통계처리에 의한 설계정수의 적용연구

김종관, 하태욱, 김원범 (전남대학교 지구시스템공학과)
양형식 (전남대학교 건설지구환경공학부)

1. 서 론

암반 공학자들은 현장 조사의 초기 단계에서부터 구조물의 설계에 이르기까지 암반 고유의 불확실성을 다루는데 많은 어려움을 겪게 된다(Kim and Gao, 1995). 지반구조물의 설계 타당성 평가를 위해 적용되는 기존의 안전율 개념은 지반구조물의 일반적인 신뢰성을 판단하는데 한계를 가지고 있다. 암반이 가지고 있는 임의성, 불확실성, 모호성의 특성 때문에 암반의 역학적 특성은 하나의 특정한 대표 값으로 표현되는 결정적인 방법보다는 불확실성이 항상 존재한다는 사실을 인정하고 불확실성 자체를 정량적으로 고려하는 확률론적 방법이 요구된다. 따라서 몬테카를로 시뮬레이션 기법은 이러한 불확실성들이 결합된 중첩효과를 평가하기 위한 수단으로 제공되며, 불확실성이 크거나 작은 곳을 구별하기 위한 확률론적 수단으로 사용된다.

확률론적 방법 중 몬테카를로 시뮬레이션 기법은 이러한 불확실성이 결합된 중첩효과를 고려하여, 불확실성이 크거나 작은 곳을 구별하기 위한 대표적인 방법이다. 이 방법은 많은 수의 실험을 바탕으로 통계 자료를 얻어 그 자료로부터 역산하여 어떤 특정한 수치나 확률분포를 구하는 방법상의 특성상 통계자료가 많을수록, 또 입력 값의 분포가 고를수록 결과의 정밀성이 높아지게 되지만, 현재 실행되는 설계에서는 조사 단계에서 낮은 개수의 표본을 이용하여 모집단의 정확한 특성을 반영하기 어렵다.

몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용한 암반 설계 정수 산정에 있어 표본의 분포 형태가 다름에도 불구하고 일괄적으로 정규분포를 시킴으로써 표본의 왜곡이 발생하게 된다. 통계적인 방법을 적용한 후에 다시 등가화된 하나의 값을 산정해 해석상에 적용시키므로 각 설계정수에 대한 임의의 분포 상태를 구현하지 못한다. 본 연구에서는 지수분포 형태를 갖는 실내 실험 결과를 표본으로 하여, 정규분포화를 통한 몬테카를로 시뮬레이션 결과와 실내 실험 결과의 분포 형태가 고려된 시뮬레이션 결과를 비교하고, 설계정수 산정에 있어 분포 형태를 고려함과 하지 않은 것이 어느 정도의 차이를 발생시키는지 2차원 유한차분 해석 프로그램인 FLAC2D를 통해 살펴보았다.

2. 설계정수 산정기법

Mohammad 등은 약 40여 편의 수치해석 관련 논문들을 통하여 수치해석용 입력변수가 어떻게 적용되었는지를 살펴보았다(Mohammad et al., 1997). <그림 1>은 입력변수 중에서도 실내 실험으로부터 구해진 탄성계수가 모델링에서 적용된 예를 나타낸 것인데, 회귀분석을 통해 실내 실험결과가 모델링에 적용될 때는 약 0.46배 정도 감쇠됨을 알 수 있다. 마찬가지로 단축압축강도, 인장강도, 포와송비에 대해서도 사례 분석을 통하여 감쇠지수를 구해본 결과, 단축압축강도는 실내 실험값의 약 0.28배, 인장강도는 실내 실험값의 약 0.49배, 그리고 포와송비는 실내 실험값과 거의 유사한 값으로 적용되었다. 이러한 연구 결과를 볼 때, 실내 실험으로부터 구한 지반의 물성을 수치해석 모델링에 적용하기 위한 감쇠기법은 대다수 해석자들에 의해 적용되고 있음을 알 수 있으며, 타당성이 검증되었다고 할 수 있을 것이다(최성웅, 정소걸, 2004).

