한국지반공학회논문집 제23권 11호 2007년 11월 pp. 109 ~ 117

Fuzzy Set Theory와 Monte Carlo Simulation을 이용한 암반사면의 파괴확률 산정기법 연구

The Evaluation of Failure Probability for Rock Slope Based on Fuzzy Set Theory and Monte Carlo Simulation

박 혁 진[1] Park, Hyuck-Jin

Abstract

Uncertainty is pervasive in rock slope stability analysis due to various reasons and subsequently it may cause serious rock slope failures. Therefore, the importance of uncertainty has been recognized and subsequently the probability theory has been used to quantify the uncertainty since 1980's. However, some uncertainties, due to incomplete information, cannot be handled satisfactorily in the probability theory and the fuzzy set theory is more appropriate for those uncertainties. In this study the random variable is considered as fuzzy number and the fuzzy set theory is employed in rock slope stability analysis. However, the previous fuzzy analysis employed the approximate method, which is first order second moment method and point estimate method. Since previous studies used only the representative values from membership function to evaluate the stability of rock slope, the approximated analysis results have been obtained in previous studies. Therefore, the Monte Carlo simulation technique is utilized to evaluate the probability of failure for rock slope in the current study. This overcomes the shortcomings of previous studies, which are employed vertex method. With Monte Carlo simulation technique, more complete analysis results can be secured in the proposed method. The proposed method has been applied to the practical example. According to the analysis results, the probabilities of failure obtained from the fuzzy Monte Carlo simulation coincide with the probabilities of failure from the probabilistic analysis.

요 지

암반사면의 안정성 해석에는 다양한 원인에 의하여 불확실성이 개입하게 되며 경우에 따라 이러한 불확실성이 암반사면의 붕괴원인이 되기도 한다. 따라서 1980년대 이후부터 이러한 불확실성에 대한 중요성이 인식되었고 이를 정량화하기 위한 기법의 하나로 확률론적 해석기법이 제안되었다. 그러나 확률론적 해석기법은 불확실성에 대한 정보를 충분하게 획득할 수 있어 확률변수(random variable)의 확률특성을 정확하게 파악할 수 있다는 가정 하에 그 적용이 가능하다. 또한 불확실성중 공간적인 변동성이나 불균질성에 의한 불확실성은 확률론에 의해 쉽게 정량화될 수 있으나 측정오차나 측정수량의 부족 등에 의해 기인하는 불확실성은 확률론에 의해 다루기 어려운 것이 사실이다. 따라서 이러한 한계점을 보완하기 위해 퍼지집합이론(fuzzy set theory)의 활용이 제안되었다. 본 연구에서는 확률변수를 퍼지숫자(fuzzy number)로 고려하여 퍼지집합이론을 활용하였고 이를 해석하기 위한 방법으로 몬테카를로기법(Monte Carlo simulation) 기법을 제안하였다. 이것은 퍼지숫자(fuzzy number)를 분석하기 위해 꼭지점(vertex) 기법이나 점추정법(point estimate method, PEM), 일계이차모멘트법(first order second moment method, FOSM)의 기법을 활용하였던 기존의 방법이 대표값만을 이용했던 단점을 보완할 수 있을 것으로 보인다. 제안된 기법의 적용성을 판단하기위해 현장을 선정하여 적용해 보았다. 결정론적 해석 결과 절리군 2는 안전한 것으로 절리군 4는 불안정한 것으로 해석되었다. 반면 확률론적 해석 결과 절리군 2의 경우 29.3%의 파괴확률을, 절리군 4의 경우 73.5%의 파괴확률을 보였다. 본 연구를 통해 제안된 기법을 활용하여 파괴확률을 계산해본 결과 절리군 2의 경우 33.5%, 절리군 4의 경우 73.5%로 확률론 해석기법의 결과와 유사하게 산정되었다. 따라서 본 연구에 의해 제안된 해석기법인 퍼지몬테카를로기법(Fuzzy Monte Carlo simulation) 기법이 이전의 해석결과와 유사한 해석결과를 보여주면서 자료의 분산이 많이 감소했다는 것을 알 수 있다.

Keywords : Fuzzy set theory, Monte Carlo simulation, Uncertainties, Probability of failure

---

1 정회원, 세종대학교 지구정보공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Geoinformation Engrg., Sejong University, hjpark@sejong.ac.kr)

