

$c-\phi$ 지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직터널 토압 : II. 실내 모형실험

김도훈¹, 차민혁², 이대수³, 김경렬⁴, 이인모^{5*}

Earth pressures acting on vertical circular shafts considering arching effects in $c-\phi$ soils : II. Lab. Model Tests

Do-Hoon Kim, Min-Hyuck Cha, Dea-Su Lee, Kyung-Ryeol Kim, In-Mo Lee

Abstract The earth pressure acting on the vertical shaft is less than that acting on the retaining wall due to three dimensional arching effect. Thus, it might be essential to estimate the earth pressure actually acting on the shaft when designing the vertical shaft. In this paper, large-sized model tests were conducted as Part II of companion papers to verify the newly suggested earth pressure equation proposed by Kim et al. (2009: Part I of companion papers) that can be used when designing the vertical shaft in cohesionless soils as well as in $c-\phi$ soils and multi-layered soils. The newly developed model test apparatus was designed to be able to simulate staged shaft excavation. Model tests were performed by varying the radius of vertical shaft in dry soil. Moreover, tests on $c-\phi$ soils and on multi-layered soils were also performed; in order to induce apparent cohesion to the cohesionless soil, we add some water to the dry soil to make the soil partially-saturated before depositing by raining method. Experimental results showed a load transfer from excavated ground to non-excavated zone below dredging level due to arching effect when simulating staged excavation. It was also found that measured earth pressure was far smaller than estimated if excavation is done at once; the final earth pressure measured after performing staged excavation was larger and matched with that estimated from the newly proposed equation. Measured results in $c-\phi$ soils and in multi-layered soils showed reduction in earth pressures due to apparent cohesion effect and showed good matches with analytical results.

Keywords: Vertical shaft, large-sized model test, staged shaft excavation, earth pressure, arching effect, $c-\phi$ soil, multi-layered soils

요 지 원형수직터널에 작용하는 토압은 아칭효과로 인해 2차원 일반 흙막이벽에 작용하는 토압보다 작으므로 원형수직터널 설계 시 벽체에 작용하는 실질적인 토압의 예측이 필요하다. 본 논문은 두 개의 연속된 논문(Companion papers)의 두 번째로서 원형수직터널 설계 시 건조한 사질토뿐만 아니라 $c-\phi$ 지반과 다층지반에서 적용 가능하도록 새롭게 제안된 토압식(김도훈 등, 2009)을 증명하기 위해 대형 모형실험을 수행하였다. 고안된 모형실험 장비는 단계별 굴착이 가능하도록 제작되었고 벽체의 반경을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 또한 강사 방법으로 지반을 조성하기 전 건조한 시료에 물을 첨가하고 불포화사질토를 형성시켜 겔보기 점착력을 발현시킴으로써 $c-\phi$ 지반과 다층지반에서 실험을 진행하였다. 실험 결과로서, 단계별 굴착을 모사하였을 때, 아칭효과에 의해 굴착된 지반에서 굴착되지 않은 지반으로 하중이 전이가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 동시에 굴착했을 때의 토압은 예측한 값에 비해 상당히 작게 나타났지만, 단계별로 굴착했을 때의 최종 토압은 동시 굴착 시의 토압에 비해 크게 나타나며 새롭게 제안된 토압식과 잘 일치하였고, $c-\phi$ 지반과 다층지반에서 수행한 실험의 결과도 겔보기 점착력의 효과로 인해 토압의 감소를 보이며 이론적인 값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

주요어: 수직터널, 대형 모형실험, 단계별 굴착, 토압, 아칭현상, $c-\phi$ 지반, 다층지반

1. 서 론

국토개발에서 지하 공간 개발의 비율이 증가함에 따

라 기계화시공기법 적용 증가 및 터널의 장대화로 인한 환기 설비의 설치로 수직터널의 적용 빈도가 증가하고 있는 추세이다. 대부분의 수직터널은 다른 형태의 단면에 비해 상대적으로 공간의 효율에서는 떨어지지만, 수직터널에 작용되는 토압이 유리한 원형으로 계획 및 시공되고 있다. 하지만 대부분의 원형수직터널에서는 보수적인 설계와 적용 경험의 부족으로 인하여 3차원적인

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

²비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정

³비회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

⁴정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

* 교신저자: 이인모 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

효과인 아칭현상을 고려하지 않은 일반적인 2차원적인 토압을 설계 및 시공에 사용하여 과도한 토압을 이용하여 적용하고 있으므로 아칭현상을 적절히 반영한 정확한 토압을 산정할 필요가 있다. 국내에서는 천병식 등(2003), 이인모 등(2007)이 사질토에서의 원형수직터널에 작용하는 토압식을 산정하였고, 그 적정성을 판단하기 위해 모형실험이 수행되어 왔다. 그러나 모형실험 시 반경방향의 변위를 제대로 모사하거나 벽체형상비의 영향을 고려하지 못하였고, 건조한 사질토에서만 실험이 이루어져 왔다. 또한 전체를 동시에 굴착하여 실험을 수행함으로써 단계적으로 이루어지는 실제의 현장을 모사하지 못하였다.

그리하여 연속된 두 논문(Companion Paper)의 전반부에 해당하는 첫 번째 논문에서(김도훈, 2009) 기존의 토압식을 수정 제한하여 $c-\phi$ 지반과 다층지반에서 적용 가능한 토압계수 산정식을 구하였으며 본 논문에서는 실험적인 연구를 통하여 제안된 토압식의 적용성을 검토하고자 하였다.

본 연구에서는 기존의 연구 결과보다 합리적인 토압을 측정하기 위해 대형 모형실험 장치를 고안하였다. 모형벽체의 형상비를 고려할 수 있도록 하였고, 원형수직터널의 시공 굴착단계에 의한 영향을 살펴볼 수 있도록 실험을 수행하여 굴착 시 정지토압에서 주동토압으로의 변화와 벽체의 단계별 굴착으로 인한 하중의 전이, 아칭현상 등을 고찰해보았다. 또한 불포화 사질토 지반에서도 실험을 수행함으로써 $c-\phi$ 지반과 다층지반을 모사하였고, 이와 같이 실험적인 연구를 수행하여 얻은 결과를 첫 번째 논문에서 새롭게 제안한 토압식과 비교, 분석하였다.

2. 원형수직터널 토압식

첫 번째 논문인 김도훈 등(2009)은 원형수직터널에 작용하는 3차원적인 토압을 산정하기 위해 토압을 작용하는 배면에 형상을 가정하였으며, 작용되는 수직방향 응력에 접선방향 토압계수 및 수정 제한한 반경방향 토압계수를 적용하여 토압 산정 해석 모델을 산정하였다.

마찰력과 점착력이 모두 존재하는 지반에서 토압 해석 모델을 산정하는 과정에서 수평아칭을 고려하기 위해 접선방향 토압계수는 ‘ $1 - \sin \phi$ ’를 적용하였고, 수직

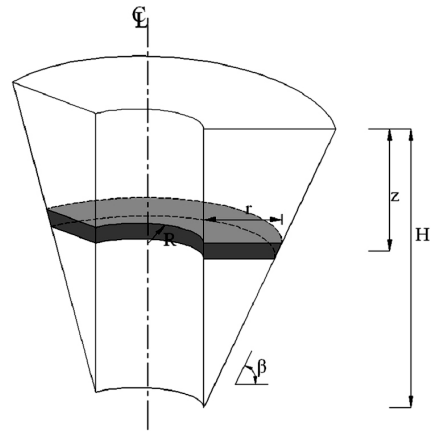


그림 1. 이완영역의 미소토체.

아칭을 고려하기 위해 앞서 제안한 토압계수를 적용하여 토압 해석 모델을 산정하였다. 이완영역의 형상은 경사각(β) ‘ $45^\circ + \phi/2$ ’을 가지는 깔대기형으로 하였으며 극한평형법을 미소토체에 적용하였다(그림 1 참조).

그림 1에서 R 은 원형수직터널 단면의 반지름, r 은 이완영역의 크기, z 는 지표에서 임의의 미소토체까지 깊이, H 는 원형수직터널 높이를 나타낸다. r 은 깊이와 β 의 함수로 식 (1)로 표현된다. 또한 임의의 깊이 z 의 미소토체의 수평 면적은 다음 식 (2)로 표현된다.

$$r = \frac{(H - z)}{\tan \beta} \quad (1)$$

$$A = \pi (2rR + r^2) \quad (2)$$

그림 2는 미소토체의 힘의 평형을 나타내며, 벽면 전단저항력(τ_w)이 발생하여 수직방향으로 가해지는 하중에 저항하게 된다. 그림 2의 벽체면에서 N_w 는 벽체면에 배면토사가 수평방향으로 가하는 응력의 반력이며, 파괴면에서 N_f 는 파괴면에 작용하는 수직저항력이고, τ_f 는 전단저항력이다. 이러한 응력들이 발생하여 힘의 평형을 이룬다.

