

인천 송도지역 지반정수의 확률분포 추정

Probability Distribution of Geotechnical Properties of Songdo area in Incheon

김동휘¹⁾, Donghee Kim, 김민태²⁾, Mintae Kim, 고성권³⁾, Seongkwon Ko, 박정규⁴⁾, Junggyu Park, 이우진⁵⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

²⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

³⁾ 포스코건설 건축사업본부 건축기술그룹 대리, Assistant manager, Architecture Technology & Design Group, Architecture Division, POSCO E&C

⁴⁾ (주)유신코퍼레이션 지반터널1부 차장, Senior Engineer, Geotechnical & tunnel Engineering Division, Yoosin Engineering Corporation

⁵⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

SYNOPSIS : Probability distribution of geotechnical properties is very useful information and it is used for evaluating the geotechnical properties itself and calculating probability of failure. In this study, probability distribution of compression index, recompression index, and void ratio are evaluated, and analysis results show that all property distributions satisfy normal and log-normal distribution.

Keywords : Probability Distribution Function, Normal Distribution, Skewness Coefficient

1. 서론

지반정수들의 적절한 모수와 확률분포형을 추정하는 것은 통계적 추론(statistical inference)의 방법에 속한다. 예를 들어 현장 및 실내시험으로 산정한 어느 특정지반의 압축지수 자료들은 압축지수의 특성을 평가하기 위하여 수집된 표본이며, 이러한 압축지수의 표본을 사용하여 그 지반이 가지고 있는 압축지수의 평균, 분산 등의 모수들과 분포형태를 추정하게 된다. 이러한 통계학적인 추론방법은 확률론적 분석에서 규정되었거나 가정된 이상화된 확률모델들과 현실세계를 이어주는 연결고리 역할을 한다. 지반정수들에 대한 통계적 추론에 관한 연구는 Lee 등(1983), Baecher(2003), Phoon과 Kulhawy(1999), Lacasse와 Nadim(1996) 등의 연구자들에 의해서 수행되었다. 지반정수들에 대한 통계적 추론을 통한 확률분포형을 결정하기 위해서는 조사자료들의 이상치(outlier)에 대한 검정, 무작위성(randomness)에 대한 검정, 가정한 확률분포형의 적합성 검정 등의 과정을 거쳐야 한다. 이러한 과정을 통하여 산정된 신뢰성 높은 지반정수들의 확률분포형은 지반공학에서의 신뢰성 분석의 활용도를 높일 것으로 판단된다. 본 논문에서는 인천 송도지반에서 광범위하게 수행된 현장 및 실내시험결과를 이용하여 압밀침하량 계산에 필요한 지반의 압축지수, 재압축지수, 간극비에 대한 확률분포를 산정하고자 한다.

2. 지반정수 확률분포형의 통계적 추정

지반공학적 문제에서 실내 및 현장시험을 통해 특정 지반에 대하여 추정하고자 하는 것은 확률변수로 표현할 수 있는 지반정수의 분포이다. 즉, 확률분포는 특정 실험이나 모집단 전체의 모든 정보를 포함하고 있기 때문에 특정 지반정수의 확률분포를 안다는 것은 그 지반정수의 모든 정보를 알게 되는 것이다. 그러나 이러한 지반정수의 정확한 확률분포는 지반전체에 대한 지반조사결과 즉, 모집단을 완전히 알 경우에만 정확히 추정할 수 있으며, 실제 현장에서 수행된 제한된 지반조사 수량으로는 완전한 확률분포를 알 수 없다. 따라서 현실에서는 제한된 지반조사결과를 이용하여 지반정수의 확률분포에 대한 모수를 추정하게 된다. 특정 지반정수의 확률분포형에 대한 모수의 추정은 일반적으로 표본, 즉 시험결과들로부터 정의되는 함수 또는 공식을 통해 이루어지므로 표본 즉, 시험결과들이 달라지면 추정된 결과도 달라지게 된다. 즉, 추정에 사용되는 통계량 또는 추정량(estimator)은 하나의 확률변수이다. 확률변수인 추정량의 확률분포는 표본이 추출된 모분포에 의존한다. 그러나 한번 표본이 추출되면 우리는 이 결과를 추정량이라는 공식을 통해 하나의 추정치(estimate)를 얻게 된다. 그러므로 표본을 반복해서 여러 번 뽑아 추정치를 각각 계산해 내면 이들은 추정량의 분포형태를 따르게 된다. 그림 1은 표본을 추출하는 과정과 표본으로 산정한 통계량으로 모수를 추정하는 과정을 나타내고 있다.

