

## 미국 유리섬유 복합관 설계 메뉴얼 소개 (Ⅲ) Introduction of American Fiberglass Pipe Design Manual (Ⅲ)



윤순종(Soon-Jong Yoon) 부회장 | 홍익대학교 토목공학과 | 교수 | sjyoon@hongik.ac.kr  
지효선(Hyo-Seon Ji) 이사 | 대원대학 철도건설과 | 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 개량공사에 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 메뉴얼(Fiberglass Pipe Design Manual, 2nd Edition)’에 대해서 연속기사로 일정한 분량으로 나누어서

소개하고자 한다. 본 메뉴얼은 총 10장으로 구성되어 있다(표 1 참조).

표 1. 유리섬유 복합관 설계 메뉴얼의 목차

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

### 2. 유리섬유 복합관 설계메뉴얼 소개

#### 제4장 유리섬유 복합관 수리계산

##### 4.1 수리학적 특성

유리섬유 복합관의 수리학적 특성은 다음과 같다.

- 유리섬유 복합관은 내부 표면은 낮은 유체 저항

항성을 가지기 때문에 더 낮은 마력으로 물을 수송할 수 있다. 이러한 특징으로 일반적인 파이프 수명에 비해 추가적인 경비절약 효과를 가지게 된다.

- 일반적으로 대부분의 유체 수송을 할 경우 표면이 매끄럽기 때문에 기간에 따른 유체 저항성이 증가하지 않는다.

- 또한 유리섬유 복합관은 매끄러운 표면을 가지기 때문에 다른 재료를 사용한 파이프의 유량에 비해 작은 직경이 선택할 수 있다.

- 공칭크기가 같더라도 내부 직경(ID)가 다른 파이프에 비해 크기 때문에 더 많은 유량을 수송할 수 있다.

제4장에서는 유리섬유관의 유입량, 경제성, 순간 유체의 성질의 분석을 위한 기본사항들을 수록하였다.

#### 4.2 초기 관 직경의 결정

주어진 유량 조건을 만족하는 관 시스템을 구성하기 위하여 먼저 초기 관 직경을 결정하여야 한다. 이렇게 결정된 관 직경으로부터 유속과 압력 손실을 구하고, 필요한 압력과 유속을 유지시키기 위한 펌프 용량 등의 설계에 이용할 수 있으며, 이를 통하여 전체 관로 시스템에 적절한 관을 선택할 수 있다. 초기 관 직경을 결정하기 위해서 아래의 식을 이용하여야 한다.

##### 4.2.1 최대 유속

$$v = \frac{48}{\sigma^{0.33}} \tag{1}$$

여기서,  $v$ =유속, ft/s,  $\sigma$ =유체 밀도, lb/ft<sup>3</sup> (물의 경우=62.4 lb/ft<sup>3</sup>)

##### 4.2.2 부식성 유체의 경우 최대 유속

$$v = \frac{24}{\sigma^{0.33}} \tag{2}$$

##### 4.2.3 물의 경우 최소 파이프 지름

$$d = 0.73 \frac{[\frac{Q}{SG}]^{0.5}}{\sigma^{0.33}} \tag{3}$$

여기서,  $d$ =관의 내경, in.,  $Q$ =유량, gpm,  $SG$ =유체의 중력, 무차원(물의 경우=1)

##### 4.2.4 부식성 유체의 경우 최소 파이프 지름

$$d = 1.03 \frac{[\frac{Q}{SG}]^{0.5}}{\sigma^{0.33}} \tag{4}$$

#### 4.3 전형적인 파이프 지름

4.2절의 공식은 부식성 유체와 물의 흐름에 대한 최소 관경이나 최대 유속을 나타낸다. 유리섬유 복합관의 압력용 관과 흡입용 관의 일반적인 지름은 다음의 식들을 이용하여 계산하여야 한다.

##### 4.3.1 압력용 관의 전형적인 지름

$$d = 0.321 [\frac{Q}{SG^2}]^{0.434} \tag{5}$$

##### 4.3.2 흡입용 관의 전형적인 지름

$$d = 0.434 [\frac{Q}{SG^2}]^{0.434} \tag{6}$$

##### 4.3.3 유량의 유속 전환식

$$v = 0.409 \left( \frac{Q}{d^2} \right) \tag{7}$$

#### 4.4 압력손실 계산

높이 차이 및 난류(Turbulent Flow)에 의해 발생하는 관 시스템의 모든 압력손실은 파이프와 이음관의 방향이 변하거나 마찰에 의해 발생한다. 유리섬유관의 압력손실을 계산하는데 이용되는 가장 일반적인 방법으로 Hazen-Williams, Manning과 Darcy-Weisbach 식들을 이용한다. 각 방법은 흐름상태의

종류와 요구되는 정확도를 고려하여 사용해야 하며, 사용되는 관의 내면에서 조도나 마찰계수를 결정한 후 사용하여야 한다.

