

## 이종재료 접합면의 초음파 비파괴평가기법

박익근\*, 박은수\*\*

\* : 천안공업전문대학 용접기술과

\*\* : 서울산업대학교 재료공학과

## Ultrasonic Nondestructive Evaluation Technique of Dissimilar Metal Transition Joints

IK GUN PARK\*, EUN SU PARK\*\*

\* : Chun An Technical College

\*\* : Seoul Industry University

머리말 이종재료 접합재의 연구개발(R&D)이나 품질보증(QA)분야에서 최적 접합조건을 신속한 결정과 사용중 접합재의 접합강도에 결정적으로 영향을 미치는 접합계면의 박리·미접합부등의 비파괴진단·평가기법에 적극 활용되고 있는 초음파비파괴평가(UNDE)기법의 주된 특징과 적용한계, 향후 연구되어야 할 과제등을 최근의 특징적인 연구경향과 적용예를 중심으로 소개하고자 한다. 본고(本稿)에서 기술하는 초음파비파괴평가기법은 부분적으로는 기술의 안정화단계에 까지 상당히 접근하여, 현재 국내 반도체산업의 품질보증분야에서는 접합재료 접합계면의 비파괴적해석에 그 유용성이 어느정도 확인되고 있으나 정량적비파괴평가(QNDE)와 검사시스템의 꽃이라 불리는 전문가시스템화와의 접근에는 아직 해결되어야 할 문제가 많다. 따라서, 저자들은 앞으로 접합재료 접합계면의 비파괴적해석에 관련한 연구사례와 결과를 정량적비파괴평가의 중요성과 방향성에 초점을 두고 본학회지를 통하여 계속 연재할 계획이다.

### 1. 서 론

최근 자동차, 조선, 항공·우주산업등의 각방면에 서 파인세라믹(fine ceramics), 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)을 시작으로 한 첨단 복합재료(Advanced Composite Materials; ACM)의 출현과 이종재료(異種材料) 접합등에 의한 신소재의 혁신적인 개발과 함께 이들 첨단소재 및 그 제품의 신뢰성 향상과 품질보증(QA)확보를 위한 재료평가(materials evalua-

tion)기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 그 중에서도 초음파비파괴평가(UNDE)기법의 연구에 관해 관심이 점점 높아지고 있다.<sup>1,2)</sup>

이들 재료는 각자 모두 유일(unique)한 특성을 갖고 있기 때문에 실용화에 선행하여 사용성능평가를 목적으로 한 적절한 간이강도평가시험법 및 비파괴진단·평가기법의 확립이 불가결하며 이것이 확립되지 않는 한 첨단재료를 핵으로 한 기술의 비약적 발전은 기대할 수 없을 것이다. 바야흐로, 비파괴재료평

가기술은 다가오는 21세기의 새로운 산업사회를 향한 최첨단핵심기술(key technology)연구분야 중의 하나라 해도 과언이 아니다.

그러나, 현재 이들 신소재분야에 비파괴재료평가기법의 적용수준은 기술발전주기(technology life cycle) 중 기술의 안정화단계에 접근하기 위한 개념정리단계를 벗어나지 못하고 있는 것이 현실이다. 따라서, 기술의 안정화단계에 접근하기 위한 다각적인 접근방식의 시도가 현재 활발히 진행중이며, 최근의 첨단 비파괴재료평가기술의 특징적인 연구동향을 간략히 요약해 보면,

- 1) 총합적인 비파괴측정기법의 적용
- 2) 정량적비파괴평가(Quantitative Nondestructive Evaluation ; QNDE)기술의 개발과 그 지능화(知能化)
- 3) 검사공정의 자동화, 검사결과의 화상화 및 비파괴검사 전문가시스템(expert system)화
- 4) Smart structure, Intelligent structure라 불리는 새로운 개념의 출현등을 들 수 있다.

본고(本稿)에서는 이상과 같은 경향(trend)속에서 지금도 급속도로 새로운 발전을 전개해 가고 있는 각종 비파괴재료평가기술 중에서, 현재 이종재료 접합부품의 연구개발(R&D), 고장해석(FA), 품질보증(QA)분야에서 반드시 해결되어야 할 과제의 하나인 접합재 구성재료의 음향특성의 차와 인서트재의 두께를 고려하여 인서트재 상하면에서 발생하는 접합계면결함을 분리하는 방법과 박막·접착층의 초음파 탐상시 다중반사의 문제점과 그 대책등에 관해 기술한다.

2. 이종재료 접합면의 비파괴평가기법

이종재료(異種材料)의 접합기술은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 상당히 많은 요인과 기술요소가 관련하기 때문에 다양한 접근방식에 의한 연구가 진행되고 있다. 이들은 크게 계면의 반응, 생성물등을 어떻게 제어할 것인가하는 재료학적인 접근방식과 계면의 열변형, 잔류응력등 접합을 방해하는 역학적인 요인을 어떻게 제어할 것인가하는 것으로 나눌 수 있다. 또, 이종재료 접합재의 실용화를 위해서는 사용성능평가를 목적으로한 강도시험 및 품질보증시험법의 확립

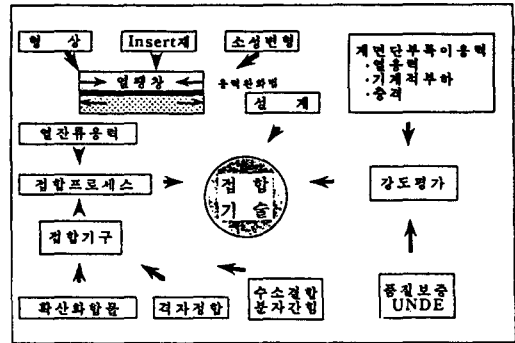


Fig. 1. Various factor and technique concerned in transition joints.

이 필요불가결하다.

이종재료 접합재의 접합강도는 접합계면의 표면상태, 인서트(insert)재, 반응층의 유무(두께), 잔류응력 레벨등 많은 인자의 영향을 받기 때문에 신속한 접합조건의 결정에는 적절한 간이강도평가시험법 및 비파괴평가(非破壞評價, Nondestructive Evaluation ; NDE)기법의 확립이 절실히 요구되고 있다. 여기서는, 접합계면의 박리·미접합부등의 결함검출에 적용이 가능하고 유용성이 실험적으로 어느정도 확인된 최근의 각종 비파괴재료평가기법의 종류와 특징중에서 초음파비파괴평가기법<sup>3), 4)</sup>을 적용한 몇가지의 탐상예에 대해 기술한다.

