

델파이방법을 이용한 암반분류법의 불연속면 거칠기 평가분류 정량화에 관한 연구

김병렬, 이승중, 최성웅*

A Study on the Quantification of Assessment Category of Roughness of Discontinuity of Rock Mass Classification Using Delphi method

Byung-Ryeol Kim, Seung-Joong Lee, Sung-Oong Choi*

Abstract This paper describes a new quantitative process for evaluating the roughness of discontinuity, which is suggested as a qualitative criteria in RMR or Q-system. For this purpose, the Delphi method which is one of the surveying methods was introduced. The selected panels were asked to evaluate the roughness of discontinuities on the Web which was hosted by authors in advance. A total of 3 surveys were performed using JRCs suggested by Barton and Choubey as well as A_i generated by the Monte Carlo simulations. After each survey, the results were provided to all panels for comparing their decisions to others. As surveys proceeded, better consensus and convergence were achieved. With a good agreement of panels on roughness classification, the quantitative criteria for roughness of discontinuity in RMR and Q-system was established in this study.

Key words Delphi method, Rock mass classification, RMR, Q-system, Roughness of discontinuity, Micro average i angle (A_i)

초 록 본 연구에서는 설문조사 기법인 델파이 방법을 이용하여 RMR 분류법과 Q 분류법에 정성적인 지표로 제시되어 있는 불연속면의 거칠기 평가분류를 정량화하였다. 패널을 선정하고 웹상에 설문조사 사이트를 개설하여 불연속면의 거칠기에 대한 설문조사를 실시하였다. 총 3회의 걸쳐 설문조사를 수행하였으며, 설문조사에는 표준 프로파일과 몬테카를로 시뮬레이션 기법이 적용되어 표준 프로파일과 동일한 미소 평균거칠각(A_i)을 갖는 프로파일을 이용하였다. 각 설문이 종료된 후에는 전체의 설문 결과를 배포하여 다음 설문 시에 전체의 의견과 자신의 의견을 비교하여 의사결정을 할 수 있도록 하였다. 설문 결과에 대하여 합의도와 수렴도를 나타내었으며, 설문조사가 회를 거듭할수록 합의도와 수렴도가 높아지는 경향을 보였다. 이에 3차 설문조사 결과를 일정한 합의의 수준에 도달하였다고 판단하고, 이를 이용하여 각 암반분류법의 거칠기 평가기준을 구분하고 분류의 범위를 정량화하였다.

핵심어 델파이 방법, 암반분류법, RMR, Q 분류법, 불연속면의 거칠기, 미소 평균거칠각

1. 서 론

국내외의 교통량과 물류수송량이 증가하면서, 기후의 영향 없이 빠르고 안정적으로 국내의 도서지역 및 인접 국 간을 연결할 수 있는 해저터널에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 해저터널은 고수압이 작용하는 해저 지반에 건설되기 때문에 해저지반의 공학적 특성을 정확하게 이해하는 것이 매우 중요하다(Park *et al.*, 2011). 그러나 육상지반과는 달리 대심도에 위치하는

Received: Mar. 31, 2015

Revised: Apr. 17, 2015

Accepted: Apr. 17, 2015

*Corresponding Author: Sung-Oong Choi

Tel) +82332506253, Fax) +82332556253

E-Mail) choiso@kangwon.ac.kr

Dept. of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 200-701, Korea

해저지반에 대한 조사는 접근성 등의 제약이 따르고, 수압에 의한 영향을 추가적으로 고려되어야 하므로, 많은 불확실성과 위험성을 가지고 있다.

이러한 해저지반에 작용하는 해수는 불연속면을 따라 유동하며, 암반에 분포하는 불연속면의 분포와 상태에 따라 해저터널이 통과하는 구간에 미치는 영향이 결정된다. 그러므로 해저지반에서는 육상지반에 비해 불연속면의 분포와 상태를 가능한 한 정확하게 파악하고 평가하는 것이 중요하다.

불연속면의 분포와 불연속면의 상태는 불연속면의 간격, 방향성, 거칠기, 풍화정도, 불연속면의 틈새 등의 인자들에 의해 평가된다. 이 중에 불연속면의 거칠기는 불연속면의 수리역학적 거동과 관련된 중요한 변수로서, 전단력 발생 시 변위 발생과 동시에 불연속면에 작용하는 최대전단강도, 터널 내의 유입량에 영향을 미치는 불연속면의 투수계수와 밀접한 관련이 있기 때문에, 불연속면의 거칠기를 신중하게 판단해야 한다(Myers, 1962, Barton and Choubey, 1977, Barton *et al.*, 1985, Lee *et al.*, 2011, Roozari *et al.*, 2011).

불연속면의 거칠기에 대한 평가는 Barton and Choubey (1977)가 제안한 표준프로파일에 의한 평가 방법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 하지만, JRC는 10개의 대표적인 단면곡선과 육안으로 관찰한 거칠기를 비교하는 정성적인 평가이기 때문에 측정 결과에 주관성이 개입된다는 문제점을 내포하고 있다(Hsiung *et al.*, 1993). 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위하여 미소 평균거칠각(Ai), 1차 미분의 RMS(Z₂), 거칠기단면지수(Rp) 등 재래의 통계적 파라미터와 분할자법(Divider Method), 칸토어법(Cantor Method) 등의 프랙탈 차원을 이용한 정량화 기법에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다(Park and Kwon, 2000).

