

# 막장볼트가 수평으로부터 벗어나는 경우 추가해 주어야 하는 본수에 대한 실내실험 및 수치해석

## A Laboratory Test and Numerical Analysis to Determine the Number of Additional Installation of Face Bolts due to the Deviated Bolts from the Horizontal Direction

서경원\*<sup>1</sup>, 이성원<sup>1</sup>, 김창용<sup>1</sup>

Seo, Kyoung-Won·Lee, Sung-Won·Kim, Chang-Yong

### Abstract

During installation of face bolts, they are often deviated from the designed horizontal direction. In this study, a laboratory test and numerical analysis were conducted to examine the change of support effect by them. Also, the number of bolts to be added for achieving the designed support effect was considered. It was verified in this study that the horizontal installation is more effective. Under the test condition of this study, 1.5 bolts/section should be added in the face of which the installation density was 3 bolts/section when the bolts were installed with R15° angle from the horizontal position.

**Keywords :** Face bolt, installation deviation, three dimensional excavation, tunnel face

### 요 지

막장볼트는 시공중 지반조건 및 천공기계의 기계적 원인에 의해 수평으로부터 벗어나게 타설되는 경우가 많다. 본 연구는 실내실험과 수치해석을 통하여 막장볼트가 수평으로부터 벗어나는 경우에 대한 보강효과의 변화를 검증하였다. 또한 이 결과를 바탕으로 추가해 주어야 하는 볼트의 개수에 대하여 고찰하였다. 본 연구로부터 막장 중앙부부터 타설하는 막장볼트는 가능한 한 수평으로 타설하는 것이 효과적이며 벗어나는 경우에는 볼트를 추가해 주어야 하는 것이 명확해 졌다. 본 연구의 조건하에서는 3본/단면을 타설 할 경우 모든 볼트가 R15°로 수평으로부터 벗어나면 1.5본/단면을 추가해 주어야 하는 것으로 나타났다.

**주요어 :** 막장볼트, 타설각도, 삼차원 굴착모형실험, 볼트축력

### 1. 서론

국외의 경우 터널굴착시 가장 위험지역인 막장의 효율적인 안정 확보와 주변지반의 침하 억제를 위한 보조공법으로서 막장볼트가 시공의 용이함과 경제성 등으로 인

해 많이 적용되고 있다. 이때 페이스 볼트의 시공기준에는 가능한 한 수평으로 설치할 것을 추천하고 있으며 (Geofront 연구회, 1996 ; 일본토목학회, 1996) 실무에서는 작업의 편의를 위해 5°이내의 상향으로 타설하는 경우가 많다(Geofront 연구회, 2000). 본 논문에서는

\*1 한국건설기술연구원, 공학박사 (kwseo@kict.re.kr)

막장에서 수평 및 약간 상향(5°이내)으로 타설하는 것을 모두 수평타설로 간주하기로 한다. 국내의 막장볼트 관련 연구는 관해서는 수평타설을 원칙으로 유충식(2000, 2002) 등이 길이 및 볼트 길이에 대한 분석을 한바 있으며 남기천 등(2003)은 지반특성에 따른 볼트 효과를 분석한 바 있다. 또한 국외에서도 많은 연구가 이루어지고 있지만 수평타설을 원칙으로 하고 있다.

그러나 실제 시공시에는 지반조건 및 기계적 조건 등으로 인해 수평으로부터 벗어나는 경우가 많이 발생하고 있다(Kinashi, 2004). 이때 수평으로부터 벗어나는 정도는 동일단면에서도 방향과 각도가 모두 다른 것이 특징이다. 필자들은 문헌분석을 통해 20m 천공시 최대 1.4m가 수평으로부터 벗어난 경우도 있음을 확인하였다(Takahashi, 1997; 서경원 등, 2006). 최근에는 40m 이상의 초장거리 볼트도 시공되고(Geofront 연구회, 2000) 있으므로 벗어나는 정도는 더욱 커질 것으로 생각된다. 페이스 볼트의 설계기준에는 수평으로부터 벗어나는 경우 개수를 추가해 주어야 한다고 규정되어 있지만 수평에서 벗어나는 경우 보강 효과가 어떻게 변하는지 또한 몇 개를 추가해 주어야 수평으로 타설한 경우와 동일한 효과를 얻을 수 있는지 등에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 논문에서는 우선 실내실험과 수치해석을 통하여 막장볼트의 수평타설과 인위적으로 각도를 주고 타설한 경우의 보강효과 및 볼트의 거동에 대하여 분석하였다(Case I). 그리고 이의 결과를 바탕으로 수평으로부터 벗어나는 경우 볼트를 추가하면서 몇 개를 추가해야 수평타설과 동일한 효과를 얻을 수 있는지에 대하여 분석하였다(Case II). 여기서 Case I의 내용은 필자들이 기존에 발표한 결과(서경원 등, 2006)를 인용하고 주로 Case II에 주목하고자 한다.

