

고성능 주입장비의 적용에 따른 주입재의 물성변화 및 주입효과 증진에 관한 연구

The Physical Properties Variation of Grout Materials and Improvement of Grouting Effects on Application of High Performance Injection Equipment

천 병 식*¹ Chun, Byung-Sik

김 진 춘*² Kim, Jin-Chun

김 백 영*³ Kim, Baek-Yung

Abstract

The grout based on solution type makes it difficult to get the improvement of ground strength and the effect of water curtain because it has lower strength and durability than suspension type. Nowadays, the technology of particle acceleration, that enhance the material permeability, such as grout based on solution type, and inexpensive grout, is being required. For these reasons, in this study, using wet milling system, we evaluated physical properties of manufactured factors such as water-cement ratio of particles before being milled, optimum milling capacity by controlling milling time and rpm, viscosity of materials, permeation coefficient, and unconfined compressive strength. Also, using micro wet milling apparatus which could manufacture ordinary Portland cement and high speed shear mix which could forcefully separate conglomerate particles in situ, we performed electrical resistivity investigation and falling head permeability tests to analyze differences of grouting effects. From these results, we found that the permeability of the applied equipment was much superior, and in the case of using high speed shear mixer, particles of grout material were well separated.

요 지

용액형 주입재의 경우 침투성은 우수하나, 현탁액형 주입재에 비하여 강도와 내구성이 현저하게 떨어지기 때문에 지반강도증대 및 차수효과를 얻기가 어렵다. 그러므로 현탁액형 그라우팅의 침투성 향상과 경제성을 고려하여 현장에서 초미립화된 주입재를 제조하는 분쇄기술의 실용화가 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 적용될 수 있는 습식분쇄기를 이용하여 피분쇄물의 물시멘트비와 분쇄장비의 분쇄시간과 분쇄속도를 조정하여 최적분쇄능력을 파악하고 피분쇄물의 점도, 침투성 및 일축압축강도 등과 같은 제조인자별 물리적 특성을 평가하였다. 또한, 보통포틀랜드시멘트를 현장에서 초미립화 할 수 있는 마이크로 습식분쇄기와, 뭉쳐진 입자를 강제로 분리할 수 있는 고속전단믹서를 현장에 적용하여 전기비저항탐사와 변수위투수시험으로 주입효과의 변화를 검토하였다. 그 결과 침투효과가 대단히 우수하였고 고속전단믹서를 사용한 경우 주입재의 입자분리가 뛰어난 것을 알 수 있었다.

Keywords : High speed shear mix, Micro wet milling, Optimum milling capacity

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Civil Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

*2 정회원, (주)한국지오테크 대표이사 (Member, President, Korea Institute of Geo Technology Inc.)

*3 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Civil Engrg., Hanyang Univ.)

1. 서론

국내에서는 지반개량의 목적으로 다양한 주입 재료 및 주입공법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이 중에서 시공 효과와 경제성이 우수한 초미립자 주입재가 점차 실용화되어 각종 그라우팅 현장에서 적용되는 추세이다(김진춘, 1999; 천병식, 1997, 2000).

최근 지반보강을 위한 연약지반 개량공법 중 그라우팅 공법은 지반주입 후 강도 및 내구성을 향상시키기 위하여 현탁액형 그라우팅을 사용하는 것이 바람직하지만 침투성이 떨어지기 때문에 용액형 그라우팅을 더 선호하는 경향이 있다. 그러므로 현탁액형 그라우팅의 침투성 향상과 경제성을 고려하여 현장에서 초미립화된 주입재를 제조하는 분쇄기술의 실용화가 절실히 요구되고 있다.

한편, 초미립화된 주입재를 사용하기 위한 방법으로는 현장에서 습식으로 분쇄된 마이크로시멘트를 이용하는 방법과 기 제조된 마이크로시멘트를 사용하는 방법이 있다. 그러나 습식으로 분쇄된 마이크로 시멘트를 이용한 그라우팅을 시행하는 경우 기 제조된 마이크로시멘트를 이용한 그라우팅에 비하여 시공성과 경제성 등 많은 장점들을 가지고 있다. 그리고 지금까지 국내 현장에서는 300rpm의 저속교반날개 회전식 그라우트 믹서가 일반적으로 사용되어 왔으나 그라우트를 충분히 혼합시킬 수 없는 단점을 가지고 있어서 1 μ m이하의 응집계 초미립자를 충분히 분산시키고 그라우팅효과를 증진시킬 수 있는 고속전단믹서를 사용해야 한다(ASCE, 1982).

따라서, 본 연구에서는 습식분쇄기를 이용하여 피분쇄물의 물시멘트비와 분쇄장비의 분쇄시간과 분쇄속도를 조정하여 최적분쇄능력을 파악하고 피분쇄물의 점도, 투수계수, 침투성 및 일축압축강도 등과 같은 제조인자별 물리적 특성을 평가하였다. 또한 마이크로 습식분쇄기와 고속전단믹서를 실제 현장에 적용하여 시험시공 및 주입효과를 분석하기 위해 전기비저항탐사 및 변수위투수시험을 실시하였다.

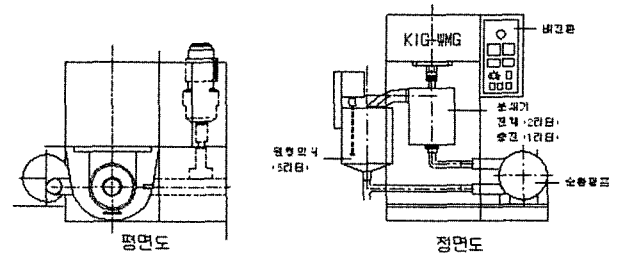


그림 1. 실험용 습식 분쇄장치 모식도

2. 실내실험

2.1 실험용 습식분쇄기

본 실험에서 사용된 습식분쇄기는 시멘트 슬러리를 만드는 5 l의 원형믹서, 피분쇄물을 초미립자화 시키는 2 l의 분쇄기, 슬러리를 원형믹서와 분쇄기로 순환시키는 순환펌프 등으로 구성되며, 주 모터의 최대분쇄속도는 900rpm이다(그림 1).

2.2 사용재료

실험을 위한 재료로 시멘트는 S사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 겔 형성용 주입재는 국내에서 가장 범용적으로 사용되고 있는 물유리 3호를 사용하였으며, 각 사용분체의 특성은 표 1, 2와 같다.

2.3 실험 항목 및 방법

2.3.1 점도

점도실험은 분쇄과정을 거친 피분쇄물을 비이커에 받아서 점도측정기를 사용하여 시행하였다. 현장에서 손쉽게 사용할 수 있는 소형의 회전 원통형 점도계를 사용하였으며, 시료액을 넣어서 정속 62.5rpm으로 회전시키면서 약 1분내의 저항치로 점도를 구하였다.

