

터널 시공 Feedback을 위한 키블록해석 시스템 개발

이두화, 추석연, 전기찬, 변재우 ((주)삼보기술단)
Osamu Murakami ((주)쓰쿠바소프트웨어엔지니어링)
Yuzo Ohnishi (교토대학 토목공학과)

1. 서론

대부분의 암반구조는 광역적인 측면에서는 상당한 안정성을 보이거나, 터널굴착시 굴착면에 발생한 국지적인 측면에서의 암반 블록은 터널 안정성에 영향을 미치게 된다. 특히, 암반터널 굴착시 응력해방에 의한 굴착면 이완과 암반에 잠재하는 절리 강도의 저하 및 새로운 균열의 발생 또는 확장은 불안정한 암괴의 발생으로 활동반, 낙반등을 초래한다. 이와 같이 암반터널에서는 굴착 자유면과 불연속면의 기하학적인 관계가 터널 안정성에 지배적인 영향을 미친다. R.E Goodmann, G.H Shi(1981)¹⁾ 등은 이러한 시공경험으로부터 암반내 불연속면과 굴착면과의 3차원적인 기하학적 관계로부터 불안정한 블록을 찾아내는 기법으로서 키블록이론을 제안하였다. Ohnishi(1994)²⁾ 등은 현장 적용성이 떨어지는 종래의 스테레오 투영법 대신에 유한조인트에 의한 유한 조인트 블록 피라미드를 수학적으로 찾아 내는 방법을 제시하였다.

이와 같은 블록이론이 수학적으로 체계화된 1985년부터 수 많은 해석 프로그램 개발과 연구가 진행되어 국내에서도 이, 송(1996)³⁾등에 의해 키블록 해석 시스템이 개발되어 현장에 적용되었다. 그러나, 대부분의 키블록 해석시스템은 키블록이론에 대한 개념적 이해가 요구되고 현장기술자들이 사용하기에는 입력과정이 복잡하다는 점 등의 많은 제약이 있어 실용화까지는 도달하지 못하고 주로 설계단계에서 터널 전문가들에 의해 활용되고 있는 실정이다. 특히, 암반내 터널 구축이 많고 터널내 낙반 사고가 종종 터널 기술자간에서 화두가 되곤하는 국내 정세를 고려할 때 키블록에 의한 현장 관리 시스템이 절실히 요구된다. 특히 경암층이 많은 국내 상황을 고려할 때 시공 단계에서 키블록의 도출과 보강대책 수립은 시공성 및 경제성 향상과 품질확보에 직결되므로 현장 적용성·대응성이 향상된 해석 시스템 개발이 시급한 실정이다.

2. 이론적 배경

블록이론은 기본적으로 위상기하학과 집합론으로 구축되어 있다. 따라서, 일반기술자가 현장에서 적용하기 어려운 점이 있지만, 이것들의 대부분은 「Shi의 정리」 형태로 간결히 정리되어 있고, 해석내용을 스테레오 투영도로 표시하는 등 독창적인 연구가 수행되고 있다.

스테레오 투영법은 예전부터 이용되어 왔지만, 블록이론의 안에서 전개되는 스테레오 투영법의 수학적 기술이나 투영원리의 이용방법은 종래의 스테레오 투영의 개념을 비약적으로 발전시키고 있다.

본 시스템에서는 모델영역과 터널굴착면의 유한성 특징을 고려하여 암반내 단층이나 절리가 3차원 공간내 유한성을 갖는다는 Ohnishi(2001)⁴⁾이론을 토대로 작성하였다.

블록이론에서는 "절리면은 영역내에서 충분히 넓다"고 가정하지만, 실재하는 절리의 넓이는 영역내에서 유한한 경우가 대부분이다. 일반적으로 노두면에서 나타나는 절리는 2차원적이지만, 블록이론에서는 절리의 갈라진 형상을 3차원적으로 모델화해야 한다. 3차원의 절리를 형성하는 모델은 여러 가지 제안되어 있지만, 본 시스템에서는 절리가 그림1에 보이는 것과 같이 평면영역에서 규정되는 면(규정평면)의 1방향 공간내에 유한히 넓은 것으로 가정하였다. 이 규정평면을 몇 개 가지고 있는가에 따라 절리는 다각형의 형상을 갖게 된다.

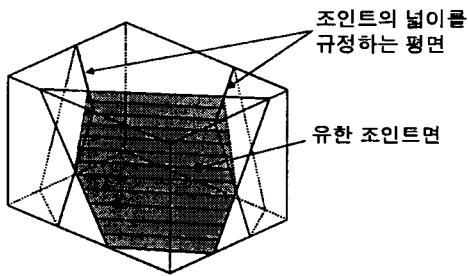


그림 1. 유한절리 모델

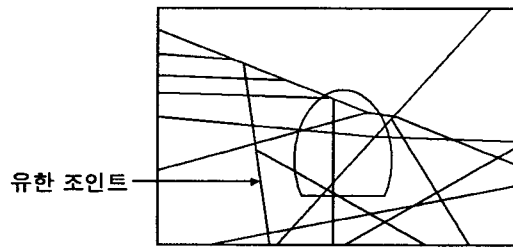


그림 2. 유한절리를 포함한 터널 단면도

절리망에서 폐합된 영역을 찾아 유한블록 및 거동가능블록의 형성여부를 판별하는 알고리즘 및 폐합된 영역에 포함된 절리면과 공동면이 유한블록을 형성하는지에 대한 판별과 유한블록에서 다시 거동가능블록을 판별하는 과정은 R.E. Goodman과 G.H. Shi (1985)⁵⁾가 제안한 블록이론의 벡터해석과정을 적용하였다.

