

## 해양심층수 취수관 부설을 위한 수치해석적 및 실험적 연구

정동호\* · 김현주\* · 김진하\* · 박한일\*\*

\*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

\*\*한국해양대학교 해양개발공학부

### Numerical and Experimental studies on pipeline laying for Deep Ocean Water

\*DONG-HO JUNG, \*HYOUN-JOO KIM, \*JIN-HA KIM, \*\*HAN-IL PARK

\*Ocean Development System Laboratory, KORDI / KRISO

\*\*Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University

KEY WORDS : Deep Ocean Water 해양심층수, Numerical and experimental study 수치해석적 및 실험적 연구,  
Pipeline laying 파이프라인 부설, Finite Difference Method 유한차분법

ABSTRACT : Numerical and experimental studies on pipeline laying for intake Deep Ocean Water are carried out. In the numerical study, an implicit finite difference algorithm is employed for three-dimensional pipe equations. Fluid non-linearity and bending stiffness are considered and solved by Newton-Raphson iteration. Seabed is modeled as elastic foundation with linear spring and damper. Top tension and general configuration of pipeline at a depth are predicted. It is found that control for tension to prevent being large curvature of pipeline is needed on the steep seabed and, it should be considered 23.5 ton of tension at a top of pipe on the process of pipeline laying at 400m of water depth. The largest top tension of pipe on condition of the beam sea during pipe laying is shown from the experiment. The results of this study can be contributed to the design of pipeline laying for upwelling deep ocean water.

#### 1. 서 론

최근 인류는 식량, 식수, 그리고 각종 에너지 문제에 직면하여 이를 해결하기 위한 다양한 방안들을 모색하고 있다. 또한 난개발로 인하여 주변 환경은 오염되어 가고 있기 때문에 환경보전적인 개발이 요구되고 있다. 이에 해양심층수는 순환재생형 해수자원으로 우리 인류가 겪고 있는 많은 문제점에 대한 해결책을 제시해 줄 것으로 기대된다 [1].

한국해양연구원 해양심층수연구센터에서는 우리나라 동해안에 부존하는 해양심층수를 개발하기 위하여 2001년

부터 이에 대한 연구 및 개발을 수행해 오고 있다. 우리나라 동해안에 존재하는 해양심층수는 수심 200m 이상에서 청정성, 저온성, 부영양성, 그리고 안정성의 특징을 가지는 것으로 조사되고 있기 때문에, 동해심층수를 개발한다면 우리나라 국민들에게 다양한 종류의 해양심층수 상품을 제공할 수 있을 것이다. 현재 한국해양연구원에서는 해양심층수의 이용, 개발, 및 관리 분야에 지속적인 연구를 수행해 오고 있다. 2004년 9월에는 해양심층수공통연구센터 건물 착공식을 수행하였으며, 2005년 5월 완공을 목표로 하고 있다. 이와 동시에 2005년 5월까지 해양심층수 취수를 위한 해양공사도 완공할 계획으로 내년부터는 해양심층수에 대한 본격적인 연구 및 개발이 가능할 것으로 기대된다.

제1저자 정동호 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7518 dhjung@kriso.re.kr

해양심층수 개발은 육상형과 해상형으로 구분되는데, 현재 강원도 고성군 죽왕면 오호리 일대에 육상형 개발을 계획 중에 있다. 육상형 개발은 파이프라인을 해저면에 부설하여 설치된 해저파이프라인을 통하여 해양심층수를 취수하는 방식이다. 육상형 방식은 해양심층수 자원이 육지로부터 약 5km 이내에 위치하는 경우에 경제적인 방식인데, 개발 예정지는 육지로부터 약 3km 이내에 해양심층수 자원이 부존하는 것을 조사되었다.

