

해저 배관의 허용 노출길이 산정에 대한 이론해석

정동호⁽¹⁾, 이용두⁽²⁾, 박한일⁽³⁾

Theoretical analysis for determination of allowable free span of subsea pipeline

by

Dong-Ho Jung⁽¹⁾, Yong-Doo Lee⁽²⁾ and Han-II Park⁽³⁾

요 약

해저배관은 지반쇄굴로 인하여 일부분이 노출되어 자유경간이 형성될 수 있다. 자유경간이 형성되면 환경하중 및 와동유기진동에 의해서 안정성을 잃을 수 있다. 본 연구에서는 해저배관의 안정성을 위협하는 중요 요소인 자유경간의 정적 및 동적 경간을 결정하는 방법을 제시한다. 자유경간 해석에서는 해저배관에 작용하는 압축력 효과를 고려하였으며 토양의 종류에 따라 경계조건을 일반화시켰다. 자유경간 양단의 해저지반은 탄성기초로 간주하였으며, 이들 선형 및 회전 스프링으로 치환하여 경계조건을 일반화시켰다. 정적 및 동적 자유경간의 길이를 산정할 수 있는 무차원화 된 곡선을 구하였다. 예제해석을 수행하여 그 적용방법을 소개하였다. 본 연구결과는 자유경간을 갖는 해저배관의 설계에 유용하게 적용될 수 있다.

Abstract

The free span of a subsea pipeline due to seabed scouring can result in structural failure by severe ocean environmental loads and vortex induced vibrations. This paper examines the safety of subsea pipelines with free spans under axial compressive load. The variation of allowable lengths of static and dynamic free spans is examined for generalized boundary conditions. The free span is modelled as a beam with an elastic foundations and the boundary condition is replaced by linear and rotational springs at each end. The static and dynamic free span curves are obtained with a function of non-dimensional parameters. A case study is carried out to introduce the application method of the curve. The results of this study can be usefully applied for the design of subsea pipelines with a free span.

Keywords: subsea pipeline, free span, analytic analysis, axial force, allowable stress, vortex shedding.

(1) 한국해양대학교 해양과학기술연구소, nocturn3@hanmail.net

(2) 제주대학교 해양과학부, eeenvlyd@cheju.ac.kr

(3) 정희원, 한국해양대학교 해양개발공학부, hipark@hhu.ac.kr

1. 서 론

해저배관은 석유 및 천연가스를 이송할 때나 정화수를 외해로 이송하는 수단으로 중요하게 사용되고 있다. 또한 최근에 우리나라 동해안 고성에서 개발중인 해양심층수를 육지까지 끌어올릴 때도 해저배관이 사용되고 있다.

해저배관이 기능상 안정적으로 수행되기 위해서는 다양한 경우에 대하여 충분한 구조해석이 수행되어야 한다. 비록 해저배관이 해저면 아래에 매설될 지라도 지반쇄굴이 발생하면 해저배관의 일부가 해양환경에 드러나게 되어 자유경간이 발생하게 된다. 자유경간이 발생하면 자중 및 해양환경에 의해서 해저배관이 파괴될 수 있으므로 이에 대한 적절한 해석을 수행하여 허용할 수 있는 길이를 산정해야 한다.

해저배관의 해석은 크게 정적해석과 동적해석으로 나눌 수 있다. 먼저 정적해석은 배관의 자유경간이 자중으로 인하여 처짐이 발생하였을 때, 배관에 초과응력이 발생하지 않도록 그 허용길이를 결정하는 것이다. 동적해석은 파도 및 해류로 인한 와동방출(vortex shedding)의 진동수와 자유경간의 고유진동수를 상호 비교하여 공진이 발생하지 않을 자유경간의 허용길이를 결정하는 것이다. 자유경간을 결정할 때에는 정적 및 동적 허용경간을 모두 계산하여 그 중에서 짧은 것을 선택한다.

