

비파괴시험에 의한 GFRP Pipe의 평가

이주석* · 조정식* · 장홍근* · 이승희**

The Evaluation of GFRP Pipe by NDT Methods

J. S. Lee, K. S. Cho and H. K. Chang, S. H. Lee

Abstract It is desirable to develop the effective NDT techniques to evaluate the strength of composite structures. In this study several of acoustic NDT techniques were applied to investigate useful parameters for evaluating the filament wound GFRP structures and following results were obtained.

1. Propagation velocity of stress wave to axial direction in the filament wound GFRP pipe depends on the effective modulus along the propagation direction and source location was parcticable from the a m-easured velocities.

2. By the application of acoustic emission techniques to GFRP pipe during hydraulic test, it was proven to be possible to detect the damage initiating pressure which could be evaluated nondestructively through the measuring of stress wave energy factor(SWEF).

3. The final failure pressure of GFRP was greatly influenced in the presence of pass through defects, and void-like defects were more dangerous than the laminar type defects.

1. 서 론

복합재료는 우수한 무게비 강도 때문에 항공, 방위, 레저산업 등을 중심으로 그 활용범위가 급격히 증가하고 있다. 이러한 복합재료 제품으로서 축대칭 형상의 것은 많은 부분이 filament winding 방법에 의해 제조되고 있다. 이들중 pipe와 같은 배관제, 압력용기 등은 그 내압특성이 가장 중요한 요소이며 이 특성은 제조,

성형과정에서 발생한 결함이나 사용중 가해진 손상에 의해 저하될 수 있다. 이러한 복합재료의 구조요소의 기계적 특성은 이론적 예측이 무척 어려우며 고유의 불균질성 때문에 실험결과의 편차도 상당히 커 sampling 검사의 적용도 그 신뢰도가 낮아 효과적인 비파괴시험 기법의 개발이 절실히 요구되고 있다. 효과적인 비파괴시험이란 결함의 검출뿐 아니라 재료 고유의 기계적 특성을 평가할 수 있어야 하며 최근 이러한

* 한국기계연구소 비파괴시험연구실

** 계명대학교

접수: 1989년 3월 14일

관점에서 새로운 시험방법이 많이 제안되고 있다.^(1, 2)

Vary 등(1)에 의해 제안된 응력파계수(Stress Wave Factor : SWF)는 적층 복합재료의 인장강도 및 층간 전단강도 등의 기계적 성질, 그리고 손상정도의 정성적 평가에 유효하다고 보고되어 있으며 이후 많은 연구자들의 관심이 집중되고 있다. 본 실험에서는 filament wound structure에 대해 SWF의 적용성을 검토하고 있다. 손상정도 및 기계적 성질의 평가에 유용한 새로운 비파괴시험 변수들을 조사하였다. 아울러 FRP pipe의 수압시험시 방출되는 Acoustic Emission(AE) 양상을 관찰하고 source location을 시도하였다.

2. 실 험

시편은 epoxy에 함침한 E-glass roving을 $[\pm 60^\circ]$ 로 helical winding 하여 $150^\circ\text{C}-2$ 시간, $180^\circ\text{C}-2$ 시간의 표준성형 cycle에 의해 제작하였다. 제작된 pipe의 내경은 $\phi 66\text{mm}$ 및 $\phi 150\text{mm}$ 의 두 가지이었으며 두 종류 모두 벽면두께 1mm, 길이 700mm의 치수를 가졌다. 또한 $\phi 66\text{mm}$ 시편을 180°C 4, 5시간의 over curing 조건에 의해 제작하였다. 제작된 두 종류의 $\phi 66\text{mm}$ 시편은 길이 230mm로 절단하여 사용하였다. 손상이 축적된 시편을 얻기 위해 $\phi 66\text{mm}$ 시편에 steel ball의 자유 낙하에 의한 충격손상을 가하였다. 이때 1회 충격운동량은 0.75kgm/sec 로 하되 충격회수는 20~100회 사이에서 조절 하였으며 충격회수 별로 3~6개씩의 시편을 제작하였다.

