

미국 유리섬유 복합관 설계 매뉴얼 소개 (VII)

Introduction of American Fiberglass Pipe Design Manual (VII)



윤순종(Soon-Jong Yoon) 회장 | 홍익대학교 토목공학과 | 교수 | sjyoon@hongik.ac.kr
지효선(Hyo-Seon Ji) 부회장 | 대원대학교 철도건설공학과 | 부교수 | hsjj@mail.daewon.ac.kr

1. 서론

유리섬유 복합관(Fiberglass Pipe)은 경량성, 내구성, 고강도, 내부식성 및 내마모성의 장점을 가지고 있다. 최근에 이러한 재료의 장점을 살려서 국내에서도 유리섬유 복합관을 사용하여 노후 하수관 개량 공사에 적용하는 사례가 급격히 증가되고 있다. 국내에서는 유리섬유 복합관에 대한 설계기준 및 공사 시방서가 아직까지 제정되지 않은 실정이다. 현장에서는 주로 유리섬유 복합관 제작사로부터 제공된 공사시방서를 기준으로 시공을 하고 있다. 이 공사시방서도 유리섬유 복합관의 재료적 특성을 기술하면서 주로 기존 콘크리트 하수관에 적용된 일반적인 내용을 주로 포함하고 있다.

본 기사에서는 국내 유리섬유 복합관 관련 설계 및 시공 기술자에게 유리섬유 복합관 설계, 제작, 시공의 각 단계에 대한 정보를 제공하기 위하여 미국 상하수도협회(American Water Works Association; AWWA M45)에서 제정된 ‘유리섬유 복합관 설계 매뉴얼(Fiberglass Pipe Design Manual, 2nd Edition)’에 대해서 연속기사로 일정한 분량으로 나누어서 소개

개하고자 한다. 본 매뉴얼은 총 10장으로 구성되어 있다(표 1 참조).

표 1. 유리섬유 복합관 설계 매뉴얼 목차

제1장	유리섬유 복합관 역사와 적용
제2장	유리섬유 복합관의 재료 및 물성 특성
제3장	유리섬유 복합관의 제조공법
제4장	유리섬유 복합관 수리계산
제5장	유리섬유 복합관 지중매설 설계
제6장	유리섬유 복합관 지중 설치 지침
제7장	유리섬유 복합관 추력 블록
제8장	유리섬유 복합관 지상 가설 설계 및 시공
제9장	접합방식 및 이음장치
제10장	운반, 취급, 보관 및 보수
부록	용어해설

2. 유리섬유 복합관 설계매뉴얼 소개

제8장 유리섬유 복합관 지상 가설 설계 및 시공

8.1 서문

이번 장에서는 지상 가설에 사용되는 16인치(400mm) 및 그 이하 그리고 억제 이음부를 포함하는 유리섬유 복합관 라인 시스템의 설계 및 설치에 대해서 살펴본다. 프로젝트에 특별한 요구사항이 있는 경우, 직경이 이보다 크거나 특수한 복합관 제품인 경우에는 여기서 언급하는 내용과는 다른 설계 및 지지 방법을 적용할 수도 있다. 그러한 경우에는 복합관 제조업체나 복합관 엔지니어로부터 설계 시 고려해야 할 사항에 대해 조언을 얻도록 한다.

8.2 시험 방법 및 물리적 성질

지상 가설 유리섬유 복합관에 대한 궁극적인 허용 설계 응력 및 물리적 성질은 표준 시험 방법에 따라 정해지며, 이들 성질은 최소 강화 벽 두께를 바탕으로 한다. 표 8-1은 다양한 ASTM 표준 시험 방법과 각 시험 방법이 제공하는 데이터 종류에 대해 보여주고 있다. 비고 온도는 설계 응력 관련 안전 정보를 보여준다. 대부분의 제조업체는 75°F(24°C) 및 복합관의 최대 허용 동작 온도에서의 데이터를 제공한다. 그리고 어떤 제조업체는 ASTM 시험 방법을 그대로 따르지 않고 변경된 방법을 사용하기도 하는데, 이 경우에는 변경 시험 방법에 대한 사전 승인이 반드시 수반되어야 한다.

Table 8-1 Standard test methods and design properties

Property	Test	Comments
Axial tensile	ASTM D2105	
Ultimate stress	or	ASTM D2105
Design stress	ASTM D638	Commonly = 25% ultimate
Modulus of elasticity		Usually 2×10^6 psi ($13.8 \times 10^3</math> MPa)$
Axial compression	ASTM D695	
Ultimate stress		
Design stress		Commonly = 25% ultimate
Modulus of elasticity		Usually 2×10^6 psi ($13.8 \times 10^3</math> MPa)$
Short-term failure pressure	ASTM D1599	From test results
Ultimate hoop tensile stress		
Hydrostatic design stress	ASTM D2992	
Procedure A cyclic pressure		Cyclic pressure rating for $657 \times 10^6</math> cyclesService factor = 1.0$
Procedure B static pressure		Static pressure rating for 438,000 h Service factor = 0.56
Coefficient of linear thermal expansion	ASTM D696	*
Collapse rating		
Ultimate pressure	ASTM D2924	Allowable design: 33% to 75% of ultimate
Design pressure		
External loading	ASTM D2412	
Stiffness factor		At 5% deflection
Pipe stiffness		At 5% deflection
Hoop flexural modulus		Calculated from stiffness factor at 5% deflection
Beam bending	†	‡
Ultimate stress		From test results
Design stress		Allowable = 12.5% of ultimate
Modulus of elasticity	ASTM D2925	From long-term tests
Thermal conductivity		Values typically range from 0.87 to 2.9

*ASTM D696 may not always produce appropriate data. Some manufacturers modify this test method to accurately determine the thermal expansion coefficient.
 †Ultimate beam bending stress typically comes from testing a simply supported (two typical supports) pipe with a concentrated load at the center. The recommended 8:1 safety factor accounts for typical operation with combinations of bending and internal pressure. This combination could shorten the service life if not considered.
 ‡There is no universally accepted method for establishing thermal conductivity to fiberglass pipe. The usual technique consists of applying heat at a controlled rate to the pipe inside diameter in a water bath. Temperature drops across the pipe wall then gives thermal conductivity as $Btu/(ft^2 \cdot hr) \cdot ^\circ F/in.$ ($W/m \cdot K$).

