

계면의 비파괴검사

정 용 무*

NDE Detection of Interfaces

Y. M. Cheong

Abstract Interfaces, both grain boundaries and phase boundaries, play a very important role in the mechanical behavior of structural materials. The problem is particularly intense in composite materials where interfaces play a primary role in the mechanical response of the composites. This paper will concentrate on the approaches to perform nondestructive evaluation of the interfaces in a manner in which some measure of the mechanical behavior of the interface can be established. Some of the possible approaches that may have potential for the nondestructive evaluation of interfaces are optical, electronic/electrical, and acoustic approaches.

1. 서 론

구조용 재료의 기계적인 건전성을 확보하는 관점에서 계면의 성질이 매우 중요하다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이와같이 계면의 중요함이 오랫동안 널리 인식되어 왔음에도 불구하고 이의 기본적인 특성을 파악하기 위한 이론적 또는 실험적인 방법들은 별로 개발되어 있지 못한 형편이다. 더군다나 알고자하는 계면의 성질과 그에 상응하는 측정가능한 Parameter를 관련짓기에 상당한 어려움이 있기 때문에 계면의 비파괴 검사방법은 별로 확립되지 않은 상태이다.

물론 비파괴검사의 가장 중요한 목적은 고체 내부 또는 표면에 존재하는 결함의 탐지이다. 즉 결함의 위치, 크기 및 형태를 결정하는 것이며 계면에 존재하는 결함도 어느 정도의 크기와 상태에 따라서는 탐지가 가능하다. 이러한 종래의 비파괴검사 개념을 좀더 확장하여 어떤 비파괴검사 기법(특수 비파괴검사)을 사용하면 결

함이 없는 건전한 재료의 고유 성질들을 간접적인 측정으로써 결정할 수도 있다.

참고문헌 1-5에 보인 바와같이 재료의 특성을 측정하기 위한 여러가지 비파괴검사 방법들이 가능하며, 예컨대 초음파 방법으로는 탄성 계수, 판상 shear strength, cohesive strength, 경도, 미세구조, 결정립크기, 결정립의 모양, 밀도, 기공, 잔류응력 등의 원하는 parameter를 초음파 감쇄, 음속의 변화, acoustic stimulation, backscattering, 초음파 공진 방법 등으로 측정할 수 있다.⁶⁾

그러나 이러한 대부분의 비파괴검사 방법들은 부피적인 성질(bulk properties)들을 측정하기 위해 개발되었으며, 재료 내부의 계면을 측정하기 위한 비파괴검사 방법은 별로 많지 않다.

계면을 검사하기 위한 비파괴검사법으로는 접착계면을 음향방출법(acoustic emission), Fourier 변환기법을 사용하는 ultrasonic spectrum

* 한국에너지연구소 비파괴시험연구실

analysis, 방사선 투과시험법(x-선, 감마선, 중성자), 와전류시험법, 광학 또는 음향 holography, 적외선을 이용하는 thermography 등으로 접착계면의 건전성을 비파괴검사하려는 방안이 있다?

그밖의 계면의 비파괴검사 방법으로 Fast Fourier 변환기법을 사용하는 acousto-optical technique과 stress wave factor(SWF)가 복합재료의 계면 shear strength를 측정하기 위해 사용되었고⁸⁾ 탄소섬유 강화 epoxy 복합재료의 피로하중에 대한 영향이 음향방출(acoustic emission)의 지문효과로써 연구된 바 있으며¹⁰⁾, 이를 광학적 방법과 연결지어서 복합재료의 파괴기구, 예컨대 계면분리 현상, matrix cracking, delamination같은 현상들이 규명되었다.

본 논문에서는 이러한 복합재료의 기계적 성질과 연관되는 계면의 특성들을 측정하기 위한 비파괴적인 시도에 대해 논의하였으며 특히 다상계(multiphase system)에서의 고체-고체간의 계면에 대해 역점을 두었다. 본 논문에 기술된 비파괴검사 방법들은 현재 연구개발 단계이며 실험실적으로만 확립된 몇 가지의 비파괴검사 방법의 예로써 특정한 목적에만 적합한 새로운 개념의 특수 비파괴검사법이라고 볼수 있다.

