

혁신적 프리스트레스트 가시설(IPS)의 띠장에 대한 등가 휨강성의 산정

Estimation for Equivalent Flexural Stiffness of Innovative Prestressed Support(IPS) Wale

김 성 보¹⁾ · 김 훈 겸²⁾ · 허 인 성³⁾
Kim, Sung Bo · Kim, Hun Kyom · Heo, In Sung

요약: 본 논문에서는 혁신적 프리스트레스트 가시설(IPS)에 적용되는 띠장에 대한 휨 강성식을 엄밀히 유도하고, 이를 바탕으로 실제 굴착 설계에 필요한 띠장의 등가 휨강성 설계식을 제시하였다. 휨 토압을 받는 IPS 띠장에 배치된 케이블 장력을 축 변형 효과를 고려한 경우와 무시한 경우에 대하여 각각 엄밀해를 도출하였다. 가상일의 원리를 이용하여 1-Post, 2-Post, 3-Post와 4-Post의 받침대를 갖는 IPS 띠장 중앙부의 수직변위를 유도하였고, 시간장과 케이블 경사각의 변화에 따른 띠장의 휨 거동 특성을 파악하였다. 유도된 중앙부 변위로부터 실제 굴착면 설계시 활용될 수 있는 간략화된 IPS 띠장의 등가 휨강성을 제시하였고, 본 연구에서 도출된 엄밀해 및 범용 유한요소해석 프로그램을 이용한 결과 비교를 통하여 제시된 설계식의 타당성을 입증하였다.

ABSTRACT: The flexural-stiffness formula of the wale for the innovative prestressed support (IPS) system was precisely derived, and the equivalent beam stiffness was introduced for application in the actual design of the IPS wale. The cable tension forces of the IPS wale were calculated in both cases, and the axial-deformation effects were included and ignored, respectively. The central displacements of the 1-post, 2-post, 3-post, and 4-post IPS wales were calculated based on the principle of virtual work. The effects of the IPS wale length and cable inclination angle were also investigated using the derived central displacements. The simplified equivalent flexural stiffness of the IPS wale is presented herein for design purposes, and the validity of the proposed design formula was verified through its comparison with the FE and analysis solutions.

핵심 용어: 외부긴장, 강재보, 휨강성, 등가보, IPS

KEYWORDS: Externally Prestressed, Steel Beam, Flexural Stiffness, Equivalent Beam, IPS

1. 서론

케이블 부재로 긴장력을 도입하여 외력을 지지하는 시스템은 구조물에 발생하는 내력을 케이블로 지지하여 응력을 분산시키는 역할을 하고 있는데 이와 같이 케이블이 갖는 구조적인 장점을 적용하는 구조물은 교량뿐 아니라 많은 토목구조물에서 적용하고 있다. 최근들어 흙막이 가시설 공사를 보다 효율적으로 안전하게 수행 할 수 있도록 H형강에 강선을 배치하고 프리스트레스트를 도입하여 H형강의 휨 저항력을 대폭 증가시킨 혁신적인 가시설 공법인 IPS (Innovative Prestressed Support) 공법이 개발되었다. (한만엽 등 2003, 김성보 등 2005)

IPS 공법은 기존의 가시설 공사에 사용되는 수많은 H-형강 대신에 프리스트레스트가 도입된 띠장을 사용하여 토공 및 가시설 공사의 작업효율이 대폭 개선되며 시공이 편리해짐으로써 추가적인 경제적 이득이 있다. 또한 단순화된 설치 및 해체 공정으로 인하여 공사 기간을 대폭 단축 할 수 있으며 파괴거동이 압축 좌굴파괴가 아닌 연성 휨 파괴이므로 파괴의 전조가 뚜렷하여 현장에서 발생할 수 있는 위험 요소에 대한 대처 능력이 월등히 뛰어나 보다 안전한 현장을 운영 할 수 있어 사고의 위험을 대폭 줄일 수 있다.

케이블이 사용된 외부긴장 시스템과 관련된 연구로서, IPS 띠장의 설계방법과 해석에 관한 연구(김성보 등, 2005, 2007)

1) 충북대학교 토목공학과 교수(sbkim@chungbuk.ac.kr)
2) 교신저자, 충북대학교 토목공학과 박사수료
(Tel. 043-261-3241, Fax. 043-275-2377, E-mail: navykhk@naver.com)
3) 충북대학교 토목공학과 공학석사(insung279@daum.net)

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

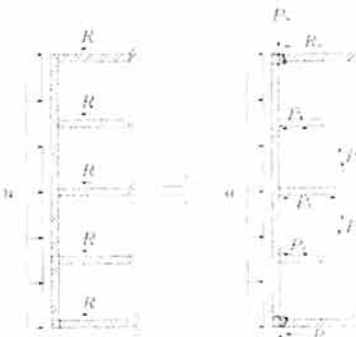
및 IPS 시스템의 비선형 해석에 관한 연구(이준석 등, 2006) 등이 수행되었다. 또한 외부 프리스트레스를 이용하여 기존 구조물을 보강하는 연구도 수행되었다(박선규, 2004). 한편 등가보에 관한 연구로, 정재철(2006) 등은 대칭단형 단순보의 등가보 변환 방법과 그에 따른 고유치해석 방법을 제시하였고 최인식(2007) 등은 등가보이론을 이용하여 복합 거더의 정적 및 자유진동 해석을 수행하였으며, 문상필(2008) 등은 계단형 외팔보의 등가보 변환에 의한 기본고유진동수 해석을 발표하였다.

흙막이 가시설의 설계에서, 굴착의 진행에 따른 토압을 산정하기 위하여 띠장을 보요소로 모델링하고 버팀보 위치의 횡변위를 구속하여 설계토압을 산정한다. 하지만, IPS 띠장은 H-형강 이외에 받침대 및 케이블로 구성되어있기 때문에 받침대 및 케이블이 포함된 IPS 띠장의 휨강성을 산정하고 이로부터 등가의 휨강성을 갖는 단일보로 띠장을 고려하여 굴착에 따른 설계토압을 산정하여야 한다.

