

# 굴착순서에 따른 Top Down 선기둥 지지력 산정

## Load Carrying Capacity of Top Down Prefounded Columns on Different Excavation Schedule

임 홍 철\*

Rhim, Hong-Chul

황 희 선\*\*

Hwang, Hee-Sun

### Abstract

Top Down method is more widely used in downtown construction, recently. As underground construction constitutes a significant portion of the total construction cost and time in Top Down construction, it is important to develop a construction method to reduce the time required in underground works. The purpose of this study is to analyze load carrying capacity of Top Down prefounded columns on different excavation schedule. When several floors are excavated, the valid buckling length of prefounded column is increased and allowable buckling stress is decreased. The result shows that all columns are safe in buckling down to B3 story whether 2 or 3 stories are excavated. However, several columns are not safe from B4 story when 2 or 3 stories are excavated straightly. With these results, a process can be designed that the first three stories in the basement are excavated, and then excavate B4 story after placing concrete on B1 and B2 floor.

키 워 드 : Top Down, 선기둥, 좌굴, 지하공사, 굴착순서

Keywords : Top Down Construction, Prefounded Column, Buckling, Underground Construction, Process of Excavation.

## 1. 연구 배경과 필요성

최근 도심지 공사에서 Top Down 공법을 적용하여 시공하는 사례가 늘고 있다. 도심지에서는 주위 건물이 밀집되어 있고 주차장 등 지하공간의 수요가 증가하여 지하공사의 규모가 대형화함에 따라서 기존의 터파기 공사로는 한계가 있고, 주위 공지를 확보하기 힘들다. 그런 점에서 공기를 단축할 수 있고, 지하 공사 시 주변 지반의 변위와 피해가 최소화 되며, 초기 작업장, 자재 적재장 등의 공간 확보에 용이한 Top Down 공법은 많은 이점을 지닌다.

현장의 주어진 조건에 따라서는 Top Down 공법을 선정해야만 하는 경우가 있다. 이 경우 다양한 시공방법과 순서에 따라서 공기를 상당히 단축시킬 수 있다. Top Down 공사에서 공기를 단축시키는데 중요한 요소는 지하공사인데, 지하공사에서는 횡부재 보다는 수직부재에 의해 공기가 좌우된다. 그 이유는 지하공사 시 굴착속도가 공기를 결정하는 요인이 되기 때문이다. 일반적으로 지하층의 한정된 층고로 인하여 굴착속도가 저하된다. 그러므로 수직부재인 선기둥의 좌굴응력이 허용하는 한 몇 개 층씩 시공하는 것은 지하공사에서의 효율성 면에서 유리하고 경제성도 높이며, 공사품질 확보에도 도움이 된다.

Top Down 공사에서 공기와 공사비에 큰 비중을 차지하는 지하공사에서의 시공속도를 높이기 위해서는 여러 개의 층을

동시에 시공하여 굴착에 필요한 적정 층고를 확보하고 콘크리트를 여러 층에 동시 타설하여 콘크리트 경화 시간을 줄여야 한다. 여러 층을 한 번에 굴착할 경우 Top Down 선기둥이 슬래브에 의한 지지 없이 노출되기 때문에 좌굴에 대한 위험이 증가한다.

본 연구에서 실제 현장의 선기둥에 대하여 1층씩, 2층씩, 3층씩 굴착하는 방법에서의 좌굴응력과 작용응력을 기존실무에서의 계산방법과 Broms의 공식을 이용하여 해석하여 다층 동시 굴착의 가능성을 분석하고자 한다.

## 2. 선기둥에 대한 정의

선기둥이란 Top Down 공사에서 지하구조체가 완성되는 시점까지 시공부분의 고정하중이나 작업하중을 지지하는 철골기둥을 말한다(사진 1, 사진 2). 일본에서는 '역타 기둥'이라는 용어를 사용하고 국내에서는 일반적으로 '선기둥'이라는 용어를 사용한다. 가설적인 구조물로서 취급되기 때문에 경제성이 강하게 요구 되지만 공사완료 후 해체되지 않고 철근 콘크리트와 함께 SRC기둥을 형성하기 때문에 (사진 3) 안정성이 추후되어야 지하 공간 시공 중의 안전과 시공 완료 후 본 구조체의 품질을 확보할 수 있다. 선기둥의 구조는 기술수준에 따라 여러 가지 방안이 고안되었지만 현재는 철골기둥과 현장타설 콘크리트 기초말뚝이 조합된 합성 구조방식이 가장 널리 정착되고 있다.

\* 연세대학교 건축공학과 교수, 정회원

\*\* 연세대학교 건축공학과 첨단구조연구실 연구원, 정회원

선기둥의 하부는 말뚝이기 때문에 시공방법은 현장타설 콘크리트 말뚝의 축조공법과 같다. 현재 국내 Top Down 선기둥 시공 시 가장 일반적으로 쓰이는 방식은 RCD공법이다. 시공은 선행굴착 → 케이싱 근입/추가 굴착 → 연직도 검측 → 슬라이드 제거 → 철골기둥, 철근망 설치 → 콘크리트 타설 → 자갈 채우기 → 케이싱 인발의 순서로 진행된다.