표준성형된 두 종류의 pipe에 대해 축방향 및 원주 방향으로 전파되는 simulated 응력파의 속도 및 감쇄를 측정하였다. 실제의 AE pulse와 유사하도록 simulation pulser는 wide band transducer를, 수신탐촉자는 일반 AE시험에서 많이 사용되는 375kHz 공명형을 각각 사용하였다. 이때 송, 수신 탐촉자의 거리를 변화 시키면서 수신신호의 진폭으로부터 감쇄를, 수신 시간 지연으로부터 속도를 환산하였다. 측정된 속도 값을 이용하여 $\phi 150\text{mm}$ pipe의 AE source location을 위해 적합한 sensor 배열위치를 결정하고 이것에 의거 source location을 시도하였다.

충격 손상이 가해진 시편에 simulation된 응력파의

ring-down 계수(SWF) 및 수신에너지(Stress Wave Energy Factor : SWEF)를 측정하였다. 여기서 응력파는 pipe의 축방향으로 전파하여 손상부위를 통과한 후 수신되도록 pulser 및 receiver를 배열하였으며 SWF 측정시에는 모두 375kHz 공명형으로 구성된 pulser/receiver fixture(AET WF1)를, SWEF측정시에는 wide band pulser(SET FC 500) 및 375kHz 공명형 수신탐촉자(AET AC375L)를 각각 사용하였다. SWF측정장치는 AET 206AU를, SWEF processing unit는 AET 4900 system(pulse rate : 1Hz)을 사용하였다. 또한 시편 단면의 현미경 관찰을 통해 시편의 미시구조 및 충격 손상의 성장 방향을 조사하였으며, 수침 초음파 C-scan을 통해 손상부의 대략적 형상 및 크기를 관찰하였다. 이때 사용 C-scan 장치는 Fig. 1과 같다.

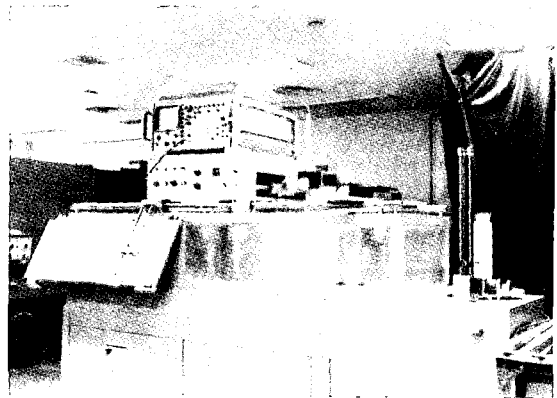


Fig. 1. Ultrasonic C-scan equipment.

비파괴적 측정이 수행된 pipe의 내압강도를 평가하기 위해 Fig. 2와 같은 수압시험장치를 제작하여 사용하였으며 수압시험 도중 방출되는 AE를 조사하여 pipe의 파괴과정을 감시하였다.⁽³⁾

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 GFRP pipe 벽면을 따라 전파하는 simulated stress wave의 전파 거리에 따라 감소하는 진폭을 측정된 결과이다. 광대역 탐촉자에 의해 시편내로 입사된 응력파 pulse는 pipe 벽면을 따라 전파해 나감에 따라

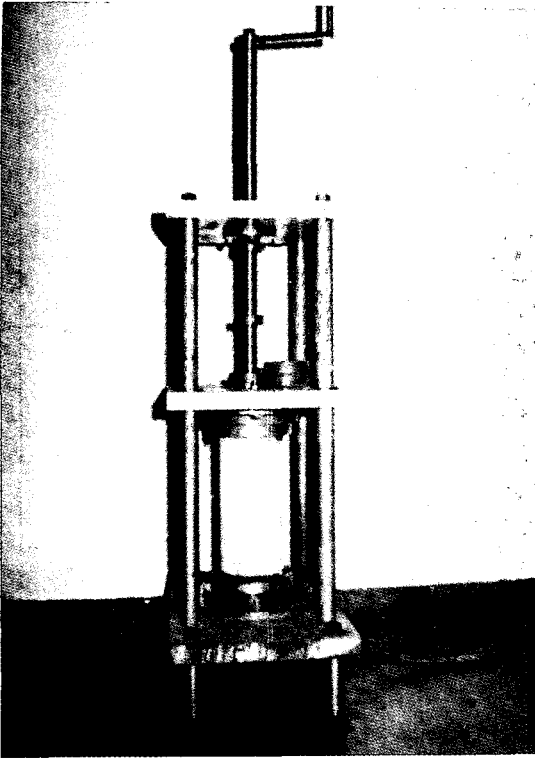


Fig. 2. Hydrotesting apparatus.