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

1. 서 론

산사태나 사면붕괴의 안정성 연구에 있어 가장 큰 어려움은 불확실성이 내재한다는 것이다. 이는 사면의 구성물질인 암석이나 흙이 자연적인 생성과정을 통해 형성되었으며 다양하고 복잡한 구성 물질로 인해 물리적 특성 및 지질조건 그리고 공학적 설계정수를 정확하게 판단할 수 없기 때문에 기인한다. 또한 이러한 지질 및 지반 특성을 파악하기 위한 실험이나 현장 조사가 현장 접근성이나 예산상의 한계 등과 같은 현실적인 제약으로 인해 충분하게 수행되지 못하여 지질특성이나 공학적 특성을 정밀하게 파악할 수 없는 한계로 인해 불확실성이 포함하게 된다. 따라서 이러한 불확실성의 존재와 그 중요성에 대하여서는 이미 오래전부터 인식되어져 왔다(Casagrande, 1965; Peck, 1969). 결국 이러한 불확실성을 효과적으로 다루기 위해 기술자의 경험적 판단이나 observation method(Peck, 1969) 등과 같은 여러 가지 방법들이 사용되어 왔으며 확률론적 해석기법도 그 중의 하나이다. 확률론의 이용은 1970년대 이후로 불확실성을 정량화하기위한 목적으로 사용되어왔으며 Whitman (1984)에 의해 그 중요성이 부각되었다. 따라서 1980년대 이후부터 산사태나 사면붕괴 관련 연구에서 확률론적 해석기법이 적용되어 왔으며 불확실성을 정량화하여 현장여건을 정확하게 반영할 수 있다는 장점으로 인해 그 활용도가 증가하고 있다(Einstein and Baecher, 1982; Mostyn and Small, 1987; Mostyn and Li, 1993; Nilsen, 2000; Park and West, 2001; El-Ramly et al., 2002; Pathak and Nilsen, 2004; Park et al., 2005). 그러나 확률론적 해석기법은 불확실성에 대한 정보를 충분하게 획득할 수 있어 변수들의 확률특성을 정확하게 파악할 수 있다는 가정 하에서 적용된다. 불확실성에 대한 정보는 불확실성이 내재하고 있는 변수의 확률특성과 관련된 자료로 통계학적으로 의미있는 확률분포함수(probability density function), 평균(expected value) 및 표준편차(standard deviation)를 의미한다. 따라서 확률론적 해석기법은 통계적으로 의미있는 확률분포함수, 평균 그리고 표준편차를 획득가능한 경우 이러한 정보를 활용하여 해석을 수행하는 것이다. 결국 현장에서의 제약이나 내재적인 문제점 또는 예산상의 한계 등으로 인해 충분한 자료의 획득이 불가능하여 확률특성을 명확하게 정의하기 힘든 경우 지질공학자의 판단이나 경험에 비추어 변수들의 확률특성을 결정하거나 과거의 연구사례 및 문헌 등을 참고하여 확률특성을 가정하게 되며 이러한 경우 부정확한 해석결과를 획득하게 될 가능성이 증가한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하기 위한 목적으로 퍼지집합이론의 활용을 제안하였다. 퍼지이론은 Zadeh(1965)에 의해 제안되었으며 불충분한 자료로부터 유발되는 불확실성을 효과적으로 다룰 수 있는 기법으로 인식되고 있다(Zimmermann, 1991). 따라서 여러 연구자들에 의해 사면의 안정성을 파악하는 데 확률론적 해석기법의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 인식되었다(Juang et al., 1998; Dodagoudar and Venkatachalam, 2000; Giasi et al., 2003). 그러나 이러한 방법들은 퍼지집합이론(fuzzy set theory)을 일계이차모멘트법(first order second moment method) 또는 점추정법(point estimate method)과 같은 근사법(approximation method)과의 결합을 통해 결과를 획득하는 방법으로 몬테카를로기법(Monte Carlo simulation)과 같은 기법에 비해 해석 결과의 정확성이 부족하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 퍼지이론과 몬테카를로기법을 결합한 새로운 해석기법을 제안하고자 하였다.

2. 퍼지몬테카를로 기법(Fuzzy Monte Carlo simulation method)

2.1 퍼지집합이론

퍼지집합이론은 현상의 불확실한 상태를 수학적인 개념을 통해 표현해 주는 방법으로 Zadeh(1965)에 의해 제안되었다. 퍼지집합이론은 흔히 많이 사용되는 보통집합(crisp or ordinary)개념을 확장 또는 일반화한 개념으로 일정한 구간으로 표현된 값이나 언어적 표현(linguistic expression) 등과 같이 애매하거나 불확실한 정보를 모델화하고 수식으로 처리할 수 있는 수학적인 도구로 제안되었다. 본 논문에서 활용된 퍼지이론의 기초적인 개념과 정의는 다음과 같다.

2.1.1 퍼지집합(fuzzy set)과 소속함수(membership function)

보통집합(crisp or ordinary set)에서는 임의의 원소(element) x가 집합 A에 소속되어 있으면 다음과 같이 표시하고, x가 집합 A의 원소 또는 멤버(member)라고 한다.

$$x \in A \tag{1}$$

또한 원소 x가 집합 A의 원소가 아니면 다음과 같이 표시한다.

$$x \notin A \tag{2}$$

이러한 개념은 소속함수(membership function), μ_A의 개념을 통해 표현될 수 있다. 즉, 원소 x가 집합 A에 소속되는가 그렇지 않은가를 다음과 같이 소속함수를 통해 나타낼 수 있다.

$$\mu_A(\mathrm{x}) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \tag{3}$$

즉 원소 x가 집합 A에 소속되었을 경우 소속함수는 1, 포함되지 않을 경우 0의 소속함수 값을 보인다. 따라서 보통집합에서 소속함수의 값은 {0,1} 두 가지 값만 존재한다.

반면 퍼지집합에서는 보통집합과 달리 원소 x가 집합 A에 포함하는 가를 판단하는 뚜렷하거나 정확한 경계가 존재하지 않는다(그림 1). 그 결과 퍼지집합에서는 원소 x의 소속함수가 전혀 소속되어 있지 않은 상태를 의미하는 0에서 소속되었음을 의미하는 1사이에 존재하게 되며 퍼지집합의 소속함수는 소속정도에 따라 0과 1사이의 어떠한 숫자로도 표현될 수 있다. 따라서 퍼지집합에서 소속함수의 값은 원소 x가 퍼지집합 A에 속하는 정도(degree) 또는 소속정도(grade of membership)을 나타낸다. 즉, 소속함수 $\mu_A(x)$가 1에 가까우면 x가 A에 속하는 정도가 높다는 것을 나타내고, 반대로 0에 가까우면 낮다는 것을 나타내고 있다.

