

# 절리 암반터널 내 그라우팅 전·후의 암반 투수계수 및 그라우팅 주입량과 Q 시스템 항목들과의 상관관계 연구

유광호<sup>1\*</sup>, 지흥근<sup>2</sup>, 서경원<sup>3</sup>, 김수정<sup>4</sup>, 유동우<sup>5</sup>

## A study on the correlation between the rock mass permeability before and after grouting & injection volume and the parameters of Q system in a jointed rock mass tunnel

Kwang-Ho You, Hong-Keun Jie, Kyoung-Won Seo, Su-Jeong Kim, Dong-Woo You

**ABSTRACT** In this study, correlations between the rock mass permeability before and after grouting & injection volume and the parameters of Q system were investigated on a grouted rock mass tunnel corresponding to rock class 4 and 5 in terms of Q classification system. As a result, it appears that the lower the Q value is, the higher the before-grouting permeability becomes and the smaller the injection volume of grouting becomes. Also RQD and Jn are the most influencing factors to the permeability of rock mass and the injection volume of grouting. In addition, it turned out that it was very difficult to lower the permeability of rock mass smaller than  $1.0 \times 10^{-8}$  m/sec with the ordinary portland cement grout.

**Keywords:** Tunnel grouting, coefficient of permeability, injection volume, Q system

**요약** 본 연구에서는 그라우팅이 실시된 4~5 등급(Q 분류의 1 이하)에 해당 되는 암반 터널을 대상으로, 그라우팅 전·후의 암반 투수계수 및 그라우팅 주입량과 Q분류법의 파라미터들간의 상관관계를 분석해 보았다. 연구 대상 터널의 경우 Q 값이 작을수록 그라우팅 전 암반 투수계수는 커지며, 그라우트의 주입량은 작아지는 것으로 나타났다. 또한 투수계수 및 주입량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 RQD 및 절리군수(Jn)인 것으로 나타났다. 또한 보통시멘트를 주입재로 한 암반터널 그라우팅 작업에서 투수계수를  $1.0 \times 10^{-8}$  m/sec이하로 낮추는 것은 매우 어려운 것으로 나타났다.

**주요어:** 터널 그라우팅, 투수계수, 주입량, Q 분류법

---

Received on November 1, 2012. Revised on November 13, 2012. Accepted on November 19, 2012.

<sup>1</sup>정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

<sup>2</sup>정회원, 대우건설 상무

<sup>3</sup>정회원, 대우건설 기술연구원 책임연구원

<sup>4</sup>비회원, 한국방사성폐기물관리공단 차장

<sup>5</sup>정회원, 한국시설안전공단 팀장

\*Corresponding author: Kwang-Ho You, khyou@suwon.ac.kr

## 1. 서론

암반터널에서의 지하수는 대부분 절리, 파쇄대를 따라 유출되며 그라우팅 시 주입재 또한 절리면을 따라 맥상으로 주입되어 차수효과를 발휘하게 된다. 그러므로 터널 굴진면에서의 절리면 특징 등 암반의 상태는 그라우팅 설계 및 효과 검증에 있어 매우 중요한 요소이다.

터널공사에서는 굴착시 안전이나 지반침하 등을 방지하기 위하여 특수한 경우에만 차수그라우팅을 실시하는 경우가 많으며 이에 대한 효과 검증은 정량적인 방법이 마련되지 않아 그라우팅 전·후의 유출량을 검측하거나 시공자의 경험에 의해 다음 공정을 진행하는 경우가 많다. 그러나 향후 건설될 해저터널(유광호와 김은혜, 2010), 방사성폐기물 저장공간, 석유 및 이산화탄소 저장공간 등에서는 굴착 시 시공안전 뿐만 아니라 주변 지반의 투수성 및 그라우팅 후의 성능 평가는 매우 중요한 공학적 요소가 될 것이다.

그라우팅에 의한 암반의 역학적 보강효과에 대해서는 주로 불연속면을 주입재로 충전시켜 그라우팅 후 전단강도 증가를 관찰한 연구(천병식과 최준근, 2003; 김태혁과 이정인, 2000)가 많이 이루어졌다. 그라우팅 후의 차수 성능에 대한 평가로는 불연속면의 전단강도 증가 확인 이외에 전기비저항 탐사에 의한 차수그라우팅 건전도 모니터링에서 그라우팅이 집중적으로 수행된 곳에서는 비저항값이 다소 낮아진 것을 확인하였다(임은상 등, 2007).

그라우팅 전·후의 투수성에 관해서는 주로 댐의 기초지반에서 많은 연구가 이루어졌으며 여규권(2009)은 단위시멘트 주입량은 RQD가 클수록 증가하는 경향을 보이거나 Lugeon값은 RQD와 상관성이 낮은 것으로 조사되었고, Lugeon값과 단위시멘트 주입량의 관계는 서로 비례하며 투수성이 큰 퇴적암 지역에서 상관성이 높은 것으로 분석하였다. 김덕근과 김교원(2001)은 도수터널에서 이루어진 그라우팅 분석 결과 셰일과 같은 퇴적암 지반에서는 상대적으로 효과가 낮게 나타나며 RMR과는 직접적인 상관성이 없는 것으로 확인되었으나 절리간극은 차수효과에 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 또한, Barton(2007)은 암반의 상태를 종합적으로 나타내는 Q 값은 루젠(L, Lugeon)에 반비례의 관계( $L \approx 1/Q$ )를 갖는다고 분석하였다.

공진영 등(2010)은  $1.0 \times 10^{-7}$  m/sec 정도의 난투수성 지역은 보통시멘트 주입재 시공구간의 투수계수는  $1.0 \times 10^{-8}$  m/sec 정도로 개량되었고 초미립자 주입재는  $1.0 \times 10^{-9}$  m/sec 정도로 개량되었음을 보고하였다. 또한 초미립자 주입재가 보통시멘트 주입재보다 암반상태, 투수성, 탄성계수 및 변형계수, 단위주입량 및 주입재 회수율 측면에서는 유리하지만 전단응력 측면에서는 특이한 차이가 없는 것으로 확인되었다. 또한 일본의 미즈나미 심지층 연구소(일본원자력연구개발기구)에서 보통시멘트 그라우트의 주입시험 결과 그라우팅 전 암반 투수계수가  $2.78 \times 10^{-6}$  m/sec에서 그라우팅

후  $(7.7\sim 4.3)\times 10^{-7}$  m/sec로 감소하는 것으로 보고하였다. 그러나 터널 굴진면에는 무수히 많은 절리가 발달하며 각 절리는 연속성, 간격, 거칠기, 지하수 상태 등 각기 다른 변수들로 인해 투수계수 및 그라우팅에 대해 정량적으로 판단하기 힘든 특징이 있다.

본 연구는 터널 굴착 시 용수구간에서 실시된 그라우팅이 암반의 투수성에 미치는 영향을 분석하고자 Q 시스템의 분류항목과 투수계수의 상관성을 분석하였다. 이를 위해 지반특성에 따른 주입량 특성 및 지반특성별 그라우팅 전·후의 암반 투수계수 경향을 분석하였다.

## 2. 대상현장 지반조건

본 연구의 대상은 경상북도에 위치하는 ○○터널로서 지반은 백악기 퇴적암류를 제3기의 화강섬록암이 관입한 형태로서 화강섬록암 주변은 이암, 실트암(siltstone), 사암의 호층으로 구성되었고 터널 구간은 화강섬록암으로 이루어져 있다. 본 논문은 지반분류의 점수와 그라우팅 전·후의 암반투수계수, 주입량과의 관계를 분석한 것으로서 당 현장의 지반분류는 Q 시스템에 의한 분류가 이루어졌다. Q 값은 6가지의 변수에 의해 식 (1)과 같이 구해진다.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

여기서, *RQD*: 암질지수(%)

$J_n$  : 절리군의 수

$J_r$  : 절리면의 거칠기 계수

$J_a$  : 절리면의 변질도

$J_w$  : 절리사이의 물에 의한 저감계수

*SRF*: 응력감소 계수(Stress Reduction Factor)

투수계수 시험 및 그라우팅은 약 2 km의 병설터널 및 수직구의 4, 5등급 암반에서 굴착된 구간을 대상으로 하였다. 4 등급은 Q 시스템에서 0.1~1의 범위를 갖으며 5등급은 0.1 이하의 값을 갖는다.