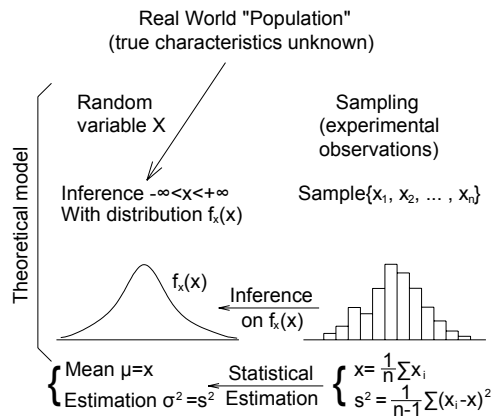


그림 1. 통계적 추론에서의 표본의 역할(Ang과 Tang, 2007)

관심 있는 지반정수들의 확률분포형을 결정하기 위한 빈도분석을 수행하기 전에 전술한 바와 같이 지반조사결과에 대한 이상치 검정, 무작위성 검정을 수행해야 한다. 이러한 검정을 통하여 관심 있는 지반정수들이 빈도분석 수행이 가능한 자료라고 평가되면 적합도 검정을 통하여 최종적으로 가장 적합한 확률분포형을 결정하게 된다. 이와 같이 지반정수의 확률분포형을 결정하는 과정을 요약하면 그림 2와 같다.

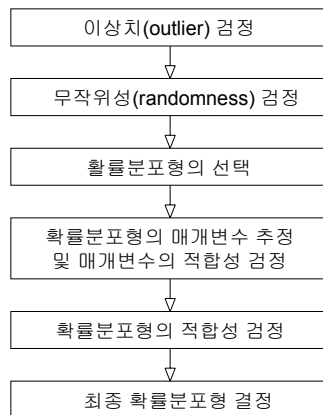


그림 2. 확률분포형의 결정 순서

3. 연구지역 위치

연구위치인 송도신도시는 인천광역시 연수구에 위치한 대규모 매립지로 평탄한 지형을 이루고 있으며, 북서쪽으로는 인천국제공항이, 북쪽으로는 청라지구가 위치하고 있다. 송도신도시의 지반조사자료 중 지층분포 분석은 1~4 공구의 자료를 사용하였으며, 지반정수에 대한 분석은 매립 후 일정기간 내에 집중적으로 수행된 1, 3공구의 자료를 사용하였다. 인천 송도지역의 1~4공구는 1996년부터 매립이 진행되어 2005년에 매립이 완료되었으며, 매립완료 후 일정기간 이상 방치하여 압밀을 진행시킨 후 공사를 진행하고 있다(최현길, 2009). 본 논문에서 사용한 대부분의 지반조사자료는 2005년 매립완료 후 2006. 6~2007. 10에 집중적으로 수행된 것이다. 또한, 분석에 사용된 지반조사는 매립이 완료된 후 퇴적층과 매립층의 특성을 파악하여 도로, 가시설, 말뚝 설계를 위해 수행된 것으로, 모래다짐말뚝공법, 압밀축진공법, 동다짐공법 등이 적용되기 전에 수행되었다. 또한, 김동휘 등(2009)에 따르면 본 논문에 사용한 시험자료들은 압밀도 80~90% 이상의 자료로 시간에 따른 지반정수의 변동성은 크지 않을 것으로 판단된다. 그림 3은 송도신도시 위치 및 매립현황을 나타내고 있다.

