프리스트레스 띠장과 사각강관 버팀보를 이용한 흙막이 가시설 공법(PS-S 공법) 적용을 통한 경제성 및 공사기간 개선효과

글 박철용 \ 건축기술팀 차장 \ **전화** 02-3433-7731 \ **E-mail** cypark@ssyenc.com

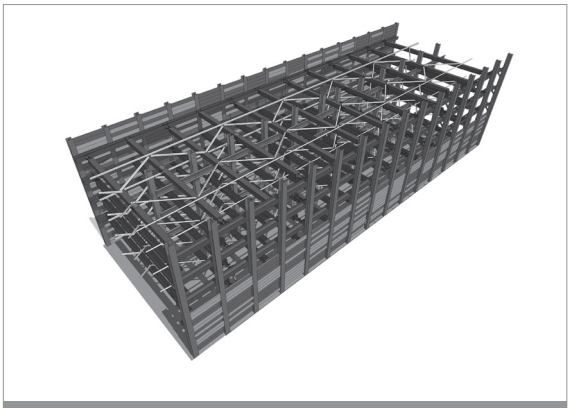
1. 머리말

국토면적이 협소한 국내건설시장은 제한적인 도시공간에 따른 토지이용 비율을 높이기 위해 지상도로 또는 고가도로와 같은 기존 지상 구조물 뿐 아니라 지하차도 또는 터널구조와 같은 지하공간 건설에도 꾸준히 노력하고 있다. 최근에는 지하철, 지하차도와 같은 도로시설물로서의 지하공간 활용 뿐 아니라 상업, 문화공간으로서의 지하공간 창출을 위한 노력이 시도되고 있다.

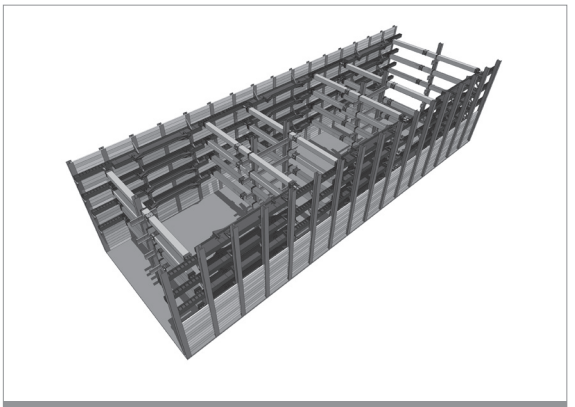
도심지에 건설되는 대형 토목구조물은 업무 및 상업용 시설이나 대형 주차장 등 공용시설, 그리고 하수처리장과 같이 혐오시설이라고 불리는 대형 토목구조물들을 모두 지하구조물로 설계하고 있다.

특히 각종 건축물 및 여러 가지 편익시설이 초고층화 되는 추세와 함께 지하공간 확보를 위한 다양한 굴착공법이 개발되어 적용되고 있다. 기존의 흙막이 공법 중 일반적으로 적용되고 있는 지보형식으로는 버팀보 공법, 어스앵커 공법, 소일네일링 공법이 있으며, 이 중 어스앵커 공법과 소일네일링 공법은 도심지 공사에서 부지공간의 제약으로 인해 인접 대지를 침범하고, 민원발생 및 각종 동의를 요하므로 도심지 근접시공에는 적용성이 많이 떨어진다. 이러한 이유로 많은 현장에서는 [그림 1]과 같이 버팀보를 이용한 흙막이 가시설 공법을 적용하고 있다. 그러나 이러한 버팀보 공법은 띠장재의 저항성능 부족으로 인해 버팀보 간격이 촘촘하게 시공되므로 버팀보와 중앙말뚝의 간섭이 발생되며 굴착장비의 움직임에 많은 제약이 발생하여 공기 및 공사비 증대를 초래하고 있다.

이에 최근에는 다양한 형태의 흙막이 공법들이 연구 개발되고 있으며, 그 중 [그림 2]에 나타나 있는 프리스트레스 띠장(PS 띠장)과 사각강관 버팀보(HI-STRUT)를 적용한 공법은 시공을 위한 적정한 공간을 확보할 뿐 아니라 안정성 및 경제성도 확보할 수 있는 공법이다. 이 공법의 원리 및 특징, 그리고 적용현장 등을 통해 공법의 이해를 돕고자 한다.