Fig. 1 및 Fig. 2에는 투수시험과 그라우팅이 이루어진 4등급 및 5등급에 해당되는 굴진면 관찰 예를 각각 나타내었다. 4등급 굴진면의 특징은 크게 3개의 절리군을 갖는데 대부분 30~40 cm 정도의 간격을 보이고 있으며 방향이 유사한 2개의 단층이 나타나는데 각각 최대 150 mm, 40 mm

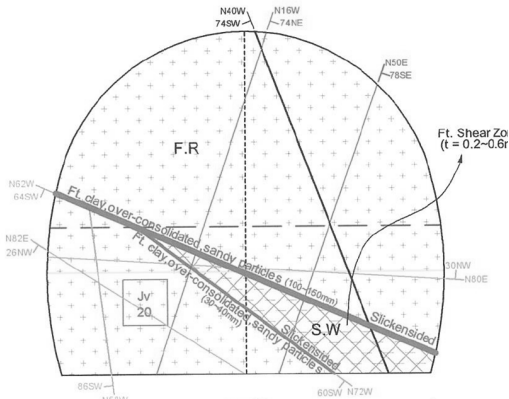


Fig. 1. A face mapping example of Rock Class 4.

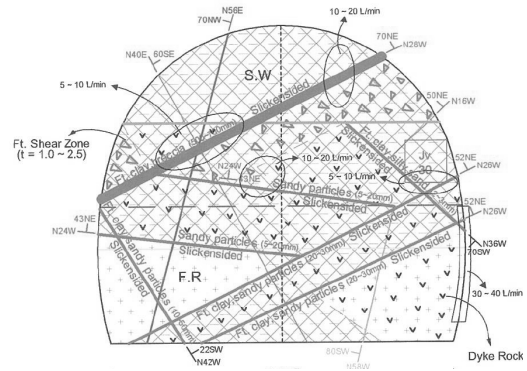


Fig. 2. A face mapping example of Rock Class 5.

정도의 폭을 갖으며 점토와 사질의 충전물이 협재되어 있다. 또한 절리사이에는 충전물이 있는 경우도 있으며 밀착되어 나타나는 경우 등 복잡한 양상을 보이고 있다. 절리사이에서의 지하수는 ‘minor inflow’의 상태를 보이고 있으며, 0.1~0.5 mm의 충전물(filling material)이 협재되어 있다. 5등급 굴진면의 특징은 크게 4개 이상의 절리군을 갖는데 대부분 20~30 cm 정도의 간격을 보이고 있으며 3개의 단층이 나타나고 최대 700 mm 정도의 폭을 갖는데 단층사이에는 점토와 사질의 충전물이 협재되어 있다. 절리사이에서의 지하수는 ‘large inflow(80~90 liter/min)’의 상태를 보이고 있으며, 단층에 의한 shear zone의 발달이 두드러지게 나타나고 있다.

### 3. 그라우팅 시공 조건

차수그라우팅의 시행여부 및 그라우팅공 배치는 구조물의 특징, 배수펌프 용량, 유지관리 비용 등을 고려하여 설정하는데 보령터널의 경우(서영호 등, 2010)는 감지공 1개에서 4 liter/min 혹은 3개공에서 총 8 liter/min 이상일 경우 차수그라우팅을 시행토록 하였다. 본 연구구간에서의 그라우팅 공 배치는 지하수 용출현황, 지질구조, 펌프용량 등을 감안하여 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 적용하였는데 그라우팅 간격은 Q 값이 0.1~1 사이는(4등급) 종방향 횡방향 간격을 모두 2.0 m씩 하였으며 0.1 이하의 암반은(5등급) 1.5 m씩 시스템으로 적용하였고 주입심도는 7 m로 하였다. 이준석 등(2004)은 할렬 및 침투주입에서 이상적인 경우 철도터널의 지수목표량을 달성하기 위해서는 차수층의 두께를 1.8 m로 분석하였으나 당 현장의 경우 Q 값이 1 이하의 암반에서 굴착이 이루어졌고 파쇄대의 발달이 두드러지므로 주입심도를 기존의 경험을 참고로 7 m로 하였다. Fig. 3과 Fig. 4에서 ○ 표시는 바닥부에서 시공한 그라우팅 주입공을 의미하며 ● 표시는 측벽부에서

시공한 그라우팅 주입공을 의미하고, ⊙ 표시는 4등급 암반에서 종방향 격공으로 시공한 그라우팅 공을 표시한 것이다. 터널 바닥부(invert)구간에 그라우팅 주입공을 배치한 이유는 터널 굴착 작업이 종료된 곳의 바닥부에서 향후 유출될 것으로 예상되는 지하수의 차단을 목적으로 그라우팅을 실시하였기 때문이다.

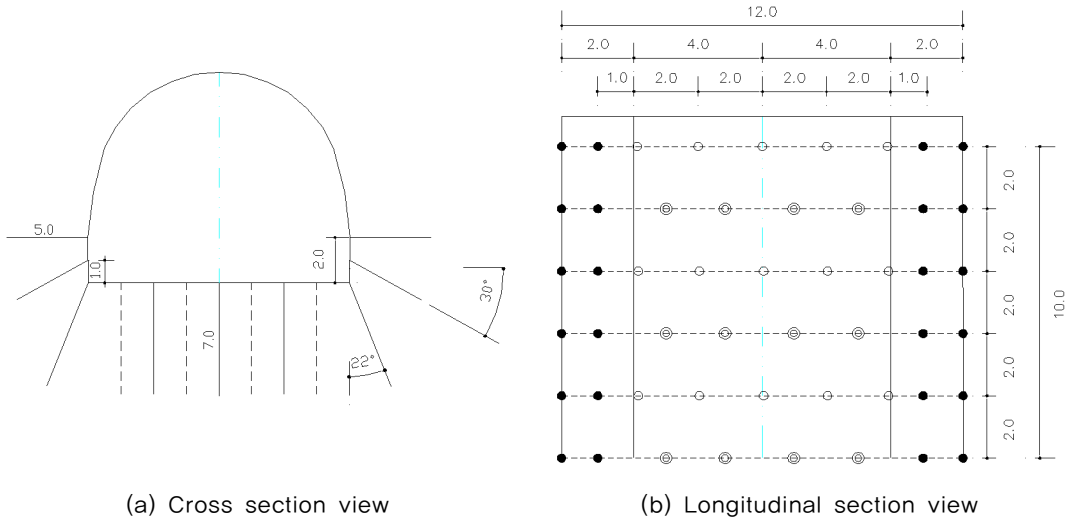


Fig. 3. Grouting hole layout in Rock Class 4.

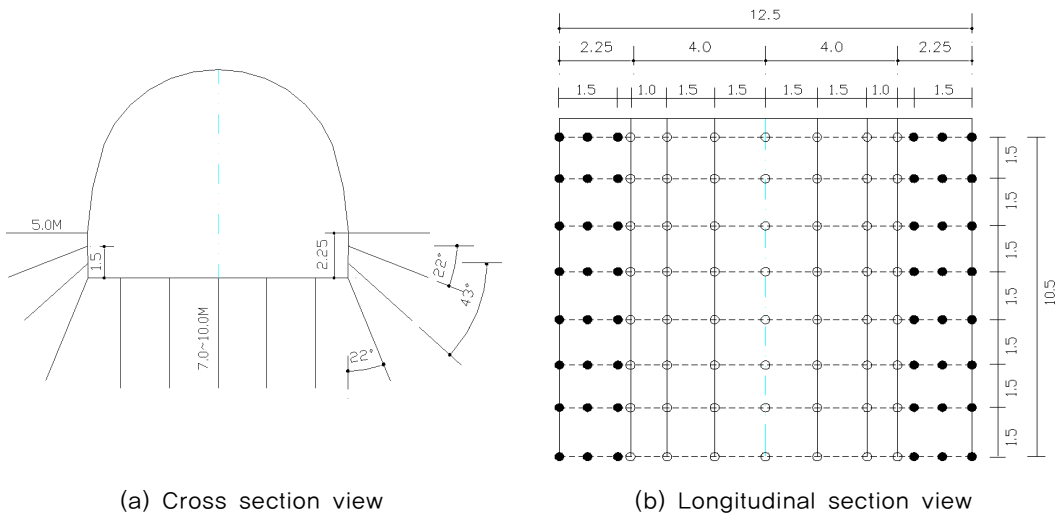


Fig. 4. Grouting hole layout in Rock Class 5.