입력된 불연속면의 정보에 의해 최대 영역을 발생시키고 절리면의 높이를 유한하게 제한하여 규정된 최대 영역내의 최대 키블록을 추출하여 안정성 검토 대상으로 한다.

(그림 3, 그림 4 참고)

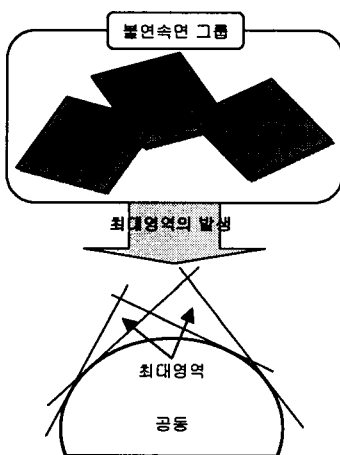


그림 3. 최대영역발생

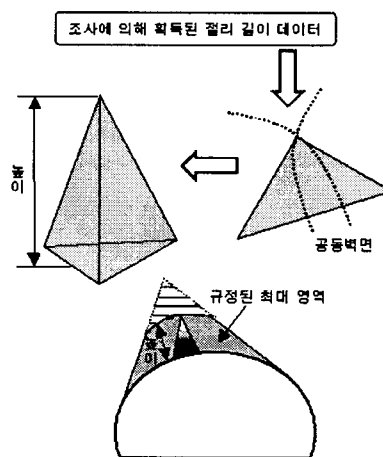


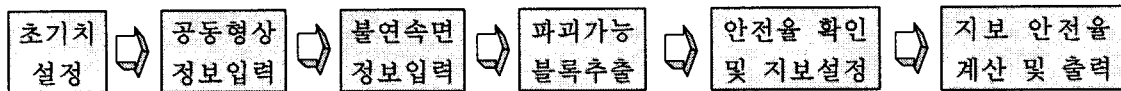
그림 4. 절리길이에 의한 최대영역의 규정

3. 개발시스템의 구성

본 킨블록 해석 시스템은 WINDOWS95 이상의 운영체제를 기반으로 하는 프로그램으로써 표준 작동 환경은 CPU 66MHz, RAM 32MB 이상이며 100MHz의 PC로 0.1초의 고속연산을 수행한다. 또한, 모든 해석 과정의 Full-list(10page) 자동 인쇄가 가능하며 최종적으로는 현장 보고서(A3 컬러)의 자동 작성 및 출력으로 다변하는 현장 대응성을 크게 향상시킨 현장 사용성에 적합한 시스템으로 구축되었다. 계산과정은 크게 공동형상 및 불연속면 정보의 입력과 각 파괴가능 블록에 대한 지보재 설치 전후의 안전율 계산 과정으로 나누어 지며 전문적 지식이 없어도 현장 사용자들이 쉽게 이해하고 적용 할 수 있도록 3차원적 블록 형성 결과를 자유자재로 확인할 수 있는 축소/확대/회전 기능을 겸비 하였으며 추가지보 설치 시 마우스 입력에 의한 산발적 지보재 설치 및 유효/무효 지보재 자동추출 기능을 갖추고 있는 강력한 현장 대응용 킨블록 시뮬레이션 시스템이라 할 수 있다.

3.1 시스템 흐름도

본 시스템의 해석 흐름은 다음과 같다.



3.2 시스템 적용 세부 과정

3.2.1 입력과정

1) 초기치 설정 및 공동형상 정보의 설정

불연속면 및 지보재 강도정수에 대해 사전 설정을 하며 프로그램 내에서 제공하는 버섯형(지하발전소), 난형, 탄환형(비축기지), 마제형의 기존형상 및 좌표 값 입력에 의한 임의형상에 의한 공동형상 작성과 공동 방향/ 길이/ 해석길이 등의 정보를 설정한다.

