

## 분산분석을 이용한 스트랜드의 축강성 예측에 관한 연구

박용대\*· 양원호\*\*· 허성필\*\*\*· 성기득\*\*\*  
(2000년 5월 2일 접수)

### A Study on the Axial Stiffness Prediction of Strand Using Analysis of Variance

Yong-Dae Park, Won-Ho Yang, Sung-Pil Heo and Ki-Deug Sung

**Key Words:** Strand(스트랜드), Wire Rope(와이어 로프), Axial Stiffness(축강성), Finite Element Analysis(유한요소해석), Analysis of Variance(분산분석)

#### Abstract

Wire ropes are widely used in cable car, suspension bridge and elevator, etc. and composed of single or multi-layer strands. It is difficult to find out the characteristics of a strand or wire rope because of complicated geometry and contact condition. In this study, the axial stiffness is evaluated using finite element method and reliable finite element analysis model is presented, taking into consideration the convergence of the length. The axial stiffness predictive equation of a strand is developed using analysis of variance, which can be applicable for characterizing the relationship between load and displacement when the strand configuration is determined.

#### 1. 서 론

와이어 로프(wire rope)는 와이어(wire)를 꼬아서 만든 기계요소로서, 단층 및 다층의 스트랜드(strand)로 구성된다. 이러한 와이어 로프는 높은 중량대비 강도를 지니고 있고, 휨에 대해서는 무시할 만큼 작은 저항능력을 지닌 유연한 부재로, 케이블카(cable car), 해양 정박시스템(mooring system), 현수교(suspension bridge), 송강기(elevator), 크레인(crane) 등에 널리 사용되고 있다.

로프는 주로 축방향의 하중을 전달하게 되므로 무엇보다 축강성(axial stiffness)이 설계의 중요하고려사항이 된다. 로프의 강성은 그를 구성하고

있는 스트랜드의 강성을 바탕으로 하게 되며 따라서 로프의 설계시에 스트랜드의 축강성에 대한 고찰이 중요한 의미를 지니게 된다.

Fig. 1(a)는 전형적인 와이어 로프의 기하학적 형상을 나타낸 것으로, 코어(core)를 중심으로 스트랜드가 꼬여 있으며, 스트랜드는 다시 중앙의 코어 와이어(core wire)를 헬리컬 와이어(helical wire)가 감싸고 있다. Fig. 1(b)는 여러 종류의 와이어 로프에 대한 단면 형상을 나타낸다. 로프는 이러한 복잡한 기하학적 형상과 다양한 설계변수, 와이어 사이의 복잡한 접촉(contact) 등으로 인해 기계적 특성을 정확하게 파악하는 것이 매우 어렵다. 따라서, 보다 간편한 방법으로 신뢰성 있게 기계적 특성을 파악할 수 있는 방법이 요구되고 있다.

로프 및 스트랜드의 강성에 대한 연구는 이론 해석 및 실험 그리고 유한요소해석(finite element analysis)을 통하여 진행되어 왔다. Costello는 스트랜드에 대해 이론 응력해석을 수행하여 최대응력을 구하였다.<sup>(1)</sup> Raoof와 Kraincanic은 이론해석을

\* 성균관대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\*\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

