

## 복합재 압력용기의 비파괴 시험과 평가



鄭鉉助 / 國科研 선임연구원  
공학박사

복합재 압력용기의 제작 및 사용중에 발생하는 결함(손상)의 비파괴검사를 통해 구조물의 건전성을 평가하는 것은 제품의 품질보증 관점에서 아주 중요합니다. 복합재에서는 여러 종류의 결함이 동시에 존재할 수 있으며, 결함-기계적 성질-비파괴특성 사이의 상호관계는 완전히 알려지지 않았습니다. 이 글에서는 복합재 연소관에 존재하는 결함의 위험도와 결함 탐지를 위한 비파괴 검사 기법에 대해 먼저 살펴 보았습니다. Filament Winding으로 제조한 복합재 연소관의 Proof Testing과 관련해 음향방출(AE)법에 의한 최근의 연구결과를 살펴본 다음, 연소관의 신뢰도 확보를 위한 비파괴 평가 방법에 대해 앞으로의 연구 방향을 제시하였습니다 (필자 주)

**섬유보강** 복합재 압력용기는 금속재 용기와는 달리 층간분리, 섬유파괴, 수지 균열 및 섬유-수지 계면 분리 등과 같은 다중 손상모드에 의해 파손이 생길 수 있습니다.

이러한 손상들은 부적절한 경화, 섬유의 비정렬, 계재물, 보강섬유의 분포불량, 가공손상 및 하중부가에 의해 야기될 수 있습니다.

따라서 제작 또는 사용중에 발생하는 손상을 검사해 구조적 건전성을 평가하는 것은 제품의 품질보증 측면에서 대단히 중요합니다.

다양한 비파괴 검사(NDT) 기법들이 복합재 구조물의 시험과 특성연구에 응용되고 있습니다. 그러나, 일반적으로 복합재료(FRP)는 낮은 전기 및 열 전도도, 높은 음향 감쇠, 기계적 물리적 성질의 이방성 및 비균질성으로 인해 비파괴 기법들을 적용할 때 어려움이 제기되고 있습니다.

모든 결함이 다 위험한 것은 아니며 위험수준이 제품의 종류에 따라 달라질 수 있으므로 각 결함에 대한 위험수준을 확립해야 합니다. 이는 여러 결함에 대한 정량적인 비파괴 평가(NDE) 특성과 설계허용치와의 상관관계를 구함으로써 가능합니다.

이 글에서는 복합재 내압용기에서 발생 가능한 결함의 위험도와 이들 결함에 대한 비파괴 검사에 대해 알아 보았습니다.

특히 Filament Winding 공정으로 제작된 복합재 연소관의 수락시험 절차를 소개하고, 수압시험중 음향방출(AE)을 이용한 비파괴 평가법에 대한 최근의 연구경향을 살펴본 다음 이를 기초로 향후 연구방향을 제시하고자 합니다.

### 결함의 종류와 비파괴 검사

복합재 부품에 존재하는 결함의 위험도는 그 부품의 설계 요구조건에 좌우됩니다. 결함의 위험도는 부품의 종류에 따라 다르며, 설계 요구조건에 따라 문턱수준보다 낮은 결함은 부품의 성능에 영향을 미치지 않을 수도 있습니다.

결함의 형태, 숫자, 위치 및 크기가 기계적, 물리적, 열적 성질에 미치는 영향은 잘 알려져 있지 않습니다.

결함의 위험수준은 각 부품에 적용되는 NDE 기법에 대해 확립되어야 하나, 결함과 재료의 다양성, 이들에 대한 NDE 특성의 차이등으로 인해 표준화하기 어려운 면이 있습니다.

다음은 복합재 연소관의 제작 또는 시험중에 발생할수 있는 결함(손상)의 위험도에 대한 간단한 정성적 묘사입니다.

#### • 결함의 위험도

수지균열 또는 잔금—연소관의 수압시험중에 일어나는 공통적인 현상입니다. 정도가 가벼우면 일반적으로 압력용기의 강도를 저하시키지 않으나 수지가 지배하는 성질을 떨어뜨리며, 수분흡수를 가속화시킵니다.

