

# 스트랜드와 와이어 로프의 강성해석 및 최적화

허성필\* · 양원호\*\* · 성기득\*\*\* · 조명래\*\*\*\*  
(1999년 7월 27일 접수)

## Stiffness Analysis and Optimization of Strand and Wire Rope

Sung-Pil Heo, Won-Ho Yang, Ki-Deug Sung and Myoung-Rae Cho

**Key Words:** Strand(스트랜드), Wire Rope(와이어 로프), Lay Angle(꼬임각), Optimization(최적화), Axial Stiffness(축강성)

### Abstract

Wire ropes are widely used in cable car, suspension bridge and elevator, etc. and there has been a growing need for ropes of large diameter. The theoretical procedures to obtain the stiffness coefficients of wire ropes, using previously reported theory, are programmed and the verification of the program is made. The effects of lay angle on the stiffness of strand are researched and comparisons on stiffness of rope are made according to the lay type. Axial stiffness optimization problems with coupling and torsional stiffness constraints are formulated and the effects of constraints on other stiffness coefficients on axial stiffness optimization are investigated.

### 1. 서 론

와이어 로프(wire rope)는 동력을 전달하는 기계요소로 케이블카(cable car), 해양 정박시스템(mooring system), 현수교(suspension bridge), 승강기(elevator)등에 널리 사용되고 있으며 각 분야에서 대형 로프의 사용요구가 점차 증가하고 있다. 특히 로프를 케드로 삼아 운전되는 수송설비인 케이블카의 설계시에는 안전성 면에서 볼 때 작동조건에 대한 로프의 설계가 무엇보다 중요하게 대두된다.

로프는 주로 축방향의 하중을 전달하게 되므로 무엇보다 축강성(axial stiffness)이 설계의 중요 고려사항이 된다. 또한 많은 경우에 파단강도를 기준하여 로프를 선정하게 되며 비례적이지는 않더라도 축강성의 향상이 파단강도를 증가시키게

될 것이므로 로프의 축강성은 로프의 성능을 좌우하는 중요한 인자라고 할 수 있다.

와이어 로프는 Fig. 1과 같이 코어(core) 둘레로 스트랜드(strand)를 꼬아 만든 구조로 되어있고 각 스트랜드는 다시 수많은 와이어(wire)를 꼬아 만든다. 로프는 이러한 복잡한 기하학적 형상과 많은 설계변수 그리고 와이어 사이의 접촉 등으로 인해 정확하게 강도 및 강성을 예측하기 어렵다.

와이어 로프의 강성을 이론적으로 해석하는 방법은 Costello 등에 의한 "Thin Rod Theory"<sup>(2,3)</sup>와 Raoof 등에 의한 "Orthotropic Sheet Theory"<sup>(4~8)</sup>로 크게 구분할 수 있으며, 후자가 대형 로프에서 더 정확하게 강성을 예측하는 것으로 보고되고 있다.<sup>(5)</sup> Raoof와 Kraincanic은 각각 IWRC 코어와 fiber 코어 로프에 대하여 이론해석에 의해 강성계수를 구하는 절차를 정리하였고, 실험결과와 비교하여 그 타당성을 입증하였다.<sup>(6,7)</sup> 또한 스트랜드의 강성계수를 결정하는 복잡한 이론해석을 꼬임각(lay angle or helical angle)의 다항식으로 표현하는 간략화 방법을 제안하였다.<sup>(8)</sup> 한편, Velinsky는 로프의 중량을 최소화시키는 최적설계 문제를 구성하고 축강성과 응력의 구속조건하에

