

모형시험과 수치해석을 이용한 저토피 터널의 변형거동에 관한 연구

Deformation Analysis of Shallow Tunnel Using Tunnel Model Test and Computational Analysis

이 재 호¹ Lee, Jae-Ho
김 영 수² Kim, Young-Su
문 홍 득³ Moon, Hong-Duk

Abstract

The control and prediction of surface settlement, gradient and ground displacement are the main factors in shallow tunnel design and construction in urban area. For deformation analysis of shallow tunnel due to excavation it is important to identify possible deformation mechanism of shear bands developing from tunnel shoulder to the ground surface. This paper investigates quantitatively the deformation behavior of shallow tunneling by model tunnel test and strain softening analysis incorporating the reduction of shear stiffness and strength parameters. The comparison of model tunnel test result and numerical simulation using strain softening analysis showed good agreement in crown settlement, normalized subsidence settlement and developing shear bands above tunnel shoulder. In this study, it is known that the strain softening modeling is applicable to the nonlinear deformation analysis of shallow tunnel.

요 지

지표면 침하량, 침하 기울기 그리고 터널주변의 지반 변위에 대한 관리와 예측은 도심지 저토피 터널의 설계와 시공에서 주요한 인자가 된다. 저토피 터널에서의 굴착에 따른 변형 해석은 터널 측벽부에서 지표부까지 발달하는 전단대의 변형특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구는 2차원 실내 터널 모형시험과 전단 탄성계수 및 강도 정수의 저하를 고려한 변형을 연화모델 해석을 통하여 미고결 저토피 터널에서의 굴착으로 인한 변형 거동 특성을 규명해 보았다. 변형을 연화모델을 이용한 수치해석과 모형 터널 시험과의 비교에서 지표면 침하, 천단침하 그리고 전단대의 발달형태에서 부합되는 결과가 나타났다. 본 연구에서 변형을 연화모델은 저토피 터널의 비선형 변형해석에 대하여 적용성이 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Deformation behavior, Model tunnel test, Shallow tunnel, Strain softening analysis

1. 서 론

도심지 NATM터널은 주변구조물의 존재 하에 미고

결성 저토피고 지반에 건설되는 경우가 많기 때문에 굴착에 따른 지표면 침하와 주변 지반의 변위가 터널 설계를 지배하는 중요인자이다(Peck 1969). 이러한 지반

1 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사후 연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National University, hero_ljh@hotmail.com, 교신저자)

2 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National University)

3 정회원, 진주산업대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Jinju National University)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

에서의 터널 굴착에 따른 변형 거동은 터널굴착에 따른 터널 어깨로부터 발달하는 전단존의 형성과 터널 상부 지반의 이완에 따른 천단과 지표부까지의 지반이 동시에 침하하는 현상이 특징적이다(Hansmire과 Cording 1985). 도심지 터널 설계에 있어서는 기존의 탄성 및 탄소성 모델을 활용한 수치해석적인 방법에 크게 의존하고 있기 때문에 현장의 변형거동을 묘사하기에는 부족한 점이 많다(Negro와 de Queiroz 2000).

이와 같은 점으로 미루어 저심도 미고결지반과 풍화암을 대상으로한 도심지 터널 굴착에 따른 변형거동의 역학적인 특성, 지하수의 영향, 지보공 및 보조공법의 효과, 지표면과 주변 지반의 안정성 문제에 관하여 모형 터널 실험, 현장 데이터의 분석과 수치해석적인 관점을 통한 연구가 필요하다고 생각된다. 최근, 다양한 해석적인 기법을 통해 도심지 터널에 대한 안정성과 변형거동에 관하여 연구가 진행되고 있다(유광호 등 2000; 신종호와 이인근 2001; 김영민 2005; 김영수 등 2006; Sakurai과 Akayuli 1998; Sterpi 1999).

본 연구는 연속체 사질토 지반을 모사하는 알루미늄 봉을 이용한 2차원 실내 터널 모형실험과 변형을 연화 모델을 통하여 미고결 저토피 지반에서의 터널굴착으로 인한 변형 거동 특성을 규명해 보았다. 수치해석은 변형을 연화와 함께 전단 탄성계수 및 강도 정수의 저하를 고려하였다(Matsumoto 2000; Akutagawa 등 2006). 실험결과에 있어서, 지표면침하와 천단 침하의 발달과 함께 터널 옆에서 발달하는 전단대 존이 확인되었으며, 이러한 양상은 기존의 연구 결과(Hansmire과 Cording 1985)와 잘 일치하였다. 변형을 연화모델을 이용한 수치해석에 있어서 지표면 침하와 천단 침하 곡선은 모형실험 결과와 잘 일치됨을 보여 주었다. 또한, 터널 측벽부로부터 지표부까지 발달하는 전단대의 분포형태에 있어서도 모형터널 실험결과와 부합되는 결과를 나타냈다.

2. 터널 굴착에 따른 변형 특성과 수치모델

그림 1은 워싱턴 D.C의 지하철 터널 현장에 계측된 지중변위계와 경사계의 결과를 이용하여 나타낸 터널 주변 최대 전단 변형률 분포도이다(Hansmire과 Cording 1985). Murayama과 Matsuoka(1969)는 알루미늄 봉을 이용한 트랩도아 실험(Trap door test)을 수행하여 저토피성 지반에서의 터널의 횡방향 및 종방향 변형 거동 그리고 토압 메커니즘에 관해 연구를 수행하였다(그림

2). 그림 2는 모델 테스트 결과와 변형 메커니즘을 설명하기 위해 나타낸 그림이다. 그림에서 영역 I은 트랩도아와 함께 저하되고, 그 결과로 인하여 영역 II가 침하된다. 영역III은 변형거동의 영향이 일어나지 않는 구간이다. 그림 1과 2에서 미고결 저토피 터널의 굴착에서는 일반적으로 터널 어깨로부터 발달하는 전단대의 형성이 특징적이며, 이로 인하여 아칭효과가 형성되기 어려움을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 터널 천단에서 지표까지의 연직 변위량이 똑같은 분포가 되는 공동침하가 발생하며, 이완토압에 의해 위험한 상태가 발생되어질 수 있음을 알 수 있다.

