

시공과정 및 현장계측을 고려한 NATM 터널의 수치해석적 연구

박춘식^{1)*}, 강만호²⁾

A Study on the Numerical Analysis of A NATM Tunnel with Consideration of Construction Procedure and Field Measurement

Choon-Sik Park, Man-Ho Kang

Abstract In order to investigate the tendency of general displacements and behaviors with respect to each construction process as well as the applicability of numerical analysis schemes, this research has focused on not only analyzing a variety of field observations made in a NATM tunnel, such as displacement of top and side, stress of shotcrete and axial strength of rock bolt, but also carrying out a series of numerical analyses. It was established from the investigation that the 2-dimensional continuum numerical analysis was the one which could more accurately predict displacement of crown and side in the area of one step excavation (patten, P1-P3), while the 2-dimensional discontinuum analysis was the most suitable scheme to study that of two step excavation (patten, P4-P6). In addition, the 2-dimensional continuum analysis enabled to appropriately predict the axial strength of rock bolt and stress of shotcrete in all the area of the tunnel. Finally, it has been possible to conclude from the study that the 3-dimensional continuum analysis should be applied to inspect the behavior and tendency with respect to each stage of the construction as well as in the case of joints, such as large turnouts where relaxation loads in both of horizontal and vertical direction are piled up.

Key words NATM tunnel, Continuum and dis-continuum analysis, Displacement, Shotcrete, Rock-bolt

초 록 본 연구는 NATM 터널의 천단변위, 내공변위, 슛크리트 응력, 록볼트 축력 등의 현장 계측치를 분석하고, 2D-3D 연속체 수치해석 및 2D 불연속체-불연속면 변형 해석을 실시, 그 결과를 비교-검토하여 각 구간의 시공과정에 따른 전반적인 변위와 거동의 경향성 및 수치해석적 접근의 적용성을 검토하고자 하였다. 그 결과 전단면 굴착 구간(지보패턴 P1~P3)에서 터널의 천단 및 내공변위를 예측하고자 할 시에는 2D 연속체 수치해석만으로도 가능하나, 상하 반단면 구간(지보패턴 P4~P6)에서 터널의 천단 및 내공변위를 예측하고자 할 시에는 반드시 2D 불연속 수치해석을 수행하여야 한다. 한편, 2D 연속체 수치해석만으로도 전 구간에 대한 터널 내 슛크리트 응력 및 록볼트 축력의 예측이 가능하다. 그리고 시공 단계에 따른 거동 및 경향성을 확인하고자 할 시에는 3D 연속체 수치해석을 수행하여야 하며, 대형 대피소 등의 접속부의 경우도 반드시 3D 연속체 수치해석을 수행하여야 한다.

핵심어 NATM 터널, 연속체 및 불연속체 해석, 변위, 슛크리트, 락볼트

1. 서 론

NATM 터널 수치해석을 통해 변위와 거동 특성에 대한 연구 및 해석 결과와 현장 계측 결과의 비교-검토에

대한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 현재 NATM 터널의 수치해석은 2D 연속체 수치해석의 하중분담을 산정을 통해 선정된 하중분담율을 적용하여 Civildini et al.(1991)가 제안한 연속체 역학을 바탕으로 하는 유한요소법(FEM) 및 유한차분법(FDM) 등을 이용한 2D 연속체 수치해석 결과를 현장의 계측치와 비교분석하여 터널의 안정성과 터널 변위 및 거동을 예측하는 연구가 주류를 이루고 있다. 한편 암반의 불연속면의 특징인 절리를 직접 고려하는 방법으로 해석대상을 불연속체로 고려하

¹⁾ 국립창원대학교 공과대학 토목공학과 교수

²⁾ SK건설(주) 부장

* 교신저자 : pcs@changwon.ac.kr

접수일 : 2010년 1월 6일

심사 완료일 : 2010년 2월 22일

게재 확정일 : 2010년 2월 23일

는 Cundall(1987)이 제안한 불연속체 개념의 개별요소법 (DEM)을 이용한 불연속체 해석 등이 점진적으로 수행되고 있다.

터널 수치해석과 실측치 평가에 의한 터널 거동 조사에 관한 연구에서 편토압을 받는 비교적 토피고가 낮은 터널의 단면에 대해 2D ABAQUS 해석과 2D FLAC의 연속체 해석을 수행하여 두 모델의 연속체 2D 수치해석과 계측치의 비교 결과 해석 단계별 변화의 양상은 실제와 일치하고 있으나 계측치의 결과와 많은 차이가 있음을 보였다(윤호중, 2003).

또한, Barton-Bandis joint 모델(Barton, N. and Bandies, S.C., 1990)을 활용한 절리암반 내에 굴착되는 터널 안정성의 수치해석적 연구에서 Mohr-Coulomb 모델은 실제 절리의 변형거동 특성을 현실적으로 묘사할 수 없으며, 특히 절리면의 전단거동에 무관하게 팽창각을 일정한 상수로 취급하는 Mohr-Coulomb 모델의 특성으로 인해 불연속체 해석 시 Barton-Bandis joint 모델을 사용하는 것이 적절하다고 하였다(이성기, 2000).

불연속체 암반의 경우 개개의 불연속면을 모델링하는 명시적 모델링으로 Cundall(1987)이 제안한 불연속체 개념의 개별요소법(DEM)을 적용하는 연구 사례가 있으며, 다수의 절리가 존재하는 경우에는 역학적 거동에 있어 연속체로서의 거동을 나타내므로 암시적 모델링으로써 Carter와 Alehossein(1990)이 제안한 비등방 모델 혹은 Pande(1993)가 제안한 모델을 이용한 의사연속체로서의 적용 연구사례가 발표된 바 있다.