\* 회원, 성균관대 대학원 기계공학과

E-mail : spheo@orgio.net

TEL : (0331)290-7496 FAX : (0331)290-5849

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\*\* 회원, 성균관대 대학원 기계공학과

\*\*\*\* 회원, 인덕대학 기계설계과

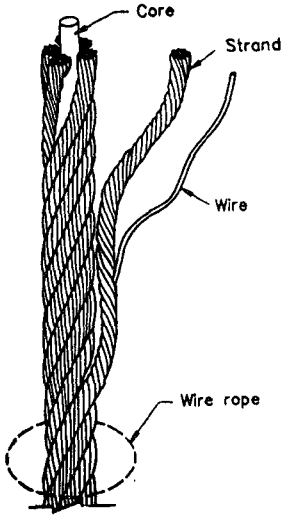


Fig. 1 Typical wire rope<sup>(1)</sup>

서 중량감소에 도달할 수 있는 여러 설계 예를 제시하였다.<sup>(9)</sup>

본 연구에서는 기존의 이론을 바탕으로 와이어 로프의 강성을 해석할 수 있는 프로그램을 작성한다. 이를 통해 강성에 영향을 미치는 인자 중에서 꼬임각의 영향을 고찰하고, 꼬임방식에 따른 강성의 차이를 비교하고자 한다. 그리고 스트랜드와 로프의 축강성을 향상시키기 위한 최적설계 문제를 구성하여 커플링강성과 비틀림강성의 구속이 축강성의 최적화에 미치는 영향을 조사하고 또한 와이어의 꼬임각이 전체 로프의 강성에 어느 정도의 영향을 미치는가를 살펴보고자 한다.

## 2. 이론 및 와이어 로프의 강성해석

### 2.1 이론

Fig. 1과 같은 와이어 로프에 축하중  $F$ 와 비틀림  $M$ 이 작용하는 경우, 그 구성방정식을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{F}{E} &= D_1 \epsilon_c + D_2 \tau \\ \frac{M}{E} &= D_3 \epsilon_c + D_4 \tau \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_c$ 는 축방향 변형률(axial strain)이고  $\tau$ 는 단위 길이당의 비틀림각(twist per unit length)이며  $E$ 는 탄성계수(Young's modulus)이다. 그리고  $D_1$ 은

로프의 축강성,  $D_2$ 와  $D_3$ 는 각각 인장-비틀림, 비틀림-인장 커플링강성(coupling stiffness),  $D_4$ 는 비틀림강성(torsional stiffness)이다. 로프를 구성하는 스트랜드에 대해서도 식 (1)과 같이 구성방정식을 나타낼 수 있으며 이 경우 각 강성계수는  $d_1, d_2, d_3, d_4$ 로 표시한다.

한편, 로프를 구성하는 스트랜드의 응력-변형을 관계는 "Orthotropic Sheet Theory"<sup>(4-8)</sup>에 의해 Fig. 2와 같이 각 와이어 층(layer of wire)을 직교 이방성 실린더로 단순화하여 식 (2)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} S_1 &= S_{11} T_1 + S_{12} T_2 \\ S_2 &= S_{12} T_1 + S_{22} T_2 \\ S_6 &= S_{66} T_6 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $S_1, S_2, S_6$  및  $T_1, T_2, T_6$ 는 와이어 층에 대한 변형을 및 응력 성분을 나타내고,  $S_{11}, S_{22}, S_{12}, S_{66}$ 는 유연(compliance)계수에 해당된다. Fig. 2에서 와이어 층과 스트랜드 축 사이의 각도  $\alpha$ 가 각 와이어 층의 꼬임각이 되며, 식 (2)의 관계를 좌표변환을 통해 스트랜드 축에 대하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S'_1 &= S_{11}' T'_1 + S_{12}' T'_2 + S_{16}' T'_6 \\ S'_2 &= S_{12}' T'_1 + S_{22}' T'_2 + S_{26}' T'_6 \\ S'_6 &= S_{16}' T'_1 + S_{26}' T'_2 + S_{66}' T'_6 \end{aligned} \quad (3)$$

경계조건을 고려하면 응력 대 변형을 비틀림 유연계수의 항으로 표현할 수 있고, 이를 이용하여 스트랜드의 강성은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} d_1 &= \left\{ \frac{4}{\pi E} \sum_{j=1}^n A_j \left( \frac{T'_1}{S'_1} \right)_j \right\} + A_{core} \\ d_2 &= \frac{4}{\pi E} \sum_{j=1}^n A_j r_j \left( \frac{T'_1}{S'_6} \right)_j \\ d_3 &= \frac{4}{\pi E} \sum_{j=1}^n A_j r_j \left( \frac{T'_6}{S'_1} \right)_j \\ d_4 &= \frac{4}{\pi E} \sum_{j=1}^n A_j r_j^2 \left( \frac{T'_6}{S'_6} \right)_j \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $A_j$ 와  $r_j$ 는 각각  $j$ 번째 와이어 층의 면적과 나선반지름(helix radius)을 나타내고  $A_{core}$ 는 코어 와이어의 면적을 나타낸다.  $n$ 은 스트랜드를 구성하는 전체 와이어 층의 수이다.