E-mail : spheo@orgio.net

TEL : (031)290-7496 FAX : (031)290-5849

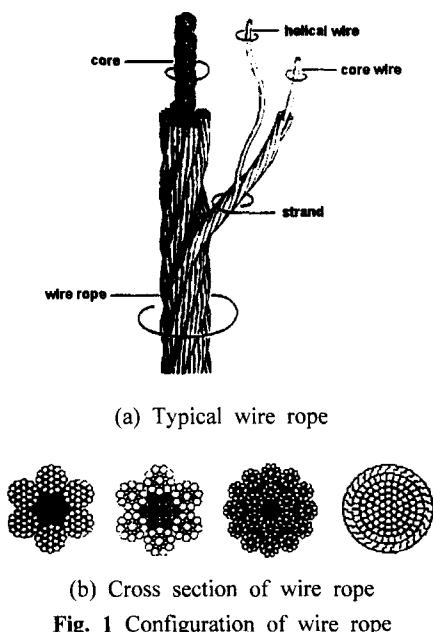


Fig. 1 Configuration of wire rope

통해 로프에 작용하는 축하중 및 토크와 변형률 및 비틀림각 사이의 관계를 설정하여 이로부터 강성계수를 결정하였고,<sup>(2,3)</sup> 스트랜드의 강성에 대한 간략식을 제안하였다.<sup>(4)</sup> Utting과 Jones는 단층 스트랜드에 대해서 인장시험을 통하여 하중·변형 특성을 파악하였다.<sup>(5)</sup> 최근 들어서는 컴퓨터 성능 및 유한요소해석 프로그램의 발달로 인하여 유한요소법을 이용한 해석이 이루어지고 있으며, Chiang은 유한요소법을 이용하여 특정 길이의 단층 스트랜드의 강성을 해석하고, 통계적 방법을 이용하여 강성 예측식을 제안하였다.<sup>(6)</sup> Jiang 등은 유한요소해석을 통해 스트랜드의 하중·변형 특성을 탄소성 영역까지 해석하였다.<sup>(7)</sup>

본 연구에서는 Chiang의 해석 모델<sup>(6)</sup>에서 길이 설정에 대한 문제점을 지적하고, 적합한 유한요소해석 모델을 이용하여 스트랜드의 축강성을 해석하였다. 그 해석 결과를 바탕으로 단층 및 이층 스트랜드에 대해 통계학적 기법의 하나인 분산분석법을 이용하여 꼬임각(lay angle or helical angle), 코어 와이어의 반경 및 헬리컬 와이어의 반경을 변수로 하는 축강성 예측식을 구성하였다. 또한 이러한 예측식에 의한 결과를 유한요소해석 결과와 비교 고찰하여 보다 신뢰성 있는 수 정된 축강성 예측식을 제시하였다. 이렇게 강성 예측식이 구성되면 보다 간편하게 스트랜드의 하

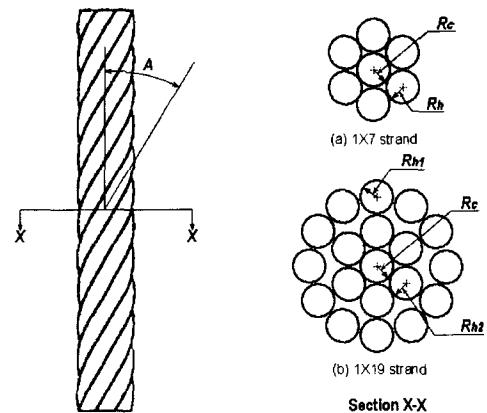


Fig. 2 Analysis model

중·변형 특성을 파악할 수 있을 것이다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석모델 및 해석방법

본 연구에서는 비교적 구조가 단순하며, 와이어 로프의 기본 구성요소인 Fig. 2와 같은 1x7 스트랜드 및 1x19 스트랜드를 해석모델로 설정하였다. 해석모델로 사용된 와이어의 물성치는 탄성계수(Young's modulus)가  $E=197.9\text{GPa}$ 이고, 프아송의 비(Poisson's ratio)는  $\nu=0.28$ 이다.

유한요소해석 모델은 두 종류의 스트랜드에 대해 각각 Fig. 3 및 Fig. 4와 같으며 3차원 8절점 요소를 사용하였다. 헬리컬 와이어가 꼬이는 헬리컬 곡선을 보다 정확히 구현하고, 와이어 사이의 접촉부는 접촉 조건을 고려하여 상세하게 요소망을 구성하였다. 헬리컬 와이어가 코어 와이어를  $360^\circ$  감는 길이를 1피치 길이(pitch length)라고 할 때, 1x7 스트랜드의 경우에는 13000여개의 요소와 16000여개의 절점이 사용되었다. 하중 및 구속조건은 스트랜드의 한쪽 끝을 구속한 상태에서 반대편 끝단에서 축방향으로 변위를 가함으로써 하중을 부여하는 변위제어법을 사용하였다.