4.4.1 Hazen-Williams 식

Hazen-Williams식은 관내에 흐르는 물의 흐름이 완전한 난류 흐름의 형태를 가지는 경우에서 사용한다. 비록 다른 방법과 같이 모든 유속이 기술적으로 정확하지 않더라도 Hazen-Williams식은 간단하기 때문에 음용수와 하·폐수용 관에 광범위하게 적용할 수 있다. Hazen-Williams식은 그림 1에 보여지는 바와 같이 계산도표에 주기적으로 나타난 선으로 표시된다. 그러나, 도표를 이용한 해석은 식수용 관인 경우만 사용하여야 한다. 만일 식수대

신 다른 유체인 경우를 고려한다면, 적용범위가 넓은 Darcy-Weisbach식을 사용하여야 한다. Hazen-Williams식은 난류흐름과 유리섬유 복합관의 압력손실을 계산하기 위해서 다음과 같은 식을 사용한다.

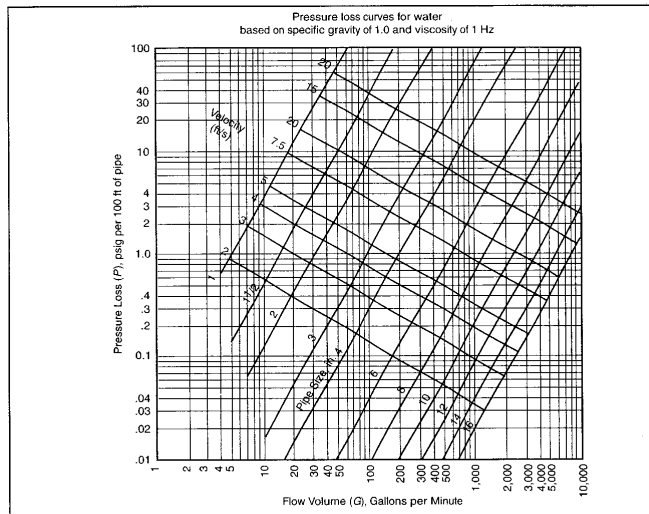
$$h_f = 0.2083 \left( \frac{100}{C} \right)^{1.85} \left( \frac{Q^{1.85}}{d^{4.87}} \right) \quad (8)$$

여기서,  $h_f$ =마찰력 ft H<sub>2</sub>O/100 ft

$C$ =Hazen-Williams 조도 계수 (일반적인 유리섬유 복합관인 경우=130~150)

$d$ =내경(ID), in.

수리학적 계산을 위해서는 실제내경(ID)를 사용하여야 한다.



Reprinted with permission from Fiberglass Pipe Handbook, Fiberglass Pipe Institute, New York, N.Y.

Figure 4-1 Friction loss characteristics of water flow through fiberglass pipe

주: 그래프나 예제들은 단순하게 공칭 파이프 크기를 사용한다.

〈그림 4-1〉 유리섬유 복합관내로 흐르는 물의 마찰손실 특성

4.4.2 단순화된 Hazen-Williams

경우에 따라 복잡한 Hazen-Williams식 대신 아래의 간단한 식을 사용할 수도 있다.

$$h_f = \left[ \frac{42.7 Q}{C d^{2.63}} \right]^{1.852} \quad (9)$$

4.4.3 손실수두를 압력손실로 전환

손실수두를 압력손실로 전환하기 위해서 다음의 식을 사용한다.

$$p = \frac{(H_f)(SG)}{2.31} \tag{10}$$

여기서,  $p$ =압력손실(psi),  $H_f = \frac{h_f L}{100}$

$SG$ =유체 중력, 무차원,  $L$ =관 길이, ft

사용되지 않은 새로운 유리섬유 복합관은 Hazen-Williams 조도 계수  $C$ 값은 150~165정도이며, 설계 시에는 조도 계수값을 140으로 고려할 것을 제안한다. 이 값은 유리섬유보다 낮은 초기값을 가진 다른 재료의 파이프와 비교된다. 내부 부식과 계획된 크기 때문에 성능이 장기간에 걸쳐서 떨어진다. 내부 부식과 크기 형태에 양은 물의 질에 따라 달라지며 지역마다 다양하다.

예제 4-1: Hazen-Williams 공식. 2,000 gpm의 수송하는 1,500 ft 길이, 10인치의 직경을 가진 유리섬유 관의 마찰 압력 손실 계산한다..

