

# 결함 및 구조물의 안전성에 있어서 비파괴평가

- 비파괴평가의 목적과 유효성 및 재료의 결함 -

## Nondestructive Evaluation on Safety Assurance of Structures and Defects

- Effectivity and Goal of NDE, Defects of Material -

남 기 우

K. W. NAM

### 1. 머리말

우리주위를 둘러보면, 여러 가지 기기에 의해 둘러싸여 있는 것을 느낄 수 있다. 이러한 기기는 금속, 세라믹, 플라스틱 등의 여러 가지 소재로 되어 있다. 그리고, 우리들은 이러한 재료와 구조물을 일상생활에서 별 관심없이 사용하고 있다. 그것은 이러한 제품의 신뢰성이 충분히 확보되어 있기 때문이다. 그리고 신뢰성을 보증하기 위한 수단으로는 「비파괴평가」(nondestructive evaluation, NDE) 라는 수단을 사용하고 있다.

비파괴평가란 이러한 재료, 기기, 구조물이 사용가능하다는 것을 보증하기 위하여 사용되는 방법이다. 문자 그대로 시험대상물을 흠 내거나 파괴하지 않고, 재료 내부 및 표면의 결함 유무를 조사하기도 하고, 혹은 시험대상물의 성질, 상태, 내부구조 등을 알기 위하여 실시하는 평가전체를 나타낸다. 더욱이 이 시험대상물의 건전성과 신뢰성의 평가도 실시한다. 그러기 위해서는 시험대상물의 빛, 방사선, 초음파, 전기, 자기 등에 대한 응답특성이 내부조직의 이상과 결함의 존재에 의하여 변화하는 것을 원리로 이용하고 있다. 비파괴로 재료·구조물의 특성을 평가하는 것이 재료를 파괴하여 비로소 재료특성을 이해 할 수 있는 재료시험과 크게 다른 점이다.

비파괴평가 시험법으로는 방사선검사, 음향검사, 표면검사 및 응력·변형률측정 등 많은 방법이 있다. 또, 최근에는 새로운 원리를 기초로 첨단적 비파괴평가법도 제안, 개발되어지고 있다. 이러한 방법은 각각 장점과 단점이 있으므로, 어떤 방법을

이용하는가는 목적에 의하여 달라진다. 이를 위하여 각각의 목적에 해당하는 가장 적당한 시험방법 및 적용이 필요하게 된다.

비파괴평가는 결함(defect)과 강도(strength)의 관계를 정량적으로 이해하기 위하여 사용되고 있다. 그리고 제조과정중에 생기는 조직의 이상과 결함의 발생을 검출하므로써 제조과정의 개선하기 위해서도 이용되고 있다. 더욱이 구조물의 사용 가능한 응력 및 수명(life time) 등을 평가하는 것도 가능하다. 이와 같이 비파괴평가는 제작된 재료·구조물의 단순 시험법이라는 점만이 아니라, 재료 설계, 제조과정, 품질보증과 깊이 관계된 중요한 기술이다. 또 결함은 유해한 면과 무해한 면이 있으므로, JIS규격에서는 흠 flaw)이라 부르고 있으나, 여기서는 재료 중에 존재하는 이상부분이라는 의미에서 결함이란 용어를 사용한다. 또 결함 중에서 예리한 형상의 것은 균열(crack)이라 부르고, 또 그다지 예리하지 않은 것은 노치(notch)라 한다.

또 최근 제품의 품질에 대한 요구가 엄격해졌고, 제조자의 제품에 대한 책임을 엄격하게 요구하고, 제조물 책임(products liability)법(PL법)이 시행되어 생산자가 제품의 품질을 한층 엄중히 관리하고, 보증할 것을 요구하고 있다. 따라서 제품의 신뢰성을 확보하기 위하여 비파괴평가의 역할도 보다 중요하게 되었다.

따라서 본보에서는 비파괴평가의 목적과 유효성에 대해 논하고, 비파괴평가의 대상이 되는 재료의 결함 대하여 간단히 서술하고자 한다.

### 2. 비파괴평가의 정의

접수일 : 1999년 1월 6일  
남기우 : 부경대학교 재료공학부

자주 사용되는 비파괴시험(nondestructive test-

ing, NDT), 비파괴검사(nondestructive inspection, NDI)라는 용어에 대하여 설명한다.

비파괴시험이란 단순한 결합 검출 수법을 의미하는 것으로 즉 물리적 원리에 기초로 한 각종의 시험법이고, 비파괴검사는 시험대상물에 대한 비파괴시험의 결과와 어떤 판정 기준으로 그 대상물이 사용가능한가 어떤가의 판정에 의해 진행되는 검사를 의미하고 있다.

게다가 비파괴평가란, 사용하는 재료의 부하조건, 환경조건을 이해하고, 균열에 대한 역학인 파괴역학(fracture mechanics)을 사용해서 재료의 안전성과 수명을 예측하고, 종합적인 재료의 건전성을 평가하는 수법을 의미하고 있다. 따라서 비파괴평가는 간단히 결합의 시험기술이라고 하기보다는 어떤 종류의 재료평가수법으로, 또 재료특성을 종합적으로 평가한다는 의미로 중요한 평가법이라고 말할 수 있다.