와이어 로프의 강성을 해석하는 이론적인 절차는 주어진 변형조건에 대하여 로프를 구성하는 스트랜드의 강성을 구하고, 스트랜드에 나타나는 하중 및 모멘트를 구하여 이로부터 로프에 작용하는 하중조건을 구한다. 이 값들을 식 (1)에 대입하면 강성을 결정할 수 있다. 상세한 관련 수식들은 참고문헌<sup>(4,6,7)</sup>에 제시되어 있고, 여기서는

그 절차만을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 강성해석 프로그램의 작성 및 검토

와이어 로프는 코어의 종류에 따라 스트랜드를 코어로 사용하는 IWRC(independent wire rope core) 로프와 섬유를 코어로 사용하는 fiber 코어 로프로 구분할 수 있다. IWRC 로프는 축방향 하중만을 대부분 전달하고 직선케도로 설치되는 경우에 주로 사용하고, fiber 코어 로프는 곡률을 가지고 설치되는 경우에 사용된다. 본 연구에서는 앞 절에서 설명한 이론적인 절차에 따라 IWRC와 fiber 코어를 가지는 로프에 대해 각각 설계변수를 입력자료로 하여 강성을 구할 수 있는 프로그램을 작성하였다.

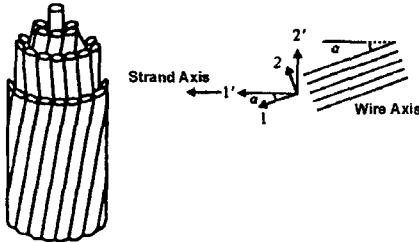


Fig. 2 Idealization of each layer of wires as an cylindrical orthotropic sheet<sup>(6)</sup>

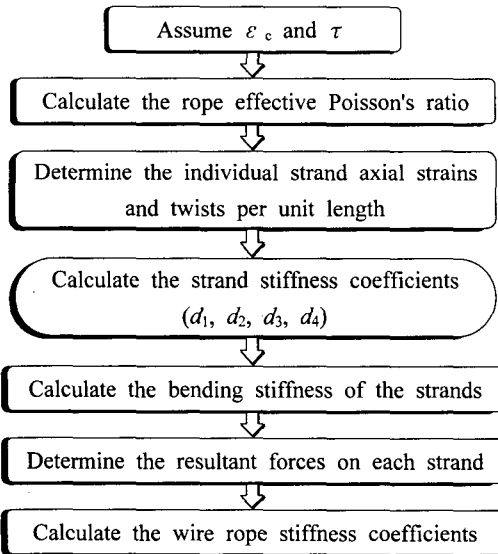


Fig. 3 Theoretical procedure for determining rope stiffness

이 프로그램의 타당성을 입증하기 위하여 먼저 Table 1의 스트랜드에 대하여 본 프로그램으로 강성을 구하고 참고문헌<sup>(6)</sup>의 결과와 비교하여 Table 2에 나타내었다. 또한 Table 3의 IWRC 로프에 대하여 해석 결과를 참고문헌<sup>(6)</sup>의 결과와 비교하여 Table 4에 나타내었고, Table 5의 fiber 코어 로프에 대하여 Table 6에 해석 및 참고문헌<sup>(7)</sup>의 결과를 나타내었다. 모든 경우에 기존 문헌에서의 결과와 적은 오차범위 내에서 잘 일치하였다.

Table 1 Construction details for strand

Layer	R(mm)	a (deg.)	m
core	1.4557	-	1
2	0.7012	12.26	9
1	1.2678	-21.23	9

R : radius of wire

a : lay angle

m : number of wires

Table 2 Comparisons of strand stiffness

Stiffness	Program results	Reference data
$d_1$	50.133	48.111
$d_2$	-47.210	-47.047
$d_3$	-47.161	-46.533
$d_4$	98.692	97.542

Table 3 Construction details for IWRC wire rope

i	j	$R_{ij}$	$a_{ij}$	$m_{ij}$	$a_i^*$	$m_i^*$
3	core	0.8014	-	1	-	1
	1	0.7347	16.29	6		
2	core	0.7021	-	1	19.17	6
	1	0.6552	8.93	6		
1	core	1.4557	-	1	19.76	6
	2	0.7012	12.26	9		
	1	1.2678	-21.23	9		

i : rope layer

j : strand layer

$R_{ij}$  : radius of wire in layer j of strand i

$a_{ij}$  : lay angle in layer j of strand i

$m_{ij}$  : number of wires in layer j of strand i

$a_i^*$  : lay angle in rope layer i

$m_i^*$  : number of strands in rope layer i

**Table 4** Comparisons of IWRC rope stiffness

Stiffness	Program results	Reference data
$D_1$	245.07	247.59
$D_2$	864.36	826.57
$D_3$	667.89	624.60
$D_4$	3309.78	3479.71