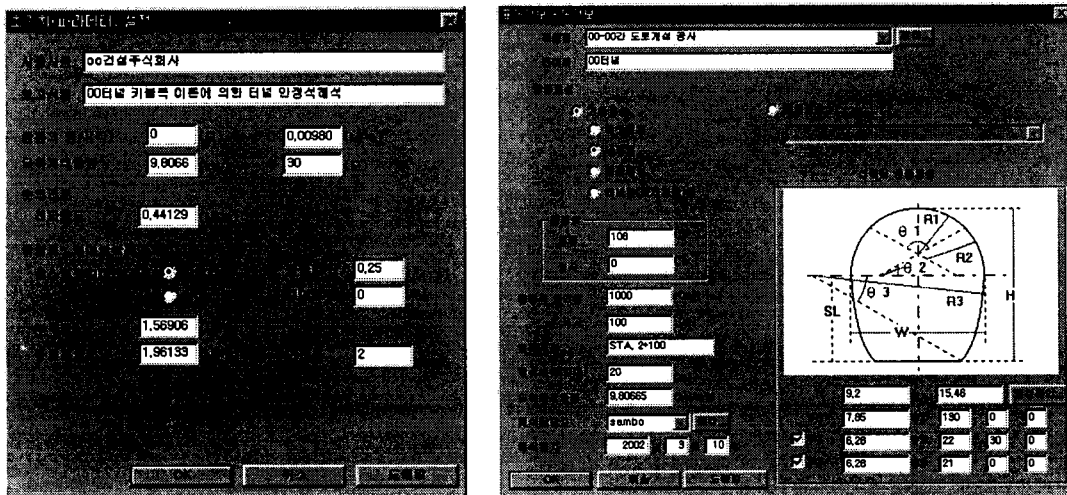


그림 5. 초기치 설정 및 공동형상 관련 정보 설정

2) 입력 절리의 스테레오 투영 및 불연속면 정보의 입력

입력절리 및 터널굴진 방향에 대해 스테레오 투영에 의한 확인 및 최대 5개 대표 절리 균 입력으로 다각형 블록 형성이 가능하며 최대블록 높이 및 불연속면 길이/위치지정으로 시공시 현장 굴착면 관찰을 통한 정확한 절리모사가 가능하다.

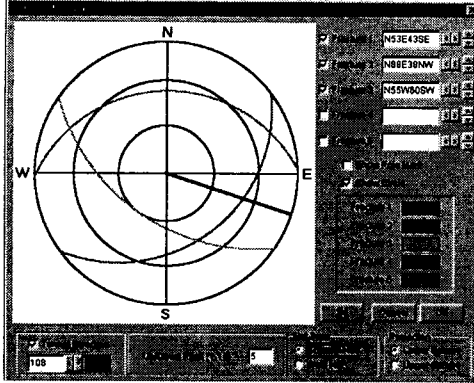


그림 6. 스테레오 투영 결과

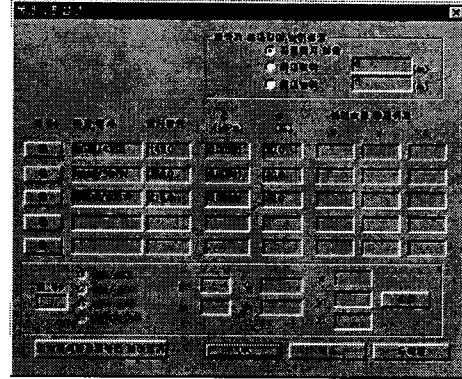


그림 7. 불연속면 정보의 입력

3.2.2 계산 및 출력과정

1) 발생 블록의 일람 및 안전을 검토

발생 가능 블록들을 일람하고 각 파괴형상에 대한 활동력 및 면내력 계산에 의한 안전을 확인 및 3차원적 발생 키블록 형상을 검토한다.

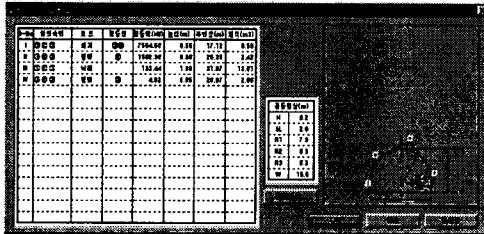


그림 8. 발생 키블록

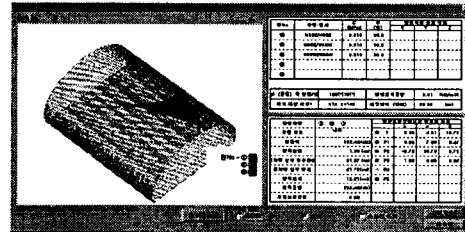


그림 9. 안전을 검토 결과

2) 지보패턴의 설정 및 적용

각 암반 등급별 록볼트 및 케이블 볼트에 대한 지보패턴을 등록하고 슛크리트, 록볼트, 강지보재, 케이블 볼트등의 지보공 설치 및 추후 추가 지보시 마우스를 이용하여 유효/무효 지보재 확인에 의한 지보 설치위치 및 필요개수를 설정한다.