그림 3에 따라 수평방향 힘의 평형을 고려한 평형방정식은 식 (3)과 같이 나타나게 된다. 수평방향으로는 벽면에서 반력인 N_w 와 접선방향응력인 σ_t , 그리고 파괴면에서 τ_f 와 N_f 가 작용하여 힘의 평형을 이룬다.

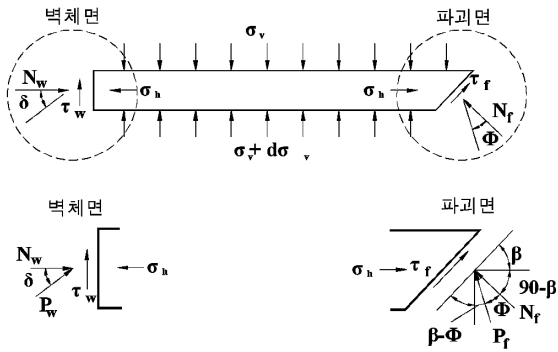


그림 2. 미소토체에서의 힘의 평형.

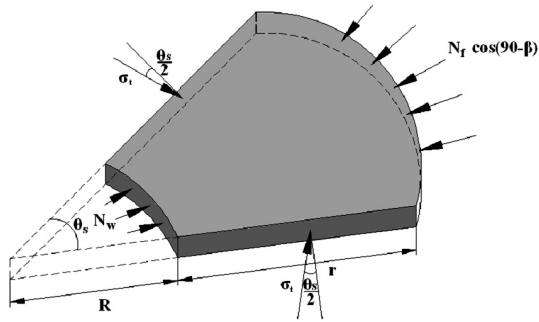


그림 3. 미소토체에서의 수평방향 힘의 평형.

여기서, $k_i = 1/(\tan^2(45 - \phi/2) - 2c/\sigma_1 \times \tan(45 - \phi/2))$ 이다. 또한, 접선방향 토압계수 λ 에 의해 접선방향 응력은 식 (6)으로 표현되고, 파괴면에 작용하는 전단강도(τ_f)는 지반사이에서 발생하는 응력이므로 다른 경우와 동일하며 식 (7)로 표현된다.

$$\sigma_t = \lambda \sigma_v \tag{6}$$

$$\tau_f = c + N_f \tan \phi \tag{7}$$

그림 3에서 미소토체의 각도(θ_s)를 미소등분한 $d\theta_s$ 가 매우 작은 값을 가진다면 $\sin \frac{d\theta_s}{2}$ 는 $\frac{d\theta_s}{2}$ 로 표현할 수 있다. 이러한 경우 식 (3)에 식 (4), (5)를 대입하여 적분한 후 N_f 에 대하여 표현하면 식 (8)과 같이 표현된다.

$$N_f = \frac{(Rk_{wa} + r\lambda)\sigma_v + c \frac{(r+R)}{\tan \beta}}{R+r} \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi} \tag{8}$$

그림 2, 3에서 수직방향 힘의 평형을 고려한 평형방정식은 식 (9)와 같이 나타난다.

$$\sigma_v A + A dz \gamma = (\sigma_v + d\sigma_v) A + 2\pi R \tau_w dz + 2\pi (R+r) \left\{ \tau_f \sin \beta + N_f \sin (90 - \beta) \right\} \frac{dz}{\sin \beta} \tag{9}$$

여기서, A는 지표에서 z 아래에서의 토체의 면적을 나타내며 $A = \pi (2rR + r^2)$ 으로 표현되고, 벽면에서의 τ_w 는 벽면마찰저항과 c-φ 지반의 영향으로 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\tau_w = c_w + k_{wa} \sigma_v \tan \delta \tag{10}$$

식 (9)에 식 (4), (8), (10)을 대입하여 정리하면, 다음 식 (11)과 같은 비제차 일계 편미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + S \sigma_v = T \tag{11}$$

여기서, 그림 2에서 N_w 는 벽체로 작용되는 σ_h 와 동일하며 식 (4)로 표현되고, k_{wa} 는 김도훈 등(2009)에서 제안한 c-φ 지반 토압계수로서 식 (5)로 표현된다.

$$N_w = \sigma_h = k_{wa} \sigma_v \tag{4}$$

$$k_{wa} = \frac{3 (K_i \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}{3 K_i - (K_i - 1) \cos^2 \theta} \tag{5}$$

여기서, $S = \frac{2\pi}{A} \left\{ k_{wa} R \tan \delta + (k_{wa} R + \lambda r) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\}$
 $T = \gamma - \frac{2\pi}{A} \left\{ c_w R + c(R+r) \left(1 + \frac{1}{\tan \beta} \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right) \right\}$ 를 나타낸다.

식 (11)에서 $z = 0$, $\sigma_v = 0$ 인 경계조건으로 구하여진 수직방향 응력은 식 (12)와 같다.

$$\sigma_v = -\frac{T}{S} e^{-Sz} + \frac{T}{S} \quad (12)$$

여기서, $S = \frac{2\pi}{A} \left\{ k_{wa} R \tan \delta + (k_{wa} R + \lambda r) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\}$
 $T = \gamma - \frac{2\pi}{A} \left\{ c_w R + c(R+r) \left(1 + \frac{1}{\tan \beta} \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right) \right\}$

또한, β 는 파괴면 경사를 나타내며 $\beta = 45 + \phi/2(^{\circ})$ 의 식으로 표현되고, k_{wa} 는 반경방향 토압계수로서 전술한 바와 같이 $k_{wa} = 3 (K_i \cos^2 \theta + \sin^2 \theta) / (3 K_i - (K_i - 1) \cos^2 \theta)$ 의 값을, 접선방향 토압계수(λ)는 $\lambda = 1 - \sin \phi$ 의 값을 가진다. 또한, γ 는 지반의 단위중량(kN/m^3)을 나타내고 ϕ 는 지반의 내부마찰각($^{\circ}$), δ 는 벽면마찰각($^{\circ}$), c 는 지반의 점착력(Pa), R 는 원형수직터널 단면 반지름(m), r 는 이완영역의 폭(m), A 는 임의의 깊이에서 이완영역의 수평면적(m^2)을 말한다. 최종적으로

벽체에 작용하는 토압(p_i)은 식 (13)과 같이 나타난다.

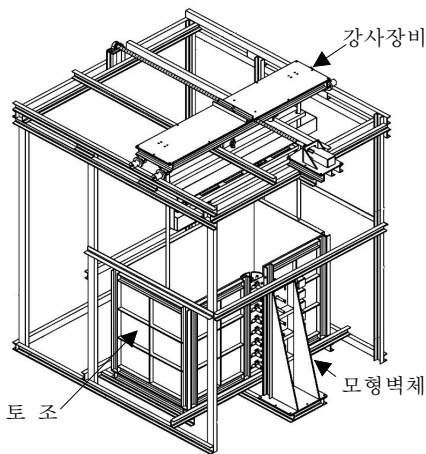
$$p_i = k_{wa} \sigma_v \quad (13)$$

3. 모형실험

3.1 모형실험 장치

본 연구에서는 합리적인 토압을 측정하기 위해 개선된 실험 장치를 고안하였다. 원형수직터널의 시공 굴착 단계에 의한 영향을 살펴볼 수 있도록 복수층의 반원형 벽체가 지지대에 지지된 상태로 복수의 구동장치에 의해 독립적으로 거동을 하면서 토압 분포를 직접적으로 측정할 수 있는 구조로 개발하였다.

그림 4는 토조와 강사장치의 전경을 나타낸 그림이다. 그림 4(a)는 실험을 위해 계획된 전체 장비의 모식도이며, 그림 4(b)는 제작된 토조의 전경, 그림 4(c)는 강사장비를 나타낸 것이다. 토조는 모형벽체의 반경과 가상파괴면까지의 거리를 고려하여 폭 160 cm, 길이 80 cm, 높이 100 cm의 크기로 제작하였다. 이는 폭/벽체직경비(B/D)가 2~2.8이 되도록 설계된 것이며 벽체는 두께 4.5mm의 강판으로, 내부의 전면판은 두께 15mm의 투명한 아크릴 판으로 제작하여 각각에 프레임 보강을 하였다. 전면판의 가운데에는 아크릴로 된 원통형 모형벽체가 설치되었다. 모형벽체는 반원형으로 설치되어 대



(a) 모형 토조 모식도



(b) 모형 토조 전경



(c) 강사 장비

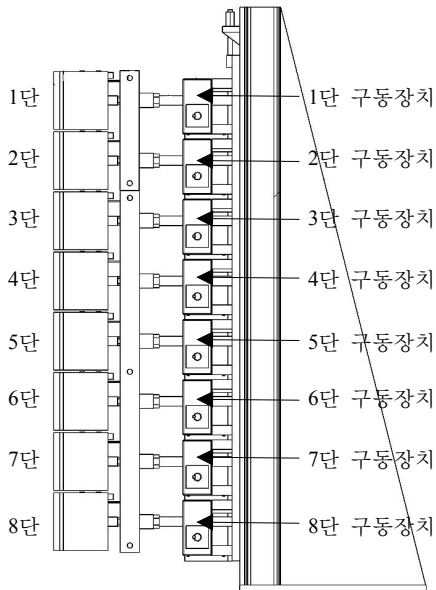
그림 4. 토조와 강사장치.

