

울산지역 퇴적암류의 지질공학적 특성

김광식¹ · 김광염^{1*} · 서용석² · 김창용¹

¹한국건설기술연구원 지하구조물연구소

²충북대학교 지구환경과학과 · 기초과학연구소

Engineering Geological Characteristics of Sedimentary Rocks at Ulsan Area

Kwang-Sik Kim¹, Kwang-Yeom Kim¹, Yong-Seok Seo², and Chang-Yong Kim¹

¹Underground Structure Div., Korea Institute of Construction Technology(KICT)

²Dept. of Earth & Environmental Sci. & Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University

퇴적암에서 발달된 불연속면들은 암반의 공학적 특성들을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 이들 불연속면을 기재하는 요소들은 일반적으로 불균질성과 불확실성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 이러한 불연속면의 기재요소를 정량적이고 객관적으로 결정하기 위해 확률론적 통계기법을 이용하였다. 울산 일대의 33개의 퇴적암 사면을 선정하여 ISRM(1978)에서 제시한 불연속면의 조사항목을 바탕으로 불연속면의 특성 조사를 수행하였으며, 조사된 항목의 확률분포함수를 분석하여 울산지역 백악기 하양층군 퇴적암류의 지질공학적 특성을 파악하였다.

주요어 : 암반, 불연속면, 퇴적암, 확률분포함수

Discontinuities developed in a sedimentary rock mass are the most important factor to determine mechanical properties of the rock mass. Parameters described discontinuities in rock mass generally connote heterogeneity and uncertainty. In this study, probabilistic statistics method was used to determine parameters of discontinuities quantitatively and objectively. The field survey was conducted at 33 sedimentary rock slopes in Ulsan area, according to the suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mass(ISRM, 1978). The engineering geological characteristics of the sedimentary rocks at Ulsan area was determined as probability distribution function deduced by analyzing parameters of discontinuities.

Key words : rock mass, discontinuity, sedimentary rock, probability distribution function

서 론

암반사면의 안정성은 토질과 다르게 암반 내에 존재하는 불연속면의 특성과 발달정도에 많은 영향을 받는다. 불연속면의 특성은 암반의 역학적 거동에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나로 터널, 사면, 매립지 및 지하공간 시공 시 안정성 해석을 위한 필수적인 자료로 활용된다. 이러한 불연속면의 특성은 암반과 관련된 건설공사의 가장 기본이 되는 조사사항으로 현장조사를 통한 다양한 평가방법들이 제시되어 있지만, 대부분의 결과값이 정성적이고 주관적인 방법을 통해 결정되기 때문에 조사자

에 따라 상당한 오차가 있는 실정이다. 또한 불연속면의 특성은 쉽게 예측할 수 없는 가변성과 불확실성을 내포하고 있어 하나의 대표값으로 규정짓는데 상당한 어려움이 따른다. 내의 경우 1980년대 이후부터 불연속면 특성에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나, 암반에서의 불연속면 특성을 규정할 수 있는 평가방법에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 불연속면을 가진 암반의 평가 방법을 검토하기 위해 울산 일대의 퇴적암 사면을 선정하여 ISRM(1978)에서 제시한 불연속면의 조사항목을 바탕으로 불연속면의 특성 조사를 실시하였으며, 불규칙

*Corresponding author: kimky@kict.re.kr

하고 다양하게 분포하는 불연속면의 특성들을 정량화하기 위해 통계적 분석에 의한 확률분포함수(probability distribution function)를 이용하여 분석하였다.

연구 방법

본 연구에서는 울산지역에 분포하는 백악기 경상누층군의 하양층군에 속하는 퇴적암들로 구성된 암반사면을 대상으로 ISRM(1978)에서 제시한 불연속면의 조사항목 중 방향성, 간격, 연속성, 거칠기, 벽면강도, 간극, 충전물, 누수, 암질지수(RQD)에 대하여 현장 조사를 수행하였다.

연구지역

연구지역은 울산광역시 굴화리 일대와 청량면 일대에 위치하는 부산-울산간 고속도로 시공 현장의 사면들이다. 이 지역은 백악기 경상누층군 하양층군의 최상부에 해당하는 곳으로 주로 적색, 녹회색 및 암회색을 띠는 사암과 셰일이 교호하는 퇴적암으로 이루어져 있다. 또한 이들 퇴적암류는 긴 연장성을 가지는 층리가 잘 발달하고 있다. 하양층군 퇴적암류는 화강암 주변부에서 관입에 따른 접촉열변성작용으로 인해 부분적으로 혼펠스화되어 있다. 퇴적암 층리의 주향은 주로 서북서 방향의 주향에 남서 방향으로 저각도 경사를 가진다.

조사를 위해 선정된 사면은 총 19개소이며, 이를 암상이나 절리 발달 양상에 따라서 다시 33개 지점으로

세분화하였다. 대상 사면의 규모는 폭이 20~100m이며, 높이 8~60m이다. 그리고 대구층에 해당하는 굴화리 일대를 A지역, 울산층에 해당하는 청량면 일대를 B지역으로 구분하여 불연속면의 조사를 수행하였다(Fig. 1).

