

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.3.347

비선형 동적 거동 해석을 통한 광섬유 케이블의 풀림 성능 예측 연구[§]

이재욱* · 김건우* · 김형렬** · 유완석*† · 안득만*

* 부산대학교 기계공학부, ** 국방과학연구소

Prediction of the Unwinding Performance of Optical Fiber Cables by Nonlinear Dynamics Analysis

Jae Wook Lee*, Kun Woo Kim*, Hyung Ryul Kim**, Wan Suk Yoo*† and Deuk Man An*

* Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

** Agency for Defense Development,

(Received January 7, 2010 ; Revised January 26, 2010; Accepted February 1, 2010)

Key Words : Unwinding Dynamics(풀림 동역학), Winding Analysis(감김 해석), Optical Fiber Cables(광섬유 케이블), Balloon Shape (블론 형상)

초록: 원격조정이 불가능한 수중운동체를 제어하기 위해서는 선 유도 제어기술이 효과적으로 사용된다. 스펠에 수십 킬로미터의 길이로 감겨있는 광섬유가 풀릴 때, 수중운동체의 거동과 광섬유의 풀림 속도의 차이에 기인한 큰 장력과 장력 변동이 발생할 수 있다. 이로 인해, 광섬유의 복잡한 거동으로 인한 엉킴 또는 절손의 문제가 발생한다. 그러므로 본 논문에서는 빠른 속도로 풀리는 광섬유의 풀림 동역학 해석을 수행하여 광섬유가 풀리는 동안의 비선형 거동 및 장력, 장력변동을 파악함으로써 설계된 스펠의 풀림 성능을 예측하는 방법을 연구하였다.

Abstract: Under harsh environments in which remote control is impossible, wire-guided control technology is effective for controlling distant underwater vehicles that serve mother ships in missions, such as exploration and installation. When the fiber is unwound from the spool, tension fluctuations occur in the fiber because of the relative velocity of the moving vehicles and unwinding velocity of the fiber. As a result, fiber cables exhibit complicated behaviors, become entangled, and may get cut. In this study, a spool-like design for winding tens of kilometers of fiber cables is proposed by analyzing cable winding. The unwinding performance of the designed spool is estimated by performing nonlinear dynamics analysis of the nonlinear behavior and tension fluctuations observed during the unwinding of the fiber.

- 기호설명 -

$\vec{R}(s,t) = r\hat{e}_r + z\hat{k}$: 원통좌표계로 정의된 위치벡터

$D\left(\frac{\partial}{\partial t} - V\frac{\partial}{\partial s}\right)$: 미분연산자

$\vec{\omega} = \omega\hat{k}$: 광섬유의 풀림 회전 각속도

$\vec{V} = V\hat{k}$: 광섬유의 풀림 선 속도

$\vec{v} = D\vec{R} + \omega\hat{k} \times \vec{R}$: 광섬유의 속도벡터

1. 서론

깊은 바다 속 탐험이나 전시 상황과 같이 원격조정이 불가능한 극한 환경하에서는 모선으로부터 임무를 수행하는 원격 수중운동체를 제어하기 위해 선 유도 제어 기술이 많이 사용된다. 특히 이러한 선 유도 기술은 일반적인 과학 연구를 수행하거나 심해 자원을 탐사하는 무인 잠수함, 혹은 통신선의 수리 및 설치와 같은 임무를 수행하는 용도로 원격 조정이 불가능한 상황에서 많이 적용되고 있으며,^(1,2) 적으로부터 무선통신을 통하여 모선의 위치 및 임무가

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, wsyoo@pusan.ac.kr

발각되어서는 곤란한 진보된 국방 기술로도 활용되고 있다.⁽⁹⁾

그리고 최근엔 정밀 제어를 통한 정확한 임무 수행과 데이터 수집량의 증가를 목적으로 쌍방향 통신이 가능하도록 하기 위해 과단강도가 우수한 구리선 보다 광섬유(optical fibers)를 사용하는 사례가 증가하고 있다. 하지만 광섬유를 사용하는 경우에는 작업 수행 중 수중운동체의 거동과 광섬유가 풀리는 속도 사이의 상대적인 속도 차에 기인해 인장력 및 인장력의 변동이 발생할 수 있으며, 결과적으로 가벼운 광섬유는 풀리는 동안에 복잡한 거동이 발생하여 절손, 엉킴과 같은 문제가 발생할 수 있다. 이 경우 값비싼 수중운동체는 더 이상 모션으로부터 임무를 수행하는 것이 불가능하기 때문에 이를 방지하기 위해 수중운동체와 모션 양측에 거동 자유도를 주기 위한 스펀 형태의 케이블 풀림 기구가 사용된다.

