

해저 파이프라인의 동적 자유경간 설계: 동해 남부해역 가스전에서의 응용 Design of Dynamic Free Span for a Subsea Pipeline: Application to the Gas Fields in the South of East Sea of Korea

박한일* · 김창현* · 최경식*

Han Il Park*, Chang Hyun Kim* and Kyung Sik Choi*

요 旨: 해저 파이프라인은 해저 석유 및 천연가스 생산의 전반에 걸쳐 중요한 역할을 하나, 열악한 해양환경하에 있어 여러 가지 외부 요인에 의해 손상될 가능성이 높으며 그로 인한 피해는 막대하다. 본 논문에서는 해저 파이프라인의 안정성을 위협하는 주된 요인 중의 하나인 동적 자유경간을 해석하였으며, 해저 파이프라인 설계에 있어서 중요한 자유경간의 허용길이를 산출하였다. 자유경간의 허용길이는 와동방출의 진동수와 자유경간의 고유진동수와와의 상관관계를 이용하여 산출하였고 경계조건에 따른 허용길이의 변화를 규명하였다. 자유경간 양단의 해저지반은 탄성기초로 간주하였으며, 이를 선형 및 회전 스프링으로 치환하여 경계조건을 일반화하였다. 본 연구를 통하여 여러 가지 지반조건에 대한 동적 자유경간의 정확한 허용길이를 간단하게 얻을 수 있는 무차원화 된 곡선을 구하였으며, 그 결과를 우리 나라 동남해역 천연가스전에 설치예정인 해저 파이프라인에 적용하였다.

Abstract □ Subsea pipelines have an important role in the overall tasks of offshore oil and gas production but are exposed to various hazards with high potential risks of damage resulting in serious economic loss and impact on ocean environment. In this paper, the dynamic free span is analysed, which is one of main risk factors against the safety of subsea pipelines and the allowable length of dynamic free span which is important for the design of subsea pipelines is determined. The allowable free span length is examined by considering the relationship between vortex shedding frequency and natural frequency of pipeline free span, and the variation of the allowable length is analysed for different boundary conditions of pipe ends. The free span is regarded as a beam on elastic foundations and the boundary condition of the beam is generalized by modelling as restrained by linear and rotational spring at each end. A non-dimensionalized curve is obtained to facilitate the determination of exact allowable length of dynamic free span for subsea pipelines and is applied to the pipelines which is to be installed in the gas fields of the south of East Sea of Korea.

1. 서 론

해저 파이프라인은 전세계적으로 수만 마일 이상 설치되어 있으며 매년 수천 마일씩 신규로 부설되고 있다. 또한 파이프라인의 직경도 3 inch 에서 56 inch에 이르기까지 상당히 다양하다. 해저 파이프라인의 설계나 설치, 방호, 수리 등에 소요되는 관련비용은 해저 석유나 천연가스 개발에 드는 전체 비용의 40~50% 정도를 차지할 만큼 높은 경우도 많으므로 차지하는 비중이 높다.

그러나 해저 파이프라인은 육상 파이프라인에 비해 보다 열악한 환경에 노출되어 있으므로 부설 및 가동시 손상을 입을 가능성이 매우 높다. 해저 파이프라인은 파도나 해류와 같은 직접적인 해양환경 요인과 지반쇄굴과 같은 2차적인 요인에 의해 그 안정성을 잃을 가능성도 높다. 해저 파이프라인의 안전사고로 인한 직접적인 피해액 및 복구비도 막대하다. 특히 석유이송 파이프라인의 경우 사고로 인한 직접적 피해 이외에도 해양환경에 미치는 2차적인 악영향은 엄청나다. 따라서 해저 파이프라인을 안전하게 유지하기 위해서는

*한국해양대학교 해양공학과 (Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea)

이러한 불안정 요인들을 자세하게 검토해야 한다.

해저 파이프라인의 지반 안정과 관련하여 고려해야 할 주요 요소중의 하나는 파도나 해류에 의한 지반의 쇄굴현상(scouring)이다. 해저 파이프라인의 주변에 쇄굴현상이 발생하면 파이프라인은 짧은 부분 또는 상당한 길이가 노출되는 자유경간이 발생한다. 해저 파이프라인의 자유경간은 지반쇄굴 이외에도 파이프라인이 불규칙하거나 암반으로 이루어진 해저 바닥에 놓여졌을 때도 나타날 수 있다. 자유경간이 발생하면 파이프라인은 파도 또는 해류에 의해 수평방향으로 이동되어 파손되거나, 파이프라인의 처짐으로 인한 굽힘응력이 허용응력을 초과하여 파손된다. 또한 자유경간 주위에서 파도 및 정상해류로 인한 와동방출이 발생하게 되면, 자유경간이 진동하게 되어 피로파괴에 의한 손상 가능성이 높다.

