

## 해저케이블 포설/회수시 장력에 대한 실험적 분석

Experimental Analysis on the Cable Tension During the Laying and Recovery of a Submarine Cable

양 승 윤\*                      김 정 훈\*                      김 경 섭\*\*                      김 재 산\*\*  
Seung-Yun Yang              Jeong-Hoon Kim              Kyung-Sub Kim              Jae-San Kim

박 귀 호\*\*\*                      김 기 원\*\*\*                      이 상 호\*\*\*\*  
Kwi-Ho Park                      Gee-Won Kim                      Sang-Ho Lee

### ABSTRACT

In this study, Experimental analysis on submarine cable tension was performed for the safe and efficient laying and recovery of a submarine cable. The tension analysis was done through the analyzed data using the cable dynamic theory and the measured data using the experiment. The analyzed cable tension was able to decide requirements for the purpose of laying and recovery of the submarine cable. As the result of tension analysis for a Submarine cable, it was shown a proper feasibility to determine the laying and recovery conditions of the submarine cable.

주요기술용어(주제어) : Cable Tension(케이블 장력), Recovery(회수), Laying(포설)

### 1. 서론

케이블 포설이란 케이블 포설선이 미리 예정된 루트를 따라 항해하면서 포설선에 장착되어 있는 케이블 엔진, 케이블 홀더 및 케이블 탱크 등의 여러 장비들을 이용해서 케이블이나 중계기 등 해저 설비물들을 해저면에 가라앉히는 작업을 말한다<sup>[1]</sup>. 케이블 포설시 가장 중요한 점은 지나치게 케이블을 풀어

생기는 비틀림 현상이나, 반대로 덜 풀어 생기는 과도한 장력이나 해저면에서 케이블 매달림 현상이 발생하지 않도록 조출속도나 선박속도를 해저지형에 따라 적절히 조절하여 포설하여야 한다. 케이블의 과도 포설이나 매달림은 해저면에 케이블이 완전히 안착되지 못함으로 인해서 대륙붕 지역에서는 어선의 어구나 앵커에 의한 피해의 우려가 높고, 심해지역에서는 해저면과의 마찰에 의한 케이블 손상의 가능성이 높다. 따라서 최적의 케이블 포설을 위해서는 포설선박의 항로와 속도, 케이블 조출비, 해저지형 등을 고려하여 여장을 계산하고 포설하여야 한다. 또한 설정된 케이블 여장으로 포설하기 위한 케이블 조출속도 제어는 케이블 포설장치를 이용하여 케이블 장력을 설정값으로 유지하게 함으로써 이루어진다. 포설선에서

† 2004년 12월 9일 접수~2005년 3월 17일 게재승인

\* 국방과학연구소

\*\* NEX 1

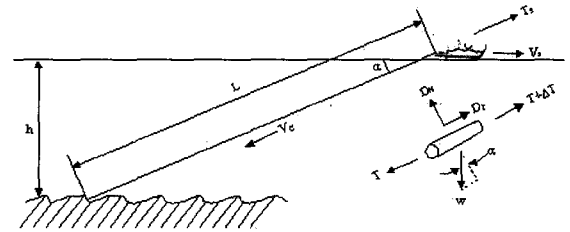
\*\*\* KT submarine

\*\*\*\* 해진건설

주저자 이메일 : syyang@add.re.kr

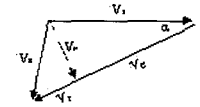
평균장력은 여장량에 영향을 받지만 케이블 장력은 여장변화에 민감하지 않고, 오히려 케이블 특성, 케이블 경사각, 심도 및 조류에 지배적인 영향을 받는다. 그러므로 안전하게 케이블을 포설하기 위해서는 케이블 장력을 유지하며 포설해야 한다. 또한 케이블 고장수리 작업에 있어서 포설선의 케이블 엔진을 사용하여 기 설치된 해저 케이블을 회수하여 케이블 탱크에 수용하는 케이블 회수작업에 있어서도 안전하고 효율적인 회수를 위해서 케이블 장력 해석을 통한 회수조건을 사전에 설정하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 논문에서는 케이블 포설 및 회수시 소요 장력을 해석하여 포설조건과 회수조건을 제시하고 실제 실험을 통하여 획득한 케이블 장력 및 회수/포설 조건과 비교 검토 하였다.



