

암반사면 통합해석 시스템 개발 및 적용성 분석

박성욱, 이종민, 정의진(주식회사 넥스지오)
박혁진(세종대학교)
한병현, 김영근, 노병돈(삼성물산 건설부문)

1. 서 론

상대적으로 등방-균질한 매질로 구성된 토사사면과는 다르게, 암반사면은 암반을 구성하는 암석의 강도정수와 암반 내 발달하는 불연속면의 방향 및 분포 특성에 의해 안정성에 영향을 받는다. 또한, 암반사면과 같은 지반구조물은 사면 내·외적 요인에 의해 그 특성을 파악하는 과정에서 많은 불확실성이 개입하게 되며, 이러한 불확실성을 정량적으로 파악하기 위한 목적으로 신뢰성 이론 적용의 필요성이 증대되고 있는 실정이다(그림 1).

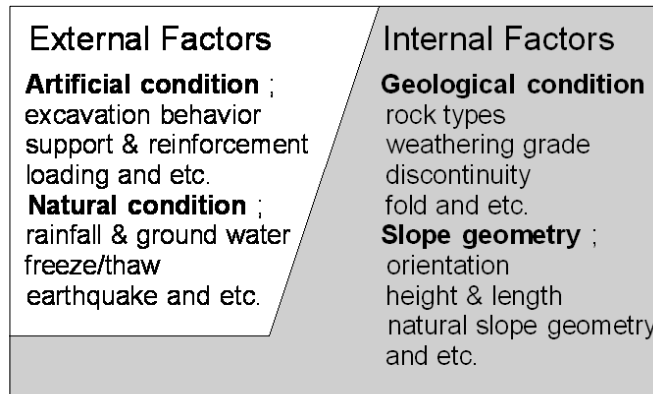


그림 1. 사면 파괴 요인

본 연구를 통해, 암반사면에서 암반 내 존재하는 불연속면을 고려한 평사투영해석(운동학적 해석, Kinematic analysis)과 한계평형해석(역학적 해석, Kinetic analysis) 과정을 신뢰성 분석과 연계하고자 하였다. 이를 바탕으로, 통합 안정해석 수행이 가능한 암반사면 통합해석 시스템을 개발하고, 그 적용성을 분석하였다.

본 논문에서는 연구개발된 암반사면 통합해석 시스템의 간략한 개요에 대해 논하고, 본 시스템을 이용한 안정해석에 관해 기술하고자 한다.

2. 시스템 개요

대상 암반사면에 사면붕괴와 같이 안정성을 확보하기 어려운 상황이 발생되면, 현장관리자는 현장조사를 통해, 간단한 안정성 평가를 수행하여 대책방안을 마련할 것이다. 만약 지

속적으로 대상 암반사면에 문제가 야기된다면, 제반 자료를 활용하여 전문가에 의한 상세한 안정해석을 수행해야 할 것이다. 본 시스템은 암반사면 관리와 관련된 일련의 업무 프로세스를 하나의 시스템에서 일괄적으로 구현할 수 있도록 설계되었다.

본 시스템은 크게 “현장관리”부분과 “안정해석”부분의 2개의 구분으로 구성되어 있다. 현장관리부분은 현장에서 사면관리를 위한 각종 사면관련 현황자료와 사면의 암반분류를 위한 총 6개의 탭으로 구성하였다. 안정해석부분은 평사투영, 한계평형, 확률론적 통합해석을 수행할 수 있도록 구성하였다(그림 2). 현장관리부분에서 얻어진 각종 자료 중 사면 현황 자료와 설계정수 자료는 암반사면 안정성 해석 및 평가과정에서 입력정수로 활용되도록 설계하였다.