불연속면 조사방법

불연속면은 지질학적 의미와 공학적 의미로 살펴볼 수 있다. 지질학적 의미의 불연속면은 암반내에 존재하는 불연속면으로서 단층, 절리, 층리, 엽리, 틈, 균열, 깨짐 등을 말하며, 공학적 의미의 불연속면은 암반 내에 존재하는 인장강도가 낮거나 또는 전혀 없는 모든 연약한 면을 총괄적으로 나타내는 용어으로써 1960년대 후반부터 많은 연구자들에 의하여 사용되어왔다(Fookes & Dennes, 1969; Attewell & Farmer, 1976; Goodman, 1976).

본 연구에 이용된 조사선 측정법은 일련의 라인 스캐닝(line scanning)을 이용하는 것으로 서로 다른 두 개의 측선을 가능한 한 처음의 조사선과 수직하도록 위치시키고, 교차하는 불연속면의 거리 및 특성을 기록하는 방법(Piteau, 1970)으로서, Priest(1993)가 제안한 바와 같이 측선은 직선을 유지하여 시추작업에서와 같은 효과를 기대할 수 있도록 하였다.

확률분포함수의 검정

통계적 분석 기법 중 확률분포함수의 특성은 0.05 유의수준에서의 평균값을 이용하여 암반 특성치를 산정하

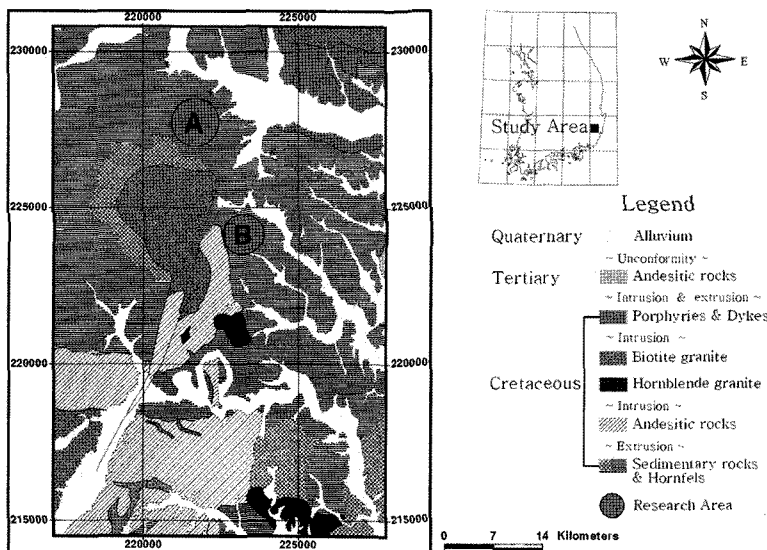


Fig. 1. Geological map of the study area.

는 것으로, chi-square(χ^2) 적합성 검정과 K-S 적합성 검정을 이용하여 결과값의 확률분포함수에 대한 검정을 실시하였다. 또한 불연속면의 특성이 어떤 특정함수를 따른다는 가정 하에 몇 가지 분포함수를 선정한 후 가장 적합한 곡선을 선택하여 적용하였다. 확률분포함수는 기존 연구자들에 의해 제시된 정규분포, 음지수분포, 감마분포, 대수정규분포 등 4가지를 사용하였다(Park, 2000; 윤우현과 천병식, 2003).

연구지역 암반 불연속면의 지질공학적 특성

본 연구지역의 불연속면 특성은 퇴적암을 대표하는 불연속면인 층리와 이를 포함한 전체 불연속면의 특성에 대해서 확률분포함수와 ISRM(1978)에서 제안한 등급 범위로 정량화하였다. 조사 항목들 중 방향성, 간격, 연장성, 간극, 벽면강도, RQD는 정량적 값이므로 확률분포함수로 나타내었고, 거칠기, 풍화도, 누수는 확률분포특성을 보이지 않아 ISRM에서 제안한 등급으로 표시하였다.

방향성(Orientation)

절리의 방향성은 경사방향/경사각으로 기재하였으며 이들의 방향성 분포를 등밀도와 로즈다이아그램으로 나타내었다(Fig. 2). 본 역에 발달하고 있는 불연속면은 3set로 구분되며, set1은 퇴적암의 층리로서 184/16, set2는 285/79, set3은 033/80의 방향성을 보였다.

현장조사에서 획득된 방향성 자료들은 분산이 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 확률론적 해석방법을 이용하여 분산이 심한 방향성 자료를 일정한 분포를 보이는 함수로 간주하고 함수내의 모든 자료를 분석에 사용하였다. 방향자료의 통계적 분포는 Fisher(1953)에 의해 제안된 Fisher함수를 이용하여 나타내었다.