주입압은 그라우팅이 수행된 곳은 모두 4~5등급의 암반으로서 국부적으로 파쇄정도가 다르며 심도 또한 각각이지만 수위회복 후의 최대수두가 약 1,000~1,500 kPa 정도인 점을 고려하여 최종 허용주입압력을 2,000 kPa 내외로 제한하여 적용하였다. 당 현장의 그라우트 배합비는 시멘트와 물만 사용하였으며 배합비는 적용지반의 암질 및 유출량 등에 따라 시멘트-물 비를 1:3에서 1:0.7 사이의 값으로 적용하였다. 본 현장의 천공방법은 공 붕괴가 발생하지 않은 곳은 충격식 방법으로 천공하였으며 파쇄대 구간 등에 대해서는 회전수세식을 적용하였다. 천공경은 모두 NX구경으로 하였다.

본 터널에서의 그라우팅은 4~5등급의 절리와 파쇄대가 존재하는 곳이 많은 곳에서 굴착이 이루어졌으므로 천공홀 붕괴 및 주입재 누출 등을 고려하여 하향식 그라우팅과 순환식 그라우팅을 적용하였다. 하향식 그라우팅은 홀 붕괴가 심할 경우에 적용하는 방법으로서 일정심도를 천공하고 주입재를 주입한 후 고결시간이 경과하면 주입한 구간을 재천공하여 1단계 주입을 종료한다. 그 다음 다시 하향으로 주입구간의 일정심도를 천공-주입-재천공 작업을 반복하여 시공하는 방법이다. 순환식 그라우팅은 대상 암반에 개구성 절리가 발달하여 주입재가 주입공 전 구간에 걸쳐 침투하거나 용출수량 및 수압이 강하여 공저까지 주입재가 도달하지 못하는 경우에 적용한다. 시공방법은 케이싱으로 계획심도까지 천공한 다음 그 안에 주입호스를 설치함으로써 케이싱 인발 후 주입재가 주입공 바닥에서부터 주입공 입구까지 골고루 침투하게 하는 방법이다.

## 4. 그라우팅 결과 분석

### 4.1 그라우팅에 의한 암반 투수계수 변화

Fig. 5에서부터 Fig. 11까지는 당 현장에서 실시한 차수그라우팅 전·후의 암반투수계수 변화를 Q 값 및 Q분류의 요소별로 나누어 나타내었다. 본 분석에 사용된 투수시험값은 총 42개이며 암반등급 4~5에서 시험된 값인데 이중 4등급 데이터가 23개 이며 5등급 데이터가 19개이다. Table 1에는 Q 시스템 요소 및 그라우팅 전·후의 암반투수계수에 대하여 나타내었다. 그라우팅 전·후의 투수계수 시험은 Fig. 3과 Fig. 4에서 심도 5 m를 천공하고 상부 1.5 m는 코킹작업을 하였으며 주입압을 0~700 kPa로 상승과 하강을 하면서 측정하였다.

Fig. 5에는 Q 값에 따른 그라우팅 전·후의 암반 투수계수를 나타내었다. Q 값이 0.1 이하인 암반에서는 그라우팅 전 ( $9.5 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-7}$ ) m/sec에서 그라우팅 후 ( $8.6 \times 10^{-7} \sim 9.9 \times 10^{-9}$ ) m/sec으로 감소되었으며 Q 값이 0.1-1 범위의 암반에서는 그라우팅 전 투수계수가 ( $3.5 \times 10^{-6} \sim 1.8 \times 10^{-6}$ ) m/sec에서 그라우팅 후 ( $1.1 \times 10^{-7} \sim 8.7 \times 10^{-9}$ ) m/sec으로 감소되었다. Q 값이 0.1 이하의 평균

**Table 1.** The parameters of Q system and the rock mass permeability before and after grouting.

Data	Rock Class	Rock mass permeability before grouting (m/sec)	Rock mass permeability after grouting (m/sec)	Q system parameters						Q value
				RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	
1	5	$8.68 \times 10^{-6}$	$4.02 \times 10^{-8}$	10	20	0.5	8	0.33	10	0.001
2	5	$2.25 \times 10^{-6}$	$2.69 \times 10^{-7}$	16	20	0.5	8	0.5	10	0.003
3	5	$2.02 \times 10^{-6}$	$8.62 \times 10^{-7}$	10	20	1.5	8	1	10	0.003
4	5	$3.50 \times 10^{-6}$	$9.40 \times 10^{-8}$	10	20	0.5	8	1	10	0.003
5	5	$9.56 \times 10^{-6}$	$2.56 \times 10^{-8}$	15	15	0.5	8	0.5	10	0.003
6	5	$2.62 \times 10^{-6}$	$4.97 \times 10^{-7}$	22.6	20	0.5	8	0.5	10	0.004
7	5	$2.35 \times 10^{-6}$	$3.44 \times 10^{-8}$	10	20	0.5	8	0.66	5	0.004
8	4	$2.18 \times 10^{-6}$	$3.77 \times 10^{-7}$	30	15	0.5	8	0.33	7.5	0.006
9	5	$6.38 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^{-8}$	20	15	0.5	8	0.5	7.5	0.006
10	5	$1.35 \times 10^{-6}$	$7.72 \times 10^{-8}$	10	15	0.5	10	1	5	0.007
11	5	$5.84 \times 10^{-6}$	$9.95 \times 10^{-9}$	25	15	0.5	8	1	7.5	0.014
12	5	$1.97 \times 10^{-6}$	$3.36 \times 10^{-7}$	25.9	15	0.5	8	1	7.5	0.014
13	5	$1.45 \times 10^{-6}$	$4.56 \times 10^{-8}$	30	15	0.5	8	0.66	5	0.017
14	5	$3.18 \times 10^{-6}$	$4.73 \times 10^{-7}$	22.6	15	0.5	6	1	7.5	0.017
15	5	$2.31 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-8}$	25.9	15	0.5	6	1	7.5	0.019
16	5	$3.53 \times 10^{-6}$	$9.21 \times 10^{-8}$	30	15	0.5	8	0.5	2.5	0.025
17	5	$2.88 \times 10^{-6}$	$7.20 \times 10^{-8}$	16	15	1	8	0.5	2.5	0.027
18	5	$1.10 \times 10^{-6}$	$7.08 \times 10^{-8}$	19.3	15	0.5	6	0.66	2.5	0.028
19	5	$1.25 \times 10^{-6}$	$1.69 \times 10^{-7}$	16	15	0.5	6	1	2.5	0.036
20	5	$3.34 \times 10^{-6}$	$3.57 \times 10^{-7}$	16	15	1	6	0.66	2.5	0.047
21	5	$1.69 \times 10^{-6}$	$6.93 \times 10^{-8}$	16	15	1.5	6	0.5	2.5	0.053
22	5	$2.46 \times 10^{-6}$	$6.04 \times 10^{-8}$	16	15	1.5	6	0.5	2.5	0.053
23	5	$1.82 \times 10^{-6}$	$7.97 \times 10^{-7}$	29.2	15	1	6	1	5	0.065
24	5	$3.71 \times 10^{-6}$	$4.44 \times 10^{-8}$	22.6	15	1	4	0.66	2.5	0.099
25	4	$1.85 \times 10^{-7}$	$4.71 \times 10^{-8}$	16	15	1.5	6	0.5	1	0.133
26	4	$1.09 \times 10^{-6}$	$7.97 \times 10^{-8}$	16	15	1.5	6	0.5	1	0.133
27	4	$3.91 \times 10^{-7}$	$2.52 \times 10^{-8}$	22.6	15	1	4	1	2.5	0.151
28	4	$3.53 \times 10^{-6}$	$8.78 \times 10^{-9}$	19.3	15	1	4	0.66	1	0.212
29	4	$2.94 \times 10^{-6}$	$1.17 \times 10^{-8}$	29.2	15	1	6	0.66	1	0.214
30	4	$5.44 \times 10^{-7}$	$2.62 \times 10^{-8}$	49	9	1	4	0.5	2.5	0.272
31	4	$2.13 \times 10^{-6}$	$6.27 \times 10^{-8}$	25.9	15	1	4	0.66	1	0.285
32	4	$3.59 \times 10^{-6}$	$3.33 \times 10^{-8}$	25.9	15	1	4	0.66	1	0.285
33	4	$1.74 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-7}$	32.5	12	1	6	0.66	1	0.298
34	4	$2.28 \times 10^{-6}$	$8.74 \times 10^{-8}$	29.2	15	1	4	0.66	1	0.321
35	4	$5.78 \times 10^{-7}$	$4.54 \times 10^{-8}$	35.8	9	1.5	3	0.66	2.5	0.525
36	4	$2.43 \times 10^{-6}$	$8.28 \times 10^{-8}$	32.5	15	1	4	1	1	0.542
37	4	$2.94 \times 10^{-7}$	$5.20 \times 10^{-8}$	29.2	12	1	4	1	1	0.608
38	4	$6.20 \times 10^{-7}$	$4.37 \times 10^{-8}$	32.5	12	1	4	1	1	0.677
39	4	$2.11 \times 10^{-7}$	$6.85 \times 10^{-8}$	32.5	12	1	4	1	1	0.677
40	4	$3.22 \times 10^{-7}$	$5.57 \times 10^{-8}$	35.8	12	1	4	1	1	0.746
41	4	$2.30 \times 10^{-7}$	$2.34 \times 10^{-8}$	39.1	12	1	4	1	1	0.815
42	4	$3.70 \times 10^{-7}$	$4.01 \times 10^{-8}$	49	9	1.5	4	1	2.5	0.817

