

## 현장계측 및 수치해석에 의한 장대버팀보의 온도영향 분석

### The Analysis of the Temperature Effects on Long-span Strut by Field Monitoring and Numerical Analysis

이문주<sup>1)</sup>, Moon-Joo Lee, 최성근<sup>2)</sup>, Sung-Kun Choi, 신세영<sup>3)</sup>, Se-Young Sin, 이우진<sup>4)</sup>, Woo-Jin Lee

<sup>1)2)</sup> 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

<sup>3)</sup> (주)현대건설 부장, Department manager, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.

<sup>4)</sup> 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수, Associate professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

**SYNOPSIS** : In this study, the effects of temperature on loading of long-span strut were studied by using field monitoring and numerical analysis. For the field monitoring, several sensors, such as strain gages, temperature gages and load cells, were installed on the struts. From the monitoring results, the relation between temperature and axial force of the struts was analysed. By numerical analysis, the changes of axial force of strut and lateral displacement of wall due to temperature change were described with the strut length and ground conditions.

**Key words** : long-span strut, temperature load, field monitoring, numerical analysis

## 1. 서 론

국내에서 대단위 산업기반시설의 확장사업을 통해 지하굴착 문제의 설계 및 시공에 관한 Know-how가 많이 축적되고 있으며 굴착공사로 인해 야기되는 주변지반의 침하와 인접구조물의 피해 등과 같은 문제해결을 위해 설계, 계획 및 시공관리 측면에서 지하굴착에 대한 지속적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 현재까지는 일반적인 지하굴착 및 토류구조물 시공시의 토류벽체와 주변지반 거동이 주 관심분야이며, 대심도, 대단면 굴착으로 인한 버팀 부재의 장대화 및 공사기간의 장기화로 인한 다양한 환경요인에 의한 버팀 부재의 영향에 대한 연구 실적은 미비한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 토류구조물의 대형화와 공사기간의 장기화로 인하여 야기되는 현장 및 자연환경의 다양한 요인들 중 온도변화가 장대 버팀보의 축력에 미치는 영향을 중점적으로 연구하고자 한다. 이를 위해 우선 현장 계측데이터를 분석하여 실제 버팀보에서 발생하는 온도와 온도변화에 의한 축력의 상관관계를 검토하였으며, 이를 바탕으로 수치해석을 실시하여 지반조건 및 부재 장화에 따른 온도의 영향을 분석하였다.

## 2. 온도-버팀보 축력관계

온도의 변화는 구조물을 구성하는 재료에 팽창 또는 수축을 발생시키고 이로 인해 열변형율(thermal strain)이나 열응력(thermal stress)가 발생하게 되는데 이때 재료의 모든 요소들은 모든 방향으로 열변

형이 발생하고 체적이 증가하게 된다. 대부분의 구조재료에 있어서 열변형을  $\epsilon_T$ 는 온도변화  $\Delta T$ 에 비례하는 경향을 보이며 아래 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_T = \alpha(\Delta T) \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 열팽창계수(coefficient of thermal expansion)로써 재료의 특성값이며 강재의 경우  $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$ 의 값을 갖는다. 일교차 및 기타 계절적 요인으로 인한 온도변화는 버팀보에 반복적인 온도하중을 유발시켜 버팀부재에 작용하는 축력에 변화가 발생하며, 과도한 경우 구조물의 안정성 저해 요인으로 작용한다.

일반적으로 온도하중에 의한 축력은 다음과 같은 방법으로 산정한다. 길이가  $L$ 인 버팀보에 온도가  $\Delta T$ 만큼 변화하게 되면 버팀보 양단에는 식(2)와 같은 길이의 변화량이 발생하게 되며, 이 때 버팀보 양단에 발생한 축력  $R$ 에 의한 구조물의 가상변위는 식(3)과 같다.

$$\delta_T = \alpha(\Delta T)L \quad (2)$$

$$\delta_R = \frac{RL}{EA} \quad (3)$$

양단이 구속되어 있다고 가정하면 발생한 변위량은 '0'이므로 식(4)와 같은 적합조건식을 얻을 수 있으며 축력  $R$ 값을 식(5)를 통해 얻을 수 있다.