**Table 5** Construction details for fiber-core wire rope

Strand	Layer	1	2	core
	m	8	8	1
	R(mm)	1.765	0.925	1.55
	$\alpha$ (deg.)	14.34	7.50	-
Number of strands in rope, $m^*$		6		
Lay angle of strand, $\alpha^*$ (deg.)		16.86		
Core radius, $\rho_c$ (mm)		7.11		

**Table 6** Comparisons of fiber-core rope stiffness

Stiffness	Program results	Reference data
$D_1$	457.8	455.3
$D_2$	2431.3	2315.9
$D_3$	2217.7	2202.7
$D_4$	13522	13598

2.3 꼬임각에 대한 강성변화 및 꼬임방식에 따른 강성비교

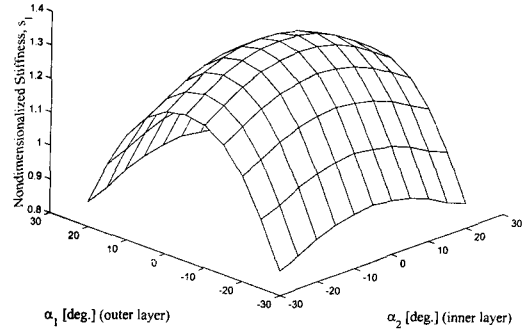
꼬임각에 따른 강성의 변화를 살펴보기 위하여 Table 1의 스트랜드에 대해 외부층과 내부층의 꼬임각을 변화시켜가며 강성의 변화를 해석하였고 각 강성계수를 다음과 같이 무차원화하여 해석 결과를 나타내었다.

$$s_1 = d_1 / (d_1)_{RS}, \quad s_2 = d_2 / (d_2)_{RS} \quad (5)$$

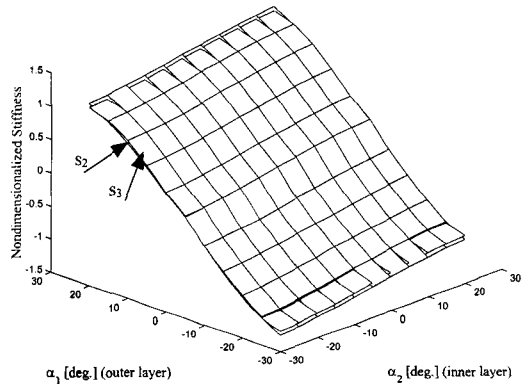
$$s_3 = d_3 / (d_3)_{RS}, \quad s_4 = d_4 / (d_4)_{RS}$$

여기서, 하첨자 RS는 참고문헌에 주어진 꼬임각에 대한 강성을 나타낸다.

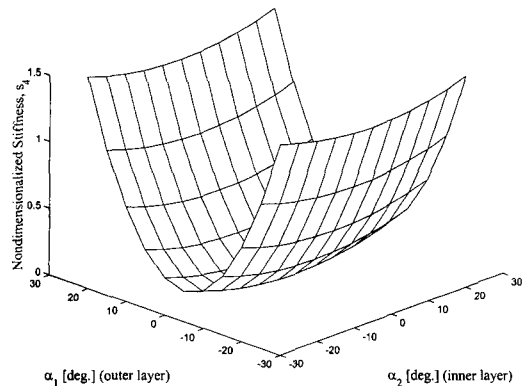
Fig. 4(a)~(c)는 외부층과 내부층의 꼬임각에 따른 강성계수  $d_1, d_2, d_3, d_4$ 의 변화를 3차원적으로 나타낸 것이다. 여기서  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 각각 외부층과 내부층의 꼬임각을 표시한다. 이 그림을 통해 꼬임각이  $0^\circ$ 에 접근함에 따라 축강성  $d_1$ 은 커지고 커플링강성  $d_2, d_3$ 와 비틀림강성  $d_4$ 는 작아짐을 알 수 있다. 이것은 축강성을 향상시키기 위해 꼬임각을 조절하는 것이 나머지 강성계수를