투수계수는  $1.36 \times 10^{-6}$  m/sec이며 0.1-1의 암반은 평균  $2.8 \times 10^{-6}$  m/sec으로서 평균값은 Q 값이 0.1 이하의 암반에서 투수계수가 약간 작은 것으로 나타나는데 이는 Q값이 작을수록 즉, 암반이 불량할수록 파쇄도가 심해지는 대신 점토성 충전물이 불연속면에 충전되어 투수성이 작아지는 경우가 있어 투수계수 시험값의 편차가 상대적으로 크기 때문으로 판단된다. 하지만 전체경향을 보았을 때 Q값이 작을수록 투수계수의 최대값은 커지는 경향을 보이고 있으며 이는 Barton (2007)의 결과와 일치한다.

Table 2에는 Barton(2007)의 결과와 본 연구의 투수계수를 비교하여 나타내었는데, 포틀랜드 시멘트를 주재료로 하는 경우 그라우팅 전의 투수계수는 편차가 크더라도 그라우팅 후는 일정한 값에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구의 데이터도 2개의 데이터를 제외하면 그라우팅 후  $1.0 \times 10^{-8}$  m/sec 이하로 감소되지 않는 것을 알 수 있는데 이는 입자크기가 40  $\mu$ m 이하인 포틀랜드 시멘트를 주재료로 한 주입재의 주입한계로 판단된다.

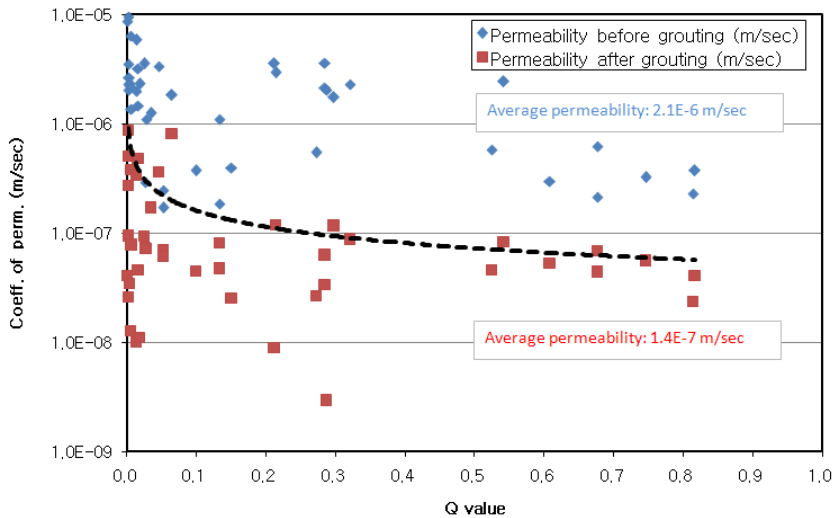


Fig. 5. Q value and the change of rock mass permeability before and after grouting.

Table 2. Barton(2007) and the rock mass permeability before and after grouting in this study.

Permeability		Before grouting (m/sec)	After grouting (m/sec)
Barton(2007)		$10^{-3}$	$10^{-7}$ - $10^{-8}$
		$10^{-5}$	$10^{-6}$ - $10^{-7}$
Q value	0.1-1	average : $2.8 \times 10^{-6}$	average : $1.7 \times 10^{-7}$
Q value	0.1 under	average : $1.3 \times 10^{-6}$	average : $5.3 \times 10^{-8}$



Fig. 6에는 암반의 RQD(Rock Quality Designation)에 따른 그라우팅 전·후의 암반 투수계수를 나타내었다. 그림에서 RQD가 10인 것은 명목상의 값으로서 0을 포함하여 10이하로 측정된 값이다. RQD가 15-40의 범위에서는 값이 클수록 그라우팅 전의 암반 투수계수는 작아지는 경향을 보이고 있으나 40 이상은 측정된 데이터수가 적어 원지반의 투수계수를 추정하기 힘들다. 투수계수 값을 보면 RQD 15~40에서는 그라우팅 전 ( $9.5 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-7}$ ) m/sec에서 ( $8.6 \times 10^{-7} \sim 8.7 \times 10^{-9}$ ) m/sec로 감소하고 있다.

RQD는 암반의 절리수와 간격에 밀접한 관련이 있는 항목으로서 지하수의 유출특성이 불연속면의 발달특성에 좌우되는 것으로 보았을 때 암반의 투수성과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되며 측정된 RQD를 이용하여 투수계수의 범위를 예측하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

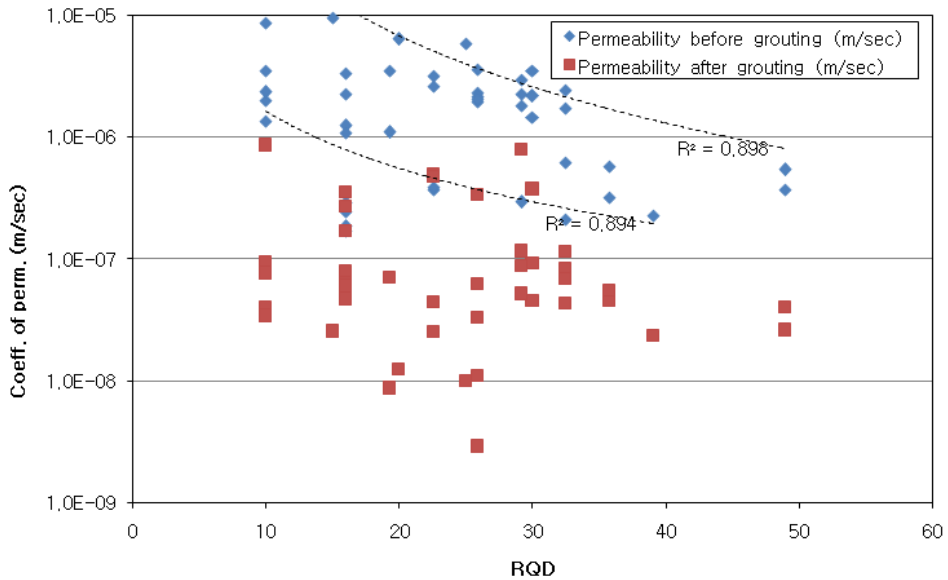


Fig. 6. RQD vs rock mass permeability before and after grouting.