단계 1. 공식 4-9를 이용하여 손실수두를 계산한다.

$$h_f = [(42.7)(2,000)/(150)(10^{2.63})]^{1.852}$$

$$h_f = 1.70 \text{ ft H}_2\text{O} / 100 \text{ ft}$$

$$\begin{aligned} \text{그렇다면 : total head loss } H_f &= (1.70)(1,500/100) \\ &= 25.5 \text{ ft} \end{aligned}$$

단계 2. 공식 4-10을 이용하여 손실수두를 압력 손실로 전환한다.

$$p = (25.5) (1.0) / 2.31 = 11 \text{ psi}$$

4.4.4 Manning

관에 유체가 부분적으로 차 있고, 높이에 관련된 수두의 영향을 고려하고, 중력의 영향을 고려한 유체의 흐름에 대해서 고려할 경우에 사용한다.

$$Q_m = \left( \frac{1.486}{n} \right) (S)^{0.5} (A) (R)^{0.667} \tag{11}$$

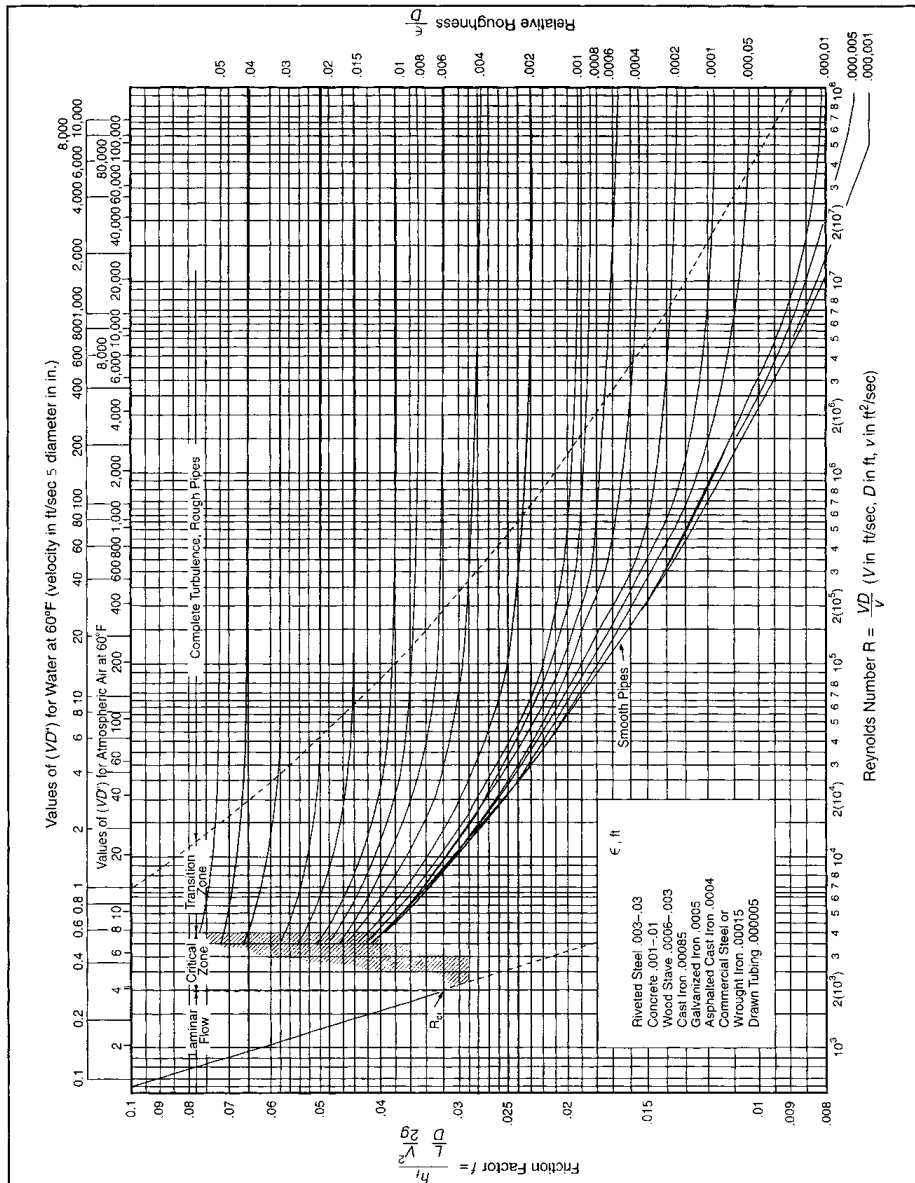
여기서,  $Q_m$ =유속, ft<sup>3</sup>/s,  $S$ =경사도, ft/ft=( $H_1 - H_2$ )/ $L$ ,  $H_1$ =상류의 높이, ft,  $H_2$ =하류의 높이, ft,  $L$ =관 설치구역의 길이, ft,  $n$ =Manning 표면 조도 계수 (전형적인 유리섬유 복합관은 0.009),  $R$ =수력 반지름(hydraulic radius ;  $A / W_p$ ), ft

