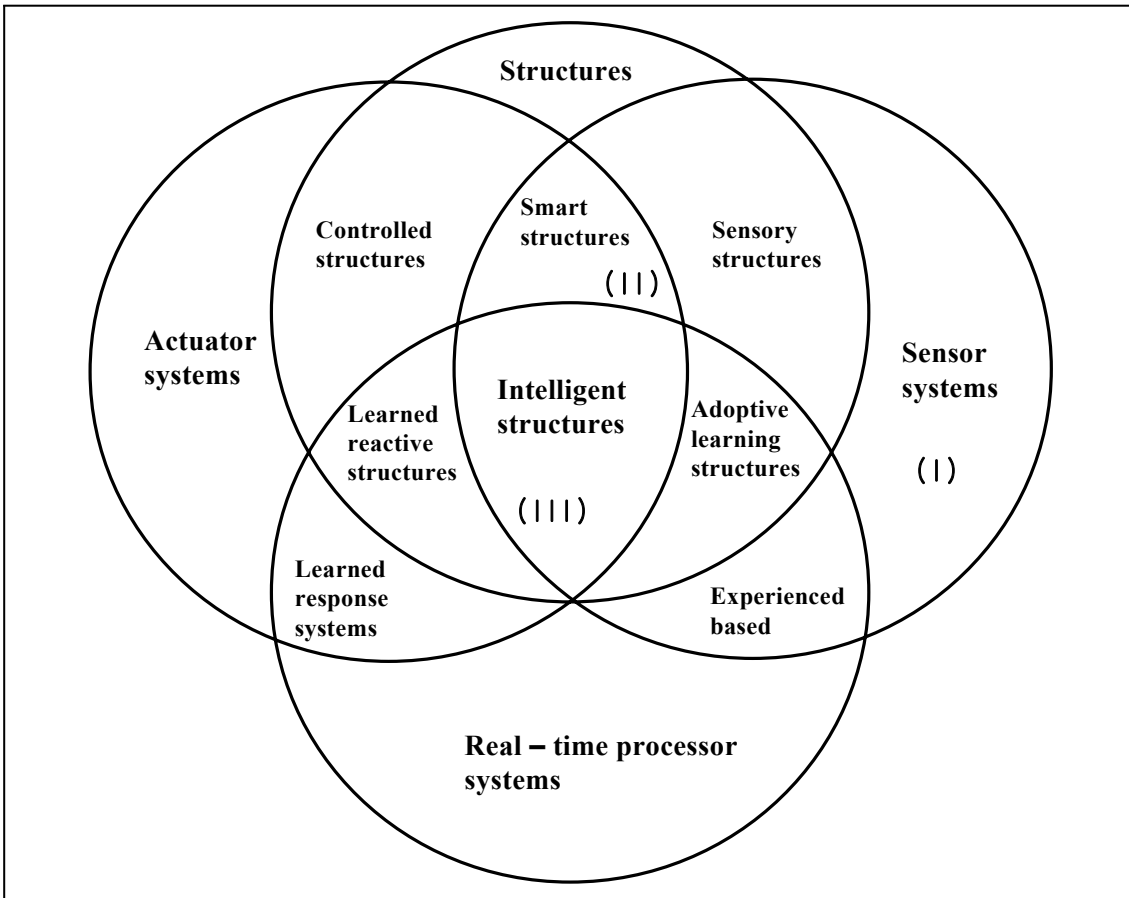


그림 1. Smart materials classification.

고 있어서 작동되고 있는 구조물의 상태와 환경상태를 알려주는 것이며, Type II는 반응적 지능 구조로서 신경계와 작동기 제어 loop가 있어서 구조물의 특징, 예를 들어, 강성, 형상, 위치, 방향 혹은 속도 등에 어떤 변화를 주는 것이다. Type III은 지능구조로서 적응학습을 할 수 있는 형태이다.

복합재료가 다른 재료에 비하여 지능형 구조 응용에 대한 연구가 더 활발한 이유는 (i) 복합 재료는 사용 재료의 성분과 포함량 및 방향 등에 따라 전혀 다른 특성을 발휘하기 때문에 원하는 특성을 낼 수 있도록 재료 설계가 가능하고, (ii) 기존의 재료에 비하여 감지기나 작동기를 구조물 내에 묻는 (embedding) 방법을 복합재료 구조물 성형 시 동시에 수행할 수 있기

때문에 적용이 용이하다는 점이다.

본 논문에서는 지능 재료를 구성하는 감지기, 작동기 및 제어기에 대하여 알아보고 지능재료의 응용과 앞으로의 전망에 대하여 기술하고자 한다.