본 논문에서는 혁신적 프리스트레스트 가시설 구조시스템(IPS)에 적용되는 띠장에 대한 휨 강성식을 엄밀히 유도하고, 이를 바탕으로 실제 굴착 설계에 필요한 띠장의 등가 휨강성식을 제시하였다. 1-Post, 2-Post, 3-Post와 4-Post의 받침대를 갖는 IPS 띠장 중앙부의 수직변위를 유도하였고, 지간장과 케이블 경사각의 변화에 따른 띠장의 휨 거동 특성을 파악하였다. 유도된 중앙부 변위로부터 실제 굴착면 설계시 활용될 수 있는 간략화된 IPS 띠장의 등가 휨강성을 제시하고, 제시된 설계식의 타당성을 본 연구에서 도출된 엄밀해 및 범용 유한요소해석 프로그램을 이용한 결과 비교를 통하여 입증하였다.

2. IPS 띠장의 기본구조

IPS공법의 기본 개념은 그림 1(a)에 평면도로 도시되어 있다. 기존 공법에서는 토압을 지지해 주기 위하여 그림 1(a)에 제시된 바와 같이 5개의 버팀보를 배치하여, 버팀보의 축력으로 토압을 지지한다. 그러나, IPS공법에서는 받침대와 강선에 장력을 발생시켜 재래식 공법에서의 중간 버팀보와 같은 위치에 같은 크기의 지지력을 발휘시킨다.

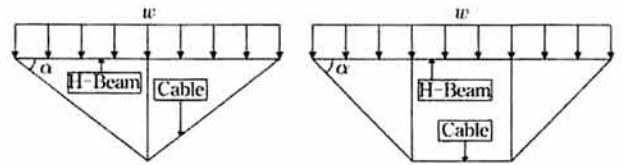


(a) Concept of IPS



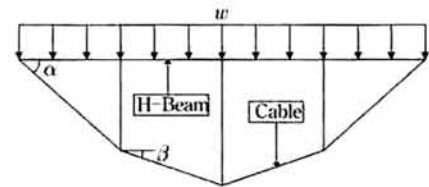
(b) Application of IPS

그림 1. IPS system

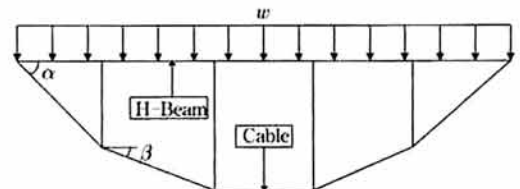


(a) 1-Post

(b) 2-Post



(c) 3-Post



(d) 4-Post

그림 2. Structure of IPS wale

본 연구에서 연구대상으로 산정한 IPS 띠장의 기본구조는 1-Post, 2-Post, 3-Post와 4-Post의 받침대를 갖는 구조로서 그림 2에서 보인 것과 같이 가정하였다. 한편 IPS의 기본모듈은 IPS띠장, 받침대, 띠장과 받침대를 연결하는 받침대 브레이싱으로 구성 된다. 이런 기본모듈에서 경간이 길어지면 받침대의 수를 증가시키고, 경간에 따라 적용 Post가 달라진다.

부재설계시 필요한 설계토압 설정은 우선 굴착깊이에 따라 각 연직구간별 최소-최대토압을 파악한 후, 구간별 최대토압을 설계토압으로 사용한다. 연직방향 토압분포에 따라서 IPS 띠장을 바꿀 수 있으나, 현장에서의 시공의 연속성 때문에 받침대의 수는 연직방향으로 동일하게 설정하고, 케이블 개수 및 띠장 및 받침대의 단면을 변화시키는 방법으로 굴착 깊이에 따른 최대 설계토압을 지지하도록 설계한다.

3. IPS 띠장의 부재력 및 휨 변위

3.1 IPS 띠장의 케이블 장력

토압과 같은 등분포 횡하중이 작용할 경우 각각의 구간에서 발생하는 케이블 장력은 그림 3과 같이 변형의 적합조건을 사용하여 엄밀히 계산할 수 있다.

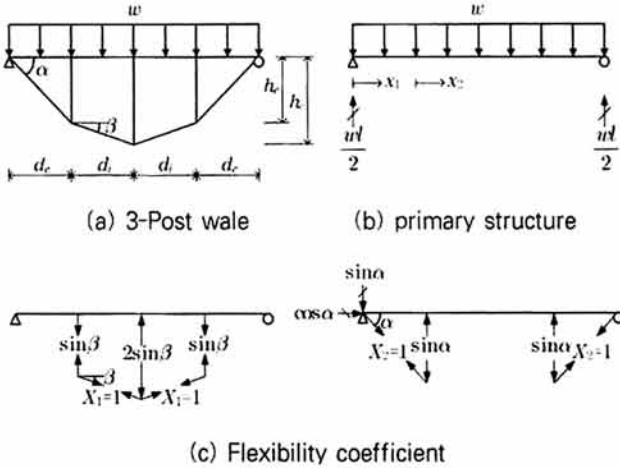


그림 3. Compatibility condition of 3-Post wale

여기서, 케이블 장력(X_1 , X_2)을 부정정력으로 취했을 때 적합조건식은 다음 식 (1)과 같다.

$$f_{11} X_1 + f_{12} X_2 + \delta_{10} = 0 \tag{1a}$$

$$f_{21} X_1 + f_{22} X_2 + \delta_{20} = 0 \tag{1b}$$

여기서,

$$\delta_{10} = 2 \int_0^d \frac{M_{10}}{EI} m_{11} dx_1 + 2 \int_0^d \frac{M_{20}}{EI} m_{21} dx_2 \tag{2a-e}$$

$$\delta_{20} = 2 \int_0^d \frac{M_{10}}{EI} m_{12} dx_1 + 2 \int_0^d \frac{M_{20}}{EI} m_{22} dx_2$$

$$f_{11} = 2 \int_0^d \frac{m_{11}^2}{EI} dx_1 + 2 \int_0^d \frac{m_{21}^2}{EI} dx_2 + \frac{2d_1}{EA} \cos^2 \beta + \frac{2d_1}{EA_c} \sec \beta$$

$$f_{12} = f_{21} = 2 \int_0^d \frac{m_{11} m_{12}}{EI} dx_1 + 2 \int_0^d \frac{m_{21} m_{22}}{EI} dx_2$$

$$f_{22} = 2 \int_0^d \frac{m_{12}^2}{EI} dx_1 + 2 \int_0^d \frac{m_{22}^2}{EI} dx_2 + \frac{2d_2}{EA} \cos^2 \alpha + \frac{2d_2}{EA_c} \sec \alpha$$