미고결 저토피 도시부 터널에는 지중 및 지상에 존재하는 각종 인접 구조물의 존재 하에 굴착되는 경우가 많기 때문에 설계단계에서 천단 및 지표면의 침하량과 침하 기울기의 발달을 적절하게 평가할 수 있는 해석기법이 필요하다. 미고결 저토피 터널이 가지는 불연속적인 거동을 설명하기 위하여 몇 가지 수치해석적인 방법이 있는 것을 알 수 있다. Sakurai과 Akayuli(1998)는 파괴후 전단 변형률의 증가와 함께 지반의 이방성 파라메타, $m(=G/E)$ 을 저하하는 것을 통해 재료특성의 비선형성을 재현하였으며, 모형 터널 실험 및 실제 현장에 적용하였다. G 는 전단 탄성계수를, E 는 탄성계수를 의미한다. Sterpi(1999)은 재료의 응력에 파괴기준을 초과한 소성상태에 들어간 시점으로부터 점착력과 내부마찰각을 선형적으로 저하시키는 방법을 도입해 터널 주변의 전단대의 발생을 수치 모델화하였다.

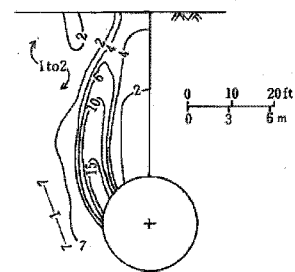


그림 1. 터널 주변의 전단대

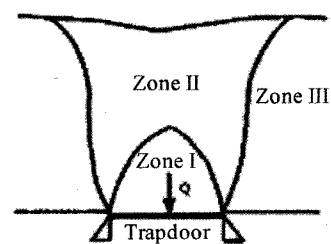


그림 2. 실험에서 나타난 변형 특성

본 연구에서는 도시부의 비선형성을 가지는 NATM 터널의 거동을 설명하기 위해 변형률 연화에 따른 이방성 파라메타와 지반강도를 저하시키는 모델(strain softening model, 변형률 연화모델)을 사용하였다.

3. 변형률 연화모델의 개요

Sakurai과 Akayuli(1998)은 재료의 손상에 따른 비선형적 거동을 나타내기 위해서 전단 강성계수의 저하를 고려하였으며, 이 때 탄성계수는 일정한 것으로 고려하였다. 응력, σ' 와 변형률, ϵ' 의 관계에 있어서, x' 축이 전단 파괴선과 일치하는 국소좌표계(x' , y')로 식 (1)과 같이 가정하고 있다(그림 3).

$$[\sigma'] = [D'][\epsilon'] \quad (1)$$

여기서, $[D']$ 는 전단 파괴선과 일치하는 방향의 국소좌표계에서의 응력-변형률 매트릭스로서 2차원 평면변형률상태에서는 식 (2)와 같이 주어진다. 그림 3은 국소좌표계(x' , y')와 전체좌표계(x , y)를 나타낸 그림으로서 대상 암반의 손상에 따른 전단대(slip line)의 발생각도는 $45^\circ \pm \phi/2$ 임을 알 수 있다(Akutagawa 등 2006).

$$D' = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & m(1-\nu-2\nu^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, E 는 탄성계수, ν 는 포아송비를 나타낸다. m 은 전단 강성저하 매개변수 또는 이방성 매개변수로서 전단 탄성계수와 탄성계수의 비로서 대상 재료의 손상을 의미한다. Sakurai 과 Akayuli(1998)은 비틀 전단 실험과 3축 압축시험을 통해 m 과 전단 변형률, ν 의 관계는 나타내었으며, 다음의 식 (3)과 (4)를 제안하였다.

$$m = \frac{1}{2(1+\nu)} - d \quad (3)$$

$$d = (m_e - m_r)[1 - \exp\{-100\alpha(\nu - \nu_e)\}] \quad (4)$$

여기서, a 는 m 을 저하시키는 정도를 결정하는 계수로써 재료고유의 값을 나타낸다. 이방성 매개변수 m_e 은 m 의 초기 값이며, m_r 은 잔류 값을 표시한다. ν_e 은 전단변형률을, ν_e 은 항복이 시작하는 전단변형률의 초기 값을 의미한다. m 은 응력상태가 파괴기준을 초과하는 시점으로부터 즉시 감소되어진다. 식 (2)를 전체 좌표계의 매트릭스 $[D]$ 로 나타내면, 식 (5)와 같으며, 응력과 변형률의 관계로 표시하면 일반적으로 식 (6)과 (7)로 표시되어진다.

$$[D] = [T][D'] [T]^T \quad (5)$$

$$[\sigma] = [D][\epsilon] \quad (6)$$

$$D = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$[T]$ 는 transformation 매트릭스를 나타낸다. 재료의 손상이 발생하지 않는다면, 식 (2)와 (7)을 통해 $m = 1/(2(1+\nu))$ 가 됨을 알 수 있다. 본 연구에서 이방성 매개변수의 저하와 함께 강도의 저하도 고려하였으며, 이 때 강도정수와 전단 변형률의 관계는 Sterpi(1999)의 연구 결과를 이용하였다. Sterpi(1999)는 알루미늄 봉의 일면 전단시험의 결과를 통하여 전단변형률의 증가에 의해 점착력, c 와 내부마찰각, ϕ 의 변화를 표시 하였다. Sterpi (1999)의 연구에서 응력상태가 초기 강도정수 c_i 와 ϕ_i 에 의한 파괴기준을 초과한 시점으로부터 감소가 시작되며, 전단변형률의 증가에 의해 잔류강도 c_r 와 ϕ_r 에 도달한다. c_i , ϕ_i , c_r 와 ϕ_r 는 재료의 고유 값을 나타낸다. 또, c 와 ϕ 가 감소가 시작할 때의 전단변형률 ν 은 응력에 의존하지만, 구속 할 때까지의 $\Delta\nu$ 은 재료 고유의 값을 나타낸다.

그림 4와 5는 본 논문에서 적용한 변형률 연화에 따른 m 및 c , ϕ 의 저하와 관련된 관계를 정리한 것이다. 그림 6은 점착력과 내부마찰각의 감소에 따른 수정된 응력 상태를 보여주고 있다.