2. 감지기 (sensor)

감지기는 복합재료 내부에 묻어 재료의 내부 상태를 조사할 수 있다. 이러한 감지기는 초음파 도파선 (waveguide wire), 압전(piezoelectric)재료, 혹은 광섬유 등이 있다. 광섬유 센서는 현재 가장 폭넓게 사용되고 있는데, 그 이유는 복합재료 성형 과정과 같은 방법으로 내부에 묻을 수 있으며, 복합재료와 같은 크기의 변형율까지 견딜 수 있기 때문이다. 이 재료

의 유전(dielectric) 특성은 복합재료의 내부를 감지할 수 있는 광섬유의 신호 경로(signal path)를 가지고 있는 동안 그대로 유지된다.

광섬유는 복합재료의 제조부터 시험 및 사용 기간 전체에 이르기까지 모든 단계에서 구조물을 연속적으로 모니터링 할 수 있다. 광섬유를 이용한 수동적 지능 구조물을 개발하기 위해서는 적절한 광섬유 사용, 감지기술 및 다중점(multiplexing) 기술이 확립되어야 하며 센서를 묻기 위한 적절한 구조물 제조 기술이 요구된다. 광섬유 센서는 섬유 주위의 물리적 변수의 상호작용에 따라 전송된 신호를 변조(modulation)시키는데 변조는 진폭, 주파수, 위상, 분극(polarization) 혹은 모드 상호작용의 형태를 취한다.

광섬유 센서는 온도, 변형율, 압력, 전기장 및 자기장 등의 물리적 변수 전 범위에 걸쳐 감지할 수 있다. Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) 이나 In-line Bragg Grating (FBR) 기술을 이용하여 반사된 신호를 모니터링 함으로써 분포된 센서에 의한 측정이 가능하다. 센서를 적용할 때 측정 시스템은 광섬유 센서 신호를 demodulate 하여 이 신호 결과와 측정하고자 하는 물리적 변수와의 상관관계를 구해야 한다.

압전 재료는 그 자체가 복합재료로서 고무와 같은 재료에 세라믹 재료를 합쳐놓은 것이며 lead zirconate titanate (PZT)가 가장 대표적이다. 이렇게 복합재료로 혼합함으로써 세라믹 재료가 가지는 취성 문제를 극복할 수 있으며 고무 재료의 낮은 밀도는 초음파 저항 매칭을 향상시킨다. PZT를 금속재료와 혼합하여 만든 금속-세라믹 복합재료 센서도 사용되고 있다.

3. 작동기 (actuator)

제어하거나 반응하는 지능구조물을 제조하기 위해서는 작동기가 필요하다. 작동기는 표면에

표 1. Comparison of actuator technologies.

Actuator Type (specific example)	Max Strain (%)	Max Pressure (MPa)	Max Energy Density (J/cm ³)	Max Efficiency (%)	Specific Density	Relative Speed (full cycle)
Electrostrictive Polymer Artificial Muscle						
Silicone	32	0.21	0.034	90	1	Fast
Polyurethane	11	1.9	0.10	80	1	Fast
Electrostatic Devices (Integrated Force Array)	50	0.03	0.0015	>90	1	Fast
Electromagnetic (Voice Coil)	50	0.10	0.025	>90	8	Fast
Piezoelectric Ceramic PZT	0.2	110	0.10	>90	7.7	Fast
Polymer (PVDF)	0.1	4.8	0.0024	90	1.8	Fast
Shape Memory Alloy (NiTi)	>5	>200	>5	<10	6.5	Slow
Shape Memory Polymer (Polyurethane)	100	4	2	<10	1	Slow
Thermal Expansion*	1	78	0.4	<10	2.7	Slow
Electrochemo-mechanical Conducting Polymer (Polyaniline)	10	450	23	<1%	~1	Slow
Mechano-chemical Polymer/Gels (poly-electrolyte)	>40	0.3	0.06	30	~1	Slow
Magnetostrictive (Terfenol-D, Etrema Products)	0.2	70	0.025	60	9	Fast
Natural Muscle (Human Skeletal)	>40	0.35	0.07	>35	1	Slow

Note) * 알루미늄, 500°C 온도 변화

접착하거나 복합재료 내부에 묻어 사용할 수 있다. 가장 이상적인 작동기는 아직 개발되지 않고 있으나 반응적 지능재료에 대한 산업적 및 군사적 관심으로 인하여 여러 재료가 연구되고 있다.