파이프라인의 자유경간 해석은 크게 정적해석과 동적해석으로 나눌 수 있다. 먼저 정적해석은 파이프라인의 자유경간이 자중으로 인하여 처짐이 발생하였을 때, 파이프라인에 초과응력이 발생하지 않도록 그 허용길이를 결정하는 것이고, 동적해석은 파도 및 해류로 인한 와동방출(vortex shedding)의 진동수와 자유경간의 고유진동수를 상호 비교하여 공진이 발생하지 않을 자유경간의 허용길이를 결정하는 것이다. 설계시에는 정적 및 동적 허용경간을 계산하여 짧은 것을 선택한다.

파이프라인의 자유경간에 대한 연구는 여러 가지 관점에서 접근되어야 하는데, 먼저 파이프 주변에서 발생하는 와동방출에 관한 연구가 주류를 이룬다(Tsahalis, 1983, 1984; Jacobsen 등 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).

본 연구에서는 해저 파이프라인의 동적 자유경간을 해석하였으며, 특히 경간의 경계조건을 일반화하여 경계조건의 변화에 따른 자유경간 허용길이의 산출 방법을 개발하였다. 또한 현재 우리 나라의 동남해역 6-1광구에서 개발될 천연가스를 해저 파이프라인으로 수송한다고 예상하여 본 연구의 결과를 동남해역 가스전에 적용하여 보았다.

2. 동남해역 천연가스전의 주요 환경특성

그 동안 정부 주도로 한반도 주변해역에서의 해저 석유 및 천연가스에 대한 탐사 및 시추가 꾸준히 지속되어 왔다. 현재 생산 가능성이 가장 높은 해역은 그림 1에 있는 대륙붕 6-1 광구로서 천연 가스가 상당량 매장되어 있는 것으로 알려졌다. 대륙붕 6-1광구에 매장된 천연가스는 가채 매장량이 3000 억 SCF 정도로서 경제성이 높은 것으로 나타났다. 만약 이 천연가스를 생산하게 되면 육상으로의 수송에는 해저 파이프라인에 의한 방법이 보다 타당한 것으로 여겨지고 있다.

해저 파이프라인을 설계 및 설치하기 위해서는 설치구간의 전체 길이, 수심, 해류, 파도, 지질, 지형상태 등과 같은 환경 특성치가 필요하다. 대륙붕 6-1 광구는 경상남도 울산으로부터 동쪽으로 60 km 지점에 위치해 있으며 수심은 150 m 정도이다. 6-1 광구는 대한해협인 西水道에 속한 지점으로서 쿠로시오 해류로부터 분리되어진 대마난류의 영향을 많이 받는다. 대마난류는 쿠로시오 해류에 비해 유속이 약하며, 최대 유속은 여름에 표층에서 1.5~1.8 knot, 하층에서 0.5~1.0 knot이며 겨울에는 표층과 하층 모두 여름의 약 1/3 이다(이, 1992).

우리 나라 근해 및 외해에 대한 파랑 실측자료가 얼마 되지 않아 대륙붕 6-1 광구 주변에서의 설계파를 추산하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 울산항에서 실측한 파랑자료를 참고하였으며 파고는 10 m, 주기는 13sec를 선택하였다(이, 1992). 아울러 이 지역의 지층 강도는 중간 정도인 것으로 간주하였다. 표 1은 본 연구에 사용된 대륙붕 6-1 광구의 제반 자연환경 자료를 나타내고 있다.

3. 자유경간의 동적 해석

자유경간에 대한 동적 해석의 주요 목적은 파이프라

표 1. 대륙붕 6-1 광구의 제반 자연환경

구 분	내 용
수심	150 m
심해 설계파의 파고	10 m
심해 설계파의 파주기	13 sec
자층에서의 해류 속도	1.0 knot
지층 강도	중간

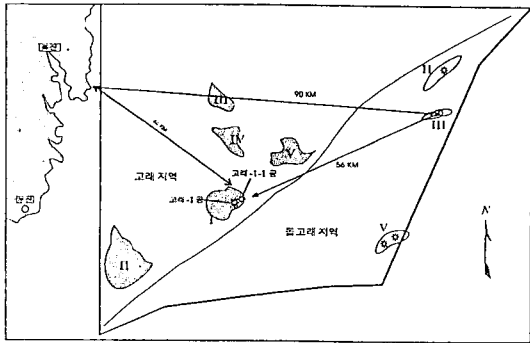


Fig. 1. Location of gas fields in the 6-1 mining block in the south of East Sea of Korea.

