

# 시멘트 몰탈형 고압분사공법(MJM)에 의한 연약지반 보강효과에 관한 연구

## A Study on the Effectiveness of the Mortar Jet Method in Increasing the Strength of the Soft Ground

천병식\* · 백기현\*\* · 주태성\*\*\* · 도종남\*\*\*\*

Chun, Byung-Sik · Baek, Ki-Hyun · Jooi, Tae-Seong · Do, Jong-Nam

### Abstract

Although high pressure discharge method is widely used for improving soft ground, it has various problems including lack of strength increase and the possibility of water pollution and soil contamination. MJM(Morta Jet Method) uses sand in addition to cement as the injection material. MJM uses triple rods with a built-in nozzle that allows easier discharge of the slime, resulting in higher replacement area ratio and more uniform formation of pillar hydrates, and thus results in significant increase in strength. MJM is expected to perform especially well as piles in marine clays. This study investigates the field applicability of the MJM through extensive laboratory and field tests.

**Keywords** : MJM, High pressure jet grouting method, Triple rods, Ground improvement

### 요 지

근래 건설현장에서의 연약처리문제는 자주 대두되는 문제이며, 이러한 연약지반을 개량하기 위한 고압 분사공법은 없어서는 아니될 필수적인 공법이지만 적용에 있어서 보강효과미흡, 지하수 및 지반오염문제 등 해결해야할 선결문제가 있다. MJM(Mortar Jet Method)공법은 주입재료로서 기존의 시멘트 외에 모래를 혼합하여 획기적 강도증대가 가능하며 3중관으로서, 슬라임 배출을 용이하게 하는 노즐을 부착시켜 치환율을 높여 전단면이 균질한 주상형고결체를 형성시킬 수 있고 특히, 해성점토 지반에서 기초말뚝으로서의 활용이 기대된다. 본 연구에서는 MJM공법의 실내 시험 및 현장시험시공을 통해 현장 적용성을 검토하였다.

**주요어** : MJM, 고압분사공법, 3중관로드, 지반개량

\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 비회원 · (주)대우건설 기술연구소 토목연구팀 선임연구원

\*\*\* 정회원 · (주)한진중공업 기술연구소 선임연구원

\*\*\*\* 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 석박사과정

## 1. 서론

일반적으로 고압분사공법은 주입롯드를 지반내에서 회전 인발시키면서, 그 선단의 분사노즐로부터 상기 주입롯드의 직각방향으로 지반 개량재를 물 또는 에어와 혼합하여, 지반 개량대와 주변 지반토를 교반 혼합하여 원주상의 개량체를 형성하는 공법이다(천병식, 2005).

상기와 같은 종래의 고압분사공법은 토질의 영향을 받기 쉽고, 1회의 시공으로 넓은 범위의 지반을 개량할 수 있으며 개량체 상호간의 밀착성이 뛰어나 토류벽이나 지수벽의 구성에 많이 사용되는 장점이 있다(김진춘 등, 2001).

그러나, 종래의 고압분사 교반공법은 지반토와 시멘트가 혼합되어 지중에 개량체를 만드는 것으로 연약지반에 시행할 경우에는 점토입자와 시멘트가 혼합되어 개량체가 형성되므로 강도가 극히 떨어지는 단점(홍원표 등, 1994)이 있다.

이에, 본 공법은 상기에 서술한 바와 같은 제문제점을 해결하기 위해 개발된 것으로서, 3중관 룯드로 개량하고자 하는 임의 지점까지 천공하여 상향으로 인발하면서 초고압수와 압축공기로 지반을 절삭 이완시켜 지중에 인위적으로 공간을 형성시킨 후 모르타르를 고압으로 분사하여 현지토를 치환함으로써 새로운 주상형의 고결체를 형성시켜 연약점토층을 비롯한 모든 지층에서 동일한 고강도의 지중연속벽이나 기초(지지)파일을 형성시키는 주상형고결체형성장치를 개발하는데 그 목적이 있다.

상기 목적을 달성하기 위하여 본 공법은 모르타르 고압분사를 통한 치환식주상형고결체형성장치로 대상 연약지반을 소정의 직경으로 천공하여, 상기 천공부위에 3중관룰드를 지중에 삽입한다.