일반적으로 이러한 스펀에는 수십 킬로미터가 풀릴 수 있는 광섬유가 감겨있기 때문에 일정한 인장력으로 스펀에 광섬유 케이블을 감는 문제에 관한 연구부터, 스펀에 감겨진 광섬유 케이블이 스펀로부터 풀려지는 과정에서 광섬유의 풀림 거동을 연구하여 인장력과 인장력의 변동을 사전에 예측하고 그 힘의 변동을 줄여줄 수 있는 방법에 대한 연구, 그리고 케이블의 절손 및 엉킴과 같은 문제를 사전에 예방하기 위한 연구가 반드시 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 수십 킬로미터의 광섬유가 동일한 인장력으로 스펀에 감기도록 하기 위한 수학적 모델을 개발하였다. 그리고 개발된 프로그램을 사용하여 광섬유 케이블 감김 해석을 수행하였으며, 일정한 인장력으로 감긴 내측 권선 형태의 스펀 형상도 제안하였다. 그리고 설계된 스펀로부터 광섬유가 풀려지는 풀림 동역학 해석을 수행하였으며, 풀리는 동안의 광섬유의 비선형 거동을 예측하고 인장력과 인장력의 변동을 사전에 검토함으로써 설계된 스펀의 풀림 성능을 예측하는 방법에 관하여 연구하였다.

2. 광섬유 케이블의 감김 해석

2.1 스펀 감김 해석(Spool Winding Analysis)

수십 킬로미터 길이의 광섬유가 스펀에 감기는 방식은 외측 권선 방식과 내측 권선 방식의 두 가지 종류가 있다. 외측 권선 방식은 스펀의 코어를 후작업으로 제거해야 할 필요가 없어 권선이 쉽고, 진동이나 충격하중에 권선된 광섬유가 저절로 붕괴될 우려가 없는 장점이 있다. 그리고 내측 권선 방식은 권선 후 권선 코어를

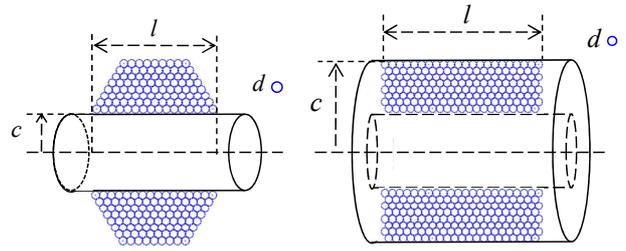


Fig. 1 Schematic representation of Payout dispenser; Outer(left) and Inner(right) winding packages

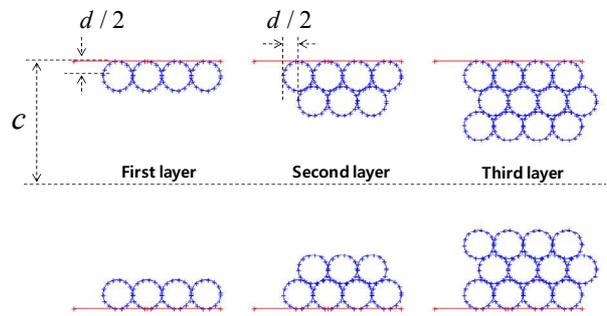


Fig. 2 Winding status of Inner packages

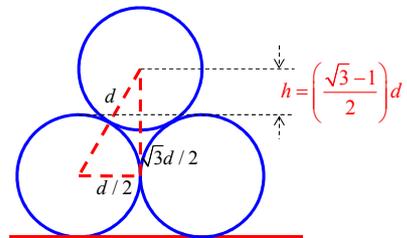


Fig. 3 Increased spool radius per each stacked layer

제거해야 하며, 권선량에 따라 외장 치수를 정확히 계산하여 스펀 케이스의 반경과 일치하도록 권선해야 하므로 권선에 어려움은 있지만, 측면 가이드가 있어 교차 권선이 가능해 작은 패키지에 더 많은 길이의 광섬유를 권선할 수 있다는 장점이 있다.