Fisher함수는 참값을 중심으로 방향자료들이 분산을 보이는 형태의 함수로 불연속면의 방향성 분포형태와 유사함을 보이고 있어 이를 사용하였다. 이 분포는 불연속면의 한 군이 3차원의 정규분포를 이룬다고 가정하고 확률밀도함수식은 식(1)과 같다.

$$f(\theta) = \frac{k \sin \theta}{e^k - e^{-k}} e^{k \cos \theta} d\theta \quad (1)$$

여기서, k : 불연속면의 군집도(degree of clustering)
 θ : 참값 또는 평균값으로부터 각 지점까지의 각도

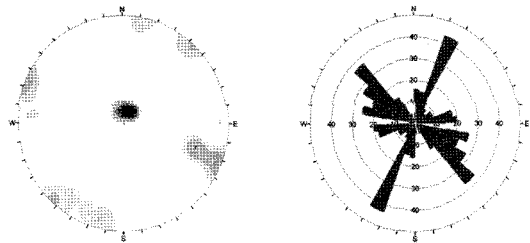


Fig. 2. Orientation of the discontinuities in the study area.

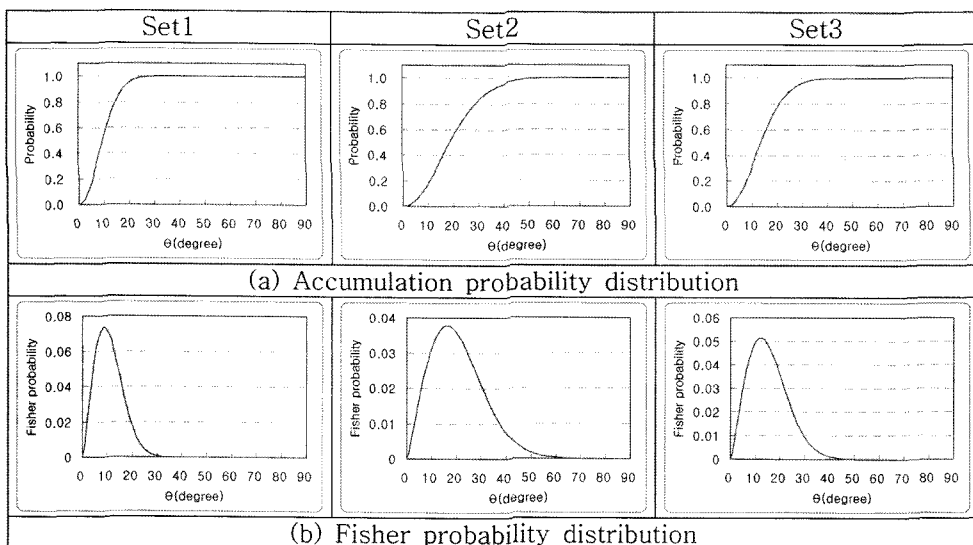


Fig. 3. Probability distributions of orientation of discontinuities.

해석결과 본 역의 불연속면들은 set1(층리), set2, set3 순으로 균집도가 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이는 절리 빈도가 높은 순으로 set을 결정하였기 때문에 절리 빈도가 가장 높은 set1의 균집도가 가장 크고, 절리 빈도가 낮은 set3의 균집도가 가장 낮게 나타났다. 또한 균집도가 작다는 것은 유사한 방향성의 분산이 심하다는 것을 의미하며, 균집도가 크다는 것은 유사한 방향의 분산이 작다는 것을 의미한다.

신뢰구간을 설정하고 불연속면의 균집도를 나타내는 Fisher 상수(K)를 알게 되면 이들의 값을 이용하여 참값 또는 평균값으로부터 각 지점까지의 각도(θ)의 범위를 알 수 있게 된다. 각 구역별 절리군의 θ 값과 K값은 논문의 마지막에 모든 분석결과를 종합한 Table 1과 같으며, 절리조별 누적확률분포와 Fisher확률분포를 Fig. 3에 나타내었다.

간격(Spacing)

불연속면의 간격에 대한 확률분포함수는 많은 연구자들의 연구 결과 음지수분포(Baecher, 1983; Priest, 1993), 대수정규분포(Narr & Suppe, 1991) 등을 따르는 것으로 보고된 바 있다. Narr & Suppe(1991)는 퇴적암에서 인장절리간격을 조사하여 절리면 간격의 표준편차는 산술평균보다 대체로 0.56배가 많다고 발표하였다. 이 경우에 절리간격에 대한 대표값은 중앙값(median value)을 사용하는 것이 절리특성을 가장 잘 나타내며, 대수정규분포를 따르게 된다고 하였다.

Fig. 4(a)는 ISRM 분류기준을 따라 빈도수를 나타낸 히스토그램으로서, set1에서 가장 높은 빈도를 보이는 구간은 Close에 해당되며, set2와 3은 Moderate이다. Fig. 4(b)는 확률분포함수를 나타낸 것으로서, set1은 음지수 분포를 보이며, 나머지 set들은 대수정규분포를 따른다. 이들 결과의 요약은 Table 1과 같다.

연장성(Persistence)

본 역에서 연장성은 층리에 해당하는 set1이 평균 17.0m로 긴 연장성을 보이며, 나머지 set2와 set3의 연장성은 평균 3m 이하의 범위를 보이고 있다. 연장성이 비교적 짧은 이유는 크기가 한정되어 있는 사면노두에서 자취 길이(trace length)를 개략적으로 측정하기 때문에 장소의 제약을 받으며, 현장 조사시 두 불연속면이 교차되거나 암석 내에서 불연속면의 종결로 인하여 연장성이 감소되기 때문이다. 이들 연장성은 사면의 규모에 따라 조금씩 다르게 나타난다.