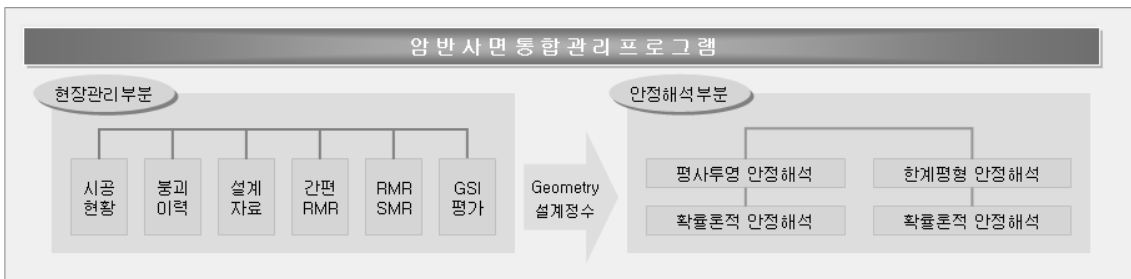


그림 2. 시스템 구성 개요도

2.1 사면현황 및 시공정보

사면현황 및 시공정보 탭은 관리주체, 사면종류, 사면 규모 등의 현황정보와 날짜별 시공 순서에 따른 절취 및 보강공법의 적용 현황을 기록하는 시공정보로 구성되어 있다. 현장관리자는 시공순서에 따라 시행 날짜 및 적용 공종 및 구간, 관리자 등의 정보를 테이블 형태로 관리하며 해당 날짜의 시공정보를 선택하면 전경 및 세부사진을 표시하여 준다. 시공정보를 관리할 수 있다. 기입된 각종 자료는 DB형태로 저장되어 지며 필요에 따라 프로젝트 파일 형태로 이동, 복사가 가능하다(그림 3).



그림 3. 사면정보 및 시공정보 상세화면

2.2 붕괴정보

붕괴정보 탭은 붕괴 일시, 구간, 규모, 유형, 발생당시 기상상황, 피해 현황, 조치내용 등을 발생 순서에 따라 기록 관리할 수 있다. 해당 붕괴이력을 선택하면 전경 및 세부사진을 표시함으로써 관리자로 하여금 시간경과에 따른 사면의 붕괴 진행 양상을 파악 할 수 있도록 한다(그림 4).



그림 4. 붕괴정보 상세화면

2.3 설계현황 및 일반용 리스트

설계자료 탭은 지반정보와 설계공법, 강도정수, 설계서상의 안정해석 결과 및 설계도면 정보를 관리 하도록 구성되어 있다. 연속체 및 불연속체의 강도정수는 추가적인 지반조사에 의해 원안대비 변경안이 도출된 경우를 감안하여 원안 자료와 변경안 자료가 모두 기입되도록 구성하였다(그림 5).

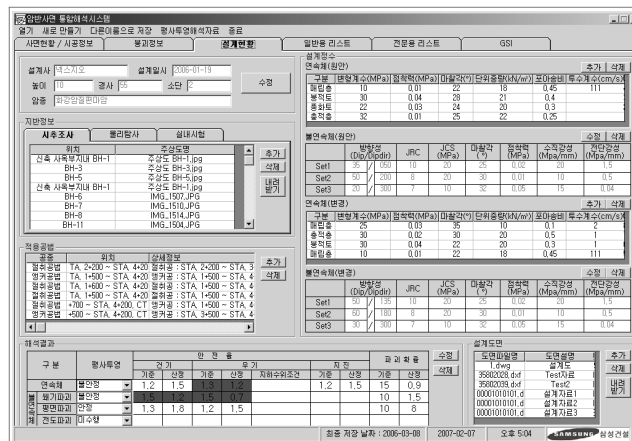


그림 5. 설계현황 상세화면

붕괴정후가 관찰되거나 추가적인 보강공법이 요구되는 사면의 경우 현장 관리자가 사면에 대한 안정성을 개략적으로 평가 할 수 있도록 일반용리스트 탭을 구성하였다. 일반용 리스트를 활용하여 현장관리자가 암반사면에 대해 간편 RMR 평가를 수행할 수 있도록 구성하였다. RQD/spacing 및 불연속면의 상태를 평가하는 항목은 대표적인 암상그림을 선택하도록 하고 일축압축강도 및 지하수위상태 관련 항목은 선택단추로 처리함으로써 손쉽게 RMR 값 산정이 이루어지도록 구성하였다(그림 6).