[그림 1] H형강을 이용한 재래식 공법



[그림 2] PS-II 와 HI-STRUT를 이용한 흙막이 가시설 공법(PS-S 공법)

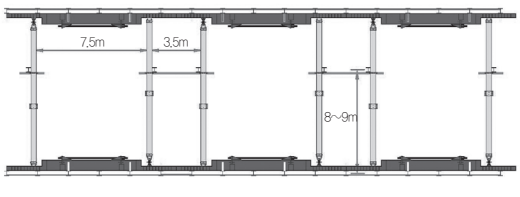
2. 공법의 원리

2-1. 공법 개요

일반적으로 띠장을 설계함에 있어 버팀보를 지점으로 하는 단순보 또는 3경간 연속보로서 구조검토를 실시하게 된다. 이 경우 버팀보의 간격이 넓어지게 되면, 띠장의 지점 간격 또한 증가하게 되어 띠장에 작용하는 최대 휨모멘트는 지점 간격의 제곱으로 증가하게 된다. 이러한 이유로 충분한 버팀보 간격을 확보하기 전에 띠장재에서 휨파괴가 발생하게 되며, 버팀보는 띠장에 비해 과설계 되는 비합리적인 구조를 형성하게 된다.

또한, 재래식 버팀공법에 사용되어지는 H-형강은 약축 방향에 대한 좌굴 및 비틀림에 취약한 구조적 문제점을 갖고 있어, 약축에 대한 보강이 필수적이다. 따라서 사용 강재량이 증가하며, 시공 공정이 추가되어 공사기간 또한 증가하고, 작업공간 확보에도 큰 어려움이 있다.

본 공법은 프리스트레스 띠장과 약축 보강이 불필요한 사각강관 버팀보와의 결합을 통해 [그림 3]과 같이 버팀보 설치간격을 7.5m 이상 확보하고, 버팀보 지간길이를 약 9m 확보하여 공기를 단축시킬 수 있을 뿐 아니라 시공성도 향상시킨 공법이다.

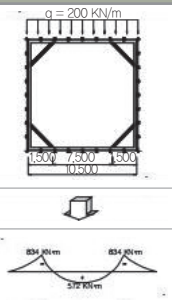
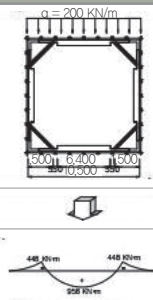
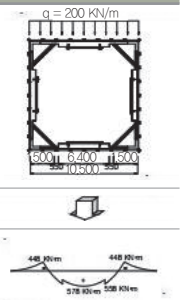


[그림 3] PS-S 공법의 기본 구조

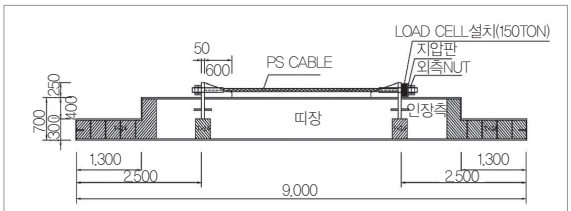
2-2. 프리스트레스 띠장의 원리 및 효과

본 공법에서 프리스트레스 띠장의 구조적 원리는 토압에 의해 유발된 휨모멘트가 중앙부에 크게 작용하도록 하는 모멘트 재분배 효과를 이용한 공법이다. 버팀보 지지방식에 있어서 띠장재의 응력을 검토할 경우 작용하는 정모멘트보다 지점의 부모멘트가 크므로 부모멘트에 의해 최대응력이 결정된다(<표 1>의 Case 1 참조). 따라서 중앙부의 단면이차모멘트를 증대하면 모멘트 재분배가 일어나서 중앙부의 정모멘트가 증가하게 되고 지점부의 부모멘트가 감소하게 된다(<표 1>의 Case 2 참조). 이 때 중앙부에 프리스트레스를 도입하면 중앙부재의 모멘트가 크게 줄어들어 상당히 합리적인 구조를 이루게 된다(<표 1>의 Case 3 참조).