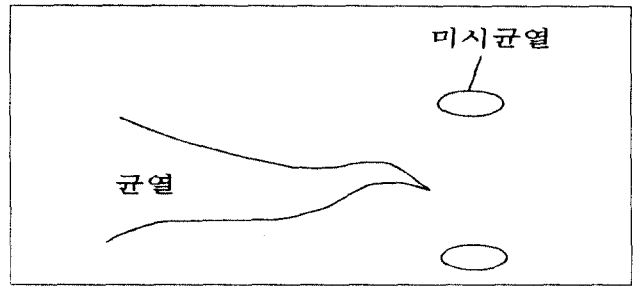
이와 같이 비파괴 평가는 재료 및 구조물의 기능, 신뢰성을 종합적으로 판단하는 요소기술이다. 예를 들어 알루미늄과 티타늄합금으로 된 항공기 부재 등에서는 신뢰성확보를 위하여 비파괴평가가 용이한 구조물 형상이 요구되고 있다. 이것은 비파괴평가가 구조설계에서도 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다. 따라서 현재 개발이 진행중인 각종 복합재료, 세라믹, 금속간화합물로 된 부품에 있어서도 이와 같은 비파괴평가가 용이한 부품형상을 만드는 설계가 당연히 고려될 필요가 있다.

재료와 제품의 제조기술은 형태를 가진 유용한 구조물의 제작 상에서도 상당히 중요한 기술요소이지만, 이와 같은 비파괴평가도 제작된 재료와 구조물을 유효하게 이용하는 기술로서 중요한 기술요소라고 말할 수 있다.

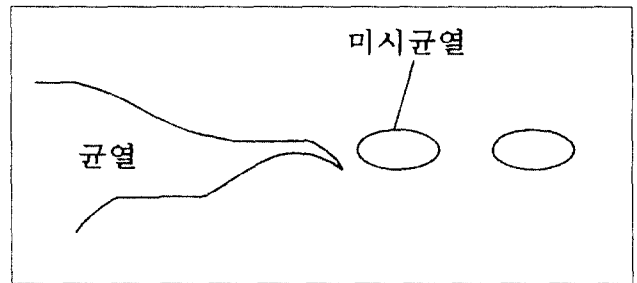
재료내에서 존재하는 결함에서는 결함의 종류, 형상, 또는 부하된 응력에 의존해서 직접 파괴에 이르는 유해한 결함과 직접 파괴에 이르지 않는 유해도가 낮은 것이 있다. 이것을 Fig. 1에 나타낸다.

이들을 고찰하는 것은 결함을 검출만 하는 단순한 비파괴시험이 아니고, 종합적으로 재료의 건전성을 평가한다는 비파괴평가가 된다. 따라서 비파괴평가를 실시하기 위해서는 비파괴 시험법의 원리를 이해하고, 시험법을 숙지하는 것만이 아니고, 재료와 구조물에 어느 정도 응력을 가해서, 또 어느 정도에서 파괴하는가라는 재료에 있어서 고유의 파괴과정을 이해하는 것이 필요하게 된다. 만일 그것이 되지 않으면, 어떠한 결함의 검출이 가능해도 재료의 건전성을 확보할 수는 없게 된다.

여기서 직접파괴로 연결되는 결함이란, 재료내를



(a) 균열면 상하의 미시균열은 균열의 응력집중을 완화시켜 진전을 어렵게한다.



(b) 균열전방의 미시균열은 균열진전을 촉진한다.

Fig. 1 유해한 결함과 무해한 결함

관통하는 것과 같이 진행하는 균열로 이 현상을 균열진전이라 한다. 균열진전개시의 저항을 나타내는 역학적 파라미터를 인성 혹은 파괴인성(fracture toughness)라고 하고, 이것은 균열에 대한 역학인 파괴역학의 중심적인 개념이다. 이것은 균열이 없는 경우, 재료가 파괴되기 어려운 정도를 나타내는 응력의 한계치로서 강도와 함께, 재료의 비파괴평가를 고려함에 있어서 대단히 중요한 파라미터이다. 비파괴평가를 실시하고, 재료의 종합적인 건전성과 신뢰성을 의논하는 과정에서 반드시 필요하게 되는 개념이다.

또 실제로 재료를 사용함에 있어서 중요한 것은 반복응력이 가해진 경우와 부식환경하에서의 균열진전이다. 이 균열진전은 균열의 기점이 되는 초기결함의 존재와 그 후의 균열성장으로 구성된다. 균열성장속도도 재료에 따라서 다르고, 인성이 큰 재료는 일반적으로 균열진전의 속도가 느리다. 취성재료에서는 초기결함, 균열성장, 최종파괴에 이르는 속도가 크므로, 조기에 초기결함을 발견하지 않으면 안된다. 또 단순히 결함의 크기만이 아니라, 그 결함이 재료의 강도와 수명에 미치는 영향을 확실히 함으로써 비로소 비파괴평가가 가능하게 된다.

### 3. 보증시험

품질보증 기술에는 비파괴평가 외에 보증시험 (proof testing)이라 불려지는 것이 있다. 이것은 검출할 필요가 있는 결함이 대단히 작으므로 비파괴평가를 실시하기 힘든 경우 등에 사용된다.

세라믹제품은 이와 같은 경우로 신뢰성평가를 위해서는 보증시험이 적용된다. 이 시험에서는 부재의 최대 사용응력  $\sigma_a$ 를 초과하는 부하  $\sigma_b$ 를 사용 전에 가하여, 그 제품에 가해진 응력  $\sigma$ 가  $\sigma < \sigma_a$ 의 조건으로서, 그 제품의 사용을 보증하는 것이다.