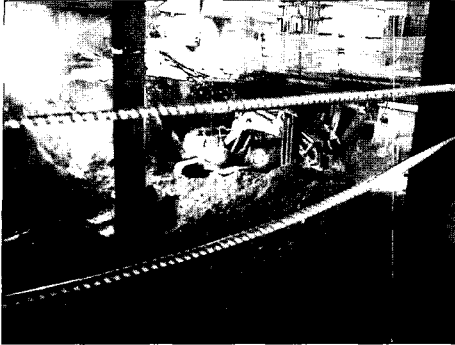


사진 1. 지하 1층 굴착 모습

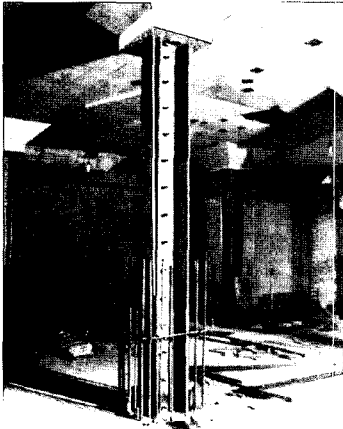


사진 2. 지하 3층 기둥

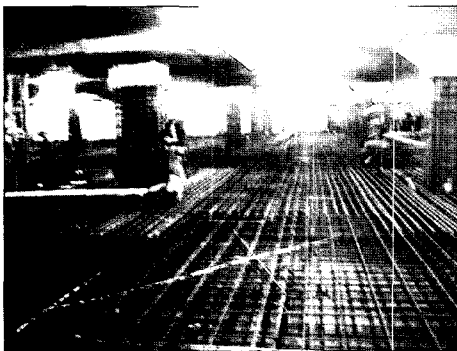


사진 3. 지하 4층 철근 배근

### 3. 선기둥 응력 해석 방법

선기둥이 어느 정도의 안전율로 설계되는지 알아보고, 여러 개의 층을 동시에 굴착했을 때 선기둥이 안전한지 예측하기 위해 실제 선기둥을 검토하였다. 기둥은 압축재이고 이 경우 좌굴응력이 중요하므로 기둥의 허용좌굴응력과 작용하중에 대한

응력을 비교하였다. 응력 해석은 Broms의 말뚝의 수평지지력에 관한 공식을 이용하는 방법과 기존의 실무에서 선기둥의 응력을 계산하는 방법을 이용하여 두 가지로 하였다.

### 3.1 Broms의 공식

일본 토목공법연구회에서는 Top-Down 선기둥 설계 시 좌굴 길이를 취함에 있어 Broms의 말뚝의 수평지지력에 관한 식을 이용하도록 권장하고 있다. 이 식을 사용하여 좌굴길이를 구하면 비교적 정확하게 부재의 허용좌굴응력을 구할 수 있다. Broms의 공식을 이용하여 허용좌굴응력과 작용하중에 의한 응력을 비교하는데 있어서 조건과 가정은 다음과 같다.

#### 3.1.1 하중

현재 서울 시내에서 건설 중인 A 현장을 참고하여 계수하중으로 하였다. 철골기둥은 Top-Down공사 중의 계획된 시공하중만을 지지하는 가설용 기둥이므로 작용하중은 시공하중만을 축하중으로 받는 것으로 한다. 하중은 구조설계서에 나와 있는 계수하중을 사용 한다. (식 1).

$$P_u = 1.4DL + 1.7LL \quad [\text{식 1}]$$

#### 3.1.2 기둥

코어부분의 기둥을 제외한 15가지 기둥 중에서 부재의 단면 크기와 위치에 따라 A, B, C 세 가지 타입으로 분류하여 분석하였다. A 현장의 경우, 코어부분을 제외한 40개의 선기둥 중에서 상부구조물이 있는 경우를 A type, 상부구조물이 없는 경우를 C type으로 크게 분류하고, 상부구조물이 있으면서 상부구조물의 외벽에 위치하여 하중이 달라지는 경우에 대해서 B type으로 따로 분류하였다. 기둥의 종류에 따른 각 층의 고정하중과 활하중은 다음과 같다(표 1).

표 1. 기둥에 따른 하중 분류

	지상(tf)		지하(tf)		특징	개소
	DL	LL	DL	LL		
A type	31	0	65	30	상부구조물 有	7
B type	38	9	99	60	상부구조물 有, 외벽위치	10
C type	0	0	60	30	상부구조물 無	23

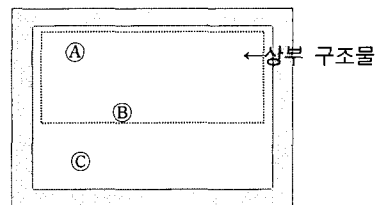


그림 1. 기둥 위치

#### 3.1.3 비교 기준

하중이 계수하중으로 되어 있기 때문에 이에 맞추어 응력 산정에 대한 기본 조항은 AISC 시방서의 E장 LFRD 설계법을 따른다.

### 3.1.4 공정 순서 가정

1개 층씩 굴착 시에는 지하1개 층 당 지상3개 층 시공 완료, 2개 층씩 굴착 시에는 지하2개 층 당 지상5개 층 시공 완료, 3개 층씩 굴착 시에는 지하3개 층 당 지상 7개 층 시공 완료 하는 것으로 가정한다.