층간분리—압력용기의 강도에 대해 일반적으로 위험하지는 않지만 수지가 지배하는 모든 성질을 저하시킵니다. 저하 정도는 층간분리의 형태, 크기, 위치에 좌우되며, 층간분리가 접합부의 Bearing 강도에 미치는 영향은 대단히 큼니다.

섬유파손—수지가 지배하는 성질과 압력용기의 성질 모두에 영향을 미칩니다. 저하되는 양은 파손 섬유의 위치와 양에 좌우됩니다.

충격손상—대단히 위험하며, 수지가 지배하는 성질과 압력용기의 성질 모두에 영향을 미칩니다. 저속충격의 경우, 강도를 35~40%까지 저하시킵니다.

기공—일반적으로 기공은 압력용기의 성능(파괴압력)을 저하시키지는 않으나, 전단, 압축, 횡방향 인장, 굽힘과 같이 수지에 의해 지배되는 성질을 떨어뜨립니다. 피로, 크립, 충격 성질들이 또한 영향을 받습니다. 일반적으로 1%의 기공은 2~15% 정도로 성질을 저하시킵니다. 수분흡수를 촉진시키며, 물리적, 열적, 전기적 성질에도 영향을 미칩니다.

접착분리—일반적으로 절연제와 추진제사이, 절연제와 연소관 사이의 분리는 위험하며, 신뢰성을 좋게 하기 위해 최소화시켜야 됩니다.

습기—습기는 일반적으로 수지가 지배하는 모든 성질을 저하시킵니다. 유리전이온도(Tg)를 감소시키며, 팽창으로 인해 무게증가를 초래하며 크기를 변화시킵니다. 더우기 접착제의 효율을 감소시킴으로써 접착기능에 영향을 미칩니다.

섬유 정렬불량—압력용기의 성질을 변화시킵니다. 저하 또는 향상정도는 정렬상태의 형태와 정도에 따라 다릅니다.

밀도변화—강도에 영향을 미치지 않습니다. 수지가 지배하는 성질의 저하는 밀도변화의 정도에 좌우됩니다. 특히 탄소-탄소 노즐부품에 치명적인데, 부식저항, 열 전도도, 산화 저항력이 밀도에 따라 변화합니다.

경화불량—연하거나 지나치게 경화된 기지를 생성해 불안정한 기계적 성질을 초래합니다. 높은 기공함량을 야기하며, 층간분리를 일으키는 높은 열 잔류응력을 야기시킵니다.

일반적으로 제작과 관련된 결함들은 재료, 공정, 설계를 최적화함으로써 최소화하거나 제거할수 있습니다. Munjal은 기공, 층간분리, 접착불량 및 섬유의 구김 등과 같은 치명적 결함의 최소화 방안을 제시하고 있습니다.

#### • 비파괴 검사 기법

##### \* 초음파법

복합재료의 비파괴 검사에 가장 자주 사용되는 기법입니다. 층간분리와 수지균열을 포함한 여러 손상모드뿐만 아니라 강성, 기공함량, 감쇠와 같은 재료의 성질도 이 방법으로 관찰될수 있습니다.

속도측정, 감쇠측정, C-scan, 음향—초음파법이 관련된 기법들이나, 데이터의 획득, 분석 및 제시방법에 따라 서로 구별됩니다.

부가하중에 의한 손상의 진전때문에 재료의 강성은 심하게 변하게 되며, 강성의 변화는 초음파의 전달속도를 측정함으로써 구할수 있습니다.

감쇠는 초음파가 재료내부를 전파할때 에너지 손실률을 나타내는 일반적인 용어입니다. 에너지는 파의 기계적 진동에너지로부터 재료

내부의 여러 손실기구들에 의해 열에너지로 비가역적으로 변환됩니다.

복합재료에서의 손실기구에는 산란(섬유, 균열, 층간분리, 기공에 의한), 열탄성효과, 점탄성효과가 포함됩니다.

복합재료에서 이 현상들은 아직까지 잘 규명되지 못하고 있지만, 초음파의 감쇠변화와 손상시작, 진전과의 상관관계가 많은 실험에서 보고되고 있습니다.

C-scan 기법은 재료의 내부 성질에 따른 초음파의 진폭 변화를 구조물의 평면상에 표시하는 방법을 말합니다.