퍼지집합 A의 원소 x가 이산값(discrete value)를 갖는 경우 원소와 소속함수의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$A = [x, \mu_A(x)] \text{ 또는 } A = \frac{\mu_A(x)}{x} \tag{4}$$

한편 퍼지집합에서 소속함수(membership function)는 다양한 형태의 함수로 표현될 수 있으며 원소의 불확실성이나 애매함을 표현하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 원소의 값이 연속값의 경우 다양한 볼록형태(convex shape)의 함수를 적용할 수 있으며 종형, 삼각형, 사다리형 등이 주로 많이 사용된다. 그림 2는 사다리꼴 소속함수의 형태를 보여주고 있으며 각 부분의 정의를 나타나고 있다. 중심영역(core)은 퍼지집합에서 완전하게 소속되는, 즉, 소속정도가 1인 집합의 영역을 의미하며 전체 영역 또는 지지(support)는 소속정도가 0이 아닌 집합의 영역

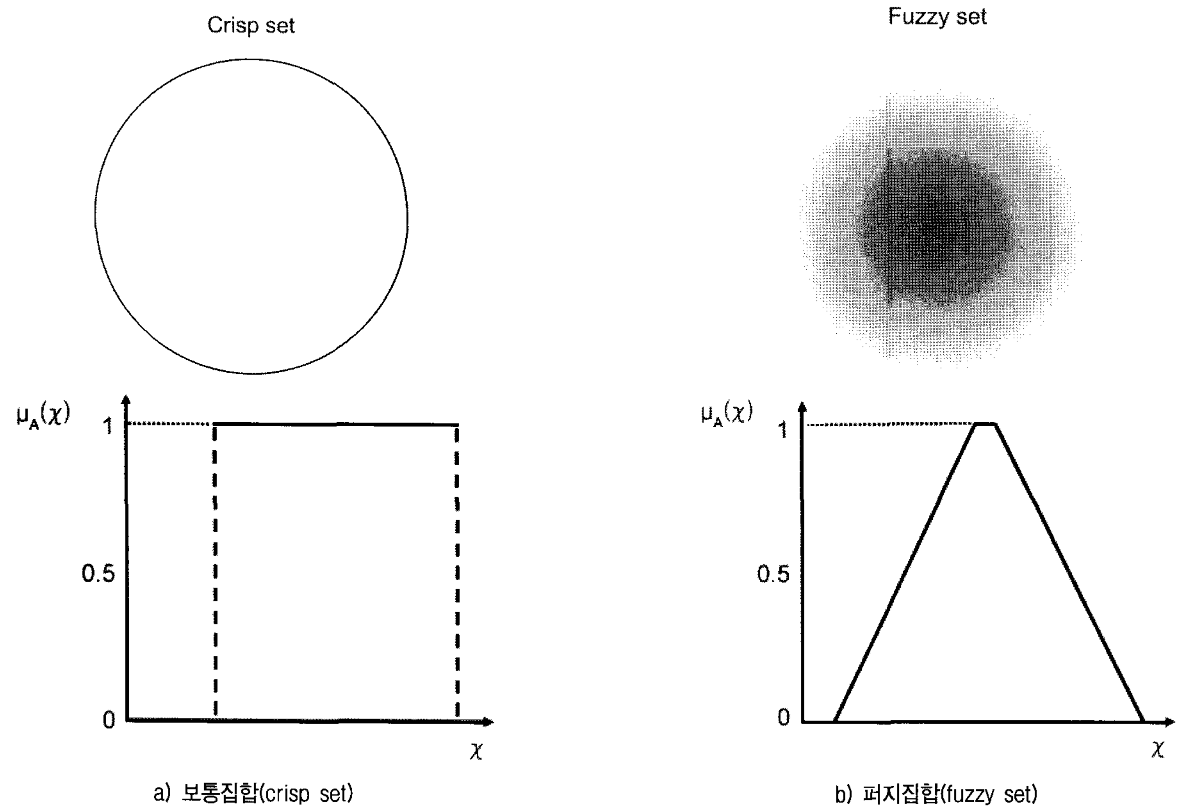

그림 1. 보통집합과 퍼지집합

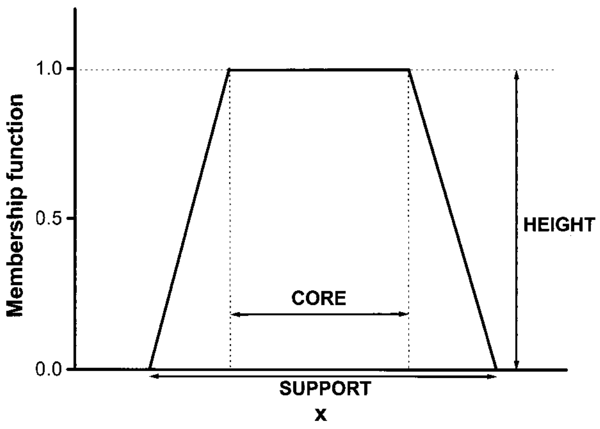

그림 2. 소속함수(membership function)

을 의미한다. 그리고 경계 영역은 소속정도가 1도 아니고 0도 아닌 집합의 영역을 말한다. 또한 퍼지집합 내의 적어도 한 개 이상의 원소가 최대 소속함수값이 1이면 정규(normal) 퍼지집합이라고 하고 그렇지 않은 경우 비정규 퍼지집합이라고 한다.

2.2 퍼지몬테카를로기법(Fuzzy Monte Carlo simulation)

확률론적 해석기법은 불확실성을 정량화하는 데 매우 효과적인 기법으로 알려져 왔다. 그러나 지질 및 지반조사가 충분히 수행되지 못하는 국내 여건상 불확실성을 정량화하는 과정에 요구되는 자료나 정보의 종류 및 수량은 그 요구량을 채우기 힘든 실정이다. 확률변수의 확률적 특성을 이해하고 이를 표현하기 위해서는 확률변수의 확률밀도함수(probability density function) 및 이와 관련된 매개변수(즉, 평균 및 표준편차)를 정확하게 획득하여야한다. 그러나 현장의 자료를 활용하여 확률밀도함수의 형태 및 관련 매개변수를 결정하는 과정은 정보의 양이 증가할수록 정확한 판단이 가능해지는 반면 자료의 수에 제한이 있는 경우 정확한 판단이 불가능해질 뿐만 아니라 결과적으로 확률변수에 대한 확률특성 역시 정확한 값을 획득할 수 없게 된다. 이런 경우 불확실성이 포함된 변수들은 평균 등과 같이 통계적으로 의미있는 대표적인 값으로 표현이 불가능하며 획득된 자료의 최소값과 최대값을 이용한 구간 내의 값으로만 표현할 수밖에 없게 된다. 반면 이렇게 최소값과 최대값을 이용하여 구간으로 표현된 매개변수는 퍼지이론을 이용하여 퍼지숫자(fuzzy number)로 고려될 수 있다. 특히 지질공학 및 지반공학적 해석분야에서는 통계적으로 중요한 자료에 대해 충분한 자료를 획득할 수 없거나 그 비용이 지나치게 높은 경우가 많기 때문으로 따라서 이러한 경우 퍼지숫자의 활용은 매우 유용하다 할 수 있다. 따라서 이와 관련하여 퍼지이론을 활용한 사면 안정해석을 수행한 여러 연구결과가 발표되고 있다.