칭을 이루어 원형수직터널을 모사하였다. 전면부 벽체는 지반조성시 사용되는 시료와의 간섭을 최소화하여 전체 거동이 대칭을 이루어 반원형 원통이 원형수직터널의 거동을 모사하는 것으로 계획하였다.

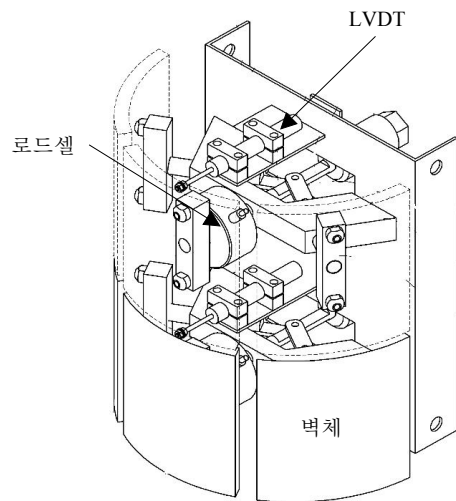
본 실험에서의 모형지반 조성 방법은 모래를 토조에 직접 떨어뜨려 균일한 상대밀도로 지반이 조성하는 강사방법을 적용하였다. 강사장치 바닥의 강판에 일정한 간격의 틈을 설치하고 그 아래에 두 개의 분산체를 설치

하여 80 cm 이상의 수직거리에서 일정한 강사가 이루어 지도록 하였다.

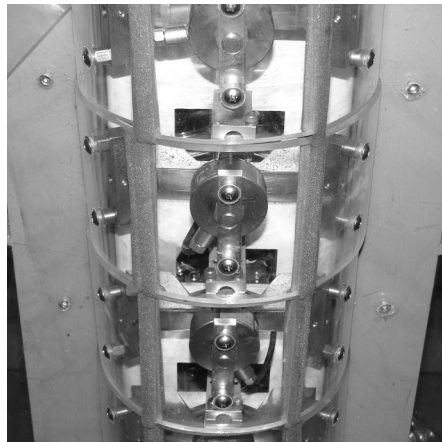
그림 5는 모형벽체를 나타낸 그림이다. 모형벽체는 두께가 1 cm이며 탄성계수가 3,160MPa를 가지는 반원통형 아크릴 벽체와 로드셀, LVDT, 전동모터가 설치된 벽체지지대로 구성되었다. 벽체의 총 높이(H)는 96 cm로, 반경(R)은 12, 14, 16 cm로 제작하여 벽체형상비에 따른 영향을 고려할 수 있도록 하였다.



(a) 모형 벽체 측면도



(b) 모형벽체 입체도



(c) 모형벽체 정면도

그림 5. 모형벽체.

그림 5(a)에 보이듯이 기존의 모형벽체(신영완, 2004; 이민모 등, 2007)와 가장 차별화 된 점은 수직방향으로 8개의 벽체 및 구동장치로 분리하여 각각 따로 변위를 발생시킬 수 있다는 점이다. 각 단계별로 분리된 원형벽체와 구동장치로 인해, 본 연구에서는 전체 동시 굴착(1단~8단 동시 이동)뿐만 아니라 단계별(1단~8단 분리 이동)로 굴착을 함으로써 시공 굴착단계를 모사할 수 있었고, 그에 따라 굴착단계에 따른 토압의 변화와 하중이 전이되는 양상, 즉 아칭효과를 확인할 수 있도록 하였다.

본 실험에서는 제작된 모형실험 장치가 원통형 아크릴 벽체에 작용하는 하중을 정확히 측정하는지를 검증하기 위하여 토조에 물을 채워 정수압을 측정하였고, 검증 결과 이론값과 실험값이 거의 일치하는 것으로 나타났다.

3.2 모형실험 내용

3.2.1 시료

본 연구에서 지반 조성을 위해 사용된 시료는 주문진 여과사이며 시료의 입도분포 및 물리적 특성은 그림 6과 표 1에 나타내었다.

사용된 시료는 입경 1.0mm 이하인 모래의 중량 백분율이 75%이상으로 비교적 가는 모래이며, 통일분류법

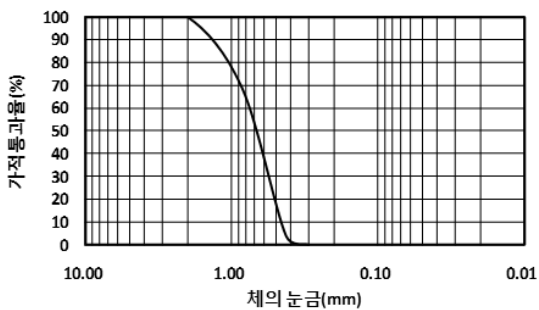


그림 6. 시료의 입도분포곡선.

표 1. 시료의 물리적 특성

구분	값	비고	분류
D_{10} (mm)	0.46	비중, G_s	2.625
D_{15} (mm)	0.49	통일분류법에 의한 분류	SP
D_{30} (mm)	0.56	e_{min}	0.579
D_{60} (mm)	0.75	e_{max}	0.851
균등계수, C_u	1.63	곡률계수, C_c	0.91

에 의한 분류결과 SP로 분류되었다.

본 시료를 사용하여 실험을 수행할 때 고안된 실험 장치로 강사방법을 이용하여 지반을 조성하게 되면 조성된 지반의 단위중량은 $\gamma = 15.2kN/m^3$ 으로 나타났고, 전단 시험을 수행한 결과 내부마찰각은 39.1° 로 산정되었다.

3.2.2 실험 조건 및 방법

본 실험의 목적은 균일하게 조성된 지반에서 원통형 아크릴 벽체의 주동변위 발생에 따른 정지토압에서 주동토압으로의 변화와 아칭효과를 확인하고, 제안된 이론식과의 비교를 통해 그 타당성을 고찰하는 것이다.

다양한 조건에 대한 영향을 파악하기 위한 실험 개요를 표 2와 같이 정리하였다. 벽체형상비(H/R)를 변경시켜가며 실험을 수행하였고, 겉보기 점착력이 발현된 불포화 사질토지반과 다층지반에 대해서도 단계별 굴착 실험을 수행하였다.

실험은 지반 조성 후 전동모터를 이용하여 1.0 mm/min의 속력으로 반경방향의 주동변위를 발생시켰고 연결된 데이터로거를 이용하여 약 1초 간격으로 로드셀과 LVDT의 측정값을 획득하였다.

4. 모형실험 결과

4.1 전체 동시 굴착 시 벽체에 작용하는 토압

4.1.1 벽체 변위에 따른 토압 변화

그림 7에 $R=14$ cm인 벽체($H/R=6.857$)로 실험을 수

표 2. 모형실험 조건

벽체 높이 H(cm)	벽체 반경 R(cm)	벽체 형상비 H/R	실험 종류
96	12	8.000	ϕ 지반, 전체 굴착 실험
			ϕ 지반, 단계별 굴착 실험
			$c-\phi$ 지반, 단계별 굴착 실험
96	14	6.857	ϕ 지반, 전체 굴착 실험
			ϕ 지반, 단계별 굴착 실험
			$c-\phi$ 지반, 단계별 굴착 실험
96	16	6.000	ϕ 지반, 전체 굴착 실험
			ϕ 지반, 단계별 굴착 실험
			$c-\phi$ 지반, 단계별 굴착 실험
			다층지반, 단계별 굴착 실험

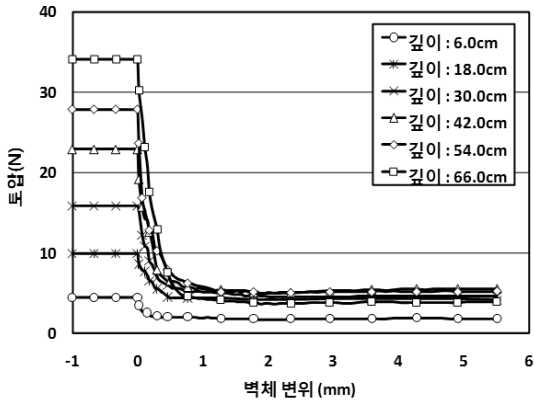


그림 7. 벽체 변위에 따른 토압 변화(H/R=6.857)