이에 본 연구는 하중분담율을 적절히 적용한 2D 연속체 해석과 실제 현장의 시공과정을 표현 할 수 있는 3D 연속체 해석을 수행하였고, 그 결과를 현장 계측 결과와 비교·검토하였다. 연구 대상은 2개소의 NATM터널이며 각 터널은 크게 전단면 굴착 지보패턴인 P1~P3 패턴과 상하 반단면 굴착 지보패턴인 P4~P6 패턴으로 나눌 수 있다. 위 2개소 터널에 대해 산정된 해석영역과 하중분담율을 각 구간 지보패턴에 적용하여 2D·3D 연속체 해석을 수행하였으며, 그 결과를 터널 내 천단변위, 내공변위, 슛크리트 응력, 록볼트 축력 등 현장계측치와 비교·검토함으로써 실제 터널 거동과의 경향성과 그 적용성을 검토하였다. 또한 본선터널 접속부인 대형 대피소 구간에 대하여 실제 시공과정을 고려한 3D 연속체 해석을 수행하였으며, 그 결과 또한 현장 계측치와 비교하여 접속부에서의 변위와 거동을 검토하였다. 터널 각 구간에 대한 2D·3D 연속체 해석 결과와 현장 계측치를 비교·검토한 결과로부터 필요 구간에 대해 2D 불연속체 수치해석 및 불연속체 변형 해석을 추가 수행하였으며, 그 결과를 검토하여 NATM 터널 전 구간에 대한 전반적인 변위와

거동의 경향성과 수치해석적 접근의 적용성을 검토하고자 하였다.

2. 터널의 연속 · 불연속체 수치해석

암반은 일반적으로 절리(Joint), 단층(Fault), 층리(Bedding Plane), 균열(Crack) 등과 같은 불연속면을 포함하기 때문에 연속체보다는 불연속체 거동특성을 보인다. 절리암반의 수치해석방법으로는 절리를 불연속면으로서 직접 고려하는 방법(Civildini et al., 1991)과 물성보정을 통해 간접적으로 고려하는 방법이 있다(Cundall, 1987). 연속체 모델기법과 불연속체 해석기법은 불연속암반의 특성에 따라 적절하게 선택하여야 한다.

본 연구의 대상인 터널 각 구간에 적용된 지보패턴 P1~P6의 경우 2D·3D 연속체 해석 시 Mohr-Coulomb Model을 적용하여 전 구간에 대해 연속체 해석을 수행하였다. 지보패턴 P4~P6의 적절한 해석을 위하여 2D 불연속체 해석을 추가 수행하였다. 2D 불연속체 해석에서는 절리 거동에 대한 현실적인 모사가 가능한 Barton-Bandis Joint Model을 적용하였으며, 불연속체 해석 결과의 신뢰도 향상을 위하여 변형에 대해 불연속면 변형해석(DDA, Discontinuum Deformation Analysis)을 추가 수행하여 그 결과를 비교·검토 하였다.

3. 터널 현황 및 물성 결정

3.1 대상 터널의 단면

본 연구의 대상 터널은 NATM 공법이 적용된 최대 토피고 403 m, 평균 토피고 250 m인 연장 3,730 m의 A 터널과 최대 토피고 215 m, 평균 토피고 100 m인 연장 3,716 m의 B터널의 2개소이다. 본 터널은 경전선 고속전철 공사를 위해 시공 중인 터널이다. A·B터널은 최대 폭이 11,120 mm, 높이 8,400 mm인 말굽형 터널로써, 단면은 그림 1과 같다.

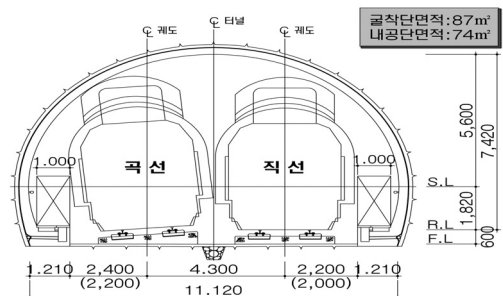


그림 1. 대상터널의 단면 (mm)

3.2 암반분류에 의한 암반등급과 지보패턴

A-B 터널은 서로 인접한 곳에 위치한 터널로써 그 지질과 지형 및 암질의 종류가 매우 유사하여 연속체불연속체 해석을 위한 물성치를 함께 적용하였다. 본 연구 대상 터널 암반등급 적용 기준은 표 1과 같으며, 본 연구에 사용된 지보패턴은 표 2와 같다.

3.3 수치 해석을 위한 물성치 산정

먼저 기존 경험치, 암반분류추정치치를 통해 초기추정치치를 산정하고, 현장조사 및 실내 시험값을 통해 최대 우도

값을 산정한다. 이 최대 우도값에 대해 초기추정치, 최대 우도값의 신뢰성을 확보하기 위하여 Monte Carlo Simulation을 통한 신뢰구간을 선정한다. Bayesian Approach를 통한 지반 물성치 산정과 확률통계적 방법에 의해 지반 물성치를 산정한다. 이와 같이 산정된 A-B 터널의 수치 해석을 위한 지반등급별 물성치는 아래 표 3과 같으며, 지보재의 물성치는 ‘터널수치해석과 실측치 평가에 의한 터널거동 조사에 관한 연구(윤호중, 2003)’을 참고하였으며, 표 4와 같다.

표 1. 터널 암반등급 적용기준

구 분		I	II	III	IV	V
RMR		81~100	61~80	41~60	21~40	20이하
RQD	화강암	71이상	61~70	41~60	21~40	20이하
Q-system		30.0이상	20.0~30.0	10.0~20.0	1.0~10.0	1.0이하
RQD	안산암	71이상	51~70	41~50	21~40	20이하
Q-system		25.0이상	15.0~25.0	10.0~15.0	1.0~10.0	1.0이하

표 2. 터널의 연속체 해석을 위한 지보 패턴

구 분	P1	P2	P3	P4	P5	P6
굴착공법	전단면	전단면	전단면	상하분할	상하분할	상하분할
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	20이하	20이하
Q-System	60이상	60-10	10-1	1-0.1	0.1이하	0.1이하
상반굴진장(m)	3.5	2.5	2.0	1.5	1.2	1.0
숏크리트두께(cm)	5(일반)	5(강섬유)	8(강섬유)	12(강섬유)	16(강섬유)	20(강섬유)
록볼트길이(m)	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0
록볼트중간격(m)	RANDOM	2.5	2.0	1.5	1.2	1.0
록볼트횡간격(m)	RANDOM	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5

