

해석 방법에 따른 비탈면 최소안전율을 비교 연구 A Comparative Study of Safe Factor of Slope according to Analysis Methods

류향택* · 장정욱** · 정연인***
Hang Taek Ryu*, Jeong Wook Jang** and Youn In Chung***

요지 : 본 연구에서는 한계평형해석에 근거하는 Talren97과 SoilWorks 그리고 유한요소해석에 근거하는 Midas GTS를 이용하여 비탈면의 최소안전율을 비교·분석하였다. 해석 변수로는 비탈면 높이, 소단조건, 지반정수, 지하수위, 비탈면 경사이며 지하수위를 제외한 모든 변수들에 대한 해석은 건기와 우기로 나누어 수행하였다. 그 결과 동일한 이론을 기반으로 하는 Talren97과 SoilWorks에 의한 비탈면 최소안전율은 동일한 값을 나타내어 프로그램간의 차이는 없는 것으로 확인되었다. 한계평형해석에 비하여 유한요소해석 결과가 다소 높은 안전율을 나타내었으며 평균적으로 약 2.4% 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 그러나 한계평형해석과 유한요소해석의 결과 값 차이는 실무에서는 무시할 수 있는 범위이므로 프로그램 및 해석방법에 따른 비탈면 안전율의 차이는 없는 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 한계평형해석, 유한요소해석, 최소안전율, 비탈면 안정해석

Abstract : This research compared and analyzed safety ratio of slope with Talren97 and SoilWorks based on limit equilibrium analysis and Midas GTS based on finite element analysis. For the analysis variables, there are slope height, berm condition, soil parameter, groundwater level, slope inclination. All of slope stability analysis were performed by dividing into dry season and rainy season. As the result of the analysis of Talren97 and SoilWorks based on same theory, safety ratio of slope shows same value, so there was no difference between the programs. In comparison with limit equilibrium analysis, the result of finite element analysis showed somewhat high ratio of safety and it was higher by about 2.4% averagely. The difference between the result of limit equilibrium analysis and that of finite element analysis is in the range which can ignored in practical work.

Keywords : limit equilibrium analysis, finite element analysis, minimum safety factor, slope stability analysis

1. 서 론

우리나라는 국토의 약 70%가 산지로 이루어져 있으며 산지나 구릉지에서 토목구조물이나 건축구조물을 축조하는 경우 대규모 비탈면을 형성하는 경우가 많다. 또한 해안 및 항만공사에서도 연약지반 개량을 위한 재하성토 비탈면, 호안이나 방파제와 같은 인공적인 비탈면이 발생하며 이때 비탈면의 안정성 확보는 대단히 중요한 문제이다. 장기간 자연적인 안정화 과정을 거친 자연 비탈면이나 구성 재료의 품질 및 시공 관리가 가능한 쌓기 비탈면은 통상 안전율을 확보하는 경우가 많지만, 깎기 비탈면의 경우는 인위적인 하부 지지력 제거로 급속한 힘의 불균형 상태를 초래하여 상대적으로 비탈면 파괴의 위험이 높다고 할 수 있다.

비탈면 안정성 검증을 위해 많은 이론들이 연구되었고 그러한 이론을 근거로 하는 프로그램들이 개발되어 상용화되고

있다. 비탈면 안정 해석의 대표적인 이론은 한계평형법과 유한요소법이다. 한계평형해석은 활동면을 따라 발생하는 전단응력과 비탈면 구성 재료의 전단강도를 분석하여 비탈면의 안정성을 평가하는 방법으로써 일반적으로 설계에 이용되고 있는 방법이다. 최근에는 비탈면의 붕괴거동에 대해 분석하고 비탈면의 진행적 파괴에 대한 적절한 계측위치 및 계측관리 값을 사전에 파악할 수 있는 유한요소법을 이용한 해석이 부각되고 있다.

이와 같이 비탈면 안정성 평가를 위하여 한계평형해석과 유한요소해석이 일반적으로 이용되어지고 있지만 두 해석 방법의 결과를 비교·분석한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 한계평형해석과 유한요소해석에 의한 비탈면 안전율을 비교·분석하고자 한다. 한계평형해석은 Talren97과 Soilworks를 이용하였고 유한요소해석은 Midas GTS를 이용하여 동일 비탈면에 대한 비탈면 안정 해석을 수행하고 그 결

*경상남도청(Gyeongsangnam-do Provincial Government)
**창원대학교 토목환경화학융합공학부(Corresponding author: Jeong Wook Jang, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University, Changwon, Gyeongnam 51140, Korea, Tel: +82-55-213-3775, Fax: +82-55-213-3775, jang@changwon.ac.kr)
***계명대학교 건축토목공학부(School of Architecture and Civil Engineering, Keimyung University)

과를 비교·분석하였다(Ryu, 2013).

2. 해석 조건

2.1 해석 변수

비탈면 안정 해석에 사용한 변수로는 비탈면 높이, 소단조건, 지반정수, 지하수위 조건, 비탈면 경사(구배)이며, 지하수위 조건을 제외한 모든 변수에 대한 해석은 건기와 우기로 나누어 수행하였다. 우기시 해석은 지표면까지 완전 포화되는 조건에서 수행하였고, 비탈면을 구성하는 지반의 기본 강도정수 값은 $c = 10 \text{ kN/m}^2$, $\phi = 30^\circ$ 이며 비탈면 구배는 1 : 1.5로 하였다.

일반적으로 동일한 조건에서 비탈면 높이가 높아짐에 따라 비탈면의 안정성은 저하되므로 비탈면 높이를 10 m, 15 m, 20 m, 30 m로 설정하여 해석을 수행하였다. Fig. 1은 비탈면 높이에 따른 해석 모델을 나타낸 것이다.

소단은 비탈면 점검로 및 배수로 역할을 수행하기도 하지만 소단 유무 및 소단 조건에 따라 비탈면의 안정성은 달라

진다. Fig. 2는 소단 조건에 따른 해석 모델을 나타내고 있으며, 소단 유무 및 소단 조건을 달리하여 해석을 수행하였다.

비탈면의 경사는 편의상 구배로 나타내었으며 일반적으로 동일조건에서 비탈면 구배가 급해짐에 따라 비탈면의 안정성은 저하된다. 비탈면의 구배가 1 : 0.5, 1 : 1.0, 1 : 1.5, 1 : 2.0인 4가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 3은 비탈면 구배에 따른 해석 모델을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 지반정수를 변수로 해석을 수행한 경우의 해석 모델을 나타내고 있으며 해석 시에 사용한 지반의 강도정수 조건을 정리하여 나타내었다. 지반정수 조건은 크게 두 가지 조건으로 나눌 수 있다. 점착력(c)을 10 kN/m^2 으로 고정시키고 내부마찰각(ϕ)을 0° , 10° , 20° , 30° 로 변화시킨 경우와 내부마찰각을 30° 로 고정시킨 후 점착력을 10 kN/m^2 , 20 kN/m^2 , 30 kN/m^2 , 40 kN/m^2 으로 변화시킨 경우이다.