작동기 요구 조건은 이동변위 (stroke)와 힘 (force 혹은 토크) 등으로 주어지지만 전달 장치의 사용으로 힘이 나 속도, 변위 등이 달라진다. 표 1은 전달 장치를 고려하지 않은 작동기 기술의 현재 수준을 비교한 것인데, 비교 특성으로 에너지 밀도 (energy density, 단위부피

당 에너지 출력) 혹은 비에너지 (specific energy, 단위 질량 당 에너지 출력)를 보여주고 있다. 이 표에서 작동기가 요구하는 작업을 수행하기 위하여 얼마나 크고 무거워야 하는지 알 수 있다. 작동기의 반응속도가 중요한 변수라면 power 밀도를 비교해야 한다. Power 밀도는 energy 밀도를 작동 주파수로 곱함으로써 계산할 수 있다.

3.1 형상기억합금(Shape Memory Alloy)

형상기억합금(SMA)는 Nitinal이라는 NiTi (53~57 wt.% Ni) 재료를 바탕으로 하고 있으며, 저온의 마르텐사이트 상에서 소성 변형된 상태가 특성 온도 이상으로 가열되면 원래의 모양으로 복원되는 재료이다. 마르텐사이트 상에서 오스테나이트 상으로 열에 의한 상변화에 의하여 소성 변형을 8% 정도는 완전히 회복된다. 그러나, 실제 반복 사용을 고려하면 2% 이내의 변형율이 적당하다. 만일 이 재료가 기억 형상을 되찾을 때 변형이 생기게 되면 최대 700MPa 정도 높은 응력이 발생한다. 이 값은 마르텐사이트 상의 항복 강도 80MPa와 비교하면 상당히 높다. 오스테나이트로 상변화하면 영율은 4배, 항복강도는 10배 증가한다.

SMA는 거의 가역적으로 재료특성을 바꿀 수 있다. 구조물 내에 묻어서 사용하는 작동기로서의 SMA는 소성 변형된 200-400 μ m의 선의 형태이며 제조 중에 기억된 길이로 되돌아가는 것이 억제되어있다. 소성 변형된 섬유는 복합재료 구조물과 일체화되어 있으며 섬유가 열을 받게 되면 복합재료에 의하여 원래 기억된 길이의 회복이 억제되고 전단하중은 섬유 전체 길이를 따라 균일하게 분포된다. 만약 중립축에서 섬유가 떨어져 있으면 구조물은 예측할 수 있는 방법으로 변형을 일으킬 것이다.

SMA 작동기는 크고 유연한 복합재료 구조물의 진동을 제어하는데 사용되어 왔다. 또 다른

응용으로는, SMA 섬유를 구조물 내부에 묻거나 혹은 표면에 부착하여 그것이 작동되면 구조물에 큰 변형이 일어나는 대신 잔류 응력 상태가 되거나 진동 특성이 달라지게 할 수 있다. 이러한 기술을 사용하여 복합재료 평판의 강성, 고유진동수, mode shape을 변화 시킬 수 있다. SMA는 작동력과 변형량이 크고, 낮은 주파수를 가지는 작동기이지만 냉각작용은 열전도와 방열에 의하여 이루어지기 때문에 높은 주파수의 진동을 억제하는 데는 적당하지 않다.

3.2 압전작동기

응력이 압전재료에 가해지면 분극이 발생하고 그 크기는 가해진 응력의 크기에 비례한다. 이것을 압전 효과라고 하는데 압전 계수인 비례상수 d_{ijk} 로 정의된다. 전기장이 가해지면 역압전효과로 인하여 압전 재료의 크기가 약간 변하게 되고 d 텐서에 의하여 이 변형율은 전기장과 어떤 관계식을 가지게 된다.

필름 형태의 이 재료는 복합재료 구조물의 외부에 접착하거나 내부에 묻어 작동기로 사용된다. 필름의 결정질 영역은 두께방향으로 약 $2kVmm^{-1}$ 의 전기장에 의하여 가장 먼저 극성을 띠게 된다. 이것은 압전이 전기장 방향으로 일어나게 하며 폭 방향으로 수축하게 한다. 이 영역은 큐리 온도보다 낮은 온도에서 안정한 상태로 유지된다. 극 방향으로 전기장이 연이어 가해지면 결정질이 그 방향으로 성장하고 길이 방향으로 팽창을, 폭 방향으로 수축 변형이 생긴다. 반대 방향의 전기장이 가해지면 음의 항전기장 값이 도달할 때까지 두께 방향으로 수축이 생기며 그 뒤에는 극이 바뀌고 두께는 다시 증가하게 된다.

압전은 다결정세라믹이나 고분자 단결정형태로 있으며 표 2에 몇 가지 system에 대한 특징이 요약되어있다. Substrate 범의 굽힘에서 압전효율은 다음 식으로 표시된다.

$$\text{압전효율} = E_{\max} d_{31} \left(\frac{6E_c t_c}{6E_c t_c + E_b t_b} \right) \quad (1)$$

표 2. Comparison of piezoelectric materials.

