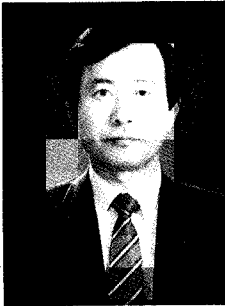


신재료의 비파괴평가기술 현황과 과제



박 은 수

(서울산업대학교
재료공학과 조교수)

- '73. 2 한양대학교 화학공학과(공학사)
- '82. 8 연세대학교 대학원 금속공학과(공학석사)
- '92. 2 한양대학교 대학원 금속공학과(공학박사)
- '87. 1-현재 서울산업대학교 재료공학과



강 계 명

(서울산업대학교
재료공학과 전임강사)

- '82. 8 한양대학교 재료공학과(공학사)
- '84. 8 한양대학교 대학원 재료공학과(공학석사)
- '90. 2 한양대학교 대학원 재료공학과(공학박사)
- '93-현재 서울산업대학교 재료공학과

1. 머릿말

재료의 이용은 적합한 재료의 선택에서 시작되고, 이는 재료가 지녀야 할 기능적, 역학적 성질에 기초를 두게되며, 나아가 최종 제품의 품질과 신뢰성 및 경제성으로 연계된다.[1] 따라서 재료의 설계, 제조공정 및 최종제품이 되기까지 품질을 평가, 관리, 보증할 수 있는 수준 높은 시험평가 기술의 필요성이 대두되게 된다. 다시말하면, 재료의 특성을 측정하여 요구 성능의 만족도를 확인하고, 그 특성의 정밀도를 발휘할 수 있는 전문적인 시험평가기술의 개발이 요구된다.

더우기 최근 연구, 개발되고 있는 초전도체료, 강자성재료, 전극재료 및 극미립자재료 등 고도의 기능성재료와 초내열, 극진공, 초고온열기관재료, 항공기소재 등의 가능성 기계구조재료 및 방진재료, 전자파흡수재료 등의 고부가가치의 새로운 재료의 출현은 그들이 가지는 물성과 제품화의 특성에서 한층 더 고품질과 고기능성 재료로의 발전을 요구받게 됨과 동시에 재료특성의 항목을 보다 세분화, 다각화시키고 있어, 그의 시험평가 기술 또한 세분화되고 다각화되며 고도의 미시화와 정밀화를 추구하는 방향으로 나아가고 있다. [2]

최근 이들 재료의 특성평가는 실시간검사, 전수검사, 사용중 부품의 검사도 가능하게 하는 등의 특성을 지니고 있는 비파괴적 시험평가기술이 재료의 미시적 특성평가 방법으로 좋은 결과를 도출하고 있어, 이에 대한 연구, 개발, 응용에 관심이 높다. 따라서 여기서는 이들 다양해진 재

료특성의 비파괴적 시험평가기술에 관하여 살펴 보고, 재료의 거대구조로부터 원자차원의 극미세 구조까지 광범위하고 다양한 신재료의 연구, 개발 및 제품화에 비파괴시험평가 기술의 이용현황을 알아본 다음, 이 기술의 앞으로 전망과 과제를 개략적으로 검토하고자 한다.

2. 비파괴시험과 재료평가

최근 산업이 발달함에 따라 재료시험기술의 개선이 요구되고 있다.[3] 재료의 사용조건이 극한화, 다변화와 고정밀성 및 고기능성이 요구되는 현 시점에서 재료특성을 평가하기 위한 파괴적 시험방법은 장시간의 시험시간의 소요, 과도한 시험비용 및 전수시험의 불가능 등 시간적, 경제적 손실을 초래하고 있다. 이에 비하여 산업의 지속성을 견지하면서 전수시험을 가능하게 하여 경제성을 제고시키는 등 큰 장점을 가질뿐만 아니라 고신뢰성을 겸비한 비파괴평가(nondestructive evaluation: NDE) 기술의 개발과 응용이 필요하게 되었다.[3-6]

표 1의 일례에서 보듯이 피막에 대한 비파괴 시험법은 파괴시험법에 비해 실시간 시험법들로 경제성이 있음을 알 수 있다.