표 1. 시멘트의 물리·화학적 특성

	분말도 (cm ² /g)	비중	화학적 성분 (%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
시멘트	3169	3.15	22.94	5.57	3.33	64.05	2.58	0.61

표 2. 물유리 3호의 물리·화학적 특성

	비중	SiO ₂	Na ₂ O	고형분
물유리 3호	1.598	34.8%	14.1%	48.9%

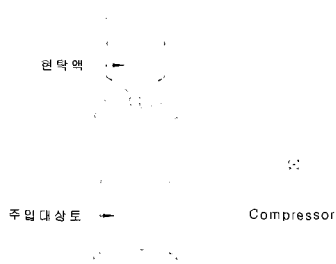


그림 2. 침투성 시험장치 모식도

2.3.2 침투성

피분쇄물의 분쇄시간에 따른 침투율 실험을 위해서 일정한 외부압력을 가압할 수 있는 compressor를 이용하여 주입압력 3kgf/cm^2 으로 주문진 표준사에 주입을 실시하였다. 실험장치로는 주입상황을 육안으로 관찰할 수 있도록 아크릴로 만든 직경 $7\text{cm} \times$ 높이 15cm 의 원통형 몰드를 제작 사용하였다(그림 2).

$$\text{침투율} = \frac{\text{침투깊이}(cm)}{15\text{ cm}} \times 100(\%)$$

2.3.3 일축압축강도

일축압축강도 시험은 크게 샌드질과 호모질로 나누어서 시행하였다. 샌드질 시편은 침투성 시험장치를 사용하여 크기가 직경 $7\text{cm} \times$ 높이 11cm 의 원통형 몰드로 제작하였으며, 호모질 시편은 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 의 큐빅 몰드로 제작하였다. 소정의 재령에서 제작된 시편의 일

축압축강도를 측정하였다.

2.4 실내실험 결과 및 분석

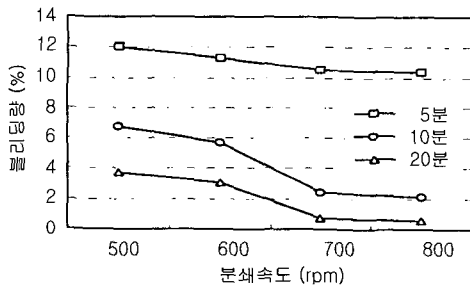
2.4.1 최적 분쇄조건 선정

실험실용 습식분쇄장치의 최적 분쇄조건을 선정하기 위해 물시멘트비를 100, 120, 160, 200%로, 분쇄시간을 5, 10, 20분으로, rpm을 500~800으로 변화시켜 실험을 실시하였다. 그림 3과 그림 4에 분쇄기회전속도와 분쇄시간에 따른 마이크로 습식 분쇄기의 분쇄능력을 나타내었다.

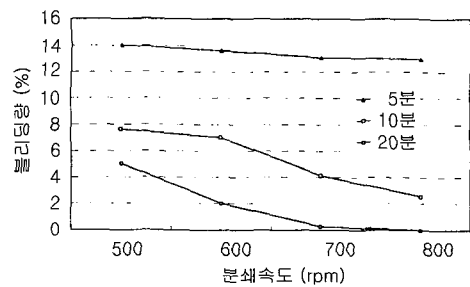
그림 3과 같이 분쇄기의 회전속도가 증가할수록 분쇄 성능이 우수함을 알 수 있다. 예를 들어 물시멘트비 200%에 따른 분쇄시간 10분인 경우 500rpm에서 블리딩값이 18%를 나타내지만 800rpm에서는 9%로 블리딩값이 현저하게 저하되는 것을 알 수 있다. 따라서, 회전속도가 높을수록 분쇄능력은 향상되지만 분쇄기의 안정성과 분쇄 효율 측면에서 700rpm 수준이 적합한 것으로 판단된다.

그림 4는 분쇄시간별 블리딩량으로 앞에서 도출한 최적회전속도인 700에서 물시멘트비가 200%인 경우 5분 분쇄시 31%의 블리딩을 나타내지만 20분 분쇄시 3%로 분쇄시간이 증가할수록 분쇄성능이 크게 향상됨을 알 수 있다. 그러나 10분을 전후해서 분쇄효율이 안정되는 것으로 판단되므로, 본 시험장치에 의한 최적 분쇄시간을 10분으로 선정하였다.

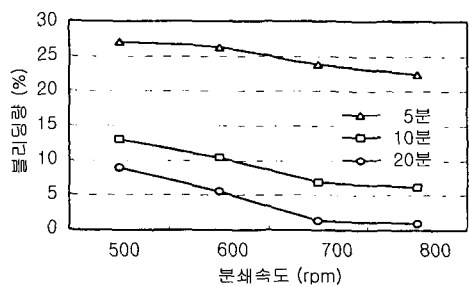
이하 주입재의 물성평가는 분쇄속도 700rpm, 분쇄시



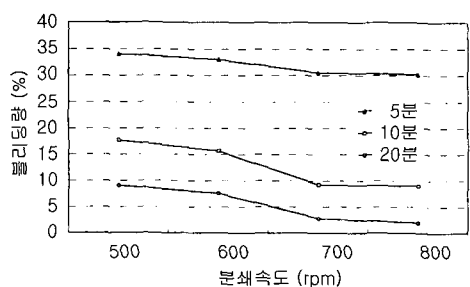
(a) 물시멘트비 : 100%



(b) 물시멘트비 : 120%

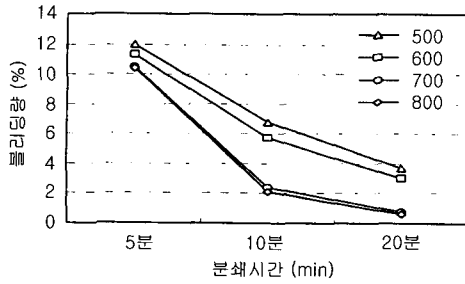


(c) 물시멘트비 : 160%

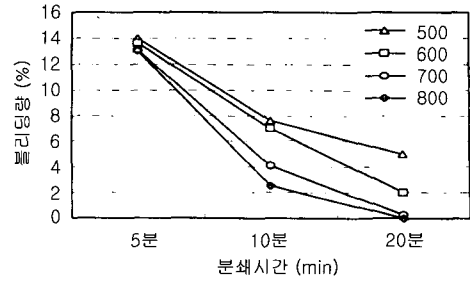


(d) 물시멘트비 : 200%

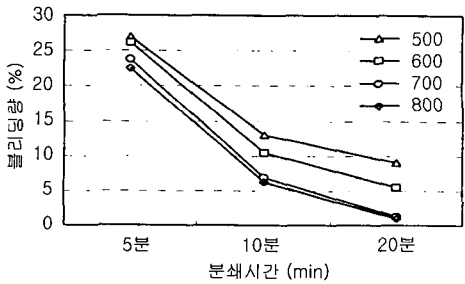
그림 3. 분쇄기 회전속도별 분쇄성능



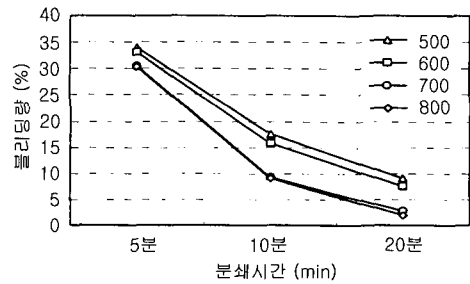
(a) 물시멘트비 : 100%



(b) 물시멘트비 : 120%



(c) 물시멘트비 : 160%



(d) 물시멘트비 : 200%

그림 4. 분쇄시간별 분쇄성능 (그림 안의 수치는 rpm)