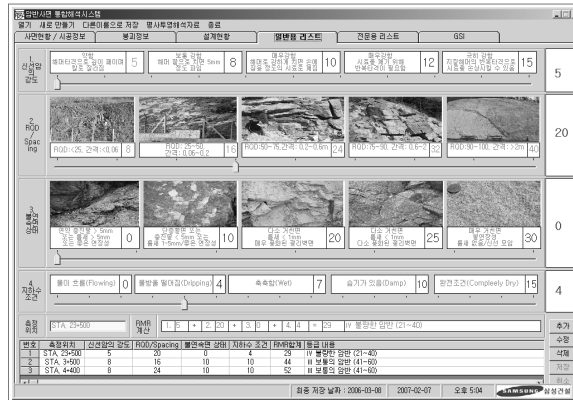


그림 6. 일반용 리스트 탭 내의 간편 RMR 평가 상세화면

2.4 전문용 리스트 및 GSI

앞서 기술한 간편 RMR 외에 상세한 RMR과 SMR 산정이 이루어 질수 있도록 탭을 구성하였다. SMR 산정의 경우 각 절리군별 F1,2,3,4 값에 의한 SMR 값을 계산하고 이중 최저값을 최종 SMR값을 산정결과로 채택하도록 하였다(그림 7 좌).

또한 암종 및 지질구조가 반영된 암반강도정수 도출이 가능한 GSI(Geological Strength Index) 산정탭을 구성하였다. 각 구성항목 산정 시 그림과 도표상의 위치 선택으로 산정결과 계산이 가능하도록 하여 신속한 GSI 도출이 이루어 질 수 있다.(그림 7 우).

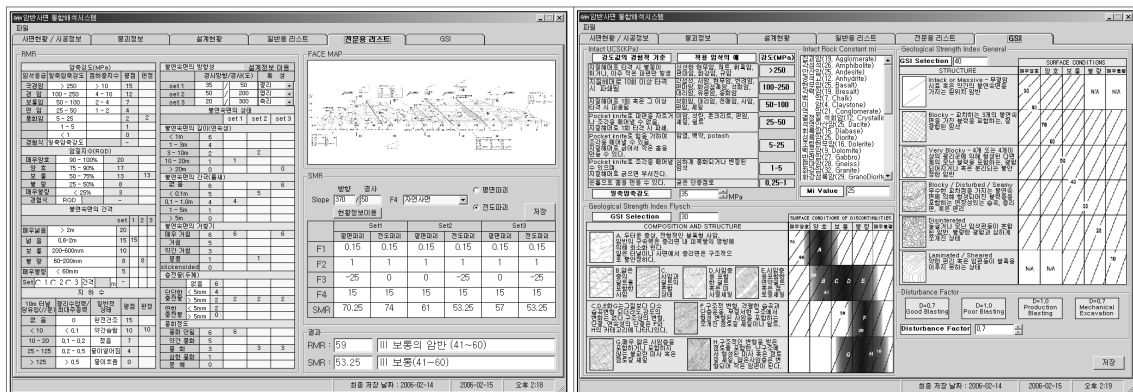


그림 7. RMR/SMR(좌) 평가 및 GSI(우) 평가 화면

3. 안정 해석

암반사면 안정해석 시 지질학적 불연속면 발달에 따른 운동학적 해석(kinematic analysis) 방법인 평사투영 해석을 가장 먼저 실시하여 안정성 여부를 판단한다. 이 때, 불안정한 결과가 도출된 경우, 블록에 작용하는 힘들에 대한 역학적 해석(kinetic analysis)방법인 한계평형해석에 의해 안전율을 도출함으로써 정량적인 안정성 판단을 하게 된다(그림 8).

