

# 규칙파 작용 시 부유식 수중파이프라인 유체동역학 해석

김승준<sup>1</sup>·서지혜<sup>2</sup>·원덕희<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>조교수, 대전대학교, 건설방재공학과, <sup>2</sup>연구원, 한국해양과학기술원, 해양ICT융합연구센터, <sup>3</sup>선임연구원, 한국해양과학기술원, 해양ICT융합연구센터

# Hydrodynamic Analysis of Submerged Floating Pipeline under Regular Wave

Kim, Seung Jun<sup>1</sup>, Seo, Ji Hye<sup>2</sup>, Won, Deok Hee<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Daejeon, 34520, Korea
 <sup>2</sup>Research Scientist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, 49111, Korea
 <sup>3</sup>Senior Research Scientist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, 49111, Korea

**Abstract** - This paper presents a study of the hydrodynamic stability of a submerged floating pipeline (SFP) under regular waves. In general, the pipeline in water have been constructed as the seabed type using immersed method. But, according to the Northern Cyprus Water Supply Project completed in 2015, the pipeline was installed up to 1500m of water depths using a suspended method for the offshore crossing to ensure economic feasibility. This study investigates the behavior and response characteristics of the SFP with configurations such as buoyancy-weight ratio, a tendon anchoring method, and incidence angle of waves by finite element analysis based on the Cyprus Project case. The design parameters of the SFP were observed to have a great influence on its dynamic behavior. Because this SFP has small stiffness, it was greatly affected by the wave and flow conditions, and it was estimated that its dynamic behavior and the section force must be reviewed in the design stage.

Keywords - Submerged floating Pipeline, Structure, Regular wave, Hydrodynamic, Finite element analysis

## 1. 서 론

2015년 7월 터키(Turkey)에서는 북키프로스(North Cyprus)로 담수를 공급하기 위해 파이프라인을 지중해를 통해 설치하는 프로젝트가 완공되었다. "Peace water"라고 명명된 이 프로젝트를 통해 매년 물 부족으로 심각한 고통을 겪고 있는 키프로스섬은 총 7500만 ㎡의 물을 공급받고 있다. 터키 본토의 알라코프루 댐(Alakopru Dam)의 수자원을 키프로스섬 게시트 코이댐(Gecitkoy Dam)으로 이송하여 저장하는 본 프로젝트에

Note.-Discussion open until June 30, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 04, 2018; revised October 22, 2018; approved on November 01, 2018. Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

#### \*Corresponding author.

Tel. +82-51-664-3565 Fax. +82-51-405-9330 E-mail. thekeyone@kiost.ac.kr 서는 총 107 km 구간 중 약 80 km에 해당하는 수중구간에 부유 식 파이프라인을 이용하였다(Fig. 1.).



Fig. 1. Turkey-North Cyprus pipeline map<sup>[1]</sup>

1995년 터키 사업가 우즈야르가리(Wuzeyir Garih)에 의하 여 처음 제안된 본 프로젝트는 2012년 3월에 기초 설계가 이루어 진 후 2015년에 완공되었다. 기존방식의 수자원 이송 파이프라 인과는 달리 본 프로젝트에는 수중으로 이송하는 구간이 존재한 다. 이러한 수중 구간에 파이프라인을 설치하는 방법에는 해저에 착저시키는 침매 방식과 수중에 부유시켜 시공하는 방식이 있다. 터키와 키프러스 사이의 해협은 최대 수심이 1,282 m로 매우 깊 기에 해저 착저식을 채택할 경우 경제성이 확보되지 않는다. 이에 Fig. 2.와 같이 선박의 항행에 영향을 미치지 않고 풍파의 영향이 적은 수심 250 m에 부유식으로 수중파이프라인을 설치하여 물 을 이송하는 방법으로 설계하여 시공하였다<sup>[2]</sup>.



Fig. 2. Bathymetric profile<sup>[2]</sup>



Fig. 3. Installation method of submerged floating pipeline<sup>[2]</sup>

Fig. 3.은 수중파이프라인의 시공방법을 도시한 것으로, 총65 km 구간의 부유식 파이프라인을 지지하기 위하여 긴장재를 이용 하였다. 이 긴장재는 500 m 간격으로 배치되며, 수직기준으로 8.9도 가량 경사를 줌으로써 수평 지지력을 향상 시켰다.