표 1 프리스트레스 띠장(PS-Ⅱ)의 원리

CASE1. 각 경간 동단면 부재인 경우	CASE2. 중앙경간에 장보를 설치한 경우	CASE3. 장보에 Prestress를 도입한 경우
		
I_1/I_2 = 1.0, Mo = 0	I_1/I_2 = 0.225, Mo = 0	I_1/I_2 = 0.255, Mo = 380kN·m

이러한 원리를 제품화한 것이 [그림 4]와 같은 프리스트레스 띠장(PS-Ⅱ)이다. 중앙부 단면의 높이는 700mm로 증가시켜 증가하는 정모멘트에 저항할 수 있도록 하였고, 단부 단면의 높이는 300mm로 하여 일반 띠장과의 연결을 용이하게 하였다.



[그림 4] PS-Ⅱ 띠장의 제원 (H-700×300×13×24)

2-3. 사각강관 버팀보의 원리 및 효과

현재까지 버팀보로는 H 형강을 널리 사용하고 있는데, H형 단면은 강축에 대한 휨강성은 크지만 약축에 대한 휨강성이 매우 적어 압축력을 받으면 약축방향으로 좌굴이 쉽게 발생한다. 이러한 약축방향 좌굴을 방지하기 위해서는 브레이싱 등의 보강부재가 필요하지만 사각강관을 버팀보로 사용하면 추가적인 부재를 줄일 수 있는 효과가 있다.

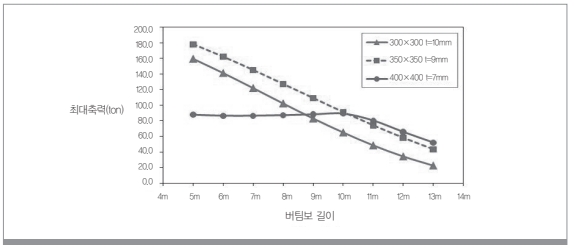
본 공법에서는 사각강관을 버팀보로 적용하였고, <표 2>에는 일반적으로 사용하는 H 형강과 본 공법에 적용하고 있는 사각강관의 제원을 비교하여 나타내었다.

버팀보는 주로 압축력에 저항하는 구조부재이므로 좌굴에 대한 저항능력이 주된 구조성능이며, 좌굴저항성능은 부재의 단면이차모멘트에 비례한다. 따라서 단면의 크기를 증가시키면서 두께를 감소시키면 경제적인 버팀보를 설계할 수 있다. 그러나 폭-두께비가 증가하면 국부좌굴의 발생 가능성이 증가하므로 사각강관의 폭을 증가시키는 데에는 한계가 있다.

표 2 H형강과 사각강관 단면제원 비교

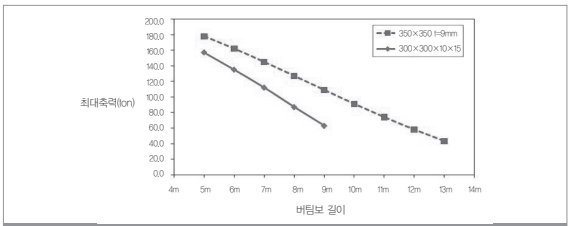
구분	H형강 (300×300×10×15)	사각강관 (350×350, 9t)
단면적(mm^2)	11,980	12,070
$I_x(mm^4)$	204×10^6	232×10^6
$I_y(mm^4)$	6.75×10^6	232×10^6
중량(kg/m)	94.0	94.7

[그림 5]는 사각강관의 크기에 따른 허용축하중을 지간길이에 따라 나타낸 것이다. 사각강관의 크기는 〈표 2〉의 H 형강의 무게에 준하여 결정하였다. 폭이 300mm에서 350mm로 증가하게 되면 허용축하중이 증가하지만 400mm로 증가하게 되면 국부좌굴의 영향으로 허용축하중이 다른 두 단면에 비해 작게 나타났다. 따라서 본 공법에서는 350mm X 350mm X 9t 로 결정하였다.



