

종방향 영구지반변형에 의한 매설관로의 거동 특성 해석

Response Analysis of Buried Pipelines Considering Longitudinal Permanent Ground Deformation

김태욱* 장재원** 임윤목*** 김문겸****
Kim, Tae Wook Jang, Jae Won Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum

ABSTRACT

In this research, a numerical model is developed for analysis of buried pipelines considering longitudinal permanent ground deformation(PGD) due to liquefaction induced lateral spreading. Buried pipelines and surrounding soil are modeled as continuous pipelines using the beam elements and a series of elasto-plastic springs uniformly distributed along the pipelines, respectively. Idealized various PGD patterns based on the observation of PGD are used as a loading configuration and the length of the lateral spread zone is considered as a loading parameter. Numerical results are verified with other research results and efficient applicability of developed procedure is shown. Analyses are performed by varying different parameters such as PGD pattern, pipe diameter and pipe thickness. Results show that response of buried pipelines are more affected by pipe thickness than pipe diameter. Finally, the critical length of the lateral spread zone and the critical magnitude of PGD which cause yielding, local buckling or tension failure are proposed for the steel pipe which are normally used in Korea.

1. 서론

매설관로는 대부분의 경우 지중에 매설되어 있으며, 단일구조물의 형태로 존재하지 않고 광범위한 지역에 분포되어 관망체계의 형태를 나타내므로 지진과 같은 자연재해의 발생시 일부분의 손상 내지 파괴가 전체적인 기능 상실로 이어지는 특징을 갖고 있다. 지진발생시 매설관로의 피해 원인은 크게 지진파 전파와 영구지반변형으로 구분할 수 있는데, 특히 측방유동 형태의 영구지반변형은 매설관로의 주요 피해원인 중의 하나로서 거론되고 있으며 그 현상학적인 복잡성으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있다. 현재까지의 연구들을 살펴보면 크게 영구지반변형 자체에 대한 연구와 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성에 관한 연구로 구분되며 실험적인 연구와 수치해석적인 연구를 중심으로 실질적인 진행이 이뤄져 왔다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나 종방

* 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 연세대학교 토목공학과 석사과정
*** 연세대학교 토목공학과 조교수, 정회원
**** 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

향 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동에 관한 연구는 1990년대 초부터 현재까지 단지 해석적인 연구를 중심으로 진행되어 왔으며, 영구지반변형의 형태가 제한적이고 측방유동 발생지역의 길이에 따라 해석방법이 달라지는 단점을 보여 왔다. 따라서, 본 연구에서는 종방향 영구지반변형의 형태를 좀 더 실질적으로 모형화시킨 후 이를 탄성지반 위의 보 이론에 근거한 매설관로의 해석모형에 적용하여 유한요소 수치해석을 수행하였다. 영구지반변형의 형상, 관의 제원 등을 변화시켜가면서 이에 따른 매설관로 거동특성의 변화를 살펴보았으며 강관을 대상으로 국부좌굴이 발생될 수 있는 한계 종방향 영구지반변형의 크기와 측방유동발생지역의 길이를 산정하였다.

2. 영구지반변형

2.1 영구지반변형의 크기

영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성을 해석하기 위해서는 먼저 발생될 수 있는 영구지반변형의 크기가 산정되어야 한다. 영구지반변형의 크기를 산정하는 문제는 영구지반변형의 크기 자체가 다양한 지반조건 및 지리학적 조건과 지진특성 등에 좌우되게 되므로 상당한 정도의 불확실성을 수반하고 있으나, 많은 학자들의 연구에 의해 경험적, 해석적, 수치해석적인 방법들이 다양한 형태로 제시되어 왔다.