표 3. 터널의 연속체 해석을 위한 물성치

구 분	I	II	III	IV	V
단위중량(KN/m ³)	28	26	25	22	20
변형계수(MPa)	20,000	12,000	8,000	1,000	300
점착력(MPa)	5.0	2.0	0.80	0.15	0.03
내부마찰각(°)	47.0	42.0	38.0	34.0	31.0
포아송비	0.20	0.22	0.23	0.25	0.30

표 4. 터널 지보재의 물성

구 분	연한숏크리트	굳은숏크리트	록볼트
단위중량 (KN/m ³)	25	25	78.5
탄성계수 (MPa)	5.0×10 ³	1.5×10 ⁴	2.0×10 ⁵
포아송비	0.2	0.2	-
규 격	-	-	D25

3.4 해석영역 산정

터널해석 수행 시 해석영역 및 경계조건의 설정은 해석 결과의 신뢰성에 상당한 영향을 미친다. 특히 해석영역이 너무 작거나 경계면이 굴착면에 인접할 경우 터널거동이 실제와 달라질 수 있으므로 해석시간의 효율성과 해석결과 신뢰성 확보를 위한 합리적인 해석영역 산정이 필요하다. 따라서 기존 해석사례 참조와 매개변수 해석을 수행하여 합리적인 해석영역 및 경계조건을 설정하여야 한다. 일반적으로 터널중심으로부터 약 4D 이상 이격된 영역은 굴착으로 인한 영향이 미미한 것으로 나타난다(윤호중, 2003). 따라서 본 구간 해석 영역은 수평방향 4~5D, 터널하부 3~4D로 설정함으로써 경계조건에 의한 해석결과의 오류를 배제함으로써 해석결과의 신뢰도를 향상 시킬 것으로 사료된다.

3.5 2차원 해석을 위한 하중분담율 결정

2차원 해석 결과로부터 3차원 해석효과를 얻기 위해 해석단계별 종방향 아칭효과를 고려한 하중분담율을 적용하고 있으나 하중분담율에 대해 정량적 기준 없이 주로

설계자의 경험에 의존하고 있다. 본 연구에서는 하중분담율 산정식(유영현과 배규진, 1997)을 이용하여 계산한 하중분담율을 적용하였고, 적용한 하중분담율을 표 5에 나타내었다.

4. 터널의 계측

계측의 목적은 터널굴착에 따른 주변지반의 움직임과 각 지보부재의 효과를 파악하여 공사의 안정성 및 경제성을 확보하는데 있다. NATM 터널은 시공 시에 시공의 원만함과 안전을 위하여 현장계측을 실시하는데 본 연구에서는 일반적인 NATM 터널과 동일하게 계측하였다(한국지반공학회, 2001, 한국터널공학회, 2002). 계측기간은 2005년 11월부터 2007년 11월까지이며, 계측기 종류 및 계측항목은 표 6과 같다.

5. A·B 터널 연속체 해석 결과 및 고찰

본 연구는 앞서 언급한 바와 같이 터널 전 구간 P1~P6

표 5. A·B 터널 적용 하중분담율

지보패턴	구 분	적용 하중분담율		
		굴착	연한 슛크리트	굳은 슛크리트
P 1		80%	10%	10%
P 2		70%	15%	15%
P 3		60%	20%	20%
P 4		50%	25%	25%
P 5, 6		40%	30%	30%
Ring Cut		30%	35%	35%

표 6. 계측항목 및 수량

		계 측 항 목	설치수량
터널내	일상계측	내공변위계	256
		천단침하계	107
	주요계측 (대표단면)	지중변위계	16
		스틁크리트응력계	16
		락볼트축력계	15
	대형대피소	천단침하계	7
		내공변위계	14
		락볼트축력계	9
		스틁크리트응력계	9
		지중변위계	9
	영구계측	라이닝응력계	4
		간극수압계	4

에 대해 검토하였다. 터널의 전단면 굴착 구간의 심도가 비교적 깊어 암질이 균질하고 연속체에 가까운 지보패턴 P1~P3에 대한 연속체 수치해석결과와 계측결과를 불연속체해석 결과와 비교하여 표 7에 정리 하였다.

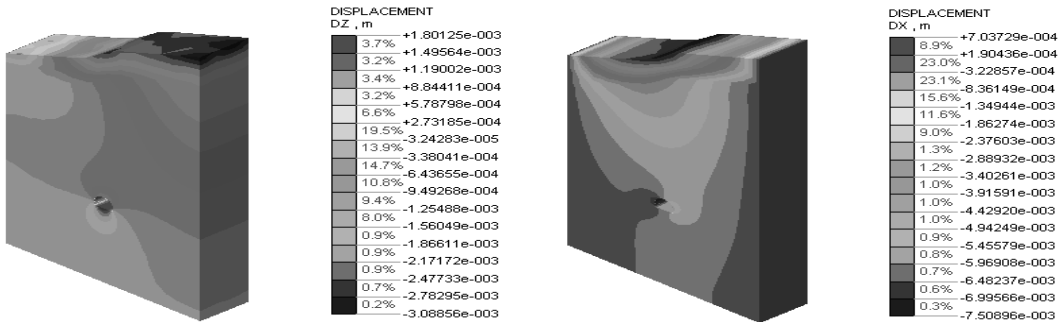
5.1 A 터널 지보패턴 P3 (전단면 굴착)

지보패턴 P3의 해석 조건은 전단면 굴착이며, 1회 굴진 장 2.0 m, 슛크리트 두께 8.0 cm, 록볼트 4.0 m×11개(중방향 2.0 m, 횡방향 2.0 m)의 간격이다. 시공단계를 고려한 전단면 굴착의 경우 먼저 막장면에 대한 압판정을 실시하고, 굴진 해당 막장면 천공을 실시한다. 그 다음으로

해당 막장면 이전 막장면의 록볼트 설치를 위해 록볼트 천공과 록볼트를 설치한 후 해당 막장면 장약 장전 및 발파를 실시한다. 해당 막장면이 굴착이 되면 슛크리트를 타설하고 보강 슛크리트 타설 후 다음 막장 굴진의 순서이다. 이와 같은 실제 시공의 단계를 최대한 반영하기 위해 유한요소해석에서의 Construction Step을 산정하였으며, 전단면 굴착의 경우 원지반 상태를 고려한 초기응력 상태를 형성한 후, 전단면 터널 굴착단계 후 이전 막장에 슛크리트 시공 및 록볼트 시공단계를 거쳐 슛크리트 경화의 단계로 정의하였다. 이를 바탕으로 도출되어진 3D 연속체수치해석 결과는 그림 2와 같다.

