

2-Arch 터널 중앙벽체 작용하중 산정에 관한 연구

A Study on the Evaluation of the Loads Acting on the Pillar in Two-Arch Tunnel

오 규 철¹ Oh, Gyoo-Chul

도 종 남² Do, Jong-Nam

천 병 식³ Chun, Byung-Sik

Abstract

In this study, Matsuda formula used to evaluate the loads acting on the pillar was investigated and load reduction factor(α) was evaluated by numerical analysis to better apply for the design. From the results, normal stress was concentrated to one side due to excavation of preceding tunnel after construction of pillar. And 86.5% of maximum normal stress was revealed partly unequally when the ground was poor. By numerical analysis, 14~83% of total loads calculated by Matsuda formula decreased and then, from these results, load reduction factor(α) was estimated. From now on, stability and economic aspects could be guaranteed by applying the load reduction factor(α).

요 지

본 연구에서는 2-Arch 터널의 중앙벽체 작용하중 산정에 쓰여지는 Matsuda의 제안식을 검토하여 문제점을 분석하였으며, 현장지반조건을 반영하는 설계정수 산정을 위해 수치해석을 수행하여 Matsuda의 제안식에 계수 α 를 제안하여 2-Arch 터널 중앙벽체 작용하중을 재산정하였다. 지반+중앙벽체의 수치해석 결과, 중앙벽체 시공 후 선행터널 굴착에 의해 중앙벽체는 편측으로 응력이 집중되는 현상을 보였으며 터널 굴착 완료 후 중앙벽체 응력과 비교해 암반이 불량한 경우 최대 86.5%의 응력이 불균등하게 국부적으로 발현되었다. 주변지반의 특성에 따른 중앙벽체 작용하중을 수치해석으로 검토한 결과 제안식에 비해 14~83%의 하중이 감소되었으며, 이를 바탕으로 하중감소계수(α)를 산정하였다. 향후 2-Arch 터널 설계 시 하중감소계수(α)를 적용하면 2-Arch 터널 중앙벽체 구조물의 과다 설계를 피하고 안정성 및 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Continuous analysis, Load reduction factor, Matsuda formula, Pillar, Two-arch tunnel

1. 서 론

최근 터널건설은 환경 친화적으로 지하공간 활용을 극대화하는 방향으로 발전해 가면서 교통의 편리성, 토지이용 효율의 극대화를 위한 복잡하고 다양한 형태로

추진되고 있다. 특히 2-Arch 터널은 개착공법 적용이 어려운 도심지 지하철 정거장 및 산악 지역의 환경훼손 저감과 선형이 분리되지 않고 용지폭이 제한된 도로터널에 시공되고 있으며 향후 환경 및 시공조건을 예상할 때 적용이 늘어날 전망이다. 2-Arch 터널은 이격거리가

1 정회원, 경남기업(주) 과장 (Member, Team Manager, KeangNam Enterprises Ltd.)

2 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 석박사과정 (Member, Graduate Student, Unified Course of the Master's and the Doctor's Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ. donamtech@empal.com, 교신저자)

3 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

매우 짧은 병렬터널로 볼 수 있으며 이로 인해 충분한 이격거리를 확보한 터널과 달리 굴착 시 터널상호간에 미치는 영향이 크다(왕이완, 2001). 터널형상에 있어서도 2-Arch 터널은 일반적인 병렬터널에 비해 중앙 상부의 안정성이 취약하므로 벽체를 설치하여 구조적 안정성을 확보하는 형태를 보인다. 2-Arch 터널의 시공실적이 많은 일본의 경우는 다수의 시공경험과 해석 그리고 계측 등을 통해 터널 굴착에 따른 거동을 파악하여 이를 토대로 개선된 설계 및 시공방안을 적용하고 있는 반면 국내의 경우는 설계 및 시공방안에 있어 해외 사례에 따른 경험적인 방법에 의존하고 있는 실정이다(김상균 등, 2003).

특히 2-Arch 터널은 다른 터널과 달리 중앙벽체의 설계가 매우 중요함에도 불구하고 이에 대한 뚜렷한 설계 방법이 없으며 Matsuda가 제안한 식에 의존하여 작용하중을 산정하고 지보패턴을 결정하고 있다. Matsuda의 제안식은 불량한 지반에서는 매우 적합하지만 지반상태가 양호할 경우 2-Arch 터널 중앙벽체에 작용하는 하중이 지나치게 보수적으로 산정된다는 한계점을 가지고 있어 지반상태가 대체적으로 양호한 경우에는 적용이 불합리하다고 판단된다(박동욱, 2003).

본 연구의 목적은 2-Arch 터널의 중앙벽체 설계하중 산정에 사용되는 Matsuda의 제안식에 대하여 검토하고 Matsuda의 제안식이 가지는 문제점을 분석하여 보다 실용적으로 실제 설계에 반영할 수 있도록 수치해석을 통해 고찰하는 것이다.

2. 2-Arch 터널의 특징

2.1 2-Arch 터널의 중앙벽체에 작용하는 하중

2.1.1 Matsuda(1998)의 제안식

일본의 경우, 계측 및 해석자료를 바탕으로 그림 1과 같이 하중작용 폭과 높이를 기준으로 설계하중을 산정하여 벽체두께를 결정하고 하부지반의 지지력을 파악하여 기초폭을 결정함으로써 중앙벽체의 중요성을 감안한 설계를 시행하고 있다(M. Kamimura, 1997).