Fig. 5는 지하수위 조건에 따른 해석 모델을 나타내고 있다. 지하수위가 지표면에서 비탈면 높이의 25%(5 m), 50%(10 m), 75%(15 m), 100%(20 m) 위치에 있는 경우를 상정하여 해석을 수행하였다.

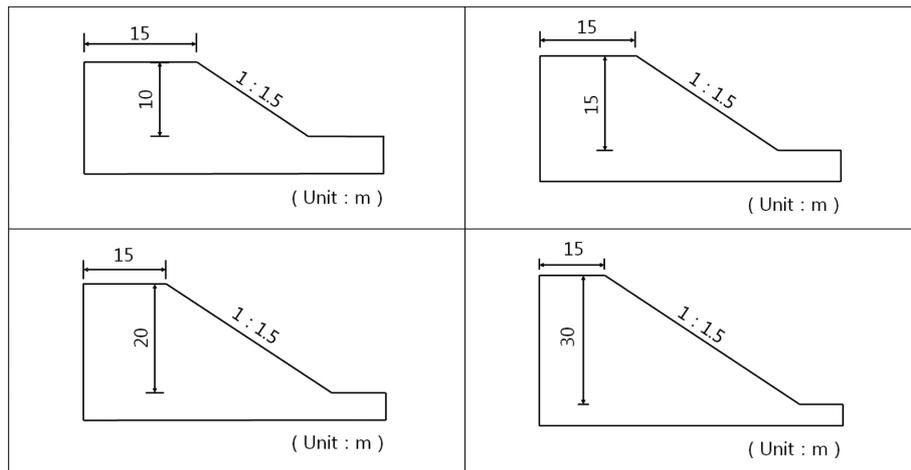


Fig. 1. Analytical models based on height of slope.

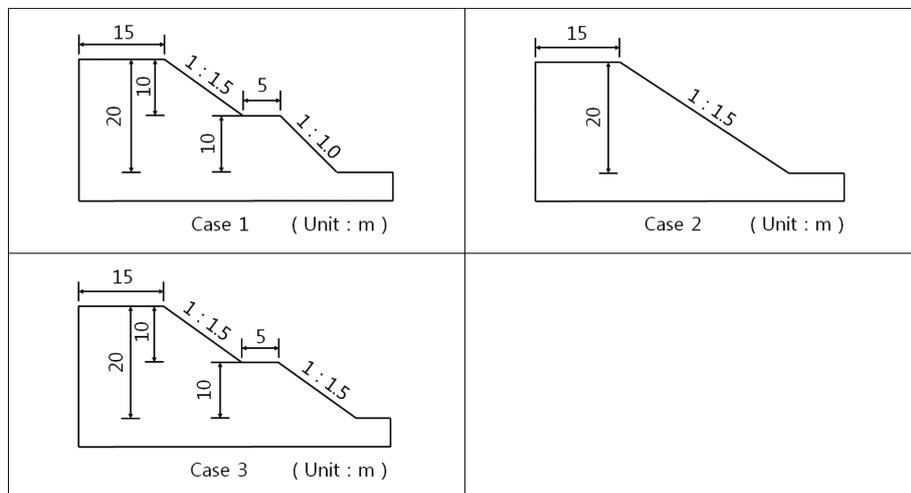


Fig. 2. Analytical models based on condition of berm.

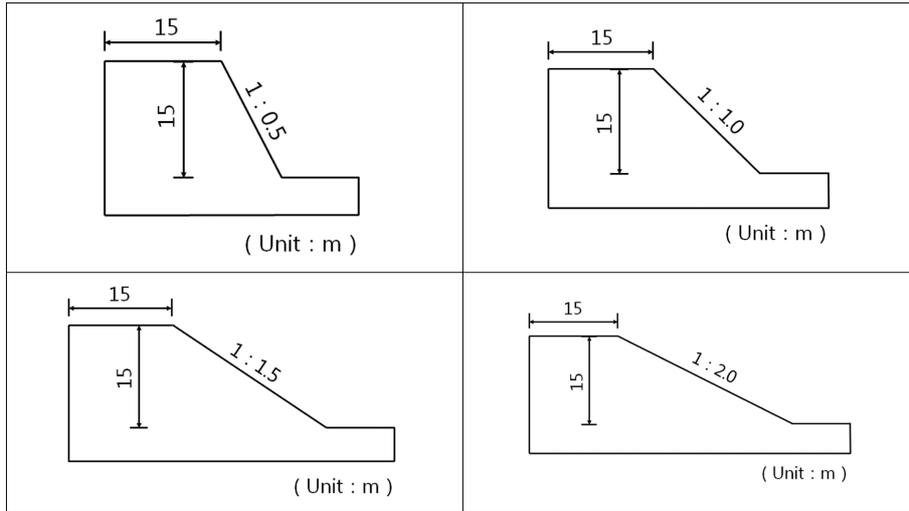


Fig. 3. Analytical models based on gradient of slope.

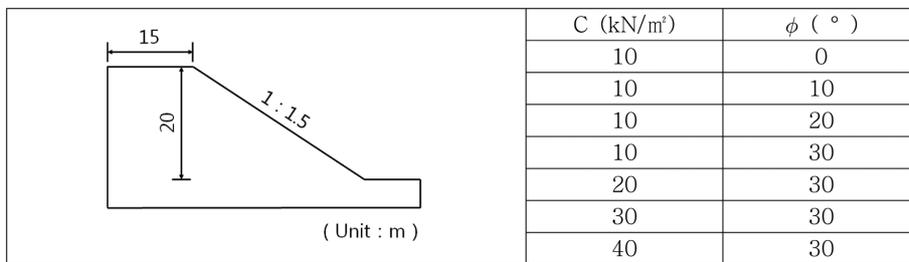


Fig. 4. Strength parameters and analysis model used for analysis.