회절, 산란, 분산 등의 효과에 의해 Fig. 4에서 보는 바와 같이 파형이 심하게 변형되며 결과적으로 pulse의 최대진폭이 감소하여 나타난다. 이러한 진폭 감소는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 거리에 따라 대략 지수적으로 감소하는 경향을 보였으며 감쇄 계수 α 는 pipe의 직경 및 전파 방향에 따라 차이를 보였다. 특히 응력파의 전파방향이 pipe축에 평행인 경우가 수직인 경우에 비해 감쇄가 매우 크게 측정되었으며 또한 축방향 전파의 경우 직경이 작은 pipe에서 감쇄계수가 다른 경우에 비해 매우 작은 값으로 나타났다. Table. 1에서 보는 바와 같이 $\phi 66\text{mm}$ pipe에서 축방향 감쇄가 특별히 작은 것은 응력파의 기하학적 퍼짐이 작기 때문인 것으로 생각되었다. 이러한 감쇄 측정과 병행하여 응력파의 전파속도를 측정된 결과를 Table. 1에 나타내었다. 측정된 속도의 값은 시편의 직경에는 크게 의존하지 않으나 전파방향에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었으며 이것은 fiber배열에 따른 시편의 이방성에 기인 하는 것으로 생각되었다.

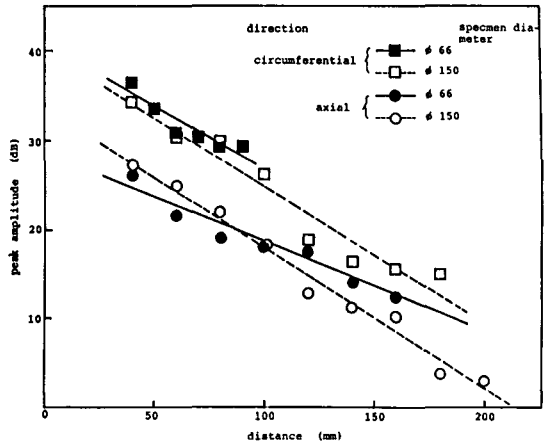
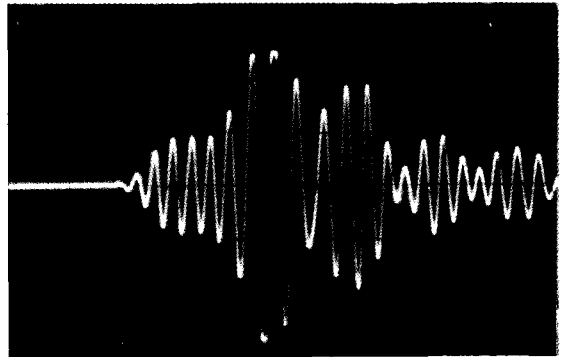
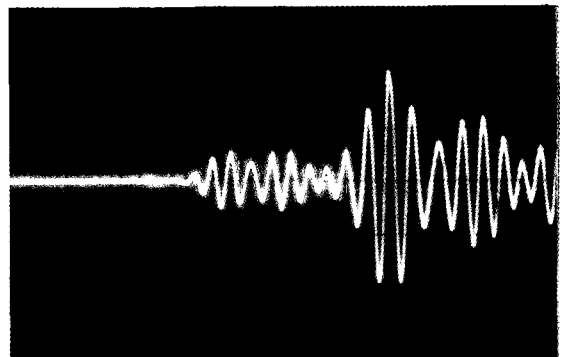


Fig. 3. Attenuation in filament wound GFRP pipe.



(a) 50mm



(b) 80mm

Fig. 4. Variation of waveform in accordance with axily propagating distance.