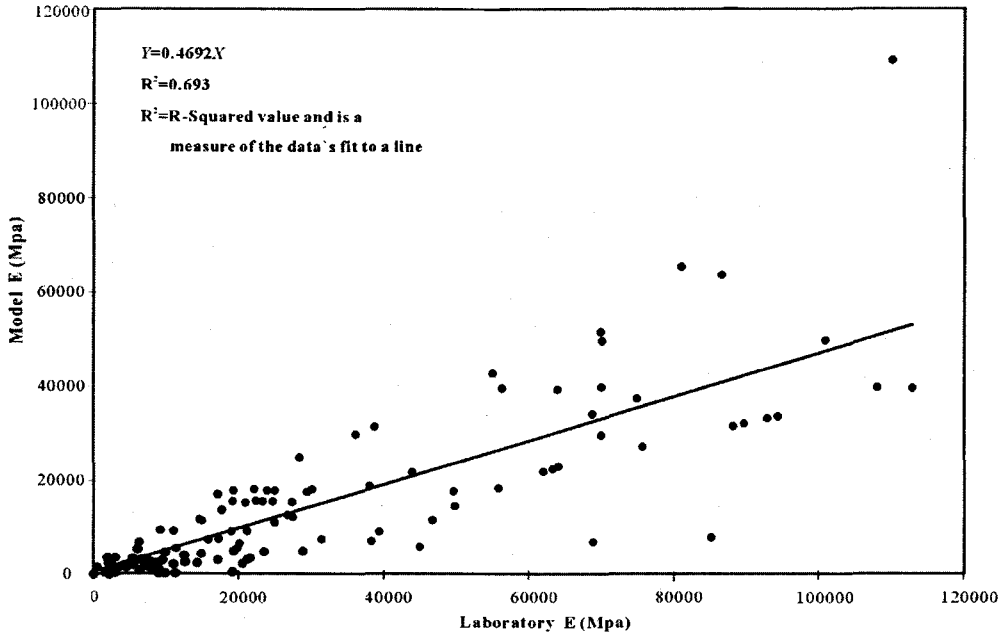


그림 1. 실내실험과 수치해석 모델링의 탄성계수 비교
(Mohammad et al., 1997)

2.1 표본산정

통계 처리를 위한 표본 산정을 위해 동일한 지역 내의 암석 시료를 가지고 실내 실험을 실시하였다. 조사지역은 전남 화순군 일대이며 사용된 시료는 주로 변성셰일이다. 단축압축강도 시험을 총 5회 실시하여 탄성계수를 산출하였다. 본 연구에서는 현장 조사의 부족으로 인한 암반 등급 평가가 미흡하여, 실내 실험을 통한 결과를 이용하여 현지 암반 조건의 설계정수를 가정하기 위해 Mohammad 등이 제안한 실내 실험의 탄성계수와 수치해석에서 사용된 탄성계수의 관계식을 이용하여 실내 실험 결과를 보정하였다. 식(1)은 Mohammad 등이 제안한 실내 실험 탄성계수와 현지 암반 탄성계수의 관계식이며, 실내 실험 결과에 의한 탄성계수와 보정된 탄성계수는 표 1과 같다.