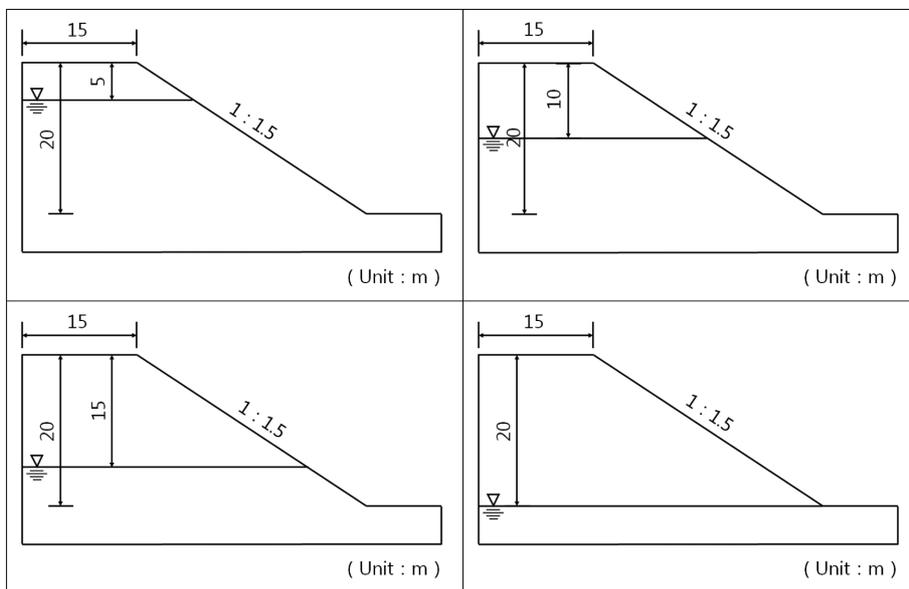


Fig. 5. Analytical models based on ground water level.

2.2 해석 방법

한계평형법의 해석방법에는 Fellenius의 방법(1927), Bishop의 방법(1955), Janbu의 방법(1957, 1968), Spencer의 방법(1967) 등이 있다. 한계평형해석 프로그램인 Talren97과 SoilWorks를 이용한 해석에서는 Bishop의 방법을 이용하였다

(Madasit, 2013).

비탈면 안정해석을 위한 유한요소법의 해석 방법에는 강도 감소법과 간접법이 있다. 본 연구에서는 강도감소법을 이용하였다. 강도감소법은 비탈면 구성재료의 전단강도를 서서히 감소시켜 계산이 수렴되지 않는 지점까지 해석을 수행하여 그

시점을 비탈면의 파괴로 간주하고 그 때의 최대 강도 저하율을 비탈면의 최소안전율로 간주하는 방법이다(Madasit, 2013).

의한 해석 결과의 일예를 나타낸 것으로, 비탈면 높이 10 m 인 경우의 우기시 한계평형해석 결과를 나타내고 있다.

Figs. 8과 9는 우기시 소단이 있는 경우의 한계평형해석 결과를 나타낸 것이다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 Talren97과 SoilWorks의 해석 결과

Figs. 6과 7은 동일 조건에 대한 Talren97과 SoilWorks에

3.2 SoilWorks와 Midas GTS의 해석 결과

Figs. 10과 11은 동일 조건에 대한 SoilWorks와 Midas

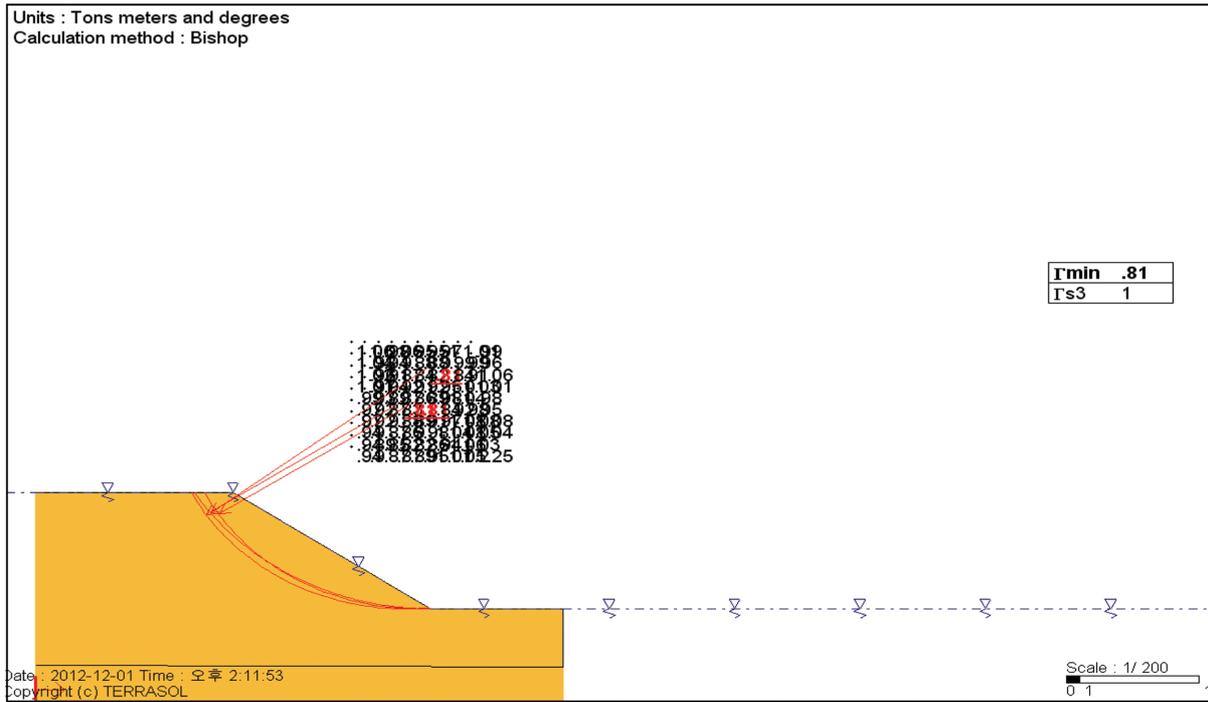


Fig. 6. Analysis result by the Talren97 (Fs = 0.81).

