

공동현상 이론을 고압분사주입공법에 적용하기 위한 실험적 연구

Experimental Study on Enhanced Jet Grouting by Cavitation Theory

이 상 익¹ Lee, Sang-Ik

김 창 종² Kim, Chang-Jong

오 세 현³ Oh, Se-Hun

김 영 옥⁴ Kim, Young-Uk

Abstract

Jet grouting method is widely being used in many geotechnical problems, especially for the purpose of reinforcement of clayey ground and cut-off wall of sandy ground. However, its design depends on highly empirical method, in which many researches have been undertaken. This study investigated the effect of cavitation on jet grouting. Small-scaled model tests were carried out using specially designed and fabricated device to analyze the effect of cavitation on jet grouting with various test conditions including ground condition, injection pressure, and injection time. The test results show that cavitation has a significant effect on jet grouting, and it has a potential for engineering application.

요 지

고압분사주입공법은 지반개량, 차수벽, 흙막이벽, 기초 보강말뚝 등에 사용되고 있다. 고압분사주입공법은 사질토 지반에 대해서는 지수목적으로, 연약한 점성토 지반에서는 지반강화를 위하여 사용되고 있다. 그러나 현재 국내에 적용되고 있는 경우의 대부분은 지반조건에 따른 강도증가 효과를 경험적으로 파악하여 설계에 적용하고 있는 실정이고 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 고압분사주입공법의 지반교란에의 효율성을 증대시킬 목적으로 공동현상(cavitation) 이론을 응용하고자 하였다. 그리고 이를 정량적으로 분석하기 위하여 공동현상(cavitation)을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해 지반조건, 주입압력 및 주입시간 등을 변화시켜가며 점성토 및 사질토 모형지반에 대하여 그라우팅을 실시하였다. 시험결과 공동현상(cavitation)을 적용한 경우 점성토 및 사질토 지반 모두 좋은 결과를 보여, 실제 공법에 적용가능성이 높은 것으로 나타났다.

Keywords : Cavitation theory, Jet grouting, Model tests

1. 서 론

각종산업의 발달과 인구의 도시집중화에 따른 토지 수요증대에 부응하기 위해 최근 도시집중에서의 도로공사, 해안매립공사, 지하철공사, 사면붕괴방지 등의 각종 토목공사는 연약지반이나 하천 등에 인접해서 실시 되는 경우가 많다. 이러한 지반에서 공사를 할 경우가

장 큰 문제점은 굴착시 지하수의 저하로 인한 지반의 침하, 굴착면과 굴착배면 지반의 지하수위차에 의해 굴착저면에 발생하는 보일링 및 히빙 현상 등으로 인접 구조물 및 공사의 안정성에 상당한 위험을 초래할 수 있다(윤중만 외, 1996). 현재 이러한 문제를 해결하기 위하여 약액주입공법 및 고압분사주입공법 등의 공법이 실제 현장에서 많이 사용되고 있다. 특히 3중관

1 정회원, (주) 상지엔지니어링 (Member, Manager, SangJee Engrg., Co. Ltd.)

2 정회원, 명지대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Engrg., Myongji Univ.)

3 정회원, 명지대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Engrg., Myongji Univ.)

4 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environment Engrg., Myongji Univ., yukim@mju.ac.kr)

로드 방식을 채택하고 있는 고압분사주입 공법은 지반 보강효과와 적용 대상지반의 범위가 넓어서 많이 적용되고 있다. 이 공법은 초고압 분류수의 강력한 운동에너지에 의해 지반을 절삭하고, 절삭된 토립자를 지표면으로 배출시키면서 원지반을 시멘트 등의 경화재로 치환하는 방법이다. 그러나 아직까지 이 공법의 지반개량 효과에 대해서도 정확하게 규명된 메카니즘이 없어 경험에 의존하거나 기존 자료를 토대로 하여 현장에 적용되고 있다. 국내에서도 이 공법의 사용빈도가 점차 증대되고 있으며 각종 건설공사에 적용하기 위해서는 지반개량효과를 면밀히 분석하고 그 효율을 더욱 증대시키는 연구가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 고압분사주입공법의 지반개량 효과와 개량효율을 증대시키고자 하는 목적으로 기초시험을 실시하였다. 효율증대 수단으로는 공동현상(cavitation)이론을 적용하고자 하였으며, 공동현상(cavitation)을 분사주입에 적용한 경우와 적용하지 않은 경우 대상지반에 어떤 영향을 미치는지 시험을 통해 고찰하였다. 지반조건, 주입압력 및 시간을 변화시켜가며 점성토 및 사질토 모형지반을 조성하고 공동현상(cavitation) 유무에 따른 그라우팅 시험을 실시하여 결과를 비교, 고찰하였다.