표 7. A·B터널 전구간에 대한 연속체-불연속체 수치해석 결과 및 현장계측 결과

구 분		대상터널 및 지보패턴		A 터널					B 터널					비 고
				P1	P2	P3	P4	P6*	P1	P2	P3	P4	P5	
천 단 변위량 (mm)	연 속 체 해 석	2D	6.132	0.903	1.554	0.842	0.287	2.188	1.980	1.128	0.350	0.925		
		3D	5.888	0.868	1.508	0.777	0.261	1.928	1.946	1.088	0.318	0.822		
	불연속체 해 석	UDEC	-	-	-	4.149	2.286	-	-	-	2.610	2.024		
		DDA	-	-	-	6.530	5.722	-	-	-	12.800	4.106		
	계 측 치		3	2	1	5	12	3	5	3	5	15		
내 공 변위량 (mm)	연 속 체 해 석	2D	6.595	1.162	1.793	0.704	0.235	2.706	2.330	1.333	0.440	0.640		
		3D	6.350	1.144	1.747	0.681	0.234	3.427	2.288	1.315	0.431	0.633		
	불연속체 해 석	UDEC	-	-	-	3.620	1.301	-	-	-	7.930	2.700		
		DDA	-	-	-	9.940	9.090	-	-	-	8.490	7.560		
	계 측 치		3	3	1	13	11	3	3	3	6	14		
스 크 리 트 최 대 응 력 (Mps)	연 속 체 해 석	2D	1.68	0.966	0.850	0.48	0.243	1.341	1.762	0.703	0.42	0.592		
		3D	2.78	1.562	0.966	0.529	0.302	2.747	2.876	0.91	0.47	0.621		
	불연속체 해 석	UDEC	-	-	-	7.695	3.021	-	-	-	6.234	4.90		
		DDA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	계 측 치		-	-	0.798	0.608	0.294	-	-	0.945	0.588	0.841		
록 볼 트 최 대 축 (KN)	연 속 체 해 석	2D	-	3.08	6.74	3.38	1.55	-	7.06	4.93	2.19	3.17		
		3D	-	3.03	6.92	3.22	1.17	-	9.10	4.43	1.69	3.29		
	불연속체 해 석	UDEC	-	-	-	57.04	53.71	-	-	-	4.161	7.329		
		DDA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	계 측 치		-	-	4.25	2.49	1.38	-	-	4.46	1.80	3.08		



(a) A터널 지보패턴 P3 3D 전단변위 해석 결과

(b) A터널 지보패턴 P3 3D 내공변위 해석 결과

그림 2. A터널 지보패턴 P3의 3D 해석 결과

실제 터널에서의 계측결과를 수치해석의 시공단계에 최대한 반영하였으며, 첫 막장의 굴착을 실시한 시점과 유한요소해석 시 첫 막장의 굴착시의 단계를 일치시켜 결과를 산출하였다. 그러나 계측결과는 매 굴착시마다 이루어지는 것이 아니므로 유한요소해석에서 나타난 단계보다 적은 수의 관측결과로 이루어져 있으며, 실제계측 결과를 유한요소해석의 단계와 최대한 일치하려고 노력하였다. 그 결과는 그림 3과 같다.

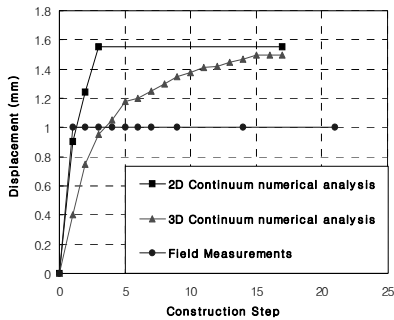
P1의 경우 P2와 P3의 경우보다 굴진장이 깊어 큰 하중이 발생하여 P1패턴의 경우가 P2~P3의 경우보다 천단변위 및 내공변위가 크게 발생하지만, 심도가 깊고 암질이 균질하며 연속체에 가까운 구간인 P1~P3의 천단내공 변위는 2D 연속체 수치해석 결과와 3D 연속체 수치해석 결과가 근접한 값을 보이며 또한 현장 계측의 결과 P4~P6의 경우보다 유사한 값을 보였다. 연속체에 가까운 본 구간의 슛크리트 응력은 선행 막장의 이완하중이 후행 막장으로 일부 전달되어 중방향 굴진에 대한 영향이 반영된 3D 연속체 수치해석의 결과가 2D 수치해석 결과보다 큰 값을 보였다. 록볼트 축력은 2D·3D 연속체 수치해석의 결과값이 서로 유사하게 나타났다.

천단면 굴착인 본 구간의 천단·내공 변위는 3D 연속

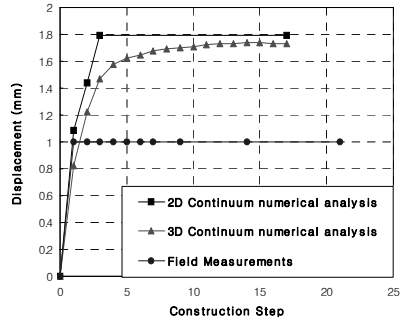
체 수치해석 결과와 현장 계측의 결과가 동일하게 터널의 최초 굴착 단계에서부터 꾸준히 증가하여 막장면과 임의 이격 거리 이후 점차 수렴하는 경향을 보이며, 슛크리트 응력과 록볼트 축력 또한 시공 단계가 진행되어 막장면과 임의 이격 거리 이후 점차 수렴하는 경향을 보인다. 이와 같은 경향들은 암질이 균질하고 연속체에 가까운 지보패턴 P1~P3와 유사한 경우에 P4~P6와 같은 경우보다 2D와 3D해석이 모두 유사하게 나타났다.