이들은 미래의 비파괴검사법으로 적용 가능성이 있는 특수한 방법들로써 이들의 상세이론보다는 실제적인 적용 가능성 및 기초실험 결과에 대해서만 간단히 설명하였음을 밝혀둔다.

2. 실험실적인 시도

고체-고체간의 계면에는 주로 결정립계(grain boundaries), 쌍정립계(twin boundaries), 상경계(phase boundaries), stacking fault, 또는 관련 상변태계면(phase transformation boundaries)들이 있다.¹²⁾

고체-고체간의 계면은 대체로 구조적인변화(structural transition)와 관련하여 생성되므로 그 구조는 결정학적 또는 기하학적으로 분석하여 예견할 수 있다. 일반적으로 결정립계는 서로 다른 배치를 갖는 동일한 두 결정간의 계면을 뜻하며, 이 경우 계면을 구성하는 양쪽 결정립의 탄성계수, 밀도를

비롯한 모든 물리적 성질들은 동일하다. 또한 구조용 복합재료의 경우 계면이란 응력의 전달을 위한 fiber와 matrix부분간의 영역으로써 그 조성이 심각하게 변화하는 지역으로 정의한다.¹³⁾ 그림 1에 기계적 성질을 조사하기 위한 개략적인 계면구조를 나타냈다. 계면구조는 대략 ①수십 옹그스트론 정도 두께를 가진 불순물의 석출 또는 편석상태, ② 1-10 nanometer의 불연속적인 interface phase로 구성된 계면, ③ 1-100 nanometer 두께의 연속적인 interface phase 등으로 분류될 수 있다. Interface phase는 결정질 또는 비정질 어느 것이라도 존재 가능하고 그 스스로 여러상으로 구성된 영역일 수도 있으며 많은 경우 계면에 존재하는 phase는 비평형상태이다.

계면을 조사하는 비파괴검사법을 개발하기 위해서는 탄성적, 전기적, 또는 구조적인 성질들의 계면에서의 검출할 수 있어야만 한다. 계면영역과 그 내부 영역간의 물리적인 성질들은 전체적으로 보면 불연속적이거나 보다 더 미시적인관점에서 보면 연속적으로 변화한다. 만약 어떤 비파괴검사 방법으로 이러한 변화를 검출할 수 있다면 계면이 복합재료의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하는데 도움을 줄 것이다. 그러나 비파괴적으로 측정이 가능한 인자는 대개 하나 이상의 Parameter들, 즉 복합적으로 재료의 성질과 연관지어지므로 현재 원하는 계면의 성질을 나타내는 정량적인 데이터를 얻기 위해서는 이미 알고 있는 standard에 대한 대비 실험으로 결정하는 경험적인 방식만이 가능할 뿐이다. 즉 원하는 재료의 성질만을 변수로하고 나머지

는 이미 알고 있는 standard에 대한 대비실험으로 결정하는 경험적인 방식만이 가능할 뿐이다. 즉 원하는 재료의 성질만을 변수로하고 나머지 실험에 영향을 주는 인자들을 모두 상수함으로써 얻고자 하는 재료의 성질과 실험 결과를 연관지을 수 있다.

비파괴검사 방법으로 앞으로 사용가능성이 있는 측정가능 parameter로서는 ① 음향 임피던스 변화 (반사, 굴절, 회절, 산란 및 감쇄), ② 음속, ③ 광학적 반사 또는 흡수, ④ 형광 또는 Optical channeling, ⑤ 전기적 또는 전자적 성질

(전도도, 유전상수, 또는 전기적 임피던스의 변화), ⑥ EXAFS (extended x-ray absorption fine structure), ⑦ photon-phonon interaction (Raman spectroscopy), ⑧ 자기적 성질 (Barkhausen emission, 자기-탄성적 관계 또는 magnetostriction) 등이 있다. 이들 중 음향법의 하나로써 계면영역과 matrix 영역간의 음향학적 성질의 차이를 비파괴검사 방법으로 응용할 수 있으나 현재의 첨단초음파 기술로도 nanometer 정도의 두께를 가진 계면영역과 상대적으로 무한히 두껍다고 가정할 수 있는 내부 매질 영역을 구분할 수 있는 음향적 성질의 차이를 검출해 내는 것은 매우 어렵다.

