

기반암에서 그라우팅에 의한 차수효과

The Impermeable Effect for Bedrock Constructed by Grouting

여 규 권†

Yea, Geuguwen

ABSTRACT : This study is based on field data obtained from rock grouting such as RQD value, Unit cement grout volume, Lugeon value(Lu), and Maximum grout pressure in four different dam sites. The relationship were analyzed and compared as follow. The cut-off effect after rock grouting in dam-foundation which are mostly consist of metamorphic rock is better than that of Sedimentary rock. And the impermeable effect after consolidation grouting is more efficiency than the impermeable effect after curtain grouting. The unit cement grout volume are increased as RQD value is higher in rock mass. But there is no relationship between RQD value and Lugeon value. In the sedimentary rock, which is more permeable than metamorphic rock, Lugeon value (Lu) is a linear function ($Lu=0.22Vc$) of unit cement grout volume (Vc). Cut-off effect of curtain grouting is less influential at each near holes which are already grouted than that of consolidation grouting. And the behavior characteristics of Lugeon value vs. the unit cement grout volume as the order of installations are almost the same.

Keywords : Lugeon value, Curtain grouting, Consolidation grouting, Metamorphic rock, Sedimentary rock

요 지 : 본 연구는 댐 4개소의 기초지반에 실시된 암반 그라우팅에 대한 현장 시험결과를 통하여 RQD, 단위시멘트주입량, Lugeon 값(Lu) 및 최대주입압력과 상관관계를 비교·분석하였다. 본 연구현장에 대하여 댐 기초지반에서 암반 그라우팅을 실시한 후 차수성에 관한 개량효과 분석결과 변성암지역이 퇴적암지역 보다 우수한 것으로 조사되었다. 그리고 압밀(Consolidation) 그라우팅의 차수효과가 차수(Curtain) 그라우팅 보다 우수한 것으로 나타났다. 단위시멘트주입량은 RQD가 클수록 증가하는 경향을 보이나, Lugeon값은 RQD와 무관한 관계를 나타내고 있다. Lugeon값과 단위시멘트주입량(Vc)의 관계는 서로 비례하고 비교적 투수성이 큰 퇴적암 지역에서의 상관관계가 $Lu = 0.22Vc$ 인 직접적인 비례관계를 보였다. 기 시공된 인접공의 영향은 차수 그라우팅 보다 압밀 그라우팅이 큰 것으로 조사되었다. 그리고 주입순서에 따른 단위시멘트주입량과 Lugeon값의 변화는 거의 동일한 거동을 나타내고 있다.

주요어 : Lugeon 값, 차수 그라우팅, 압밀 그라우팅, 변성암, 퇴적암

1. 서 론

댐 건설은 미래의 물 부족에 대응하기 위한 불가피한 대안으로 우리나라 수자원 여건상 향후 많은 중·소규모 댐의 건설이 이루어 질 것으로 예상된다. 따라서 본 연구는 댐 건설에서 가장 중요하게 다루어지는 기초지반의 그라우팅을 주제로 하고 있다. 댐 건설에 있어 기초지반은 상부 제체하중을 지지할 수 있는 충분한 강도와 댐의 효율성을 최대화 할 수 있도록 지지능력과 차수성이 확보되어야 한다. 그러나 실제로 대부분의 기초지반은 발파 및 기계굴착으로 인하여 기초지반이 이완되고 또한 기반암의 불연속적인 특성에 의하여 이러한 조건을 만족시키지 못하고 있다. 그러므로 댐의 기능을 효율적으로 수행하기 위하여 댐 제체 시공전에 기초지반의 처리가 필요하며 특히,

그라우팅공법은 기초지반의 보강 및 양압력, 침투수량을 저감하는 중요한 보강공법으로 사용되고 있다.

본 연구는 암반 그라우팅이 실시된 4개 현장의 댐 시공 사례를 먼저 설명하고 둘째로 차수 그라우팅 및 압밀 그라우팅의 시공전·후의 Lugeon값과 RQD와의 상관성, Lugeon 값과 단위시멘트량과의 상관성, RQD와 단위시멘트량과의 상관성을 비교·분석하여 공학적 거동특성을 고찰하였다. 셋째로 댐 기초지반에서 차수 그라우팅 및 압밀 그라우팅 시공시 주입순서에 따른 인접주입공의 심도별 투수성 및 단위시멘트주입량 변화에 대한 연구를 실시하였다. 마지막으로 본 연구대상현장에 적용된 심도별 최대주입압력에 대하여 Housby(1982)가 제시한 심도별 최대주입압력과 비교하여 그 적용성을 평가하고 동시에 시공기준을 제시하고자 한다.

† 정희원, 삼부토건(주) 공학박사(E-mail : moonju@sambu.co.kr)

2. 댐 기초지반의 주입공법

2.1 주입공법의 개요

주입공법의 목적은 댐 기초부 지반의 지질학적인 결함을 개량하고 침윤선을 연장시켜 누수량의 감소, 세굴방지 및 기초의 지지력을 증대시키는데 그 목적이 있다. 댐 기초지반에 적용되는 주입공법은 일반적으로 차수 그라우팅을 중심으로 압밀 그라우팅을 병행하여 시공하는데 이는 상호보완 효과를 얻기 위하여 인접구간에 압밀 그라우팅을 선 시공하고 차수 그라우팅을 후 시공한다. 그리고 주입압력은 수압시험 결과에 근거하여 암반의 균열상태, 물·시멘트 농도비 및 주입깊이 등에 따라 다르지만 시멘트 그라우트의 배합은 물·시멘트비(W/C)는 10 : 1을 기준으로 할 경우가 일반적이다.

2.2 최대주입압력과 심도

일반적으로 토층구간은 최대 주입효율을 얻기 위하여 주입압력을 가능한 한 높게 적용하고 있으나 암반그라우팅에서는 주입압력을 결정할 때 기초지반을 손상시키지 않는 보통 주입압력(Moderate pressure)을 채택하거나, 기계 굴착이나 발파에 의해 기초암반의 넓혀진 균열을 채우기 위하여 높은 주입압력(High pressure)을 적용하는 두 가지의 방법이 있다. 단, 암반 표층구간의 주입압력은 표층구

간의 암반을 이동시키거나 그라우팅재료의 과다한 유출이 발생되지 않도록 채택하여야 한다. 따라서 그라우팅공사의 설계 및 시공시 적용되는 주입압력은 0.23bar/m으로도 연암(Weak rock)과 보통암(Average rock)에서 만족할 만한 결과를 보이는 반면에 극경암(Very sound rock)에서는 주입압력을 0.23bar/m에 2배의 크기의 주입압력을 적용하고 있다. 최대주입압력과 심도와의 관계를 연암(Weak rock), 보통암(Average rock) 및 경암(sound rock)에 따라 그림 1과 같은 연구결과가 있다.