[그림 5] 사각강관 크기에 따른 허용축력

[그림 6]은 이렇게 결정된 사각강관의 허용축하중을 H 형강과 비교하여 나타낸 것인데, 같은 지간에 대해 사각강관의 허용축하중이 H 형강의 허용축하중보다 크며, 같은 설계하중에 대해 사각강관이 더 긴 지간으로 설계되어질 수 있음을 보여준다.



[그림 6] 버팀보 형식에 따른 허용축력

3. 공법의 특징

3-1. 경제성

H 형강을 이용한 재래식 가시설 공법에 비해 PS-S 공법이 경제성을 갖는 주요 요인은 두가지로 요약할 수 있다. 첫째 버팀보 간격을 넓힘으로써 버팀보의 개수를 줄일 수 있는 것이고, 둘째 사각강관 버팀보 적용으로 브레이싱 등의 보강재를 줄이고 중간 말뚝 간격을 넓힐 수 있는 것이다.

경제성을 검토하기 위해 굴착고 10m, 연장 132m의 토목현장을 대상으로 동일한 벽체 조건을 가정하여 내부 가시설 공사비를 재래식 공법과 비교하였다. 강재 손율은 표준품셈 6개월 공사 기준으로 설계단가의 30%를 적용하였다. 〈표 3〉에서 자재대는 기존 공법에 비해 다소 고가이지만 중앙파일 개소수의 감소로 인해 중앙파일과 버팀보 및 부대공사비가 크게 감소하여 전체적으로는 기존 공법에 비해 20% 정도 경제성이 있는 것으로 나타났다.

표 3 경제성 검토 (1)

(단위 : 원)

구 분		HI-STRUT +PS-II(①)	재래식 공법 (②)	증감 ①-②
30m (폭) 기준	중앙파일공사	46,139,904	86,512,320	-112,145,903 (-19.47%)
	띠장공사	26,396,700	26,030,499	
	버팀보공사	114,903,028	223,767,942	
	부대공사	10,652,802	20,559,708	
	자재대	265,708,956	219,076,824	
계		463,801,390	575,947,293	
35m (폭) 기준	중앙파일공사	46,139,904	86,512,320	-126,447,881 (-20.84%)
	띠장공사	26,396,700	26,030,499	
	버팀보공사	116,919,316	234,187,70	
	부대공사	11,572,989	22,317,612	
	자재대	279,209,676	237,638,334	
계		491,871,346	606,686,466	

다음으로 굴착깊이 10m, 굴토면적 1,000㎡ 정도의 소규모 터파기공사, 굴착깊이 16m, 굴토면적 2,800㎡ 정도의 중규모 터파기공사, 그리고 굴착깊이 13m, 굴토면적 4,100㎡ 정도의 대규모 터파기공사 이상 3개 건축현장을 대상으로 경제성을 분석하였으며, 그 결과 35~49% 절감률이 있는 것으로 나타났다.

표 4 경제성 검토 (2)

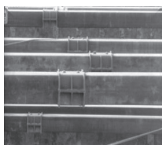
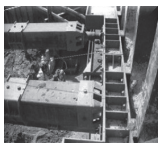
(단위 : 원)

공종	소규모		중규모		대규모	
	재래식공법	PS-S공법	재래식공법	PS-S공법	재래식공법	PS-S공법
내부가시설	174,977,160	88,910,668	768,717,214	422,776,595	1,463,280,628	783,899,663
부대공사	3,460,756	2,318,459	13,998,116	11,454,490	34,085,189	22,740,533
자재대	59,796,620	32,293,557	332,487,757	318,196,333	1,000,392,852	760,632,804
직접공사비	238,234,536	123,522,684	1,115,203,087	752,427,418	2,497,758,669	1,567,273,000
순공사비	282,818,561	145,068,426	1,321,079,612	867,726,511	2,923,289,535	1,801,488,883
일반관리비	16,969,113	8,704,105	79,264,776	52,063,590	175,397,372	108,089,332
이윤	31,434,970	14,474,081	139,589,587	76,499,158	262,139,741	135,885,001
공급가액	331,222,644	168,246,612	1,539,933,975	993,289,259	3,360,826,648	2,048,463,216
절감률	49%		35%		39%	

3-2. 시공성

H 형강을 이용한 재래식 공법에서는 버팀보와 버팀보 또는 버팀보와 띠장을 연결하기 위해 용접이나 볼트 연결을 위한 천공을 하기 때문에 구조부재의 손실이 발생할 수 밖에 없다. 본 공법에서는 〈표 5〉의 중앙 연결장치 및 단부 연결장치를 개발하여 볼트 연결만으로 구조부재들이 연결되도록 하여 시공의 편리성을 도모하였다.