Matsuda(1998)는 중앙벽체에 작용하는 하중(P)는 토피(H)가 터널폭(D)보다 큰 경우 식(1), 토피(H)가 터널폭(D)보다 작은 경우는 식(2)와 같다.

$$P = \gamma \cdot D \cdot W \quad (1)$$

$$P = \gamma \cdot H \cdot W \quad (2)$$

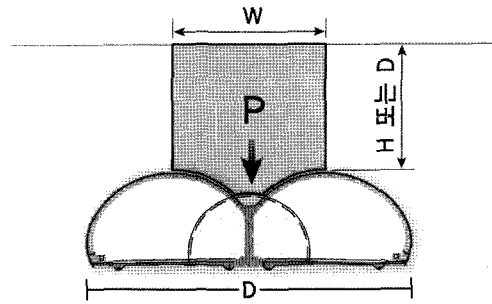


그림 1. 2-Arch 터널 중앙벽체에 작용하는 하중(T. Matsuda, 1998)

여기서, W : 중앙벽체에 작용하는 하중의 폭은 양측 터널 중심선사이 거리(m)

γ : 지반의 단위중량(kN/m^3)

2.1.2 Matsuda(1998) 제안식의 고찰

Matsuda(1998)는 계측 및 해석자료를 바탕으로 중앙벽체에 작용하는 하중을 식 (1), (2)와 같이 제안하였으나 이는 불량한 지반에 국한된다. 지반 상태가 양호한 경우 중앙벽체의 설계가 과다하게 산정되는 결과를 초래하며 경제적으로도 불합리한 결과를 가져온다(E. Soliman 등, 1993). 따라서 본 연구에서는 암반등급별 연속체 해석을 통해 산정된 중앙벽체의 변위를 하중으로 변환하여 중앙벽체에 작용하는 단면력과 Matsuda (1998)의 제안식으로 산정된 하중에 의한 단면력을 비교하였다. 그리고 중앙터널의 벽체부분에 작용하는 하중을 합리적으로 평가하고 시공 시 경제성을 높이기 위해 지반등급에 적절한 하중감소계수 α 값을 산정한 후 Matsuda식에 적용하여 적정성을 검토하였다.

2.2 2-Arch 터널의 시공순서 고찰

2-Arch 터널은 시공 중 발생하는 응력변화를 최대한 억제하고 이를 적절하게 분배하면서 시공하여야 안정성을 기할 수 있는 구조체이므로 터널시공은 통상 응력이 집중되는 중앙부 터널을 시공한 후 좌·우측 터널을 시공하고 마지막으로 라이닝을 타설하게 된다. 굴착방법은 지반이 극히 불량할 경우를 제외하고는 중앙 터널은 전단면으로, 좌·우측 터널은 상하반단면 분할굴착으로 시공하도록 계획하였다. 따라서 본 연구에서는 터널의 시공순서에 맞춰 터널을 모델링하고 수치해석을 수행하였으며 터널 굴착에 따른 중앙벽체의 거동을 분석하고 중앙벽체에 작용하는 하중을 산정하고 Matsuda

(1998)의 제안식과 비교하여 발생하는 응력의 차이를 통해 하중감소계수를 산정하고 이를 중앙벽체의 단면 설계에 반영 하였다.

3. 수치 해석

3.1 해석 개요

3.1.1 굴착에 따른 2-Arch 터널 중앙벽체의 작용하중 산정

중앙벽체의 작용하중을 산정하기 위해서 암반등급별 유한요소해석을 통한 중앙벽체의 변위량을 구조해석에 적용하여 벽체응력을 산정하고 Matsuda(1998)의 제안식을 통한 벽체응력을 상호 비교하여 하중감소계수 α 를 산정하였다. 산정된 하중감소계수 α 를 Matsuda(1998)의 제안식에 적용하여 구조해석을 수행하고 해석결과를 변위량이 적용된 구조해석 결과와 비교하여 감소계수 적용의 적정성을 검토하였다. 그림 2는 중앙벽체 작용하중 산정 과정을 간략하게 흐름도로 나타낸 것이다.

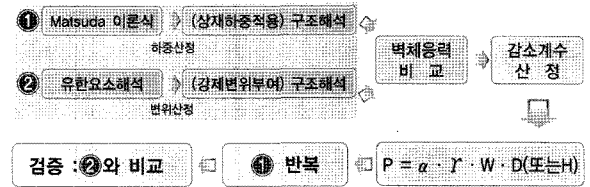


그림 2. 중앙벽체 작용하중 산정 흐름도

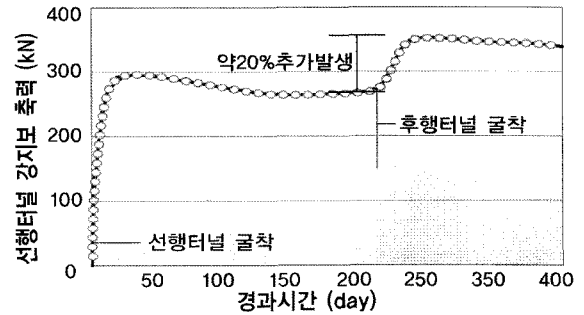


그림 3. 굴착순서에 따른 축력변화(이상덕 등, 2003)

3.1.2 지보패턴 이원화 계획

착에 따른 지반 상호간의 영향이 없도록 충분한 이격 거리를 확보한 2차로 병렬터널의 거동양상과 2-Arch 터널의 거동양상은 다르게 나타난다. 상호 이격거리가 좁은 2-Arch 터널의 경우, 동일한 지반조건 및 토피조건에서도 시공순서에 따라 선행터널 및 후행터널의 거동이 달라진다(T. Addenbrooke 등, 2001). 선행터널의 경우, 굴착 및 지보재 설치가 완료되어 변위가 수렴된 이후에도 후행터널 굴착으로 인해 중앙 상부의 Arching 현상이 없어짐에 따라 선행터널부로 하중전이가 발생하여 추가적인 지반변위 및 지보재 단면력이 발생하게 된다(그림 3 참조). 따라서 본 연구에서는 그림 4와 같이 응력집중을 분산시키기 위해서 선행터널과 후행터널의 지보패턴을 차등 적용하여 선행터널 숏크리트를 더 두껍게(지보등급 1등급 상향) 적용하였다.