이러한 두 가지 권선 방식의 스펀을 도식적으로 나타내면 Fig. 1 와 같으며, Fig. 2 와 3 의 기하학적인 조건으로부터 두 가지 권선 방식 모두 수학적 모델의 개발이 가능하다.

하지만 본 연구의 수중운동체에 적용된 스펀 구조는 내측 권선 방식이므로, 내측 권선 방식의 감김 성능 해석 프로그램을 위주로 설명할 것이다.

Fig. 2 와 같이 내측 권선 방식의 경우, 스펀의 케이스가 고정되어 있으므로, 케이스의 반경을 스펀의 반경(c)으로 정의하여 출발 한다.

Fig. 2 에서 알 수 있는 바와 같이 첫 번째 층의 반경(H_1) 및 감긴 길이(L_1)에 대한 해석 결과는 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$H_1 = c - d/2 \quad (1)$$

$$L_1 = 2\pi H_1 (l/d) \quad (2)$$

유사하게 두 번째 층의 반경 및 감긴 길이를 식 (3)과 (4)와 같이 구할 수 있고, 세 번째 층의 경우는 내측 권선 방식의 경우 케이스의 가이드가 있어 교차권선이 가능하기 때문에 식 (5), (6)과 같이 구할 수 있다.

$$H_2 = H_1 - (d/2 + h) \equiv H_1 - \Delta H \quad (3)$$

$$L_2 = 2\pi H_2 \left(\frac{l-d}{d} \right) \quad (4)$$

$$H_3 = H_2 - \Delta H = H_1 - 2\Delta H \quad (5)$$

$$L_3 = 2\pi H_3 \left(\frac{l}{d} \right) \quad (6)$$

식 (1) ~ (6)을 일반화하면, n 번 감긴 내측 권선에 대한 스펀 반경 및 전체 권선된 광섬유의 길이를 구하는 수학적 모델을 각각 식 (7)과 (8)와 같이 계산할 수 있다.

$$H_n = H_1 - (n-1)\Delta H \quad (7)$$

$$L_s = L_{\text{odd}} + L_{\text{even}}$$

where; $L_{\text{odd}} = \sum_{i=1,3,5,\dots}^n 2\pi H_i \left(\frac{l}{d} \right)$ (8)

$$L_{\text{even}} = \sum_{i=2,4,6,\dots}^n 2\pi H_i \left(\frac{l-d}{d} \right)$$

그리고 권선과정의 권선 속도에 관한 식을 유도 하면, Fig. 4 와 같이 권선되는 동안에 광섬유 케이블을 동일한 권선속도(v)로 공급하게 되면, 각층의 권선 반경 (H_n)이 증가하는 영향으로 작업 선 속도가 증가하게 된다. 그러므로 각 층마다 권선 장력이 달라지게 되고, 일정하지 못한 케이블의 장력은 스펀 장착을 불안정하게 하는 원인이 되거

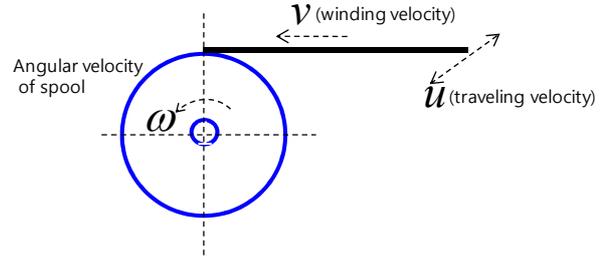


Fig. 4 Winding velocity during winding process

나 광섬유의 풀림 거동 시 영향을 미치게 된다. 그러므로 스펀에 권선 시 늘어나는 권선반경의 영향을 고려하여 스펀의 각속도 및 이송속도를 조절 조절하 하는 것이 중요하다.