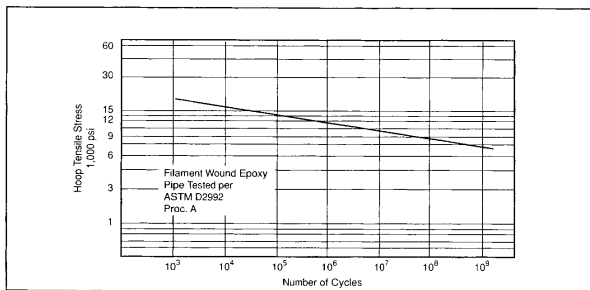
8.3 정적내압

유리섬유 복합관의 정적내압에 대한 유체 정역학적 설계 기반은 ASTM D2992에 따라 수행한 장기 시험에 기초한다. 이 표준 방법은 두 가지 방법으로 정적압력을 정의한다. 절차 A는 사이클링 조건에 대한 유체 정역학적 설계 기반을 정의하며, 절차 B는 고정 정적압력 가설에 대한 정격을 정의한다. 그림 8-1 및 8-2는 절차 A 및 절차 B에 따라 시험한 유리섬유 복합관의 일반적 특성을 보여준다. 이 방법은 일정 온도 및 축방향 제약이 없는 상태에서 최소 18개의 시편을 각기 다른 응력 수준에 노출시켜서 시험을 진행한다. 이 때 응력 수준은 단기 및 장기 (>10,000 h) 시험 모두에 대해서 실패 결과를 얻을 수 있도록 설정한다. 후프 응력 대 시간 또는 사이클 도메인에 데이터를 나타내면 결과적으로 회귀 곡선을 따른다. 이 곡선은 15로 외삽한다.

유체 정역학적 기반은 AWWA 가설에 대해 50년 또는 657,000,000 사이클의 예상 수명을 제공하는

후프 응력(또는 변형)이다. 서비스 설계 인자(FS)를 외삽된 값에 적용하면 허용 설계 응력을 얻을 수 있다. 서비스 인자는 가설마다 서로 다르다. 사이클 조건(절차 A)의 경우 0.8~1.0 그리고 정적 조건(절차 B)의 경우 0.5~0.56의 서비스 설계 인자가 주로 사용되고 있다.

ANSI/AWWA 표준 C950의 경우 설계 인자(FS)는 서비스 설계 인자의 역수이며 이는 항상 1 보다 크거나 같다. 현재 시장에는 다양한 복합관 시공방법 및 재료들이 나와 있다. 이번 장에 기술된 규칙을 제조업체가 제공하는 유체 정역학적 기반 응력 및 변형에 적용할 경우 사용할 제품을 판단하는 데 큰 도움이 될 것이다.



NOTE: This is representative data. Consult the manufacturer for specific product rating.
Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-1 Fatigue resistance (cyclic internal pressure)

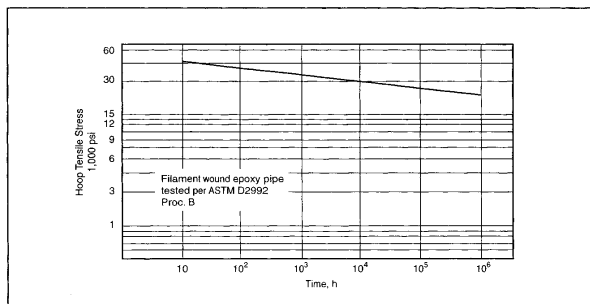


Figure 8-2 Fatigue resistance (static internal pressure)

8.3.1 후프 인장 응력 계산

다음은 후프 응력 계산식이다.

$$S = \left[\frac{P(D-t)}{2t} \right] \quad (\text{식 8-1})$$

여기서,

- S = 설계 후프 응력, psi
- D = 강화 OD의 평균, in.
- P = 정적내압, psi
- t = 최소 강화벽 두께, in.

8.3.2 후프 변형 계산

다음은 후프 변형 계산식이다.

$$\xi = \frac{S}{E_T} \quad (\text{식 8-2})$$

여기서,

- ξ = 후프 변형, in./in.
- E_T = 후프 탄성 인장 계수, psi

8.4 온도팽창 및 수축

유리섬유 복합관은 후프 및 축방향으로 서로 다른 팽창률을 가진다. 예를 들어, 55도 각도로 감아서 만든 필라멘트 와인딩 복합관은 후프방향으로는 강재와 동일한 온도팽창 특성을 보인다. 축방향으로는 강재의 팽창률보다 2배 더 큰 팽창률을 보인다. 복합관 시스템 전체의 팽창 및 수축은 다음 식으로 결정된다.

$$L_c = (12) (C_t) (L) (T_c) \quad (\text{식 8-3})$$

여기서,

- L_c = 길이 변화, in.
- C_t = 축방향 온도팽창 계수 in./in./°F
- L = 앵커사이의 복합관 길이, ft
- T_c = 온도 변화, °F

(팽창 : 최대 동작 온도 - 설치 온도, 수축 : 설치 온도 - 최소 동작 온도)

예제 8-1 : 온도 변화가 60F이고 팽창계수가 1.09×10^{-5} 인 공칭 2인치 복합관라인에 대한 ft당 길이 변화를 계산하라.

$$L_c = (12) (1.09 \times 10^{-5}) (1) (60) = 0.0078 \text{ in./ft}$$

(식 8-4)

복합관 시스템의 온도팽창 및 수축 효과를 결정하기 위해서는 다음 조건을 알아야 한다:

- 설계 온도 조건
- 복합관의 크기 및 물리적 성질
- 종단 지점의 치수 및 온도 변화를 포함한 시스템의 레이아웃
- 종단 반작용의 제한사항

8.5 온도팽창 설계

지상 가설 복합관라인 설계 시에는 온도팽창으로 인해 복합관에 대한 지지 및 가이드가 중요한 이슈로 등장한다. 정적압력 저항 및 수명 제한과 더불어 온도팽창 및 수축의 효과도 함께 고려해야 한다. 온도팽창 및 수축으로 인한 길이 변화에 대응하기 위한 방법에는 여러 가지가 있으나, 그 중에서도 가장 흔히 사용되고 있는 방법은 다음과 같다:

- 앵커 및 가이드 사용
- 방향 전환
- 확장 루프
- 기계적 확장 이음부

가이드, 확장 루프 및 기계적 확장 이음부는 각 종단에 앵커를 사용하는 직선 복합관라인에 사용된다. 경험에 의하면 방향 전환이 온도팽창 대응에 있어서 가장 저렴한 방법이며, 일정 간격 가이드 설치가 다음으로 경제적인 방법이며 기계적 확장 이음부 및 확장 루프가 그 뒤를 잇는다. 온도변화가 작은 경우 그리고 복합관 시스템이 짧은 복합관으로만 이루어진 경우에는 온도팽창 문제가 크지 않기 때문에 특별한 대책을 마련할 필요는 없다. 하지만, 모든 시스템을 구축할 경우에는 어느 정도 길이 변화에 대응할 수 있는 시스템을 구축하는 것이 좋다. 8.7절의

방법론은 이러한 설계 기준에 대해 다루고 있다.