(a) 포설중의 cable 형상

- $T_s$  : cable선상 장력
- $V_s$  : cable 선속
- $V_c$  : cable 조출속도
- $w$  : cable의 단위 수중중량
- $D_n$  : cable 작용하는 법선방향의 유체저항
- $D_t$  : cable 작용하는 접선방향의 유체저항
- $\alpha$  : cable 경사각
- $h$  : 수심
- $L$  : 포설선과 착저점간의 cable장



(b) 포설선속과 cable의 포설선도의 연직

[그림 1] 해저케이블에 작용하는 힘

## 2. 해저 케이블 장력해석

### 가. 포설역학<sup>2~5)</sup>

해저 케이블의 포설에 있어서 가장 중요한 것은 해저면에 될 수 있으면 착저한 상태에 케이블을 포설하는 것이다. 또한 해저면의 상황에 적합한 케이블을 선택하여 포설하는 것도 중요하다. 선속이 일정한 포설선에서 선속보다 빠른 속도로 케이블이 조출되고 있을 때는 케이블 각부가 일정속도로 침하하고 있으므로 포설선에서 해저케이블 착저점까지의 케이블 형상은 일직선이 되어 착저점에 있어서 케이블 장력은 영(zero)이 된다. 만약 케이블 조출속도가 선속보다 늦어지면 케이블 착저점에 있어서 장력이 발생하여 케이블 형상은 현수선이 된다. 즉, 착저점이 직선포설 때 보다 포설선에 멀어지게 된다.

#### 1) 포설중 케이블에 작용하는 힘

포설중 케이블에 작용하는 힘은 케이블에 대한 법선줄의 접선방향에 작용하는 해수의 유체저항과 케이블에 가해지는 중력 및 케이블 장력이다. 포설선의 선속과 포설속도와의 관계는 그림 5에 나타난 것과 같다. 케이블의 단위길이당의 법선줄 접선방향에 작용하는 해수의 유체저항을 각각  $D_N$ ,  $D_T$  그리고 연직

방향에 작용하는 케이블 각부의 단위길이의 수중중량을  $W$  케이블 각부에 작용하는 케이블 장력의 증분을  $\Delta T$ 로 하면 다음식이 얻어진다.

$$D_N = W \cos \alpha \quad (1)$$

$$D_T = W \sin \alpha - \Delta T \quad (2)$$

유체역학에 의하면 해수중을 이동하는 케이블에 대한 해수의 유체저항은 양자의 상대속도의 2승에 비례하여 다음 식으로 나타난다.

$$\text{유체저항} = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2 \quad (3)$$

여기서,  $C_D$ 는 항력계수,  $\rho$ 는 해수밀도,  $S$ 는 투영면적,  $V$ 는 상대속도를 나타낸다. 포설선은 벡터  $V_s$ 로 수평방향으로 움직이고 있어 케이블은 수평에 대하여  $\alpha$ 의 방향에 벡터  $V_c$ 로 조출되고 있다. 조출된 케이블의 각부는  $V_s$ 와  $V_c$ 의 벡터 합 즉,  $V_R$ 로 해수에 대해서 운동한다.  $V_R$ 를 케이블에 대한 법선성분  $V_N$ 와 접선성분  $V_T$ 로 분해하면

$$V_N = V_S \sin \alpha \quad (4)$$

$$V_T = V_C - V_S \cos \alpha \quad (5)$$

로 나타난다. 식 (3)을 사용하면 단위길이 케이블에 작용하는 법선성분과 접선성분의 저항은 다음 식으로 나타난다.

$$D_N = \frac{1}{2} C_D \rho d (V_S \sin \alpha)^2 \quad (6)$$

$$D_T = \frac{1}{2} C_D \rho 2\pi d (V_C - V_S \cos \alpha)^2 \quad (7)$$

여기서  $d$ 는 케이블의 외경이다.

2) 케이블 경사각

케이블 경사각  $\alpha$ 가 작을 경우에는  $\cos \alpha \approx 1$ ,  $\sin \alpha \approx \alpha$ 의 근사가 성립하므로 식 (6)을 식 (1)에 대입하여 정리하면

$$W \cos \alpha = \frac{1}{2} C_D \rho d (V_S \sin \alpha)^2 \quad (8)$$

$$\alpha V_S = (2W / C_D \rho d)^{1/2} = H \quad (9)$$

이 얻어진다.