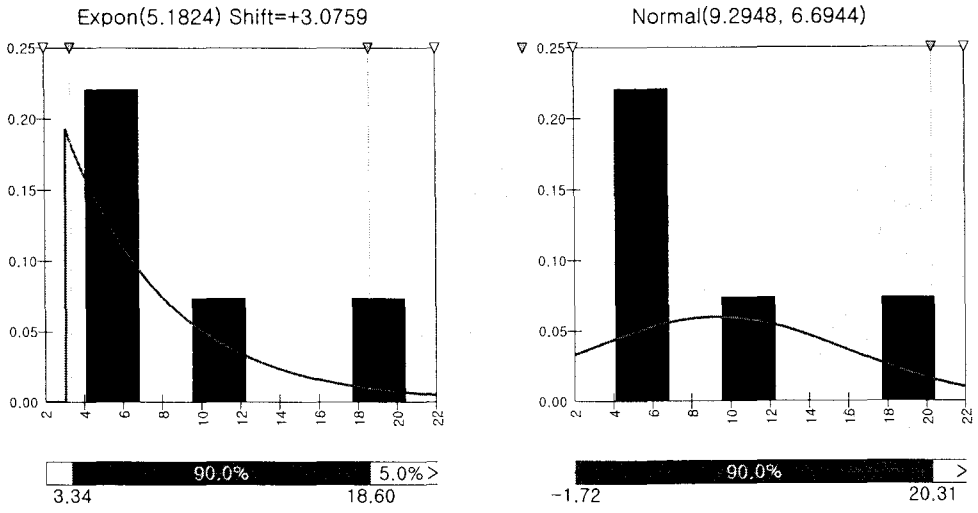
$$E = 0.46 \times E_{lab} \quad (1)$$

E_{lab} : 실내 실험 탄성계수

표 1. 탄성계수(GPa)

구 분	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
실내실험결과	14.7	10.3	22.7	8.94	44.4
보정된 탄성계수	6.77	4.74	10.4	4.11	20.4

몬테카를로 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 암석 물성의 분포 특성을 파악하는 것이 선행되어져야 한다(Kim and Gao, 1995). <그림 2>는 실내 실험에 의한 5개의 표본을 히스토그램 및 분포함수 곡선을 나타낸 결과이다. 실내 실험 결과에 가장 적합한 분포 특성은 지수분포이며 분포 특성 및 신뢰 범위 90% 구간 내의 상, 하한값은 <그림 2(a)>와 같다. 지수분포 특성을 나타내는 실내 실험 결과를 임의로 정규분포 형태로 가정한 결과는 <그림 2(b)>와 같다. 표 2는 실내 실험 결과를 지수분포 형태와 정규분포 형태로 연속 확률 분포화하였을 경우 나타나는 결과를 정리한 것이다. 두 분포의 평균은 약 11% 정도, 표준편차는 약 22% 정도의 편차가 있는 것으로 나타났다.



(a) (b)