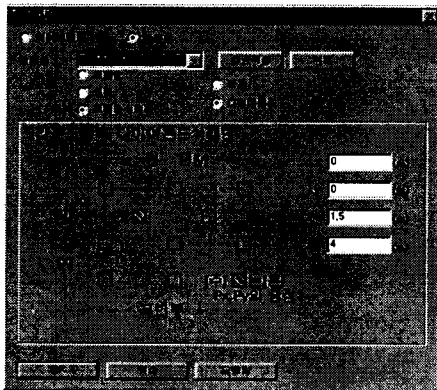


그림 10. 지보패턴의 설정

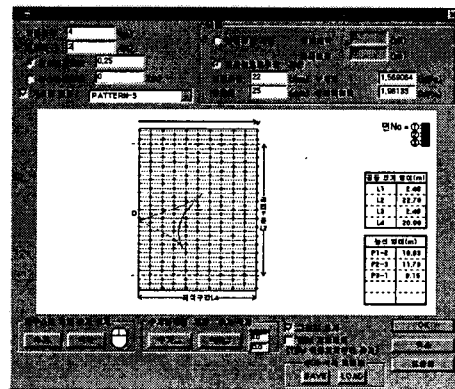


그림 11. 지보패턴의 적용 및 추가/삭제

4) 지보재 설치후 안전을 검토

각 지보공 설치 단계에 대한 안전율을 계산하고 기준 안전율에 못 미칠 경우나 실제 시공시 현장 막장면 상태에 따라 Feedback 원리에 의해 지보패턴 재 설정 및 유효, 무효 지보재 확인에 의한 추가지보재 설치등의 재검토로 터널 안전성을 확보한다.

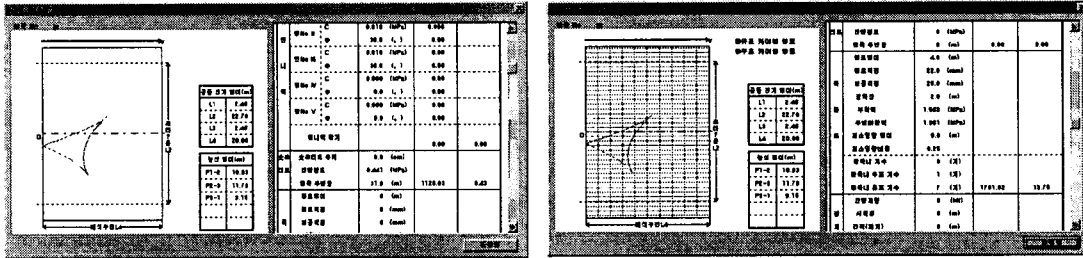


그림 12. 슛크리트 및 록볼트 지보의 안전율 계산 결과

5) 보고서 파일 출력

본 시스템은 내부 처리용의 Key Parameter를 사용자가 제어할 수 있는 구조로 되어 있으며 키블록 연산 결과의 TEXT 형식 출력 및 전체 정보에 대해 개별 리스트 인쇄와 최종적으로는 보고서의 자동 작성 및 출력 기능을 통해 현장 적용성을 크게 강화시켰다.

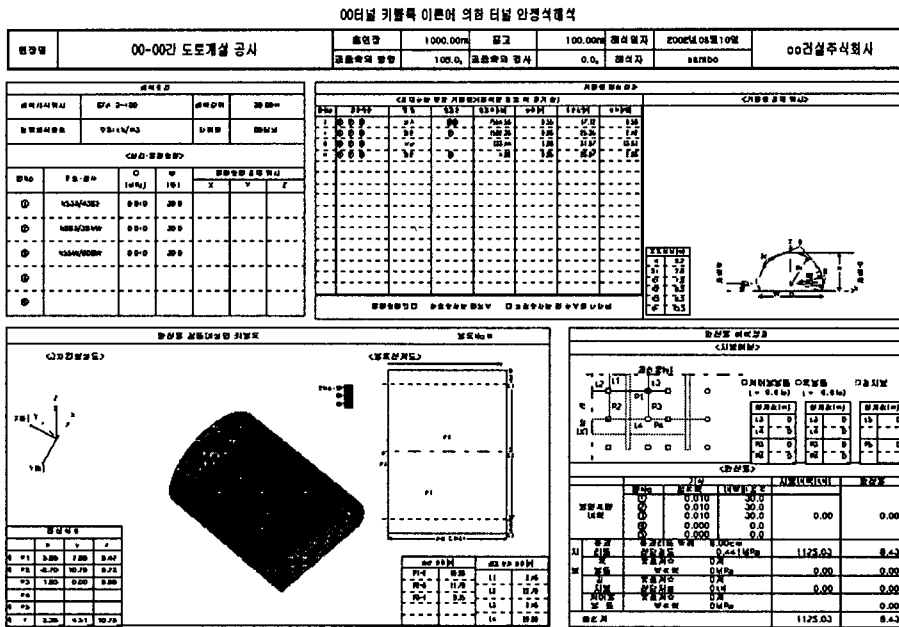


그림 13. 최종 보고서 출력 결과

4. 설계단계 검토

본 장에서는 기존 수행된 도로터널 설계과업의 불연속면 자료 및 지보 데이터를 기초로 본 시스템을 이용한 키블록 안정성 검토를 수행 하였다. 적용된 터널형상은 2차로, 3차로, 4차로 도로터널이며 동일한 조건의 불연속면 데이터에 대한 블록 발생 형상 및 지보재 설치 전후의 안전율을 살펴 보았다.