간 10분으로 1종 시멘트를 마이크로 시멘트로 습식분쇄한 현탁액을 대상으로 실험하였다.

2.4.2 점도 실험결과

점도는 주입재의 전단응력에 가장 많은 영향을 미치며 주입재의 입도 형상 및 주입재의 배합에 따라 달라진다. 한편, 현탁액형 시멘트 밀크의 점도는 회전점도계를 이용하여 측정하며, 회전점도계의 원리는 회전봉의 마찰저항을 점도로 환산하는 것이기 때문에 공극사이를 통과하는 주입재의 마찰저항을 평가하는 데 가장 일반적으로 사용되고 있다. 소형의 회전 원통형 점도계를 사용하여 물시멘트비에 따른 1종시멘트의 점도를 구한 결과를 그림 5에 나타내었다.

물시멘트비 100%에서 분산제 무첨가시 점도가 400cps 인 반면에 분산제 1%사용시 50cps로 분산제를 사용하는 경우 점도가 급격히 낮아진다. 따라서 주입재 배합설

계시 점도를 저감시킬 수 있는 대책으로 분산제를 첨가하는 것이 효과적이며, 이후 주입재의 물성평가 시험은 분산제가 시멘트 중량의 1% 첨가된 것으로 한다.

2.4.3 침투성 실험결과

주입재의 물시멘트비는 100~200%로 하고 대상시료는 동일조건을 위해서 주문진 표준사를 사용하여 시료를 10cm씩 3층으로 나누어서 적절히 다짐하였으며 주입압도 1kgf/cm²로 각 시료마다 동일하게 가압하였다. 동일한 주입조건에 따른 시멘트 슬러리의 침투깊이 시험결과를 그림 6에 나타내었다.

물시멘트비가 높을수록 즉, 물시멘트비가 100%인 경우 침투깊이가 3cm인 반면에 물시멘트비가 200%인 경우는 13cm로 침투깊이가 증가함을 알 수 있다. 이는 현탁액이 묽을수록 점도가 낮아져서 침투성이 향상되었기 때문인 것으로 판단된다.

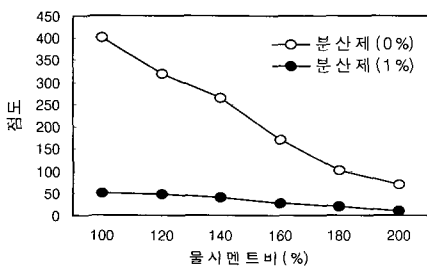


그림 5. 물시멘트비에 따른 점도

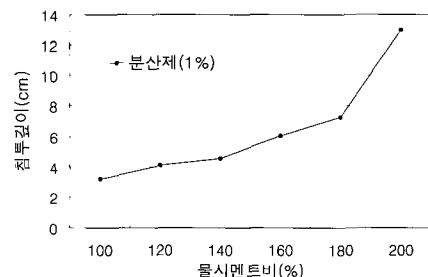


그림 6. 물시멘트비에 따른 침투깊이

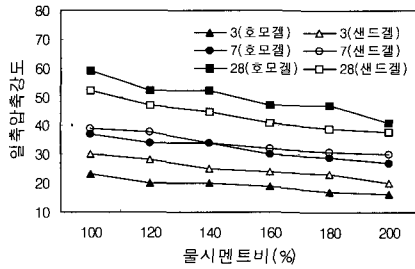


그림 7. 샌드겔과 호모겔의 일축압축강도 경향

2.4.4 일축압축강도 실험결과

물시멘트비에 따른 샌드겔과 호모겔의 1일, 3일, 28일 일축압축강도를 그림 7에 나타내었다.

호모겔과 샌드겔의 강도비는 재령이 길어질수록 호모겔강도가 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 28일 재령에서부터 호모겔강도가 샌드겔강도보다 더 커지는 역전현상이 발생하였다. 이와 같은 현상은 샌드겔이 호모겔보다 강도가 몇 배 더 크다는 종래의 생각들과 상당히 배치되는 것이다. 실제 지반내에서 주입되어 고결된 샌드겔은 혼합수가 대부분 배수(dewatering)되는 것이 그라우팅의 기본적인 기술사상이며, 본 실내실험의 경우 혼합수가 그대로 샌드겔 내에 존재하면서 수화반응이 진행되었기 때문에 모래입자를 결속시키는 페이스강도가 약해졌기 때문인 것으로 판단된다.

3. 시험시공

3.1 개요

현장 시공성 평가를 실시한 ○○저수지는 충청남도 청양군 화성면 수정리에 위치하며, 1958년에 준공된 총 32ha의 농경지에 농업용수를 공급하는 수리시설물로서 총저수량은 103ha-m, 댐형식은 존형이다. 저수지의 주요 제원은 표 3, 표 4와 같다.

3.2 장비 및 시험시공

3.2.1 마이크로 습식분쇄기

본 실험에 사용된 마이크로 습식분쇄기는 주입재의 현장 초미립화를 위하여 제작되었으며 전경과 모식도 및 주요제원은 다음과 같다(표 5, 그림 8).

보통포틀랜드시멘트의 초미립자화를 위한 작업공정은 그림 9와 같이 피분쇄물(보통포틀랜드시멘트)을 투입하여 원형믹서에서 물과 혼합한다. 여기에서 만들어진 시멘트 슬러리를 순환펌프를 이용해 마이크로 습식분쇄기에서 고분말로 분쇄한 후 다시 원형믹서로 이동한다. 이러한 작업을 10분간 계속 순환시켜 아지테이터에서 최종적으로 얻고자 하는 현장제조 마이크로시멘트가 제조된다.