여기서  $H$ 는 주어진 케이블에 있어서 일정한 것으로 유체역학 정수로 나타낸다. 또한 식 (9)는

$$\alpha = \frac{H}{V_S} \quad (10)$$

과 같이 바꾸어 쓰면 포설 케이블의 경사각이 얻어지는 편리한 식이므로 케이블 경사각을 특히 케이블 임계각이라 부른다. 식 (10)에서와 같이 유체역학 정수가 정해지면 포설선의 속도  $V_S$ 와 케이블 임계각  $\alpha$ 의 관계가 결정되어 용이하게 포설할 수 있다.

3) 포설선에서의 케이블 장력

포설중의 케이블 장력은 식 (7)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음식이 얻어진다.

$$\Delta T = W \sin \alpha - \frac{1}{2} C_D \rho 2\pi d (V_C - V_S \cos \alpha)^2 \quad (11)$$

식 (11)을 케이블 전장에 대하여 적분하여  $L \sin \alpha = h$ 로 고쳐쓰면 식 (12)를 얻는다.

$$T_S = Wh - L \frac{1}{2} C_D \rho 2\pi d (V_C - V_S \cos \alpha)^2 \quad (12)$$

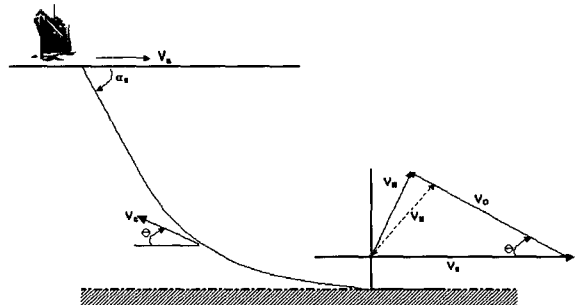
식 (12)의 우변 제2항은 제1항에 비교하여 극히 적어서 무시되므로, 선상의 케이블 장력은 접지점 수심의 케이블 수중중량과 동일하다. 그러나 케이블 조출 속도가 선속을 낮추면 케이블 접지점에는 장력  $T_O$ 가 발생하여 선상의 케이블 장력은 다음식이 된다.

$$T_S = Wh + T_O \quad (13)$$

나. 회수역학<sup>[1,3,4,5]</sup>

1) 회수시 작용하는 역학

회수작업시 케이블 구성은 작업중 케이블에 작용하는 힘들의 방향에 따라 결정 되어 진다.



[그림 2] 해저케이블 회수시 작용하는 역학

위의 그림에서

$V_R$  : 수중에서 케이블속도

$V_C$  : 케이블 전인속도

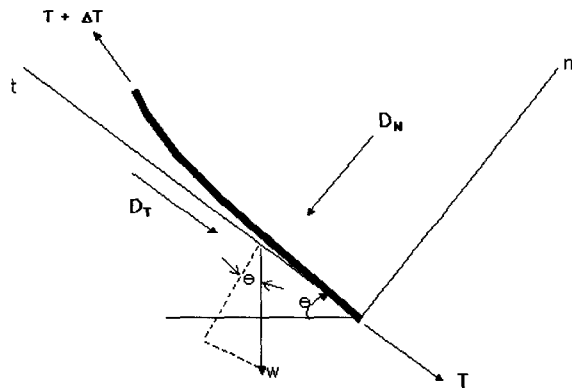
$V_S$  : 케이블 선박속도

$V_N$  : 케이블 견인속도의 수직성분

이고, 결국 작용하는 힘들의 벡터합은

$V_R = V_S + V_C$ 가 된다.

매달려 있는 케이블에 작용하는 수직 견인력( $D_N$ )과 케이블 중량의 수직성분( $W \cos \theta$ )은 회수 작업동안 그림 3처럼 동일방향으로 작용하므로 이 두힘의 합은 0이 아니며 회수 작업동안 케이블 구성은 직선이 아니고 그림 3처럼 곡선이 된다.



[그림 3] 회수작업 동안 케이블에 작용하는 힘

곡률을 가진 케이블은 케이블에 수직으로 작용하는 장력의 성분을 가지며 이 수직성분의 장력의 크기는 수직 견인력 및 케이블 중량의 수직성분의 합이 되고 케이블의 구심가속도와 질량의 곱과 같다. 이와 같은 힘의 작용에 의하여 케이블 구성형태가 결정된다. 회수작업 동안 케이블 구성이 직선이 아니고 곡선이기 때문에 해저면에서 케이블에 걸리는 장력( $T_0$ )은 0이 되지 않으므로 이것은 정상 포설시 보다 회수작업시 더욱더 큰 인장력이 요구됨을 의미한다.