$$\delta_T - \delta_R = \alpha(\Delta T)L - \frac{RL}{EA} = 0 \quad (4)$$

$$R = EA\alpha(\Delta T) \quad (5)$$

즉 양단이 구속된 조건에서는 부재의 길이에 관계없이 온도증가로 인해 동일한 축력이 증가할 것이나, 실제 현장에서는 버팀보의 양단의 변위는 완벽한 구속조건이 아니므로 온도증가에 의한 실제 버팀보의 축력증가는 구속조건일 경우보다는 작을 것이고, 축력으로 전환되지 못한 온도하중의 일부는 벽체의 변위를 발생시킬 것이다. 본 연구에서는 이에 근거하여 아래와 같은 축력전이율과 벽체변위율을 정의한다.

$$\text{축력전이율(\%)} = (\text{축력으로 전이된 온도하중}) \div (\text{온도변화로 인한 온도하중}) \times 100 \quad (6)$$

$$\text{벽체변위율(\%)} = (\text{벽체변위로 전이된 온도하중}) \div (\text{온도변화로 인한 온도하중}) \times 100 \quad (7)$$

축력전이율과 벽체변위율의 합은 주변으로 손실되는 온도하중을 고려하면 100%보다 작을 것이다. 축력전이율과 벽체변위율은 벽체와 버팀보 부재의 강성, 지반조건, 그리고 현장 복공률과 같은 기타 부재의 영향을 받을 것이다.

### 3. 현장계측 데이터 분석

#### 3.1 온도-버팀보축력 상관관계

버팀보가 받게 되는 하중, 즉 버팀보에서 발생하는 축력은 일차적으로 토압에 의해 발생하지만 단기적으로는 일교차에 의해, 장기적으로는 계절적인 온도변화에 의해 발생하기도 한다. 버팀보에 발생한 축력을 온도와 관련하여 분석하여 온도와 버팀보 축력의 상관관계를 검토하였다. 표 1과 같이 하중계와

온도계를 동시에 설치하여 부재의 온도와 축력을 동시에 측정하였다. 7월 한달동안 측정된 버팀보의 축력 및 온도변화 양상을 그림 1과 같이 나타내었다. 축력은 온도변화 양상과 상당히 일치하는 경향을 보이며 일교차에 의해 주기적인 증감곡선을 나타내고 있다. 또한 평균 버팀보의 축력이 7월 하반기로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보이는데 이는 굴착에 의한 토압증가가 아닌 7월 평균기온의 증가 때문인 것으로 판단된다.

표 1. 계측기(하중계+ 온도계) 설치지점

설치위치	설치깊이	버팀보길이	설치된 지반조건
A 지점	5.2m	54m	풍화토
B 지점	2.8m	37m	매립층

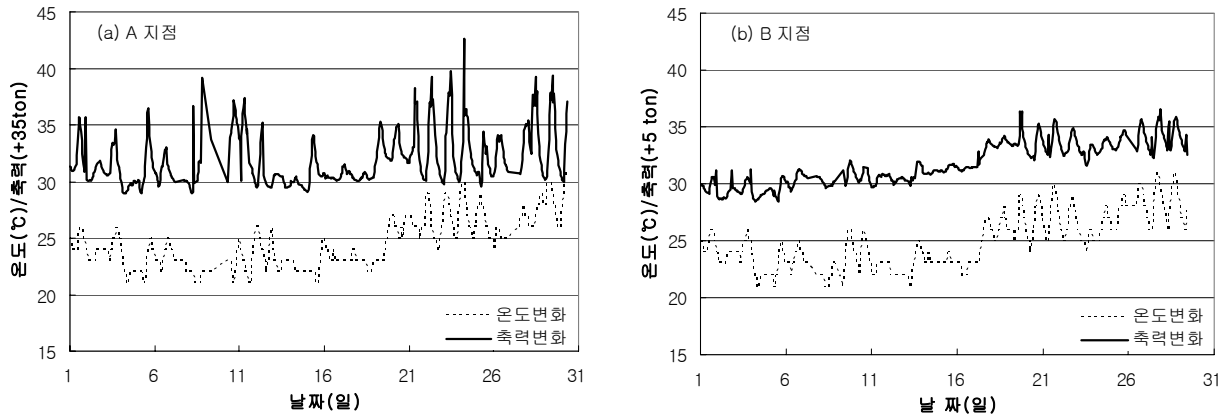


그림 1. 7월중 온도-축력 변화양상 [(a) A 지점, (b) B 지점]