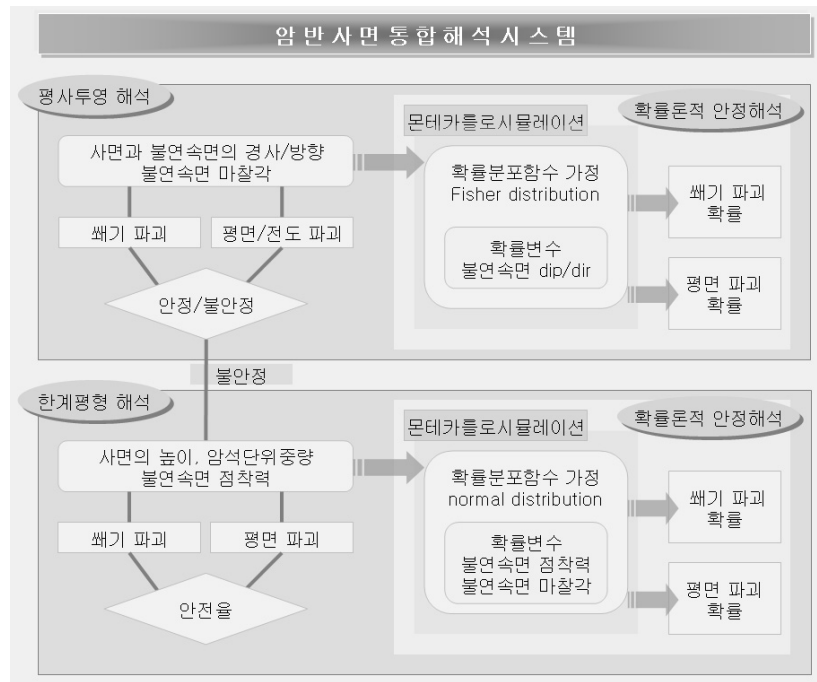


그림 8. 안정해석 흐름도

평사투영 및 한계평형해석 수행 시 입력자료의 불확실성을 감안하여 해석결과의 활용성과 신뢰성을 향상시키기 위해 확률론적 안정해석을 실시한다. 평사투영 해석의 불연속면 방향성을 피셔분포(fisher distribution)를 따르는 확률변수로 가정하고 몬테카를로시뮬레이션에 의한 반복계산과정을 통해 썩기 및 평면 파괴확률을 산정하게 된다. 확률론을 이용한 한계평형해석의 경우 불연속면의 점착력과 마찰각이 정규분포(normal distribution)를 따르는 것으로 가정하여 썩기 및 평면에 대한 파괴확률을 구한다(그림 9).

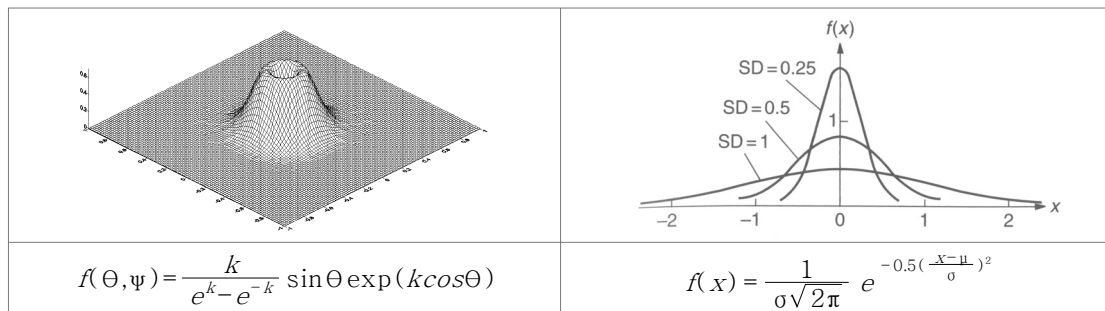


그림 9. fisher분포함수곡선(좌) 및 정규분포함수곡선(우)

3.1 평사투영 안정해석

암반사면에서 발생하는 파괴의 유형은 암반 내에 존재하는 지질학적 불연속면에 의해 좌우된다. 따라서 암반사면의 설계나 안정성 해석시 어떤 종류의 불연속면이 존재하고 있는지를 조사하고 불연속면의 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 운동학적 해석(kinematic analysis)은 이미 존재하고 있거나 계획되어 있는 암반사면에 대해 암반블럭의 기하학적 특성을 이용하여 어떤 종류의 파괴가 발생할 것인가를 파악하는 해석 과정으로 사면과 불연속면의 기하학적 특성에 의하여 결정된다.

평사투영해석을 구현하기 위해 입력창과 평사투영 분석창, 해석결과 창으로 구성하였다. 사면경사 입력시 구배입력(1:X.X)과 경사(도) 입력이 동시에 가능하도록 하여 사용자의 편의를 도모하였다. 평면 및 전도파괴의 경우, 불안정 영역도시를 위한 범위각 설정에 20°, 25°, 30°를 모두 고려할 수 있도록 하였다(그림 10).