경험에 의하면 지상 가설 복합관 시스템의 경우 약 300 ft(91m) 간격으로 앵커를 설치하는 것이 바람직하다(주: 복합관 직경이 큰 경우에는 달라질 수 있다). 앵커는 진동 및 부하 조건 변경으로 인한 복합관의 이동을 막아준다. 시스템내의 모든 변경 지점은 앵커를 사용해 단단히 고정시켜야 한다. 변경 지점은 복합관의 직경, 재료 및 높이 그리고 방향이 변경되는 지점과 복합관 제조업체의 변경 지점을 모두 포함한다. 변경 지점의 앵커는 복합관라인의 각 부분을 온도 종단 부하의 전달로부터 보호한다.

8.5.1 온도 종단 부하

유리섬유 복합관의 축방향 탄성계수는 강재의 약 1.5~10%까지 그 값이 매우 다양하다. 이처럼 비교적 낮은 계수는 설계 시 매우 큰 장점으로 작용한다. 낮은 계수는 보다 작은 종단 부하를 의미하며, 이는 강관에 비해 보다 약한 억제 장치를 사용할 수 있음을 뜻한다. 복합관 시스템내 내부 정적압력도 길이 변화를 초래할 수 있는데, 경험에 의하면 이로 인한 길이 변화는 매우 미미해서 설계시 고려할 필요는 없다.

온도 종단 부하 계산을 위한 식은 다음과 같다:

$$E_L = (C_t) (E) (A) (T_c) \quad (\text{식 8-5})$$

여기서,

E_L = 온도 종단 부하, lb

C_t = 축방향 온도팽창 계수, in./in./°F

E = 축방향 탄성계수, psi

(팽창의 경우 압축, 수축의 경우 인장)

A = 단면적, in.²

T_c = 온도 변화, °F

(팽창 : 최대 동작 온도 - 설치 온도, 수축 : 설치 온도 - 최소 동작 온도)

예제 8-2. 예제 8-1의 공칭 2인치 복합관의 강화 OD가 2.375인치, 압축 탄성계수 E_c 가 1.3×10^6 psi, 그리고 인장 탄성계수가 1.72×10^6 psi이다. 복합관라인은 75F에서 설치되고 최대 동작 온도는 200F, 최소 동작 온도는 35F이며, 온도팽창 계수는 1.09×10^{-5} 이다.

단계 1. 온도 변화를 계산한다.

$$T_c = 200 - 75 = 125^\circ\text{F} \text{ (팽창)}$$

$$T_c = 75 - 35 = 40^\circ\text{F} \text{ (수축)}$$

단계 2. 단면적을 계산한다.

$$A = \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2) \quad (\text{식 8-6})$$

$$A = 0.7854 (2.375^2 - 2.235^2) = 0.507 \text{ in.}^2$$

설계 계산시에는 주로 강화 치수만 사용한다. 레진 표면은 복합관의 강도에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

단계 3. 식 8-5를 사용해서 종단 부하를 계산한다.

$$\begin{aligned} E_L &= (1.09 \times 10^{-5})(1.3 \times 10^6)(0.507)(125) \\ &= 898 \text{ lb} \text{ (팽창)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_L &= (1.09 \times 10^{-5})(1.72 \times 10^6)(0.507)(40) \\ &= 380 \text{ lb} \text{ (수축)} \end{aligned}$$

앵커간 복합관 길이가 늘어나면 복합관에는 수축이 일어나며, 수축이 일어나면 복합관에는 장력이 발생한다.

8.5.2 간격 설계 - 앵커 및 가이드

방향 및 높이 변경이 발생하는 지점마다 앵커를 설치하게 되면 시스템은 직선 복합관라인으로만 구성된 형태가 된다. 앵커가 설치된 상태에서 가이드를 사용하면 팽창 문제를 경제적으로 해결할 수 있다. 유리섬유 복합관의 비교적 낮은 계수는 온도 응

력을 복합관 벽의 압축 응력으로 흡수하게 한다. 복합관 지지 간격을 줄이는 방법을 통해 원주 불안정성을 줄이지 않을 경우, 팽창으로 인한 압축 응력은 좌굴로 이어질 수 있다.

최대 허용 가이드 간격을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$L_G = 0.2617 \sqrt{\frac{(E_b)(I)}{(C_t)(A)(T_c)(E_c)}} \quad (\text{식 8-7})$$

여기서,

L_G = 가이드간 최대 거리, ft

E_b = 축방향 굽힘 탄성 계수, psi

E_c = 축방향 압축 탄성 계수, psi

I = 관성모멘트, in.^4

C_t = 축방향 온도팽창 계수, $\text{in./in./}^\circ\text{F}$

A = 강화 복합관 벽의 단면적, in.^2

T_c = 온도 변화, $^\circ\text{F}$

굽힘 및 압축 계수는 실험 데이터로부터 얻어지는 값들이기 때문에, E_b/E_c 비는 최소 및 최대 동작 온도에서의 대표적인 데이터를 사용해서 계산해야 한다. 두 계산값 중 작은 값이 안전한 설계 조건을 만족시킬 것이다. 가이드 간격과 지보 간격을 비교해서 지보 간격과 적절한 조화를 이루도록 가이드 간격을 조절한다. 예를 들면, 지보 2개 또는 3개마다 지보대신 가이드를 사용한다. 이 때 가이드는 지보 역할을 수행하는 것이기 때문에 이번 장의 다른 절에서 기술한 지보, 앵커 및 가이드의 최소 요구사항을 만족해야 한다.

예제 8-3: 예제 8-1 및 8-2의 데이터와 다음의 정보를 사용해서 최대 허용 가이드 간격을 결정한다.

35°F에서 $E_b = 2.2 \times 10^6 \text{ psi}$

그리고 $E_c = 1.3 \times 10^6 \text{ psi}$

200°F에서 $E_b = 1.3 \times 10^6 \text{ psi}$

그리고 $E_c = 0.6 \times 10^6 \text{ psi}$

단계 1. I 를 계산한다.

$$I = \frac{\pi}{64} (OD^4 - ID^4)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (2.375^4 - 2.235^4)$$

$$I = 0.337 \text{ in}^4$$

단계 2. 각각의 온도에서 E_b/E_c 를 계산한다.

$$35^\circ\text{F에서 } E_b/E_c = 2.2 \times 10^6 / 1.3 \times 10^6 = 1.69$$

$$200^\circ\text{F에서 } E_b/E_c = 1.3 \times 10^6 / 0.6 \times 10^6 = 2.17$$

35°F 데이터를 사용한다(위 두 값 중 작은 값을 사용한다).

단계 3. 식 8-7을 사용해서 L_G 를 계산한다.

