

## 미국 유리섬유 복합관 설계 매뉴얼 소개 (IV)

### Introduction of American Fiberglass Pipe Design Manual (IV)



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 매뉴얼(Fiberglass Pipe Design Manual, 2nd Edition)’ 에 대해서 연속기사로 일정한 분량으로 나누어서 소개하고자 한다. 본 매뉴얼은 총 10장으로

구성되어 있다(표 1 참조).

표1. 유리섬유 복합관 설계 매뉴얼의 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 스템블록
제8장	유리섬유 복합관 설계 및 시공
제9장	접합방식 및 이음장치
제10장	운반, 취급, 보관 및 보수
부록	용어해설

#### 2. 유리섬유 복합관 설계매뉴얼 소개

##### 제5장 지중 매설 설계

##### 5.1 개요

지중매설용 유리섬유관의 구조 설계는 5.7의 설

계 요구사항을 만족시키기 위한 설계 조건 정의, 파이프 종류 선택 및 해당 파이프 성질, 설치 파라메타 선택 및 관련 계산의 타당성 검토가 필요하다. 계산 결과가 요구사항을 만족하지 않을 경우에는 설치 파라메타를 업그레이드하거나 다른 물성을 가지는 파이프를 선택해서 관련 계산을 다시 수행해야 한다. 비정상적인 경우에 대해서는 이번 장에 포함되어 있지 않는 특별 정보나 계산이 필요할 수도 있다 (5.9 참조)

유리섬유관 설계에는 이론적인 방법과 경험적인 방법이 모두 사용된다. 단기간 테스트는 물론 모의 사용 조건하의 장기간 테스트로부터 얻은 데이터의 통계적 외삽법을 통해서 50년 사용기간에 대한 성능 한계치도 결정한다. 적절한 설계 인자들을 사용해서 성능 한계치를 감소시켜서 설계 응력 및 변형치를 얻을 수 있다. 설계 인자는 설계시 고려되지 않은 물성 및 부하의 변경사항을 고려함으로써 계획된 파이프 사용 기간동안에 적절한 성능을 보장할 수 있도록 정의된다. 설계 인자는 추정, 과거 경험 및 엔지니어링 원칙을 바탕으로 한다.

이 장의 설계 방법은 개념상 균일한 벽 및 ribbed-wall 단면의 파이프에 적용된다. 그러나, ribbed-wall 파이프 설계의 경우 몇몇 방정식은 파이프의 특성을 고려해서 수정되어야 한다. 그리고, ribbed-wall 단면에 대한 적절한 설계를 위해서 이번 장에서 언급하지 않은 추가적인 계산 방법이 필요할 수 있다.

5.2 설계 용어

이번 장에서 설명하는 매설 파이프 설계에는 다음의 정의들이 사용된다.

**사용 압력 ( Pw. )** 정상 동작시의 장기간 최대 사용 압력

**압력 등급 ( Pc. )** 다른 부하가 없는 상태에서 파

이프가 견딜 수 있는 최대 압력

**서지 압력 ( Ps. )** 밸브가 동작하거나 펌프 작동 시작 또는 중단시 유체의 속도 변화에 기인한 파이프내의 (사용 압력이상으로의) 일시적 압력 증가, 워터 햄머 (water hammer)라고도 한다.

**서지 허용압력 ( Psa. )** 압력 등급 변경없이 수용할 수 있는 서지 압력 부분, 서지 허용압력은 일반 시스템에서 흔히 발생하는 압력 서지를 수용할 수 있다.

**HDB (Hydrostatic design basis), ANSI/AWWA 표준 C950의 장기 정수(靜水) 설계 압력** 관련 압력등급 부분에 준하는 테스트 및 세부 평가 절차에 의해 결정된 특정 섬유유리 파이프 재료의 장기 정수(靜水) 원주방향 강도.

**설계 인자 ( FS. )** 계산에 사용할 설계치를 정의하기 위해 특정한 기계적 또는 물리적 성질을 감소시키는데 사용하는 1보다 큰 숫자

**변수.** 이 장의 방정식 및 식에 사용되는 변수들에 대한 정의, 그림 5-1 참조.

5.3 설계 조건

설계 조건은 대개 필요 유량 및 최대 유속, 수력학, 배관 높이 및 관련 지리 및 지세, 공도용지 및 설치 요구사항에 의해 결정된다.

$B'$ = 탄성지지대의 경험계수

$B_d$ = 배관의 터파기 폭, in(mm)

$D$ = 관의 중심지름, in(mm)

$D_f$ = 표 5-1에 따른 shape 팩터.

$D_L$ = 변형지연 계수

$E$ = 원주방향 굽힘 탄성계수, psi(MPa)

$E'$ = 토양 반발력 계수, psi(MPa)

$E'_b$ = 되메우기 후 다짐에 의한 토양 반발력 계수, psi(MPa)

$E'_n$ = 관 상단에서의 자연토양에 의한 토양 반발력 계수, psi(MPa)

$E_H$ = 원주방향 인장 탄성계수, psi(MPa)  
 $EI$ = 굴곡강도, in.<sup>2</sup>-lb/in. (m<sup>2</sup>-N/m)  
 $F$ = 단위길이당 하중, lb/in(N/m)  
 $FS$ = 안전율  
 $F/\Delta y$ = 강성, psi(Mpa)  
 $H$ = 매립깊이, ft(m)  
 $h$ = 관 상단에서 등고선의 높이, in(m)  
 $h_w$ = 관 상단에서 해수면의 높이, in(m)  
 $HDB$ = 유체정역학 설계 기초, psi(kPa) (응력기반일 경우), in. per in.(mm/mm) (변형기반일 경우)  
 $ID$ = 내경, in(mm)  
 $I$ = 원주방향 굽힘에 대한 관 벽의 단면2차 모멘트  
 $K = [2nL/\pi D]^2$   
 $K_x$ = 베딩 계수  
 $L$ = distance between rigid stiffeners, in(mm)  
 $L1$ = 차량의 움직임으로 인한 토피에 따라 관 상단에 직접적으로 받는 활[동]하중의 길이, ft.(m) (그림 5-2 참조)  
 $L2$ = 차량의 움직임으로 인한 토피에 따라 관 상단에 직접적으로 받는 활[동]하중의 길이, ft.(m) (그림 5-2 참조)  
 $I_f$ = 충격계수  
 $n$ = 좌굴에 의한 굽힘 형상  $\geq 2$   
 $OD$ = 외경, in.(mm)  
 $P$ = 차량 하중(바퀴하중), lb, (kg)  
 $PS$ = 강성  
 $P_c$ = 압력등급, psi(kPa)  
 $P_s$ = 서지압력, psi(kPa)  
 $P_{sa}$ = 허용 서지압력, psi(kPa)  
 $P_v$ = 내부 진공압력, psi(kPa)  
 $P_w$ = 사용압력, psi(kPa)  
 $q_a$ = 허용 좌굴압력, psi(kPa)  
 $q_u$ = unconfined 압축강도, US s/ft<sup>2</sup>(N/m<sup>2</sup>)

$r$ = 중심반지름, in.(mm)  
 $r_c$ = rerounding 계수  
 $R_w$ = 부력 안전율  
 $S_b$ = 장기간 원주방향 휨 변형, in/in.(mm/mm)  
 $S_c$ = 토양기초 조합계수(soil support combining factor)  
 $S_i$ = 최대 원주방향 인장강도, psi(kPa)  
 $S_r$ = 압력등급에 따른 원주방향 인장강도, psi(kPa) 및 변형, in/in.(mm/mm)  
 $t$ = ASTM D3567에 따른 관벽 강화재의 두께, in(mm)  
 $t_L$ = 라이너 두께(사용할 경우), in. (mm)  
 $t_t$ = 관벽과 라이너(사용할 경우)의 두께, in. (mm)  
 $W_c$ = 토압하중, lb/in.<sup>2</sup> (N/m)  
 $W_L$ = 활[동]하중, lb/in.<sup>2</sup> (N/m)  
 $\gamma_s$ = 토양의 단위중량, lb/in.<sup>3</sup> (N/m<sup>3</sup>)  
 $\gamma_w$ = 물의 단위중량, lb/in.<sup>3</sup> (N/m<sup>3</sup>)  
 $v_{hl}$ = 원주방향 응력을 적용할 경우 포아송 비  
 $v_{lh}$ = 길이방향 응력을 적용할 경우 포아송 비  
 $\Delta y$ = 예상 수직 변형량, in.(mm)  
 $\Delta y_a$ = 장기간 최대 허용 수직 변형량, in.(mm)  
 $\sigma_b$ = 변형이 지속되는 동안 최대 원주방향 휨 응력, psi(kPa)  
 $\sigma_c$ = 복합하중이 지속되는 동안 최대 응력, psi(kPa)  
 $\sigma_{pr}$ = 내압이 지속되는 동안 사용 응력, psi(kPa)  
 $\delta d$ = 시공후 장기간 최대 허용 변형량, in.(mm)  
 $\epsilon_b$ = 변형이 지속되는 동안 최대 원주방향 굽힘 변형, in/in. (mm/mm)  
 $\epsilon_c$ = 복합하중이 지속되는 동안 최대 변형, in/in. (mm/mm)  
 $\epsilon_{pr}$ = 내압이 지속되는 동안 사용 변형, in/in. (mm/mm)

### 5.3.1 Head 손실

관 내면의 마찰에 의한 유체의 head 손실은 유리섬유관의 경우 다른 종류의 파이프보다 월등히 작는데 이는 유리섬유관의 부드러운 내면과 결정형성 및 부식이 발생하지 않기 때문이다. 이는 장기적 흐름 계수인 Manning의  $n$  0.009 및 Hazen-William의  $C$  150을 통해서 쉽게 알 수 있다. 설계자는 설계 조건을 정의하는데 이 부분을 고려해야 한다. (제 4 장 유체역학 참조)

### 5.3.2 서지 압력

서지 압력은 주어진 시스템 설계 파라미터에 대한 파이프의 원주방향 탄성계수 및 두께 대 직경비를 바탕으로 계산된다(이번 장 뒷부분에서 언급). 과도한 서지 압력은 설계 단계에서 식별해서 해당 원인을 제거하거나 자동 서지 압력 릴리프를 포함시키거나 보다 높은 압력 등급을 선택해야 한다.

### 5.3.3 기본 설계 조건

구조 설계 계산 이전에 정의해야 하는 설계 조건에는 다음과 같은 것들이 있다:

- 공칭 파이프 크기 (표1 부터 표6 까지, ANSI/AWWA 표준 C950)
- 사용 압력  $P_w$  (5.7.1.2)
- 서지 압력  $P_s$ (5.7.1.3)
- 파이프 매설 지역의 토양 조건 및 매설깊이에 서의 토양 조건(5.7.3.8)
- 토양 단위 중량 (5.7.3.5)
- 최소 및 최대 토피 (5.7.3.5)
- 활[동]하중(5.7.3.6)
- 내부 진공 압력(부압)  $P_v$ (5.7.5)
- 평균 및 최대 사용 온도 (5.9)

### 5.4 파이프 특성

설계전(임시) 파이프 압력 등급은 대개 5.7에 정의된 사용 압력, 서지 압력 및 외부 하중을 바탕으

로 선택한다. 특정 파이프 제품의 주어진 등급에 대한, 평균 및 최대 사용 온도에서의 특성은 제조자나 제조사 설명서를 참고해야 한다. ANSI/AWWA 표준 C950에 주어진 원주방향 강성, 길이방향 강도 및 원주방향 인장 강도에 대한 값들은 최소 요구사항이며, 몇몇 파이프 제품은 이들 특성에 대해 매우 높은 수치를 나타내기도 한다.