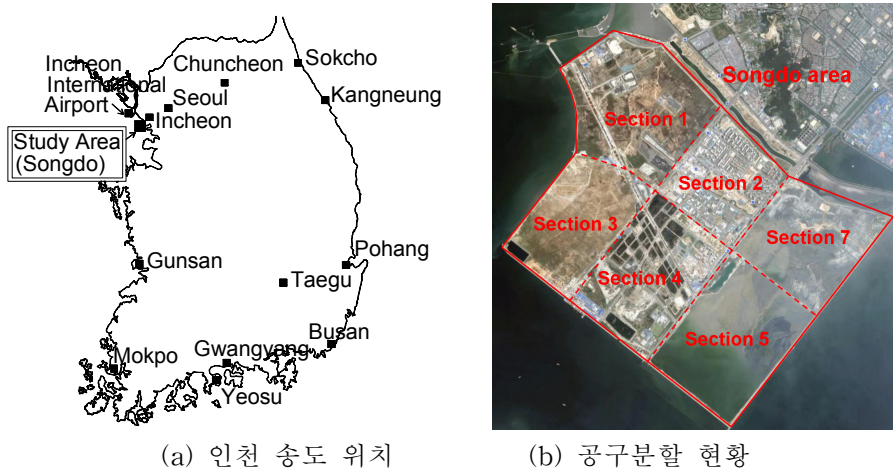


그림 3. 인천 송도 위치, 공구분할 현황 및 시추조사위치(김동휘 등, 2009)

4. 확률분포 추정

4.1 압축지수와 재압축지수의 확률분포

인천 송도지반은 점토와 실트가 섞여 있는 지반으로 압밀층을 점토 및 실트층으로 상세하게 구분하기는 매우 어렵다. 따라서 실제 압밀침하량을 추정할 경우에는 실트와 점토의 특성이 모두 고려된 압축지수를 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 만약, 압밀층 전체가 점토 또는 실트일 경우에는 점토와 실트의 시험결과를 구분하여 분석한 값을 사용해야 할 것이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 지반을 ML과 CL로 구분하지 않고 압축지수를 분석한 결과 깊이에 따라서 거의 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 특성을 보이는 인천 송도지역 압축지수의 확률분포형을 도출하기 위해서는 압축지수가 연구대상 공간에서 무작위성을 보여야 한다. 즉, 공간적으로 특정한 경향성을 보이지 않아야 한다. 본 논문에서는 압축지수의 무작위성을 검정하기 위하여 전술한 바와 같이 Run 검정을 사용하였다. Run 검정을 X, Y, Z 방향에 대하여 수행한 결과 표 1에서 볼 수 있듯이 흙의 종류를 CL과 ML로 구분했을 경우와 CL, ML을 구분하지 않고 압축지수에 대한 무작위성 검정을 수행한 결과 모두 무작위성 판정 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 송도지반의 압축지수는 Run 검정방법을 통하여 무작위성을 보이는 것으로 나타나 압축지수에 대한 빈도분석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

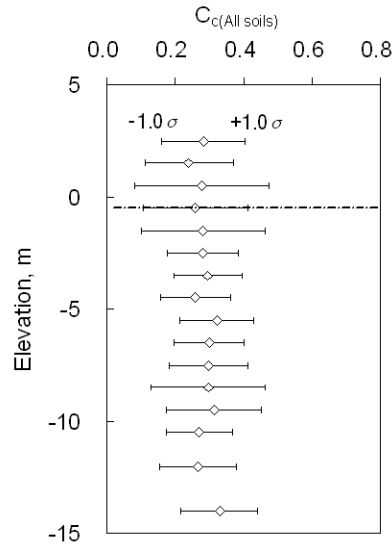


그림 4. 깊이에 따른 압축지수

표 1. 압축지수자료의 무작위성 검정 결과(유의수준 $\alpha = 0.05$)

Soil type(No. of data)	Direction	X(East-West)		Y(South-North)		Z(Vertical)		판정 기준
		계산치	판정	계산치	판정	계산치	판정	
ML(n=200)		0.971	OK	0.875	OK	0.261	OK	1.96
CL(n=275)		1.334	OK	0.614	OK	1.341	OK	
All soils(ML, n=200; CL, n=200)		0.947	OK	1.956	OK	0.038	OK	