이며, EI와 EA는 띠장의 휨강성과 축강성이고 EA_c는 케이블의 축강성이다. 기본구조물에서 외력에 의한 구간별 휨모멘트와 단위부정정력에 의한 구간별 휨모멘트는 각각 다음 식과 같다.

$$M_{10} = \frac{wl}{2} x_1 - \frac{w}{2} x_1^2, \tag{3a-e}$$

$$M_{20} = \frac{wl}{2} (d_c + x_2) - \frac{w}{2} (d_c + x_2)^2$$

$$m_{11} = m_{22} = 0, m_{21} = -h_c \cos \beta - x_2 \sin \beta, m_{12} = -x_1 \sin \alpha$$

표 1. Cable tension formula of IPS wale

Post	Case A	Case B
1	$X = \frac{5wL \sin \alpha}{16 \sin^2 \alpha + 192 \left(\frac{\cos \alpha}{\lambda} + \frac{\sec \alpha}{\lambda_r} \right)}$	$X = \frac{5wL}{16 \sin \alpha}$
2	$X_1 = \frac{13wL \tan \alpha}{36 \tan^2 \alpha + 324 \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda_r} \right)}$ $X_2 = \frac{3wL \sin \alpha}{8(\sin^2 \alpha + 27 \frac{\cos \alpha}{\lambda} + 27 \frac{\sec \alpha}{\lambda_r})}$	$X_1 = \frac{13wL \cos \alpha}{36 \sin \alpha}$ $X_2 = \frac{3wL}{8 \sin \alpha}$
3	$X_1 = \frac{w(176 h_c \cos \beta + 23 L \sin \beta)}{32 \left(48 \left(\frac{h_c \cos \beta}{L} \right)^2 + \sin \beta \left(12 \frac{h_c \cos \beta}{L} + \sin \beta \right) + \frac{48 \cos \beta}{\lambda} + \frac{48 \sec \beta}{\lambda_r} \right)}$ $X_2 = \frac{13wL \sin \alpha}{32 \left(\sin^2 \alpha + \frac{48 \cos \alpha}{\lambda} + \frac{48 \sec \alpha}{\lambda_r} \right)}$	$X_1 = \frac{w(176 h_c \cos \beta + 23 L \sin \beta)}{32 \left(48 \left(\frac{h_c \cos \beta}{L} \right)^2 + \sin \beta \left(12 \frac{h_c \cos \beta}{L} + \sin \beta \right) \right)}$ $X_2 = \frac{13wL}{32 \sin \alpha}$
4	$X_1 = \frac{37w h_c}{300 \left(\left(\frac{h_c}{L} \right)^2 + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda_r} \right)}$ $X_2 = \frac{w(310 h_c \cos \beta + 33 L \sin \beta)}{40 \left(15 \frac{h_c \cos \beta}{L} (\sin \beta + 5 \frac{h_c \cos \beta}{L}) + \sin^2 \beta + 75 \left(\frac{\cos \beta}{\lambda} + \frac{\sec \beta}{\lambda_r} \right) \right)}$ $X_3 = \frac{17wL \sin \alpha}{40 \left(\sin^2 \alpha + 75 \frac{\cos \alpha}{\lambda} + 75 \frac{\sec \alpha}{\lambda_r} \right)}$	$X_1 = \frac{37wL^2}{300 h_c}$ $X_2 = \frac{w(310 h_c \cos \beta + 33 L \sin \beta)}{40 \left(15 \frac{h_c \cos \beta}{L} (\sin \beta + 5 \frac{h_c \cos \beta}{L}) + \sin^2 \beta \right)}$ $X_3 = \frac{17wL}{40 \sin \alpha}$

엄밀히 계산할 수 있다. 표 1에 각 Post별 받침대가 등간격으로 배치된 IPS 띠장의 케이블의 장력식들이 유도되어 있다. Case A는 케이블 및 보의 축변형을 고려한 경우이고 Case B는 케이블 및 보의 축변형을 무시한 경우이다.

3.2 IPS 띠장의 횡변위

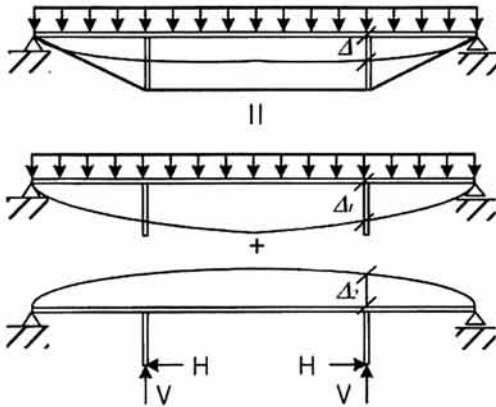


그림 4. Lateral displacement of IPS wale

횡 토압에 의한 IPS 띠장의 횡변위(Δ)는 그림 4에 도시한 바와 같이 케이블을 제거하였을 때의 횡변위(Δ1)와 케이블 장력에 의한 횡변위(Δ2)의 합으로 엄밀히 산정할 수 있다. 본 논문에서는 수치해석 프로그램인 MATHEMATICA를 이용하여 1-Post, 2-Post, 3-Post, 4-Post를 갖는 IPS 띠장의 횡변위를 엄밀히 유도하였으며, 받침대가 등간격으로 배치된 경우 1-Post, 2-Post IPS 띠장의 횡변위는 각각 다음의 식과 같다.

$$\Delta_{1post} = \frac{5 w L^4 (r \cos \alpha + \sec \alpha)}{32 E I (12 \sec \alpha + 12 r \cos \alpha + \lambda_1^2 \sin^2 \alpha)} \quad (4a-b)$$

$$\Delta_{2post} = \frac{w L^4 (d_1 + d_2 + d_3)}{216 E I (27 r \cos \alpha + 27 r \sec \alpha + \lambda_1^2 \sin^2 \alpha)}$$

여기서, $d_1 = (1+r)(594r \cos \alpha + 27 \sec \alpha)$

$d_2 = \lambda^2 r (27r + 13(1+r) \cos \alpha) \sin \alpha \tan \alpha$

$d_3 = 27 \lambda_1^2 \sec \alpha \tan^2 \alpha$

$$r = \frac{A_t}{A}, \quad \lambda_1 = \frac{L}{\sqrt{I/A_t}}$$

3-Post, 4-Post IPS 띠장의 횡변위식(Δ_{3post}, Δ_{4post})도 유도하였으나 모든 항들을 표기하기에는 너무 복잡하고 항들이 많기 때문에 본 절에서 나타내지는 않고, 4장의 수치해석에서 전산해석결과 및 본 논문에서 도출한 다른 설계식과 수치적으로

비교하였다.