Table 1. Attenuation factor and velocity of stress wave in filament wound GFRP pipe

전파방향	시편직경 (ϕ ; mm)	감쇠계수 (α ; dB/mm)	속도(V ; m/s)
circumferential	66	0.141	4400
	150	0.154	4620
axial	66	0.104	2920
	150	0.159	2910

일축 비등방성 재료에서 초음파의 주축방향 (x -축) 및 원주방향(y -축)에 대한 전파 속도는 다음과 같이 주어진다.⁽⁴⁾

$$V_1 = \sqrt{C_{11}/\psi} \quad (1)$$

$$V_2 = \sqrt{C_{22}/\psi}$$

여기서 ψ 는 시편의 밀도, V_1 과 V_2 는 각각 x -방향과 y -방향 종파의 속도, C_{ij} 는 elastic constants로 FRP angle ply [$\pm\theta$] 적층판에 대해

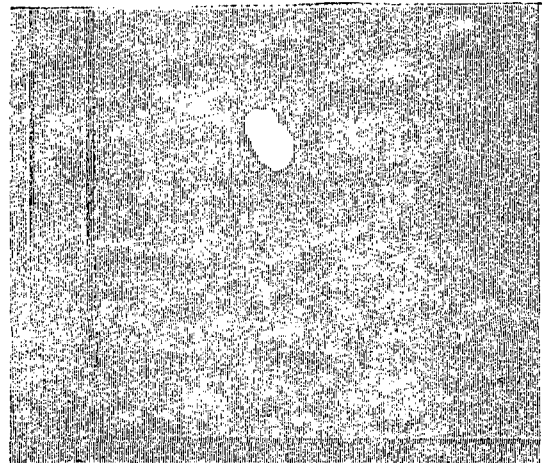
$$C_{11} = U_1 + U_2\cos 2\theta + U_3\cos 4\theta \quad (2)$$

$$C_{22} = U_1 - U_2\cos 2\theta + U_3\cos 4\theta$$

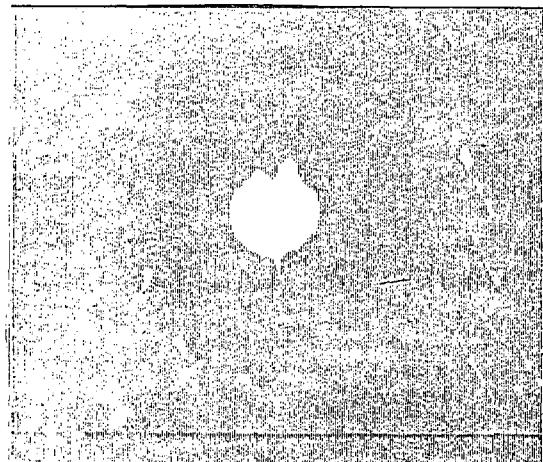
와 같이 주어진다.⁽⁵⁾ 여기서 U_i 들은 stiffness tensor들의 선형결합으로서 본 실험에서 E-glass fiber-epoxy 시편에 대해 $U_1 = 20.47$, $U_2 = 15.04$, $U_3 = 3.33$ GPa의 값 및 $\psi = 1.4\text{g/cm}^3$ 의 값을 대입하여 전파속도가 가장 빠른 quasi-longitudinal mode에 대한 값을 $V_1 = 2820$ m/s, $V_2 = 4350$ m/s로 각각 계산하였다. 이 값들은 Table 1에서의 실험치들과 매우 근사한 값을 나타내고 있다. 이러한 속도의 값은 전파 방향에 대한 effective modulus 값에 크게 의존하므로 simulated stress wave의 전파속도 측정은 그 전파 방향의 탄성계수 및 복합 재료에서의 섬유 배열 상태에 관한 간접적 정보를 찾아낼 수 있을 것이다.

Fig. 5는 steel ball에 의해 충격이 가해진 시편에 대한 초음파 C-scan 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 충격 부위의 손상이 명확히 구분되었으며 그 부위의 크기는 충격회수의 증가에 따라 점차로 커져감이 관측되었다. 손상 부위의 형상을 대체적으로 원형을 나타내었으나 fiber 배열 방향으로의 성장 pattern이 약간 나타나고 있음을 볼 수 있었다. 이러한 충격 손상은 시편 단면의

미시구조 관찰에 의해 Fig. 6(c)에서 보는 바와 같은 delamination으로 확인되었으며 시편 벽면의 관통 방향으로는 거의 성장하지 않음이 관찰되었다.



a) 50회



b) 100회

Fig. 5. Ultrasonic C-scan of impact damaged GFRP pipe.