해저배관의 구조해석에서는 특히 압축력 효과를 고려하는 것이 매우 중요하다. 해저배관에 압축력이 작용한다면 처짐이 증가하기 하여 허용경간의 길이가 짧아지기 때문에 이 효과를 반드시 고려해야 한다.

해저배관의 동적해석에 관한 많은 연구사례가 있다(Tsahalis[1983]; Jacobsen et al.[1984]). 이들 연구는 자유경간 끝 지점의 지지조건에 대한 폭 넓은 고려없이 단지 유체의 동적 현상에만 초점을 맞추어 왔다. 또한 지반의 특성에 따른 자유경간의 변위, 응력, 모멘트 변화 등에 관한 연구(Hetenyi[1946])를 근거로 하여 자유경간의 고유진동수에 대한 연구도 이루어졌다(Hobbs[1986]). 일반화된 경계조건을 갖는 경우에 대한 자유경간 길이를 산정하는 방법도 제시되었으나 압축력이 고려되지 않았다(박 등[1996]; 박·김[1996]; Park and Kim[1977]).

본 연구에서는 압축력이 작용하는 해저배관에

대해 정적 자유경간 및 동적 자유경간을 해석하였으며, 특히 경간의 경계조건을 일반화하여 경계조건에 변화에 따른 자유경간 허용길이의 산출 방법을 개발하였다. 개발된 방법은 현재 우리나라 서해안의 아산만에 건설되어 있는 해저배관에 적용하여 정확한 허용경간을 산정하였다.

2. 지배방정식

일반적으로 배관에 자유경간이 발생하게 되면, 그 양단은 부재 주변의 탄성기초에 의해 구속이 되고, 이때의 탄성기초는 Fig. 1과 같이 자유경간 끝단에서의 선형 및 회전 스프링으로 모델링할 수 있다. 만일 기초의 탄성계수(elastic modulus)가 k (N/m^2)이고, 배관의 굽힘강성이 EI 라면 등가의 스프링 강성, λ_H 는 다음 식과 같다(Hetenyi[1946]).

$$\lambda_H = \left(\frac{k}{4EI} \right)^{0.25} \quad (1)$$

또한 선형 스프링강성 k_1 과 회전 스프링강성 k_2 는 위에서 구한 λ_H 와 k 를 이용해서 다음과 같이 구할 수 있다(Hetenyi[1946]).

$$\text{선형 스프링강성} : k_1 = k / (2\lambda_H) \quad (2)$$

$$\text{회전 스프링강성} : k_2 = k / (4\lambda_H^3) \quad (3)$$

Fig. 1과 같이 길이가 L 인 부재의 양단이 선형 및 회전 스프링에 의해 구속되고 부재의 축방향의 압축하중이 부재 전체 길이에 걸쳐 균일 분포된 하중이 작용한다면, 이 부재의 정적 평형 방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} + P(y - y_0) + \frac{w}{2} x^2 + M_0 + Sx = 0 \quad (4)$$

$$y_0 = \text{양단의 횡방향 변위} (= wL/2k_1)$$

$$M_0 = \text{왼쪽 끝의 회전 스프링 모멘트}$$

$$S = x \text{ 위치에서의 전단력} (= \frac{wL}{2} - wx)$$

그리고 부재의 왼쪽 끝단에서 아래와 같이 회전 스프링 관계식을 얻을 수 있다.

$$M_0 = -k_2 \theta_0 \quad (5)$$

θ_0 = 부재 왼쪽 끝단의 회전각

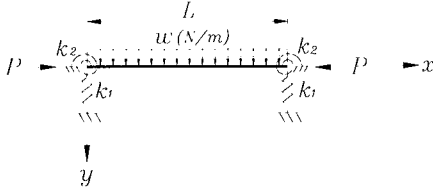


Fig. 1 Simplified beam model on elastic foundation.