현재로써는 두께 약 0.1-1.0 micrometer 의 착된 계면을 초음파 방법으로 검사하여 계면에 대한 일부 성질을 알아낼 수 있는 정도이다. 또한 계면의 탄성적 성질과 밀도의 차이는 주로 조성, 격자 구조, 자기적 domain walls, 및 격자간 거리와 관련하여 측정할 수 있는 parameter 와 연관된 재료의 불균일성에 기인한다¹⁴⁾. 일반적으로 초음파의 반사 또는 감쇄실험으로 계면의 유용한 정보를 얻기 위해서는 계면영역의 두께가 초음파 파장의 1/2 이상이어야 하며 따라서 계면을 검사하기 위해 가능한 높은 주파수를 사용할수록 작은 결함을 탐지할 가능성은 높아지나 어떠한 재료의 불균일성이라도 초음파를 산란시키는 역할을 할 것이기 때문에 고주파수 음향파 (high frequency acoustic wave) 의 사용에는 한계가 존재한다. 한편 기존의 비파괴검사 방법들과 마찬가지로 이미 알고있는 기준과 측정치를 비교하는 방법이 장래의 가능성있는 비파괴검사법의 개발에도 동일하게 적용될 것이다. 그러나 다시 한번 강조하는바 비파괴적으로 측정 가능한 parameter 들에서 원하는 계면의 기계적 성질을 추출해 내는 것은 대단히 어려운 문제이다. 예컨대 초음파 음속 측정 방법에서 수많은 인자들 즉 밀도, 탄성변형, 소성변형, 탄성계수, texture, 잔류응력, poisson's ratio, 입자크기, 사용 주파수, 온도 등이 음속변화에 영향을 주며 계면음향파를 이용하면 계면의 전달응력과 관련된 특성을 측정할 가능성이 있다고 하나,¹⁵⁾

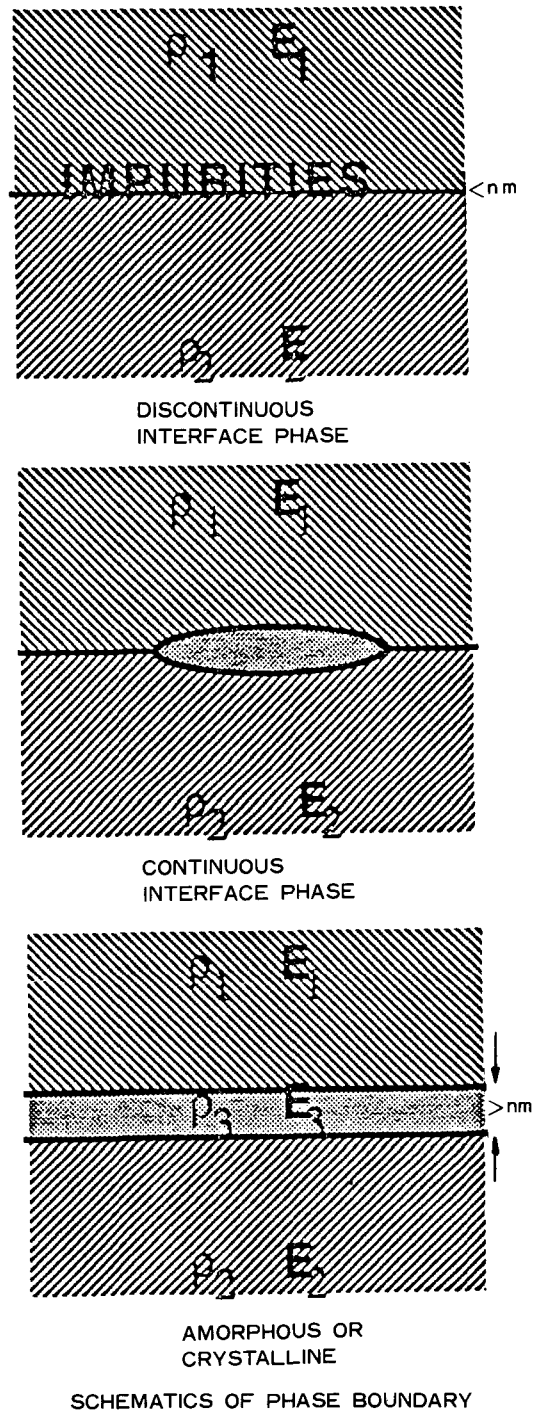


Fig.1. Schematics of interface boundary. a) Localized boundary chemistry, b) discontinuous boundary phase, c) continuous boundary phase.