### 3.1.5 좌굴길이

Broms의 말뚝의 수평지지력에 대한 공식을 이용하여 흙 속의 제 1부동점까지의 깊이  $l_0$ 를 구한다. 좌굴길이는 상부의 콘크리트에 매입되어 있지 않는 점에서 흙속의 제 1부동점까지의 길이(식 4)이다.

$$\beta = \sqrt{4 \text{ of } \frac{k_h B}{4 E I}} \quad [\text{식 2}]$$

$$l_0 = \frac{1}{\beta} \quad [\text{식 3}]$$

$k_h$  : 수평방향 지반반력계수 ( $kg/cm^3$ )

B : 선기둥의 폭 ( $cm$ )

E : 선기둥의 탄성계수 ( $t/cm^2$ )

I : 선기둥의 단면2차 모멘트 ( $cm^4$ )

$$l = (\text{철골기둥의 비지지 노출길이}) + l_0 \quad [\text{식 4}]$$

### 3.1.6 지지조건

좌굴길이를 취함에 있어서 지지조건은 근사 하여 가정한다. Top-Down 선기둥에 쓰이는 철골기둥은 슬래브 및 기초에 비해 강성이 현저히 작으므로 철골기둥의 상하부는 이동이 구속된 것으로 생각한다. 상부는 콘크리트에 매입되어 있으므로 고정단으로 보고 하부는 굴착구멍에 채운 쇠석자갈로 인하여 Pin 상태에 근사하므로 Pin으로 가정하므로 이때의 유효좌굴계수는 0.7-0.8로 놓을 수 있는데 본 연구에서는 0.7로 가정하였다 (식 5).

$$l_k = 0.7 \times l \quad [\text{식 5}]$$

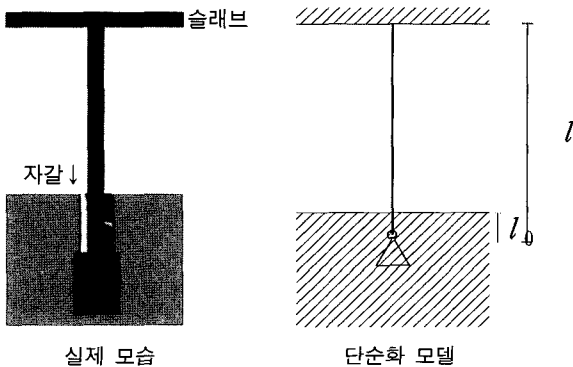


그림 2. 지지조건 단순화 모델

### 3.1.7 수평방향 지반반력계수

[식 2]에서의 수평방향 지반반력계수  $k_h$ 는 Hukuoka 법을 이용하여 구한다.

$$k_h = 691N^{0.406} (t/m^3) \quad [\text{식 6}]$$

선기둥 시공 시 뒷채움으로 자갈을 채워 넣기 때문에 자갈의 N(표준관입 시험치)는 40~50이므로 45로 한다.

### 3.2 기존 실무 계산 방법

Broms의 공식은 선기둥의 지지조건을 비교적 정확하게 고려하여 좌굴길이를 구하는 방법이지만 시공오차를 고려하지 않은 이상적인 경우를 가정하기 때문에 시공과정에서 생기는 편심에 의한 모멘트를 따로 고려해 주어야 한다.

실제 선기둥 설계 시에는 편심모멘트를 따로 계산하는 대신 지지조건을 가장 불리한 조건으로 가정하여 좌굴길이와 허용 좌굴응력을 구한다. 보다 현실적인 경우에 대한 분석을 위해 실무에서 실제 설계 시 쓰이는 방법을 이용하여 선기둥을 분석해 보았다. 이 경우 조건과 가정은 다음과 같다.

- 1) 하중, 기둥의 종류, 비교기준, 공정 순서에 대한 조건은 위의 경우와 같다.
- 2) 좌굴길이: 좌굴길이는 상단의 슬래브 밑면으로부터 굴착 완료부분까지의 길이, 즉 슬래브에 의한 지지 없이 드러나는 선기둥 전체의 길이로 한다.
- 3) 지지조건: 일반적으로 좌굴길이를 취함에 있어서 지지조건을 근사화 하여 가정하는데, 실제 선기둥 설계 시에는 가장 불리한 조건으로 상·하단 모두 Pin으로 가정하므로 유효좌굴길이계수를 1로 둔다.

### 3.3 두 식의 비교

기둥의 비지지 길이를 H라 하면 Broms의 공식을 이용하는 경우와 실무계산방법을 이용하는 경우 각각의 유효좌굴길이는 다음과 같다(표 2).

표 2. 유효좌굴길이 비교

	Broms의 공식	실무계산방법
유효좌굴길이 $l_k$	$l_k = 0.7 \times (H + l_0)$	$l_k = 1.0 \times H$

두 경우 공히 AISC의 시방서의 E장 LRFD 설계법을 따라서 허용좌굴응력을 구하면 실무계산방법이 더 보수적인 값을 나타낸다. Broms의 공식은 원래 기초 말뚝의 수평방향 반력을 구하는 공식인데 탐다운 공사에서 선기둥의 설계를 경제적으로 하기위해 응용된 것이기 때문이라고 생각된다.

## 4. 해석 결과

### 4.1 1개 층씩 굴착경우 허용 및 작용응력

1개 층씩 굴착할 때에 각각의 기둥에 대해서 허용좌굴응력과 작용응력을 비교해 보았다.

Broms의 공식을 이용했을 때의 유효좌굴길이를  $l_{k1}$ 이라 하면  $l_{k1}$ 은 상부의 콘크리트에 매입되어 있지 않는 점에서 흙속의 제 1부동점까지의 길이((각 층의 층고) +  $l_0$ )에 유효좌굴계수 0.7을 곱한 값 즉,  $l_{k1} = 0.7 \times ((\text{각 층의 층고}) + l_0)$ 이다.

실무의 계산방법을 이용하는 경우에는 유효좌굴길이를  $l_{k2}$ 라 한다.  $l_{k2}$ 는 각 층의 층고에 유효좌굴계수 1을 곱한 값이 된다(표 3).