스트랜드의 축강성은 구속된 절점에서의 반력,  $R_s$ 를 유한요소해석을 통하여 구한 후 식 (1)과 같이 스트랜드의 단면적,  $A_s$ 로 나누어 준 값을 변형률  $\epsilon$ 으로 나누어 계산하였다.

$$S = \frac{(R_s/A_s)}{\epsilon} \quad (1)$$

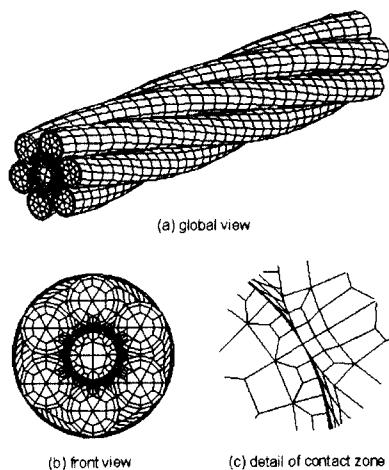


Fig. 3 FE-Model for 1x7 strand

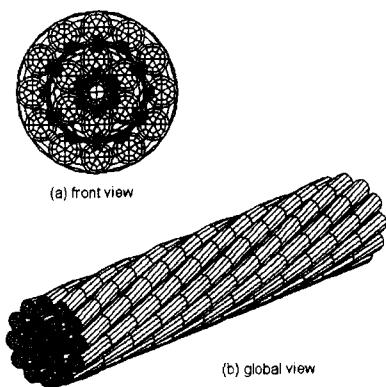


Fig. 4 FE-Model for 1x19 strand

본 연구에서는 유한요소 해석을 위하여 전처리기(pre-processor)로 PATRAN version 7.0을 사용하였으며, 해석 및 후처리기(post-processor)로 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS version 5.8을 사용하였다.

## 2.2 해석결과

유한요소해석 모델의 타당성을 검토하기 위해 Chiang의 연구<sup>(6)</sup>에서 설정된 사양 중에서 Table 1과 같은 스트랜드에 대해서 유한요소해석을 수행하여 축강성을 구하고 그 결과를 Chiang의 결과<sup>(6)</sup>와 함께 Table 2에 나타내었다. 표에서 같이 두

Table 1 Construction of 1x7 stand

Strand type	$R_c$ (mm)	$R_h$ (mm)	$A$ (deg.)	$L$ (mm)	C
I	1.97	1.865	9.23	7.67	sliding
II	1.97	1.865	17.03	7.67	sliding
III	1.97	1.865	9.23	9.971	sliding
IV	2.47	1.365	9.23	9.971	no sliding

$R_c$  : radius of core wire

$R_h$  : radius of helical wire

$A$  : lay angle or helical angle

$L$  : length of model

C : contact condition

Table 2 Axial stiffness of 1x7 stand

Strand type	Axial stiffness		Error e(%)
	$S_a$ (GPa)	$S_a$ (GPa) <sup>(6)</sup>	
I	189.9	194.8	2.5
II	174.7	179.3	2.6
III	188.4	192.6	2.2
IV	190.7	196.1	2.8

결과 사이의 오차가 대략 3% 이내로 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5는 해석모델의 길이에 따른 스트랜드의 축강성 변화를 나타낸 그림이다. 함께 나타낸 Chiang의 결과<sup>(6)</sup>는 상당히 짧은 길이의 해석모델에 대해서만 해석을 수행하여 와이어의 꼬임을 충분히 표현하지 못한 문제점이 있다. 따라서, 본 해석에 앞서서 유한요소해석 모델의 길이가 해석 결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 코어 와이어의 반경이 1.97mm, 헬리컬 와이어의 반경이 1.865mm, 꼬임각이 17.03°인 1x7 스트랜드에 대해서 길이에 따른 축강성 해석을 수행하였다. 그림에서와 같이 유한요소해석 모델의 길이가 증가함에 따라 스트랜드의 축강성은 감소하다가 일정한 값에 수렴하고 있으며 이러한 경향은 1x19 스트랜드에서도 동일하게 나타났다. 따라서, 스트랜드 및 와이어 로프의 유한요소해석에서 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 특정길이 이상의 유한요소해석 모델을 설정해야 한다.