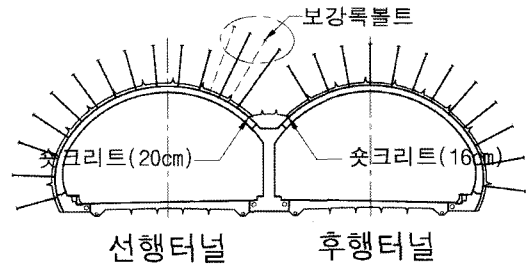


그림 4. 2-Arch 터널 설계 지보적용예(Type-4)

3.2 해석 적용지반

본 연구 대상구간의 지질특성을 파악하기 위해 수평 시추를 포함한 시추조사와 물리탐사(전기비저항, 탄성파 속도 등)를 수행하였다. 그 결과 기반암은 노출 시 풍화에 민감한 경향을 나타내는 흑운모 편마암 및 우백질 화강편마암으로 이루어져 있으며 터널의 암반등급

표 1. 해석 적용지반의 물성치 (이상덕 등, 2003)

구분	변형계수 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	포어송비
GT-I	2.5×10 ⁴	26.2	3,500	45	0.21
GT-II	1.13×10 ⁴	25.5	1,100	42	0.23
GT-III	6.3×10 ³	24.5	650	37	0.25
GT-IV	1.5×10 ³	22.5	200	35	0.26
GT-V	9.0×10 ²	21.6	80	33	0.28

은 II, III, IV등급으로서 비교적 양호한 암반이 존재하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 터널구간의 암반등급에 국한된 해석을 하지 않고 추가적으로 I, V등급에 대한 중앙벽체의 거동특성도 파악하여 암반 특성치에 따른 해석결과를 도출하고자 하였다. 표 1은 본 연구에서 사용된 적용지반의 물성치를 나타낸 것이다.

3.3 해석 적용 지보패턴 및 지보재

본 연구에서 적용된 지보재 물성치는 표 2와 같고 지보패턴별 숏크리트 적용 두께 및 단면적은 표 3과 같이

선행터널의 응력집중을 분산시키기 위해서 선행터널과 후행터널의 지보 패턴을 이원화하여 적용했다는 것이다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 Matsuda 제안식에 의한 하중산정

1998년 Matsuda는 2-Arch 터널의 중앙 벽체에 작용하는 하중을 그림 1과 같이 하중작용 폭과 높이를 기준으로 계측 및 해석결과를 바탕으로 제안하였다. 제안식을 사용하여 토피고와 암반등급에 따른 중앙벽체의 작용하중을 산정하고 중앙벽체 응력을 정리하면 표 4와 같다.

표 2. 해석 적용 지보재 물성치

구 분	탄성계수 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	포아송비	단면적 (m ²)	
Shotcrete	연 성	5×10 ³	24	0.167	표 3 참조
	강 성	1.5×10 ⁴	24	0.167	
Rockbolt	2.1×10 ⁵	78	-	4.9×10 ⁻⁴	
중앙벽체	2.3×10 ⁴	25	0.167	8.0×10 ⁻¹	

표 3. 지보패턴별 슛크리트 적용 두께 및 단면적

구 분	두께 (cm)			단면적 (m ²)		
	선행터널	후행터널	중앙터널	선행터널	후행터널	중앙터널
Type-1	8	5	5	0.08	0.05	0.05
Type-2	12	8	5	0.12	0.08	0.05
Type-3	16	12	8	0.16	0.12	0.08
Type-4	20	16	12	0.20	0.16	0.12
Type-5	24	20	15	0.24	0.20	0.15

표 4. Matsuda 제안식에 의한 중앙벽체 작용하중 및 응력

구 분	중앙벽체 작용하중(MN)	중앙벽체 두께 (m)	중앙벽체 압축응력(MPa)	비 고
GT-I	H=10m	0.8	5.46	$\gamma=26.2\text{kn/m}^3$ W=14.34m D=30m
	H=20m		10.71	
	H=30m		15.95	
GT-II	H=10m		5.33	$\gamma=25.5\text{kn/m}^3$ W=14.34m D=30m
	H=20m		10.44	
	H=30m		15.56	
GT-III	H=10m		5.14	$\gamma=24.5\text{kn/m}^3$ W=14.34m D=30m
	H=20m		10.06	
	H=30m		14.99	
GT-IV	H=10m		4.81	$\gamma=22.5\text{kn/m}^3$ W=14.34m D=30m
	H=20m		9.40	
	H=30m		13.98	
GT-V	H=10m		4.67	$\gamma=21.6\text{kn/m}^3$ W=14.34m D=30m
	H=20m		9.12	
	H=30m		13.57	

※ H<D 일때 P=γ×H×W, H>D 일때 P=γ×D×W

4.2 터널굴착시 지반과 구조물의 상호작용에 의한 중앙벽체 거동 분석

Matsuda의 제안식 산정된 중앙벽체에 작용하는 하중은 터널 시공에 따른 지반거동을 반영하지 못하며 암반등급이 양호한 지반에서 작용하중이 오히려 과다하게 산출되는 문제점이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 연속체 해석을 통해 주변지반의 특성과 토피고에 따른 중앙벽체의 하중변화를 분석하고 이를 구조물 해석에 적용하여 중앙벽체에 작용하는 하중을 합리적으로 산정하였다.

4.2.1 토피고 10m인 경우 중앙벽체 거동분석 결과

토피고 10m인 경우 암반등급에 따라 중앙벽체에 작용하는 응력 그림 5와 같이 선행터널 굴착시 1.0~3.6MPa이 작용하였으며 후행터널 굴착시 2.7~4.6MPa이 작용하였다. 후행터널의 굴착이 완료된 상태의 중앙벽체 응력을 Matsuda의 제안식에 의해 산정된 응력 4.7~5.5MPa과 비교하면 암반등급이 양호한 지반에서의 응력이 크게 나타났으며 벽체 응력 또한 제안식에서 비교적 크게 산정되고 있음을 알 수 있다. 최종 굴착이 완료 되었을 때를 기준으로 선행터널의 굴착에 의해 중앙벽체의 응력은 그림 6과 같이 암반등급에 따라 38.5~79.4%가 발현되었으며 암반이 불량한 조건일수록 벽체의 응력증가량이 커짐을 알 수 있었다. 또한 선행터널 굴착 시 작용되는 응력 분포는 그림 7과 같이 선행터널 쪽으로 편향되게 작용하였으며 이는 암반이 불량한 조건에서 더

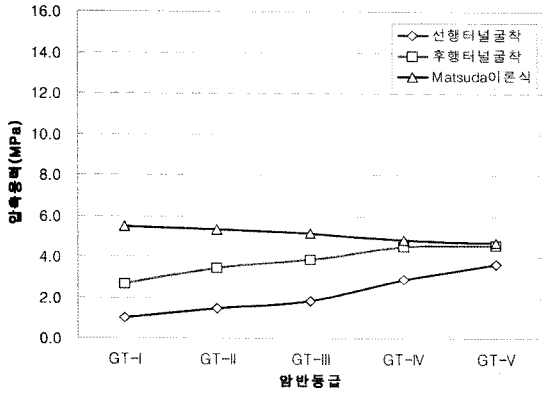


그림 5. 압축응력 비교(토피고 10m)