표 3. 1개 층 굴착 시 유효좌굴길이와 하중작용 층

굴착단계	$l_{k1}(cm)$	$l_{k2}(cm)$	하중 작용 층
B1	298	415	F1 + F2~F4
B2	298	415	B1 + F1 + F2~F7
B3	413	580	B2~B1 + F1 + F2~F10
B4	413	580	B3~B1 + F1 + F2~F13
B5	413	580	B4~B1 + F1 + F2~F16
B6	413	580	B5~B1 + F1 + F2~F20

이 조건을 토대로 세 가지 기둥의 경우에 대해 각각 허용좌굴응력과 작용응력을 구해서 비교하였다. Broms의 공식을 이용하여 계산한 허용좌굴응력을  $F_{cr1}$ , 실무의 계산 방법을 이용하여 구한 허용좌굴응력을  $F_{cr2}$ 라 하고 작용응력을  $f_a$ 라 하였다 (그림 3, 그림 4, 그림 5).

Broms의 공식을 이용하여 해석한 결과와 실무의 계산방법을 이용하여 해석한 결과 모두에서 각 층의 층고가 비슷하기 때문에 허용좌굴응력은 층에 따른 변화가 거의 없다. Broms의 공식을 이용하였을 때가 실무 계산방법을 이용하였을 때 보다 유효좌굴길이가 더 짧고, 따라서 허용좌굴응력도 더 크다. 실무의 계산방법이 더 안전을 고려하여 보수적인 값을 도출한다는 것을 알 수 있다. 작용응력은 지하로 깊이 내려갈수록 지상구조물의 공사가 진행되기 때문에 점점 커진다.

그림 3, 4, 5를 보면 가장 큰 하중이 작용하는 지하 6층에서도 모든 종류의 기둥이 작용응력보다 허용좌굴응력이 Broms의 공식을 이용하여 해석한 결과로는  $1000 \sim 1600 \text{ kgf/cm}^2$  정도, 실무의 계산방법을 이용하여 해석한 결과로는  $900 \sim 1600 \text{ kgf/cm}^2$  더 커서, 두 방법 모두 허용좌굴응력이 크게 설계되어 있다. 이결과를 통해 선기둥 구조 설계 시 큰 안전율이 적용됨을 알 수 있다.

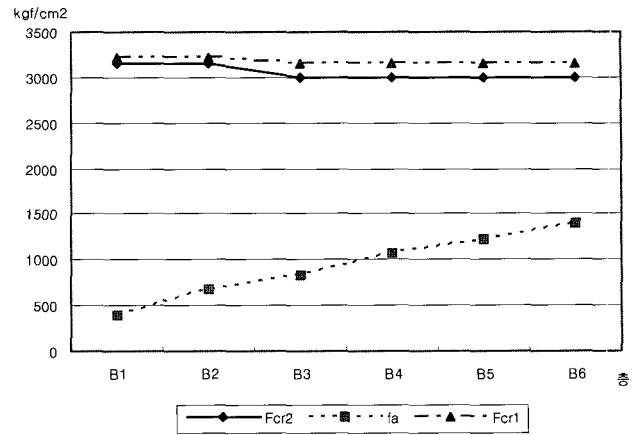


그림 3. 1개 층 굴착 시 A type 기둥의 응력 비교

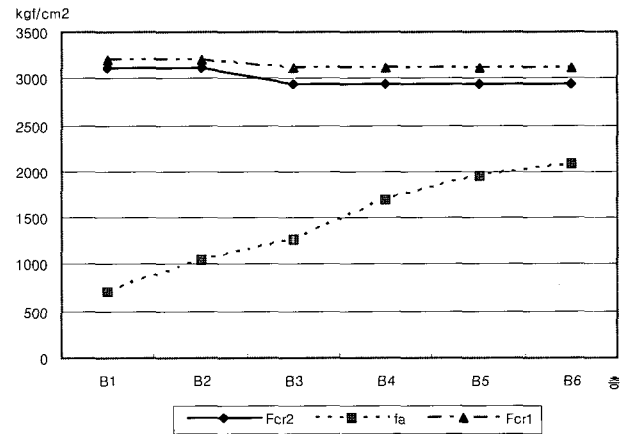


그림 4. 1개 층 굴착 시 B type 기둥의 응력 비교

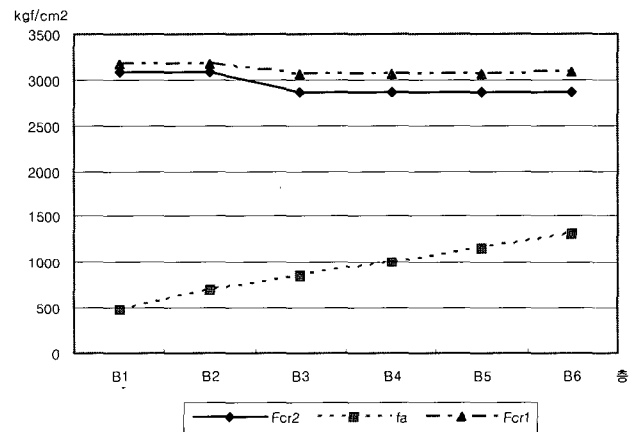


그림 5. 1개 층 굴착 시 C type 기둥의 응력 비교

### 4.2 2개 층씩 굴착경우 허용 및 작용응력

지하 1~2층, 지하3~4층, 지하5~6층으로 나누어 2개 층씩 굴착하는 경우에 대해서 응력을 비교했다.