그러나 기존 연구의 경우 퍼지숫자인 변수의 불확실성을 파악하고 분석에 활용하기위해 주로 꼭지점(vertex) 기법을 사용하였다(Juang et al., 1998). 꼭지점(vertex) 기법은 퍼지 특성을 갖는 퍼지숫자인 매개변수로부터 α- cut의 개념을 이용하여 보통집합(crisp set)으로 변환하는 과정으로 일계이차모멘트법(fuzzy first order second moment method; Giasi et al., 2003)와 점추정법(fuzzy point estimate method; Dodagoudar and Venkatachalam, 2000) 등의 기법으로 활용되었다. 그러나 일계이차모멘트법(first order second moment method)나 점추정법(point estimate method)은 근사법(approximation method)로 몬테카를로기법과는 달리 정확한 가능성을 산정하는 기법이 아닌 간단한 수식의 계산을 통해 추정된 값을 획득하는 기법이다. 즉 퍼지숫자로부터 일정한 과정을 거쳐 대표적인 값을 다수 선정하여 이를 계산에 활용하는 기법으로 퍼지숫자대신 선정된 몇 개의 값을 사용하여 보통집합화하는 과정을 거치게 된다. 이러한 기법들은 주로 몬테카를로기법이 불가능한 경우에 대하여 사용되어 왔으며 퍼지숫자의 경우 확률분포함수의 적용이 어렵기 때문에 몬테카를로기법보다는 꼭지점(vertex)기법을 활용한 계산이 적용되어 왔던 것으로 보인다. 그러나 이러한 기법들은 근사법을 적용하여 해석결과를 획득하였기 때문에 그 해석결과가 엄밀하게 정확한 값을 획득되었다고 하기보다는 정확한 결과에 가까운 근사값이 획득되었다는 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 몬테카를로기법을 적용하여 퍼지숫자를 분석하는 기법을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 주로 퍼지숫자로 고려되는 매개변수의 특성을 파악하고 소속함수(membership function)를 결정한 후 결정된 소속함수를 활용하여 몬테카를로기법의 계산에서 필요한 확률밀도함수(probability density function)로 고려하였다. 대개 암반사면 안정해석의 경우 불연속면의 전단강도특성을 나타내는 내부마찰각이 주로 불확실성을 내재하고 있는 매개변수로 고려된다. 이것은 불연속면의 전단강도 특성 획득을 위해 수행되는 직접전단시험의 경우 시료수의 제한 등과 같은 요인에 의해 충분히 많은 양의 실험 수행이 불가능하며 이에 따라 정확한 전단강도 특성을 획득하기 어렵기 때문이다. 따

라서 내부마찰각을 퍼지숫자로 고려하고 획득한 실내 실험 결과의 자료를 활용하여 소속함수를 결정하였다. 지금까지의 연구에서는 확률론적 해석의 경우 확률변수의 확률밀도함수를 누적분포함수로 전환하고 이를 몬테카를로기법에 활용하였으나 퍼지이론의 경우 확률밀도함수(probability density function)가 존재하지 않으므로 몬테카를로기법 계산에서 누적분포함수를 활용할 수 없게 된다는 한계점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 대부분의 퍼지숫자가 소속함수의 최대값이 1인 정규(normal)퍼지숫자라는 점에 착안하여 소속함수를 누적분포함수로 고려하였다. 따라서 난수발생(random number generating)을 통해 0에서 1사이의 값을 임의로 발생시킨 후 이를 퍼지숫자의 소속함수에 대입하여 적절한 값을 획득하였다. 이렇게 획득된 값들을 안전율의 계산공식에 적용하여 반복적으로 다수의 안전율을 산정하였으며 계산된 안전율 중 1보다 작은 경우의 수를 계산하여 파괴확률로 산정하였다.

3. 적용 사례

앞 서 제안된 퍼지몬테카를로기법(fuzzy Monte Carlo simulation)을 실제 현장에 적용하여 확률론적 해석결과와 비교하기 위하여 비주얼 베이직(visual basic)을 활용하여 알고리즘을 코드(code)화 하였으며 개발된 기법의 적용대상인 1개소의 사면현장을 선정하였다. 본 연구를 위해 선정된 사면의 경사방향과 경사는 각각 325도와 65도를 보이고 있으며 40.8m의 사면 높이를 보이고 있다. 사면은 주로 선캠브리안기의 변성퇴적암으로 구성되어 있으며 현장의 정밀조사를 통해 불연속면의 기하학적인 특성을 조사하였다. 현장사면을 대상으로 선측선(scanline)기법을 이용하여 약 350개의 불연속면 자료를 획득하였으며 불연속면의 방향성 분석 결과 약 6개 절리군이 관찰되었다(표 1). 이를 평사투영해석을 통해 운동학적 해석(kinematic analysis)을 수행한 결과 2개의

표 1. 현장에서 관찰된 불연속면군

불연속면군	대표방향성
Set 1	217/77
Set 2	320/30
Set 3	061/66
Set 4	311/40
Set 5	196/56
Set 6	183/05

절리군(set 2와 set 4)이 평면파괴의 가능성을 가지는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 해석의 편이성과 확률론적 해석결과와 퍼지몬테카를로기법의 해석결과의 비교분석을 용이하게 하기위하여 평면파괴의 안정성에 대하여 해석을 실시하였다.