이처럼 담수공급을 목적으로 하는 파이프라인 이외에도 전세 계적으로 에너지 수요에 대한 꾸준한 증가현상으로 인해 유류 및 가스 운반에 대한 수중파이프라인 설계 개념에 대한 연구가 진행 되고 있다<sup>[3],[4],[5]</sup>. 본 연구에서는 상기 터키 수중파이프라인 시례 를 기반으로 규칙파가 작용하였을 경우 수중파이프라인

336 한국강구조학회 논문집 제30권 제6호(통권 제157호) 2018년 12월

(Submerged Floating Pipeline, 이하 SFP)의 동적 거동 특성 을 분석하려고 한다. 이를 위해 범용프로그램 ABAQUS-AQUA<sup>[6]</sup>를 이용하였으며, 부력-자중비율(Buoyancy-Weight Ratio, 이하 BWR), 앵커링 형상, 수심 등의 변수를 선정하여 상 세 거동 특성을 분석하였다.

# 과랑 중 수중파이프라인의 유체-구조 동역학 해석

#### 2.1 수중 선요소의 지배미분 방정식 및 유체력

자중, 부력, 조류와 같은 정적 하중 및 파랑에 의한 동적 하중을 받는 SFP 함체 및 계류선의 지배미분방정식은 Garrett의 Slender rod 이론(Fig. 4.)<sup>[7]</sup>을 통해 구성 할 수 있다.

$$-(\vec{Br''})' + (\vec{\lambda r'})' + \vec{q} = \vec{mr}$$

$$\lambda = T - Bk^{2}$$

$$\frac{1}{2}(\vec{r} \cdot \vec{r} - 1) = \frac{T}{A_{l}E} \approx \frac{\lambda}{A_{l}E}$$
(1)

여기서, B= 김 강성(bending stiffness), T=인장력 (tensile force), k=곡률 (local curvature), m =단위 길이 당 질량 (mass per unit length),  $\vec{q} =$ 단위 길이 당 분포하중벡터 (distributed force on the rod per unit length),  $\lambda =$ 라그랑 지 곱수(Lagrange multiplier), E=탄성 계수 (Young's modulus),  $A_t=$ 유효 단면적(effective sectional area).



Fig. 4. General definition of submerged slender rods

식 (1)에서 수중 선요소가 받는 하중은 단위 길이 당 분포하중 벡터로 고려 가능한데, 자중과 부력을 제외한 파랑 및 조류에 의 한 유체력은 Morison방정식을 통해 관성력 (inertia force) 및 항력 (drag force)의 항으로 식 (2)와 같이 적용 가능하다.

$$q_{n} = C_{I} \rho A_{e} v_{n}^{\dagger} + C_{D} \frac{1}{2} \rho D |v_{nr}| v_{nr} + C_{m} \rho A_{e} r_{n}^{\dagger}$$
(2)

여기서,  $C_I$ ,  $C_D$ , and  $C_m$ =관성, 항력, 부가질량계수 (inertia, drag, and added mass coefficient),  $v_n$ ,  $v_{nr}$ , and  $r_n$ =법선방 향 유체 가속도, 수직 상대 속도, 수직 구조물 가속도(normal fluid acceleration, normal relative velocity, and normal structural acceleration),  $\rho$ , D,  $A_e$ =유체 밀도, 외경, 단면적 (fluid density, outer diameter, and outer cross sectional area).

#### 2.2 파랑 정의 - 규칙파 (regular waves)

SFP에 작용하는 규칙파는 포텐셜 이론(wave potential theory)에 의해 진행 파(propagating wave)로써 정의할 수 있다. 이 이론을 통하여 특정 주기 및 진폭을 갖는 규칙 파랑 작용 시자유수면 이하 임의위치에서의 물 입자의 운동을 정의할 수 있고, 이를 식 (2)에 적용하면 시간에 따른 특정 위치의 실린더 형 구조물에 작용하는 유체력을 계산할 수 있다<sup>8</sup>.

$$\eta(x,t) = a\cos(kx - \omega t) \tag{3}$$

$$\Phi = \frac{\omega}{k} a \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$

$$= \frac{g}{\omega} a \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$
(4)

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$
 (wave dispersion relation) (5)

$$u_{x} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \omega a \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \qquad (6)$$

$$u_{z} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \omega a \frac{\sinh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \tag{7}$$

여기서,  $\eta(x,t)$ =시간 t 와 수평좌표 x 지점에서의 자유수면 의 높이(surface elevation), k=파수 (wave number),  $\omega$ =파의 각주파수(angular wave frequency), g=중력가속도(gravity acceleration),  $\Phi$ =Airy파의 속도 포텐셜 (wave velocity potential),  $u_x, u_z$ =x, z 방향에 대한 물 입자의 속도.