현존하는 초음파 방법으로 원하는 기계적 성질을 다른 측정에 영향을 미치는 인자들로부터 완벽하게 분리해 낼 가능성은 상당히 희박하다.

본 논문에서는 비파괴적으로 계면을 조사하는데 이용될 가능성이 있는 세 가지 방법들에 대해 논의하고자 한다. 첫째, Raman microprobe 방법은 레이저 광속을 계면에 초점을 맞추어서 계면 또는 그 근방의 잔류응력, 화학 조성, 결합 특성등을 조사할 수 있으며, 둘째, 계면의 전기적인 특성 변화를 조사하여 기계적 성질과 관련된 유용한 정보를 추출해 낼 수 있고, 마지막으로 기술된 EXAFS 방법을 적용하여 계면에서의 서로 다른 원자들간의 거리 및 배위수를 측정할 수 있다.

3. Raman microprobe를 이용한

비파괴검사법

Raman 효과를 위해서는 시편을 조사하기 위한 강한 단색광원 즉 강한 laser와 시편에서 산란된 에너지를 분석하기 위한 분광설비가 필요하다¹⁸⁾.

Raman microprobe의 구성은 일반적인 Raman 산란장치와 광학현미경을 결합하여 이루어지며¹⁵⁾, 시편의 비파괴검사와 화학분석을 위해서는 laser 광속을 집속시키고 산란된 빛을 수집 분석하기 위한 현미경 광학이 필요하다. 일반적으로 Raman microprobe는 계면의 미세한 화학 분석, 원자간 결합특성, 원거리 규칙도, 원자단위의 미소 불순물 분석, 및 잔류응력 측정에 이용된다. Graphite fiber 표면의 graphitization 정도, 고분자 matrix와 graphite fiber 간의 계면에서의 화학반응을 Raman microprobe 방법으로 조사된 바 있으며¹⁶⁾, 반도체 가공 특히 VLSI (Very Large Scaled Integrated Circuit)의 wafer 가공 및 특성측정 과정에서 silicon wafer를 오염시키는 유기화합물, silicon과 silicon 산화물간의 laser-annealing 후에 계면에 존재하는 잔류응력, metal silicides의 미세 화학분석(17-19)을 비파괴적인 방법으로 조사할 수 있다.

특히 laser Raman microprobe 방법은 Raman active한 재료의 계면에서의 잔류응력의 측정에 유용하다. 이론적으로 산란된 빛의 Raman wavenumber shift와 재료 내부의 응력상태는 어떤 범위내에서는 대략 선형적 관계를 가지며 이러한 이론은 실험적으로도 증명된 바 있다^{20,21)}. 또한 laser 광원을 대략 1micrometer 까지 집속시킬 수 있으므로 광학적으로 투명한 Raman active한 재료의 계면에 초점을 맞추으로써 초점 영역 근방 즉 계면과 그 주위의 작은 영역에서의 잔류응력 상태 측정에 laser Raman microprobe 방법을 사용할 수 있다. 이러한 시도의 한 예로써 Fig-2에 보인 바와 같이 silicon과 수정(quartz)간 계면의 작은 영역에 laser 광속을 집속하여 광학적으로 투명한 수정쪽에서 조사시킴으로써 계면의 silicon쪽과 수정쪽의 잔류응력을 측정할 수 있다. Raman microprobe와 분광기 입구에 entrance slit 사이에 있는 중간 image plane의 조리개를 조절함으로써 focal volume 이외의 산란되는 Raman intensity를 제한할 수 있으며, 이론적으로 광속 축방향의 공간 분해능은 5-10 micrometer 이고, 초점의 크기 즉 반경 방향의 공간 분해능은 직경 약 1-2 micrometer이다. 응력과 관련된 Raman 주파수 이동을 보정하기 위해 수정 시험편에 변위량을 측량을 측정하기 위한 strain gauge를 부착하고 이를 four-point bending jig에서 보정실험하였다. 수정의 여러 Raman 주파수 가운데 하나인 128cm⁻¹의 경우, 1cm⁻¹의 wave number 하향 이동은 변위 0.4% 또는 이와 상응한 응력 347MPa 과 동등함으로 밝혀졌다²³⁾. 또한 수정과 silicon의 계면에서의 측정된 잔류응력은 substrate 영역에서 지수함수적인 응력분포와 박막영역에서 일정한 응력분포를 갖는 판상형 복합재료 응력모델과 비교하였다. 모델해석 결과 두 영역의 열팽창계수의 차이에 기인하여 발생하는 국부적인 잔류응력은 수정 substrate 쪽으로는 매우 작은 범위 약 300nanometer 정도까지 영향을 미친 것으로 밝혀졌다^{24,25)}. 이러한 일련의 시도는 Raman spectroscopy 방법을 이용하여 계면의 잔