## 2. 막장볼트의 개요 및 이론적 배경

### 2.1 볼트와 지반의 상호작용에 관한 고찰

막장전방에서 수평으로 타설된 볼트의 미소구간의 힘의 평형은(그림 1) 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

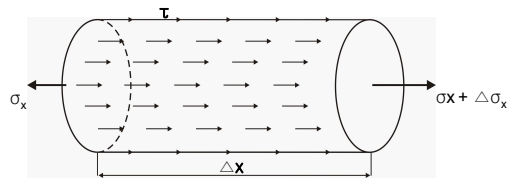


그림 1. 볼트미소구간의 평형

$$-\sigma_x \pi a^2 + (\sigma_x + \Delta\sigma_x) \pi a^2 + \tau \cdot 2\pi a \cdot \Delta x = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_x$  : 볼트 축방향에 작용하는 응력  
 $\tau$  : 볼트 주변에 작용하는 부착응력  
 $a$  : 볼트 반경

식 (1)로부터 식 (2)와 같은 간단한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta\sigma_x}{\Delta x} = -\frac{2}{a}\tau \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 막장 볼트 축력은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$p = \pi a^2 \int_0^l d\sigma = -2\pi a \int_0^l \tau dx \quad (3)$$

즉 볼트에 작용하는 축력의 크기는 볼트 주변에 작용하는 부착저항력의 합과 같고 그 방향은 역방향인 것을 알 수 있다. 이것을 막장볼트와 관련지어 보면 다음과 같다. 우선 지반을 연속체로 가정하면 터널 축방향의 지반변위는 그림 2(a)와 같이 막장 내측으로 변위가 발생한다. 이에 따라 막장볼트도 변형을 일으키지만 볼트의 터널 축방향 강성이 훨씬 크기 때문에 볼트는 지반변위를 제어하려는 쪽으로 작용하고 지반과 볼트의 경계면에는 마찰저항력이 발생한다. 이 마찰저항의 크기는 지반과 볼트의 변위차 즉 지반-볼트의 강성차에 비례하고 그 방향은 막장을 지반쪽으로 잡아당기는 듯이 거동하게 된다. 이 분포는 그림 2(b)와 같이 모식적으로 나타낼 수 있다. 이 마찰저항력의 분포로부터 계속되는 볼트 축력분포를

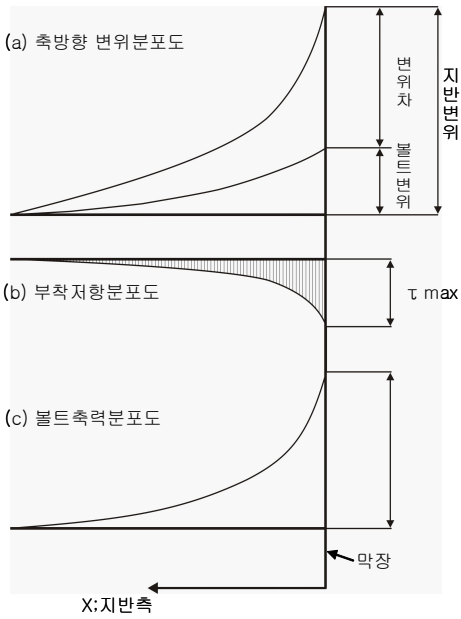


그림 2. 연속체 지반의 변위, 부착저항 및 축력분포의 모식도

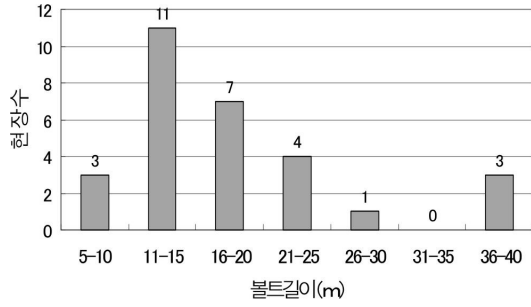


그림 3. 현장적용의 볼트길이

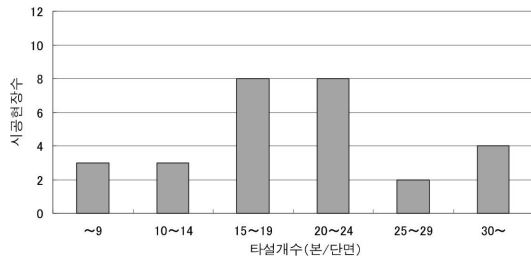
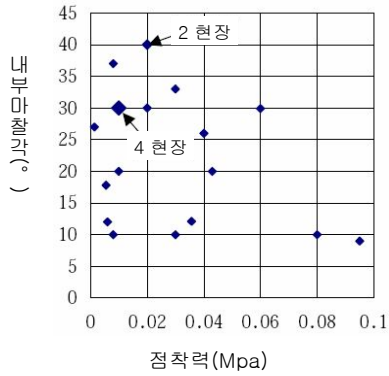
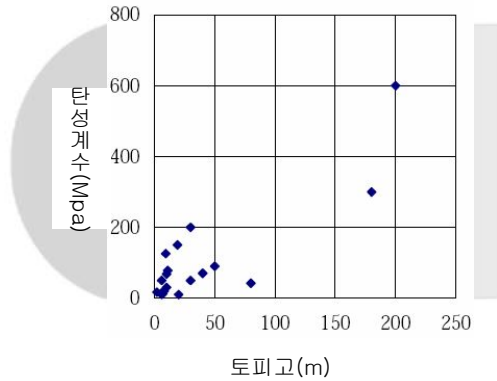