식(5)를 식(4)에 대입하면 아래와 같은 정적 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} + Py = k_2 \theta_0 + \frac{wL}{2} x - \frac{w}{2} x^2 + Py_0 \quad (6)$$

다음은 부재의 동적 평형방정식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2}) + P \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = w(x, t) \quad (7)$$

- $Y(x, t)$ = 시간과 공간의 함수로서 측면 변위, m
- P = 배관에 작용하는 축 방향력, N
- m = 단위 길이당 유효질량, kg/m
- w = 분포하중, N/m

식(7)에서 분포하중을 무시하고 $Y(x, t) = y(x) \sin(\omega t)$ 으로 가정한다면, 지배방정식은 다음과 같이 재정리 될 수 있다.

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{P}{EI} \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{m\omega^2}{EI} y = 0 \quad (8)$$

3. 정적 자유경간 길이

위의 정적 지배 방정식의 해를 얻기 위하여 우선 아래와 같은 무차원 변수 a 를 정의한다.

$$a = \frac{P}{EI} \quad (9)$$

그러면 정적 지배 방정식의 일반해는 다음과 같다.

$$y = C_1 \cos \sqrt{a}x + C_2 \sin \sqrt{a}x + \frac{w}{2P} x^2 - \frac{wL}{2P} x + \frac{k_2 \theta_0}{P} - \frac{w}{P^2} EI + y_0 \quad (10)$$

상수 C_1 과 C_2 는 경계조건에서 얻는다. 먼저 왼쪽 끝단의 경사도는 작은 각도 θ_0 에 대해 식(10)을 1차 미분하면 다음과 같이 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} = \sqrt{a} C_2 - \frac{wL}{2P} \approx \theta_0 \quad (11)$$

그리고 부재가 좌우 대칭이므로 중간점에서 전단력이 0이 되므로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=L/2} = 0 \quad (12)$$

식(5)와 식(11), (12) 그리고 관계식

$$-EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_x \quad (13)$$

를 이용하면 아래와 같이 두 상수를 구할 수 있다.

$$C_1 = \frac{w(a\beta + 1)}{P[\beta \tan \alpha + 1]} \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{w(a\beta + 1) \tan \alpha}{P[\beta \tan \alpha + 1]} \quad (15)$$

여기서 무차원 파라메타 α , β 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{\sqrt{a}L}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} L \quad (16a)$$

$$\beta = \frac{k_2}{\sqrt{aEI}} = k_2\sqrt{EI}P \quad (16b)$$

따라서 식(11)으로부터 왼쪽 끝단의 회전각은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\theta_0 = \frac{w(\tan \alpha - \alpha)}{P\sqrt{a}[\beta \tan \alpha + 1]} \quad (17)$$

식(16a)와 식(16b)을 식(14)와 식(15)에 대입한 후, 식(10)에 대입하고 관계식(11)을 이용하면 부재길이에 따른 모멘트 표현식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} M_x &= -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \\ &= -\frac{EIw}{P} \left[\frac{(\alpha\beta + 1)}{(\beta \tan \alpha + 1)} \times \right. \\ &\quad \left. (\cos \sqrt{ax} + \tan \alpha \cdot \sin \sqrt{ax}) + 1 \right] \end{aligned} \quad (18)$$

무차원 파라메타를 사용하면 다음과 같다.

$$\beta^* = \frac{(\cos \alpha - 1)}{\alpha(\cos \alpha + 1) - 2 \sin \alpha} \quad (19)$$

따라서 $0 < \beta < \beta^*$ 에 대해 $|M_{L/2}| > |M_0|$ 이고 $\beta^* < \beta < \infty$ 에 대해 $|M_{L/2}| < |M_0|$ 이다. 그리고 또한 배관에서의 허용 굽힘 응력을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$M = \frac{2\sigma_B I}{D} \quad (20)$$