5.2 A 터널 지보패턴 P4 (상·하 단면 굴착)

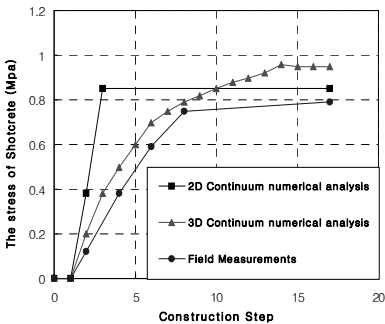
지보패턴 P4구간의 해석 조건은 1회 굴진장 1.5 m, 슛크리트 두께 12.0 cm, 록볼트 4.0 m×15개(중방향 1.5 m, 횡방향 1.5 m)의 간격이다. 시공단계를 고려한 상·하 반단면의 경우 먼저 막장면에 대한 압판정을 실시하고, 굴진 해당 막장면 천공을 실시한다. 그 다음으로 해당 막장면 이전 막장면의 록볼트 설치를 위해 록볼트 천공과 록볼트를 설치한 후 해당 막장면 장약 장전 및 발파를 실시한다. 해당 막장면이 굴착이 되면 슛크리트를 타설하고 보강 슛크리트 타설 후 다음 막장 굴진의 순서이다. 이를 반복적으로 상부 반단면 굴진 완료 되면 하부반단면 굴진을 실시하며 그 시공순서는 동일 작업 반복이다. 연



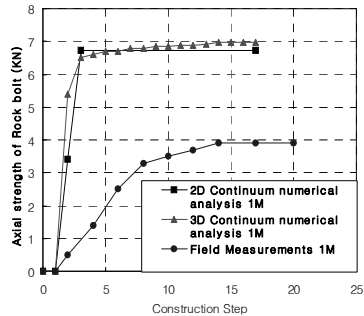
(a) A 터널 지보패턴 P3 천단변위



(b) A 터널 지보패턴 P3 내공변위



(c) A 터널 지보패턴 P3 슛크리트 응력



(d) A 터널 지보패턴 P3 록볼트 축력(1 m)

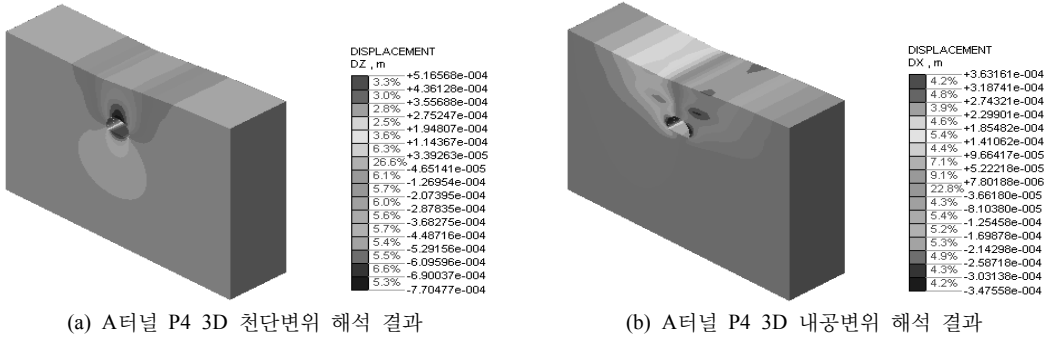
그림 3. A 터널 P3의 연속체 해석과 현장계측 결과

속체수치해석 결과는 그림 4와 같다.

실제 터널에서의 계측결과를 수치해석의 시공단계에 최대한 반영하였으며, 상·하 반단면에서 첫 막장의 굴착을 실시한 시점과 유한요소해석시 첫 막장의 굴착시의 단계를 일치시켜 결과를 산출하였다. 그러나 계측결과와는 매 굴착시 마다 이루어지는 것이 아니므로 유한요소해석에서 나타난 단계보다 적은 수의 관측결과로 이루어져 있으며, 실제계측결과를 유한요소해석의 단계와 최대한

일치하려고 노력하였다. 그 결과는 그림 5과 같다.

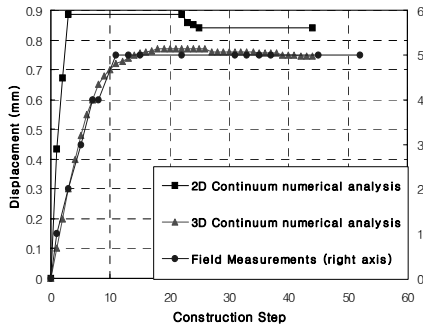
2D 해석 시의 상하 반단면 굴진에 따른 단계별 결과값의 변화를 표현하기 위해 위와 같이 3D 해석 시공 단계의 상부 반단면, 하부 반단면 굴착 시점과 2D 해석 시의 시공 단계를 임의적으로 일치시켜 상하 반단면 시공 단계에 따른 경향을 파악하고자 하였다. 3D 수치해석 결과의 천단면위 그래프에서 터널의 천단면위는 최종 굴착 단계에서부터 꾸준히 증가하여 막장면과 암의 이격