스풀 1 회전 시 권선의 이송속도(u)는 광섬유의 직경과 같아야 하므로 각 층별 스펀의 권선 각속도(ω_n)와 이송속도(u_n)는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$\omega_n = \frac{v}{H_n}, \quad u_n = \frac{vd}{2\pi H_n} \quad (9)$$

외측 권선의 경우도 유사한 방식으로 감김 모델을 개발할 수 있으며, 단지 스펀의 코어 치수 고정으로 인해 스펀의 반경 (c)을 코어 반경으로 정의하고, 가이드가 없어 교차권선이 불가능한 차이만 존재할 뿐이므로 앞서 유도한 스펀의 감김 모델과 유사한 해석 모델의 유도가 가능하다.

2.2 스펀 형상 설계

본 연구에 사용된 광섬유의 치수와 스펀 형상은 각각 Table 1 과 2 와 같이 직경 0.7mm 의 광섬유가 전체 180mm 의 케이스에 내장 권선되어 있다. 그리고 광섬유 풀림 기구에는 전체 50[km]까지 풀릴 수 있는 광섬유가 권선되어야 한다. 그러므로 내측 권선 스펀을 2.1 절에 유도한 감김 해석 식을 사용하여 Fig. 5 와 같이 설계가 가능하다.

설계된 내측 스펀에 일정한 장력으로 권선하기 위해 Table 3 의 결과와 같이 첫 번째 층에서 360rpm, 이송속도 4.2mm/s 로 1 분동안 권선하고, 마지막 층에서 159rpm, 이송속도 1.86mm/s 로 2.3 분 동안 권선 하는 방식으로 두 속도를 제어하면 일정한 장력의 권선이 가능함을 알 수 있다.

3. 광섬유 케이블의 풀림 해석

3.1 풀림 동역학

풀림 동역학이란, Fig. 6 과 같이 원통형 패키지

Table 1 Dimension of optical fiber cable

Diameter	Density	Total winding length
0.7 [mm]	1.4[g/cm ³]	50[km]

Table 2 Dimension of spool package

	Radius (<i>c</i>)	Length (<i>l</i>)
Inner package	180.0 [mm]	260.0 [mm]

Table 3 Resultant winding velocity and winding time (winding velocity *v* = 3.0 [m/s])

ω_n [rpm]	u_n [mm/s]	time [min]
360.8 ~ 159.2	4.21 ~ 1.86	1.0 ~ 2.3

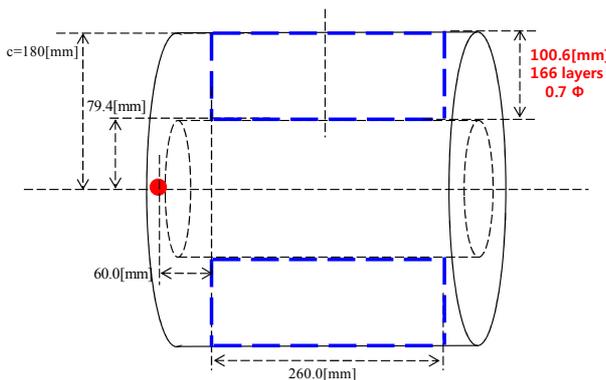


Fig. 5 Designed inner spool package

에 감겨진 실이 높이 (*H*)만큼 떨어진 고정점 (eyelet, *O*)을 통하여 속도 (*V*)로 빠져나가는 경우, 단위 시간 당 빠져나가는 길이에 비해 원주 방향으로 풀려지는 길이가 더 많아져 불륜 형상 (balloon shape)으로 풀려나가는 거동에 대해 연구하는 학문이다. 실이 풀리는 동안에 장력 및 거동에 대한 연구는 1958년 Padfield⁽⁴⁾에 의해 연구된 적이 있으며, 정상상태 거동에 대한 수학적 증명 및 수학모델의 유도는 Fraser et al⁽⁵⁾에 의해 수행된 적이 있다. 두 모델 모두 원통형상의 스폴로부터 풀려지는 실의 거동은 패키지 형상, 풀려지는 속도, 패키지에 감긴 각도, 공기 저항 그리고 불륜의 수에 의존한다고 연구하였다.