σ_B = 자유경간의 허용응력

D = 파이프의 외경

따라서 식(18)에서 $x=0$ 과 $x=L/2$ 에서 경간의 모멘트는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} M_0 &= \frac{EIw}{P} \left[\frac{a\left(\frac{k_2 L}{2} + EI\right)}{k_2 \sqrt{a} \tan \frac{\sqrt{aL}}{2} + EIa} - 1 \right] \\ &= -\frac{2\sigma_B I}{D} \end{aligned} \quad \text{at } x=0 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} M_{L/2} &= \frac{EIw}{P} \times \\ &\left[\frac{a\left(\frac{k_2 L}{2} + EI\right)}{\left(k_2 \sqrt{a} \tan \frac{\sqrt{aL}}{2} + EIa\right) \cos \frac{\sqrt{aL}}{2}} - 1 \right] \\ &= \frac{2\sigma_B I}{D} \end{aligned} \quad \text{at } x = \frac{L}{2} \quad (22)$$

여기서 다음과 같은 무차원 파라메타 λ 를 정의하면 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{2\sigma_B P}{EwD} \quad (23)$$

식(21)과 식(22)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\beta_0 = \frac{\lambda}{(1-\lambda) \tan \alpha - \alpha} \quad \text{at } x=0 \quad (24)$$

$$\beta_{L/2} = \frac{(1+\lambda) \cos \alpha - 1}{\alpha - (1+\lambda) \sin \alpha} \quad \text{at } x = \frac{L}{2} \quad (25)$$

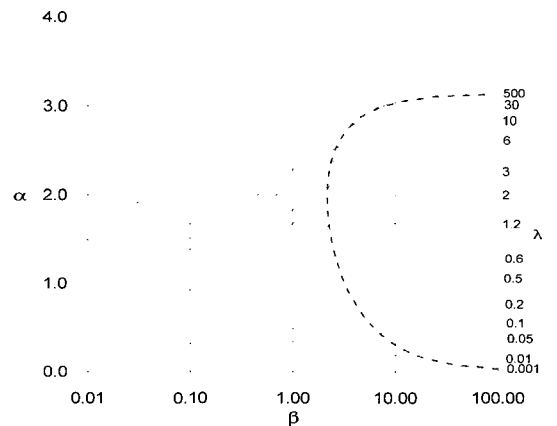


Fig. 2 The relations between α and β for a range of parameter λ in a static free span including axial compressive load.

위의 두 식(24)과 (25)는 축방향 압축하중을

포함한 부재의 정적자유경간 길이와 기타 파라메타 사이의 관계식이며 β_0 과 $\beta_{2/L}$ 의 두 값 중 작은 값을 취한다. 이 두 식을 곡선으로 표시하면 Fig. 2와 같이 된다. 임계 곡선 A(점선곡선 - 관계식(18 대응)의 왼쪽 부분은 경간의 왼쪽 끝단의 모멘트관계식에, 오른쪽 부분은 경간의 중간점의 모멘트관계식에 각각 대응된다.

만일 부재의 치수와 환경조건으로부터 β 와 λ 의 값을 계산하고 Fig. 2에서 α 를 구하면 축방향 압축하중과 횡방향 분포하중을 받는 자유경간의 정적 허용길이는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$L = \frac{2\alpha}{\sqrt{\alpha}} = 2\alpha/\sqrt{\frac{P}{EI}} \quad (26)$$

4. 동적자유경간 길이

자유경간의 진동을 최소로 하기 위해서는 와동방출(vortex shedding)의 진동수와 자유경간의 고유진동수의 차이를 크게 하는 것이다. 와동방출로 인한 자유경간의 진동은 다음에 정의되는 감소 속도(reduced velocity), V_r 의 함수이다.

$$V_r = \frac{2\pi V}{\omega_n D} \quad (27)$$

- ω_n : 자유경간의 고유진동수
- V : 유동 속도
- D : 파이프 외경

유체의 흐름에 의한 자유경간의 진동은 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 즉, 유동방향(in-line)진동과 유동직각방향(cross-flow) 진동이 있다. 이 중에서 유동에 직각방향인 진동이 배관의 피로파괴에 주된 영향을 미치므로 직각방향의 진동이 배관의 동적 자유경간 설계에 고려된다. 유동 속도가 증가하여 감소 속도의 값이 6 정도가 되면, 자유경간의 고유진동수가 와동방출 진동수와 같게 되어 공진에 의한 파괴가 예상된다. 따라서 유동에 직각방향인 진동의 발생을 최대한 억제하기 위해서 일반적으로 감소속