Fig. 6은 위의 해석 모델의 길이에 대한 고찰을 바탕으로 1피치 길이의 해석 모델을 사용하여 유한요소해석을 통해 얻은 스트랜드의 하중-변위

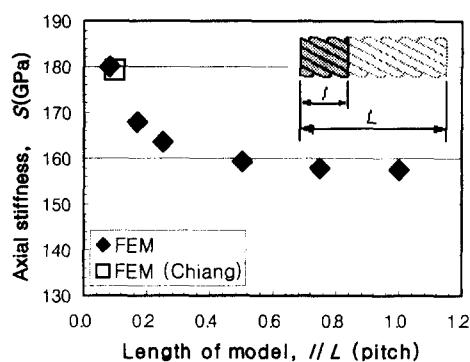


Fig. 5 Axial stiffness on variation of the length of model for 1×7 strand

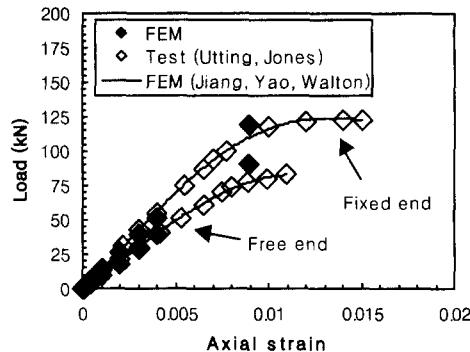


Fig. 6 Load-strain curve of strand using 1 pitch length model

관계를 나타낸다. 함께 나타낸 Utting 등의 실험 결과 및 Jiang 등의 해석 결과<sup>(7)</sup>와 탄성구간에서 잘 일치함을 알 수 있다. Table 2와 Fig. 6의 결과로부터 본 연구에서의 유한요소해석을 통한 스트랜드의 축강성 해석이 타당하다고 할 수 있겠다.

Table 3은 코어 와이어의 반경이 2.47mm, 헬리컬 와이어의 반경이 1.865mm, 꼬임각이 15°인 1×7 스트랜드에 대해서, 코어 와이어와 헬리컬 와이어 사이의 마찰계수를 변화시켜가며 축강성을 구한 결과이다. 접촉으로 인한 마찰을 완전 미끄럼 상태, 미끄럼이 전혀 없는 상태, 그리고, 마찰계수가 0.15, 0.3인 경우로 나누어 해석을 수행하였다. 접촉부를 포함하는 유한요소해석에서는 접촉이 발생하는 두 면을 각각 접촉면으로 설정하여 상대적 침투를 방지하게 되며 접촉조건이 만족되도록 상세하게 요소망을 구성하게 된다. 이러한 접촉면 설정에서 두 물체의 상대 운동에

Table 3 Axial stiffness on variation of the contact condition

Friction coefficient, $\mu$	Axial stiffness, $S$ (GPa)
0 (sliding condition)	167.31
0.15	167.32
0.3	167.33
$\infty$ (no sliding condition)	169.21

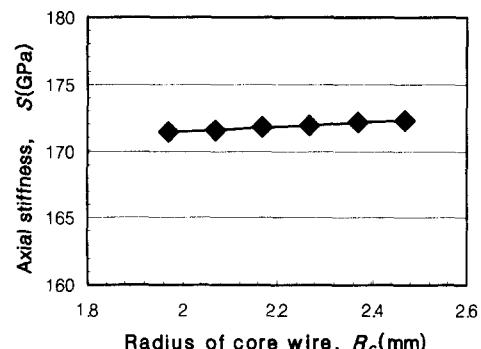


Fig. 7 Axial stiffness on variation of the radius of core wire for 1×19 strand

영향을 미치는 마찰계수를 부여하였다. 표의 결과에서와 같이 마찰계수의 변화에 대하여 스트랜드의 축강성은 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

Figs. 7~9는 1×19 스트랜드에 대하여 각각 코어 와이어의 반경, 헬리컬 와이어의 반경 및 꼬임각에 따른 스트랜드의 축강성 변화를 나타낸 그림으로 1×7 스트랜드도 동일한 경향을 나타낸다. Fig. 7에서와 같이 스트랜드의 축강성은 코어 와이어의 반경이 증가함에 따라 증가한다. 헬리컬 와이어의 반경은 코어 와이어의 경우와는 반대로 Fig. 8에서와 같이 와이어의 반경이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 스트랜드의 축강성을 식 (1)에 의해 결정함에 있어서 헬리컬 와이어의 반경 증가로 늘어난 스트랜드의 단면적에 비해 지지 반력의 증가량이 상대적으로 작기 때문에 나타나는 현상이다. 꼬임각의 감소는 스트랜드의 축강성을 증가시키며, 와이어의 반경을 변화시키는 것 보다 큰 영향을 미친다. 1×19 스트랜드의 경우 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 것과 같이 축강성은 안쪽 헬리컬 와이어의 영향