설계시에는 ANSI/AWWA 표준 C950의 최소값들보다 큰 값을 가지는 물성 및 구조 용량(structural capacities)을 사용해야 한다. 설계시 필요한 파이프 특성에는 다음과 같은 것들이 있다:

- 공칭 강화벽 두께  $t$  및 라이너 두께  $t_L$  (ANSI/AWWA 표준 C950)
- 원주방향 인장 탄성계수  $E_H$  (5.7.1.1)
- $HDB$  (Hydrostatic design basis)
- 원주방향 휨 탄성계수 (5.7.2)
- 최소 파이프 강성  $F/\Delta y$  (ANSI/AWWA 표준 C950)
- 장기 원주방향 휨 변형 (5.7.2.2)
- 포아송 비 (5.7.5)

### 5.5 설치 파라미터

현장 조건 및 설치 계획에 따라 선택해야 하는 주요 설치 파라미터에는 파이프 주변 되메움(backfill) 토양의 종류(터파기 되메움), 다짐 정도 및 파이프 상단에서의 토양 특성이 있다. 이들 파라미터를 처음 선택하는 시점에서는 널리 사용되고 있는 표준 사양, 해당 토양 보링(boring) 보고서, 제조사의 권고 사항 및 과거 경험에 의존하게 된다. 주어진 토양 종류 및 다짐 정도가 설계시 필요한 다음 값들을 결정하는데 큰 영향을 미친다:

- 베딩 계수(bedding coefficient)  $K_X$  (5.7.3.4)
- 토양 반발력 계수  $E$  (표 5-3, 5-4 및 5-6 그리고 5.7.3.8)
- 변형 지연계수 (deflection lag factor)  $D_L$

(5.7.3.3)

5.6 설계 절차

5.3부터 5.5에 걸쳐서 정의한 조건, 성질 및 설치 파라메타를 사용해 5.7의 요구사항 만족 여부를 설계 계산을 통해서 확인할 수 있다.

특정 제품 성능 한계치를 정의하는데 사용한 기본 조건에 따라서 응력 또는 변형을 사용해 해당 계산을 수행할 수 있다. 파이프가 5.7의 요구사항을 만족하는지의 여부를 결정하는 설계 계산 방법은 다음과 같다:

1. *HDB* 및 파이프 치수로부터  $P_c$  를 계산 (5.7.1.1)
2. 사용 압력  $P_w$  확인(5.7.1.2)
3. 서지 압력  $P_s$  확인(5.7.1.3)
4. 원주방향 굽힘으로부터 허용 변형 계산(5.7.2)
5. 토양하중  $W_c$  및 활[동]하중  $W_L$  결정 (각각 5.7.3.5 및 5.7.3.6)
6. 토양 반발력 계수  $E$  계산 (5.7.3.8)
7. 변형 예측치 확인 (5.7.3)
8. 총하중 확인 (5.7.4)
9. 좌굴(buckling) 확인 (5.7.5)

5.7 설계 계산 및 요구사항

5.7.1 내부 압력

5.7.1.1 압력 등급  $P_c$ . ANSI/AWWA 표준 C950의 압력 등급은 다음과 같이 파이프의 장기간 강도 또는 HDB와 관계있다:

응력기반 HDB의 경우:

$$P_c \leq \left[ \frac{HDB}{FS} \right] \left[ \frac{2t}{D} \right] \tag{5-1}$$

변형기반 HDB의 경우:

$$P_c \leq \left[ \frac{HDB}{FS} \right] \left[ \frac{2E_H^t}{D} \right] \tag{5-2}$$

여기서,

$P_c$ = 압력 등급

$HDB$ = HDB : 응력에 기초한 경우 psi, 변형에 기초한 경우 in./in.

$FS$ = 설계시 안전율, 1.8

$t$ = ASTM D3567에 따른 파이프 강화벽 두께, in

$D$ = 다음의 파이프 평균 직경:

내경 ID 시리즈 파이프의 경우 (표1 및 2, ANSI/AWWA 표준 C950):

$$D = ID + 2t_L + t$$

OD 시리즈 파이프의 경우 (표3, 4, 5 및 6, ANSI/AWWA 표준 C950):

$$D = OD - t$$

여기서,

$t_L$ = 라이너의 두께, in

$ID$ = 내경, in

$OD$ = 외경, in

$E_H$ = 파이프의 원주방향 인장 탄성 계수, psi

*HDB*(Hydrostatic design basis). 유리섬유복합관의 *HDB*는 강화벽 및 라이너에 사용된 재료 및 조성에 따라 서로 다르다. *HDB*는 내면 강화벽의 원주방향 응력 또는 원주방향 변형으로 정의된다.

**온도 및 수명.** 제조자는 유리섬유복합관의 사용 온도에 대한 *HDB*를 ANSI/AWWA 표준 C950에 준한 테스트를 통해 정의해야 한다. 이러한 테스트는 50년후 제품 성능 한계치를 정의하는 것이 목적이다. 고온에서의 성능 한계치는 사용된 재료 및 파이프 벽의 종류에 따라 다르다. 고온 사용을 위한 적절한 *HDB*값은 제조자에게 문의해야 한다.

**설계 인자.** ANSI/AWWA 표준 C950의 내부 압

력 설계를 위해서는 두개의 독립된 설계 인자가 필요하다.

첫번째 설계 인자는 압력 등급  $P_c$ 에서의 단기 원주방향 인장강도  $S_i$  대 원주방향 인장응력  $S_r$ 의 비율이다. 이 인자는 단기간 최대 압력 조건에 의한 응력 또는 변형이 단기 간 파이프의 유체정역학적(流體靜力學的) 강도를 초과하지 않도록 보장한다. ANSI/AWWA 표준 C950의 표10에 주어진 원주방향 인장강도값은 초기 유체정역학적(流體靜力學的) 강도에 대한 최소 설계 인자 4.0을 나타낸다.

두번째 설계 인자는 압력 등급  $P_c$ 에서의  $HDB$  대 원주방향 응력 또는 변형  $S_r$ 의 비율이다. 이 인자는 지속 사용 압력에 의한 응력 또는 변형이  $HDB$ 에 의해 정의된 장기 원주방향 강도를 초과하지 않도록 보장한다. 유리섬유복합관 설계의 경우 이 최소 설계 인자는 1.8이다.

두 설계 인자 모두 확인해야 한다. 특정 파이프 제품의 장기 강도 저하 특성에 따라 두 인자중 한 인자가 파이프 설계에 큰 영향을 미치기 때문이다. 주의깊은 엔지니어라면 파이프의 동작 조건에 따라 이 두 인자를 증가시키거나 감소시켜 사용해야 할 것이다.

**5.7.1.2 사용압력  $P_w$ .** 파이프의 압력 등급은 다음과 같이 시스템내의 사용 압력과 동일하거나 그 보다는 커야 한다:

$$P_C \geq P_w \tag{5-3}$$

여기서,

$P_w$  = 사용 압력

**5.7.1.3 서지 압력  $P_s$ .** 파이프의 압력 등급은 시스템내의 최대 압력, 즉 사용 압력에 서지 압력을 더한 후 이 압력을 다시 1.4로 나눈 값과 동일하거나 그 보다는 커야 한다:

$$P_C \geq \frac{(P_w + P_s)}{1.4} \tag{5-4}$$

여기서,

$P_s$  = 서지 압력

서지 압력의 처리 방식은 ANSI/AWWA 표준 C950이 커버하는 파이프 및 재료의 특성을 반영한다. 최대 압력  $2 P_c$ 는 현장 또는 공장에서 수압시험을 하여야 하며, 이는 식 5-3 및 5-4에 해당되지 않는다.

**서지 압력 계산  $P_s$ .** 서지 압력의 계산은 인정 및 공인된 이론을 이용해서 계산해야 한다((제 4 장 유체역학 참조).

계산된 서지 압력의 크기는 파이프의 원주방향 인장 탄성 계수 및 두께 대 직경( $t/D$ )비에 크게 의존한다. 이러한 이유로 유리섬유복합관의 계산된 서지 압력은 높은 탄성계수 혹은 두꺼운 관 두께를 가지는 재료의 다른 파이프의 서지 압력보다 작은 값이 된다. 예를 들면, 탄성계수 3,000,000 psi (20,680 MPa) 및  $t/D$ 비 0.01인 유리섬유복합관의 유속이 갑자기 2 ft/s (0.6 m/s) 만큼 변한다면, 계산된 서지 압력은 약 40 psi (276 kPa) 만큼 증가하게 된다.

**서지 허용 압력  $P_{sa}$ .** 배관계에서 흔히 발생하는 갑작스런 압력 변화(서지압력)에 대응하기 위한 값이 서지 허용 압력이다. 서지 허용 압력  $0.4P_c$ 는 서지압력에 의한 순간적인 변형율에 대한 유리섬유복합관의 강도 증가에 기초한다. 갑작스럽게 자주 압력의 방향이 바뀌는 시스템 설계의 경우 이 부분에 대해 특별히 고려해야 한다. 제조자의 권고사항을 확인하는 것도 좋은 방법이다.

**5.7.2 원주방향 굽힘**

파이프의 장기간 최대 수직방향 허용 변형은 적절한 설계 인자를 통해 이미 감소된 파이프의 장기간 원주방향 굽힘 변형 능력을 초과하는 원주방향 굽힘 변형 (또는 응력)으로 이어져서는 안된다. 이 요구사항의 만족여부는 다음 공식중 하나를 사



용해서 확인할 수 있다:

응력에 기초한 경우:

$$\sigma_b = D_f E \left( \frac{\Delta y_a}{D} \right) \left( \frac{t_t}{D} \right) \leq \frac{S_b E}{FS} \quad (5-5)$$

변형에 기초한 경우:

$$\sigma_b = D_f E \left( \frac{\Delta y_a}{D} \right) \left( \frac{t_t}{D} \right) \leq \frac{S_b}{FS} \quad (5-6)$$

여기서,

$\sigma_b$  = 변형이 지속되는 동안 최대 원주방향 휨응

력, psi

$D_f$  = 표5.1의 형상 인자

$E$  = 파이프의 원주방향 휨 탄성계수, in

$\Delta y_a$  = 장기간 수직방향 최대 허용 변형, in

$S_b$  = 장기간 원주방향 굽힘 변형 (ANSI/AWWA C950)

$D$  = 파이프 평균 직경, in

$FS$  = 설계 인자, 1.5

$\epsilon_b$  = 변형이 지속되는 동안 원주방향 최대 굽힘

변형, in./in.

$$t_t = t + t_L, \text{ in.}$$

**5.7.2.1 형상 인자  $D_f$ .** 형상 인자는 파이프 변형을 굽힘 응력 또는 변형과 연관지으며, 파이프 강성, 터파기부의 매설 재료 및 다짐, 현치 메우기 (Haunching), 토양 조건 및 변형의 정도에 따라 결정된다. 표 5-1은 일정하지 않은 현치 메우기, 적어도 2~3%의 변형을 그리고 불량 조건 상쇄를 위한 안정된 토양 및 트렌치(trench) 폭을 가정했을 경우의  $D_f$  값을 보여준다.

표 5-1에 주어진 값들은 일반적인 터파기부 매설 재료에 대한 값이다. 다른 터파기부 매설 재료의 경우 각 파이프 강성에 대해 가장 큰  $D_f$  값을 사용한다.

**5.7.2.2 장기간 원주방향 휨 변형  $S_b$ .** 장기간 원주방향 굽힘 변형은 파이프 벽에 사용된 재료 및 제조 방법에 따라 제품마다 그 정도가 다르다. 장기간 원주방향 굽힘 변형은 ANSI/AWWA 표준 C950에 정의된 바에 따라 결정해야 한다.