### 3.2 깊이별 부재 온도분포

현장 계측기가 설치된 두 지점은 복공관이 설치된 지역으로써 직사광선의 영향을 직접적으로 받지 않는 구간이다. 깊이별 버팀보에서 발생하는 실제 온도를 측정하기 위해 A지점에 설치된 온도계를 분석하여 깊이별 부재온도를 분석한 결과 아래 그림 2와 같이 나타났다. 하루중 부재의 온도변화량은 깊이에 관계없이 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 따라서 복공관이 설치된 지역의 부재온도는 모두 동일한 것으로 가정해도 무방할 것으로 판단되며, 추후 이를 수치해석 조건으로 활용하였다.

표 2. A 지점 깊이별 온도계 설치현황

온도계	설치된버팀보	설치깊이
S-1	1단	3.71m
S-2	2단	5.91m
S-3	3단	8.11m
S-4	4단	10.31m
S-5	5단	12.51m
S-6	6단	14.51m
S-7	7단	16.51m

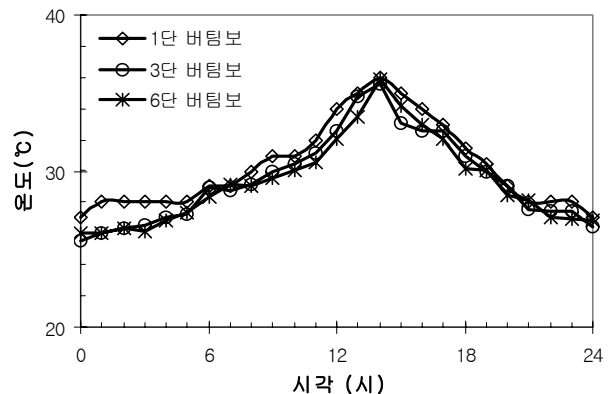


그림 2. 시간에 따른 깊이별 부재온도 변화

### 3.3 축력전이율 및 벽체변이율

버팀보 축력과 온도변화를 통해 6~11월(6개월간)동안 온도하중의 축력전이율을 분석하여 그림 3과 같이 나타내었다. 풍화토지반인 A지점의 축력전이율은 평균 44%이고, 매립층인 B지점의 축력전이율은 평균 16%로 나타났다. A지점의 축력전이율은 32~51%, B지점의 축력전이율은 11~18%의 비교적 고른 분포를 나타내며, 버팀보가 거치된 지반의 강성이 클수록 클수록 축력으로 전이되는 온도하중의 비율이 증가함을 알 수 있다.

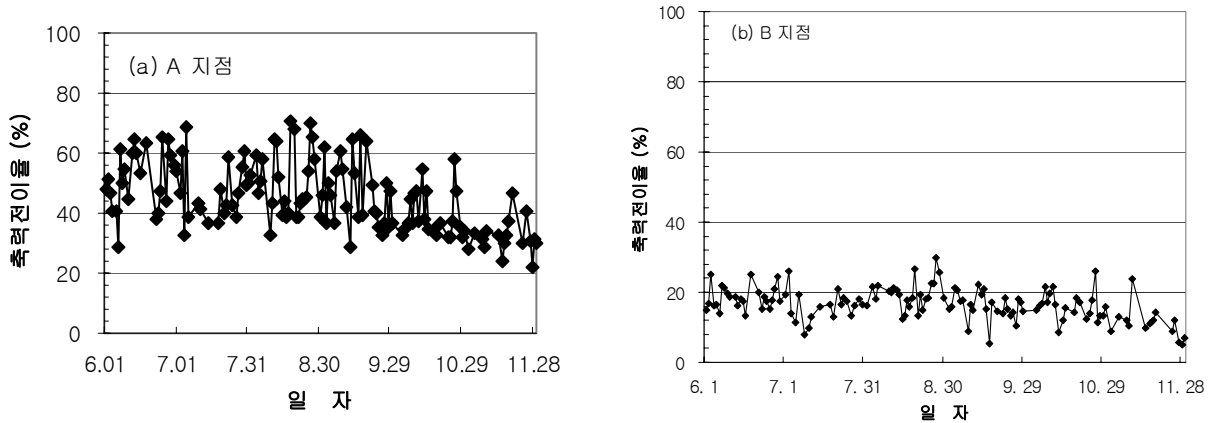


그림 3. 축력전이율 [(a) A 지점, (b) B 지점]