# 수중파이프라인 주요 설계 인자에 따른 부유 운동 및 긴장재 장력 변동 특성

본 연구에서는 실제 모델 65km 중에 Fig. 5.와 같이 임의로 길 이 2.5km, 직경 1.48m의 SFP 단위모델을 설정하여 규칙파랑에 대한 유체 동역학적 특성을 해석적으로 분석하였다. 본 해석연구 에서는 SFP의 부력-자중비율(BWR), 긴장재의 배치형상 (tendon anchoring method), SFP 설치 수심(clearance depth), 규칙파의 입사각(incidence angle of wave)에 대한 매 개변수연구를 통해 구조물의 주요 기하학적 특성이 파랑하중에 의해 SFP 동적거동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 고 려한 해석 모델의 물성치 및 환경 조건은 Table 1과 같다.



Fig. 5. General configuration of the SFP model

Parameters	Values
1. Environmental conditions	
Water depth (h, m)	1282
Wave period (T, sec)	10.0
Wave Height(H, m)	8.4
2. For Pipe	
Outer diameter (m)	1.48
Wall thickness (m)	0.08
Elastic modulus (GPa)	0.25
Density(kg/m <sup>3</sup> )	960
Drag/added mass coefficient	1.2/1.0
Draft (m)	50.0, 250.0
3. Hollow section of tendon	
Outer diameter/thickness (m)	0.139/0.10
Elastic modulus (GPa)	210.0
Minimum yield stress (MPa)	482.6(API X70)
Minimum ultimate stress (MPa)	565.4(API X70)
Drag/added mass coefficient	1.2/1.0
Tether spacing (m)	500.0

 Table 1. Environmental conditions and main properties of the considered SFP models

본 해석 연구는 ABAQUS V6.14<sup>60</sup>를 사용하였다. Fig. 5.(b) 와 같이 파이프 및 긴장재는 3차원 보요소 및 트러스요소를 사용 하여 모사하였고, 긴장재에는 "No compression" 옵션을 사용 하여 압축력에 의한 긴장재 좌굴효과를 배제하였다. 파이프와 긴 장재는 Fig. 5.(a)와 같이 긴장재 연결위치를 고려하여 MPC (Multi-Point Constraint) 옵션을 통해 연결조건을 부여하였다. 모든 긴장재 최하단부는 석션, 중력식 기초 등에 고정되어 있다고 가정하여 힌지조건을 경계조건으로 부여하였다. 또한, SFP의 양 단 엔드 경계조건은 연안과 연결되기에 고정되어있다고 가정하 였다.

SFP가 받는 유체력은 ABAQUS- AQUA를 통해 정의하였다. ABAQUS-AQUA는 특정 수심을 갖는 유체장 및 파랑에 대해 파 포텐셜 이론에 입각하여 정의할 수 있는데, 이를 통해 Table 1에 제시된 특정 주기 및 최대파고를 갖는 선형파에 대한 시간이력 유 체-구조동역학 해석을 수행할 수 있다.

해석은 두 단계 해석 (2-step analysis)으로 진행되는데, 구조 물이 받는 정적 하중 (구조물의 자중 및 부력)에 대한 해석 (first step) 이후 파랑에 의한 동적 해석 (second step, Implicit dynamic analysis)의 순으로 수행되었다. 규칙파에 의한 시간 이력해석은 총 600.0 초 (0~200.0초 : ramp-up 구간) 동안 수 행되어 구조물의 동적 응답을 분석하였다. 또한 본 SFP는 수중터 널 및 해양구조물과는 다르게 파이프가 Table 1과 같이 플라스 틱으로 되어 있기 때문에 강성이 작으며, Fig. 3.과 같이 아치형태 로 배치되기 때문에 파이프와 긴장재의 거동을 분리하여 분석하 는 것이 필요할 것으로 판단된다. 이에 Fig. 5.(b)에 나타낸바와 같이 파이프의 중간부(Point A)와 긴장재의 최상단부(Point B) 를 분석 포인트로 설정하였다.