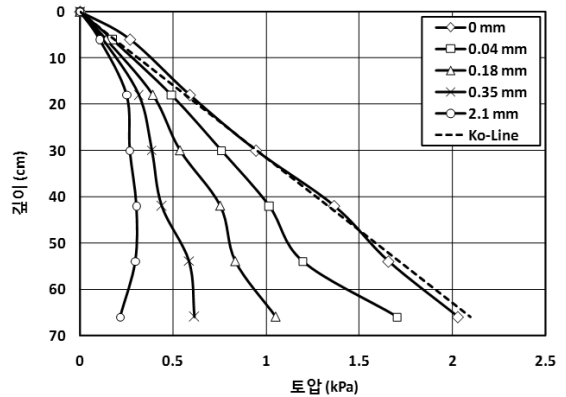


그림 8. 벽체 변위에 따른 토압 분포 변화(H/R=6.857)

행하여 지반을 조성한 이후에 벽체의 주동변위에 따라 깊이별로 설치된 로드셀을 이용하여 측정된 토압의 변화를 나타내었다. 실험 결과, 지반이 조성된 이후로 변위가 발생하기 전 시점까지는 정지토압의 상태를 유지하다가 변위가 발생하면서 토압이 감소하기 시작하였으며 반경방향의 주동변위가 약 2.05 mm 부근에서 최소의 주동토압을 나타내었다. 벽체 반경의 약 1.5% 변위에서 최소의 토압이 발생한 것으로, 앞선 연구들의 실내실험 결과와 비교하여보면, 벽체 반경의 1~6% 변위에서 최소의 주동토압이 나타났던 기존의 결과(신영완, 2004; 이민모 등, 2007)에 비해 비교적 작은 범위에서 최소주동토압 값을 보였음을 알 수 있다. 이것은 지금까지의 실험에서 제대로 고려하지 못하였던 파괴면을 포함하는 충분히 큰 토조의 크기와 실질적인 반경방향의 변위모사에서 비롯된 것으로 판단된다. 또한 이러한 실험 결과는 모형벽체의 이동속도와도 차이가 있는 것으로 보인다.

그림 8에는 지반 조성 이후 벽체의 주동변위에 따른 토압 분포의 결과와 변화를 나타내었다. 조성된 지반의 상태에서는 선형적인 분포를 보이며 K_0 -Line에 거의 근접한 결과를 보였고($K_0=0.20$), 주동변위가 발생함에 따라 각 지점에서 토압이 감소하여 2.10 mm 변위가 발생하였을 때 최소의 토압 분포를 보였다. 토압 분포의 변화양상을 보면, 변위가 발생하면서 상부에서의 토압 감소폭보다 하부로 내려갈수록 토압이 감소되는 폭이 상대적으로 점점 커지는 것을 알 수 있었고, 최소의 주동토압이 작용하는 2.10 mm 변위에서는 상부와 하부의 토압이 가장 작고 가운데 부분에 최대의 토압이 작용하

는 형태의 분포를 보였다.

이와 같은 토압의 분포 형태는 파괴의 형상이 갈매기형이라는 가정 하에서 벽체의 하부로 갈수록 활동 토체의 단위 깊이당 체적이 감소하고 파괴단면에서의 전단 저항력이 토체의 하방향 활동력에 저항하여 토체의 자중을 안정된 지반으로 전이시켜 하부에서의 토압감소를 이 증가하기 때문으로 판단된다(신영완, 2004).

4.1.2 이론식과 모형실험 결과의 비교 및 분석

벽체의 반경을 변화시켜가며 시험을 수행하여 측정된 최종 토압 결과를 표 3에 정리하였고, 제안된 이론식과 비교하여 그림 9에 토압 분포를 나타내었다.

표 3과 그림 9의 결과를 살펴보면, 이론값과 유사한 형태로 상부와 하부의 토압이 작고, 벽체의 가운데 부분에 작용하는 토압이 가장 크게 나타났다. 또한 벽체형상비가 작을수록, 즉 벽체반경이 클수록 벽체에 작용하는 토압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 벽체형상비가 작아짐에 따라 이완되는 토층의 영역이 확장되며, 이와 반대로 벽체형상비가 커지면 이완영역이 작아지게 되어 상대적으로 아칭현상의 차이가 생기기 때문이다. 즉, 파괴면에서 작용하는 저항력이 파괴면의 증가에 따라 크게 발생하게 되어도, 이와 동시에 이완영역의 증가로 인한 수직방향 응력이 더 크게 증가하기 때문에 토압이 벽체형상비가 작아짐에 따라 커지는 현상이 발생되는 것으로 판단된다.

또한, 이론적인 토압에 비해 실험 수행 시 실제로 측정된 토압이 작게 산정되었는데, 이는 각 지점에서 벽면의

표 3. 최종 토압 결과(전체 동시 굴착)

(단위 : kPa)

깊이(cm)	R=12 cm	R=14 cm	R=16 cm
	H/R=8.000	H/R=6.857	H/R=6.000
0	0	0	0
6.0	0.065	0.105	0.151
18.0	0.142	0.251	0.280
30.0	0.184	0.268	0.301
42.0	0.229	0.303	0.379
54.0	0.248	0.298	0.392
66.0	0.171	0.216	0.306
78.0	0.076	0.099	0.213
90.0	0.036	0.023	0.099

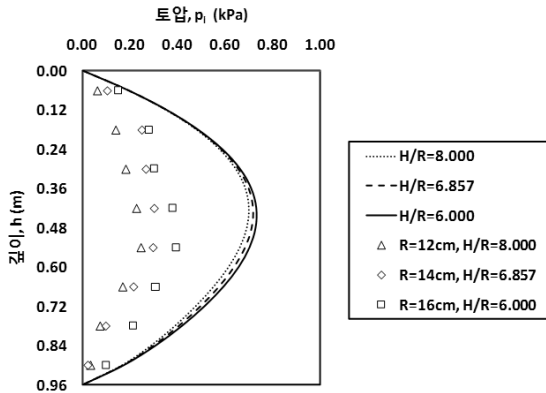


그림 9. 토압 분포(전체 동시 굴착)

이동에 의해 감소되는 토압만을 측정하게 되고, 이후에 지반이 이완되면서 하중이 전달되고 토압이 회복되는 과정을 모사하지 못하였기 때문으로 판단된다.

4.2 단계별 굴착 시 벽체에 작용하는 토압

4.2.1 단계별 굴착에 따른 토압의 변화

원형수직터널 실내 모형실험에서 전체 심도의 동시 굴착을 모사하였을 경우 하중전이 효과 등을 고려하지 못하여 실제의 토압보다 토압이 작은 것으로 판단되었고, 따라서 본 연구에서는 단계별로 굴착을 모사하여 실험을 수행하였다. 단계별로의 굴착은 실제 현장에서 원형수직터널의 시공 시와 동일하게 모사하기 위해 계획되었다.

그림 10에 R=12 cm 인 벽체(H/R=8.000)로 실험을 수행하여 지반을 조성한 이후 K₀ 상태의 초기값과 벽체를 단계별로 굴착하면서 깊이별로 설치된 로드셀을 이용하여 측정한 토압의 변화를 나타내었다. 최상부의 단으로부터 최하부의 단까지 차례대로 1단~8단으로 명명하였을 때, 2단, 4단, 6단, 8단 굴착 시의 토압 변화를 차례대로 나타내었으며 모든 그림에는 실제로 측정한 토압값 뿐만 아니라 제안식으로부터 얻은 각 단 굴착 시의 이론적인 토압도 함께 표시하였다. 또한 각 벽체의 굴착 시 아칭효과로 인해 상부의 지반에 하중이 전이되는 현상을 확인하기 위해 굴착하는 깊이의 토압뿐만 아니라 해당 깊이 상부의 모든 토압의 변화를 함께 나타내었다.

그림 10의 결과를 살펴보면, 각 단 굴착 시에는 전체 동시 굴착 시와 동일하게 벽체에 작용하는 토압이 정지 토압에서 주동토압으로 줄어들고, 그 후 하부의 단이 차례대로 굴착됨과 동시에 감소되었던 토압이 다시 증가하면서 회복되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 추가적인 굴착으로 인한 이완영역의 증가와 하부의 변위가 발생하면서 하부에서 보유하고 있던 하중을 상부의 움직임이 없는 쪽으로 전이시키는 아칭현상에 의한 것으로 판단된다. 즉 전체 굴착 시 이론식에 비해 토압이 작게 산정된 것과 반해, 단계별 굴착 시에는 전이, 회복되는 토압이 고려되어 작용하는 토압이 증가하였고, 이론식과 유사한 결과를 보였다.