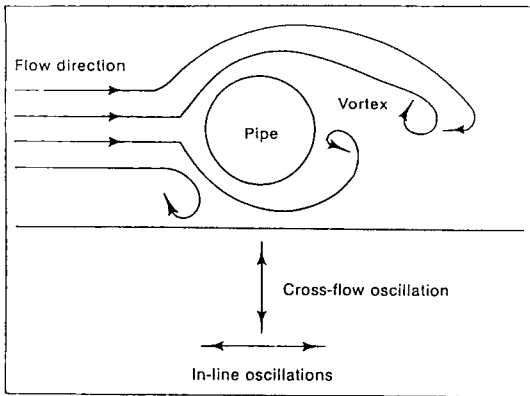


Fig. 2. Vortex-induced oscillations (Mousselli, 1981).

인이 피로로 인한 파괴가 발생하지 않도록 최대 허용 길이를 결정하는 것이다.

3.1 자유경간의 고유진동수와 와동방출의 진동수와의 관계

자유경간의 진동을 최소화 하기 위해서는 와동방출의 진동수와 자유경간의 고유진동수의 차이를 크게 하는 것이다. 먼저 와동방출의 진동수는 다음과 같다.

$$f_s = \frac{SV}{D} \tag{1}$$

여기서 S 는 Strouhal 수, V 는 유동 속도이며, D 는 피복세의 두께를 포함한 파이프라인의 외경이다.

위에서 Strouhal 수는 Reynolds 수 또는 항력계수와와의 관계를 이용해서 구할 수 있다. 그러나 실제로 대부분의 파이프라인 설계에서는 Strouhal 수의 값으로 0.2를 많이 사용한다 (Mousselli, 1981).

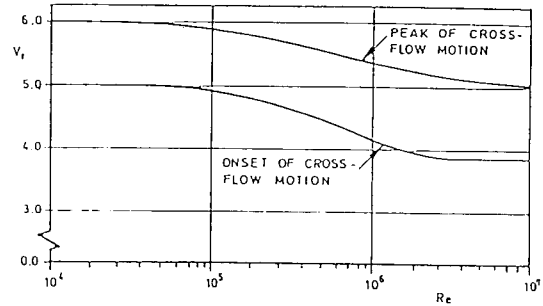


Fig. 3. Reduced velocity vs. Reynolds number (DnV, 1981).

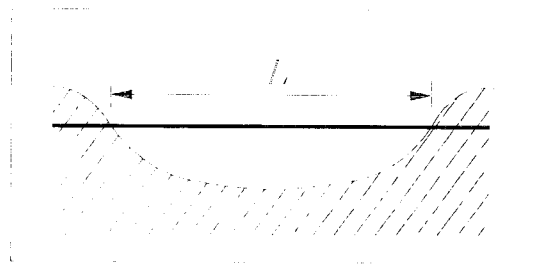


Fig. 4. Free span configuration of a pipeline.

한편, 와동방출로 인한 자유경간의 진동은 다음에 정의되는 감소 속도(reduced velocity), V_r 의 함수이다.

$$V_r = \frac{V}{f_n D} \tag{2}$$

여기서 f_n : 자유경간의 고유진동수이다.

유체의 흐름에 의한 자유경간의 진동은 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 즉, 유동방향(in-line)의 진동과 유동에 직각방향(cross-flow)의 진동이 있다 (그림 2). 이 중에서 유동에 직각방향인 진동이 파이프라인의 피로파괴에 주된 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 파이프라인의 동적 자유경간 설계에 고려된다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 유동 속도가 증가하여 감소 속도의 값이 5 정도가 되면, 자유경간의 고유진동수가 와동방출 진동수와 같게 되어 공진에 의한 파괴가 예상된다. 따라서 유동에 직각방향인 진동의 발생을 최대한 억제하기 위해서 일반적으로 감소속도를 3.5 이하로 유지한다 (DnV, 1981). 이 조건을 식 (1)에 적용하고 식 (2)를 이용하면 와동방출 진동수와 자유경간 고유진동수와의 관계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