경험적인 방법으로서 Hamada 등은 Niigata 지진(1964)이 발생했을 때의 Niigata시, San Fernando 지진시(1906) Upper Van Norman호 서안 지역, Nihonkai-Chubu 지진시(1983) Noshiro 시의 관측자료들을 이용하고 다중회귀분석을 통해서 영구지반변형의 크기는 해당지층의 지형적인 형상과 밀접한 관련이 있다는 사실을 밝혔으며 식 (1)과 같은 회귀식을 제안하였다.

$$\delta = 0.75\sqrt{h} \cdot \sqrt[3]{\theta_g} \quad (1)$$

여기서, δ 는 영구지반변형의 크기, h 는 액상화 층의 두께(m), 그리고 θ_g 는 측방유동 지층 바닥면의 경사(%)와 지표면의 경사(%)중 큰 값을 나타낸다. 그러나, 이러한 회귀식은 한정된 지반조건과 관측자료에 기초하여 도출된 것이므로 완만한 경사를 가진 지반에서만 적용이 가능하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 1992년 Bartlett과 Youd는 San Francisco 지진(1906), Niigata 지진(1964), San Fernando 지진(1971), Imperial Valley 지진(1979), Borah Peak 지진(1983), Superstition Hills 지진(1983) 등의 자료를 이용하여 완만한 경사를 가진 지반과 자유면에 대해 각각 식 (2), 식 (3)과 같은 형태의 경험식을 제안했다

$$\begin{aligned} \log(\delta+0.01) = & -15.787 + 1.178M - 0.972\log R_d - 0.013R_d - 0.922D_{50,15} \\ & + 0.429\log S + 0.348\log T_{15} + 4.527\log(100 - F_{15}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \log(\delta+0.01) = & -15.787 + 1.178M - 0.972\log R_d - 0.013R_d - 0.922D_{50,15} \\ & + 0.429\log Y + 0.348\log T_{15} + 4.527\log(100 - F_{15}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, M 은 지진의 진도, R_d 는 진앙거리(km), S 는 지반경사(%), Y 는 자유면 비(%), T_{15} 는 15보다 작은 수정된 SPT 값을 가진 포화된 점착력 없는 흙의 두께(m), F_{15} 는 T_{15} 에 있는 평균 fines contents(%), $D_{50,15}$ 은 T_{15} 에서의 평균 입경(mm)이다. 위 식들은 각 위치에서의 지진동 효과와 지형적인 조건 및 지반의 물성을 반영하고 있다.

2.2 영구지반변형의 형태 및 모형화

영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성 해석에 있어서 영구지반변형의 크기와 함께 중요하게 고려되어야 할 사항은 실제 발생될 수 있는 영구지반변형의 형상이다. 1986년 Hamada 등^[1]은 1964년 Niigata 지진과 1983년 Nihonkai-Chubu 지진에서 관측된 자료를 이용하여 종방향 영구지반변형의 형태를 그림 1과 같이 나타냈는데 관측된 지역은 Noshiro시의 북쪽지역(N-2)과 Noshiro시의 남쪽지역(S-4, S-13, S-15, S-16)이고, 여기서 수직방향의 선들은 발생한 영구지반변형의 크기를 나타낸다. 종방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동을 해석하기 위해서는 지반변위를 지진하중으로 산정해야 하는데, 관측된 영구지반변형의 형태가 그림 1에서와 같이 관측된 지역에 따라 다양하고 복잡한 형태를 가지고 있기에 본 연구에서는 종방향 영구지반변형을 그림 2와 같이 보다 단순하고 이상화된 형태로 모형화하였다. 그림 2에 나타난 이상화된 영구지반변형의 형태는 상단에서부터 각각 Block 형태, Ramp 형태, Ramp-Step 형태, Ridge 형태를 나타내며, 여기서 L 은 축방유동 발생지역의 길이를, δ 는 영구지반변형의 크기를 나타낸다.

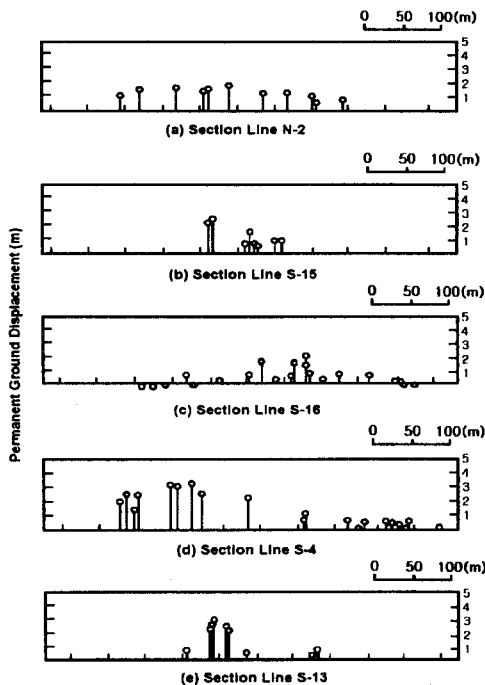


그림 1 실제의 종방향 영구지반변형^[1]