그림 4. 현장적용의 볼트개수



(a) 점착력과 내부마찰각의 관계



(b) 터널 토포고와 지반의 탄성계수와와의 관계

그림 5. 페이스 볼트의 시공실적과 지반조건

식 (3)에 따라 구하면 그림 2(c)와 같이 막장면에서 최대의 축력(인장)을 나타내고 지반 심도 방향으로 감소하는 분포를 얻을 수 있다.

## 2.2 막장볼트의 사용 현황

막장볼트는 약 30년 전부터 사용되었지만, 정량적 설

계는 약 2000년 이후 새로운 재료의 개발과 함께 이루어져 왔다. 막장볼트는 그림 2와 같이 11~15m로 터널 1D에 해당하는 길이가 많이 사용되고 있으며 1단면당 타설개수는 15~24개 정도가(그림 3) 사용되고 있다(Geo-front 연구회, 2000). Ohtsuka(2006)은 막장볼트를 적용한 33개의 현장시료를 분석한 결과(그림 4), 점착력은 0.05MPa 이하의 현장에서 적용된 경우가 많으며 내

표 1. 실험방법

실험토조	폭 0.88m, 길이 1.08m, 높이 0.6m의 알루미늄입 토조하부에 1 step(2cm)씩 굴착할 수 있도록 탈착식의 도어를 설치함
지반재료	동산탄, 와세린, 산화아연을 200:1:0.3의 중량비로 섞은 인공재료 동산탄의 유효경(D <sub>10</sub> )은 0.88mm, 균등계수(U <sub>c</sub> )는 2.18, D <sub>60</sub> 은 1.92mm임 재료의 장점 : 지반에 어느 정도의 점착력을 줄 수 있으며, 물을 사용하지 않으므로 물성치가 안정되어 있고, 장기간 보존이 가능함 재료의 단점 : 재료가 무거우므로 취급하기 어렵고, 와세린을 사용하기 때문에 일정한 온도관리가 필요함
터널모형	터널모형은 아크릴제의 반원통형의 파이프이며 직경(D)은 160mm(내경 154mm)임 터널의 토피고는 22cm(1.4D)임
막장볼트	아크릴제의 1D(160mm), 한 변 2mm의 rod에 에폭시수지로 표준사를 부착함 스트레인게이지를 2개 1쌍으로 8개소에 붙여 굴착시 막장중앙부에 설치하여 축력을 계측함 볼트의 타설방법은 계획된 위치에 꼽아넣는 방법하며 다음 단계 굴착시 막장후방의 1단계분(20mm)을 절단하면서 굴착을 진행함 막장볼트의 축력은 모형토조의 20~36cm구간의 굴착시 계측함
분석항목	변위 : 지표면 터널중단방향에 10개소, 횡단방향 3개소에 다이얼게이지를 설치하여 지표면 침하를 계측함 축력 : 볼트에서 계측된 스트레인을 스트레인게이지의 예비실험을 통하여 구한 보정계수를 이용하여 축력으로 환산함 수치해석으로 막장 최대수평변위를 분석함
터널굴착	사진 1의 왼쪽부터 손 굴착으로 2cm씩 순차적으로 굴착하고, 최종적으로 2.8D(44cm)를 굴착함(이와 같은 굴착방법은 Ishimura 등(1998)에 의해 성공적으로 행해진바 있음)

부마찰각은 30°근방인 지반에서 적용된 경우가 많다고 보고하였다. 또한, 지반의 점착력이 크고 내부마찰각이 작은 점토계 지반에서도 사용 실적이 많다고 보고하였다. 그림 10(b)에는 사용현장의 토피고와 탄성계수를 나타내었다. 탄성계수는 200MPa 이하의 지반, 토피고는 50m 이하의 저토피구간에서 사용실적이 많은 것으로 조사되었다. 또한, 막장볼트의 길이는 약 12m의 경우가 제일 많으며 중첩장은 볼트의 길이가 길수록 길어지는 경향은 있지만 3m-4m의 현장이 제일 많았다. 이것은 터널막장의 파괴포락선이 약 0.5D근방에 집중하고 있기 때문으로 사료된다.