암반의 상태를 평가하기 위하여 일반적으로 널리 사용하고 있는 RMR 분류법과 Q 분류법에는 이러한 불연속면의 상태를 평가하는 기준들이 세부적으로 분류되어 정량적으로 제시되고 있으나, 예외적으로 불연속

면의 거칠기와 불연속면의 풍화에 대한 평가요소는 정성적인 지표로 제시되고 있다.

본 연구에서는 설문조사 기법인 델파이 방법을 이용하여 RMR 분류법과 Q 분류법의 불연속면의 상태를 평가하는 요소 중 정성적으로 제시되어 있는 불연속면의 거칠기를 평가하는 기준을 구분하고 그 분류의 범위를 정량화된 통계적 파라미터를 이용하여 제시하였다.

2. 암반분류법의 불연속면의 거칠기 평가분류

국내의 현장에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 RMR 분류법과 Q 분류법을 이용하였으며, 두 암반분류법에 정성적으로 제시되어 있는 불연속면의 거칠기의 평가를 정량화하고자 분류기준을 검토하였다.

RMR 분류법은 터널과 광산에서 암반을 평가하기 위하여 Bieniawski(1973)에 의해 제안된 방법이며, Lauffer (1958)의 분류법이나 Wickham *et al.*(1972)의 RSR 분류법을 기초로 개발되었다. 암석의 일축압축강도, RQD, 불연속면의 간격, 불연속면의 상태, 지하수 상태의 5개의 평가요소와 구조물의 방향성과 불연속면의 방향성에 대한 보정요소로 구성된다(Sunwoo *et al.*, 2011). 본 연구에서 검토하고자 하는 불연속면의 거칠기를 평가하는 분류와 각 분류에 해당되는 RMR 분류법의 평점은 Table 1과 같으며, 총 5개의 분류(①매우 거칠, ②거칠, ③약간 거칠, ④부드러움, ⑤슬리켄사이드)로 평가되고 있다.

Q 분류법은 Barton *et al.*(1974)에 의해 개발되었으며, 스칸디나비아의 212개 터널 사례연구를 근거로 제안된 정량적인 분류법으로, 총 6개의 RQD, 절리군의 수(J_n), 불연속면의 거칠기 계수(J_r), 불연속면의 풍화 및 변질 계수(J_a), 지하수에 의한 저감 계수(J_w), 응력 저감 계수(SRF)를 사용하여 암반을 정량적으로 평가한다. Q 분류법의 평가분류 중 불연속면의 거칠기를 평가하는 분류는 Table 2와 같으며, 일반적인 상태의 불연속면에 대하여 총 7개의 분류(①불연속적인 절리, ②거

Table 1. Roughness parameter of discontinuity of RMR rock mass classification (Bieniawski, 1989)

Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	6	5	3	1	0

Table 2. Roughness parameter of discontinuity of Q-system classification (Barton *et al.*, 1974)

Roughness	Discontinuous joint	Rough and irregular, undulating	Smooth, undulating	Slickensided, undulating	Rough or irregular, planar	Smooth, planar	Slickensided, planar
Rating	4.0	3.0	2.0	1.5	1.5	1.0	0.5

칠거나 불규칙함, 기복이 있음, ③매끄럽고, 기복이 있음, ④평활면, 기복이 있음, ⑤거칠고, 불규칙한 판상, ⑥부드럽고, 판상, ⑦평활면, 판상)로 구분하고 있다.

RMR 분류법의 불연속면의 거칠기 평가분류에 비해 Q 분류법의 불연속면의 거칠기 평가분류는 평가하는 기준이 많고, 불연속면의 거칠기에 대한 표현이 다양하여 의미상의 구분이 쉽지 않다. 그러므로 본 연구에서는 불연속면의 거칠기의 구성요소인 만곡과 요철을 이용하여 Q 분류법의 불연속면의 거칠기를 표현하고자 하였으며, 의미상 중복되는 평가요소를 통합하였다. 중복되는 평가요소는 만곡과 요철을 명확하게 구분하여 표현하고 있는 평가요소의 기준을 이용하였으며, Table 3 과 같이 총 4가지 분류의 평가요소로 다시 구분하였다. 예를 들면, 가장 평점이 높은 “불연속적인 절리”는 만곡과 요철의 표현이 불분명하나, “거칠거나 불규칙함, 기복이 있음”의 평가기준은 “거칠거나 불규칙함”이라는 요철에 대한 표현과 “기복이 있음”이라는 만곡의 표현이 명확하게 나타나 있기 때문에, “거칠거나 불규칙함, 기복이 있음”의 기준을 이용하였다.

이러한 RMR 분류법과 Q 분류법의 불연속면의 거칠기를 평가하는 분류는 정성적인 기준에 의해 각 분류들을 구분하고 있기 때문에, 평가자의 주관적인 판단에서 발생할 수 있는 오류, 평가자들 개개인이 각기 다른 정성적인 기준을 갖고 있기 때문에 평가된 거칠기가 일반화되지 못하는 한계 그리고 이론적인 연구, 수치해석 및 상관성 연구에 직접적으로 적용되지 못하는 등의 문

제점들을 갖고 있다.