최적 분쇄성능을 도출하기 위한 실내시험결과 현장에서 상용되는 물시멘트비 배합에 따른 분말도가 콜로

표 3. 일반 제원

관개 면적(ha)	유역 면적(ha)	저수량		제정고 (EL)	홍수위 (EL)	만수위 (EL)
		총저수량	유효저수량			
32	68	103 ha-m	99 ha-m	102.65	100.60	100.00

표 4. 시설 제원

댐형식	제장(m)	제고(m)	정폭(m)	홍수위상 여유고 (m)	법면경사	
					내측	외측
존형	92	14.5	3.0	0.6	2.5	2.0

표 5. 주요제원

품명	사항	비고
원형믹서	2HP Geared Motor	원통형
아지테이터	2HP Motor	직사각형
순환펌프	2HP Motor	150 ℓ/min
분쇄기	10HP Motor	700rpm
양수기	2HP Motor	

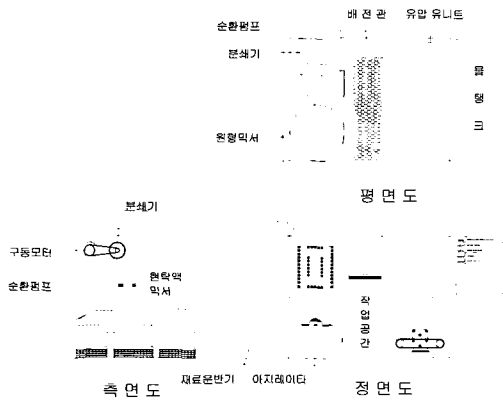


그림 8. 습식 분쇄기 모식도

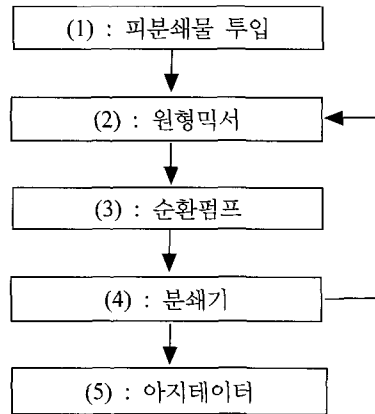


그림 9. 현장제조 마이크로시멘트 분쇄작업 순서도

이드수준에 도달하기 위한 분쇄시간은 15분이 가장 좋지만 경제적인 측면에선 10분이 가장 이상적인 분쇄시간으로 판단되었으며, 분쇄시간 10분에서 시간당 슬러리 생산량이 1.85m³로서 이는 국내 현장에서 그라우팅 시공량 공급에 원활히 대응할 수 있는 수준이다. 또한, 시멘트가 수화되어 물성변화가 시작되는 시점이 90분이상이 소요되므로 10분 동안의 분쇄공정 후 시멘트의 변질이나 성능저하 문제는 없는 것으로 판단되었다.

3.2.2 고속전단믹서

주입재의 뭉쳐진 입자를 강제로 분리시키는 고속전단믹서의 현장적용성 평가를 위하여 장비를 제작하였다. 전용전압은 220V이며 현장의 전기 상황을 고려하여 후면에 트랜스를 추가로 설치하였으며, 믹싱탱크의 최대 용량은 300ℓ 이나 믹싱의 효율과 기계적인 안전성을 고려한 적정 믹싱용량은 200ℓ 가 적당하다.

고속전단믹서의 정면도와 평면도는 그림 10, 그림 11과 같다. 컨트롤박스에 속도조절 다이얼을 사용하여 믹싱속도를 0~1800rpm까지 변화시킬 수 있었다.

고속전단믹서의 작동은 그림 11에서, 콘트롤 박스의 전원스위치를 ON에 위치시키고 피혼합물을 믹싱탱크 입구에 주입을 한다. 다음으로는 콘트롤 박스의 속도조절 다이얼을 원하는 혼합속도(rpm)까지 설정을 한다. 여기까지 되면 회전믹서의 셋팅은 끝난 것이며 믹싱탱크에 주입된 피혼합물은 이동관을 통과하여 믹서펌프로 이동하게 된다. 믹서펌프에서 혼합과정을 거친 혼합물은 다시 이동관을 통하여 믹싱탱크로 압송된다. 위와 같이 피혼합물은 일련의 과정을 순환하며 혼합된다.

3.2.3 시험시공

보통포틀랜드시멘트를 초미립화하는 마이크로 습식

표 6. 고속전단믹서의 주요제원

항 목	내 용	항 목	내 용
구조양식	고속 rotor 및 vortex mixer	혼합 적정시간	30~60 초
교반용량	200 ℓ	동력	7.5(AC 220/380 겸용)
믹서 회전수	0~1800 rpm	치수	1,570×1,200×2,000

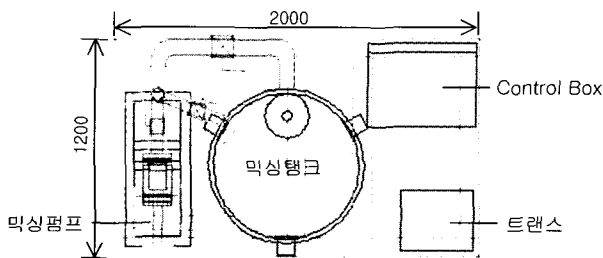


그림 10. 고속가변 회전믹서의 평면도

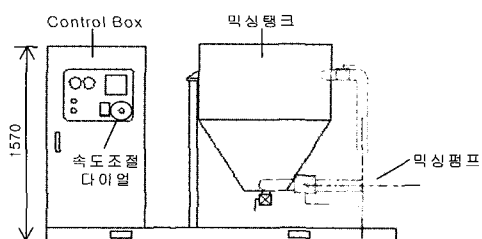


그림 11. 고속가변 회전믹서의 정면도

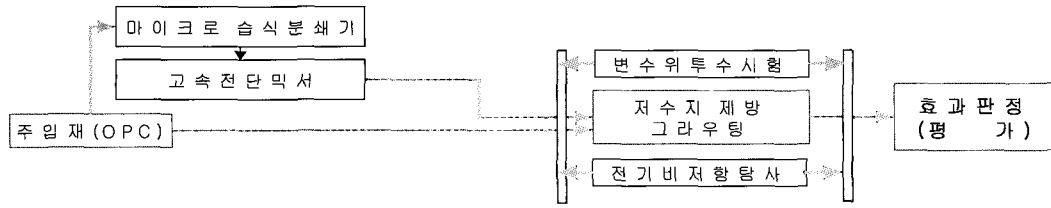


그림 12. 주요 시험 개요도

분쇄기와 피분쇄물의 뭉침을 강제적으로 분리시키는 고속전단믹서를 누수현상 및 제체 침하현상이 발생한 신리저수지에서 현장적용시험을 행하였다. 현장적용시험에 대한 시공 개요도는 그림 12와 같다.