2. 공동현상(cavitation) 정의 및 응용

유체(流體)에는 속도수두, 압력수두, 위치수두 이외 손실수두가 있는데 앞의 세 가지 수두의 합은 전수두로서 일반적으로 손실수두를 무시하면 일정한 값을 가진다. 똑 같은 높이(위치)에 놓여 있는 관이 일부 축소되었을 경우 연속원리에 의하여 속도가 커지게 되는데 반해 압력은 떨어지게(낮아지게) 된다. 이와 같이 유체(流體)속에서 압력이 낮은 곳이 생기면 물속에 포함되어 있는 기체가 분리하여 물이 없는 빈 공간이 생기는데 이와 같은 현상을 공동현상(cavitation)이라 한다(Young, 2001). 액체 속을 빠른 속도로 움직이는 물체의 표면에는 '베르누이의 정리'에 의해 액압(液壓)이 저하한다. 그러면 압력이 액체의 포화증기압보다 낮아진 범위에 증기가 발생하거나 액체 속에 녹아 있던 기체가 나와 공동(cavity)을 이룬다. 이것은 터빈이나 선박용의 프로펠러를 운전할 때 일어나는 현상으로, 압력면에 발생하는 경우도 있지만, 주로 날개의 등(뒷쪽) 부분에 발생한다. 발생한 기포는 압력이 높은 부분에 오면 급격히 부서져 소음이나 진동의 원인이 되며 수리구조물에 피해를 줄 정도의 높

은 에너지를 발생시킨다. 또 기포가 사라져 없어질 때 기포의 부피가 급격히 축소됨에 따라 그 부분의 압력이 매우 커지며, 그것이 인접구조물을 침식시키는 원인이 되기도 한다.

수리학적 측면에서 볼 때는 공동현상(cavitation)이 수리학적 기계나 펌프 등의 수리구조물의 효율을 저하시키거나 손상을 가져오는 나쁜 현상으로 여겨질 수도 있으나 이러한 공동(cavity)에너지를 역으로 이용하면 긍정적인 파괴에너지를 얻을 수 있을 것이다. 예를 들어 고압분사주입공법 시공시, 초고압수로 지반을 절삭하는 과정에서 공동효과를 유발시켜 공동에너지를 지반의 교란영역을 확장시키는데 이용하고 이에 따른 결과로 더 커진 대구경의 지반개량체를 얻을 수 있을 것이다.

3. 모형시험

3.1 시험개요

본 연구에서는 공동현상(cavitation) 이론을 고압분사주입공법에 응용하기 위하여 점성토 및 사질토 모형 지반에서 주입압력, 공기와 물의 배합비, 노즐 형태를 바꾸어가며 관입시험 및 그라우팅을 실시하고 지반의 파괴양상, 주입 형태 및 깊이 등의 영향을 파악하였다. 본 시험에 사용된 노즐은 여러 형태의 노즐을 압력조건과 노즐의 형상을 변화시키면서 수조에서 공동현상(cavitation) 발생 시험을 실시해서 공동현상(cavitation)이 잘 발생하도록 중심에 고압수를 그 주위에 저압수를 배치하여 고압수와 저압수의 상대 속도차로 경계부근에 공동현상(cavitation)이 생기도록 제작한 것이다. 이에 대한 자세한 설명은 3.3절에 나타내었다. 이렇게 생긴 공동(cavity)의 소멸 순간에 발생하는 충격파와 초고압 분류수에 의해 토립자가 흩어지는 원리를 이용하여 그라우팅 영역을 확장함으로써 분사주입의 효율을 증대시킬 수 있음을 나타내고자 하였다.