Table 5-1 Shape Factors

Pipe Stiffness		Pipe-Zone Embedment Material and Compaction			
		Gravel*		Sand†	
		Dumped to Slight‡	Moderate to High§	Dumped to Slight‡	Moderate to High§
psi	kPa	Shape Factor $D_f$ (dimensionless)			
9	62	5.5	7.0	6.0	8.0
18	124	4.5	5.5	5.0	6.5
36	248	3.8	4.5	4.0	5.5
72	496	3.3	3.8	3.5	4.5

\* GW, GP, GW-GC, GW-GM, GP-GC, and GP-GM per ASTM D2487 (includes crushed rock).

† SW, SP, SM, SC, GM, and GC or mixtures per ASTM D2487.

‡ < 85% Proctor density (ASTM D698), <40% relative density (ASTM D4253 and D4254).

§ ≥ 85% Proctor density (ASTM D698), ≥40% relative density (ASTM D4253 and D4254).

**5.7.2.3 휨 설계 인자.** 굽힘에 견딜 수 있는 파이프 설계를 위해서는 두 개의 독립적인 설계 인자를 고려해야 한다.

첫번째 고려 요소는 굽힘시 초기 변형율을 시공후 최대 허용 변형율과 비교하는 일이다. ANSI/AWWA 표준 C950의 원주방향 강성 테스트(레벨 B)는 원통형의 파이프를 사용 한계치 이상의 변형조건에 노출시킨다. 이 테스트 요구사항은 초기 굽힘 변형에 대해 적어도 2.5의 설계 인자를 시연한다.

두번째 설계 인자는 장기간 굽힘 응력 또는 변형 대 최대 허용 장기간 변형율에서의 굽힘 응력 및 변형 비율이다. 섬유유리 파이프 설계시 최소 설계 인자는 1.5이다.

**5.7.3 변형율**

매설된 파이프의 경우 외부 하중에 의한 파이프의 장기간 수직방향 지름의 감소치가 5.7.2에서 정의한 최대 허용 변형율 ( $\Delta y_a/D$ )과 엔지니어나 제조자가 요구한 허용 변형율 ( $\delta d/D$ )중 작은 값을 초과하지 않는 범위내에서 설치되어야 한다. 해당 요구사항은 다음과 같이 표현된다:

$$\Delta y/D \leq \delta d/D \leq \Delta y_a/D \quad (5-7)$$

여기서,

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(D_L W_C + W_L) K_X}{0.149 PS + 0.061 E'} \times 100 \% \quad (5-8)$$

$\Delta y / D$ = 파이프 평균 지름에 대한 백분율로 표시한 예상 수직방향 변형량

$D_L$ = 변형 지연계수 (5.7.3.3)

$W_C Z$ = 수직하중, psi (5.7.3.5)

$W_L$ = 활[동]하중, psi (5.7.3.6)

$K_X$ = 베딩 계수 (5.7.3.4)

$PS$ = 파이프 강성, lb/in./in., psi (5.7.3.7)

$E'$ = 토양 반발력 계수, psi (5.7.3.8)

**5.7.3.1 변형량 계산** 변형량을 입력 파라메타로 요구하는 설계 계산은 허용 설계 응력 또는 변형을 초과하지 않는 범위에서 최대 허용 변형량  $\Delta y_a/D$ 뿐만 아니라 예상 변형량  $\Delta y_a/D$ 를 보여줘야 한다. 최대 허용 변형량  $\delta d/D$ 는 모든 설계 계산시에 사용되어야 한다.

**5.7.3.2 변형량 예상** 모든 연성관에는 매설되었을 때 수직방향 지름의 감소에 해당하는 변형량이 발생한다. 변형량의 정도는 토양 하중, 활[동]하중, 2차 되메움 토양의 특성(native soil characteristics at pipe elevation), 되메움 재료 및 밀도, 터파기 폭, 현치 메우기 그리고 파이프 강성에 의해 결정된다. 변형량 정도를 예상하기 위한 많은 이론들이 제시되고 있는 것이 사실이나, 실제 시공 조건이 시공 계획과 정확히 일치하지 않음으로 인해서 파이프의 실제 변형량은 계산값과 일치하지 않는다. 이러한 결과를 초래하는 변수로는 토양 조건의 가변성 및 지중매설관을 시공하는데 사용하는 방법, 재료 및 장비의 가변성을 들 수 있다.

파이프 시공을 직접 수행하는 현장 작업자는 장기간 파이프 변형량이 5.7.2에서 정의한  $\Delta y_a$  또는 엔지니어 또는 제조자가 요구한 값보다 작은 값이 되도록 보증하기 위해서 설계된 시공 절차를 준수해야 한다. 앞서서도 언급했고 뒤에 나오는 정보를 통해서도 알 수 있듯이, 방정식 5-8은 현장에서 발생할 수 있는 단기 및 장기 변형량의 정도를 예측하는데 지침으로 사용된다. 방정식 5-8은 1941년 Spangler\*가 처음 발표한 Iowa 공식의 한 형태이다. 이 방정식은 지금까지 제시된 수많은 변형량 예측 방정식에 사용되어져 왔다. 이번 장에서 살펴볼 수 있듯이 Iowa 공식은 하중조건으로 인한 현장 변형량 수준에 대한 매우 정확하고 합리적인



예측치를 제시하는 파이프-토양 상호작용이라는 주요 측면에 대해 다룬다.

자중 그리고 되메움 및 다짐에 의한 초기 타원화는 이번 장에서 다루지 않는데, 이로 인한 변형량은 대체적으로 파이프 강성이 9 psi에서 18 psi 사이(62 kPa에서 124 kPa사이)일 경우 크지 않기 때문이다(설치 조건에 따라 달라짐). 그러나, 파이프 강성이 이 값보다 작을 경우에는 해당 요인에 의한 변형량도 반드시 고려해야 정확한 변형을 예측이 가능하다.

이 방법의 적용을 위해서는 베딩, 되메움 그리고 다짐의 정도에 대해 사용되는 설계값들이 현장에서 적절한 기능과 장비를 통해 그대로 구현될 수 있어야 한다. 설계 가정 사항을 그대로 구현하는데 문제가 발생할 경우에는 연성관의 변형량이 계산에 의한 예측치보다 작아지거나 커진다는 것을 경험을 통해 알고 있다.

**5.7.3.3 변형지연계수  $D_L$ .** 변형지연계수는 파이프의 현재 변형량을 이용해 수 년뒤 파이프의 변형량을 예측할 수 있게 해준다. 파이프 변형량이 시간이 지남에 따라 증가하는 주된 이유는 베딩의 “아칭(arching)”이 사라짐에 따라 파이프에 받는 하중이 커지기 때문이다. 이러한 현상은 토양이 젖었다가 다시 마르는 반복 횟수에 따라 대부분 매설 후 몇개월후부터 시작해서 최대 2년후까지 발생한다. 시간이 지남에 따라 파이프 변형량이 증가하는 두번째 이유는 시간이 경과함에 따라 되메움재의 시간에 따른 강화 정도 및 파이프 측면의 토양 유실때문이다. 이는 일반적으로 하중 증가의 경우보다 그 영향이 매우 미미해서 밀도가 높은 강성의 토양이 파이프 주변을 감싸고 있는 경우에는 파이프의 변형에 거의 영향을 미치지 못한다. 장기 변형을 예측값으로는  $D_L > 1.00$ 이 적절하다.

**5.7.3.4 기초지지각계수  $K_x$ .** 기초지지각계수는 하중에 의한 관 하부 반작용에 대한 하부 토양에 의한 지지 정도를 나타낸다. 균일하지 않은 현치매우기를 가정할 경우(일반적인 직접 매설 조건),  $K_x$  값으로는 0.1을 사용해야 한다. 균일한 하부 지지가 있을 경우에는  $K_x$ 값으로 0,083이 적절하다.

**5.7.3.5 수직하중  $W_c$ .** 수직하중은 파이프 바로 위의 직사각 프리즘형태의 토양 무게를 나타낸다. 토양 프리즘은 토피와 파이프 외경과 동일한 폭을 가진다.

$$W_C = \frac{\gamma_s H}{144} \tag{5-9}$$

여기서,

$W_c$ = 수직 토양 부하

$\gamma_s$ = 과부하의 단위 무게

$H$ = 파이프 상단의 매설 깊이

**5.7.3.6 활[동]하중  $W_L$**  다음의 계산은 4차선 도로의 폭 12-ft(3.7-m)인 각 차선의 중앙에 AASHTO HS-20 트럭이 위치하고 있는 경우를 가정한 것이다. 파이프는 트럭의 진행방향에 대해서 수평 또는 수직 아니면 임의의 방향을 향하고 있을 수 있다. 다른 트럭 하중은 실제 시험시 또는 프로젝트 필요에 따라 정의할 수 있다.

1. 트럭 진행방향과 평행인 하중 폭(ft)  $L1$ 을 계산한다, 그림 5-2 참조.

$$L1 = 0.83 + 1.75H \tag{5-10}$$

2. 트럭 진행방향과 수직인 하중 폭(ft)  $L2$ 를 계산한다, 그림 5-2 참조.

$$2 \text{ ft} < H < 2.48 \text{ ft}$$

$$L2 = 1.67 + 1.75H \tag{5-11}$$

$$H \geq 2.48 \text{ ft}$$

$$L2 = (43.67 + 1.75H) / 8 \quad (5-12)$$

$I_f$  = 충격 인자

$$= 1.1 \text{ for } 2 \text{ ft} < H < 3 \text{ ft}$$

$$= 1.0 \text{ for } H \geq 3 \text{ ft}$$

3.  $W_L$ 을 계산한다:

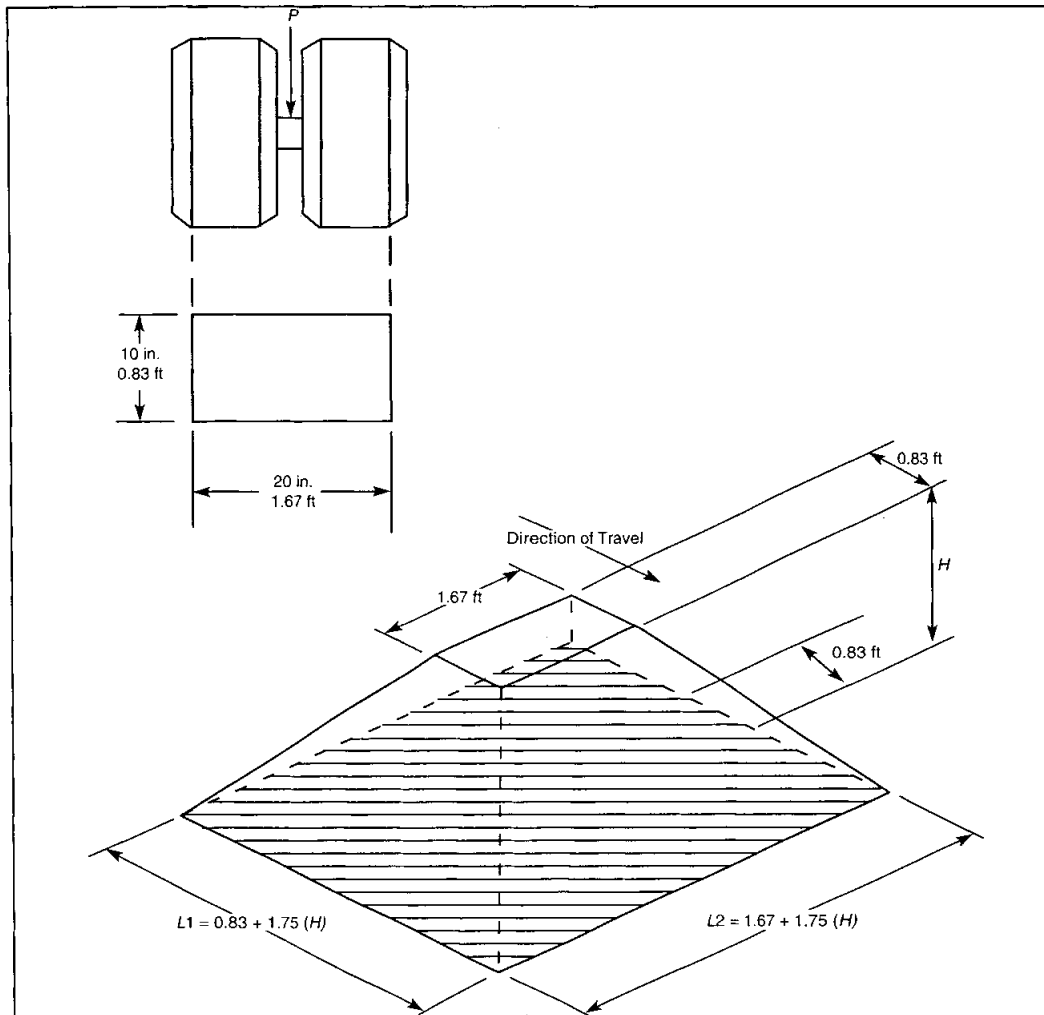
$$W_L = P(I_f) / \{144 (L1)(L2)\} \quad (5-13)$$

여기서,

$W_L$  = 파이프의 라이브 부하

$P$  = 16,000 lb (HS-20 휠 부하)

이 계산은 파이프 지름과 무관하며 표 5-2에서 보는 바와 같이 활[동]하중을 계산해 낼 수 있다. 표 5-2는 Cooper E-80 기차길 하중에 대한 활[동]하중도 포함하고 있다.