Material	PZT	PZT	PVDF
	G1195	G1278	
Curie temperature (°C)	360	190	100
Electric field E_{\max} (kVm ⁻¹)	600	600	40000
d_{31} (pmV ⁻¹)	190	250	23
Modulus (GPa)	63	60	2
Effectiveness (x 10 ⁻⁶)	40	51	16
Effectiveness/field (pmV ⁻¹)	67	85	0.39

Note) $d_{33} \approx 2.5d_{31}$

여기서 E_b 와 E_c 는 빔 및 압전 세라믹의 탄성 계수이며 t_b 와 t_c 는 각 재료의 두께이다.

표 2에 나와 있는 압전효율은 $t_b/t_c=10$ 이고 $E_b = 70$ GPa인 경우의 값이다. 만약 가용전압이 제한되어 있다면 그 전기장에 대한 압전효율은 중요한 값이며 이 값은 보면 세라믹이 고분자보다 훨씬 더 효율적이다. PZT 압전세라믹은 납지르콘산염(lead zirconate)과 납 티탄산염(lead titanate)의 고품 혼합물이며 이 두 재료의 구성 비율에 따라 상변태 경계와 특성이 좌우된다. 구조물에 묻는 용도로 사용하려면 작동기 두께는 복합재료 적층 ply 두께보다 작거나 ply를 부분적으로 올려내어 작동기를 넣을 수 있도록 해야 하며 큐리온도는 복합재료의 성형온도보다 더 높아야 한다.

세라믹은 고분자계 PVDF (polyvinylidene fluoride) 필름보다 작동 온도 범위가 넓고 단위 전기장에 대하여 압전효율이 높다. 압전 작동기는 동적 변형을 센서로도 사용할 수 있는데 그 이유는 압전기에 가해진 동적하중은 전하량 차이로 나타나고 이것을 모니터링할 수 있기 때문이다. 따라서, 만약 발생된 전압이 모니터링 할 수 있게 충분히 높다면, 그리고 발생된 하중이 변위를 일으킬 수 있도록 높다면 압전기는 작동기 및 감지기 모두에 사용될 수 있다. 복합재료에서의 압전기 사용으로 얻을 수 있는 다양한

특성치의 범위는 점점 증가하고 있다.

3.3 Electrostrictive 재료

이 작동기는 lead-magnesium-niobate (PMN) 세라믹 재료로 만들어져 있는데 비극성 세라믹으로서 piezoelectric 작동기에서 나타나는 것 보다 더 작은, 약 3% 수준의 이력현상(hysteresis)을 보이고 있기 때문에 open-loop 형상 제어에 적합하다. 그러나, 전압과 변위 관계가 2차식으로 나타나기 때문에 매우 높은 비선형을 보인다. 이 작동기는 큐리 온도 이상에서 작동되며 PZT 재료에 비해 매우 낮은 큐리 온도를 가진다.

특히, 탄성계수가 낮은 electrostrictive polymer 와 연성이 높은 전극을 같이 사용한 작동기는 비교적 새로운 형태의 작동기로서 여러 면에서 근육과 유사한 성능을 보여주고 있다. 이 작동기는 EPAM (electrostrictive polymer artificial muscle)이라고 불리는 것으로 표 1에서 보면 EPAM은 다른 작동기와 비교할 때 가장 우수한 성능을 보이지는 못하지만 근육의 성능과 매우 비슷하거나 더 높게 평가되고 있다. 따라서, 이 작동기는 생물체와 매우 유사한 성능을 요구하는 로봇, 작동장치 혹은 무인 차량 등에 적용할 수 있다.

3.4 Magnetostrictive 재료

이 재료는 자기장이 있을 때 강자성 재료의 형태가 변화되는 것으로서 작은 자성 영역의 회전으로 인하여 재료 내부의 변형율이 발생하는 현상을 이용한 것이다. 이 변형율은 자기장이 가해지는 방향으로 재료를 팽창시키며 자기장이 커질수록 더 많은 영역이 회전하게 되고 자력이 포화 상태가 될 때까지 배열된다. 자기장의 방향이 반대가 되면 영역 방향도 반대가 되나 변형율은 그대로 작용되어 자기장 방향으

로 다시 팽창한다. Magnetostrictive에 의한 힘은 근본적으로 분자 운동에 기인하므로 기계적인 반응 속도는 매우 빨라서 백만분의 1초 정도의 수준이다.

