

미국 유리섬유 복합관 설계 매뉴얼 소개 (VI)

Introduction of American Fiberglass Pipe Design Manual (VI)



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 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).

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 지중매설설계
제6장	유리섬유 복합관 지하설치 지침
제7장	유리섬유 복합관 추력 블록
제8장	유리섬유 복합관 설계 및 시공
제9장	접합방식 및 이음장치
제10장	운반, 취급, 보관 및 보수
부록	용어해설

2. 유리섬유 복합관 설계매뉴얼 소개

제7장 유리섬유 복합관 추력 블록

7.1 불균형 추력(Thrust Force)

불균형 추력은 압력 파이프에서 방향이 바뀌는 지점(예를 들면, 엘보우, y-자형 파이프(wye), T-자형 파이프(tee) 등) 및 단면적이 바뀌는 지점(예를 들면, 리듀서) 또는 파이프라인 종단지점(예를 들면, 벌크헤드)에서 발생한다. 이러한 힘을 적절히 억제하지 않으면 파이프라인이 움직이는 원인으로 작용할 수 있으며, 결과적으로 조인트 분리 및 파이프 손상을 초래할 수 있다. 추력은 크게 두 가지로 나뉘는데 첫째가 파이프 내압으로 인한 유체 정역학적 추력, 둘째가 흐르는 유체의 모멘텀 변화로 인한 유체 동역학적 추력이다. 대부분의 압력 파이프라인은 비교적 저속으로 동작하기 때문에 유체 동역학적 추력은 매우 작으며 일반적으로 무시된다.

7.1.1 유체 정역학적 추력

유체 정역학적 추력의 일반적인 예를 그림 7-1에서 볼 수 있다. 데드 엔드, 티, 래터럴 및 리듀서의 추력은 파이프 조인트에서의 내압 P 와 단면적 A 의 함수이다. 게다가 굽힘 부분에서의 추력은 편향각의 함수이므로 추력은 결과적으로 다음과 같이 표시된다:

$$T = 2PA \sin(\Delta/2) \quad (\text{식 7-1})$$

여기서,

T = 유체 정역학적 추력, lb

P = 내압, psi

$A = (\pi/4)D_j^2$ = 파이프 조인트의 단면적, in²

여기서 D_j 는 파이프 조인트 직경, in.

Δ = 굽힘 부분의 편향각, 각도

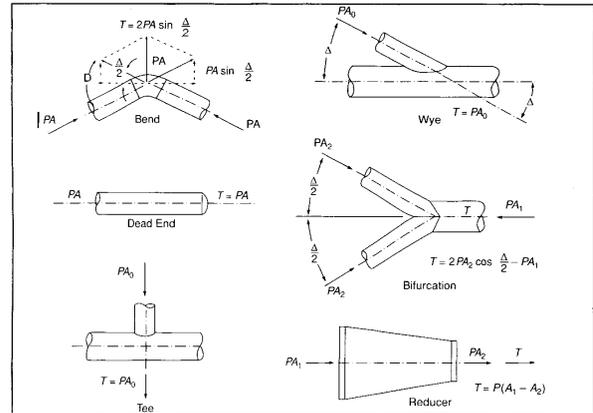


Figure 7-1 Thrust force definitions

7.2 추력 저항

매설 파이프의 경우 불균형 수평 추력은 두 가지 고유 저항을 수반하는데, 첫째는 파이프의 고정하중, 토질 커버, 그리고 파이프 내 유체에 의한 마찰력이며 둘째는 추력 방향의 파이프 또는 이음부에 대한 토질의 수동 저항이다. 만일 이 저항력이 추력을 상쇄시키기에 충분하지 않다면 추력 블록을 사용해서 이음부의 버팀면에 지지 면적을 증가시키는 방법, 주변의 파이프를 이음부에 묶어서 파이프라인의 마찰력을 증가시키는 방법, 또는 이음부를 리미트에 고정시키거나 움직임을 방지하는 방법 등으로 저항력을 보충해야 한다. 수직 편향에서의 불균형 수직인장 추력은 이음부의 고정하중, 토질 커버, 그리고 내부의 유체에 의한 저항을 받는다. 만일 이 저항력이 추력을 상쇄시키기에 충분하지 않다면 중력형 추력 블록을 사용해 고정하중을 증가시키는 방법, 주변의 파이프를 이음부에 묶어서 파이프라인의 고정하중을 증가시키는 방법, 또는 이음부를 리미트에 고정시키거나 움직임을 방지하는 방법 등으로 저항력을 보충해야 한다.