NOTE: For  $H \geq 2.48$  ft, see part 2 of the  $L2$  formula. (Change accounts for overlapping influence areas from adjacent wheel loads.)

Figure 5-2 Distribution of HS-20 live load through fill for  $H < 2.48$  ft

Table 5-2 HS-20 and Cooper's E-80 live loads (psi)

HS-20 Live Loads (psi)				Cooper's E-80 Live Loads (psi)			
Depth		$W_L$		Depth		$W_L$	
ft	m	psi	kPa	ft	m	psi	kPa
2	0.6	6	41.4	4	1.2	14.1	97.3
2.5	0.8	3.9	26.9	5	1.5	12.2	84.2
3	0.9	3.3	22.8	6	1.8	10.5	72.5
3.5	1.1	2.6	17.9	8	2.4	7.7	53.1
4	1.2	2.2	15.2	10	3.0	5.7	39.3
6	1.8	1.5	10.3	12	3.7	4.6	31.7
9	2.7	1.0	6.9	14	4.3	3.7	25.5
10	3.0	0.8	5.5	16	4.9	3.0	20.7
12	3.7	0.6	4.1	18	5.5	2.6	17.9
16	4.9	0.5	3.4	20	6.1	2.2	15.2
20	6.1	0.4	2.8	25	7.6	1.5	10.3
27	8.2	0.2	1.4	30	9.2	1.1	7.6
40	12.2	0.1	0.7	35	10.7	0.8	5.5
				40	12.2	0.6	4.1

Cooper E-80 design loads consist of four 80,000-lb axles spaced 5 ft c/c. Locomotive load assumed uniformly distributed over an area 8 ft x 20 ft. Weight of track structure assumed to be 200 lb/lin ft, including impact. Height of fill measured from top of pipe to bottom of ties.

5.7.3.7 파이프 강성 PS. 파이프의 강성은 파이프 벽 재료의 원주방향 휨 탄성계수  $E$ 에 파이프 단위 길이당 관성모멘트  $I$ 를 곱한 것을 0.149에 중심 반지름 삼제곱값을 곱한 것으로 나눈 것이다 (식 5-14 참조). 관성모멘트는  $t_i^3/12$ 와 동일하며 여기서  $t_i$ 는 전체 벽 두께이다. 벽 두께가 균일하지 않은 경우에는 제조자로부터 적절한 관성모멘트값을 구해 사용한다.

$$PS = \frac{EI}{0.149(r + \Delta y/2)^3} \quad (5-14)$$

파이프의 강성은 ASTM D2412에 준해서 평행판 하중 테스트를 실시함으로써 결정할 수 있다. 평행판 하중 테스트중 하중에 의한 파이프 상단 및 하단의 변형율을 측정해서 다음 공식으로부터 파이프 강성을 계산한다:

$$PS = \frac{F}{\Delta y} \quad (5-15)$$

여기서,

$F$  = 단위 길이당 하중

$\Delta y$  = 수직방향 변형율

5.7.3.8 토양 반발력 계수  $E'$ . 연성관의의 수직 하중은 파이프의 수직방향 지름의 감소와 수평방향 지름 증가를 초래한다. 수평방향 지름의 증가는 파이프를 지지하는 수동 토양 저항을 증가시킨다. 수동 토양 저항은 토양 종류 및 터파기 되메움 재료의 다짐 정도, 토양 특성, 토피 그리고 터파기 폭에 의해 결정된다(표 5-3 토양 분류표 참조). 지중매설관의  $E'$ 를 결정하기 위해서는 원래 토양에 대한 독립  $E'$ 값인  $E'n$  및 되메움제 대한  $E'$ 값인  $E'b$ 을 결정한 다음 식 5-16을 이용해야 한다. 특별한 경우에 대해서는 이번 장의 뒷 부분에서 다루기로 한다.

Table 5-3 Soil classification chart

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests <sup>a</sup>			Soil Classification			
			Group Symbol	Group Name <sup>b</sup>		
<b>Coarse-grained soils</b> More than 50% retained on No. 200 sieve	<b>Gravels</b> More than 50% of coarse fraction retained on No. 4 sieve	<b>Clean gravels</b> Less than 5% fines <sup>c</sup>	$Cu \geq 4$ and $1 \leq Cc \leq 3^e$	GW	Well-graded gravel <sup>f</sup>	
			$Cu < 4$ and/or $1 > Cc > 3^e$	GP	Poorly graded gravel <sup>f</sup>	
	<b>Sands</b> 50% or more of coarse fraction passes No. 4 sieve	<b>Gravels with fines</b> More than 12% fines <sup>c</sup>		Fines classify as ML or MH	GM	Silty gravel <sup>f,g,h</sup>
				Fines classify as CL or CH	GC	Clayey gravel <sup>f,g,h</sup>
		<b>Clean sands</b> Less than 5% fines <sup>d,j</sup>		$Cu \geq 6$ and $1 \leq Cc \leq 3^e$	SW	Well-graded sand <sup>i</sup>
				$Cu < 6$ and/or $1 > Cc > 3^e$	SP	Poorly graded sand <sup>i</sup>
<b>Sands with fines</b> More than 12% fines <sup>d</sup>		Fines classify as ML or MH	SM	Silty sand <sup>g,h,i</sup>		
		Fines classify as CL or CH	SC	Clayey sand <sup>g,h,i</sup>		
<b>Fine-grained soils</b> 50% or more passes the no. 200 sieve	<b>Silts and clays</b> Liquid limit less than 50	<b>Inorganic</b>	PI > 7 and plots on or above "A" line <sup>j</sup>	CL	Lean clay <sup>k,l,m</sup>	
			PI < 4 or plots below "A" line <sup>j</sup>	ML	Silt <sup>k,l,m</sup>	
	<b>Silts and clays</b> Liquid limit 50 or more	<b>Organic</b>	Liquid limit—oven dried	< 0.75	OL	Organic clay <sup>k,l,m,n</sup>
			Liquid limit—not dried			Organic silt <sup>k,l,m,o</sup>
		<b>Inorganic</b>	PI plots on or above "A" line	CH	Fat clay <sup>k,l,m</sup>	
			PI plots below "A" line	MH	Elastic silt <sup>k,l,m</sup>	
<b>Organic</b>	Liquid limit—oven dried	< 0.75	OH	Organic clay <sup>k,l,m,p</sup>		
	Liquid limit—not dried			Organic silt <sup>k,l,m,p</sup>		
<b>Highly organic soils</b>	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor		PT	Peat		

<sup>a</sup> Based on the material passing the 3-in. (75-mm) sieve.

<sup>b</sup> If field sample contained cobbles and/or boulders, add "with cobbles and/or boulders" to group name.

<sup>c</sup> Gravels with 5% to 12% fines require dual symbols:  
 GW-GM well-graded gravel with silt  
 GW-GC well-graded gravel with clay  
 GP-GM poorly graded gravel with silt  
 GP-GC poorly graded gravel with clay

<sup>d</sup> Sands with 5% to 12% fines require dual symbols:  
 SW-SM well-graded sand with silt  
 SW-SC well-graded sand with clay  
 SP-SM poorly graded sand with silt  
 SP-SC poorly graded sand with clay

<sup>e</sup>  $Cu = D_{60}/D_{10}$   
 $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$

<sup>f</sup> If soil contains  $\geq 15\%$  sand, add "with sand" to group name.

<sup>g</sup> If fines classify as CL-ML, use dual symbol GC-GM or SC-SM.

<sup>h</sup> If fines are organic, add "with organic fines" to group name.

<sup>i</sup> If soil contains  $\geq 15\%$  gravel, add "with gravel" to group name.

<sup>j</sup> If the Atterberg limits (liquid limit and plasticity index) plot in hatched area on plasticity chart, soil is a CL-ML, silty clay.

<sup>k</sup> If soil contains 15% to 29% plus No. 200, add "with sand" or "with gravel," whichever is predominant.

<sup>l</sup> If soil contains  $\geq 30\%$  plus No. 200, predominantly sand, add "sandy" to group name.

<sup>m</sup> If soil contains  $\geq 30\%$  plus No. 200, predominantly gravel, add "gravelly" to group name.

<sup>n</sup> PI  $\geq 4$  and plots on or above "A" line.

<sup>o</sup> PI  $\leq 4$  or plots below "A" line.

<sup>p</sup> PI plots on or above "A" line.

<sup>q</sup> PI plots below "A" line.

Source: ASTM D2487; Reprinted with permission from the Annual Book of ASTM Standards, copyright ASTM, 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428-2959.

NOTE: ASTM D2487 allows the use of "borderline" symbols when test results indicate that the soil classification is close to another group. The borderline condition is indicated by an en dash between the two symbols, for example CL-CH.