표 1. 피막두께 측정법

비파괴적 시험법	파괴적 시험법
자기적법	용해법 :
와전류법	- 중량측정법(화학적 용해)
X선 분광법	- 용해금속의 정량분석법
β선 후방산란법	- 전해법
광학적 현미경법	파면현미경법
	간섭현미경법

여기서 비파괴시험(nondestructive testing; NDT)과 NDE의 차이점은 NDT가 재료의 원형, 성능, 기능에 변화없이 재료의 내부 및 표면의 결함을 조사, 계측하는 기술인데 비하여 NDE는 NDT의 결과를 가지고 재료의 부하 조건, 환경 조건을 파악하여 즉 파괴역학적으로 재료의 수명을 예측하여, 종합적으로 재료의 건전성을 평가하는 기술이라는데 있다. 다시말해서 NDE는

결함의 계측기술이라기 보다는 재료평가에 더 큰 비중을 둔 기술이다.[8]

이와같은 NDE 기술은 재료의 조성, 재료내부의 결함(전위, 결정입도, 석출물과 같은 제2상 등)에 따른 기계적 성질의 변화 및 조직특성 등에 기인하는 방사선적, 탄성적, 전, 자기적 및 열적 성질 등 재료의 고유성질의 미소변화를 비파괴적으로 감지할 수 있는 특징을 이용하여, 재료의 조성, 기계적성질, 조직적특성 등의 건전성을 간접적으로 평가하는 기술이다.[3]

NDT로 검출가능한 재료의 미세조직과 결함의 크기를 분류하여 그림 1에 나타내었고, 이들에 적용가능한 NDT 기술은 그림 2와 같다.

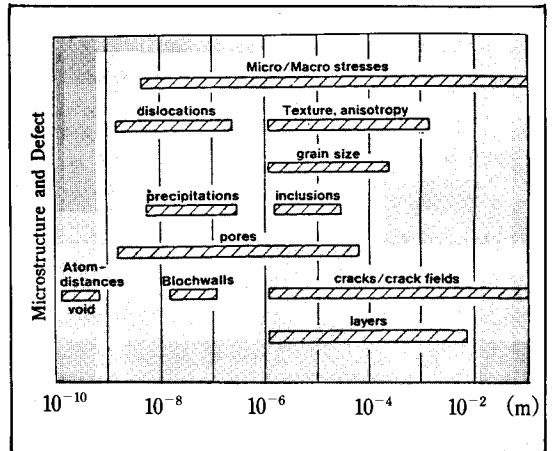


그림 1. 미세조직과 결함의 크기

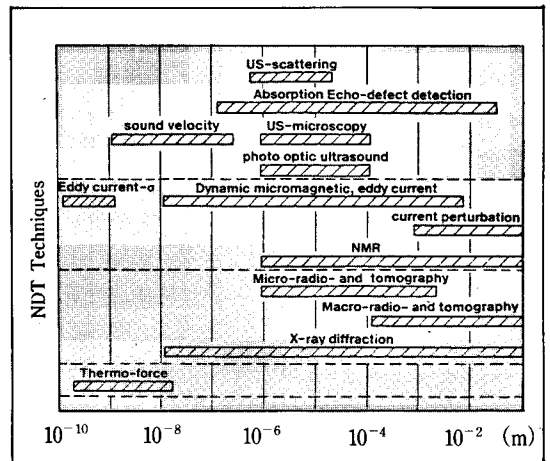


그림 2. 미세조직과 결함의 크기에 적용되는 비파괴시험기술

그림 2에 나타낸 바와같이 NDT에 적용되는 에너지원으로는 초음파, 전자파, 전자기 및 열로 대별되고, 또한 각기 다른 검출감도의 특성을 가짐으로서 이들에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

이를 분류하여 보면,

1. 초음파는 10^{-9} m의 차원을 가지는 전위, 석출물, 미소응력 등이 영향을 미치는 재료의 기계적 강도에 관한 연구[4]에 주로 이용되고 있고,

2. 전자파인 X선은 회절을 이용한 응력해석 및 미세조직 변화의 조사연구[7]에,

3. 전자기의 와전류는 조직변화에 따른 재료의 전기전도도 변화의 검출과 공공과 같은 결함탐지의 연구[9]에 이용되며, Bloch wall의 거동에 의한 Barkhausen 효과로 잔류응력의 측정에 관한 연구[10]도 이루어지고 있다.

4. 최근 초음파현미경이나 초음파 spectroscopy를 이용한 다결정체의 조직특성의 정량적 평가에 관하여도 연구[6]되고 있다.