Sabarly(1968)는 적절한 주입압력의 선택은 기술적인 문제에 크게 의존하지 않는다고 주장하였다. 이는 보통 주입압력(Moderate pressure)을 선호하는 기술자는 주입압력을 0.23bar/m를 채택하는 반면에, 다른 기술자는 변형 그라우트(Displacement grout)개념의 주입압력인 1.00bar/m을 적용하여 그라우팅 작업을 해왔기 때문이다.

따라서 그라우팅 작업시 적절한 주입압력의 선택은 그라우트재료의 과다누출이나 암반 표층부에서 과다한 변형을 발생시키는가를 관찰하면서 단계적으로 서서히 주입압력을 상승시키면서 그라우팅을 실시하여야 한다.

2.3 Lugeon Test

수압시험(Lugeon Test)은 공내에 물을 주입하여 암반의 투수성을 결정하는 시험으로써 1Lu(Lugeon)은 10bar의 압력에서 시험구간 1m당 1분에 주입되는 누수량이 1ℓ가 되는 조건의 투수능을 의미한다. 그러나 수압시험 시 적용되는 최대수압인 10bar의 압력은 대개의 그라우팅에서 너무 고압이므로 이보다 낮은 압력으로 시험을 하고 이를 보정하여 Lu값을 산정하며 보정 방법은 아래 식 (1)과 같다.

$$Lugeon값 = \text{누수량}(\ell/m/\text{min}) \times \frac{10(\text{bar})}{\text{실제압력}(\text{bar})}$$

$$(1 \text{ Lugeon} = 1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}) \quad (1)$$

수압시험시 압력 적용은 낮은압력→중간압력→최고압력→중간압력→낮은압력의 5단계로 실시하며, 암반의 조건이 높은 압력을 적용하여도 변위나 파쇄가 발생하지 않는다면 최대 10bar까지 적용할 수 있다. 그러나 일반적으로 낮은 압력을 가하는 이유는 시험압력이 파쇄압력 이상에서 예상하지 못하는 순간에 파쇄가 일어나면 더 이상의 압력을 가할 수 없기 때문이다. 지표면 또는 터파기면에서 가까운 얇은 심도나 연암에서 높은 압력으로 주수하면 지반이 교란되므로 낮은 압력을 적용하고 Lugeon값을 보정하여 산출한다.

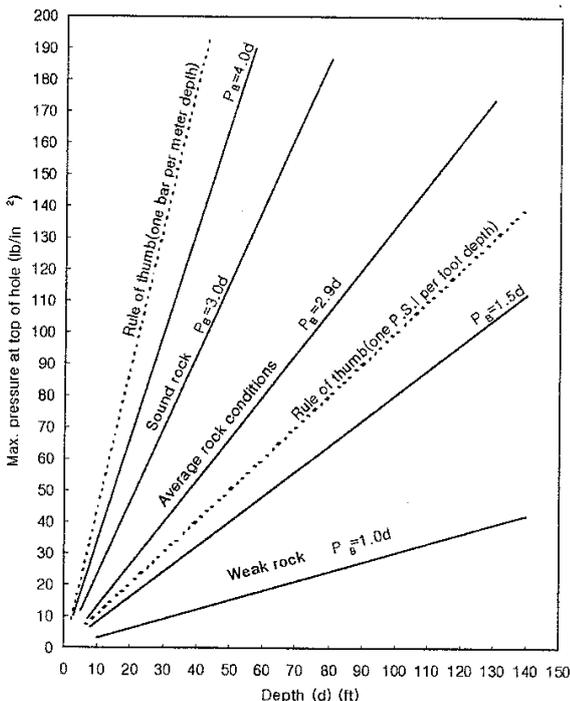


그림 1. 최대주입압력과 심도와의 관계(Houlsby, 1982)

3. 현장개요

3.1 시험방법

주입을 위한 천공방식은 로오테리 타입의 천공기를 사용했으며 천공구경은 조사공(Pilot hole)의 경우는 AX-size($\phi=36.1\text{mm}$)를 적용하였으며, 검사공(Check hole)인 경우는 NX-size($\phi=63.5\text{mm}$)로 실시하였다. 조사공은 주입 1차공으로 하여 2차공, 3차공 등의 순서로 중앙내삽법에 의해 시공하였으며 천공을 종료한 그라우팅 홀에 대하여 물 세척을 실시한 후 주입을 실시하였다. 주입방법은 단계별로 천공과 주입을 실시하였으며 최종단계까지 반복하는 다단식 주입공법을 채택하였다. 본 연구 대상현장에서 주입압력은 표층부의 암반상태가 불량하여 높은 주입압력을 적용할 경우 인위적으로 암반파쇄를 발생시킬 가능성이 있어 하부로 갈수록 주입압력을 증가시키는 방식으로 시행하였다. 그리고 주입재료는 포트랜드 시멘트를 사용하였고 시멘트 그라우트의 배합은 물·시멘트비(W/C)는 10 : 1의 범위로 실시하였다.

3.2 시공현황

본 연구자료로 사용된 4개 현장의 댐 기초지반은 암반으로 차수성을 개선하기 위하여 차수 그라우팅과 압밀 그

라우팅을 실시하였고 이에 따른 현장별 댐 형식, 시공위치, 암질, 그라우팅 제원 및 투수성 확인시험 등의 시공현황은 표 1과 같다.

그리고 본 연구에 이용된 Lugeon값, RQD, 최대주입압 및 단위시멘트주입량에 대한 시험자료는 조사공과 검사공에서 수행한 루전시험(Lugeon test), 코어채취 및 주입관리 시스템 등에 의하여 확인되었으며, 본 시험공의 시험결과에 대한 신뢰성에 따라 국가 주요구조물인 댐의 안전성에 직접적인 영향을 미치므로 이를 고려하여 현장시험관리를 실시하였다.