Broms의 공식을 이용했을 때의 유효좌굴길이  $l_{k1} = 0.7 \times \{(\text{두 개 층의 층고를 합한 높이}) + l_0\}$ 이고, 실무의 계산방법을 이용하는 경우의 유효좌굴길이  $l_{k2} = 1 \times (\text{두 개 층의 층고를 합한 높이})$ 이다 (표 4). 각 방법에 대한 유효좌굴길이와 굴착 순서에 따라 하중이 가해지는 층을 정리하면 다음과 같다.

표 4. 2개 층 굴착 시 유효좌굴길이와 하중작용 층

굴착단계	$l_{k1}(cm)$	$l_{k2}(cm)$	하중 작용 층
B1~B2	588	830	F1 + F2~F6
B3~B4	819	1160	B2~B1 + F1 + F2~F11
B5~B6	819	1160	B4~B1 + F1 + F2~F16

Broms의 공식을 이용하여 해석한 결과로는 2개 층씩 굴착하는 경우에도 허용좌굴응력이 작용응력보다 크게 나타나 안전함을 확인할 수 있다. A type 기둥은 허용좌굴응력이 작용응력보다  $1500 \text{ kgf/cm}^2$  (그림 6), C type 기둥은  $1300 \text{ kgf/cm}^2$  커서 큰 안전율을 보였고 (그림 8), B type 기둥도 차이가  $300 \text{ kgf/cm}^2$ 로 작지만 (그림 7) 허용좌굴응력이 더 크기 때문에 안전 측에 든다고 할 수 있다.

반면에 실무의 계산방법을 이용한 경우에는 A 타입과 C 타입의 기둥은 가장 불리한 지하 5~6층 구간에서도 허용좌굴응력이 작용응력보다  $900 \sim 1000 \text{ kgf/cm}^2$  커서 안전한 결과를 보였다 (그림 6, 그림 8). 그러나 B 타입 기둥은 Broms의 공식을 이용한 경우와는 달리 지하 1~2층, 지하 3~4층에서는 문제가 없었지만 지하 5~6층의 구간은 작용응력이 허용응력보다 크게 나타났다 (그림 7).

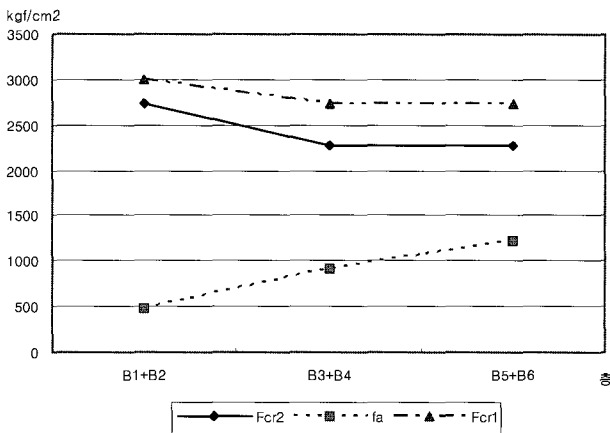


그림 6. 2개 층 굴착 시 A type 기둥의 응력 비교

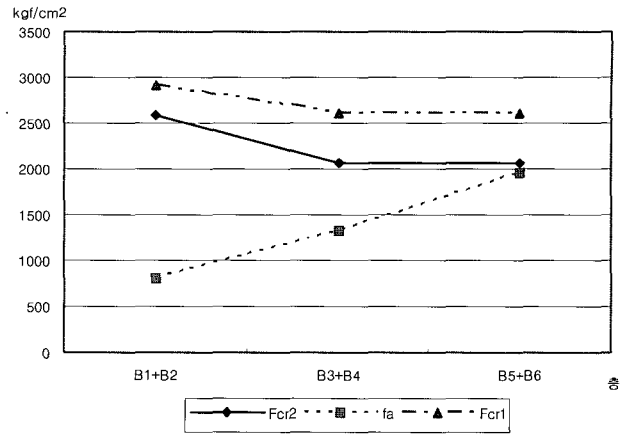


그림 7. 2개 층 굴착 시 B type 기둥의 응력 비교

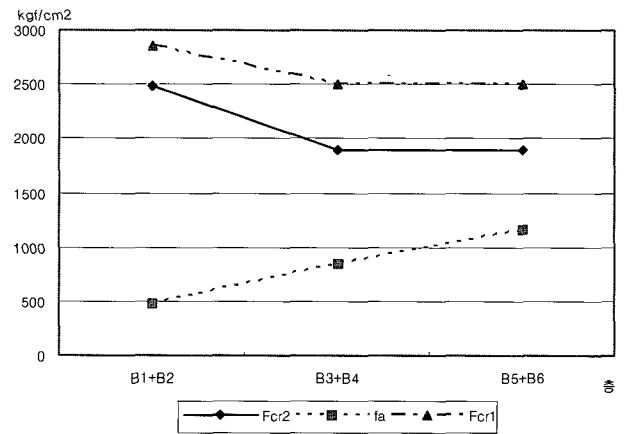


그림 8. 2개 층 굴착 시 C type 기둥의 응력 비교

### 4.3 3개 층씩 굴착경우 허용 및 작용응력

3개 층씩 굴착하는 경우에도 선기둥이 좌굴에 대해서 안전하지 검토하기 위해 지하 1~3층, 지하 4~6층으로 나누어 3개 층씩 굴착하는 경우에 대해서 비교하였다.

Broms의 공식을 이용하여 응력을 계산하는 경우는 유효좌굴길이  $l_{k1} = 0.7 \times \{(\text{3개 층의 층고를 합한 높이}) + l_0\}$ 이다.