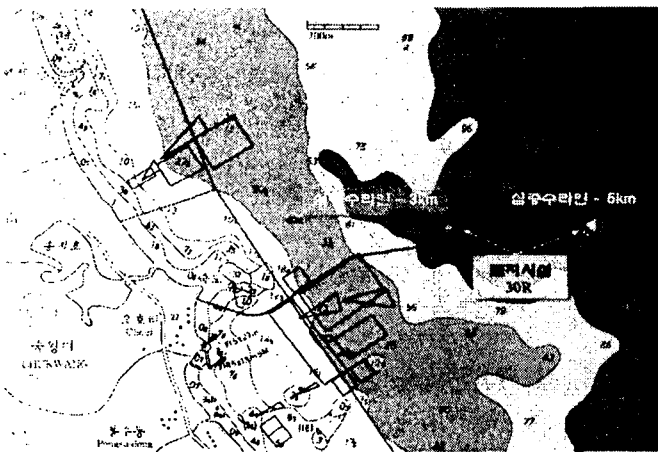


Fig. 1 Subsea pipeline route at Kosung

현재 한국해양연구원에서는 육상으로부터 3km 지점의 수심 350m, 5km 지점의 수심 500m에서 해양심층수를 취수할 목적으로, 육지로부터 약 5km 지점까지 파이프라인을 부설할 계획을 가지고 있다. Fig. 1에서는 우리나라 개발 예정지에 대한 파이프라인 설치 예정지를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 설치 예정지역은 해저경사가 급격하게 변하는 지역이 나타나고 있기 때문에, 파이프라인을 부설할 때 해저지반 환경조건을 잘 고려해야 할 것이다. 또한 파랑과 조류에 의해서 파이프는 외력하중을 받게 되며, 부설선박에 매달려 있는 파이프는 부설선박의 거동에 의해서 가진되게 된다. 따라서, 파이프라인을 안전하게 부설하기 위해서는 부설 작업 이전에 해양환경 하중과 다양한 상황들을 적절히 고려해서 파이프라인에 대한 동적해석을 수행하여 파이프의 안정성을 확보해야 한다.

본 연구에서는 해양심층수 취수용 파이프라인을 부설하는 과정에 대한 부설 시뮬레이션 및 실험적 연구를 수행한다. 수치 시뮬레이션에서는 파이프에 대한 동적지배방정식을 세워서 수치해석적 방법을 적용하여 이를 풀이하며, 예제해석을 통하여 특정 수심에서 소요되는 파이프의 형상과 장력을 추정한다. 파이프 부설 경로에 대해서는 지반 매쉬를 생성하고, 파이프가 지반과 접촉하는 지점에 대해

서는 탄성기초로 표현하였다. 수리모형 실험에서는 비선형 파랑 조건에서 입사파에 따른 장력 발생 경향을 살펴본다.

## 2. 해양심층수 취수용 파이프

해양심층수를 취수하기 위한 파이프는 구조적으로 안정해야 함은 물론이고, 양질의 해양심층수를 제공할 수 있는 기능성 배관이어야 한다. 따라서 일반적으로 석유나 가스를 운반하는 강관을 사용할 수 없다.

강재 파이프가 강도 면에서 아주 뛰어난 장점이 있지만, 파이프의 산화 및 부식에 의한 해양심층수의 오염이 발생할 수 있으므로 강재를 선택하기에는 많은 무리가 있다. 따라서 양질의 해양심층수를 얻을 수 있는 HDPE 재질의 관을 사용해야 할 것이다. HDPE관은 비중이 1보다 작아서 해수 중에서 물 위에 떠 오르게 되므로, 별도의 중량체를 설치해서 안정성을 취해야 한다 (Fig. 2).

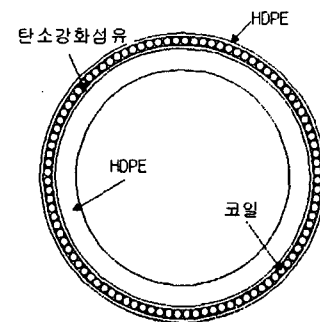


Fig. 2 Cross-section of pipe

현재 고려되는 복합관은 HDPE-탄소강화섬유-코일-HDPE로 구성되며, 탄소강화섬유는 축방향 하중에 대하여 강도를 증가시키기 위해서 사용된다. 또한 코일은 파이프 전체의 중량을 증가시키기 위해서 사용된다.