그러므로 본 연구에서도 불륜형상의 정상상태 응답이 수학적으로 검증된 Fraser 모델을 바탕으로

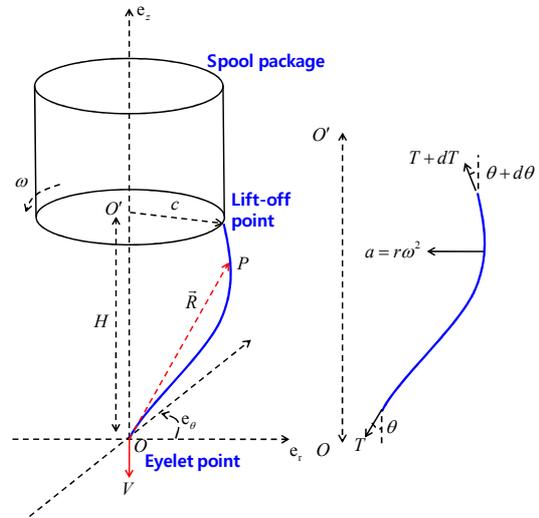


Fig. 6 Unwinding dynamics of optical fiber cables

앞서 설계한 스폴 패키지로부터 풀려나가는 광섬유의 거동을 연구하고자 한다. 광섬유 역시 완전 탄성 거동을 하며, 균일하고, 길이방향으로 늘어나지 않는다는 것을 가정한다.

원통 좌표계로 정의된 지배 방정식은 식 (10)과 같다.

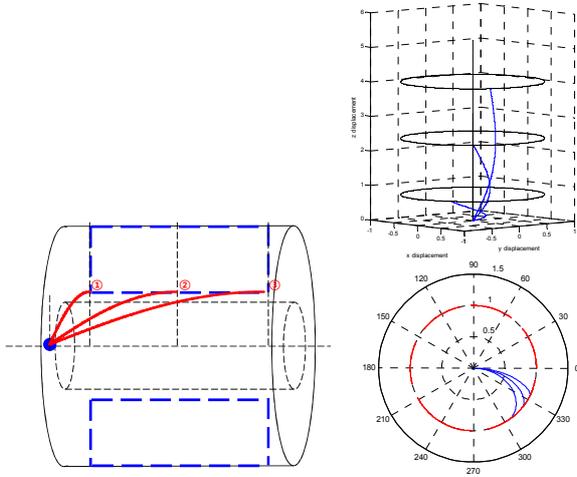
$$m_0 \{ D^2 \mathbf{R} + 2\omega \mathbf{k} \times D\mathbf{R} + \omega^2 \mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{R}) \} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\mathbf{T} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial s} \right) + \mathbf{F} \quad (10)$$

여기서, $\mathbf{R}(s,t) = r\mathbf{e}_r + z\mathbf{k}$ 은 임의의 시간 *t*에서 광섬유 요소의 위치를 나타내며 $D(= \partial/\partial t - V\partial/\partial s)$ 는 미분 연산자를 의미한다. 그러면 $m_0 D^2 \mathbf{R}$ 은 광섬유의 관성력 벡터, $2m_0 \omega \mathbf{k} \times D\mathbf{R}$ 은 코리올리력 벡터 및 $m_0 \omega^2 \mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{R})$ 은 원심력 벡터를 의미하게 된다. *F*는 식 (11)과 같이 정의된 광섬유의 단위 길이에 작용하는 공기 저항력을 의미한다.

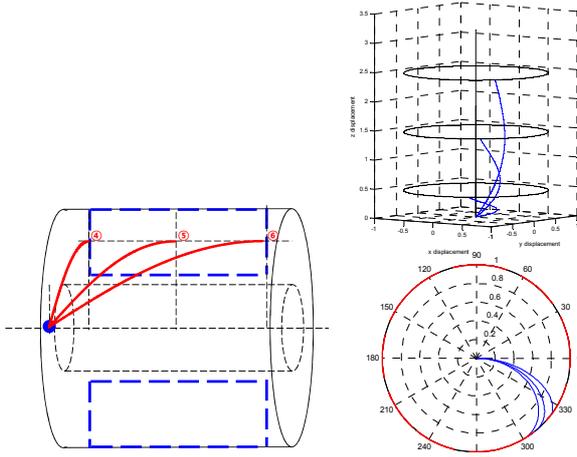
$$\mathbf{F} = -\frac{1}{2} C_D \rho d |\mathbf{v}_n| \mathbf{v}_n = -D_n |\mathbf{v}_n| \mathbf{v}_n \quad (11)$$

