

원주방향응력이 매설배관의 축직각 외부균열에 미치는 영향

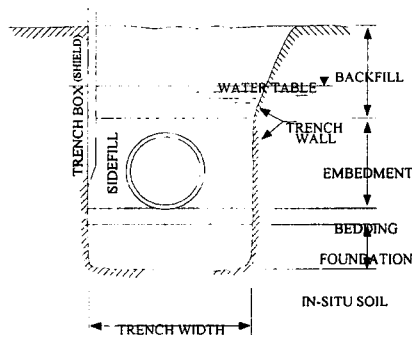
이역섭 · 황인현

인하대 기계 · 항공 · 자동화공학부

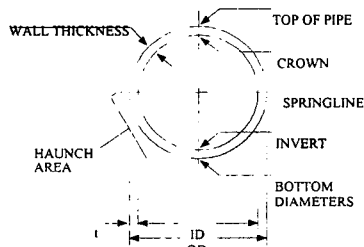
1. 서론

배관을 지하에 매설할 경우 매설배관이 묻히는 깊은 도랑을 트랜치라 하는데 이 트랜치의 폭과 깊이의 치수를 적절하게 결정하는 것은 매설배관의 건전성을 유지하는데 중요한 인자중의 하나이다.

Watkins는 매설배관의 트랜치 폭에 대한 연구를 수행하여 최근 그 결과를 발표한바 있다⁽¹⁾. Fig. 1에 트랜치와 배관의 단면도를 그리고 일반적으로 사용하는 기술적인 용어를 나타내었다.



(a) Terminology for trench cross section



(b) Terminology for pipe cross section (ring)

Fig. 1 Typical cross sections of a trench and a buried pipe

본 논문에서는 매설배관에 작용하는 원주방향응력이 매설배관의 외부균열에 미치는 영향들을 규명하고 여러 가지 설계 파라메타들이 매설배관에 존재하는 결함의 건전성에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다.

2. 매설배관의 응력해석

1) 토질압력이 매설배관에 발생시키는 응력

유연성을 갖고있는 매설배관이 균일한 토질 외압, P ,를 받으면서 평형상태에 있는 경우를 Fig. 2(a)에 나타내었으며 이것과 등가한 응력상태를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 여기서 배관과 토질사이에서 발생하는 전단응력의 영향은 무시하였다.

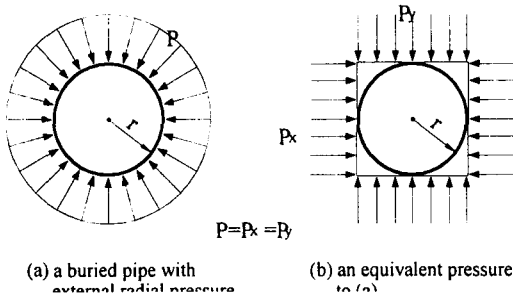


Fig. 2 External load on a buried pipe

만약 매설배관에 변형이 일어나서 Fig. 3과 같은 타원형으로 되었을 경우의 평형조건은 다음과 같다.

$$P_x r_x = P_y r_y \quad \dots \dots \dots (1)$$

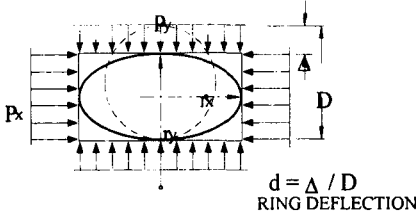


Fig. 3 Pressure on deflected ring

변형된 매설배관의 형상(타원)과 링-강성을 고려하면

$$P_x r_x < P_y r_y \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

이때 P_y 에 대한 매설배관의 최대응력은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_c = Pm(1+d) + \frac{E}{2m} \frac{3(d-d_0)}{(1-2d-2d_0)} \quad (3)$$

여기서,

P : 수직외압

$m = r/t$: 배관의 유연성

r : 배관의 반경

t : 배관의 두께

d_0 : 초기 링-처짐량

d : P 작용 후 링-처짐량

E : 탄성계수

이 응력은 배관의 내압에 의한 원환응력과 중첩하여 작용하게 되며 전체 원환응력의 합은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_T = \sigma_H + \sigma_c \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

여기서,

$$\sigma_H = \frac{P_i r}{t}$$

P_i : 매설배관 내의 유체압력

식(4)의 응력은 매설배관에 존재하는 축직각방향의 균열면에 나란한 성분이며, 결국 균열은 2축 방향의 응력상태에 놓이게 된다. 따라서 축직각방향의 균열의 거동을 규명할 때는 2축 응력을 받는 하중조건을 반드시 고려해야 하며, 축과 경사각을 가질 경우에는 혼합모드하중조건에 대한 연구가 수행되어야 한다.