이와 같은 정성적인 기준으로부터 발생하는 문제점들을 보완하기 위하여 불연속면의 거칠기를 평가하는 분류를 정량화하고 구분하는 기준을 명확히 하는 것이 필요하다 판단되며, 본 연구에서는 Barton and Choubey (1977)이 제시한 표준 프로파일과 델파이 방법을 이용하여 불연속면의 거칠기를 정량화하고 평가하는 분류 기준을 구분하고자 하였다.

3. 델파이 방법에 의한 불연속면의 거칠기 평가분류 정량화

3.1 델파이 방법

델파이 방법(Delphi method)은 1950년대 초 미국의 랜드연구소(Rand Corporation)에서 대면토의에서 나타나는 제한점을 제거하고 긴급한 국방문제에 관하여 집단을 수집하는 방법으로 개발되었다. 이 방법은 예측하려는 문제에 관하여 전문가들의 견해를 유도하고 종합하여 집단적 판단으로 정리하는 일련의 절차라고 정의된다(Dalkey and Helmer, 1963).

델파이의 과정과 효과는 Fig. 1과 같으며, 초기에 한 문제에 대해 전문가들에게 설문조사를 요청하여 전문가들의 의견을 독자적인 형태로 취합한다. 취합된 의견을 모든 전문가들의 의견을 대표할 수 있는 형태로 정리하고, 설문조사에 참여한 전문가들에게 배부하여 의견을 수렴한다. 이러한 방법으로 답을 얻고자 하는 문

Table 3. Revised Roughness parameter of discontinuity of Q-system classification

Roughness	Rough and irregular, undulating	Smooth, undulating	Rough or irregular, planar	Smooth, planar
Rating	3.0 - 4.0	1.5 - 2.0	1.5	0.5 - 1.5

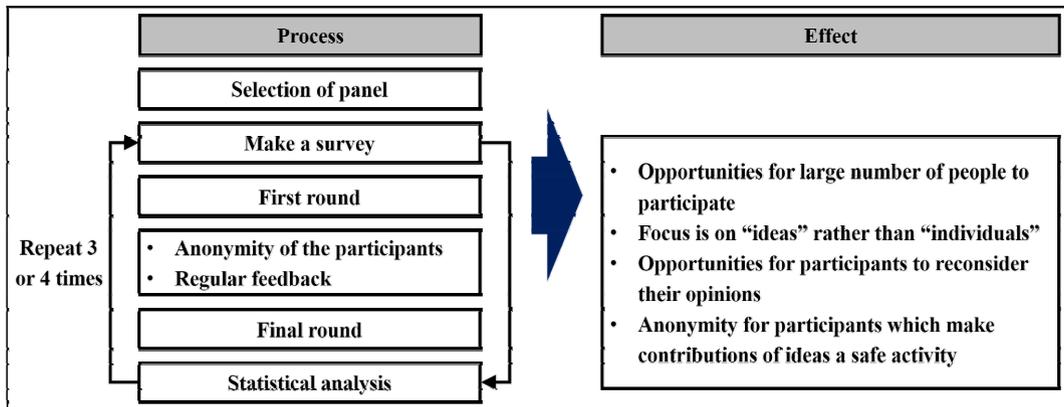


Fig. 1. Processes and effects of delphi method

1. 아래 불연속면 프로파일(Profile)을 참고하여 아래 항목에 답변해주세요. 제한시간은 2분입니다.



1) 불연속면 프로파일의 거칠기(roughness)를 평가해주세요.

매우거칠다 거칠다 조금 거칠다 부드럽다. 슬리켄사이드

2) 불연속면 프로파일의 만곡(waviness)을 평가해주세요.

만곡이 있다. 만곡이 없다.

3) 불연속면 프로파일의 요철(unevenness)을 평가해주세요.

요철이 있다. 요철이 없다.

제한시간 : 2 분

Fig. 2. Example survey

제에 대하여 일반적인 합의가 이루어질 때까지 서로의 의견에 대하여 논평하고, 자신의 의견과 비교해 보면서 특정한 요소나, 자신만의 가치관에 의해 왜곡되지 않았는지 생각하게 됨으로써 합리적인 결과를 얻는 방법이다(Lee, 2001).

3.2 패널의 선정 및 설문조사지 작성

본 연구에서는 암반공학 분야에 높은 지식과 권위를 겸비한 분들, 다년간 시공현장에서 불연속면의 거칠기에 대한 평가 경험이 풍부한 분들, 불연속면의 거칠기에 대한 연구를 수행하였거나 진행 중인 분들을 패널로 선정하였으며, 총 38분을 대상으로 설문조사를 수행하

였다.

설문조사에 대한 접근성과 참여율을 높이기 위하여, 웹상에 설문조사 사이트(site)를 개설하였고 전자 우편(e-mail)을 이용하여 사이트 URL과 응답한 설문조사의 결과를 배포하였다. 또한 설문조사 페이지별로 2분의 제한시간을 부여하여, 불연속면의 프로파일에 대한 패널의 직관적인 판단이 반영되도록 하였다.