Fig. 5(a)의 히스토그램은 ISRM 분류법을 기준으로 작성된 것이며, set1은 Close, set2와 3은 Moderate로 기재된다. Fig. 5(b)는 연장성의 확률분포함수를 나타낸 것으로서 간격과 유사한 대수정규분포와 음지수분포를 보이며, set1은 음지수분포를 보이고 나머지 set들은 대수정규분포를 따른다. 이들 결과의 요약은 Table 1과 같다.

간극(Aperture)

간극은 서로 붙어있는 불연속면들 간의 수직거리이다.

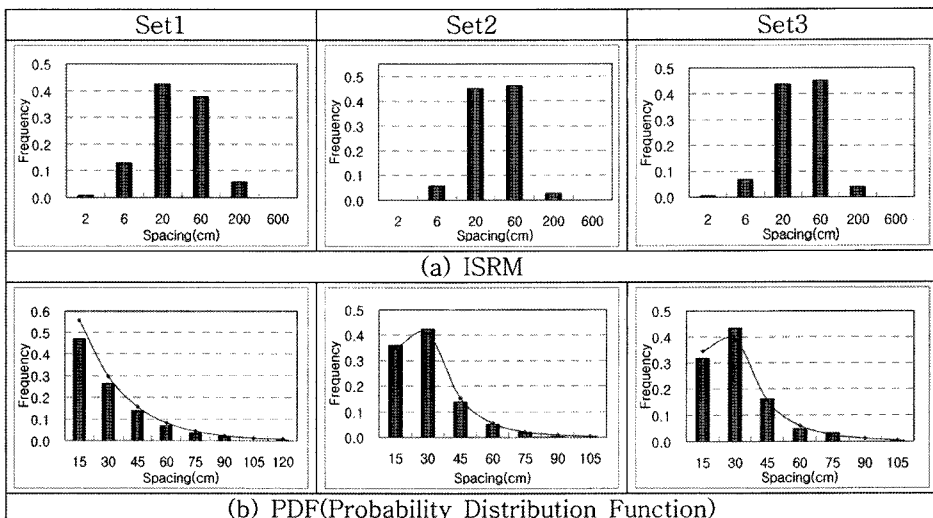


Fig. 4. Probability distribution function of spacing.

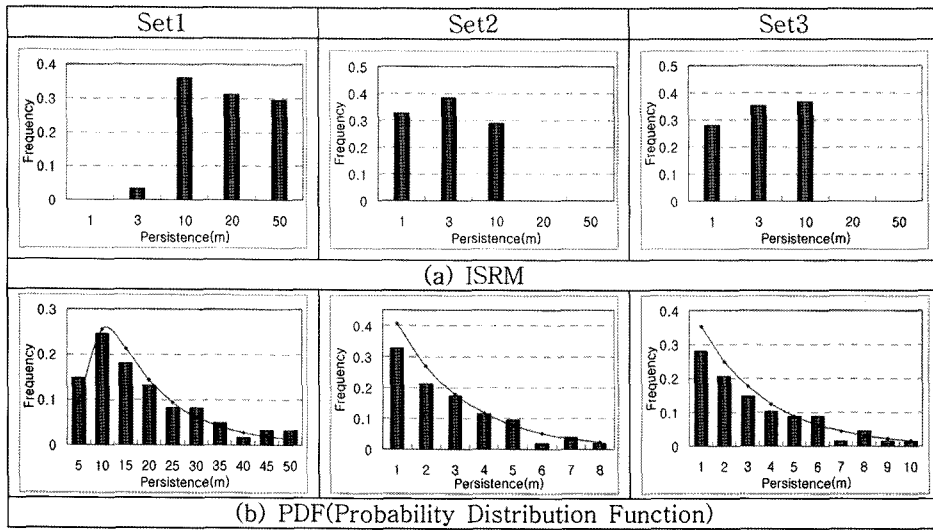


Fig. 5. Probability distribution function of persistence.

미세 간극은 주로 공기나 물로 채워져 있지만 대규모 간극은 육안으로 확인 가능한 뚜렷한 거칠기와 굴곡을 가진다. 이들은 전단변위, 인장력, 용해 등으로 이미 교란된 상태이며 표면풍화나 굴착 등에 영향을 받는다. 본 연구에서 간극의 측정은 미세 간극의 경우 Feeler gauge를 사용하고 대규모 간극은 mm단위 자를 사용하여 측정하였다.

ISRM과 확률분포함수의 결과는 Table 1과 같다. Fig. 6(a)는 ISRM분류법을 따라 작성된 히스토그램이며, set1 은 Very tight, set2와 3은 Moderate로 나타났다. Fig.

6(b)는 확률분포함수로서 set1과 set2는 음지수분포를 보이며, set3은 감마분포를 따른다. 이들 결과의 요약은 Table 1과 같다.