상기와 같이 횡 토압에 의한 IPS 띠장의 횡변위에 대한 엄밀해는 수많은 항들로 구성되어 설계시 적용하기가 어렵다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 가상일의 원리를 이용하면 띠장의 횡변위식을 보다 간략히 나타낼 수 있다. 즉, 그림 5에 나타낸 바와 같이 받침대의 수에 따른 케이블장력과 평형을 이루는 근사적인 부재력과 단위하중에 의한 근사적인 부재력을 사용하고 가상일의 원리를 적용하여 계산한 띠장의 횡변위는 각각 다음과 같다.

$$d_{1post} = \frac{5 w L^4 (r \cos^2 \alpha + \sec \alpha)}{32 E I (12 \sec \alpha + 12 r \cos \alpha + \lambda_1^2 \sin^2 \alpha)} \quad (5a-d)$$

$$d_{2post} = \frac{13 w L^4 (1 + 3r + 2 \sec^3 \alpha)}{216 E I (9 + 9r + \lambda_1^2 \tan^2 \alpha)}$$

$$d_{3post} = \frac{13 w L^4 (\sec \alpha + \cos^2 \alpha (2r + \sec^3 \beta))}{128 E I (48 r \cos \alpha + 48 \sec \alpha + \lambda_1^2 \sin^2 \alpha)}$$

$$d_{4post} = \frac{17 w L^4 (2 \sec \alpha + \cos^2 \alpha (1 + 5r + 2 \sec^3 \beta))}{400 E I (75 r \cos \alpha + 75 \sec \alpha + \lambda_1^2 \sin^2 \alpha)}$$

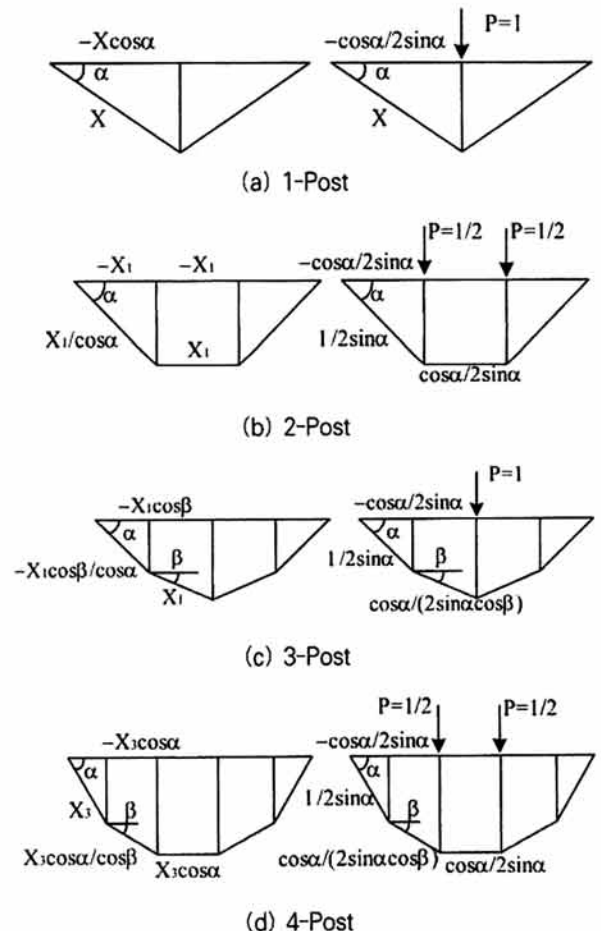


그림 5. Member forces of IPS wale

표 2. Cable tension of IPS wale

Post	L (m)	α (degree)	β (degree)	h_e (m)	h_c (m)	Case A (kN)			Case B (kN)			MIDAS (kN)		
						Exterior	Interior	Center	Exterior	Interior	Center	Exterior	Interior	Center
1	14	30	-	-	4.04145	1703	-	-	1711	-	-	1704	-	-
					4.90145	1493	-	-	1498	-	-	1494	-	-
					5.87370	1337	-	-	1340	-	-	1338	-	-
2	23	30	-	-	4.42635	3372	2862	-	3386	2865	-	3374	2862	-
					5.36826	2954	2364	-	2962	2366	-	2955	2364	-
					6.43310	2644	1975	-	2649	1976	-	2645	1975	-
3	32	30	15	4.61880	6.76240	5092	4241	-	5111	4244	-	5095	4241	-
					7.53056	5092	4065	-	5111	4067	-	5095	4065	-
		35	15	5.60166	7.74525	4459	3627	-	4570	3629	-	4461	3627	-
					8.51342	4459	3513	-	4570	3514	-	4461	3513	-
		40	15	6.71280	8.85639	3989	3115	-	3997	3116	-	3991	3115	-
					9.62456	3989	3044	-	3997	3045	-	3991	3044	-
4	41	30	15	4.73427	6.93146	6833	6148	5969	6970	6168	5982	6836	6148	5969
					7.71883	6833	5898	5363	6970	5916	5372	6836	5898	5363
		35	15	5.74170	7.93889	5981	5255	5214	6076	5267	5223	5984	5255	5214
					8.72626	5981	5095	4745	6076	5106	4752	5984	5095	4745
		40	15	6.88062	9.07780	5351	4511	4562	5422	4519	4568	5354	4511	4562
					9.86518	5351	4412	4199	5422	4419	4203	5353	4412	4199

표 3. Load distribution of Strut (Case A)

Post	L (m)	α (degree)	β (degree)	Load Distribution(%)	Post	L (m)	α (degree)	β (degree)	Load Distribution(%)	
				Strut					Exterior Strut	Interior Strut
1	14	30	-	60.82 (1)	3	32	30	15	45.26 (2)	34.30 (1)
				61.17 (1)					36.12 (2)	43.45 (1)
				35				15	50.59 (2)	29.34 (1)
20	42.38 (2)	37.55 (1)								
40	15	54.93 (2)	25.19 (1)							
		20	47.59 (2)	32.53 (1)						
2	23	30	-	73.30 (2)	4	41	30	15	44.52 (2)	38.81 (2)
									20	34.13 (2)
		35	15	50.50 (2)			33.17 (2)			
				20			41.17 (2)	42.50 (2)		
		40	15	55.42 (2)			28.48 (2)			
				20			47.09 (2)	36.80 (2)		