그러나 재료성질의 NDE에 관한 연구는 현재 초보적 단계, 즉 실험실적 단계에 불과하므로 실용화를 위해서는 많은 연구가 요구되고 있다.

따라서 앞으로 첨단산업시대에 재료의 정량적인 NDE 기술의 개발과 활용 등 이에 관한 연구는 필수불가결하며, 재료에 따라 이들 연구결과의 적합한 이용은 재료과학과 공업기술의 발전에 크게 이바지할 것이다.

3. 재료특성의 비파괴평가기술

금속재료, 고분자재료, 세라믹재료, 콘크리트 및 이들을 서로 배합하여 더 높은 기능성을 가지는 복합재료(composite material)로 발전한 공업재료는 장치부품의 구성요소나 기계구조물, 토목건축자재로서의 각종 용도와 환경조건에서 사용되어짐으로써 이에 적합하게 할 목적으로 소재의 제조공정에서부터 최종 완제품이 되기까지 열처리, 성형가공 등을 통해 공업재료로서의 목적에 합치하는 성질을 갖도록 하고 있다.

비파괴적 재료특성평가는 이들 재료의 제조공정으로부터 최종 완제품에 이르기까지 품질을

보증하고 관리하는 수단으로서 결함의 정량화 기술인 동시에 화상처리와 같은 가시화의 기술이며, 나아가서는 재료평가기술이 추구하는 목적에 부합되는 고도의 주요 기반기술이다. 그러므로 재료특성의 시험평가는 신재료 연구의 기반이 되는 재료의 물성측정에 관심이 집중되고 있으며, 더우기 NDE 기술의 중요성이 부각되면서 이의 기술수준이 제품의 신뢰성과 직결되게 되었다.

3.1. 재료특성과 비파괴평가기술의 중요성

지금까지 재료의 NDE는 주로 재료, 부품, 구조물 등에 존재하는 균열, 가공, 개재물 등과 같은 거시적 결함과 가공의 정밀도, 표면상태 및 동적, 정적 파괴강도의 해석 등에 관한 연구가 주류를 이루었다. 그러나 오늘날 고성능과 고기능 및 고품질재료의 개발과 수요의 증가에 따라 앞으로의 NDE 기술은 그 대상이 단순재료가 아닌 기능성 재료, 기능성구조 재료, 세라믹재료, 전자전기재료 및 복합재료 등의 첨단재료로 나아가고 있다. 그러므로 이들 특수 용도의 첨단재료 즉 신재료의 기계적, 화학적, 물리적 성질의 평가 및 미시적 결함(극미소 균열, 공공 등)의 검출과 해석, 비파괴적 수명예측 등의 초정밀도를 가지는 시험평가기술의 개발과 발전이 강력히 요구되는 추세이다.

이를 위하여 초음파, 전자파, 방사선, 전자기, 레이저 등의 이용기술이 증가하고 있으며, 이들 기술의 개발은 시험장치와 해석기술의 발전으로 이어져 재료의 주요 성능시험평가기술로 발전하고 있다. 이는 재료의 특성평가뿐만 아니라 개량수단으로서 활용될 것이며, 또한 사용중의 재질의 변화를 시험평가할 수 있는 고도의 첨단기술이 된다.

3.2. 비파괴평가기술과 재료특성 항목

NDT 기술을 적용하여 재료의 특성변화의 측정과 검출의 대상이 되는 항목으로 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 1) 화학적조성, 미시적인 재료의 물리, 화학적 구조, 미량불순물원소의 편서
- 2) 재료의 거시적, 미시적 내부조직, 열처리상

태의 완전성

- 3) 개재물과 복합상의 분포 및 개재물의 유무
- 4) 가공 및 용접상태
- 5) 균열, 기공, 불균질부위 등 내부결합의 유무

이상과 같은 재료의 특성은 원자차원의 미시적 재료물성으로서 물리량의 변화로부터 국소적 재료조직의 형태 즉 결정입도, 밀도, 공극율, 석출, 복합혼합물상의 체적분율 등을 생각할 수 있으며, 체적차원의 거시적 재료 특성치로 탄성, 경도, 재료강도, 투자율, 내식성 등을 들 수 있다. 더우기 최근 발전이 두드러진 기능성 신재료의 출현으로 재료특성의 항목은 보다 세분화, 다각화가 되고 있어, 그 측정기술 또한 보다 고도의 기술이 요구되고 있다.