벽면강도(Wall strength)

본 연구에서는 벽면강도 값을 얻기 위하여 Schmidt hammer를 이용하였으며, Schmidt hammer를 통하여 얻어진 반발치(rebound value) r값을 Miller(1965)의 제안식 (2)에 적용하여 절리벽면의 압축강도(JCS)값을 산출하였다.

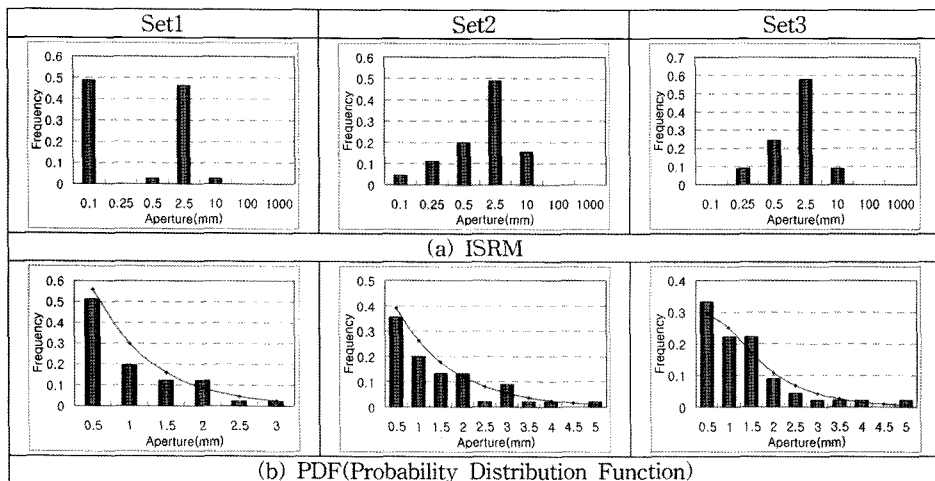


Fig. 6. Probability distribution function of aperture.

$$JCS = 10^{(0.0008 \times r \times \gamma + 1.01)} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

여기서, r = Schmidt hammer의 반발치

γ = 암석의 건조밀도 (KN/m^2)

이때, 암석의 건조밀도는 현장의 대표값으로 24.0KN/m^2 으로 하였다.

모든 set들에서 JCS의 값은 50-100MPa의 범위에서 가장 높은 빈도를 나타내며, ISRM 분류기준으로는 Strong에 해당한다(Fig. 7(a)). 확률분포함수로 표현하면, set1과 2는 정규분포를 따르고 set3은 대수정규분포를 따른다(Fig. 7(b)). 이들 결과의 요약은 Table 1에 나타내었다.

암질지수(Rock Quality Designation)

RQD는 암석 및 불연속면의 특성을 종합적으로 표현할 수 있는 비교적 간단하고 정량적인 방법으로서 대부분의 지반조사시에 측정된다. RQD는 다이아몬드 비트로 굴착하고 double core barrel을 사용하여 채취한 NX코어를 사용하는 것을 권장하며. 채취된 코어 중 10cm 이상 되는 부분의 합과 전체 코어길이의 비를 백분율로 표시한 값이다(Deere et al, 1967). 본 연구에서는 Palmstrom(1982)이 제안한 식(3)을 이용하여 간접적으로 RQD값을 구하였다.

$$RQD = 115 - 3.3Jv \quad (3)$$

여기서, Jv 는 체적절리지수이다. Jv 가 35이상일 때 RQD는 0이며, Jv 가 4.5미만일 때 RQD는 100이다. 그

리므로 Jv 의 범위는 $4.5 < Jv < 35$ 이다.

Jv 는 평균 간격(S_n)을 이용하여 구해지는 각 불연속면 세트의 단위길이 당 불연속면 개수(λ_n)의 총합으로 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$Jv = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \dots \lambda_n \quad (\lambda_n = 1/S_n, \text{ Mean}) \quad (4)$$

Deere(1968)는 RQD값과 암질(rock quality)에 대해서 5등급인 Very poor: 0-25; Poor: 25-50; Fair: 50-75; Good: 75-90; Excellent: 90-100로 구분하였다. Fig. 8(a)는 각 등급별 빈도수를 나타낸 것이며, Fair등급에서 가장 높은 빈도를 보인다. 확률분포함수는 Fig. 8(b)와 같이 정규분포를 따른다.

거칠기(Roughness)

불연속면의 거칠기는 전단강도에 있어 중요한 요소이며, 암반에서 파괴면의 거칠기에 따라 암반거동에 중요한 영향을 미칠 수 있다. ISRM 기준에 의하면 불연속면의 거칠기 구분은 큰 규모의 굴곡정도(waviness)인 계단상(steped), 파동상(undulating), 평탄상(planar)과 작은 규모의 절리면 요철(unevenness)인 거친 면(rough), 부드러운 면(smooth), 단층활면(slickensided) 등 9개의 등급으로 구분된다.