변형률 연화해석에서의 응력과 변형률의 관계는 Matsu-mote(2000), Akutagawa 등(2006)에 의해 상세히 설명되어져 있다. 간단히 요약하면 다음과 같다.

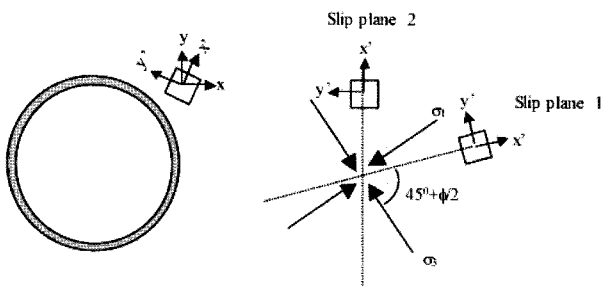


그림 3. 국소좌표계와 전체 좌표계

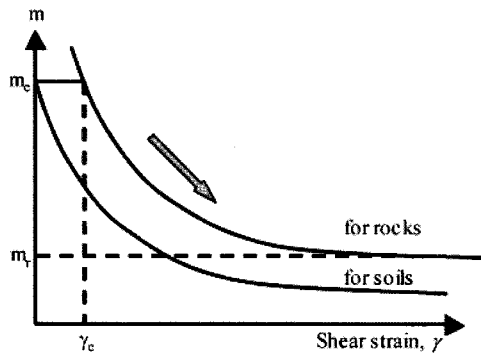


그림 4. 전단변형률(γ)에 따른 이방성 매개변수(m)의 저하

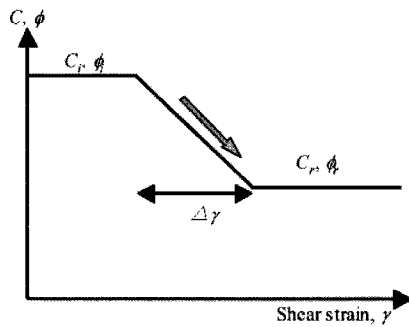


그림 5. 전단변형률(γ)에 따른 강도정수(c, ϕ)의 저하

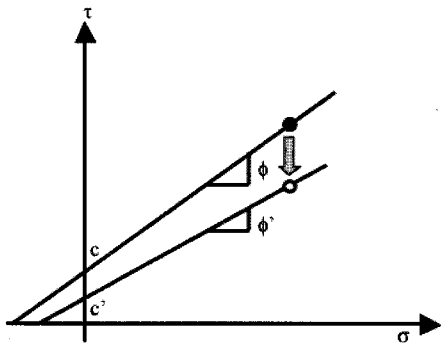


그림 6. 강도정수(c, ϕ)의 저하에 따른 수정된 응력상태

(1) 파괴기준은 Mohr-Coulomb의 식을 이용한다. 이 방성 매개변수 m_r 와 강도정수 c_r, ϕ_r 는 응력상태가 파괴 기준에 도달한 시점부터 저하하기 시작하고, 전단변형률 γ 의 증가에 따라 수렴값 m_r, c_r, ϕ_r 에 도달한다. 여기서, 파괴면방향(그림 3)에서 최대 전단응력 τ' 의 응력경로를 고려한다.

(2) 전단변형률 γ_c 는 유한 요소해석상에서 최대 전단응력이 처음으로 파괴기준에 도달할 때의 값으로 정의한다. 전단변형률 γ 은 이방성 매개변수와 강도저하가 저하되기 전까지는 응력에 의존하지만, 저하가 시작되어 수렴에 이르기까지는 재료의 고유한 값으로 간주한다.

(3) 수치해석은 각 단계에서 불균형이 일정한 값(10% 이내)에 도달시 수렴된다고 간주한다. 요소는 4각형 8절

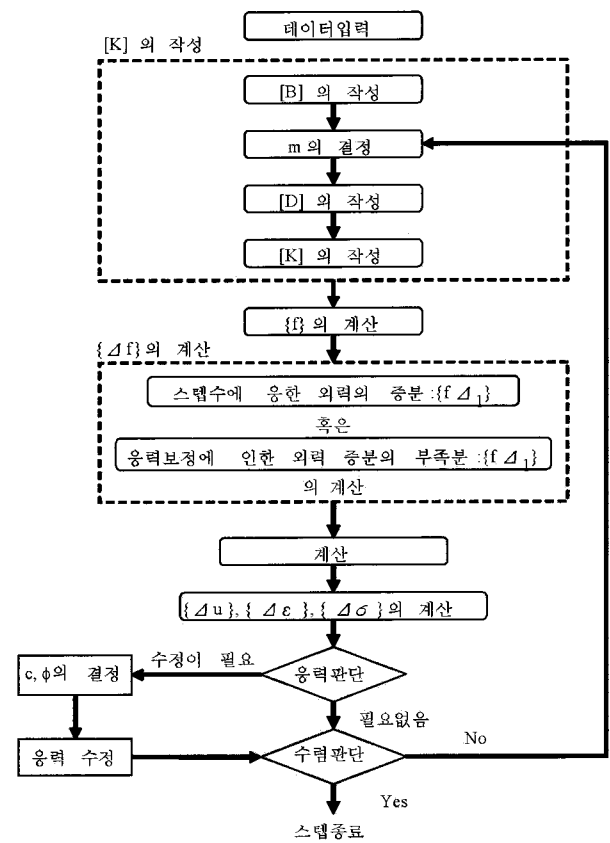


그림 7. 수치해석의 흐름도

점을 이용한다.

그림 7은 본 해석의 흐름도를 나타낸 것이다.

4. 터널 모형실험과 수치해석

4.1 모형실험

4.1.1 실험 개요

미고결성 지반의 터널 굴착에 있어서 주변 지반의 변형거동을 이해하기 위해서 터널 모형실험이 수행되었으며, 이러한 터널 모형실험에 사용된 재료로서 표준사 또는 알루미늄봉을 이용하였다(이용주 2006; Murayama 과 Matsuoka 1969; Adachi 등 1985; Sakurai 등 1994; Sakurai과 Akayuli 1998; Sterpi 1999; Matsumote 2000; Shahin 등2004).