4. 매개변수 해석 및 분석

4.1 IPS 띠장의 케이블 장력

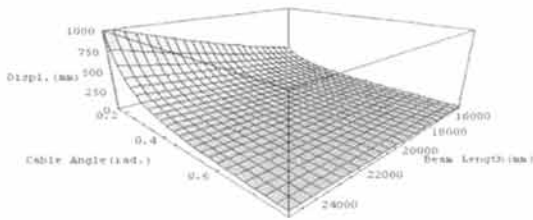
표 2에서 등분포 횡 토압이 200 kN/m 일 때, PS강선의 경

사각에 따른 IPS 케이블의 부재력들을 나타내었다. 보 및 케이블의 탄성계수는 $E=204.4\text{ GPa}$, 받침대는 강체로 가정하여 보 탄성계수의 1000배를 사용하였으며, 보의 단면적은 $A=17390\text{ mm}^2$, 단면2차모멘트는 $I=4.03 \times 10^8\text{ mm}^4$, 케이블의 직경은 $D=80\text{ mm}$ 를 적용하였으며 모든 받침대는 등간

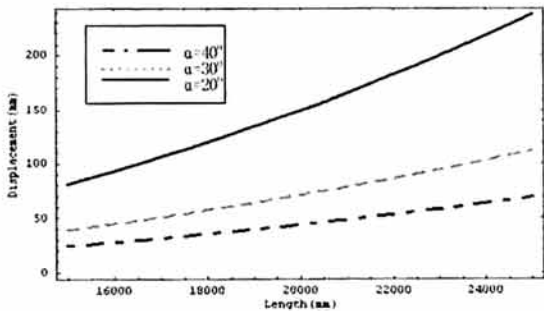
격으로 배치하였다. Case A와 Case B는 표 1에서 유도된 바와 같이 각각 보 및 케이블의 축변형 효과를 고려한 경우와 무시한 경우이다. 또한 MIDAS해석은 보와 받침대를 보요소로 모델링하였고 케이블을 인장력전달 트러스요소로 모델링하였다. 표 2에서 알 수 있듯이 모든 부재의 축변형을 고려한 Case A 엄밀해의 이론값과 MIDAS해석 결과 값은 거의 일치함을 보이고, 축변형을 무시한 Case B의 이론값과 MIDAS해석 결과값은 오차가 최대 3%이내의 미소함을 알 수 있다.

표 3은 Case A에서 각 Post에 따라 받침대가 분담하는 토압을 비율로 나타낸 것이며, 괄호안의 숫자는 받침대 개수를 표시한 것이다. 받침대의 부재력은 케이블 장력이 계산이 된 후 케이블과 받침대가 만나는 점에서 절점법을 이용해 구하였다. 전체 받침대의 토압분담율은 대략 1 Post가 61%, 2 Post가 73%, 3 Post가 80%, 4 Post가 84%로 계산되었으며 경사각 β 가 커질수록 내측 받침대의 토압분담율이 커짐을 알 수 있다.

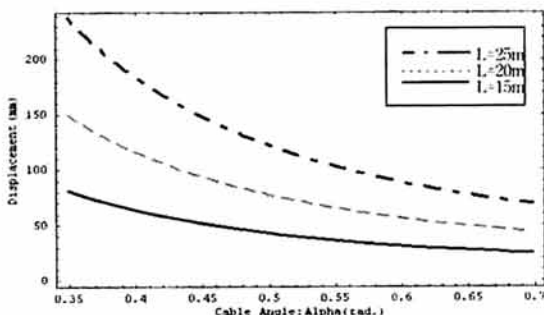
4.2 IPS 띠장의 횡변위



(a) Beam displacement along with cable length and angle



(b) Beam displacement along with cable length



(c) Beam displacement along with cable angle

그림 6. Displacement of 2-Post beam

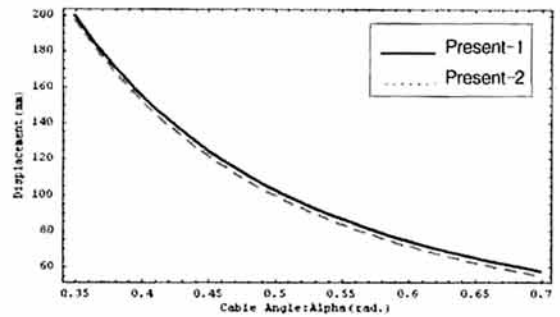
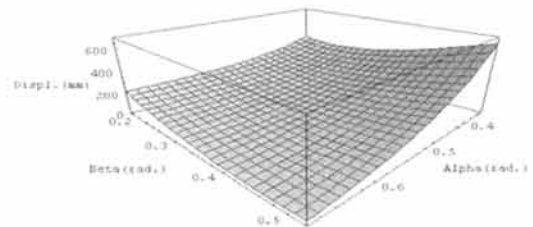
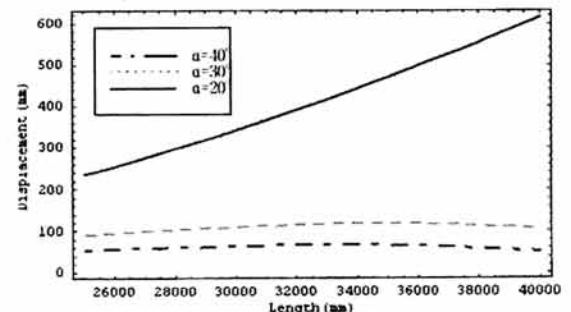
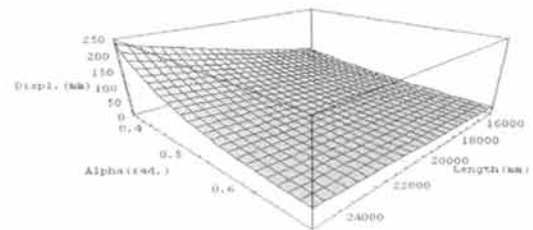