무작위성 검정 후에는 가정한 확률분포형의 추정된 매개변수가 각각의 확률분포형 매개변수 적합성조건을 만족하는지를 검토해야 한다. 본 논문에서는 확률분포형으로는 정규분포, 대수정규분포, 감마분포, 와이블분포, 검벨분포를 사용하였으며, 매개변수 추정방법으로는 모멘트법을 사용하였다. 매개변수 적합성 판정결과 표 2에서 볼 수 있듯이 압축지수 추정에 사용된 모든 확률분포형이 적합성조건을 만족하는 것으로 나타났다. CL, ML의 자료를 합하여 확률분포형의 매개변수를 산정할 경우에는 두 자료의 개수가 매우 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 두 종류의 흙에 대한 압축지수가 무작위성을 보이므로 현장에 실제로 분포하는 흙의 비를 알 수 있다면 간단하게 자료 개수의 비를 조정하여 확률분포를 구하면 현장을 대표할 수 있는 확률분포를 산정할 수 있을 것이다. 그러나 현실적으로 연구대상지반에 분포하는 CL, ML의 비를 파악한다는 것은 매우 어려운 일이므로 본 논문에서는 두 종류의 흙이 동일한 비로 혼재되어 있다고 가정하였다. 따라서 두 종류의 흙에 대하여 동일한 개수의 자료를 사용하여 압축지수의 대표 확률분포형을 추정하였다. 만약, 설계하고자 하는 지반이 CL이 우세할 경우에는 CL의 자료에 가중치를 더 부여한 후 대표 확률분포형을 결정해야 할 것이다. 이와 같은 분석방법은 압축지수뿐만 아니라 본 논문에서 분석한 모든 지반정수에 적용하였다.

표 2. 압축지수의 확률분포형에 대한 매개변수 산정 및 적합성 검정결과

Soil types	PDF model	Location parameter	Scale parameter	shape parameter	Validity check
ML	Normal	0.201	0.070	-	OK
	Log-normal	- (-0.229)	-1.660 (-0.856)	0.337 (0.161)	OK(OK)
	Gamma	- (-0.072)	0.024 (0.018)	8.293 (15.245)	OK(OK)
	Weibull	- (0.054)	0.225 (0.167)	3.156 (2.231)	OK(OK)
	Gumbel	0.170	0.054	-	OK

표 2. 압축지수의 확률분포형에 대한 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(계속)

Soil types	PDF model	Location parameter	Scale parameter	shape parameter	Validity check
CL	Normal	0.304	0.087	-	OK
	Log-normal	- (-0.206)	-1.231 (-0.689)	0.282 (0.170)	OK(OK)
	Gamma	- (-0.023)	0.025 (0.023)	12.068 (13.927)	OK(OK)
	Weibull	- (0.123)	0.336 (0.204)	3.888 (2.180)	OK(OK)
	Gumbel	0.264	0.068	-	OK
All soils	Normal	0.252	0.092	-	OK
	Log-normal	- (-0.367)	-1.442 (-0.492)	0.353 (0.147)	OK(OK)
	Gamma	- (-0.149)	0.033 (0.021)	7.528 (19.107)	OK(OK)
	Weibull	- (0.052)	0.282 (0.226)	2.991 (2.313)	OK(OK)
	Gumbel	0.210	0.071	-	OK

주) ()안은 3변수분포의 매개변수를 의미함

압축지수의 확률분포형을 추정하기 위하여 적용한 5가지 확률분포형에 대한 적합성을 K-S 검정방법을 이용하여 판정하였다. 그 결과 ML과 모든 흙을 사용한 경우는 유의수준 0.05에서 모든 확률분포형이 적합한 것으로 평가되었으며, CL은 유의수준 0.01에서 모든 확률분포형이 적합한 것으로 나타났다. 확률분포형에 대한 적합성 평가결과를 요약하면 표 3과 같으며, 실제 자료와 확률분포형을 함께 도시한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5의 분포이름 옆의 숫자는 확률분포형의 변수개수, Mean은 평균, SD는 표준편차, COV는 변동계수, Skewness Coefficient는 왜곡도계수를 의미한다. ML, CL 및 두 종류의 흙을 합하여 산정한 확률분포형의 왜곡도계수는 각각 0.49, 0.52, 0.45의 양수로 확률분포형이 약간 왼쪽으로 치우친 경향을 보이거나 그 값이 작아 거의 대칭인 분포로 판단된다. 따라서 가장 일반적인 대칭분포인 정규분포와 함께 추정에 사용한 모든 확률분포형을 사용하여 압축지수의 분포를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