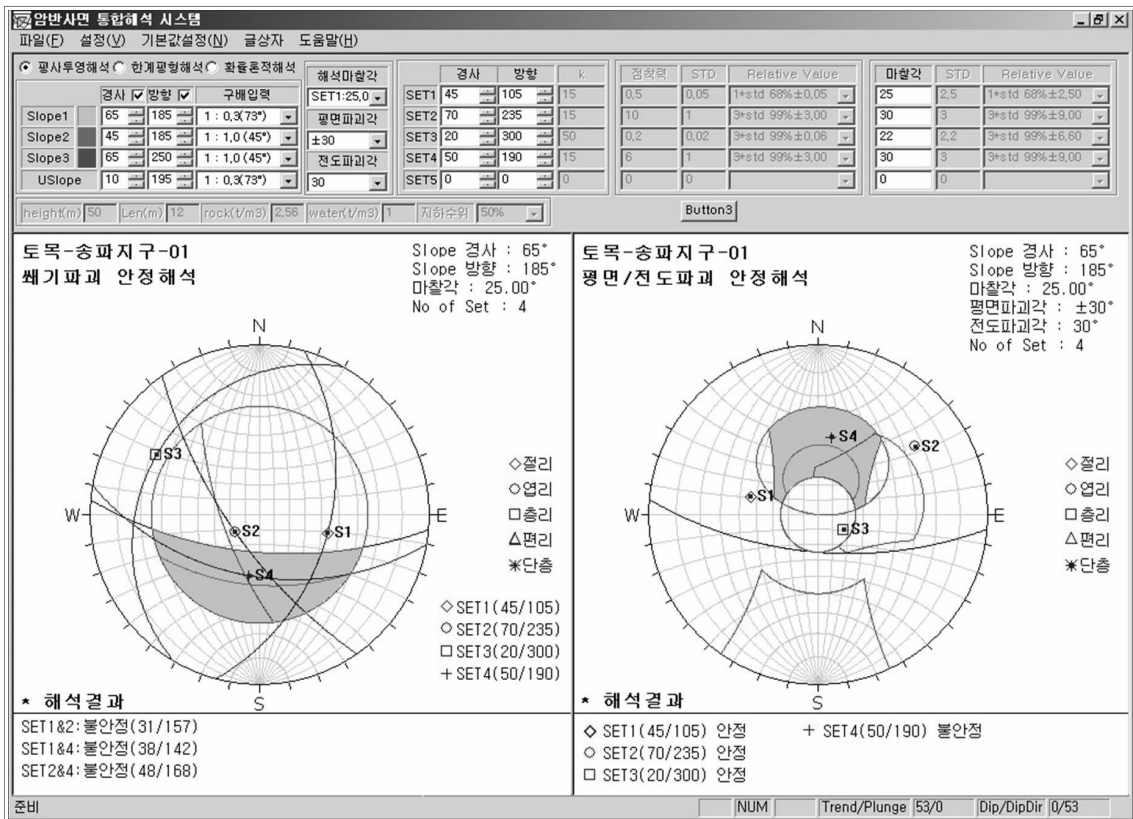


그림 10. 썩기 파괴(좌) 및 평면/전도파괴(우) 안정해석

특히, 현장 관리자가 불안정한 사면에 대해 사면 경사각 변화에 따른 안정성 확보여부를 용이하게 판단할 수 있도록 사면방향성을 3단계에 걸쳐 입력 가능케 함으로써 효율적인 분석이 가능하도록 설계하였다. 그림 7의 우측 그림과 같이 절리군4(Set4)에 의해 평면파괴가 인지되나 사면의 경사각을 65°에서 45°로 완화함으로써 평면파괴의 가능성이 감소하는 결과를 분석 그림 상에서 용이하게 판단할 수 있다.

본 시스템은 입력정수 입력창과 결과창을 하나의 화면에 구성함으로써 사용자 하여금 입력정수 변경에 따른 안정해석결과를 즉각적으로 확인케 하는 특징을 가지고 있다. 절리, 엽리, 단층 등 절리군의 지질학적 종류에 따라 구별되는 기호의 사용이 가능하고, 평면/전도 파괴 해석시 절리군별, 쉼기파괴 해석시 절리군 조합별 안정성 여부와 해당 절리군을 제시함으로써 관리자가 해석결과 및 원인을 용이하게 판단할 수 있다.