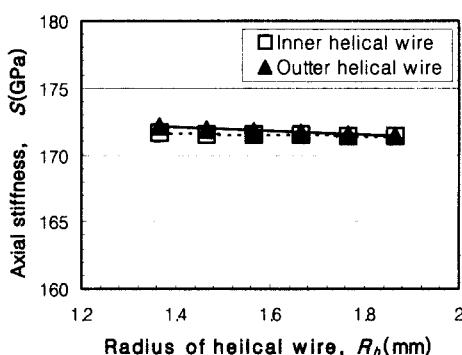


Fig. 8 Axial stiffness on variation of the radius of helical wire for 1x19 strand

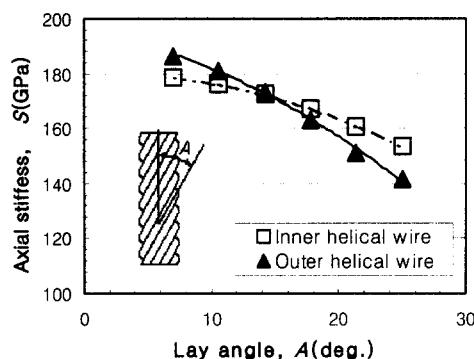


Fig. 9 Axial stiffness on variation of the lay angle for 1x19 strand

보다는 바깥쪽 와이어의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

### 3. 축강성 예측식 구성

#### 3.1 개요

본 연구에서는 통계학적 기법의 하나인 실험계획법(design of experiment)의 분산분석을 이용하여 스트랜드의 축강성 예측식을 구성하였다. 이때, 유한요소해석 결과에서 축강성에 거의 영향을 미치지 않는 경향을 나타낸 와이어 사이의 마찰계수를 제외한 코어 와이어의 반경, 헬리컬 와이어의 반경 및 꼬임각을 인자로 설정하였으며, 각 인자들의 수준은 0과 1의 두 단계로 기존의 연구들<sup>(2~4,6,7)</sup>에 나타난 사양들을 고려하여 1x7 스트랜드는 Table 4와 같이, 1x19 스트랜드는 Table 5와 같이 설정하였다.

Table 4 Factors and levels for design of experiments of 1x7 strand

Factors	Levels	
	0	1
$R_c$ (mm)	1.97	2.47
$R_h$ (mm)	1.365	1.865
$A$ (deg.)	7	25

Table 5 Factors and levels for design of experiments of 1x19 strand

Factors	Levels	
	0	1
$R_c$ (mm)	1.97	2.47
$R_{h2}$ (mm)	1.365	1.865
$R_{h1}$ (mm)	1.365	1.865
$A$ (deg.)	7	25

$R_{h1}$  : radius of the outer helical wire

$R_{h2}$  : radius of the inner helical wire

데이터의 분석에는 각 인자들의 주효과(main effect)뿐만 아니라, 교호작용(interaction)에 의한 영향까지도 효과적으로 분석할 수 있는 요인배치법을 사용하였다. 각 인자들 간의 교호작용은 두 인자들 사이의 교호작용만을 고려하였으며, 세 가지 인자 이상의 교호작용에 의한 값은 오차로 간주하였는데, 실제로 세개 이상의 인자들간의 교호작용에 의한 효과는 무시할 수 있을 만큼 작은 값으로 나타났다.