상기 3중관룰드의 상부에는 초고압수주입구, 모르타르주입구, 압축공기주입구가 형성된 스위벨이 설치되고, 상기 스위벨에 각각 연통되도록 초고압수배출구, 모르타르배출구, 압축공기배출구가 모니터에 의해 3중관룰드에 장착되며, 상기 초고압수주입구에서 초고압수와 압축공기를 함께 분사함과 동시에 상기 압축공기 및 모르타르는 모르타르배출구를 통해 배출하면서 회전 분사시켜 지중을 절삭 파쇄시켜 지상으로 슬라임을 배출시킴과 동시에 상기 모니터에 장착된 압축공기배출구와 모르타르배출구를 통하여 아래로 모르타르와

압축공기를 함께 분사시켜, 지중에 주상형 고결체를 형성함을 특징으로 한다.

본 연구는 실내 토질역학시험 및 현장시험을 이용하여 기존의 공법과의 비교 이러한 장점을 가지고 있는 시멘트 몰탈형 고압분사공법(MJM)에 의하여 보강된 연약지반의 공학적 특성을 규명해 보도록 한다.

## 2. MJM(Mortar Jet Method)공법 개요

### 2.1 공법의 기본원리 및 특징

일반적인 주입공법은 저압주입이며 될 수 있는 한 지반의 골조를 파괴하지 않고 그 공극에 주입재를 침투 또는 할렬주입 시키는 점(천병식, 2005)에 반하여 고압분사공법은 적극적으로 지반을 파쇄하여 치환 또는 혼합충전하는 것으로서 높은 압력을 가한 압력수를 노즐을 통해 분사하여 운동에너지로 지반을 세굴하고, 세굴공간에 경화재를 충전하여 원주상의 고결체를 지중에 조성(홍원표, 1994)하는 공법이다. 이에 본 MJM공법은 3중관 룯드로 개량하고자 하는 지점까지 천공하여 상향 인발하면서 초고압수와 압축공기로 지반을 절삭·이완시켜 지중에 인위적인 공간을 형성한 후 모르타르를 고압으로 분사하여 현지토를 치환함으로써 주상형의 고결체를 형성시켜 연약점토층을 비롯한 모든 지층에서 균일한 고강도의 지중연속벽이나 기초(지지)파일을 형성시키는 주상형 고결체 형성공법이다.

치환율을 높이는 방법으로서 본 공법에서 개발한 기술은 압축공기를 하부에서 상부 표토방향으로 향하게 하는 노즐 설치이다. 이 노즐은 슬라임 배출을 용이하게 하여 절삭된 공벽의 유지가 원활해지고 주입재의 Mixing 효과가 탁월하여 각 고결체의 강도 증가를 가져온다. 따라서, 고결체의 강도증가로 인하여 고결체의 개수 및 직경을 줄일 수 있으므로 공사비 감소효과를 가져온다. 또한 직경  $\varnothing 114\text{mm}$ 인 선단장치(그림 1 참조)를 사용함으로써 시공시 공장에서 출하한 고강도의 시멘트 모르타르( $\varnothing 7\text{mm}$ 이하 레미콘)를 주입장비를 통해 사용할 수 있다. 이는 고결체의 강도 증가를 가져올 뿐만 아니라 시공을 용이하게 하여 경제적 측면에서 공사비 감소에 직접적인 영향을 끼치게 된다.

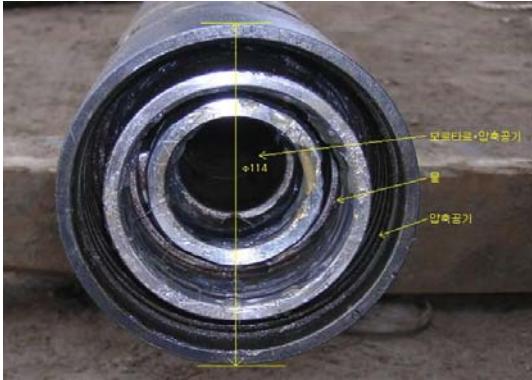


그림 1. 주입장비

## 2.2 시공방법

본 MJM공법에 있어 시공방법은 다음 그림 1과 같다. 천공 단계는 선단장치를  $\varnothing 114\text{mm}$ 로 확장시키는 기술을 적용한다. 대구경 선단장치는 수직도 유지에 핵심기술로서 본 시공시 시공품질을 개선하고 추가적인 보조공법을 사용하지 않으므로 공사비 절감 효과를 가져온다. 천공 단계를 거쳐, 초고압수 원지반의 치환율을 높일수록 개량체의 품질이 향상된다. 분사개시 및 MJM개량체 조성단계에서 공벽 유지 및 슬라임 배출을 용이하

게 하기 위하여 압축공기를 하부에서 상부 표도 방향으로 향하게 하는 노즐을 설치하여 개량체의 강도 증가를 가져온다(그림 2 참조).