그렇지만, 반복피로와 응력부식균열의 존재 조건 하에서는  $\sigma < \sigma_a$ 의 범위에 있어서도 안정균열성장이 발생하므로, 완전하게 이 제품의 사용을 보증하는 것은 아니다. 따라서, 만일 이와 같은 보증시험만으로 제품의 신뢰성을 확보한다면, 제품 사용중에도 사용을 중지하고 때때로 보증시험을 실시하고, 제품 사용의 보증을 실시할 필요가 있다. 그런데, 보증 시험중에 균열성장이 발생할 가능성도 있으므로, 이 방법은 반드시 확실한 신뢰성과 건전성을 보증하는 것은 아니다.

또, 실제 제품이 아니고, 같은 제조과정에서 제작한 몇 개의 동등품에 대해서, 보증시험을 실시함으로써 제품 전체의 신뢰성을 확보한다는 사고 방식도 있다. 그러나, 그 제품에 대한 특성의 분산 등을 고려하면, 역시 보증 시험 단독만으로는 반드시 충분한 신뢰성 보증을 할 수 있다고는 말할 수 없다. 이와 같이 비파괴평가가 어려운 세라믹에서는 보증 시험만으로 신뢰성을 확보하는 시도도 실시되어지고 있다. 그렇지만, 인성이 높은 금속재료에 있어서도 중요부재는 비파괴평가와 보증시험을 병행하고 있다. 재료시험과 제품 부재의 재료 특성이 다른 것을 고려한다면, 비파괴평가를 제외한 재료의 신뢰성 확보는 어렵다고 할 수 있을 것이다. 특히 취성적인 무기계 재료의 개발에 있어서는 비파괴평가법은 제일 중요한 기술이라고 말할 수 있다.

### 4. 목적과 유효성

앞절에서 논한 것과 같이 비파괴평가란 시험대상물을 파괴하지 않고, 재료, 구조물 등의 품질관리와 품질보증을 실시하는 방법이다. 그리고 재료의 신뢰성은 몇 개의 기술요소가 서로 잘 조합되어 비로소 달성되는 것이다. 현재 비파괴평가가 유효하게 이용되고 있는 기술요소를 크게 분류하면,

(1)신소재의 개발, (2)제조과정의 개선, (3)품질보증 및 수명평가의 세가지를 들 수 있다.

#### (1)신소재의 개발

첨단적인 기술의 하나로서 신소재를 들 수 있는데, 그 개발에 크게 기대가 모아지고 있다. 우리가 사용하고 있는 재료를 크게 분류하면, 구조재료와 기능재료로 나눌 수 있다. 간단히 논하면, 구조재료란 교량, 자동차, 선박, 항공기 등에 사용되어지는 고강도 재료를 말한다. 이와 달리, 기능 재료는 반도체, 각종 센서 등으로 광학적, 전기적, 자기적, 화학적 성질이 우수한 이른바 지적재료이다.

이러한 신소재 중에서, 특히 구조용의 신소재는 극저온, 초고온의 상태에서 사용되기도 하고, 방사선, 충격하중, 열충격 등의 가혹한 조건하에서 사용되어지는 경우가 많다. 이와 같은 조건을 극한 환경이라 하고, 여기에 사용되는 재료를 극한 재료라고 한다. 이와 같이 신소재의 대부분은 극한 환경에서 사용되어지게 되고, 이와 같은 환경에 견디는 내환경재료의 개발이 신소재 개발의 한 과제이다. 예를 들면, 개발이 기대되는 우주항공 분야의 우주 왕복기 등에서는 세라믹, 복합재료, 금속간화합물 및 경사기능재료 등 초고온에서 견딜 수 있는 고강도 경량의 구조용 신소재의 개발이 필요하게 되었고, 또 심해저 탐사선 등에서는, 초경량, 초강력 티탄합금의 개발이 진행되어지고 있다. 이와 같이 앞으로의 첨단 기술은 바이오테크놀로지, 일렉트로닉스와 함께 신소재의 개발에 크게 의존하고, 신소재개발은 앞으로의 기술혁신에 있어서 중요한 기반기술이라 할 수 있다.

이와 같은 신소재로서는 일부 금속재료가 대상이 되지만, 세라믹, 유리, 금속간화합물, 고분자 복합재료 및 탄소/탄소 등의 첨단적인 복합재료가 주 대상이다. 그리고, 이러한 재료는 취성적으로 신뢰성이 낮은 것이 문제가 되고 있다. 그래서, 이후의 신소재는 인성이 높은 것, 즉 질긴 재료일 필요가 있다. 이것은 앞에서 논한 것과 같이, 균열이 진전하기 힘들고, 점성(들러붙는 성질)이 있어 파괴하기 힘들다는 역학적 특성을 의미한다.

그런데, 재료설계의 목적으로서는 취성을 극복하고, 고인성을 가진 재료를 개발하는 것이다. 그 때문에 최종적인 파괴에 이르기까지의 과정을 명확하게 하면서, 인성향상을 위한 재료 설계 방법을 확립해야 한다. 이것은 거의 대부분의 재료, 구조물에 있어서는 갑작스러운 파괴가 발생하지 않고, 재료의 여러 곳에서 많은 종류의 미시적인 파괴가 생겨서 최종적으로 파괴에 이르는 경우가 많기 때

문이다. 따라서, 재료의 인성을 생각한다면, 그 재료 특유의 파괴 과정을 이해하는 것이 중요하다. 이와 같이 미시적인 파괴기구의 해명을 위해서는 개개의 미시적인 파괴의 검출 및 특성 평가가 중요하며, 비파괴적인 결합 검출은 중요한 기술 요소가 된다. 이를 위한 결합 검출기술은 세라믹과 복합재에 필요한 기술수준에는 미치지 못하고 있으나, 재료개발을 진행함에 있어서 중요하고, 신소재 개발의 기술요소로서 도움이 될 것으로 기대된다.