실무의 계산 방법을 이용하는 경우에는 유효좌굴길이  $l_{k2}$ 는  $l_{k2} = 1 \times (\text{3개 층의 층고를 합한 높이})$ 가 된다 (표 5).

3개 층씩 굴착하는 경우에 있어서 유효좌굴길이와 하중조건은 다음과 같다.

표 5. 2개 층 굴착 시 유효좌굴길이와 하중작용 층

굴착단계	$l_{k1}(cm)$	$l_{k2}(cm)$	하중 작용 층
B1~B3	994	1410	F1 + F2~F8
B4~B6	1225	1740	B3~B1 + F1 + F2~F15

해석 결과, Broms의 식을 이용하여 구한 값을 비교해 보면 3개 층씩 굴착할 경우에도 모든 기둥에서 작용응력보다 허용좌굴응력이 크게 나타났다. 허용좌굴응력과 작용응력과의 크기 차이는 A type 기둥은  $1000 \text{ kgf/cm}^2$  (그림 9), B type 기둥은  $200 \text{ kgf/cm}^2$  (그림 10), C type 기둥은  $700 \text{ kgf/cm}^2$  (그림 11) 정도이다. 이 결과를 보면 3개 층을 동시에 굴착하여도 선기둥의 좌굴에는 안전하다고 할 수 있다.

그러나 실무의 계산 방법을 이용하여 해석한 결과에서는 Broms의 공식을 이용하여 분석한 결과와는 달리 경우 지하 1~3층의 구간에서는 모든 기둥이 안전치를 나타내었으나 지하 4~6층의 구간에서는 B 타입과 C 타입의 기둥이 허용응력보다 큰 응력을 받기 때문에 (그림 10, 그림 11) 좌굴에 대해 안전하지 않은 것으로 나타났다.

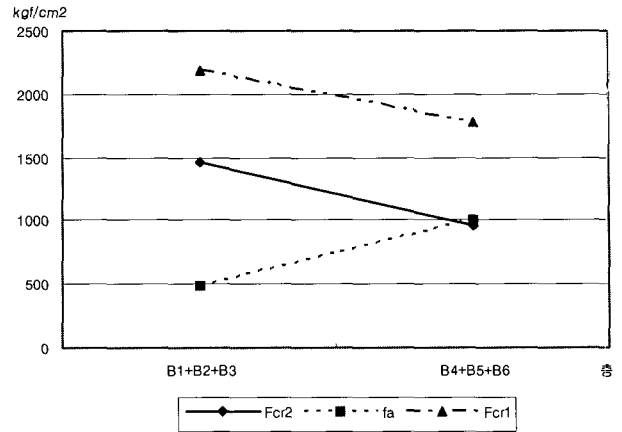


그림 11. 3개 층 굴착 시 C type 기둥의 응력 비교

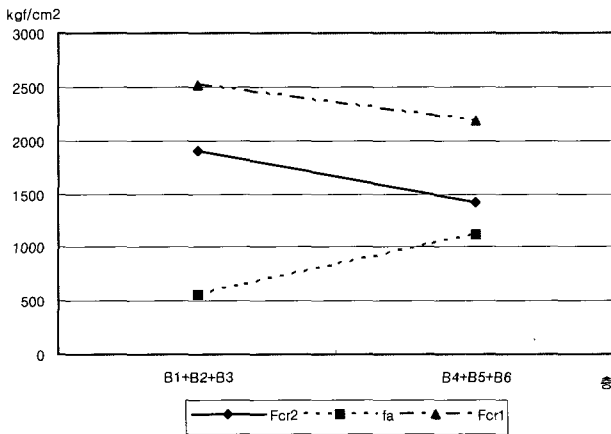


그림 9. 3개 층 굴착 시 A type 기둥의 응력 비교

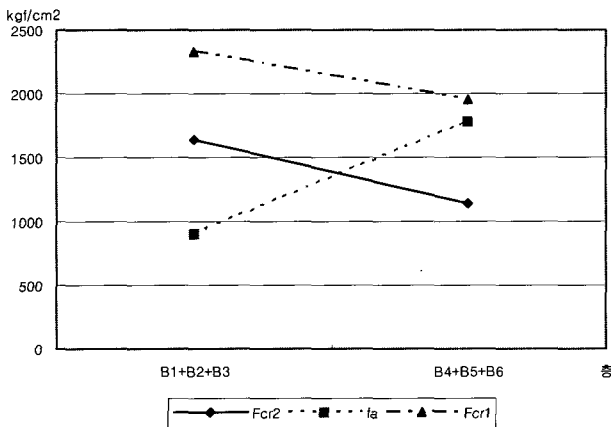


그림 10. 3개 층 굴착 시 B type 기둥의 응력 비교

## 5. Top-Down 지하 공사 시 다층(多層) 동시 굴착 순서 제안

### 5.1 응력 비교 결과에 따른 다층 동시 굴착 가능성

1개 층 굴착, 2개 층 동시 굴착, 3개 층 동시굴착에 대해서 3가지 종류의 기둥의 응력을 비교해 보았다. 해석 결과 모든 기둥이 지하 3층까지는 2개 층씩 굴착하는 것뿐만 아니라 3개 층씩 굴착하는 것에 대해서도 허용좌굴응력이 작용응력보다 커서 안전하다는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 지하 4층 이하로 내려가면 그 때에는 지상층 구조물의 하중도 상당히 증가하기 때문에 지하 기둥의 부담이 커진다. 2개 층씩 굴착에 대한 결과를 보면 대부분의 기둥은 안전치를 나타내는 데에 비해 B type의 기둥이 불안정한 결과를 보였다 (그림 7). 이것은 B type 기둥이 외벽에 접해있는 기둥이라서 풍압에 의한 횡하중이 작용하기 때문으로 보인다. 이 경우 A type과 C type 기둥은 안전하므로 (그림 6, 그림 8) 만일 설계 시 부터 2개 층 동시 굴착을 고려하여 B type 기둥에 대해 보강을 하거나 더 큰 단면의 형강을 사용하였다면 2개 층 동시굴착이 가능하다.