비파괴적으로 평가되는 각종 재료의 주요 특성을 표 2에 나타내었으며, 이에 적용되는 NDT 기술을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 방사선 : 방사선투과, X선 두께측정, X선회절
- 2) 초음파 : 음속, 감쇠, 산란, 반사강도, 굴절, 음탄성, 음향방출
- 3) 자기 : 자속변화, Barkhausen noise, 자분
- 4) 와류 : 위상, 진폭
- 5) Laser : holography
- 6) 기타 : 광, 열, 전기저항 및 전위차, 표면에너지

표 2. 비파괴적으로 평가되는 각종 재료의 주요 특성[12]

재료의 종류	재료 특성	평가한계
금속재료 합금강	전위밀도	1
	펄라이트간격	1
	탄화물성상	1, 2
	결정입도	1, 2
	불순물편석	1, 2
	경도	2
	표면경화층깊이	2, 3
	항복, 인장강도	3
	연성	3
	파괴인성	3

내열합금	전위형태	1
	공공농도	1
	시효석출물형태	1
	결정입도	1, 2
	경도	2
	항복, 인장강도	3
	연성	3
	파괴인성	3
	내식성	2
크래드재료	경도	2
	접합성	2, 3
	탄성	3
	연신율	3
	크래드두께	2, 3
	굽힘강도	3
	파괴인성	3
자성재료	투자율	2
	최대자속밀도	2
	보자력	2
화합물반도체	주입이온분포	1
	캐리어농도	1
	전위분포	1
	다층구조	1, 2
	표면결합밀도	1, 2
	열전도율	2
분말야금	공공율	1, 2
	밀도	1, 2
	결정입도	1, 2
	열팽창계수	2
	비열	2
	경도	2
	탄성율	3
	파괴인성	3
	내마모성	2, 3
	표면결합	2, 3
복합재료	공공율	2
	밀도	2
	섬유함유율	2
	섬유배향도	2
	aspect비	2
	층간바리	2, 3
	탄성율	3
	강도	3
	파괴인성	3

보기 : 평가한계에서 1은 micro, 2는 submacro, 3은 macro를 의미한다.

4. 신재료의 기능특성에 관한 비파괴 평가기술의 동향

신재료의 기능적 특성과 그 평가에 관한 NDE 기술은 철강산업을 중심으로 하여 항공, 우주산업으로 발전되었다. 그러나 최근 고도의 기능성 부품인 전자재료, 자석재료, 각종 센서와 열기관, 항공기재료 등 고기능성 기계구조재료 및 기타의 신재료의 출현에 의해 고정밀도를 요구하는 재료와 제품의 기능성 평가에 관한 요구가 높아지고 있다.

그러나 아직 신재료에 대한 NDE 기술이 확립되어 표준화된 단계에 이르지 못한 상태이다. 따라서 여기서는 근간에 발표된 연구보고를 중심으로 이 분야의 기술발전이 예상되는 3가지 공업재료 즉 금속계 신재료와 세라믹재료 및 복합재료에 대해 NDE기술 적용의 현황과 전망에 관하여 검토하여 보고자 한다.

4.1. 금속계 신재료

금속계 신재료는 사용단계로 보아 단결정, 박막, 다층상, 다공질, 복합상 bulk재 등의 다양한 형태를 보이고 있어, 종래의 단일조직 결정재료와는 그 성상이 크게 다른 경우가 많다. 또한 이들 재료는 새로운 복합적기능의 적용과 특수한 환경하에서의 사용 및 초소형 부재로 가공처리되기도하므로 종래의 표준적인 NDE기술을 그대로 적용할 수 없는 경우가 많으므로 신재료평가의 어려움을 더해 주고 있다. 그러므로 재료의 물리적이고 화학적인 특성을 충분히 이해한 위에 신재료의 비파괴적 특성평가방법의 확립이 요구되고 있다.