### (2)제조 공정의 개선

어떤 제조기술에 의한 재료와 구조물의 제작이 가능하게 될 경우, 다음에 문제가 되는 것이 그 제품의 신뢰성을 확보하는 것이다. 이것은 제품의 품질을 어느 일정 수준을 유지하는 것, 즉, 그 제품에 존재하는 결함을 어느 수준이하로 하는 것을 의미한다. 또, 제품의 품질을 어느 일정 수준으로 유지하는 것은 분산이 적은 공정의 확립을 의미한다. 이 목적을 위해서도 비파괴평가는 상당히 도움이 된다. 즉, 어떤 결정된 품질의 제품을 만들고자 할 경우나, 제품 제작을 위한 제조기술이 적절한가를 확인하기 위해서 비파괴평가를 적용하는 것이 가능하다. 우선, 그 제조기술에 의한 시작품을 만들고, 그것에 대한 비파괴시험을 실시하고, 어느 일정 수준의 품질의 것이 얻어질 수 있는가를 확인한다. 만일 적절하지 않는 것이 있으면, 그 발생 원인을 파악하여 제조기술을 개량시킨다. 그리고, 개개의 제조과정에서 문제점을 전부 해결하고, 최종적으로 기대되는 품질의 제품이 안정하게 얻어질 수 있는 제조 기술을 확립한다. 또 그 과정에서는 발생하는 결함의 특징을 잘 이해하여, 그 결함을 충분히 검출 가능한 비파괴 시험법을 선택하고 이용하는 것이 중요하다.

이와 같이 비파괴평가를 실시하기 위해서는 여분의 검사비용이 들고, 제조단가를 상승시키는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 비파괴평가를 실시함으로써, 도중에 발생하는 결함을 발견하지 못하고, 다음 공정으로 이동하고, 제조 최종단계에서 제품이 불량품인 것을 발견하는 잘못을 없앨 수 있다. 또, 최초의 제조조건을 결정하는 과정에서 비파괴평가를 적용함으로써, 충분한 품질의 제품이 제작될 수 있도록 제조조건이 결정된다면, 이후에는 개개의 제품의 품질을 전부 조사할 필요가 없게 되고, 오히려 생산단가의 저하를 기대할 수 있다. 또 제조공정이 변경된 경우에도, 그 영향만을 분명히 하는 적절한 비파괴평가를 실시하는 것이 가능하고, 품질을 확인해 가면서 각 공정에서의 문

제점을 해결해 나가면 된다.

비파괴평가를 실시하는 것은 처음에는 여분의 공정 수와 비용이 들어, 제조단가의 상승을 초래하는 것 같이 보이지만, 전체의 생산단가를 고려하면 반드시 그런 것도 아니다. 비파괴평가를 실시하지 않았기 때문에 제품의 사용개시후의 보수비용과 파괴사고가 발생한 경우의 물적, 인적 피해에 대한 보상에 비교한다면, 비파괴평가의 비용은 반드시 큰 것만은 아니다. 또 제조 단계에서 발견되는 불필요한 보수는 비교적 용이하고, 적은 공정과 싼 비용으로 보수를 실시하는 것이 가능하다.

특히 고가인 재료와 구조물에 있어서는 최종제품에 이르기 전인 반제품의 단계에서 충분한 품질을 갖지 않는 것을 제거할 필요가 있다. 여기에는 각 공정마다 반제품의 상태를 판정하는 것이 필요하고, 이 의미에서도 비파괴평가의 중요성이 인식되어질 것이다.

### (3)품질보증 및 잔여 수명평가

제조공정의 개선에 의하여 충분한 품질의 재료와 구조물의 제작이 가능한 경우, 그 다음에 문제가 되는 것은 역시 그 각각의 제품의 신뢰성을 확보하는 것 즉, 각각의 제품의 품질보증이다. 신뢰성의 정의는 재료, 구조물의 종류, 사용목적에 의해 다르다. 예로서 보통의 건물에 사용되어지는 콘크리트의 경우에서는 다소 금이 있어도 그 건물의 구조를 지탱할 수 있는 강도가 유지된다면, 구조물의 신뢰성은 잘 확보되어 있다고 말할 수 있다. 그러나, 만일 콘크리트가 방수를 위해 사용되어진 경우에는 작은 균열에도 누수의 원인이 되고, 이미 그 구조물의 신뢰성이 확보되어 있다고 말할 수 없을 것이다. 혹은 자동차용의 강판의 표면의 상처는 그 제품의 강도자체에는 그렇게 영향을 미치지 않을 것이다. 그러나 미적 관점에서는 그 상처는 제품의 가치를 크게 저하시키게 된다.