#### 3.1 부력-자중 비율(BWR)

본 시스템에서는 부유체를 긴장재와 파이프의 연결부에 설치 하는 방법으로 부유력을 조절하였다. 부력-자중비율(BWR)을 1.05~1.20의 범위에서 4단계로 변수를 바꾸어 가면서 SFP의 거 동 특성을 분석하였다. 이 때 분석 대상 SFP 설치 위치 (clearance depth)는 수심 50m이다.





(b) Heave at Point B











먼저 Fig. 6.(a)~(c)와 같이 Point B의 파랑에 대한 동적 변형 을 분석하였다. Fig. 6.(a)를 살펴보면, BWR이 증가됨에 따라서 긴장재의 수평방향 좌우동요(sway)가 감소하는 것으로 나타났으 며 이는 부력이 증가하면서 초기장력이 증가하였기 때문이라고 판단된다. 자중보다 부력이 더 크도록 설계된 SFP에서 부력과 자 중의 차이는 긴장재의 초기 장력을 결정하고, 이 후 SFP에 동적 하중이 작용하면 운동이 발생하여 긴장재 장력 변화가 야기된다 <sup>[9]</sup>. 이러한 초기장력의 증가는 Fig. 7.에서 확인할 수 있는데, BWR이 증가할수록 긴장재의 응력이 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 동일한 외력의 작용할 경우 부력이 질량에 비하여 상대적으 로 커지가 때문에 상향력이 발생하게 된다. 이 때의 상향력은 Fig. 6.(b)에서 보는 바와 같이 초기의 수직변위를 증가시켜 초기장력 을 크게 만들어 주면서 SFP의 변형을 제어하게 되는 것으로 나타 났다. Fig. 6.(c)는 BWR에 따른 절대최대변위를 나타낸 것으로, SFP 접선방향의 변위와 수직방향상하동요(heave) 변위는 큰 차 이가 없으나 BWR이 증가함에 따라서 수평방향 변위가 감소하는 것으로 나타났다.

초기 SFP는 수직방향 14m의 아치형태로 배치되어 있기 때문 에 기본적으로 변형이 많이 발생하도록 되어 있는 구조이다. Fig. 8.은 파이프의 변형을 나타낸 것으로서 Point A 위치에서의 수평 및 수직 변위를 나타낸 것이다. 수평으로는 Fig. 8.(a)와 같이 약 4~8m의 변위가 발생하며, 수직으로는 Fig. 8.(b)에서 보는 바와 같이 25m의 수직 처짐이 발생하는 것으로 나타났다. 본 SFP는 초기 형상 대비 28m 까지 처짐이 발생할 수 있기 때문에 Fig. 8.(b)에서 나타난 처짐은 최대로 발생한 것으로 판단된다.





#### 3.2 긴장재 배치 방법

SFP는 긴장재의 앵커링 배치 방법에 따라서 동적 거동 특성이 달라진다. 본 절에서는 Fig. 9.와 같이 3가지 앵커링 타입에 대해

서 동적 거동 특성을 분석하였다. 앵커링 Shape 1의 경우에는 SFP를 1개의 수직 긴장재가 고정시켜주며, Shape 2는 2개의 수 직 긴장재로 고정된다. Shape 3은 8.9도 각도를 가지는 사선으 로 배치되는 형식이다. 이 때 SFP 설치 위치는 50m, BWR 1.2, 그리고 Table 1의 환경 조건을 파랑조건으로 고려하여 분석하였 다.



Fig. 9. Anchoring method

Fig. 10.(a)~(c)는 각각 긴장재의 배치 방법에 따른 긴장재의 좌우동요, 상하동요, 그리고 절대 최대변형을 나타낸 것으로, 앵 커링 Shape 2가 가장 큰 수평 및 수직 변형을 보이는 것으로 나타 났다. 일반적으로 Shape 1이 Shape 2보다 변형이 크게 나타나 야하지만, 본 해석 모델 조건에서는 변형이 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. 이는 동일한 BWR 1.2 조건에서 긴장재 1개로 상향력 을 지지하기 때문에 초기장력이 Fig. 11.과 같이 약 2배 이상 크 게 작용함으로 인하여 수평변위가 Fig. 10.(a)와 같이 제어되는 것으로 나타났다. 또한, Fig 10.(c)에서 보이는 바와 같이 사선으 로 배치한 Shape 3이 수평 및 수직 변위를 가장 잘 제어하며 가장 우수한 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.