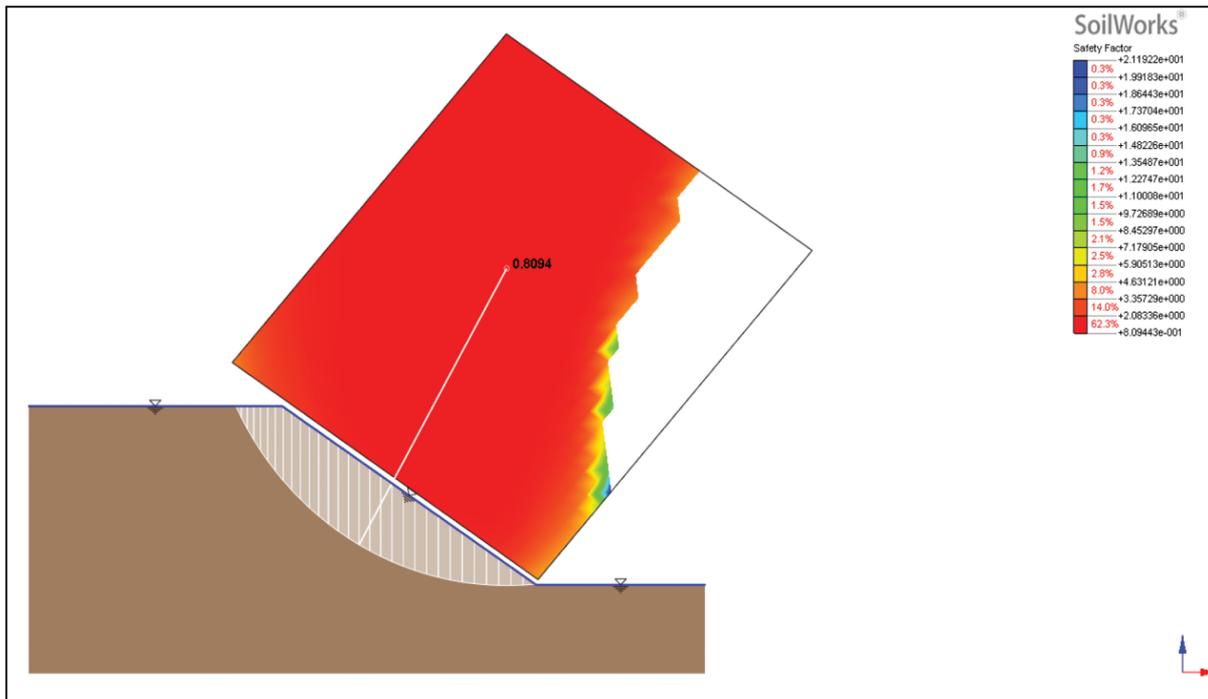


Fig. 7. Analysis result by the SoilWorks (Fs = 0.809).

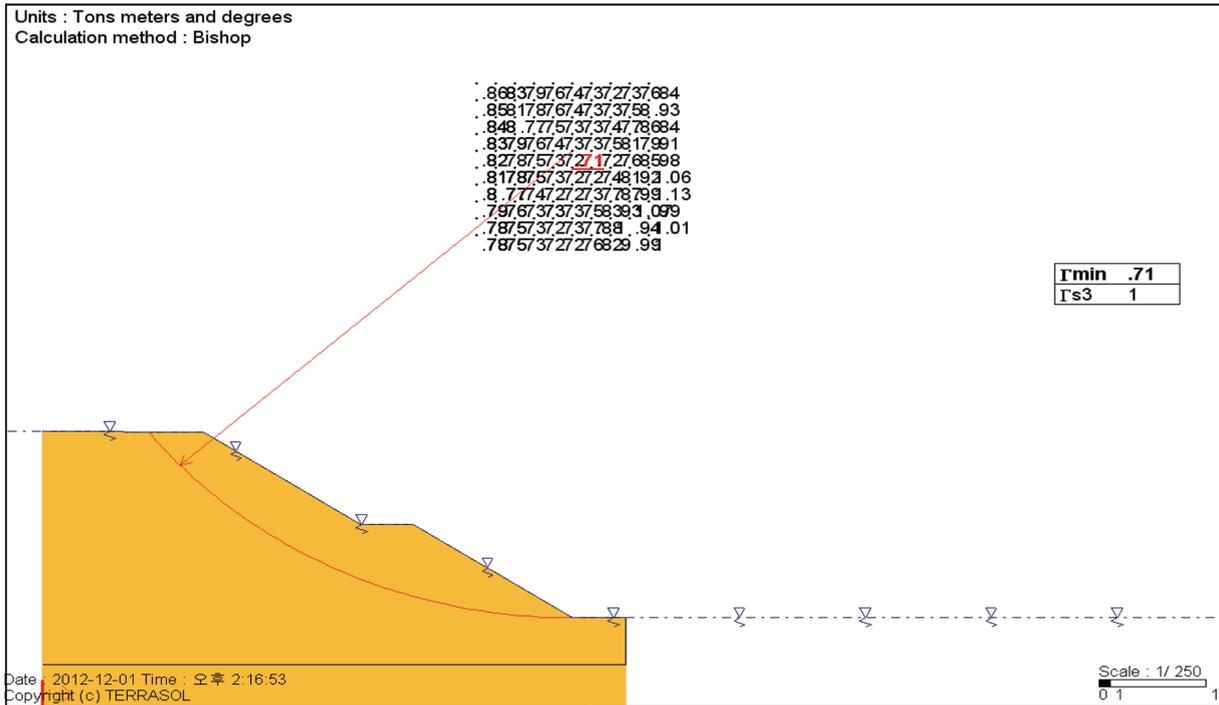


Fig. 8. Analysis result by the Talren97 (Fs = 0.71).