3.2 한계평형 안정해석

한계평형 안정해석에 사용되는 쉼기 및 평면파괴의 기본 이론은 Hoek & Bray의 Rock slope engineering에 기술된 내용을 근거로 전산화 하였다. 사면 치수 입력시 그림 11에서와 같이 사면의 위험블록의 형상에 반영되어 이해를 돕도록 설계하였다. 기존의 지하수위를 고려한 해석시 만수위로 고려되던 한계를 탈피하여 다양한 단계의 지하수위가 고려되도록 반영하였다.

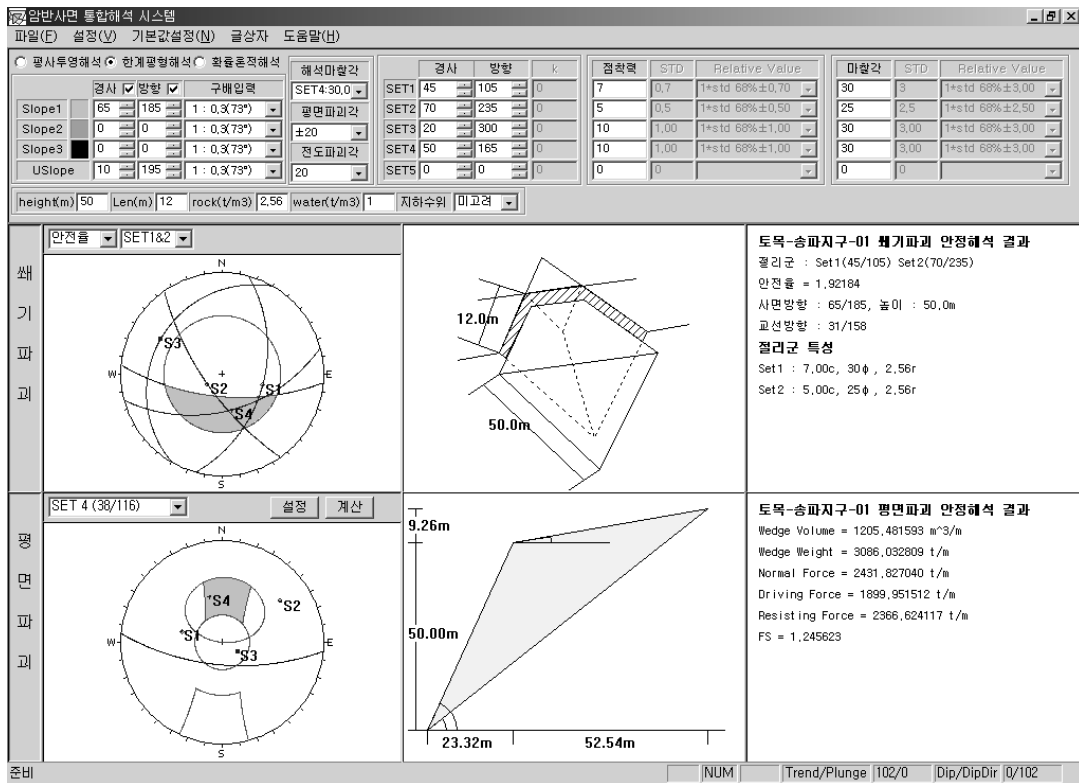


그림 11. 한계평형 안정해석

암반사면의 안정해석시 해석결과에 민감한 영향을 주는 지하수위는 그림 12와 같이 인장균열이 있는 경우와 인장균열이 분포하지 않는 경우로 나누어 고려할 수 있도록 하였다. 인장균열의 유무에 따라 사면 저부(toe)부근에서의 다양한 조건의 지하수 분포양상이 고려되도록 하였으며 사용자는 제시된 예시 그림을 선택하여 계산 방법을 선택할 수 있도록 하였다.