이와 같이 신뢰성과 품질보증의 의미는 재료와 구조물의 종류, 사용목적에 크게 의존하고 있다. 그러나, 일반적인 공업제품의 경우의 신뢰성에 대한 평가의 파라미터로서는 ①그 제품 성능의 분산을 나타내는 통계적량, ②초기의 성능에 대한 제품의 일부 혹은 전부가 파손하는 것에 의하여 저하한 성능의 비율, ③어떤 사용조건 하에서 제품의 파손없이 초기의 성능을 만족하면서 가동이 기대되는 기간에 대한, 실제로 가동한 기간의 비율 등을 고려하는 것이 가능하다. 여기서 제품의 열화, 즉 제품의 일부 혹은 전부가 파손해 소기의 성능이 만족될 수 없는 상태가 일어나는 원인으로는

그 제품을 구성하는 재료의 문제, 그 제품의 구조 설계의 문제, 더우기 그 제품의 제조에 있어서 문제, 그 제품을 사용하는 방법의 문제, 혹은 역학적 조건을 포함한 사용환경의 큰 변화 등을 들 수 있다. 어떠한 원인의 경우에 대하여 제품의 열화와 손상이 발생하는 확률을 가능한 한 낮추도록 하여야 한다.

그것을 위한 수단으로서 비파괴평가의 적용이 유효하다. 즉, 제품을 구성하는 재료자체의 특성을 확실히 파악하기 위하여 비파괴평가를 사용해서 소재의 상태를 판단한다. 더욱이 제조공정에 있어서 비파괴평가를 사용하므로써 제조기술의 상태를 판정하고, 최종제품에 대한 비파괴평가를 실시한다. 그렇게 함으로써 열화와 파손을 일으킬 가능성이 있는 요인을 선별하여 그것을 배제하기도 하고, 혹은 제품의 수리나 보수를 실시함으로써 그 제품이 열화되거나 파손되는 확률을 낮추는 것이 가능하다.

혹은 사용중의 기기, 구조물에 있어서도 열화나 파손이 생길 염려가 있는 개개의 요소에 대하여 적절한 비파괴시험을 적용함으로써 내부결함 혹은 표면결함 유무를 조사하고, 건전성을 평가하고, 필요한 경우에는 가능한 범위에서 보수를 실시하여 그 제품의 건전성을 확보한다. 또 사용 가능 기간인 잔여수명을 평가함으로써 신뢰성을 확보한다. 이렇게 하여 어떤 사용조건에 있어서 기대 되는 신뢰성을 보다 한층 높이는 것이 가능하다.

이와 같이 재료의 선택에서 제품의 제조, 혹은 그 사용의 여러 가지 단계에 있어서, 그 단계에 있어서 고려되는 결함에 대하여, 그 결함의 검출에 유효하고 적절한 비파괴시험법을 적용하여 비파괴평가를 실시함으로써 비로소 제품의 건전성을 확인하고, 그 신뢰성을 향상시키는 것이 가능하게 된다. 그러므로 단지 적당한 비파괴시험법을 적용한다 하더라도 제품의 신뢰성 향상을 도모하는 것은 불가능하다. 충분히 목적을 고려한 후에 그것에 가장 적당한 비파괴시험법을 선택할 필요가 있다. 더구나 정확한 시험기술로 실시하여야 한다. 그러기 위해서는 각종의 비파괴시험법의 원리를 잘 이해하고 착오없이 적용할 필요가 있다.

## 5. 결 함

### 5.1 결함의 종류

비파괴평가의 분야에 있어서 결함이란, 소재 및 기기·구조물에 존재하는 불연속부 및 불균질부를 포함한 이상부분을 나타내는 말로 환경조건(응력,

열, 분위기 등)에 의하여 유해한 인자로서 작용하는 것과 작용하지 않는 것이 있다. 예를 들어, 균열은 무엇보다도 유해한 결함으로 일반적으로 생각되어지나, 치수(길이×높이), 형상 및 그것에 가해지는 응력의 종류와 크기에 따라서 반드시 유해한 결함이라고 할 수 없는 경우도 있다.

다만, 그와 같은 균열이 발생하게 되기까지의 공정에는 무엇인가의 제조조건 혹은 사용조건이 착오가 있는 것으로 생각되어지고, 품질관리 혹은 품질보증상의 관점에서 적절한 대책을 세워야 한다. 이와는 반대로, 개재물 등은 어느 정도까지는 허용하였다고 하여도 어쩔 수 없는 결함으로 인정되는 경우도 있으나, 그 형상에서 예리한 각을 가진 형태를 한 것은 균열과 같은 유해한 인자로서 작용하는 것도 있다. 따라서, 결함이 존재한다고 해서 바로 유해하다고 결정지어서는 안 된다. 이와 같이 유해한가 무해한가를 판단하는 경우에는 작용하는 응력과 결함 위치와의 관계가 중요한 인자가 된다.

또 검출의 대상이 되는 결함은 언제 그 결함이라도 도입되었는지에 의하여 이하와 같이 분류된다.

- (1)제조공정에 도입된 주로 내부결함
- (2)기계가공중 및 처리공정중에 도입된 주로 표면 결함
- (3)부품, 제품의 사용중(공용중) 또는 환경에 의해 생기는 결함

더욱이, (1)과 (2)는 재료와 구조물을 사용하기 이전에 존재하는 의미로 초기결함(initial defect)이라 하고 (3)은 재료와 구조물의 열화, 손상을 초래한다.