## 3. 실내시험

### 3.1 공시체 제작

시멘트와 잔골재를 각각 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3의 배합비로 공시체(직경 5cm, 높이 10cm)를 제작하여 14일간 수중양생을 실시하였다.

### 3.2 일축압축강도 측정

상기와 같은 배합비로 공시체를 제작하여 각각의 배합비에 따른 재령별 강도 변화를 측정하기 위하여 KS F 2314에 따라 일축압축강도를 측정하였다. 재령 28일을 기준으로 하였을 때, 배합비 1 : 1의 경우는  $408.99\text{kgf/cm}^2$ , 배합비 1 : 2의 경우는  $265.07\text{kgf/cm}^2$ , 배합비 1 : 3의 경우는  $114.05\text{kgf/cm}^2$ 로서 재령 증가에 따라 유사한 경향으로 증가함을 알 수 있었다(그림 3 참조).

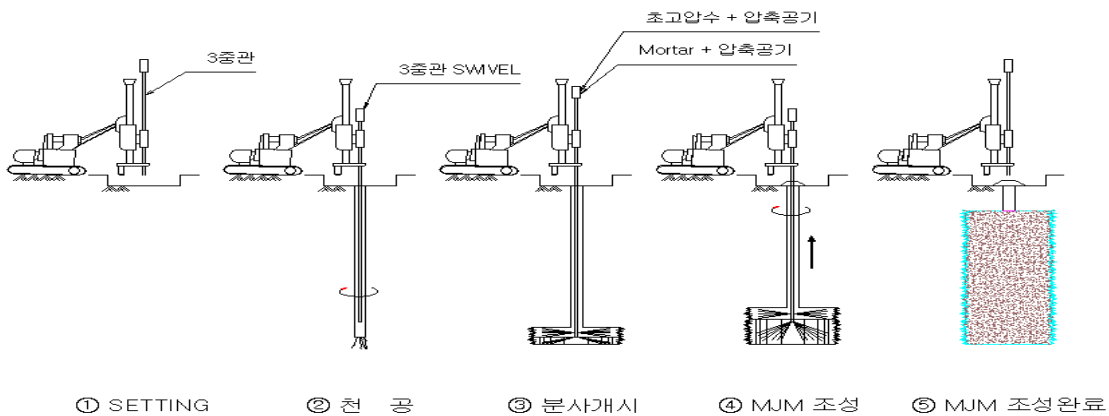


그림 2. 시공순서도

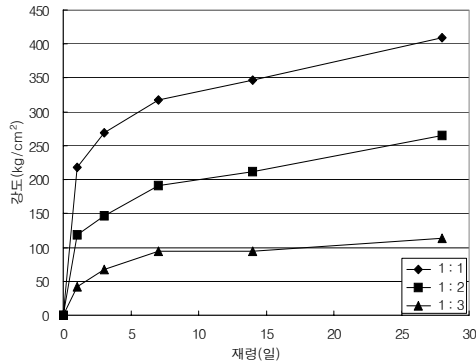


그림 3. 재령별 일축압축강도



그림 4. 구근형성 확인

## 4. 현장시험

### 4.1 시험시공사례(지하철 901공구현장)

본 시험시공에서는 현장시험을 통한 MJM공법의 배합비(시멘트:잔골재)산정 및 MJM공법의 기준시간을 적용하여 시험시공을 시행함으로써 주입인발시간과 주입재(모르타르)의 효과적 주입방법을 구축하여 지반보강효과, 구근형성 시험 및 육안 확인을 통하여 기존의 고압분사그라우팅 공법과 본 공법의 특성을 비교검토 하는 데에 중점을 두고 시행하였다. 현장시험은 시추조사 3개소, 투수시험 3회, 공내재하시험 3회 실시하였다. 시험시공시 말뚝체 직경은 1,000mm이고, 심도는 4~5m, 그리고 중심 간격은 1,000mm이다. 또한, 시멘트와 잔골재의 배합비 1 : 1, 1 : 2는 시추조사에서 채취된 코어의 일축압축강도를 측정하였다.