설문조사는 Fig. 2와 같이, 1개의 불연속면 프로파일과 이의 거칠기, 만곡, 요철에 대한 세 가지 질문으로 구성되어 있으며, 각 설문조사에서는 총 10개의 불연속면 프로파일을 평가하도록 하였다.

1차 설문조사에 사용된 불연속면의 프로파일은 Barton and Choubey(1977)가 제시한 표준 프로파일을 사용하였으며, 각 프로파일에 해당하는 정량화된 지표를 제시하기 위하여 표준 프로파일을 1 mm 간격으로 스캐닝(scanning)하고 재래의 통계적 파라미터로 표현하였다(Table 4). 본 연구에서는 일반적으로 JRC와 높은 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있는 기울기를 이용한 정량화 방법인 미소 평균거칠각(Ai) 방법을 이용하였으며, Ai는 식 (1)에서와 같이 측정간격이 일정할 때 각 측정 간의 높이차에 의한 미소 기울기를 평균한 것이다(Chun and Kim, 2001).

$$A_i = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} \tan^{-1} \left(\frac{y_{t+1} - y_t}{\Delta x} \right) \tag{1}$$

식 (1)에서 Ai는 미소 평균거칠각, N은 측정갯수, y는 높이좌표, Δx는 측정간격을 나타낸다.

이후의 설문조사에서는 1차 설문조사의 표준프로파일과 동일한 Ai 값을 갖는 인공의 프로파일을 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용하여 생성하고, 이를 이후의 설문조사에서 이용하였다(Fig. 3).

Table 4. Measured roughness parameters from standard profile (Lee et al., 2011)

JRC	Range	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Ai	Value	3.43	4.48	5.97	6.88	8.68	8.99	11.34	12.50	13.77	15.77

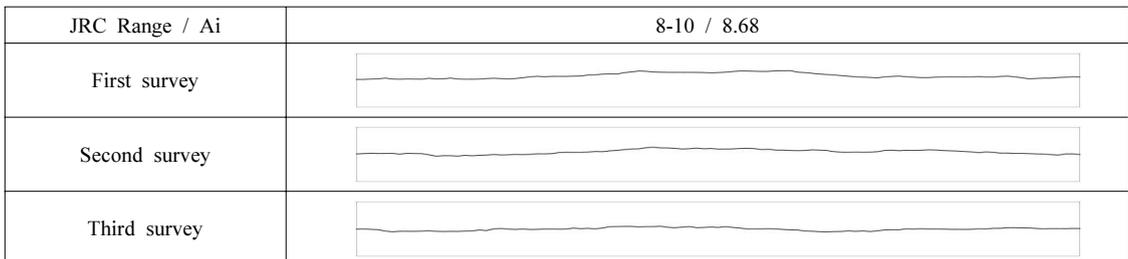


Fig. 3. Roughness profiles used for survey

3.3 설문조사 및 결과분석

설문조사는 총 3회에 걸쳐서 수행되었으며, 이전의 설문조사에 응답한 패널만을 대상으로 다음 설문조사를 진행하였다. 다음의 설문조사를 진행하기 전에 Fig. 4와 같이, 사분위점과 중위수(median)가 표시된 이전의 전체 설문결과를 패널들에게 배포하고, 전문가 본인이 평가한 결과와 다수의 의견을 비교하고 본인의 의견을 다음의 설문조사에 반영할 수 있도록 하였다.

전체 설문조사에 대한 패널의 응답현황은 Table 5와 같으며, 응답결과에 대한 응답률을 백분율(%)로 표현하였다. 설문조사에 응답하는 인원은 이전의 설문조사에 비해 약 35 %씩 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 해당 차수의 설문조사에 참여한 인원들의 응답률은 이전

차수의 응답률에 비해 1.05 배 이상의 증가폭을 갖는 것으로 분석되었다. 이는 이전의 설문조사에 응답한 패널만을 대상으로 다음의 설문조사를 진행하였고, 인터넷이 가능하다면 언제 어디서나 단시간에 설문조사가 가능하도록 환경을 구축하여 설문조사에 대한 부담을 줄였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 설문조사의 차수를 거듭할수록 설문조사의 결과에 텔파이 방법에 의한 영향이 누적되는 것을 의미하며, 설문조사의 신뢰도가 높아지고 있는 것으로 판단할 수 있다.

전체 설문조사 결과에 대하여 합의도(consensus)와 수렴도(convergence)를 분석하였다. 여기서 합의도는 식 (2)와 같이 전체의 결과에서 사분위점 간의 범위를 중위수로 나눈 값을 감해준 것이며, 수렴도는 식 (3)과

암반분류법의 불연속면 거칠기 평가분류 정량화를 위한 연구

- 1차 설문조사 결과 -

1차 설문조사에 참여해주셔서 감사합니다. 총 24분의 전문가 분들께서 설문에 참여해 주셨으며, 1차 설문조사에 대한 결과는 다음과 같습니다. 설문조사 결과는 평가해주신 각 프로파일과 이를 대상으로 평가한 종합결과 차트 그리고 종합결과 표로 구성되어 있습니다. 종합결과 차트상에는 1차 설문에 대한 전문가들의 응답결과를 요약하여 중앙치는 M_d 로, 사분점간 범위는 ()로 표기하였으며, 평가해주신 결과와 분석된 결과를 비교하여 참고해주면 감사하겠습니다.