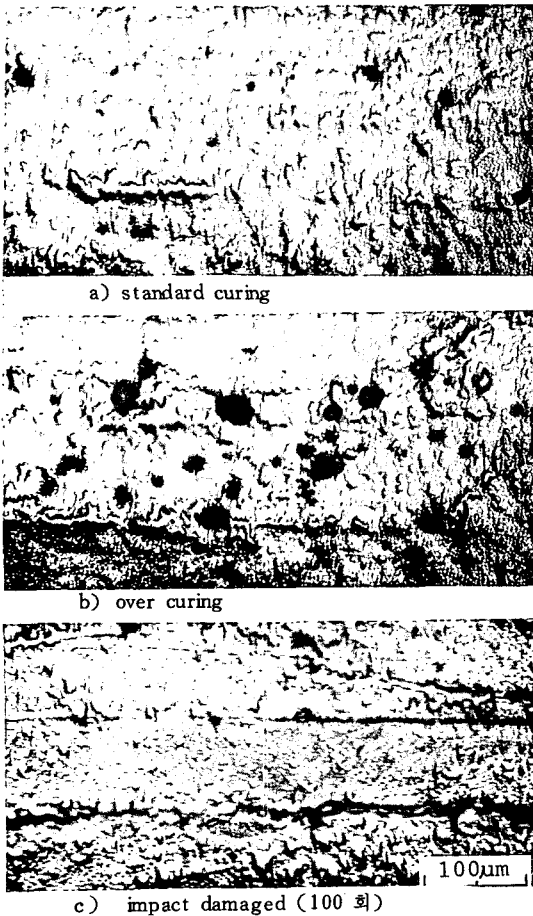


Fig. 6. Microstructures of GFRP pipe cross-section.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 시편 전 부위에 걸쳐 섬유 배열 방향의 지시가 관측되었는데 이것은 섬유 및 resin 분포가 불균질하기 때문으로 판단되었다. 이러한 불균질 분포의 존재는 Fig. 6과 같은 시편 단면의 미세 구조 관찰 결과에서도 확인되었다. 이러한 resin-rich region은 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 roving의 winding 방향으로 발달하며 충격시 그 region을 따라 delamination이 성장함을 관측할 수 있었다. (Fig. 6(c) 참조) 또한 이러한 resin-rich region은 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 over-curing시 많이 발생하는 void와 인접하여 존재하는 것으로 보아 기공형성의 주요 부위로 추정되었다. 따라서 이러한 resin-rich region의 존재는 적층 시편에서의 interlaminar region과 같이 결합 발

생의 요인으로 작용하는 것으로 판단되었다. 시편의 미세 조직 사진으로부터 측정된 섬유 부피비는 대략 $51 \pm 5\%$ 정도로 나타나 적층성형시에 비해 10% 정도 낮게 나타났으며 over-curing된 시편에 대해서도 비슷한 값을 보였다.

시편에 가해진 충격손상의 정도를 평가하기 위하여 측정된 응력파계수(SWF) 값을 Fig. 7에 도시하였다. 충격 손상이 가해진 시편의 SWF 값은 손상 정도의 증가에 따라 급격한 감소를 나타내고 있으나 50회 이상의 충격에 대해서는 그 값의 변화가 두드러지지 않았다. Monitoring oscilloscope 화면상에서 관찰한 바에 의하면 Fig. 3의 결과가 나타내는 바와 같이 검출 응력파의 최대진폭은 충격회수의 증가에 따라 전반적으로 감소 하였으며 이러한 진폭감소는 결과적으로 threshold crossing count인 SWF의 감소를 나타내게 되지만 손상정도가 심각한 시편에서는 이러한 진폭 감소에 의한 SWF 감소 효과가 크지 않아 응력파의 분산으로 인한 pulse duration의 증가에 따라 SWF가 오히려 약간 증가하는 경향을 보였다. 이러한 SWF의 바람직하지 않은 반전현상은 설정 threshold 및 증폭비의 조정