도를 3.5 이하로 유지한다(DnV[1981]). 이 조건을 식(27)에 적용하면 와동방출 진동수와 자유경간 고유진동수와의 관계를 다음과 같이 얻을 수 있다(박 등[1996]).

$$\omega_n \geq \frac{2\pi V}{3.5 D} \quad (28)$$

식(28)은 자유경간을 피로로 인한 파손으로부터 보호할 수 있는 자유경간 고유진동수의 한계치를 나타낸다.

실제로 자유경간의 고유진동수는 무한하지만, 그 중에서도 가장 작은 값인 1차 진동모드의 고유진동수만 위 조건을 만족하면 그 밖의 고유진동수는 위 조건을 자동적으로 만족하게 된다. 따라서 자유경간에 의한 피로파괴를 피할 수 있는 허용길이를 산정하기 위한 아래의 이론해석 전개에서는 1차 진동모드만 고려하며 식(28)을 만족하는 조건을 찾는다.

동적해석에 관한 일반해석은 참고문헌 [1]을 바탕으로 간단하게 정리하면 다음과 같다.

식(8)의 특성 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_1^2 &= (-P + \sqrt{P^2 + 4m\omega^2 EI})/2EI \\ \lambda_2^2 &= (P + \sqrt{P^2 + 4m\omega^2 EI})/2EI \end{aligned} \quad (29)$$

미분방정식(8)의 일반해는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$y = A \sinh \lambda_1 x + B \cosh \lambda_1 x + C \sin \lambda_2 x + D \cos \lambda_2 x \quad (30)$$

여기서 A, B, C, D 는 경계 조건으로부터 결정되는 임의의 상수이다.

1차 모드에 대한 자유경간의 경계조건을 적용하여 B 와 D 에 대해서 정리한 후, 무용해(non-trivial solution)를 얻기 위한 조건을 적용하면 그 결과는 다음과 같다.

$$\frac{-EI\lambda_2^3 \tan \frac{\lambda_2 L}{2} + k_1}{-EI\lambda_1^3 \tanh \frac{\lambda_1 L}{2} + k_1} + \frac{EI\lambda_2^2 + \lambda_2 k_2 \tan \frac{\lambda_2 L}{2}}{EI\lambda_1^2 + \lambda_1 k_2 \tanh \frac{\lambda_1 L}{2}} = 0 \quad (31)$$

k_1/EI 과 k_2/EI 를 무차원 변수 $\beta = [k/EI]^{1/4}$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{k_1}{EI} = \frac{k^{3/4} EI^{-3/4}}{\sqrt{2}} = \frac{\beta^3}{\sqrt{2}} \quad (32)$$

$$\frac{k_2}{EI} = \frac{k^{1/4} EI^{-1/4}}{\sqrt{2}} = \frac{\beta}{\sqrt{2}} \quad (33)$$

무차원 변수를 이용하여 다음 식을 얻는다.

$$f_1 = \frac{|\lambda_1|}{\beta} = \sqrt{(-P + \sqrt{P^2 + 4m\omega^2 EI}) / 2\sqrt{EI}k}$$

$$f_2 = \frac{|\lambda_2|}{\beta} = \sqrt{(P + \sqrt{P^2 + 4m\omega^2 EI}) / 2\sqrt{EI}k}$$

(34)

$$\alpha = \beta \frac{L}{2} = \frac{L}{2} \left(\frac{k}{EI} \right) \quad (35)$$

식(34), (35)를 이용하여 식(31)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{f_2(\sqrt{2}f_2 + \tan f_2\alpha)}{f_1(\sqrt{2}f_1 + \tanh f_1\alpha)} + \frac{1 - \sqrt{2}f_2^3 \tan f_2\alpha}{1 - \sqrt{2}f_1^3 \tanh f_1\alpha} = 0 \quad (36)$$