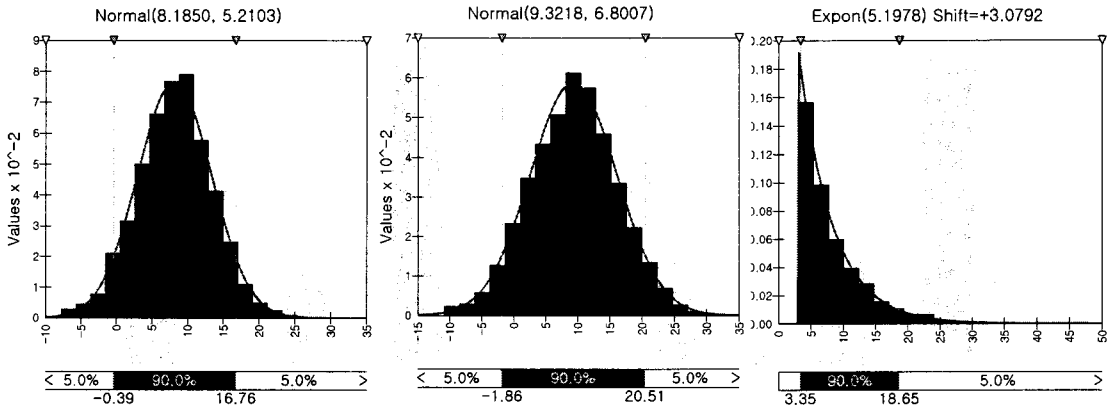
그림 2. 표본 분포

표 2. 분포 결과

구 분	하한값	상한값	평균	표준편차
지수분포	3.34	18.6	8.26	5.18
정규분포	-1.72	20.3	9.29	6.69

2.2 통계처리

대부분의 설계정수 산정에서 탄성계수는 정규분포의 분포 특성을 가지는 것으로 알려져 있으며, 정규분포라는 가정 하에 실내 실험 및 현장 조사 결과의 평균과 표준편차를 이용하여 통계처리를 적용시킨다. 그러나 실내 실험 결과에 있어 정규분포 외의 분포를 나타내는 표본의 특성을 무시하고 정규분포라는 일괄적인 가정은 모집단의 분포 특성을 왜곡할 가능성이 존재한다. 이러한 분포 특성 가정이 나타낼 수 있는 모집단의 왜곡을 평가하기 위하여 본 연구에서는 다음의 세 가지 경우를 비교해 보았다. Case Ⅰ은 표본에 가장 적합한 연속 확률 분포 형태인 지수분포의 평균과 표준편차를 분포 특성으로 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 정규분포로 정의하여 실시한 경우이다. Case Ⅱ는 표본의 분포 형태를 최적의 분포 형태인 지수분포가 아닌 정규분포로 가정하고 이때의 분포 특성을 이용하여 정규분포로 몬테카를로 시뮬레이션을 실시한 경우이고, Case Ⅲ는 표본의 분포 형태를 지수분포로 가정하고 분포 특성을 이용하여 Case Ⅰ과 다르게 지수분포로 정의하여 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였다. <그림 3>은 각각의 경우에 대한 몬테카를로 시뮬레이션의 결과를 나타낸 것이며 시뮬레이션을 통해서 산정된 평균값과 표준편차는 표 3과 같다. 평균값의 경우 가장 차이가 큰 Case Ⅰ과 Case Ⅱ의 경우에 약 11%의 편차가 발생하였다. 이는 시뮬레이션 전의 표본 분포에서 발생한 결과와 유사하다. 이를 통해서 표본의 분포 특성을 어떻게 보느냐에 따라 확률론적 방법으로 설계정수를 결정하는 결과에 있어 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Case Ⅰ (b) Case Ⅱ (c) Case Ⅲ

그림 3. 몬테카를로 시뮬레이션

표 3. 산정된 탄성계수(GPa)

	구 분	평균	표준편차
Case Ⅰ	지수 분포 ⇨ 정규 분포	8.19	5.21
Case Ⅱ	정규 분포 ⇨ 정규 분포	9.32	6.80
Case Ⅲ	지수 분포 ⇨ 지수 분포	8.28	5.19

3. 수치해석을 통한 결과 분석

3.1 해석 모델 및 방법

표 3의 결과에서와 같이 설계정수의 편차가 실제 설계에 미치는 영향을 알아보기 위해서 2차원 유한차분 해석 프로그램인 FLAC2D를 통해 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서는 변화되는 적용 물성은 탄성계수만을 고려하였기 때문에 탄성해석을 실시하였다. 암반 정수는 단위중량은 2.4t/m^3, 포와송비는 0.28을 적용하였고, 지보재의 물성치는 표 4와 같다. 해석에 사용된 모델의 크기는 가로 150m, 세로 100m이고 터널 단면 크기는 폭 12m, 높이는 9m이며 토피의 두께는 50m이다. <그림 4>는 해석에 사용된 요소망이다.

표 4. 지보재 물성

지보재	탄성계수 (kPa)	포와송비 (v)	단위중량 (t/m^3)	그라우트강성 (kPa)	그라우트강도 (kPa)	항복강도 (kPa)
연한 숏크리트	5.00E+06	0.3	2.0	-	-	-
굳은 숏크리트	1.56E+07	0.2	2.0	-	-	-
록볼트	2.10E+08	0.3	-	1.40E+07	8.00E+02	177