2) 회수시 케이블에 걸리는 장력

선박에서의 장력  $T_S$ 는 일반적인 포설역학에서와 마찬가지로 유도하면 다음 식으로 구해진다.

$$\frac{\overline{T_S} - 1}{T_S} = \left[ \tan^2 \left[ \frac{\alpha}{2} \right] \left[ \frac{\cos \alpha + \cos \alpha_S}{1 - \cos \alpha \cos \alpha_S} \right] \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (14)$$

여기서  $\overline{T_S} = \frac{T_S}{Wh}$ ,  $\gamma = \frac{2 - \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha}$

단, 이 식은 케이블 견인력의 접선성분과 원심력을 무시하였다.

윗식에서

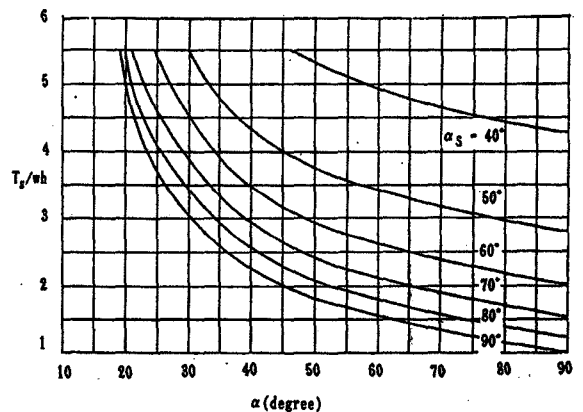
$\alpha_S$  : 케이블 임계각

$$\alpha = \frac{H}{V_S}$$

$H$  : 케이블 특성상수

$V_S$  : 선박속도

윗식은 케이블 견인속도( $V_C$ )와 선박속도( $V_S$ )가 일치하는 정상상태 하에서만 성립한다. 견인속도와 선박속도의 차이는 윗 식에 의해서 주어진 장력보다 크거나 작은 장력을 유발하는 과도상태를 나타낸다. 또한 케이블 임계각( $\alpha_S$ )이 변화할 경우에도 정상상태 유지를 위하여는 케이블 견인속도와 선박속도가 일치하도록 유지해야 할 것이다.



[그림 4]  $T_S/Wh$  대  $\alpha$ 의 변화( $\alpha_S$ 의 관계)

### 3. 해저 케이블 장력의 이론산출

장력해석을 위하여 적용한 해저 케이블의 특성데이터는 표 1과 같다.

[표 1] 해저케이블 특성 데이터

	외 경	수중무게	비 고
케이블 #1	94mm	2.5Kg/m	
케이블 #2	52mm	5Kg/m	

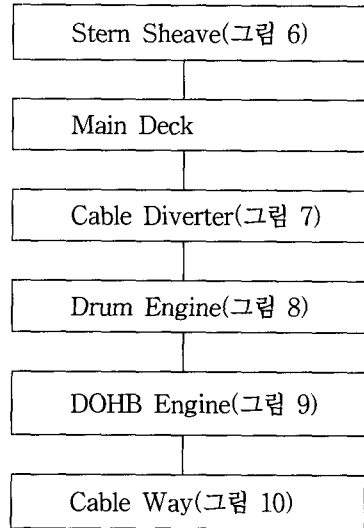
유체역학 상수  $H$ 는 식 (9)를 이용하여 계산할 수 있다.

- 케이블의 수중중량 = 0.5ton/Km
- 케이블의 외경 = 52mm
- 항력계수 = 2.5
- 해수의 밀도 = 103.36Kg/m<sup>3</sup>

이상에서  $H$ 를 구하면 30.42도Knot 이다. 식 (10)에서 포설케이블의 경사각을 70도로 하면 케이블 선속은 800m/hr가 된다. 하지만 실제 실험시에는 안전을 고려하여 케이블 선속을 500m/hr로 가져갔다. 따라서 포설시의 운용조건인 포설케이블의 선속과 경사각이 결정되어지고, 소요장력은 식 (13)에서 0.65ton이 걸릴 것으로 예측된다. 또한 회수시에는 회수케이블 경사각을 80도, 케이블 선속을 300m/hr로 가져가면 그림 4의 관계를 이용하여 회수장력은 포설장력의 약 1.5배 즉, 0.975ton이 발생할 것으로 예상된다.