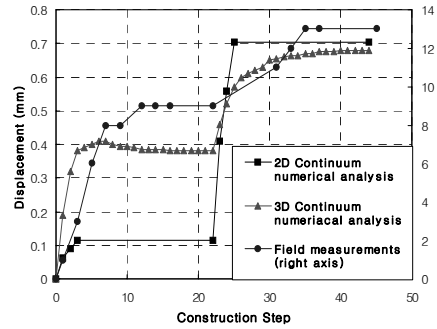
(a) A터널 P4 3D 천단면위 해석 결과

(b) A터널 P4 3D 내공면위 해석 결과

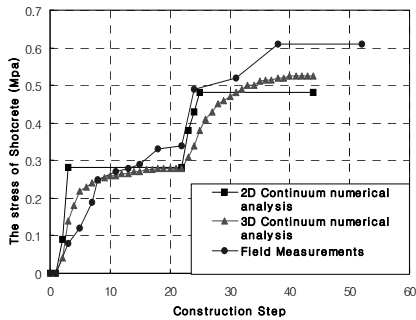
그림 4. A터널 지보패턴 P4의 3D 해석 결과



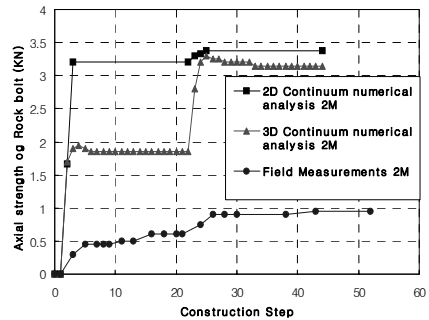
(a) A터널 지보패턴 P4 천단면위



(b) A터널 지보패턴 P4 내공면위



(c) A터널 지보패턴 P4 슛크리트 응력



(d) A터널 지보패턴 P4 록볼트 축력(2 m)

그림 5. A 터널 P4의 연속체 해석과 현장계측 결과

거리 이후 점차 수렴하는 경향을 보인다.

내공면위의 경우 상부 반단면 굴착에 의해 내공 변위량이 증가하였다. 이후 하부 굴착에 의해 다시 내공 변위량이 증가하여 최종적으로 상하 반단면 굴착에 따른 최종 변위로 수렴하는 경향을 보인다. 한편 계측 결과 값도 상부 반단면, 하부 반단면의 굴진 단계에서 값이 크게 증가한 후 점차 수렴함을 알 수 있었다. 그러나 2D·3D 연속체 수치해석 결과와 현장 계측치의 결과는 절대값의 차이를 보였다. 이는 절리 발달이 예상되는 분구간에서 연속체 해석 모델의 경우 절리특성을 정확히 고려할 수 있는 방법이 없어 발생한 현상이라 판단된다.

수치해석과 현장계측의 두 경우가 동일하게 슛크리트 응력 및 록볼트 축력의 경우 하 반단면 굴착 시 그 값이 증가하였으며, 시공 단계가 진행되어 막장면과의 임의 거리 이격 후 점차 수렴하는 경향을 보인다. 2개소의 터널을 대상으로 연구한 결과 토피코가 낮고 절리가 발달했을 것으로 사료되는 상하 반단면의 지보패턴을 적용하는 P4-P6의 경우 암반 절리의 비선형적 거동에 대한 모사가 가능한 Barton-Bandis joint Model 등을 사용한 불연속체 해석이 수행되어야 보다 실제 터널의 거동을 보다

정확하게 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

6. 터널 불연속체 해석 결과 및 고찰

본 장에서는 비교적 토피코가 낮아 암질이 불균질하고 절리가 발달된 A·B터널 사중점 갱구부 구간에 적용된 상하 반단면 굴착 구간인 P4~P6 구간에 대해 2D·3D 연속체 해석 및 2D 불연속체 해석과 불연속면 변형해석을 수행하여 현장 계측치와 비교검토 하였다.

6.1 불연속 해석을 위한 물성치

A·B 터널구간을 12개의 균질절리영역으로 구분하여 균질절리영역별(HFD-1~12) 불연속면 특성(수직강성, 전단강성, 강도정수)을 파악하였으며, 불연속면의 분포 특성(방향, 간격), 역학적 특성 분석 결과, 절리면 전단시험 및 경험식을 활용하여 2D 불연속체 해석(UDEC)의 Barton-Bandis Joint Model 적용을 위한 불연속면 물성치를 도출하였으며 표 8에 정리하였다. 표 8에서 JRC는 불연속면의 거칠기, k_n 은 불연속면의 수직강성, k_s 는 불연속면의 전단강성, σ_c 는 무결함 암석의 압축강도이다.

표 8. 불연속해석을 위한 물성치

구 분 (HFD)	절리군	방향성	JRC	σ_c σ_d		ϕ_b (o)	ko=1.0		구 분 (HFD)	절리군	방향성	JRC	σ_c σ_d		ϕ_b (o)	ko=1.0	
				(MPa)			kn	ks					(MPa)			kn	ks
							(MPa/mm)									(MPa/mm)	
1	J1	299/15	10.1	151	44	32	24.410	0.271	7	J1	141/48	8.4	173	69	33	33.306	0.621
	J2	276/64	10.0				24.280	0.269		J2	108/75	8.6				33.386	0.627
	J3	058/62	11.3				26.048	0.288		J3	274/68	9.7				34.058	0.663
2	J1	272/23	8.2	108	28	32	26.463	0.345	8	J1	201/18	13.7	139	69	33	79.969	3.913
	J2	037/11	9.7				27.567	0.366		J2	030/15	9.2				87.637	3.311
	J3	347/31	7.5				26.357	0.335		J3	295/75	11.2				82.366	3.566
3	J1	272/23	9.6	166	31	32	33.437	0.567	9	J1	201/18	10.3	231	69	30	70.570	2.363
	J2	037/11	10.1				33.751	0.578		J2	030/15	9.6				71.772	2.298
	J3	347/31	7.9				33.350	0.531		J3	295/75	9.4				72.195	2.280
4	J1	034/54	8.2	221	69	31	112.565	3.880	10	J1	358/23	9.4	197	67	32	72.972	2.468
	J2	133/55	9.7				103.366	4.092		J2	139/24	8.0				77.537	2.337
	J3	275/43	7.5				118.803	3.784		J3	257/26	10.0				71.736	2.526
5	J1	034/54	7.9	221	84	31	157.697	6.287	11	J1	358/23	9.3	106	34	28	33.313	0.493
	J2	133/55	7.5				162.270	6.200		J2	139/24	10.8				34.355	0.524
	J3	275/43	6.3				178.522	5.943		J3	257/26	9.7				33.515	0.501
6	J1	282/13	10.5	152	69	32	26.353	0.320	12	J1	068/26	8.7	226	30	28	24.766	0.261
	J2	147/17	9.5				25.111	0.303		J2	289/22	9.1				25.128	0.265
							J3	248/68		10.5	26.702	0.282					