### 3. 실험 및 수치해석 방법

#### 3.1 실험방법의 개요

막장볼트의 시공은 타공법과 다르게 막장으로부터 수평으로 타설하여 절단하면서 굴착하므로 이러한 특징을 충실히 모델화하기 위하여 표 1 및 그림 5과 같은 실험방

법을 고안하였다. 사진 1에는 표 1과 같은 과정을 통하여 실험준비가 완료된 상태의 모형토조를 나타내었다. 이때 실험의 가정조건은 막장볼트의 사용실적의 현장조사를 토대로 도로2차선 터널과 토피고 1.5D를 기준으로 스케일을 조절하였다.

#### 3.2 수치해석 방법

본 실험은 막장을 순차적으로 3차원 굴착을 하므로 막장 수평면위의 직접적인 계측은 불가능하기 때문에 실내 실험을 수치해석으로 재현하여 막장 수평변위 등을 분석하였다. 표 2에 해석에 사용된 볼트의 제원을 나타내었고 표 3에는 터널모형의 제원을 나타내었다. 지반은 완전탄소성체로 모델화하고, 파괴기준은 Mohr-Coulomb의 기준을 적용하였다. 해석에 사용된 프로그램은 FLAC3D이다. 볼트는 파일요소로 모델화하고, 굴착 등은 실내실험과 동일한 순서로 행하였다. 볼트와 지반간의 부착특성에 대해서는 아크릴제-에폭시-모래-지반 재료계에서의 부착의 파괴는 볼트와 지반재료간에 발생하는 것으로 가정해서, 지반재료의  $c$ ,  $\phi$ 를 이용하였다.

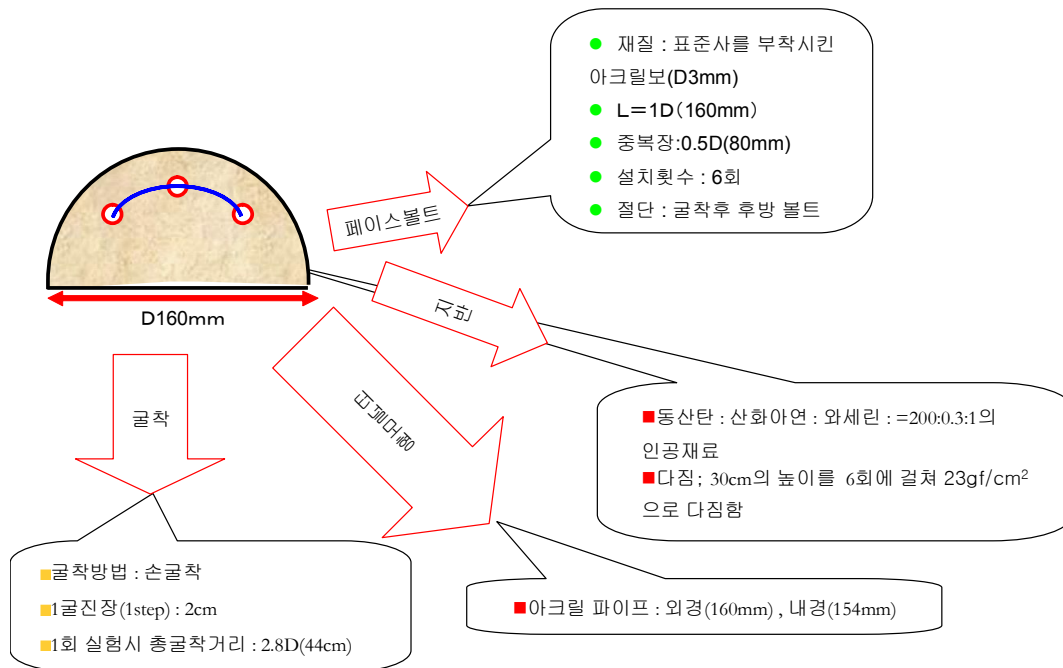


그림 6. 실험개요

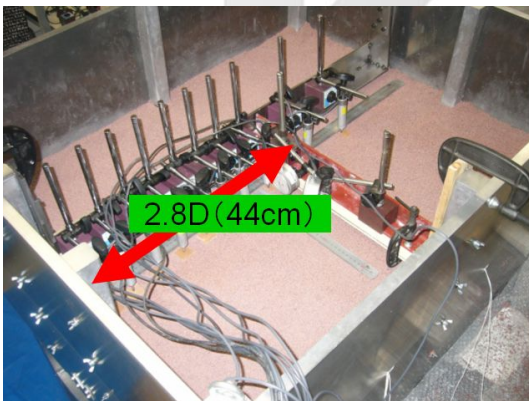


사진 1. 실험준비 완료후의 모형토조 모습

그림 6에 해석영역을 나타내었다. 토피와 터널의 치수는 실험과 동일하다.