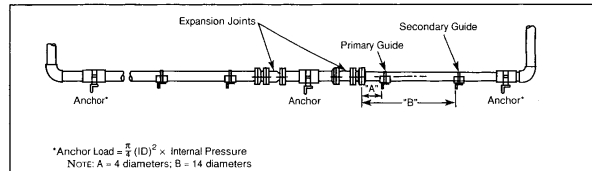
$$L_G = 0.2617 \sqrt{\frac{(2.2 \times 10^6)(0.337)}{(1.09 \times 10^{-5})(0.507)(125)(1.3 \times 10^6)}} = 7.5 \text{ ft}$$

8.5.3 확장 이음부 설계

확장 이음부는 긴 직선 복합관의 온도팽창을 흡수 하는데 사용된다. 확장 이음부에는 여러 종류가 있으며 유리섬유 복합관 시스템과 더불어 사용할 수 있다. 온도 변화시에 발생하는 힘이 금속 시스템에 비해 비교적 작기 때문에 작은 힘에서도 동작하는 확장 이음부를 사용하는 것이 필수적이다. 따라서, 확장 이음부당 필요 이동량 및 확장 이음부의 수는 유리섬유 시스템의 경우가 더 크다.

확장 이음부에 대한 허용 임계 힘은 복합관내에서 발생하는 온도적 힘과 지보 또는 가이드의 간격에 의해 결정된다. 일반적으로 확장 이음부 시작부분으로부터 복합관 직경의 4배되는 위치에 첫 번째 가이드가 설치되며, 복합관 직경의 14배에 해당하는 거

리에 두 번째 가이드가 설치된다(그림 8-3 참조). 이들 가이드 및 위치는 올바른 정온도에 도움을 준다. 나머지 지보간의 간격은 최대 계산 간격보다 작아야 한다.



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-3 Typical expansion joint installation

허용 임계하중을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 (E_c) (I)}{L_G^2} \times S_f \quad (\text{식 8-9})$$

여기서,

P_{cr} = 복합관의 임계 좌굴 하중, lb

E_c = 동작 온도에서의 축방향 압축 탄성계수

I = 관성모멘트, in^4

L_G = 지보 간격, in.

S_f = 재료 변화에 대응하기 위한 안전 인자 추천값 0.9

예제 8-4: 식 8-9와 이전 예제들의 데이터(지보 간격, $L_G = 7.5 \text{ ft}$)를 사용해서 공칭 2인치 복합관에 대한 임계 좌굴 하중을 계산한다.

$$P_{cr} = \frac{(3.1416)^2 (1.3 \times 10^6) (0.337)}{[(7.5)(12)]^2} \times 0.9$$

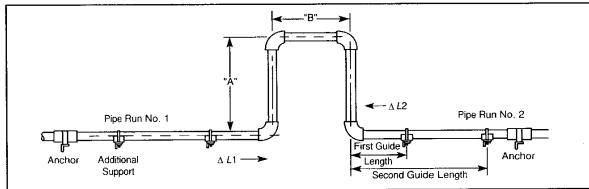
$$P_{cr} = 481 \text{ lb}$$

주: 정적압력 스트레스도 고려되어야 한다.

정적압력 스트레스는 설계 정적압력에 확장 이음부 단면적을 곱한 값이다.

모든 가설에서 확장 이음부의 임계 힘은 복합관에 의해서 발생된 온도 종단 부하를 초과해서는 안된다.

확장 이음부의 고비용과 제한된 변화는 많은 가설에 적용하기에는 비실용적이다. 그러한 경우에는 루프, 가이드, 또는 짧은 길이의 유연한 호스 등을 사용해 온도팽창에 대응할 수도 있다. 올바른 동작을 위해서는 확장 이음부의 양쪽에 반드시 앵커를 설치해야 한다.



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-4 Expansion loop dimensions

8.5.4 확장 루프 설계

확장 루프는 그 유연함으로 길이 변화에 대응한다 (그림 8-4 참조). 이 설계 방법은 자유 종단에 부하가 집중되는 캔틸레버 빔에 발생하는 응력을 계산하는데 사용되며, 루프 레그 및 복합관에 평행한 라인의 유연성은 무시한다.

각 확장 루프의 양쪽 끝에 설치하는 가이드가 올바른 정온도를 돕는다. 처음 두 개의 가이드에 대한 권장 거리는 공칭 직경의 4배 및 14배이며, 최대 허용 간격을 초과하지 않는 범위 내에서 가이드 및 지보를 추가적으로 설치해야 한다.

확장 루프 설계를 위해서는 다음 식을 사용한다:

$$L_A = \sqrt{\frac{(K)(L_c)(E_b)(OD)}{(144)(\sigma_b)}} \quad (\text{식 8-10})$$

- 여기서,
- L_A = "A" 레그의 길이, ft
- L_C = 길이 변화, in.
- E_b = 축방향 굽힘 탄성 계수, psi
- OD = 복합관 외경, in.(최소)

- K = 캔틸레버 빔 상수
- = 가이드가 없는 캔틸레버 빔의 경우 0.75
- = 가이드가 있는 캔틸레버 빔의 경우 3.0
- σ_b = 설계 허용 굽힘 응력, psi (최소 $S_f=8$)

예제 8-5: 앞의 예제에 나왔던 공칭 2인치 복합관의 허용 굽힘 응력 b 가 1,850 psi (8:1)이고 계산된 최대 길이 변화가 4.0 인치일 때 이 복합관에 필요한 확장 루프 "A" 레그의 길이를 계산한다.

$$L_A = \sqrt{\frac{(0.75)(4.0)(1.3 \times 10^6)(2.375)}{(144)(1,850)}}$$

$$L_A = 5.9ft$$

"B" 레그의 길이는 일반적으로 "A" 레그 길이의 절반이므로, "B" = (5.9)(0.5) = 2.95 ft.

만일 이음부의 최대 허용 굽힘 응력이 복합관의 최대치보다 크다면, 이음부의 굽힘 모멘트는 고려할 필요가 없다. 그렇지 않다면 제조업체가 이음부에 대한 허용 굽힘 모멘트 값을 제공할 것이다. 이 값들은 식 8-11에서 "A" 레그 길이를 계산하는 데 사용된다. 계산 결과를 비교해서 큰 값을 사용한다. 중량벽 복합관 또는 비교적 얇은 벽을 가진 복합관의 경우 대개 LA 치수에 대한 검증이 필요하다.

$$L_A = \sqrt{\frac{12(L_c)(E_b)(I)}{144(M)}} \quad (\text{식 8-11})$$

- 여기서,
- L_C = 길이 변화, in. (최대)
- M = 허용 엘로우 굽힘 모멘트, lb-in.

주 : 경우에 따라 제조업체가 모든 이음부에 앵커를 설치할 것을 요구할 수도 있다. 예를 들면, 연귀

이음을 한 이음부 또는 직경이 큰 이음부의 허용 굽힘 응력은 복합관의 값보다 작을 수 있다. 이와 같은 경우에는 앵커, 가이드 및 확장 이음부를 사용해서 온도팽창에 대응하는 수밖에 없다.