### 4. 실험결과 및 고찰

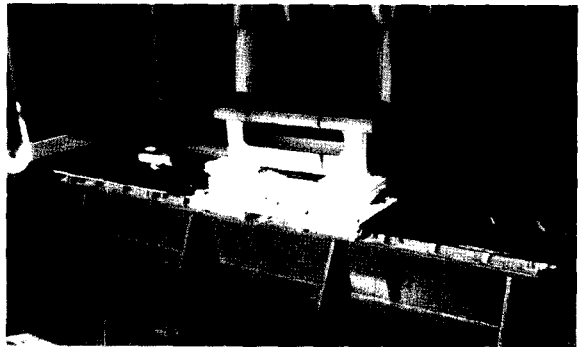
해저케이블의 포설 또는 회수시에는 전용 포설선과 전용장비가 필요하며 일반적인 포설절차는 그림 5와 같으며 회수는 포설의 역순으로 이루어진다. 참고로 실제 사용한 포설장비는 그림 6~그림 10과 같다.



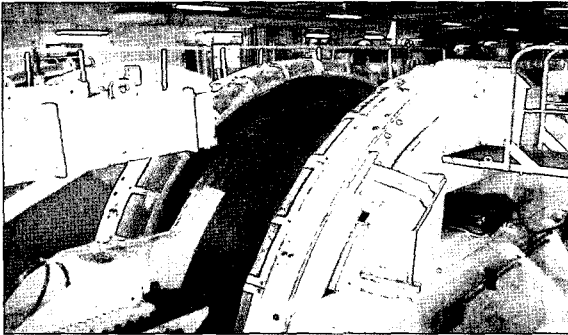
[그림 5] 해저케이블 포설절차



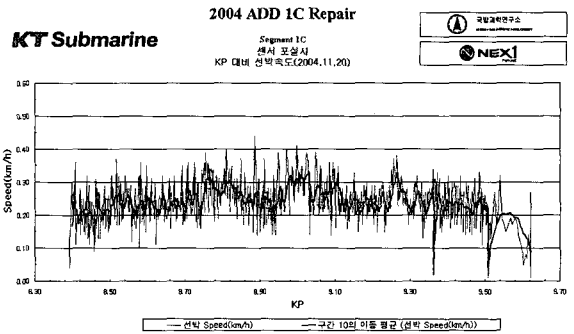
[그림 6] Stern Sheave



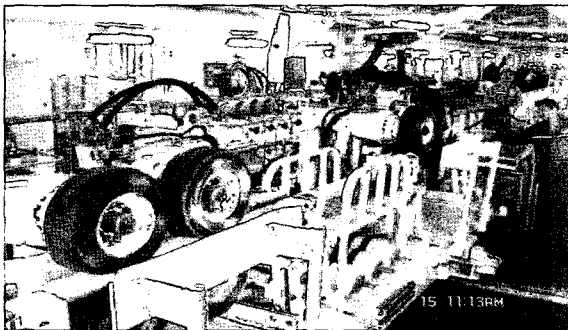
[그림 7] Cable Diverter



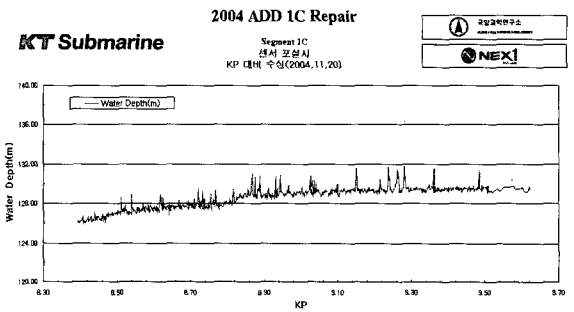
[그림 8] Drum Engine



[그림 11] 포설시 선박 속도



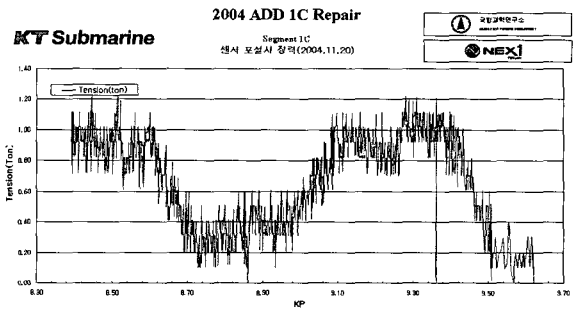
[그림 9] 케이블 홀더



[그림 12] 해저 수심



[그림 10] Cable Way



[그림 13] 포설시 케이블 장력

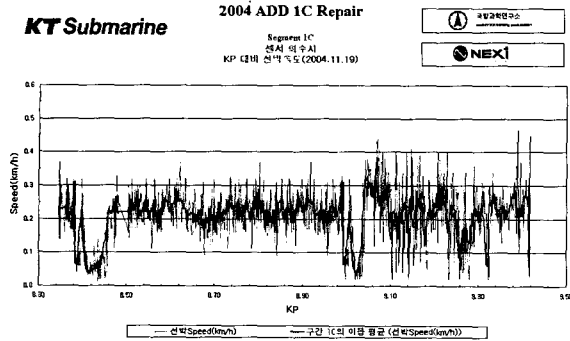
가. 포설시 결과 및 고찰

이론적 해석을 토대로 수심 130m 지역의 해상에서 케이블 포설시 포설조건을 케이블 선속 500m/hr, 포설케이블 경사각을 70도로 유지하면서 포설을 하였다. 결과는 그림 11~그림 13에 나타나 있듯이 선박 속도는 250m/hr, 장력은 0.4~1.0ton으로 나타났다. 케이블 속도를 직접측정이 곤란하여 선속으로 유추하

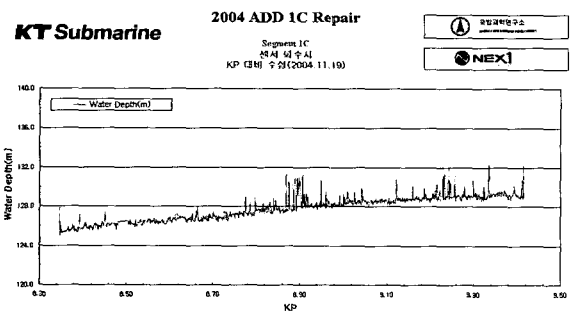
면 물론 선속과 케이블 조출속도는 차이가 있다. 해상에서 조류와 풍랑의 영향의 의한 것으로 포설조건은 적절 했던 것으로 판단되고, 장력은 평균적으로 이론해석과 실험결과가 유사한 결과를 나타내었다.

나. 회수시 결과 및 고찰

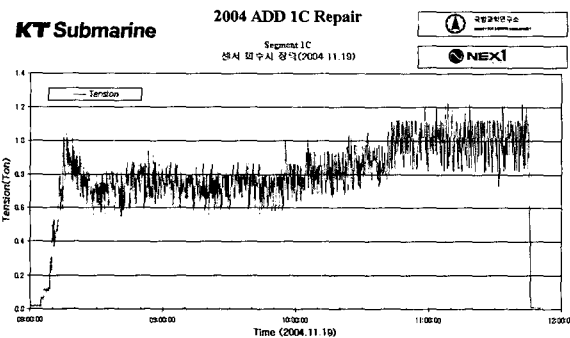