4.1 시스템 적용 불연속면의 선정

본 시스템을 이용한 해석적 검토에 적용하기 위한 불연속면 선정을 위해 기존 수행 프로젝트에서의 암반절리계 조사자료에 기초하여 선정된 터널이 통과하는 구간의 균질절리영역 중에서 가장 절리가 발달된 구간을 택하고 이 구간의 시추공 영상촬영과 노두조사 결과로부터 불연속면의 방향, 연장, 길이의 통계분석을 실시한 결과를 이용하였다.

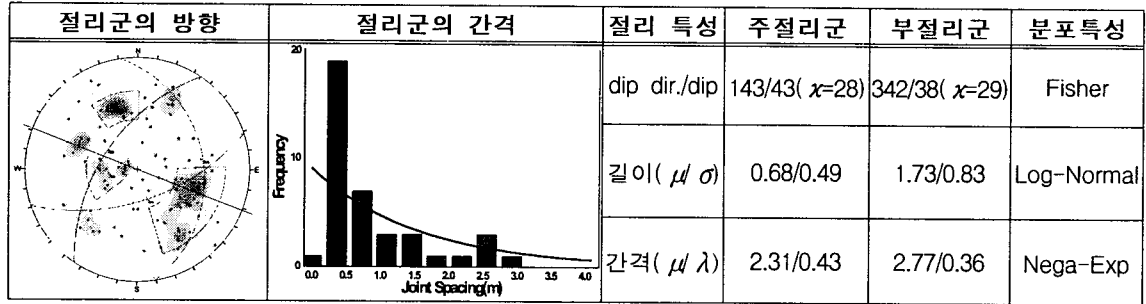


그림 14. 분석 대상 불연속면의 방향 및 밀도 특성

4.2 시스템 적용단면 및 입력데이터

본 시스템을 이용한 키블록 검토를 위해 아래 그림과 같이 2차로, 3차로 및 4차로 형상의 3개 단면을 선정하고 동일한 조건의 입력조건 및 블록 크기를 제한하여 해석을 실시하였다.

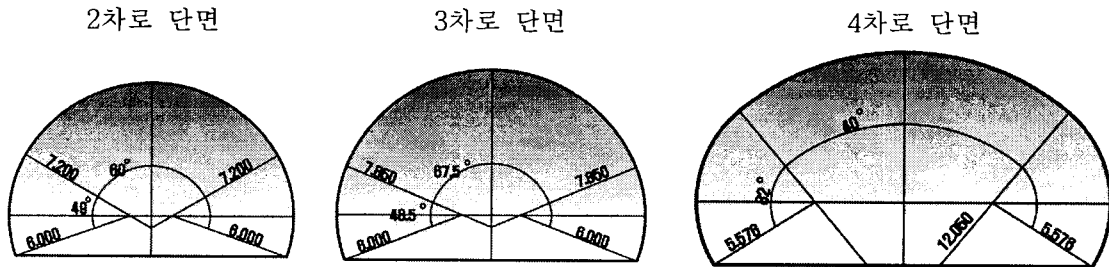


그림 15. 키블록 해석에 사용한 도로 터널 단면

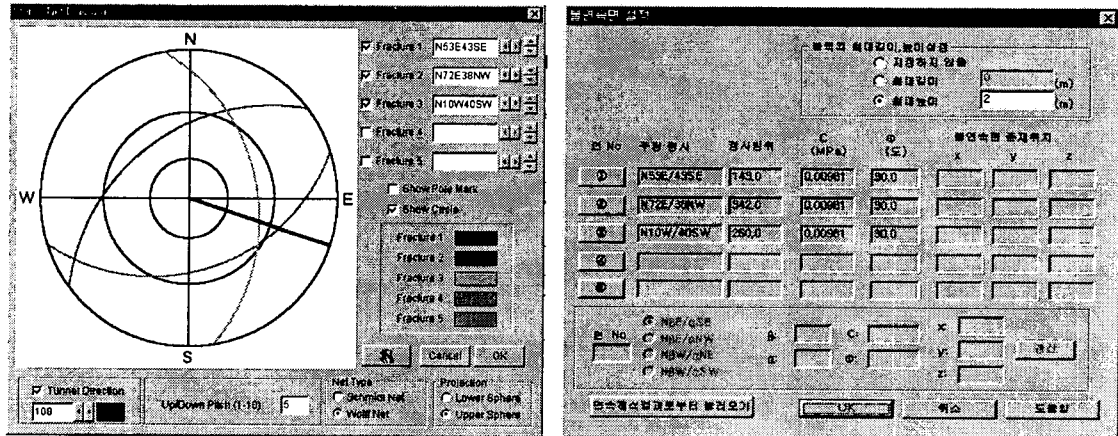


그림 16. 적용 불연속면의 STEREO NET 투영 및 불연속면 데이터 입력

4.3 블록의 형상 및 활동력 검토

각 검토단면별 발생 블록 형상과 활동력, 면내력 계산을 통한 무지보시 안전율을 검토하고 설계적용 구간의 암반 3등급 지보패턴인 슛크리트(8cm), 록볼트(4m, 중 2m, 횡 1.5m 간격) 지보후 안전율을 검토한 결과를 아래 표 1에 나타내었다.