## 3. 부설 시뮬레이션 개발

### 3.1 라이저의 구조해석

본 절에서는 해양심층수를 취수하기 위한 유연라이저의 구조해석에 대하여 다룬다.

#### 가. 파이프 지배방정식

지배방정식은 뉴톤의 제2법칙, 모멘트 평형, 적합조건, 그리고 국부적 곡률관계를 이용한다 [2]. 아래의 식은 미소요소의 국부좌표계  $t, n, b$  상에서 결정되어진다.

$$m(\dot{v}_t + v_b\dot{\theta} - v_n\dot{\phi}\cos\theta) = T + S_b\Omega_n - S_n\Omega_b - w_o\cos\phi\cos\theta + R,$$

$$m(\ddot{v}_n + \dot{\phi}(v_n \cos \theta + v_b \sin \theta)) + m_a \ddot{v}_n = S_n' + \Omega_b(T + S_b \tan \theta) + w_o \sin \phi 2 + 0.25\pi d^2 \rho_w C_M \dot{u}_n + R_n$$

$$m(\ddot{v}_b - v_n \dot{\phi} \sin \theta - v_b \ddot{\theta}) + m_a \ddot{v}_b = S_b' - S_n \Omega_b \tan \theta - T \Omega_n - w_o \cos \phi \sin \theta + 0.25\pi d^2 \rho_w C_M \dot{u}_b + R_b$$

$$EI \Omega_n' = -EI \Omega_b^2 \tan \theta + S_b(1 + T/EA)^3$$

$$EI \Omega_b' = EI \Omega_n \Omega_b \tan \theta - S_n(1 + T/EA)^3$$

$$v_i' + \Omega_n v_b - \Omega_b v_n = T/EA$$

$$v_n' + \Omega_b(v_i + v_b \tan \theta) = (1 + T/EA) \dot{\phi} \cos \theta$$

$$v_b' - \Omega_b v_n \tan \theta - \Omega_n v_i = -(1 + T/EA) \dot{\theta}$$

$$\Omega_n = \theta'$$

$$\Omega_b = \phi' \cos \theta$$

(1)

여기서, 점('):  $t$ 의 미분, 프라임('): 공간  $s$ 의 미분

$T$  : 케이블의 유효장력

$d$  : 케이블의 직경

$\theta, \phi$  : 회전각도

$S_n, S_b$  :  $n, b$  방향의 전단력

$u_n, u_b$  :  $n, b$  방향의 유체속도 성분

$\Omega_n, \Omega_b$  :  $n, b$  방향의 곡률

$v_i, v_n, v_b$  : 각각  $t, n, b$  방향의 케이블 속도 성분

#### 나. 해저지반접촉 모델링

수치모델링에서 해저지반은 탄성기초로 고려되어, 해저지반과 접촉하는 부분은 질량-스프링-댐퍼에 의한 단순한 모델로 해결하였다. 파이프의 연직 좌표값이 해저지반 좌표값 보다 작은 경우에는 지반강성과 감쇠력이 작용하는 것으로 고려하였다. 지반스프링( $k_c$ )은 사전에 일정량의 지반 관입( $\delta_b$ )을 결정함으로써 다음의 관계식을 사용하였다.

$$w_e ds = k_c \delta_b \quad (2)$$

이 때 지반강성에 의한 반력은 파이프의 자중보다 작도록 지정하였다.