3.3 지질특성

3.3.1 제 1현장

본 지역의 지질학적 특성은 지리산 편마암 복합체로서 주로 변성암류가 분포하고 있다. 변성암류는 여러 종류의 편마암으로 구성되어 있으며 이는 퇴적암의 광역 변성작용과 이에 수반된 화강암화 작용에 의해서 생성된 것이나 시대는 명확하지 않다.

하부지반은 반상변정 편마암이 분포하며 유역은 반상변정 편마암, 석회규산염암 및 백립암이 분포한다. 댐 지점의 좌안은 9.0m~12.8m, 우안은 1.5m~3.8m 두께의 붕적층, 풍화잔류토 및 풍화암이 분포하고 그 하부에 암반층이 위치하고 있다. GL -9.0m~GL -18.0m 심도구간에 RQD

표 1. 시공현황

구 분	제 1현장		제 2현장		제 3현장		제 4현장		
댐 형식	콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐		중력식 콘크리트댐		콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐		콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐		
시공위치	본댐 프린스 하부		제수문 하부		본댐 지중연속벽 하부		본댐 우안부 파쇄대		
암 질	변성암(편마암 복합체)		퇴적암(사암, 세일 호층구조)		퇴적암(사암, 세일 호층구조)		퇴적암, 화산암 (화성암 관입)		
그 라 우 팅	형 식	압밀 ○	차수 ○	압밀 ○	차수 ○	×	○	×	○
	공 수	648 (Pilot 21) (Check 9)	231 (Pilot 15) (Check 8)	시험 시공 (Pilot 18) (Check 3)	시험 시공 (Pilot 4) (Check 2)	-	28 (Pilot 7) (Check 7)	-	41 (Pilot 8) (Check 1)
	심 도	5m	40m	5m	20m (Pilot 25m)	-	20m (Pilot 25m)	-	40m (Pilot 45m)
	배 치	2 ~ 3열 열간격 : 1.5m 공간격 : 2m	1열 열간격 : - 공간격 : 1.5m	5열(지그재그) 열간격 : 3m 공간격 : 3m	2열(지그재그) 열간격 : 1m 공간격 : 3m	-	1열 열간격 : - 공간격 : 3m	-	2열 (지그재그) 열간격 : 1m 공간격 : 3m
	주입 방법	-	일반 : 상향식 Pilot : 하향식	-	일반 : 상향식 Pilot : 하향식	-	일반 : 상향식 Pilot : 하향식	-	일반 : 상향식 Pilot : 하향식
	주입 압력	5.7lb/in ²	5.7 - 35.5lb/in ²	2.1lb/in ²	2.1 - 8.5lb/in ²	-	2.1 - 8.5lb/in ²	-	4.3 - 35.5lb/in ²
투수성 확인	Lugeon Test Boring Log		Lugeon Test Boring Log		Lugeon Test Boring Log		Lugeon Test Boring Log		

9%~12%인 균열대와 수직 절리가 협재되어 있고 파쇄대가 일부 분포하고 있다. 그리고 기타구역은 RQD가 50%이상의 비교적 양호한 상태이다.

3.3.2 제 2현장

본 지역의 기반암은 전구간이 중생대 경상계 낙동강통 마동층에 속하는 퇴적암류인 사암과 셰일이 호층을 이루며 발달되어 있으며, 좌안 및 우안 암반 경사부를 제외한 일부구간에서 기반암이 나타나는 것으로 조사되었다.

암석 노두면은 퇴적암의 특징인 평행구조로서 층리의 발달이 우세하고 절리가 발달되어 있고, 이 지역에서 관찰되는 절리는 다양한 방향성을 보여주고 있으며 좌안의 경우 절리의 간격은 약 20cm~80cm이며 1.5m~10m의 연속성을 보이고 있다. 또 이 지역에서 우세한 층리의 방향성은 주향이 N10°~30°E이며 경사는 5°~15°SE를 나타내고 우안의 상부지역에서는 주향이 N10°~20°E이며 경사는 10°~16°NW의 방향성을 보이며 층리방향이 국부적으로 변화하는 양상을 보이고 있다. 또 기반암의 상부층을 따라서는 기계적 풍화작용이 진행되고 있어 절리, 파쇄대 등 균열대가 발달하고 있어나 심도가 증가함에 따라 신선한 기반암으로 점진적 천이상태를 보이는 것으로 조사되었다.

3.3.3 제 3현장

본 지역의 지질은 주로 중생대 경상계의 퇴적암류가 주로 분포하고 있으며, 퇴적암류는 경상계 하부층인 낙동강통의 일부로서 하부에서부터 원지층, 마동층, 진주층 및 칠곡층의 순으로 분포하고 있고 낙동강통의 구성 퇴적암류는 역질사암, 사암, 사질셰일 및 셰일등이 주로 분포하며 수매의 석회암 또는 니질석회암이 박층으로 협재되어 있다. 지질구조는 단순하여 주로 N10°E~30°E의 주향을 가지며 5°~15°SE정도의 경사를 갖는 단사구조를 나타내고 있다.

댐 하부의 지질은 제4기의 충적층과 경상계 퇴적암층이 분포되어 있으며, 충적층은 모래 및 자갈이 주 구성물질이며 퇴적암은 회색사암과 갈색을 띤 셰일이 하류방향으로 경사져 있는 호층구조를 이루고 있다.

퇴적암의 층리는 N18°~30°E의 주향을 가지며 12°SE방향으로 경사져 있다. 사암내에는 N68°~80°W, N10°~18°E의 주향과 수직의 경사로 된 2조의 절리가 현저하며, 부분적으로 절리면은 벌어진 상태이다. 사암내의 절리면은 풍화 변색되어 있기도 하며, 셰일의 모래가 충전된 곳도 있다. 이러한 현상은 절리면을 통하여 지하수 유동이 있었으며, 추후 담수시의 누수유로가 될 가능성이 있음을 시사한다.

셰일내에는 층리의 주향과 거의 평행한 N36°~40°E의

주향과 수직의 경사를 갖는 절리가 형성되어 있으며 절리면은 대체로 열려있는 경우가 많고 점토가 충전되어 있다. 사암과 셰일의 접촉을 받은 셰일층의 표면은 풍화되어 세편으로 박리되는 현상을 보이고 있다. 층리의 경사방향과 절리의 방향성이 우수방향과 일치하고 있고, 셰일층과 사암층이 접하는 부위의 셰일층 표면의 슬레이킹(Slaking) 현상 등을 고려할 경우 기초암반의 수밀성에 있어 불리한 상태이다.