표 3. 월평균 축력전이율

부 재	축 력 전 이 율 (%)						평 균
	6 월	7 월	8 월	9 월	10 월	11 월	
A 지점	51	47	51	46	39	32	44
B 지점	18	16	20	16	16	11	16

## 4. 수치해석

온도하중의 고려가 가능한 지반 범용 프로그램인 PENTAGON-2D를 사용하여 수치해석을 실시하였다. 버팀보에 작용하는 온도를 0~30℃로 변화시키면서 버팀보길이, 지반조건에 따른 버팀보의 축력발생 경향과 벽체 변위 양상을 비교하였다.

### 4.1 버팀보 장대화에 따른 온도하중 영향

아래 그림 4와 같은 가상지반을 설정하여 버팀보 장대화에 따른 온도하중의 영향을 검토하였다. 각 층의 지반정수 및 부재제원은 표 4, 표 5과 같다.

그림 5는 10m와 50m의 버팀보에 대해 각각 온도를 0℃, 10℃, 30℃로 변화시키면서 수치해석을 실시하여 나타난 버팀보 축력 및 벽체변위 양상이다. 버팀보의 길이가 10m인 경우에는 온도하중이 증가하여도 축력증가량이 크지 않으며 벽체변위량도 극히 미비하나 버팀보의 길이가 증가할수록 온도하중의 영향이 증가하여 축력증가량과 벽체변위량이 모두 증가하는 경향을 보인다. 즉 버팀보의 길이가 늘어날수록 온도하중에 의한 축력 및 벽체변위의 영향은 증가함을 알 수 있다.

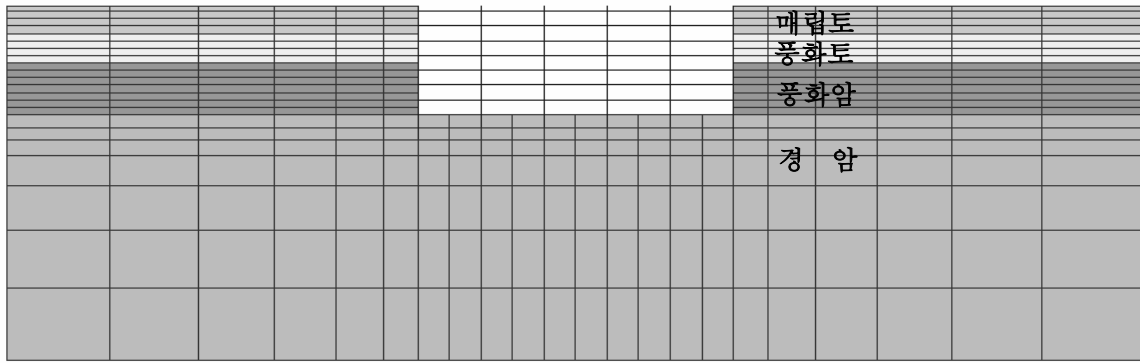


그림 4. 수치해석 메쉬

표 4. 가상 지반조건

지반조건	두께 (m)	내부마찰각 (deg)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )
매립토	4.7	30	1.0	1000
풍화토	5.0	32	3.0	4000
풍화암	8.7	34	4.0	10000
경암	-	38	25.0	100000

표 5. 부재제원

구분	사용강재	단면적 (cm <sup>2</sup> )	단면이차모멘트 (cm <sup>4</sup> )	
			I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>
버팀보	H-300×305×15×15	134.8	21500	7100
중간파일	H-250×255×14×14	104.7	11500	3880
측벽파일	H-300×305×15×15	134.8	21500	7100