류응력상태를 비파괴적으로 알아보는데 응용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

의 관련 지을 수 있다면, 예컨대 steel의 sensitization과 같은 문제점을 입계 (grain boundary) 전기전도도 측정으로써 규명할 수 있는 비파괴검사의 한 방법으로 이용 가능할 것이다.

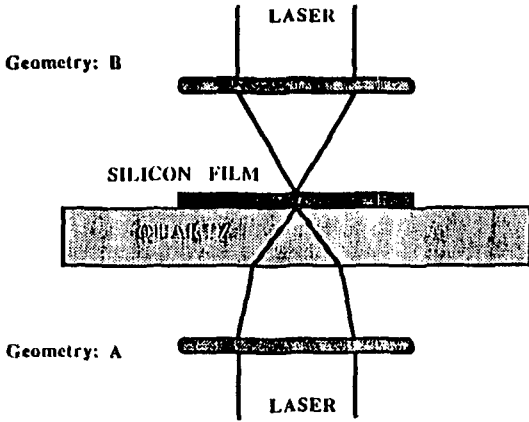


Fig.2. Experimental geometries for the Raman band shift for the measurement of residual stress on and near the interface between quartz and silicon film (geometry:A) and on the top surface of silicon film (geometry:B)

4. 전기적 / 전자적인 비파괴검사법

계면을 지나는 전기전도도의 변화가 계면의 기계적 성질과 연관지을 수 있다면 이를 비파괴검사의 한 방법으로 이용할 수 있다. Fig. 3 에 계면의 전기전도도를 측정할 수 있는 실험방법을 보였으며 이러한 방법을 metal matrix/graphite fiber 복합재료의 계면을 조사하는데 이용할 수 있다. 이러한 복합재료의 계면은 주로 산화물 또는 탄화물의 상태로 존재하며 계면영역의 전도도는 저전도도와 고전도도의 급격한 변화 소위 switching 현상을 나타내며 이러한 전도도의 switching을 계면의 기계적 성질과 연관지을 수 있다. 보통 이런 전기-기계적 switching 현상은 계면산화물의 원자구조와 계면 결합특성의 변화를 유발하는 국부적인 공간전하밀도등으로 이해되고 있다. 따라서 계면의 전기전도도 변화 양상을 비파괴적으로 측정함으로써 복합재료 계면에서의 파괴경향을 예측할 수 있으며⁷⁾ 이러한 시도가 조직적으로 확립 되어 알고자 하는 성질과 비파괴적으로 얻을 수 있는 측정치와