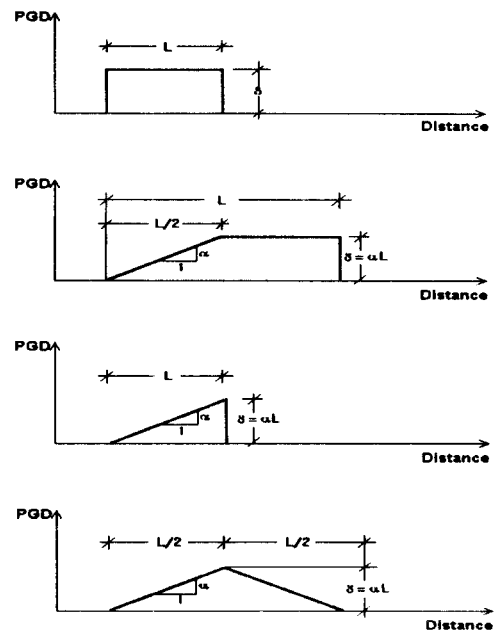


그림 2 영구지반변형의 모형화

3. 매설관로의 모형화 및 수치해석 프로그램의 구성

본 절에서는 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성 해석을 수행하는 데 있어서 적용된 매설관로의 해석모형과 수치해석 프로그램에 대해서 소개하고자 한다. 그림 3과 같이 축방유동이 발생하는 지층 상부에 매설된 관망을 기본적으로 탄성 지반 위에 지지된 보로서 모형화하며 매설된 관망은 축방유동이 발생하는 지역과 발생하지 않는 지역을 동시에 통과하는 것으로 생각한다. 연속된 매설관로의 해석모형은 그림 4와 같이 연속적인 축방향과 횡방향 지반 스프링으로 둘러싸인 관 요소로 고려한다. 전체 좌표계를 기준으로 축방향과 횡방향이 각각 x 와 z 로 표시되는 모형에서 매설관의 축방향 변위를 u 로, 지반의 축방향 변위를 u_g 로 나타내면, 매설관 축을 따라 분포된 지반 스프링의 축방향 변형 Δu 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta u(x) = u(x) - u_g(x) \quad (4)$$

해석상에서 지반의 축방향 변위는 그림 2와 같은 형상을 갖는 영구지반변형의 크기로서 표현되고 매설관의 축방향 변위는 지반 스프링으로서 표현된다. 종방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 파괴는 압축에 의한 국부좌굴과 인장에 의한 인장파괴로 나타나게 되므로 이를 수치적으로 표현하기 위해서는 지반의 탄소성 거동을 모형화해야 한다. 따라서 본 연구에서는 ASCE에서 제안한 완전 탄소성 모형^[2]으로써 지반의 거동을 표현하였으며 선형탄성구간에 대해서는 Wang 등^[3]이 제안한 다음 식을 적용하였다.

$$k_x = 2.0G_s \quad (5)$$

본 연구를 통해 개발된 매설관로 해석프로그램의 전체적인 개요를 간략하게 설명하면 다음과 같다. 먼저 영구지반변형의 크기 및 형상을 하중으로 산정하고 관과 지반의 요소 강성도 행렬을 이용하여 전체 강성도 행렬을 구성한 후 매설관로의 거동을 해석한다. 이후 매설관의 소성응답 발생 유무에 따라 수정된 전체 강성도 행렬을 이용하여 최종적인 매설관로의 응답을 산출한다.