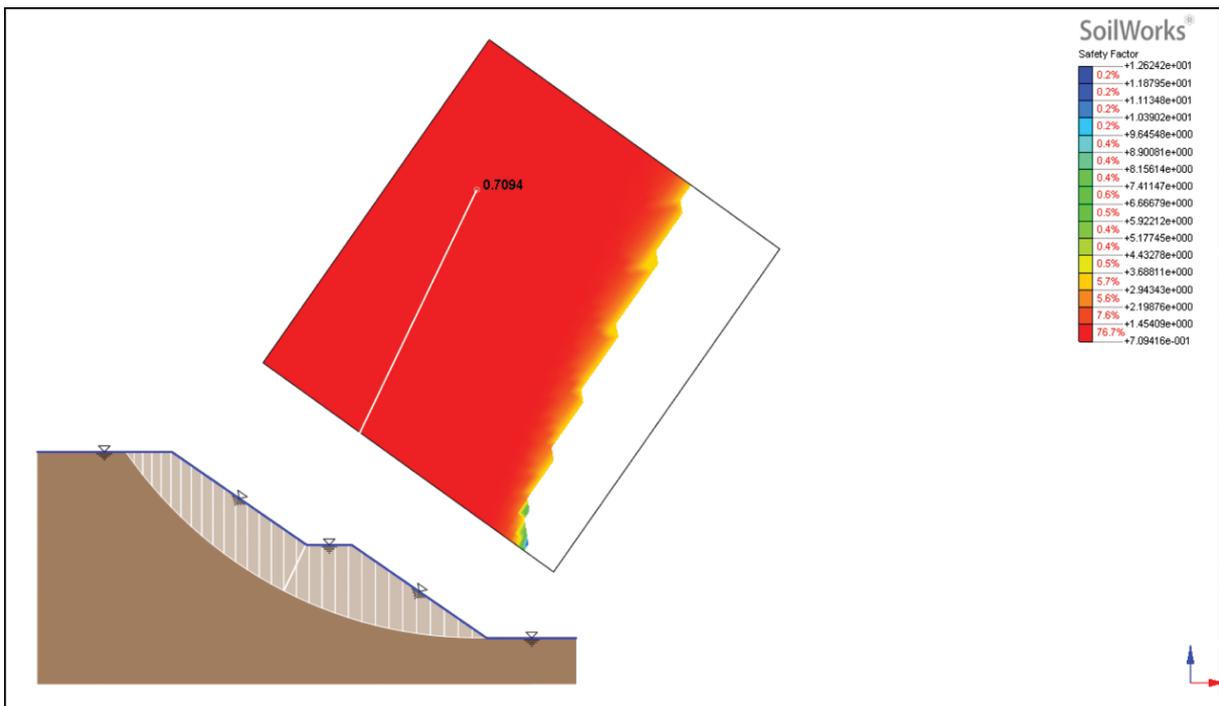


Fig. 9. Analysis result by the SoilWorks (Fs = 0.709).

GTS에 의한 해석 결과의 일례를 나타낸 것으로, 우기시 지반정수 조건이 $c = kN/m^2$, $\phi = 10^\circ$ 인 경우의 한계평형해석 결과와 유한요소해석 결과를 나타내고 있다.

Figs. 12와 13은 지하수위가 지표면에서 5 m 아래에 위치할 때 한계평형해석 결과와 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다.

3.3 해석 결과의 분석

Table 1과 Table 2는 건기 및 우기시 각 변수값에 따른 비탈면 안정해석 결과를 표로 정리한 것이며, Table 3은 지하수위에 따른 해석 결과를 정리한 것이다.

Figs. 14와 15는 건기 및 우기시 비탈면 높이에 따른 해석 결과를 나타낸 그래프이다. 비탈면 높이가 10 m, 15 m인 경

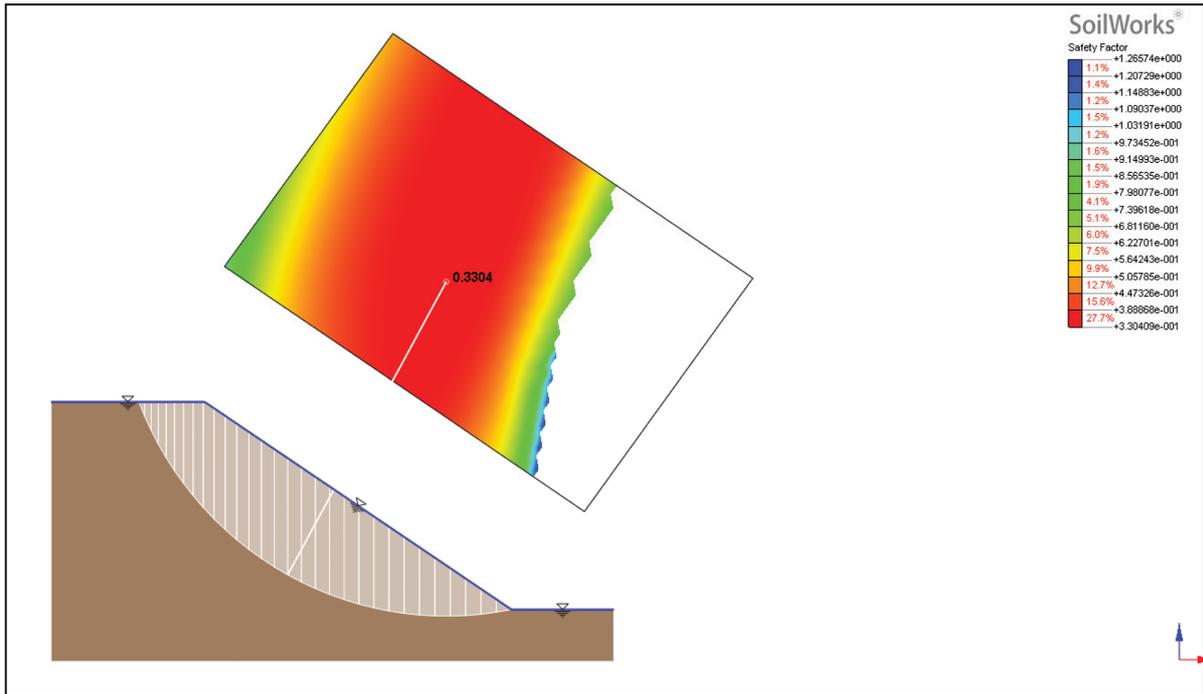


Fig. 10. Analysis result by the SoilWorks (Fs = 0.33).