2) 트랜치 폭의 영향

매설배관의 모양이 원형에 가까우면 일반적으로 트랜치 폭은 배관직경의 2배를 넘지 않게 한다. 또한 링-처짐량이 5% 미만일 경우에는 링-처짐량의 영향은 무시한다. 이러한 경계조건하에서 매설배관 벽에 발생하는 압축응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{cl} = \frac{Pr}{t} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (5)$$

여기서,

σ : 배관벽내의 압축응력

P : 배관의 수직압축 ($= P_l + P_d$)

P_l : 생하중(surface live load)

P_d : 사하중(dead load pressure) ($\approx \gamma H$)

t : 배관의 두께

r : 배관의 반경

매설배관의 압축강도와 식(5)의 σ_{ct} 와 비교하여 순수매설 배관의 구겨짐 가능성에 대한 검토를 엄밀히 수행하여야 한다. 또한 매설배관의부에 존재하는 축직각 방향 균열 거동에 미치는 영향도 규명해야 한다.

식(5)의 σ_{ct} 는 배관의 내압에 의한 원환응력과 중첩하여 작용하게 되며 전체 원환응력의 합은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{Ti} = \sigma_H + \sigma_{ct} \quad \dots \dots \dots (6)$$

만약 트랜치 벽의 토질이 양질이 아니고 타수(blow-count)가 4보다 작은 경우에는 유연성 파이프에 대한 트랜치 폭을 결정할 경우, 다음과 같은 과정을 생각해야 한다. ① 측면채움(sidefill)의 마찰각을 결정 ② 토질 전단평면의 각도 결정 ③ 트랜치 폭 방향 하중(P_x)의 이전 경사 결정 ④ 트랜치 벽의 압력결정.

일반적으로 양질의 토질이 아닐 경우의 트랜치 측면 폭은 배관 가장자리에서 $D/2$ 정도로 취한다. 이 폭은 토질의 성질에 따라 다소 감소될 수 있다. 트랜치 폭의 적절한 크기는 유한요소법과 같은 테크닉을 사용하는 것이 좋다. 트랜치 내의 배관이 받는 하중상태를 모델화한 예를 Fig. 4에 나타내었다⁽¹⁾.

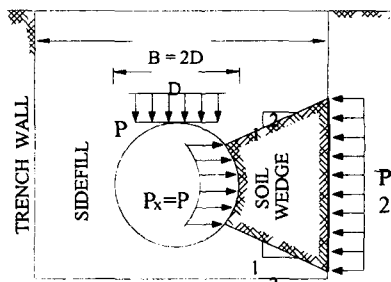


Fig. 4 Approximate punch-through soil wedge showing how pressure P is transferred to the trench wall where it is distributed and reduced by roughly half in a trench of width $2D$.

트랜치 폭은 될 수 있는 데로 작게 취하여 배관의 하중을 감소시키는 것이 매설배관의 수명을 증가시키는 요인이 될 수 있다.

트랜치를 굴착한 토질이 충분한 강도를 가지고 있지 않을 경우에는 트랜치 벽이 수평방향의 하중을 지탱할 수 없게 된다. 그래서 트랜치의 폭을 넓게 해야 한다.

3. 축직각 방향 균열거동에 대한 영향

1) 자동차 바퀴 하중

Fig. 5는 최소 토질덮힘 두께를 갖는 매설배관위로 자동차가 지나갈 때 자동차 바퀴 하중을 모델화하여 나타낸 것이다.

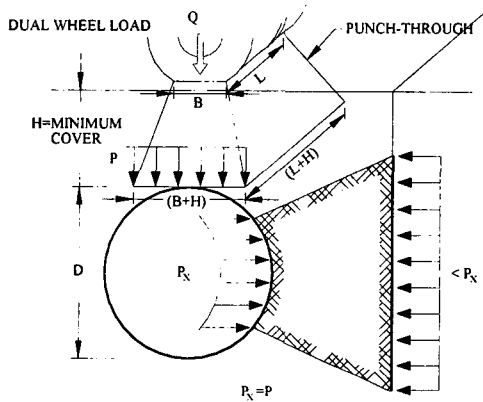


Fig. 5 Dual-Wheel load passing over a pipe buried under minimum soil cover showing a sidewall wedge at incipient soil slip.