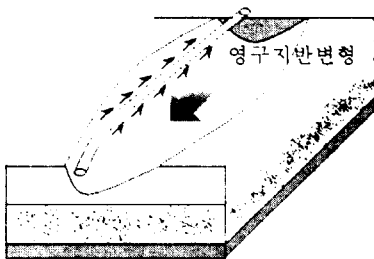


그림 3 종방향 영구지반변형을 받는 매설관로

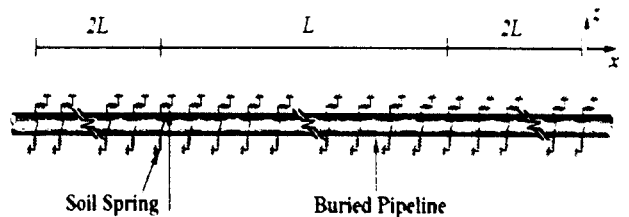


그림 4 매설관로의 해석모형

4. 수치해석 및 결과분석

4.1 수치해석기법의 검증

개발된 수치해석프로그램을 이용하여 종방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 응답을 산정하고, 이를 기존의 연구 결과와 비교하였다. 비교대상인 O'Rourke의 해석^[3]결과는 해석영역 전체를 지반과 매설관의 상대변위가 탄성영역인 구간과 지반과 매설관의 상대변위가 비탄성영역인 구간으로 구분한 후, 각 영역의 경계에서의 연속조건과 평형조건을 이용하여 매설관의 최대 변형률을 구한 것이다. 본 연구에서 고려한 영구지반변형의 형태는 Block 형태의 영구지반변형이며, 해석 대상은 측방유동이 발생된 지층 상부에 위치한 매설깊이가 91cm인 매설관로이다. 매설관과 지반의 제원 및 물성은 표 1에 나타나 있다. 매설관로에서의 단부구속 효과를 상쇄시키기 위해서 측방유동 발생 지역과 그 양쪽방향으로 측방유동 발생지역의 2배에 해당하는 길이를 전체 해석지역으로 설정하였다.

그림 5는 200m부터 600m의 범위를 갖는 측방유동 발생 지역에 대해 10cm부터 70cm 사이의 종방향 영구지반변형이 발생될 경우 매설관로의 거동특성을 해석한 결과이다. 측방유동 발생 지역의 길이가 200m와 400m인 경우, 지반 변위가 증가함에 따라 매설관의 최대 변형률은 증가하게 되나 어느 정도 이상의 지반 변위가 발생하게 될 경우 최대 변형률은 일정하게 되는 특성을 나타내게 된다. 이는 지반과 매설관로의 상대변위가 탄성한계를 넘게 되는 영역이 존재하며 이러한 영역이 매설관로의 변형률에 큰 영향을 미친다는 사실을 의미한다. 측방유동 발생 지역이 600m일 경우, 이러한 현상이 가시적으로 나타나지는 않으나 지반변위가 증가하게 되면 동일한 결과가 나타날 것으로 사료된다. 수치해석 결과를 O'Rourke의 해석결과와 비교해 보면 측방유동 발생 지역의 시작 부분에서는 최대인장변형률이, 끝부분에서는 최대압축변형률이 발생한다는 사실과 전반적인 측방유동 발생지역의 길이와 영구지반변형의 크기에 따른 최대 변형률의 변화 양상이 어느 정도 일치한다는 사실을 확인할 수 있다. 변형률의 크기 상에서 발생하는 오차는 수치해석 과정 내에서 자체적으로 발생하는 것으로 판단되며 오차의 범위가 크지 않다는 점을 고려한다면 본 연구에서 개발된 해석 프로그램은 비교적 타당한 것으로 사료된다.