그림 7. Comparison of 2-Post IPS wale displacement

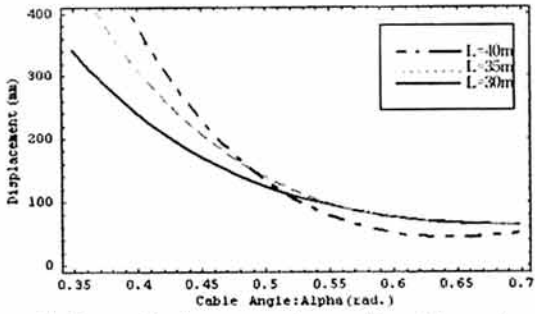
그림 6은 받침대가 2개인 IPS 띠장에 등분포 횡토압이 작용할 때, 띠장의 길이와 케이블의 경사각에 따른 띠장의 횡변위에 대한 매개변수 해석결과를 보여준다. 모든 띠장의 길이에 대하여 케이블의 경사각이 증가함에 따라 횡변위가 급속히 감소함을 알 수 있다. 즉, 케이블 경사각이 20°에서 30° 및 40°로 증가함에 따라 변위의 감소율은 약 50% 및 35%정도로 계산되었다. 그림 7은 케이블의 경사각 변화에 따른 2-Post 띠장의 횡변위를 나타내었다. Present-1과 Present-2는 각각 본 논문에서 유도한 엄밀해 식(4b)와 설계목적으로 도출된 식(5b)를 이용하여 계산한 결과이다. 케이블의 경사각의 전체적인 영역에서 설계식과 엄밀해와의 오차가 1% 이내로 잘 일치함을 확인하였다.



(a) Beam displacement along with cable length and angle

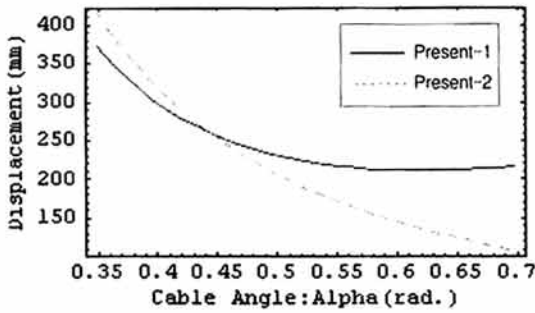


(b) Beam displacement along with cable length

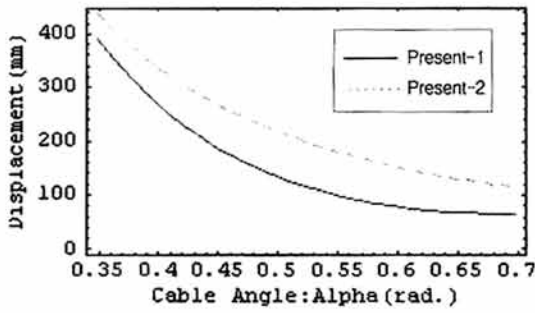


(c) Beam displacement along with cable angle
그림 8. Displacement of 3-Post beam

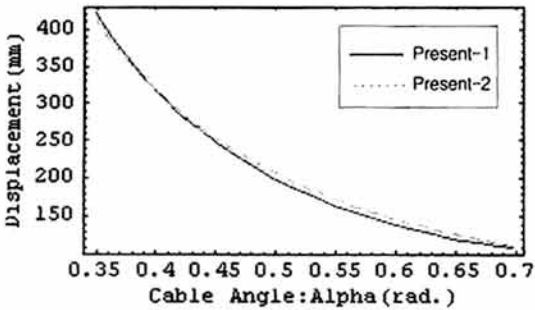
그림 8은 받침대가 3개인 IPS 띠장에 등분포 횡토폰이 작용할 때, 띠장의 길이와 케이블의 경사각에 따른 띠장의 횡변위에 대한 매개변수 해석결과이다. 모든 띠장의 길이에 대하여 케이블의 경사각이 증가함에 따라 횡변위가 급속히 감소함을 알 수 있다. 즉, 케이블 경사각이 20°에서 30° 및 40°로 증가함에 따라 변위의 감소율은 약 40% 및 30% 정도로 계산되었다.