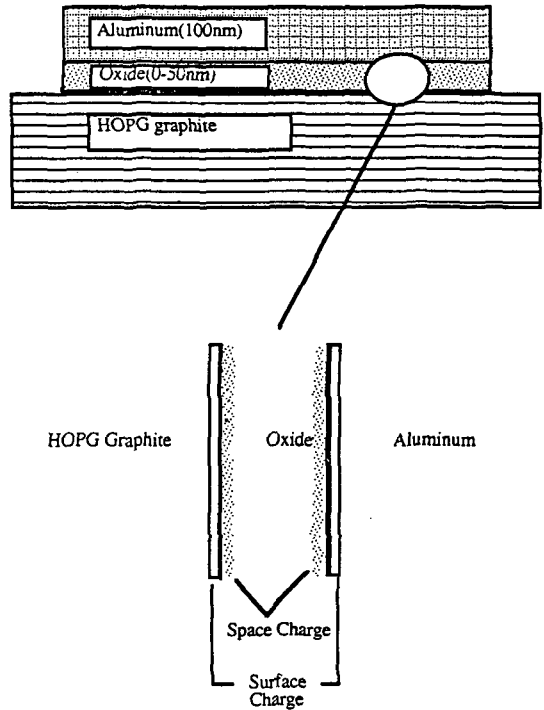


Fig.3. Electrical conductivity states of a model system

다른 한가지 비파괴검사방법으로 AC-field 방법이 있다. 현재 고주파 AC-field법은 표면결함의 탐지와 크기추정에 상용으로 널리 쓰이고 있다. AC-field 방법의 응용은 '전도체에 대해서는 thin-skin 효과 그리고 비자성체에 대해서는 thickskin 효과를 기초로하여 표면 또는 표면 직하의 결함을 탐지하고 그 크기를 측정하는데 이용되고 있다²⁶⁾. 비록 주파수에 따른 skin depth의 조절이 가능하긴 하나 이 방법의 이론이나 응용은 재료의 성질 및 표면상태에 따라 상당히 제한적으로 사용되고 있으며 만약 계면 영역의 전도도나 자기투자율의 변화를 설명할 수 있다

면 이러한 측정가능한 parameter와 계면의 기계적 성질을 연관시킬 수 있다. 또한 큰 자기투자율의 변화를 보이는 어떤 재료에 대해서는 이를 응력상태와 연관지음으로 측정하는데 사용할 수 있다²⁹⁾. 또한 Si-SiO₂의 계면을 전압-축전 용량등의 방법으로 조사할 가능성에 대해서 참고고문헌 28에 자세히 기술되어 있다. 이러한 기법을 bulk 상태 복합재료에 응용하는데 근본적인 어려움은 복합재료 계면을 어떻게 분리해내는가 하는 점이며 제한적이거나 박막 구조인 판상형 복합재료에 대한 시도가 실험실적으로 수행되고 있는 단계에 있다.

5. EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure)

EXAFS 방법은 Fig. 4에 보인 바와 같이 absorption edge위 x-ray energy의 함수로 표현되는 x-ray 흡수상수의 진동현상을 이용한다. EXAFS의 기본원리는 x-ray가 원자에서 흡수되어 방출되는 광전자의 파동과 주위 원자들로부터의 산란된 파동간의 간섭현상으로 설명되고 있다³⁰⁾. EXAFS 측정결과에는 원자간 구조에 대한 정보가 포함되어 있으며 Fourier 변환과 같은 기법을 써서 원하는 정보를 뽑아낼 수 있다.

EXAFS Data: Absorption Coeff. vs. Energy
Bulk Ti: K Edge @ 4966 eV

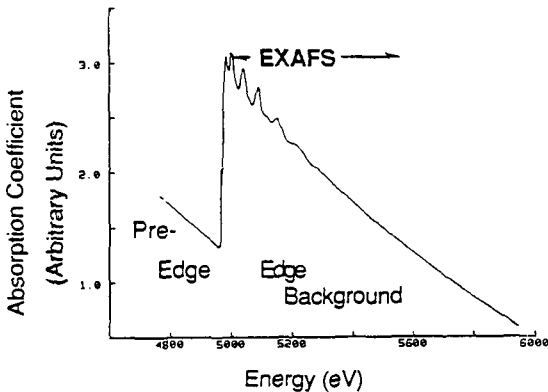


Fig.4. Typical x-ray absorption spectrum

EXAFS의 상세이론과 그에 연관된 물리적인 상수들은 여러 문헌들⁽³⁰⁻³⁵⁾에 자세히 기술되어 있으므로 여기에서는 이 방법의 비파괴적인 응용에 대해서만 간단히 기술한다.