### 3.3 실험 case

#### 3.3.1 막장볼트가 수평으로부터 벗어나는 경우의 실험(case I)

그림 7에 case I에 대한 모델을 나타내었다. 먼저 그림 7(a)의 none과 (b)의 0°(수평타설)을 비교하여 막장볼트의 효과를 고찰하고, 그림 7(b)와 그림 7(c), (d)의 수평타설과 각도타설을 분석하였다. 볼트는 막장중앙부에 타설하는 것으로 한다. 이때 각도타설은 방사상15°, 30°의 두 가지를 가정하였다. 여기서 각도타설은 수평으로부터 벗어난 정도를 말한다. 막장볼트의 벗어남은 그림 7의 (c), (d)와 같이 가정하였다. 그림 7(c)의 C지점을 중심으로 전방에 방사하는 형태이며 이러한 타설은 현장에서 생기는 수평타설로부터 벗어나는 각도와 비교하여 주변지반으로 퍼져나가는 면적이 크나 실제 타설각도의 벗어남은 각 단면에서도 서로 다른 점과 실내시험의 검증 한계를 고려하여 방사상으로 타설하기로 하였다.

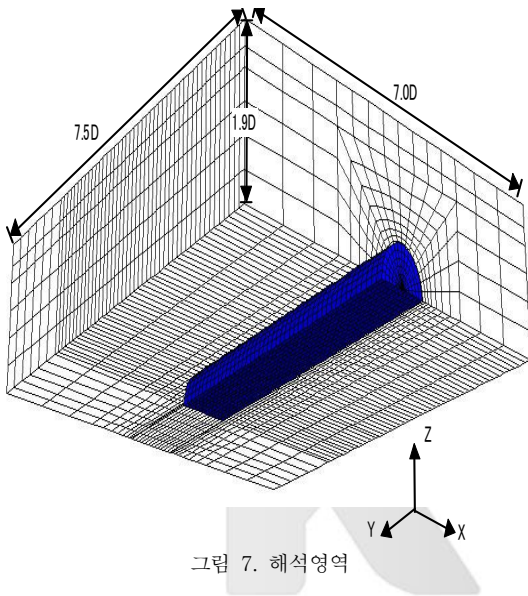
표 4에 그림 7과 같이 타설했을 경우의 특징 및 타설본수 등에 대한 설명을 나타내었다. 2.8D까지 굴착하면서

표 2. 막장볼트의 제원 및 물성치

탄성계수 (kPa)	단면적 (cm <sup>2</sup> )	부착강도 (kN/m/m)	부착강성 (kN/m)	중첩장 (D)	길이 (L)
4.5E8	7.0×10 <sup>-2</sup>	7.3	0.35	0.5D(8cm)	16cm (1D)

표 3. 터널모형의 제원

탄성계수 (kPa)	내경 (mm)	외경 (mm)
4.5×10 <sup>8</sup>	154	160



6회의 볼트를 타설하였으며 중첩장은 예비실험을 참고로 0.5D로 하였다.

### 3.3.2 추가하는 개수에 대한 실험(case II)

case II는 case I의 결과를 바탕으로 수평으로부터 벗어나는 경우 몇 개를 추가해주어야 수평타설과 동일한 효과를 얻을 수 있을가에 대하여 분석하였다. 그림 7(c)를 기준모델로 설정하고 볼트를 1개, 2개 추가하면서 그림 7(b)의 결과와 비교하였다. 그림 8에는 case II의 분석모델을 나타내었다.

## 4. 결과분석 및 고찰

### 4.1 Case I에 대한 분석

그림 9에 막장볼트의 타설각도에 따른 막장중앙부의 최대수평변위(수치해석치)를 나타내었다. 먼저 페이스볼트의 수평타설에 의해 막장최대수평변위가 47% 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 막장볼트를 타설한 막장에서는 타설각도에 의한 영향이 작지만 타설 후 2 step 굴착

표 4. 막장볼트의 타설각도에 대한 실험 모델

실험모델	모델명	볼트배치	타설본수	타설 shift	타설특징
그림 3(a)	None	볼트없음	-	-	-
그림 3(b)	0°	수평타설	3본/단면	6	모든 단면에서 동일한 타설밀도가 유지됨
그림 3(c)	R15°	방사상15°타설	3본/단면	6	4step굴착 후 막장으로부터 볼트가 없어짐
그림 3(d)	R30°	방사상30°타설	3본/단면	6	2step굴착 후 막장으로부터 볼트가 없어짐

볼트의 중첩장 : 0.5D(8cm)

총 굴착거리 : 2.8D(44cm)