표 1. 다양한 도로터널 단면에 대한 키블록 해석결과

2차로 터널에서의 키블록 발생							3차원 파괴형상 및 안전율 계산			
							I 쉐기파괴	II 평면파괴	III 낙하	
B-No	발생속면	모드	활동면	활동력(kN)	높이(m)	주변공(m)	정적(m ³)			
I	①②③	쉐기	①②	699.06	1.16	15.44	1.07	활동력 : 699.06kN 면내력 : 694.69kN 안전율 : 0.994	활동력 : 29.99kN 면내력 : 2.93kN 안전율 : 0.097	활동력 : 0.64kN 면내력 : 0.00kN 안전율 : 0.0
II	①②③	평면	③	29.99	2.00	18.25	5.25			
III	①②③	낙하		0.64	0.37	9.50	0.07			
							활동력 : 699.06kN	활동력 : 29.99kN	활동력 : 0.64kN	
표준지보패턴 적용시 낙하 블록에 대한 유효 록볼트는 없으며 슛크리트에 의한 안정							스�크리트 : 545.2kN	스�크리트 : 644.2kN	스�크리트 : 335.2kN	
							록볼트 : 295.19kN	록볼트 : 1029.6kN	록볼트 : 0.00kN	
							록볼트 유효갯수 : 1	록볼트 유효갯수 : 4	록볼트 유효갯수 : 0	
							안전율 : 2.196	안전율 : 55.908	안전율 : 523.750	
3차로 터널에서의 키블록 발생							3차원 파괴형상 및 안전율 계산			
							I 쉐기파괴	II 평면파괴	III 낙하	
B-No	발생속면	모드	활동면	활동력(kN)	높이(m)	주변공(m)	정적(m ³)			
I	①②③	쉐기	①②	640.21	1.29	16.23	1.17	활동력 : 640.2kN 면내력 : 635.4kN 안전율 : 0.992	활동력 : 2.51kN 면내력 : 29.23kN 안전율 : 11.645	활동력 : 1.42kN 면내력 : 0.00kN 안전율 : 0.0
II	①②③	평면	③	2.51	2.00	17.52	5.25			
III	①②③	낙하		1.42	0.40	11.13	0.14			
							활동력 : 640.2kN	활동력 : 2.51kN	활동력 : 1.42kN	
표준지보패턴 적용시 평면파괴 블록에 대한 유효 록볼트는 없으며 자체 면내력에 의한 안정							스�크리트 : 573.0kN	스�크리트 : 619.7kN	스�크리트 : 392.9kN	
							록볼트 : 573.47kN	록볼트 : 0.00kN	록볼트 : 292.0kN	
							록볼트 유효갯수 : 2	록볼트 유효갯수 : 0	록볼트 유효갯수 : 1	
							안전율 : 2.783	안전율 : 258.537	안전율 : 482.324	
4차로 터널에서의 키블록 발생							3차원 파괴형상 및 안전율 계산			
							I 쉐기파괴	II 평면파괴	III 낙하	
B-No	발생속면	모드	활동면	활동력(kN)	높이(m)	주변공(m)	정적(m ³)			
I	①②③	쉐기	①②	2459.79	1.56	18.73	2.37	활동력 : 2459.79kN 면내력 : 2449.05kN 안전율 : 0.995	활동력 : 72.23kN 면내력 : 39.75kN 안전율 : 0.550	활동력 : 5.4kN 면내력 : 0.0kN 안전율 : 0.0
II	①②③	평면	③	72.23	2.00	19.62	5.54			
III	①②③	낙하		5.40	0.61	16.86	0.55			
							활동력 : 2459.79kN	활동력 : 72.23kN	활동력 : 5.4kN	
굴착 자유면과 블록간의 기하학적 관계로부터 2, 3차로 터널에 비해 활동력 증가							스�크리트 : 661.3kN	스�크리트 : 692.6kN	스�크리트 : 595.1kN	
							록볼트 : 1156.9kN	록볼트 : 917.07kN	록볼트 : 304.6kN	
							록볼트 유효갯수 : 4	록볼트 유효갯수 : 3	록볼트 유효갯수 : 1	
							안전율 : 1.735	안전율 : 22.835	안전율 : 166.620	

해석 결과, 키블록 발생 위치 및 파괴형태는 2, 3, 4차로 터널 모두 동일한 것으로 나타났다. 그러나 활동력 및 면내력은 굴착 자유면과 블록 발생면과의 3차원적인 기하학적 형상에 의해 서로 상이하게 나타나는 것으로 확인되었다. 특히 표준 지보 패턴에 의한 시스템 불팅시 블록내 존재하는 불팅이라 할지라도 그 길이 및 블록 형상과 설치 방향의 3차원 다면적 관계 등에 의해 유효/무효 불팅에 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 시공중 굴착면 관찰에 의한 정량적 지보위치 선정이 터널 안정성에 무엇보다 중요하다고 판단되며 이를 위한 현장 대응용 키블록 시스템 개발이 시급하다 할 수 있다.