7.3 추력 블록

콘크리트 추력 블록은 이음부의 버팀면 및 고정하중을 증가시킴으로써 이음부의 움직임에 대한 저

항성을 향상시킨다. 수평 엘보우에 대한 일반적인 추력 블록이 그림 7-2에 나와 있다.

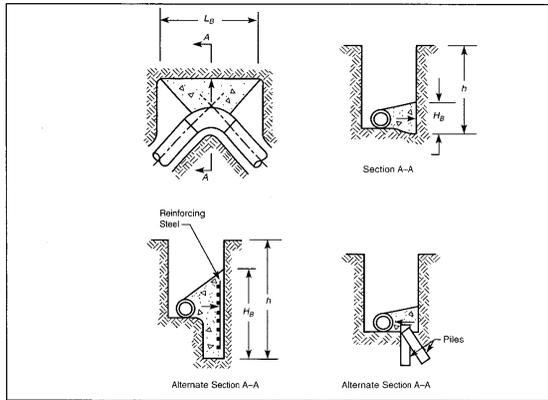


Figure 7-2 Typical thrust blocking of a horizontal bend

크기 계산: 추력 블록의 고정하중을 무시하면 블록 크기는 토질의 버팀 용량에 기초해서 계산할 수 있다:

$$\text{면적} = L_B \times H_B = (T \times FS) / \sigma \quad (\text{식 7-2})$$

여기서,

$L_B \times H_B$ = 추력 블록의 버팀 표면 면적, ft²

T = 추력, lb

σ = 토질의 버팀값, lb/ft²

FS = 설계 인자, 1.5

다양한 종류의 토질에 대한 안전한 수평 버팀 강도값이 표 7-1에 나와 있다.

Table 7-1 Horizontal soil-bearing strengths

Soil	Bearing Strength σ (lb/ft ²)*	σ (kN/m ²)
Muck	0	
Soft clay	1,000	4882.4
Silt	1,500	7323.6
Sandy silt	3,000	14647.3
Sand	4,000	19529.7
Sandy clay	6,000	29294.6
Hard clay	9,000	43941.9

*Although the bearing strength values have been used successfully in the design of thrust blocks and are considered to be conservative, their accuracy is dependent on accurate soil identification and evaluation. The design engineer must select the proper bearing strength of a particular soil type.

블록을 설계할 때 추력이 토질 버팀 면적의 기하학적 중심을 통과하도록 설계하는 일이 불가능할 경우에는 안정성면에서 해당 설계를 평가하는 작업이 수반되어야 한다. 필요할 경우 강화 조건을 포함해 토질의 버팀 용량을 바탕으로 콘크리트 블록의 크기를 계산한 후에는 추력 블록의 뒤에 위치하는 수동 토질 웨지의 전단 저항을 확인해야 하는데 이것이 설계 전반에 큰 영향을 미칠 수도 있기 때문이다. 지표면으로부터 블록의 아랫면까지의 거리 h 의 1/2보다 작은 높이 H_B 의 추력 블록의 경우, 블록의 설계는 일반적으로 토질의 버팀 용량에 의해서 좌우된다. 그러나 H_B 가 $h/2$ 보다 클 경우 블록의 설계는 일반적으로 추력 블록의 뒤에 위치하는 토질 웨지의 전단 저항에 의해서 좌우된다. 토질의 버팀값 및 전단 저항값 그리고 추력 블록 강화를 결정하는 일은 본 설명서의 범위를 벗어나므로, 지질 공학 전문가의 컨설팅을 구할 것을 권장한다.

일반 구성: 버팀값을 결정하는 일은 추력 블록의 크기를 결정하는데 핵심적인 부분이다. 이 값은 아주 부드러운 토질의 경우 1,000 lb/ft² (48 kN/m²)보다 작은 값으로부터 아주 단단한 바위의 경우 평방미터당 수톤(kN/m²)에 이르기까지 다양하다.