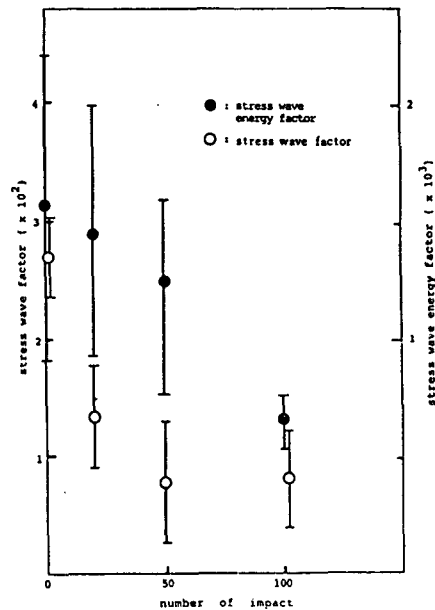


Fig. 7. Variation of SWF & SWEF in accordance with impact damage.

의해 어느 정도 조절이 가능하지만 SWF 값의 물리적 의미의 모호함과 더불어 SWF의 적용에 제한을 가하는 요소가 될 수 있다.

반면 수신 응력과 pulse의 에너지(SWEF)를 측정 한 결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 손상정도의 증가에 따라 단조적으로 감소하는 경향을 나타내었다. SWEF는 그 값의 물리적 의미가 명확할 뿐만 아니라 일반적으로 pulse 폭보다 진폭에 보다 민감하게 의존 하며 threshold 보다 매우 큰 진폭의 pulse 에너지에 의해 그 값이 좌우되므로 SWF 값과는 달리 threshold 설정 및 증폭비의 변화에 관계없이 그 값이 나타내는 경향이 일관성을 띠게 된다. 따라서 복합재료의 결합에 대한 정성적 평가에 SWEF는 SWF에 비해 보다 유용한 parameter로 생각할 수 있다. 단 SWEF 측정은 energy processing 과정이 SWF에 비해 복잡하고 계산시간이 소요되므로 보다 효과적인 장치의 개발이 필요할 것이다.

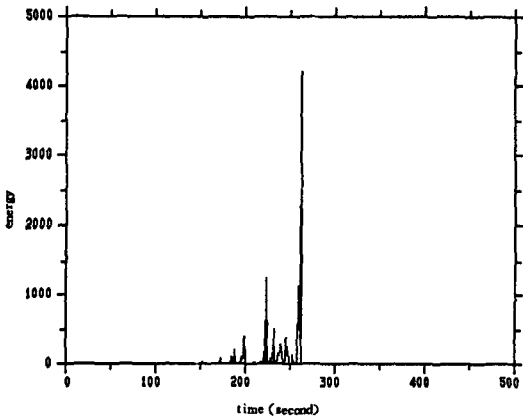


Fig. 8. Acoustic Emission energy versus time during hydrotest in GFRP pipe.

Fig. 8은 시편의 수압 시험중 방출 되는 Acoustic Emission(AE)의 에너지를 측정한 결과이다. 대략 최종 파괴 압력의 30~70% 사이에서 AE가 방출 하기 시작하였으며 이것의 감시에 의해 수압시험중 시편에 발생한 초기파손의 검출이 가능하였다. AE 방출 양상은 초기 파손후 점차 증가하여 파단 직전 급격히 많은 AE 에너지의 방출이 관측되었다. Oscilloscope 화면에 관

찰된 AE의 파형은 내압시험 전반에 걸쳐 대표적인 ring-down형 pulse 였으나 최종 파단 직전에는 연속형 AE이었다. 이 연속형 AE는 catastrophic한 파단 직전 항상 수초간 감지되었으며 물의 누설에 의한 것으로 확인되었다. 이 결과로 부터 파단 이전 측정된 손상 부위에 시편벽면을 관통하는 미세한 기지균열이 형성 되어 이 주변에 집중된 응력이 catastrophic한 파단을 일으키는 것으로 판단되었으며 따라서 delamination 형의 결합은 관통형의 결합에 비해 덜 심각하다는 것을 예측할 수 있었다. 이러한 경향은 시편의 파단 압력을 측정한 Fig. 9의 결과에서도 볼 수 있다. Fig. 9는 충격손상 및 over curing에 의한 파단압력의 감소를 나타내고 있는데 최종 파단 압력 뿐만 아니라 초기 파손압력도 over curing에 의한 감소 효과가 두드러지게 나타났다. 이 결과는 충격손상에 의해 주로 발생되는