취수관 지반 접촉 순간의 충격적 거동을 줄이기 위하여 감쇠계수( $c$ )를 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$c = \zeta c_c = 2 \zeta \sqrt{k_c m} \quad (3)$$

여기서,  $c_c$  : 임계감쇠계수

$\zeta$  : 감쇠상수

#### 다. 수치해석

총 10개의 지배방정식을 얻을 수 있으며 한 요소에 대해 미지변수는 총 10개가 된다. 지배방정식은 행렬로 표현하면 아래와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$[J] \vec{H}' = [K] \vec{H} + \vec{L} \quad (4)$$

여기서

$$\vec{H} = (T, S_n, S_b, v_i, v_n, v_b, \phi, \theta, \Omega_n, \Omega_b)^T$$

위의 행렬식은 수치해석적 방법을 적용하여 풀이되는데, 본 연구에서는 유한차분법(중앙차분법, 음해법)을 사용하였다. 지배방정식은 비선형으로 나타나는데, 비선형해를 구하기 위하여 뉴턴-랩슨 방법을 적용하였다.

### 3.2 예제해석 및 분석

본 절에서는 앞 절에서 설명한 수치해석적 방법을 적용하여 해저파이프라인 부설에 관한 시뮬레이션을 수행한다.

#### 가. 해저지반의 생성

거리에 따라서 수심이 변하는 해저지반을 표현하기 위하여 해저지반에 대한 메쉬(mesh) 작업을 수행하였다. 해저지반 메쉬를 위해서 먼저 특정 지점에 대한 기준점을 부과하였으며, 즉 임의의 어떤 거리에 대한 수심을 입력한 후 나머지 거리에 대해서는 거리에 대하여 수심이 선형적으로 변화한다고 가정하였다.

현재 해양심층수 취수 예정지역은 수심이 급변하는 지역이 존재하기 때문에 이 지역에 대하여 특별히 지반 표현이 될 수 있도록 지반 메쉬 작업을 수행하였다. 본 예제 해석에서는 길이 방향(x 좌표)에 따른 6개의 기준점을 잡고, 넓이 방향(y 좌표)에 대하여 5개의 기준점을 잡은 후에 나머지 지반 좌표를 얻었다. 각 X와 Y 방향에 대하여 메쉬 개수를 지정하여 기준점 간의 거리를 결정하였다.

Table 1 Reference points for seabed mesh

X \ Z	Z				
	0	0	0	0	0
2500	-50	-45	-50	-50	-70
3000	-200	-180	-200	-220	-210
3500	-350	-330	-370	-320	-380
5000	-500	-520	-500	-480	-550
6000	-550	-590	-550	-600	-650

#### 나. 해양환경조건

파이프를 부설하는 동안 발생하는 해양환경 조건은 Table 2에서 보여주고 있다. 비교적 해황이 잔잔한 조건을 선정하여 파이프 부설을 할 예정이기 때문에 유의파고 1m, 유의주기 6초의 조건을 적용하였다. 유속은 0.5m/s의 비교적 강한 조건을 적용하였다.

Table 2 Environment condition

Wave	Current	Soil
Hs : 1.0 m Ts : 6 s	0.5m/s (90 degree)	Sand

다. 파이프 특성치

현재 계획 중인 해양심층수 취수용 파이프는 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 4개의 층으로 구성된다. Table 3에서는 복합관의 특성치를 보여주고 있는데, 전체 외경은 170mm이며 파이프 전체의 비중은 2.5이다. 수중 중량은 약 134N/m 로써 해저면 위에 설치하였을 때 안정성을 갖도록 설계하였다.

라. 해석결과 분석

수치해석에서는 일정수심에서 파이프라인을 부설하는 동안에 예측되는 형상을 추정하였으며, 그 순간에 파이프가 부설선박에 연결된 지점에서 장력을 예측하는 문제에 초점을 두었다.