8.5.5 방향 전환

경우에 따라서는 시스템 방향 전환을 통해 확장 루프의 기능과 동일한 결과를 구현할 수 있다. 그러나, 새들과 같은 부품을 사용한 방향 전환은 굽힘 응력이 이음부를 손상시킬 수 있기 때문에 확장 및 수축을 흡수하는데 사용해서는 안 된다. 주어진 방향 전환에서의 복합관 응력은 전체 길이 변화 및 방향 전환 이후 첫 번째 행어(hanger) 또는 가이드까지의 거리에 의해서 좌우된다. 다시 말하자면, 필요한 유연한 레그 길이는 최대 길이 변화에 의해 결정된다. 권장 지보 및 가이드 간격을 무시할 수는 없으나, 스트랩 행어와 같이 유연한 이동식 지보는 복합관의 변화도 허용하고 길이 변화에 대응할 수 있는 동시에 필요한 지지력도 제공한다. 지보는 횡방향 변화 및 복합관 좌굴을 방지해야 한다. 큰 온도적 변화가 예상되는 경우에는 방향 전환이 이루어지는 지점에 짧은 길이의 유연한 호스를 설치함으로써 복합관라인의 변화에 대응할 수 있다. 이 방법은 간혹 주기적인 가이드 설치 방법을 적용할 수 없을 경우 큰 변화를 보상할 수 있는 가장 경제적인 방법이다. 제조업체는 각각의 유연한 호스에 대한 최소 곡률 반경, 화학적 성질, 온도 및 정적압력 정격에 대한 사양을 제공한다.

유연한 복합관 레그의 길이(예를 들면, 첫 번째 지보 또는 가이드까지의 거리)를 계산하는 식은 다음과 같다:

$$L_{sh} = \sqrt{\frac{1.5(L_c)(E_b)(OD)}{144(\sigma_b)}}$$

여기서,

L_{sh} = 방향 전환 지점부터 첫 번째 행어까지의 길이

예제 8-6: 앞의 예제에서 나왔던 공칭 2인치 직경의 복합관에 대한 L_{sh} 값을 계산한다.

$$L_{sh} = \sqrt{\frac{1.5(4.0)(1.3 \times 10^6)(2.375)}{144(1,850)}}$$

$$L_{sh} = 8.3ftz$$

일반적으로 이러한 형태의 분석은 비틀림 응력은 무시한다. 허용 굽힘 응력이 허용 비틀림 응력보다 훨씬 작기 때문이다. 따라서, 그림 8-5에 나와 있는 복합관 레그의 굽힘은 복합관의 변화를 일반적으로 잘 흡수한다. 그러나, 앵커를 사용하지 않을 경우에는 해당 레그에 대해서 식 8-12에서 계산된 L_{sh} 보다 크거나 같은 자유 길이를 확보해야 한다.

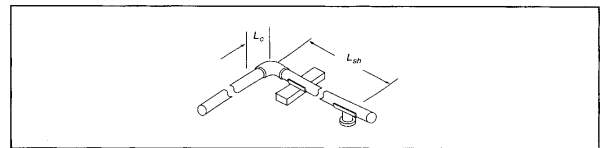


Figure 8-5 Directional change

8.6 지보, 앵커 및 가이드

지보, 앵커 및 가이드 설계 및 배치시 반드시 준수해야 하는 6가지 기본 규칙은 다음과 같다.

8.6.1 규칙 1. 부하를 집중시키는 일은 삼가한다.

최대 85 psi (586 kPa)의 버팀 응력을 가지며 복합관 바닥중 120도 부분을 커버할 수 있는 곡선 형태의 지보를 사용한다. 앵글 아이언, I-빔 또는 U-볼트와 같은 몰러 지보 및 플랫 지보에 복합관을 고정시킬 때는 복합관을 적절히 보호한 상태에서 고정시킨다.

복합관이 놓이는 지보 표면에 뾰족한 부분이 있어

서는 안 되지만, 만일 있다면 금속 또는 유리섬유 슬리브를 사용해 복합관을 보호해야 한다.

Table 8-2 Minimum support width for 120° contact supports

Pipe Size		Minimum Support Width	
<i>in.</i>	<i>mm</i>	<i>in.</i>	<i>mm</i>
1	25	0.88	22.4
1.5	40	0.88	22.4
2	50	0.88	22.4
3	80	1.25	31.8
4	100	1.25	31.8
6	150	1.50	38.1
8	200	1.75	44.5
10	250	1.75	44.5
12	300	2.00	50.8
14	350	2.00	50.8
16	400	2.50	63.5

Note: Table is based on maximum liquid specific gravity of 1.25.

8.6.2 규칙 2. 최소 지보 치수를 만족한다.

강관에 사용되는 표준 복합관 지보가 표 8-2의 최소 지보 폭을 만족한다면 유리섬유 복합관을 지지하는데 그대로 사용할 수 있다. 지보가 이 최소 조건을 만족하지 못할 경우에는 자른 유리섬유 복합관 또는 금속을 사용해서 그 크기를 크게 만들어야 한다. 지보 폭은 버팀 응력이 85 psi (586 kPa)를 초과하지 않도록 넓게 만들어져야 한다.

지보를 크게 만들기 위해서 사용하는 슬리브는 최대 동작 온도에서도 안정적으로 동작하는 접착제를 사용해서 접착시켜야 한다. 복합관 및 슬리브의 접착 표면은 사포를 사용해서 거칠게 만든다.

8.6.3 규칙 3. 외부적 마모로부터 보호한다.

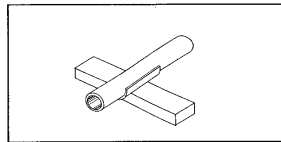
진동이 있는 경우에는 접촉면을 마모로부터 보호해야 한다(그림 8-6 참조). 잦은 온도적 사이클 및 진동 부하가 복합관에 영향을 미친다면 모든 접촉점을 보호해야 하는데, 복합관 벽을 유리섬유 또는 강재로 만들어진 새들 또는 동일 복합관의 일부분에 접촉하는 방법을 사용할 수 있다.

8.6.4 규칙 4. 무거운 장비는 따로 지지한다.

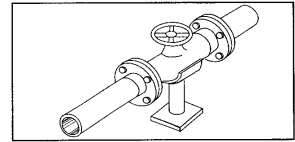
밸브를 포함한 무거운 장비는 수평 및 수직 방향 각각에 대해 지지해야 한다.

8.6.5 규칙 5. 심한 굽힘은 피한다.

복합관라인을 지표상에 직접 설치할 경우 복합관에 과도한 응력을 발생시킬 수 있는 심한 굽힘은 피한다.



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-6 Fiberglass wear protection cradle



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-7 Steel wear protection cradle

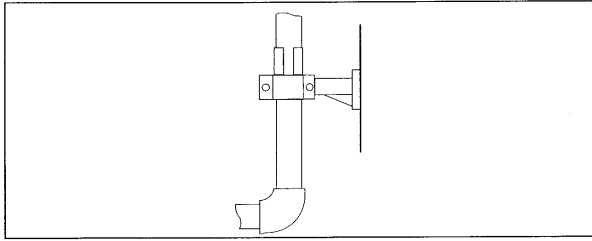
8.6.6 규칙 6. 수직 복합관에서 과도한 부하는 피한다.