*** 설문조사 항목**

1) 불연속면 프로파일의 거칠기(roughness)를 평가해주세요.
 ① 매우 거칠다. ② 거칠다. ③ 조금 거칠다. ④ 부드럽다. ⑤ 슬러캔사이드

2) 불연속면 프로파일의 만곡(waviness)을 평가해주세요.
 ① 만곡이 있다. ② 만곡이 없다.

3) 불연속면 프로파일의 요철(unevenness)을 평가해주세요.
 ① 요철이 있다. ② 요철이 없다.

(a) Result report of first survey

1) 1번 불연속면 프로파일 설문조사 결과

2) 2번 불연속면 프로파일 설문조사 결과

그림 1. 1번 불연속면 프로파일

그림 3. 2번 불연속면 프로파일

그림 2. 1번 불연속면 프로파일 1) 항목 평가결과 종합

그림 4. 2번 불연속면 프로파일 1) 항목 평가결과 종합

표 1. 1번 불연속면 프로파일 2), 3) 항목 평가결과 종합

	만곡	요철
있다	0	0
없다	24	24

표 2. 2번 불연속면 프로파일 2), 3) 항목 평가결과 종합

	만곡	요철
있다	1	1
없다	23	23

(b) Result of survey of each profile

Fig. 4. Example of result report of survey

Table 5. Participation status of survey

	First survey			Second survey			Third survey		
	Responses	Total	Response rate (%)	Responses	Total	Response rate (%)	Responses	Total	Response rate (%)
Ph.D	12	26	46.15	9	12	75.00	6	9	66.67
Doctor's course	10	10	100.00	8	10	80.00	8	8	100.00
Master's course	2	2	100.00	2	2	100.00	2	2	100.00
Total	24	38	63.16	19	24	79.17	16	19	84.21

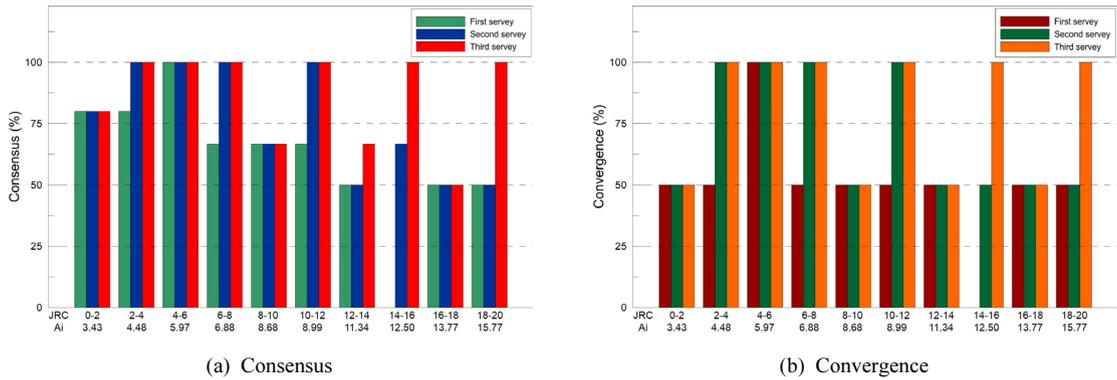


Fig. 5. Consensus and convergence of survey of RMR rock mass classification

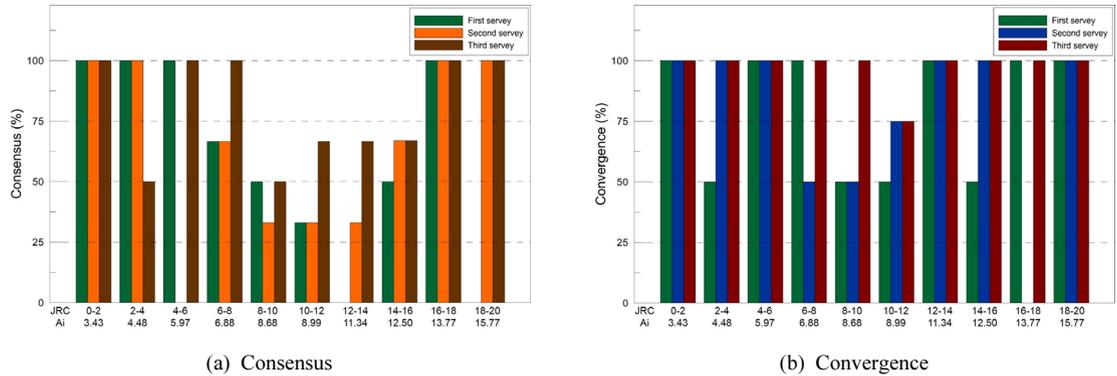


Fig. 6. Consensus and convergence of survey of Q-system classification

같이 사분위수의 편차로 정의된다. 본 연구에서는 설문 조사의 차수가 거듭됨에 따른 값의 변화 추이를 파악하기 위하여 %의 단위로 합의도와 수렴도를 표현하였다.

$$Consensus(\%) = (1 - \frac{Q_3 - Q_1}{Md}) \times 100 \quad (2)$$

$$Convergence(\%) = (\frac{Q_3 - Q_1}{2}) \times 100 \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 Q₃-Q₁은 사분점 간의 범위, Md는 중위수를 나타낸다.