먼저 Table 1과 같이 해저면을 구성하면 수심 500m 지점까지 파이프라인을 부설하기 위해 소요되는 파이프의 길이를 알아보면, 파이프가 완전하게 직선으로 부설된다고 가정하면 총 5053m의 파이프가 소요된다. 파랑조건은 유의주기 6초, 유의파고 1m이며, 이 경우에 파이프라인은 부설선박의 끝단을 통해서 나간다고 가정하여 부설선박의 끝단에서 변위를 산출하여 이 변위를 파이프의 맨 윗 점에 강제가진으로 적용시켰다 (Fig. 3). 부설과정은 수심 50m 지점에서 시작하여 점점 수심이 깊은 곳으로 이동해 가는 것으로 가정하였다. Fig. 4에서는 수심 및 부설선박의 위치에 따른 파이프 전체의 형상을 보여주고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 모든 조건에서 파이프의 전체 형상은 카터너리(catenary)가 되도록 설정하였는데, 그 이유는 장력이 작게 작용하여 현수된 파이프의 길이가 너무 길면 파이프는 곡률이 크게 발생하게 된다. 특히 본 연구에서 다루는 동해안 설치지점과 같이 해저경사가 큰 지형에서 파이프의 곡률이 크게 되는 경우에는 굽힘에 의한 파이프의 안전성 문제가 발생할 수 있기 때문에 위와 같은 현상

을 잘 고려해야 한다. C5\* 조건은 수심 약 400m 지점에 대한 해석을 보여주고 있는데, C51은 현수된 파이프의 길이가 1074m로 해석되었다. 앞서 언급한 바와 같이 소요 예상되는 파이프의 길이가 5053m라면, 이 상태 부근에서 파이프의 끝단이 연결된다는 사실을 알 수 있다. 따라서 이 지점에서 발생하는 장력을 파이프의 최고 소요 장력으로 해석할 수 있으며, 최대 발생 장력인 22.5 ton을 파이프 설계 시에 반영해야 할 것으로 판단된다.