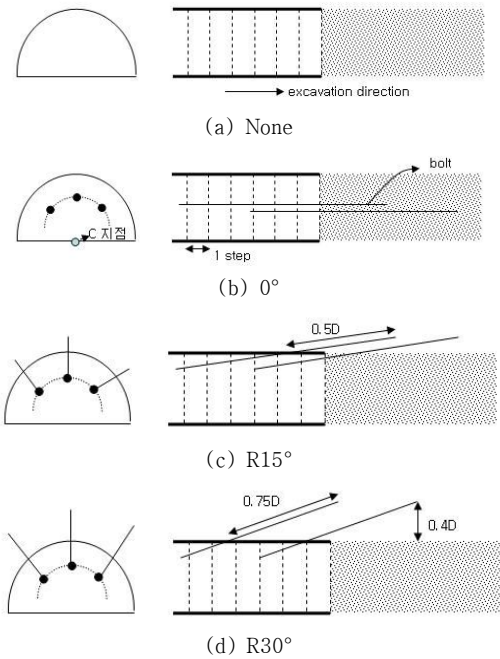


그림 8. 실내실험 및 수치해석 모델

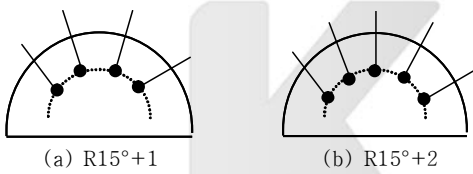


그림 9. Case II의 분석모델

한 지점(R30°의 볼트는 막장으로부터 없어짐)에서는 수평변위가 커지는 것을 알 수 있다. 즉 막장부의 수평변위에 대한 효과는 수평타설이 가장 효과적이며 지반공학 및 시공 원인에 의해 타설각도가 생기는 경우 타설 본수를 증가시켜야 하는 것이 명확해 졌다.

그림 10에는 최종굴착시의 터널 종단방향의 지표면 침하량을 나타내었다. 이 지점은 그림8처럼 수평볼트는 6분/단면(1단면당 3분을 타설하였으나 중첩장을 고려한 타설이므로 6분/단면이 된다.)이 존재하며, R15°타설은 굴착선 가까이 볼트가 위치하는 형태가 되며 R30°타설은 막장전방의 천단부에 볼트가 위치하지만 막장 수평방향으로는 볼트가 없는 상태가 된다. 막장후방 1.88D에서는 0°은 none에 비하여 약 22%의 변위가 감소되지만

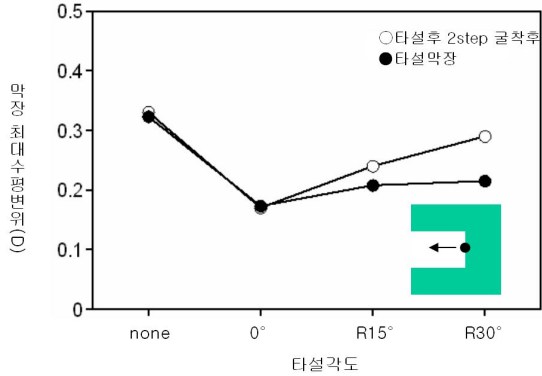


그림 10. 타설각도에 따른 막장수평변위 (수치해석)

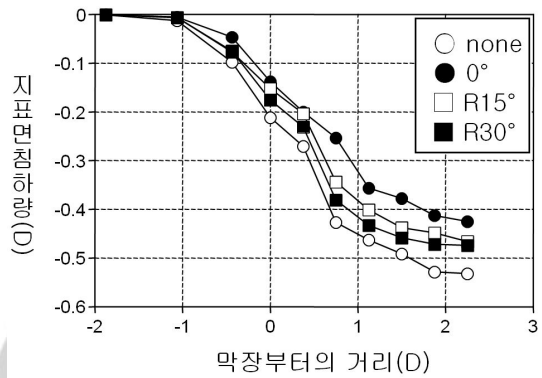


그림 11. 2.8D 굴착했을때의 지표면 침하량 (실험)

R15°는 15% 감소, R30°는 10%가 감소하고 있어 타설각도의 커짐에 수반하여 막장볼트의 효과는 감소되고 있는 것을 알 수 있다.

그림 11에 타설각도에 따른 볼트의 최대 축력분포를 나타내었다. 볼트의 축력은 변위가 클수록 커질 것으로 예상되나 그 반대로 수평볼트의 축력이 가장 크며 타설각도가 클수록 축력이 작아지고 있다. 즉 0°(수평타설)은 최대 14N이 작용하고 있으나 R30°볼트는 7N으로 50% 작은 것으로 나타났다. 이것은 다음과 같이 생각할 수 있다. 방사상 타설의 경우 지반의 변위는 커지나 주된 변위가 발생하는 연직방향과 수평방향으로부터 벗어나 있으므로 지반과 볼트의 상대변위는 작아져서 마찰이 작아지고 결과적으로 축력이 작아졌다고 판단된다. 그러므로 볼트의 최대축력을 발현시키기 위해서는 수평타설을