3.3.4 제 4현장

본 지역의 지질특성은 경상계 신라통의 퇴적암류(대구층)와 이를 관입, 또는 분출한 화산암류와 상기 신라통의 제 암층을 관입한 불국사통의 화성암류로 주로 구성되어 있다. 최하부층인 대구층은 언양을 지나는 언양단층 동부 일원에 널리 분포되어 있다. 하부는 암록색, 녹회색 암회색의 사암, 실트스톤, 사질실트스톤, 사질셰일 및 셰일이 우세하며 조사대상 지역에 해당되는 하부층은 자색의 사질 실트스톤, 실트스톤, 사질셰일, 셰일 등이 우세하며, 녹회색 내지 암회색 및 암녹회색의 사암, 사질실트스톤, 실트스톤, 사질셰일 및 셰일 등과 호층을 이루고 있으며, 담회색의 이암이 박층으로 협재되어 있다. 언양단층 서쪽부분을 접하고 있는 화성암류는 경상계 신라통의 안산암질암, 석영안산암류 및 반암류등이 대부분이며, 상기의 퇴적암류와 화산암류를 관입한 불국사통의 화성암류로 구성된다. 불국사통의 화성암류는 주로 화강암(언양 화강암, 흑운모 화강암)이며, 화강섬록암, 반암류 및 맥암등으로 구성된다. 본 지역의 기반암을 부정합으로 덮고 있는 제4기의 충적층은 자갈, 모래, 점토등으로 구성되며, 지류들의 연변부를 따라 분포한다.

4. 주입효과 및 상관성 분석

4.1 주입 전, 후의 차수효과

그림 2와 표 2는 연구대상 현장별 그라우팅 전, 후의 투수성의 변화를 심도에 따라 나타내고 있다. 제1현장의 경우 기초지반은 지리산 편마암 복합체로서 주로 변성암류가 분포하는 지역의 댐 하부에 차수 그라우팅과 압밀 그라우팅을 시공한 결과이며, 차수 그라우팅의 경우 조사공에 대한 심도별 Lugeon값은 0.00Lu~35.90Lu으로 다양하게 나타나고 있으며, 조사공의 심도 5m~10m구간과 30m지점, 검사공은 10m, 30m, 40m지점에서 대체적으로 큰 루전값이 보이고 있는데 이는 본 구간에서 파쇄대가 형성되어 있는 것으로 조사되었다. 따라서, 평균 Lugeon값이 주입전에

는 0.76Lu~6.09Lu의 투수성을 보이고 있다. 차수 그라우팅 시공 후 검사공에서 조사된 평균 Lugeon값은 0.01Lu~0.23Lu으로 감소하였으며, 압밀 그라우팅의 경우 주입심도 5m 단일구간에서 주입전 평균 Lugeon값이 28.47Lu에서 주입후 0.17Lu으로 변성암지역에서의 주입효과는 주입 전보다 우수한 차수효과를 보이고 있는 것으로 조사되었다. 본 연구대상인 제 1현장의 경우 즉, 변성암지역의 차수 그라우팅 및 압밀 그라우팅의 차수효과를 비교해 보면 차수 그라우팅은 평균 Lugeon값이 0.01Lu~0.23Lu이고, 압밀 그라우팅은 평균 루전값이 0.17Lu으로 167.5%의 차수 개선효과를 보이고 있다. 이러한 차수효과는 원지반 굴착시 이완영역이 굴착면 부근에서 주로 발생되므로 본 구간에 대한 그라우팅의 적용이 차수성 확보에 주요 요소로 작용함을 알 수 있다. 이는 댐 기초하부지반의 투수성에 대한 시방기준인 3Lu이하(댐 설계기준, 2001)와 비교 했을 때 매우 우수한 차수효과이다.

제 2현장의 차수 그라우팅의 조사공에 대하여 심도별 투

수성을 조사한 결과 3.90Lu~12.03Lu의 투수성을 보이고 있다. 이는 지질특성이 변성암인 제 1현장에 비하여 퇴적암으로 이루어진 제 2현장 지역이 더 높은 투수성을 보이고 있다. 차수 그라우팅 시공 후, 검사공에서 실시한 Lugeon 시험결과에 의하면 현장의 투수성은 0.35Lu~1.85Lu 정도의 개선효과가 있음을 알 수 있다. 이는 차수 그라우팅 실시 후 퇴적암 지역인 제 2현장의 차수성이 향상된 것을 보여주고 있다. 그러나 표 2에서와 같이 제 1현장의 투수성 개선효과와 비교해 보면 제 2현장의 투수성 개선효과가 약간 낮은 것으로 조사되었다. 이는 퇴적암의 특성인 층리나 절리의 간격, 파쇄대가 상대적으로 발달되어 있었으므로 이에 대한 영향이라고 판단된다. 압밀 그라우팅은 주입전 평균 Lugeon값이 12.88Lu이며, 압밀 그라우팅 실시 후의 개선된 평균 Lugeon값은 0.57Lu으로 주입전보다 226% 정도 차수성이 향상되었다. 따라서 제 2현장의 차수 그라우팅과 압밀 그라우팅에서 주입구간 5m에서 각각 차수효과를 비교해보면 차수 그라우팅은 주입전 평균 Lugeon값이