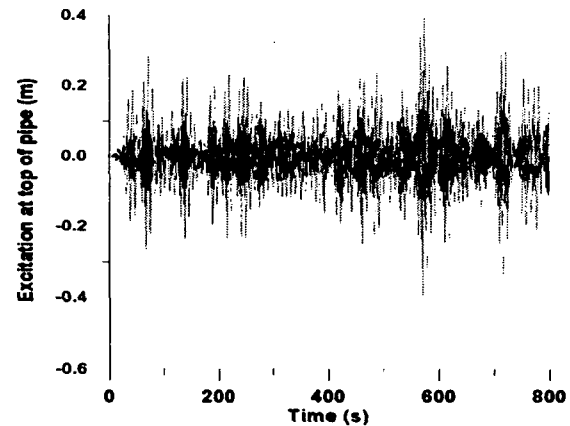


Fig. 3 Excitation at top of pipe

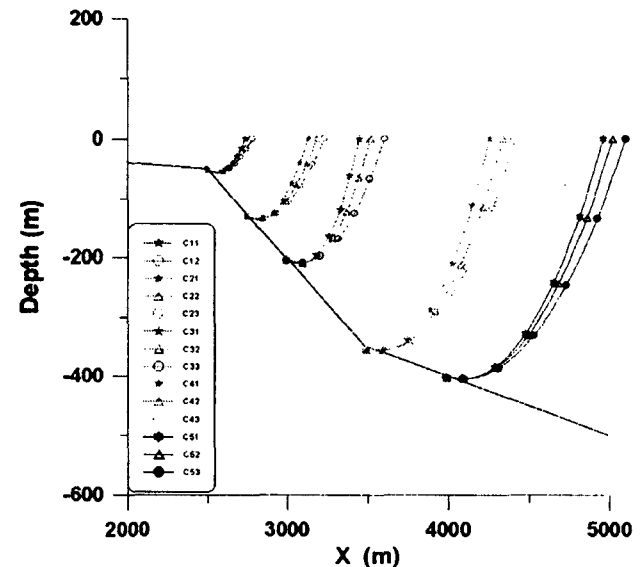


Fig. 4 Pipeline configurations with depth

Table 3. Pipe properties

	E	O.D	I.D	A	I	EA	EI
	(N/m <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>4</sup> )	(N)	(N-m <sup>2</sup> )
HDPE pipe(inner)	8.82e8	0.135	0.125	2.0e-3	4.3e-6	1.80e6	3.80e3
Carbon fiber	2.3e10	0.139	0.135	8.6e-4	-	1.98e7	-
Steel coil	-	0.155	0.139	-	-	-	-
HDPE pipe(outer)	8.82e8	0.170	0.155	3.0e-3	9.8e-6	2.65e6	8.68e3
Equilibrium axil stiffness						2.425e7	
Equilibrium bending stiffness							1.25e4

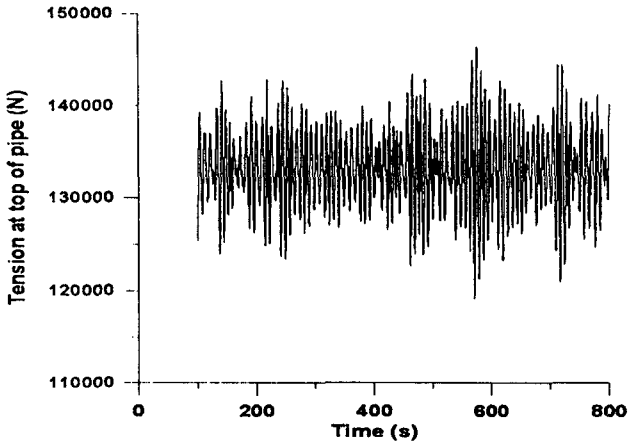


Fig. 5 Tension variation for C33

Fig. 5에서는 C33 조건에서 파이프 상단부의 장력 변동을 시간 이력으로 보여주고 있다. 장력 변동은 가진조건과 비슷한 경향으로 나타났으며, 스프링(spring)과 같은 불안정한 현상은 나타나지 않았다.

Table 4에서는 전체 해석 결과를 정리하였다. 장력 변동의 정상치와 변동치, 그리고 파이프의 시작점과 끝점에 대한 좌표점들을 정리하여 부설 과정에서 발생하는 현상들을 예측할 수 있도록 하였다.

Table 4 X coordinates and tension at top point

No	D (m)	X.0-X.n (m)	$\Delta x$ (m)	S (m)	T <sub>top</sub> (kN)	$\Delta T$
C11	50	2500-2737	237		50	0.25
C12	50	2500-2779	279		73	0.26
C21	127	2750-3130	370		76	25.7
C22	127	2750-3185	435		97	37.3
C23	127	2750-3231	481		116	34.5
C24	127	2750-3063	313		55	33.9
C31	204	3000-3450	450		84	33.6
C32	204	3000-3519	519		105	27.3
C33	204	3000-3606	606		132	27.3
C34	204	3000-3656	656		153	37
C41	355	3500-4255	755		152	23.6
C42	355	3500-4338	838		177	19.7
C43	355	3500-4413	913		200	
C51	401	3990-4961	971	1074	210	29
C52	401	3990-5019	1029	1127	230	29
C53	401	3990-5101	1110		260	29

#### 4. 부설 수리모형 실험

수치시뮬레이션을 통하여 부설 과정에 발생하는 장력과 형상을 추정하는 한편, 수리모형실험을 통하여 실제현상에 대한 장력발생 경향을 분석하였다.