Fig. 7에는 Jn(절리군의 수)에 따른 그라우팅 전·후의 암반 투수계수를 나타내었다. 암반에서의 지하수 유출은 절리면을 따라 발생되므로 Jn은 암반의 투수성에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그라우팅 전의 암반 투수계수는 Jn의 값이 9점일 경우(3방향의 절리군 발달) ( $3.5 \times 10^{-6} \sim 5.7 \times 10^{-7}$ ) m/sec, 12점일 경우(3방향의 절리군과 랜덤한 절리 발달) ( $3.5 \times 10^{-6} \sim 1.8 \times 10^{-7}$ ) m/sec, 15점일 경우(4방향 또는 그 이상의 절리군과 랜덤하게 현저히 절리가 많음) ( $3.5 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-7}$ ) m/sec, 20점일 경우(토사상으로 파쇄된 암반) ( $9.5 \times 10^{-6} \sim 3.7 \times 10^{-7}$ ) m/sec로 나타났다. 즉 Jn이

15점을 경계로 암반의 투수성이 크게 다른 것을 알 수 있다. 그라우팅 후의 암반 투수계수는  $J_n$ 의 값이 9점일 경우 ( $4.5 \times 10^{-8} \sim 3.3 \times 10^{-8}$ ) m/sec, 12점일 경우 ( $5.5 \times 10^{-8} \sim 8.7 \times 10^{-9}$ ) m/sec, 15점일 경우 ( $8.6 \times 10^{-7} \sim 3.4 \times 10^{-8}$ ) m/sec, 20점일 경우 ( $4.4 \times 10^{-8} \sim 9.9 \times 10^{-9}$ ) m/sec로 나타났는데  $J_n$  9~12사이에는 그라우팅후의 투수계수 값 차이가 크지 않다. 이것은 암반이 파쇄될수록 절리사이의 충전물, 폭 등 다양한 변수에 의해 주입재의 침투가 다양하게 나타나기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 6과 Fig. 7에는 RQD 및  $J_n$ 과 그라우팅 전 투수계수에 대해 상한선과 하한선을 연결한 추세선을 나타내었는데 Q 값이 1 이하인 암반에서 RQD가 40 이하이고  $J_n$  20 이하인 암반의 그라우팅 전의 투수계수는 이 범위 내에 속해 있음을 나타내고 있으며, 유사한 암반의 경우 투수계수의 시험이 곤란한 경우가 이 그래프를 사용하면 개략적인 투수계수를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

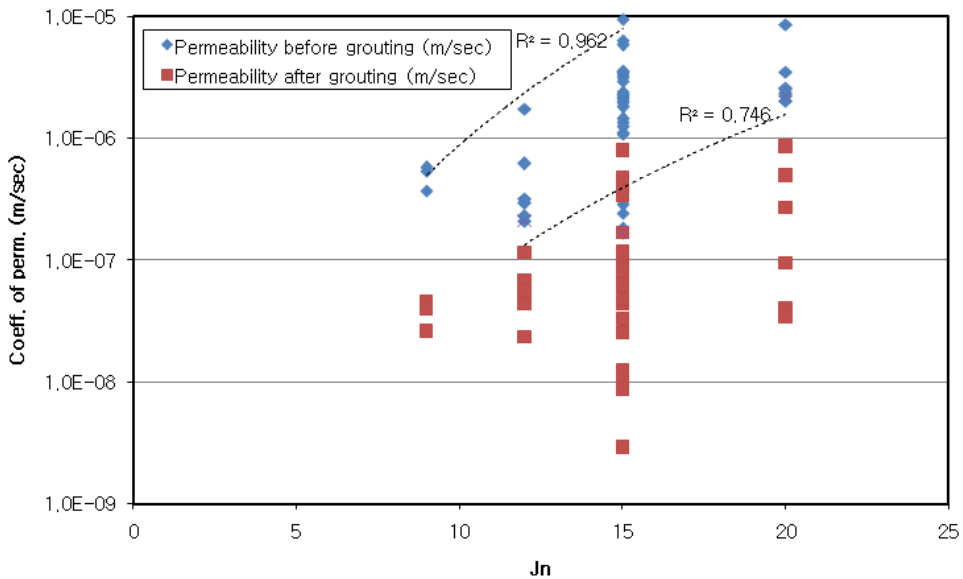


Fig. 7.  $J_n$  vs rock mass permeability before and after grouting.

Fig. 8에는  $J_r$ (절리면의 거칠기 계수)과 그라우팅 전·후의 암반 투수계수를 나타내었다. 그림에서 보면 그라우팅 전 암반 투수계수는  $J_r$ 이 커질수록 즉 거칠거나 또는 불규칙하고 평탄한 경우가 투수계수가 작으며 박피상이고 평탄할수록 투수계수는 커지는 특징을 보이고 있다. 또한 그라우팅 후의 암반 투수계수는  $J_r$ 이 1.5인 경우 즉 절리면의 거칠기가 박피상이고 평탄하면 투수계수 감소의 큰 차이가 나타나지 않는다.

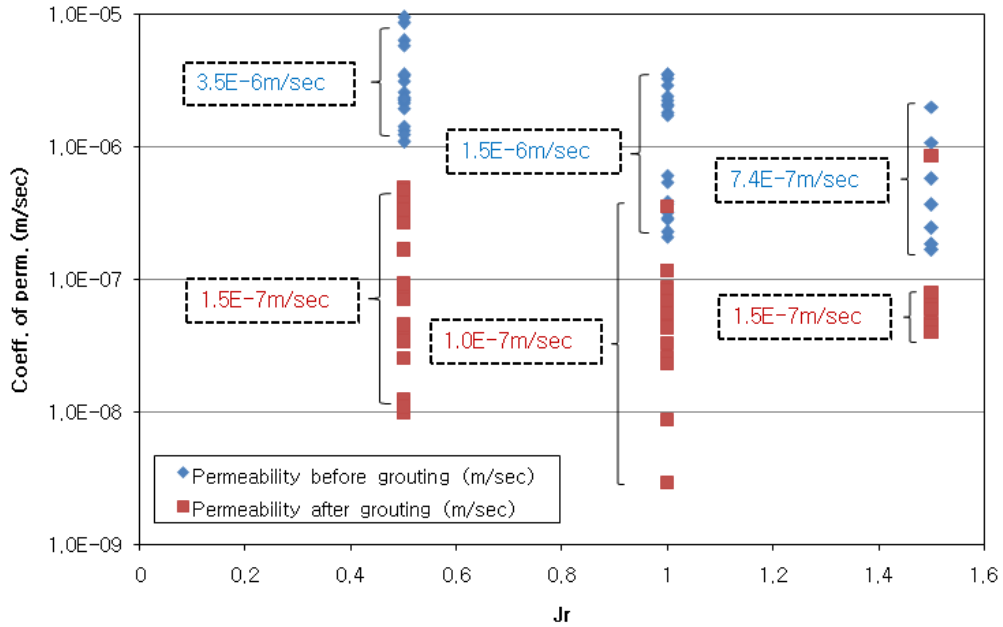


Fig. 8. Jr vs rock mass permeability before and after grouting.

Fig. 9에는 Ja(절리면의 변질정도)와 그라우팅 전·후의 암반 투수계수를 나타내었다. 절리면의 변질정도의 배점은 0.75~20점으로서 본 현장에서는 3~10의 좁은 범위에 분포하며 주로 면의 특징을 나타내는 파라미터로서 암반의 투수성에 관해서는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

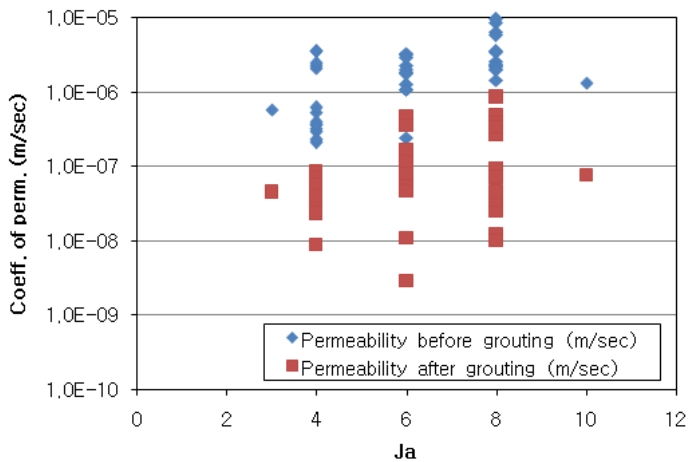


Fig. 9. Ja vs rock mass permeability before and after grouting.