Table 5-4 Values for the soil support combining factor  $S_c$

$E'_n/E'_b$	$B_d/D$ 1.5	$B_d/D$ 2	$B_d/D$ 2.5	$B_d/D$ 3	$B_d/D$ 4	$B_d/D$ 5
0.1	0.15	0.30	0.60	0.80	0.90	1.00
0.2	0.30	0.45	0.70	0.85	0.92	1.00
0.4	0.50	0.60	0.80	0.90	0.95	1.00
0.6	0.70	0.80	0.90	0.95	1.00	1.00
0.8	0.85	0.90	0.95	0.98	1.00	1.00
1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	1.30	1.15	1.10	1.05	1.00	1.00
2.0	1.50	1.30	1.15	1.10	1.05	1.00
3.0	1.75	1.45	1.30	1.20	1.08	1.00
$\geq 5.0$	2.00	1.60	1.40	1.25	1.10	1.00

NOTE: In-between values of  $S_c$  may be determined by straight-line interpolation from adjacent values.

$$E' = S_c E'_b \quad (5-16)$$

여기서,

$E'$  = 토양 반발력 계수 (식 5-8 및 식 5-21에서 사용)

$S_c$  = 표 5-3의 토양 지지 결합 인자

$E'_b$  = 표 5-5의 터파기 되메움제의 토양 반작용 계수

$S_c$  값을 위해 표 5-4를 사용하기 위해서는 다음의 값들을 결정해야 한다:

$E'_n$  = 표 5-6의 2차 되메움제의 자연 토양 반발력 계수

$B_d$  = 파이프 스프링라인(springline)에서의 터파기 폭

#### 5.7.4 복합하중

내부 압력 및 변형율의 복합적인 영향으로 인한 최대 응력 및 변형은 식 5-17 및 식 5-18 또는 식 5-19 및 식 5-20을 다음과 같이 만족해야 한다:

응력기반 HDB 및  $S_b$ 의 경우:

$$\frac{\sigma_{pr}}{HDB} \leq \frac{1 - \left(\frac{\sigma_b r_c}{S_b E}\right)}{FS_{pr}} \quad (5-17)$$

$$\frac{\sigma_b r_c}{S_b E} \leq \frac{1 - \left(\frac{\sigma_{pr}}{HDB}\right)}{FS_b} \quad (5-18)$$

변형기반 HDB 및  $S_b$ 의 경우:

$$\frac{\epsilon_{pr}}{HDB} \leq \frac{1 - \left(\frac{\epsilon_b r_c}{S_b}\right)}{FS_{pr}} \quad (5-19)$$

$$\frac{\epsilon_b r_c}{S_b} \leq \frac{1 - \left(\frac{\epsilon_{pr}}{HDB}\right)}{FS_b} \quad (5-20)$$

여기서,

$FS_{pr}$  = 압력 설계 인자, 1.8

$FS_b$  = 굽힘 설계 인자, 1.5

$\epsilon_{pr}$  = 내부 압력으로 인한 사용 응력

$$= \frac{P_w D}{2t}$$

$\epsilon_b$  = 최대 허용 변형율으로 인한 굽힘 응력

$$= D_r E \left(\frac{\delta d}{D}\right) \left(\frac{t_t}{D}\right)$$

$r_c$  = 재선회 계수

$$= 1 - P_w / 435 \quad (P_w \leq 435 \text{ psi})$$

$\xi_{pr}$  = 내부 압력으로 인한 사용 변형

Table 5-5 Values for the modulus of soil reaction  $E'_b$  for the pipe zone embedment, psi (Mpa)

Soil Stiffness Category	Soil Type Primary Pipe Zone Backfill Material (Unified Classification System)*	Dumped	Slight		Moderate		High	
			<85% Proctor <40% Relative Density	85-95% Proctor 40-70% Relative Density	85-95% Proctor 40-70% Relative Density	>95% Proctor >70% Relative Density		
SC5	Highly compressible fine-grained soils (CH, MH, OL, OH, PT), or borderline soils (CH/MH), or any dual symbol or borderline soil beginning with one of these symbols.	Soils in this category require special engineering analysis to determine required density, moisture content, and compactive effort.	Soils in this category require special engineering analysis to determine required density, moisture content, and compactive effort.		Soils in this category require special engineering analysis to determine required density, moisture content, and compactive effort.		Soils in this category require special engineering analysis to determine required density, moisture content, and compactive effort.	
SC4	Fine-grained soils with medium to no plasticity (CL, ML, ML-CL), or borderline soil (ML/CL), or any dual symbol or borderline soil beginning with one of these symbols, with <30% coarse-grained particles	50 (0.34)	200 (1.4)		400 (2.8)		1,000 (6.9)	
SC3	Fine-grained soils with medium to no plasticity (CL, ML, ML-CL), or borderline soil (ML/CL), or any dual symbol or borderline soil beginning with one of these symbols, with ≥30% coarse-grained particles	100 (0.69)	400 (2.8)		1,000 (6.9)		2,000 (13.8)	

NOTE: Percent Proctor density per ASTM D698 and relative density per ASTM D4253 and D4254. Values for  $E'_b$  for in-between soils or borderline Proctor densities may be interpolated. \*ASTM Classification D2487 (see Table 5-3).

Table continued next page.

Table 5-5 Values for the modulus of soil reaction  $E'_b$  for the pipe zone embedment, psi (Mpa) (continued)

Soil Stiffness Category	Soil Type Primary Pipe Zone Backfill Material (Unified Classification System)*	Dumped	Slight		Moderate		High	
			<85% Proctor <40% Relative Density	85-95% Proctor 40-70% Relative Density	85-95% Proctor 40-70% Relative Density	>95% Proctor >70% Relative Density		
SC3	Coarse-grained soil with fines (GM, GC, SM, SC, GC-GM, GC/SC) or any dual symbol or borderline soil beginning with one of these symbols, containing more than 12% fines	100 (0.69)	400 (2.8)		1,000 (6.9)		2,000 (13.8)	
SC2	Coarse-grained soils with little or no fines (GW, GP, SW, SP, GW-GC, SP-SM) or any dual symbol or borderline soil beginning with one of these symbols, containing 12% fines or less	200 (1.4)	1,000 (6.9)		2,000 (13.8)		3,000 (20.7)	
SC1	Crushed rock with ≤15% sand, maximum 25% passing the 3/8 in. sieve and maximum 5% fines	1,000 (6.9)	3,000 (20.7)		3,000 (20.7)		3,000 (20.7)	

NOTE: Percent Proctor density per ASTM D698 and relative density per ASTM D4253 and D4254. Values for  $E'_b$  for in-between soils or borderline Proctor densities may be interpolated. \*ASTM Classification D2487 (see Table 5-3).



Table 5-6 Values for the modulus of soil reaction  $E'_n$  for the native soil at pipe zone elevation

Native in Situ Soils*				$E'_n$ (psi)
Granular		Cohesive		
Blows/ft†	Description	$q_u$ (Tons/sf)	Description	
>0-1	very, very loose	>0-0.125	very, very soft	50
1-2	very loose	0.125-0.25	very soft	200
2-4		0.25-0.50	soft	700
4-8	loose	0.50-1.0	medium	1,500
8-15	slightly compact	1.0-2.0	stiff	3,000
15-30	compact	2.0-4.0	very stiff	5,000
30-50	dense	4.0-6.0	hard	10,000
>50	very dense	>6.0	very hard	20,000

\*The modulus of soil reaction  $E'_n$  for rock is  $\geq 50,000$  psi.

†Standard penetration test per ASTM D1586.

For embankment installation  $E'_b = E'_n = E'$

**$E'$  special cases**

Geotextiles—When a geotextile pipe zone wrap is used,  $E'_n$  values for poor soils can be greater than those shown in Table 5-6.

Solid sheeting—When permanent solid sheeting designed to last the life of the pipeline is used in the pipe zone,  $E'$  shall be based solely on  $E'_b$ .

Cement stabilized sand—When cement stabilized sand is used as the pipe zone surround, initial deflections shall be based on a sand installation and the long-term  $E'_b = 25,000$  psi. (Typical mix ratio is one sack of cement per ton or 1.5 sacks of cement per cubic yard of mix.) For embankment installation  $E'_b = E'_n = E'$ .

$$= \frac{P_w D}{2tE_H}$$

$\xi_b$  = 최대 허용 변형율으로 인한 굽힘 응력

$$= D_f \left( \frac{\delta d}{D} \right) \left( \frac{t_f}{D} \right)$$

$\delta d$  = 시공시 최대 허용 장기간 변형율

5.7.5 버클링(Buckling)

5.7.5.1 버클링 이론. 지중매설관은 수직 하중과, 만약 있다면 지하수의 정수압 및 내부 진공으로 구성된 방사형 외부 부하에 노출된다. 이러한 하중은 매설된 파이프를 구부리기에 충분한 외부 방사 압력은 토양의 지지 효과로 인해 동일한 파이프가 유체 환경에 있을 때 구부림을 초래할 수 있는 압력보다 몇 배나 높다.

5.7.5.2 버클링 계산. 해당 외부 부하의 총합은 허용 버클링 압력과 동일하거나 작아야 한다. 허용

버클링 압력  $q_a$ 는 다음 식에 의해 결정된다:

$$q_a = \left( \frac{1}{FS} \right) [32R_w B E' \frac{EI}{D^3}]^{\frac{1}{2}} \tag{5-21}$$

여기서,

$q_a$  = 허용 버클링 압력

$FS$  = 설계 인자, 2.5

$R_w$  = 다음과 같이 계산된 물 부력 인자:

$$R_w = 1 - 0.33(hw/h); 0 \leq hw \leq h$$

여기서,

$h_w$  = 파이프 상단위의 수표면 높이

$h$  = 파이프 상단위의 지표면 높이

$B'$  = 탄성지지 실험계수, 계산 방법은 다음과 같다:

$$B' = \frac{1}{1 + 4e^{-0.065H}}$$

여기서,

$H$  = 파이프 상단까지의 매설 깊이

$E'$  = 토양 반작용 복합 계수

주 : 식 5-21은 다음 조건하에서만 유효하다:

내부 진공이 없을 때 :  $2 \text{ ft} \leq H \leq 80 \text{ ft}$

내부 진공이 있을 때 :  $4 \text{ ft} \leq H \leq 80 \text{ ft}$

토피가 4ft와 2ft사이일 때 내부 진공이 존재하는 경우 식 5-22의  $q_a$ 는 von Mises 공식에서 주어진 임계 버클링 압력으로서 결정된다. 2ft와 4ft사이의 토피는 권고값인 2.5를 초과하는 경우 안전 인자를 제공한다. 토피가 2ft와 4ft사이인 경우 필요한 벽 두께를 결정하기 위해서는 식 5-23을 사용해서 활[동]하중 및 데드(dead) 하중을 확인한다. 이 값이 범위에 대한 추가적인 권고사항은 제조자로부터 구한다.

Von Mises 공식은 다음과 같다:

$$q_a = \left( \frac{2Et_t}{D(n^2 - 1)(1 + K)^2} + \left[ n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - v_{hl}}{1 + K} \right] \left( \frac{8EI}{D^3[1 - (v_{hl})(v_{lh})]} \right) \right) \quad (5-22)$$

여기서,

$n$  = 버클링에 형성된 로브의 개수 ( $n$ 값은 반복 솔루션으로 구한  $q_a$ 의 최소값을 제시해야 한다.)

$v_{hl}$  = 포아송 비, 후프 응력 적용

$v_{lh}$  = 포아송 비, 경도 응력 적용

$$K = \left( \frac{2nL}{\pi D} \right)^2$$

여기서,

$L$  = 경식 링 보강재간 거리

주 : 통벽(ribbed-wall이 아닌) 파이프의 경우  $L$ 은 벨(bell), 커플링(coupling), 플랜지등 조인트간의 거리이다.

일반 파이프 설치. 일반 파이프 설치시 버클링 요구사항을 만족하는지는 다음 방정식을 사용해서

확인할 수 있다:

$$\gamma_w h_w + R_w(W_c) + P_v \leq q_a \quad (5-23)$$

여기서,

$\gamma_w$  = 물의 비중

$P_v$  = 내부 진공 압력 (즉, 대기압 파이프 내 절대 압력)

경우에 따라 데드 부하와 더불어 활[동]하중을 고려해야 하는 경우가 있다. 그러나, 활[동]하중과 내부 진공 과도값을 동시에 적용해야 하는 경우는 드물다. 활[동]하중을 고려해야 할 경우 버클링 요구사항을 만족하는지의 여부는 다음 공식으로 확인할 수 있다:

$$\gamma_w h_w + R_w(W_c) + W_L \leq q_a \quad (5-24)$$

### 5.8 축방향 하중

지중매설관의 축방향 응력은 (1) 파이프에 축방향으로 힘이 작용할 때마다 축방향 인장 응력을 초래하는 내부 압력에 기인한 후프 팽창 (2)힘에 의한 열팽창 및 압축 (3) 불균일한 베딩 및 토양 구성 또는 토양 함몰에 기인한 파이프 “빔” 힘에 의해 발생한다. 축방향 강도에 대한 최소 요구사항은 5.1.2.4 및 5.1.2.5 그리고 ANSI/AWWA 표준 C950의 표 11, 12 및 13에 나와 있다. 이 요구사항에는 본 사용 설명서 제 6 장에 나와 있는 지침을 따르고, 제 7 장에 준해서 굽힘 지점, 블랭크(blank) 및 밸브에 사용되는 스러스트 블록을 포함하며, 파이프 제조자의 권고사항을 따르는 일반 형질 지하 파이프 설치시의 사용 조건이 포함되어 있다. 조인트에 힘이 가해지는 경우, 파이프는 내부 압력에 의해 발생하는 모든 힘을 수용할 수 있도록 설계가 이루어져야 한다.