수직 복합관은 그림 8-8에서 보는 바와 같이 지지한다. “복합관 압축 방식”을 사용하는 것이 좋다. 어쩔 수 없이 “복합관 장력 방식”을 사용해야 하는 경우라면, 인장 부하가 복합관의 최대 인장 정격보다 크지 않도록 주의를 기울여야 한다. 가이드의 간격은 수평 복합관라인을 설치하는 경우와 동일한 간격을 사용한다(그림 8-8 참조).

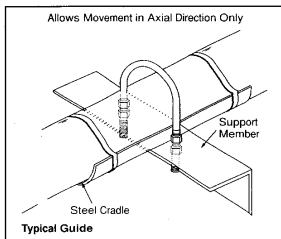
8.6.7 가이드

가이드는 복합관이 축방향으로 자유롭게 움직일 수 있을 정도로 느슨해야 한다. 하지만, 가이드 자체는 복합관이 횡방향으로 움직이는 일을 방지하기 위해 지지물에 단단하게 고정되어야 한다(그림 8-9 참조).

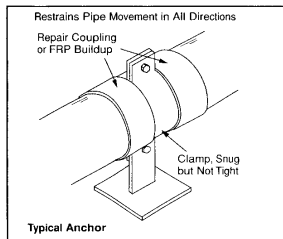
모든 가이드는 지보 역할을 수행하는 것이기 때문에 지보의 최소 요구사항을 만족해야 한다. 온도적 사이클이 자주 발생하는 설치 환경이라면 8.6.3 절을 참조한다.



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-8 Vertical support



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-9 Guide support



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-10 Anchor support

8.6.8 앵커

앵커는 외부로부터 작용하는 힘에 대해서 복합관의 변화를 방지해야 한다. 복합관 앵커는 복합관 시스템을 각각의 독립된 부분으로 분리하는 역할을 수행한다. 앵커 또한 외부로부터 작용하는 힘을 견딜 수 있는 지지물에 단단히 고정시켜야 한다. 경우에 따라 펌프, 탱크 및 이와 유사한 장비들이 앵커로 사용될 수도 있으나, 대부분의 경우 복합관의 크기가 변경되거나 유리섬유 복합관이 다른 재료의 복합관 또는 다른 메이커의 복합관에 연결될 때마다 앵커를 사용하는 것이 일반적이다. 밸브 위치, 복합관 방향 변경 위치 그리고 주요 분기 연결 위치에도 앵커를 사용한다. 새들 및 래터럴(lateral)은 특히 굽힘 응력에 민감하다. 새들 및 래터럴의 응력을 최소화 하기 위해서는 각각의 양쪽에 앵커를 설치한다.

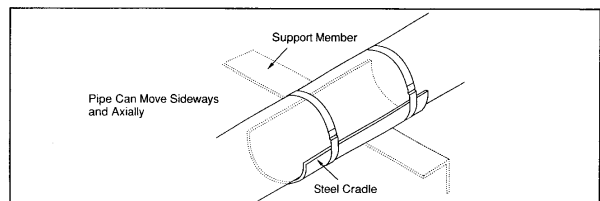
그림 8-10은 일반적인 앵커를 보여준다. 복합관 시스템 관련 경험에 의하면 지상 가설 복합관 시스템의 경우 약 300 ft(91m) 간격으로 앵커를 설치하는 것이 바람직하다. 이들 앵커는 진동 및 물 충격으로 인해 복합관이 움직이는 것을 방지한다.

앵커를 설치하는 여러 가지 방법 중 한 방법은 앵

커 슬리브사이 또는 앵커 슬리브와 이음부 사이에 클램프를 설치한다. 복합관에 부착된 슬리브는 복합관이 앞뒤로 움직이는 것을 방지하며, 슬리브의 두께는 클램프 두께와 같거나 커야 한다. 대개 클램프의 양측에 각각 하나의 슬리브를 접착해서 사용한다. 앵커 슬리브는 대개 복합관 직경에 해당하는 길이로 만들어지며, 원주의 180도를 커버한다. 앵커 또한 지보 역할을 수행하는 것이기 때문에 지보의 최소 요구사항을 만족해야 한다.

8.6.9 지보

복합관 및 유체의 중량으로 인한 과도한 복합관 편향을 방지하기 위해서는 다음 방법 중 한 가지 방법을 사용해 결정한 간격으로 수평 복합관을 지지한다(그림 8-11 참조).



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.
Figure 8-11 Typical support

8.6.9.1 타입 I. 한쪽 끝의 이음부 또는 3 스패 길이보다 작은 섹션에 연결된 단순한 단일 스패(스패 길이당 두개의 지보)의 복합관. 경우에 따라 보다 정확한 스패 길이를 얻기 위해서는 앵커 근처의 섹션과 같이 다른 형태의 스패에 대한 빔 분석을 사용하는 경우도 있으나, 다음 식을 사용하는 것이 보다 안전한 방법이다.

$$L_s = 4 \sqrt{\frac{(d_m)(E_b)(I)}{0.013(W)}} \quad (\text{식 8-13})$$

여기서,

$$L_s = \text{지지되지 않는 스패 길이, in.}$$

- d_m = 허용 중간지점 편향 (유리섬유의 경우 일반적으로 0.5인치), in.
- $W = P_w + P_w$, lb/lin in.
- P_w = 복합관 중량, lb/lin in.
- W_f = 유체 중량, lb/lin in.
- $W_f = \rho V_p/12$
- L_h = 선형 길이 (lb/ft를 얻기 위해서 1.0 ft를 사용한다)
- ρ = 밀도, lb/ft²
- V_p = ft 당 복합관 부피, ft³/ft
- $V_p = (\pi/(ID/12)^2)(L_h/4)$
- $I = (\pi/64)(OD^4 - ID^4)$
- ID = 내경, in.
- OD = 외경, in.

