

국부 변형을 고려한 다중관 설계 기법

Local Deformation Based Design Concept for Multi-layered Pipeline

원 중 화* · 김 문 겸** · 김 규 원***

Won, Jong Hwa · Kim, Moon Kyum · Kim, Kyu Won

요 약

본 논문에서는 배관의 국부변형을 고려하여 각 배관의 특성으로 인하여 발생하게 되는 최대 응력 발생 지점에 대한 평가 및 설계기법을 제안한다. 다중관은 일반적으로 배관의 매설 조건이 불안정한 곳이나 배관의 내부 유체의 유출 모니터링 및 난방관 등의 보온을 목적으로 사용되나, 다중관의 거동에 대한 거동 및 설계에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서 제안한 기법은 탄성범위에서 거동하는 연성관을 대상으로 하며 외관의 형상 및 외부 하중에 의하여 예상되는 국부 변형을 설계 인자로 고려하는 방법이다. 일반적인 원형관의 경우 관의 하단부에서 가장 큰 국부 변형 반경을 나타내며, 국내외에서 사용하고 있는 정사각 콘크리트 보호공의 경우 관의 상측, 하측부($45+90n^\circ$)에서 가장 큰 반경을 관찰할 수 있다. 이는 내압이 작용하는 구조물에 대하여 낮은 압력에도 항복에 이르는 환경을 제공하기 때문에 설계 시 반영되어야 할 중요한 요소이다.

keywords : 다중관, 국부 변형, 국부 반경, flat spot analysis

1. 서 론

다중관은 일반적으로 하자 및 해저, 그리고 진동하중 등에 노출되어 있는 불건전한 매설 조건을 보이는 곳에 설치된다. 불건전한 매설 조건은 예측 불가능한 하중 조건을 포함하여 배관 자체의 내부 유체가 누설되었을 때 사회적인 손실이 크게 우려되는 부분까지 포함한다. 따라서 주로 홍수 등으로 하자 변동이 심한 하천 통과 배관 및 해저, 그리고 철도 등의 하부에 매설되는 배관 및 에너지 수송용 파이프라인 및 난방관 등에 사용된다. 그러나 이러한 다중관에 대한 설계는 다분히 정성적으로 이루어지고 있으며 외부에 설치된 관이 내부 배관에 미치는 영향에 대한 연구도 미비한 실정이다. 본 연구에서는 flat spot analysis를 이용하여 이러한 다중 배관 설계에 대하여 정량적으로 접근하는 기법을 제안한다.

2. 비정형 매설 배관

지중에 매설되는 구조물은 설치 후 하중의 분산 및 지지, 그리고 유지 보수 등을 고려할 때 파이프와 같이 원형을 띠는 구조가 가장 이상적이다. 또한 주로 배관의 목적으로 사용되는 유체의 수송을 위하여 폐쇄된

* 학생회원 · 연세대학교 토목환경공학과 응용역학연구실 박사과정 examewe@yonsei.ac.kr

** 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 applymkk@yonsei.ac.kr

*** 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 kyu_won@yonsei.ac.kr

구조를 설계함에 있어 유속 및 내부 압력 등을 고려할 때 역시 구조적 취약점이 가장 적은 형상이다. 그러나 배관의 목적에 따라 그림 1과 같이 하수도의 유속을 설계하기 위한 비정형 배관이 설치되는 경우도 있다. 일반적으로 지중에 설치될 때 배관은 그림 2와 같이 거의 타원에 가까운 형태의 비정형으로 변형이 된 상태로 매설된다. 따라서 내압과 관의 두께, 직경만을 고려하는 압력관의 설계 가정에 적합하지 않게 된다. 그러나 가스 및 수도관과 같이 고압을 유지하는 압력관은 내압이 작용할 때 상대적으로 강성이 작은 지반의 변형을 발생시키며 원형으로 복구하는 경향이 있으며, 이러한 특성을 고려하여 내부 압력을 re-rounding pressure라고 일컫기도 한다.