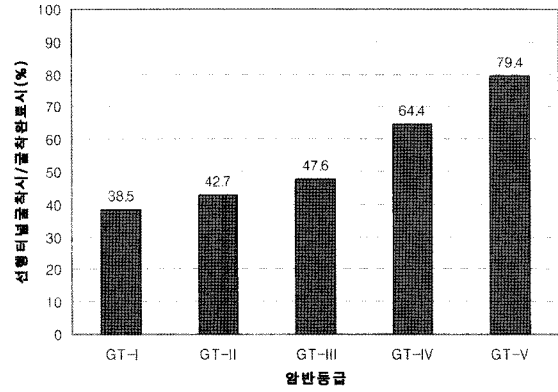


그림 6. 벽체응력 비교(토피고 10m)

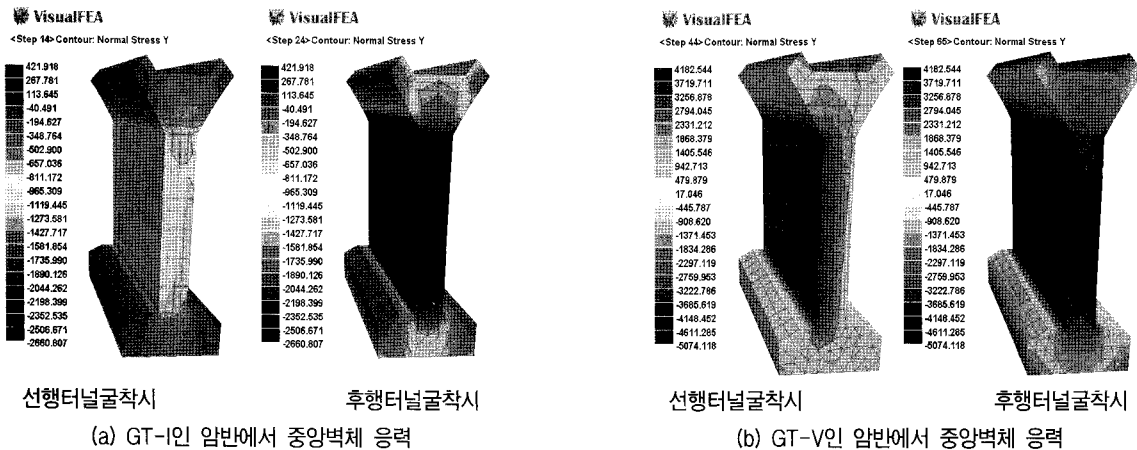


그림 7. 중앙벽체의 응력 비교(토피고 10m)

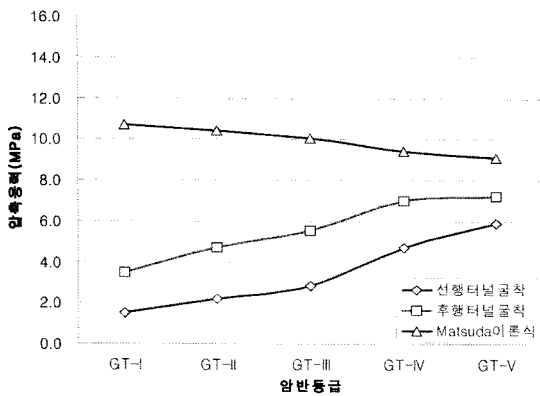


그림 8. 압축응력 비교(토피고 20m)

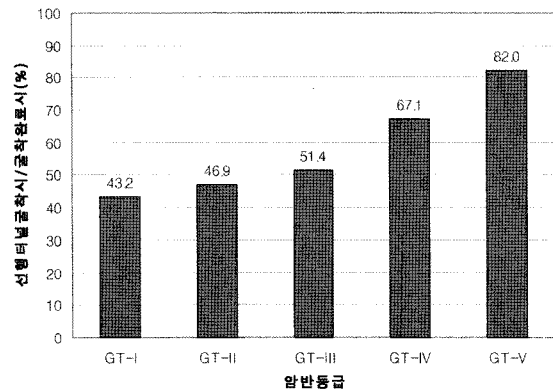


그림 9. 벽체응력 비교(토피고 20m)

속 두드러지나 후행터널 굴착으로 인해 좌우로 일정한 분포형태를 나타내었다.

4.2.2 토피고 20m인 경우 중앙벽체 거동분석 결과 토피고 20m인 경우 암반등급에 따라 중앙벽체에 작용하는 응력은 그림 8과 같이 선형터널 굴착 시 1.5~6.0MPa이 작용하였으며 후행터널 굴착시 3.5~7.2MPa이 작용하였다. Matsuda의 제안식에 의해 산정된 응력

은 9.1~10.7MPa로 수치해석 결과에 비해 크게 나타났으며 암반등급이 양호한 지반일수록 제안식에 의한 응력 측정은 많은 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 최종 굴착이 완료 되었을 때를 기준으로 선형터널의 굴착에 의해 중앙벽체의 응력은 그림 9와 같이 암반등급에 따라 43~82%가 발현되었으며 암반이 불량한 조건일수록 벽체의 응력증가량이 커짐을 알 수 있었다. 또한 선형터널 굴착시 작용되는 응력 분포는 선형터널 쪽으로 편향