표 1 매설관과 지반의 제원 및 물성

내 용		입 력 치
관 세 원	탄성계수 (E)	$1.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
	항복응력 (σ_y)	$3.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$
	외경 (D)	30.5cm
	두께 (t)	6.4mm
지 반 물 성	단면적 (A)	59.97 cm^2
	요소길이 (l)	50cm
	단위중량 (γ)	$0.161 \times 10^{-2} \text{ kgf/cm}^3$
	매설심도 (H)	91cm
	측방향강성 (k_x)	725 kgf/cm^2
	측방향저항력 (f_x^*)	7.4 kgf/cm

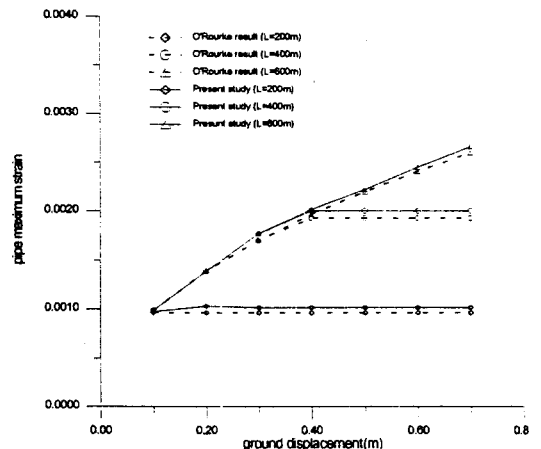


그림 5 수치해석과 O'Rourke 해석식의 결과 비교

4.2 매설관로의 거동특성 해석

개발된 해석프로그램을 이용하여 영구지반변형 형태 및 매설관의 제원 변화에 따른 거동 특성을 파악하였다. 영구지반변형의 형태는 그림 2에 나타난 네 가지 형태를 사용하였으며, Block 형태의 영구지반변형에 대해서는 실제 발생하는 형태를 보다 실질적으로 표현하기 위해 Sine형태로 모형화하였다. 또한 매설관의 제원 변화에 대한 거동특성을 살펴보기 위해서 매설관의 관경과 관두께를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 관과 지반의 물성 및 제원은 표 1과 같고 측방유동 발생지역의 길이는 각각에 대해 200m와 400m로 제한하였다.

그림 6과 그림 7은 영구지반변형의 형태에 따른 관경 30cm, 관 두께 6.5mm 매설관의 거동 특성을 나타내고 있다. Block 형태의 영구지반변형에 대해서 가장 큰 최대 변형률이 발생되며 Sine 형태, Ramp 형태, Ramp-Step 형태, Ridge 형태의 순으로 매설관의 최대 변형률이 발생한다는 사실을 확인할 수 있다. 즉, 동일한 조건인 경우 Block 형태의 영구지반변형이 매설관로에 가장 큰 피해를 발생시킬 수 있다는 결론을 도출할 수 있으며 이는 지진피해사례결과와도 일치하는 것이다. 측방유동 발생지역의 길이가 400m인 그림 7의 경우 측방유동 발생지역의 길이가 200m인 그림 6에 비해 변형률의 크기가 증가한다는 사실을 확인할 수 있다. 또한 영구지반변형의 형상에 따른 변형률의 차이는 그림 6과 유사하게 나타난다는 사실을 확인할 수 있다.

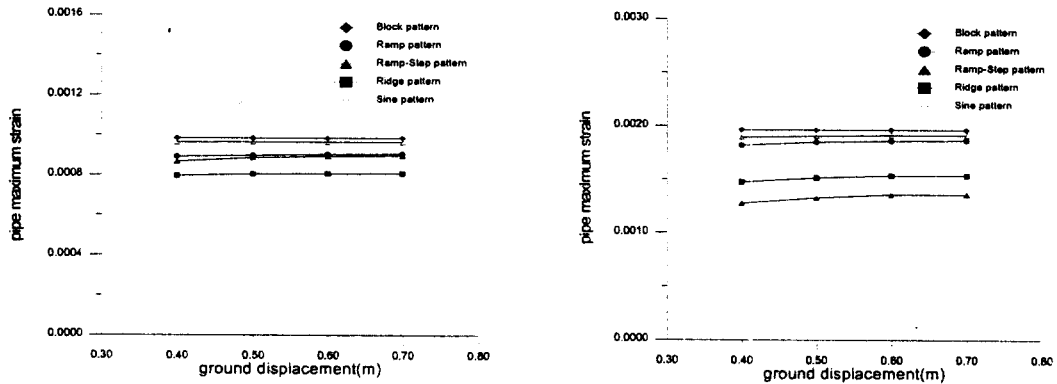


그림 6 영구지반변형 형태에 따른 해석결과(L=200m) 그림 7 영구지반변형 형태에 따른 해석결과(L=400m)