5.9 특별한 설계 고려사항

ANSI/AWWA 표준 C950 및 5.7의 설계 요구사항을 만족하고 제 6 장의 지침을 따라서 설치된 파이프는 매설후 응용시 적절한 사용 강도를 제공한다. 그러나, 다음의 경우에 대해서는 특별한 주의가 요구된다: (1) 고온 사용시 (2) 광범위한 온도 변화 (3)  $H < 4\text{ft}(1.2\text{m})$ 인 얇은 매설 (4) 불균일한 베딩 및 불안정한 토양 분포 (5) 힘이 작용하는 인장 조인트 (6) 매우 어려운 설치 조건 (예를 들면, 수중 설치시) (7) 무거운 미사(微砂) 또는 모래 하

중 (8) 비이상적인 지표 및 설치 부하

5.10 설계 예

지금부터 세 가지 서로 다른 설계 계산에 대한 예를 살펴본다. 각 설계 예에 사용된 설계 조건, 파이프 성질 및 설치 파라메타는 표 5-7에 나와 있다. 이들 파라메타에 대한 설명은 각 예제 설계 계산에서는 반복하지 않는다.

Table 5-7 Conditions and parameters for design examples

Conditions and Parameters	Sec. 5.10.1 (Example 1)	Sec. 5.10.2 (Example 2)	Sec. 5.10.3 (Example 3)
<b>Design conditions:</b>			
Nominal pipe diameter, in.	12	36	72
Working pressure $P_w$ , psi	220	115	55
Surge pressure $P_s$ , psi	65	55	20
Vacuum $P_v$ , psi	14.7	8	0
Cover depth $H$ , ft (min.-max.)	2.5-4	4-8	6-12
Wheel load $P$ , lb	16,000	16,000	16,000
Soil-specific weight $\gamma_s$ , lb/ft <sup>3</sup>	120	125	115
Service temperature, °F	32-100	32-90	32-95
Native soil conditions at pipe depth	slightly compact clayey sand	dense silty sand	medium stiff, inorganic clay
Native soil modulus $E'_n$ , psi	3,000	10,000	1,500
Groundwater table location	at ground surface	3 ft below ground surface	10 ft below ground surface
Maximum $h_w$ , in.	48	60	24
Minimum $h_w$ , in.	30	12	0
<b>Basis for <math>HDB</math> and <math>S_b</math></b>			
	Stress, <i>psi</i>	Strain, <i>in./in.</i>	Strain, <i>in./in.</i>
<b>Pipe properties:</b>			
Trial pressure class $P_c$ , psi	250	150	100
Reinforced wall thickness $t$ , in.	0.21	0.61	0.61
Liner thickness $t_L$ , in.	0	0.04	0.05
Total wall thickness $t_t$ , in.	0.21	0.65	0.66
Minimum pipe stiffness $F/\Delta y$ , psi	72	36	9
Hoop tensile modulus $E_H$ , psi	$3.3E6$	$1.8E6$	$3.25E6$
Hoop flexural modulus $E$ , psi	$3.45E6$	$1.9E6$	$3.5E6$
$HDB$	14,800	0.0064	0.0058
$S_b$	0.0100	0.0115	0.0058
Mean diameter $D$ , in.	12.21	36.69	72.71
Distance between joints $L$ , in.	240	360	480
Poisson's ratio $\nu$ , in./in.			
Hoop load $v_{hL}$	0.35	0.30	0.35
Axial load $v_{ih}$	0.15	0.20	0.15
<b>Installation parameters:</b>			
Pipe/zone installation description	slightly compacted silty sand, SM	moderately compacted clayey sand, SC	moderately compacted gravel, GW
Trench width, in.	27	58	104
Shape factor $D_f$	3.5	5.5	7.0
Backfill soil modulus $E'_b$ , psi	400	1,000	2,000
Deflection coefficient $K_x$	0.1	0.1	0.1
Deflection lag factor $D_L$	1.05	1.1	1.2
<b>Deflection:</b>			
Maximum deflection permitted, $\delta d/D$	0.05	0.05	0.05

표 5-7의 파이프 재료 성질 및 특성은 본 예제를 위한 것으로 실제 설계값으로 사용해서는 안된다. 이 파라메타들의 값은 파이프 설치 방법 및 재료에 따라 달라질 수 있으므로, 제조자로부터 정확한 값을 구해서 사용해야 한다.

**5.10.1 설계 예 1 : 응력 기반**

표 5-7의 예제 1에 나와 있는 가정 설계 조건, 파이프 성질 및 설치 파라메타 그리고 5.6에 나와 있는 설계 계산 절차를 사용해서 계산한다:

- 1. 식 5-1을 사용해서 HDB로부터 압력 등급  $P_c$  계산(5.7.1.1)

$$P_c = 250 \text{ psi} \leq \left(\frac{HDB}{FS}\right)\left(\frac{2t}{D}\right) \leq \left(\frac{14,800}{1.8}\right)\left(\frac{2(0.21)}{12.21}\right) \leq 282.83 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

- 2.  $P_c$ 와 식 5-3을 사용해서 사용 압력  $P_w$  계산 (5.7.1.2)

$$P_c \geq P_w$$

$$250 \text{ psi} \geq 220 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

- 3.  $P_c$ 와 식 5-4를 사용해서 서지 압력  $P_s$  확인

$$P_c \geq (P_w + P_s)/1.4$$

$$250 \geq (220 + 65) / 1.4$$

$$250 \text{ psi} \geq 204 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

- 4. 식 5-5를 사용해 링 굽힘으로부터 허용 변형  $\Delta y_a$  계산(5.7.2)

$$\sigma_b = D_f(E)\left(\frac{\Delta y_a}{D}\right)\left(\frac{t_f}{D}\right) \leq \left(\frac{ES_b}{FS}\right)$$

$$3.5(3.45E6)\left(\frac{\Delta y_a}{12.21}\right)\left(\frac{0.21}{12.21}\right) \leq \frac{(3.45E6)(0.01)}{1.5}$$

$$17,009\Delta y_a \leq 23,000$$

따라서, 최대  $\Delta y_a = 1.35 \text{ in.}$

식 5-8로부터(5.7.3)

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\Delta y_a}{D}$$

이 예제에서,  $\delta d/D = 0.05$  :

$$\Delta y/D \leq 0.05 \leq 1.35/12.21$$

$$(5\%)D \leq (11\%)D \therefore \text{OK}$$

- 5. 외부 하중  $W_c$  및  $WL$  계산

식 5-9를 사용해 외부 하중  $W_c$  결정

$$W_c = \frac{\gamma_s H}{144}$$

$$H = 2.5 \text{ ft}$$

$$W_c = \frac{120(2.5 \text{ ft})}{144} = 2.08 \text{ psi}$$

$$H = 4 \text{ ft}$$

$$W_c = \frac{120(4 \text{ ft})}{144} = 3.33 \text{ psi}$$

식 5-13를 사용해 외부 하중  $WL$  결정

$$W_L = P(I_f) / [144(L_1)(L_2)]$$

$WL$  계산을 위해 식 5-13을 사용하려면  $I_f$ ,  $L_1$  및  $L_2$ 를 먼저 결정한다

$$H = 2.5 \text{ ft} \quad I_f = 1.1$$

$$H = 4 \text{ ft} \quad I_f = 1.0$$

식 5-10으로부터  $L_1$  결정

$$L_1 = 0.83 + 1.75(H)$$

$$H = 2.5 \text{ ft} \quad L_1 = 0.83 + 1.75(2.5 \text{ ft}) = 5.21 \text{ ft}$$

$$H = 4 \text{ ft} \quad L_1 = 0.83 + 1.75(4 \text{ ft}) = 7.83 \text{ ft}$$

식 5-12를 사용해  $L_2$  계산

$$H \geq 2.48 \text{ ft} \quad L_2 = [(43.67) + 1.75(H)] / 8$$

$$H = 2.5 \text{ ft} \quad L_2 = [(43.67) + 1.75(2.5 \text{ ft})] / 8 = 6.01 \text{ ft}$$

$$H = 4 \text{ ft} \quad L_2 = [(43.67) + 1.75(4 \text{ ft})] / 8 = 6.33 \text{ ft}$$

식 5-13에 대입한다

H=2.5ft  $W_L=16,000(1.1)/[144(5.21)(6.01)]=3.90$  psi

H=4ft  $W_L=16,000(1.0)/[144(7.83)(6.33)]=2.24$  psi

6. 식 5-16을 사용해서 토양 반발력 계수 E' 계산

$E'=S_c E'_b$

E'를 결정하기 위해서는 Sc를 먼저 결정

$E'_n/E'_b=3,000/400=7.5$

$B_d/D=27/12.21 = 2.21$

표 5-4를 사용해 Sc=1.52를 외삽한 다음

식 5-16에 대입한다

$E'=1.52(400)=608$  psi

7. 식 5-8을 사용해 변형을 계산(5.7.3)

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(D_L W_C + W_L) K_X}{0.149 PS + 0.061 E'} \times 100\%$$

H=2.5 ft인 경우에 대해 식 5-8에 대입한다

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(1.05 \times 2.08 + 3.90)(0.1)}{0.149(72) + 0.061(608)} \times 100 = 1.27\%$$

식 5-7을 사용해 확인

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\Delta y_a}{D}$$

$1.27\% \leq 5\% \leq 11\% \therefore OK$

H=4 ft인 경우에 대해 식 5-8에 대입한다

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(1.05 \times 3.33 + 2.24)(0.1)}{0.149(72) + 0.061(608)} \times 100$$

$= 1.20\%$

식 5-7을 사용해 확인

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\Delta y_a}{D}$$

$1.20\% \leq 5\% \leq 11\% \therefore OK$

8. 식 5-17 및 식 5-18을 사용해 결합 하중 응력 확인(5.7.4)

식 5-17을 사용해 확인

$$\frac{\sigma_{pr}}{HDB} \leq \frac{1 - (\frac{\sigma_b r_c}{E S_b})}{FS_{pr}}$$

$$\frac{220(12.21)}{2(0.21)} \leq \frac{1 - (\frac{(3.5)(3.45E6)}{0.01(3.45E6)})(0.05)(\frac{0.21}{12.21})(1 - (\frac{220}{435}))}{1.8}$$

$0.43 \leq 0.47 \therefore OK$

식 5-18을 사용해 확인

$$\frac{\sigma_b r_c}{E S_b} \leq \frac{1 - (\frac{\sigma_{pr}}{HDB})}{FS_b}$$

$$\frac{(3.5)(3.45E6)(0.05)(\frac{0.21}{12.21})[1 - (\frac{220}{435})]}{(3.45E6)(0.01)} \leq \frac{1 - [\frac{(\frac{220(12.21)}{2(0.21)})}{14,800}]}{1.8}$$