$$A = \text{관의 단면적, ft}^2, W_p = \text{관의 습도 한계, ft}$$

4.4.5 Darcy-Weisbach(관 마찰 손실)

압력 손실은 유속의 제곱에 비례하고, 관 길이에 비례하며, 관 직경에 반비례의 관계를 가지고, 관 내부 표면조도와 유체의 특성(밀도와 점도)과 관련이 있음을 보여주는 Darcy-Weisbach 방정식은 층류(Laminar Flow)와 난류 흐름에 무관하게 모든 유체에 사용하는 장점이 있으나 Darcy-Weisbach 마찰 계수가 변하기 쉽다는 단점도 가지고 있다. 이 방정식을 이용하여 관 마찰손실을 구하려면 다음의 순서에 따라야 한다. 먼저 관직경의 측정이 끝나면, 관내 흐름이 층류인지 난류인지 흐름의 종류를 분별 하여야 한다. 관찰된 흐름 특성이 Darcy-Weisbach 방정식에서 사용될 근사적인 마찰계수 값의 선택에 필요하다. 아래의 레이놀즈 방정식은 유체 흐름의 특징을 분별하는데 사용한다.

$$R_e = (ID)(v) / \mu \tag{12}$$



Reprinted with permission from L. F. Moody, Friction Factors for Pipe Flow, ASME, 345 E. 47th St., New York, NY 10017.

Figure 4-2 Moody diagram for determination of friction factor for turbulent flow

〈그림 4-2〉 흐름의 종류가 난류인 경우, 마찰인자의 계산에 사용되는 Moody선도

여기서,  $R_e$  = 레이놀즈 수, 무차원  
 $\mu$  = 유체 운동학적 점도,  $\text{ft}^2/\text{s}$ ,  $ID$  = 내경,  $\text{ft}$   
 흐름의 종류에 따른 레이놀즈 수는 아래와 같이 정의한다.

〈표 4.1〉 흐름의 종류에 따른 레이놀즈 수

흐름의 종류	레이놀즈 수
층류	$R_e \leq 2,000$
천이역	$2,000 < R_e < 4,000$
난류	$R_e \geq 4,000$

간단하게 표현된 Darcy-Weisbach 방정식은 다음과 같이 사용될 수 있다.

$$H_f = \frac{f L (v^2)}{2 (ID) g} \quad (13)$$

만일, 이 관 내부 흐름이 층류이면(i.e.  $Re \leq 2,000$ ), 마찰계수  $f_t$ 은 다음과 같이 감소한다.

$$f_t = \frac{64}{Re} \quad (14)$$

주 : 층류에 대한 마찰계수는  $f_t$ 로 표시하고, 난류에 대한 마찰계수는  $f_t$ 로 표시한다.

또한, 관 내부 흐름이 난류이면(i.e.  $Re \geq 4,000$ ), 마찰계수  $f_t$ 는 매끈한 곡선으로 표시되는 무디선도에서 그 값을 찾는다.(그림 4.2) 유리섬유 관에서 표면 조도  $e$ 는  $1.7 \times 10^{-5}$ 피트와 같다. 관의 내경으로 나누었을때( $\frac{e}{ID}$ ) 난류에 대한 마찰 계수  $f_t$ 는 부드러운 관의 부분에서부터 뽑아낼수 있다. 난류에 대한 마찰 계수는 Colebrook 방정식으로부터 계산하여야 한다.

$$\frac{1}{f_t^{0.5}} = -2 \log \left[ \frac{\left( \frac{e}{ID} \right)}{3.7} \right] + \frac{2.51}{(Re) (f_t^{0.5})} \quad (15)$$

여기서,  $f_t$ =무디 마찰 계수,  $e$ =표면 조도=유리섬유관에서는  $1.7 \times 10^{-5}$

위의 Colebrook 방정식은 풀기가 매우 어렵기 때문에, 레이놀즈 수와 마찰계수와의 관계를 나타내는 아래의 간단한 방정식을 이용하여 구할 수도 있다. 아래의 방정식은 Colebrook 방정식과 1% 정도의 오차를 가지고 있다.