이 경우 배관의 수직 압축 하중은

$$P = P_d + P_l \quad \dots \dots \dots (7)$$

여기서 $P_d = \gamma H$, P_l 은 생하중 이며 P_l 은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$P_l = \frac{Q}{(B+H)(L+H)} \quad \dots \dots \dots (8)$$

여기서,

Q : 타이어 자국 면적($L \times B$) 위의 하중

매설배관이 묻혀있는 트랜치 폭이 좁고, 링-처짐량을 무시할 수 있는 경우에는 식(6)을 사용하여 축직각 균열거동을 규명할 수 있다. 즉, 다음과 같은 응력이 축직각 균열의 균열방향과 수직으로 작용하게 된다.

$$\sigma_{T1} = \frac{P_i r}{t} + \frac{(P_d + P_l) \cdot r}{t}$$

$$= (P_i + \gamma H + P_l) \cdot \frac{r}{t} \quad \dots \dots \dots (9)$$

여기서,

P_i : 매설배관내의 유체압력

Fig. 6에 매설배관내에 존재하는 축직각 외부균열의 개략도를 나타내었다.

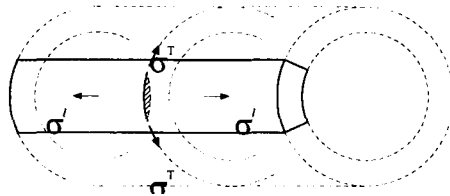


Fig. 6 An external circumferential crack under biaxial stresses

여기서 매설배관의 직경의 영향은 무시하고 Fig. 6의 표면균열을 2차원 균열로 단순화 시키면 아래 Fig. 7과 같이 된다.

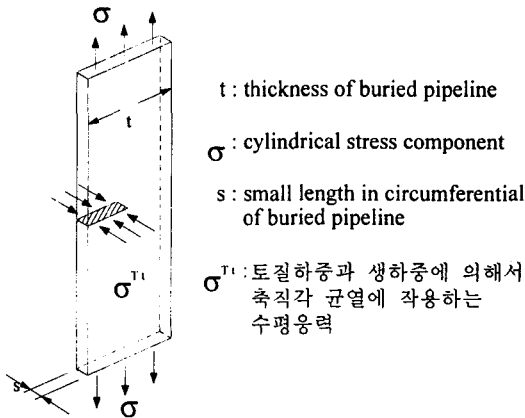


Fig. 7 A simple model for the crack in Fig. 6

이제 여기서 응력성분 σ_{T1} 가 균열의 거동에 미치는 영향을 규명해 보자. 지금까지 파괴역학에서는 균열에 수직인 응력과 균열에 수평인 응력에 대한 영향을 주로 연구해

왔다. 그러나 지금 여기에서와 같이 σ_{T1} 가 균열의거동에 미치는 영향에 대한 연구는 찾아 볼 수 없다. 여기에서는 σ_{T1} 가 균열선단주의의 응력에 미치는 영향을 규명하기 위하여 단순한 모델을 제시하고자 한다.

σ_{T1} 에 대한 x 및 y 방향으로 발생하는 변형률은 인장이며 그 크기는 $\frac{\nu\sigma_{T1}}{E}$ 와 같다. 따라서 x 및 y 방향으로 유기되는 응력의 크기는 $\sigma_x = \nu\sigma_{T1} = \sigma_y$ 로 된다. 여기서 σ_y 는 σ 에 비하여 작다고 가정하여 생략하고, $\sigma_x = \nu\sigma_{T1}$ 는 균열방향으로 작용하게 되어, 결국 균열의 거동에 영향을 미치는 응력상태는 Fig. 8과 같이 된다.

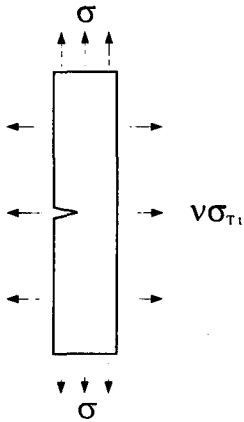


Fig. 8 An ideal model for the crack in Fig. 7

결국 균열은 2차원 응력상태로 되어, 전과 방향이 일정하지 않게 될 가능성이 높다.

4. 결론

매설배관의 외부에 존재하는 결함에 원주방향응력성분에 미치는 영향을 이론적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 토질압력과 트랜치의 폭이 매설배관에 발생시키는 최대응력에 영향을 미치는 경향을 밝혔다.
- 2) 자동차 바퀴하중 등 경계조건의 영향이 매설배관의 외부결함 거동에 미치는 영향을 규명하는 단순모델을 제시하였다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터(SAFE)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) R. K. Watkins, "Trench Width for Buried Pipes", 2nd Int. Conf., Advanced in underground pipeline Engineering, Bellevue, Washington, 1995.