2. 1. 접합계면부의 비파괴평가기법

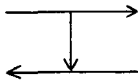
이종재료 접합재의 개발과정에서 비파괴평가기법이 담당할 수 있는 주된 역할로는 다음의 2가지 점을 들 수 있다.

1) 접합조건 탐색단계에서의 활용

어떠한 접합조건이 적절하며, 어떠한 프로세스(process)가 문제인가를 파악하기 위해 각접합과정에서의 접합상황을 비파괴적으로 조사할 수 있다는 것은 매우 큰 장점이 된다. 문제가 되는 프로세스를 중점적으로 조사하는 것에 의해 개발기간을 단축할 수 있는 경우가 많다.

또, 접합재 강도특성의 불충분한 원인이 접합계면 강도의 본질적인 문제인가 아니면 접합성(접합율)의 문제인가를 조기에 판별하는 것도 가능하다.

Table 1. NDE techniques of dissimilar metal transition joints.

<p>Ultrasonic Techniques</p>	<p>Ultrasonic Nondestructive Evaluation (UNDE)<sup>1), 2), 5)</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• RF signal </li> <li>• Spectroscopy</li> </ul> <p>Amplitude, Phase Observation Amplitude Spectrum, Phase Spectrum Observation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• B-scan image</li> <li>• C-scan image</li> <li>• 3-D image</li> </ul> <p>SAM (Scanning Acoustic Microscope)<sup>6)</sup> Laser Ultrasonic Technique<sup>7), 8)</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• SLAM (Scanning Laser Acoustic Microscope)</li> <li>• Laser Pico Second Acoustics</li> </ul> <p>Ultrasonic CT (Computed Tomography)</p>
<p>X-ray Techniques</p>	<p>RT (Radiographic Testing) X-ray CT (Computed Tomography)<sup>9)</sup></p>
<p>Others</p>	<p>Thermography AE (Acoustic Emission) AU (Acousto-Ultrasonic) PA (Photo-Acoustics) ET (Eddy Current Testing) Electric Resistance Method Smart Structure, Intelligent Structure PBS (Polar Backscattering) Method</p>

2) 접합재의 품질보증면에서의 활용

계면(界面)접합재의 실용상 가장 큰 과제중의 하나는 품질관리(Quality Control ; QC) 또는 품질보증(Quality Assurance ; QA)의 문제이다. 재료·설계상의 문제는 요구를 만족하고 있다는 전제하에 제조과정의 접합프로세스에서 품질관리의 방법으로 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 접합프로세스를 제어한다.
- 샘플링(sampling)하여 파괴시험을 실시한다.
- 최종단계에 비파괴평가를 실시한다.

이들은 필요에 따라 조합하여 채용된다. 이 중 최후의 비파괴평가는 제품 제조시에 특히 중요하나 사용시에 있어서도 열화나 손상의 확대에 의한 파괴사고의 발생을 방지한다는 관점으로부터 중요한 의미를 갖는다.

비파괴평가의 원리면에서는 시험편이나 제품 모두

기본적으로는 차이가 없으나 형상이 복잡한 경우나 손상이 된 경우는 보다 신중한 대응이 요구된다. 이 종재료 접합재의 계면접합부에 박리·미접합부등의 결함검출에 적용이 가능하고 유용성이 실험적으로 어느정도 확인된 최근의 각종 첨단 비파괴재료평가 기법의 종류를 간략히 정리하면 대략 Table 1과 같다.

이종재료 접합재에서는 재료의 조합, 형상·치수등의 형태적인 특성도 다양하여 일반적인 비파괴재료 평가기법을 논하는 것은 곤란하지만 체적(bulk)접합재의 비파괴재료평가에 관해서는 균질재와 거의 동일한 기법이 적용가능하다. 단, 용사막(溶射膜)이나 박막(薄膜)등과 같은 현재까지 개발된 비파괴계측기법에 의한 적용에 한계가 존재할 때는 특수한 기법의 적용이 불가피하다.

3. 초음파비파괴평가기법(UNDE)

X선과 함께 내부결합검출에 활용되고 있는 가장 일반적인 비파괴평가기법이다. 그 원리는 결합부로부터의 반사파를 표면반사파와 저면반사파로 분리하여 검출하고, 그 진폭(amplitude)이나 위상(phase)특성 등으로부터 결합위치나 결합크기등을 추정하는 비파괴계측기법이다.

일반적으로 Fig. 2와 같은 3층구조의 음향해석모델을 갖는 이종재료의 접합면에 초음파비파괴평가(Ultrasonic Nondestructive Evaluation ; UNDE) 기법을 적용하는 경우는 대개 다음과 같은 주요한 계측정보의 활용과 문제점이 제기된다.

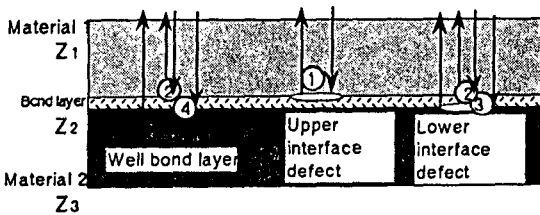


Fig. 2. Acoustic analysis model with three layer.

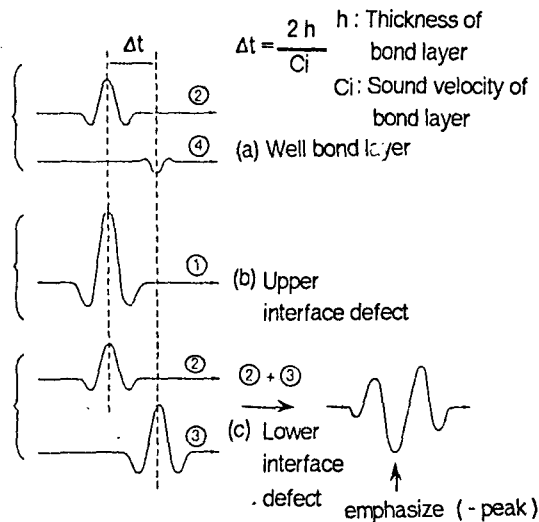


Fig. 3. Reflection echo pattern from upper and lower interface defect of bond layer.