RMR 분류법에 대한 각 설문조사의 합의도와 수렴도를 분석한 결과는 Fig. 5(a) 그리고 Fig. 5(b)와 같으며, 설문조사의 횟수를 거듭할수록 합의도와 수렴도가 높아지는 경향을 나타내고 있다. 특히 합의도에서 1차, 2차 설문조사에 비해 3차 설문조사 결과에서 상대적으로 높은 값을 갖는 것으로 분석되고 있다.

Q 분류법의 합의도와 수렴도는 Fig. 6과 같이 분석되

었다. 합의도를 나타내는 Fig. 6(a)에서는 JRC 값이 8 - 12인 범위에서 설문조사의 합의도가 다른 범위의 JRC 값에 비해 비교적 낮은 수준을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 Q 분류법의 경우 만곡과 요철의 유무와 그 조합들에 의해 불연속면의 거칠기를 평가하고 있기 때문에, 만곡과 요철의 조합이 복잡하고 모호한 경우에는 패널의 의견이 상대적으로 낮은 합의의 수준을 나타내는 것으로 판단된다.

그러나 Fig. 6(b)의 수렴도의 분석결과에서 설문조사가 진행될수록 수렴도가 높아지는 경향을 보이고 있으며, 전반적으로 수렴도가 100%에 근사한 값을 나타내고 있다. 이는 패널들의 의견이 하나의 기준으로 수렴하고 있다는 것으로 분석되며, 3차의 설문조사 결과에 패널들의 취합된 의견이 반영되었다는 것을 의미한다.

RMR 분류법과 Q 분류법의 합의도와 수렴도의 분석 결과로부터, 본 연구에서 도출하고자 하는 불연속면의 거칠기를 평가하는 분류의 기준이 설문조사의 회를 거듭할수록 일반적인 합의의 범위와 수렴의 기준에 도달

하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

4. 불연속면의 거칠기 평가분류 정량화

총 3회의 설문조사에서 일반적인 합의의 범위에 도달한 것으로 판단되는 3차의 설문조사 결과를 바탕으로 불연속면의 거칠기를 평가하는 기준을 분류하였다. 설문조사 결과상의 중위수와 사분위수가 중첩되는 비율을 고려하여 평가하는 기준을 분류하였으며, 측정된 표준 프로파일의 A_i 값을 이용하여 각 분류별로 정량화된 지표를 제시하였다. 또한 정량화된 평가분류가 2개 이상의 범위에 분포하는 경우, 해당하는 분류들의 A_i 값을 범위로 나타내었다(Table 6).

RMR 분류법의 불연속면의 거칠기에 대한 평가분류를 정량화한 결과, 매우 거칠, 부드러움, 슬리켄사이드의 분류에서 명확하게 각각의 JRC 범위와 A_i 값으로 구분되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 거침과 조금 거침의 분류에서는 JRC의 범위가 10 - 12이고, A_i 값이 8.99인 영역이 중복되어 나타나고 있으며, 이는 ‘조금’이라는 모호한 표현에 의해 거칠기가 과대평가된 것으로 생각된다.

Q 분류법의 불연속면의 거칠기에 대한 평가분류를 정량화한 결과에서, 거칠기가 가장 큰 “거칠거나 불규칙함, 기복이 있음”의 평가분류와 가장 작은 “부드럽고, 판상”의 평가분류는 중복 없이 A_i 값의 범위를 제시하고 있으며, 이는 설문조사로부터 분석된 합의도와 수렴도의 결과와도 잘 일치한다. 그러나 이외의 “매끄럽고, 기복이 있음”과 “거칠고, 불규칙한 판상”의 분류에서는 비교적 더 큰 거칠기를 나타내는 “매끄럽고, 기복이 있음”의 평가분류가 “거칠고, 불규칙한 판상”의 평가분류

에 포함되는 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과는 앞서 언급하였듯이, 설문조사에서 만족과 요철의 유무만을 조사하고 이를 조합하여 설문 결과로 이용하였기 때문에 복잡한 평가기준을 나타내는 이 두 분류에서 값이 중복되어 나타나는 것으로 사료된다.

5. 고찰 및 토의

RMR 분류법과 Q 분류법상에서의 불연속면의 거칠기에 대한 평점은 6점, 4점으로 일축압축강도나 RQD의 평가요소에 비해 매우 작은 부분을 나타내고 있다.

그러나 앞서 언급하였듯이, 암반분류법이 적용되는 환경이 일반적인 육상지반이 아닌 수리적 특성에 큰 영향을 받는 하/해저지반일 경우에는 역학적 취약대로 작용하고 있던 불연속면이 물이 유동하는 채널의 역할을 하게 되기 때문에, 암반의 수리적인 특성에 큰 영향을 미치게 된다.