(a) Sway at Point B



(c) Absolute maximum displacement at Point B

**Fig. 10.** Tendon motion of the SFP according to the anchoring type (BWR = 1.2, H = 8.4m, T = 10s, clearance depth = 50m)

Fig. 11.은 긴장재에 발생하는 응력을 나타낸 것으로서 BWR 에 의한 초기응력이 형성된 이후에, 파랑이 작용하여 규칙적인 응 력의 변화가 발생하는 것을 보여준다. 규칙파에 의해 긴장재에 발 생하는 응력은 재료물성치(Table 1)의 허용응력 482.6MPa에 비해 약 35% 수준인 것으로 나타나 안전측인 것으로 판단된다.



**Fig. 11.** Tendon stress of the SFP according to the anchoring type (BWR = 1.2, H = 8.4m, T = 10s, clearance depth = 50m)

Fig. 12.(a)~12.(b)는 파이프 스팬의 중간부인 Point A에서의 좌우동요 및 상하동요를 나타낸 것이다. 이 또한 Shape 3에서 최 소 변형을 보이며 변위 제어 성능이 가장 우수한 것으로 나타났 다.





#### 3.3 수중파이프라인 설치 수심

실제 터키-키프러스에 설치된 SFP는 수심 250m에 설치되었

다. 본 절에서는 SFP가 수심 50m에 설치되었을 때와 250m 설치 되었을 때의 거동 특성을 분석하였다. 공통조건으로는 BWR 1.2 와 Table 1의 환경 조건을 가진 파랑조건을 고려하였다.

긴장재 최상단부인 Point B의 변형을 분석한 결과 Fig. 13.과 같이 수심 250m에서는 파랑에 의한 수평 및 수직 변형이 거의 발 생하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 유 체입자는 파랑에 의하여 일반적으로 궤도운동을 하는 자유 수면 으로부터 수직으로 멀어질수록 파랑에 의한 영향이 매우 감소하 기 때문이다.





Fig. 14.는 SFP 흘수에 따른 긴장재의 응력을 나타낸 것으로 수심 50m에 설치된 SFP는 규칙파에 의하여 약 15MPa의 변동폭 을 보이지만 수심 250m에 설치되어 있는 SFP의 경우에는 약 68MPa정도에서 거의 변동이 발생하지 않는 것으로 나타나, 심 해에서는 파랑의 영향이 미미함이 확인되었다.



Fig. 14. Tendon stress of the SFP according to the clearance depth

Fig. 15.에는 Point A에서의 흘수에 따른 파이프의 변위를 도 시하였다. Fig. 15.(a)와 같이 수심 250m에 설치된 경우 긴장재 의 수평변위(Fig. 13.(a))의 경향과 유사하게 파랑에 의한 파이프 의 수평변위가 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 15.(b)는 파이프의 수직변위를 나타낸 것으로 수 심 250m에 설치된 파이프는 해석 초기에 부력으로 인하여 약 4m정도 상승한 상태를 지속적으로 유지하고 있는 반면에 수심 50m 해석 모델은 초기 부력에 의하여 상승한 후에 파랑에 의하여 큰 영향을 받으면서 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다.



(a) Sway at Point A



Fig. 15. Pipe motion of the SFP according to the clearance depth

Fig. 15.(c)는 Point A에서 파이프의 절대최대변위를 나타낸 것으로 수심에 따라서 큰 변위의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 터키-키프러스 SFP에 적용된 수심 250m가 합리적임 이 본 해석을 통하여 검증된 것을 확인할 수 있었다.

#### 3.4 파의 입사각



Fig. 16. The wave incidence angle for the SFP

실제 파랑의 주파향은 계절 및 해양환경조건에 따라서 변한다. 또한 구조물이 주파향에 대하여 항상 법선방향으로 건설될 수 없 기 때문에 대상지의 환경조건을 확인한 후 주파향의 입사각에 따 라서 거동 특성을 분석해야 그 현장에 해양환경조건을 고려한 설 계가 가능하다고 판단된다. 본 절에서는 Fig. 16.과 같이 SFP의 길이방향에 법선방향으로 파랑이 작용할 경우를 입사각 0로 설정 하여 30도 까지 4단계로 변화시켜가며 SFP의 거동 특성을 분석 하였다. 이때 다른 변수로는 BWR=1.2, H=8.4m, T=10s, clearance depth=50m 조건이 적용되었다.