현재 연구개발되고 있는 대표적인 금속계 신소재의 특성평가에 이용되고 있는 NDE의 몇 가지 예를 보자. 형상기억합금은 열탄성 상변태에 따라 AE 단성파가 발생하며 이것에 의해 변태온도나 상변태의 거동 및 고유응력을 파악할 수 있다. 철소결합분체의 초음파감쇠율로부터 기공율, 결정입도를 평가한 보고가 있다. 초전도재료의 변형율, 파괴, 자화특성 등의 측정은 음향방출(acoustic emission; AE) 특성이 이용되며, 화합물반도체의

경우 전위, 계면구조, 표면준위, 다층구조, 표면의 결합밀도, 열전도율, 전기적결합 등의 측정에는 전자파중에서 Raman 산란분광, 마이크로파흡수, 루미네센스(luminescence), 적외선 등을 응용하고 있다. 또한 amorphous 금속, 표면개질금속, 제진재료, 내열재료, 섬유강화복합재료, 분말야금합금 등에 대해서도 초음파, 와류, 자기, 광, 열, 방사선, 전기 등의 특수한 고유성질을 적용시키는 고도의 NDE기술이 시도되는 것으로 연구보고되고 있다. 금속과 비금속의 고상접합강도 특성을 초음파반사에코우 높이비와 접합강도와는 상관성이 있다는 보고도 있고, [13] 더우기 반도체 생성과정에서 비파괴적인 프로세스 평가기술의 발전이 기대되고 있다.

전체적으로 전자·반도체 등 박막상의 반금속 재료에는 광, 열, 방사선 등의 적용이 많으며, 대개의 경우 초음파특성을 주로 응용하고 있으며, 앞으로도 이 분야의 연구가 계속될 것으로 전망된다.

4.2. 세라믹 재료

세라믹재료에 적용되는 NDE기술은 대부분 금속계 재료와 같은 것이 많으나, 세라믹재료의 경우 조직의 크기가 아주 미세하고 비자성인 것이 많아서 고주파, 초음파, X선, 증성자투과시험, 초음파현미경, AE가 적용된다.

AE 특성을 이용한 세라믹재료의 특성평가의 예로서 alumina ceramics의 AE 총 사상수와 응력확대계수(k_1)와는 상관성이 있으며[14], AE는 주로 균열선단에 형성되는 파괴프로세스 존 내부의 균열형성에 의해 방출된다고 생각되며 이로부터 세라믹재료의 균열저항성을 간접적으로 알 수 있다. 또한 AE원파형 해석에 의해 세라믹 내부의 결합분포나 파괴인성의 평가를 할 수 있는 가능성이 밝혀지고 있다.[15]

최근에 개발, 활용되고 있는 초음파현미경으로는 주파수가 수 MHz에서 1 GHz의 범위로 재료가 음향이방성을 가지는 것을 기초로하여 결정이방성을 평가할 수 있고, 표면근방의 미시적 조직변화나 결합의 존재양상도 관찰할 수 있다.

그리고 세라믹설계상 중요한 국소적변형율이나 영율을 비접촉적으로 측정할 수 있는 레이저간섭을 이용한 spectrum photography법이나, X선에 의한 표면잔유응력측정 등이 시도되고 있다.

4.3. 복합재료

복합재료는 재료의 불균질성과 이방성, 재료와 구조의 일체화 및 재료설계와 구조설계의 불가분성을 가지고 있는 기능성 구조재료이다. 이 재료는 미시적전지에서 처음부터 많은 결합을 내포하고 있으며 이 양상도 복합상경계의 박리, 공동, 피로미시균열 등 일반 금속재료에 비하여 영향 인자가 많다. 그 내부 파괴양식은 복잡 다양하며, 이들이 혼합하여 발생하고 진행되기 때문에 복합재료의 비파괴적 재료시험평가는 금속재료보다 어려운 점이 많다.

항공기용 복합재료로 주로 사용되고 있는 탄소섬유강화수지(CFRP)의 결합이나 재료특성의 비파괴평가방법을 보면 복합재료의 역학적특성, 섬유배향, 재질의 균일성 및 층간박리와 같은 역학적, 물리적 특성평가를 위해서 초음파의 감쇠, 전파속도, 산란각도, 스펙트럼 등의 측정 및 공진법이 주로 이용되고 있으며, 접착불량, 층간박리 및 균열 등의 결함은 광학적 방법 즉 스펙트럼사진, 레이저간섭무늬, 광학적 홀로그래피를 이용한 연구도 많이 이루어지고 있다. 그 외에 저전압 고해상력의 방사선투과시험, 와전류, AE법의 적용 사례도 적지 않다.