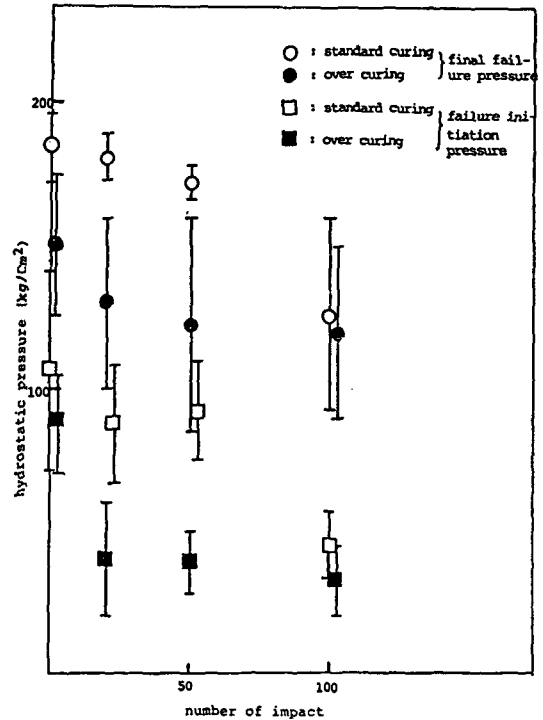


Fig. 9. Final failure pressure and failure initiation pressure versus number of impact in GFRP pipe.

delamination에 비해 over curing에 의해 생성된 void (Fig. 6참조)가 관통형 결함의 생성에 보다 큰 역할을 한다는 사실을 이야기해 주고 있다.

복합재료의 기계적 강도를 비파괴적으로 평가하기 위한 방법의 하나로 SWF의 측정이 Vary 등에 의해 제안되어 FRP 시편의 인장강도 및 층간 전단강도와 비교하여 비교적 좋은 상관관계를 얻은 바 있다.^(4,6) 그러나 SWF의 값은 앞에서 언급한 바와 같이 측정 조건에 의해 그 경향성이 변화될 수 있으며 본 실험에서도 Fig. 7과 9의 결과에서와 같이 좋은 상관관계를 얻지 못하였다. 반면 SWEF 값은 큰 data scattering에도 불구하고 Fig. 10에서 보는 바와 같이 초기 손상 압력과 상대적으로 좋은 상관관계를 나타내었다. SWEF 측정은 시편의 손상부를 투과하여 전파되는 응력과 에너지를 측정함으로써 손상부의 내응력 능력을 평가하려는 방법으로, SWF에 비해 응력과 에너지의 전파효율에 대한 보다 직접적이고 물리적으로 명확한 의미를 갖는 값이라 할 수 있다. 다만 본 실험에서는 기존 AE energy processor의 신호처리 능력의 한계때문에 SWF 측정 시에 비해 작은 수의 응력과 pulse를 대상으로 할 수 밖에 없었고 따라서 data의 scattering이 매우 크게 나타났다. 이러한 문제점은 개량된 energy processor 및 재현성 높은 pulse generator의 개발로 개선이 가

능할 것이다.

AE source의 2차원적 위치 판정을 위해서 최소한 3개의 sensor가 필요하며 각각의 sensor에 수신된 신호의 시간차를 환산하여 source location을 수행하게 된다. 무한판에서와 달리 원통형 구조에서는 supurious source를 제거하기 위해 3개의 sensor로 하나의 zone을 구성하도록 하고 시험대상 구조를 여러개의 zone으로 나누어 zone location을 실시한다. 시험재료가 등방성인 경우에는 zone 구성방법을 일반적인 삼각형 형상을 채택해도 무방하지만 복합재료와 같은 이방성 재료는 각 방향으로의 응력과 전파속도가 다르기 때문에 zone구성에 특별한 주의가 요구 되었다. 본 실험에 사용된 $\phi 150\text{mm}$ FRP pipe벽면은 축방향 및 원주방향을 주축으로 하여 대칭적이므로 이 두개의 축을 대칭축으로 하는 이등변 삼각형 형상으로 zone을 구성 하되 각각의 경우에 있어서 sensor간의 거리는 각 방향으로의 응력과 전파속도를 환산하여 결정하였다. 본 실험에서 sensor의 배치를 Fig. 11과 같이 하였을 경우 S2와 S3 사이의 원주방향 거리를 240mm, S1과 S2, S3의 중심점까지의 축방향 거리를 160mm로 설정하여 Fig. 11의 Source location 결과를 얻을 수 있었다. 이때 각 방향으로의 거리의 비는 축방향 속도 2800m/s, 원주방향 속도 4200m/s의 비에 해당 하는 것으로 측정된 속도가 Table 1의 값 보다 약간 작게 나타난 것은 three-