초음파 탐촉자가 파를 송수신하면서 구조물의 평면을 x-y scan 형태로 기계적으로 움직이게 됩니다. 구조물을 물 탱크속에 담그거나 물기 등이 탐촉자와 재료사이의 접촉매질로 사용됩니다.

시편상의 각 위치에서 파가 재료내부를 통과할때 수신한 신호로부터 상대적 에너지의 크기를 계산하게 됩니다. 일련의 에너지 등급을 설정해 천연색이나 회색으로 표시할수 있습니다.

초음파 C-scan법은 복합재 부품의 초기 구조적 건전성, 사용중의 하중으로 인한 손상시작이나 진전을 결정하기 위해 광범위하게 사용되고 있습니다.

음향-초음파법은 A. Vary등에 의해 개발된 것으로 기본적으로 2개의 탐촉자를 사용해 Pitch-Catch방법을 사용합니다.

이는 2개의 탐촉자로 Body Wave를 주고 받는 통상적인 Pitch-Catch 방법과는 다릅니다. 2개의 탐촉자가 복합판재의 한 면에 설치되어 수신 탐촉자는 송신 탐촉자로부터 발생한 판파에 반응하게 됩니다.

송신탐촉자는 이와 동시에 Body Wave를 발생시키는데, 일부는 판파로 바뀌거나, 판의 아래 윗면사이에서 소실될 때까지 반사를 계속합니다.

수신된 신호는 최종 파괴 위치나 피로 하중시의 강성 변화와 상관관계가 있는 것으로 알려져 있습니다. 보다 반복성이 좋은 결과를 얻기

위해 다양한 신호해석이 사용되기도 합니다.

#### \* 음향방출법

재료가 변형할때 이와 동시에 방출되는 음향을 검출하는 기법입니다. 예를 들면, 나무조각이 응력을 받을 때 나무가 쪼개지기 직전에 균열이 생기는 소리를 들을수 있습니다.

똑같은 현상이 복합재를 포함한 다른 재료에서도 나타납니다. AE 방법으로 복합재료에서 서로 다른 파손모드의 구별을 위해 많은 연구가 시도되고 있습니다.

또한 Cyclic Loading을 받는 복합재료의 손상성장 기구 감시 및 특성연구에 사용되고 있으며, 복합재 압력용기의 Proof Testing에 널리 사용되고 있습니다.

#### \* 방사선시험

손상상태에 관해 광범위하고도 상세한 정보를 제공해 주는 NDT 기법입니다. 복합재료 연구를 위해 중성자, 감마선, X-선을 포함한 다양한 침투입자나 선원이 사용됩니다.

X-선이 가장 많이 사용되고 있는데, 그 이유는 사용이 쉽고 장비가 이미 상용화되어 있기 때문입니다. Graphite/Epoxy 복합재료에서는 15~25kV의 아주 낮은 X-선 에너지를 사용해야 됩니다.

수지와 섬유는 이러한 저 에너지에서도 거의 투명합니다. 따라서 내부 손상에 관한 정보를 얻기 위해, 좋은 불투명 침투제를 사용해야 하며, 이로 인해 표면에 노출되어 있거나 표면열림 균열에 인접한 손상으로 탐지가 제한됩니다.

X-선으로 Boron 섬유 보강 시편에서 섬유의 끊어짐은 찾아낼수 있지만, Graphite나 Aramid 보강 시편에서 섬유의 끊김을 찾아낼수 없습니다.

#### \* 열시험법

재료의 표면에 등온선의 궤적을 나타내는 기법을 일반적으로 일컫는 말입니다. 시험체내의 결함, 비균질성 물질 또는 다른 바람직하지 못한 조건들은 등온선 지도에서 국부적으로 온도가 높거나 낮은 부분으로 나타나게 될 것입니다.

이 방법을 적용하기 위해서는 시험체를 가열한 후, 시험체 표면의 온도를 측정해 그 결과를 해석하면 됩니다. 여러가지 기법이 사용될수 있으나, 비디오-열사진 카메라가 가장 효과적이고 분해능이 높습니다.

열시험법은 복합재료에서의 손상을 탐지하고 분석하는데 이용되고 있습니다. 결함이나 손상의 윤곽을 찾기 위해 수동식이나 능동식의 열원을 사용할수 있으며, 복합재료의 검사에는 이 2가지 방법이 모두 사용되고 있습니다.