또한 불연속면의 시료를 획득하여 불연속면에 대한 직접전단시험을 수행하였다. 19회의 직접전단시험 결과 내부마찰각은 20.9도에서 46.3도 사이의 값을 보이고 있으며 평균 34.6도, 표준편차 8.2를 보이고 있다(그림 3). 그러나 사실 19회의 직접전단시험은 국내의 여건을 감안할 때 상당히 많은 양이라 할 수 있다. 대개의 경우 직접전단시험은 10회 이내의 실험이 수행되는 경우가 다반사이며 이러한 경우 내부마찰각이 보이는 확률특성을 정확하게 판단하기 어렵게 된다. 그림 3에서도 볼 수 있듯이 19회의 시험이 수행되었음에도 불구하고 확률분포특성을 파악하기 어려울 것으로 보인다. 이전의 연구에 의하면 내부 마찰각의 확률특성은 정규분포곡선을 보이는 것으로 보고되고 있으나(Mostyn and Li, 1993; Nilsen, 2000; Pathak and Nilsen, 2004; Park et al., 2005) 본 연구의 결과 확률분포특성이 정규분포를 보인다고 판단하기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 내부마찰각을 퍼지숫자로 고려하여 안정성해석을 수행하였으며 그 결과를 내부마찰각이 정규분포곡선을 보이는 확률변수로 가정하여 확률론적 분석을 수행한 결과와 비교해 보았다. 본 연구에서 내부마찰각을 퍼지숫자로 고려할 때 삼각형의 형태를 보이는 소속함수로 고려하여 삼각형 퍼지숫자로 가정하였으며 소속함수의 값이 0을 보이는 최소값과 최대값은 실험결과의 최대값과 최소값으로 고려하였으며 평균값을 소속함수 값이 1을 보이는 중심(core)값으로 설정하였다. 반면 점착력의 경우

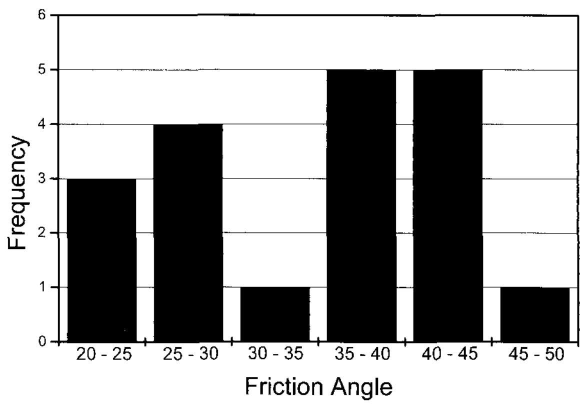

그림 3. 내부마찰각의 실험 결과

Hoek(1997)의 제안과 같이 0의 값을 갖는 것으로 고려하였다.

3.1 확률론적 해석 결과

앞 서 평사투영해석을 통해 운동학적으로 불안정한 것으로 해석되었던 절리군 2와 절리군 4에 대해 한계평형해석을 통한 결정론적 해석(deterministic analysis)을 실시하였다. 퍼지몬테카를로기법 기법을 통해 획득된 해석결과를 동일한 입력자료를 활용하여 수행한 다른 기법의 해석결과와 비교를 하기위해 먼저 결정론적 해석(deterministic analysis)을 수행하였으며 그 결과 절리군 2의 경우 안전율(factor of safety)이 1.20으로 계산되었으며 절리군 4의 경우 안전율이 0.82로 계산되었다. 즉 결정론적 해석을 통해 획득된 역학적 해석 결과 절리군 2의 경우 안정한 것으로 해석되었으며 절리군 4의 경우 불안정한 것으로 해석되었다. 또한 퍼지몬테카를로기법 해석기법과의 비교를 위하여 기존의 해석기법인 확률론적 해석기법(Park et al., 2005)을 활용하여 절리군 2와 절리군 4에 대한 안정성 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 불연속면의 방향을 고정변수(deterministic variable)로 가정하여 각 절리군의 평균경사방향과 평균경사를 대표방향성으로 분석에 활용하였으며 내부 마찰각만 확률변수(random variable)로 고려하였다. 내부 마찰각의 경우 직접전단시험으로부터 획득한 평균값과 표준 편차인 34.6도와 8.2를 사용하였으며 확률분포함수의 경우 기존의 연구 결과로부터 정규분포함수를 사용하였다. 확률론적 해석에서는 몬테카를로 기법을 활용하여 약 16,000회의 반복적인 계산을 수행하였으며 안전율이 1보다 작은 경우의 수를 계산하였다. 그림 4와 5는 각각 절리군 2와 절리군 4에 대해 몬테카를로기법을 통해 획득된 안전율의 분포를 보여 주고 있다. 해석결과 절리군 2의 경우 29.3%의 파괴확률이 계산되었으며 절리군 4의 경우 73.5%로 계산되었다. 이 결과를 결정론적 해석 결과와 비교해 보면 결정론적 해석을 통해 획득한 안전율이 1.20으로 계산되어 안전한 것으로 해석된 절리군 2의 경우 29.3%의 비교적 높은 파괴확률을 보이는 것으로 해석되었으며 안전율이 0.82로 계산된 절리군 3의 경우 파괴확률이 73.5%로 매우 불안정한 것으로 해석되었다. 이러한 결과는 절리군 2를 안정한 것으로 판단한 결정론적 해석결과와는 차이가 발생한 것으로 분산이 심한 자료로부터 대표값만을 계산에 사용한 결정론적 해석기법과 자료에 내재한 불확실성을 고려하여 자료의 분산을 고려한 확률론적 해석기법의 차이에서 발생하는 현상으로 보인다. 반면 직접전단 시험을 통해 획득한 내부 마찰각의 경우 평균이 34.6도를 보이고 있으며 표준편차가 8.2를 보이고 있어 본 연구에서 수행한 직접전단시험로부터 획득한 내부 마찰각의 분산은 변동계수(coefficient of variation)가 23.3%로 매우 높게 나타난 것을 알 수 있다. 그러나 대개 이전의 연구들에 의하면 내부마찰각의 변동계수는 약 10%를 보이는 것으로 보고되고 있다(Park and West, 2001). 따라서 결국 확률론적 해석에 활용된 실험값의 분산이 매우 심하게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 몬테카를로기법을 통해 생성되는 내부 마찰각 값의 변화가 99.8%의 신뢰수준 내에서 10도에서 59.2도 사이에서 발생하게 됨을 의미한다. 또한 97%의 신뢰 수준 내에서는 18.2도에서 51.0도 사이의 분포를 보이게 되어 지나치게 낮은 내부 마찰각이 파괴확률의 계산에 사용될 가능성이 있음을