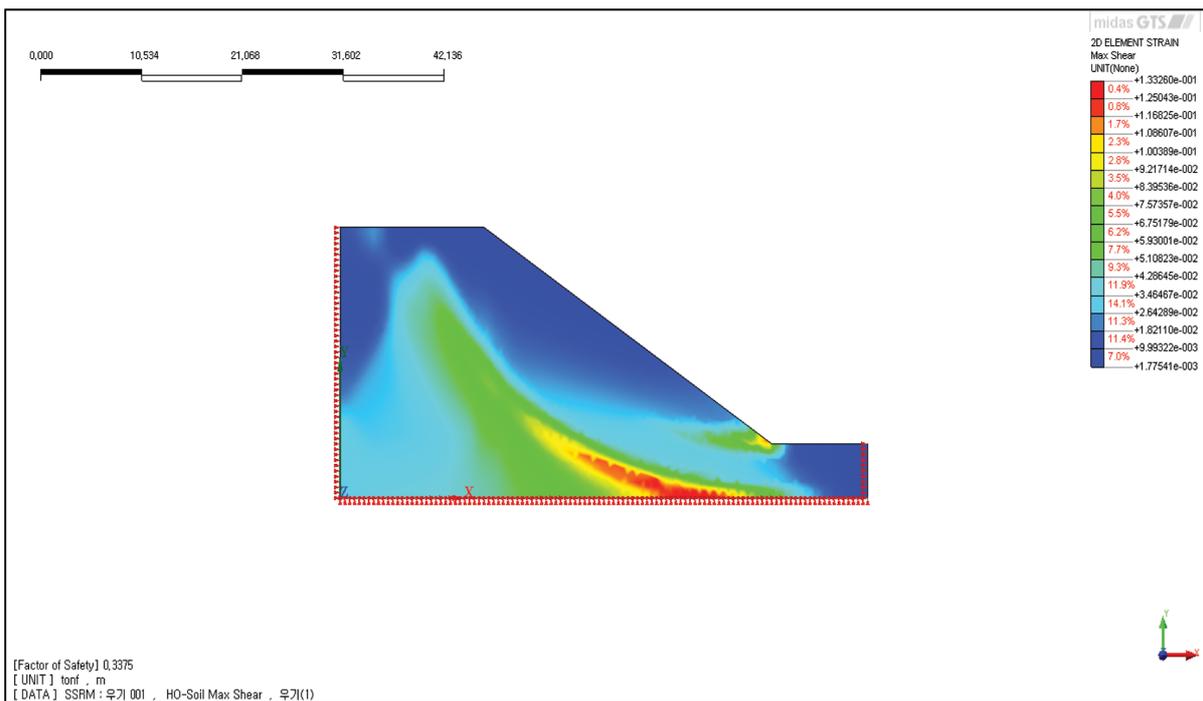


Fig. 11. Analysis result by the Midas GTS (Fs = 0.338).

우에는 유한요소법에 의한 안전율이 한계평형법에 의한 안전율보다 다소 높게 나타났으며, 높이가 높아질수록 두 해석간의 안전율 차이는 미미한 것으로 나타났다.

Figs. 16과 17은 소단 조건에 따른 해석 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 소단이 있는 경우에는 두 해석간 안전율 차이는 미미하나 소단이 있는 경우에는 유한요소법에 의한 안전율이 다소 높게 나타났다.

Figs. 18과 19는 비탈면 구배에 따른 해석 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 비탈면 구배에 따른 해석 결과, 유한요소법에 의한 안전율이 한계평형법에 의한 안전율보다 미미하게 높기는 하나 거의 유사한 값을 나타내었다.

Figs. 20과 21은 지반 강도정수에 따른 해석 결과를 그래프로 나타낸 것이며, 건·우기시 해석 결과 모두 비슷한 값을 보임을 알 수 있다.

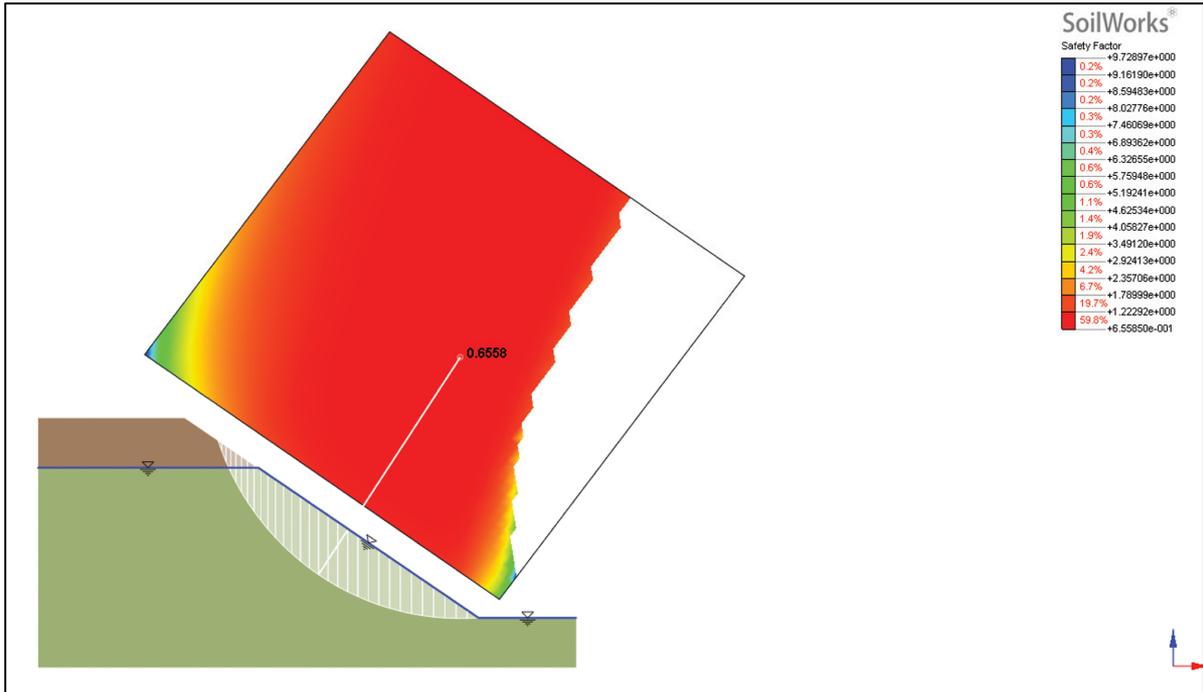


Fig. 12. Analysis result by the SoilWorks (Fs = 0.656).