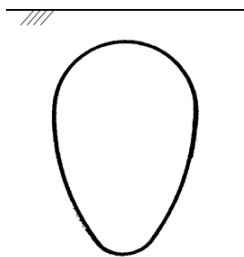


그림 1 비정형 매설 배관 (하수도용)

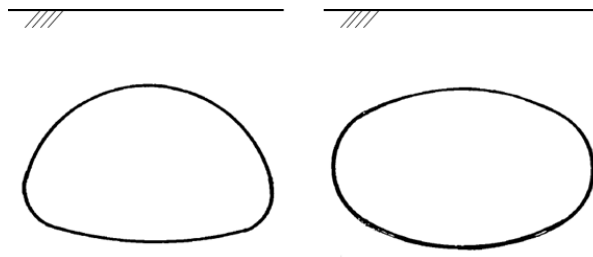


그림 2 토압에 의한 지중 배관의 변형

그러나 강관 외부에 콘크리트 등과 같이 강성이 큰 재료로 케이싱이 이루어질 경우에는 외부의 보호공의 형상에 따라 강관의 변형 양상이 결정된다. 따라서 강성이 큰 보호공을 갖는 다중관을 설치할 경우 공장에서 기 제작된 원형의 다중관을 사용하는 것이 가장 이상적이나, 부득이하게 현장 타설을 통한 사각형 등의 보호공을 설치 할 경우에는 비정형 관에 대한 검토가 수반되어야 한다.

3. 국부 변형 반경

3.1. Flat Spot Analysis

배관의 과도한 변형 및 곡률 역전현상 등에 대한 검토를 위해 도입된 기법으로 외부의 하중 및 조건 등으로 편평한(flat, out of round) 구간이 발생하는 지점을 검토하는데 사용된다. 기본적인 개념은 배관은 외부 조건에 따라 변형이 발생하게 되며, 변형은 하중 재하방향으로 발생하기 때문에 비정형인 배관 변형 양상에 따라 상대적으로 큰 반경을 갖게 되며, 이러한 지점에서 파괴가 발생할 가능성이 크다는 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 초기상태에는 그림 3과 같이 배관의 모든 지점이 동일한 반경 r 을 갖게 되는데 변형 후에는 각 지점에 따라 차등한 국부 변형 반경 r' 을 보이게 된다. 수치해석에서 이와 같은 반경을 도출하기 위해서는 2차원 해석에서 탄성론에 기초한 해석식을 이용하는 방법과 절점의 상대위치에 대한 기하 조건을 이용하여 반경을 구하는 방법이 있으나, 해석을 바탕으로 도출된 응력 및 변형률 값을 바탕으로 국부 변형 반경 r' 을 구하는 것이 보다 효율적이고 정확한 방법이라 할 수 있다.

3.2. 다중관 해석

다중관에서 주요 검토 대상은 내부에 있는 목적 수송물을 포함하는 배관이며, 내부 배관을 비정형으로 변형시키는 요소는 외부 하중이 외관(보호공)을 통하여 내관으로 전달되는 접촉면 압력이다. 그림 4와 같은 다중관에서의 접촉면 압력은 하중의 형태와 외관의 형상에 의해 도출되며, 접촉면 압력은 내/외관의 기하조건

및 강성을 고려하여 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_c = \frac{C_0 P_i + 2C_1 P_o}{C_0 + C_1 C_2} \quad (1)$$

$$C_0 = (1 + \nu_i) b^2 / (E_i t)$$

$$C_1 = b c^2 / \{E_o (c^2 - b^2)\}$$

$$C_2 = (b/c)^2 (1 - \nu_o) + (1 + \nu_o)$$

여기서 P_c 는 접촉면 압력, C_i 는 강성 상수, b 는 외관의 내부 반경, c 는 외관의 반경, t 는 내관의 두께이며, $\nu_{i/o}$ 은 내외관의 포아송 비, $E_{i/o}$ 은 내외관의 탄성계수이다.

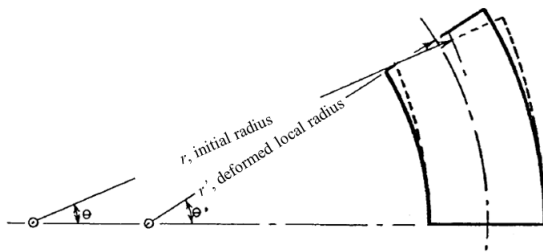


그림 3 국부 변형 반경

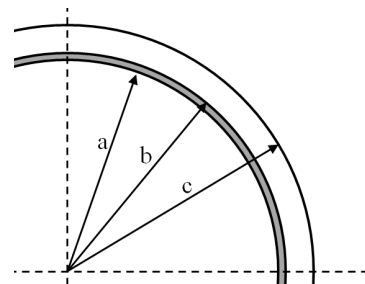


그림 4 원형 다중관

4. 비정형 다중관 성능 검토

앞서 기술된 기법들을 이용하여 도출된 국부 변형 반경을 사용하여 비정형 다중관의 성능을 검토하도록 한다. 도출된 단면의 국부 변형 반경 중 가장 큰 반경을 보이는 지점이 설계 고려 지점이며, 해당 지점의 반경과 설계 혹은 사용압력을 고려하여 안정성을 검토하도록 한다.