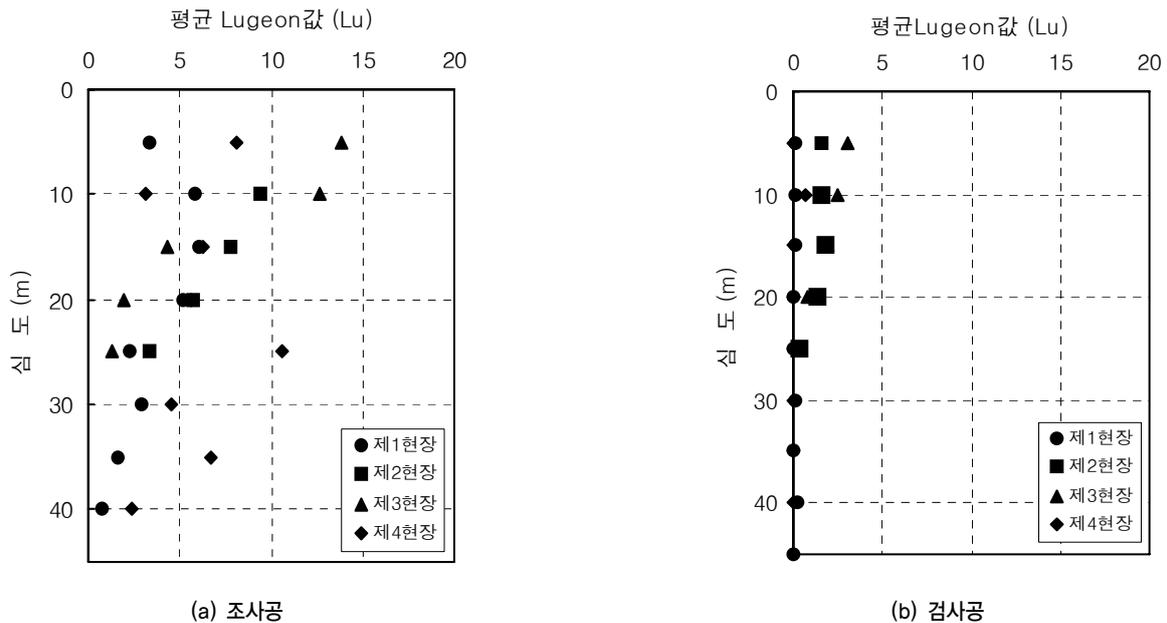


그림 2. 심도와 평균 Lugeon값

표 2. 현장별 주입 전, 후의 투수성의 변화

대상현장	지 질	주입전의 투수성(Lu)		주입후의 투수성(Lu)	
		차수	압밀	차수	압밀
제1현장	변성암 (편마암)	0.76~6.09	28.47	0.01~0.23	0.17
제2현장	퇴적암 (사암, 세일)	3.9~12.03	12.88	0.35~1.85	0.57
제3현장	퇴적암 (사암, 세일)	1.30~13.81	-	0.84~3.04	-
제4현장	퇴적암, 화산암 (사암, 세일, 안산암, 화강암)	2.37~10.58	-	0.00~0.67	-

3.90Lu~12.03Lu이고 주입 후 평균 Lugeon값은 0.35Lu~1.85Lu이다. 그리고 압밀 그라우팅은 주입전 평균 Lugeon값이 12.88Lu이고 주입 후 Lugeon 값은 0.57Lu으로 지표면 부근에서는 압밀 그라우팅의 차수효과가 일반적으로 우수한 것으로 나타났다.

제 3현장은 사암과 세일로 구성된 퇴적암이 대부분을 차지하는 지역으로, 제2현장의 경우 계수문 하부에 압밀 그라우팅을 선 시공한 후 차수 그라우팅을 실시하였으며, 제 3현장의 경우 댐 하부 지중연속벽 하부에 차수 그라우팅만을 실시한 현장이다. 조사공의 심도별 투수성을 조사해 본 결과 평균 Lugeon값이 3.90Lu~12.03Lu의 투수성을 보이고 있으며, 제 3현장의 경우 평균 Lugeon값이 1.30Lu~13.81Lu과 비슷한 양상을 보이고 있다. 즉, 제 3현장과 제 2현장은 동일한 지역 내에서 수행된 그라우팅공사로 유사한 지반조건에서 조사된 결과라 볼 수 있다. 또한, 본 현장의 차수 그라우팅 검사공의 평균 Lugeon값이 0.84Lu~3.04Lu로 제 2현장의 평균 Lugeon값인 1.30Lu~13.81Lu과 비슷한 양상을 보임을 알 수 있었다.

제 4현장의 경우 퇴적암과 이를 관입 또는 분출한 화산암류와 화성암류의 복잡한 지질특성을 보이는 지역으로 댐 우안부에 차수 그라우팅만을 시공한 현장으로 주입전의 평균 Lugeon값은 유사한 지질특성을 보이는 제 2현장, 제 3현장과 유사한 2.37Lu~10.58Lu로 조사된 반면 주입후의 투수성을 비교해 보면 평균 Lugeon값이 0.00Lu~0.67Lu로 제 2현장, 제 3현장보다 월등히 우수한 것으로 나타났다. 이는 비록 유사한 암질을 가지는 지역이라 할지라도 암반 그라우팅의 차수효과는 암반의 절리특성, 파쇄대, 지하수의 영향, 암반의 종류 등에 의해 영향을 받는다고 판단된다.

표 2에서 현장별 주입 전,후의 투수성의 변화를 살펴보면, 제 4현장의 경우 차수 그라우팅만 실시하였으나 제 2, 3현장에 비하여 차수효과가 좋은 것으로 나타나는 이유는 주입압

력이 제 2, 3현장의 경우 2.1~8.5lb/in²이나 제 3현장의 경우 4.3~35.5lb/in²으로 주입압력이 크며 안산암 및 화강암인 화성암류가 퇴적암류와 혼재되어있기 때문인 것으로 판단된다. 단, 주입을 위한 천공방식은 로우타리 다입의 천공기를 사용했으며 그라우팅의 배치는 공간격이 3.0m로 동일하고 주입방법은 조사공의 경우 모두 하향식으로 적용하였다.

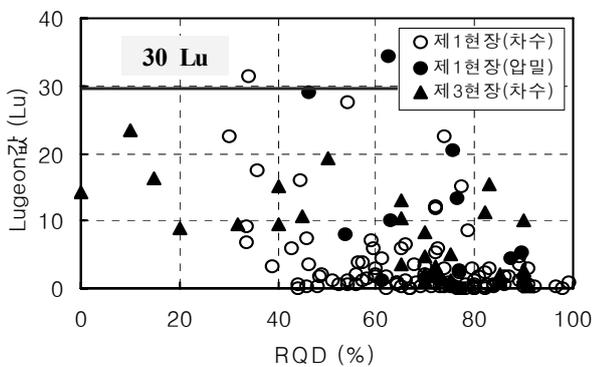
4.2 Lugeon값과 RQD와의 관계

그림 3(a)는 제 1현장, 제 3현장의 차수 그라우팅과 압밀 그라우팅을 실시하기 위한 조사공의 Lugeon값과 RQD의 관계를 나타낸 것이다. 제 1현장은 편마암이 대부분을 차지하는 지역이며, 제 2현장은 사암과 세일의 퇴적암이 대부분을 차지하는 지역이다. 이 두 현장의 경우 그라우팅 작업전의 조사공에 의한 RQD와 Lugeon값의 관계는 각각의 데이터들의 분산도가 크며, 어떠한 정량적인 관계를 찾는 것은 힘든 것을 알 수 있다.