3.2 시험에 사용된 재료

모형시험에는 점토와 모래 2종류의 흙을 사용하였다. 점토는 부산 ○○지역에서 채취된 시료로 불순물을 제거하여 사용하였으며 모래는 일반적인 강모래로 시험에 적합하도록 10mm 이하의 입자를 사용하였다. 시험에 사용된 점토 및 모래의 물성치를 표 1에 나타내었으

표 1. 시료의 기본물성

흙의 종류	공학적 특성						
	아터버그한계		통일분류	비중	함수비 (%)	건조단위중량	
	액성한계 (%)	소성지수 (%)				최대값 (t/m ³)	최소값 (t/m ³)
점토	64	35	소성이 큰 점토	2.72	39.2	-	-
강모래	-	-	입도분포가 나쁜 모래	2.63	7.6	1.79	1.54

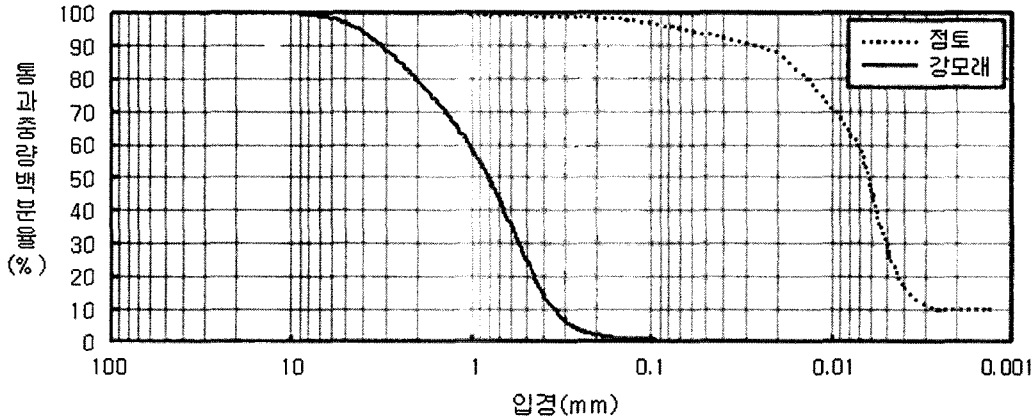


그림 1. 시료의 입도분포곡선

며 입도분포곡선을 그림 1에 도시하였다.

3.3 시험에 사용된 장비

시험에 사용된 주입장치는 노즐과 주입용 탱크, 그리고 주입탱크에 압력을 가할 수 있는 가압장치로 구성하였으며, 압력 컨트롤러를 사용하여 압력을 일정하게 유지되도록 하였다. 실제 주입탱크의 용량은 18L로 10kg/cm²의 압력에도 견딜 수 있도록 제작하였으며 현장에서 사용되는 고압분사주입공법을 모사하기 위하여 압력(고압, 저압)발생장치, 주입용 탱크 및 노즐을 그림 2와 같이 배치하였다. 모형시험에서는 주입압력 및 주입탱크의 용량의 한계로 인해 실제현장의 1/40의 상사모형을 고려하여 적용하였다.