**\* 와류법**

와류시험법은 자기유도 원리에 기초하고 있습니다. 자장의 변화에 따라 전도체내에 와류가 형성됩니다. 대부분의 수지는 아주 열등한 전기 전도체이나 탄소 섬유는 비교적 좋은 전도체입니다.

와류를 형성하기 위해서 섬유들은 여러 지점에서 전기적으로 접촉해야 됩니다. 섬유 방향배열 검사와 섬유의 파손을 탐지하는데 사용될수 있습니다.

이러한 기법들 외에 Computed Tomography와 Optical Holography등의 방법이 사용 가능합니다.

---

연소관의 Proof Testing과 비파괴 평가

---

복합재 연소관의 수락시험에는 일반적으로 Proof Testing, 비파괴 평가, Tag End 시험, 공정 확인 시험이 포함됩니다.

여기서 Tag End 시험은 실제 구조물에서 시편을 취해 주로 수지에 의해 지배되는 여러가지 성질의 측정에 사용됩니다.

공정확인 시험은 공정 감시용 시편이 실제 구조물을 대표하지 않으므로 신뢰성이 낮습니다. 더우기 이 시험들은 설계 요구조건이 파열 압력인 연소관의 수락시험용으로는 적합하지 않습니다.

**• Proof testing**

연소관의 으뜸가는 설계 요구조건이 파괴압력일때 일반적으로 사용되는 방법입니다. 물을 이용해 사용 압력까지 연소관을 가압하고 그

압력에서 연소시간동안 유지시킵니다.

일반적으로 사용되는 Proof Pressure는 MEOP의 0.9~1.1을 사용합니다. 사용자의 요구에 따라 하나 또는 그 이상의 Proof Cycle이 있을수 있습니다.

합격/불합격 기준은 Proof Test의 결과에 기초합니다. 부품이 Proof Test중에 파열되거나 눈에 보이는 손상을 입게 되면 불합격됩니다.

Proof Testing은 대단히 신뢰성이 있는 것으로 입증되었으나, 합격/불합격만을 판정하는 시험이며 내부 결함(손상)의 분포에 대한 어떤 정보도 제공하지 못합니다. 더우기 수압시험을 통과한 연소관이 MEOP이하에서 파열하는 경우가 있습니다.

따라서 비파괴적 방법으로 수압시험의 전 과정을 감시해 수압시험중 가압으로 인한 손상 발생 위치와 손상 특성을 규명해 수압시험 후 연소관의 신뢰도 보증이 요구됩니다. AE 시험이 여기에 대한 하나의 해결책을 제시하고 있습니다.

**• 음향방출법의 이용**

음향방출법은 수압시험중 실시간으로 손상 시작 위치, 종류 및 위험도에 대한 정보를 제공하므로 연소관의 구조적 건전성을 평가하는데 이상적인 방법입니다.

복합재 연소관의 3가지 으뜸가는 파괴기구는 수지균열, 층간분리와 섬유파손입니다. 층간분리와 섬유파손은 연소관에서 치명적인 파괴기구입니다. 층간분리는 연소관의 좌굴강도에 치명적이며, 섬유는 연소(가압)중 대부분의 하중을 지탱해 줍니다.

수지 균열은 그것이 섬유에 손상을 일으킬때 연소관의 하중지지 능력에 치명적이 됩니다. 위의 파괴기구 모두 수압시험중에 나타나며, AE 거동과 이들 파괴기구와의 상관관계를 구할수 있습니다.

유리섬유로 제작된 탱크, 압력용기, 파이프의 AE시험법은 보강플라스틱용 AE위원회(CARP)의 형성과 활동에 힘입어 폭넓게 수용되고 있습니다.

AE검사법은 CARP에서 개발하여 SPI에서 1982년 그 절차서가 발간되었으며, 1983년 ASME의 Boiler and Pressure Vessel Code에 AE 검사법이 도입되었습니다.

30~150kHz의 주파수 범위에서 단계별로 하중을 부가하면서 하중 정지 상태에서의 방출, Felicity Ratio와 다른 기준을 적용해 합격/불합격 기준을 규정하고 있습니다.

그동안 AE는 복합재 압력용기의 수압시험에 적용되어 불합격 제품의 선별, 손상 종류 식별과 그 위험도 결정, AE 파라미터의 정량화에 대한 연구가 주로 진행되었습니다.