(a) Nondimensional axial stiffness



(b) Nondimensional coupling stiffness

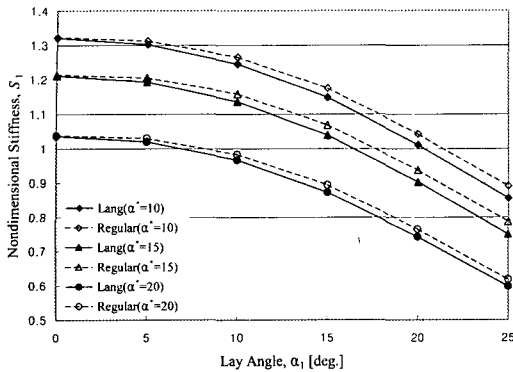


(c) Nondimensional torsional stiffness

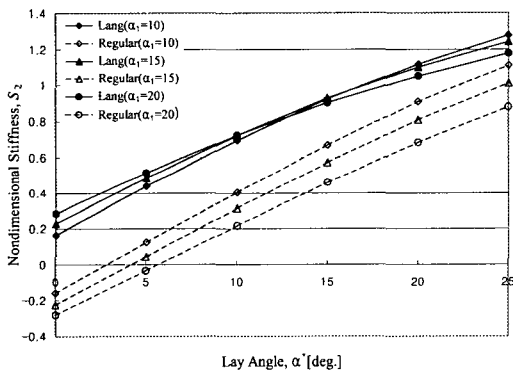
**Fig. 4** Stiffness variation along the lay angle of spiral strand

감소시킬 수 있음을 나타내며 다음장의 최적설계에서 구속조건으로 부여하고자 한다. 또한 모든 강성계수에 대하여 외부층의 꼬임각에 의한 강성

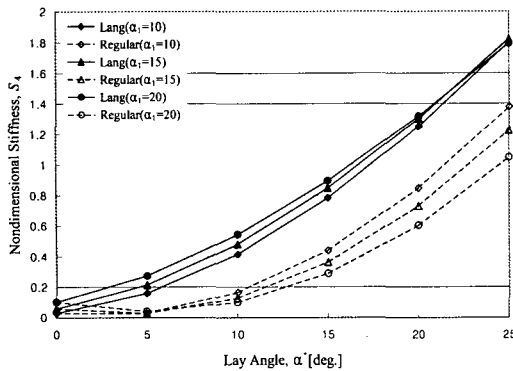
의 변화가 내부층의 꼬임각에 의한 변화에 비해 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서 강성계수  $d_2$ 와  $d_3$ 는 거의 같은 값을 나타냄을



(a) Nondimensional axial stiffness



(b) Nondimensional coupling stiffness



(c) Nondimensional torsional stiffness

Fig. 5 Stiffness variation along the lay angle of fiber-core wire rope

관찰할 수 있으며 이것은 기존의 문헌에서와 일치하는 경향이다.<sup>(8)</sup>

한편, 로프를 꼬는 방법에는 랭꼬임(Lang's lay)과 보통꼬임(regular lay)이 있다. 랭꼬임은 로프와 스트랜드의 꼬임방향이 같은 방향인 경우이고, 보통꼬임은 꼬임방향이 서로 반대방향이다. 보통꼬임은 랭꼬임에 비하여 접촉 면적이 작아 와이어의 마모가 빠르지만 잘 풀리지 않아 취급이 쉬운 반면, 랭꼬임은 접촉면적이 커서 마모에 의한 손상이 적기 때문에 내구성, 유연성이 좋으나 풀리기 쉬우므로 취급에 주의하여야 한다.

Fig. 5(a)~(c)는 Table 5의 fiber 코어 로프에 대하여 꼬임방식을 달리 하였을 때 꼬임각에 따른 강성계수의 변화를 비교하여 나타낸 것이다.  $D_1, D_2, D_4$ 를 식 (5)의 형태로 무차원화하여 각각  $S_1, S_2, S_4$ 로 표시하였다. 그림에서  $\alpha^*$ 는 스트랜드의 꼬임각이고,  $\alpha_1$ 은 스트랜드의 외부층 와이어의 꼬임각을 나타낸다. 앞의 스트랜드에 대한 해석 결과로부터 스트랜드의 내부층 와이어의 꼬임각은 강성에 상대적으로 적은 영향을 미치므로 Table 5의 값으로 고정하여 해석하였다.  $D_2$ 와  $D_3$ 는 앞의 스트랜드에 대한 해석 결과와 유사하게 거의 같은 값으로 나타나  $D_2$ 의 변화만을 나타내었다. 꼬임각이 강성에 미치는 영향은 스트랜드의 꼬임각이 와이어의 꼬임각에 비하여 훨씬 크게 나타났고, 이것은 예측할 수 있는 결과이다. 꼬임 방식에 따라 비교해 보면 축강성은 보통꼬임인 경우가 더 크게 나타난다. 그러나 커플링 강성과 비틀림 강성은 랭꼬임인 경우가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3. 최적설계