$0.15 \leq 0.38$

9. 버클링 압력 확인

주 : 진공 하중 존재. 식 5-22를 사용해 H = 2.5

ft인 경우에 대해 허용 버클링 압력 qa 결정

$$q_a = \left( \frac{2E t_i}{D(n^2 - 1)(1 + K)^2} \right) + \left[ n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - v_{hl}}{1 + K} \right] \left( \frac{8EI}{D^3 [1 - (v_{hl})(v_{in})]} \right)$$

qa 계산을 위해 식 5-22를 사용

하려면 K 값을 먼저 결정한다

$$K = \left( \frac{2nL}{\pi D} \right)^2 = \left( \frac{2(2)(240)}{\pi(12.21)} \right)^2 = 626.3$$

식 5-22에 대입하고 qa를 계산한다

$$q_a = \left( \frac{2(3.45E6)(0.21)}{(12.21)(2^2 - 1)(1 + 626.3)^2} \right) + \left[ 2^2 - 1 + \left( \frac{2(2)^2 - 1 - 0.35}{1 + 626.3} \right) \right] \left( \frac{8(3.45E6)(0.21^3/12)}{(12.21)^3 [1 - (0.35)(0.15)]} \right)$$

$= 0.101 + 3.011(12.35) = 37.29$  psi

식 5-21을 사용해 H = 4 ft인 경우에 대해 허용 버클링 압력 qa 결정

$$q_a = \frac{1}{FS} \left[ 32R_w B E' \left( \frac{EI}{D^3} \right) \right]^{0.5}$$

qa 계산을 위해 식 5-21을 사용하려면  $R_w$  및  $B'$  값을 먼저 결정한다

$$R_w = 1 - 0.33 (h_w/h)$$

$$= 1 - 0.33 (48/48)$$

$$= 0.67$$

$$B' = 1/(1 + 4e^{-0.065H})^c$$

$$= 1/(1 + 4e^{-0.26})$$

$$= 0.245$$

식 5-21에  $R_w$  및  $B'$  값을 대입한다

$$q_a = \frac{1}{2.5} \left[ 32 (0.67) (0.245) (608) \left( \frac{3.45E6 (0.21)^3}{12 (12.21)^3} \right)^{1.5} \right]$$

$$= 27.34 \text{ psi}$$

일반 파이프 설치시의 버클링 요구사항을 만족하는지 확인하기 위해 식 5-23을 사용한다

$$\gamma_w (h_w) + R_w W_c + P_v \leq q_a$$

활[동]하중을 고려해야 하는 상황이라면, 식 5-24를 사용한다

$$\gamma_w (h_w) + R_w W_c + P_v \leq q_a$$

식 5-23 및 5-24를 사용하려면 깊이 2.5 ft에서의 물 부력 인자  $R_w$  값을 먼저 계산한다

$$R_w = 1 - 0.33 (h_w/h); 0 \leq h_w \leq h$$

$$= 1 - 0.33 (30/30)$$

$$= 0.67$$

H = 2.5 ft 인 경우에 대해 일반 파이프 설치 조건을 확인하기 위해 식 5-23에 대입한다

$$(0.0361)(30) + (0.67)(2.08) + 14.7 \leq 32.29 \text{ psi}$$

$$17.18 \leq 32.39 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

그리고 H = 2.5 ft 인 경우에 대해 활[동]하중 조건을 확인하기 위해 식 5-24에 대입한다

$$(0.0361)(30) + (0.67)(2.08) + (3.9) \leq 32.29 \text{ psi}$$

$$6.38 \leq 32.39 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

H = 4 ft 인 경우에 대해 일반 파이프 설치 조건을 확인하기 위해 식 5-23에 대입한다

$$(0.0361)(48) + 0.67 (3.33) + (14.7) \leq 27.34 \text{ psi}$$

$$18.66 \leq 27.34 \text{ psi}$$

그리고 H = 4 ft 인 경우에 대해 활[동]하중 조건을 확인하기 위해 식 5-24에 대입한다

$$(0.0361)(48) + 0.67 (3.33) + (2.24) \leq 27.34 \text{ psi}$$

$$6.20 \leq 27.34 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

결론 : 모든 확인 값이 요구사항을 만족하므로 설계는 OK.

### 5.10.2 설계 예 2 : 변형 기반

표 5-7의 예제 2에 나와 있는 가정 설계 조건, 파이프 특성 및 설치 파라메타 그리고 5.6에 나와 있는 설계 계산 절차를 사용해서 계산한다:

1. 식 5-2를 사용해서 HDB로부터 압력 등급  $P_c$  계산(5.7.1.1)

$$P_c = 150 \text{ psi} \leq \left( \frac{HDB}{FS} \right) \left( \frac{2E_{FH}}{D} \right)$$

$$\leq \left( \frac{0.0064}{1.8} \right) \left( \frac{2(1.8E6)(0.61)}{36.69} \right)$$

$$\leq 212.81 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

2.  $P_c$ 와 식 5-3을 사용해서 사용 압력  $P_w$  계산 (5.7.1.2)

$$P_c \geq P_w$$

$$150 \text{ psi} \geq 115 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

3.  $P_c$ 와 식 5-4를 사용해서 서지 압력  $P_s$  확인 (5.7.1.3)

$$P_c \geq (P_w + P_s)/1.4$$

$$150 \geq (115+55)/1.4$$



150 psi ≥ 122 psi ∴OK

4. 식 5-6을 사용해 링 굽힘으로부터 허용 편향 변형 계산(5.7.2)

$$\epsilon_b = D_f \left( \frac{\Delta y_a}{D} \right) \left( \frac{t_t}{D} \right) \leq \left( \frac{S_b}{FS} \right)$$

$$5.5 \left( \frac{\Delta y_a}{36.69} \right) \left( \frac{0.65}{36.69} \right) \leq \left( \frac{0.0015}{1.5} \right)$$

$$0.00266 \Delta y_a \leq 0.00767$$

따라서, 최대  $\Delta y_a = 2.89$  in.

식 5-7로부터(5.7.3)

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\delta y_a}{D}$$

이 예제에서,  $\frac{\delta d}{D} = 0.05$

$$\frac{\Delta y}{D} \leq 0.05 \leq \frac{2.89}{36.69}$$

5% ≤ 7.9% ∴OK

5. 외부 하중  $W_c$  및 WL 계산

식 5-9를 사용해 외부 하중  $W_c$  결정(5.7.3.5)

$$W_c = \frac{\gamma_s H}{144}$$

$$H = 4 \text{ ft } W_c = \frac{125(4)}{144} = 3.47 \text{ psi}$$

$$H = 8 \text{ ft } W_c = \frac{125(8)}{144} = 6.94 \text{ psi}$$

식 5-13를 사용해 외부 하중 WL 결정(5.7.3.6)

$$W_L = P(I_f) / [144(L1)(L2)]$$

WL 계산을 위해 식 5-13을 사용하려면 If, L1 및 L2를 먼저 결정한다

$$H = 2.5 \text{ ft } I_f = 1.0$$

$$H = 4 \text{ ft } I_f = 1.0$$

식 5-10으로부터 L1 결정

$$L1 = 0.83 + 1.75(H)$$

$$H = 4 \text{ ft } L1 = 0.83 + 1.75(4) = 7.83 \text{ ft}$$

$$H = 8 \text{ ft } L1 = 0.83 + 1.75(8) = 14.83 \text{ ft}$$

식 5-12를 사용해 L2 계산

$$H \leq 2.48 \text{ ft } L2 = [(43.67) + 1.75(H)] / 8$$

$$H = 2.5 \text{ ft } L2 = [(43.67) + 1.75(4)] / 8 = 6.33 \text{ ft}$$

$$H = 4 \text{ ft } L2 = [(43.67) + 1.75(8)] / 8 = 7.21 \text{ ft}$$

식 5-13에 대입한다

$$H = 4 \text{ ft } W_L = 16,000(1.0) / [144(7.83)(6.33)] = 2.24 \text{ psi}$$

$$H = 8 \text{ ft } W_L = 16,000(1.0) / [144(14.83)(7.21)] = 2.24 \text{ psi}$$

6. 식 5-16을 사용해서 토양 반발력 계수  $E'$  계산(5.7.3)

$$E' = S_c E'_b$$

먼저  $S_c$  결정

$$E'_n / E'_b = 10,000 / 1,000 = 10$$

$$B_d / d = 58 / 36.69 = 1.58$$

표 5-4를 사용해  $S_c = 1.94$ 를 외삽한 다음

식 5-16에 대입한다

$$E' = (1.94(1,000)) = 1,940 \text{ psi}$$

7. 식 5-8을 사용해 변형을 계산(5.7.3)

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(D_L W_c + W_L) K_X}{0.149 P S + 0.061 E} \times 100 \%$$

$H = 4$  ft 인 경우에 대해 식 5-8에 대입한다

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(1.1(3.47) + 2.24)0.1}{0.149(36) + 0.061(1,940)} \times 100 = 0.49 \%$$

식 5-7을 사용해 확인

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\Delta y_a}{D}$$

$H = 8$  ft 인 경우에 대해 식 5-8에 대입한다

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(1.1(6.94) + 1.04)(0.1)}{0.149(36) + 0.061(1.940)} \times 100$$

$$= 0.70\%$$

식 5-7을 사용해 확인

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\Delta y_a}{D}$$

0.70% ≤ 5% ≤ 7.9% ∴ OK

8. 식 5-19 및 식 5-20을 사용해 결합 하중 변형

c 확인(5.7.4)

식 5-19를 사용해 확인

$$\frac{\epsilon_{pr}}{HDB} \leq \frac{1 - (\frac{\epsilon_b r_c}{S_b})}{FS_{pr}}$$

$$\frac{115(36.69)}{2(0.61)(1.8E6)} \leq \frac{1 - ((5.5)(0.05)(\frac{0.65}{36.69})(1 - (\frac{115}{435})))}{0.0115 \cdot 1.8}$$

0.30 ≤ 0.38 ∴ OK

식 5-20을 사용해 확인

$$\frac{\epsilon_b r_c}{S_b} \leq \frac{1 - (\frac{\sigma_{pr}}{HDB})}{FS_b}$$

$$\frac{(5.5)(0.05)(\frac{0.65}{36.69})[1 - (\frac{115}{435})]}{0.0115} \leq \frac{1 - \left[ \frac{(\frac{115}{2(0.61)(1.8E6)})}{0.0064} \right]}{1.5}$$

0.31 ≤ 0.47 ∴ OK

9. 식 5-21을 사용해 버클링 확인

$$q_a = \frac{1}{FS} \left[ 32R_w B E' \left( \frac{EI}{D^3} \right) \right]^{0.5}$$

qa 계산을 위해 식 5-21을 사용하려면 Rw 및 B'

값을 먼저 결정한다

$$R_w = 1 - 0.33(h_w/h) ; 0 \leq h_w \leq h$$

H = 8 ft

$$R_w k = 1 - 0.33(60/96)$$

= 0.794

H = 4 ft

$$R_w = 1 - 0.33(12/48)$$

= 0.917

$$B = \frac{1}{1 + 4e^{-0.065(H)}}$$

H = 8 ft

$$B = \frac{1}{1 + 4e^{-0.065(8)}}$$

H = 4 ft

$$B = \frac{1}{1 + 4e^{-0.065(4)}}$$

= 0.245

H = 8 ft인 경우에 대해 식 5-21에 Rw 및 B'

값을 대입한다

$$q_a = \frac{1}{2.5} \left[ 32(0.794)(0.296)(1,940) \left( \frac{1.9E6(0.61)^3}{12(36.69)^3} \right) \right]^{0.5}$$

= 41.21 psi

H = 4 ft인 경우에 대해 식 5-21에 Rw 및 B'

값을 대입한다

$$q_a = \frac{1}{2.5} \left[ 32(0.917)(0.245)(1,940) \left( \frac{1.9E6(0.61)^3}{12(36.69)^3} \right) \right]^{0.5}$$

= 40.30 psi

식 5-23의 요구사항을 만족하는지 확인

$$\gamma_w(h_w) + R_w W_c + P_v \leq q_a$$

식 5-24의 요구사항을 만족하는지 확인

$$\gamma_w(h_w) + R_w W_c + P_v \leq q_a$$

H = 8 ft인 경우에 대해 식 5-23에 대입한다

$$(0.0361)(60) + (0.794)(6.94) + 8 \leq 41.21 \text{ psi}$$

$$15.68 \text{ psi} \leq 41.21 \text{ psi}$$

그리고 식 5-24에 대입한다

$$(0.0361)(60) + (0.794)(6.94) + 1.04 \leq 41.21 \text{ psi}$$

$$8.72 \text{ psi} \leq 41.21 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

H = 4 ft인 경우에 대해 식 5-23에 대입한다

$$(0.0361)(12) + (0.917)(3.47) + 8 \leq 40.30 \text{ psi}$$

$$11.62 \text{ psi} \leq 40.30 \text{ psi}$$

그리고 식 5-24에 대입한다

$$(0.0361)(12) + (0.917)(3.47) + 2.24 \leq 40.30 \text{ psi}$$

$$5.86 \text{ psi} \leq 40.30 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

결론 : 모든 확인 값이 요구사항을 만족하므로 설계는 OK.