#### 4.1 실험의 구성 및 조건

본 실험은 해양시스템안전연구소 해양공학수조에서 수행되어졌다. 실험의 구성은 Fig. 6과 같으며, 입사파랑의 각도를 조절하기 위하여 선박의 방향을 돌리면서 실험을 수행하였다. 모형 부설선박을 일정 위치에 유지시키기 위해서 4 방향에서 스프링과 라인을 이용하였으며, 부설선박 우현에 2축 로드셀을 설치하여 파이프와 연결하여 파이프에 작용하는 장력을 측정하고자 하였다. 모형선의 크기, 수조의 수심 등을 고려하여 1/38.94 축적으로 실험조건을 결정하였으며, 따라서 파이프 모형의 직경은 4.5mm, 중량은 10g/m로 결정하였다. 비선형 파랑 조건에 대하여 실험을 수행하였으며, ITTC 스펙을 이용하여 유의파고 1m, 2m, 3m, 피크주기 6.6s, 7.5s, 8.6s 조건으로 수행하였다.

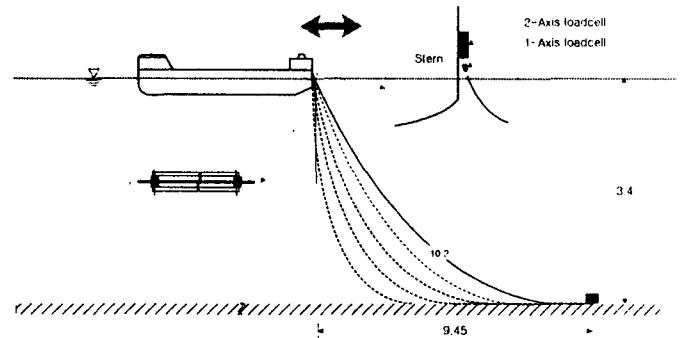


Fig. 6 Experiment scheme

#### 4.2 실험 결과

실험에서는 부설선박의 운동, 계류력, 파이프의 장력 등을 측정하였는데, 본 연구에서는 파이프에 걸리는 장력 측정에 중점을 두었다. 장력은 통계치 분석을 통하여 일정 장력의 초과 확률을 계산하였다. Fig. 7에서는 입사파랑의 입사각도에 따른 장력 분포를 살펴보고 있는데, 횡파(90도) 조건에서 장력의 변동치가 가장 크게 나타나는 반면에, 선수파(180도)에 대해서는 장력 변동이 작게 나타났다. 그 이유는 취수관과 부설선박이 선박의 우현 끝단에 연결되어 있어서 횡파에 의해서 선박의 롤(roll) 운동이 크게 나타나기 때문이다. 따라서 파이프를 실제 부설할 경우에도 횡파 조건을 피할 수 있는 설계를 하거나 파이프가 부설선박의 중앙단을 통하여 부설되도록 하여 롤 운동 영향을 줄일 수 있도록 해야 할 것이다. Fig. 8에서는 초기 장력의 크기에 따른 초과확률을 나타내고 있다. 모든 조건에서 알 수 있듯이 초기장력이 큰 경우에 장력의 변동값 초과확률도 크게 나타난다는 사실을 알 수 있다.