3. 1. 이종(異種)재료 접합계면의 경우

이 경우는 상기 Fig. 2에서 인서트재가 없고 음향 임피던스가 서로 다른 재료 1, 2만 존재하는 경우로 예로서 각종 클래드(clad)강이나 이종재료 접합계면을 들 수 있으며, 접합계면에 결함이 없어도 초음파는 음향 임피던스(acoustic impedance ; Z)가 서로 다른 경계면에서 반사파가 존재하고 그 반사신호의 크기는 계면을 구성하는 물질의 음향임피던스와 접합 상황에 좌우된다. 음향임피던스가 큰 물질에 입사하는 경우와 역의 경우에는 입사파에 대해 반사파의 위상이 반전된다. 고체로부터 물이나 공기와 같이 임피던스가 작은 물질에 입사할 때는 반사파의 위상은 반전한다. 이 사실은 접착부 박리검출에 매우 중요한 의미를 갖는다.

접합계면에서는 여러 종류의 재료의 조합이 일어나기 때문에 반사파의 신호는 입사파와 위상이 반전하게 되는 고체내의 크랙검출과 같이 단순히 평가할 수는 없다. 다시말해, 접합계면의 비파괴평가에 활용되는 계측정보는 주로 반사파레벨과 위상특성이며 이 경우는 접합시의 열이력(熱履歴)에 의한 초음파 특성의 변화등을 고려한 표준시험편의 사용이 요망된다.

3. 2. 동종(同種)재료 접합계면의 경우

이 경우는 Fig. 2에서 인서트재가 없고 음향임피던스가 서로 같은 재료가 접합해 있는 경우(예를들면 스폿용접 접합부)로 접합계면에 미소간극(gap)이 존재하여도 접합계면에서 초음파의 반사파는 거의 존재하지 않고 통과해버리기 쉽기 때문에 미소간극(예를들면 스폿용접에서 corona bond)에서 초음파의 반사파를 수신하여 C-scope정보를 얻기 위해서는 최적

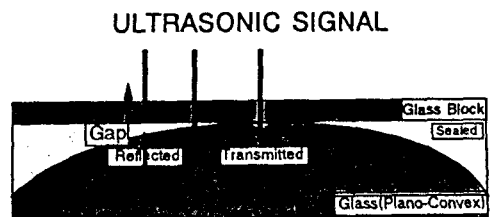


Fig. 4. Configuration of Newton Ring.

시험방법의 조건설정이 적극 검토되어야 한다.

Fig. 5는 미소박리(剝離)의 검출능을 향상시키기 위해 펄스인가(印加) 전압을 제어하는 것에 의해 Fig. 4의 뉴우튼링(Newton Ring)을 사용한 초음파의 반사거동실험 및 박리계면에서 초음파의 변위(變位) 해석등과 함께 박리의 간극과 진폭과의 관계를 나타내고 있다.

Fig. 6은 뉴우튼링의 접촉점에서부터 간극의 증가에 의한 반사파높이를 C-scope정보로 나타낸 것이다. 접촉점으로부터 멀어질수록 미소간극에 의한 반사파가 상쇄 또는 보강 간섭을 일으키는 일정영역에서 진폭이 급격히 변화하며, 따라서 이에 상응하는 C-scan 화상은 동심원을 그리는 부분이 존재한다. 이 부분의 간극부터는 초음파의 반사파가 존재하기 때문에 초음파의 정보를 활용할 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6의 뉴우튼링의 실험 결과로부터 펄스인가전압을 가능한

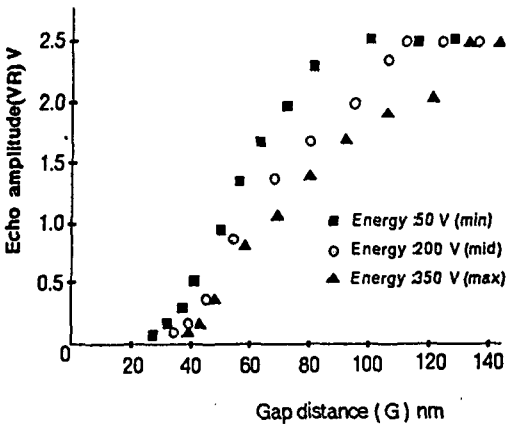


Fig. 5. Relationship between gap distance and echo amplitude.

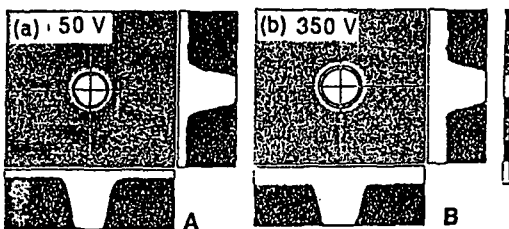


Fig. 6. C-scan image of Newton Ring (a) 50V, (b) 350V.

한 낮게 시험조건을 설정하는 것이 미소박리의 검출에 유효함을 알 수 있다.

### 3. 3. 인서트(Insert)재가 삽입된 접합계면의 경우

#### 3. 3. 1. 인서트재 상하접합계면의 결함분리법

이 경우는 두 재료의 접합계면에 접합잔류응력(residual stress)의 완화를 위해 인서트재가 사용되는 경우로 응력완화재 상하(上下)면의 접합계면에서는 매우 복잡한 초음파의 반사·투과현상이 발생하고 접합상황에 대한 정보의 판단이 매우 곤란해진다. 즉, 접합시 열간류응력의 완화를 목적으로 삽입하는 인서트재의 두께나 음향임피던스에 의해 박리나 미접착부등의 결함검출이 매우 어려워진다. 또, 접합프로세스의 개발에 있어서는 인서트재의 상면에 결함이 있는가 아니면 하면에 결함이 있는가를 식별하는 것은 매우 중요하다. 여기서는, 접합재 구성재료의 음향특성의 차와 인서트재의 두께를 고려하여 인서트재 상하면에서 발생하는 접합결함을 분리하는 방법에 대해 기술한다.

인서트재 상하면에서의 접합 및 초음파의 반사·투과의 패턴을 대별하면 Fig. 2와 같으며, 인서트재 상면의 박리부는 음향적으로 완전한 자유표면이 되고 박리부에 입사한 초음파는 거의 100% 반사하게 된다.

또, 표면파형과 위상이 반전하는 것도 특징이다. 따라서, 인서트재 상면박리는 반사음압레벨과 위상반전의 유무로부터 평가하는 것이 가능하다. 단, 인서트재의 음향임피던스가 재료1의 음향임피던스보다도 작은 경우에는 양자(兩者)의 계면에서 반사에코의 위상반전이 일어나기 때문에 이 경우에는 위상반전의 유무만으로는 결함여부의 판정은 불가능하다.