#### 3.1 강성 최적화의 개요

식 (1)에 나타난 와이어 로프의 강성계수 중에서 가장 중요하게 고려되어야 할 것은 축강성  $D_1$ 이다. 예를 들어 케이블카에 설치되는 로프를 설계할 때 축하중이 가장 크게 고려되며 굽힘 모멘트나 비틀림은 이차적인 고려사항이다. 또한 로프의 파단강도를 기준하여 로프를 선정하게 되므로 이 파단강도를 향상시키는 것이 로프의 성능 개선 및 경량화에 중요한 역할을 하게 된다. 축강성의 변화가 강도에 영향을 미치게 될 것이므로 꼬임각에 대하여 로프의 축강성을 최적화시

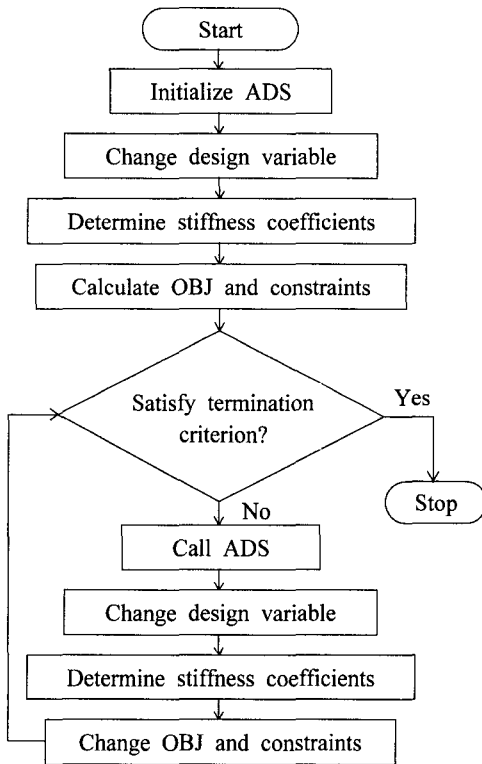


Fig. 6 Flowchart for optimization

키는 것이 중요한 의미를 가지게 된다.

그런데, 이론해석에 의하여 축강성을 향상시킬 수 있는 방법은 앞의 고찰에서와 같이 꼬임각을  $0^\circ$ 에 가깝게 하는 것이다. 하지만 이것은 실제 로프를 제작함에 있어 무의미한 상황이며 또한 강성해석에서도 꼬임각을  $0^\circ$ 에 가깝게 하면 축강성은 크게 향상되거나 커플링강성과 비틀림강성이 현저하게 작아짐을 알 수 있다. 따라서 축강성을 최대화시키는 최적설계 문제에서 여러 가지 형태로 구속조건이 부여되어야 할 것이고 실제로 응력이나 변형 또는 제작상의 문제, 마모 등이 이러한 구속조건이 될 수 있을 것이다. 본 연구는 로프의 강성에 초점을 맞추고 있으므로 나머지 강성계수들을 일정한 값 이하로는 작아질 수 없는 구속조건을 부여하여 축강성을 최대화시키는 최적설계 문제를 구성하였다. Fig. 6은 본 연구에서 최적설계가 수행되는 과정을 나타내며 최적화 프로그램인 ADS를 subroutine으로 호출하여 전체 알고리즘을 구성하였다. 최적설계의 수행에서 사용한 방법은 Table 7과 같다.

Table 7 Algorithms used in optimization

Whole routine algorithm	Linear extended interior penalty function method
Search direction finding algorithm	Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno variable metric method
One-dimensional search algorithm	Golden section method followed by polynomial interpolation

### 3.2 스트랜드의 강성 최적화

Table 1의 스트랜드에 대하여 앞절의 설명에 따라 아래와 같이 최적설계 문제를 구성하였다. 설계변수(design variable)는 두 와이어 층의 꼬임각  $\alpha_1, \alpha_2$ 이고, 설계변수에 대한 side constraint는 참고문헌<sup>(5-9)</sup>에 나타난 로프의 사양과 강성을 결정하는 간략방법<sup>(8)</sup>을 적용할 수 있는 꼬임각의 범위들을 고려하여  $-25^\circ \leq \alpha_1 \leq 25^\circ, -25^\circ \leq \alpha_2 \leq 25^\circ$ 로 설정하였다.