6.2 A 터널 시점 갱구부 구간(지보패턴 P4) 불연속체 해석

A 터널의 시점 갱구부 구간에 적용한 지보패턴 P4의 2D 불연속체 해석의 해석 단계와 그 적용 하중 분담율은 A터널 P4와 같이 적용하였다. UDEC을 사용한 수치해석 결과인 변위 벡터도는 그림 6에, 불연속변형해석(DDA)을 이용한 B터널 지보패턴 P4 구간의 해석결과인 블록 변형에 대한 블록 변형도는 그림 7에, 연속체-불연속체 해석 및 현장 계측치 결과는 그림 8에 나타내었다.

천단침하 및 내공변위 결과에 있어서 불연속체 해석의 결과가 연속체 해석 결과에 비해 그 값이 크게 나타나며 현장 계측치와 가까워지는 것은 다이러턴시 현상과 소성 거동 및 절리면 거칠기 등의 불연속적 특성이 고려되어 나타난 결과라 사료되며, DDA 해석의 경우 지보재를 모사 할 수 없어 그 해석결과가 UDEC의 해석결과보다 크게 나타났다.

연속체 해석 결과는 불연속체 해석의 결과에 비해 슛크리트 압축응력의 변화가 완만하였으나, UDEC에 의한

불연속체 해석의 경우 절리특성에 따라 인장과 압축응력이 나타나 응력의 변화가 절리특성에 지배 된 것으로 판단된다.

록볼트 축력의 경우 연속체 해석에서는 완만한 분포 변화를 보였으나, UDEC에 의한 2D 불연속체 해석에서는 절리특성에 지배 되어 국부적으로 응력이 집중되는 현상을 보인 것으로 판단된다.

7. A터널 대형대피소 접속부 구간 해석 결과 및 고찰

A 터널 대형대피소 구간에 대해 3D 연속체 수치해석 결과와 현장 계측치를 천단변위, 내공변위, 슛크리트 응력, 록볼트 축력의 항목 등에 대해 비교 검토하였다. A터널 전단면 굴착 구간을 본선 터널로 하는 대형대피소를 접속지점으로부터 본선터널이 최소 20 m이상 굴착이 진행된 후에 지보재를 설치하는 것으로 해석하였다. 그림 9는 대형대피소 구간에 대한 수치해석의 결과이며, 표

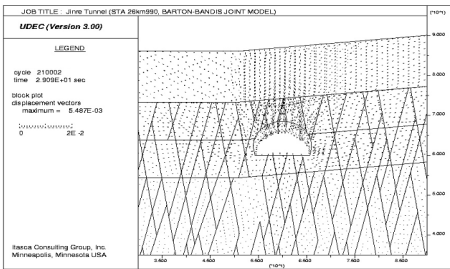


그림 6. A터널 지보패턴 P4의 2D 불연속체 해석결과

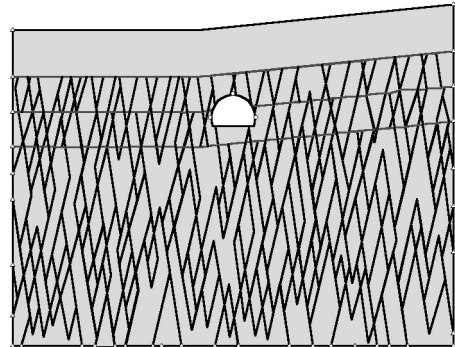
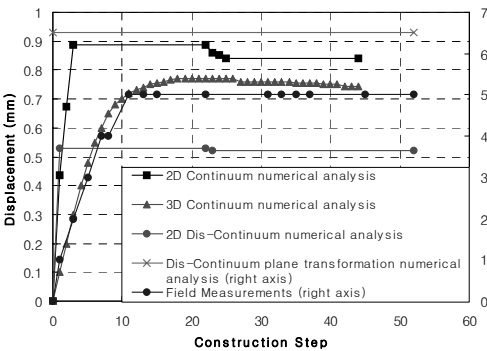
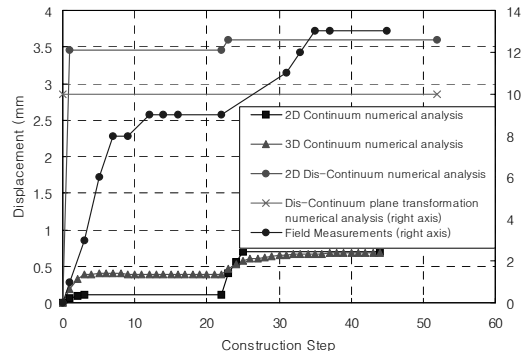


그림 7. A터널 지보패턴 P4의 블록 변형도



(a) 시점 갱구부 구간 P4 천단변위



(b) 시점 갱구부 구간 P4 내공변위

그림 8. A터널 P4 연속-불연속체 해석 및 현장 계측결과

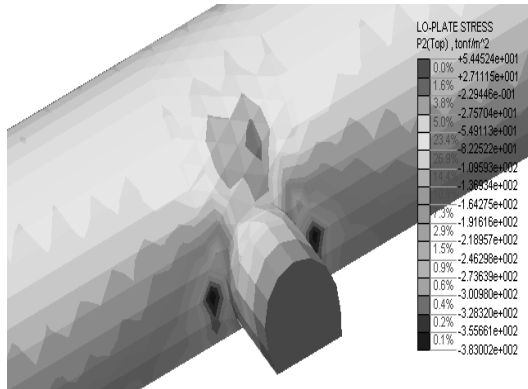


그림 9. 대형대피소 3D 연속체 수치해석결과

9는 대형대피소 구간에 대한 3D 수치해석결과 및 현장계측 결과이다.