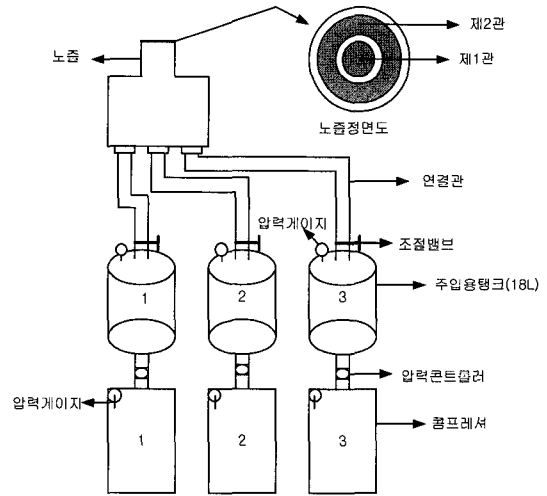


그림 2. 시험 장치 및 배치도

본 시험에 사용된 노즐은 사진 1과 같이 공동현상(cavitation)이 발생할 수 있도록 설계하였으며 캡과 노즐이 분리된 형태이다. 길이가 긴 노즐(일치형)과 노즐 중심부분의 길이가 3mm 정도 짧은 노즐(비일치형) 두 개를 사용하여 시험을 실시하였으며 사진 2에 노즐 전면부의 형상을 나타내었다. 노즐의 가운데 부분에서(제1관)에서 고압수를 배출하고 둘레의 빈 공간(제2관)으로 저압수를 배출하여 두 가지의 서로 다른 속도의 흐름으로 인한 공동현상(cavitation) 발생을 유도하였다.

3.4 점성토 모형지반 관입시험

점성토 모형지반 관입시험에 사용된 모형지반의 조성에는 원심력 압밀기를 사용하였다. 원심력 압밀기는 길이 50cm의 회전팔(arm) 8개가 대칭으로 부착되어 있고(그림 3), 7.5HP의 모터 용량으로 최대 1140rpm의 회전이 가능하다(Park et al., 2003). 원통형 압밀용기(높이 10cm, 길이 40cm)에 슬러리 상태의 시료를 넣어 소정의 회전 원심력으로 회전시켜 균질한 상태의 모형 점토지반을 조성하였다. 회전에 앞서 원통형 압밀상자에서 배

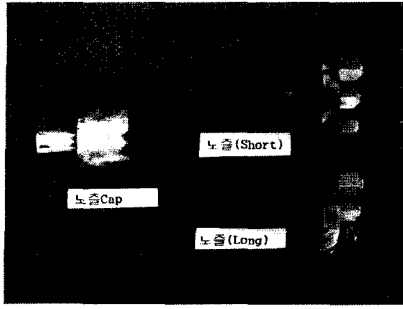


사진 1. 그라우팅 노즐

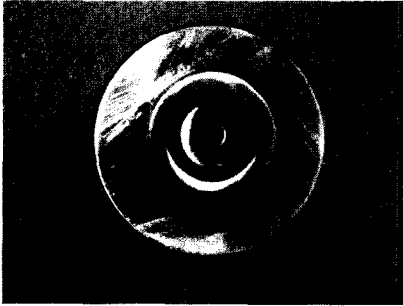


사진 2. 노즐 전면부 형상

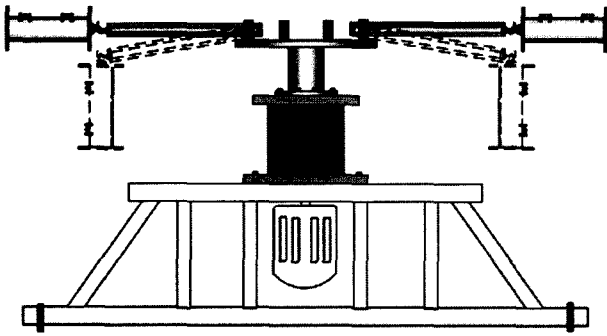


그림 3. 원심력 압밀기

수가 잘 되도록 배수재를 설치하였으며, 배수재와 시료의 마찰을 최소화하기 위하여 배수재와 시료 사이에 다공 필름을 설치하였다. 점성토 모형지반 조성 방법을 설명하면 다음과 같다.

3.4.1 시험방법 및 순서

- 1) #100 체를 통과한 점토시료에 대해 물을 붓고 덩어리가 없는 슬러리 상태로 만든다.

- 2) 시료를 끓여 시료속의 기포를 제거하고 원심력 압밀 용기에 넣는다.
- 3) 조성된 점성토 모형지반에 상재압을 주기 위해 0.8kg의 추를 올려놓고 원심력 압밀기에서 50rpm씩 증가시키면서 최대 250rpm의 회전 원심력으로 30시간 동안 압밀한다.
- 4) 압밀이 완료되면 압밀용기에서 시료를 꺼내어 지름 10cm, 높이 15cm의 크기로 동일하게 모형지반을 조성한다.
- 5) 노즐의 효과와 경향을 파악하기 위하여 주입압력과 시간을 각각 달리하여 점성토 모형지반에 관입시험을 실시한다.
- 6) 관입시험 실시 후 관입 깊이와 직경 및 파괴된 형상을 관찰하고 기록한다.