또한 이와 동일한 원리로 지반 조성 시에는 깊이에 따라 K₀ 상태의 선형적인 토압 분포를 가지게 되지만, 상부로부터 차례대로 단계별 굴착이 이루어지면서 하부로

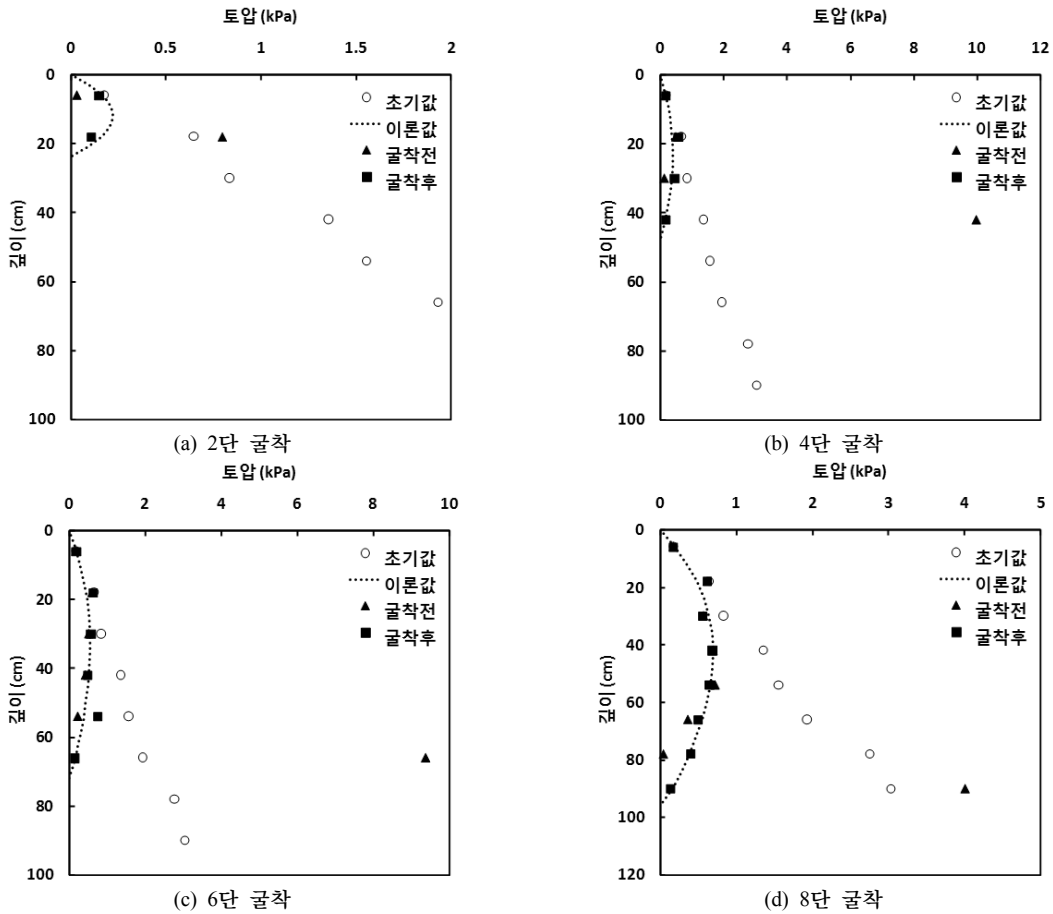


그림 10. 단계별 굴착 시 깊이별 토압 변화(H/R=8.000)

하중의 전이가 발생하여 각 단의 굴착 직전에는 K_0 상태의 토압에 비해 훨씬 큰 토압을 받고 있음을 알 수 있다.

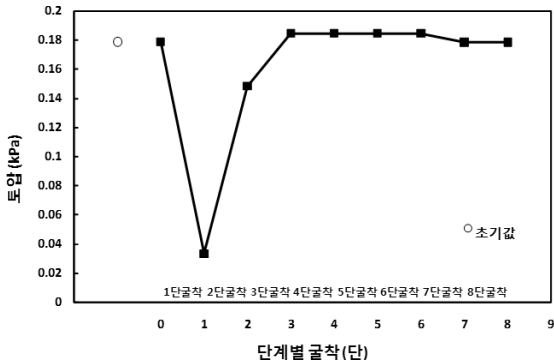
비록 단계별 굴착에서는 하중의 전이가 발생하여 전체 동시 굴착 시와 비교하여 토압 크기의 차이를 보이지만, 전체 동시 굴착 시와 마찬가지로 상부와 하부의 토압이 작고, 가운데 부분에 작용하는 토압이 가장 큰 형태임을 확인할 수 있다. 이는 원형수직터널의 경우 전체 굴착 및 단계별 굴착 모두 아칭현상에 의해 2차원적인 토압이 아닌 3차원적인 토압이 발현됨을 보여주는 결과이다.

이러한 하중 전이 효과는 측정 깊이 바로 아래의 단이 굴착될 때 많이 이루어지고, 측정 깊이로부터 세 번째 아래의 단이 굴착되는 시점부터는 그 영향이 미미하게 나타났다.

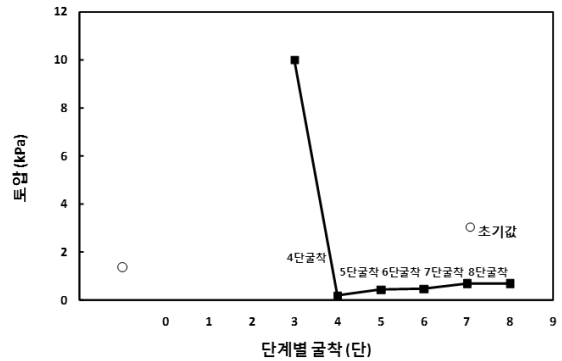
단계별 굴착이 진행되는 동안에 6.0 cm(1단 깊이)와

42.0 cm(4단 깊이) 지점에서의 토압 변화를 그림 11에 나타내었다.

그림 11과 같이 일정 깊이에서 단계별 굴착에 따라 토압이 변화되는 양상을 살펴보면 해당 깊이의 단이 굴착될 때 정지토압에서 주동토압으로 토압이 감소하였다가 굴착이 계속 이루어지는 과정에서 토압이 다시 증가하게 되는데, 1단, 2단과 같은 상부의 단의 경우에는 초기에 가지고 있던 토압을 그 하부의 단이 굴착되면서 상당량 회복을 하여 초기의 토압에 근접한 토압을 받게 되지만, 하부의 단의 경우에는 굴착 전의 토압에 비해 적은 양이 회복되는 것을 알 수 있다. 이는 하중이 전이되어 되돌아오는 과정에서 하부의 단의 경우에는 그 상부에 지반이 존재함으로써 지반에 작용되는 중력이 저항력으로 작용하였고, 굴착되는 단 상, 하부 지반의 강성



(a) 6.0 cm에서의 토압 변화



(b) 42.0 cm에서의 토압 변화

그림 11. 단계별 굴착에 따른 일정 깊이에서의 토압 변화(H/R=8.000)

표 4. 최종 토압 결과(단계별 굴착)

(단위 : kPa)

깊이(cm)	R=12 cm	R=14 cm	R=16 cm
	H/R=8.000	H/R=6.857	H/R=6.000
0	0	0	0
6.0	0.178	0.201	0.165
18.0	0.623	0.595	0.417
30.0	0.569	0.653	0.586
42.0	0.690	0.677	0.604
54.0	0.653	0.595	0.596
66.0	0.508	0.583	0.529
78.0	0.405	0.475	0.500
90.0	0.139	0.146	0.083

차이로 인해 이완된 상태인 상부지반에 비해 이완되지 않은 하부지반 쪽으로 하중의 전이가 더 많이 이루어지기 때문인 것으로 판단된다.

4.2.2 이론식과 모형실험 결과의 비교 및 분석

벽체의 반경을 변화시켜가며 시험을 수행하여 측정된 최종 토압 결과를 표 4에 정리하였고, 제안된 이론식과 비교하여 그림 12에 토압 분포를 나타내었다.

벽체의 전체 동시 굴착 시와 마찬가지로, 상부와 하부의 토압이 작고, 벽체의 가운데 부분에 작용하는 토압이 가장 큰 형태로 나타났다. 하지만 벽체의 단계별 굴착 시에는 전체 동시 굴착 시보다 최종 토압이 크게 측정되어, 중간 심도의 최대 토압의 경우 1.5~3.0 배의 값을 보이며, 이론적으로 제시한 토압과 거의 일치하였다. 이것은 전체 동시 굴착 시에 고려되지 못하였던 하중의

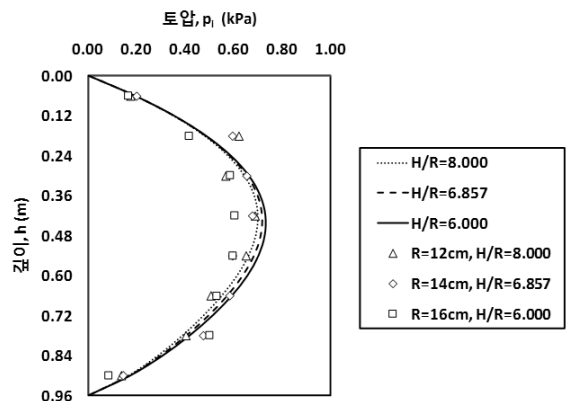


그림 12. 토압 분포(단계별 굴착)

전이 현상이 단계별 굴착 시에는 고려되어 감소되었던 토압이 다시 회복되었기 때문인 것으로 판단된다.