EXAFS 실험을 위한 x-ray 발생장치로는 rotating anode type의 비교적 강한 x-ray 실험실적인 설비 또는 보다 세고 넓은 대역의 x-ray를 발생시킬 수 있는 본격적인 synchrotron radiation source 설비가 필요하다. EXAFS 기법은 실험의 기하학적인 형태에 따라 투과법 또는 형광법을 쓸 수 있으며 계면의 국부적인 ordering과 같은 원자구조적인 측면에서의 정보를 비파괴적인 수단으로 얻을 수 있는 시도의 한 가지이다. 그 한가지 예로 1-5 monolayer의 Ti를 이보다 두꺼운 Ni layer에 증착한 다층구조의 Ni-Ti-Ni-Ti...판상 복합재료에 대해 EXAFS 기법을 적용하여 보았다³⁶⁾. 여러가지 다른 방법, 다른 조건에서 진공 증착된 시편들의 Ni-Ti 계면구조는 기본 스펙트럼 및 Fourier 변환 스펙트럼 등을 비교한 결과 비정질상태의 Ti 산화물 또는 TiNi intermetallic으로 밝혀졌다. EXAFS 방법으로 국부적인 원자의 규칙도를 규명할 수 있는 능력은 이를 계면의 비파괴검사 방법으로 사용할 수 있다는 가능성을 보여주었으며 Al matrix 위에 MBE: Molecular Beam Epitaxy로 증착된 단원자층 Ga 또는 As의 원자구조가 이들 원자들의 고용체이며 ordered interface phase 임으로 밝혀졌다³⁷⁾. 비록 기계적 성질과의 직접적인 상관관계는 확립되지는 않았으나 이 방법도 비파괴적으로 계면의 원자적인 규칙성과 원자 배위수 등을 알아내는데 여러 면에서 도움을 줄 것이다.

본 논문에서는 계면의 기계적 성질을 비파괴적으로 알아낼 수 있는 가능한 방법들에 대해서 기술하였다. 여기에 기술된 방법들은 현재 일반적으로는 쓰이지 않는 방법들이며 이들 가운데 어느 방법도 계면의 기계적 성질과 관련된 정보를 완벽하게 제시하지는 않는다. 또한 이 방법들은 모두가 어떤 특정한 목적에만 부합되며 실험실에서나 가능한 상태이나 앞으로 이 방면에

많은 노력을 기울임으로써 이들이 비파괴검사법으로 널리 사용될 때가 오리라고 희망한다.