### 5.10.3 설계 예 3 : 변형 기반

표 5-7의 예제 2에 나와 있는 가정 설계 조건, 파이프 특성 및 설치 파라메타 그리고 5.6에 나와 있는 설계 계산 절차를 사용해서 계산한다:

1. 식 5-2를 사용해서 HDB로부터 압력 등급  $P_c$  계산(5.7.1.1)

$$P_c = 100 \text{ psi} \leq \left(\frac{HDB}{FS}\right)\left(\frac{2E_{FH}}{D}\right)$$

$$\leq 175.713 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

2.  $P_c$ 와 식 5-3을 사용해서 사용 압력  $P_w$  계산 (5.7.1.2)

$$P_c \geq P_w$$

$$100 \text{ psi} \geq 55 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

3.  $P_c$ 와 식 5-4를 사용해서 서지 압력  $P_s$  확인 (5.7.1.3)

$$P_c \geq (P_w + P_s)/1.4$$

$$100 \geq (55+20)/1.4$$

$$100 \text{ psi} \geq 54 \text{ psi} \therefore \text{OK}$$

4. 식 5-6을 사용해 링 굽힘으로부터 허용 변형  $y_a$  계산(5.7.2)

$$\epsilon_b = D_f \left(\frac{\Delta y_a}{D}\right) \left(\frac{t_t}{D}\right) \leq \left(\frac{S_b}{FS}\right)$$

$$7.0 \left(\frac{\Delta y_a}{72.71}\right) \left(\frac{0.66}{72.71}\right) \leq \left(\frac{0.0058}{1.5}\right)$$

$$0.00087884 \Delta y_a \leq 0.0038666$$

$$\therefore \text{최대 } \Delta y_a = 4.42 \text{ in.}$$

식 5-7로부터(5.7.3)

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\delta y_a}{D}$$

이 예제에서,

$$\frac{\delta d}{D} = 0.05$$

$$\frac{\Delta y}{D} \leq 0.05 \leq \frac{4.42}{72.71}$$

$$(5\%) D \leq (6.09\%) D \therefore \text{OK}$$

5. 외부 하중  $W_c$  및 WL 계산

식 5-9를 사용해 외부 하중  $W_c$  결정(5.7.3.5)

$$W_c = \frac{\gamma_s H}{144}$$

$$H = 6 \text{ ft } W_c = \frac{125(6)}{144} = 4.79 \text{ psi}$$

$$H = 12 \text{ ft } W_c = \frac{125(12)}{144} = 9.58 \text{ psi}$$

식 5-13를 사용해 외부 하중 WL 결정(5.7.3.6)

$$W_L = P(I_f) / [144(L_1)(L_2)]$$

WL 계산을 위해 식 5-13을 사용하려면,  $L_1$  및  $L_2$ 를 먼저 결정한다

$$H = 6 \text{ ft } I_f = 1.0$$

$$H = 12 \text{ ft } I_f = 1.0$$

식 5-10으로부터 L1 결정

$$L1 = 0.83 + 1.75(H)$$

$$H = 4 \text{ ft} \quad L1 = 0.83 + 1.75(6 \text{ ft}) = 11.33 \text{ ft}$$

$$H = 8 \text{ ft} \quad L1 = 0.83 + 1.75(12 \text{ ft}) = 21.83 \text{ ft}$$

식 5-12를 사용해 L2 계산

$$H \geq 2.48 \text{ ft} \quad L2 = [(43.67) + 1.75(H)]/8$$

$$H = 6 \text{ ft} \quad L2 = [(43.67) + 1.75(6 \text{ ft})]/8 = 6.77 \text{ ft}$$

$$H = 12 \text{ ft} \quad L2 = [(43.67) + 1.75(12 \text{ ft})]/8 = 8.08 \text{ ft}$$

식 5-13에 대입한다

$$H = 6 \text{ ft} \quad W_L = 16,000(1.0)/[144(11.33)(6.77)] = 1.45 \text{ psi}$$

$$H = 12 \text{ ft}$$

$$W_L = 16,000(1.0)/[144(21.83)(8.08)] = 0.63 \text{ psi}$$

6. 식 5-16을 사용해서 토양 반발력 계수 E' 계산(5.7.3.8)

$$E' = S_c E'_b$$

먼저 Sc 결정

$$E'_n/E'_b = 1,500/2,000 = 0.75$$

$$B_d/d = 104/72.71 = 1.4303$$

표 5-4를 사용해 Sc=1.94를 외삽한 다음

식 5-16에 대입한다

$$E' = 0.81(2,000) = 1,620 \text{ psi}$$

7. 식 5-8을 사용해 변형을 계산(5.7.3)

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(D_L W_C + W_L) K_X}{0.149 PS + 0.061 E} \times 100\%$$

H=6 ft인 경우에 대해 식 5-8에 대입한다

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(1.2(4.79) + 1.45)0.1}{0.149(9) + 0.061(1,620)} \times 100$$

$$= 0.72\%$$

식 5-7을 사용해 확인

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\Delta y_a}{D}$$

$$0.72\% \leq 5\% \leq 6.09\% \quad \therefore \text{OK}$$

H=12 ft 인 경우에 대해 식 5-8에 대입한다

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(1.2(9.58) + (0.63))0.1}{0.149(9) + 0.061(1,620)} \times 100$$

$$= 1.21\%$$

식 5-7을 사용해 확인

$$\frac{\Delta y}{D} \leq \frac{\delta d}{D} \leq \frac{\Delta y_a}{D}$$

$$1.21\% \leq 5\% \leq 6.09\% \quad \therefore \text{OK}$$

8. 식 5-19 및 식 5-20을 사용해 결합 하중 변형 c 확인(5.7.4)

식 5-19를 사용해 확인

$$\frac{\epsilon_{pr}}{HDB} \leq \frac{1 - (\frac{\epsilon_b r_c}{S_b})}{FS_{pr}}$$

$$\frac{(55)(72.71)}{2(0.61)(3.25E6)} \leq \frac{1 - (7(0.05)(\frac{0.66}{72.71})(1 - (\frac{55}{435})))}{0.0058} \leq \frac{0.0058}{1.8}$$

$$0.17 \leq 0.29 \quad \therefore \text{OK}$$

식 5-20을 사용해 확인

$$\frac{\epsilon_b r_c}{S_b} \leq \frac{1 - (\frac{\sigma_{pr}}{HDB})}{FS_b}$$

$$\frac{(7.0)(0.05)(\frac{0.66}{72.71})[1 - (\frac{55}{435})]}{0.0115} \leq \frac{1 - \left[ \frac{(55)(72.71)}{2(0.61)(3.25E6)} \right]}{1.5}$$

$$0.48 \leq 0.55 \quad \therefore \text{OK}$$

9. 식 5-21을 사용해 허용 버클링 압력 확인

$$q_a = \frac{1}{FS} \left[ 32 R_w B E' \left( \frac{EI}{D^3} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

식 5-21을 사용하려면 R<sub>w</sub> 및 B' 값을 먼저 결정한다

$$R_w = 1 - 0.33 (h_w/h)$$

$$H = 6 \text{ ft}$$

$$R_w = 1 - 0.33 (0/72)$$

$$= 1.0$$

$$H = 12 \text{ ft}$$

$$R_w = 1 - 0.33 (24/144)$$

$$= 0.945$$

$$B = \frac{1}{1 + 4e^{-0.065(H)}}$$

$$H = 6 \text{ ft}$$

$$B = \frac{1}{1 + 4e^{-0.065(6)}}$$

$$= 0.270$$

$$H = 12 \text{ ft}$$

$$B = \frac{1}{1 + 4e^{-0.065(12)}}$$

$$= 0.353$$

H = 6 ft인 경우에 대해 식 5-21에  $R_w$  및 B' 값을 대입한다

$$q_a = \frac{1}{2.5} \left[ 32 (1.0) (0.270) \left( \frac{(1,620) 3.5 E6 (0.61^3)}{(12) 72.71^3} \right) \right]^{0.5}$$

$$= 19.64 \text{ psi}$$

H = 12 ft인 경우에 대해 식 5-21에  $R_w$  및 B' 값을 대입한다

$$q_a = \frac{1}{2.5} \left[ 32 (0.945) (0.353) \left( \frac{(1,620) 3.5 E6 (0.61^3)}{(12) 72.71^3} \right) \right]^{0.5}$$

$$= 21.83 \text{ psi}$$

진공이 존재하지 않기 때문에 오직 식 5-24의 요구사항을 만족하는지 확인

$$q_a \geq W_L + R_w (W_c) + \gamma_w h_w$$

H = 6 ft인 경우에 대해 대입한다

$$\geq (1.45) + (1)(4.79) + 0.0361 (0 \text{ in.})$$

$$= 6.24 \leq 19.64 \therefore \text{OK}$$

H = 12 ft인 경우에 대해 대입한다

$$\geq (0.63) + 0.945(9.58) + 0.0361 (24)$$

$$= 10.55 \leq 21.83 \therefore \text{OK}$$

결론 : 모든 확인 값이 요구사항을 만족하므로 설계는 OK.

### 참고문헌

1. AASHTO H-20. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Cagle, L., and B.C. Glascock. 1982. Recommended Design Requirements for Elastic Buckling of Buried Flexible Pipe (Report of ANSI/AWWA Standard C950 Ad-Hoc Task Group on Buckling). In Proc. of AWWA Annual Conference and SPI 39th Annual Conference (January, 1984). Denver, Colo.: American Water Works Association.
3. Luscher, U. 1966. Buckling of Soil Surrounded Tubes. Jour. Soil Mech. & Found., 92(6):213.
4. Molin, J. 1971. Principles of Calculation for Underground Plastic Pipes—Calculations of Loads, Deflection, Strain. ISO Bull., 2(10):21.
5. Spangler, M.G. and R.L. Handy. 1982. Soil Engineering. New York: Harper & Row.
6. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System.) 1993. ASTM D2487. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials.
7. Standard for Fiberglass Pressure Pipe. 1995. ANSI/AWWA C950. Denver, Colo.: American Water Works Association.
8. Standard Practice for Determining Dimensions of 'Fibergalss' (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe and Fittings. 1991. ASTM D3567. West

- Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
9. 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.
  10. Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. 1993. ASTM D4253. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.
  11. Von Mises, R. 1914. Critical Pressure of Cylindrical Tubes. *Zetschorft des Vereins Deutscher Ingenieure*, 28:19.