Fig. 10에는  $J_w$ (절리 사이의 간극수에 의한 감소계수)와 그라우팅 전·후의 암반 투수계수에 대해 나타내었으며 Fig. 11에는  $J_w$  값의 범위별로 평균 투수계수를 나타내었다.  $J_w$ 의 배점은 0.05 ~1의 범위를 가지지만 당 현장은 주로 0.3-1 사이에 분포하고 있는데 이를 개략의 수압으로 표시하면 10~100 kPa의 범위에 해당된다. Fig. 10을 보면 절리사이에 작용하는 수압이 작을수록 즉  $J_w$ 가 1에 가까울수록 원지반의 투수계수는 커지는 특징을 가지고 있는데 이는 수압시험 시 원지반에서의 수압이 작을수록 투수계수는 커지기 때문인 것으로 판단된다. 그라우팅 작업 시에는 주입압을 2,000 kPa까지 하였으므로 그라우팅 후의 암반 투수계수는  $J_w$ 에 의한 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

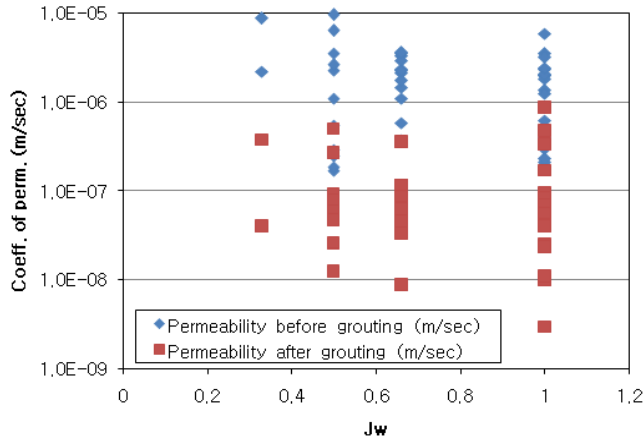


Fig. 10.  $J_w$  vs rock mass permeability before and after grouting.

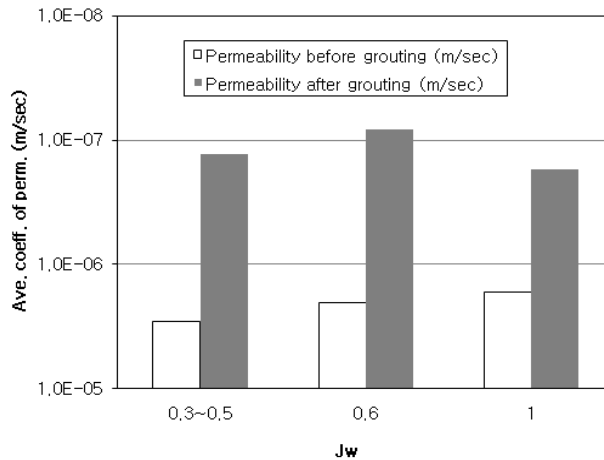


Fig. 11.  $J_w$  vs rock mass permeability before and after grouting.

## 4.2 그라우팅 시 주입량

Fig. 12에서 Fig. 16까지는 60개소의 Q값 및 Q분류 요소별 그라우팅 주입량을 나타내었다. 단위주입량은 각 공당 총 주입량을 주입길이 7 m로 나누어 단위 미터당 주입량으로 나타내었다.

Fig. 12에는 Q 값에 따른 단위주입량을 나타내었는데 Q 값이 0.00~0.01의 범위에서는 101 liter/m, 0.01~0.1의 범위에서는 107 liter/m, 0.1~1에서는 137 liter/m가 주입되어 Q 값이 양호할수록 즉 암반의 상태가 양호할수록 투수계수는 작아지나 주입량은 증가하는 경향이 있다. 통상적으로 투수계수가 크면 주입량도 커질 것으로 예상되나 당 현장의 Q 값이 0.1 이하의 암반의 경우 파쇄대 발달로 인해 절리사이에 점토 등이 협재되어 있기 때문에 주입량은 작은 것으로 판단된다. 절리의 발달이 많은 0.00-0.1까지는 주입량의 변화가 크지 않으나 0.1 이상의 경우에는 주입량의 차이가 많은 것을 볼 수 있다. 이는 Q 값이 0.1 이하에서는 굴진면 전체가 거의 유사한 정도의 균질한 절리가 발달하는데 비해 암반의 상태가 비교적 양호한 0.1 이상인 경우에는 굴진면에 발달하는 몇 개의 절리의 영향을 크게 받기 때문으로서 투수계수와 주입량은 상관성이 크지 않는 것으로 판단된다.

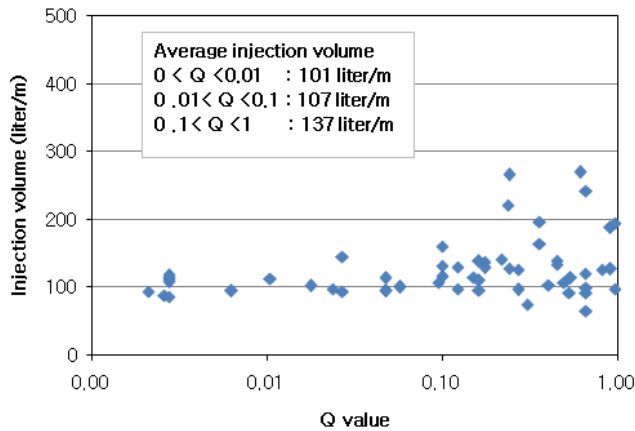


Fig. 12. Q value vs injection volume.

Fig. 13에는 RQD에 따른 단위주입량을 나타내었다. RQD는 절리의 수와 관계된 것으로서 특징적인 점인 평균 주입량은 RQD 0~20에서는 105 liter/m, 20~40점 사이에서는 137 liter/m, 40 이상에서는 166 liter/m으로 RQD 값이 클수록 주입량이 증가하는데, 이는 여규권(2009)의 논문 결과와 일치한다. 그러나 최대 주입량은 RMR 30까지는 주입량이 증가하다가 이후에는 감소하는 경향이 있다. 이는 RQD가 낮은 곳은 파쇄대가 분포하는 곳이 많고, 절리사이에 점토 등의 충전물이 협재되어 있어 주입량이 작은 것으로 판단되며 RQD의 점수가 높은 곳은 절리 발달이 적어 주입재의

침투가 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 또한 RQD가 0~20사이에는 주입량이 85~145 liter/m로서 차이가 크지 않으나 20~40에서는 주입량이 64~269 liter/m로서 차이가 큰 것을 알 수 있다. 이는 RQD 20 이하인 경우 주로 5등급에 해당하는 경우가 많아 굴진면 전면에 절리가 균일하게 발달하는 것으로 볼 수 있으나 RQD가 20~40 사이에서는 절리가 불규칙하게 발달하는 경우가 많아 맥상으로 주입되는 암반 그라우팅의 특성상 주입량에 큰 차이가 있는 것으로 판단된다.

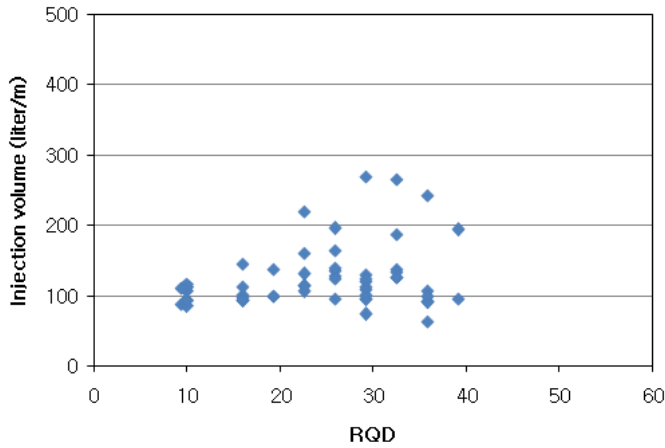


Fig. 13. RQD vs injection volume.