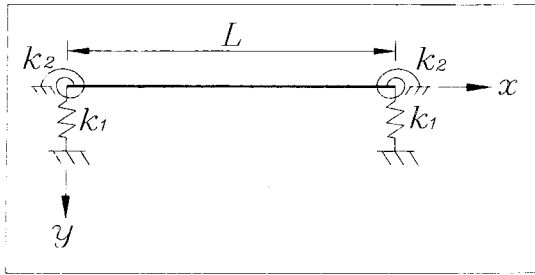


Fig. 5. Model of free span beam on elastic foundations.

$$f_n \geq \frac{f_s}{3.5S} \quad (3)$$

식 (3)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 자유경간의 고유진동수는 1차 진동모드만 고려하고, 식 (1)과 (3)으로부터 다음의 고유 각진동수를 얻을 수 있다.

$$\omega_1 = \frac{2\pi V}{3.5D} \quad (4)$$

3.2 자유경간의 허용길이

일반적으로 파이프라인의 자유경간은 그림 4와 같이 부재 주변의 탄성기초에 의해 구속되는데, 이때의 탄성기초는 그림 5와 같이 자유경간 끝단에서의 선형 및 회전 스프링으로 모델화 할 수 있다. 만일 기초의 탄성계수(elastic modulus)가 $k(N/m^2)$ 이고, 파이프라인의 굽힘강성이 EI 라면 등가의 스프링 강성, λ_H 는 다음 식으로부터 구할 수 있다 (Hetenyi, 1946).

$$\lambda_H = \left(\frac{k}{4EI}\right)^{0.25} \quad (5)$$

또한 선형 스프링강성 k_1 과 회전 스프링강성 k_2 는 위에서 구한 λ_H 와 k 를 이용해서 다음과 같이 들 수 있다.

$$\text{선형 스프링강성: } k_1 = k/(2\lambda_H) \quad (6)$$

$$\text{회전 스프링강성: } k_2 = k/(4\lambda_H^3) \quad (7)$$

파이프라인의 자유경간이 그림 5와 같이 모델링 되었을 때, 이 시스템의 동적운동 지배방정식은 다음과

같다.

$$\frac{d^4 y}{dx^4} - \lambda^4 y = 0 \quad (8)$$

$$\lambda = \left[\frac{M\omega_n^2}{EI}\right]^{0.25} \quad (9)$$

여기서 M = 부가질량을 포함한 파이프라인의 단위 길이당 유효질량 (kg/m), EI = 파이프라인의 굽힘강성 ($N \cdot m^2$)이며 ω_n = 자유경간의 고유 각진동수 (rad/sec)이다.

미분방정식 (8)의 일반해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = A \sin \lambda x + B \cos \lambda x + C \sinh \lambda x + D \cosh \lambda x \quad (10)$$

여기서 A, B, C, D 는 경계조건을 이용해서 결정되는 임의의 상수이다.

그림 5와 같은 자유경간의 진동모드는 부재의 중앙을 기점으로 해서 대칭모드와 비대칭모드로 나눌 수 있는데, 앞 절에서 언급한 바와 같이 와동방출 진동수와 관계되는 자유경간의 진동수는 1차 진동모드에 대한 고유진동수이고, 자유경간의 1차 진동모드는 대칭으로서 경계조건은 다음과 같다.

$$x = 0 \text{에서 } EI \frac{d^3 y}{dx^3} = -k_1 y_0 \quad (11)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = k_2 \frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} \quad (12)$$

$$x = \frac{L}{2} \text{에서 } \frac{dy}{dx} = 0 \quad (13)$$

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} = 0 \quad (14)$$

먼저 경계조건식 (13)과 (14)를 식(10)에 대입함으로써 아래의 관계식을 얻을 수 있다.

$$A = B \cdot \tan \frac{\lambda L}{2} \quad (15)$$

$$C = -D \cdot \tanh \frac{\lambda L}{2} \quad (16)$$

이를 다시 식 (10)에 대입한 후에 경계조건식 (11)과 (12)를 이용하면 다음과 같은 두 식을 얻을 수 있다.

$$B \left[\tan\left(\frac{\lambda L}{2}\right) - \frac{k_1}{EI\lambda^3} \right] + D \left[\tanh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) - \frac{k_1}{EI\lambda^3} \right] = 0 \quad (17)$$

$$B\left[1 + \frac{k_2}{EI\lambda} \tan\left(\frac{\lambda L}{2}\right)\right] - D\left[1 + \frac{k_2}{EI\lambda} \tanh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)\right] = 0 \quad (18)$$