#### 3.2 축강성 예측식의 구성

실험계획법의 이론과 Chiang의 연구<sup>(6)</sup>를 바탕으로 하여 1x7 스트랜드의 축강성 예측식을 식 (2)와 같이 가정하였다.

$$S_{1 \times 7} = S_m + c_1 r_c + c_2 r_h + c_3 a + c_4 r_c r_h + c_5 r_c a + c_6 r_h a \quad (2)$$

여기서  $S_m$ 은 스트랜드의 평균 축강성을 나타내며,  $c_1 \sim c_6$ 는 각각의 인자가 축강성에 미치는 영향을 정량적으로 나타내는 계수이다.  $r_c$ ,  $r_h$ ,  $a$ 는 코어 와이어의 반경, 헬리컬 와이어의 반경 및 꼬임각을 수준이 0일 때 -1의 값을 갖고, 수준이 1일 때 +1의 값을 갖도록 무차원화 한 값이며, 예를 들어  $a$ 는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$a = \frac{A - \frac{A_1 + A_0}{2}}{\frac{A_1 - A_0}{2}} \quad (3)$$

$1\times 19$  스트랜드에 대하여  $1\times 7$  스트랜드에서와 같은 방법으로 식 (4)와 같이 축강성 예측식을 가정하였다.

$$\begin{aligned} S_{1\times 19} = S_m &+ c_1 r_c + c_2 r_{h2} + c_3 r_{h1} + c_4 a_2 \\ &+ c_5 a_1 + c_6 r_c r_{h2} + c_7 r_c r_{h1} \\ &+ c_8 r_c a_2 + c_9 r_c a_1 + c_{10} r_{h2} r_{h1} \quad (4) \\ &+ c_{11} r_{h2} a_2 + c_{12} r_{h2} a_1 + c_{13} r_{h1} a_2 \\ &+ c_{14} r_{h1} a_1 + c_{15} a_2 a_1 \end{aligned}$$

스트랜드의 축강성 예측식을 구성하기 위하여, 설정된 인자와 수준에 대하여 유한요소해석으로부터 얻은 결과를 바탕으로 분산분석(analysis of variance; ANOVA)을 수행하였다. Table 6은  $1\times 7$  스트랜드에 대한 유한요소해석 결과를 나타내며, 이를 바탕으로 분산분석을 수행하여 Table 7과 같은 분산분석표로 정리하였다.

Table 6 Design matrices and test results for  $1\times 7$  strand

Test condition	Factor			Axial stiffness
	$R_c$	$R_h$	$A$	$S(\text{GPa})$
1	0	0	0	188.05
2	0	0	1	134.66
3	0	1	0	187.73
4	0	1	1	124.43
5	1	0	0	188.72
6	1	0	1	143.50
7	1	1	0	187.80
8	1	1	1	130.21

Table 7 ANOVA for  $1\times 7$  strand

Source	Sum of squares	D.O.F.	Mean squares	F-ratio
$R_c$	29.491	1	29.491	38.958
$R_h$	76.632	1	76.632	101.231
$A$	6022.531	1	6022.531	7955.787
$R_c R_h$	1.674	1	1.674	2.211
$R_c A$	24.082	1	24.082	31.812
$R_h A$	62.050	1	62.050	81.968
Error	0.757	1	0.757	
Total	6217.217	7		

스트랜드의 축강성에 미치는 주효과 및 교호작용의 영향은  $1\times 7$  스트랜드와  $1\times 19$  스트랜드에 대해 각각 Table 8과 Table 9에 정리하였으며, 이렇게 분석된 결과를 이용하여 스트랜드의 축강성 예측식을 각각 식 (5) 및 (6)과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} S_{1\times 7} = 160.64 &+ 1.92 r_c - 3.09 r_h - 27.44 a \\ &+ 1.74 r_c a - 2.78 r_h a \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_{1\times 19} = 160.36 &- 10.89 a_2 - 21.40 a_1 \\ &- 2.57 r_{h2} a_2 + 2.35 r_{h2} a_1 \\ &+ 2.25 r_{h1} a_2 - 3.02 r_{h1} a_1 \\ &+ 1.72 a_2 a_1 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 각 항의 부호가 의미하는 것은 '+'일 때는 수준이 0에 해당하는 값에서 1에 해당하는 값으로 증가함에 따라 해당 인자는 축강성을 증가시키는 효과를 가지고 있다는 것을 나타내며, 반대로 '-'일 때는 축강성을 감소시키는 요인으로 작용한다는 것을 나타낸다.