대형대피소와 같은 시공 단계를 갖는 경우 일방향 터널과는 다르게 종방향과 횡방향의 이완하중이 중첩되며, 또한 대형대피소 굴착 시 본선티널의 지보재가 제거되어 주변 접속부에 지보재의 응력 집중을 유발하는 경향을 보였다. 대형대피소의 응력은 굴착에 의한 아칭효과에 의해 본선과 대형대피소 접속부 천단으로 집중하는 응력 분포를 나타내는 것으로 판단된다. 대형 대피소 굴착에 의해 큰 추가 변위가 발생됨에 따라 수직방향 응력은 본선티널과 대형대피소의 접속부의 천단과 어깨부에 크게 집중 되었다. 슛크리트 최대 휨압축응력은 접속부 상부인 본선티널의 우측 어깨부에서 중횡 방향의 이완하중의 중첩과 대형대피소 굴착을 위한 지보재의 제거로 인하여 발생하는 것으로 사료된다.

대형 대피소의 수치해석 결과와 현장계측 결과는 유사한 경향을 보인다. 하지만 현장계측의 경우 계측기 설치의 한계와 설치 이전 거동을 알 수 없으므로 대형대피소와 같은 접속부 등의 경우에는 3D 수치해석이 반드시 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 대형 대피소와 같은 접속부의 경우 위와 같은 3D 수치해석 결과로 응력 집중의 범위를 파악하여 본 연구 구간의 경우와 같이 본선티널 20 m 이상 굴진이력 후 대형대피소를 시공하는 시공 단계를 고려할 수 있으며 현지부 등의 보강의 필요성을 사전에 파악하고 안전한 시공에 임할 수 있을 것으로 사료된다.

8. 결론

본 연구는 두 개소의 NATM 터널에 대해 천단변위, 내공변위, 슛크리트 응력, 록볼트 축력 등의 현장 계측치

표 9. A터널 대형대피소 구간 3D 수치해석 결과 및 현장 계측 결과

구 분	Mohr-Coulomb Model		
	해석치	계측치	
3D 천단변위량 (mm)	본선 구간	1.336	3
	대형대피소 구간	0.902	2
3D 내공변위량 (mm)	본선 구간	1.679	4
	대형대피소 구간	0.596	5
3D 슛크리트 최대 응력 (Mps)	본선 구간	0.578	0.504
	대형대피소 구간	0.358	0.252
3D 록볼트 최대 축력 (KN)	본선 구간	7.64	5.63
	대형대피소 구간	0.001	0.1

를 분석하고, 수치해석 프로그램을 이용 2D-3D 연속체 수치해석 및 2D 불연속체-불연속면 변형 해석을 실시, 그 결과를 비교-검토하여 각 구간의 시공과정에 따른 전반적인 변위와 거동의 경향성 및 수치해석적 접근의 적용성을 검토하고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전단면 굴착 구간(지보패턴 P1~P3)에서 터널의 천단 및 내공변위를 예측하고자 할 시에는 2D 연속체 수치해석만으로도 가능하다.
- 2) 상하 반단면 구간(지보패턴 P4~P6)에서 터널의 천단 및 내공변위를 예측하고자 할 시에는 반드시 2D 불연속 수치해석을 수행하여야 한다.
- 3) 2D 연속체 수치해석만으로도 전 구간에 대한 터널 내 슛크리트 응력 및 록볼트 축력의 예측이 가능하다.
- 4) 시공 단계에 따른 거동 및 경향성을 확인하고자 할 시에는 3D 연속체 수치해석을 수행하여야 한다.
- 5) 대형 대피소 등의 접속부의 경우 반드시 3D 연속체 수치해석을 수행하여야 한다.

참고문헌

1. Civildini, A., Goida, G., and Jommi, C., 1991, Analisi di stabilita ad elementi finite per materiali con incrudimento negativo, Proc. of the II Convegno nazionale dei ricercatori del gruppo di coordnotationnto degli studi di ingengerial geotechnica del C.N.R., Ravello, Ltallt, pp. 75-92
2. Cundall, P.A., 1987, Distinct element models of rock and soil structures, Analytical and Computational Methods in Engineering rock Mechanics, E. T. Brown Ed, pp. 129-163
3. 윤호중, 2003, 터널 수치해석과 실측치 평가에 의한 터널 거동 조사에 관한 연구, 공주대학교석사학위 논문.

4. Barton, N. and Bandies, S.C., 1990, Review of predictive capabilities of JRC-JSC model in engineering practice, Proceedings of the International Symposium on Rock Joint, Loen, Norway, pp. 125-140.
5. 이성기, 2000, Barton-Bandis joint 모델을 활용한 절리암 반속 터널 안정성의 수치해석적 연구, 한양대학교석사학위논문.
6. Carter, J.P and Alehossein H., 1990, Analysis of tunnel distortion due to an open excavation in joint rock, Computer and Geotechnics, 9, pp. 209-231.
7. Pande, G.N., 1993, Constitutive Models for Intact Rock, Rock Joints and Jointed Rock Masses, Comprehensive Rock Engineering, 1, pp. 427-442.
8. 유영현, 배규진, 1997 국내 터널건설의 현황조사 및 교차 터널의 설계법 개발연구, 코오롱건설(주)
9. 한국지반공학회, 2001 터널계측(V), 17.3.
10. 한국터널공학회, 2002 터널의 이론과 실무, 터널공학 시리즈 1, pp. 165~174.



박 춘 식

1981년 동아대학교 공과대학 토목공학과 졸업
 1990년 일본 동경대학교 대학원 토목공학과 공학석사
 1993년 일본 동경대학교 대학원 토목공학과 공학박사
 Tel: 055-213-3772
 E-mail: pcs@changwon.ac.kr
 현재 국립창원대학교 공과대학 토목공학과 교수



강 만 호

1994년 서울산업대학교 토목공학과 졸업
 2004년 국립창원대학교 산업정보대학원 토목공학과 공학석사
 2008년 국립창원대학교 대학원 토목공학과 공학박사
 Tel: 011-586-0872
 E-mail: mhkang@skec.co.kr
 현재 SK건설(주) 부장