그리고, 인서트재 하면에 결함이 있는 경우에 대해서는 A-scope(RF파형)로 상면반사파와 하면반사파가 명확히 분리할 수 있는 경우, 각각의 반사파에 게이트를 걸어 + 피크(peak)나 - 피크(peak)를 검출하는 것에 의해 피크값의 크기나 반사파반전의 유무등으로부터 박리의 판정을 하는 것이 가능하다. 그러나, 이 경우에도 재료1의 두께변동등에 상관없이 항상 안정된 게이트설정이 가능한가의 여부는 실용상 상당히 중요한 문제이다. 한편, 상면반사파와 하면반

사파를 명확히 분리할 수 없는 경우 또는 반사파 간극이 작아 게이트를 안정적으로 설정하는 것이 곤란한 경우에는 이 방법을 이용하는 것은 불가능하게 된다.

따라서, 접합계면에서 RF파형의 + 피크나 - 피크를 함께 측정하여 이들을 시료의 구성에 의해 정해지는 조건식에 대입하여 판정하고 인서트재 상하면에서의 접합상태를 분리하여 C-scan 화상으로 표시하는 기법이 많이 활용되고 있다. 여기서는 우선 재료 1,2가 인서트재보다 음향임피던스가 큰 경우에 대해 고찰하였다. Fig. 2에 표시한 건전부, 상면박리부, 하면박리부에 대응하는 반사파패턴의 대표적인 예는 Fig. 3과 같다.

상면박리부로부터의 반사파는 기본적으로 기준재(재료1과 동일재료, 동일두께의 재료를 접합시키지 않고 겹친것)로부터의 반사파와 동일한것으로 여기서는 위로 볼록한 반전반사파가 된다. 또, 건전부로부터의 반사파는 기준재반사파에 반사율을 곱한 것과 인서트재 두께의 2배 정도 위상지연을 수반하는 반사파(인서트재와 재료2의 계면에서 발생)로 구성된다. 한편, 하면박리반사파는 상면접합부반사파와 하면박리반사파로 된다. 이 하면박리반사파는 음향임피던스의 조합이나 인서트재의 두께에 의해 파형의 특징이 변한다.

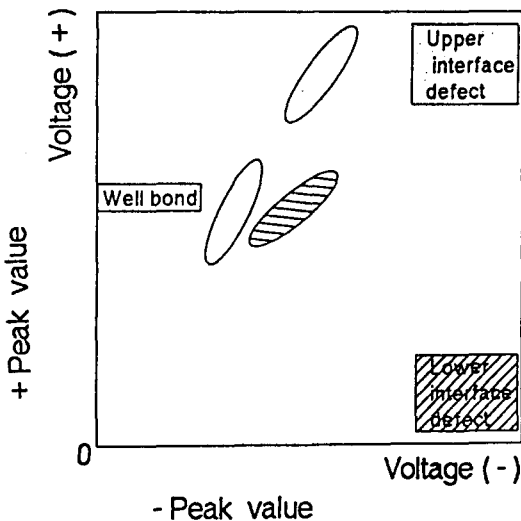


Fig. 7. + peak and - peak distribution.

모든 A-scope의 데이터를 저장해 놓고 후에 해석하는 것이 가능하면 이들의 파형을 상세히 분석하는 것으로부터 접합상태를 아는 것이 가능하나 상당한 시간과 수고가 걸리는 작업이 된다.

그래서, 초음파 파장이 인서트재의 두께의 1/2이 되는 탐촉자를 채용하는 것으로부터 상면박리반사파의 특징을 강조하고, RF파형의 + 피크와 - 피크로부터 상하면결합을 분리한다. 다시말해, 상면반사파와 하면반사파를 1주기분의 위상차(phase shift)를 주는 것으로부터 Fig. 3(c)에 나타난 것과 같이 하면박리가 일어나는 경우 - 피크를 강조하고 그 외의 접합상태와 구별가능하도록 하였다. 이 기법으로 접합계면을 탐상하면 Fig. 7과 같은 그림을 얻을 수 있다. 이를 근거로하여 안정된 게이트 설정이 가능하면 각계면에서의 반사율·투과율이나 실험적으로 얻어진 보정치등을 고려한 판정기준을 이용하면 결합의 분리를 하는 것이 가능하게 된다.

### 3. 4. 박막 접착층을 갖는 접합계면의 경우

이것은 두 재료의 접합계면에 초음파파형의 거리분해능 이하의 두께를 갖는 박막(薄膜, thin film)이나 코팅(coating)층등이 존재하는 경우로 접합계면에서는 반사반사파와 표면반사파 또는 저면반사파가 간섭파형으로 존재하기 때문에 에코의 분리가 곤란해져 통상의 초음파계측기법으로는 해석이 불가능하게 된다. 이 분야에 대한 초음파계측기법의 한계를 극복하기 위해 많은 연구가 진행되고 있으며, 立川<sup>3)</sup> 등은 집속탐촉자의 다중반사를 이용한 박판접합재의 초음파탐상법을 제안하고 있다.

본 기법은 표면근방의 결합이나 이종재료 계면의 평가에 유효한 방법으로 초음파의 초점이 대상물보다 깊게 되도록 물속거리(water distance)를 조절한다. 이와같은 조건에서는 초음파는 표면으로부터의 반사와 경계 또는 결합으로부터의 다중반사파(multiple echo)를 발생하고 반사를 반복하는 것에 의해 초음파가 집중하는 효과와 감쇠하는 효과가 있고 탐상도형에는 표면반사파의 뒤에 경계면반사파나 결합반사파가 분리되어 형성된다. 이 표면반사파의 뒤에 나타나는 반사파높이의 변화를 주사탐상(scanning)으로 조사하여 접합상태를 조사한다.

초음파Spectroscopy에 의한 방법<sup>5)</sup>을 이용하면 초음파파형의 거리분해능 이하의 박막접착층을 갖는 3층구조물질을 갖는 음향해석모델에서 초음파파형의 위상반전이나 간섭의 영향에 상관없이 중간접착층 물질의 박막두께나 음속측정등이 가능하다. 그 원리는 광대역의 주파수성분을 갖는 초음파파형을 고속푸리에(fourier)변환하여 진폭스펙트럼(amplitude spectrum)과 위상스펙트럼(phase spectrum)의 정보를 활용하는 방법으로, 미리 측정하여 놓은 중간층 상면으로부터의 간섭받지 않은 초음파 반사파형의 진폭스펙트럼과 중간 박막접착층 양면으로부터 간섭한 초음파 반사파형의 진폭스펙트럼과의 비로부터 구한 주기적인 극소치간의 주파수차(dip intervals or frequency intervals;  $\Delta f$ )를 구하면 다음식  $T=V/(2 \cdot \Delta f)$ 에 의해 박막두께 T를 계산할 수 있고, 또, 박막의 두께를 알고 있으면  $\Delta f$ 의 측정만으로 박막 접착층재료의 음속 V를 간단히 알 수 있다.