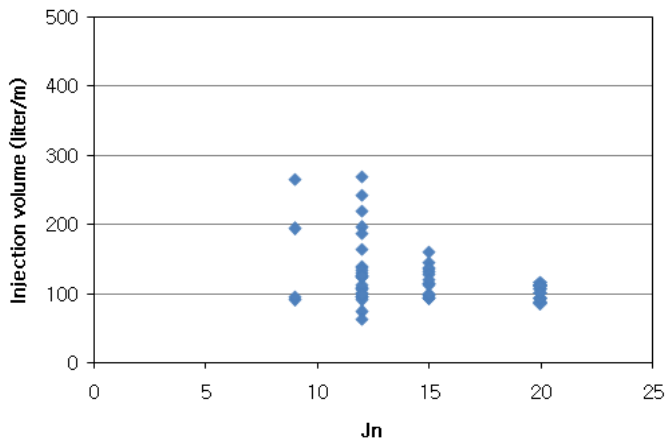


Fig. 14. Jn vs injection volume.

Fig. 14에는 Jn(절리군의 수)에 따른 단위주입량을 나타내었다. Jn이 9 (3 방향의 절리군) ~ 12 (3 방향의 절리군과 랜덤한 절리)의 경우 단위주입량이 (64~269) liter/m로서 절리의 간격, 충전물,

폭 등에 따라 주입량의 차이가 크지만 15 (4 또는 그 이상의 절리군과 랜덤하게 현저히 절리가 많음) ~ 20 (토사상으로 파쇄된 암반)에서는 (85~187) liter/m으로 비교적 차이가 적다. 특히 Jn 20에서는 (115~187) liter/m으로 각 공당 주입량의 차이 및 주입량이 적은 것을 알 수 있는데 토사상으로 파쇄된 상태에서는 주로 절리나 단층파쇄대 사이가 점토 및 사질의 충전물로 채워져 있어 주입량이 적은 것으로 판단된다.

Fig. 15에는 Jr(절리면의 거칠기 계수)에 따른 단위주입량을 나타내었다. Q분류에서 Jr은 0.5~4의 범위를 갖는데, 본 데이터의 경우 주로 1.0에 집중되어 있긴 하지만 절리면의 거칠기는 주입량에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

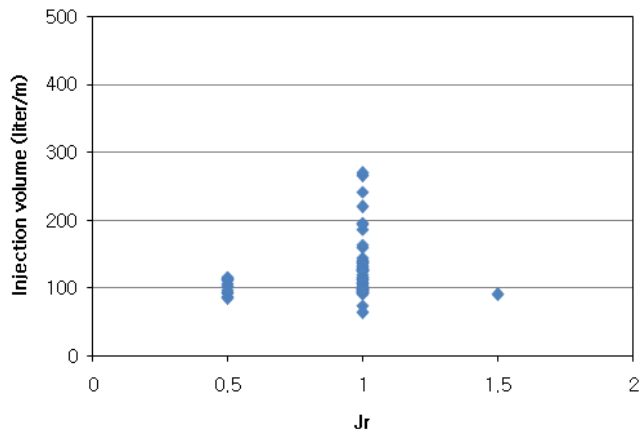


Fig. 15. Jr vs injection volume.

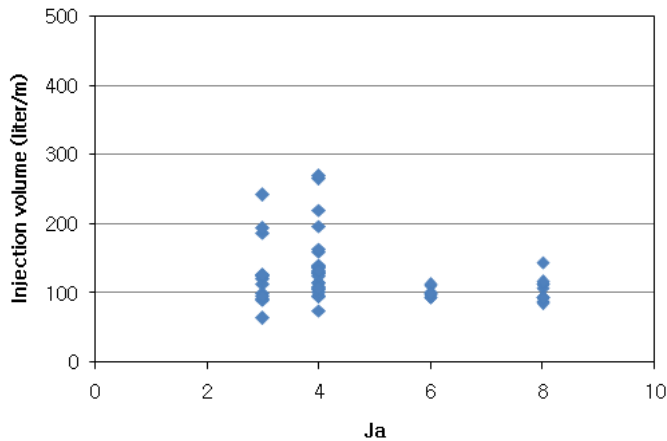


Fig. 16. Ja vs injection volume.

Fig. 16에는 Ja(절리면의 변질정도)에 따른 단위주입량을 나타내었다. 특징적인 점은 Ja의 값이 클수록 즉 절리면의 변질정도가 클수록 주입량은 일정하나 값이 작을수록 주입량의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 Ja값이 클수록 절리사이에 충전물이 협재되는 경우가 많아 주입이 어려워지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 17에는 Jw(절리 사이의 간극수에 의한 감소계수)에 따른 단위주입량을 나타내었다. Jw는 0.05~1의 범위를 갖는데 절리에서 소량의 용수가 유출되면 반대로 주입량도 많아지며 절리사이에서 높은 수압이 작용하는 경우 주입량이 작아지는 특징을 보이고 있다. 즉, Jw는 현장응력에 관계되는 요소이지만 그라우팅재의 주입량에 영향을 미치는 요인 중의 하나라고 판단된다.

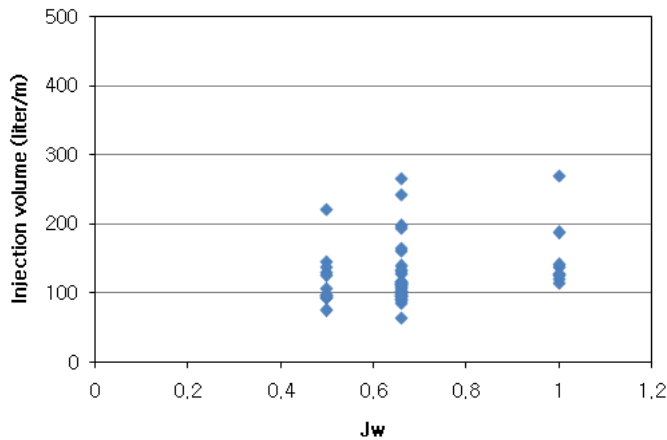


Fig. 17. Jw vs injection volume.

Fig. 18에는 Q분류에서 블록크기를 나타내는 요소( $RQD/J_n$ ), 전단강도를 나타내는 요소( $J_r/J_a$ ), 현장응력을 나타내는 요소( $J_w/SRF$ )와 그라우팅 전·후의 암반 투수계수와와의 관계를 나타내었고 Fig. 19에는 주입량과의 관계를 나타내었다. 먼저 그라우팅 전의 암반 투수계수는  $RQD/J_n$ 이 클수록 작아지는 경향이 있으며  $J_r/J_a$  및  $J_w/SRF$ 와는 큰 상관성이 없음을 보이고 있다. 주입량은  $RQD/J_n$ 이 가장 큰 상관성을 보이고 있으나 3 이상에서는 명확한 관계를 보기 어렵다.  $J_w/SRF$ 는 값이 증가할수록 최대 주입량도 증가하는 경향을 보이고 있으며  $J_r/J_a$ 와는 큰 상관성이 없음을 보이고 있다. 따라서 절리의 발달이 Q 값 1 이하의 암반터널에서의 투수계수 및 그라우트의 주입량은  $RQD/J_n$ 과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.



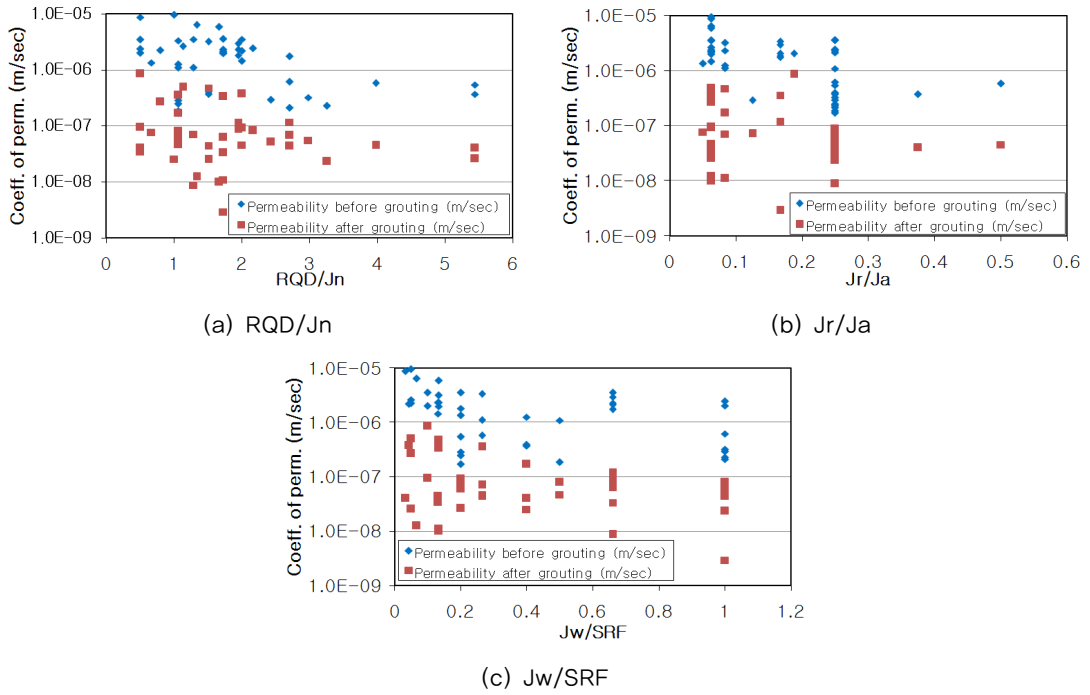


Fig. 18. Q parameters vs coefficient of permeability.