### 4.2 현장적용결과 비교분석

#### 4.2.1 육안확인

시험구간을 굴착하여 육안확인(천병식, 2002)한 결과 구근이 거의 원형형태로 양호하게 양생되었으며, 구근형성 상태는 다음의 그림 4와 같다.

#### 4.2.2 시추조사

조사부지의 지반상태를 파악하고 현장시험시공의 효과확인에 필요한 제반 지반공학적 자료를 수집하기 위하여 시추조사(천병식, 2002)를 실시하였다.

시추작업은 회전식 추진방식에 따라 진행되었으며, 공벽을 보호하여 작업을 원활히 수행하고 정확한 성과를 얻기 위하여 굴진심도에 따라 Casing을 삽입하는 Casing 공법을 채택하였다.

시추구경은 원칙적으로 NX( $\varnothing$ 76mm)로 작업하였으며, 시추심도는 현장 시공상황에 따라 차이는 있으나, MJM 공법으로 시공이 완료된 층의 아래 지층까지 확인하는 것을 원칙으로 수행하며, 말뚝체 사이에서 시추를 실시하였다.

시추조사 결과로부터 나타난 지반의 지층 상태는 표 2에서와 같이 배합비 1 : 2일 때 회수율(T.C.R) 62%로 배합비 1 : 1의 회수율 51%, 배합비 1 : 3의 회수율 40%에 비해 양호한 회수율을 보였고, 시추조사 결과는 표 1 및 그림 5와 같다.

표 1. 시추조사 결과

배합비	1 : 1	1 : 2	1 : 3
지층명	MJM고결체	MJM고결체	MJM고결체
지층상태 (코어회수율)	보통	보통	불량
색조	담회색 회색	담회색	암회색
분포심도 (m)	0.0~4.5	0.0~3.4	0.4~3.65
T.C.R (%)	51	62	40



그림 5. 시추 코어

#### 4.2.3 현장투수시험

시추조사와 병행하여 지반의 투수성을 파악하기 위해 변수위법으로 시추공 전체에서 현장투수시험을 실시하였다. 시험 방법은 Casing의 상단까지 물을 채워서 수위가 하강함에 따라 Casing 상단에서부터 수면의 깊이를 측정하여 투수계수를 산출하는 방법이다. 투수계수는 식(1)에 의해 계산되었다.

$$K = \frac{r^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L}{r}\right) \ln\left(\frac{(H_c + D_c) - H_1}{(H_c + D_c) - H_2}\right) \quad (1)$$

여기서,

- $K(cm/sec)$  : 투수계수
- $D(cm)$  : 시추공경
- $L(cm)$  : 시험구간
- $t_1, t_2(sec)$  : 측정시간
- $r$  : 케이싱 반경
- $H_c(cm)$  : 지표에 노출된 케이싱 길이
- $D_c(cm)$  : 지중에 삽입된 케이싱 길이
- $H_1, H_2(cm)$  : 시간에 따른 수위강하 거리

표 2에서 보는 바와 같이 조사지역의 현장투수시험은 5분 동안 변수위 투수시험으로 실시하였으며, 배합비 1 : 1과 1 : 2에서는 수위변화를 보이지 않을 정도로 투수계수가 현저히 작게 측정되었다. 배합비 1 : 3의 투수계수는  $1.34 \times 10^{-4} cm/sec$  로 나타났다.

표 2. 현장투수시험 결과

배합비	시험구간 (m)	투수계수 (cm/sec)	비고
1 : 1	0.0m~2.0m	-	수위변화 없음
1 : 2	0.0m~2.0m	-	수위변화 없음
1 : 3	0.0m~2.0m	$1.34 \times 10^{-4}$	

#### 4.2.4 공내재하시험

시추공의 공벽면을 가압하고, 이때 발생하는 공벽면의 변형량을 측정함으로써 지반의 성질(강도, 변형특성)을 파악하기 위하여 실시하였다. 공내재하시험은 일반적으로 지반의 변형계수를 구하는 목적으로 실시되지만, 암반분류의 지표로 얻기 위하여 실시하는 경우도 있다. 공내재하시험은 ELASTMET- ER 4018을 이용하여 실시하였다.