현장에서 사용한 주입재는 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 분쇄기에서 분쇄과정을 거쳐 고속전단믹서로 이동, 1800rpm의 고속으로 교반을 하고 주입펌프와 주입호스를 통하여 지반주입을 실시하였다. OPC(보통포틀랜드시멘트)을 주입한 경우와 고성능 주입장비를 적용하여 MC(현장제조 마이크로시멘트)를 주입한 경우에 대하여 변수위투수시험과 전기비저항 탐사법으로 주입 전후의 지반개량에 대한 효과판정을 실시하였다.

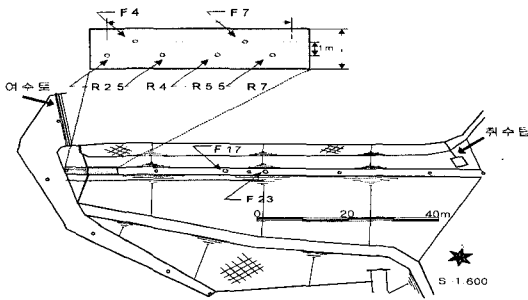


그림 13. 그라우팅 구간에 대한 전기비저항 탐사 위치도

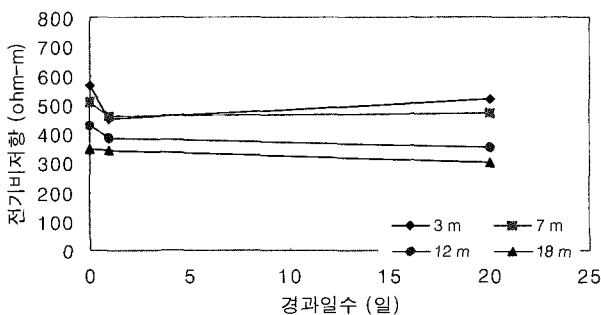


그림 14. F17 지점 그라우트 주입 구간의 재령에 따른 전기비저항 변화도

3.3 시험시공 결과 및 고찰

3.3.1 전기비저항 수직탐사

전기비저항 수직탐사는 지표면 상의 한 점에서 그 하부의 심도에 따른 전기비저항을 측정하고, 그 결과를 다른 수리지질학적인 정보와 상호연관을 통해 지하의 구조를 더 상세히 파악하는 데 있다(송성호 등, 2000, 2001; 정승환 등, 1992, Komine 등, 1996). 수직탐사는 대지에 공급되는 전류가 전류전극 사이의 간격이 넓어질수록 더 깊은 곳을 통과한다는 사실에 기초하고 있으며, 전류전극 간의 간격이 넓을수록 심부의 정보를 반영하게 된다.

전기비저항탐사를 적용한 현장구간은 제체에 대한 MC 주입구간 중 공변 R4와 R7 지점과 OPC가 주입된 나머지 구간 중 공변 F17 및 F23 지점에 대하여 그라우트 주입 이후 재령에 따른 현장 전기비저항을 측정하였다. 이때 현장에서 측정된 저항값은 거리계수(geometry factor)를 곱하여 겉보기비저항으로 환산하였다.

공변 F17 및 F23 지점은 OPC를 사용한 주입지점으로 이 지점에 대하여는 그라우팅 주입 이전인 2002년 11월 12일부터 11월 14일까지 측정한 결과를 기초로, 그라우팅 주입을 실시한 2002년 11월 15일 이후 1일 경과 후 및 약 3주 경과 후에 동일지점에 대하여 슬림배열 전기비저항 수직탐사를 실시하였다. F17 지점

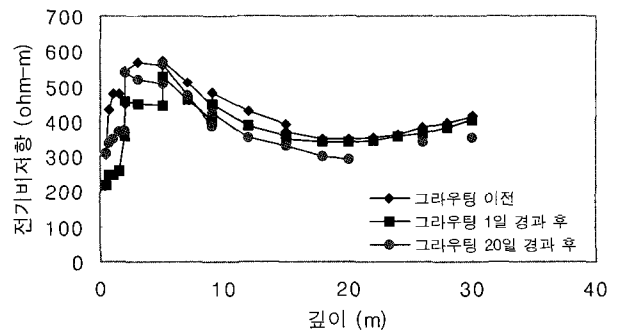


그림 15. F17 지점 재령에 따른 심도별 전기비저항 변화도

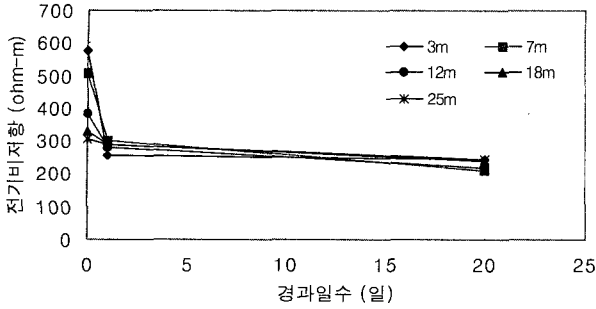


그림 16. F23 지점 그라우팅 주입 구간의 재령에 따른 전기비저항 변화도

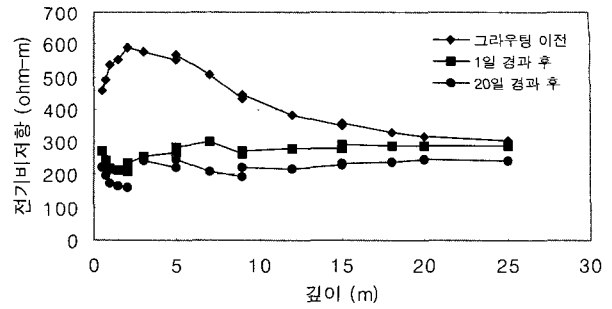


그림 17. F23 지점 재령에 따른 심도별 전기비저항 변화도

은 탐사결과 OPC 주입 구간은 그라우팅 이후 1일 경과 후 동일 심도의 전기비저항값은 초기 값보다 약 100~150 ohm-m 정도까지 낮아지는 것으로 나타났으며, 3주 이후에서도 전기비저항값이 안정되게 결과가 나타난다(그림 14). 이때 그라우트의 주입효과가 나타나는 심도는 그라우팅 이전에 비하여 전기비저항의 값이 낮아지는 구간으로 설정할 수 있으며, 본 지점의 경우는 그라우팅 전체 구간에서 그라우트의 주입 효과를 알 수 있다(그림 15). F23 지점은 그라우팅 이후 1일 경과 후 동일 심도의 전기비저항값은 초기 값보다 약 200 ohm-m 이상까지 낮아지는 것으로 나타났으며, 3주 이후에서도 전기비저항값이 안정되게 결과가 나타난다(그림 16). 이 지점의 경우도 F17지점과 마찬가지로 그라우팅 전체 구간에서 그라우트의 주입 효과가 나타남을 알 수 있다(그림 17).