이 외에도 박막의 접합평가에 관해서는 초음파현미경의 사용이나 광음향분광법(초음파법은 아님)등의 적용이 고려될 수 있으나 탐상의 용이성이나 장치 보급의 면에서 체적(bulk) 접합재의 접합평가에는 초음파탐상기법의 적용이 금후에도 주를 이룰 것으로 생각된다.

#### 4. 초음파탐상시험 사례(事例)

##### 4. 1. 초경합금 · 강 의 접합계면

Fig. 8은 두께 0.5mm의 인서트재(동)을 갖는 초경합금 · 강 의 접합재를 25MHz의 집속탐촉자를 사용하여 C-scope 탐상하였을 때의 + 피크의 다계조(多階調) 표시 결과이다. 또, 데이터처리하여 인서트재 상면과 하면의 결함을 분리한 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 이들 그림을 비교하여 보면 잘 알 수 있듯이 반사파의 C-scope 표시만으로는 결함이 인서트재의 상면에 존재하는지 하면에 존재하는 것인지 판정이 어렵다. 그러나, 이종재료 구성체의 음향특성의 차나 인서트재의 두께를 고려한 본 방법에 근거하여 판정을 하면 상면, 하면결함을 분리하여 평가할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 이상의 기법은 다음과 같은 장점이 있음을 알 수 있다.

- 1) A-scope로 상면반사파와 하면반사파를 명확히

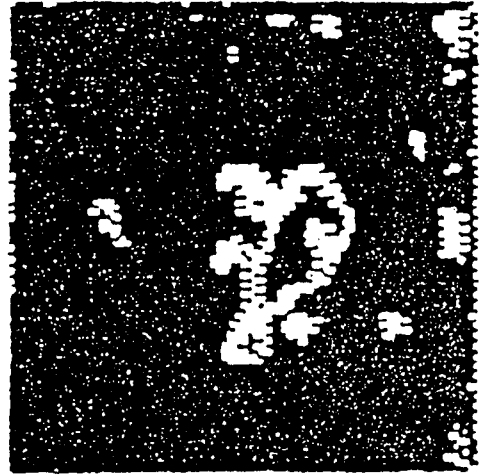


Fig. 8. Before separation of upper and lower interface defect of bond layer.

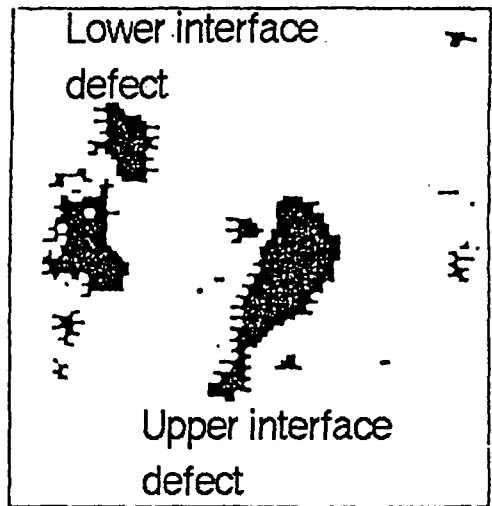


Fig. 9. After separation of upper and lower interface defect of bond layer.

분리할 수 없는 경우에도 적용이 가능하다.

- 2) 게이트를 계면반사파 전체에 거는 것이 가능하기 때문에 시료나 탐상조건의 설정이 용이하고 신뢰성이 높은 데이터를 얻는 것이 가능하다.
- 3) 상면반사파와 하면반사파를 분리하여 게이트를 거는 경우에 비해 성능이 보다 안정된 저주파수의 탐촉자를 이용하는 것이 가능하다.

4. 2. 스폿용접 접합부<sup>11) 12)</sup>

Fig. 10은 주파수 25MHz 집속형초음파탐촉자를 사용하여 Fig. 6의 뉴우톤링에 의해 설정한 최적시험조건으로 두께 2mm의 강판을 3가지의 용접조건(용접전류 6000,7000,9000A)으로 스폿용접한 접합부의 C-scan image를 나타내고 있다. C-scan image로부터 너겟(nugget : 완전히 용착하여 접합강도가 확보되는 부분)형성상황을 잘 파악할 수 있다. 즉, 6000A의 경우는 너겟의 생성부족, 9000A의 경우는 중앙부에 Void가 생기는 과대전류, 결국 적당한 용접전류는 7000A로 최적용접조건을 쉽게 설정할 수 있다.

Fig. 10의 우측에 용접전류 9000A 경우의 Void를 포함하는 용접부단면(斷面, cross section A-B)의 현미경관찰을 통해 너겟직경을 측정한 결과는 8.4mm이며 초음파 C-scan image로부터 측정된 너겟직경은 8.5mm로 대체로 잘 일치하고 있으나 너겟부 주변에 밀접히 존재하는 corona bond(고상접합계면으로 접합강도에 기여하지 못하는 부분)부에서 초음파는 거의 통과해버리기 때문에 너겟직경의 정량적평가나 너겟과 corona bond부의 정확한 식별을 위해서는 이 문제의 해결이 앞으로의 연구과제이다.

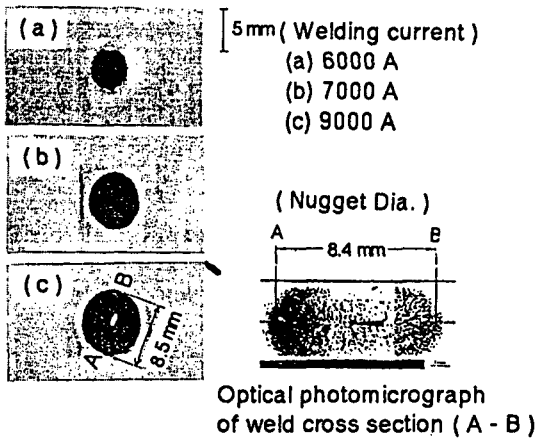


Fig. 10. Test result of spot welds.