### 5.2 초기결함

올바른 비파괴시험을 실시하기 위하여 소재, 용접부 등에 발생하는 결함의 종류를 예상하여야 하며, 그러기 위해서는 각종재료, 용접부 등에 발생하는 결함에 대하여 지식을 가지고 있어야 할 필요가 있다. 단, 여기서 말하는 결함은 제조 단계에서는, 제조과정에서 작업관리를 충분히 실시하므로써 방지할 수 있는 종류의 것이다. 또한, 결함의 종류, 양, 크기에 의해서는 설계조건으로써 주어지는 통상의 운전조건에서 재료, 기기, 구조물 등의 건전성이 손실되는 원인이 될 우려가 있다. 한편, 정기검사에서 발견되는 결함의 일부는 제조시의 검사에서 발견되지 못한 것도 있지만, 사용 중에 발생 혹은 성장한 것이 많다. 따라서, 그대로 방치하면 파괴에 이르는 발생원이 될 수 있는 유해한 것이다.

각종 재료 및 용접부에 발생하는 주요한 결함의

종류와 발생원인은 이하와 같다.

(1)강판 및 용접부의 결함

층상결합은 압연방향에 얇은 층상으로 발생하는 내부결합으로 강괴 중에 수축공, 블로우홀, 슬래그 혹은 내화물이 잔류해 있어서 미압착 부분이 발생한 것이다.

비금속개재물은 잉곳 제조시 슬래그, 탈산생성물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, SiO<sub>2</sub>, MnS 등), 그 외의 불순물이 함께 포함된 것으로 미소한 것이 많다. 이와같은 미소한 비금속개재물은 존재위치, 크기, 밀도 등에 의해서는 용접부에 발생하는 결함의 원인이 되기도 하고 역학적 성질에 영향을 미치나, 강재의 용도에 의해 유해성의 정도가 다르다.

표면결합은 부풀음, 각종균열, 잉곳 제조시의 스플래시나 용탕의 혼적이 많은지 블로우홀이 존재하는 경우에 발생하기 쉽고, 산화물의 혼입에 의해 발생하는 움푹패인 혼적등이 있다.

용접부균열은 그 발생온도에 의해 고온균열과 저온균열로 대별된다. 고온균열은 주로 용접금속 혹은 열영향부가 응고 과정의 높은 온도에서 아직 연성이 부족한 상태에 있을 때의 인장력에 의해 발생하는 것이다. 용접금속은 응고해서 수축하고자 하나, 주위의 모재에 의해 구속되기 때문에 결과적으로 인장력이 작용한다.

용접부 저온균열은 용접부가 약 300℃이하가 되면 생기는 것으로, 용접부의 수소취화, 저온에서 발생하는 인장응력 및 용접금속 혹은 열영향부의 경화와 연성 저하가 원인이다. 이 중에서 용접후 장시간 경과 한 후에 발생하는 균열을 특히 지연 균열이라 한다. 지연균열을 검출하기 위해서는 용접 종료 후 적어도 24시간 이상 경과한 후 비파괴시험을 실시할 필요가 있다.

용입불량은 루트면이 용융되지 않고 그대로 남아있는 것으로, 개선각도가 너무 작은 경우나 용접봉의 선택이 잘 못되었을 때 발생한다. 일반적으로 용입불량은 외부에서 잘 발견할 수 없는 것으로 이음의 강도가 약하게 되고, 특히 이 부분에 반복하중이 작용하면 균열이 일어날 수 있다. 용입불량은 홈의 폭과 모양, 모재 두께에 따른 용접봉의 지름, 용접전류, 운봉법을 잘 선택하면 방지할 수 있다.

(2)세라믹의 결함

세라믹 파괴 원인이 되는 내부결합으로는 재료를 소결 성형할 때에 기공 혹은 다공역, 혼입이물 및 이상성장 결정립이 생각되어 진다. 기공상 결함

은 주위에 이방성을 동반하고, 또 혼입이물과 이상립은 균질성을 잃고, 이에 따라 응력집중원으로 강도, 인성을 저하시킨다.

그렇지만, 주의해야할 결함은 균열상 결함으로 동일한 크기의 결함에서도 원공상결함에 비교해서 응력집중이 크고, 월등하게 유해하다. 이 균열상 결함은 그 크기에 비하여 균열 개구량이 작으므로, 방사선투과, 초음파탐상등에서는 검출하기 어려운 경우도 많다. 그렇지만 파괴역학적 고찰에 의해 검출해야 할 결함의 크기를 구하는 것이 가능하다. 최종 불안정파괴의 기점이 되는 검출해야 할 균열의 크기는 60~600 $\mu$ m, 시간 의존형의 균열진전에 의하여 수명을 평가할때의 크기는 20~200 $\mu$ m, 그리고 파괴인성 향상 등에 기여하는 재료 조직제어에 필요한 결함으로는 1~50 $\mu$ m정도의 결함검출이 필요하다고 말할 수 있다.

(3)섬유강화복합재료의 결함

한편, 복합재료의 비파괴검사에 요구되는 기술은 세라믹과는 크게 다르다. 예로써 CFRP적층재에서는 허용결함의 크기는 공공율로서 약 0.5%, 층간 박리로서 약 1mm정도로 세라믹의 허용 결함 치수에 비하면 큰 값이다. 그러나 종래의 비파괴검사법을 적용하기에는 이하의 문제가 거론되어 진다.

- ①불균질이방성재료이다.
- ②비자성재료이다.
- ③기포, 공공, 박리 등의 결함에 대하여 섬유와 수지의 탄성과, 방사선, 자기파등의 투과, 반사에 있어서 물성차가 작다.
- ④수지중의 섬유와 충진재는 결함과의 식별이 어렵다.