그러므로 불연속면의 기하학적 형상이나 상태를 정확하게 판단하고, 이를 설계에 직접적으로 반영하여 정밀하게 불연속면을 고려하여야 한다. 이에 본 연구에서는 불연속면의 상태에 해당하는 평가요소들 중에 불연속면의 거칠기에 대한 연구를 수행하였으며, 불연속면의 거칠기에 대한 평가분류와 그 값을 범위로 정량화하였다.

본 연구의 정량화된 RMR 분류법과 Q 분류법의 불연속면의 거칠기 평가분류는 중복되거나 포함되는 영역이 존재하기 때문에, 이러한 영역에 대한 표현을 구체화하고 평가요소를 단순화시키는 것이 필요하다고 판단하였다.

RMR 분류법의 불연속면의 거칠기에 대한 평가요소에서는 모호한 표현들 때문에 정량화 과정에서 중복되

Table 6. Result of quantification of roughness of RMR and Q-system rock mass classification by delphi method

Separation		Ai value		JRC Range	Overlap range (Ai value)
		Minimum	Maximum		
RMR parameter	Very rough	15.77	-	18 - 20	
	Rough	12.50	13.77	14 - 18	
	Slightly rough	6.88	11.34	6 - 14 (10 - 12)	Rough (8.99)
	Smooth	4.48	5.97	2 - 6	
	Slickensided	-	3.43	0 - 2	
Q-system parameter	Rough and irregular, undulating	12.50	-	14 - 20	
	Smooth, undulating	8.68	8.99	8 - 12	
	Rough or irregular, planar	6.88	11.34	6 - 14 (8 - 12)	Smooth, undulating (8.68 - 8.99)
	Smooth, planar	-	5.97	0 - 6	

Table 7. Roughness ratings of discontinuities of RMR rock mass classification

Roughness	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	5- 6	3	1	0
JRC range	14 - 20	6 - 14	2 - 6	0 - 2
Ai value	> 12.50	6.88 - 11.34	4.48 - 5.97	3.43 >

Table 8. Revised Roughness ratings of discontinuities of Q-system rock mass classification

Roughness	Rough and irregular, undulating	Smooth, undulating	Rough or irregular, planar	Smooth, planar
Rating	3.0 - 4.0	1.5 - 2.0		0.5 - 1.0
JRC range	14 - 20	6 - 14		0 - 6
Ai value	> 12.50	6.88 - 11.34		5.97 >

는 영역이 나타난 것으로 분석하였다. 이에 본 연구에서는 의미상 불분명한 ‘조금’이라는 모호한 표현과 ‘매우’라는 극단적인 표현을 단순화하여 분류기준을 제시하는 것을 고려해 보았으며, 이를 Table 7과 같은 형태로 나타내었다.

거칠기 평가요소의 ‘매우’라는 표현은 ‘가장’, ‘아주’ 등의 표현과 비슷한 의미를 가지며, 이러한 표현들은 일정한 범위를 나타내기보다는 최고 또는 최저의 특정한 값을 나타내게 된다. 이는 본 연구의 ‘매우 거침’의 분류에서 Ai 값이 15.77의 단독 영역을 나타내는 결과에서도 확인할 수 있다. 그러므로 극단적인 표현에 의한 영향을 줄이고자, ‘매우’라는 분류기준을 ‘거침’의 분류기준에 통합시켜 표현을 단순화하였으며, 평가자가 ‘거침’에 정도에 따른 유연한 평가를 할 수 있도록 해당하는 평점과 Ai 값을 범위로 제시하였다. 또한 ‘조금’이라는 모호한 단어에 의해 과대평가된 것으로 사료되는 Ai 값이 8.99인 범위를 “조금 거침”의 범위에 포함시켜 분류하고, 거칠기에 대한 표현을 “거침”, “조금 거침”, “부드러움”, “슬리켄사이드”의 분류로 평가기준을 단순화하였다.

“매끄럽고, 기복이 있음”의 범위가 “거칠고, 불규칙한 판상”의 범위에 포함이 되는 것으로 나타나는 Q 분류법의 불연속면의 거칠기 평가요소는 두 분류를 하나의 범위로 통합하여 제시하였다. 또한 거칠기를 하나의 정확한 값으로 표현한다는 것은 큰 오류를 범할 수 있기 때문에 각 평가분류에 해당하는 평점과 Ai 값을 범위로 제시하였다(Table 8).

6. 결론

본 연구에서는 설문조사 기법인 델파이방법을 이용하

여 정성적으로 제시되어 있는 RMR 분류법과 Q 분류법의 불연속면의 거칠기 평가분류 정량화하였다. 불연속면에 대한 높은 수준의 지식을 갖춘 패널을 선정하고 웹상에 설문조사 사이트를 개설하여 델파이 방법의 설문조사를 수행하였다. 총 3회의 걸쳐 설문조사를 수행하였으며, 설문조사에는 Barton and Choubey의 표준 프로파일과 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 적용한 동일한 Ai 값의 프로파일을 이용하였다.