### 5.2 굴착 순서 제안

기둥 응력의 해석결과를 토대로 현재 설계되어 있는 기둥의 조건을 바꾸지 않는 상황 하에서 안전하면서도 공기를 단축할 수 있는 굴착 순서를 제안하고자 한다.

굴착 순서 제안에 있어서 하중과 기둥의 크기, 시공 순서 등의 조건과 가정은 기둥 응력 해석에서와 같으며 좌굴길이와 지지조건에 대한 가정은 실무에서의 계산방법에 따라 좌굴길이는 상단의 슬래브 밑면으로부터 굴착 완료부분까지의 길이로 하고, 지지조건은 양단을 Pin으로 보아 유효좌굴계수를 1로 한다. 즉  $l_k = 1 \times (\text{선기둥의 비지지 길이})$  이다 (표 6).

#### 5.2.1 지하 1층 ~ 지하 3층

응력 비교 결과 모든 기둥이 지하 1층부터 지하3층까지는 3개 층 동시 굴착의 경우에도 안전하므로 지하 1층부터 지하 3

층까지는 한 번에 굴착이 가능하다. 굴착 후 슬래브의 타설이 진행되는데, 지하 1층과 지하 2층의 슬래브만을 타설한다. 그렇게 되면 후에 지하 4층 굴착 시에 적정 층고가 확보되어 굴착 속도 지연을 방지할 수 있다. 이 기간에 지상 층은 2층부터 8층까지 7개 층의 공사가 진행된다. (그림 14-①).

### 5.2.2 지하 4층

지하 4층부터는 지상층 구조물과 지하층 구조물의 하중으로 인해 선기둥에 부담되는 응력이 커진다. 만약 지하 4층과 5층을 동시에 굴착하게 되면 선기둥의 비지지 길이가 3개 층(지하 3, 4, 5층)이 되어 좌굴에 안전하지 못하게 된다. 그러므로 지하 4층부터는 1개 층씩 굴착을 진행해야 한다. 지하 1, 2층 슬래브의 콘크리트 타설과 동시에 지하 4층을 굴착을 시작 한다. 지하 3층의 슬래브를 타설하지 않았으므로 2개 층 층고의 높이가 확보되기 때문에 굴착기기의 작동이 용이해져서 굴착속도가 증가한다. 이 때 선기둥의 좌굴길이는 지하 3층의 층고와 4층의 층고를 합한 높이이다 (그림 14-②). 이 기간에 지상층은 9~11층의 3개 층의 공사가 진행된다.

### 5.2.3 지하 5층

지하 4층의 굴착을 완료한 후 지하 3층 콘크리트를 타설과 동시에 지하 5층을 굴착하고 지상은 12~14층의 3 개 층 공사가 진행된다. 좌굴길이는 지하 4, 5층의 층고를 합한 높이이다.

### 5.2.4 지하 6층

마찬가지로 지하 6층도 지하 4층 콘크리트 타설과 굴착을 함께 진행한다. 지상층은 15~17층의 작업이 완료된다. 굴착이 완료된 후 지하 5층과 6층의 콘크리트를 동시에 타설한다.

표 6. 다층 동시 굴착 시 유효좌굴길이와 하중작용 층

굴착단계	$l_{kl}(cm)$	하중 작용 층
B1~B3	1410	F1 + F2-F8
B4	1160	B2~B1 + F1 + F2-F11
B5	1160	B3~B1 + F1 + F2-F14
B6	1160	B4~B1 + F1 + F2-F17

제안 방법에 대해 기둥의 허용좌굴응력과 작용응력을 비교해 보면 다음과 같다.