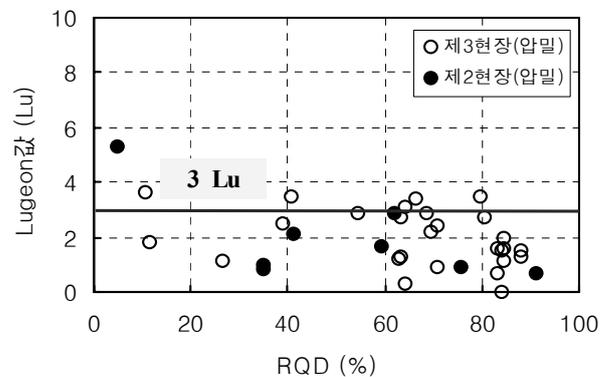
한편, 그림 3(b)는 퇴적암이 대부분인 유사한 지반조건을 가진 제 2현장과 제 3현장의 그라우팅 작업 후 검사공에서 조사된 RQD와 Lu값의 관계를 나타내고 있다. 주입 후 제 3현장의 경우 그라우팅에 의한 RQD 개선효과는 없는 것으로 판단되며, 차수효과는 주입 전 4Lu이상의 투수성을 가지는 구간의 Lugeon값들이 3Lu이하로 차수성이 향상된 것으로 조사되었다.

4.3 Lugeon값과 단위시멘트주입량의 관계

제 1현장과 제 2현장의 차수 그라우팅과 압밀 그라우팅 시공 시 Lugeon값과 단위시멘트주입량의 관계는 그림 4와 같다. 투수성이 낮은 변성암 지역인 제 1현장의 경우 Lugeon값과 단위시멘트주입량의 관계는 상관성이 불명확한 것으로 조사되었다. 비교적 투수성이 큰 퇴적암 지역에



(a) 조사공



(b) 검사공

그림 3. Lugeon값과 RQD

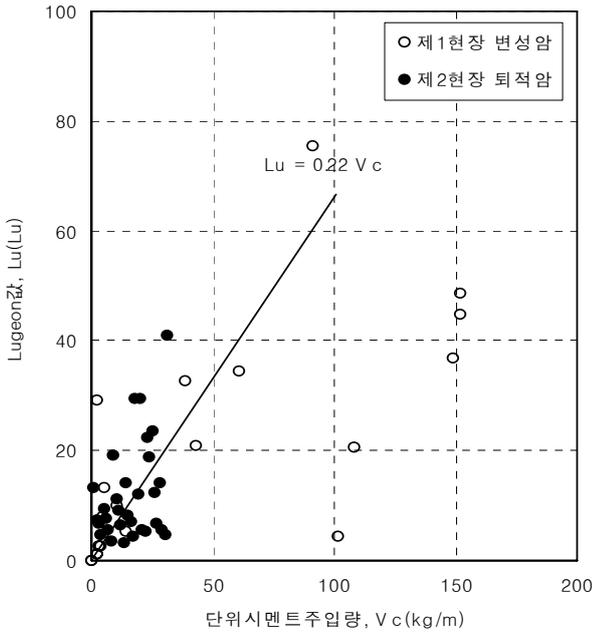


그림 4. 암종별 Lugeon값과 단위시멘트주입량

서의 Lugeon값(Lu)과 단위시멘트주입량(Vc)의 관계는 선형적($Lu=0.22Vc$)으로 비례한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 관계는 층리가 발달된 퇴적암에 비해 비교적 낮은 투수성을 가지며 열리가 발달된 변성암지역에서의 Lugeon값과 단위시멘트주입량의 관계는 분산도가 큰 것으로 조사되었다.

4.4 RQD와 단위시멘트주입량의 관계

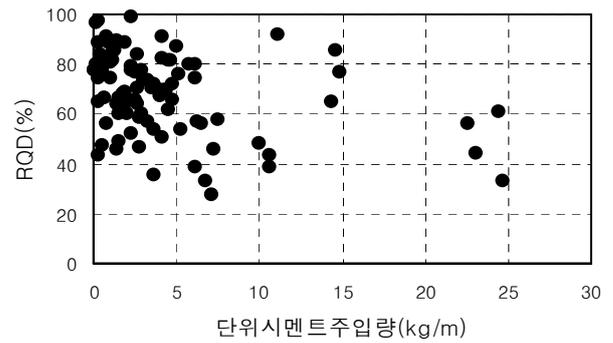
그림 5는 제 1현장에서의 차수 및 압밀 그라우팅 조사공에서 얻어진 RQD와 단위시멘트주입량의 상관관계를 나타내고 있다. 제 1현장 기초지반의 RQD는 거의 50%이상의 양호한 상태로 지반특성은 전술한바와 같이 편마암으로 구성된 변성암으로 이루어진 지역이다.

차수 그라우팅과 압밀 그라우팅에 의한 RQD와 단위시멘트주입량의 관계는 앞서 분석한 Lugeon값과 단위시멘트주입량의 관계와 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다. RQD가 증가할수록 단위시멘트주입량은 감소하는 것으로 조사되었다. 이는 단위시멘트주입량은 지반내에 존재하는 공극에 직접적인 영향을 받는다는 사실을 알 수 있으며, RQD는 단위시멘트주입량의 결정하는 요소로 작용한다는 사실을 알 수 있다.