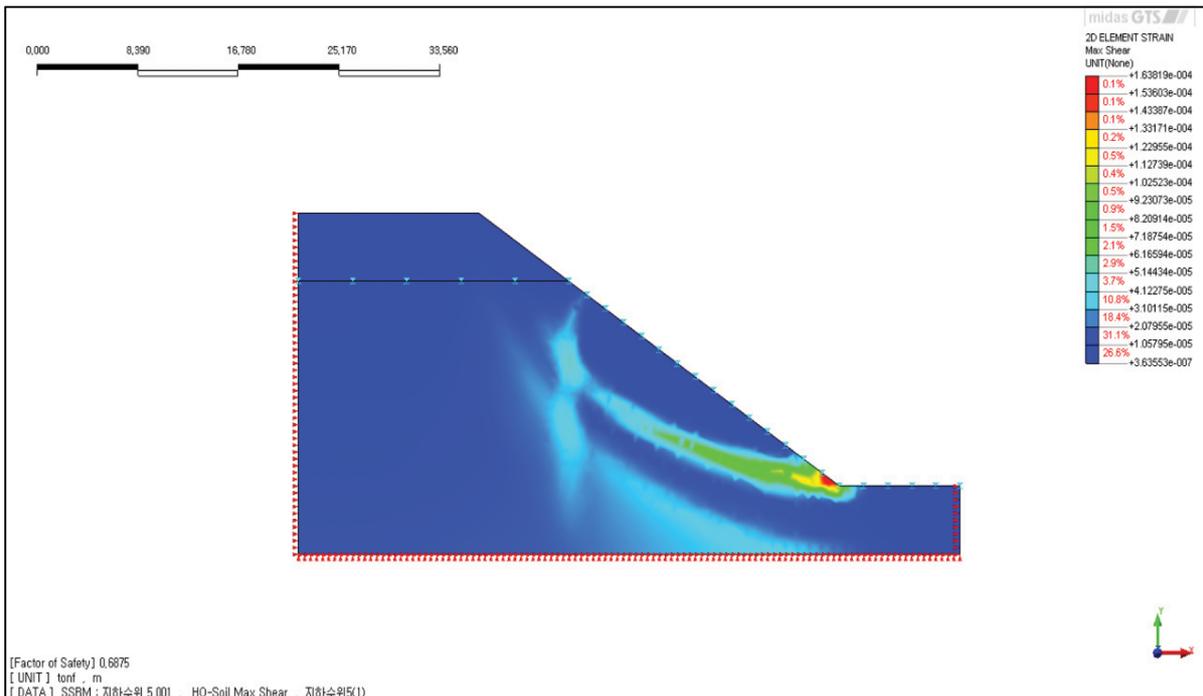


Fig. 13. Analysis result by the Midas GTS (Fs = 0.688).

Fig. 22는 지하수위 조건에 따른 해석 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 두 해석법 간의 해석 결과는 비교적 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

한계평형해석에 근거하는 Talren97과 SoilWorks 그리고 유

한요소해석에 근거하는 Midas GTS를 이용하여 동일 조건의 비탈면에 대한 안정성 해석을 수행하여 그 결과를 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동일한 이론을 기반으로 하는 Talren97과 SoilWorks에 의한 해석 결과, 동일 조건 비탈면의 최소 안전율은 거의 동일한 값을 나타내어 프로그램별 오차는 없는 것으로 확인되었다.

Table 1. Analytical safety factors for each analytical models during dry season

Analysis parameter	Analysis program			
	Talren97	Soilworks	MidasGTS	
Height of slope				
10 m	1.61	1.603	1.663	
15 m	1.42	1.421	1.463	
20 m	1.32	1.319	1.338	
30 m	1.21	1.208	1.213	
Condition of berm				
Case1	1.26	1.254	1.338	
Case2	1.32	1.319	1.338	
Case3	1.56	1.555	1.563	
Gradient of slope				
1 : 0.5	0.76	0.761	0.813	
1 : 1.0	1.09	1.088	1.138	
1 : 1.5	1.42	1.421	1.463	
1 : 2.0	1.75	1.748	1.788	
c (kN/m ²)	ϕ (°)			
10	0	0.17	0.175	0.163
10	10	0.58	0.585	0.588
10	20	0.94	0.942	0.963
10	30	1.32	1.319	1.338
20	30	1.60	1.601	1.613
30	30	1.85	1.849	1.863
40	30	2.08	2.078	2.088

Table 2. Analytical safety factors for each analytical models during rainy season

Analysis parameter	Analysis program			
	Talren97	Soilworks	MidasGTS	
Height of slope				
10 m	0.81	0.809	0.863	
15 m	0.65	0.652	0.688	
20 m	0.57	0.568	0.588	
30 m	0.47	0.473	0.488	
Condition of berm				
Case1	0.56	0.567	0.613	
Case2	0.57	0.568	0.588	
Case3	0.71	0.709	0.738	
Gradient of slope				
1 : 0.5	0.12	0.121	0.173	
1 : 1.0	0.42	0.422	0.488	
1 : 1.5	0.67	0.652	0.688	
1 : 2.0	0.85	0.851	0.888	
c (kN/m ²)	ϕ (°)			
10	0	0.17	0.175	0.163
10	10	0.33	0.33	0.338
10	20	0.45	0.449	0.463
10	30	0.57	0.568	0.588
20	30	0.81	0.808	0.838
30	30	1.02	1.02	1.063
40	30	1.22	1.222	1.263

Table 3. Analytical safety factors according to ground water level

Ground water level	Talren97	Soilworks	MidasGTS
5 m	0.65	0.656	0.688
10 m	0.80	0.801	0.838
15 m	1.12	1.123	1.088
20 m	1.32	1.319	1.338

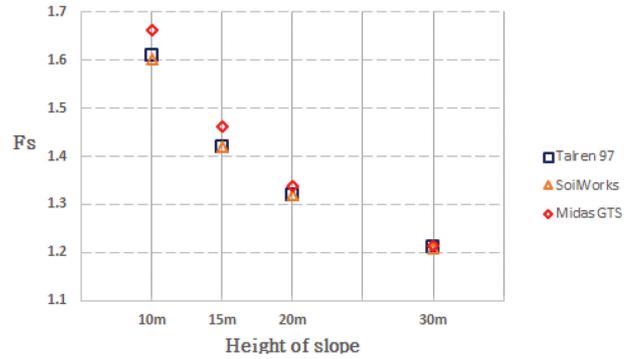


Fig. 14. Safety factors according to height of slope during dry season.

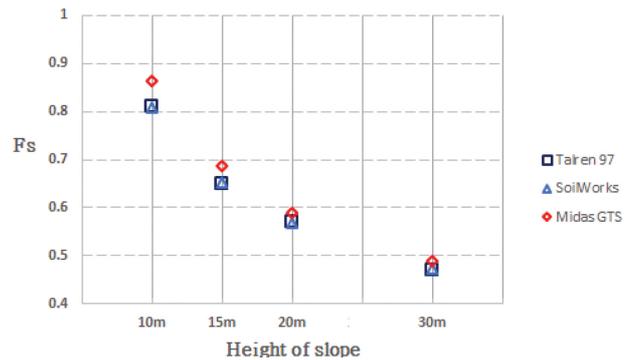


Fig. 15. Safety factors according to height of slope during rainy season.

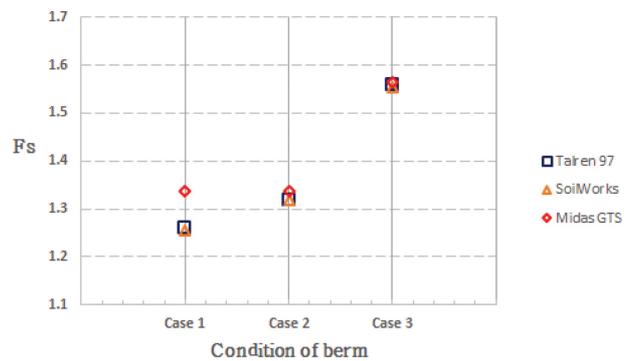


Fig. 16. Safety factor according to condition of berm during dry season.