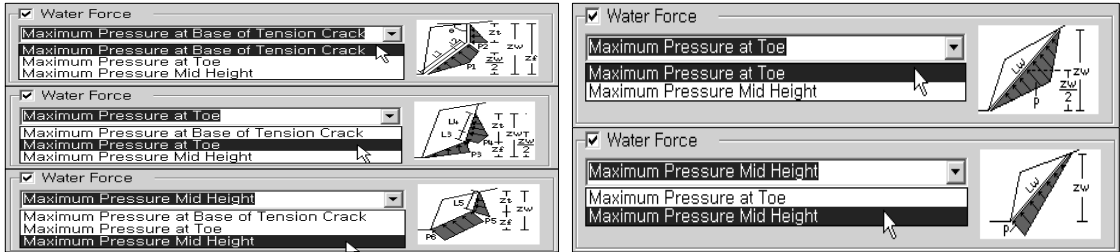


그림 12. 인장균열 유무에 따른 지하수위 고려

3.3 확률론적 안정해석

확률론적 안정해석은 몬테카를로시뮬레이션 과정에 따라 무작위추출(random generation) 된 확률변수값을 기존 평사투영과 한계평형해석에 의해 반복적으로 계산한 후 파괴확률을 산정한다.

평사투영에 의한 썸기/평면파괴의 경우 생성된 불연속면과 불연속면의 조합이 불안정영역에 도시되는 횟수를 전체 반복 횟수로 나누어 파괴확률을 계산하게 되며 결과는 평사투영망에 도시되어 진다.

한계평형 해석에 의한 썸기/평면파괴 확률은 내부적인 반복계산과정을 거쳐 도수분포와 누적분포 그래프를 통해 결과가 도시된다. 보통 1000회의 반복계산에 20초 미만이 소요되는 것으로 나타났다(그림 13).

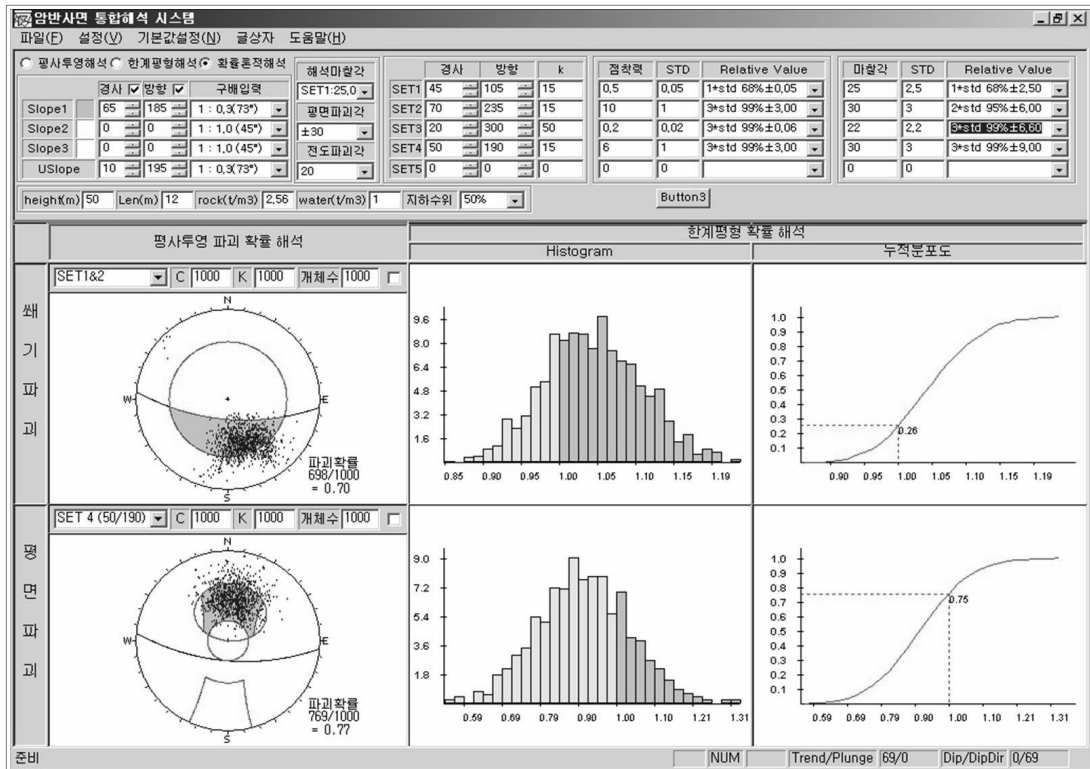


그림 13. 확률론적 안정해석

각각의 확률변수에 확률특성을 부여하기 위해 불연속면 방향성에 대해서는 fisher 상수(k)를 이용하였으며, 점착력 및 마찰각의 경우 표준편차(standard deviation)와 1~3배 표준편차 값에 따른 상하한 값을 추출 범위로 이용하였다(그림 14).