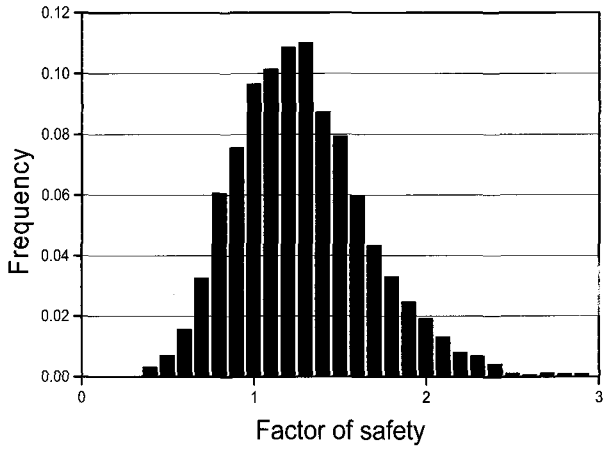

그림 4. 확률론적 해석 기법에 의한 절리군 2에 대한 안전율 분포

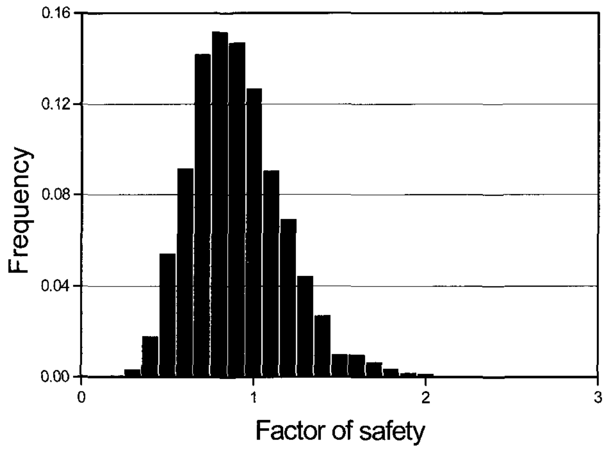

그림 5. 확률론적 해석 기법에 의한 절리군 4에 대한 안전율 분포

알 수 있다. 즉 내부 마찰각의 불확실성이 매우 높은 것을 알 수 있으며 비현실적으로 낮은 내부마찰각 값이 해석에 활용되고 있어 해석결과의 정밀도에 문제가 있는 것으로 판단될 수 있다.

따라서 입력자료의 분산정도, 즉 불확실성이 미치는 영향을 파악하기 위해 내부 마찰각의 분산을 축소하여 변동계수를 10%로 조정하고 확률론적 해석을 다시 수행하였다(그림 6와 그림 7). 그림 6와 7의 결과는 그림 4와 5과 비교해 보았을 때 안전율 분포의 분산이 매우 줄어든 것을 확인할 수 있으며 이는 마찰각의 분산이 감소함에 따라 나타난 것으로 보인다. 결과적으로 절리군 2의 경우 파괴확률이 8.8%로 감소하였으나 절리군 4의 경우 94.0%로 증가하였다. 이러한 결과는 분산 감소에 따라 절리군 2의 경우 평균 아래쪽의 분포가 많이 감소한 것으로 보이나 절리군 4의 경우 오히려 평균 위쪽의 분포가 감소한 것으로 판단된다. 따라서 분산의 조정은 계산결과에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

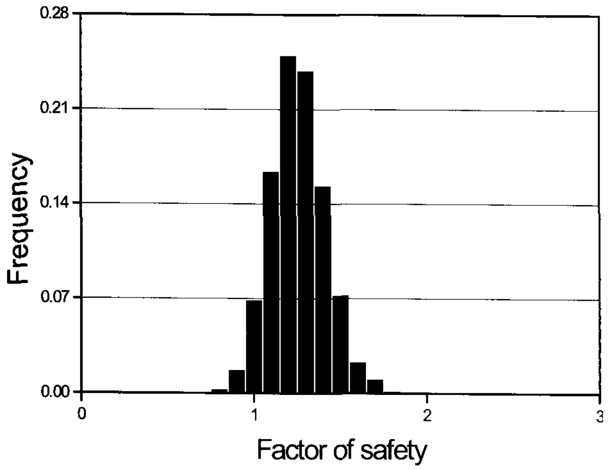

그림 6. 확률론적 해석 기법에 의한 절리군 2에 대한 안전율 분포 (COV = 10%)