배합비에 따른 변형계수 및 탄성계수는 표 3과 같다.

표 3. 공내재하시험 결과

배합비	1 : 1	1 : 2	1 : 3
시험심도 (GL.-m)	3	1.5	1
대상 지층	MJM 고결층	MJM 고결층	MJM 고결층
포아송비 (적용값)	0.25	0.25	0.25
변형계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	21,383	21,283	4,592
탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	49,697	37,763	9,910

#### 4.2.5 코어의 일축압축시험

시멘트와 잔골자의 배합비 1 : 1, 1 : 2는 시추조사에서 채취된 코어를 지름 5cm, 높이 10cm의 1 : 2비율로 절단한 후 일축압축강도를 측정하였다. 배합비 1 : 3의 경우, 코어채취 형태가 일정하지 못하여 실험을 실시하지 못하였으며, 표 4에서 보는바와 같이 배합비에 따른 일축압축강도는 불규칙한 분포를 보였다.

표 4. 일축압축시험 결과

배합비	일축압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )				
	1 : 1	132.8	144	234.4	299.2
1 : 2	78.4	88.8	98.4	102.4	144.8

## 5. 결론

본 연구에서는 시멘트 몰탈형 고압분사공법(MJM)의 연약지반 보강효과를 평가하기 위해 실내시험 및 현장시험 결과를 분석·정리하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각각의 시멘트와 잔골재의 배합비(1 : 1, 1 : 2, 1 : 3)에 따른 재령별 일축압축시험결과, 1 : 1의 경우는 408.99kgf/cm<sup>2</sup>, 1 : 2의 경우는 265.07 kgf/cm<sup>2</sup>, 1 : 3의 경우는 114.05kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 이로부터 주입재의 배합비는 1 : 1과 1 : 2가 적합한 것으로 판단된다.
- (2) 시험시공 실시 후, 채취된 코어의 상태가 양호한 시멘트와 잔골재의 배합비 1 : 1과 1 : 2 코어의 일축압축강도를 측정하였다. 배합비 1 : 1의 경우 132.8~327.2kgf/cm<sup>2</sup>, 1 : 2의 경우는 78.4~144.8kgf/cm<sup>2</sup>으로 측정되었다.
- (3) MJM공법의 고결체에 대한 현장투수시험 결과 시멘트와 잔골재의 배합비 1 : 1과 1 : 2의 경우는 수위변화가 없는 것으로 보아 투수가 거의 되지 않는 불투수성으로, 1 : 3의 경우는  $K=1.34 \times 10^{-4}$ cm/sec로 나타났다(표 2 참조).

- (4) 공내재하시험 결과 시멘트과 잔골재의 배합비 1 : 1과 1 : 2의 경우는 각 물성치를 비교(표 3 참조)해 본 결과, 연암에 가까운 것으로 나타났다.
- (5) 본 공법은 슬라임 배출을 용이하게 하여 치환율을 증가시킴으로서 기존의 고압분사공법과는 다르게 CIP 대응시 별도 차수벽을 설치할 필요가 없으므로 공기가 단축되어 결과적으로 경제적인임을 알 수 있다.
- (6) 본 공법은 항만 및 안벽, 하천 및 제방의 기초지반 보강, 허빙 방지 보강파일, 제방 및 댐의 차수, CIP 대체, 토류벽 및 차수벽, 옹벽 기초보강 및 Sliding방지, 그리고 각종 관로 설치시 연약지반 보강기초로써 활용할 수 있을 것으로 본다.

향후 축적된 실내시험 및 시험시공을 통한 자료를 토대로 MJM공법의 친환경성과 연약지반 보강효과에 대한 공학적 특성 규명작업을 지속적으로 실시할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년 (주)대우건설기술연구소와 (주)우지스의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부로서 이에 깊은 감사를 드립니다.

(접수일자 : 2005년 9월 6일)

## 참고문헌

1. 천병식(2002), S.R.C 공법의 특성 및 현장 적용성에 관한 검토 연구. 한양대학교, pp. 1~5.
2. 천병식(2005), 최신지반주입공법 -이론과 실제-. 원기술, pp. 187, pp. 217~234.
3. 홍원표(1994), 고압분사주입공법(S.I.G)에 의한 지반개량체의 특성에 관한 연구 보고서. 중앙대학교, pp. 111~176.