(a) $\beta = 10^\circ$



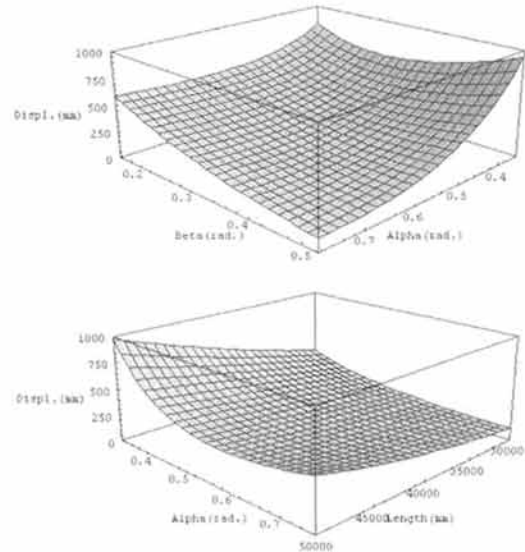
(b) $\beta = 20^\circ$



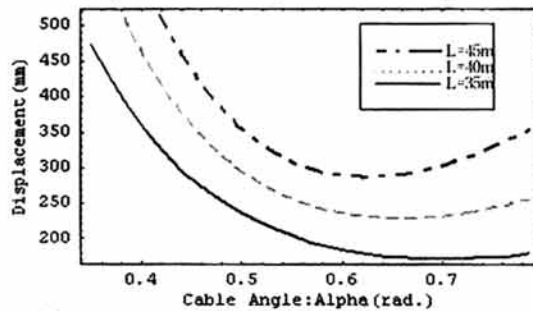
(c) $\beta = \alpha / 2.5$

그림 9. Comparison of 3-Post IPS wale displacement

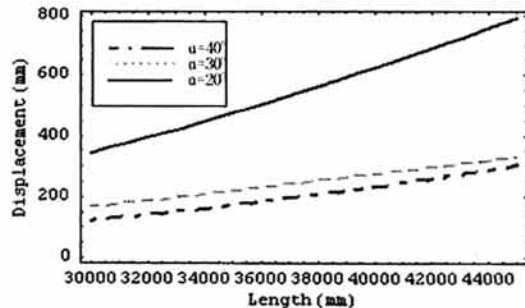
그림 9는 케이블의 경사각 변화에 따른 3-Post 띠장의 횡변위를 나타내었다. 2-Post와 달리 3-Post는 외측케이블의 경사각(α)과 내측케이블의 경사각(β)의 변화에 따라 횡변위가 크게 영향을 받는다. 2-Post와 마찬가지로 Present-1과 Present-2는 각각 본 논문에서 유도한 엄밀해 식과 설계목적으로 도출된 식을 이용하여 계산한 결과이다. 외측케이블의 경사각(α)이 작은 경우는 설계식과 엄밀해의 차이가 크지 않으나 경사각이 증가할수록 오차의 증가가 크게 발생하여 설계식으로 사용하기가 적합하지 않음을 알 수 있다. 하지만 그림 9(c)에서와 같이 내측케이블의 경사각과 외측케이블경사각의 관계를 $\beta = \alpha/2.5$ 과 같이 제한하면 전체적인 경사각 영역에서 설계식과 엄밀해의 결과가 거의 동일함을 알 수 있다.



(a) Beam displacement along with cable length and angle



(b) Beam displacement along with cable angle



(c) Beam displacement along with cable length

그림 10. Displacement of 4-Post beam

그림 10은 받침대가 4개인 IPS 띠장에 등분포 횡토폰이 작용할 때, 띠장의 길이와 케이블의 경사각에 따른 띠장의 횡변위에 대한 매개변수 해석결과이다. 모든 띠장의 길이에 대하여 케이블의 경사각이 증가함에 따라 횡변위의 감소효과는 3-Post와 유사하게 계산되었다. 3-Post 띠장에서는 외측케이블의 경사각이 28° 이상이 되면 띠장의 길이에 무관하게 횡변위의 감소비율이 크지않았다. 하지만, 4-Post의 경우 띠장의 길이가 35m, 40m, 45m로 증가함에 따른 횡변위의 증가효과는 외측케이블 경사각의 모든 영역에서 크게 발생함을 알 수 있다. 3-Post와 마찬가지로 Present-1과 Present-2는 각각 본 논문에서 유도한 엄밀해 식과 설계목적으로 도출된 식을 이용하여 계산한 결과이다. 그림 11(a) 및 (b)에서와 같이 외측케이블의 경사각(α)이 작은 경우는 설계식과 엄밀해의 차이가 크지않으나 경사각이 증가할수록 오차의 증가가 크게 발생하여 설계식으로 사용하기가 적합하지 않음을 알 수있다. 하지만 그림 11(c)에서와 같이 내측케이블의 경사각과 외측케이블경사각의 관계를 $\beta = \alpha/1.7$ 과 같이 제한하면 전체적인 경사각 영역에서 설계식과 엄밀해의 결과가 거의 동일함을 확인하였다.

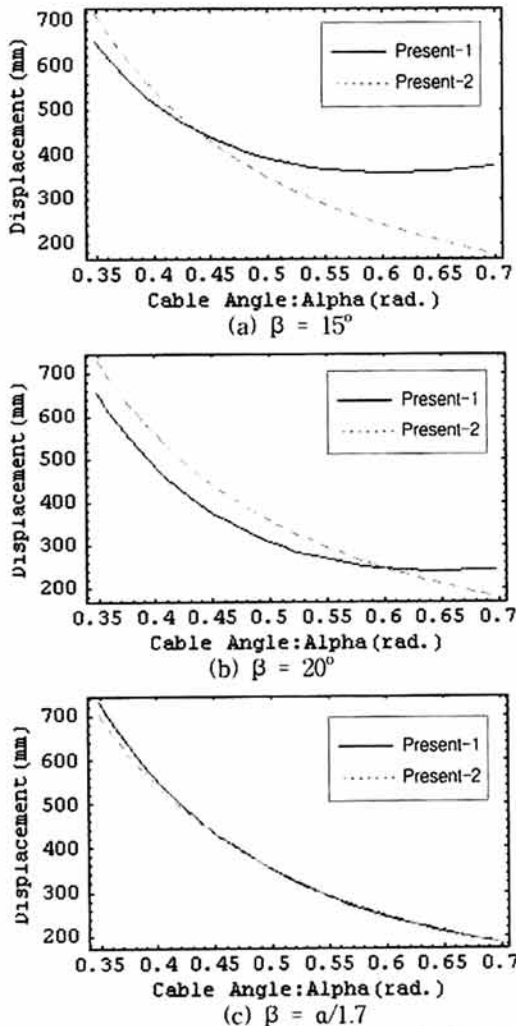


그림 11. Comparison of 4-Post IPS wale displacement

4.3 등가휨강성계수를 적용한 강재보

등분포 횡하중을 받는 IPS 띠장의 횡변위로부터 등가의 휨강성을 갖는 단순보의 휨강성을 산정한다. 예를들면, 그림 12에서와 같이 3-Post 강재보의 중앙부 받침대의 수직변위와 등가휨강성($EI\xi_{3post}$)을 갖는 단순보의 중앙점 수직변위를 같게 놓아 식 (6a)의 등가휨강성계수(ξ)를 구한다. 2-Post와 4-Post의 경우에는 식(6b) 및 (6c)와 같이 중앙 받침대 설치 위치의 수직변위를 사용하여 등가휨강성계수를 유도하였다.

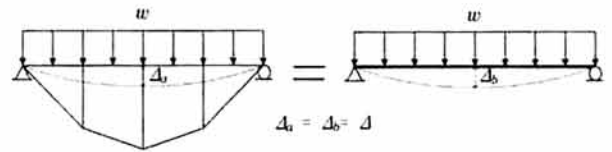


그림 12. Equivalent beam of 3-Post wale

$$\Delta_{3post} = \frac{5 w L^4}{384 EI(\xi_{3post})} \tag{6a-c}$$

$$\Delta_{2post} = \frac{11 w L^4}{972 EI(\xi_{2post})}$$

$$\Delta_{4post} = \frac{31 w L^4}{2500 EI(\xi_{4post})}$$

식(5)의 설계 변위식을 이용하여 도출된 IPS 띠장의 Post의 개수에 따른 등가휨강성계수는 다음과 같다.