표 3. 압축지수 확률분포형의 적합성 검정 결과

Soil type	PDF model	검정 통계치	유의수준 $\alpha = 0.05$		유의수준 $\alpha = 0.01$	
			검정기준	판정	검정기준	판정
ML	Normal	0.07	0.09	O	0.11	O
	Log-normal	0.06 (0.05)		O(O)		O(O)
	Gamma	0.05 (0.05)		O(O)		O(O)
	Weibull	0.06 (0.04)		O(O)		O(O)
	Gumbel	0.07		O		O
CL	Normal	0.08	0.07	X	0.09	O
	Log-normal	0.04 (0.05)		O(O)		O(O)
	Gamma	0.05 (0.05)		O(O)		O(O)
	Weibull	0.09 (0.04)		X(O)		O(O)
	Gumbel	0.05		O		O
All soils	Normal	0.06	0.06	O	0.08	O
	Log-normal	0.06 (0.03)		O(O)		O(O)
	Gamma	0.04 (0.03)		O(O)		O(O)
	Weibull	0.05 (0.03)		O(O)		O(O)
	Gumbel	0.06		O		O

주) ()안은 3변수 분포의 적합성 판정결과를 의미함

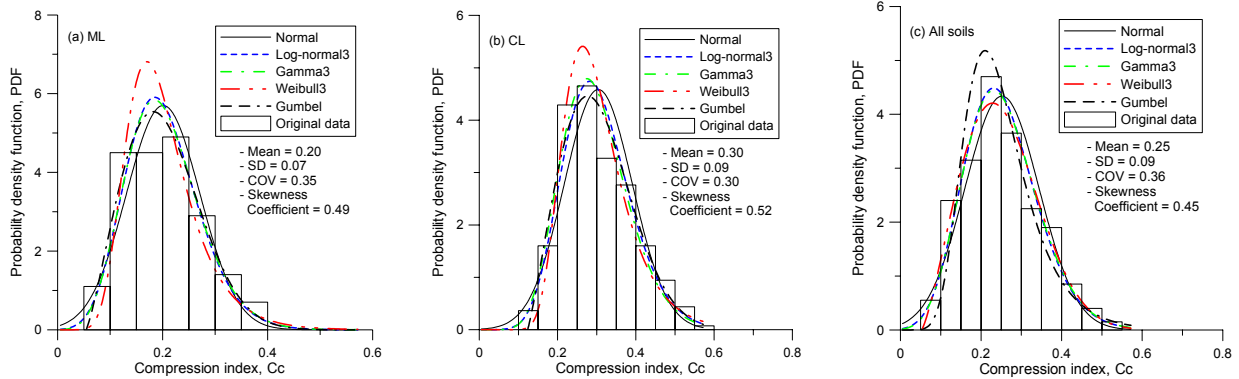


그림 5. 압축지수의 확률분포형

본 연구에서는 압축지수뿐만 아니라 과압밀상태 지반의 압밀침하량을 산정할 경우 필요한 재압축지수에 대한 확률분포형을 추정하였다. Run 검정을 사용하여 X, Y, Z 방향에 대한 압축지수 자료의 무작위성을 검정한 결과 흙의 종류를 CL과 ML로 구분했을 경우와 CL, ML을 구분하지 않았을 경우 모두 무작위성 판정 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 압축지수에 대한 빈도분석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 재압축지수 확률분포추정에 사용한 확률분포형의 매개변수 적합성 판정결과 사용된 모든 확률분포형이 적합성조건을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 확률분포형의 적합성 검정결과 CL, ML을 구분하지 않은 경우와 두 자료를 합한 경우 모두 유의수준 0.05에서 모든 확률분포형이 적합한 것으로 평가되었다. 따라서 대칭분포인 정규분포를 포함한 추정에 사용한 모든 확률분포형을 사용하여 재압축지수의 분포를 나타낼 수 있을 것으로 판단되며, 재압축지수의 확률밀도함수는 그림 6과 같다.