실내 터널 모형실험의 굴착과정을 나타내기 위해서 사용되어진 방법은 굴착 면에 일정한 변위를 제어하는 변위 경계 조건 방식(Adachi 등 1985)과 굴착 면에 일정한 압력에 의하여 제어하는 압력 경계 조건 방식(Sakurai 등 1994)이 있다. 최근, 알루미늄 봉을 재료로한 압력 경계 조건은 변위 예측의 용이성, 반복적인 실험, 현실적인

터널 굴착모사, 터널의 지보압의 검토 가능 등에 있어서 장점이 확인되었다. 반면에 수동식이므로 실험상 많은 주의가 필요하며, 원심력 실험 등과 같은 실제 지반을 모사하기에는 다소 무리가 있다고 생각되어지나, 미교결성 지반을 대상으로 한 터널링 문제에 있어서는 유용한 방법임을 알 수 있었다(Sakurai 등 1994; Sterpi 1999).

알루미늄 봉 적층체와 공기압(air bag)를 이용한 터널 모형실험은 일본 고베대학교 지하공간 연구실의 Sakurai 등(1994)에 의해 처음으로 시작되어, 그 후 Akutagawa 등(1997), Kitani(1997), Matsumoto(2000) 그리고, Sakurai 과 Akayuli(1998)들이 연속해서 수행하였다. 본 논문은 그들의 연구결과를 터널 토압과 변형거동의 관점에서 정리하여 이용하였다.

터널모형실험의 개요를 간단히 설명하면 다음과 같다. 사용한 터널 횡단면에 대한 모형실험장치 모식도를 그림 8에 나타내었다. 모형 토조의 재원으로는 폭115cm, 높이 45cm를 사용하였으며, 길이 5cm, 직경 1.5mm와 3mm의 알루미늄 봉을 무게비 6:4로 혼합하여 알루미늄 집합체를 이용한 인공지반을 만들었다. 사진 1은 터널 모형실험장치를 나타내고 있다. 알루미늄 봉 혼합체로 구성된 인공지반은 표준사의 입도곡선을 고려하여 수행되어졌다. 혼합된 터널굴착을 모사하기 위하여 공기압으로 제어되는 터널 모형의 공기압(air bag)은 15cm의 직경을 사용하였으며, 사용된 공기압은 제어밸브에 의하여 0.001tf/m²까지 제어할 수 있다. 터널 모형실험은 터널 형상의 에어백에 토질의 토피압에 해당되는 공기압을 가하고, 터널 천정부의 알루미늄 봉이 이동하지 않도록 주의하여 소정의 지표면까지 알루미늄 봉을 쌓는다. 이 상태에서 알루미늄 봉으로 구성된 인공지반에 터널 형상의 에어백의 공기압을 감소시킴으로써 터널의 굴착과정을 시뮬레이션한다. 지표면 침하와 천단침하는 그림 9와 같이 레이저 변위계를 이용해 터널 굴착에 따라 측정하였다.

터널주변 지반의 변형이나 붕락 때의 변형은 모형 토조 표면에 표점을 그리고, 굴착의 전후에 표점의 이동을 디지털 카메라 촬영으로 수행하였다. 사진으로부터 읽은 표점의 기록은 사진 측량 프로그램에 의하여 각 측정점의 변위를 나타내었다. 측정된 변위값을 변형률로 계산하는 방법은 Sakurai(1982), Nishitake 등(1996)이 제안한 것을 이용하였다.

유한요소법에서의 변위-변형률관계로 부터 이용하여 터널 주변의 변형율은 식 (8)과 같이 구할 수 있으며, 최대전단 변형률은 식 (9)와 같이 구해진다(김영민 2005).

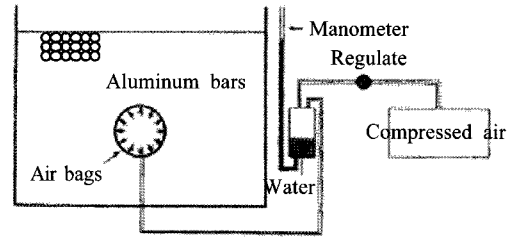
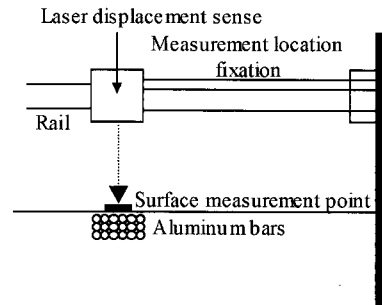
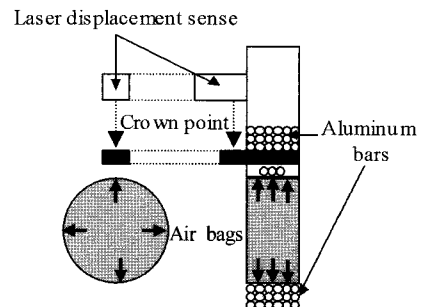


그림 8. 모형 실험의 모식도



(a) 천단 침하



(b) 지표면 침하

그림 9. 모형실험에 있어서 계측 방법

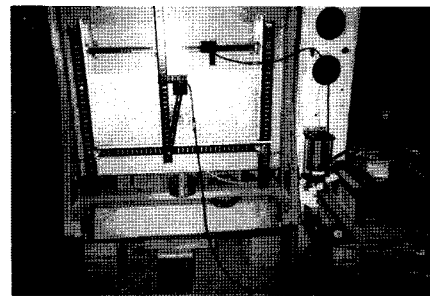


사진 1. 터널 모형실험 장치

$$[\varepsilon] = [B][u] \quad (8)$$

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \frac{1}{4}\gamma_{xy}^2} \quad (9)$$