$$f_t = \left[ 1.8 \log \frac{Re}{7} \right]^{-2} \quad (16)$$

#### 4.5 이음관(Fitting)에서의 손실수두

이음관에서의 손실수두는 동일한 손실수두를 가지는 관의 길이로 표현하고, 표현된 일정 길이를 가지는 관의 손실수두를 계산하여 구하여야 한다. 이러한 방법은 많은 용분야에서 충분한 정확도를 가지고 있음이 증명되었으며, Hazen-Williams 또는 Manning 방정식과 같이 사용할 수 있다. 이 방법은 층류의 경우에만 사용하여야 한다. 만일 표에 나타난 데이터와 다른 상황인 경우나, 또는 더 높은 정확도가 요구되면 이음관에서의 손실수두는 각각의 이음관 종류에 대해서 손실 계수(K 인자)를 사용하여 계산할 수 있다. 손실 계수의 계산에 사용되는 K인자값은 표4-1와 같이 정의한다. 손실 계수의 계산은 식 17을 통해서 수행되어야 한다.

$$H_f = K \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (17)$$

여기서,  $K$ =표 3-2에서 제공된 각각의 이음관 종류에 따른 K 인자값.

〈표 4-2〉 유리섬유 복합관 이음관의 전형적인 K 인자

이음관의 종류	K 인자
90° elbow, standard	0.5
90° elbow single miter	1.4
90° elbow double miter	0.8
90° elbow triple miter	0.6
180° return bend	1.3
Tee, straight flow	0.4
Tee, flow to branch	1.4
Tee, flow from branch	1.7
Reducer, single size reduction	0.7
Reducer, single size reduction	3.3

대다수의 수리학에 관한 책에서 K 인자는 다양한 형태의 이음관에서 사용되며 밸브에 대해서는 이 책에 수록되어 있지 않다. 시스템 전체 손실수두는 이음관류의 손실수두, 직관에서 발생하는 손실수두, 그리고 관 고도의 변화에 따라 발생하는 손실수두 값이 모두 포함되어야 한다.

**예제 4-2: 관로에서 파이프 직경, 상용 압력, 압력 등급의 계산.** 관로는 5,000피트 길이의 파이프와 25피트의 높이변화를 가지는 각4개의 90°곡관과 각3개의 45°곡관을 요구한다. 동적 점성도  $\mu = 0.00001$ 이라고 가정하면 유동률은 8,000 gpm이다.

단계 1. 최소 직경을 결정(식 3)

$$d = 0.73 [Q / (SG)]^{0.5} / \rho^{0.33} = 0.73 [8,000 / (1)]^{0.5} / 62.4^{0.33}$$

그 다음으로 큰 크기, 18인치,를 사용하면 이 예에서 공칭 직경은 ID=18.19인치=1,516피트이다

단계 2. 평균 유속의 계산(식 4-7)

$$v = 0.409(Q/d^2) = 0.409(8,000 / (18.19)^2) = 9.89 \text{ ft/s}$$

단계 3. 레이놀드 수의 계산(식 4-12)

$$Re = (ID)(v) / \mu = (1.516)(9.89) / 0.00001 = 1,499,324$$

Re가 4,000보다 크므로, 흐름은 난류 범위에 있다.

단계 4. 마찰 계수의 계산(식 4-16)

$$f = [1.8 \log (Re/7)]^{-2} = [1.8 \log (1,499,324/7)]^{-2} = 0.0109$$

단계 5. 식 13과 식 17을 조합하여 시스템 마찰 손실을 계산한다.

$$H_f = [\sum K + f(L/ID)](v^2/2g)$$

수량	접합 방법	K 인자	총 K 인자
4	90° 곡관	0.8	3.2
3	45° 곡관	0.5	1.5
			총=4.7

$$H_f = [4.7 + 0.0109(5,000/1.516)](9.89^2/2(32.2)) = 61.5 \text{ ft}$$

단계 6. 마찰수두와 높이수두를 조합한다.

$$H_{\text{total}} = H_f + H_e = 61.5 + 25 = 86.5 \text{ ft}$$

단계 7. 손실수두를 상용압력손실Pw(식 10)로 전환한다.

$$W_p P_w = H_{\text{total}}(SG) / 2.31 = 86.5(1) / 2.31 = 37.5 \text{ psi}$$

예제 4-2에서의 방법은 총 상용압력이 37.5 psi이다. 비록 상용압력 자체가 50psi 압력등급을 필요로 한다고 할지라도 더 높은 등급이 관로안에서 전위 수격현상으로 선택되어 지던가 AWWA C950에 나오는 최소 강성 요구사항을 만족하는 것이 선택될 것이다. 이 예에서 다음 더 높은 등급은 100psi이다. 예4-4는 수격현상을 만족하는 압력 등급을 증명하기 위해 언급되었다.