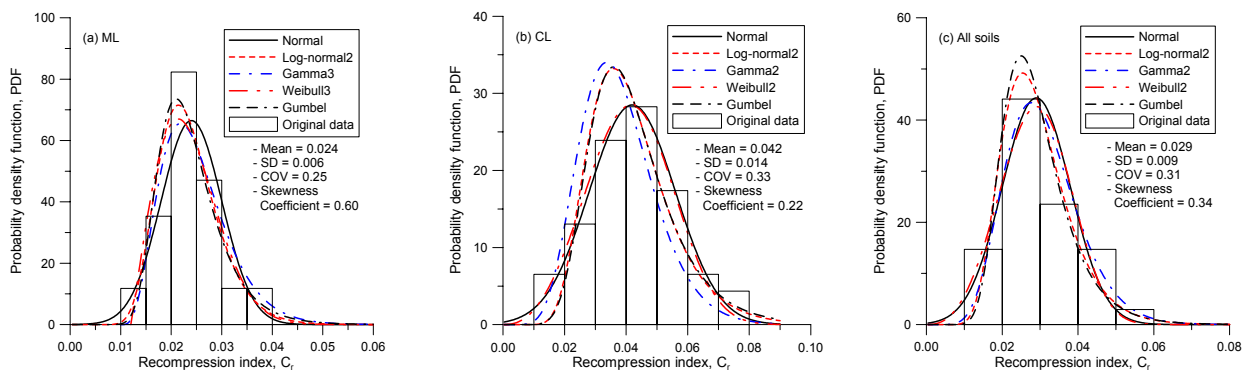


그림 6. 재압축지수의 확률분포형

4.2 간극비의 확률분포

간극비의 경우 압밀침하량 계산에 직접적으로 사용되는 지반정수로 본 논문에서는 현재의 응력상태에서의 간극비의 분포를 분석하였다. 매립에 의한 원지반 압밀침하량을 평가하기 위해서는 매립 전의 간극비를 알아야 함을 주지해야 할 것이다. 따라서 본 논문에서 제시한 간극비의 확률밀도함수는 매립 후에 추가 하중증가에 의한 압밀침하량 계산시 사용해야 할 것이다. 인천 송도지반의 경우 그림 7에서 볼 수 있듯이 현재 응력상태에서 간극비는 흙의 종류에 관계없이 일정한 경향을 보이는 것으로 나타났으나, 상부 매립층과 하부 퇴적층의 간극비는 상이한 것으로 나타났다. 즉, 상부 매립층의 간극비가 하부 퇴적층의 간극비보다 큰 것으로 나타났다. 또한, 인천 송도지반은 실트층, 점토층을 명확하게 구분되어 형성되어 있는 것이 아니라 매우 복잡하게 혼재되어 있으므로 침하량을 계산할 경우에는 점토와 실트의 구분 없이 두 층의 특성을 반영할 수 있는 간극비가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 흙

을 구분하지 않고 간극비의 활률분포를 매립층 및 퇴적층에 대하여 분석하였다.

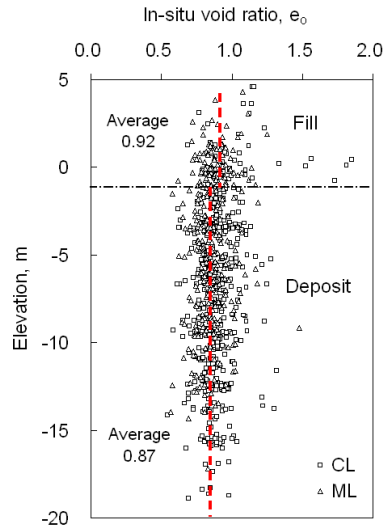


그림 7. 깊이에 따른 간극비 분포

간극비 자료에 대한 X, Y, Z 방향에 대한 무작위성 검정결과 모든 방향에 대하여 무작위성을 보이는 것으로 나타났다. 매개변수의 적합성 검정결과 매립층의 경우에는 3변수 감마분포와 와이블분포, 퇴적층의 경우에는 3변수 와이블분포가 검정기준을 통과하지 못하였다. 매개변수 적합성 검정을 통과한 활률 분포형에 대한 적합성 검정을 수행하였으며, 매립층의 경우에는 유의수준 0.05 및 0.01에서 2변수 와이블분포가 검정기준을 통과하지 못하였다. 매립층의 왜곡도계수는 0.89로 왼쪽으로 약간 치우친 것으로 나타났으며, 이는 매립층에 분포하고 있는 느슨한 지층의 영향으로 큰 간극비를 보이는 지층이 부분적으로 분포하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 매립층 간극비의 활률분포형은 이러한 특성을 고려해야 할 것으로 판단되며, 왼쪽으로 치우친 경향을 나타낼 수 있는 대수정규분포 또는 감마분포가 적합한 것으로 판단된다. 퇴적층은 유의수준 0.05에서는 정규분포와 2변수 와이블분포, 유의수준 0.01에서는 2변수 와이블분포가 각각의 검정기준을 통과하지 못하였다. 퇴적층의 경우에는 분석에 사용한 자료가 392개로 매우 많아 적합성 검정기준이 이에 따라 매우 작게 설정되어 유의수준 0.05에서는 통과하지 못하였으나 검정기준이 약간 증가한 유의수준 0.01에서는 통과한 것으로 나타났다. 또한, 그림 8(b)에서 볼 수 있듯이 퇴적층의 간극비는 거의 대칭적으로 분포하고 있어 정규분포가 적합한 것으로 판단된다. Lacasse와 Nadim(1996)은 일반적으로 간극비는 정규분포를 보인다고 하였으며, 이는 인천 송도지반 퇴적층의 분포와도 일치하는 것으로 나타났다.