또한 단계별 굴착 시에는 벽체형상비의 영향이 전체 동시 굴착 시와는 달리 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 벽체의 반경이 12~16 cm로 큰 차이가 없고, 지반조성 시 K_0 값이 0.17~0.22 사이의 값을 보이며 하층의 전이에 차이가 존재할 수 있었기 때문으로 판단된다. 하지만 벽체 반경의 차이를 본 연구의 실험에서보다 크게 한 경우에는 이론식과 같이 단계별 굴착 시에도 벽체형상비에 따른 토압의 변화가 있을 것이라 판단된다.

4.3 불포화 사질토 지반에서의 단계별 굴착 시 벽체에 작용하는 토압

4.3.1 단계별 굴착에 따른 토압의 변화

기존의 연구에서 제안되었던 토압식은 점착력이 없는

건조한 사질토 지반에 적용 가능하였고, 모형실험도 건조한 상태에서 수행되어왔다. 본 논문은 두 개의 연속된 논문(Companion paper)로서 첫 번째 논문에서 기존의 토압식을 수정하여 $c-\phi$ 지반에 적용 가능한 토압 모델을 제시하였고, 본 연구에서는 불포화 사질토 지반에서도 실험을 수행하여 $c-\phi$ 지반에서의 토압 결과를 수정 제안된 토압 모델과 비교, 분석하였다. 불포화 지반에서의 c 값에 대한 발현은 정지희(2009)에 의해 밝혀진바 있다.

본 실험에서는 강사가 가능할 정도로 최소한의 점착력을 발현시키기 위해 함수비를 0.5%로 하여 실험을 수행하였다. 건조사에 함수비를 첨가한 경우, 겉보기 점착력으로 인해 점착력이 발현된 것으로 판단되며, 이를 기반으로 하여 $c-\phi$ 지반에서의 실험을 수행하였다.

그림 13에 R=12 cm인 벽체(H/R=8.000)로 실험을 수

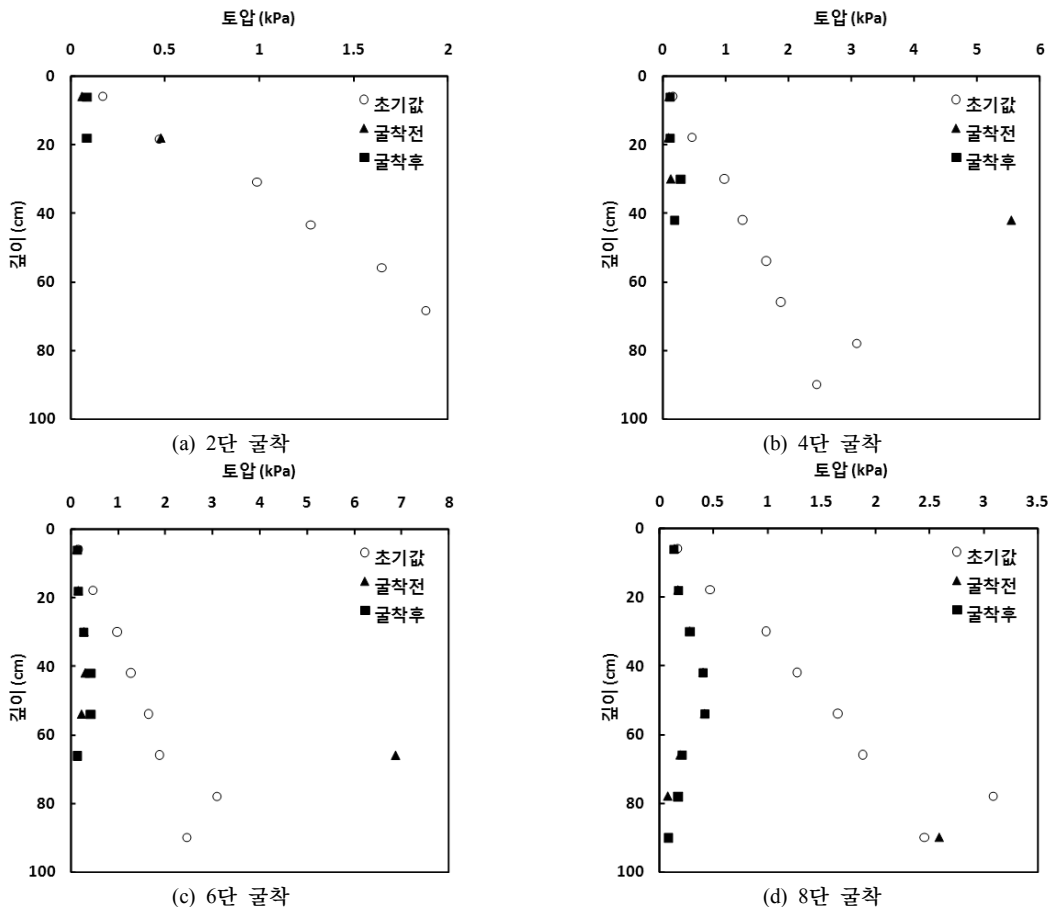


그림 13. 단계별 굴착 시 깊이별 토압 변화(함수비 0.5%, H/R=8.000)

www.kci.go.kr

행하여 지반을 조성한 이후 K_0 상태의 초기값과 벽체를 단계별로 굴착하면서 깊이별로 설치된 로드셀을 이용하여 측정된 토압의 변화를 나타내었다. 4.2에서와 마찬가지로 2단, 4단, 6단, 8단 굴착 시의 토압 변화를 차례대로 나타내었으며 각 벽체의 굴착 시 아칭효과로 인해 상부의 지반에 하중이 전이되는 현상을 확인하기 위해 굴착하는 깊이의 토압뿐만 아니라 해당 깊이 상부의 모든 토압의 변화를 함께 나타내었다.

그림 13의 결과를 살펴보면, 각 단 굴착 시에는 전체 동시 굴착 시와 동일하게 벽체에 작용하는 토압이 정지 토압에서 주동토압으로 줄어들고, 그 후 하부의 단이 차례대로 굴착됨과 동시에 감소되었던 토압이 아칭현상에 의해 다시 증가하면서 회복이 되지만, 함수비로 인해 점착력이 발현된 $c-\phi$ 지반에서는 증가되는 크기가 건조한 지반에 비해 작게 나타났고, 영향 범위도 작다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 점착력으로 인해 파괴면에서의 전단강도가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

또한 동일한 맥락에서, 상부로부터 차례대로 단계별 굴착이 이루어지면서 하부로 하중의 전이가 발생하여 각 단의 굴착 직전에는 K_0 상태의 토압에 비해 큰 토압을 받고 있으나 건조한 지반에서 수행한 실험 결과와 비교하면 증가된 크기가 크지 않음을 알 수 있다.

굴착을 모두 완료한 시점에서는 다른 조건으로 실험을 수행했을 때와 마찬가지로 상부와 하부의 토압이 작고, 가운데 부분에 작용하는 토압이 가장 큰 형태였으나, 점착력의 영향으로 하중의 전이가 적게 일어남으로써 건조한 지반에서 수행한 단계별 굴착 실험 결과에 비해 토압이 작게 나타났다.

단계별 굴착이 진행되는 동안에 6.0 cm(1단 깊이) 지점에서의 토압 변화를 그림 14에 나타내었다. 건조한 지반에서의 유사한 양상을 보이며 단계별 굴착이 진행되는 동안 상부의 단의 경우에는 하부의 단에 비해 초기에 가지고 있던 토압을 상당량 회복하지만, 전술한 대로 점착력의 영향으로 인해 하중이 전이되는 양이 건조한 지반에서의 단계별 굴착 결과에 비해 전반적으로 적고, 최종 토압은 작게 나타났다.

4.3.2 겉보기 점착력 분석 및 이론식과의 비교

벽체의 반경을 변화시켜가며 실험을 수행하였고, 이를 바탕으로 함수비로 인해 발현된 겉보기 점착력의 크기

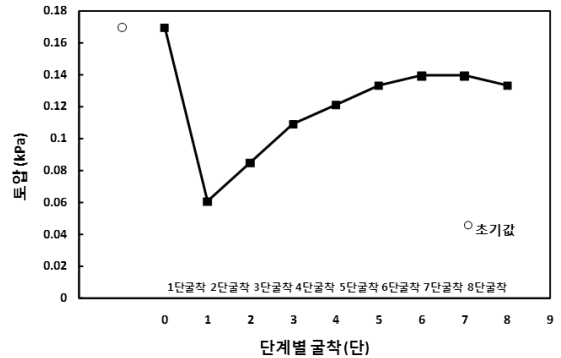


그림 14. 단계별 굴착에 따른 6.0 cm에서의 토압 변화(함수비 0.5%, $H/R=8.000$)

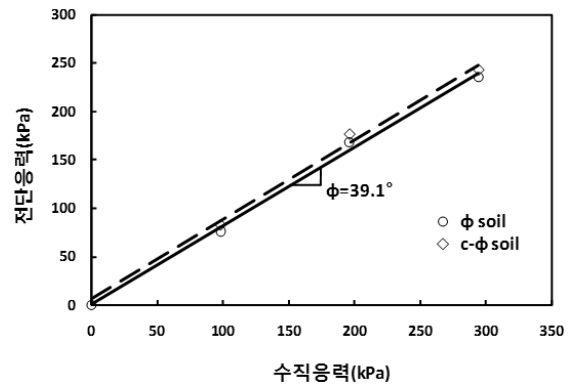


그림 15. 불포화 사질토의 전단실험 결과.