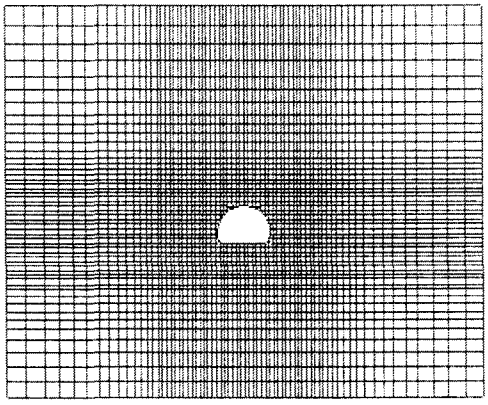
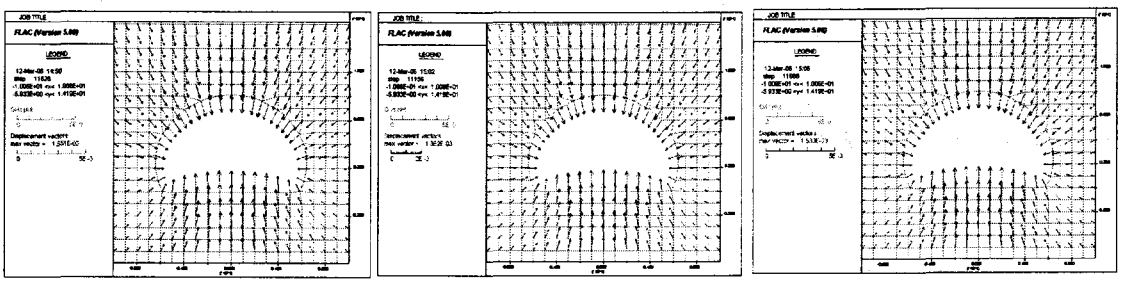


그림 4. 요소망

3.2 해석 결과

수치해석을 통한 각 Case별 결과 분석은 터널 구조물 주변에 발생하는 최대변위와 지보재에서 발현되는 지보력을 기준으로 그 차이를 분석하였다. <그림 5> 및 표 5는 각각의 경우에 대해 수치해석을 실행한 결과 발생한 변위 크기를 Case Ⅲ결과를 기준으로 각 Case별 차이를 나타낸 것이다. 표 5에서 나타난 것과 같이, Case Ⅰ과 Case Ⅲ는 거의 비슷한 최대변위를 나타내고 있다. 그러나 Case Ⅱ는 Case Ⅰ, Ⅲ에 비해 큰 값을 보이며 그 차이는 약 11%이다. 이러한 결과는 각

Case별 분포 특성 중 표본의 분포 특성을 이용한 Case Ⅰ, Ⅲ의 경우, 확률 분포 특성을 결정짓는 평균과 표준편차가 표본의 통계 분포 곡선에 의한 것으로 신뢰구간 범위의 상, 하한의 차이는 발생하지만, 그 기준이 되는 평균은 서로 유사한 값을 갖기 때문이다. 따라서 Case Ⅰ의 경우는 표본의 분포 특성을 고려하였기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션 결과도 비슷한 양상을 나타내고 있다. Case Ⅱ는 표본의 분포 특성을 임의로 정규분포로 가정하였기 때문에 Ⅰ, Ⅲ의 경우와는 많은 편차가 발생함을 확인할 수 있다.



(a)Case Ⅰ (b)Case Ⅱ (c)Case Ⅲ

그림 5. 변위 분포

표 5. 최대변위

구 분	최대변위(m)	편차(Case Ⅲ기준)
Case Ⅰ	1.55E-03	+1.30%
Case Ⅱ	1.36E-03	-11.2%
Case Ⅲ	1.53E-03	0%

표 6은 록볼트 축력과 숏크리트의 최대 휨 압축응력 및 전단응력을 각 경우별로 비교한 것이다. 지보력 결과 역시 최대변위 발생 결과와 마찬가지로 Case Ⅱ는 Case Ⅰ, Ⅲ와는 많은 편차가 발생함을 알 수 있으며, 그 차이는 약 11%의 편차를 나타내고 있다. <그림 6>은 록볼트의 최대 축력 및 숏크리트의 최대 휨 압축응력을 나타낸 것이다.