$$\xi_{1post} = \frac{(12 \sec \alpha + 12 r \cos \alpha + \lambda_i^2 \sin^2 \alpha)}{12(r \cos^2 \alpha + \sec \alpha)} \tag{7a-d}$$

$$\xi_{2post} = \frac{22(9 + 9 r + \lambda_i^2 \tan^2 \alpha)}{117(1 + 3 r + 2 \sec^3 \alpha)}$$

$$\xi_{3post} = \frac{5(48 r \cos \alpha + 48 \sec \alpha + \lambda_i^2 \sin^2 \alpha)}{39(\sec \alpha + \cos^2 \alpha (2 r + \sec^3 \beta))}$$

$$\xi_{4post} = \frac{124(75 r \cos \alpha + 75 \sec \alpha + \lambda_i^2 \sin^2 \alpha)}{425(2 \sec \alpha + \cos^2 \alpha (1 + 5 r + 2 \sec^3 \beta))}$$

여기서 $r = \frac{A_t}{A}$, $\lambda_i = \frac{L}{\sqrt{I/A_t}}$

위에서 유도된 등가휨강성계수를 이용하여 등분포 토폰을 받는 IPS 띠장의 횡변위를 그림 12와 같이 등가보모델을 이용하여 수직변위를 구하고 그 결과를 IPS 띠장의 전체해석모델의 결과와 비교하여 표 3에 나타내었다. 해석에 사용된 부재의 재원은 4.1절에 기술된 단면과 동일하고, 3-Post와 4-Post의 경우 내측케이블의 경사각은 그림 9와 그림 11의 해석결과를 바탕으로 각각 $\beta = \alpha/2.5$, $\beta = \alpha/1.7$ 의 값을 사용하였다. 표

3에서 MIDAS-1은 IPS띠장의 전체해석모델에 의한 결과를 나타내고 MIDAS-2는 등가휨강성계수를 이용한 등가보의 해석 결과를 나타낸다. 해석결과 받침대의 수에 따른 최대오차가 각각 0.1%, 2.6%, 7.9%, 3.3% 이내로 계산되었다.

1-Post와 2-Post의 경우 3%이내의 차이를 보였고, 3-Post, 4-Post의 경우 전산해석결과와 안전측으로 8% 이내의 차이를 나타내고 있어, IPS 띠장 설계에서 본 논문에서 도출된 설계식의 적용성을 입증하였다.

표3. Displacement by full and equivalent model

Post	L (m)	α (degree)	ξ	MIDAS-1 (m)	MIDAS-2 (m)
1	14	30	38.1598	0.03185	0.03183
		35	48.4052	0.02511	0.02509
		40	58.1007	0.02092	0.02090
2	23	30	84.0497	0.09291	0.09148
		35	110.879	0.07063	0.06935
		40	138.647	0.05661	0.05546
3	32	30	174.924	0.17804	0.18951
		35	233.728	0.13138	0.14183
		40	297.553	0.10561	0.11141
4	41	30	265.470	0.31451	0.32047
		35	357.534	0.23046	0.23795
		40	459.901	0.18094	0.18499

감사의 글

본 연구는 2008년도 충북대학교 학술연구비 지업사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 저자는 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

김성보, 한만엽, 김문영, 김낙경, 지태석 (2005) 혁신적 프리스트레스트 가시설(IPS)공법에 적용되는 띠장의 설계 및 해석, 한국전산구조공학회는문집, 제18권 1호, pp.79-91.

김성보, 한만엽, 김문영, 정경환 (2007) 시공단계를 고려한 혁신적 프리스트레스트 가시설(IPS) 띠장의 거동, 대한토목학회논문집, 제 27권 4A호, pp.485-492

문상필, 홍순조 (2008) 계단형 외팔보의 등가보 변환에 의한 기본 고유진동수 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 제21 4호, pp.401-410

박선규 (2004) 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강공법, 한국전산구조공학회논문집, 제17권 1호, pp. 39-42

이준석, 김문영, 한만엽, 김성보, 김낙경 (2006) 다절점 케이블요소를 이용한 IPS 시스템의 비선형해석, 한국전산구조공학회 논문집, pp.623-630

정재철 문상필 (2006) 대칭단형 단순보의 등가보 변환에 의한 고유치 해석, 한국전산구조공학회논문집, 제19권 1호, pp. 55-62

최인식, 여인호 (2007) 등가보이론을 이용한 복합 거더의 정적 및 자유진동 해석, 한국철도학회논문집, 제10권 5호, pp.600-606

한만엽, 김문영, 김성보, 민병철, 이영생 (2003) 혁신적 프리스트레스트 가시설 공법 연구 보고서, 아주대학교 토목기술연구원, pp.1-307.

Troitdky, M. S. (1990) *Prestressed Steel Bridges*, Van Nostrand Reinhold, pp.78-104.

Mathematica, Mathematica : A system for doing mathematics by computer, Addison-Wesley Publishing company, Wolfram Research.

MIDAS, MIDAS CIVIL Getting Started & Tutorials, POSCO Engineering & Construction Co., Ltd.

(접수일자 : 2009. 4. 14 / 심사일 2009. 4. 22 / 게재확정일 2009. 7. 21)

5. 결론

본 논문에서는 받침대 및 외부긴장재가 설치된 강재보의 휨거동 특성을 등가보 해석을 통하여 분석하였다. 케이블장력을 부정정력으로 취하여 부재력을 계산하고 이로부터 중앙부 받침대의 수직변위를 계산하였다. 계산된 케이블 장력과 받침대의 수직변위로부터 외부긴장 강재보와 등가휨강성을 갖는 등가보를 제시하였고, 유한요소해석을 통하여 제시된 등가휨강성의 타당성을 검증하였다. 그 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 외부긴장 강재보에 등분포 횡하중이 작용할 경우 발생하는 케이블장력에 대한 엄밀해를 유도하였다. 또한, 보와 케이블의 축변형 효과를 무시한 근사적인 케이블 장력식을 도출하였다.
- (2) 등분포 토압을 받는 IPS 띠장의 횡변위에 대한 엄밀해를 유도하고 가상일의 원리를 이용하여 설계목적으로 사용하기 위하여 간략화된 근사식을 제시하였다.
- (3) 외부긴장 강재보의 휨강성과 동일한 휨강성을 갖는 등가보의 휨강성식을 유도하였다. 유도된 등가 휨강성식을 이용하여 외부긴장 강재보를 한 개의 등가보로 치환하여 중앙부 받침대의 수직변위를 유한요소해석과 비교결과