Minimize :  $-d_1$

Subject to :  $w_2 \times (|d_2|)_{\max} - |d_2| < 0$

$w_3 \times (|d_3|)_{\max} - |d_3| < 0$

$w_4 \times (d_4)_{\max} - d_4 < 0$

먼저 구속조건이 없는(unconstrained) 상태에서 최적설계를 수행하여  $d_2, d_3, d_4$ 의 최대값을 구한다. 여기에 각각 가중치  $w_2, w_3, w_4$ 를 곱하여 커플링강성과 비틀림강성이 이 값보다 커야 한다는 구속조건하에서 축강성을 최대화시키는 최적설계 문제를 구성하였다.

Table 8은 구속조건에 부여되는 각각의 가중치를 변화시키며 최적설계를 수행한 결과로 가장 오른쪽 열의 -OBJ는 최소화된 목적함수(objective function)의 부호를 바꾼 값을 나타낸다. 따라서 이 값은 최대 축강성을 의미하며 가중치의 변화가 최대 축강성에 미치는 영향을 파악할 수 있는 결과들을 나타내었다. 전체적으로 볼 때  $w_2$ 나  $w_3$ 를 증가시킬 때 보다  $w_4$ 를 증가시킬 때 최대 축강성의 감소가 크게 나타나고 있다.  $w_2$ 나  $w_3$ 는 0.3에서 0.5로 증가할 때 최대 축강성이 오히려 약간 증가하는 경우도 있으나 이것은 최적화 과정중의 수치적 오차 등으로 생각되며 실제 최대 축강성의 감소가 거의 나타나지 않음을 의미한다. 따라서 나머지 강성계수를 구속조건으로 하여 축강성을 최대화시키는 최적설계 문제에서 비틀림강성의 구속이 다른 커플링강성에 비하여 축강성의 최적화에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

**Table 8** Optimization results for various weight factor

factor			
$w_2$	$w_3$	$w_4$	-OBJ
0.3	0.3	0.3	58.674
		0.5	54.019
		0.7	47.670
	0.5	0.3	58.964
		0.5	54.022
		0.7	56.339
0.5	0.3	0.3	58.181
		0.5	54.020
		0.7	47.670
	0.5	0.3	58.229
		0.5	54.021
		0.7	56.167
0.7	0.3	0.3	54.592
	0.5	0.3	54.559

OBJ : objective function

3.3 와이어 로프의 강성 최적화

Table 3의 와이어 로프에 대하여 스트랜드의 경우와 같은 형식으로 아래와 같이 최적설계 문제를 구성하였다. 단, 설계변수는 스트랜드와 와이어의 꼬임각  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{31}$ 이고 side constraint는 스트랜드의 경우와 같이 설정하였다. 실제 로프의 제작시에는 보통꼬임이나 랭꼬임과 같이 꼬임각에 대한 제한이 주어질 것이나 여기서는 이론적으로 꼬임각의 변화에 따른 강성최적화에 도달하고자 하는 것이므로 스트랜드에서와 같은 side constraint만으로 최적설계를 수행하였다. 다른 강성계수에 대한 구속조건은 각 최대값에 대해 임의로 0.5, 0.5, 0.3의 가중치를 부여하였다.

$$\text{Minimize : } -D_1$$

$$\text{Subject to : } 0.5 \times (|D_2|)_{\max} - |D_2| < 0$$

$$0.5 \times (|D_3|)_{\max} - |D_3| < 0$$

$$0.3 \times (D_4)_{\max} - D_4 < 0$$

스트랜드를 구성하는 와이어의 꼬임각이 전체 로프의 강성 최적화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같이 세 가지 경우로 나누어 최적설계를 수행하였다. Case 1은 와이어의 꼬임각은 초기 사양대로 고정시키고 스트랜드의 꼬임각만을 설계변수로 하여 최적설계를 수행한 경우이

**Table 9** Optimization results for three cases

	$( D_2 )_{\max}$	$( D_3 )_{\max}$	$(D_4)_{\max}$	-OBJ
Case 1	1117.37	1032.02	7022.88	301.68
Case 2	1304.52	1147.16	7841.95	352.60
Case 3	1582.87	1227.05	9470.92	394.41

다. Case 2는 각 스트랜드에 대하여 최적설계를 수행하여 얻은 최적화된 와이어의 꼬임각을 사용하여 Case 1과 같이 2개의 설계변수에 대하여 최적설계를 수행한 경우이고 Case 3은 전체 로프에 대하여 6개의 설계변수를 가지고 최적설계를 수행한 경우이다.