4. 3. 박막·접착재료의 접합계면<sup>5),7),10)</sup>

IC 패키지 내부의 접합부의 접합계면에는 계면박리검출이 가장 문제가 되고 있다. 즉, 이들 전자부품의 신뢰성은 내부에 존재하는 Void나 계면박리등에 결정적으로 영향을 받는다. 비교적 큰 Void의 경우는

X선 검사법으로 검사가 가능하나 리드 프레임(lead frame)주위에 은밀히 숨겨져 있는 Void나 계면박리, 패키지내부의 수지크랙(resin crack)등의 검출은 곤란하다. 초음파영상법은 이들 미세결함이나 미소간극을 갖는 계면박리의 검출에 매우 효과적인 비파괴계측기법이다.

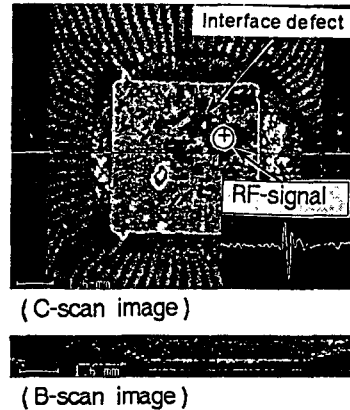


Fig. 11. Test result of LSI package.

Fig. 11는 집속형탐촉자(20MHz, 수중초점거리 20 mm)를 사용하여 LSI패키지 이면(裏面)으로부터 측정된 C-scan image(평면상)와 그 라인커서(line cursor)상을 X-Z Scan하여 영상화한 B-scan image(단면상)를 나타내고 있다. 이로부터 접합계면의 미소박리결함도 검출이 가능함을 알 수 있고, C-scan image 상의 커서위치에 탐촉자가 연동하여 필요한 RF파형

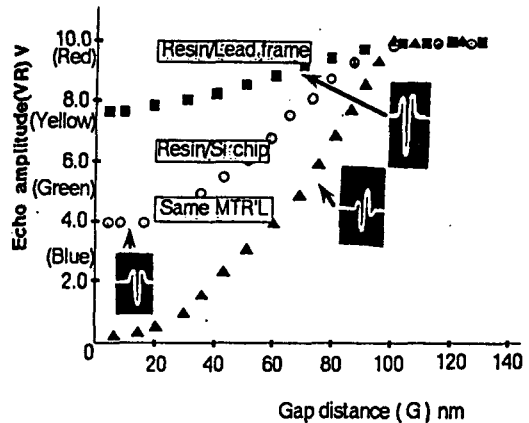


Fig. 12. Relationship between delamination gap and echo amplitude<sup>10)</sup>.



을 관찰해가며 플로피디스크에 저장하면 격리부와 접착부의 파형을 측정종료후에도 비교할 수 있다. 그리고 저장된 RF파형의 주파수해석을 하면 측정대상 물질이 갖는 초음파의 새로운 많은 정보를 얻을 수 있다.

Fig. 12는 반도체에서 초음파탐상시험후의 절단검사나 뉴우튼링(Newton Ring)을 사용한 반사거동실험 및 박리계면에서의 초음파의 변위(變位) 해석등과 함께 박리의 간극과 진폭과의 관계를 구한 한 예이다. 이 그림으로부터 0.02 $\mu$ m 정도의 접합계면에 간극이 있어도 초음파는 반사파가 존재하여 검출하는 것이 가능하다. Fig. 12은 펄스인가전압이 120V의 경우로 전압이 변하면 이들의 관계는 변화한다.

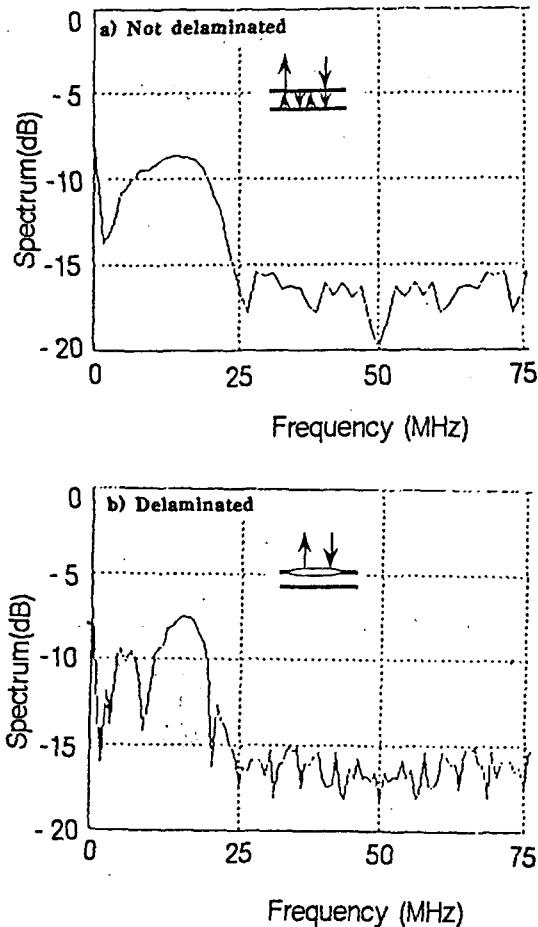


Fig. 13. Detection of delamination by using frequency spectra.<sup>10)</sup>

Fig. 13은 LSI패키지의 인너리드와 수지부계면의 박리유무를 주파수 스펙트럼의 패턴차로부터 조사한 예이다. 박리가 없을 때는 리드프레임에서 다중반사가 생기기 때문에 (b)와 같은 스펙트럼이 얻어진다.

Fig. 14는 파워IC의 Cu와 Si칩(chip)간의 납땜 접합부의 두께를 spectroscopy를 이용하여 측정한 예를 나타내고 있다. Fig. 14의 (a)는 시간영역의 파형, (b)는 그 스펙트럼이다. 스펙트럼의 dip 간극(극소치

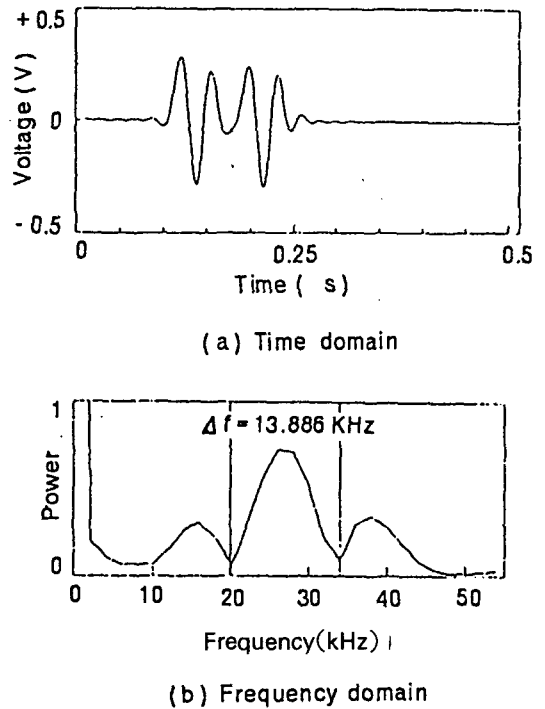


Fig. 14. Measurement of thickness of soldered layer in power IC.<sup>10)</sup> ( $\Delta f = 13.8$  kHz)