각각의 설문조사의 결과에 대하여 합의도와 수렴도를 분석하였으며, 설문조사의 횟수를 거듭할수록 합의도와 수렴도가 높아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 불연속면의 거칠기를 평가하는 분류의 기준이 일반적인 합의의 범위와 수렴의 기준에 도달하고 있는 것으로 판단되며, 일정한 합의의 수준과 취합된 의견이 반영된 3차 설문조사의 결과를 이용하여 불연속면의 거칠기 평가분류를 정량화하고, 각 평가분류에 해당하는 Ai 값의 범위를 제시하였다.

RMR 분류법과 Q 분류법의 불연속면의 거칠기에 대한 평가분류를 정량화한 결과, 일부 범위에서 ‘조금’과 같은 모호한 표현과 ‘만곡’과 ‘요철’의 조합에 의한 불연속면의 거칠기에 대한 표현으로 인해 범위가 중복되거나 포함되어 나타났다. 이에 평가요소의 표현을 구체화하고 그 분류기준을 단순화하여, 정량화된 불연속면의 거칠기의 분류에 대한 범위를 제시하였다.

본 연구에서 제안된 불연속면의 거칠기에 대한 정량화된 평가분류는 표준 프로파일을 기준이 되는 프로파일로 설정하여, 정성적으로 평가되어 사용되고 있는 평가분류를 정량화하고자 하였다. 이는 각 표준 프로파일에 해당하는 Ai 값을 이용하였기 때문에, 정량화되어 제시되는 형태가 단일의 Ai 값이나 두 개 이상의 프로파일 간의 Ai 범위로 제한되게 되고, 이로 인해 평가분

류들 사이에 값이 단절되는 구간들이 나타나게 된다. 이는 앞서 언급되었듯이, 표준 프로파일의 A_i 값을 이용하여 정량화된 값의 범위를 제안하였기 때문이며, 선행된 본 연구에서 단절되는 구간들에 대하여 정의하는 것은 공학적인 오류를 포함할 수 있다고 판단하여 불연속성을 갖는 범위로 제시하였다. 향후 다양한 거칠기를 갖는 시료들에 대하여 불연속면의 전단특성과 관련된 연구를 추가적으로 수행하고, 이를 본 연구에서 정량적으로 제시하고 있는 불연속면의 평가분류와 연관시켜 분석한다면, 본 연구에서 분석하지 못한 영역을 보완하여 평가분류의 전 구간에 대한 정량화된 지표 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 불연속면의 상태에 관련된 평가요소들 간의 상관성을 분석할 때 기초자료로 활용할 수 있으며, 나아가 정량적인 불연속면의 상태를 제시하는 지표의 일부분으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소기술 개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사드립니다. 아울러 설문조사에 응해주신 전문가님들께 깊이 감사드립니다.

References

- Barton, N.R., Lien, R., and Lunde, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mech.*, Vol. 6, No. 4, 189-239.
- Barton, N.R. and Choubey, V., 1977, Shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech. and Rock Engng.*, Vol. 10, 1-54.
- Biniawski, Z.T., 1973, Engineering classification of rock masses, *Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, Vol. 15, No. 12, 335-344.
- Biniawski, Z.T., 1989, *Engineering rock mass classifications*, Wiley, NewYork.
- Chun, B.S. and Kim, D.Y., 2001, A numerical study on the quantification of rock joint roughness, *Journal of Korean geotechnical society*, Vol. 17, No. 1, 85-97.
- Dalkey, N.C. and Helmer, O., 1963, An experimental application of the Delphi method to the use of experts, *Management science*, Vol. 9, No. 3, 458-467.
- Hsiung, S.M., Ghosh, A., Ahola, M.P. and Chowdhury, A.H., 1993, Assessment of conventional methodologies for joint roughness coefficient determination, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 30, 825-829.
- Lauffer, H., 1958, *Gebirgsklassifizierung für den stollenbau*, *Geologi und bauwesen*, Vol. 24, No. 1, 46-51.
- Lee, D.H., Lee, S.J. and Choi, S.O., 2011, A study on 3D roughness analysis of rock joints based on surface angularity, *Tunnel and underground space*, Vol. 21, No. 6, 494-507.
- Lee, J.S., 2001, *Delphi method*, Kyoyookbook.
- Park, E.S., Shin, H.S. and Kim, H.M., 2011, Site investigation for the design of a subsea tunnel, *Journal of Korean tunnelling association*, Vol. 13, No. 6, 68-80.
- Roozali, M.A., Hossaini, M.F., Moosavi, M. and Beiki, M., 2011, A laboratory study on stress dependency of joint transmissivity and its modeling with neural networks, fuzzy method and regression analysis, *I.J.M.G.E*, University of Tehran, Vol. 45, No. 1, 57-66.
- Sunwoo, C., Ryu, D.W., Kim, H.M. and Kim, K.S., 2011, Study on the Geotechnical characteristics of granite in korea and their correlation with rock classification method, *Tunnel and underground space*, Vol. 21, No. 3, 205-215.
- Wickham, G.E, Tiedemann, H.R. and Skinner, E.H., Support determination based on geologic prediction, *Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf.*, AIME, NewYork, 312-320.

김 병 렬



2012년 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학사
2014년 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253
E-mail: shingcore@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 자원공학과 박사과정

이 승 중



2007년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2009년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253
E-mail: lhj3601@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 자원공학과 박사과정

최 성 응



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-255-6253
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 자원공학과 교수