참 고 문 헌

1. R.S.Sharpe; Research Techniques in Nondestructive Testing, vol. 1-8, Academic Press Inc., London, 1970-1985
2. E.A.Ash and C.B.Scruby; Phil. Trans. R. Soc. London, 1986, vol. A320, pp. 159-378
3. O.Buck and S.M.Wolf; Nondestructive Evaluation: Application to Materials Processing, Proc. ASM, ASM, TMS Meeting, Am. Soc. for Metals, Warrendale, 1984
4. J.N.Zemel; Nondestructive Evaluation of Semiconductor Materials and Devices, NATO Advanced Study Institute Series, Plenum Press, New York, 1979.
5. A.Vary; Materials Analysis by Ultrasonics, Noyes Data corp., Park Ridge, 1987
6. A.Vary; ref. 1, vol. 4, chapt 5, pp. 159-204, 1980.
7. E.Segal, and J.L.Rose; ref. 1, vol. 4, chapt. 8, pp. 275-316, 1980
8. A.Vary and K.J.Bowles; Polymer Eng. and Sci., 1979, Vol. 19(5), pp. 373-376
9. K.K.Phani, S.K.Niyogi, A.K.Maitra, and M.Roychandhury, J. Materials Sci., 1986, Vol. 21 (12), pp. 4335-4341.
10. J.H. Williams, Jr. and N.R. Lampert; Materials Evaluation, Dec. 1980, pp. 68-72.
11. M.Wevers, I.Verpoest, E.Aernoudt. P. DeMeester; The Second Int. Conf. on Acoustic Emission, Special Supplement to J. Acoustic Emission, Sep. 1985, Vol. 4, No. 2/3, pp. S186-S190.
12. L.E.Murr; Interfacial Phenomena in Metals and Alloys, pp. 187-188, Addison-Wesley Publishing Co., London, 1975
13. A.G.Metchalfe; Interfaces in Metal Matrix Composites, vol. 1, pp. 3-8, Academic Press, New York, 1974.
14. R.Truell, C. Elbaum, and B.B.Chick; Ultrasonic Methods in Solid State Physics, pp. 161, Academic Press, New York, 1969.
15. J.A.Simmons, E.Drescher-Krasicker, H. N.G.Wadley, M. Rosen, and T.M.Hiseh; Ultrasonic Methods for Characterizing the Interfaces in Composites, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, June 1987, Williamsburg VA.
16. J.Summerscales. Non-Destructive Testing by Raman Spectroscopy, Int. Conf. Composite Materials VI, F.L.Matthews, N.C.R.Buskell, J.M.Hodgkinson, and J. Morton eds., vol. 1, pp. 1.321-1.332, Elsevier-The Metallurgical Society, London, 1987
17. F.Adar, Applications on the MOLE-Raman Microprobe for Materials Characterization, presented at the 31st Sagamore Army Materials Research Conf., August 1984
18. P.M.Fauchet, IEEE Circuits and Devices Magazine, 1986, vol. 2, pp. 37-42
19. R.P. Van Dugne, R.I.Aitkorn, and K.L. Haller; IEEE Circuits and Devices Magazine, 1986, vol. 2, pp. 61-65
20. V.J.Tekippe, A.K.Ramdass, and S.Rodriguez; Phys. Rev. B, 1973, vol. 8 (2) pp. 706-717
21. E. Anastassakis; J. Raman Spectroscopy, 1981, vol. 10, pp. 64-76
22. P.Dhamelincourt; PhD thesis, Etude et Realisation D'une Microsonde Moleculaire a Effet Raman Quelques Domaines D'application, Univ. of Lillie, 1979.
23. Y.M.Cheong, and H.L.Marcus; Raman Microprobe Measurements of Residual Stresses at Interface, in Interface in Metal Matrix Composites, A.K.D.Dhing-

- ra, and S. G. Fishman eds., pp. 147-154, The Metallurgical Soc., Warrendale, 1986
24. Y.M.Cheong H.L.Marcus, and F.Adar: J. Materials Research, Nov/Dec 1987, in Press.
 25. Y.M.Cheong, Ph D dissertation, Univ, of Texas, Dec. 1987.
 26. H.Mendez, D.Finello, R. M. Walser, and H.L.Marcus; Scripta Met., 1982, vol. 16, pp. 855-858.
 27. L.D.Brown, C.L.Glove, and H.L. Marcus; Interface Failure in Planar Aluminum - Graphite Composites, in Interface in Metal Matrix Composites, A.K.Dhingra, and S. G. Fishman eds., pp. 205-210, The Metallurgical Soc., Warrendale, 1986
 28. J.A. Cooper R.J.Dewhurst, and S.B. Palmer; Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1986 vol. A320, pp. 319-328
 29. E.H.Nicollian, J.R.Brews; MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, John Wiley & Sons, New York 1982.
 30. C.A.Ashley, and S.Domich; P gys. Rev. B, 1975, vol. 11 (4) pp. 1279-1288.
 31. P.A.Lee, and G. Beni; Phys. Rev. B, 1977, vol. 15 (6), pp. 2862-2883
 32. P.A.Lee, and J.B.Pendry; Phys. Rev. B, 1975, vol. 11 (8), pp. 2795-2811.
 33. F.W.Lytle, D.E.Sayers, and E.A.Stern ; Phys. Rev. B, 1975, vol. 11 (12), pp. 4825-4835
 34. E.A.Stern , D.E.Sayers, and F.W.Lytle; Phys Rev. B, 1975, vol. 11 (12), pp. 4836-4846.
 35. E.A.Stern; Phys. Rev. B, 1974, vol. 10 (8), pp. 3027-3037
 36. E.V.Barrera, S.M.Heald, and H.L.Marcus; Scripta. Met. 1987, in press
 37. E.V.Barrera, Ph D dissertation, Univ. of Texas, Dec. 1987.