여기서 다음과 같은 무차원 변수를 도입하고,

$$\alpha = \frac{k}{M\omega_n^2} \quad (19)$$

$$\theta = \lambda L \quad (20)$$

식 (17)과 (18)에서 B와 D를 소거하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & [\sqrt{2}\sin(\frac{\theta}{2}) - \alpha^{3/4}\cos(\frac{\theta}{2})] \cdot [\sqrt{2}\cosh(\frac{\theta}{2}) + \alpha^{1/4} \\ & \sinh(\frac{\theta}{2})] + [\sqrt{2}\sinh(\frac{\theta}{2}) - \alpha^{3/4}\cosh(\frac{\theta}{2})] \cdot \\ & [\sqrt{2}\cos(\frac{\theta}{2}) + \alpha^{1/4}\sin(\frac{\theta}{2})] = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

한편 자유경간의 양단이 고정지지 또는 단순지지일 때와 같이 이미 잘 알려진 경계조건에 대해서 적용해 보면 다음과 같다. 먼저 양단이 고정지지일 때의 경계 조건은 다음과 같고,

$$x=0; y=0, \frac{dy}{dx} = 0 \quad (22)$$

$$x = \frac{L}{2}; \frac{dy}{dx} = 0, \frac{d^3y}{dx^3} = 0 \quad (23)$$

양단이 단순지지일 때의 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0; y=0, \frac{d^2y}{dx^2} = 0 \quad (24)$$

$$x = \frac{L}{2}; \frac{dy}{dx} = 0, \frac{d^3y}{dx^3} = 0 \quad (25)$$

위의 경계조건을 식 (10)에 대입하여 다음의 두 방정식을 얻을 수 있으며 방정식을 만족하는 각각의 γ 값을 얻을 수 있다.

$$[\text{양단 고정지지}] \sin\frac{\theta}{2} + \cos\frac{\theta}{2} = 0, \theta = 4.712 \quad (26)$$

$$[\text{양단 단순지지}] \cos\frac{\theta}{2} = 0, \theta = \pi \quad (27)$$

그림 6은 식 (21)을 만족하는 α 와 γ 의 관계를 나타내며 양단의 경계조건이 고정 또는 단순지지인 경우가 주어진다. 그림 6을 이용하면 여러 가지 지반상태

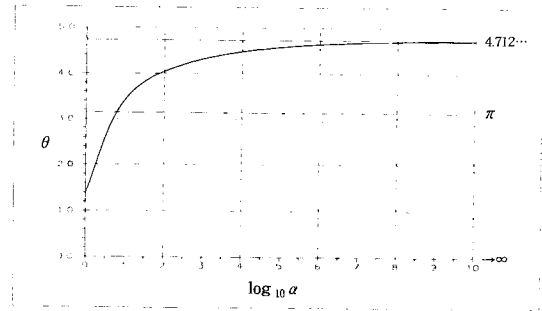


Fig. 6. Non-dimensionalized allowable span length vs. rigidity of boundary conditions.

와 파이프라인 단면에 따른 자유경간의 허용길이를 쉽게 구할 수 있다. 즉, 어떤 지반의 특성값과 파이프라인의 단면치가 주어지면 그에 해당하는 γ 의 값을 그림 6에서 찾을 수 있고, 식 (9)으로부터 λ 값을 얻을 수 있다. 이들 값을 식 (20)으로부터 유도된 아래 식에 대입함으로써 자유경간의 허용길이를 쉽게 구할 수 있다.

$$L = \frac{\theta}{\lambda} \quad (28)$$

그림 6에서 알 수 있듯이 지반의 강도가 커질수록 자유경간의 허용길이가 증가됨을 알 수 있고 반대로 강도가 약할수록 허용길이가 짧아짐을 알 수 있다.

4. 동남해역 천연가스전에서의 적용

본 장에서는 동남해역 천연가스전의 천연가스 생산에 대비하여 이 지역에 타당한 해저 파이프라인의 동적 자유경간 허용길이를 산출해 보았다. 계산에 사용된 파이프라인의 제원은 표 2와 같다.