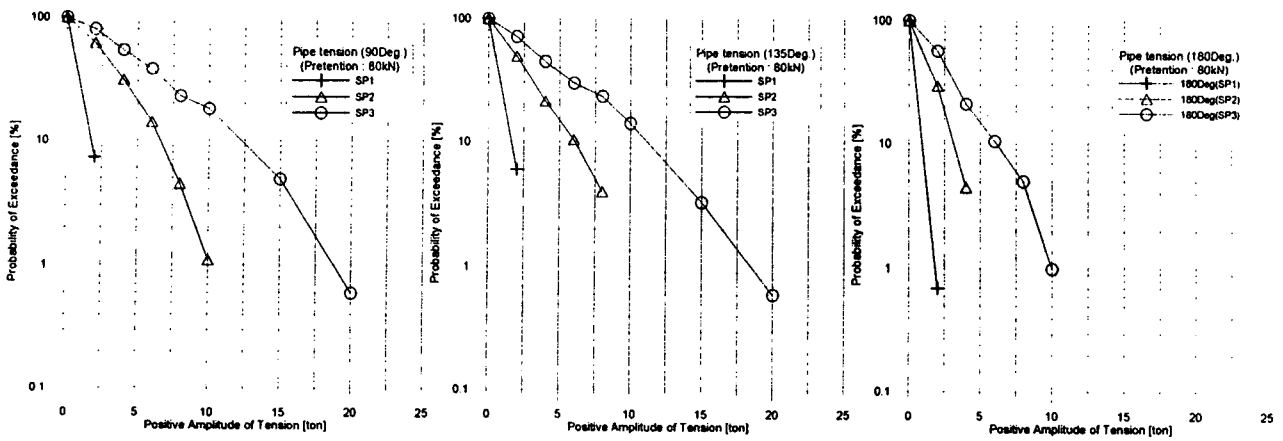


Fig. 7 Probability of Exceedance with heading

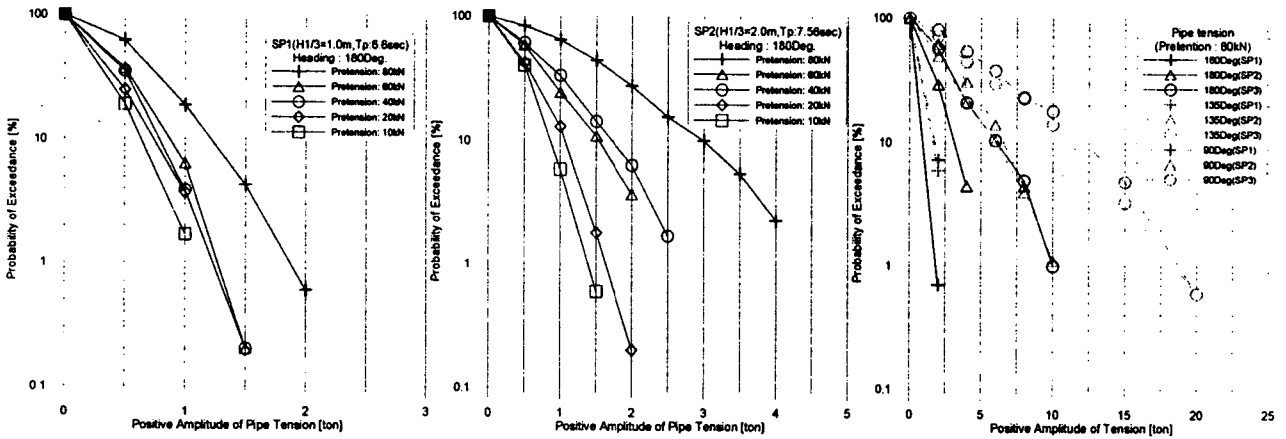


Fig. 8 Probability of Exceedance with pretension

## 5. 결 론

본 연구에서는 육상형 해양심층수 개발을 위한 파이프 라인 부설 수치시뮬레이션 및 수리모형 실험을 수행하였다. 본 연구를 통한 결론을 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 부설 과정에서 파이프에 곡률이 크게 발생하지 않도록 적당한 장력 조절이 필요하다.
- 2) 수심 500m까지 파이프를 부설하는 동안에 최대 23.5 ton의 장력이 발생하여 이를 설계 시에 반영해야 한다.
- 3) 부설하는 과정에서는 횡파 조건을 피할 수 있도록 설계 되어져야 한다.

향후 파이프라인 조출효과(payout)에 대한 해석이 필요하며, 이상의 연구 결과는 향후 우리나라 동해심층수 취수 관 설치하는 과정에 많은 기여를 할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 '해양심층수 다목적 이용 개발' 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김현주 외 (2002). "해양심층수의 다목적 개발(2)" 해양수산부 최종보고서 2002.
- [2] 정동호, 김현주, 박한일 (2004). "수치해석적 방법을 통한 해양심층수 취수용 유연 라이저의 거동 해석에 관한 연구", 한국해양공학회 논문집, 제18, 1호.