표 5 버팀보 연결장치

중앙 연결장치	단부 연결장치
	
• 설치·해체 용이 • 현장에서 직접 설치 가능 • 연결부 변형 없는 구조	• 띠장과 연결 용이 • 각종 잭(jack)과 연결 용이 • 설치·해체 용이

본 공법의 설치 및 철거는 개발된 연결장치로 인해 현장 용접작업 없이 볼트조립만으로 설치 및 해체가 가능하고, 기존 재래식 공법보다 공사기간의 단축이 가능하며, 용접 및 절단에 의한 강재 손실을 최소화하여 모재 손실 없는 강재 절감의 효과를 볼 수 있다. 〈표 6〉은 본 공법의 설치 시공순서이며, 철거과정은 건축 슬래브 또는 구조물 기초 시공을 완료한 후 설치과정의 역순으로 이루어진다.

표 6 내부 가시설 설치 시공순서

벽체 및 중앙파일 설치	단부 및 중앙 연결부 제작
피스브라켓 설치	받침빔 설치
보걸이 설치	PS-II 띠장 설치
누름브라켓 설치	HI-STRUT 설치

단부 연결	중앙부 연결

앞에서 경제성을 분석한 3개 현장을 대상으로 벽체공사와 토공사를 제외한 내부 가시설 공사를 기준으로 기존 재래식 공법과 공사기간을 비교하였으며, 그 결과 소규모 현장은 19일, 중규모 현장은 40일, 대규모 현장은 36일 정도의 공기단축 효과가 있는 것으로 분석되었다.

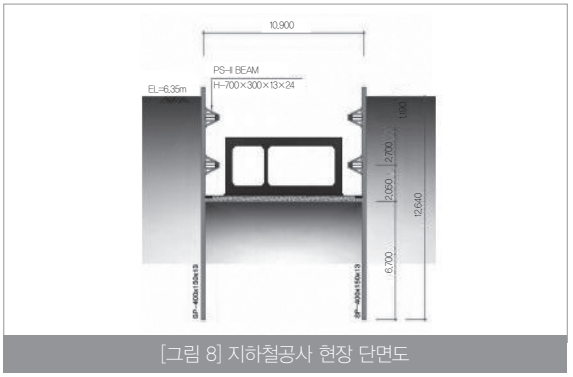
표 7 공사기간 비교

구분	공사기간(일)		비고
	PS-S공법	재래식공법	
소규모	14	33	58(%)
중규모	66	106	38(%)
대규모	80	116	31(%)

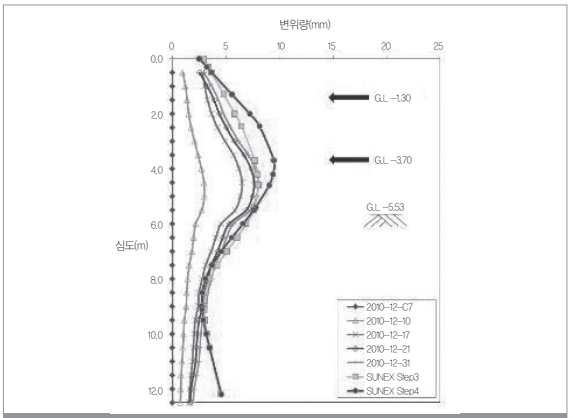
3-3. 계측관리

PS-S 공법을 적용한 지하철공사 현장과 건축공사 현장을 대상으로 흙막이 벽체의 변위 계측을 통한 공법의 안정성을 확인하였다. 지하철공사 현장은 폭 약 11m, 깊이 약 6m 내외로 굴착하여 공동구(RC BOX)를 설치하는 공사이며, 지반은 매우 연약한 토질로 이루어져 있다([그림 7 및 8] 참조). 계측결과 전체 구간 모두 0.1%H 이내의 변위가 발생하였으며, 이는 허용관리기준인 1.0%H와 대비하여 매우 만족하는 결과를 보여주고 있다. [그림 9]는 현장 계측결과를 SUNEX 프로그램 해석결과와 비교한 것으로 계측결과는 해석결과와 매우 유사한 형태로 보이고 있으며, 예상변위보다 안전측으로 변위가 발생한 것으로 나타났다.