#### 4.6 에너지 소모량 계산 과정

유체 저항과 경제성은 많은 디자이너들 사이에서 배타적인 특징이라고 고려되었다. 그러나 크게 보면 관로 운용 가격은 마찰 저항성과 파워 소비에 따라 결정되었다. 금속성의 관로 재료의 마찰 효과는 수질(pH, Langelier calcium-carbonate index 등)과 같은 내부 부식가능성에 따라서 복잡해진다. 다른 말로 하면 관로의 내부 마찰은 관의 재료에 따른 부식효과의 시간에 따라서 증가할 수 있다. 관로 설계 과정은 관로 재료의 경제적인 측면의 운용을 고려하여야 한다. 다른 관 재질을 고려할 경우, 손실수두와 관련된 경제적인 이점들을 계산하기 위해서 따라야 할 기본적 과정들은 다음과 같다.

##### 4.6.1 관로 경제적 해석 과정

단계 1. 손실수두를 계산하라(식 9)

$$H_f = \left[ \frac{42.7 Q}{C d^{2.63}} \right]^{1.852}$$

단계 2. 요구되는 단위인 펌프 마력으로 손실수두를 변환하라.

$$h_p = \frac{Q \rho H_f}{33,000} \quad (18)$$

여기서,  $h_p$ =요구되어지는 마찰력,  $\rho$ =유체 밀도 (물의 경우 8.34 lb/gal)

단계 3. 연간 사용되는 에너지를 계산하라.

$$E_c = (h_p) (24 \frac{h}{d}) (365 \frac{d}{year}) (0.7457 kw - \frac{h}{hp} - h) / eff \quad (19)$$

여기서,  $E_c$ =연간 에너지 사용량, kw-h/year,  $eff$ =펌프 효율(일반적으로 75에서 85%)

단계 4. 평균 에너지 비용(AEC)

$$AEC = (E_c) (UEC) \quad (20)$$

여기서,  $AEC$ =연간 에너지 비용, \$

$UEC$ =단위 에너지 비용,\$/kw-h

**예제 4-3: 비교 전력 비용 계산.** 10,000피트 길이, 6인치 직경을 가진 관로는 일년을 기준으로 500 gpm의 물을 운송한다. 관로 설계자는 평균 Hazen-Williams 계수  $C=150$ 을 가진 유리섬유 관을 사용하는 것과 평균 Hazen-Williams 계수  $C=100$ 을 가진 다른 재료의 관을 사용하는 것에 대해서 관로 수명이상기간을 고려하여야 한다.  $0.06\$/kw-h$ 의 단위 용을 기초로 하여 각각의 재료에 대한 평균 연간 에너지 비용 AEC과 20년간 사용했을때 총 에너지 비용을 계산한다.

단계 1. 각각의 재료에 대한 손실수두를 계산한다

유리섬유관일 경우

$$H_f = [42.7Q/(C)(d^{2.63})]^{1.852}$$

$$= 1.58 \text{ ft}/100 \text{ ft}$$

=시스템에서 158 ft

대체 재료일 경우

$$= [(42.7)(500)/(100)(6.00)^{2.63}]^{1.852}$$

$$= 3.34 \text{ ft}/100 \text{ ft}$$

=시스템에서 334 ft

단계 2. 손실수두를 요구되는 마력으로 변환한다.

유리섬유관	대체 재료
$h_p = Q \rho H_f / 33,000$	$= (500)(8.34)(334) / 33,000$
$= 19.97 \text{ hp}$	$= 42.21 \text{ hp}$

단계 3. 80%의 펌프 효율과 식 19를 사용하여 연간 에너지 소비량  $E_c$ 을 계산한다.

Fiberglass Pipe	Alternate Material
$E_c = (19.97)(24)(365) (0.7457) / 0.80$	$= (42.21)(24)(365) (0.7457) / 0.80$
$= 163,063 \text{ kw-h}$	$= 344,662 \text{ kw-h}$

단계 4. AEC(식 20)을 계산하고 20년간의 총 에너지 비용을 결정한다.

Fiberglass Pipe	Alternate Material
$AEC = (163,063)(0.06)$	$= (344,662)(0.06)$
$= \$9,784/\text{year}$	$= \$20,680/\text{year}$
$= \$195,676 \text{ over } 20 \text{ year}$	$= \$413,594 \text{ over } 20 \text{ year}$

비용에 대한 시간값을 고려하여 더 많은 복잡한 기술 (순 현재 값, life cycle 비용, 등)은 대체 관 재료의 상대적인 경제성을 평가하는데 사용된다. 이러한 기술들은 계산상 관의 설치비용으로 고려되고 미래의 자금의 흐름은 적당한 할인율에 따라서 할인된다.



#### 4.7 순간 압력들

수격(Water Hammering) 현상에 의한 내부의 충격, 또는 압력 서지(Surge)는 일반적으로 시스템 내부의 유체의 유속이 급격하게 변하는 경우에 발생한다. 특정한 조건하에서 관 재료와는 상관없이 이러한 충격들은 관로 시스템을 붕괴시키거나 파괴시키기 충분한 크기에 도달할 수 있다. 일시적인 압력이라 함은 압력파(wave)의 방향과 일시적인 원인에 따라서 시스템에 압력이 증가되고 감소되는 움직이는 파동을 말한다.