그림 8과 그림 9는 관경의 변화에 따른 거동특성을, 그림 10과 그림 11은 관두께의 변화에 따른 거동특성을 각각 나타내고 있다. 그림 8과 그림 9를 통해 관경이 증가함에 따라서 매설관로에 발생하는 최대변형률이 증가한다는 사실을 확인할 수 있으며 이는 매설관과 지반사이에 작용하는 상호작용력, 즉 접합면에서의 최대저항력이 증가함에 따라 매설관로의 변형률이 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 또한 그림 10과 11을 통해 관의 두께가 감소함에 따라서 매설관로에 발생하는 최대변형률이 증가한다는 사실을 확인할 수 있는데 이는 상호작용력의 감소 및 관강성의 감소로 인한 것으로 사료된다.

그림 8과 그림 10, 그림 9와 그림 11을 비교한다면 관경과 관두께가 동일한 조건하에서 배로 증가할 경우 매설관로 변형률의 증감은 관두께에 상대적으로 더 많은 영향을 받게 된다는 특징이 나타나게 된다. 즉, 동일한 조건의 경우 종방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 응답특성은 관경보다는 관의 두께에 더 큰 영향을 받는다는 사실을 규명할 수 있었다.

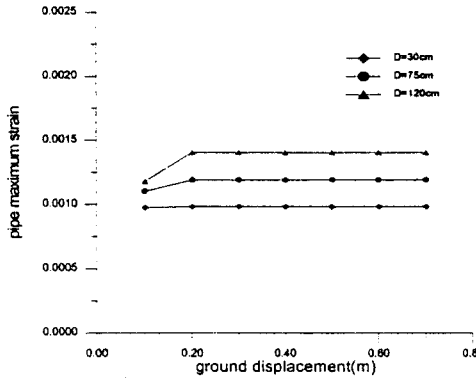


그림 8 관경변화에 따른 해석결과(L=200m)

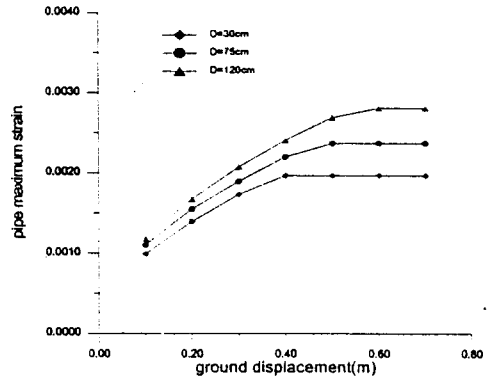


그림 9 관경변화에 따른 해석결과(L=400m)

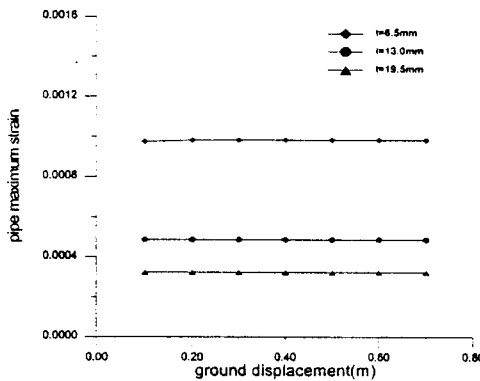


그림 10 관두께 변화에 따른 해석결과(L=200m)

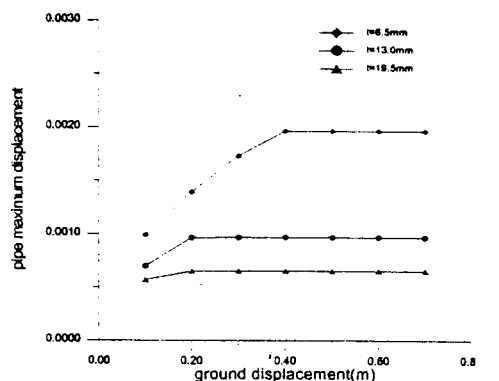


그림 11 관두께 변화에 따른 해석결과(L=400m)