최근에는 AE 파의 전달 현상과 음원 탐지, 손상-압력용기의 강도-Felicity Ratio 수치 사이의 상관관계등에 대한 연구가 수행되고 있습니다.

• 향후 연구 방향

AE는 현재 외국에서 NDT Package의 일부로서 양산되는 연소관의 품질보증 수단으로 사용되고 있습니다. AE로 결함(손상) 위치를 먼저 찾은 다음, 초음파나 X-Ray로 결함(손상)의 크기를 측정하고 종류를 식별하고 있습니다.

정수압시험중 이상한 AE거동이 없으면 연소관은 검사에 합격합니다. 향후 복합재 압력용기의 비파괴 시험/평가와 관련해 아래와 같은 연구의 지속적 수행이 요구되고 있습니다.

— 결함(손상) - 복합재료의 성질 - NDE 특성 사이의 상관관계 연구

— AE 시험에 의한 손상 특성, 치명적인 결함의 정도와 종류, 압력용기의 강도 예측에 의한 수압시험 후의 연소관 품질보증 확립

— 이러한 항목에 대한 광범위한 데이터 베이스 구축 \*

- ▲ E. G. Henneke II, 「Destructive and Nondestructive Tests」, in Composites, Eng. Mater. Handbook, Vol. 1, ASM Int., 774, 1987년
- ▲ M. J. Sundaresan, E. G. Henneke II and W. Brosey, 「Acousto-Ultrasonic Investigation of Filament-Wound Spherical Pressure Vessels」, Mat. Eval., 601, 1991년 5월
- ▲ C. H. Adams, 「Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Fiberglass Reinforced Plastic Tanks/Vessels」 37th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, SPI, 1982년 1월
- ▲ 「Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessels」, Boiler and Pressure Vessel Code, Article 11, Subsection A, Section V, AST, 1988년
- ▲ A. T. Green, C. S. Lockman and R. K. Steele, 「Acoustic Verification of Structural Integrity of Polaris Chambers」, Modern Plastics, MOPLA, 41, 137, 178, 180, 1964년
- ▲ H. Spanheimer and A. J. DeHerrera, 「Prediction of Composite Pressure Vessel Performance by Application of the Kaiser Effect in Acoustic Emission」, Hercules Incorporated, Magna, Utah and Thiokol Company, Brigham city, Utah, 1975년
- ▲ C. Le Floch, 「Acoustic Emission Monitoring of Composite High-Pressure Fluid Storage Tanks」, NDT International, 259, 1986년 8월
- ▲ M. A. Hamstad, 「Results Obtained During Acoustic Emission Monitoring of Proof Testing of a Large Kevlar/Epoxy Rocket Motor case」, First Int. Symp. on Acoust. Emis. from Reinf. Comp., SPI, 1983년 7월
- ▲ D. J. McNally, 「Inspection of Composite Rocket Motor Cases Using Acoustic Emission」, Mat. Eval., 43, 728, 1985년
- ▲ E. v. K. Hill and T. J. Lewis, 「Acoustic Emission Monitoring of a Filament-Wound Composite Rocket Motor Case during Hydroproof」, Mat. Eval., 43, 859, 1985년
- ▲ J. W. Whittaker, W. D. Brosey, O. Burenko and D. A. Waldrop, 「Acoustic Emission Wave Propagation and Source Location in Small Spherical Composite Test Specimens」, J. Acoustic Emission, 7, 32, 1988년
- ▲ J. W. Whittaker, W. D. Brosey, O. Burenko and M. A. Hamstad, 「Correlation of Felicity Ratio and Strength Behavior of Impact-Damaged Spherical Composite Test Specimens」, J. Acoustic Emission, 9, 84, 1990년
- ▲ J. W. Whittaker, W. D. Brosey, O. Burenko and M. A. Hamstad, 「Felicity Ratio Behavior of Pneumatically and Hydraulically Loaded Spherical Composite Test Specimens」, J. Acoustic Emission, 9, 75, 1990년

참 고 자 료

- ▲ A. K. Munjal, 「Product Acceptance Testing for Filament Wound Composite Rocket Motor Components」, ASM/ESD Advanced Composite Conference, 309, 1985년