갑작스러운 밸브의 폐쇄는 움직이고 있는 유체의 운동에너지를 압력에너지로 변환시켜 충격파의 발생을 유발한다. 이러한 충격력은 파열 또는 붕괴가 발생하기에 충분한 정도의 크기에 도달할 수도 있으며, 설계시 이에 대한 고려가 반드시 이루어져야 한다.

##### 4.7.1 수격 현상(Water Hammer)

수격 현상의 크기는 유체의 물성치와 속도, 탄성계수와 관 재료의 벽두께, 관로의 길이 그리고 유체 변화의 충격량에 관계된 속력 등의 함수로 표현된다. 유리섬유 복합관에서 상대적으로 낮은 탄성계수 때문에 압력파가 시스템을 통과하면서 진행되는 동안의 점차적으로 자가 감쇠 효과가 일어나, 금속 재질의 관에서는 금속 재료의 높은 탄성계수에 때문에 압력파의 진폭이 더 크게 나타난다. 급격한 밸브의 폐쇄 및 개방뿐만 아니라, 갑작스런 공기의 배출과 펌프의 시동 또는 정지는 수격 현상을 유발한다. 수격 현상의 압력 서지는 기구의 느린 반응 때문에 전통적인 보돈(Bourdon) 튜브 게이지에서 쉽게 나타나지 않는다. 수격 현상의 최종적인 결과로 과도한 압력과 관 진동, 또는 관과 이음관의 파손을 유발할 수 있는 이동 현상 등이 발생한다.

몇몇 경우에는 관 시스템의 고정작업이 관 진동과 이동문제를 완화시킬 수 있으며, 다른 경우에는

Mechanical valve operators, Accumulators, Rupture discs, Surge relief valves, feedback loops around pumps, 등에서 수격 현상의 원인을 미리 방지하거나, 제거시켜야 한다. 급격한 개방이나 폐쇄가 불가능하도록 밸브를 설치하는 것도 간단한 예방조치가 될 수 있다. 또한, 펌프는 천천히 개방하는 경우가 아니라면, 절대 공전상태로 시동시켜서는 안 되며, 기계적으로 작동하는 밸브는 유량을 점차적으로 증가시키면서 개폐시켜야 한다.

##### 4.7.2 수격 현상 계산

속도 변화에 따른 서지 압력을 계산하는 데 사용되는 Talbot 방정식은 다음과 같다.

$$P_s = \left(\frac{a}{q}\right) \left(\frac{SG}{2.3}\right) (\Delta v) \tag{21}$$

이 때,

$$a = \frac{12}{\left[\left(\frac{\rho}{g}\right) \left(\frac{1}{k} + \frac{d}{E(t)}\right)\right]^{0.5}} \tag{22}$$

여기서,  $P_s$ =서지 압력의 표준 편차, psi

$a$ =압력 파 속도, ft/s,  $\Delta v$ =유속의 변화량, ft/s,  $\rho$ =유체의 밀도, lb/ft<sup>3</sup>,  $SG$ =유체 비중, 무차원,  $k$ =압축성 유체의 벌크 계수, psi (물의 경우 300,000psi),  $E$ =관 벽의 탄성계수, psi,  $d$ =관의 내경, in.,  $t$ =관 벽의 두께, in.,  $g$ =중력가속도, 32.2 ft/s<sup>2</sup>

압력 등급  $P_c$ 를 결정할 때, 압력 등급이 작용 압력  $P_w$ 와 서지 압력  $P_s$ 의 합을 1.4로 나눈 값과 같거나 커야 한다 (제5장 참조). 많은 기계학과 수리학 책에서 간단한 관 시스템에서 단순하게 밸브의 폐쇄의 결과로서 압력 서지(surge)의 계산을 위한 Talbot 방정식을 제공한다. 정교한 유체 순간 계산

프로그램은 다양한 조건하에서 복잡하게 분리된 관 시스템에서 수격현상을 분석하는 것이 가능하다.