공번 R4 지점은 MC를 사용한 주입지점으로 이 지점에 대하여는 그라우팅 주입 이전인 2002년 11월 11일 측정된 결과를 기초로, 그라우팅 주입을 실시한 2002년 11월 12일 이후 1일 간격으로 동일지점에 대하여 3일 동안 및 약 3주 후에 슬럼프져 배열 전기비저항 수직탐사를 실시하였다. 탐사결과 그라우팅 이후 동일 심도의 전기비저항값은 초기 값보다 약 200~400ohm-m 정도까지 매우 낮아지며, 이후부터 안정된 값을 보인다(그림 20). 이때 그라우트의 주입효과는 R4 지점과 마찬가지로 전체구간에서 나타나며, 제체의 매질에 대한 침투효과가 상대적으로 커졌기 때문이라고 판단된다(그림 21).

를 실시하였다. 탐사결과 그라우팅 이후 동일 심도의 전기비저항값은 1일 경과 후부터 초기 값보다 심도에 따라 약 200~800 ohm-m 정도까지 매우 낮게 나타나며, 이후부터 안정된 결과가 나타난다(그림 18). 이때 그라우트의 주입효과는 전체구간에서 나타나며, OPC 구간에 비해 전기비저항의 변화폭이 매우 크게 나타남에 따라 제체의 매질에 대한 침투효과가 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다(그림 19).

공번 R7 지점은 MC를 사용한 주입지점으로 이 지점에 대하여는 공번 R4에서와 동일하게 그라우팅 주입 이전인 2002년 11월 11일 측정된 결과를 기초로, 그라우팅 주입을 실시한 2002년 11월 12일 이후 1일 간격으로 동일지점에 대하여 3일 동안 및 약 3주 후에 슬럼프져 배열 전기비저항 수직탐사를 실시하였다. 탐사결과 그라우팅 이후 동일 심도의 전기비저항값은 초기 값보다 약 200~400ohm-m 정도까지 매우 낮아지며, 이후부터 안정된 값을 보인다(그림 20). 이때 그라우트의 주입효과는 R4 지점과 마찬가지로 전체구간에서 나타나며, 제체의 매질에 대한 침투효과가 상대적으로 커졌기 때문이라고 판단된다(그림 21).

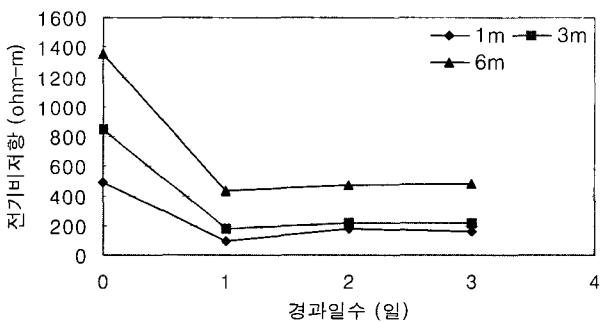


그림 18. R4 지점 그라우팅 주입 구간의 재령에 따른 전기비저항 변화도

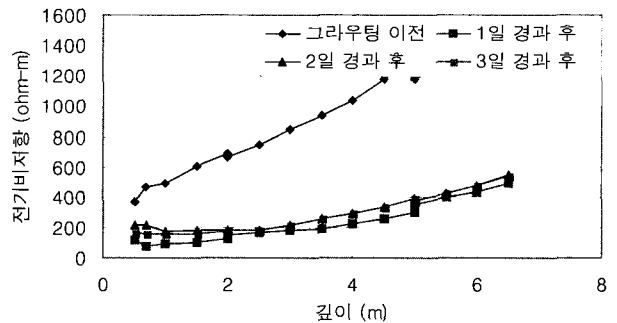


그림 19. R4 지점 재령에 따른 심도별 전기비저항 변화도

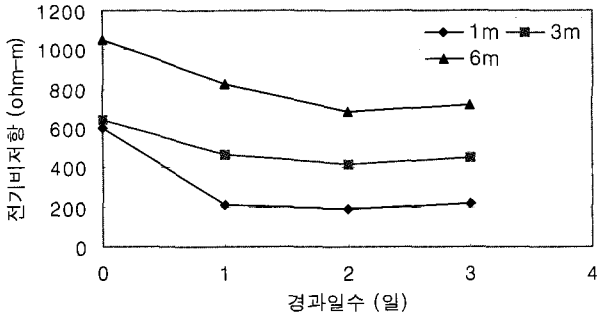


그림 20. R7 지점 그라우트 주입 구간의 재령에 따른 전기비저항 변화도

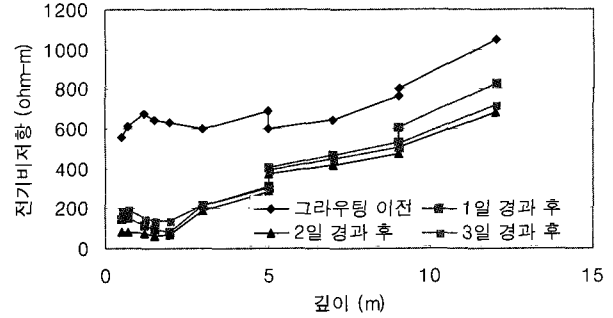


그림 21. R7 지점 재령에 따른 심도별 전기비저항 변화도

3.3.2 주입 시험

이 저수지에서 MC의 주입구간은 총 9 m로, 주입공의 간격은 3m, 전/후열 간격은 1m로 시공하였다(그림 22). 주입공에 이용된 BX 케이싱은 외경이 73mm이고, 로드 (rod)의 외경은 44.2mm, 비트가 달린 코아바렐의 외경은 60mm이다.

이 저수지의 경우는 제체가 존형으로 제체 양안부에 기반암과의 경계부가 나타나지만, MC 주입구간이 여수로 구간부분의 사암과 역암의 풍화대 주변부에 위치하므로, 3~8m 심도에서 기반암의 풍화대가 나타난다. 또한, 그라우트 주입을 위한 시추공을 천공하는 과정에서

굴진수가 완전히 빠져나감에 따라 이 저수지에 대한 주입순서는 제체 하부 기반암에 대해서는 패커를 이용한 주입을 실시하였으며, 상부의 제체 구간에 대하여는 간이 멘젯트 튜브를 이용하여 주입하였다.

그라우트의 배합비는 물시멘트비를 약 3:1로 주입하였으며, 주입재의 입자 분리가 완전하게 이루어지도록 고속전단믹서를 이용하여 약 1,800rpm의 회전속도를 유지하여 혼합하였다. 이 저수지에 대한 주입은 후열을 먼저 주입하고 전열을 주입하는 순서로 진행하였다.