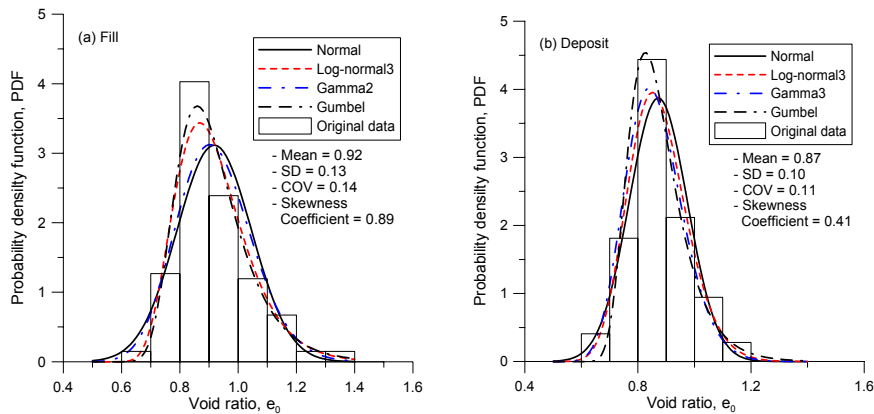


그림 8. 간극비의 활률분포형

5. 요약 및 결론

지반정수들에 대한 확률분포형을 결정하기 위해서는 지반조사결과에 대한 이상치 검정, 무작위성 검정을 수행해야 한다. 이러한 검정을 통하여 관심 있는 지반정수들이 빈도분석 수행이 가능한 자료라고 평가되면 적합도 검정을 통하여 최종적으로 가장 적합한 확률분포형을 결정하게 된다. 본 연구에서는 압축지수, 재압축지수, 간극비에 대한 확률분포형을 산정하였다.

ML, CL, ML과 CL의 자료를 합하여 압축지수 확률분포형을 추정하였으며, 각각의 확률분포형의 왜곡도계수는 0.49, 0.52, 0.45의 양수로 확률분포형이 약간 왼쪽으로 치우친 경향을 보이거나 그 값이 작아 거의 대칭인 분포로 판단된다. 따라서 가장 일반적인 대칭분포인 정규분포와 함께 대수정규분포 등의 추정에 사용한 모든 확률분포형을 사용하여 압축지수의 분포를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 재압축지수도 압축지수의 확률분포형과 유사한 추정결과를 보이는 것으로 나타났다. 간극비의 경우에는 흙의 종류에 관계없이 유사한 값을 보이는 것으로 나타나 매립층과 퇴적층으로 구분하여 각각의 지층에 대한 확률분포형을 추정하였다. 그 결과 두 지층은 모두 대칭분포인 정규분포를 만족하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김동휘, 안신환, 김재정, 이우진(2009), “인천 송도지역 지반의 변동성 분석”, *한국지반공학회논문집*, 제25권, 6호, pp.73~88.
2. 최현길(2009), “송도 국제도시 개발계획에 대한 개관”, *인천 특별 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 인천광역시, pp.3-27.
3. Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (2007), *Probability Concepts in Engineering, Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, 2nd Edition, New York, John Wiley & Sons, pp.278-305.
4. Baecher, G. B. (2003), *Reliability and Statistical Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., pp.177-203.
5. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), “Uncertainties in characterizing soil properties”, *Uncertainty in the Geologic Environment*, Madison, ASCE, pp.49-75.
6. Lee, I. K., White, W., and Ingles, O. G. (1983), *Geotechnical Engineering*, Boston, Pitman, pp.57-88.
7. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), “Characterization of geotechnical variability”, *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), pp.612-624.