**예제 4-4: 서지 압력 계산.** 예제 4-2에서 관에 작용하는 최대 서지 압력이 40% 허용 기준안에 있다고 결정한다. 유속의 최대 순간 변화가 파이프의 유속과 같다고 가정하면 필라멘트 와운드 유리섬유 관은 100psi(관벽 두께  $t=0.21$ 인치)의 압력등급과 3,000,000psi의 인장률을 가진다. 물의 용적률 300,000psi 이다

단계 1. 파동 유속을 계산한다. (식 22)

$$a = 12 / [(\rho/g)(1/k + ID/E(t))]^{0.5}$$

$$= 12 / [(62.4/32.2)(1/300,000 + 18.19/3,000,000(0.21))]^{0.5}$$

$$= 1,515 \text{ ft/s}$$

단계 2. 서지 압력을 계산한다.(식 21)

$$P_s = (a/g)(SG/2.3)(\Delta v)$$

$$= (1,515/32.2)(1/2.3)(9.89)$$

$$= 202 \text{ psi}$$

단계 3. 최대 시스템 압력 요구사항 만족하는지 체크한다.

$$P_c \geq (P_w + P_s)/1.40$$

예제 4-2에서  $P_w=37.5 \text{ psi}$  이고  $P_c=100 \text{ psi}$

$$(37.5 + 202)/1.40 = 171 \text{ psi}$$

이 값은 100psi 압력 등급 을 초과한다.

이 특수한 설계 예에서 설계자는 두 가지의 선택권이 있다. 첫 번째는 파이프 압력 등급을 100psi에서 200psi까지 두개의 압력 등급으로 증가시켜 같은 관경을 얻는 것이다. 이 방법은 280psi의 총 시스템 압력을 허용할 것이다. 두 번째 대안은 파이프 크기와 압력 등급 두 가지를 모두 다음 단계의 관경과 압력 등급으로 증가시키는 것이다. 더 큰

관경은 사용압력과 (적은 마찰) 더 적은 유속을 줄여줄 것이다. 이러한 경우에는 다음 단계의 관경은 20인치(ID=20.19인치=1.683피트)이다. 20인치의 관경과 150psi 압력등급 관의 관벽두께는 0.23인치이다.

비교를 목적으로 두 번째 사항은 이 예제에서 설명될 것이다. 추가적인 정보를 위해서 예제 4-2를 언급한다.

단계 4. 더 큰 관경을 사용하여 새로운 유속을 계산한다.

$$v = 0.409(Q/d^2) = 0.409(8,000)/(20.19)^2 = 8.03 \text{ ft/s}$$

주: 이 유속은 예제 4-2에서 9.89 ft/s보다 적다는 것을 주의해라.

단계 5. 새로운 관경을 사용하여 상용압력을 재계산한다.

A) 레이놀드 수 (식 12)

$$Re = (ID)(v)/\mu = (1.683)(8.03)/0.00001 = 1,351,450$$

B) 마찰 인자를 계산한다. (식 16)

$$f_t = [1.8 \log (Re/7)]^2 = [1.8 \log (1,351,450/7)]^2 = 0.011$$

C) 식 13과 식 17을 조합하여 시스템 마찰 손실을 계산한다.

$$H_f = [\sum K + f_t(L/ID)](v^2/2g)$$

예 4-2로부터 총 K값은 4.7이다.

$$H_f = [4.7 + 0.011(5,000/1.6830)]((8.03)^2/2(32.2)) = 37.5 \text{ ft}$$

D) 총 수두를 계산

$$H_{total} = H_f + H_e = 37.5 + 25 = 62.5 \text{ ft}$$

E) 수두를 상용압력으로 전환한다.

$$P_w = H_{total}(SG)/2.31 = 62.5(1)/2.31 = 27 \text{ psi}$$

단계 6. 새로운 유속을 사용하여 서지 압력을 재계산한다.

A) 파동 유속을 계산한다.(식 21)

$$\begin{aligned}
 a &= 12 / [(\rho/g)(1/k + ID/E(t))]^{0.5} \\
 &= 12 / [(62.4/32.2)(1/3000,000 + 20.19/3,000,000(0.23))]^{0.5} \\
 &= 1,509 \text{ ft/s}
 \end{aligned}$$

B) 더 큰 관경을 사용하여 서지 압력을 재계산한다.

$$\begin{aligned}
 P_s &= (a/g)(SG/2.3)(\Delta v) \\
 &= (1,509/32.2)(1/2.3)(8.03) \\
 &= 164 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

단계 7. 최대 시스템 압력 요구사항을 만족하는지 재 체크한다.

$$\begin{aligned}
 P_c &\geq (P_w + P_s) / 1.40 \\
 P_w &= 27 \text{ psi} \\
 (27 + 164) / 1.40 &= 136 \text{ psi} \\
 P_c = 150 &\geq 136 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

최대 시스템 압력 요구사항은 더 높은 압력등급을 사용할 때 더 큰 관경을 사용함으로써 만족한다. 설계자는 일반적으로 새로운 압력등급에서 더 큰 관경의 관을 사용하는 것이 좋은지 더 큰 압력등급에서 동일한 관경을 사용하는 것이 좋은지 평가할 것이다.