4.1.2 실험 결과

모형 터널 실험은 저토피고 지반에서의 터널의 거동을 중심으로 토피비, H/D=0.5, 1 그리고 2인 경우에 대

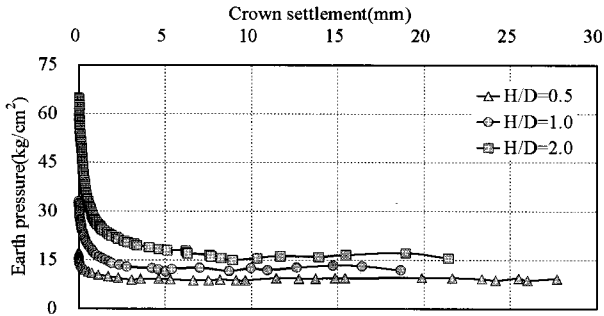


그림 10. 공기압의 저하에 따른 천단 침하 결과

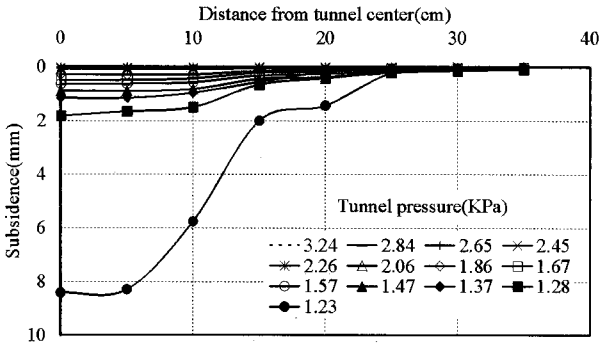


그림 11. 공기압의 저하에 따른 지표면 침하 결과(H=1D)

하여 실시하였다.

여기서, H는 터널의 토피를 나타내며, D는 터널 직경을 나타낸다. 그림 10과 11은 공기압의 저하에 따른 천단침하와 지표면침하를 나타낸 것이다. 천단침하에 있어서, 초기 굴착 단계까지는 공기압과 침하 간에 선형의 감소그래프가 이루어지지만, 어느 정도의 굴착단계 이후에는 침하가 크게 발생하는 비선형적인 거동이 일어남을 알 수 있다. 일반적으로 그림 10을 지반반응곡선이라고 하며, 선형 구간을 탄성 거동, 비선형구간을 소성거동이 지배하는 영역이라고 나타낼 수 있다. 그림 11의 지표면침하에 있어서 터널 굴착에 따라 지표면 침하량이 커짐을 알 수 있다. 그림 12와 13은 터널이 붕락이 진행된 굴착단계에 있어서 변위 벡터와 최대 전단변형률을 표시한 것이다. 그림 12에서 지중변위의 방향은 터널 중심으로 모아지고, 터널상반부에서 발생하는 지중침하량의 크기는 심도에 관계없이 비슷함을 알 수 있다.

그림 13에서 터널 측벽부(Spring line)에서 전단대가 지표면의 부근까지 도달하는 변형모드임을 알 수 있었다. 모형 터널 실험 결과를 통해 미고결 저토피 지반에서의 굴착에 따른 주변지반의 변형거동을 분석하면, 초기 굴착단계에서는 선형 침하형태인 탄성거동이 지배하며, 어느 정도 지난 후 소성 거동이 나타난다. 터널의 붕락 때에는 전단대가 지표면까지 도달하는 변형특성

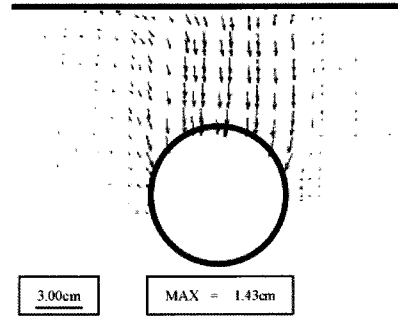


그림 12. 지중 침하 벡터 결과 (H=1D, 터널 내부압력 $P_i=11.9\text{KPa}$, 초기 터널 내부압력의 비 $P_i/P_0=0.36$)

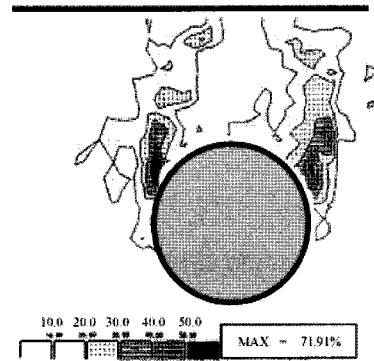


그림 13. 최대 전단 변형률 분포 결과(H=1D)

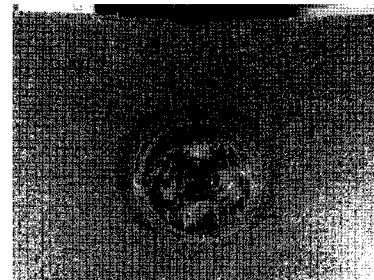


사진 2. 터널 붕락 후의 지반과 터널 형태

이 나타나며, 이로 인하여 터널 상부지반의 이완과 함께 비교적 큰 지표침하량과 좁은 침하형태가 일어남을 알 수 있었다. 사진 2는 터널 붕락 후의 지반과 터널 형태를 나타낸 것이다. 그림 12, 13 그리고 사진 2를 통해 본 실험에서는 터널 측벽부에서 지표부까지 전단대가 발달함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기존의 Hansmire와 Cording(1985)이 현장 계측을 통해 설명한 전단대의 발달 형태와 부합되고 있다.

4.2. 수치 해석

4.2.1 모형실험의 모델링

본 절에서는 변형률 연화모델을 이용한 미고결성 지

토포 터널의 특징적인 변형거동에 대한 평가를 실시하였으며, 비교를 위하여 기존의 Mohr-Coulomb의 탄소성해석도 함께 수행하였다. 수치해석을 통한 변형특성은 굴착에 따른 천단 침하와 지표침하 그리고 최대 전단 변형률의 발달 정도를 나타내었다. 그림 14는 적용되어진 FEM모델의 요소망을 나타낸 것이다.