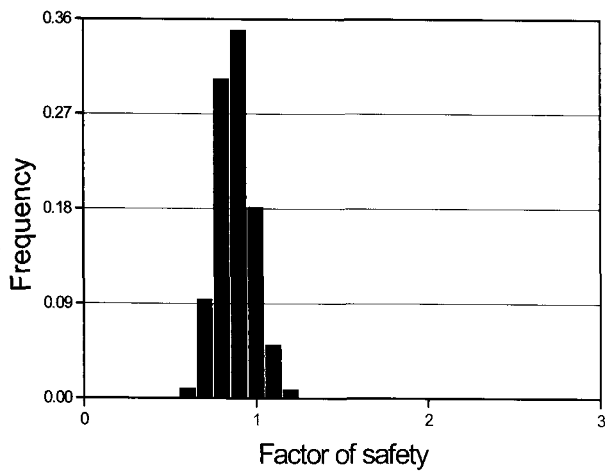

그림 7. 확률론적 해석 기법에 의한 절리군 4에 대한 안전율 분포 (COV = 10%)

결국 확률론적 해석의 경우 확률변수의 불확실성 또는 분산에 따라 해석결과가 크게 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 자료의 수가 한정되어 확률변수의 특성을 정확하게 파악하기 힘든 경우 어떤 형태의 분산을 고려하는 가에 따라 결과에 영향을 미치는 것으로 보인다.

3.2 퍼지몬테카를로기법 해석 결과

앞 서 실험을 통해 획득된 내부 마찰각은 분산이 매우 심한 편으로 상당한 양의 불확실성이 내재되어 있는 것으로 판단된다. 실험결과를 통해 획득한 결과 내에 포함된 불확실성은 주로 공간적인 변동성이나 실험결과의 부족에 기인한다. 이러한 경우 전통적으로 활용해오던 확률론적 해석기법의 적용이 부적절해질 수 있다. 특히 자료 수의 부족은 확률변수의 확률특성을 정확하게 파악할 수 없게 되며 이는 확률변수에 대한 정확한 정보를 조건으로 하는 몬테카를로기법의 해석결과에 심각한 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 내부 마찰각을 퍼지숫자(fuzzy number)로 파악하여 안정성 해석을 수행하였다. 이를 위하여 내부마찰각을 삼각형 퍼지숫자(triangular fuzzy number)로 고려하였고 실험결과로부터 획득한 최소값과 최대값인 20.9도와 46.3도를 퍼지숫자의 최소값과 최대값으로 계산하였다. 또한 평균값인 34.6도를 중심영역(core)으로 선정하였다(그림 8). 따라서 몬테카를로기법을 통해 형성된 내부마찰각의 값은 20.9도와 46.3도 사이에서만 변동하게 된다. 이러한

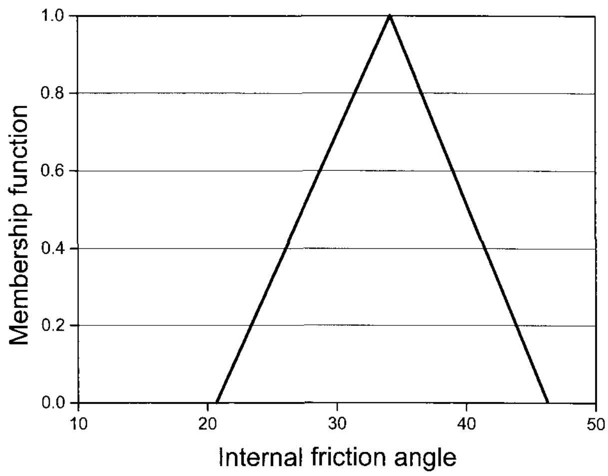

그림 8. 삼각형 소속함수(triangular fuzzy number)

결과는 앞 서 확률론적 계산에서 몬테카를로기법을 통해 획득한 내부마찰각에 비해 그 분산이 많이 감소한 것이다. 즉 정규분포함수로 환산하여 계산하였을 경우 99.8%의 신뢰 구간 내에서 변동계수가 13.3% 수준으로 이는 앞 서 확률변수로 고려했을 경우 변동계수 23.3%에 비하면 작은 수준이다. 이러한 내부마찰각의 분포를 이용하고 몬테카를로기법을 통해 획득한 안전율의 분포곡선은 그림 9와 그림 10과 같다. 절리군 2에 대해 퍼지몬테카를로기법를 통해 획득한 결과인 그림 9를 확률론적 해석기법의 결과(그림 4)를 비교해 보면 안전율의 분산이 그림 4의 결과보다 그림 9에서 많이 감소한 것을 확인할 수 있으며 그림 10과 그림 5에서의 결과에서도 마찬가지이다. 해석 결과 획득한 파괴확률은 절리군 2의 경우 33.5%로 계산되었으며 절리군 4의 경우 72.9%로 계산되었다. 절리군 2의 경우 확률론적 해석의 결과와 fuzzy Monte Carlo의 해석결과가 각각 29.3%와 33.5%로 약간 차이를 보이고 있으나 절리군 4의 경우 73.5%

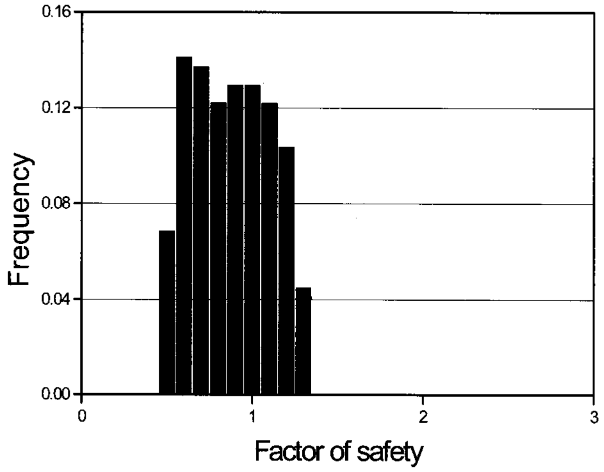

그림 9. FMC로 계산한 안전율 분포(절리군 2)