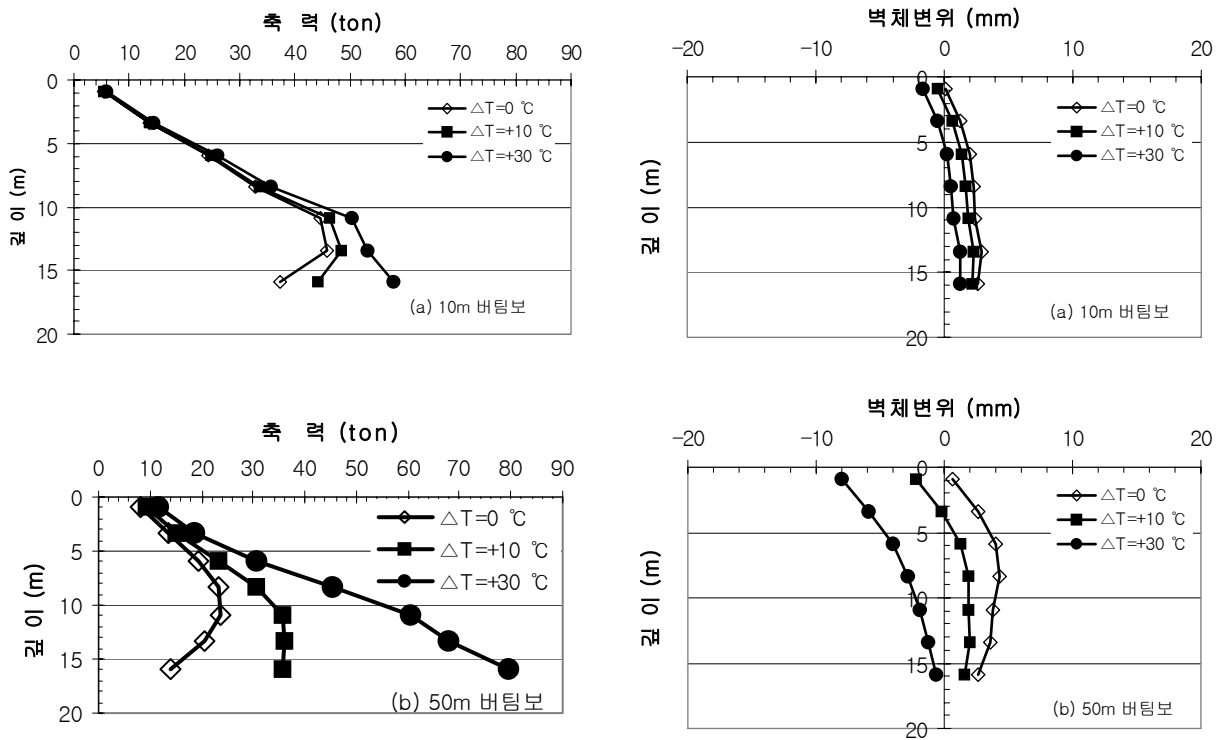


그림 5. 굴착폭에 따른 버팀보 축력과 벽체변위 [(a) 10m 버팀보, (b) 50m 버팀보]

표 6은 각 버팀보 길이별 온도하중에 의한 축력전이율과 벽체변위율을 나타낸 것이다. 버팀보의 길이가 증가할수록 발생하는 온도하중이 벽체변위보다는 축력으로 더 큰 비율로 전환되는 것을 알 수 있다. 즉 동일한 온도증가에 의해서도 버팀보 길이가 길어질수록 더 큰 벽체변위가 발생하지만, 벽체변위율은 감소하며 축력증가율은 반대로 증가하는 경향을 보인다.

표 6. 버팀보 길이에 따른 축력전이율과 벽체변위율

부 재	축력전이율 (%)			벽체변위율 (%)		
	10m	30m	50m	10m	30m	50m
1단	0.4	2.0	3.3	99.6	98.0	96.7
2단	0.8	2.6	5.3	99.1	97.4	94.5
3단	1.6	6.1	11.2	98.3	93.5	88.5
4단	2.7	13.1	21.2	97.3	86.4	78.5
5단	5.5	26.1	35.9	94.4	73.7	63.1
6단	7.3	34.5	46.5	91.2	65.0	53.1
7단	20.0	52.6	64.8	80.0	47.3	34.1

#### 4.2 지반조건에 따른 온도하중 영향

지반조건에 따른 온도하중의 영향을 파악하기 위해 그림 4와 동일한 메쉬에서 버팀보의 길이를 50m로 고정하고 지반조건만을 변경하여 해석을 실시하였다. 즉 경암위의 매립토+ 풍화토+ 풍화암 지반을 단일층으로 묘사하여 해석을 실시하였다. 그림 6은 각각의 지반조건에 따른 버팀보의 축력 및 벽체변위 양상을 나타낸 것이다. 지반의 강성이 클수록 부재의 온도가 증가하면 더 큰 축력이 발생하는 것으로 나타나며, 반면 벽체변위량은 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 지반조건에 따른 온도증가에 의한 축력전이율 및 벽체변위율을 아래 표 7와 같이 나타내었다. 지반의 강성이 증가할수록 축력증가율을 증가하지만 반면 벽체변위율은 감소하는 경향을 보인다.