Fig. 17.(a)~17.(d)는 각각 입사각에 따른 긴장재의 전후방향, 좌우방향, 상하방향 동요 및 최대 동적 변위를 나타낸 것이다. Fig. 17.(a)를 살펴보면, 입사각 0도와는 다르게 입사각 10도 및 20도에서 긴장재의 변위가 SFP의 접선방향으로 발생하는 것으 로나타났다. 이는 SFP의 비틀림을 유발할 수 있을 것으로 판단된 다. 또한 Fig. 17.(d)와 같이 절대최대변위를 비교해 보면 입사각 에 따라서 수평, 수직, 그리고 SFP의 접선방향 변위가 바뀌는 것 을 볼 수 있으며, 이는 설계 시 반드시 고려해야 될 사항인 것으로 판단된다.

본 해석 모델들이 모두 BWR이 1.2로 변위제어가 충분히 잘 된 상태이기 때문에 Fig. 17.(b), (c) 와 같이 큰 변형이 발생하지 않았다. 이러한 이유로 입사각에 따라 긴장재에 발생하는 응력 (Fig. 18.)은 거의 유사한 것으로 판단된다.



Fig. 18. Tendon stress of the SFP according to the incidence angle

이어 Fig. 19.(a)~19.(d)는 각각 Point A에서 파이프의 전후 방향, 좌우방향, 상하방향 동요 및 최대 동적 거동을 나타낸 것이 다. 먼저 SFP의 접선방향의 변위(Fig. 19.(a))를 확인해보면 입사 각이 0도일 때에는 변형이 거의 발생하지 않는 반면에 입사각이 증가함에 따라서 큰 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 파이 프에 발생하는 비틀림, 휨 등의 단면력에 큰 영향을 줄 것으로 판 단된다. 또한 수직변형은 Fig.19.(c)와 같이 입사각 10도와 0도 가 거의 유사한 거동을 나타내는 것으로 나타났다.







Fig. 19. Pipe motion of the SFP accorting to the incidence angle (BWR=1.2, H=8.4m, T=10s, clearance depth=50m)

### 4. 결 론

본 연구에서는 수중파이프라인에 작용하는 규칙파랑에 대한 유체 동역학적 특성을 해석적으로 분석하였다. 구조물의 주요 기 하학적 설계인자인 부력-자중비율(BWR), 긴장재의 배치형상, 설치 수심, 및 파의 입사각에 대한 매개변수연구를 통해 파랑하중 에 의한 파이프와 긴장재의 동적 거동을 분석하였다.

(1) 부력-자중 비율(BWR)

긴장재와 파이프의 연결부에 부유체를 설치하여 부유력을 조 절하는 방법으로 BWR을 1.05~1.20로 변화시켜가며 분석한 결 과, SFP의 BWR이 증가됨에 따라 긴장재의 초기장력이 비례적으 로 증가하기에 긴장재의 수평방향 좌우동요가 감소하였다. 또한, 파이프의 수평변위는 약 4~8m 이며, 최대 처짐은 약 25m 발생 하는 것으로 나타났다.

(2)긴장재 배치 방법

긴장재 배치 방법에 따른 동적거동 결과는 긴장재와 파이프 모 두 사선으로 배치한 Shape 3인 경우 수평 및 수직 변위를 가장 잘 제어하며 가장 우수한 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 또한, 규칙파에 의해 긴장재에 발생하는 응력은 긴장재 배치 형상에 따 라 최대 허용응력의 35% 수준인 것으로 나타나 안전측인 것으로 판단된다.