2. Midas GTS에 의해 수행된 유한요소해석 결과의 안전율이 Talren97과 SoilWorks에 의해 수행된 한계평형해석 결과의 안전율보다 평균적으로 약 2.4% 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 힘의 평형조건에 대한 가정 차이에 기인한 결과로 판단된다.

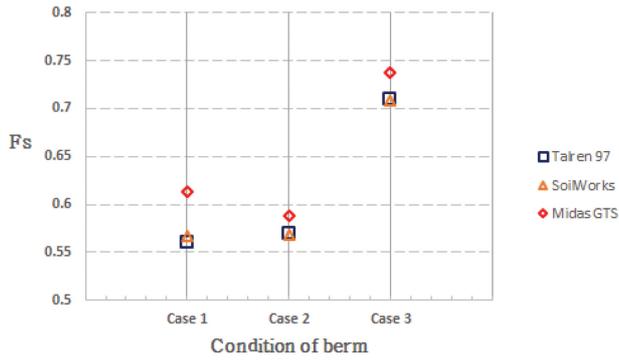


Fig. 17. Safety factor according to condition of berm during rainy season.

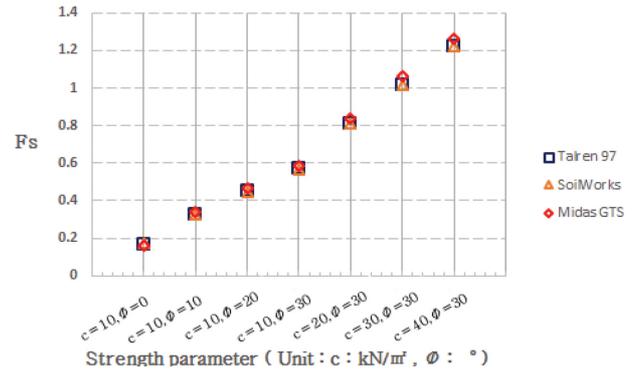


Fig. 21. Safety factor according to strength parameter during rainy season.

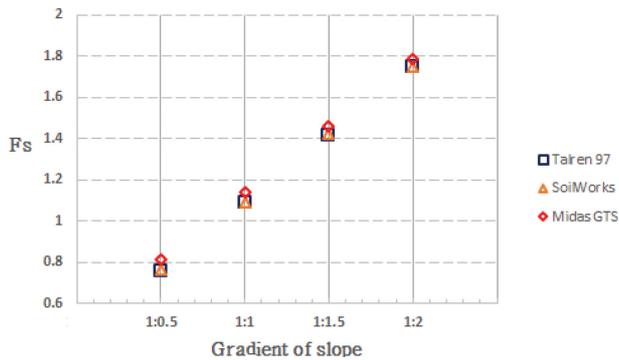


Fig. 18. Safety factor according to gradient of slope during dry season.

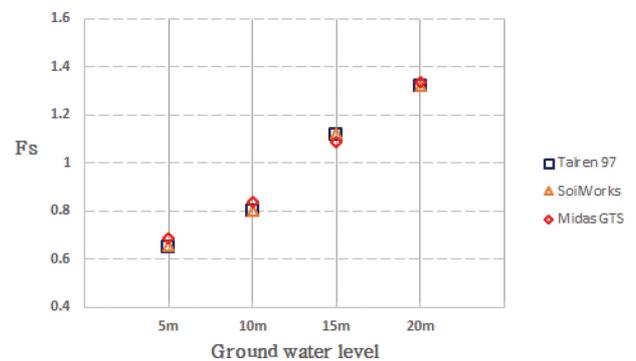


Fig. 22. Safety factor according to ground water level.

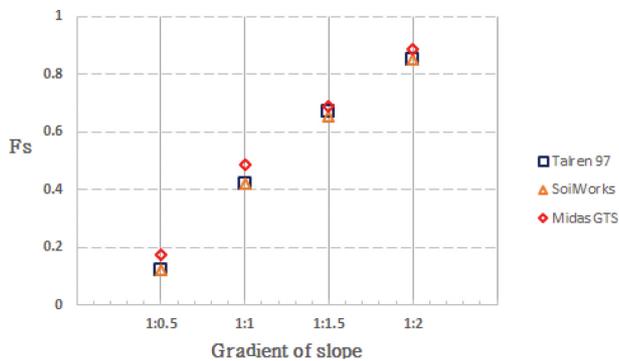


Fig. 19. Safety factor according to gradient of slope during rainy season.

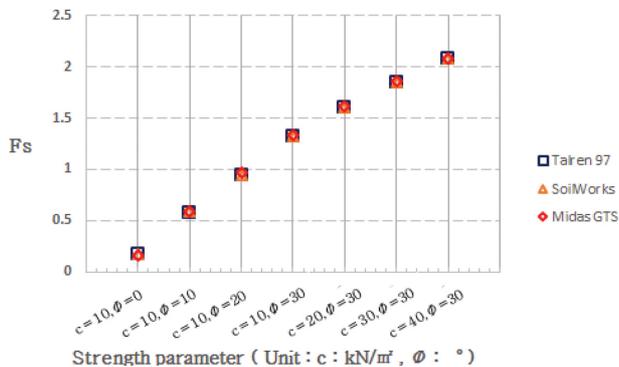


Fig. 20. Safety factor according to strength parameter during dry season.

3. 유한요소해석과 한계평형해석의 결과 값의 오차범위는 $\pm 5\%$ 이내이므로 실용상 정해에 가까운 값으로 판단되며, 프로그램 및 해석방법에 따른 비탈면 안전율 차이는 없으므로 판단되었다. 따라서 응력이나 변위에 대한 검토가 필요한 경우에는 유한요소해석을 수행해야 하지만 최소안전율을 확인하고자 하는 경우에는 Bishop 방법에 의한 한계평형해석만으로도 충분한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

References

Bishop, A.W. (1955). The use of slip circle in the stability analysis of Earth Slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.

Fellenius, W. (1927). *Erdstatische Berechnungen*. revised edition, W. Ernst u. Sons, Berlin.

Janbu, N. (1957). Earth pressure and bearing capacity calculations by generalized procedure of slices. *Proceedings of 4th international conference, SMFE, London*, 2, 207-212.

Janbu, N. (1968). *Slope stability calculations*. Soil Mechanics and Foundation Engineering Report, The Technical University of

Norway, Trondheim.
Midasit (2013). Analysis Reference (in Korean).
Midasit (2013). Verification Manual SoilWorks (in Korean).
Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11-26.
Ryu, H.T. (2013). A Comparative Study of Safe Factor of Slope

with Analysis Methods. Master's Thesis, Changwon University (in Korean).

Received 5 September, 2018

Revised 13 September, 2018

Accepted 1 October, 2018