Fig. 3은 식(36)을 만족하는 $\lambda = f_1/f_2$ 에 대한 f_2 (횡축)와 $\phi = 2\alpha \cdot f_2$ (종축)의 관계를 나타내고, 이 그림을 이용하면 여러 가지 지반상태와 배관 단면에 따른 자유경간의 허용길이를 쉽게 구할 수 있다. 즉, 어떤 지반의 특성치와 배관의 단면수치가 주어지면 λ_1, λ_2 의 절대값 및 β 값을 계산할 수가 있다. 이 값들로부터 f_1, f_2 를 계산하고 다시 λ 값을 계산한다. f_2 와 λ 값을 알면 Fig. 3으로부터 ϕ 를 얻을 수 있으며 동시에 $\phi = 2\alpha \cdot f_2$ 식으로부터 α 값을 구할 수 있다. α 값을 식(35)에 대입하여 동적 자유경간의 허용길이(L)를 계산하거나 위 식들의 조합에 의해 유도된 아래 식을 이용해 동적 자유경간의 허용길이를 구할 수 있다.

$$L = \frac{\phi}{\lambda_2} \quad (37)$$

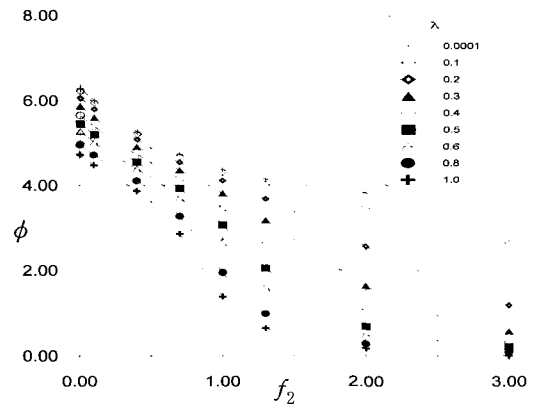


Fig. 3 Relation between ϕ, f_2 and λ .

5. 자유경간 설계에 대한 예제해석

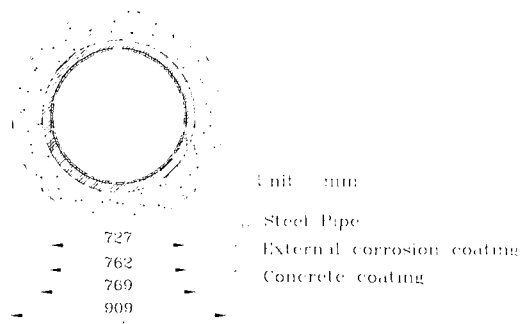


Fig. 4 Cross-section of pipeline system.

본 절에서는 앞 절에서 다루었던 해석결과를 바탕으로 실제 서해배관에 적용하여 예제해석을 수행한다. 사용된 각종 자료는 Dnv에 의해 수행된 ‘아산만 해저관로 설계에 대한 기술보고서’에 기초한다(DnV[1997]). Table 1은 배관 시스템의 특성치를 나타내며, Table 2는 토양의 종류에 따른 k 값을 나타내고 있다. 외부 부식제와 외부 콘크리트는 하중으로만 작용하지 강성으로는 작용하지 않는다고 가정하였다. 따라서 굽힘허용응

력은 파이프의 값을 사용한다. 토양의 종류는 Dnv 보고서에 의해서 실트질로 구성되어 있다고 가정하였다. 그리고 Table 3은 적용해역의 중심에 따른 조류분포를 나타내고 있다. 따라서 조

Table 1 Pipe properties.

Elastic Modulus	2.07×10^{11} (N/m ²)
Density	7850 (kg/m ³)
Outer diameter	0.762 (m)
Thickness	0.0175 (m)
Moment of inertia	2.837×10^{-3} (m ⁴)
External corrosion density	940 (kg/m ³)
External corrosion coating	0.0035 (m)
Concrete coating density	2300 (kg/m ³)
Concrete coating thickness	0.07 (m)
water density	1025 (kg/m ³)

Table 2 Soil properties(k).