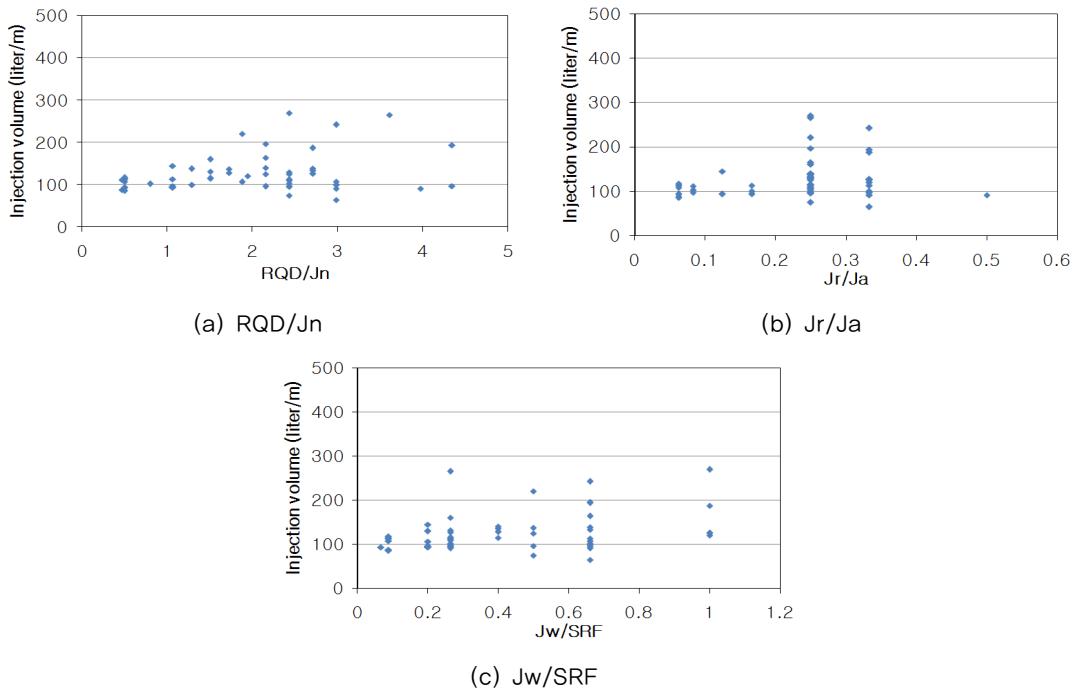


Fig. 19. Q parameters vs injection volume.

## 5. 결 론

암반터널에서의 지하수 유출은 대부분 절리를 따라 유출되므로 절리의 특징과 투수계수, 주입량의 관계는 그라우팅 설계 및 시공 시 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 Q 분류 값이 1 이하의 절리가 발달한 암반터널에서 그라우팅 전·후의 암반 투수계수와 그라우팅 주입량과 Q 분류 파라미터간의 상관관계를 분석해 보았고, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. Q 값이 1 이하인 암반의 경우 6가지 항목 중에서 투수계수에 큰 영향을 미치는 인자는 RQD와 Jn(절리군의 수)로 나타났으며 측정된 RQD 및 Jn을 이용하여 암반터널에서 투수계수 범위를 예측하는 것이 가능할 것으로 판단된다.
2. Q 값이 0.1~1 범위의 암반에서는 그라우팅 전 투수계수가 ( $3.5 \times 10^{-6} \sim 1.8 \times 10^{-6}$ ) m/sec에서 그라우팅 후 ( $1.1 \times 10^{-7} \sim 8.7 \times 10^{-9}$ ) m/sec으로 감소하며 Q 값이 0.1 이하의 암반에서는 ( $9.5 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-7}$ ) m/sec에서 그라우팅 후 ( $8.6 \times 10^{-7} \sim 9.9 \times 10^{-9}$ ) m/sec으로 감소하고 있다. 이때 2개의 데이터를 제외하면 그라우팅 후  $1.0 \times 10^{-8}$  m/sec 이하로 감소되지 않는 것을 알 수 있는데 이는 입자크기가 40  $\mu$ m 이하인 포틀랜드 시멘트를 주재료로 한 주입재의 주입한계로 판단된다.
3. Q 값이 0.1~1 범위의 암반에서는 그라우팅 시 64~269 liter/m이 주입되었으며 Q 값이 0.1 이하의 암반에서는 85~160 liter/m이 주입되어 Q 값이 1 이하의 암반에서는 지반의 상태가 양호할수록 주입량은 증가하는 경향이 있으며 파쇄대의 상태가 불리할수록 주입량은 작아지는 경향이 있는 것으로 나타났다.
4. 그라우팅 전의 암반 투수계수는 RQD/Jn이 클수록 작아지는 경향이 있으며 주입량 또한 RQD/Jn이 비교적 상관성을 보이며 Jw/SRF의 값이 증가할수록 최대 주입량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

본 연구는 암반터널에서 Q 값이 1 이하의 경우 지반 분류 항목들과 그라우팅 전·후의 암반 투수계수, 단위주입량에 관한 고찰로서 추후 암반 상태가 비교적 양호한 경우의 관련 자료들을 분석하면 그라우팅 설계 및 평가에 보다 실용적인 연구 성과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업(09기술혁신 E01)으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Chun, B.S., Choi, J.K. (2003), "A study on the reinforcement of rock faults grouting", Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 4, No. 4, pp. 45-51.
2. Im, E.S., Shin, D.H., Kim, J.H., Kim, W.Y. (2007), "Monitoring of electrical resistivity for grouting effect", The 2007 Conference of Korean Geo-Environmental Society, pp. 69-73.
3. Japan Atomic Energy Agency, [www.jaea.or.jp](http://www.jaea.or.jp)
4. Kim, D.K., Kim, G.W. (2001), "Field experiments on the cutoff grouting around waterway tunnel", The Journal of Engineering Geology, Vol. 11, No. 1, pp. 81-99.
5. Kim, T.H., Lee, J.I. (2000), "The effect of cement milk grouting on the deformation behaviour of artificial rock joints", Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 10, No. 2, pp. 180-195.
6. Kong, J.Y., Kim, C.K., Park, J.H., Chun, B.S. (2010), "Grouting effects of micro-fine cement in the rock-based sites", Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 12, pp. 37-45.
7. Lee, J.S., Sagong, M., Hwang, S.G., Lee, D.S., Kim, K.R. (2004), "Estimation of the waterproof grouting thickness around tunnel", The 2004 Spring Annual Conference of Korea Tunnelling Association, pp. 105-127.
8. Nick Barton (2007), Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy, Taylor & Francis Group, pp. 159-177.
9. Seo, Y.H., Nam, H.Y., Ju, K.S., Jang, S.B., Hur, D.H., Lee, S.C. (2010), "An introduction of the design for the first subsea road tunnel (Boryeong tunnel) in Korea", The News Letter of Korean Tunnelling Association, Vol. 12, No. 3, pp. 30-38.
10. Yea, G.G. (2009), "The impermeable effect for bedrock constructed by grouting", Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 2, pp. 51-59.
11. You, K.H., Kim, E.H. (2010), "A study on the stability analysis for grouting reinforcement in a subsea tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 12, No. 2, pp. 145-155.