표 7. 지반조건에 따른 축력전이율과 벽체변위율

부 재	축력전이율 (%)			벽체변위율 (%)		
	매립층	풍화토	풍화암	매립층	풍화토	풍화암
1단	2.9	7.1	12.4	97.1	92.8	87.2
2단	2.9	7.7	13.0	97.0	92.4	87.1
3단	4.1	8.8	13.5	95.4	91.1	86.3
4단	5.3	11.2	15.3	94.2	88.5	84.6
5단	7.1	14.1	17.7	92.3	85.1	81.8
6단	10.6	19.4	23.0	89.1	79.5	76.7
7단	25.3	35.9	39.7	74.2	64.1	60.2

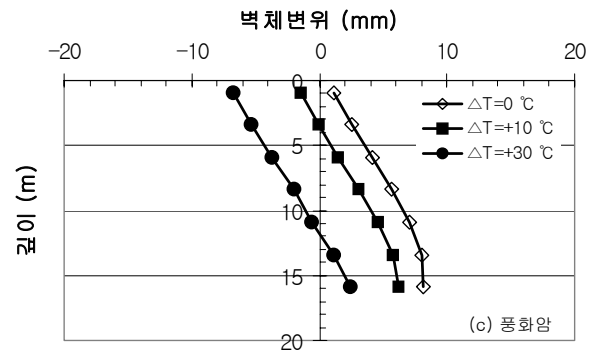
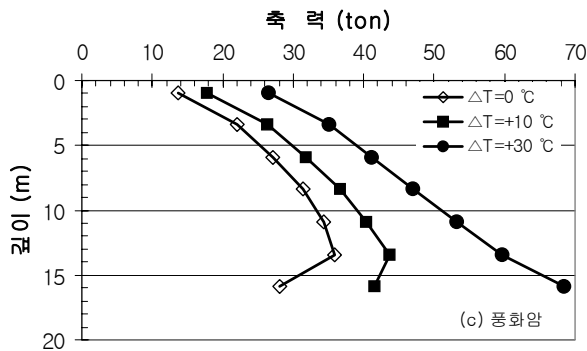
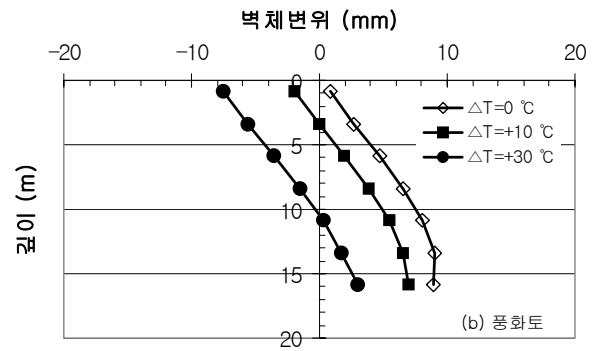
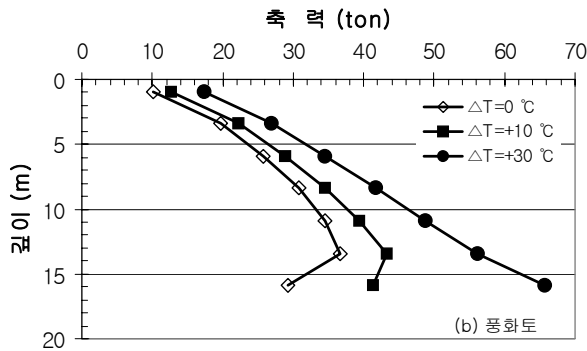
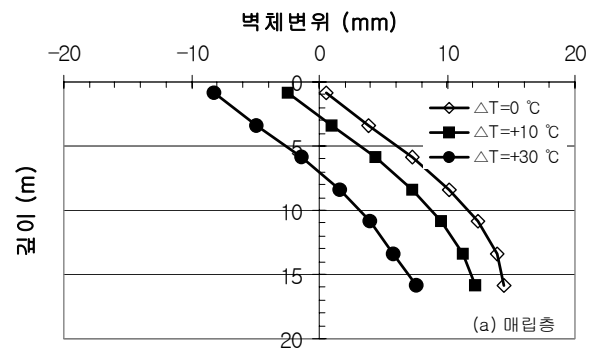
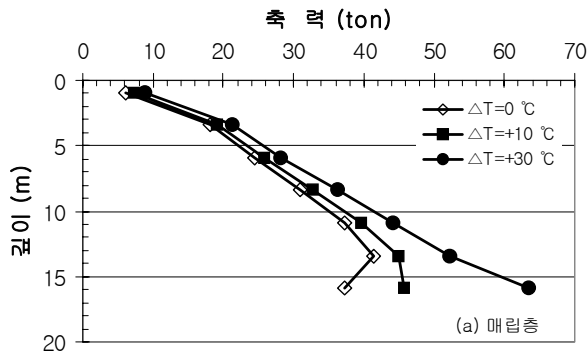