[그림 7] 지하철공사 현장



[그림 8] 지하철공사 현장 단면도



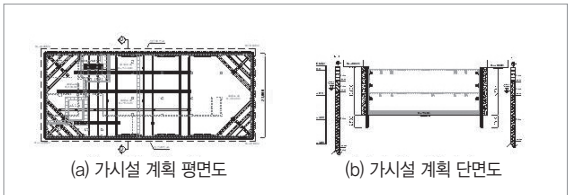
[그림 9] 벽체 변위 비교

건축공사 현장은 굴착 크기 23m X 57m 이고, 굴착깊이는 –12m 내외이며, 대지경계를 기준으로 서쪽에는 35m 도로, 동쪽에는 6m 도로가 위치해 있으며, 북쪽과 남쪽에는 기존 건물이 접해 있는 현장이다(〈표 8〉 참조).

표 8 건축공사 현장 개요 및 가시설 현황

공사명	건축공사 현장
굴착면적	1300 m^2
굴착깊이	GL. –12.00 m
지보공법	사각 강관 버팀보, PS–띠장 공법
벽체공법	C.I.P φ400, c.t.c400(H–pile c.t.c 1,600)
차수공법	S.G.R φ800, c.t.c600(굴착심도까지 주입)

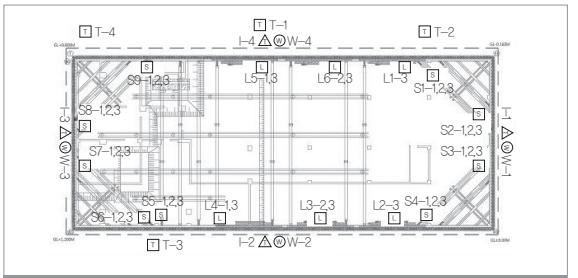
[그림 10] 현장전경



(a) 가시설 계획 평면도 (b) 가시설 계획 단면도

[그림 11] 가시설 계획 평면도 및 단면도

현장 시공여건과 설치 목적에 따라 지중경사계 (△T), 지하수위계 (Ⓦ), 변형률계(S), 하중계(L), 건물경사계(T) 등을 설치하였다([그림 12] 참조).



[그림 12] 계측 계획도

〈표 9〉와 같이 가시설의 실제 거동을 예측할 수 있는 가시설 계측 결과 분석을 통해 PS–S 공법은 현장 적용성에 있어 안정적인 것으로 나타났다.

표 9 계측결과 분석

계측기명	관리번호	계측치		변위량	관리기준	판단
		초기치	최대치			
지중경사계 (mm)	I–2	0.0	–16.83	16.83	1/300H(40)	안정
지하수계 (m)	W–3	–8.05	–9.71	1.66	0.5m/1일	안정
변형률계 (MPa)	S3–2	0.0	–18.27	18.27	실측응력 〈 허용휨응력/1.2	안정
하중계 (tonf)	L2–3	116.57	116.77	–0.20	±23.3 & 121.00이내	안정
건물경사계 (mm)	T–4	0.0	0.13	0.13	1/500(0.2)	안정

참고문헌

❶ 김동준, 최인식, 김현숙(2011), 프리스트레스 띠장(PS–Ⅱ)과 사각강관 버팀보(HI–STRUT)를 이용한 가시설 공법(PS–S 공법), 한국강구조학회지 제23권제3호, pp.41–48

❷ 건설신기술 제640호(2011), 프리스트레스가 도입된 띠장재와 폐단면 사각강관 버팀보를 함께 이용한 흙막이 가시설 공법(PS–S 공법)