해석영역은 실내 모형실험에 수행되어진 조건을 고려하였으며, 경계조건은 하부 경계는 y방향 변위를, 좌/우측 경계는 x방향의 변위를 구속하였다. 터널 형상은 좌우대칭이므로 반단면만을 모델링하였으며, 2차원 평

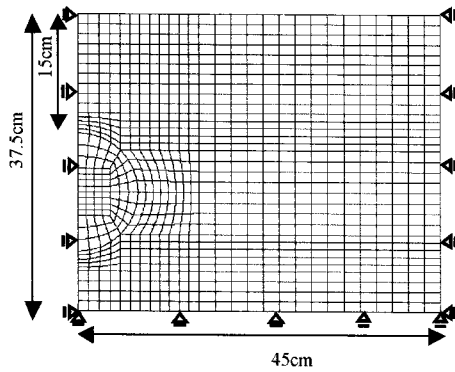


그림 14. FEM 요소망(H=1D)

표 1. 탄성과 탄소성 수치해석에서 사용된 물성치

Young's modulus ; E	H=0.5D	369.5KPa
	H=1D	529.7KPa
	H=2D	850.2KPa
Poissons' s ratio ; ν	0.333	
Unit weight ; w	21.36kN/m ³	
Friction angle	30.7°	
Cohesion	0.258KPa	

표 2. 변형률 연화해석에서 사용된 물성치

Young's modulus ; E	H=0.5D	369.5KPa
	H=1D	529.7KPa
	H=2D	850.2KPa
Poissons' s ratio ; ν	0.333	
Unit weight ; w	21.36kN/m ³	
Friction angle	Initial ; f_i	30.7°
	Residual ; f_r	23.2°
Cohesion	Initial ; c_i	0.258KPa
	Residual ; c_r	0KPa
Increment of maximum shear strain during which strength parameters, c and f , drop ; $\Delta\gamma$	0.0025	
Tensile strength ; σ_t	0KPa	
Residual value of m	0.0001	
Constant of damage parameter ; a	1	

면변형 조건에서 stress release method(Panet과 Guenet 1982)을 사용한 굴착 모델링을 수행하였다. 수치모델링에 있어서 첫 번째 단계에서 지중해석을 수행하였다.

지중해석에 있어서 굴착전 원지반 상태의 응력상태, K_0 , 는 $\nu/(1-\nu)$ 를 고려하였다. 다음의 제 2단계에서 터널이 굴착되어지며, 이 때 초기응력의 해방을 50스텝으로 분할해 수행하였다. 스텝1에 하중의 2%을 해방하는 것으로서, 스텝50에는 하중의 100%을 해방하는 것을 의미한다. 사용되어진 재료정수 값은 알루미늄 집합체의 직접 전단 실험과 매개변수 연구를 통해 얻은 값을 사용하였다(Sterpi 1999; Matsumoto 2000). 표 1은 탄소성해석에서 사용된 물성치를 나타낸다. 표 2는 변형률 연화해석을 위해 사용되어진 물성치 값을 나타내고 있다. 탄성계수는 터널깊이를 고려하여 수식 (10)에 의하여 구하였다(Adachi 등1985). 여기서, σ_m 은 터널중심에서의 평균 수직응력을 나타낸다.

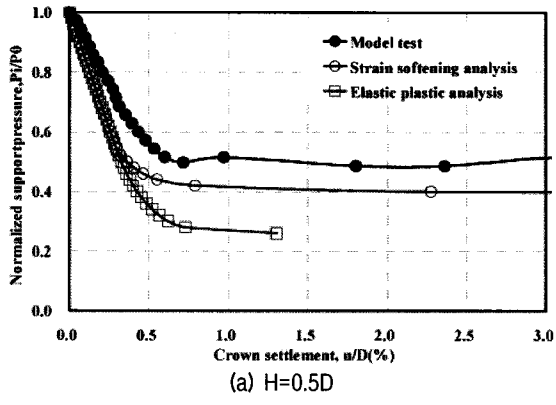
$$E=49+10\sigma_m \text{ (Kpa)} \quad (10)$$

4.2.2 수치해석 결과

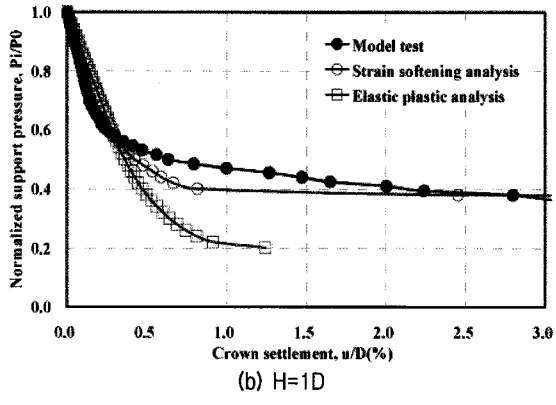
천단침하와 터널 지보압의 관계를 그림 15에 나타내었다. 수치해석과 실험결과의 비교에 있어서 Mohr-Coulomb 탄소성모델보다 변형률 연화모델이 보다 근접한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

그림 16은 정규화된 지표면 침하를 비교한 것이다. 터널 중심으로부터 15cm떨어진 지점에서 침하거동이 탄소성모델을 통해서는 재현되어지기 어려우나, 제안된 변형률 연화모델의 경우에는 재현이 가능함을 알 수 있었다. 그림 17은 초기응력에서 62%정도의 응력이 해방된 단계에서의 탄소성 그리고 변형률 연화모델에 의한 최대 전단 변형분포를 나타낸 것이다. 탄소성모델의 경우 터널 주변의 한정된 지역에서 전단대가 나타났지만, 연화해석의 경우 전단대가 지표면까지 도달하는 변형 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 앞의 그림 13의 실험결과와 일치함을 알 수 있다. 그림 18은 연화모델을 이용한 굴착해방력에 따른 최대 전단변형률 분포의 발달 과정을 나타낸 그림이다. 응력해방률 60%에서 64%일 때 전단대는 급속히 발달됨을 알 수 있다.