를 알아보았다. 직접전단실험을 실시한 결과는 그림 15와 같고, 건조한 사질토로 실험한 결과에 비교하였을 때 약간의 점착력이 발현된 것으로 판단되었다.

정확한 점착력을 산정하기 위하여 실제로 측정된 값들과 이론적으로 제안된 모델을 통해 역해석을 실시하였고 그 결과, 0.40 kPa의 점착력이 발현되었다고 판단하였다. 측정된 최종 토압 결과를 표 5에 정리하였고, 제안된 이론식과 비교하여 그림 16에 토압 분포를 나타내었다.

결과를 살펴보면, 제시된 $c=0.40\text{ kPa}$ 인 $c-\phi$ 지반에서의 이론식과 전체적으로 유사한 경향을 보였다.

그림 17의 결과와 같이 건조한 지반에서의 단계별 굴착으로 수행한 실험 결과에 비해 불포화 사질토 지반에서의 최종 토압은 작게 측정되었다. 이는 점착력의 영향으로 지반의 전단강도가 증가하여 이완영역이 작아지고,

표 5. 최종 토압 결과(함수비 0.5%)

(단위 : kPa)

깊이(cm)	R=12 cm	R=14 cm	R=16 cm
	H/R=8.000	H/R=6.857	H/R=6.000
0	0	0	0
6.0	0.133	0.134	0.145
18.0	0.172	0.175	0.192
30.0	0.281	0.294	0.316
42.0	0.394	0.368	0.371
54.0	0.398	0.389	0.399
66.0	0.206	0.208	0.254
78.0	0.159	0.167	0.171
90.0	0.079	0.093	0.099

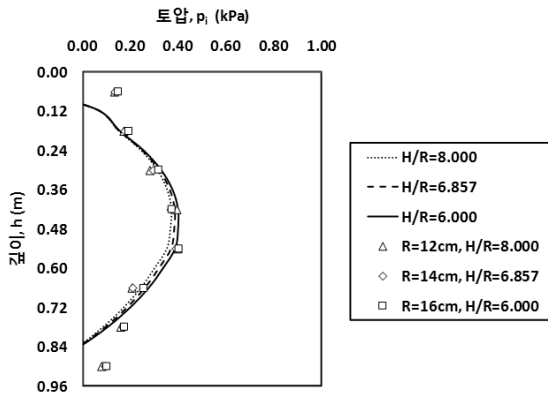


그림 16. 토압 분포(함수비 0.5%)

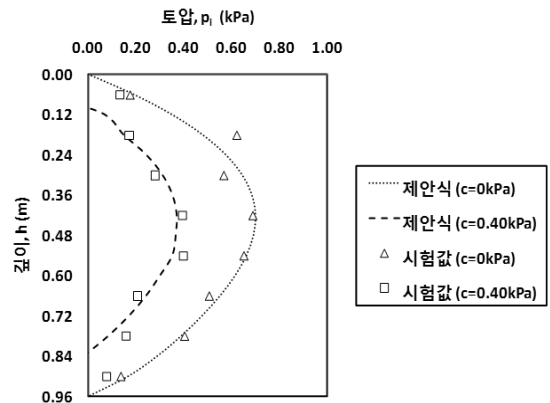


그림 17. 점착력에 의한 토압 비교.

하중이 전이되는 양이 전반적으로 적기 때문에 토압의 회복이 적게 나타났기 때문에 판단된다. 또한, 이러한 결과는 $0.40 kPa$ 과 같은 작은 점착력만 발휘되어도 35~45%정도의 토압이 감소한다는 것을 보여준다.

4.4 다층지반에서의 단계별 굴착 시 벽체에 작용하는 토압

4.4.1 단계별 굴착에 따른 토압의 변화

본 연구에서는 불포화 사질토 지반뿐만 아니라 다층 지반에서도 실험을 수행하여 다층지반에서의 토압 결과를 수정 제안된 토압 모델과 비교, 분석하였다.

다층지반을 모사하기 위해 건조된 사질토와 0.5%의 함수비를 가진 사질토로 지반을 조성하여 실험을 수행하

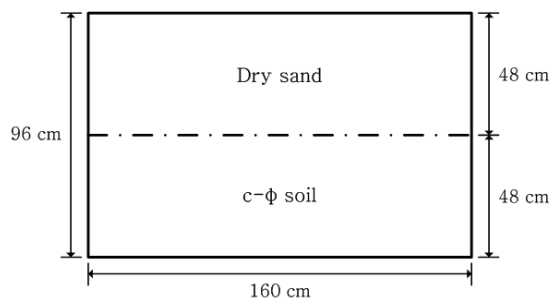
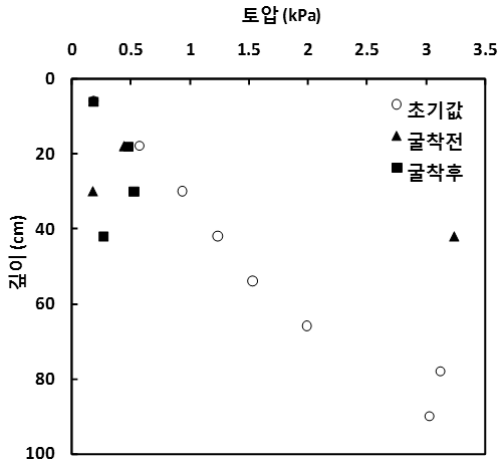
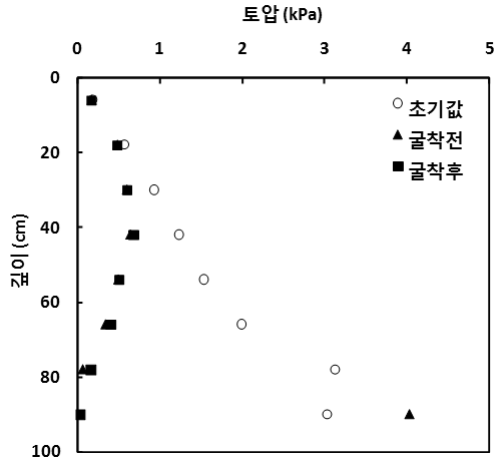


그림 18. 다층지반 모사.

였다. 그림 18과 같이 벽체의 5단에서 8단 깊이에 해당하는 하부지반은 겉보기 점착력이 발휘되도록 함수비가 0.5%인 사질토로 조성하였고, 벽체의 1단에서 4단 깊이에 해당하는 상부지반은 건조된 사질토로 조성하였다.



(a) 4단 굴착



(b) 8단 굴착

그림 19. 단계별 굴착 시 깊이별 토압 변화(다층지반)

그림 19에 R=16 cm인 벽체(H/R=6.000)로 실험을 수행하여 지반을 조성한 이후 K₀ 상태의 초기값과 벽체의 단계별 굴착을 진행하였을 때, 4단과 8단 굴착 시의 토압 변화를 나타내었다.

다층지반에서의 단계별 굴착 시 토압 변화를 살펴보면, 각 단 굴착 시에는 전체 동시 굴착 시와 동일하게 벽체에 작용하는 토압이 정지토압에서 주동토압으로 줄어들고, 그 후 하부의 단이 차례대로 굴착됨과 동시에 감소되었던 토압이 아칭현상에 의해 다시 증가하면서 회복이 되는 형태로 나타났다. 하지만, 건조한 사질토로 조성된 1~4단 깊이의 상부지반에서 굴착이 일어날 때의 토압의 변화는 건조한 지반에서의 단계별 굴착 시의

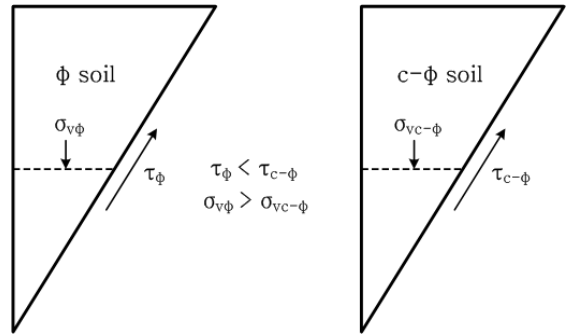


그림 20. 지반에 작용하는 저항력(τ)과 수직응력(σ_v).