여기서, \mathbf{v}_n 은 광섬유의 이동 궤적에 수직인 속도 성분으로써 공기저항력은 $-\mathbf{v}_n$ 의 방향으로 작용하게 된다. 그리고 C_D 는 항력계수, ρ 는 공기의 밀도, *d*는 광섬유의 유효 직경을 의미한다. 공기 저항

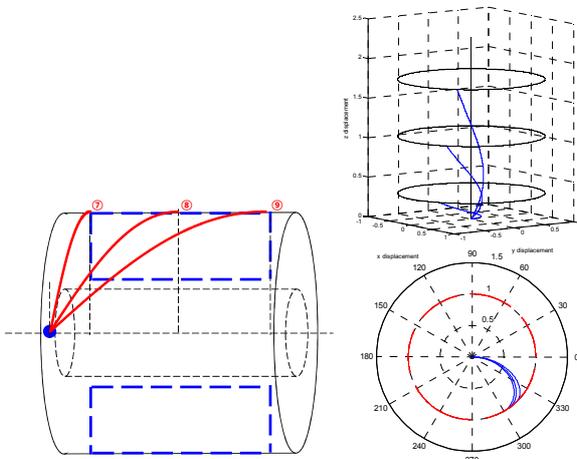
비선형 동적 거동 해석을 통한 광섬유 케이블의 풀림 성능 예측 연구



(a) Unwinding balloon shape at first layer



(b) Unwinding balloon shape at middle layer



(c) Unwinding balloon shape at last layer

Fig. 7 Balloon shape during unwinding from inner winding spool (non-dimensional value)

Table 4 Tension at eyelet point during unwinding from inner spool; unit [N]

	front	Center	rear
first	1.17	2.07	3.93
middle	1.10	1.44	2.16
last	1.09	1.26	1.62

력을 유도하는데 사용된 광섬유의 속도 및 속도의 수직 성분은 각각 식 (12)와 (13)과 같이 유도할 수 있다.

$$v = -(V\bar{a})\bar{a} + DR + \omega k \times R \quad (12)$$

$$v_n = \frac{\partial R}{\partial s} \times \left((DR + \omega k \times R) \times \frac{\partial R}{\partial s} \right) \quad (13)$$

식 (10)은 시간과 공간에 대한 편미분 방정식이므로 Fraser⁽⁵⁾는 정상상태 방정식을 유도하기 위하여 시간, 위치, 속도 및 하중에 관한 무차원 파라미터를 도입하여 무차원 운동 방정식을 유도하였다. 그리고 무차원 방정식을 섭동법을 이용하여 식 (14)과 같은 정상상태 방정식으로 정리하였다.

$$\frac{\partial^2 R}{\partial s^2} - 2k \times \frac{\partial R}{\partial s} + k \times (k \times R) = \frac{\partial}{\partial s} \left(T \frac{\partial R}{\partial s} \right) + F \quad (14)$$

식 (14)은 Fig. 6에 표시한 바와 같이 두개의 경계값 문제로 근사된다. 경계를 이루는 두점은 $s=0$ 인 고정점과 $s=s_l$ 인 이탈점으로 구성되며, 두 경계점에서의 조건은 식 (15)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} R(0) &= 0 & \text{at } s=0 \\ r(s_l) &= c, r'(s_l) = 0 \\ z(s_l) &= H \end{aligned} \right\} \text{at } s=s_l \quad (15)$$

식 (14)과 (15)를 풀기 위하여 슈팅법⁽⁶⁾과 4차 룬게-쿠타법⁽⁶⁾을 이용하였다. 그리고 슈팅된 초기값이 이탈점에 수렴하는지 여부를 평가하기 위해 식 (16)와 같은 오차함수를 정의하였고, 오차함수가 0.5% 이내이면 수렴하도록 프로그램화 하였다.

$$\mathfrak{R}(r(s_l), r'(s_l), z(s_l)) = \sqrt{(r(s_l) - c)^2 + (r'(s_l) - 0)^2 + (z(s_l) - H)^2} \quad (16)$$