따라서, FRP를 대표로 하는 복합재료에서는 금속재료와 같은 균질등방재료와 크게 다르기 때문에 새로운 비파괴검사법만이 아니라, 비파괴평가법의 개발이 필요한 것이 현실이다.

5.3 열화, 손상

기기, 구조물 혹은 부품이 항복점 혹은 내력 이상의 과대한 응력을 받으면 소성변형을 하고, 처음의 형상으로 돌아갈 수 없게 되고, 그 기능을 잃는 경우가 있다. 그때, 그것들의 물체는 파손되었다고 한다. 또, 소성변형 후에 균열이 생기고, 이 균열이 더욱 발전해 마침내 완전히 2개로 분리되는 경우를 파괴(fracture)라 부르고 있다. 이러한 현상을 모두 포함해서 손상(failure)라고 부르고 있다.

일반적으로 재료의 파괴현상은 크게 나누어서 2개로 분류하는 것이 가능하다. 그 하나는 주철과

같은 재료의 파괴에서 대표되는 것과 같이 탄성상태에서 거의 변형하지 않고, 파괴하는 것으로, 이와 같은 파괴를 취성파괴(brittle fracture)라고 부른다. 이것에 대해 연강과 같이 연성재료에서 크게 소성변형한 후에 일어나는 파괴를 연성파괴(ductile fracture)라고 부른다. 그리고 피로파괴, 응력부식균열에 의한 파괴 및 벽개파괴 등은 전자에 속한다. 이 두 가지의 파괴의 차이를 하중-연신율곡선의 차이와 파단면의 형상의 차이로 나타내면 Fig. 2와 같이 된다.

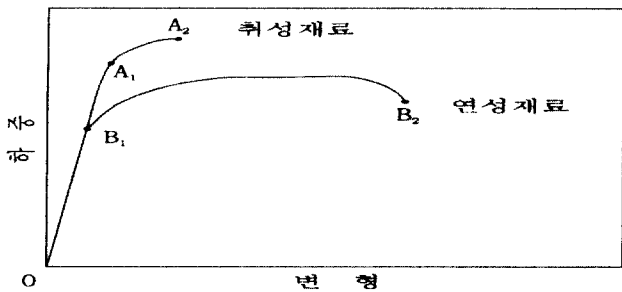


Fig. 2 연성파괴와 취성파괴

이와 같이 재료는 연성파괴 또는 취성파괴중 어느 쪽의 파괴형식으로 파괴하지만, 그 어느 쪽인가는 재료의 인성에 의존도가 크다. 그러나, 같은 재료에서도 사용온도에 의해 인성이 차이가 나고, 일반적으로 페라이트계 강은 저온이 되면 인장강도, 항복점, 피로강도는 증대하지만, 연신과 단면 수축율은 급속히 저하해서 취화되게 된다. 한편, 오스테나이트계 스테인리스강과 알루미늄합금은 저온에서도 취화 되지 않는다. 상온에서 연성파괴하는 강도 어떤 온도이하에서는 급속히 취화되고, 파단부 근방에서는 거의 소성변형이 일어나지 않고 취성파괴를 일으키게 된다. 이것을 천이온도라 부르며, 연성파괴가 취성파괴로 천이하는 온도로서 정의되고 있다. 이와 같은 파괴는 위에서 설명한 취성파괴와 구별하기 위해 저온취성이라 하고, 특히 노치가 있으면 발생하기 쉬워, 이것을 저온노치취성 혹은 간단히 노치취성이라 부르고 있다. 그러나 어느 경우에도 천이온도이상에서는 일어나지 않는 현상이다.

천이온도는 일반적으로 노치가 있으면 높게 되며, 더욱이 노치가 예리할수록 높게 나타난다. 기계, 구조물의 사용온도 부근의 천이온도를 가진 재료를 사용할 때는 특히 충격하중에 의해 취성파괴를 일으키는 경우가 많고, 큰 사고가 일어날 염려가 있다. 천이온도는 반드시 상온이하에서 존재한다고 말할 수는 없다. 같은 재료에서도 열처리조건

에 의해 변화하고, 일반적으로는 소성변형이 일어나기 쉬운 재료일수록 천이온도는 낮게 되며, 하중속도가 빠를수록 천이온도는 높게 된다. 또한, 재료의 결정립이 조대해 질수록 천이온도는 높게 되며, 탄소강에서는 탄소함유량이 증가할수록 천이온도는 높다.

또한, 이하와 같이 열화, 손상과정이 현상으로 존재한다.

(1)피로균열

1사이클에서는 파괴를 일으키지 않는 응력을 수백회에서 수백만회 반복하는 것에 의해 발생하는 균열을 말한다. 피로균열중에는 집중 응력 피로균열, 열피로균열, 부식 피로균열 등이 있다.

(2)응력부식균열

부식환경중에 있는 금속재료에 인장응력이 정적으로 가해져서 생기는 것으로 경우에 따라서는 수소취성과도 관계 있다고 생각되어지고 있다. SCC(stress corrosion cracking)이라 약칭하여 불려지는 경우가 많다.

(3)캐비테이션

액체중에 발생한 기포가 터지면서 표면에 충격을 주어서 발생하는 침식을 말한다.

(4)열응력균열

가열냉각의 1사이클 혹은 극히 적은 사이클의 열응력에 의해 발생한 것을 말한다.