결과와 거의 일치하게 나타난 반면에, 함수비가 0.5%인 불포화 사질토로 조성된 5~8단 깊이의 하부지반에서 굴착이 일어날 때의 토압 변화는 함수비로 인해 발현된 점착력의 영향으로 c- ϕ 지반에서의 특성을 보이며 토압이 회복되어 증가하는 크기가 건조한 지반에서의 크기에 비해 작게 나타났다. 이는 앞의 4.3에서 언급하였듯이, 점착력의 영향으로 지반의 전단강도가 증가하고 이완영역이 작아져 하중이 전이가 적게 일어났기 때문으로 판단된다.

굴착을 모두 완료한 시점에서는 다른 조건으로 실험을 수행했을 때와 마찬가지로 상부와 하부의 토압이 작고, 가운데 부분에 작용하는 토압이 가장 큰 형태로 나타났다. 1~4단 깊이의 상부지반에서의 경우, 건조한 지반에서 수행한 단계별 굴착 실험의 최종 토압 결과와 거의 유사한 값을 보였으나 5~8단 깊이의 하부지반의 경우는 4.3의 불포화 사질토 지반에서의 단계별 굴착 실험의 결과에 비해 크게 나타났다. 이는 그림 20과 같이 균일한 함수비를 가진 c- ϕ 지반일 때와 비교하였을 때 파괴형상은 같게 나타나지만, 상부지반이 ϕ 지반인 다층지반에서는 파괴면에서의 저항력이 작아지고, 하부지반에 수직응력이 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

4.4.2 다층지반에서의 토압 분포

다층지반에서의 벽체의 단계별 굴착 시의 토압 분포를 알아보기 위해 그림 21에 앞에서 제시하였던 식 (14)의 제안식을 바탕으로 다층지반에서의 이론적인 토압의 분포와 실제로 측정된 최종 토압 값을 함께 나타내었다.

실제로 측정된 토압 분포 결과를 살펴보면 상부지반에 작용하는 토압이 상대적으로 하부지반에 작용하는

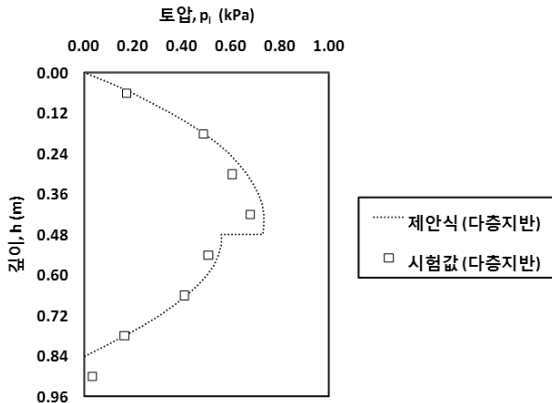


그림 21. 토압 분포(다층지반)

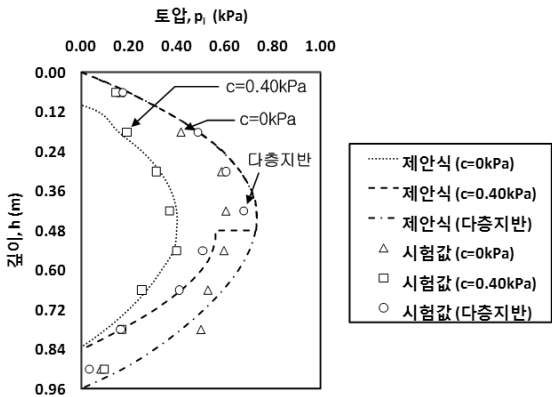


그림 22. 최종 토압 분포.

토압에 비해 크게 산정되었고, 제시된 다층지반에서의 이론식과 전체적으로 유사한 경향을 보였다.

지금까지의 모형실험 결과로 그림 22에 건조한 지반, c-φ 지반, 다층지반에서의 단계별 굴착 시의 최종 토압 분포를 이론식과 함께 나타내었다. 앞에서 언급하였듯이 1~4단 깊이의 상부지반에 작용하는 토압의 경우, 건조한 지반에서 수행한 단계별 굴착 실험의 최종 토압 결과와 거의 유사한 값을 보였으나, 5~8단 깊이의 하부지반의 경우는 함수비가 균일한 불포화 사질토 지반에서의 단계별 굴착 실험의 결과에 비해 큰 토압을 받는 것으로 나타났는데, 이는 함수비로 인해 점착력이 발현된 c-φ 지반과 비교하여 상부지반이 φ 지반으로 이루어진 다층지반에서는 파괴면에서의 저항력이 작아지고, 하부지반에 수직응력이 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 실내에서 수행한 대형 모형실험을 통하여 건조한 지반과 함수비로 인해 점착력이 발현된 불포화 사질토 지반에서의 원형수직터널에 작용하는 토압의 특성을 살펴보고, 이를 이론적으로 제시된 토압 해석 모델과 비교함으로써 그 타당성을 고찰해보았다. 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 벽체의 전체 동시 굴착 시 벽체의 변위가 발생함에 따라 토압은 정지토압에서 주동토압으로 점차 감소하여 최종적으로 상부와 하부의 토압이 작고 벽체의 중간 부분에 최대의 토압이 작용하는 형태로 나타났으며, 이론적인 토압에 비해 실제의 토압이 작게 측정되었다.
2. 벽체의 반경을 변화시켜가며 실험을 수행하였고 벽체형상비의 영향을 살펴본 결과, 벽체형상비가 작을수록, 즉 벽체의 반경이 클수록 벽체에 작용하는 토압이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 이는 벽체형상비가 작아짐에 따라 이완되는 토층의 영역이 확장되기 때문으로 판단된다.
3. 벽체의 단계별 굴착 시에는 아칭현상에 의해 벽체에 작용하는 토압이 줄어들었다가 하부의 단이 굴착되면서 토압이 다시 증가하며 회복되었고, 토압의 전체적인 크기가 전체 동시 굴착 시에 비해 크게 측정되어 이론식과 거의 유사한 값을 나타냈다.
4. 함수비로 인해 점착력이 발현된 c-φ 지반에서의 단계별 굴착 시에는 건조한 지반에서의 결과에 비해 하중이 전이되고 회복되는 양이 적게 나타났고 영향 범위도 작아, 최종 토압이 건조한 지반에서의 단계별 굴착에 의한 토압에 비해 작은 값으로 측정되었다. 또한, 이러한 결과는 0.40 kPa와 같은 작은 점착력의 영향만으로도 토압이 크게 감소한다는 것을 보여준다.
5. 다층지반에서의 단계별 굴착 시 상부지반에서 굴착이 일어날 때의 토압의 변화는 건조한 지반에서의 단계별 굴착 시의 결과와 거의 일치하였고, 하부지반의 경우는 점착력의 영향으로 c-φ 지반에서의 특성을 보이며 굴착이 완료된 후에는 이론식과 전체적으로 유사한 경향을 보였다. 또한, 상부지반에 작용하는 토압의 경우, 건조한 지반에서 수행한 결과와 거의 같은

값을 보였으나 하부 지반의 경우는 $c-\phi$ 지반에서의 단계별 굴착 실험 결과에 비해 큰 토압을 받는 것으로 나타났는데, 이는 $c-\phi$ 지반과 비교하여 상부지반이 ϕ 지반으로 이루어진 다층지반에서는 파괴면에서의 저항력이 작아지고, 하부지반에 수직응력이 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

본 논문은 김도훈 등(2009)에 연속되는 논문으로 이론에 대한 검증을 실내실험을 통해 검증하였다. 이론식에서 가정한 파괴면은 상기의 결과와 같이 원형수직터널의 하중전이 효과를 충분히 고려하여, 이론식이 적절한 토압을 산정하는 것으로 판단된다. 실제 원형수직터널 굴착과 동시에 발생한 변위로 인해 아칭에 의한 토압이 발현되는 경우에 본 연구의 이론식은 적절한 토압을 산정하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 지원으로 이루어진 연구로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김도훈, 이대수, 김경렬, 이용희, 이인모 (2009), “ $c-\phi$ 지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직터널 토압: I. 이론”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제2호, pp. 117-129.
2. 신영완 (2004), “사질토 지반에 설치된 원형수직구의 흠막이벽에 작용하는 토압”, 박사학위 논문, 한양대학교.
3. 이인모, 문홍표, 이대수, 김경렬, 조만섭 (2007), “다층지반에서의 아칭현상에 의한 수직갱 토압”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 49-62.
4. 정지희 (2009), “불포화토의 겔보기점착력이 지하구조물 거동에 미치는 영향”, 석사학위 논문, 고려대학교.
5. 천병식, 신영완 (2003), “사질토 지반의 원형수직구에 설치된 흠막이벽에 작용하는 토압”, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제5호, pp. 175-187.

접수일(2009.12.24), 수정일(2010.1.7), 게재확정일(2010.1.18)