표 6. 지보력 비교

	록볼트		숏크리트			
	축력(kN)		전단응력(kPa)		휨 압축응력(kPa)	
	최대값	편차	최대값	편차	최대값	편차
Case Ⅰ	6.30	+1.61%	5.94	+1.02%	9,221	+0.20%
Case Ⅱ	5.60	-10.8%	4.90	-11.5%	8,193	-10.9%
Case Ⅲ	6.20	0%	5.88	0%	9,202	0%

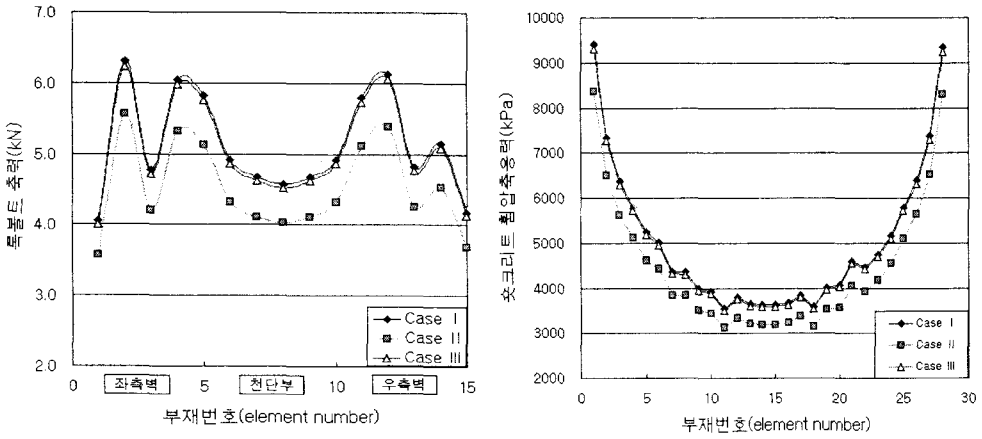


그림 6. 록볼트 축력 및 숏크리트 휨 압축응력

4. 결 론

본 연구에서는 표본의 원분포 특성을 고려하여 통계처리한 경우의 사례와 그렇지 않은 경우를 비교해 보았다. 원분포 특성을 고려하여 통계처리를 실시한 경우는 통계처리 후에도 비슷한 양상을 나타냈으며 평균값의 경우 가장 차이가 큰 Case Ⅰ과 Case Ⅱ의 경우에 약 11%의 편차가 발생하였다. 이는 시뮬레이션 전의 표본 분포에서 발생한 결과와 유사함을 알 수 있다. 수치해석을 통해 최대변위, 록볼트 축력 및 숏크리트 휨 압축응력을 비교 검증한 결과, 본래의 분포 특성을 고려하여 통계처리를 실시한 Case Ⅰ의 경우는 표본의 분포 특성을 고려하였기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션 결과도 비슷한 양상을 나타냈으며 Case Ⅱ는 표본의 분포 특성을 임의로 정규분포로 가정하였기 때문에 Ⅰ, Ⅲ의 경우와 약 11%의 편차가 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 표본의 분포 특성을 무조건 정규 분포화 하는 것은 모집단의 특성을 왜곡하게 되므로 설계정수 산정 시에 표본의 분포 특성을 고려하여 통계처리를 해야 할 것이다.

참고문헌

1. 최성웅, 정소걸, 2004, Monte Carlo Simulation 기법을 이용한 RMR의 역산 및 그에 의한 암반사면의 안정성 분석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 14.2, 97-107.
2. Kim, K., Gao, H., 1995, Probabilistic Approaches to Estimating Variation in the Mechanical Properties of Rock Masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 32.2, 111-120.
3. Mohammad, N., D. J. Reddish and L. R. Stace, 1997, The Relation between In Situ and Laboratory Rock Properties used in Numerical Modeling (Technical Note), Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 34.2, 289-297.