Fig. 9는 각 set별 거칠기의 발생빈도를 히스토그램으로 나타낸 것이다. Set1은 IV(undulating rough), V(undulating smooth)등급에서 동일한 빈도를 보이며, set2와 set3은 VII(planar rough)등급에서 가장 높은 빈

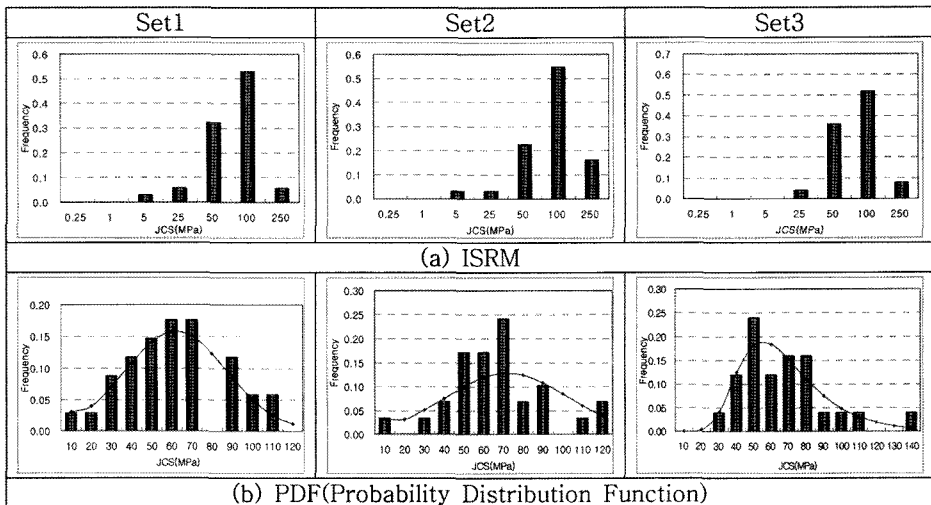


Fig. 7. Probability distribution function of JCS.

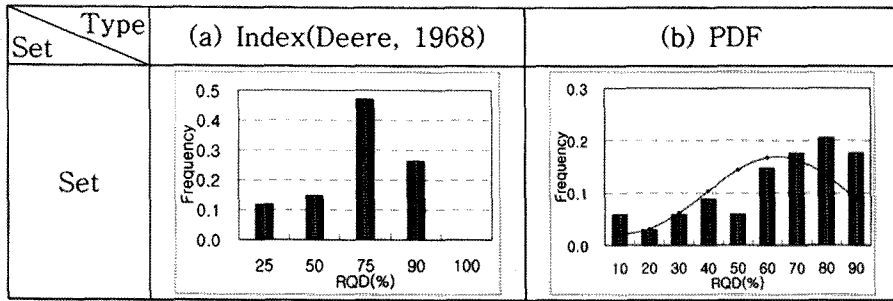


Fig. 8. Probability distribution function of RQD.

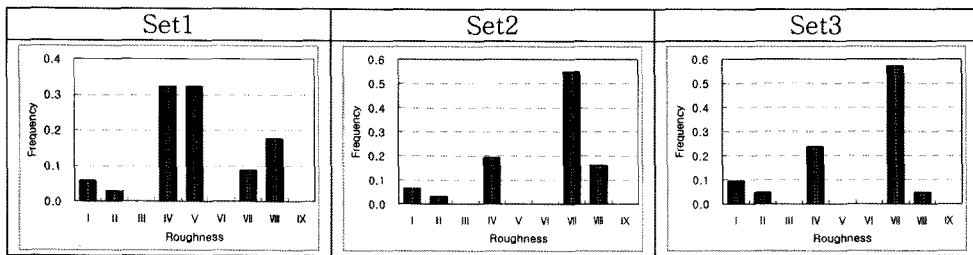


Fig. 9. Roughness properties of the study area.

도를 보이고 있다. 거칠기는 수치화할 수 없으므로 χ^2 검증을 시 통계적 분석에 적절한 확률분포함수로 나타낼 수 없었다.

화도도 거칠기와 마찬가지로 수치화 할 수 없으므로 χ^2 검증에 의한 통계적 분석에 적절한 확률분포특성으로 나타낼 수 없었다.

풍화도(Weathered)

암석은 우수, 바람, 빙하 등의 자연적인 요인으로 인해 오랜 기간에 걸쳐 제자리에서 부서지고 분해되는 풍화작용을 받는다. 기계적인 풍화작용은 암반 내 분리면의 상태를 악화시키며 암편의 크기를 작아지게 한다. 화학적 풍화는 절리망에 의해 유동하는 지하수의 영향에 따라 정도가 달라진다.

풍화도는 ISRM에서 제안한 6등급으로 분류하였으며 Fig. 10에 히스토그램으로 나타내었다. 분석결과, 모든 set들이 III등급인 Moderately weathered로 기재된다. 풍

누수(Seepage)

ISRM에서는 불연속면 누수를 크게 충전물이 없는 경우(unfilled)와 충전물이 있는 경우(filled)로 나누고, 이들을 다시 각각 6 등급으로 분류한다. Fig. 11은 각 분류별 발생빈도를 나타낸 것으로서, 본 역에서 빈도수가 가장 높은 등급은 충전물이 있는 경우 I등급으로 나타났으며 이는 충전물 과압밀 및 낮은 투수성으로 뚜렷한 유동이 없는 것을 의미한다. 충전물이 없는 경우 역시 I등급이 대부분을 차지하며, 밀착, 건조, 누수의 가능성이 없는 것을 의미한다.