중간스팬 편향 d_m 이 0.5인치 (13 mm)를 초과할 경우 제조업체로부터 허용 굽힘 응력 또는 버팀 응력과 같은 다른 고려 요소에 대한 정보를 구한다. 중간스팬 편향이 0.5인치 (13 mm) 이하인 경우 일반적으로 복합관라인의 굽힘 응력은 복합관의 허용 굽힘 응력보다 낮다. 설치 후 중간스팬 편향이 0.5인치 (13mm) 이상 발생하는 경우, 굽힘 응력에 대한 안전 인자가 8:1이면 정적내압으로 인한 굽힘 응력 및 길이방향 응력을 모두 상쇄시키는 데 충분한 것으로 밝혀졌다. 사실 사이클 굽힘 시험에 의하면 응력은 선형적으로 더해지는 특성을 나타내지 않으며 8:1 안전 인자면 안전한 것으로 나타났다(사이클 굽힘 시험은 설계 굽힘 응력 또는 그 이상의 응력 수준으로 구부린 복합관에 대해 사이클 정적압력 시험을 실시하는 시험이다). 비교적 얇은 벽으로 된 낮은 강성의 복합관의 경우 지보에서의 로컬 버팀 정적압력이 매우 큰 경우가 종종 있다. 이러한 가설에 사용되는 지보는 180도의 접촉면이 필요하며, 보다 작은 직경의 강성이 높은 복합관에 일반적으로 사용되

는 85 psi (586 kPa)와는 달리 안전한 설계 허용 버팀 정적압력 (45 psi [310 kPa])을 따른다. 복합관 디자인이 제조업체마다 서로 다르기 때문에, 제품 및 시스템에 대한 제조업체의 권장값을 사용한다.

예제 8-7: 앞의 예제에서 나왔던 공칭 2인치의 복합관을 사용해서 다음 절차에 따라 허용 스패 길이 L_s 를 계산한다.

단계 1. 식 8-14를 사용해 복합관 부피를 계산한다.

$$V_p = \frac{3.1216 \left(\frac{2.235}{12} \right)^2 (1.0)}{4}$$

$$V_p = 0.0272 \text{ ft}^3/\text{ft}$$

단계 2. W 를 계산한다.

$$p = (6.24)(1.05) = 65.5$$

$$W_f = (65.5)(0.0272) = 1.78 \text{ lb/ft}$$

$$W = 0.4 + 1.78 = 2.18 \text{ lb/ft}$$

단계 3. 식 8-13을 사용해 L_s 를 계산한다.

$$L_s = \sqrt[4]{\frac{(0.5)(1.3 \times 10^6)(0.337)}{0.013 \left(\frac{2.18}{12} \right)}}$$

$$L_s = 98.1 \text{ in. 또는 } 8.2 \text{ ft}$$

8.6.9.2 타입 II. 연속빔으로 분석된 복합관 - 3 스패 전체가 부하.

$$L_s = \sqrt[4]{\frac{(d_m)(E_b)(I)}{(0.0069)(W)}} \quad (\text{식 8-15})$$

8.6.9.3 타입 III. 연속빔으로 분석된 파이프 - 4 스패 전체가 부하.

$$L_s = \sqrt[4]{\frac{(d_m)(E_b)(I)}{(0.0065)(W)}} \quad (\text{식 8-16})$$

8.6.9.4 타입 IV. 양쪽 끝이 고정된 빔으로 분석된 복합관 - 균일하게 분포된 부하.

$$L_s = 4 \sqrt{\frac{(d_m)(E_b)(I)}{(0.0026)(W)}} \quad (\text{식 8-17})$$

지보는 8.6.1 절부터 8.6.6 절까지 기술된 지보 최소 요구사항을 만족해야 한다. 주 : 직경 대비 벽 두께가 작은 경우 지보에 좌굴이 발생할 확률이 높다. 이러한 경우에는 시험을 통해서 검증된 경험적 방정식과 특별한 버팀 응력 계산식을 사용해야 할 수도 있다.

8.7 굽힘

유리섬유 복합관의 최소 곡률반경은 최종 단기 굽힘 응력의 1/8인 설계 응력에 기초해서 결정된다. 새들 및 래터럴과 같은 몇몇 부품은 다른 것들보다 굽힘 응력에 취약하다(권장값 및 제한값은 제조업체로부터 구한다). 최소 곡률반경 계산식은 다음과 같다.

$$R_m = \frac{(E_b)(OD)}{(24)(S_b)} \quad (\text{식 8-18})$$

여기서,

$$R_m = \text{최소 허용 곡률반경}$$

예제 8-8: 앞의 예제에서 사용된 공칭 2인치 복합관과 식 8-18을 사용해서 75°F에서의 최소 곡률반경을 계산한다.

$$R_m = \frac{(2.2 \times 10^6)(2.375)}{(24)(1,850)}$$

$$R_m = 117.7 \text{ ft}$$

재료의 물성은 온도에 따라 변하기 때문에, 허용 최소 곡률반경도 온도에 따라 그 값이 달라진다.

8.8 온도전도도

유리섬유 복합관 벽의 온도전도도는 금속의 약 1%에 불과하다. 그러나, 대부분의 온도전달 현상에 있어서 복합관의 온도 손실 및 이득은 복합관의 온도전도도에 의해서라기보다는 주변 매체(예를 들면, 공기 및 토양 등)로의 온도 흐름에 대한 저항에 의해 결정된다. 이는 비교적 얇은 유리섬유 복합관 벽의 절연 효과가 매우 낮은 주요 원인이다. 이는 강관에 대한 온도절연표를 대부분의 유리섬유 복합관 라인에도 그대로 적용할 수 있는 근거가 된다. 온도전도도 계수는 유리섬유 복합관의 종류에 따라 그 값이 서로 다르다. 일반적으로 에폭시 레진 복합관의 경우 2.5-3.0 Btu/(h) (ft²)(°F)/in. (0.36-0.43 W/m-K)이며, 폴리에스터 또는 비닐 에스터 레진 복합관의 경우 1.0-1.5 Btu/(h) (ft²)(°F)/in. (0.14-0.22 W/m-K)이다.

8.9 온도 트레이싱

유리섬유 복합관을 가온도하는데는 스팀 트레이싱과 전기 가온도 테이프를 사용할 수 있다. 이중 어떤 방법을 사용하든 다음의 세 가지 조건이 최대 요소 온도를 결정한다:

1. 평균 벽 온도는 복합관의 온도 정격을 초과할 수 없다.
2. 최대 트레이싱 온도는 복합관의 최대 정격 온도보다 100°F(38°C) 이상 높을 수 없다.
3. 복합관 내벽에서 복합관의 최대 권장 화학 저항 온도를 초과할 수 없다.

예제를 통해 이 세 가지 조건의 적용 예를 가장 잘 살펴볼 수 있다.

예제 8-9: 최대 온도 정격 210F의 유리섬유 복합관내에서 95°F의 50% 부식액을 유지할 수 있게 하

는 최대 온도 트레이싱 온도는 무엇인가? 이 가설에 대한 알려진 화학 저항 온도는 100°F이다.