Table 9는 앞에서 언급한 세 가지 경우에 대하여 최적설계를 수행한 결과를 나타낸다. Case 1과 같이 와이어의 꼬임각을 초기 사양대로 고정시켰을 때보다 Case 2와 같이 스트랜드에 대한 최적설계로부터 얻어진 와이어의 꼬임각으로 고정시킨 경우가 최대 축강성이 증가함을 알 수 있다. Case 3은 와이어의 꼬임각을 고정시키지 않고 설계변수로 사용한 경우로 최대 축강성이 가장 크게 나타난다. 구체적으로 Case 3의 경우는 Case 1에 비해서 30%를 넘는 최대 축강성의 향상을 얻을 수 있었다. 이로부터 로프의 강성에 큰 영향을 미치는 것은 스트랜드의 꼬임각이지만 와이어의 꼬임각도 무시할 수 없는 영향을 가짐을 알 수 있다. 따라서 스트랜드의 꼬임각에 실제적인 제한이 주어진다면 와이어의 꼬임각이 로프의 강성 최적화에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 예측된다.

4. 결 론

스트랜드와 와이어 로프의 강성에 대한 이론해석을 수행하고, 축강성을 최대화시키기 위한 최적설계를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 이론해석에 의하여 와이어 로프의 강성을 결정하는 프로그램을 작성하였고 그 타당성을 입증하였다.
- (2) 외부층의 꼬임각이 내부층의 꼬임각에 비하여 스트랜드의 강성에 큰 영향을 준다.
- (3) 꼬임방식에 따라 강성을 비교하면 축강성은 보통꼬임인 경우가 더 크지만 커플링 강성과 비틀림 강성은 랭꼬임인 경우가 더 크다.
- (4) 다른 강성계수에 구속조건을 부여하고 축강

성을 최대화시키는 최적설계 문제를 구성하였고, 이를 통하여 비틀림강성의 구속이 커플링강성의 구속에 비하여 축강성의 향상을 어렵게 함을 알 수 있었다.

(5) 스트랜드의 꼬임각이 로프의 강성에 큰 영향을 미치지만 와이어의 꼬임각도 무시할 수 없는 영향을 가지며 경우에 따라서 로프의 강성 최적화에 큰 역할을 할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Schrems, K. K., 1994, "Wear-related Fatigue in a Wire Rope Failure," *J. Testing and Eval.*, Vol. 22, No. 5, pp. 490~499.
- (2) Costello, G. A., 1983, "Stresses in Multilayered Cables," *J. Energy Resour. Technol.*, Vol. 105, pp. 337~340.
- (3) Velinsky, S. A., 1985, "Analysis of Fiber-core Wire Rope," *J. Energy Resour. Technol.*, Vol. 107, No. 3, pp. 388~393.
- (4) Hobbs, R. E. and Raoof, M., 1982, "Interwire Slippage and Fatigue Prediction in Stranded Cables for TLP Tethers," *Behavior of Offshore Structures*, Vol. 2, pp. 77~99.
- (5) Raoof, M. and Kraincanic, I., 1994, "Critical Examination of Various Approaches Used for Analysing Helical Cables," *J. Strain Analysis*, Vol. 29, No. 1, pp. 43~55.
- (6) Raoof, M. and Kraincanic, I., 1995, "Analysis of Large Diameter Wire Ropes," *J. Engng. Mechanics*, Vol. 121, No. 6, pp. 667~675.
- (7) Raoof, M. and Kraincanic, I., 1995, "Characteristics of Fibre-core Wire Rope," *J. Strain Analysis*, Vol. 30, No. 3, pp. 217~226.
- (8) Raoof, M. and Kraincanic, I., 1995, "Simple Derivation of the Stiffness Matrix for Axial/Torsional Coupling of Spiral Strands," *Comp. and Strut.*, Vol. 55, No. 4, pp. 589~600.
- (9) Velinsky, S. A., 1993, "A Stress Based Methodology for the Design of Wire Rope Systems," *J. Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 69~73.