5.4 결함의 유해도

결함이 재료의 강도에 어떻게 영향을 미치는가는 결함을 포함한 재료가 어떤 조건하에서 사용되는가 및 재료의 인성에 따라 다르기 때문에 일률적으로 논하는 것은 불가능하다. 즉, 그 재료가 사용되고 있는 부분에서의 응력조건, 온도조건, 분위기, 더욱이 결함의 형상, 크기, 방향, 위치(표면, 내부, 응력집중부)등에 의하여 동일재료중에 같은 종류의 결함이 존재하고 있어도 같은 파괴거동을 보인다고 한정할 수 없다. 오히려, 각각의 경우에서 다른 것으로 생각하는 것이 타당할 것이다. 결함을 포함한 재료의 건전성을 평가하는 경우에는 우선 결함의 크기, 재료의 파괴인성 및 사용 응력을 파괴역학적으로 고찰하여야 한다. 더욱이, 현재까지의 규명된 파손 혹은 파괴사고가 발생하지 않은 것에 대한 경험을 가미해서 결함 평가기준을 설정하여야 한다. 그때 검토되는 항목으로는 아래와 같다.

- (1)소재 및 용접부에 가해지는 응력조건, 분위조건
- (2)결합의 위치 및 방향
- (3)결합이 존재하는 부분의 판 두께
- (4)소재, 용접부의 기계적 성질
- (5)결합이 존재하는 부분의 잔류응력의 상태
- (6)사용 중에 가해지는 여러 조건에 대한 성질

또한, 여기서 검토를 하여야 하는 여러 조건에 대한 성질에는 다음의 것들이 포함된다.

- ①정적강도, ②크리프강도, ③피로강도(인장, 굽힘, 비틀림), ④취성파괴에 대한 저항(파괴인성), ⑤ 내식성(응력부식균열에 대한 감수성을 포함)

여기에 논한 여러 인자 중, 특히 주의 깊게 검토해야 하는 것은 피로강도와 파괴인성이다. 그것은 이 두가지는 지금까지 발생한 큰 파괴형태의 대부분을 점하고 있는 것으로 보고되고 있기 때문이다. 물론 다른 파괴 형태도 각각 중요하지만, 예를 들면 부식 혹은 응력부식균열이 발생하고, 그 부분이 노치가 되어 피로파괴나 취성파괴를 일으킨다. 파괴발생방지의 기본적 대책으로서 만일 사용재료의 재질을 적절히 선택함으로써 어떤 파괴형태가 일어나는 것을 충분히 방지할 수 있다면, 우선 재질적으로 파괴발생인자를 제거해 두는 것이 바람직하고, 더욱이 발생할 수 있는 파괴형태에 대하여 검토를 하여 파괴발생을 방지할 수 있는 여러 조건을 부여하여야 한다.

이미 논한 것과 같이, 결합과 재료의 강도와의 관계는 극히 복잡한 것으로 시험편에서 실시된 각종 시험연구의 성과만으로는 해결할 수 없는 경우가 적지 않다. 만일 파괴시험결과를 중요한 판단의 기초로 하고자 할 경우에는 가능한 한 실제에 가까운 여러 조건을 부여할 수 있는 시험편으로 하지 않으면 안 된다.

앞으로 개발이 기대되는 세라믹, 금속간 화합물, 복합재료 등의 첨단 재료는 취성 재료가 대부분이다. 그것에 비하면 금속은 연성재료라 말할 수 있다. 또 취성재료는 인성이 낮은 재료로 이해되고 있다. 여기서 극한적으로 가혹한 조건하에서 이와 같은 취성재료를 사용하면 재료의 표면, 내부에 존재하는 대단히 작은 결함이 재료파손의 원인이 되는 경우가 많다. 예로서 엔진용 세라믹으로 개발이 완료되어 있는 실리콘나이트라이드( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )에서는 20~30 $\mu\text{m}$ 의 결함(이 경우는 기공과 개재물)의 존재에 의해 강도는 크게 저하하고 있다. 이것을 금속재료의 경우와 비교해 보면 같은 강도의 강에 있어서는 강도저하는 1~2mm의 결함에 의해 생긴

다.

이와 같이 첨단재료로서 기대가 큰 세라믹은 작은 결함의 존재로 그 특성이 크게 저하한다. 이것은 상온, 대기중의 결과이지만 고온에서 특히 특수한 환경에서는 보다 작은 결함이 파괴의 원인이 된다. 그러므로 취성적인 첨단재료의 개발에서는 지금까지의 금속재료보다 몇십배 몇백배 작은 미소결함의 제어기술이 필요하게 된다. 그것은 이러한 재료를 유효하게 이용하기 위해서는 이들 미소결함을 검출하는 방법이 필요하게 된다.

이상 결합 검출의 중요성을 논했으나 작은 결함이 잘 분포하면 강인한 즉, 인성이 높은 재료가 얻어지게 된다. Fig. 1에 나타난 것같이 균열의 전방에 미소균열이 발생하면, 균열면의 전방에 발생한 것은 균열진전을 조장한다. 그러나 균열면의 상하에 생성된 것은 균열의 응력집중을 완화하고 균열이 진행하기 어렵게 하는 유효한 역할을 한다. 이 작은 균열로 대표되는 미소결함을 효과적으로 도입해서 고인성재료를 얻는 원리를 micro-crack toughening라고 부르고, 세라믹과 같은 취성 재료 개발의 새로운 원리로서 제안되고 있다. 결합을 역으로 이용해서 파괴되기 어려운 재료를 얻는 발상이며, 이를 위해 미소결함검출 기술이 중요하다.

(다음호에 계속)