상업화된 재료로서 가장 작동 효과가 뛰어난 재료인 Terfenol-D는 $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ 로 표시되는데 여기서 $x=0.27\sim 0.3$, $y=1.92\sim 2.0$ 의 비율을 가지는 재료이다. Terfenol-D를 사용한 복합재료는 흔히 giant magnetostrictive particle composites (GMPC) 라고 부르는데, 수중 음파장치의 transduction 재료로 널리 사용되고 있다. 이 재료의 에너지 밀도와 출력 힘과 변형율은 벌크 재료보다 낮지만 대역폭, 연성 및 가공성 등은 우수하여 이 기술에 대한 관심이 점점 증가하고 있다.

3.5 ER (Electrorheological)유체 및 MR (Magnetorheological)유체

Electrorheological 유체는 재료특성 변화를 순간적 및 가역적으로 큰 변화를 줄 수 있는 재료로서 가장 현저한 것은 전기장 하에서의 점도 변화이다. 마이크로 크기의 친수성 입자를 hydrophobic을 가지는 유체에 적절하게 분산시킴으로써 다양한 ER유체가 가능하다. 이러한 유체를 사용함으로써 복합재료의 감쇄 특성을 변화시킬 수 있다. ER 유체 층의 두께 방향으로 전기장을 가하게 되면 유동특성이 급격하게 변하고 ER유체의 내부 분자 구조는 비교적 규칙적인 사슬과 같은 기둥 형태로 분산액의 입자가 배열되기 때문에 고체와 같은 특성을 지

니게 된다.

이러한 기둥구조는 분산액의 에너지 분산 특성을 증가시키고 분산액 내의 질량 재분포를 일으킨다. 전기장을 제거하면 입자는 불규칙하게 되돌아가고 유체의 점도를 가지게 된다. 유체에 가해지는 전압을 제어함으로써 고유 진동수를 넓은 주파수 범위에 대하여 능동적으로 변화시킬 수 있으며 이러한 방법으로 공진을 피할 수 있다. 이 기술의 문제점은 ER 유체를 어떤 방법으로 복합재료 내부에 삽입시키느냐 하는 것과 높은 전압으로 유체를 작동시키는 방법이다. 왜냐하면, 유체는 무게를 증가시키며 복합재료의 구조적 성능을 향상시키지 않기 때문이다. 비슷한 효과는 MR 유체에 자기장을 작용시키는 경우에도 일어난다.

실제로, 제어가능한 ER 및 MR 유체를 사용한 모든 장치는 (i) 밸브 모드 (유동모드), (ii) 클러치 모드 (전단 모드) 및 (iii) 스퀴즈 필름 압축모드 혹은 이 세 가지의 혼합된 형태이다. 그림 2는 ER 및 MR 유체의 기본적인 작동 모드를 보여주고 있다. 밸브모드 장치의 예는 서보밸브, 댐퍼, 충격흡수장치 및 작동기이며, 전단모드의 예로서는 클러치, 브레이크, chucking and locking 장치 및 댐퍼 등이다. 이것 보다는 적용이 덜 되고 있는 스퀴즈 모드는 작은 진폭의 진동과 충격 댐퍼에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

4. 제어시스템

그림 1 에서 보는 바와 같이 감지기 및 작동

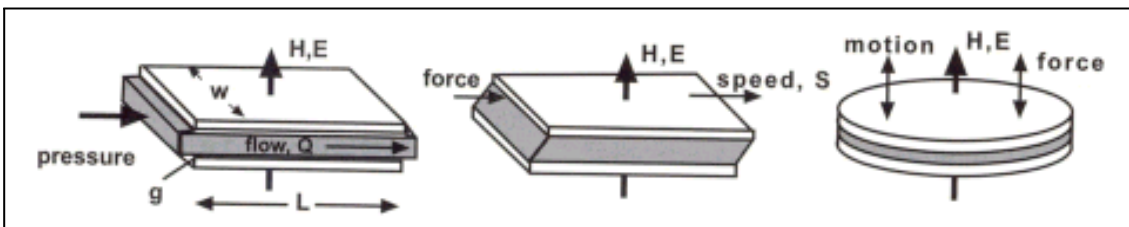


그림 2. Basic operation modes for ER and MR fluids.

기 모두를 포함하는 Type III 구조에 있어서 신호는 감지기로부터 받아들여져서 마이크로프로세서를 기본으로 한 제어기(controller)에 의해 분석되고 작동기와 신호를 주고받으며 재료의 반응을 변화시키도록 한다. 신경회로망을 사용한 병렬 프로세싱은 실시간 제어기에 많이 사용되고 있다. 이 개념은 수많은 신경세포가 개별적으로는 다소 느리게 그리고 불완전하게 기능을 발휘하지만 집합적으로 학습을 하여 복잡한 임무를 수행하는 생물학적 시스템으로부터 도입한 것이다.