4.3 한계 종방향 영구지반변형 산정

개발된 수치해석 프로그램을 이용하여 Grade B 강관(steel pipe)을 대상으로 국부좌굴이 발생하는 한계 축방유동 발생지역의 길이와 영구지반변형의 크기를 산정하였으며 이를 O'Rourke의 해석결과와 비교하였다. 단, 본 연구에서는 강관의 응력-변형을 관계를 실질적인 관계에 가깝게 나타내기 위하여 탄소성 모델을 적용하였으며, 인장부와 압축부의 응력-변형을 관계는 동일하다는 가정하에 국부좌굴이 발생하는 변형률을 Newmark^[4]에 의해 제시된 값의 평균값인 $0.175 t/R$ 을 적용하여 해석을 수행하였다. 수치해석결과 및 O'Rourke의 해석결과가 표 2에 나타나 있으며 두 해석결과가 어느 정도 일치한다는 사실을 확인할 수 있다.

표 2 Grade B 강관의 한계 축방유동 발생지역의 길이 및 영구지반변형 크기

관경 (cm)	관의반경 /관두께	매설깊이 (cm)	해석식 결과		수치해석 결과	
			축방유동 발생길이(m)	영구지반 변형크기(m)	축방유동 발생길이(m)	영구지반 변형크기(m)
75	10	210	704	0.53	706	0.55
75	25	160	349	0.23	350	0.22
75	50	260	115	0.07	116	0.08
75	100	110	114	0.066	116	0.07
75	100	210	68	0.04	69	0.05
75	150	120	66	0.037	67	0.05

관경의 증가에 따라서 축방유동 발생지역의 길이 및 영구지반변형의 크기가 감소하는 경향을 확인할 수 있으며 해석결과상의 차이는 O'Rourke의 해석식 자체가 Ramberg-Osgood 모델에 기초하였기에 발생한 것으로 사료된다. 또한 이러한 결과는 본 연구에서 개발된 수치해석 프로그램이 한계 종방향 영구지반변형을 산정하는 데 있어서도 합리적인 적용성을 갖는다는 점을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 축방유동으로 발생하는 영구지반변형중 종방향 영구지반변형을 모형화하여 이를 매설관로의 해석모형에 적용함으로써 종방향 영구지반변형에 의한 매설관로의 응답을 산정할 수 있는 수치해석 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 다양한 영구지반변형의 형상을 모형화하였으며, 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성 해석결과를 기존의 연구결과와 비교·검증함으로써 개발된 수치해석 프로그램의 적용성과 타당성을 입증하였다. 또한 지반과 매설관로의 상대변위가 탄성한계를 넘게되는 영역이 존재하며 이러한 영역이 매설관로의 변형률에 큰 영향을 미친다는 사실을 규명하였다.
- (2) 영구지반변형의 형상과 관의 두께 및 관경 등을 변화시켜가면서 해석을 수행한 결과 Block 형태의 영구지반변형이 가장 큰 파괴가능성을 갖는다는 사실을 규명하였으며, 관경에 비해 관두께의 경우 매설관로의 변형률에 미치는 영향이 상대적으로 더 크다는 사실을 규명하였다.
- (3) 국부좌굴을 유발시키는 한계종방향 영구지반변형의 크기 및 축방유동 발생지역의 길이를 산정하였고 이를 기존의 해석결과와 비교·검증함으로써 본 연구에서 개발된 수치해석 프로그램의 확장성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술정책관리연구소(KISTEP)의 연구과제 수행 내용의 일부로서 KISTEP 및 한국가스공사의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hamada, M. and Yasuda, S.(1986), "Study on Liquefaction induced PGD," Association for the Development of Earthquake Prediction, Japan, pp.87.
2. ASCE(1984), *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, N.Y.
3. O'Rourke, M. and Wang, L.R.(1991), "Earthquake Response of Buried Pipelines," *Proceedings of the ASCE Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena, California.
4. Hall, W. and Newmark, N.(1977), "Seismic Design Criteria for Pipelines and Facilities," *Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, pp.18-34.