5. 시공시 현장 적용 사례

5.1 시공시 현장 적용 방안

시공중인 터널을 대상으로 본 키블록 해석 시스템을 적용해 보았다. 대상 터널은 일본 제 2名神(메이신) 고속도로 栗東(쿠리히가시)터널이며⁶⁾, 적용 굴착공법은 TBM+확장발파공법이다. 굴착대상 암반조건은 경암반으로 지반거동은 주로 불연속면에 기인한다고 판단되어, TBM 도갱으로부터 관찰된 불연속면 정보를 바탕으로 확폭단면에 대해 키블록해석을 적용하였으며, 도출된 키블록에 대한 보강방안을 검토하였다.

시공중 키블록 해석시의 상세한 흐름은 그림17과 같다. 해석을 통해 추출된 키블록을 대상으로 무대책시(무지보), 1차숏크리트 타설시, 표준지보패턴 적용시의 안전성을 단계별로 검토하여 추가 지보의 필요성 및 지보량을 결정하였으며, 결과의 일부를 5.2에 정리하였다.

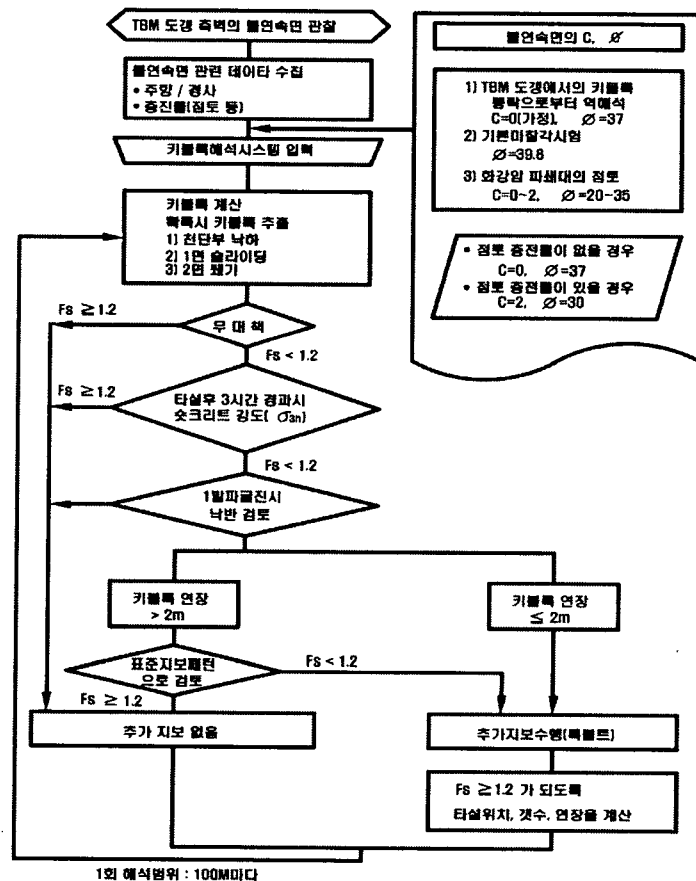
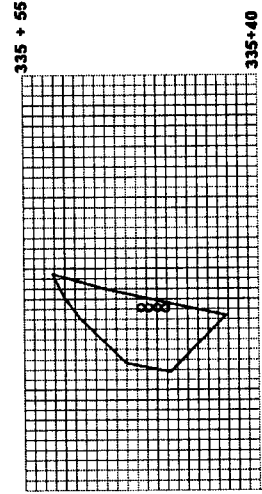