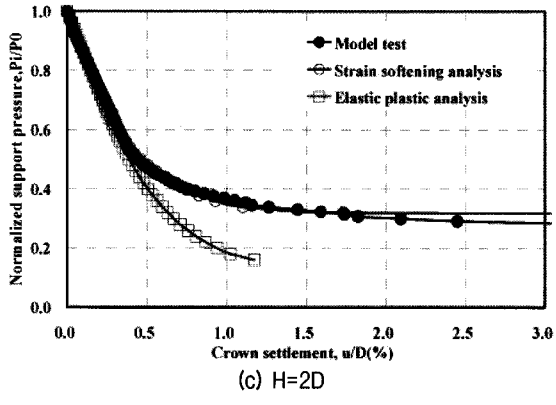
그림 15, 16, 17 그리고 18을 통해 연화 모델을 이용한 변형거동이 모형실험의 결과와 매우 비슷하게 나타났으며, 미고결 저토포성 지반에서의 터널 변형거동을 어느정도 정확하게 평가 할 수 있는 수치해석 기법이라는 것을 알 수 있었다. 변형률 연화모델을 이용한 실제



(a) H=0.5D

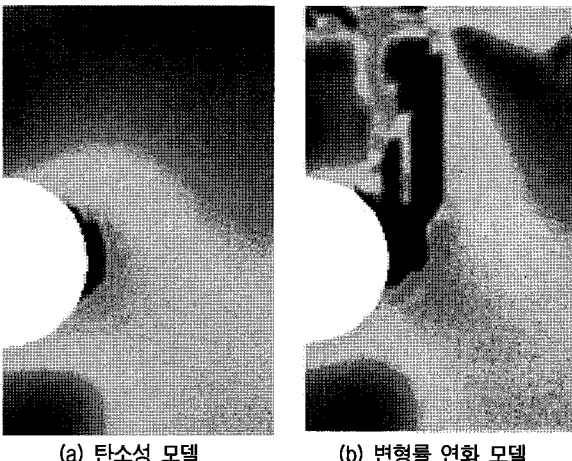


(b) H=1D

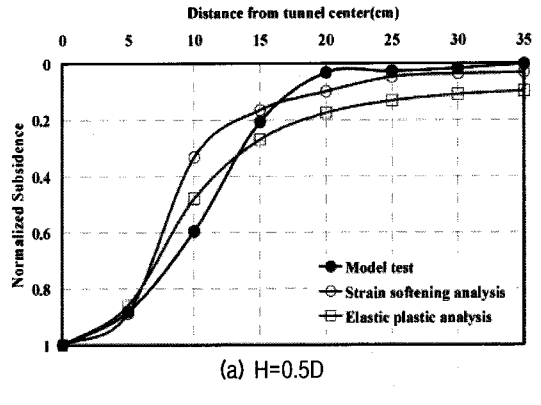


(c) H=2D

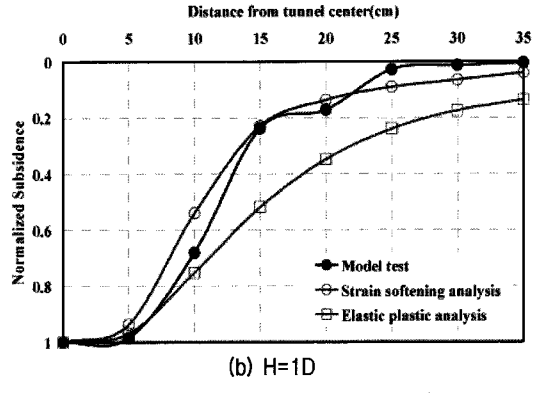
그림 15. 천단침하에 있어서 수치해석과 모형실험의 비교



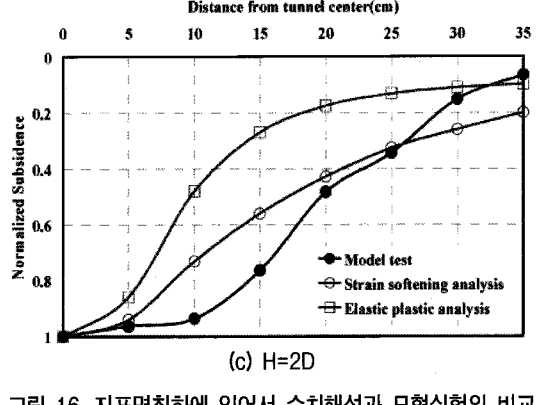
(a) 탄소성 모델 (b) 변형률 연화 모델
그림 17. 최대 전단 변형률 분포에 있어서 모델 별 비교



(a) H=0.5D



(b) H=1D



(c) H=2D

그림 16. 지표면침하에 있어서 수치해석과 모형실험의 비교

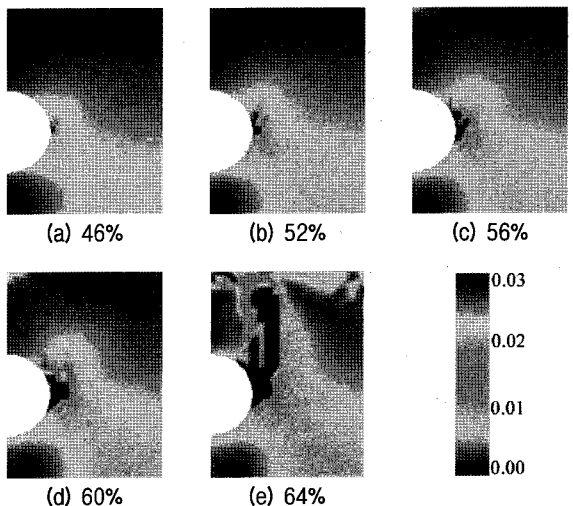


그림 18. 굴착해방력에 따른 최대 전단 변형률의 발달 과정

터널설계의 적용성에 대하여 적절한 연화물성치의 평가는 필수적이라고 사료된다. 연화물성치의 적절한 평가에 대하여 보다 많은 연구가 수행되어져야 할 것이다.

5. 결론

미고결성 저토피고 지반에서의 터널 굴착에 따른 변형거동은 터널 상부 측벽부에서 발달하는 전단대의 형성과 터널 상부 지반의 이완에 따른 지반침하가 특징적이다. 이는 지표면 침하량뿐만 아니라 지표면 침하 기울기가 크게 발달하는 원인이 된다. 본 연구는 사질토 지반을 모사하는 알루미늄 붕을 이용한 2차원 실내 터널 모형실험과 전단 탄성계수 및 강도정수의 저하를 고려한 변형을 연화해석을 통하여 미고결 저토피 지반에서의 터널굴착으로 인한 변형 거동 특성을 규명해 보았다.