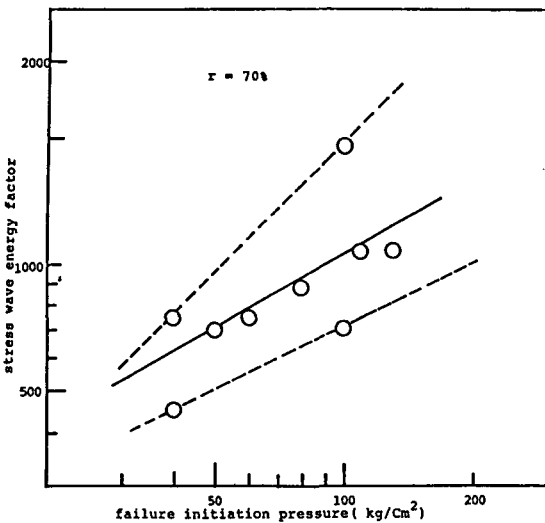


Fig. 10. Relationship of initial failure pressure and SWEF.

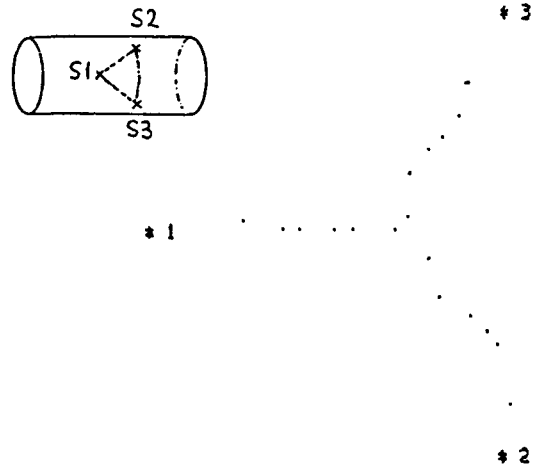


Fig. 11. Acoustic Emission source location with penil lead AE source in GFRP pipe.

shold 설정 및 신호의 감쇄로 인해 수신시간의 지연이 Table 1의 결과 측정시 보다 더 크게 측정되기 때문인 것으로 판단되었다. Fig. 11의 결과는 연필심 파괴의 simulated source를 각 sensor와 zone의 중심을 잇는 선상에서 발생시킨데 대한 결과이며 S2와 S3를 pipe의 중심 축상에 배치한 경우에도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

1) Filament winding에 의해 제조된 GFRP pipe내에서 응력파의 주축방향 전파속도는 그 방향의 effective modulus에 의해 결정되며 측정된 속도값을 고려하여 AE source location이 가능하였다.

2) FRP pipe의 수압시험시 AE의 적용을 통해 초기 손상을 탐지할 수 있었으며 초기손상압력은 SWEF의 측정을 통해 비파괴적으로 평가가 가능하였다.

3) FRP pipe의 파단압력은 관통형 결함의 생성 가능성에 좌우되며 delamination에 비해 void가 더 치명적인 결함으로 평가되었다.

References

- 1) A. Vary and K. J. Bowles, Proc. 11th Symp. NDT, 1977, pp. 242, SwRI
- 2) D. T. Hayford, E. G. Henneke and W. W. Stenchomb, J. C. M 11(1977) pp. 429
- 3) "Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Fiberglass Reinforced Plastic Piping System", 1st Int'l. Symp. AE from Reinforced Composites, APS, 1983
- 4) M. Hlavacek, Int'l J. Sol. Struct., 11(1975) 199
- 5) S. W. Tsai and H. T. Hahn, "Introduction to Composite Materials" Technomic Pub. Co., 1980
- 6) H. E. Kautz, Mat. Eval., 45(1987) 1404