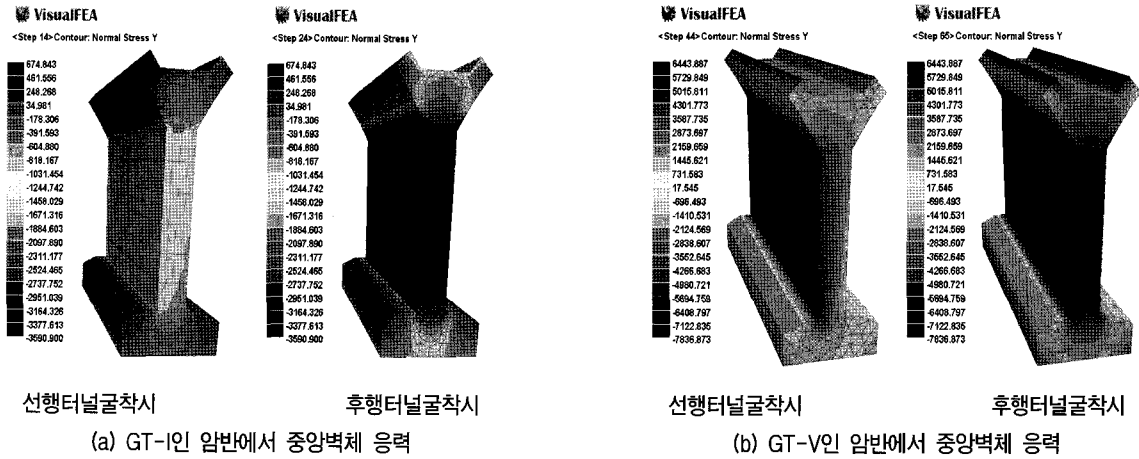


그림 10. 중앙벽체 응력 비교(토피고 20m)

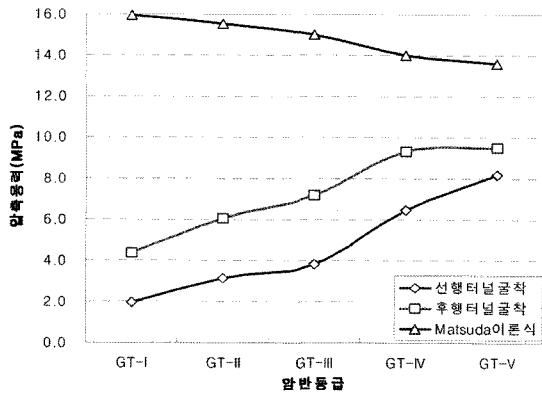


그림 11. 압축응력 비교(토피고 30m)

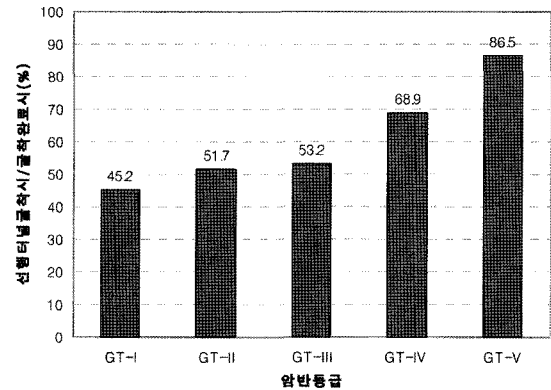


그림 12. 벽체응력 비교(토피고 30m)

되는 현상이 두드러지고 후행터널 굴착시 일정한 분포 형태를 나타내었으나 그림 10과 같이 양호한 암반에 비해 불량한 암반에서는 응력의 편측분포가 국부적으로 잔류함을 확인할 수 있었다.

4.2.3 토피고 30m인 경우 중앙벽체 거동분석 결과 토피고 30m인 경우 암반등급에 따라 중앙벽체에 작용하는 응력은 그림 11과 같이 선행터널 굴착 시 1.98~8.20MPa이 작용하였으며 후행터널 굴착 시 4.37~9.49MPa이 작용하였다. 하행터널의 굴착이 완료된 상태의 중앙벽체 응력을 Matsuda의 제안식에 의해 산정된 응력과 비교하면 13.6MPa~16.0MPa로 암반등급이 양호한 지반에서의 응력이 크게 나타났다. 최종 굴착이 완료 되었을 때를 기준으로 선행터널 굴착에 의해 중앙벽체의 응력은 그림 12와 같이 암반등급에 따라 45.2~88.5%가 발생되었으며 응력의 분포형태는 그림 13와 같이 선행터널 쪽으로 편향되게 작용 되었다. 이러한 현상은 암반조건이 불량한 지반에서 더욱 두드러지며 후행터널 굴착 시에도 중앙벽체의 응력분포가 일정하게 작용되지 않고

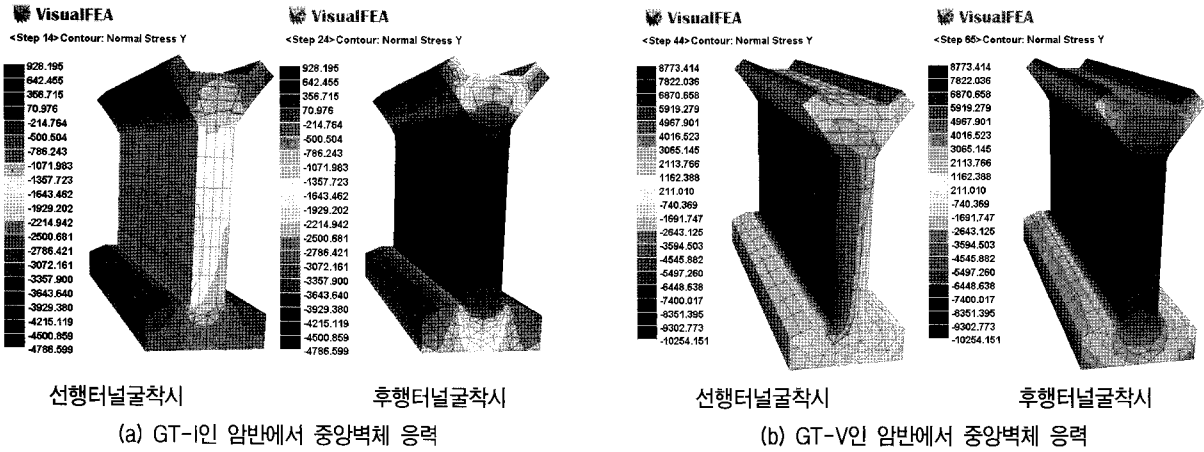
낮은 토피고의 조건에 비해 응력의 편측분포가 좀 더 넓은 범위에서 발생함을 확인할 수 있었다.

4.3 구조 해석에 의한 중앙벽체의 거동분석

2-Arch터널 굴착 시 암반등급에 따른 중앙벽체 작용하중을 지반+구조물의 수치해석을 통해 검토하였으나, 지반과 구조물 모델링 시 구성 모델이 달라 인접하는 부분에서의 인터페이스에 따른 영향으로 국부적인 하중집중을 나타내어 객관적인 판단자료로서 부적합하게 된다. 이러한 영향을 최소화 하기위해 수치해석에서 구한 중앙벽체의 변위량을 구조해석에 적용하여 중앙벽체에 작용하는 응력을 분석하였다.