Table 8 List of main effect and interactions for  $1\times 7$  strand

Variable		Effect(GPa)
Mean		160.64
Main effect	$R_c$	3.84
	$R_h$	-6.18
	$A$	-54.88
Interaction	$R_c A$	3.48
	$R_h A$	-5.56

Table 9 List of main effect and interactions for  $1\times 19$  strand

Variable		Effect(GPa)
Mean		160.36
Main effect	$A_2$	-21.78
	$A_1$	-42.80
	$R_{h2} A_2$	-5.14
Interaction	$R_{h2} A_1$	4.70
	$R_{h1} A_2$	4.50
	$R_{h1} A_1$	-6.04
	$A_2 A_1$	3.44

### 3.3 축강성 예측식의 수정

식 (5)와 (6)을 이용하여 스트랜드의 축강성을 구하면 꼬임각에 대한 설정 범위의 중앙 부근에서 비교적 큰 오차를 나타낸다. 이는 축강성 예측식을 구성하기 위하여 데이터를 분석하는 방법으로 수준의 개수가 2인 요인배치법을 사용함으로써 발생한 것으로, 수준의 개수가 2라는 것은 설정된 수준을 양 끝점으로 두 점을 잇는 관계를 선형적으로 보았다는 것을 의미한다. 하지만, Fig. 8에서 보는 것처럼 스트랜드의 축강성은 꼬임각에 대하여 직선적인 관계가 아니다. 따라서, 기준 데이터로 사용된 꼬임각이  $7^\circ$  와  $25^\circ$  부근에서는 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 설정 범위의 중앙에 해당하는  $16^\circ$  부근에서는 비교적 큰 오차를 나타내게 된다. 따라서, 설정된 스트랜드의 사양 전 범위에 걸쳐서 보다 정확한 축강성을 예측하기 위해서는 이러한 현상을 보정할 수 있는 수정항을 필요로 한다.

축강성 예측식의 수정은 Fig. 10과 같이 꼬임각의 중앙에서의 결과를 보정하여, 두 개의 직선적인 관계로 이루어지도록 하였다. 이러한 방법으로 수정을 할 수 있는 이유는 꼬임각에 대한 결과가 직선적인 관계에서 벗어남이 크지 않기 때문이다. 이렇게 수정된 스트랜드의 축강성 예측식을  $1 \times 7$  스트랜드는 식 (7)에,  $1 \times 19$  스트랜드는 식 (8)에 각각 나타내었다.  $1 \times 19$  스트랜드는 안쪽 및 바깥쪽 헬리컬 와이어의 꼬임각에 의한 오차를 각각 보정하여 수정식을 구성하였다.

$$S_{1 \times 7} = 160.64 + 1.92r_c - 3.09r_h - 27.44a + 1.74r_c a - 2.78r_h a - 7.70(|a| - 1) \quad (7)$$

$$S_{1 \times 19} = 160.36 - 10.89a_2 - 21.40a_1 - 2.57r_{k2}a_2 + 2.35r_{k2}a_1 + 2.25r_{h1}a_2 - 3.02r_{h1}a_1 + 1.72a_2a_1 - 4.04(|a_2| - 1) - 3.01(|a_1| - 1) \quad (8)$$

축강성 예측식의 타당성을 검토하기 위하여 유한요소해석 결과 및 예측식을 통하여 계산한 결과를 비교하였으며,  $1 \times 7$  스트랜드와  $1 \times 19$  스트랜드에 대해 각각 Table 10, 11에 나타내었다. 표의 결과에서와 같이 예측식으로부터 얻은 결과가 유한요소해석으로부터 얻은 결과와 잘 일치하며, 꼬임각 설정 범위의 중앙 부근에서는 수정식을 적용하여 보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

유한요소해석 결과 데이터를 바탕으로, 분산분석을 이용하여 축강성 예측식을 구성하고 여기에 수정항을 추가하는 본 연구에서의 절차에 의해서 특정의 스트랜드에 대해 적용 타당한 축강성 예