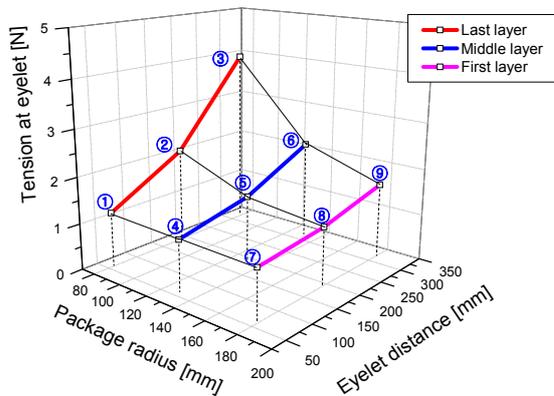


Fig. 8 Tension at eyelet point during unwinding from inner spool

3.2 제안된 스펴의 풀림 해석

앞서 Fig. 5 와 같이 설계된 내측 스펴에 풀림 거동 해석을 적용하였다. 본 연구에서 권선된 광섬유가 풀리는 속도는 100 kph 이며, 공기중에서 풀리는 것을 가정하였다. 이 속도로 풀려지는 광섬유의 거동 결과는 Fig. 7 과 같다. 스펴의 형상 및 풀려지는 블룬의 형상은 실제 크기를 20%의 scale 로 축소된 형상을 보여주며, Fig. 7 내에 표시된 치수들은 무차원 치수 값이다.

광섬유가 풀려지는 동안 고정점에서 발생하는 인장력의 결과는 Fig. 8 과 Table 4 의 결과와 같으며, 평균 인장력 1.76 N 과 3.93 N, 1.09 N 의 최대 및 최소 인장력이 각각 발생하는 것을 알 수 있다. 제시된 장력의 결과는 단지 9 개의 지점에 대한 선형 근사를 사용하였지만, 이탈점을 더 많이 지정하면 전체 구간에 대한 인장력의 변동을 예측할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 이러한 선유도 임무의 강건성을 유지하기 위해 적용된 스펴 형상의 광섬유 풀림 기구에 대하여 수십킬로미터의 광섬유가 동일한 인장력으로 스펴에 감기도록 하기 위한 감김

성능 해석 프로그램을 개발하였고, 개발된 프로그램을 사용하여 일정한 장력으로 감기위한 스펴의 권선 각속도와 이송속도를 제안하였으며, 내측 권선 형태의 스펴을 설계하여 제시하였다. 그리고 내측 권선 방식으로 설계된 스펴로부터 풀림 동역학 해석을 수행하여 풀리는 동안 발생하는 광섬유 케이블의 비선형 거동과 고정홀에서 발생하는 케이블의 장력을 예측하였다.

향후 제안된 스펴을 실제 제작하여 제안된 감김 해석 결과를 바탕으로 수십킬로미터의 광섬유를 감은 후 풀림 시험을 실시하여 예측된 블룬의 형상 및 고정점에서의 장력 결과를 비교하여 개발된 예측 모델의 신뢰성을 확보할 예정이다.

후 기

본 연구내용은 국방과학연구소의 지원으로 이루어졌습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Kwon, D. Y., Park, H. I., 2004, "A Numerical Analysis for the Dynamic Behavior of ROV Launcher and 1st Cable Under Combined Excitations," Conference of the Korean Society of Ocean Engineers, pp. 198~203
- (2) Cho, G. N., Song, H. C., 2003, "Dynamic Analysis of ROV Cable with the Coupling of Ship Motion," Conference of the Korean Society of Ocean Engineers, pp. 94~98.
- (3) Forecast International website, Anti-Submarine Warfare - DM2A4 Torpdeo, www.forecastinternational.com/archive/asw/as11545.doc
- (4) Padfield, D. G., 1956, "The Motion and Tension of an Unwinding Thread," Proc. R. Soc. London, A245, T301
- (5) Fraser, W. B., Ghosh, T. K., and Batra, S. K., 1992, "On Unwinding Yarn From A Cylindrical Package," Proc. R. Soc. London, A436, T479
- (6) Jaan Kiusalaas, 2005, "Numerical Methods in Engineering with Matlab," Cambridge University Press