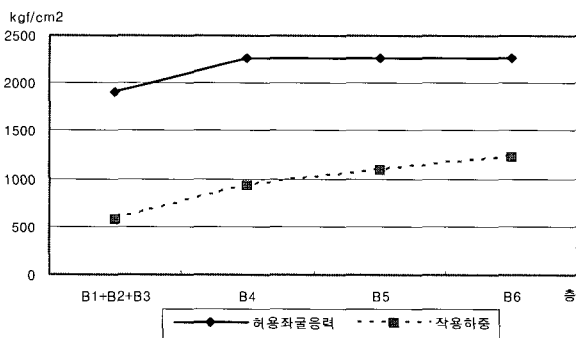


그림 12. 다층 동시 굴착 시 A type기둥 응력 비교

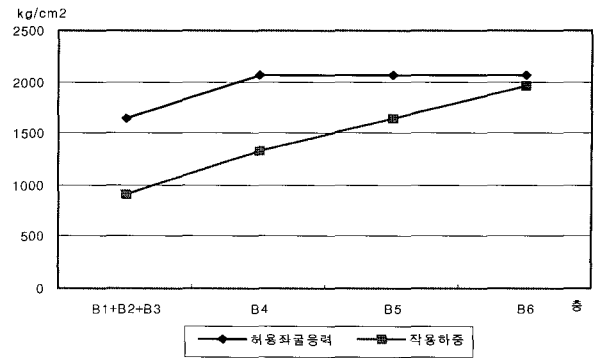
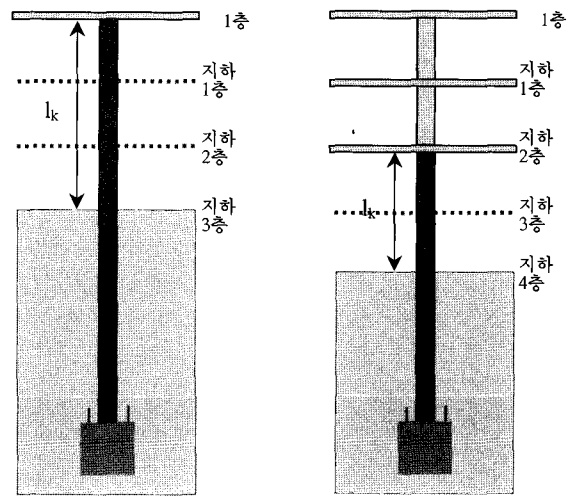
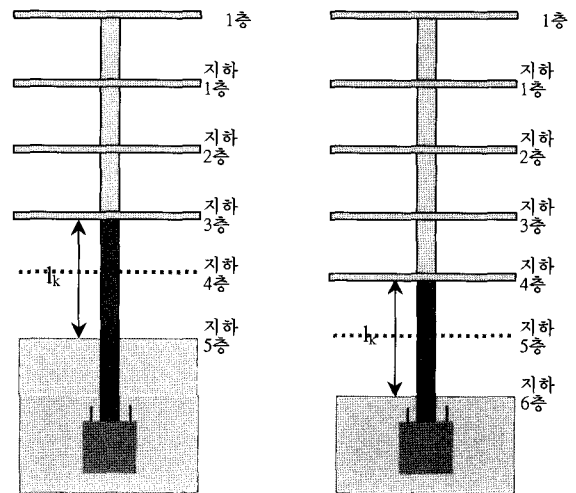


그림 13. 다층 동시 굴착 시 B type기둥 응력 비교



① 지하 1층~3층 굴착

② 지하 4층 굴착



③ 지하 5층 굴착

④ 지하 6층 굴착

그림 14. 다층 동시 굴착 순서

## 6. 결 론

- 1) Broms의 식과 실무의 방법을 이용하여 기둥의 응력을 해석한 결과 1개 층 씩 굴착 시에는 모든 층에서 허용좌굴 응력이 작용응력보다 평균  $1000 \text{ kgf/m}^2$  크다. 이것으로 탑다운 선기둥이 큰 안전율을 가지고 설계된다는 것을 알 수 있다.
- 2) 2개 층 씩 굴착 시에는 Broms의 식을 적용하여 해석한 결과는 모든 경우에서 안전하다는 결과가 나왔지만, 실무의 방법에 의한 해석 결과를 보면 지하 1~2층, 지하 3~4층의 구간에서는 모든 기둥이 허용좌굴응력이 작용응력보다 커서 안전하였으나 지하 5~6층의 구간에서는 일부 기둥의 작용응력이 허용응력보다 커져서 위험하였다.
- 3) 3개 층 씩 굴착 시에는 실무의 방법을 적용한 결과에서 지하 1~3층 구간은 모든 기둥이 안전하나, 지하 4~6층 구간에서는 50%의 기둥이 위험함을 보였다.
- 4) 응력비교결과를 토대로 좌굴에 안전하면서도 시공성을 확보할 수 있는 굴착 방법을 제안하였다. 처음 3개 층은 작용 응력이 허용 응력보다 작으므로 지하 1~3층의 3개 층을 동시에 굴착한다. 지하 4층 굴착 시 지하 1, 2 층만 콘크리트를 타설하여 굴착에 필요한 2개 층의 층고를 확보한다. 그 후에는 한층 씩 굴착과 콘크리트 타설을 병행하여 완료한다.
- 5) 탑다운 공사에서 선기둥에 작용하는 힘은 축하중과 편심 모멘트 외에도 바닥구조의 불균형 모멘트, 바닥구조의 탄성전단 효과, 바닥구조의 수축, 말뚝부분 콘크리트의 침하 등에 의한 부가응력 등이 작용한다. 앞으로 더 많은 연구가 이루어져 선기둥에 작용하는 여러 하중의 작용기구가 명확히 규명하여 보다 경제적인 설계를 하여야 할 것이다.
- 6) 본 연구는 하나의 현장에 대해서 분석 한 것이므로, 향후 여타 Top Down현장에 대해서도 추가적인 연구를 진행할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고, 한국건설교통기술평가원에서 시행한 2005년도 건설핵심기술 연구사업 '공기단축형 복합구조시스템 건설기술' (과제번호: 05 RND 건설핵심 D02-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 씨지이엔씨 이봉열 상무님과 (주)선진엔지니어링 이해출 부장님의 도움 말씀에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 토목공법연구회, 톱다운 공법, 도서출판 일광, 2003
2. 이동희, 탑 다운 공법 시공, 기문당, 2001
3. Top-Down 공법의 연구, 포스코개발주식회사, 2001
4. American Institute of Steel Construction, Manual of Steel Construction LRF D Code: Specification E. Columns and other compression members, 2nd Ed. 1998
5. 황희선, 임홍철, "Top Down 선기둥의 지지력 산정방법에 관한 연구", 한국건축시공학회, 2006년 한국건축시공학회 춘계 학술 발표대회 논문집 제6권 1호, p137~140, 2006.5