신경회로망은 비교적 단순한 비선형 요소로 이루어진 층으로 이루어져 있으며 적응학습 능

력과 신속한 신호처리 및 판단을 내리는 능력이 있다. 만약 항공기와 같은 매우 중요한 구조물로부터 변형을 및 온도 정보를 줄 수 있는 감지기가 개발되어 구조적인 건전성을 평가할 수 있다면 이러한 데이터를 비교할 수 있는 기준값들이 필요하다. 자가 적응성 처리 능력을 가지는 신경회로망은 이러한 대규모의 데이터량을 처리하는데 매우 적합하다.

5. 지능 복합재료 제조

감지기와 작동기를 묻은 복합재료는 그 복합재 구조물의 일체성이 이러한 외부 재료에 의

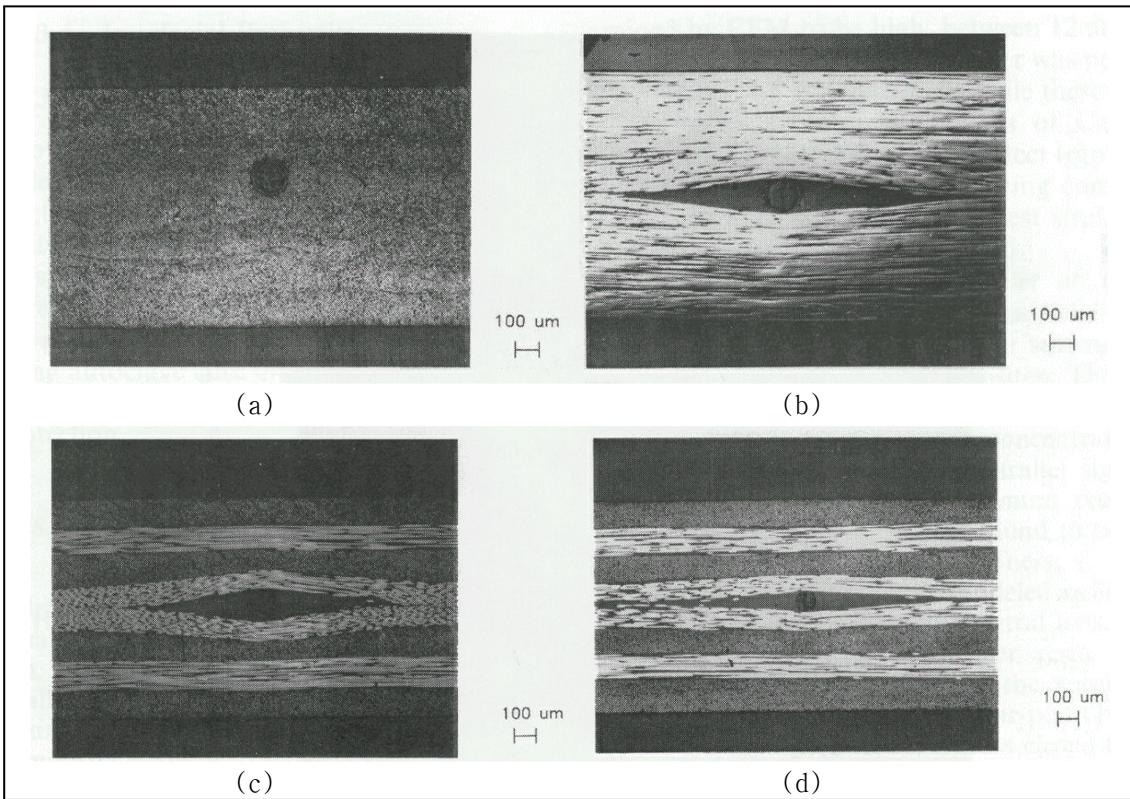


그림 3. Cross-sectional micrographs of composite laminates showing the effect of embedded optical fibers: (a) optical fiber embedded parallel to the reinforcement in unidirectional composites; (b) optical fiber embedded transversely to the reinforcement in unidirectional composites; (c) optical fiber embedded transversely to the reinforcement in a [0/90] cross-ply laminates; (d) optical fiber embedded transversely to the reinforcement in a [0/90] cross-ply laminates (using the smaller diameter of cladding and coating materials than (a) - (c)).