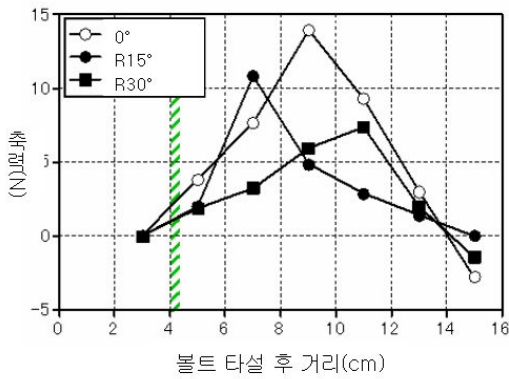


그림 12. 페이스 볼트의 타설각도에 따른 최대 축력의 비교(그림중의 해치선은 막장의 위치를 의미함) (실험)

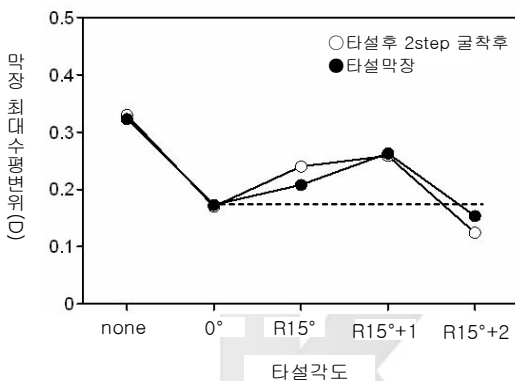


그림 13. 볼트를 추가하였을 경우의 막장 최대 수평변위 (수치해석)

해야 하며, 타설각도가 벗어나는 경우 개수를 추가해 주어야 하는 것이 명확해졌다.

#### 4.2 case II에 대한 고찰

그림 12에는 그림 7(c)모델을 기본으로 볼트를 1본, 2본 추가하였을 때의 막장 수평변위를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 타설각도 R15°의 변위가 0°(수평타설)의 변위에 근접하기 위해서는 단면당 1.5본 이상을 추가해 주어야 하는 것으로 나타났다.

그림 13 및 그림 14에는 최종굴착지점인 2.8D를 굴착하였을 때 종단방향의 지표면 침하량을 나타내었다. 그림 12와 마찬가지로 타설각도 R15°의 변위가 0°의 변위

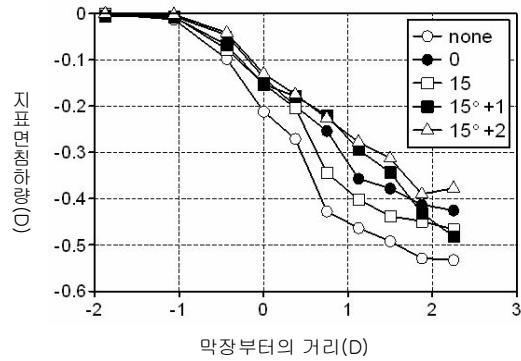


그림 14. 2.8D 굴착했을때의 지표면 침하량 (실험)

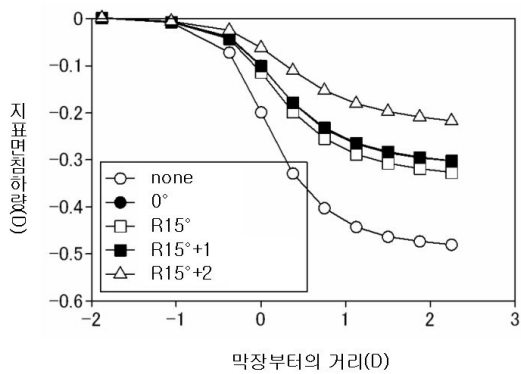


그림 15. 2.8D 굴착했을때의 지표면 침하 (수치해석)

에 근접하기 위해서는 1본 이상을 추가해 주어야 하는 것을 알 수 있다. 즉 그림 12와 그림 13의 결과로부터 막장 중앙부의 막장볼트는 수평으로부터 벗어나게 시공되면 보강효과는 감소되며 이 경우 계획된 수평타설과 동일한 효과를 얻기 위해서는 볼트를 추가해 주어야 하는 것으로 나타났다. 그림 10에는 수치해석으로 재현한 최종굴착시의 지표면 침하량을 나타내었다. 그림에서 0°의 결과는 R15°의 결과와 거의 일치하여 그림상에는 나타나지 않는다. 실험값과 마찬가지로 최소 1본/단면 이상을 추가해주어야 수평타설과 동일한 효과를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

이상의 지표면 침하 및 막장 수평변위 등의 분석결과 본 연구의 조건하에서는 3본/단면을 타설 할 경우 모든 볼트가 R15°로 수평으로부터 벗어나면 1.5본/단면을 추가해 주어야 하는 것으로 나타났다.