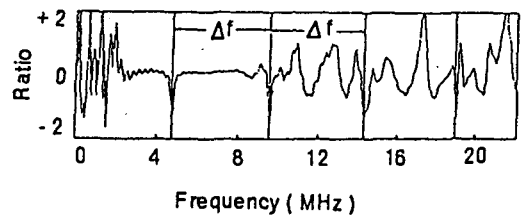


Fig. 15. The ratio of the power spectrum of multiple reflective waveform to that of base waveform in 240 $\mu$ m acryle thin film. ( $\Delta f = 5680$  kHz)

간의 주파수 간극차( $\Delta f$ )로부터 납땜층의 두께를 측정할 수 있다. 이 예는 두께가 약 70 $\mu\text{m}$ 의 경우이다. Fig. 15는 박막의 두께(240 $\mu\text{m}$ )를 알고 있을 때  $\Delta f$ 의 측정에 의해 박막재료가 갖는 음속을 측정할 수 있는 예를 나타내고 있다.

4. 4. 박막층에서 다중반사의 문제점과 대책

박막을 갖는 접착층의 접합면에 박리가 없는데도 C-scan image상에 완전히 박리가 되어 있는 것과 같은 결과가 나오는 경우가 있다. 이것은 박막(코팅층, 은페이스트의 층 등)에 의한 다중반사의 영향으로 계면반사파의 진폭이 변화하기 때문이다. Fig. 2와 같은 3층구조의 음향해석모델을 갖는 다중반사 모델의 박막에서의 반사파높이(음압반사율)는 종래의 음향임피던스의 차에 의한 음압반사율의 식으로는 구할 수 없고 다음 식을 이용하게 된다.

$$r = \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \frac{Z_1}{Z_3}}{(\frac{Z_1}{Z_3} + 1)^2 \cdot \cos^2(\frac{2nL}{\lambda}) + (\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3})^2 \cdot \sin^2(\frac{2nL}{\lambda})}}$$

..... (1)

여기서,  $Z_1$ : 재료1의 음향임피던스,  $Z_2$ : 박막, 인서트층의 음향임피던스,  $Z_3$ : 재료2의 음향임피던스,  $L$ : 인서트층의 두께,  $\lambda$ : 인서트층 두께에서의 파장이다. 위식에서 반사율(반사파높이)은 박막(코팅층)의 두께와 초음파의 파장(주파수)으로부터 어느 범위를 주기적으로 변화하게 된다. 따라서, 어느 경우는 박리가 없는데도 불구하고 반사율이 높은 진한 적색의 화상으로 나타나고, 어떤 경우는 검게 나타나기도 한다. 이 문제에 대한 대책으로는 다음의 2가지점을 생각할 수 있다.

- 1) 박막등에서 박리가 나타나는 화상이 얻어지면 탐촉자의 주파수를 바꾸어 다시 탐사를 한다. 박막층에서 다중반사의 경우는 Fig. 16에서와 같이 주파수에 의해 반사율이 변화하기 때문에 화상이 변하게 된다. 그러나 박리의 경우 전혀 변하지 않기 때문에 2가지의 주파수로 측정된 화상을 비교하면 박리인가 박막코팅의 영향인가 판별이 가능하다.

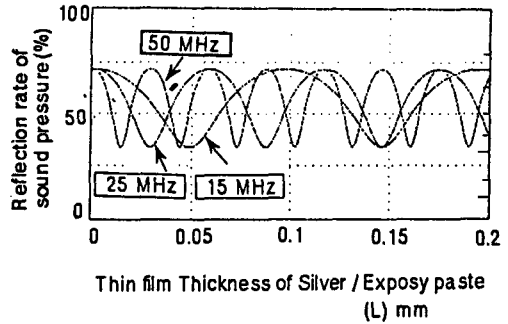


Fig. 16. Relationship between thin film thickness of silver/exposy paste and reflection rate of sound pressure.

- 2) 가장 확실하게 판별할 수 있는 방법은 반사파높이를 비교하는 방법이다. 박리해 있는 경우의 음압반사율은 100%가 된다. 따라서, 앞에 기술한 반사율의 값보다 절대적으로 높은 값이 된다. 완전히 박리해 있는 샘플이 없는 경우에는 시험체 표면에 빔을 집속시킨 경우의 표면반사파(박리부의 반사파로 간주)와 비교한다. 이 경우는 초음파감쇠의 보정이 필요하게 된다.

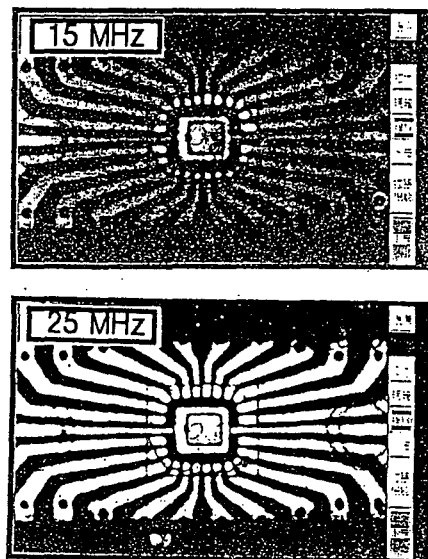


Fig. 17. Comparison of C-scan image between 25 MHz and 15 MHz.

Fig. 17은 LSI패키지(lead frame두께 250 $\mu$ m)를 측정 한 예로 (a)는 25 MHz(수직중에서의 실측주파수 13.1 MHz)의 탐촉자, (b)는 15 MHz(9.5 MHz)의 탐촉자로 측정한 C-scan image이다. 이 경우 25 MHz와 15 MHz의 비교를 위해 칩중앙부로부터의 반사파의 높이가 25 MHz와 15 MHz에서 같아지도록 계인을 조정하여 측정하면 칩중앙부에서는 같은 콘트라스트를 갖는 화상이 얻어진다. 그러나, 리드 프레임의 콘트라스트는 전혀 다르고 25 MHz는 밝고, 15 MHz는 약간 어두운 화상이 되어 큰 차가 있다. 마치 25 MHz의 측정결과는 박리처럼 보인다. 리드프레임부에서의 반사파의 전압을 측정하여 비교하면 25 MHz의 경우가 15 MHz 보다도 4.9 dB 높게 측정되었다. 이것은 앞에 기술한 얇은 층에서의 간섭에 의한 결과이다. (1)식으로부터 25 MHz와 15 MHz와의 리드프레임에서의 음압반사율을 계산하여 보면 25 MHz의 경우가 6.4 dB 높게 되어 실측치와 거의 일치한다.