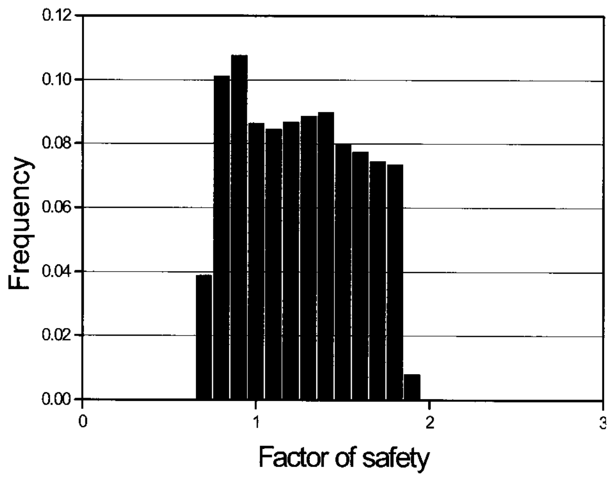

그림 10. FMC로 계산한 안전율 분포(절리군 4)

와 72.9%로 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 즉, 퍼지기법을 이용하여 변수내의 분산을 줄였음에도 불구하고 파괴확률이 거의 유사함을 보이고 있다. 결과적으로 퍼지기법의 활용은 입력변수에서 나타나는 불확실성, 즉 분산을 효과적으로 통제할 수 있음을 확인할 수 있으며 그럼에도 불구하고 확률론적 해석결과와는 유사한 파괴확률을 보이는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 불충분한 자료로부터 발생하는 확률론적 해석기법의 문제점을 보완하기 위한 방법으로 퍼지집합이론의 활용을 제안하였다. 즉, 본 연구에서는 확률변수를 퍼지숫자로 고려하여 퍼지집합이론을 활용하였고 이를 해석하기 위한 방법으로 몬테카를로 기법을 제안하였다. 몬테카를로 기법을 활용하기 위해 소속함수(membership function)를 확률분포함수로 계산에 활용하였고 소속함수의 값이 최대 1을 보인다는 점에 착안하여 누적분포함수로 고려하였다.

제안된 기법의 적용성을 판단하기위해 현장을 선정하여 실제 측정된 값을 적용해 보았다. 결정론적 해석결과 절리군 2는 안전한 것으로 절리군 4는 불안정한 것으로 해석되었다. 반면 확률론적 해석 결과 절리군 2의 경우 29.3%의 파괴확률을, 절리군 4의 경우 73.5%의 파괴확률을 보였다. 그러나 이러한 결과는 자료의 분산이 매우 심하게 나타났던 입력자료의 문제점으로 인해 안전율의 분포가 매우 심하게 분산되어 있어 비현실적인 계산 결과가 일부 관찰되었다. 따라서 입력자료의 분산을 조정하여 다시 계산해 본 결과 파괴확률이 변화하는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 제안된 기법을 활용하여 파괴확률을 계산해본 결과 소속함수가 삼각형일 때 절리군 2의 경우 33.5%, 절리군 4의 경우 73.5%로 확률론 해석기법의 결과와 유사하게 산정되었다. 따라서 본 연구에 의해 제안된 해석기법인 퍼지몬테카를로기법이 이전의 해석결과와 유사한 해석결과를 보여주면서 자료의 분산이 많이 감소했다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-003-C00174)을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Casagrande, A. (1965), "Role of the Calculated Risk in Earthwork and Foundation Engineering", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 91, pp.1-40.
2. Dodagoudar, G.R. and Venkatachalam, G. (2000), "Reliability Analysis of Slope using Fuzzy Sets Theory", *Computers and Geotechnics*, 27, pp.101-115.
3. Einstein, H.H. and Baecher, G.B. (1982), "Probabilistic and Statistical Methods in Engineering Geology", *Rock Mechanics*, Supplement, 12, pp.47-61.
4. El-Ramly, H., Morgenstern, N.R., and Cruden, D.M. (2002), "Probabilistic Slope Stability Analysis for Practice", *Can. Geotech. J.*, 39, pp.665-683.
5. Giasi, C.I., Masi, P., and Cherubini, C. (2003), "Probabilistic and Fuzzy Reliability Analysis of a Sample Slope near Aliano", *Engineering Geology*, 67, pp.391-402.
6. Juang, C.H., Jhi, Y.Y., and Lee, D.H. (1998), "Stability Analysis of Existing Slopes considering Uncertainty", *Engineering Geology*, 49, pp.111-122.
7. Hoek, E. (1997), *Practical Rock Engineering*, http://www.rocscience.com/hoek/PracicalRockEngineering.asp
8. Mostyn, G.R. and Li, K.S. (1993), "Probabilistic Slope Analysis - State of Paly", *Proceeding of Conference on Probabilistic Method in Geotechnical Engineering*, pp.89-109.
9. Mostyn, G.R. and Small, J.C. (1987), "Methods of Stability Analysis", *Soil Slope Instability and Stabilization*, Balkema, pp.71-120.
10. Nilsen, B. (2000), "New Trend in Rock Slope Stability analysis", *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 58, pp.173-178.
11. Park, H.J. and West, T.R. (2001), "Development of a Probabilistic Approach for Rock Wedge Failure", *Engineering Geology*. 59, pp. 233-251.
12. Park, H.J., West, T.R., and Woo, I. (2005), "Probabilistic Analysis of Rock Slope Stability and Random Properties of Discontinuity Parameters, Interstate Highway 40", *Engineering Geology*, 79, pp.230-250.
13. Pathak, D. and Nilsen, B. (2004), "Probabilistic Rock Slope Stability Analysis for Himalayan Condition", *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 63, pp.25-32.
14. Peck, R.B. (1969), "Advantages of Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics", *Geotechnique*, 19, pp.171-187.
15. Whitman, R.V. (1984), "Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 110, pp.145-188.
16. Zadeh, L.A. (1965), "Fuzzy Sets". *Information and Control*, 8, pp.338-353.
17. Zimmermann, H.J. (1991), *Fuzzy Set Theory and its Application*, Kluwer Academics, pp.456.

(접수일자 2007. 8. 20, 심사완료일 2007. 10. 31)