계측 자료를 이용하여 최적의 타설패턴과 각도에 대해서 보고할 예정이다.

## 5. 결론

본 연구는 막장볼트의 타설각도에 의한 영향을 분석함과 동시에 수평으로 벗어나는 경우의 추가해 주어야 하는 개수에 대한 기초적 실험 결과를 보고하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 막장볼트의 막장수평변위에 대한 효과는 수평으로 타설하는 것이 가장 효과적이며 타설각도가 클수록 수평변위는 커지고 있다. 본 실험의 조건하에서는 0°는 R30°타설 보다 53% 보강효과 큰 것으로 나타났다. 또한 막장수평변위, 천단침하, 막장볼트의 축력 분포로부터 수평으로부터 벗어나는 경우 개수를 추가해주어야 하는 것이 명확해 졌다.
- (2) 막장에서 방사상으로 타설한 막장볼트의 축력은 수평으로부터 벗어나는 각도가 클수록 작아지고 있으며 큰 변위가 발생해도 축력은 증가하지 않는다. 이것은 막장에서의 변위는 수평변위가 우세하므로 수평으로부터 벗어날수록 볼트와의 마찰이 작아지기 때문으로 판단된다.
- (3) 본 연구의 조건인 3본/단면을 타설 할 경우 모든 볼트가 R15°로 수평으로부터 벗어나면 1.5본/단면을 추가해 주어야 수평타설과 동일하거나 약간 우수한 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

막장볼트는 국외에서는 활발하게 적용되고 있으나 국내의 경우 사용실적은 거의 없는 상황이다. 본 논문에서는 시공시 발생하기 쉬운 수평으로부터의 벗어남에 대해 보충하는 개수에 대한 기본적 고찰을 하였다. 계측된 자료중 20m천공시 최대 1.4m가 수평으로부터 벗어난 경우도 있으며 최근 강관을 이용한 지반보강시에는 50m이상의 초장거리 강관다단그라우팅도 수행되고 있으므로 천공작업시의 편차는 더욱 커지리라 판단된다. 또한 최근에는 막장중상부의 볼트는 수평으로 타설하고 최외곽부의 볼트를 상향 20°정도의 각도로 타설하여 강관다단의 역할을 분담케 하는 타설패턴도 이루어지고 있으므로(○○터널 공사사무소, 2006) 타설각도에 영향은 더욱 커지리라 사료된다. 향후 다양한 형태의 배치에 대한 실

## 참고문헌

1. ○터널 공사사무소 동일본고속도로주식회사 동북지사 (2006), ○○터널 대책공 검토업무 제2회 위원회 위원회자료.
2. 남기천, 허영, 유광호 (2001), “과쇄대 암반에서 얇은 심도의 터널 굴착시 막장보강 효과에 관한 연구”, 터널 기술, Vol. 5, No. 4, pp. 323-335.
3. 서경원, Nishimura Kazuo, 김광염, 김창용 (2006), “막장볼트의 타설각도가 보강효과에 미치는 영향분석”, 지반공학회 논문집, 제22권 10호, pp. 1-8.
4. 일본토목학회 (1996), 터널표준시방서 산악공법편\_동해설.
5. 유충식, 신형강 (2000), “모형실험에 의한 수평보강재로 보강된 터널 막장의 거동 분석”, 터널기술, Vol. 3, No. 2, pp. 32-40.
6. 유충식, 양기호 (2002), “Behaviour of a tunnel face reinforced with longitudinal pipes-laboratory investigation”, 터널기술, Vol. 4, No. 2, pp. 91-99.
7. Geofront 연구회 (1996), 장척막장볼트의 적용(안), pp. 12-17.
8. Geofront 연구회 (2000), 장척막장볼트의 시공실태 조사와 분석 II, pp. 231-327.
9. Kinashi H. (2004), “A study on development and effect of the longitudinal face bolt (in Japanese)”, Kyoto University, Ph.D. Thesis.
10. Ohtsuka I. (2006), “Study on performance and application range of long face bolts”, Proceedings of the 35th Symposium on Rock Mechanics, JSCE, pp. 41-46.
11. Takahashi H. (1997), “장척막장볼트에 의한 갱구부 막장 대책”, 터널과 지하, Vol. 28, No. 3, pp. 29-35.
12. Toshiaki, I., Hideto, M., Hideto, M. and Kunino H. (1998), “A 3-dimensional excavation model test about the effect of a tunnel pre-lining for the restraint of the ground deformation”, Proceedings of Tunnel Engineering, JSCE, Vol. 8, pp. 199-204.



**서경원**

한국건설기술연구원, 공학박사  
kwseo@kict.re.kr



**이성원**

한국건설기술연구원  
국토지반연구부 수석연구원  
swlee@kict.re.kr



**김창용**

한국건설기술연구원  
국토지반연구부 수석연구원  
cykim@kict.re.kr

---

K C I