그림 6. 지반조건에 따른 버팀보 축력과 벽체변위 [(a) 매립층, (b) 풍화토, (c) 풍화암]

## 5. 결 론

본 연구에서는 온도변화가 장대버팀보의 축력에 미치는 영향을 분석하기 위해 현장 계측데이터 분석 및 수치해석을 실시하였으며, 현장계측 데이터 분석결과 여름철 일교차에 의한 버팀부재의 온도증가로 인해 추가 축력이 발생함을 알 수 있었다. 그러나 실제 현장의 버팀보가 양단 고정조건이 아니기 때문에 온도하중이 모두 축력으로 전환되지는 않으며 지반 및 벽체의 강성에 따라 벽체변위로 일부 전환되었다.

현장계측을 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 복공판이 설치된 지점은 직사광선의 영향을 받지 않기 때문에 굴착 깊이에 관계없이 거의 일정한 부재온도를 나타내었다.
- (2) 풍화토인 A지점의 온도하중 축력전이율은 평균 44%이고 매립층의 축력전이율은 평균 16%로 나타났으며, 이는 지반의 강성이 클수록 축력으로 전이되는 온도하중의 비율이 증가함을 나타내는

것이다.

또한 온도하중을 고려한 수치해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 버팀보의 길이가 증가할수록 온도하중에 의해 추가로 발생하는 버팀보 축력 및 벽체변위량이 증가한다.
- (2) 버팀보의 길이가 증가할수록 온도하중은 벽체변위보다는 축력으로 더 큰 비율로 전환된다.
- (3) 지반의 강성이 커질수록 온도하중에 의해 축력의 증가량은 증가하고 벽체변위량은 감소한다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 서울지하철 9호선 902공구 산학 협동연구용역의 일환으로 실시되었기에 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 7. 참고문헌

1. 강영중, 임남형, 신정렬, 양재성 (1999), “온도하중을 고려한 장대레일 궤도의 안정성 해석”, **한국강구조학회논문집**, 제 11권, 제 3호, pp.281~290
2. 김종우 (1995), “현장계측과 수치해석을 이용한 가설 흙막이 구조물의 변형특성 연구”, **한국암반공학회, 터널과 지하공간**, Vol.5, pp.223~229.
3. 박영훈, 이승용, 변윤주, 장동일 (1998), “가교량의 온도응력 평가”, **한국강구조학회논문집**, 제 10권, 제 1호, pp.1~10.
4. 유충식, 김연정 (2000), “깊은굴착시 버팀보식 흙막이벽체의 거동”, **대한토목학회논문집**, 제 20권, 제 3-C호, pp.195~204.
5. 유충식, 김연정 (2000), “암반을 포함한 다층토 지반에서의 깊은굴착시 흙막이벽체의 수평변위 및 겹보기토압”, **한국지반공학회논문집**, 제 16권, 제 4호, pp.43~50.
6. Mesri, G. and Hayat, T. M. (1993), "The coefficient of earth pressure at rest", *Can. Geotech. J.* Vol.30, pp.647~666
7. Ou, C. Y. and Lai, C. H. (1994), "Finite-element analysis of deep excavation in layered sandy and clayey soil deposits", *Can. Geotech. J.* Vol.31, pp.204~214