해 심각하게 감소되지 않는 조건 하에서만 가능하다. 그러나, 현재는 이러한 재료의 직경은 8~10 μm 직경 수준인 복합재료용 강화섬유인 탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유 등에 비하여 상당히 크다. 직경 100~300 μm 크기인 광섬유 센서를 적층 복합재료에 묻으면 센서 주위의 보강섬유가 불가피하게 손상을 입게 된다. 이러한 특성은 묻는 센서의 직경과 주위의 보강 섬유에 대한 센서의 상대적인 배향 이탈에 따라 달라진다. 예를 들어, 그림 3에서 보는 바와 같이, 보강섬유와 평행하게 배열되는 센서섬유는 그 직경이 적층 플라이 두께의 반보다 작다면 그 간섭을 최소로 할 수 있다. 그러나 보강섬유와 직각으로 배열되는 센서섬유는 국부적으로 변형이 되고 센서 주위에 수지 과다 지역을 만든다. 즉 섬유센서 혹은 작동기를 복합재료 구조물에 사용할 수 있게 하려면 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- (i) 보강섬유의 균일 분포에 대한 방해를 최소화 할 수 있을 것.
- (ii) 복합재료의 기계적인 특성 감소가 많이 생기지 않을 것.
- (iii) 구조물 내부에 묻는 과정에 있어서 감지/작동 기술을 적용할 수 없을 정도로 장치의 특성 감소가 일어나거나 손상을 입지 않을 것.

한편, 지능기술이 선박, 항공기 및 우주 구조물과 같은 실제 구조물에 적용하려면 사전에 많은 요인에 대한 충분한 조사가 필요하다. 즉,

- (i) 재료에 대한 고려사항으로서, 감지기/작동기가 복합재료의 강도 특성에 어떻게 영향을 미치는지, 그리고 복합재료가 겪게 되는 환경(성형조건 및 사용조건)에 어느 정도 부합되는지에 대한 연구가 필요하다.
- (ii) 제조 면에서 본다면, 복합재료에 부착되거나 묻게 되는 감지기/작동기의 위치 결정이

중요하다. 즉, 구조물 제조 중 위치를 유지하는 방법, 모니터 및 제조과정을 자동화하는 방법, 그리고 신호 처리 와이어 연결 문제, 또한 구조물 제조와 손상 수리 등을 경제적으로 수행 할 수 있는 방법 등에 대한 조사가 필요하다.

6. 지능재료의 미래

지능재료는 감지기/작동기, 감지기/작동기/회로가 집적화된 장치, 이것이 선형으로 배열된 형태, 최종적으로는 집적화된 장치가 구조물 전체에 분포되는 형태로 발전될 것으로 보고 있다. 이렇게 단계적으로 고난위 기술 개발이 일어남과 동시에 각 단계 내에서도 성능 향상이나 신뢰도 및 안정성 향상을 위한 기술 개발도 지속적으로 이루어질 것이다.

감지기/작동기 분야는 새로운 작동 원리, 새로운 재료, 새로운 설계를 계속적으로 추구할 것이다. 그러나, 시장을 뚫고 응용분야를 확대하고, 따라서 새로운 산업의 발판을 마련하기 위해서는 지금 수준의 감지기/작동기의 성능을 향상시키기 위한 많은 노력이 기울여져야 할 것이다. 이를 위해서는 작동원리에 대한 이해와 더 나은 packaging 기술 및 재료, 더 향상된 측정 방법과 측정 장치가 필요하다.

감지기와 작동기를 집적화하여 closed-loop 기능을 하는 단위장치 형태는 지능 구조물의 성능과 시장 점유를 더 확대시킬 것이다. 기술이 발전될수록 감지기/작동기/회로는 적절한 제조 과정을 거쳐 하나의 칩(chip)으로 집적화될 수 있을 것이다. 감지기는 그 자체가 작동기를 가지며 신호처리 회로가 내장되어 있어서 자동적으로 교정하고 스스로 점검할 수 있다. 이것은 데이터 변화가 심하거나 감도 저하되는 문제를 해소시킬 수 있으며 기능 상실에 대한 경고까지 할 수 있다. 향상된 성능으로 인하여 산업계나 수요자는 이런 지능재료를 쉽게 받아 들일 수 있다. 마찬가지로, 작동기도 감지기를

내장하고 신호처리 회로가 하나의 장치에 집적화되어 있어서 작동치의 결과 데이터를 측정할 수 있으며 closed-loop 제어에 의하여 변화가 심하거나 noise가 있거나 비선형적인 경우에도 요구하는 결과를 낼 수 있다.

같은 감지기 혹은 작동기가 여러 개 배열된 단위 장치는 한두 개가 고장 나더라도 문제가 없으므로 장치 전체의 신뢰도를 향상시키며 이렇게 다수의 감지기 혹은 작동기는 특이 결과가 아닌 전체 평균치를 나타내기 때문에 데이터 안정성 향상을 보장할 수 있다. 서로 다른 종류의 감지기나 작동기의 배열에 대해서도 요구하는 기능을 더 잘 수행할 수 있다.