이론적 해석을 토대로 수심 130m 지역의 해상에서 케이블 회수시 회수조건을 케이블 선속 300m/hr, 케



[그림 14] 회수시 선박 속도



[그림 15] 해저 수심



[그림 16] 회수시 케이블 장력

란하여 선속으로 유추하면 해상에서 조류와 풍랑 영향을 고려하면 회수조건은 적절했던 것으로 판단되고, 실제 안전한 케이블 회수작업이 이루어 졌다.

또한 회수시 케이블 소요장력은 이론해석의 결과치인 0.95ton과 실험결과가 아주 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 회수조건은 아주 적절 했던 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 해저케이블의 포설과 회수시 안전을 위하여 고려되어야 할 중요한 요소인 케이블 소요장력을 해석하고, 최적의 포설조건과 회수조건을 설정하였다. 결과 및 고찰에서 제시하였듯이 이론적 해석 결과치는 실제 해상실험에서 획득한 데이터와 아주 유사한 결과를 나타내었다. 이 결과는 해저케이블의 포설과 회수시 안전과 효율이라는 측면에서 조건설정 에 유효한 결과라 생각된다. 추후 케이블 선속을 직접 측정하여 해석을 보완해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 한국해저통신, 해저광케이블 건설공사 기술자료, 1991.
- [2] 한국해저통신, 해저광케이블 통신기술, 1995.
- [3] C. E. Roden, "Submarine Cable Mechanics and Recommended Laying Procedure", Bell-Telephone Lab. 1964.
- [4] James. W. Kamman, "Modelling of Submerged Cable Dynamics", Technical Refort for Office of Naval Research. 1983.
- [5] James. W. Kamman, "Modelling of Towed Cable System Dynamics", Naval Coastal Systems Center, 1990.