4.3.1 토피고 10m인 경우 중앙벽체 거동분석 결과

토피고 10m인 경우 Matsuda의 제안식에 의한 중앙벽체 작용하중은 암반등급에 따라 3.1~3.8MN이 작용하며 이를 구조물 해석에 적용한 결과 중앙벽체에 작용하는 압축응력은 4.67~5.46MPa이 작용하였다. Matsuda의 제안식은 시공단계를 고려하지 못하므로 터널굴착 완료



(a) GT-III 인 압반에서 중앙벽체 응력

(b) GT-V 인 압반에서 중앙벽체 응력

그림 13. 중앙벽체 하중 비교(토피고 30m)

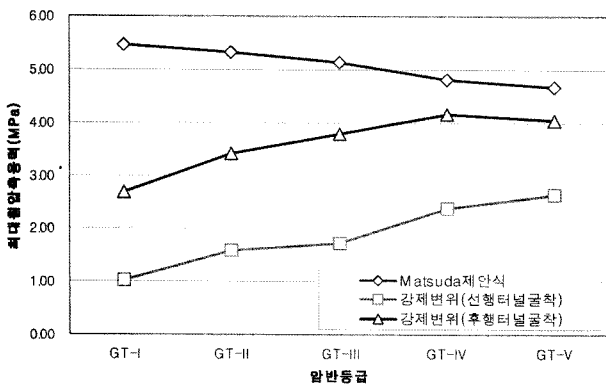


그림 14. 중앙벽체 최대압축응력(토피고 10m)

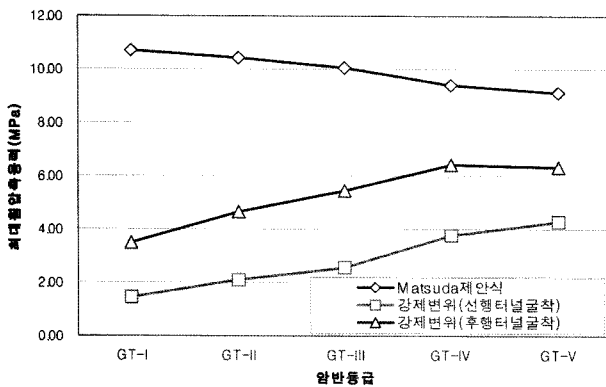


그림 15. 중앙벽체 최대압축응력(토피고 20m)

시 중앙벽체에 작용하는 응력만을 나타내었다. 지반과 구조물의 복합모델링을 통해 시공단계별로 구조물에 작용하는 변위량을 구조해석에 반영하여 선행터널 굴착단계와 후행터널 굴착단계에 발생하는 응력을 구하였으며 중앙벽체의 발생응력은 그림 14와 같이 선행터널 굴착 시 1.03~2.63MPa, 후행터널 굴착 시 2.69~4.03MPa 이 작용하였다. Matsuda의 제안식으로 구한 중앙벽체의 응력과 비교하면 제안식은 암반등급이 양호한 지반에

서 2.0배정도 크게 산정되고 있음을 알 수 있었다.

변위량에 의해 산정된 결과는 Matsuda의 제안식에 의한 중앙벽체 응력의 49~86%에 해당하며 양호한 암반에서 더욱 감소하는 것으로 나타났다.

4.3.2 토피고 20m인 경우 중앙벽체 거동분석 결과

구조해석 결과 토피고 20m인 경우 Matsuda의 제안식에 의한 중앙벽체 응력은 그림 15와 같이 암반등급에 따라 9.12~10.71MPa이 작용하였다. 강제변위에 의한 중앙벽체의 발생응력은 선행터널 굴착 시 1.45~4.27MPa이 작용하였으며 후행터널 굴착 시 3.48~6.40MPa이 작용하였다. Matsuda의 제안식으로 구한 중앙벽체의 응력과 비교하면 제안식은 암반등급이 양호한 지반에서 3.08배정도 크게 산정되었고 강제변위법에 의해 산정된 결과는 Matsuda의 제안식에 의한 중앙벽체 응력의 38~69%에 해당하며 양호한 암반에서 더욱 감소하는 것으로 나타났다.

4.3.3 토피고 30m인 경우 중앙벽체 거동분석 결과

구조해석 결과 토피고 30m인 경우 Matsuda의 제안식에 의한 중앙벽체 응력은 그림 16과 같이 암반등급에 따라 13.57~15.95MPa이 작용하였다. 강제변위에 의한 중앙벽체의 발생응력은 선행터널 굴착 시 1.90~5.28MPa이 작용하였으며 후행터널 굴착 시 4.38~7.84MPa이 작용하였다. Matsuda의 제안식으로 구한 중앙벽체의 응력과 비교하면 제안식은 암반등급이 양호한 지반에서 3.64배정도 크게 산정되었고, 강제변위법에 의해 산정된 결과는 Matsuda의 제안식에 의한 중앙벽체 응력의 27~58%에 해당되며 양호한 암반에서 더욱 감소하는 것으로 나타났다.

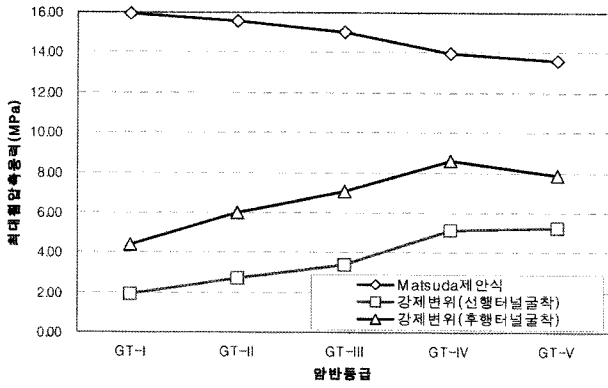


그림 16. 중앙벽체 최대압축응력 비교(토피고 30m)

4.4 하중감소계수(α)의 중앙 벽체 적용에 대한 적정성 검토

4.4.1 하중감소계수의 산정

Matsuda의 제안식에 의한 중앙벽체의 응력은 표 5와 같이 산정되었으며 암반이 양호할수록 작용하중은 증가하는 것으로 나타났다. 이와는 반대로 지반과 구조물의 연속체 해석결과 양호한 지반에서 중앙벽체의 응력은 최대 73%의 감소를 보였다.