	경사	방향	k	점착력	STD	Relative Value	마찰각	STD	Relative Value
SET1	45	105	15	0,5	0,05	1*std 68%±0,05	25	2,5	1*std 68%±2,50
SET2	70	235	15	10	1	3*std 99%±3,00	30	3	2*std 95%±6,00
SET3	20	300	50	0,2	0,02	3*std 99%±0,06	22	2,2	
SET4	50	190	15	6	1	3*std 99%±3,00	30	3	1*std 68%±2,20 2*std 95%±4,40
SETS	0	0	0	0	0		0	0	3*std 99%±6,60

그림 14. 확률변수 특성치의 입력창

반복계산에 의한 해석결과는 엑셀파일 형태로 저장되도록 하여 해석결과 검증 및 민감도 등의 추가적인 분석에 활용이 가능하도록 하였다. 평사투영에 의한 해석결과는 대원과 극점, 대원교점이 분석회수 만큼 도시될 경우 시각적인 분석에 어려움이 있는 만큼 도시회수를 조절할 수 있도록 고려하였다.

확률론적 해석 - 썩기				점착력1	마찰각1	점착력2	마찰각2	FS
SET1	65/185	SET2	70/235	4,90367	21,01574	5,03739	25,18693	0,62446
USlope	10/195			5,02974	21,55603	4,76937	23,84685	0,63150
Height(m)		50,00	Rock(t/m3)					
Len(m)		12,00	Water(t/m3)					
점착력		7,00	점착력	5,26945	22,58338	3,92693	19,63463	0,63741
std		0,70	std	5,05385	21,65936	5,32826	26,64130	0,64869
Relative Min		4,90	Relative Min	5,20588	22,31091	4,68463	23,42316	0,64893
Relative Max		9,10	Relative Max	5,16920	22,15370	5,40406	27,02031	0,66352
마찰각		30,00	마찰각	5,29028	22,67264	4,96840	24,84202	0,66549
std		3,00	std	5,11285	21,91221	5,75896	28,79482	0,66691
Relative Min		21,00	Relative Min	5,56178	23,83622	4,07718	20,38588	0,67390
Relative Max		39,00	Relative Max	5,31846	22,79341	5,27386	26,36931	0,67672
FS Min		0,62	FS Max	5,39345	23,11479	5,08632	25,43158	0,68021
FS				5,43587	23,29660	5,16519	25,82595	0,68704
	Count							
	0,61293		1					
	0,62966		2					
	0,64650		2					
	0,66333		5					
	0,68017		6					
	0,69700		16					
	0,71383		18					

그림 15. 확률론적 해석결과의 외부저장(exporting)

4. 결 론

본 논문에서는 암반사면의 통합적 관리 및 해석이 가능한 프로그램의 기능과 적용분석을 실시하였다. 현장에서 관리자는 사면의 붕괴이력 및 설계변경 자료 등을 이력 관리할 수 있고 중점관리 대상사면에 대한 건전성평가를 수행함으로써 현장관리의 효율성을 높일 수 있는 것으로 분석되었다.

상세한 안정성 분석을 위해서는 상기 과정에서의 현황 및 설계자료를 바탕으로 평사투영 해석 및 한계평형 해석을 실시하여 파괴 여부 및 안전율 산정이 가능하다. 또한 확률론적 해석에 의한 파괴 확률을 제시함으로써 다양한 분석결과 활용 및 해석결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 배규진, 박혁진(2002), “불연속면의 확률특성을 고려한 암반사면의 평면파괴 확률 산정”, **한국지반공학회지**, 제 18권 2호, pp. 97-105.
2. 박혁진(2002), “점추정법을 이용한 평면파괴의 파괴확률 산정”, **터널과 지하공간**, 제 12권 3호, pp. 189-197.
3. 윤운상, 정의진, 최재원, 김정환, 김원영, 김춘식(2002), “거동특성에 따른 사면 파괴 지수 시스템; SFi-system”, **한국지반공학회 논문집**, 제18권, pp.23-27.
4. 한국시설안전기술공단(2003), **도로절토사면 유지관리지침**, 건설교통부, pp.115.