주입압은 표 7과 같이 먼저 주입한 후열에서는 토사층의 경우 평균 2~3kgf/cm²(최대 7kgf/cm²), 암반층의 경우는 3~5kgf/cm²(최대 11kgf/cm²)이었지만, 나중에 주입한 전열의 경우는 토사층의 경우 평균 3~4kgf/cm², 암반층의 경우는 5~7kgf/cm²로 나타났다. 이러한 결과는 시험 구간에서 기반암 풍화대에 대한 후열의 주입의 효과가 전열을 주입하는 과정에서 주입압을 상승시키게 한 결과로 판단되며, 이러한 결과는 제체 토사층의 경우에서도 동일하게 나타났다.

그러나 주입량은 전열 및 후열에서 토사층의 경우는 3.0~3.5batch, 암반층의 경우는 4.5~5.0batch로 큰 차이가 나타나지 않았다. 이러한 영향은 주입구간의 제체

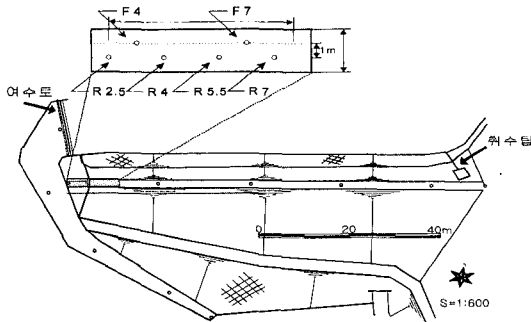


그림 22. 저수지 MC 주입공 위치도

표 7. MC 주입공별 그라우트 주입량 및 주입압

공 번	토 사 층			암 반 층		
	심도 (m)	주입량 (batch)	주입압 (kgf/cm ²)	심도 (m)	주입량 (batch)	주입압 (kgf/cm ²)
R 7	0-9.0	2.5	1~2(3~4)	9.0-14.0	9.0	3~4(5~7)
R 4	0-6.5	3.0	1~2(3~5)	6.5-8.5	4.5	3~5(5~6)
R 2.5	0-3.5	6.5	2.5~3(5)	3.5-7.5	2.0	5~7(11)
R 5.5	0-7.0	2.0	3.5~5(7)	7.0-9.0	2.5	3~5(7)
F 4	0-8.0	3.0	3~4	8.0-12.0	7.5	5~7
F 7	0-11.0	2.5	3~4	11.0-13.5	2.5	3~4

※ 1 batch = 368 ℓ, 주입압의 ()는 최대 주입압

표 8. OPC 주입공별 그라우트 주입량 및 주입압

공번	심도 (m)	주입량 (batch)	주입압 (kgf/cm ²)	공번	심도 (m)	주입량 (batch)	주입압 (kgf/cm ²)
F 17	0-25.0	15.0	3.0	R 17	0-25.0	4.5	4~5
F 21	0-22.0	8.9	3.5	R 21	0-22.0	5.2	5~7
F 24	0-22.0	14.3	3~4	R 24	0-22.0	7.8	4~5
F 27	0-25.0	14.8	3.5~4	R 27	0-22.0	8.0	5.5~6.5
F 30	0-22.0	13.8	3~4.5	R 30	0-22.0	4.1	5~7
F 34	0-21.5	14.5	4~5	R 34	0-22.0	4.4	6~7
F 37	0-23.5	14.3	3~4	R 37	0-21.0	4.2	5~6
F 39	0-18.0	9.0	3.5~4.5	R 39	0-18.8	5.1	5~6
F 42	0-14.0	5.9	3~4	R 42	0-14.0	2.3	6~7
F 45	0-10.0	2.6	4~5	R 45	0-11.0	1.7	5~7

※ 1 batch = 368 ℓ

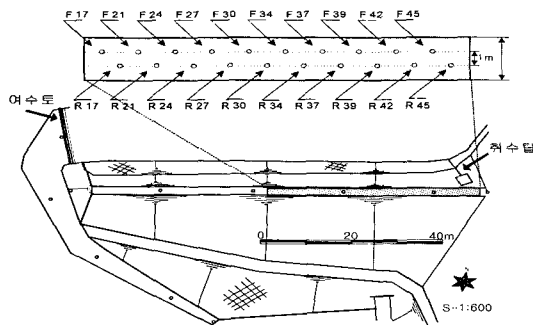


그림 23. 저수지 OPC 주입공 위치도

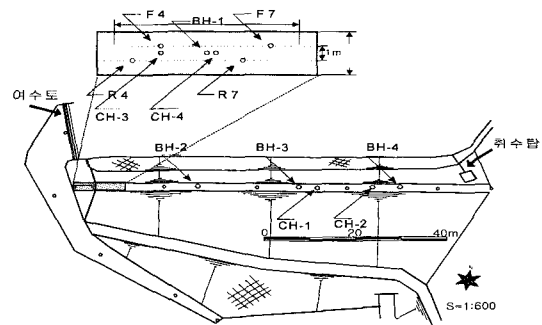


그림 24. 저수지 제체에 대한 투수시험 대상공 위치도

의 경우 내제와 외제측에 폭넓게 발달한 누수범위를 주입하기 때문에 판단된다.

OPC 주입 구간은 MC 주입구간의 외곽부로, 전열의 경우 제체 우안부의 abutment 부분은 주입 구간이 짧아 10batch 이내의 주입량이 나타났지만, 제체 중앙부의 경우는 약 15batch 내외로 주입되었다(그림 23, 표 8). 그러나 후열의 경우는 약 50~70% 정도 감소한 결과가 나타났다. 주입압은 전열의 경우 평균 3.0~5.0kgf/cm², 후열의 경우는 평균 5.0~7.0kgf/cm²로 후열의 주입압이 상대적으로 높게 나타나는데, 이는 MC 주입구간에 서 나타난 결과와 마찬가지로 전열에 대해 시공한 주입의 영향이 나중에 시공된 후열의 인접공에서 주입량의 감소와 수반되어 발생하는 영향으로 판단된다. 그러나 MC 주입구간과 OPC 주입구간의 깊이 차이에도 불구하고 전후열 전체적으로 MC 주입구간의 주입압이 OPC 주입구간에 비해 상대적으로 낮게 나타났는데, 이는 저수지 제체의 중심점토 상태가 매우 불량함에 따라 분말도가 상대적으로 높은 MC의 경우 상대적으로 넓은 범위까지 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.3.3 시추공을 이용한 투수시험 결과

그라우팅에 의한 제체의 개선효과를 파악하기 위해서는 대상구간에 대한 투수성 파악이 매우 중요하며, 특히 투수시험 해석으로 얻어진 투수계수는 그라우팅 시공 전후의 효과 판정을 위해 반드시 필요한 자료이다. 일반적으로 투수계수는 기준 정수두압에서 침출수량으로 정의되며, 어느 단면의 전체 침출수량은 투수계수와 면적의 곱으로 계산할 수 있으며, 보통 평균값을 이용한다(Fetter, 1993).