이는 제안식에서 단위중량(γ)의 항목이 양호한 지반일수록 커지게 되고 제안식이 불량한 지반에 국한된 경험식으로 양호한 지반의 지반 특성을 반영하지 못하기 때문으로 판단된다.

따라서 연속체해석을 통해 지반 특성이 잘 반영되도록 모델링하여 수치해석을 수행하고 중앙벽체의 변위량을 하중으로 적용하여 구조 해석한 결과는 표 6과 같이 강제변위에 의한 중앙벽체 응력검토는 변위량과 작용응력을 시공단계별로 구할 수 있으므로 시공단계에 따른 구조물의 거동과 시공 중 중앙벽체에 불리하게 작용하는 요소 분석이 용이함을 알 수 있었다. 해석조건에 따라서 선형 굴착 터널과 후행 굴착터널의 지보재를 일원화 또는 이원화한 해석결과 중앙벽체에 작용되는 응력은 거의 유사한 경향을 나타내므로 실제 설계에 반영한 이원화된 지보재의 해석결과를 제안식과의 중앙벽체 응력 비교에 적용하였다.

지반+구조물해석 결과는 구성 모델에 의한 국부적인 응력집중으로 인해 객관적인 근거로서 부족하다고 판단되어 배제하고 강제변위에 의한 결과와 제안식을 조합하여 하중감소계수(α)를 제안하였다. 이로써 암반등급별 토피고에 따른 하중감소계수(α)를 Matsuda의 제안식에 적용하여 지반+구조물의 상호거동을 과다하지 않

표 5. Matsuda 제안식 및 수치해석에 의한 중앙벽체 응력

구 분	Matsuda 제안식에 의한 중앙벽체 압축응력 (MPa)	지반+구조물 수치해석에 의한 중앙벽체 압축응력 (MPa)
GT-I	10m	2.66
	20m	3.46
	30m	4.37
GT-II	10m	3.45
	20m	4.72
	30m	6.04
GT-III	10m	3.86
	20m	5.54
	30m	7.19
GT-IV	10m	4.52
	20m	7.00
	30m	9.34
GT-V	10m	4.57
	20m	7.21
	30m	9.49

표 6. 구조해석(강제변위)에 의한 중앙벽체 응력

구 분	Matsuda 제안식에 의한 중앙벽체 압축응력(MPa)	구조해석에 의한 중앙벽체 압축응력(MPa)	
		일원화	이원화
GT-I	10m	2.69	2.69
	20m	3.48	3.48
	30m	4.39	4.38
GT-II	10m	3.43	3.42
	20m	4.67	4.66
	30m	5.98	5.97
GT-III	10m	3.80	3.79
	20m	5.43	5.42
	30m	7.06	7.05
GT-IV	10m	4.15	4.15
	20m	6.41	6.40
	30m	8.58	8.56
GT-V	10m	4.01	4.03
	20m	6.35	6.33
	30m	7.82	7.84

고 지반의 특성을 잘 반영한 중앙벽체 작용하중을 간략한 식으로 구할 수 있도록 하였다. 토피고에 따른 하중감소계수(α)를 정리하면 표 7과 같다.

4.4.2 하중감소계수 적용의 적정성 검토

Matsuda의 제안식과 구조해석을 통해 산정된 하중감소계수의 적정성을 검토하기 위해 하중감소계수(α)가 적용된 제안식과 강제변위법에 의한 중앙벽체의 응력을 비교한 결과는 그림 17과 같다.

표 7. 하중감소계수(α)의 산정

암반등급	토포고	중앙벽체 압축응력(MPa)			감소계수 (α)
		Matsuda 제안식	지반+ 구조물해석	강제변위법	
GT-I	10m	5.46	2.66	2.69	0.49
	20m	10.71	3.46	3.48	0.32
	30m	15.95	4.37	4.38	0.27
GT-II	10m	5.33	3.45	3.42	0.64
	20m	10.44	4.72	4.66	0.45
	30m	15.56	6.04	5.97	0.38
GT-III	10m	5.14	3.86	3.79	0.74
	20m	10.06	5.54	5.42	0.54
	30m	14.99	7.19	7.05	0.47
GT-IV	10m	4.81	4.52	4.15	0.86
	20m	9.40	7.00	6.40	0.68
	30m	13.98	9.34	8.56	0.61
GT-V	10m	4.67	4.57	4.03	0.86
	20m	9.12	7.21	6.33	0.69
	30m	13.57	9.49	7.84	0.58

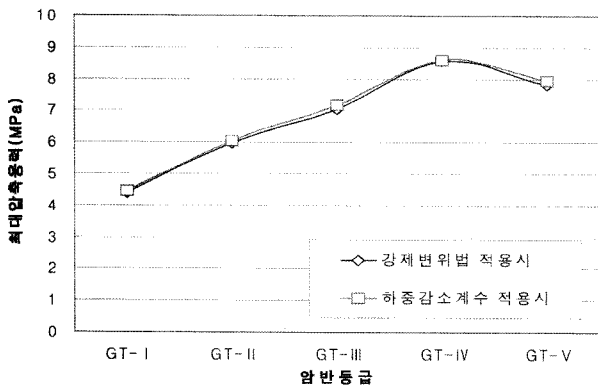


그림 17. 중앙벽체 최대압축응력 비교(토포고 30m)

하중감소계수의 적정성에 대한 검증을 위해 하중감소계수가 적용된 제안식과 강제변위법에 대해 토포고와 암반등급별로 구조해석을 수행하여 중앙벽체의 응력을 검토한 결과 98%이상 일치하는 것으로 분석되었다. 따라서 제안식에 적용된 하중감소계수는 수치해석 결과와 높은 상관성을 보이므로 적정한 것으로 판단된다.

이를 통해 Matsuda의 제안식에 하중감소계수를 적용하여 중앙벽체의 단면설계에 적용되는 작용하중을 간편하게 구할 수 있었다.