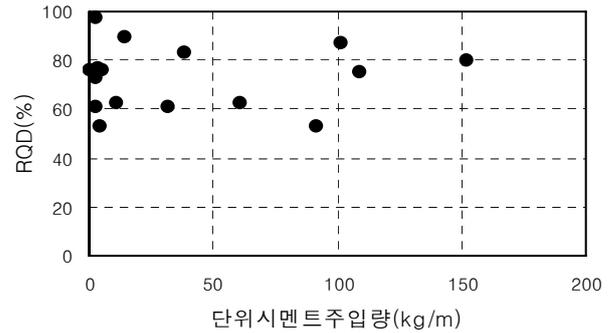
4.5 시공차수별 평균 Lugeon값과 평균단위주입량의 관계

4.5.1 차수 그라우팅

사암과 세일로 구성된 퇴적암이 대부분으로 이루어진 제



(a) 차수 그라우팅



(b) 압밀 그라우팅

그림 5. 제 1현장 조사공의 RQD와 단위시멘트주입량

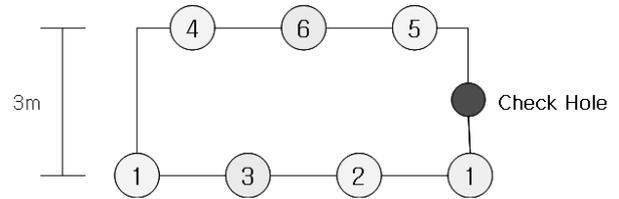
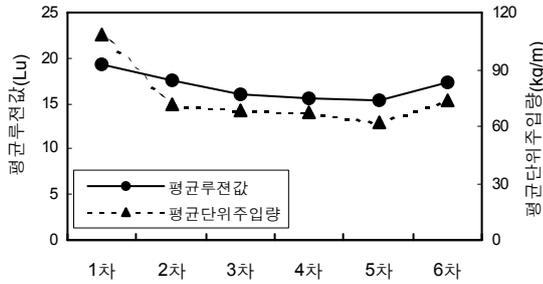


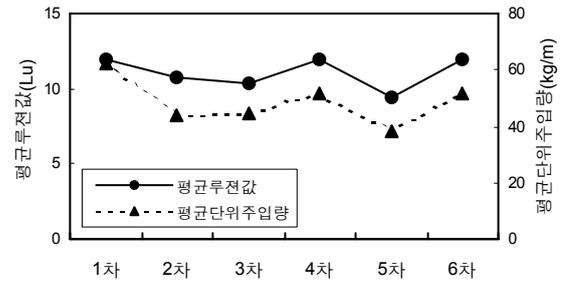
그림 6. 차수 그라우팅 시공순서도

2현장은 그림 6과 같이 Curtain 그라우팅 시공순서에 따른 평균 Lugeon값과 평균단위시멘트주입량의 관계는 그림 7과 같다.

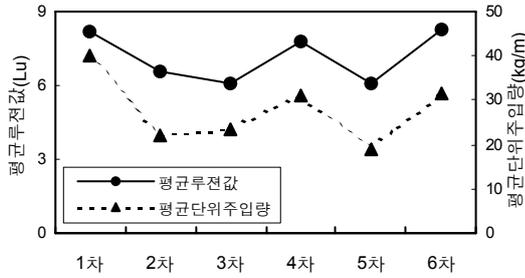
평균 Lugeon값과 시공순서와의 관계를 살펴보면 전체적으로 심도가 깊어지면 평균 Lugeon값도 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 시공차수에 따른 평균 Lugeon값의 변화는 심도 5m구간과 20m구간에서는 인접 주입공의 영향은 거의 없는 것으로 조사되었으며, 심도 10m, 15m구간에서 비교적 인접 주입공과의 거리가 짧은 4차, 6차공은 인접 주입공의 영향을 받아 Lugeon값이 감소해야 하는 반면에 더 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 Curtain 그라우팅 시공 시 시공순서에 따른 평균 Lugeon값의 관계는 인접 주입공과의 간격보다 주입구간의 파쇄대의 유무, 절리 특성 등에 의한 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 한편, 시공차수에 따른 평균단위시멘트주입량은 시공차수와 평균 Lugeon값과의 관계와 거의 일치하는 경향을 보이는



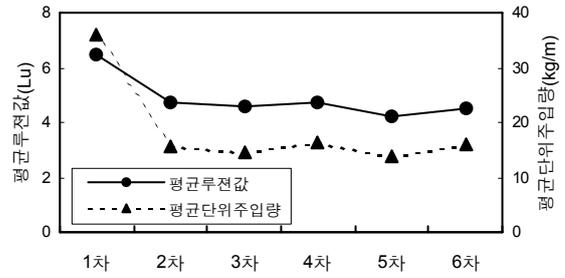
(a) 심도 5m



(b) 심도 10m



(c) 심도 15m



(d) 심도 20m

그림 7. 심도에 따른 평균 Lugeon값과 평균단위주입량

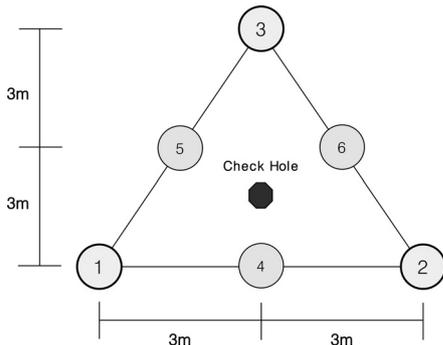


그림 8. Consolidation그라우팅 시공순서도

것으로 조사되었다.

4.5.2 압밀 그라우팅

그림 9는 제 2현장의 제수문 하부에서 실시한 압밀 그라우팅의 시공순서에 따른 평균 Lugeon값과 평균단위시멘트주입량의 관계를 나타낸다. 본 현장의 시공차수에 따른 평균 Lugeon값의 변화를 살펴보면 비교적 주입공들의 간격이 넓은 1차, 2차, 3차공은 인근 주입공에 의한 평균 Lugeon값의 영향이 거의 없는 것으로 조사되었으며, 비교적 주입공들의 간격이 좁은 4차, 5차, 6차공은 Curtain 그라우팅 시공시의 시공차수에 따른 평균 Lugeon값의 관계와 다르게 인근 주입공의 영향을 받아 평균 Lugeon값이 급격히 감소한 것으로 조사되었다. 이는 Consolidation 그라우팅의 시공심도가 5m인 단일심도로서 표층암반의 기계굴착 및 발파에 의해 발생된 균열이나 파쇄대에 그라우

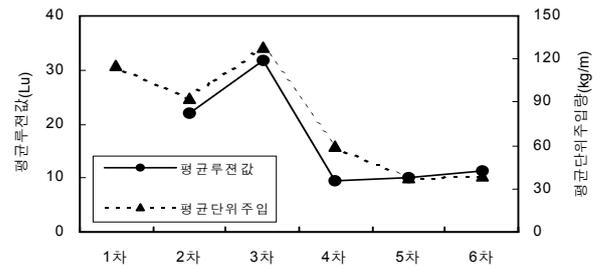


그림 9. 시공차수에 따른 평균Lugeon값과 평균단위주입량

트가 침투주입 됨에 따른 영향이라 판단된다.