실험결과에서 지표면 침하와 천단침하의 발달과 함께 터널 옆에서 발달하는 전단대가 확인되었다. 변형을 연화모형을 이용한 수치해석과 터널 모형실험과의 비교에서 지표면 침하, 천단침하 그리고 전단대의 발달형태에서 부합되는 결과가 나타났다.

변형을 연화모형은 미고결 저토피 터널에서의 굴착에 따른 변형메커니즘의 이해뿐만 아니라 지표면침하와 침하기울기를 적절히 평가할 수 있는 모델링기법임을 알 수 있었다.

본 논문에서 사용되어진 지반 성형과 터널 굴착에 관한 모형실험은 엄밀하게는 실제 굴착과 똑같다고는 볼 수 없으나 모형 실험과 변형을 연화모형에서의 변형거동이 기존의 현장계측 결과와 어느 정도 일치성을 나타내었으며, 이는 실제 터널현장에 적용 가능함을 알 수 있었다. 실제 도시 터널의 수치해석에 이용할 경우, 지반의 연화물성치의 평가와 지보의 모델링, 지하수 모델링과 같은 부분에 대하여 보다 많은 연구가 진행되어져야 한다. 또한, 대단면 도심지 NATM터널의 합리적인 수치해석적인 설계법을 제안하기 위해 현장 적용성에 대한 명확한 도출이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 일본 고베대학교 지하공간 연구실 교수와 학생들의 적극적인 협조로 인해 수행된 것으로 이에 감사드립니다. 특히, 고베대학교의 아쿠타가와교수와 사쿠라이교수에게 다시한번 감사드립니다.

이 논문은 2007년도 두뇌한국 21(BK21)에 의하여 지원되었습니다. 또한, 본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국 건설교통기술 평가원에서 위탁 시행한 2005년도 CTRM(05 건설핵심 D03-01)에 의해 일부 지원되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김영민 (2005), “굴진장을 고려한 얇은 터널 파괴거동에 대한 모형실험 및 수치해석”, 한국암반공학회지, *터널과 지하공간*, 제15권, 제6호, pp.400-410.
2. 김영수, 정우섭, 이성운, 석태룡 (2006), “도시 NATM 터널의 변형을 연화모형을 이용한 지반거동 예측”, 한국터널공학회, *학술논문집*, Vol.8, No.1, pp.21-30.
3. 신중호, 이인근 (2001), “화강토 지반내 복합막장 터널의 파괴메카니즘 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제17권, 제4호, pp.317-329.
4. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), “연약 암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가”, *한국터널공학회*, 제2권, 제3호, pp.47-57.
5. 이용주 (2006), “이미지 프로세싱을 이용한 얇은 터널 모형실험과 수치해석의 비교”, *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 7호, pp.5-12.
6. Adachi, T., Tamura, T., Yashima, A. and Ueno, H. (1985), “Behavior and simulation of sandy ground tunnel”, *Proceedings of JSCE*, No.358, III-3, pp.129-136.
7. Akutagawa, S., Ogawa, K. and Sakurai, S. (1997), “An analytical and experimental investigation on stability of underground openings”, *Proc. 9th Int. Conf. Computer Mech. And Adv. In Geomech.*, in Yuan, J. X.(ed), Balkema, Rotterdam, pp.1495-1500.
8. Akutagawa, S., Otazawa, H. and Sakurai, S. (2006), “Numerical simulation of a large scale slope failure considering reduction of stiffness and strength over time”, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.55, No.5, pp.515-522.
9. Hansmire, W.H. and Cording, E.J. (1985), “Soil tunnel test section; Case history summary”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.11, pp.1301-1320.
10. Kitani, T. (1997), “Study on the earth pressure tunnel and deformation behavior”, Masters thesis, Graduate School of Science and Technology, Kobe University, Japan.
11. Matsumoto, K. (2000), “Fundamental investigation of design pressure of tunnels”, Masters thesis, Graduate School of Science and Technology, Kobe University, Japan.
12. Murayama, S. and Matsuoka, H. (1969), “On the settlement of granular media caused by the local yielding in the media”, *Proceedings of JSCE*, Vol.172, pp.31-41.
13. Negro, A. and de Queiroz, P.I.B. (2000), “Prediction and performance: A review of numerical analyses for tunnels”, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, edited by Fujita and Miyazaki, pp.409-418.
14. Nishitake, S., Sakurai, S. and Arikawa, K. (1996), “Study on tunnel face stability by X-ray radiography method-approach by three dimensional strain analysis”, *Proceedings of JSCE*, No.547, III-36, pp.87-96.
15. Panet, M. and Guenot, A. (1982), “Analysis of convergence behind the face of a tunnel”, *Tunneling '82*, London, pp.197-204.
16. Peck, R.B. (1969), “Deep excavation and tunneling in soft ground”, State of the Art Report, *Proceedings of the 7th International*

Conference on SMFE, Mexico City, State of the Art Volume, pp.225-290.

17. Sakurai, S. (1982), "An evaluation technique of displacement measurements in tunnels", *Proceeding of JSCE*, No. 317, pp.93-100.
18. Sakurai, S and Akayuli, C.F.A. (1998), "Deformational analysis of geomaterials considering strain-induced damage", In; Cividini, A. (ed), *Proc. 4th. Europ.*, pp.729-738.
19. Sakurai, S., Kaeshima, I., Kawabata, Y. and Saragai, A. (1994), "Model tests on deformation and loosening pressure of shallow tunnel", *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, No.487/III-26, pp.271-274.
20. Shahin, H. M., Nakai, T., Hinokia, M. and Yamaguchi, D. (2004), "3D effect of earth pressure and displacements during tunnel excavations", *Soils and foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 44, No.5, pp.37-49.
21. Sterpi, D. (1999), "An analysis of geotechnical problems involving strain softening effects", *Int. J.Num. Analyt. Meth. Geomech.*, 23, pp.1427-1454.

(접수일자 2007. 7. 2, 심사완료일 2008. 1. 8)