이 저수지의 경우는 변수위투수시험법을 이용하여 MC 주입구간인 제체의 공번 R4~R7 사이와 OPC 주입구간에 대하여 그라우팅 전후에 투수시험을 실시하여 상호결과를 비교하였다. 변수위투수시험법은 투수시험 예정구간의 상부까지 케이싱을 설치하고 시험구간은 나공(裸孔) 상태를 유지한 후, 공 내부에 물을 주입하거나 빼낸 후의 시간에 따른 수위변화를 측정하여 투수계수를 산출하는 방법이다.

변수위투수시험을 이용하여 그라우팅 시공전에 MC 계획 주입구간 5개 지점과 OPC 계획 주입구간 3개 지점의 투수계수를 구하였으며, 시공 후에는 MC 구간 2

표 9. 변수위투수시험 결과표 (k : cm/sec)

단 계	공 번호	제체 k	암반 k	비 고
주 입 공 (시공 전)	BH-1	4.96×10^{-3}	4.24×10^{-4}	MC 주입구간
	F4	-	2.59×10^{-4}	
	F7	1.49×10^{-4}	-	
	BH-2	4.10×10^{-3}	9.88×10^{-5}	OPC 주입구간
	BH-3	3.97×10^{-3}	9.63×10^{-5}	
BH-4	5.18×10^{-3}	5.62×10^{-5}		
확 인 공 (시공 후)	CH-1	2.47×10^{-5}	1.38×10^{-5}	OPC 주입구간
	CH-2	4.47×10^{-5}	1.08×10^{-5}	
	CH-3	4.65×10^{-5}	-	MC 주입구간
	CH-4	1.81×10^{-5}	-	

개 지점과 OPC 주입구간 2개 지점에 대해 검사공 투수 시험을 실시하여 시공 효과를 평가하였다(그림 24).

변수위투수시험 결과 제체 전체 구간에서 투수계수의 범위는 성토부의 경우는 $5 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 내외, 제체 하부 풍화대의 경우는 $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 내외로 나타났다(표 9). 그러나 그라우팅 이후의 투수계수는 MC와 OPC 주입 구간 모두에서 약 10배 이상인 $1 \sim 4 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 정도로 투수계수가 감소한 것으로 나타났다. 이는 제체에서 광범위한 누수가 진행되는 토질 특성으로 주입재의 발달도가 큰 영향을 나타내지 못한 영향으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 시멘트 주입재의 초미립화를 위한 습식분쇄기를 제작하여 최적분쇄능력 및 제조인자별 물리적 특성실험을 실시하였고, 실제 현장에서 마이크로 습식분쇄장치 및 고속전단믹서를 적용하여 누수제체에 대한 그라우팅 주입효과를 평가하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 습식분쇄장치의 성능에 따라서 적정 분쇄속도와 분쇄시간의 한계가 있음을 파악하였으며, 본 연구의 시험장치에서는 최적분쇄조건을 분쇄속도 700rpm 과 분쇄시간 10분으로 선정하였다. 1종시멘트를 습식분쇄기로 초미립자와 함으로서 점도가 급격히 높아지는 것을 방지하기 위해서 분산제를 사용하는 것이 필요하며, 분쇄수준과 현탁액의 물시멘트비에 따라서 분산제의 적정 첨가량 검토가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 물시멘트비가 클수록 침투성이 향상되었으며, 이는 현탁액의 점도가 낮아지기 때문으

로 판단된다.

- (2) 호모겔과 샌드겔의 강도비는 재령이 길어질수록 호모겔강도가 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 28일 재령에서부터 호모겔강도가 샌드겔강도 보다 더 커지는 역전현상이 발생하였다. 이와 같은 현상은 혼합수가 그대로 샌드겔 내에 존재하면서 수화반응이 진행되었기 때문에 모래입자를 결속시키는 페이스강도가 약하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 지반보강이 우선인 경우는 현탁액의 물시멘트비를 낮추는 것이 유리할 것으로 사료된다.
- (3) 현장제조 마이크로시멘트의 주입구간과 보통포틀랜드시멘트 주입구간에서의 전후열 평균 주입압이 각각 $2.9 \sim 4.4 \text{ kgf/cm}^2$ 와 $4 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$ 범위로 초미립자 시멘트의 경우 주입압이 상대적으로 낮았음에도 침투 효과가 대단히 우수하였다. 초미립자시멘트를 사용한 그라우팅 이후의 투수계수는 그라우팅 이전에 비하여 약 10~100 배정도 감소하여 주입 이후 개선효과가 양호한 것으로 판단되며, 보통포틀랜드시멘트 주입 구간의 경우는 약 10 배정도 감소된 것으로 나타났다. 또한, 두 지구에 적용한 쌍극자배열 전기비저항 탐사 결과 그라우팅 이후 전극 전개별로 겹보기 비저항 이상곡선이 양호한 연속성이 나타나는 것과 그라우팅 이전에 비해 주입구간이 전체적으로 수평적인 발달이 나타나는 결과 등은 그라우트의 주입에 의한 개선 결과로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 한국건설기술연구원의 2000년 중소기업 기술개발 촉진과제 중 “마이크로시멘트 현장 제조 및 실시간 시공모니터링을 이용한 최적 그라우팅 시스템 개발 연구”의 일환으로 수행된 것임을 밝히며, 관계당국에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김진춘(1999), 지반개량용 초미립자 시멘트의 주입특성에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, pp.6-32.
2. 송성호, 권병두, 최중학, 김경만(2001), “저수지 누수문제에 대한 수리지질 및 지구물리 방법의 적용”, 한국자원공학회지, 제38권, pp.292-300.
3. 송성호, 이규상, 김진호, 권병두(2000), “방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항 탐사의 적용”, 자원환경지질, 제33권, pp.417-424.

4. 정승환, 김정호, 양재만, 한규언, 김영웅(1992), "전기비저항탐사에 의한 제방의 누수구간 탐지", 지질공학, pp.47-57.
5. 천병식(1997), 지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구, 건설교통부, pp.152-241.
6. 천병식(1999), 최신 지반주입-이론과 실제-, 원기술, pp.19-23.
7. ASCE(1982), *Grouting in Geotechnical Engineering*, Pro. Conf. New Orleans, Louisiana, February 10-12, pp.11-16.
8. Fetter, C.W. (1993), *Applied Hydrogeology*, Third Edition, Prentice Hall, p.98-99.
9. Komine H., Tanaka Y., Nishi K.. and Suzuki K.(1996), *Quantitative Evaluation of Ground Improvement by Chemical Grouting using Electrical Resistivity(Part II) - Evaluation of Improvement Region by Resistivity Tomography*, 研究報告U93035, 日本電力中央研究報告書(in Japanese).

(접수일자 2003. 3. 10, 심사완료일 2003. 5. 23)