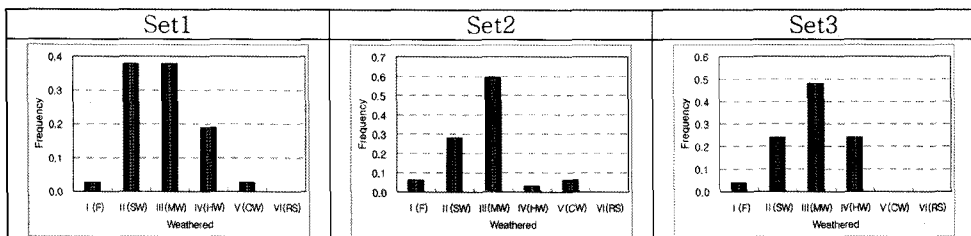


Fig. 10. Weathering properties of the study area.

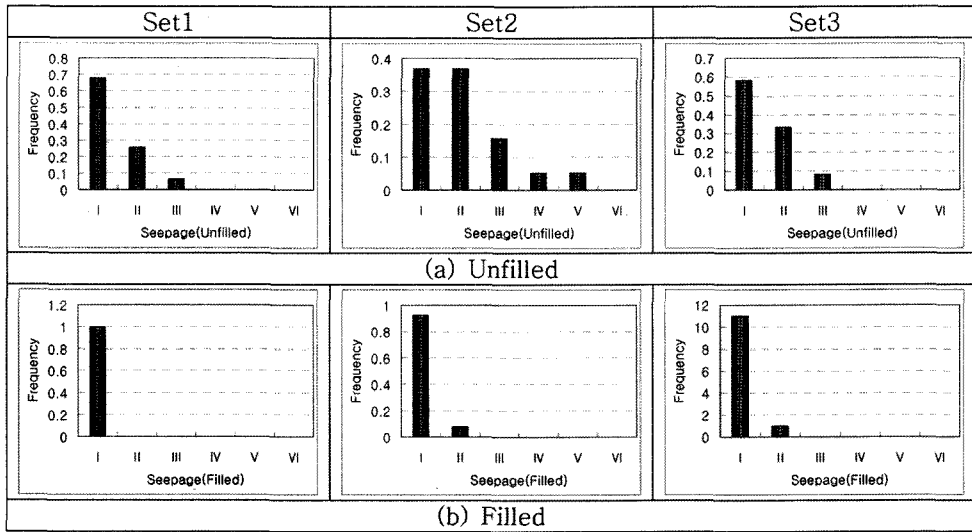


Fig. 11. Seepage properties of the study area.

Table 1. Characteristics of the discontinuities in the study area.

Set	Field index	Mean	Standard deviation	PDF	ISRM
Set1	Orientation	184/16	-	Fisher, $K = 49, \theta = 20$	-
	Spacing (cm)	23.6	19.1	Negative exponential ($\lambda = 0.042$)	Close
	Persistence (m)	17.0	11.4	Lognormal ($\mu = 2.59, \sigma = 0.75$)	Medium
	JCS (MPa)	57.06	25.0	Normal	Strong
	Aperture (mm)	0.8	0.77	Negative exponential ($\lambda = 1.25$)	Very tight
	RQD (%)	58.5	23.3	Normal	Fair
	Roughness	-	-	-	IV, V
	Seepage	-	-	-	I
Weathering	-	-	-	III	
Set2	Orientation	285/79	-	Fisher, $K = 37, \theta = 23$	-
	Spacing (cm)	23.4	14.9	Lognormal ($\mu = 2.96, \sigma = 0.64$)	Moderate
	Persistence (m)	2.41	1.84	Negative exponential ($\lambda = 0.414$)	Low
	JCS (MPa)	66.9	30.8	Normal	Strong
	Aperture (mm)	1.27	1.15	Negative exponential ($\lambda = 0.785$)	Open
	RQD (%)	58.5	23.3	Normal	Fair
	Roughness	-	-	-	V
	Seepage	-	-	-	I
Weathering	-	-	-	III	
Set3	Orientation	033/80	-	Fisher ($K = 24, \theta = 29$)	-
	Spacing (cm)	24.1	15.3	Lognormal ($\mu = 2.98, \sigma = 0.68$)	Moderate
	Persistence (m)	2.88	2.43	Negative exponential ($\lambda = 0.35$)	Medium
	JCS (MPa)	62.3	24.9	Lognormal ($\mu = 4.06, \sigma = 0.39$)	Strong
	Aperture (mm)	1.18	1.11	Gamma ($\alpha = 1.27, \beta = 0.93$)	Open
	RQD (%)	58.5	23.3	Normal	Fair
	Roughness	-	-	-	V
	Seepage	-	-	-	I
Weathering	-	-	-	III	

결 론

울산 일대의 33개의 퇴적암 사면을 선정하여 ISRM(1978)에서 제시한 불연속면의 조사항목을 바탕으로 불연속면의 특성 조사를 수행하였으며, 조사된 항목의 확률분포함수를 분석하여 울산지역 백악기 하양층군 퇴적암류의 지질공학적 특성을 파악하였다. 울산지역 퇴적암류 불연속면의 지질공학적 특성을 각 set별로 ISRM에서 제안된 등급과 확률분포특성으로 나누어 살펴보면 다음과 같다.