4.4.2 암반등급에 따른 하중감소계수 제안

암반등급 및 토포고에 따른 하중감소계수는 그림 18과 같으며 토포고와 지반특성을 알면 추세를 통해 하중감소계수를 찾고, 이를 제안식에 적용해 중앙벽체에 작용하는 하중을 간략히 산정할 수 있다.

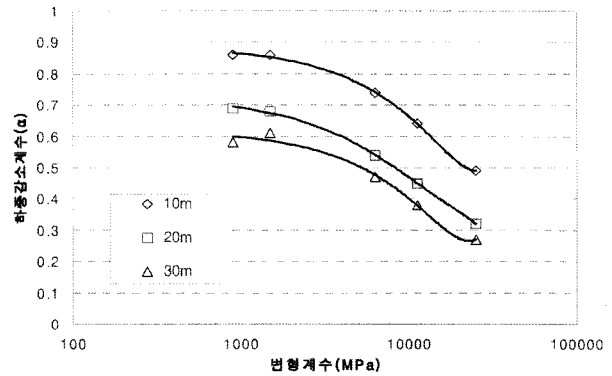


그림 18. 하중감소계수 변화 추이

지금까지의 결과에서 알 수 있듯이, Matsuda의 제안식은 불량한 지반에 국한되어 적용된 것으로 지반조건이 양호한 암반에 적용될 경우 단위중량(γ)의 값이 커지게 되어 벽체에 작용하는 하중이 커지게 된다. 이는 일반적으로 지반조건이 양호할수록 이완하중이 감소한다는 이론과 모순되므로 적용성이 크게 떨어지게 된다. 따라서 이러한 모순을 해결하기 위해 수치해석을 통한 벽체의 작용 하중을 찾아 Matsuda의 제안식에 지반에 따른 하중감소계수(α)를 적용하는 것이 적절한 것으로 판단되며 중앙벽체의 구조 검토 시 간단한 해법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 불량한 지반에 국한된 Matsuda의 제안식을 양호한 지반에서도 적용이 가능하도록 연속체 해석을 수행하여 암반등급에 따른 하중감소계수 (α)를 제안하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) Matsuda의 제안식은 시공 중 중앙벽체에 작용하는 하중을 구할 수 없으므로 수치해석을 통해 시공 중 중앙벽체의 작용하중을 검토하였다. 중앙벽체 시공 후 선행터널 굴착으로 인해 중앙벽체는 편측으로 응력이 집중되는 현상을 보였고 터널 굴착 완료후의 중앙벽체 응력과 비교해 암반이 불량한 경우 토포고 10m일 때 최대 79.4%, 토포고 20m일 때 최대 82%, 토포고 30m일 때 최대 86.5%의 응력이 불균등하게 발현되었다.
- 2) 선행터널 시공 후 벽체의 자립시간이 길어짐에 따라 중앙벽체에 불평형력이 장기적으로 발생되므로 변형과 손상의 원인이 될 수 있다. 그러므로 선행터널

시공 후 후행터널의 빠른 굴착으로 터널을 폐합하여 중앙벽체의 장기적인 안정성을 확보해야 할 것으로 사료된다.

- 3) 상부의 이완하중을 축력으로 지지하는 중앙벽체의 설계는 일반적으로 축력에 대한 설계가 주를 이루었으나 시공순서를 반영한 수치해석 결과 선행터널 굴착 시 거더부에 모멘트가 발생하게 되므로 중앙벽체의 편측에 압축응력이 집중되었다. 따라서 시공 중 빠른 폐합으로 모멘트 발생을 억제하고 중앙벽체 설계 시 철근보강을 통해 발생하는 불평형력에 최대한 저항할 수 있는 설계가 필요할 것으로 사료된다.
- 4) 실제 설계에 반영한 선행굴착 터널과 후행굴착 터널의 지보재를 이원화한 경우에 지보재를 동일하게 적용한 결과를 비교하면, 중앙벽체의 작용응력은 거의 유사하므로 중앙벽체의 안정성에 크게 기여하지 않는 것으로 나타났다. 반면에 수치해석결과 지보재 이원화 시 선행터널과 후행터널의 지보재에 작용하는 응력이 10%의 감소하였으므로 불량한 지반에서 터널의 안정성 확보를 위해서는 이원화를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.
- 5) 주변지반 특성에 따른 중앙벽체 작용하중을 수치해석으로 검토한 결과 14~83%의 하중 감소가 가능한 것으로 나타났다. 이 감소량을 하중감소계수(α)로 정의하고, Matsuda의 제안식에 적용하여 토피고 10m

에서 0.49~0.86, 토피고 20m에서 0.32~0.69, 토피고 30m에서 0.27~0.58을 구조물 설계 시 반영하였다. 하중감소계수를 제안식에 적용하여 작용하중을 산정한 결과 98.6%의 정확도를 보였다.

참 고 문 헌

1. 김상균, 김태혁, 이인모 (2003), "2-Arch 도로터널 설계 및 시공 개선방안 고찰", *한국터널공학회지*, pp.29-38.
2. 박동욱 (2003), *도로터널에서 2-Arch 터널의 적용성과 문제점 개선사항에 대한 연구*, 한양대학교 석사학위 논문, pp.4-14.
3. 왕이완 (2001), "도로에서 2-Arch 터널의 적용성", *대한터널협회 정기학술발표회*, pp.141-152.
4. 이상덕, 전은숙 (2003), "사질토 지반에서 2-Arch 터널의 거동", *한국터널공학회 논문집*, Vol. 6, No. 2, pp.171-182.
5. E. Soliman, H. Duddeck and H. Ahrens (1993), "Two and Three-dimensional Analysis of Closely Spaced Double-tube Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No. 1, pp.13-18.
6. M. Kamimura (1997), "Discussion on the behaviors of parallel tunnel with a small clearance", *28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress*, pp.898-906.
7. T. Addenbrooke and D. Potts (2001), "Twin Tunnel Interaction : Surface and Subsurface Effects", *The International Journal of Geomechanics*, Vol. 1, No. 2, pp.249-271.
8. T. Matsuda, K. Terada, M. Igarashi and K. Miura (1998), "Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground", *Tunnels and Metropolises*, pp.1193-1198.

(접수일자 2007. 1. 17, 심사완료일 2007. 11. 1)