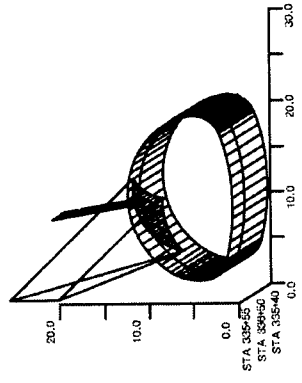
그림 17. 시공중 키블록 해석 흐름도

5.2 키블록 해석 결과

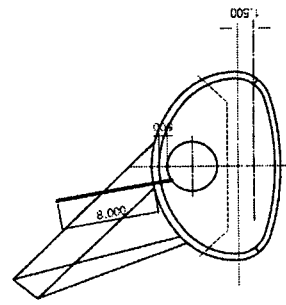
해석단면 (STA.)	블록 중량 (t)	블록 연장 (m)	파괴 양상	무대책(무지보시)			1차 슛크리트		표준 지 보				추 가 지 보			최종 안전율	
				활동력 (tf)	마찰 저항력 (tf)	점착 저항력 (tf)	무대책 안전율	S/C 내력 (tf)	S/C 내력 (tf)	지보 패턴	S/C 내력 (tf)	류볼트 내력 (tf)	H형강 내력 (tf)	표준 지보후 안전율	갯수		길이 (m)
334+00 ~ 335+00	722.25	6	쇄기	710.61	76.32	0.00	0.11	9.80	0.12	46.23	239.83	40.20	0.57	13.00	12.00	456.04	1.21
	3.54	1	쇄기	3.49	0.35	10.16	3.01		CI-2				3.01				3.01
335+00 ~ 336+00	1209.59	16	낙반	1209.59	0.00	0.00	0.00	14.99	0.01	53.03	198.79	107.20	0.30	28.00	12.00	974.86	1.21
	1143.1	11	쇄기	841.77	192.36	0.00	0.23	8.56	0.24	60.57	509.57	120.60	1.05	4.00	8.00	165.26	1.25
336+00 ~ 338+00	1053.4	14	평면	989.82	271.48	0.00	0.27	14.86	0.29	52.60	329.49	93.80	0.76	12.00	8.00	498.95	1.26
	19.24	8	쇄기	18.92	2.69	0.00	0.14	7.53	0.54	26.66	41.88	0.00	3.76				3.76
339+00 ~ 339+00	4.33	3.5	평면	4.27	0.57	0.00	0.13	4.04	1.08	14.30	10.91	0.00	6.04				6.04
	0.02	0.5	평면	0.02	0.00	0.00	0.00	2.18	109.00	2.18	0.00	0.00	109.300				109.00
335+00 ~ 336+00	355.70	5	쇄기	347.73	0.00	0.00	0.00	5.94	0.02	21.01	28.32	0.00	0.14	9.00	12.00	378.00	1.23
	102.07	4	쇄기	99.78	19.61	0.00	0.00	3.90	0.24	13.78	33.11	0.00	0.67	2.00	8.00	84.00	1.51
335+00 ~ 336+00	0.42	2	평면	0.41	0.05	0.00	0.12	2.08	5.20	7.37	0.00	0.00	18.10				18.10
	545.90	12.5	평면	537.61	71.43	0.00	0.13	11.98	0.16	42.40	149.13	0.00	0.49	10.00	8.00	420.00	1.27



(a) 키블록 단면 전개도(타설위치 선정)



(b) 추가 지보재 설치의 확인



(c) 추가지보 타설 터널 단면도

그림 18. 키블록 추가 보강 사례(STA.335+00 ~ 336+00)

6. 결 론

본 연구는 암반터널을 대상으로 현장기술자들이 실제 현장 불연속면 발달사항을 Mapping 하는데서 끝나는 것이 아니라 설계시 예측된 불연속면 발달사항과 시공시 확인된 발달사항을 종합적으로 비교분석하여 키블록의 규모 및 위치를 정확히 예측 혹은 파악하고 실제 시공시 지보부재의 적정성을 정량적으로 파악하고 슛크리트나 록볼트의 수량을 증감시키는 가이드 자료를 제공할 수 있는 키블록 해석 시스템을 개발하였다.

본 해석 시스템을 시공중 현장에 적용시 예상되는 기대효과는 다음과 같다.

- 1) 키블록에 대한 표준지보패턴의 적정성 평가가 용이하고 표준지보패턴 적용후 추가 지보재의 용이한 적용 및 안정성 파악이 가능하다
- 2) 시공시 다양한 지보부재의 선정 및 추가지보재의 유무효성 판단이 가능하다.
- 3) 키블록의 3차원적인 파악 및 지보부재의 효율성에 대한 시각적인 판단이 가능하다
- 4) 모든 해석결과에 대해 현장보고서 형태의 출력이 가능하여 현장기술자가 전문적인 지식 없이도 시공중 키블록 해석시스템 적용이 가능하다

최근 지반조사 기법이 발달하여 과거보다 양질의 불연속면 자료를 얻고 있으나, 시공중 이를 토대로 지보부재의 적정성 여부를 평가·반영하는데 활용하는 예는 드문 실정이다.

따라서, 현장에서(터널 막장에서) 정확도가 높고 객관적인 불연속면 정보를 기초로 본 시스템을 적용함으로써 신속한 터널 안정성 평가가 가능하며 보다 체계적이고 합리적인 터널 시공이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) G.H. Shi, R.E. Goodman (1981), A new concept for support of underground and surface excavations in discontinuous rocks based on a key stone principle, Proc. of the 22nd U.S. Symp. on Rock Mechanics
- 2) 大西有三, 中川誠司, 田中誠(1994), 岩盤節理の幾何學的分布性狀の推定に關する研究, 土木學會論文集第499号/Ⅲ-28, pp. 59-68
- 3) 송재준, 이정인 (1996), 터널굴착에서 불연속면에 의한 공동주변 암반블록의 안정성 해석, 한국자원공학회지, Vol. 33, pp. 186-193
- 4) Ohnishi, Y. & Q. Yu (2001), 3D block analysis for fractured rock, Computer Methods and Advances in Geomechanics, Desai et al. (eds), Balkema, Rotterdam.
- 5) Goodman, R.E. & G.H. Shi (1985), Block Theory and Its Application to Rock Engineering. Prentice-Hall International, Inc., New Jersey.
- 6) ジェオフロンテ研究會 (2000), 吹付け覆工によるシングルシエルの設計に關する檢討報告書, シングルシエル分科會, pp. 117-124