1) set1은 총리로서 주로 184/16의 방향성을 나타내고, Fisher함수분포를 따르며 K값은 49이다. 간격은 close에 해당되며, 음지수분포를 나타낸다. 연장성은 medium으로 기재되며 대수정규분포를 따른다. 절리벽면강도는 strong으로 기재되며 정규분포를 따른다. 간극은 very tight로 기재되며 음지수분포를 보인다. 암질지수는 fair로 기재되며 정규분포를 보인다. 거칠기, 누수, 풍화도는 수치화할 수 없어 확률분포를 나타낼 수 없으며, 각각은 IV~V, I, III등급으로 기재된다.

2) set2는 285/79의 방향성을 나타내고, Fisher함수분포를 따르며, K값은 37이다. 간격은 moderate로 기재되며, 대수정규분포를 따른다. 연장성은 low로 기재되며, 음지수분포 형태를 보인다. 절리벽면강도는 strong으로 기재되며 정규분포를 따른다. 간극은 open으로 기재되며 음지수분포를 보인다. 암질지수는 fair로 기재되며 정규분포를 보인다. 거칠기, 누수, 풍화도는 수치화할 수 없어 확률분포를 나타낼 수 없으며, 각각은 V, I, III등급으로 기재된다.

3) set3은 033/80의 방향성을 나타내고, Fisher함수분포를 따르며 K값은 24이다. 간격은 moderate로 기재되며 대수정규분포를 나타낸다. 연장성은 medium으로 기재되며 음지수분포를 나타낸다. 절리벽면강도는 strong으로 기재되며 대수정규분포를 따른다. 간극은 open으로 기재되며 감마분포를 보인다. 암질지수는 fair로 기재되며 정규분포를 보인다. 거칠기, 누수, 풍화도는 수치화할 수 없어 확률분포를 나타낼 수 없으며, 각각은 V, I, III등급으로 기재된다.

사 사

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 "IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시

공기기술개발(과제번호:C105A1020001-05A0502-00240)" 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

윤우현, 천병식, 2003, 불연속면의 비선형 전단강도를 이용한 암반사면의 쉐기파괴 확률해석, 한국지반공학회, 19(6), pp.151-160.

Attewell, P. B. and Farmer, I. W., 1976, Principles of Engineering Geology, Chapman & Hall, London.

Baecher, G. B., 1983, Statistical analysis of rock mass fracturing, Journal of Mathematical Geology, 15(2), pp.33-40.

Deere, D. U., 1968), Geological Consideration, Rock Mechanics in Engineering Practice, ed. R. G. Stagg and D. C. Zienkiewicz, Wiley, New York, pp.1-20.

Fisher, R. A., 1953, Dispersion on a sphere, Proceedings of the Royal Society of London, U.K. pp.145-155.

Fookes, P. G. and Dennes, B., 1969, Observation studies on fissure patterns in cretaceous sediments of south-east England, Geotechnique, 19, pp.453-477.

Goodman, R. E., 1976, Methods of geological engineering, West publishing, San Francisco.

Hudson, J. A. and Priest, S. D., 1979, Discontinuity spacings in the rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, pp.135-148.

ISRM, 1978, International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock Mech. & Min. Sch. And Geomecha. 15, pp.319-368.

Narr, W., and Suppe, J., 1991, Joint spacing in sedimentary rocks, Journal of Structure Geology, 13(9), pp.1037-1048.

Palmstorm, A., 1982, The volumetric joint count-a useful and simple measure of the degree of rock jointing, Proc. 4th Int. Ass. roc. Eng. Geol., Delhi, 5, pp.15-19.

Park, H. J., 2000, Probabilistic approach of stability analysis for rock wedge failure, Econ. Environ. Geol. 33(4), pp.295-307.

Piteau, D. R., 1970, Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock, In Discontinuity Analysis for Rock Engineering (ed. Priest, S. D.), Chapman & Hall, London.

Piteau, D. R., 1973, Characterizing and extrapolating rock joint properties in engineering practice. Rock Mechanics Supplement, 2, pp.5-31.

Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, 473p.

김광식

한국건설기술연구원 지하구조물연구소
411-712, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0775
Fax: 031-910-0211
E-mail: kwangks@kict.re.kr

김광엽

한국건설기술연구원 지하구조물연구소
411-712, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0225
Fax: 031-910-0211
E-mail: kimky@kict.re.kr

서용석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: ysseo@cub.ac.kr

김창용

한국건설기술연구원 지하구조물연구소
411-712, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0224
Fax: 031-910-0211
E-mail: cykim@kict.re.kr