한편, 시공차수에 따른 평균단위주입량의 관계는 차수 그라우팅 시와 유사한 결과로 시공차수와 평균 Lugeon값과의 관계와 거의 일치하는 경향을 보이는 것으로 조사되었다.

4.6 심도와 최대주입압력과의 관계

그림 10은 암반에 그라우트 주입시 최대주입압력과 심도와의 관계를 암반의 종류와 비교하여 나타내었다 제 4현장의 경우에는 사암과 이암의 퇴적암류 또는 이를 관입한 화산암류와 암층에 관입한 화성암류가 주성분 이루는 지역으로 암반 그라우팅 시공시 적용된 심도별 주입압력의 크기를 도시하였다. 그 결과 제 4현장의 최대주입압력은 심도의 증가량에 거의 4배와 일치하는 것으로 조사되었으며, 본 현장의 주입 후 차수효과는 주입 전 평균 Lugeon값이 2.37Lu~10.58Lu인 투수성이 주입 후 0.00Lu~0.67Lu로 개

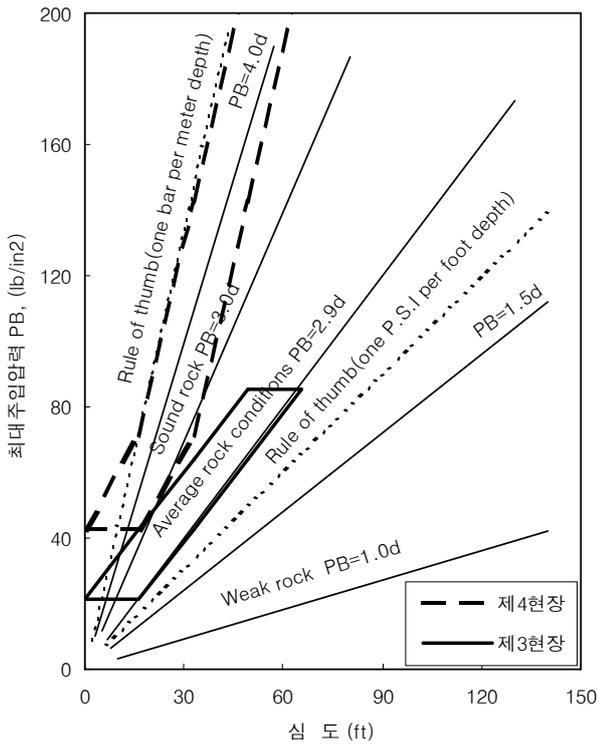


그림 10. 제 3, 4현장의 최대주입압력과 심도와의 관계

선된 것으로 조사되었다. 제 3현장은 사암과 세일로 이루어진 퇴적암 지역으로 본 현장의 심도별 최대주입압력의 크기를 살펴보면 2.9bar/m와 3.0bar/m 사이에 존재하는 것으로 조사되었다. 주입 후 차수효과는 주입 전 평균 Lugeon값이 1.30Lu~13.81Lu에서 주입 후 0.84Lu~3.04Lu로 개선된 것으로 조사되었다. 현장별 최대주입압력범위에 따른 차수효과를 비교해 보면 심도의 4배의 주입압력을 적용한 제 4현장의 차수효과가 주입압력이 3.0bar/m 이하로 시공된 제 3현장보다 차수효과가 우수한 것으로 조사되었다.

5. 결 론

본 연구는 4개의 댐 시공 사례현장에 대하여 댐 기초지반에서 실시한 암반 그라우팅시 시험공과 검사공에서 수

행된 시험데이터를 이용하였다. 현장시험을 통하여 확인된 Lugeon값, RQD, 단위시멘트주입량 및 최대주입압력과의 상관관계를 비교·분석하였다. 그리고 지질별 그라우팅 전후의 차수특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 시험현장의 경우 댐 기초지반에 그라우팅을 실시한 후 차수성에 관한 개량효과는 변성암지역이 퇴적암 지역 보다 우수한 것으로 조사되었다.
- (2) 암밀 그라우팅의 차수효과가 Curtain 그라우팅 보다 우수한 것으로 나타났으며, 이는 기초지반에서 기계굴착이나 발파에 의하여 암이 이완되므로 차수효과를 높이기 위하여 표층부를 처리하는 암밀 그라우팅을 시공하는 것이 필연적인 것으로 나타났다.
- (3) 단위시멘트주입량은 RQD가 클수록 증가하는 경향을 보이지만 Lugeon값은 RQD와 상관성이 낮은 것으로 조사되었다.
- (4) Lugeon값(Lu)과 단위시멘트주입량(Vc)의 관계는 서로 비례하며, 비교적 투수성이 큰 퇴적암 지역에서의 상관성이 높은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2001), 댐 설계기준. pp. 228.
2. Fergusson, F. F. and Lancaster-Jones, P. F. (1964), *Testing the Efficiency of Grouting Operations at Dam sites*, Proc. 8th Int. Congress on Large Dams, Edinburgh, Vol. 1, pp. 121~313.
3. Houlby, A. C. (1976), *Routine Interpretation of the Lugeon Water Test*, Q. J. Engg. Geo., Vol. 1, No. 9, pp. 303~313.
4. Houlby, A. C. (1977), *Engineering of Grout Curtain to Standard*, Proc. Am. Soc Civil Engineers, J. Geotech. Engg. Division, Vol. 103, No. 9, pp. 953~970.
5. Houlby, A. C. (1982), *Cement Grouting for Dams*, Conf., Grouting in Geotech, Speciality Conference, New Orleans, American Society of Civil Engineers, pp. 1000~1014.
6. Sabarly, F. (1968), *Grouting and Drainage of Dam Foundations in Rock of Low Permeability*, Geotechnique, Vol. 18, pp. 229~249.

(접수일: 2008. 11. 19 심사일: 2008. 12. 22 심사완료일: 2009. 1. 16)