Silt	10^6 (N/m ²)
Sand	10^8 (N/m ²)

Table 3 Current profile.

Surface	2.06 (m/s)
-10	1.54 (m/s)
3m above seabed	1.54 (m/s)

류의 속도는 1.54(m/s)를 적용하였다. Fig. 4는 배관 시스템의 단면 형상을 보여준다.

- 단위 길이 당 배관 시스템의 전체 질량(M)
 $M = \text{파이프 내부유체의 질량} + \text{파이프 자체 질량} + \text{외부 부식재의 질량} + \text{외부 콘크리트의 질량} + \text{부가질량}$
 $= 1418.77$ (kg/m)

- 유효중량 (w)

$$w = w_{system} - w_{buoyancy} = 7535.86 - 6651.84 = 887.02 \text{ (N/m)}$$

- 파이프의 허용굽힘응력 (σ_B)

$$\sigma_B = 3.0013 \times 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$\sigma_B(\text{허용굽힘응력}) = (\sigma_E^2 - 0.75\sigma_H^2)^{1/2}$$

$$\sigma_E(\text{허용등가응력}) = 0.67 \times SMYS = 300.16 \text{ MN/m}^2 = 300.16 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_H(\text{원환응력}) = -5.15 \text{ MN/m}^2 = -5.15 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_B = (300.16^2 - 0.75 \cdot (-5.15)^2)^{1/2} = 300.13 \text{ N/mm}^2 = 3.0013 \times 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

5.1 정적자유경간해석

본 절에서는 배관에 작용하는 압축력을 고려해서 정적자유경간 해석을 수행하는데, 여기서는 Fig. 2를 이용하기 위하여 사용되는 변수를 계산한다. 해석에서 사용된 파이프의 특성치는 Table 1과 동일하다. 작용압력도 역시 Dnv에서 제시하는 값으로서 2.35MN을 사용한다.

- a. 식(23)에 의하여 λ 를 구한다.

$$\lambda = \frac{2\sigma_B P}{EwD} = 8.485$$

- b. 무차원 변수 λ_H 를 구한다

$$\lambda_H = \left(\frac{k}{4EI} \right)^{0.25} = 0.1436$$

- c. 회전 스프링 강성 k_2 를 구한다.

$$k_2 = k / (4\lambda_H^3) = 8.43543 \times 10^7$$

- d. 식(16b)을 이용하여 무차원 변수 β 를 구한다.

$$\beta = \frac{k_2}{\sqrt{EIP}} \approx 2.27$$

- e. β 와 λ 를 구하고 나면, Fig. 2를 이용하여

α 을 구한다. 그림에서 보면 $\alpha \approx 1.6$ 가 된다.

f. 마지막으로 정적허용 경간을 얻기 위해 식 (26)을 이용한다.

$$L = \sqrt{\frac{2\alpha}{\frac{P}{EI}}} \approx 50.49 \text{ (m)}$$

5.2 동적자유 경간해석

본 절에서는 압축력을 고려한 동적 자유경간을 구하는데, 각종 변수를 계산하여 Fig. 3을 사용하여 간단하게 구할 수 있다.

a. 1차 모드의 고유진동수를 구하기 위하여 Dnv에서 제공하는 1차 모드 고유진동수의 공식을 적용한다.

$$\omega_1 = \frac{2\pi V}{3.5D} = 3.04 \text{ (m/s)}$$

b. 식(29)에 의하여 무차원 변수 $\lambda_{1,2}$ 를 계산한다.

$$\lambda_1 = \sqrt{(-P + \sqrt{P^2 + 4m\omega^2 EI})/2EI} = 0.056$$

$$\lambda_2 = \sqrt{(P + \sqrt{P^2 + 4m\omega^2 EI})/2EI} = 0.085$$

c. 무차원수 β 를 결정한다.