마이크로파의 이용은 아직 초기단계에 있지만 FRP의 비파괴시험평가 방법으로서 관심이 높다. 마이크로파의 복소유전율에 영향을 미치는 인자로부터 반사율, 유전율변화에 의해 섬유함유율, 수지경화도측정, 입사파와 반사파의 간섭정상파 분포패턴에서 함침불량, 재질열화의 검출에 대한 시도가 있다.[16] 마이크로파는 비교적 얇은 재료에 한정 적용되므로 최종 제품검사보다도 그 이전의 중간적인 제품제조공정중의 감지기술로서 발전에 기대를 가진다.

인공재료로서의 복합재료는 다기능화에 따라 용도가 확대되고 있으나 단일 금속이나 고분자

재와 같은 일반재에 비해 조직, 구조, 결합이 복잡하고 파괴양상이 크게 다르므로 종래의 재료와는 다른 시험기술과 해석방법이 요구된다. 따라서 새로운 시험기술과 기존의 시험기술을 유기적으로 잘 복합하여 사용할 수 있는 방법을 모색해야 한다.

5. 맺는말

신재료의 개발은 기능재료, 구조재료를 불문하고 재료설계, 제조프로세스, 재료평가로 이어지는 이들 세 단계 기술의 유기적인 발전에 의해서 추진된다. 그런데 지금까지 평가기술은 구조재료의 제작과정에서 생긴 재료결합의 유무나 강도특성을 밝히는 기술정도로 생각해 왔었다.

그러나 요즘 세라믹 등의 취성재료의 개발을 시작하면서 수십 미크론의 결합이 직접 재료의 파괴와 결부됨이 밝혀져 미소결합의 비파괴평가 기술의 확립이 취성극복의 기반기술임을 인식하게 되었으며, 반도체재료 등 전자·기능재료의 경우도 제조한 결정, 박막 등의 물리적, 화학적 특성의 고정밀도 평가에 의한 제조프로세스와 평가기술의 확립이 없이는 첨단기능재료의 개발은 있을 수 없음을 알게 되었다.

그러므로 신재료의 비파괴평가기술은 시급하고 중요한 공업기반기술이다. 그리고 신재료에 대한 비파괴적 특성연구는 기초과학분야와 전기·전자 재료산업분야는 물론 제조, 장치산업의 발전의 가속화도 유도시킬 수 있다. 따라서 비파괴평가 기술의 개발과 연구는 신재료의 개발에 중요한 역할을 담당할 수 있는 요소기술로서, 앞으로 지속적인 관심의 대상이 되어야하며 부단한 투자가 이루어져야 할 분야로 생각된다.

6. 참 고 문 헌

1. K. G. Budinski; Engineering Materials: properties and selection, 3rd ed., Prentice-Hall Inc., 19, 1989.
2. 日本非破壊検査協會編: 新非破壊検査便覽, 日刊工業新聞社, 1271, 1992.

3. D. E. Bray and R. K. Stanley; *Nondestructive Evaluation*, McGraw-Hill Book Co., N.Y., 16, 1989.
4. Peter D. Edmonds; *Methods of Experimental Physics*, Vol.19, Academic Press, N.Y., 496, 1981.
5. J. F. Bussiere; *Materials Evaluation*, Vol.44, 560, 1986.
6. J. Szilard; *Ultrasonic Testing*, John Wiley & Sons Inc., N. Y., 167, 1982.
7. B. D. Cullity; *X-ray diffraction*, 2nd ed., Addison-Wesley, 447, 1978.
8. 堂山 昌男, 山本 良一; *材料の評価システム*, 東京大學出版會, 141, 1987.
9. S. N. Vernon; *Materials Evaluation*, Vol.46, 1981, 1988.
10. V. Hauk, P. Holler, R. Oudelhoven and W. A. Theiner; *Nondestructive Characterization of Materials*, P. Holler, R. Green & V. Hauk(Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 466, 1989.
11. A. Vary; *Research Techniques in NDT*, Vol. IV, R. S. Sharpe(Ed), Academic Press, London, 159, 1980.
12. 日本非破壊検査協會編: *新非破壊検査便覧*, 日刊工業新聞社, 1266, 1992.
13. A. Spitzig, R. B. Thompson & D. C. Jiles; *Met. Trans.* 20-A, 571, 1989.
14. 佐藤 修一, 岸 輝雄: *新素材及びその製品の非破壊試験シンポジウム 論文集*(日本非破壊検査協會), 125, 1985.
15. 若井 史博, 岸 輝雄: *ibid.*, 113, 1985.
16. 四方田重昭, 小野昌孝, 牧 廣, *纖維學會誌*, 31-8, 306, 1975.