추력 블록의 크기를 결정하는 데는 해당 토질 조건에 대한 이해가 반드시 필요하다. 그림 7-2는 수평 굽힘 위치에 추력을 분포시키는 구체적인 방법들을 보여주고 있다. 단면 A-A가 가장 흔한 적용 사례이지만 약한 토질의 경우 다른 단면의 방법들이 필요할 수 있다. 그림 7-3은 수직 굽힘에 대한 전형적인 추력 블록을 보여주고 있다. 아래쪽 굽힘에 대한 블록 설계는 수평 굽힘의 경우와 동일하나 위쪽 굽힘에 대한 블록은 블록의 고정하중, 벤드, 벤드내 물 및 과부하를 이용해 추력의 수직 성분을 적절히 상쇄시킬 수 있는 크기로 제작되어야 한다.

올바른 시공: 추력 블록 실패의 가장 큰 원인은 올바르지 않는 시공에 있다. 시공이 제대로 되지 않는다면 올바른 크기의 블록도 실패로 이어질 수밖에 없다. 블록은 반드시 안정된 토질에 설치되어야 하고 블록의 정면은 추력 방향에 수직이고 추력의 정중앙에 위치해야 한다. 수많은 추력 블록이 실패로 끝나는 이유는 잘못된 설계와 시공에 그 원인이 있다. 시공 및 설계 인력 중 대부분이 추력의 크기에 대해 제대로 이해하고 있지 못하다. 예를 들어, 100 psi(689kPa)에서 사용하는 36인치(900mm)의 90도 각도 굽힘 파이프 뒤에 설치된 추력 블록은 150,000 lb(667 kN) 이상의 추력을 견딜 수 있어야 한다. 쉽게 간과되고 있는 또 하나의 사실은 추력이 파이프 직경의 제곱에 비례해서 증가한다는 사실이다. 동일한 내압에서 사용할 경우 직경 36인치(900mm)의 파이프는 직경 18인치(450mm)의 파이프가 발생시키는 추력의 약 네 배에 해당하는 하중을 발생시킨다.

근접 굴착: 추력 블록이 제대로 설계 및 시공되었다고 하더라도 블록을 지지하는 토질이 불안정한 상태가 되면 실패할 수밖에 없다. 파이프에 압력이 가해질 때 추력 블록을 지지하는 뒤쪽의 토질이 근처에서 이루어진 굴착 등 다른 요인으로 무너져 버린다면 블록을 설치한 의미가 없게 된다. 가까운 시기에 추력 블록 근처에 굴착 가능성이 크다면 조인트를 묶는 방법을 사용하는 것도 좋은 방법이다.

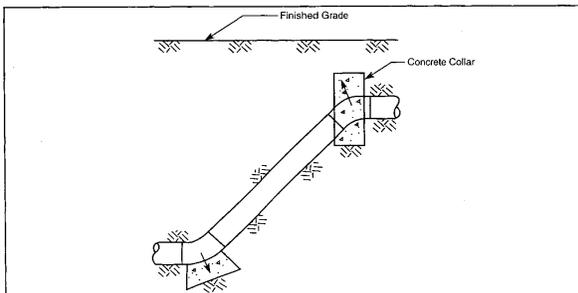


Figure 7-3 Typical profile of vertical bend thrust blocking

7.4 작은 편향을 가진 조인트

각도 편향을 가지고 설치된 파이프 조인트에서의 추력은 일반적으로 매우 작아서 추가적인 억제물은 필요하지 않다.

작은 수평 편향: 수평 편향 조인트에서의 추력 T 는 그림 7-4에서 보는 바와 같이 파이프의 윗면과 아랫면의 마찰에 의해 저항을 받는다. 다음 조건을 만족할 경우 추가 억제물은 필요하지 않다:

$$T \leq fL_p(W_p + W_w + 2W_e) \quad (\text{식 7-3})$$

여기서,

$T = 2PA \sin(\Delta/2) =$ 최종 추력, 편향된 조인트에 의해 생성된 편향각

$f =$ 마찰 계수

$L_p =$ 파이프 길이, ft

$W_p =$ 파이프 중량, lb/lin ft

$W_w =$ 파이프내 유체 중량, lb/lin ft

$W_e =$ 토질 커버 부하, lb/lin ft

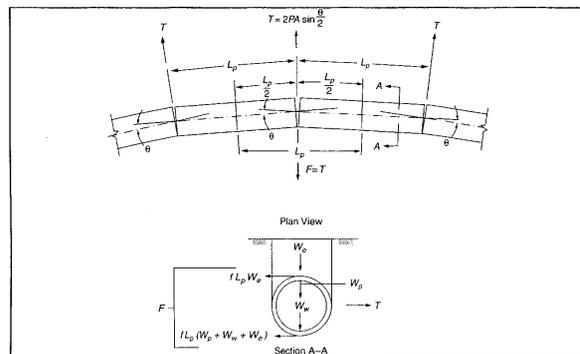


Figure 7-4 Restraint of thrust at deflected joints on long-radius horizontal curves

이전 분석에서는 파이프에 대한 트렌치 뒷채움의 수동 토질 저항이 무시되었으나, 설치 및 현장 조건에 따라서 추력 저항값을 계산하는데 뒷채움의 수동 토질 저항을 포함시킬 수 있다. 마찰 계수 f

의 값은 토질의 종류와 파이프 외부의 거칠기에 따라 결정된다. 마찰 계수의 설계치는 대개 0.25에서 0.5사이의 값을 갖는다. 토질 커버 부하의 결정은 파이프라인에 압력이 가해졌을 때 기대되는 뒷채움 밀도와 커버 높이에 기초해야 한다. 토질 밀도의 값은 압밀 정도에 따라 90 lb/ft³에서 130 lb/ft³ 사이(14 kN/m³에서 20 kN/m³ 사이)의 값을 가진다. W_e 값은 다음과 같이 유연한 파이프에 가해진 부하에 대한 Marston 방정식을 사용해 안전하게 결정할 수 있다:

$$W_e = (C_d)(W)(B_d)(B_c) \quad (\text{식 7-4})$$

여기서,

W_e = 토질 부하, lb/lin ft

C_d = 뒷채움 토질의 종류 및 H 비에 기초한 계수(파이프의 경우 상단까지의 뒷채움 깊이, ft) B_d (그림 7-5 참조)

W = 토질의 단위 중량, lb/ft³

B_d = 파이프 상단의 ditch 폭, ft

B_c = 파이프 외경, ft

자유 회전이 가능한 조인트의 작은 수직 편향:
긴반경의 수직 커브상의 편향된 조인트에서의 수직 인장 추력은 그림 7-6에서 보는 바와 같이 복합 고정하중 W_t 에 의한 저항을 받는다. 다음 조건을 만족할 경우에는 별도의 억제물이 필요하지 않다:

$$T \leq (W_p + W_w + W_e) \cos(\varphi - \theta_2) \quad (\text{식 7-5})$$

여기서,

$$T = 2PA \sin(\theta/2)$$

L_p = 표준 또는 사면(beveled) 파이프의 길이, ft

W_p = 파이프 중량, lb/lin ft

W_w = 파이프내 물의 중량, lb/lin ft

W_e = 토질 커버 부하, lb/lin ft

φ = 기울기각, 각도

θ = 조인트의 각도 편향에 의한 편향각

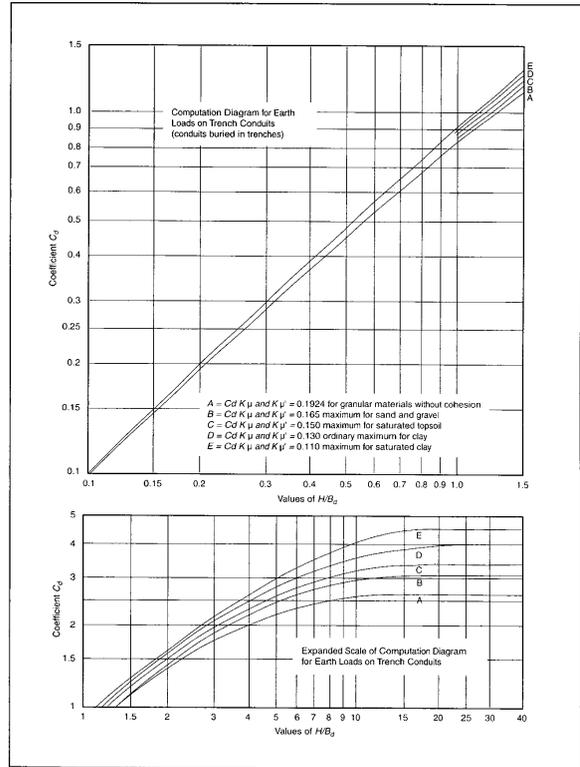


Figure 7-5 Computation diagram for earth loads on trench conduits

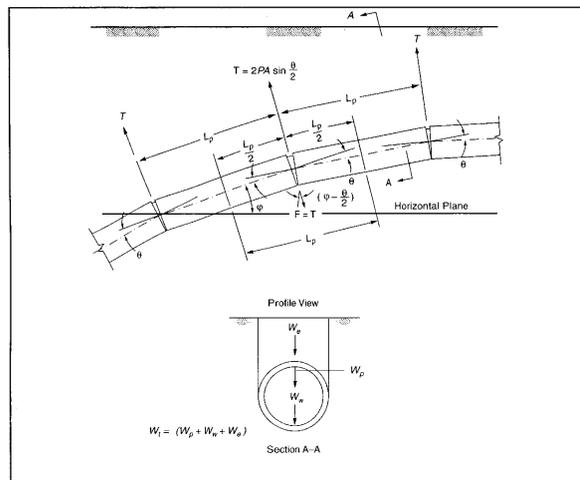


Figure 7-6 Restraint of uplift thrust at deflected joints on long-radius vertical curves

7.5 억제 조인트

이음부 또는 편향된 조인트의 불균형 추력은 편향된 조인트 전반에 걸친 억제 조인트 또는 부근의 파이프를 이음부에 묶는 방식으로 상쇄시킬 수 있다. 이 방법은 이음부의 각 측면에 여러 개의 파이프를 동여땀으로써 이음부 추력에 저항할 수 있는 연결 파이프의 마찰력을 증가시킨다. 추력은 이음부에서 최대값을 나타내고 이음부로부터 거리 L 만큼 떨어진 위치에서는 사라지기 때문에 이음부에 가장 근접한 위치부터 거리 L만큼 떨어진 위치까지 거리별로 필요한 추력 저항값을 계산할 수 있다. 묶여있는 파이프상의 마찰 저항은 최종 추력 T와는 반대방향으로 작용한다. 그림 7-4의 단면 A-A는 수평 추력이 존재하는 매설 파이프에 작용하는 외부 수직력과 해당 마찰 저항에 대한 도식을 보여주고 있다. 그림 7-3에 나와 있는 위쪽 벤드의 경우 중력형 추력 블록을 사용해서 구현한 수직인장 추력 억제 기능을 주변 파이프를 묶어서 파이프라인의 고정하중을 증가시키는 방법으로도 구현할 수 있을 것이다. 그림 7-6의 단면 A-A는 고정하중에 의한 추력 저항을 결정하는 데 사용된 매설 수직(수직인장) 벤드에 작용하는 수직력에 대한 도식을 보여준다. 앞서서도 언급했듯이, 파이프에 대한 트렌치 뒷채움의 수동 토질 저항이 무시되었으나, 설치 및 현장 조건에 따라서 추력 저항값을 계산하는데 뒷채움의 수동 토질 저항을 포함시킬 수 있다.

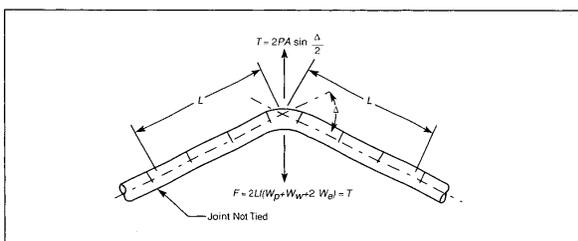


Figure 7-7 Thrust restraint with tied joints at bends

수평 벤드 및 벌크헤드: 그림 7-7에 나와 있듯이 수평 벤드의 각 레그를 따라서 필요한 마찰 저항 F는 $PA \sin(\Delta/2)$ 이다. 토질에 대해 파이프 ft당 필요한 마찰 저항은 다음과 같다:

Frictional resistance/ft of pipe=

$$f(2W_e + W_p + W_w) \tag{식 7-6}$$

여기서,

f= 파이프와 토질간 마찰 계수

W_e = 과부하, lb/lin ft

W_p = 파이프 중량, lb/lin ft

W_w = 파이프내 물의 중량, lb/lin ft

F= 마찰 저항

따라서 벤드의 각 레그에 묶어주어야 할 파이프의 길이 L은 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$L = \frac{PA \sin(\Delta/2)}{f(2W_e + W_p + W_w)} \tag{식 7-7}$$