$$\beta = \left(\frac{k}{EI}\right)^{0.25} = 0.203$$

d. 식(34)을 이용하여 무차원변수 $f_{1,2}$ 를 결정한다.

$$f_1 = \frac{\lambda_1}{\beta} = 0.276$$

$$f_2 = \frac{\lambda_2}{\beta} = 0.418$$

e. 위 값을 이용해서 λ 를 구한다

$$\lambda = \frac{f_1}{f_2} = 0.66$$

f. 무차원 변수 λ , f_2 를 구하고 나면, Fig. 3을 이용하여 ϕ 값을 구하는데 $\phi \approx 4.25$ 가 된다.

g. 따라서 식(37)을 이용하여 자유경간을 설정한다.

$$L = \frac{\phi}{\lambda_2} \approx 50.00 \text{ (m)}$$

h. 한편 자유경간의 양단이 고정지지와 단순지지일 때의 허용길이는 경계조건을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_s = \frac{\pi}{0.085} \approx 36.96 \text{ (m)} \text{ (단순 지지)}$$

양단 고정일 경우는 단순지지와는 달리 간단한 수식의 관계로 정립되지 않는다. 따라서 이 경우에는 토양강성 k 값을 상당히 큰 값을 가지고 계산을 한다. 이때 자유경간 길이는 $L \approx 60.00 \text{ (m)}$ 가 된다.

이상의 결과를 정리하면 Table 4와 같다. 동적허용 자유경간의 길이가 더 작음을 알 수 있는데, 실제 자유경간에 대한 허용 길이는 약 36.96m가 됨을 알 수 있다.

Table 4 Results from free span analyses.

Static(m)	Dynamic(m)	
	hinged-hinged	fixed-fixed
50.49	36.96	60.00

따라서 해저배관의 자유경간 길이가 37m를 초과할 때에는 안정성을 보장하기 위해서 적당한 보강이 요구되어져야 한다.

6. 결 론

본 연구에서는 설치된 해저배관의 안정성에 중요한 영향을 미치는 자유경간 해석을 수행하였다. 해저배관에 작용하는 축방향 압축하중 및 횡방향 분포하중, 그리고 토질의 조건 등을 고려하

여 정적 및 동적 자유경간 길이를 산정하는 관계를 유도하였다. 정적해석 및 동적해석을 동시에 수행하여 짧은 자유경간의 길이를 허용경간으로 설정하는 정확한 해석결과를 얻었다. 해석 결과는 현재 우리나라 서해안에 설치되어 있는 해저배관에 적용하여 허용자유경간의 길이가 37.96m가 됨을 알 수 있었다. 본 연구의 석유 및 가스 이송용 배관 및 해양심층수용 해저배관 등 다양한 목적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 박한일, 2001, “일반화된 경계조건을 갖는 해저파이프라인의 동적 자유경간 결정 방법”, 한국해양해양공학회, Vol. 13, No. 4.
- [2] 박한일 · 김창현, 1996, “해저파이프라인의 안정성을 위한 정적 자유경간의 설계”, 한국해양안전학회, Vol. 2, No. 1.
- [3] 박한일 · 김창현 · 최경식, 1996, “해저파이프라인의 동적 자유경간 설계 : 동해남부해역 가스전예의 응용”, 한국해양해양공학회, 8(1): 81~86.
- [4] DnV, 1997, Technical Report : Pipeline Project-Design and Consultancy Services Final Report, Korea Gas.
- [5] Hetenyi, M., 1946, Beams on Elastic Foundations, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [6] Hobbs, R. E., 1986, “Influence of Structural Boundary Conditions on Pipeline Free Span Dynamics”, Proceedings of the 3rd OMAE Symposium, ASME, Vol. 3, Tokyo.
- [7] Mousselli, A. H., 1981, Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods, Penn Well Publishing Company, Oklahoma.
- [8] Park, H. I. and Kim, C. H., 1997, Analytical methods for the determination of allowable free span lengths of subsea pipelines, Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 2, Honolulu, Hawaii.