5. 결론 및 향후 연구과제

이종재료 접합기술은 Fig. 1에서와 같이 상당히 많은 요인과 기술요소가 관련됨을 알 수 있었다. 본고(本稿)에서는 이 중에서 접합재의 접합강도에 결정적으로 영향을 미치는 접합계면의 박리·미접합부의 비파괴진단·평가에 유력한 초음파비파괴평가 기법을 응용한 예에 대해 보고하였다. 본고에 이어 정량적비파괴평가의 중요성과 방향성에 초점을 두고 앞으로 이 분야에 연구되어야 할 과제를 간략히 기술하면 다음과 같다.

1. Intelligent 초음파계측시스템의 구축

범용 비파괴재료평가분야에 활용가능하고, 특히 이종재료 접합재의 계면해석에 효율적으로 사용 가능하려면 다음과 같은 기능을 갖춘 Intelligent화 된 초음파계측시스템의 개발이 요구된다.

1) Auto-focus의 기능

피검체 단면에 대해 계단형(또는 경사)로 주사하여 얻는 stairing (slope) image (S-image)를 보아 가면서 소정의 위치(깊이)에 커서를 맞추어 그 위치에서 평면상을 얻으면 초점이 정확히 맞추어진 C-scan image를 얻을 수 있다.

2) Spectroscopy 해석기능

C-scan image상의 커서위치에 탐촉자가 연동하여 그 부분의 RF파형으로부터 반사파높이와 위상정보의 확인과 함께 RF파형을 저장하여 수시로 진폭스펙트럼과 위상스펙트럼의 정보를 충분히 활용가능해야 한다.

2. 고속 전자주사(電子走事, electronic beam scanning)화

Fig. 18로부터 쉽게 알 수 있듯이 기계주사는 단일 탐촉자의 기계적인 지그재그이동에 의하기 때문에 상당한 주사시간을 요한다. 이에 대해 전자주사는 X 방향의 주사는 array탐촉자의 빔을 전자적 switching에 의해 고속으로 하고, Y방향에는 array탐촉자 또는 피검체를 이동하기 때문에 주사에 필요한 소요시간이 비약적으로 단축된다.

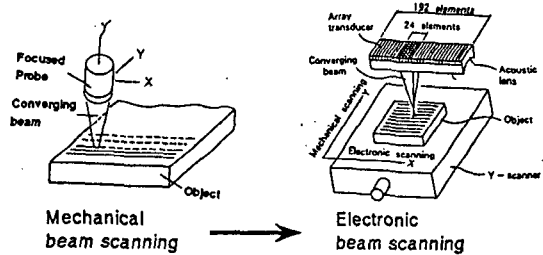


Fig. 18. Mechanical and Electronic beam scanning modes in C-scan ultrasonic imaging.

3. 검사공정의 자동화 및 전문가시스템화

(인공지능(AI)기술의 neural network나 fuzzy등의 활용)

전문가의 경험과 지식을 체계화하여 최적의 검사 조건을 지원하고 고정도의 시험데이터와 해석데이터를 축적하고 데이터베이스(database)화하여 이로부터 관련규격에 근거 결함의 등급분류나 판정규칙을 도출해 낼 수 있는 그야말로 검사시스템의 꽃이라 불리는 전문가시스템(expert system)의 개발이야말로 이상의 모든 문제점을 총합적으로 해결할 수 있을 것이다.

끝으로, 본고(本稿)의 작성에 많은 참고자료와 조언을 주신 일본비파괴검사협회 제2분과회 215소위원장 小倉위원장, 佐佐木 박사, 그 이외 제2분과회원 여러분께 이 지면을 통해 감사사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 野中 壽夫, “超音波による新素材の缺陷検出”, 日本非破壊検査協會, 新所在及び“その製品の非破壊試験シンポジウム”論文集(1988), pp. 126-130
- 2) 武捨 義則 他, “25 MHz 超音波によるはんだ”接合部の映像化試験”, 日本非破壊検査協會 第2分科會, NDI資料 21338(1991), pp. 52-58
- 3) 立川 他, “集束探觸子による薄板はんだ”継手の超音波試験”, 日本熔接學會論文集, 第7卷 第4號(1989), pp. 519-524
- 4) 永井 崇之 他, “異材接合材の超音波探傷法の開發”, 日本非破壊検査協會 平成 6年度 春季大會講演概要集(1994), pp.31-34
- 5) S. Takeshita, “Application of Two-Dimensional Ultrasonic Spectroscopy to Nondestructive Inspection”, Materials Evaluation(Dec. 1990), pp. 1473-1477
- 6) 石川 潔, “超音波顯微鏡によるセラミックス金屬接合部の評價”, 日本非破壊検査協會, 新素材及び”その製品の非破壊試験 シンポジウム”論文集(1988), pp. 126-130
- 7) オリバ・ライト 他, “ピコ超音波法による薄膜の非破壊評價”, 日本非破壊検査協會 平成 5年度 秋季大會講演概要集(1993), pp.41-46
- 8) 小川 岳夫 他, “レーザ”超音波による材料評價裝置の開發” 日本非破壊検査協會 平成 5年度 秋季大會講演概要集(1993), pp.217-218
- 9) 藤井 正司 他, “電子部品用X線マイクロCT”, 日本非破壊検査協會 平成 6年度 春季大會講演概要集(1994), pp.91-94
- 10) 小倉 幸夫, “半導體の超音波探傷試験”, 日本非破壊検査協會 第2分科會 超音波による非破壊評價シンポジウム(1993), pp. 61-67
- 11) Peter B. Nagy and Laszlo Adler, “Ultrasonic Evaluation of Solid-State Bonds” Materials Evaluation, Vol. 47, No. 7(1989), pp.935-943
- 12) 박 익근 외, “초음파에 의한 SPOT용접부의 비파괴평가”-제1보 화상기법을 중심으로-, 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 논문집(1993), pp. 13-28