(3) SFP 설치 수심

SFP가 수심 50m에 설치되었을 때와 250m 설치되었을 때의 거동 특성을 분석한 결과, 긴장재와 파이프 모두 심해에서는 파랑 의 영향이 미미함이 확인되었다. (4) 파의 입사각

SFP의 길이방향에 법선방향으로 파랑이 작용할 경우를 입사 각 0로 설정하고 30도 까지 변화시켜가며 거동을 분석한 결과, 긴 장재의 변위가 입사각에 따라 SFP의 접선방향으로 발생하는 것 으로 나타나 비틀림에 대한 검토가 필요하다고 판단되며, 파이프 의 경우에도 SFP의 접선방향의 변위가 입사각이 0도일 때에는 변형이 거의 발생하지 않는 반면에 입사각이 증가함에 따라서 큰 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 파이프에 발생하는 비틀 림, 휨 등의 단면력에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

분석 결과 SFP는 매개변수에 따라 동적거동이 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. SFP는 수중터널과 같은 다른 수중구조물에 비 해강성이 작기 때문에 수면과 가까워져 파랑의 영향성이 커질 경 우에 많은 변형이 나타난다. 본 연구는 SFP가 설치될 실해역에 대 한 환경검토 시 견고한 개념설계에 적용 가능할 것으로 판단되며, 이를 위해 향후에는 이러한 주요설계인자에 대한 유체동역학적 거동특성을 바탕으로 단면력 검토는 물론 나아가 일방향 및 다방 향 불규칙파 조건에서 수중파이프라인의 거동특성분석이 필요하 다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기본 연구자 지원 사업(NRF-2018R1D1A1B07050335) 및 한국해양과학기술원 주요사업 (PE99631)의 지원에 의하여 수행된 연구입니다.

## 참고문헌(References)

- Google LLC (n.d.) Google Maps, https://www.google.com/ maps
- [2] Kruijt, N. (2003) Turkey-Cyprus Submerged Floating Freshwater Pipeline, Master's Thesis, Delft University of Tech-

nology, Netherlands.

- [3] Paulsen, G., Søreide, T.H., and Nielsen, F.G. (2000) Submerged Floating Pipeline in Deep Water, *Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, USA, pp.108-114.
- [4] Fyrileiv, O., Aamlid, O., Venås, A., and Collberg, L. (2013) Deepwater Pipelines - Status, Challenges and Future Trends, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment,* Institution of Mechanical Engineers, Vol.227, No.4, pp.381-395.
- [5] Yang, H., Wang, Z., and Xiao, F. (2017) Parametric Resonance of Submerged Floating Pipelines with Bi-Frequency Parametric and Vortex-induced Oscillations Excitations, *Ships and Offshore Structures*, Taylor & Francis, Vol.12, No.3, pp.395-403.
- [6] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014) Abaqus Analysis User's Manual, Ver. 6.14, DSS, USA.
- [7] Garrett, D.L. (1982) Dynamic Analysis of Slender Rods, Journal of Energy Resources Technology, ASME, Vol.104, No.4, pp.302-306.
- [8] 김승준, 박우선, 원덕희(2016) 유한요소해석을 통한 해중터 널의 유체동역학 해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 36권, 제6호, pp.955-967.

Kim, S., Park, W.-S., and Won, D.-H. (2016) Hydrodynamic Analysis of Submerged Floating Tunnel Structures by Finite Element Analysis, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.36, No.6, pp.955-967 (in Korean).

[9] 원덕희, 김승준(2017) 긴장재 느슨해짐에 따른 해중 터널의 동 적 불안정 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제 29권, 제6호, pp.401-410.

Won, D.H., and Kim, S. (2017) Dynamic Instability of Submerged Floating Tunnels Due to Tendon Slack, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No. 6, pp.401-410 (in Korean).

**9. 약:** 본 연구에서는 선형규칙파 내의 수중파이프라인의 유체동역학적 거동특성을 분석하였다. 일반적으로 수중파이프라인은 해저에 착 저시키는 침매방식으로 건설되어왔으나 2015년 완공된 터키-사이프러스간 파이프라인 프로젝트에서는 심해에서의 경제성 확보를 위해 부유식 수중파이프라인방식을 적용하여 시공한 사례가 있다. 이에 본 연구에서는 사이프러스 프로젝트의 사례를 바탕으로 부력-중량비, 긴장재 앵커 배 열 방식, 파이프라인 설치수심, 그리고 규칙파의 입사각을 주요 변수로 하여 수중파이프라인의 거동특성을 분석하였다. 그 결과 수중파이프라 인은 경계 및 하중조건에 따라서 많은 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 파이프라인의 강성이 작아 파랑 및 흐름조건에 큰 영향을 받기 때문 에 설계 시 동적 거동 및 단면력 검토가 필수적으로 필요하다고 판단된다.
 핵심용어: 수중파이프라인, 구조, 규칙파, 유체동역학, 유한요소해석