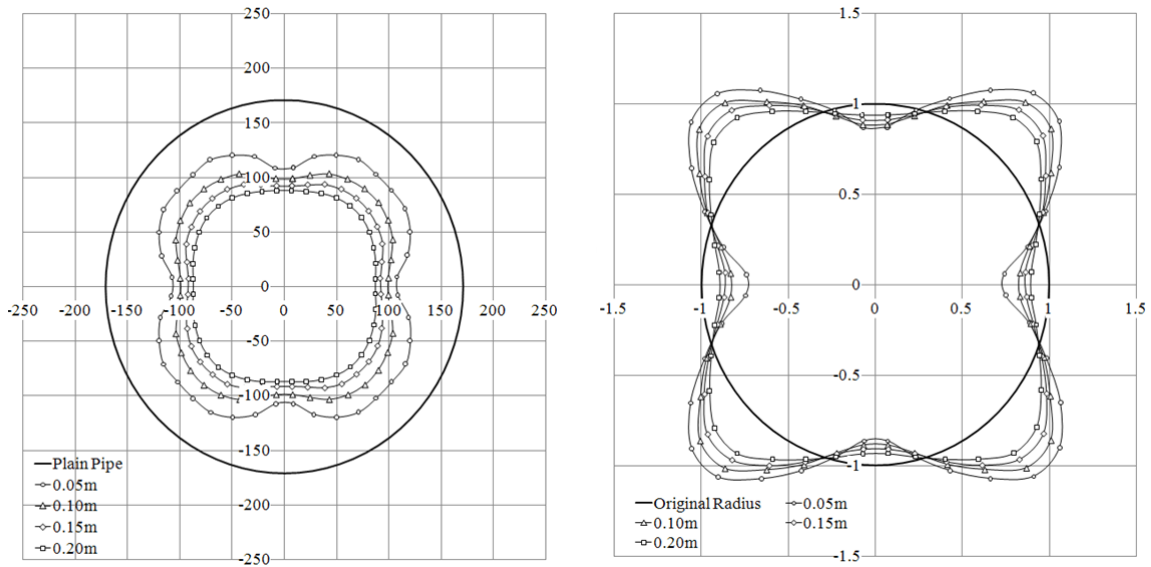
4.1. 사각 콘크리트 케이싱 강관

국내외에서 사용되고 있는 현장 타설 사각콘크리트 케이싱 강관에 대하여 검토하였다. 다음 표 1에 물성 및 기하조건을 요약하였다.

표 1 콘크리트 및 강관의 물성값 및 기하조건

구분	E (kgf/cm^2)	γ (kgf/cm^3)	ν	비고
배관	2.11×10^6	7.86×10^{-3}	0.3	D=0.762m, t=0.0175m
콘크리트	2.01×10^5	2.50×10^{-3}	0.2	1.062m×1.062m

다음 그림 5에 대상 구조물의 내관에 발생하는 원주방향응력(그림 5.a)과 발생된 응력을 바탕으로 도출된 상대 국부 변형 반경(그림 5.b)을 나타내었다. 내관 형상과 상이한 형태의 케이싱에 의하여 관의 상측, 하측부($45 + 90^\circ$)에서 가장 큰 반경을 보인다. 해당 구조물은 설계 압력인 $80kgf/cm^2$ 의 내압을 고려하였다.



(a) 원주방향 응력 (MPa) (b) 상대 국부 변형 반경
 그림 5 사각 콘크리트 케이싱 강관 검토

그림 5와 같이 다중관은 상하부에서 최대 국부 변형 반경이 발생하는 원형관과 전체적으로 상이한 변형 특성을 보이게 된다. 따라서 이와 같은 경우 배관의 설계를 위하여 측상 및 측하부에 대한 검토를 수행하는 것이 타당할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 국부 변형에 기초한 다중관의 설계 기법을 제안하였다. 제안된 분석 기법을 통하여 다중관의 거동 특성을 분석하였으며, 결과로부터 설계시 검토되어야 할 인자를 도출 하였다. 다중관의 거동은 단일관과 상이하게 나타나며, 기존의 설계 기법으로 검토할 경우 과다 설계 또는 성능 저평가가 발생할 수 있기 때문에 다중관의 특성을 고려하여 합당한 기법으로 설계, 검토하여야 할 것이다.

참고문헌

- R. K. Watkins, L. R. Anderson (2000) Structural Mechanics of Buried Pipes, *CRC Press*.
 Connor, J.J. (1976) Analysis of Structural Member System, *Ronald Press Company*, New York.
 J. H. Won, M. S. Kim, M. K. Kim (2008) Deformation-based behavior of x65 gas pipeline in rectangular concrete encasement, ASME, International Pipeline Conference 2008.