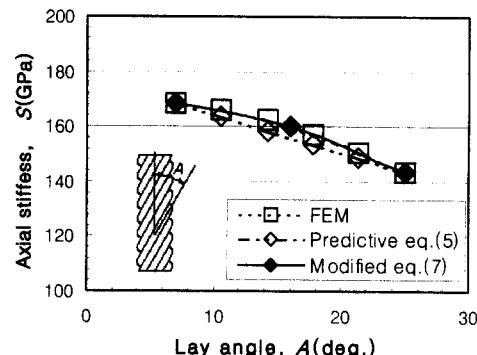


Fig. 10 Comparison between predictive equation with FEM

Table 10 Comparison of  $1 \times 7$  stand axial stiffness

Strand type	$R_c$ (mm)	$R_h$ (mm)	$A$ (deg.)	Axial stiffness(GPa)		
				Eq.(5)	Eq.(7)	FEM
V	1.97	1.65	8	184.57	185.43	187.44
VI	2.25	1.46	16	162.79	170.49	170.42
VII	2.43	1.80	22	141.28	143.84	143.97

Table 11 Comparison of  $1 \times 19$  stand axial stiffness

Strand type	$R_c$ (mm)	$R_h$ (mm)	$R_{h1}$ (mm)	$A_2$ (deg.)	$A_1$ (deg.)	Axial stiffness(GPa)		
						Eq.(6)	Eq.(8)	FEM
VIII	2.47	1.865	1.865	25	25	129.07	129.07	129.26
IX	1.97	1.365	1.365	7	7	193.65	193.65	194.41
X	2.22	1.615	1.615	16	16	160.63	167.68	168.56
XI	2.37	1.422	1.69	12	19	155.99	160.50	162.45
XII	2.07	1.763	1.56	19	16	152.16	157.06	157.56

축식을 구성할 수 있다. 그리고 이를 이용하면 임의의 설계 사양에 대한 축강성의 평가를 복잡한 유한요소해석 없이 간편하게 결정할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

유한요소법을 이용하여 스트랜드의 축강성을 해석하고, 해석 결과를 바탕으로 통계학적 분석 방법의 하나인 분산분석을 이용하여 스트랜드의 축강성 예측식을 구성하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소법을 이용하여 스트랜드의 축강성을 해석하기 위해서는 특정길이 이상의 모델을 설정해야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

(2) 스트랜드의 축강성 해석에 있어서 마찰의 영향은 국부적인 현상으로 그 영향이 매우 적었다.

(3) 스트랜드의 축강성은 코어 와이어의 반경이 증가함에 따라 증가하며, 헬리컬 와이어의 반경이 증가함에 따라서는 감소한다.

(4) 스트랜드의 축강성은 주로 꼬임각에 영향을 받고 있으며, 꼬임각이 증가할수록 작아진다.

(5) 스트랜드의 축강성은 헬리컬 와이어의 반경과 꼬임각 모두에 대해서 바깥쪽 와이어의 영향을 더 크게 받는다.

(6) 통계학적 방법의 하나인 분산분석법을 이용하여 스트랜드의 축강성 예측식을 구성하였으며, 이 식을 이용하면 다양한 설계사양에 따른 축강성을 간편하게 결정할 수 있다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산

업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Costello, G. A., 1983, "Stresses in Multilayered Cables," *J. Energy Resour. Technol.*, Vol. 105, pp. 337~340.
- (2) Raoof, M. and Kraincanic, I., 1995, "Analysis of Large Diameter Wire Ropes," *J. Eng. Mechanics*, Vol. 121, No. 6, pp. 667~675.
- (3) Raoof, M. and Kraincanic, I., 1995, "Characteristics of Fiber-Core Wire Rope," *J. Strain Analysis*, Vol. 30, No. 3, pp. 217~226.
- (4) 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.
- (5) Utting, W. S. and Jones, N., 1985, "Tensile Testing of a Wire Rope Strand," *J. Strain Analysis*, Vol. 20, No. 3, pp. 151~164.
- (6) Chiang, Y. J., 1996, "Characterizing Simple-Stranded Wire Cables Under Axial Loading," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 24, pp. 49~66.
- (7) Jiang, W. G., Yao, M. S. and Walton, J. M., 1999, "A Concise Finite Element Model for Simple Straight Wire Rope Strand," *Int. J. of Mechanical Sciences*, Vol. 41, pp. 143~161.
- (8) 전치혁, 정민근, 이혜선, 1998, "공학용통계," POSTECH PRESS, pp. 231~260.