단계 1:

조건 1에 대해서는 다음 식을 사용할 수 있다.

$$A_i = (T_i + T_i)/2 \quad (\text{식 8-19})$$

여기서,

$$A_i = \text{평균 벽 온도, } ^\circ\text{F}$$

$$A_i = (95 + T_i)/2 = 210^\circ\text{F}$$

$$T_i = \text{내벽 온도, } ^\circ\text{F}$$

$$T_i = \text{온도 트레이싱 온도, } ^\circ\text{F}$$

$$T_i = 325\text{F 최대}$$

단계 2:

조건 2에 대해서는 다음 식을 사용할 수 있다.

$$T_i = T_R + 100^\circ\text{F} \quad (\text{식 8-20})$$

여기서,

$$T_R = \text{복합관의 최대 정격 온도, } ^\circ\text{F}$$

$$T_i = 210^\circ\text{F} + 100^\circ\text{F} = 310^\circ\text{F}$$

단계 3:

식 8-19 및 식 8-20을 이용해 계산한 값 중 작은 값이 최대 트레이싱 요소 온도에 해당한다. 이 경우에는 310°F이다.

이 방법을 이용한 최대 트레이싱 요소 온도 계산은 흐르는 유체 조건을 포함하는 가설에만 해당된다. 정적 유체의 경우 최대 허용 트레이스 요소는 복합관의 화학 저항 온도이다. 이 예제의 경우 $T_i \leq 100^\circ\text{F}$.

단계 4:

조건 3의 경우 이프의 최대 권장 화학 저항을 결정하기 위해서는 제조업체의 데이터가 필요하다. 이 값을 내벽 온도 T_i 와 비교해야 하는데, T_i 보다는

커야 한다.

예제 8-9에서 최대 허용 트레이스 온도는 100°F이다.

8.10 특성 및 성질

유리섬유 복합관의 특성 및 성질은 금속 복합관에 대해 흔히 사용되는 것들과는 서로 다르다.

8.10.1 설계 정적압력 또는 응력

복합관 정적내압에 대한 설계 응력은 표 8-1에서 볼 수 있듯이 ASTM D2992를 바탕으로 한다. 이음부의 내부 작동 정적압력은 대개 최종 단기 실패 정적압력(ASTM D1599)의 1/4에 기초한다.

8.10.2 탄성계수이방성(異方性)

유리섬유 복합관은 이방성(異方性) 복합 소재기 때문에 축방향 탄성계수와 후프방향 탄성계수는 서로 다르다. 또 인장, 굽힘 및 압축 계수가 서로 크게 다르기 때문에 올바른 값을 사용하는 것이 매우 중요하다. 이러한 계수들은 레진의 종류, 유리의 양 그리고 유리 필라멘트 와인딩의 방향에 의해 좌우된다. 특정 부하 및 온도 조건에 대한 정확한 계수 값은 제조업체로부터 확인할 수 있다. 이 값들은 일반적으로 응력 변형 커브상에서 최종 실패 부하의 1/4에 해당하는 지점에서 접선을 그려서 구할 수도 있다. 이들 계수는 온도에 따라 그 값이 변한다.

8.10.3 허용 인장 또는 압축 부하

일반적으로 허용 설계 응력은 최종 단기 실패 부하의 25%이다. 최소 강화벽 두께(면적)와 함께 이 응력값을 사용해서 허용 최대 부하를 계산할 수 있다.

8.10.4 굽힘 부하

최종 빔 응력은 단기 실패를 구현하기 위해 중심에 집중된 부하를 적용한 단순 빔을 사용해 결정할

수 있다. 그리고, 허용 설계 응력은 최소 8:1의 안전 인자를 최종 실패값에 적용함으로써 구할 수 있다. 8:1 인자는 정적압력 복합관 가설에서 발생하는 복합적인 부하를 보상하기 위해 사용된다.

굽힘 계수는 일정 시간(대개 6주 이상) 동안 균일하게 분포된 부하를 가진 단순 지지 빔의 중간스팬 편향을 결정하는 테스트를 통해서 결정된다. 허용 굽힘 응력 및 탄성 굽힘 계수는 온도에 따라 그 값이 변화한다. 이 값은 복합관 가설에서 발생할 수 있는 극한의 온도까지 고려한 값이어야 한다.

8.10.5 포아송 비

유리섬유 복합관은 이방성 소재기 때문에 포아송 비는 부하 조건에 따라 그 값이 다르다. 예를 들어, 축방향 부하로 인한 후프방향 포아송비는 후프방향 부하로 인한 축방향 포아송비와 그 값이 서로 다르다.

8.10.6 진공 또는 외부 정적압력

유리섬유 복합관은 진공상태에서 소재를 이송할 수 있다. 붕괴 정적압력에 저항하는 유리섬유 복합관의 능력은 복합관 크기, 제조 방법 및 벽두께 대비 직경비, 그리고 원재료의 함수인 복합관 강성에 크게 의존한다.

유리섬유 복합관의 외압 저항은 ASTM D2924에 준한 시험을 통해서 결정할 수 있다. 이 표준 시험 방법을 통해서 두 가지 단기 실패 정적압력을 구할 수 있다:

- 좌굴 실패 정적압력 - 좌굴이 발생하는 외부 계이지 정적압력
- 압축 실패 정적압력 - 유체를 전송하지 않는 상태에서 복합관이 견딜 수 있는 최대 외부 계이지 정적압력

실제 시험을 거치지 않은 복합관에 대해서는 비례

상수를 이용해서 시험 데이터를 유추할 수 있다. 일반적으로 제조업체의 붕괴 정적압력 권장값은 복합관의 최종 단기 외부 실패 정적압력의 33~75%이다 (ASTM D2924). 설계시에는 제조업체의 권장값을 사용해야 한다.

8.10.6.1 좌굴 비례 상수

$$K = \frac{P}{E_c \left(\frac{r}{t}\right)^3} \quad (\text{식 8-21})$$

여기서,

K = 좌굴 비례 상수

P = 외부 붕괴 정적압력, psig

E_c = 탄성 원주 계수, psi

r = 평균 강화벽 두께, in.

t = 최소 강화벽 두께, in.

8.10.6.2 압축 비례 계수

$$C = \frac{P_c (OD - t)}{2t} \quad (\text{식 8-22})$$

여기서,

C = 압축 비례 계수

P_c = 실패시 정적압력, psi

REFERENCES

1. Standard for Fiberglass Pressure Pipe. 1995. ANSI/AWWA C950. Denver, Colo.: American Water Works Association.
2. Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for 'Fiberglass' (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings. 1991. ASTM D2992. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
3. Standard Test Method for Beam Deflection of 'Fiberglass' (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-

- Resin) Pipe Under Full Bore Flow. 1995. ASTM D2925. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
4. Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30 Degrees C and 30 Degrees C. 1991. ASTM D696. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
 5. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics (Metric). 1991. ASTM D695. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
 6. Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading. 1993. ASTM D2412. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
 7. Standard Test Method for External Pressure Resistance of 'Fiberglass' (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe. 1993. ASTM D2924. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
 8. Standard Test Method for Longitudinal Tensile Properties of 'Fiberglass' (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Tube. 1990. ASTM D2105. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
 9. Standard Test Method for Short-Time Hydraulic Failure Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings. 1988. ASTM D1599. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
 10. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic. 1994. ASTM D638. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.