이렇게 기능을 발휘하는 장치 개념을 더 확장하여 재료나 구조물 전체에 분포시키면 재료 특성이나 구조 특성을 제어하는 데 사용될 수 있기 때문에 실질적인 지능재료 혹은 지능 구조물이 가능하게 된다. 예를 들어, 감지기/작동기/회로가 집적화된 단위 장치를 날개 구조물 전체에 분포시켜 항공기에 적용하면 날개 형상을 능동적으로 바꿀 수 있기 때문에 와류나 난류 등의 공기역학 제어가 가능하다. 이러한 능동 제어 날개는 헬리콥터의 로터 블레이드나 가스 터빈에 적용하여 효율을 향상시킬 수 있다. 이외에도, 지능재료와 지능 구조물에 대한 최근의 응용 사례를 열거하면 다음과 같다.

- (1) 능동 및 수동 구조진동 감쇄 및 제어
- (2) 능동 및 수동 소음 감소 및 제어
- (3) 회전익기 제어 및 건전성 감시용 능동 날개 구조물
- (4) 교량, 고속도로, 내진 구조물의 감시 및 제어를 위한 지능 시스템
- (5) 안테나 및 광학장치용 지능 표면 (smart skin)
- (6) 인공피부 및 인공근육

이런 지능구조 및 지능 재료는 첨단 기술 산업을 설계와 시스템 성능 면에 있어 더 정교한 수준으로 끌어 올릴 것이다.

7. 결 론

지능 재료를 구성하는 감지기, 작동기 및 제어기에 대하여 개괄적으로 알아보고 지능재료의 응용과 앞으로의 전망에 대하여 기술하였다. 광섬유 센서, 압전재료, 형상기억재료, ER 유체에 대한 자세한 내용은 본 특집의 다른 논문에서 다루고 있다.

최근까지 감지기, 작동기 및 제어기에 대한 기초기술 연구는 많이 진행되고 있으나 실제 구조물에 이러한 기술을 통합한 기술 개발은 아직 미미한 실정이다. 이 첨단 기술은 국내외적으로 국방, 항공우주 산업 등에서 특히 연구가 활발하게 진행되고 있으며 향후, 지능 구조기술의 적용이 일반 구조물로 적용되면 일반 산업계로의 파급이 확대될 것이다. 지능형 복합재료 기술은 현재는 센서, 작동, 프로세스의 세 가지 기능이 집적화된 장치, 이것이 선형으로 배열된 형태, 최종적으로는 집적화된 장치가 구조물 전체에 분포되는 형태로 발전될 것으로 보고 있다. 한편으로는, 이러한 기능을 가진 각각의 재료 구성 요소는 미세 구조적 특징을 가진 원자 혹은 분자 크기의 집합체로 구성되고, 더 균질 재료화 한 것으로 발달되리라고 전망된다.

지능재료 기술이 지구상에서 가장 정교한 생물체를 모방하는 기술로까지 발전하기 위해서는 감지기/작동기의 새로운 작동 원리, 새로운 재료, 새로운 설계를 계속적으로 추구해야 할 것이며, 성능 향상이나 신뢰도 및 안정성 향상을 위한 기술 개발에 많은 노력이 기울여져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Kelly, A., Davidson, R. and Uchino K., "Smart Composite Materials," Chapter 20 in Vol. 5, Test Methods, Nondestructive

- Evaluation and Smart Materials, volume editors, Carlsson, L., Crane, R. L., and Uchino, K., in Comprehensive Composite Materials, editors in chief, Kelly, A. and Zweben, C., 2000, Elsevier Science Ltd., Amsterdam.
- [2] Davidson, R. and Roberts, S., "Optical Fiber Sensor Compatibility and Integration with Composite Materials," Chapter 28 in Vol. 5, Test Methods, Nondestructive Evaluation and Smart Materials, volume editors, Carlsson, L., Crane, R. L., and Uchino, K., in Comprehensive Composite Materials, editors in chief, Kelly, A. and Zweben, C., 2000, Elsevier Science Ltd., Amsterdam.
- [3] Ashley, S., "Magnetostrictive actuators," Mechanical Engineering, June 1998.
- [4] Kornbluh, R., Pelrine, R., Pei, Q., Oh, S. and Joseph, J., "Ultrahigh Strain Response of Field-Actuated Elastomeric Polymers," Proceedings of SPIE Smart Materials 2000, Newport Beach, California (April).
- [5] Ko, W. H., "The future of sensor and actuator systems," Sensors and Actuators A 56 (1996), pp. 193-197.