동남해역 천연가스전의 제반 환경자료가 표 1과 같을 때, 선형파 이론을 이용하면 해저 바닥에서의 수평 방향의 파유속은 0.14 m/sec 이다. 또한 해저 파이프라인

표 2. 파이프라인의 제원

구분	내용
파이프의 재질	강철
파이프의 탄성계수, E	2.1×10^{11} N/m ²
파이프의 밀도, ρ_s	7850 kg/m ³
파이프라인의 외경, D	0.3048 m
파이프라인의 두께, t	0.01905 m
파이프의 단면적, A_s	1.71×10^{-2} m ²
파이프의 단면 이차모멘트, I	1.75×10^{-4} m ⁴

인의 진동은 파입자와 해류의 운동에 의해서 발생하므로, 자유경간에 작용하는 전체 유동속도(V)는 해저 바닥에서의 해류속도와 수평방향의 파유속을 더한 0.65 m/sec 가 된다. 해저 바닥에서의 유동속도가 이와 같을 때, 자유경간의 1차 진동모드에 대한 고유진동수(ω_1)는 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\omega_1 = 3.828 \text{ rad/sec}$$

한편 동남해역 천연가스전에 사용되는 파이프라인의 제원이 표 2와 같을 때, 자유경간의 동적해석에 필요한 파이프라인의 단위 길이당 유효질량은 다음과 같다.

$$M = \text{파이프 내부유체의 질량} + \text{파이프의 자체 질량} + \text{부가질량} = 220.61 \text{ kg/m}$$

위 계산에서 부가질량계수(C_m)는 1.0 을 사용하였다. ω_1 과 M 의 값이 위와 같을 때, 식 (9)를 이용하면 $\lambda = 0.097$ 을 얻을 수 있다.

동남해역의 지층 강도는 표 1에 명시한 바와 같이 중간 정도의 강도를 띠고 있다. 일반적으로 부드러운 실트 지반의 k 값은 약 10^6 N/m^2 정도이고, 견고한 사질토 지반의 k 값은 약 10^8 N/m^2 정도이므로, 동남해역의 지반은 k 값을 대략 10^7 N/m^2 정도로 간주하였다. k 값과 표 2, 식 (19)를 이용하면 α 는 3093 정도이고, 이때 γ 값은 그림 6으로부터 대략 4.4 정도가 됨을 알 수 있다. 그러므로 이 해역에서 자유경간의 동적 허용 길이는 식 (28)을 이용해서 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$L = \frac{\theta}{\lambda} \approx 45.36 \text{ m}$$

한편 자유경간의 양단이 고정지지와 단순지지일 때의 허용길이는 각각 식 (26)과 (27)을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$L_f = \frac{4.712}{0.097} \approx 48.58 \text{ m (고정지지)}$$

$$L_s = \frac{\pi}{0.097} \approx 32.39 \text{ m (단순지지)}$$

이 값들을 비교하면 서로간에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 해저 파이프라인의 불안정을 유발하

는데 주된 요소가 되는 동적 자유경간을 해석하여, 양단지반의 강도와 자유경간의 허용길이와의 상관 관계를 얻었다. 종래의 자유경간 허용길이 계산에서는 경간의 양단조건을 고정지지, 단순지지 또는 그 중간상태로 간주하여 근사적으로 계산해 왔으나, 본 논문을 통하여 보다 정확한 동적 자유경간의 허용길이를 쉽게 산출할 수 있다. 본 연구의 결과를 동남해역의 천연가스전에 설치 예정인 해저 파이프라인에 적용하여 허용 길이를 계산하였다.

謝 辭

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었기에 재단에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- 이 석우, 1992. 한국 근해 해상지, 집문당.
- Dawson, T.H., 1983. *Offshore Structural Engineering*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Det norske Veritas, 1981. Rules for Submarine Pipeline Systems.
- Hetenyi, M., 1946. *Beams on Elastic Foundations*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Hobbs, R.E., 1986. Influence of structural boundary conditions on pipeline free span dynamics, *Proceedings of the 3rd Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*, ASME, 3. Tokyo.
- Jacobsen, V. et al., 1984. Vibrations of offshore pipelines exposed to current and wave action, *Proceedings of the 3rd Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*, ASME, New York.
- Mousselli, A.H., 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*, Penn Well Publishing Company, Oklahoma.
- Tsahalis, D.T., 1983. The effect of seabottom proximity on the vortex-induced vibrations and fatigue life of offshore pipelines, *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 105.
- Tsahalis, D.T., 1984. Vortex-induced vibrations of a flexible cylinder near a plane boundary exposed to steady and wave-induced currents, *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 106.