여기서,

L = 각 벤드 레그에 묶어주어야 할 파이프의 길이, ft

P = 내압, psi

A = 단면적, in.²

Δ = 벤드의 편향각, 각도

f = 파이프와 토질간 마찰 계수

W_e = 과부하, lb/lin ft

W_p = 파이프 중량, lb/lin ft

W_w = 파이프내 물의 중량, lb/lin ft

벌크헤드 또는 티 레그에 묶어주어야 할 파이프의 길이는 다음과 같다:

$$L = \frac{PA}{f(2W_e + W_p + W_w)} \quad (\text{식 7-8})$$

여기서,

L = 벌크헤드 또는 티 레그에 묶어주어야 할 파이프의 길이 (다른 변수들은 앞에서 정의한 대로 사용)

수직 벤드: 그림 7-8에 나와 있듯이 수직 벤드의 각 레그를 따라 필요한 고정하중 저항은 $2PA \sin(\Delta/2)$ 이다. 추력과 반대방향으로 작용하는 파이프 ft당 고정하중 저항은 다음과 같다:

Dead weight resistance/ft of pipe=

$$(W_e + W_p + W_w) \text{COS}(\varphi - \Delta/2) \quad (\text{식 7-9})$$

여기서,

W_e = 과부하, lb/lin ft

W_p = 파이프 중량, lb/lin ft

W_w = 파이프내 물의 중량, lb/lin ft

φ = 기울기각, 각도

Δ = 벤드의 편향각(그림 7-8참조)

수직(수직인장) 벤드의 각 레그에 묶어주어야 할 파이프의 길이 L 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L = \frac{PA[\sin(\Delta/2)]}{(W_e + W_p + W_w) \text{COA}[\varphi - (\Delta/2)]} \quad (\text{식 7-10})$$

(다른 변수들은 앞에서 정의한 대로 사용):

$$L1 = \frac{PA \sin \Delta/2}{(W_w + W_p + W_w) \text{COS}(\varphi_1 - \Delta/2)} \quad (\text{식 7-11})$$

$$L2 = \frac{PA \sin \Delta/2}{(W_e + E_p + W_w) \text{COS}(\varphi - \Delta/2)} \quad (\text{식 7-12})$$

수직 아랫방향 벤드는 파이프 아랫면에 대한 트랜치의 버팀 능력에 의해서 지지된다. 파이프에 대해 적절한 베딩 작업이 이루어졌다면 이 조건은 별도로 고려할 필요가 없다.

파이프를 따라 전달되는 추력: 이음부에 묶어주어야 할 파이프의 길이를 계산하는 일 외에도, 설계자는 묶여진 파이프가 추력을 전달(방출)할 수 있을 만큼 충분한 길이를 가지고 있는지 반드시 확인해야 한다. 벤드에 인접한 파이프는 다음의 최대 추력을 견딜 수 있도록 설계되어야 한다:

$$F_y = \left(\frac{5.43\Delta + 0.063\Delta}{1,000} \right) PA \text{ for } 0 < \Delta \leq 90^\circ \quad (\text{식 7-13})$$

$$F_y = PA \quad \text{for } \Delta > 90^\circ \quad (\text{식 7-14})$$

여기서,

F_y = 벤드에 인접한 파이프가 견뎌야 하는 최대 축방향 추력

F = 내압, psi

A = 단면적, in.²

Δ = 벤드의 편향각, 각도

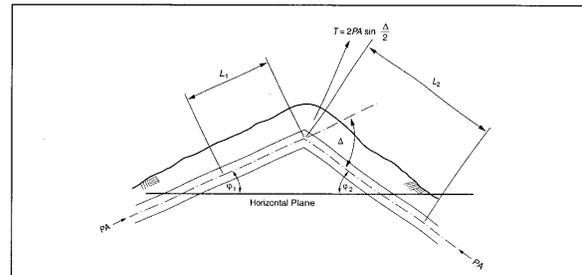


Figure 7-8 Length of tied pipe on each leg of vertical (uplift) bend