3.4.2 주입압력과 시간

점성토 모형지반에 대해 실시한 모형시험의 주입유형과 시간을 표 2에 나타내었다. 여기서 주입유형은 일치형 노즐의 경우와 비일치형 노즐의 경우에 대하여, 공동현상(cavitation)이 발생하지 않는 조건인 물(고압)+공기(저압)과 공동현상(cavitation)이 발생하는 물(고압)+물(저압)+공기(저압)의 두 가지 경우이며 물 고압은 10kg/cm², 저압은 3kg/cm², 공기는 1kg/cm²의 압력을 사용하였다. 이는 여러 번의 예비로 실시된 공동현상(cavitation) 발생시험을 통해 얻어낸 사용된 시험기기 및 시험조건 범위 중 최적의 압력조건으로 공동현상(cavitation)이 가장 잘 발생하는 경우이다. 또한 주입시간 7초는 사용된 주입탱크의 용량을 고려하여 결정하였다.

3.4.3 점성토 모형지반 시험결과

점성토 모형지반에 공동현상(cavitation)을 적용한 경우에 대하여 관입시험을 실시하고 그 결과를 표 3에 정리하였다.

일치형 노즐을 사용하였을 때 주입시간을 7초로 시간을 동일하게 하고 물+공기의 조합인 경우와 공동현상(cavitation)이 발생하는 물(고압)+물(저압)+공기의 조합

표 2. 점토시료의 주입유형과 시간

주입유형	노즐(일치형)		노즐(비일치형)	
	물(고)+공기(저)	물(고)+물(저)+공기(저)	물(고)+공기(저)	물(고)+물(저)+공기(저)
주입시간	7초	7초	7초	7초

주) 고: 고압, 저: 저압

표 3. 주입압과 시간에 따른 구근의 특성치

노즐종류	주입시간	특성치(cm)	물(10kg/cm ²) +공기(1kg/cm ²)	물(10kg/cm ²) +물(3kg/cm ²)+공기(1kg/cm ²)
일치형	7초	관입깊이	5.5	7
		직경	2.4	2.5
비일치형	7초	관입깊이	4.5	7
		직경	2.3	3

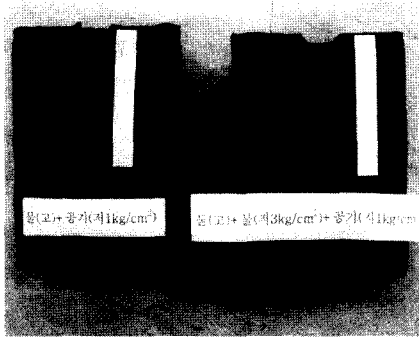


사진 3. 노즐(일치형)주입 결과

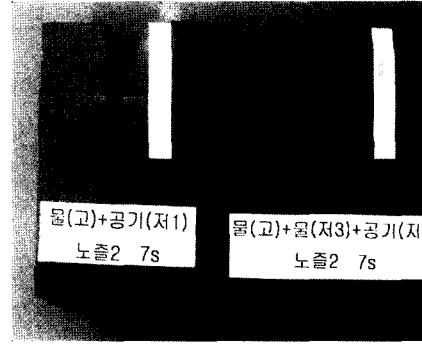


사진 4. 노즐(비일치형)주입 결과

인 경우를 비교하였다. 물과 공기만 분사하여 점토 지반이 파괴된 후 형상을 관찰한 결과 일치형 노즐의 경우는 관입깊이 5.5cm, 직경 2.4cm가 발생하였고, 공동현상(cavitation)을 응용한 물(고압)+물(저압)+공기로 분사한 경우는 관입깊이 7cm, 직경 2.5cm가 발생하여 분사시 조합 방법에 따라 관입깊이와 직경에 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 공동현상(cavitation)을 적용한 경우가 관입깊이는 1.5cm 더 크게 나타났으며 직경에는 거의 차이를 보이지 않았다(사진 3, 4 참조).

비일치형 노즐을 사용하였을 때도 일치형 노즐을 사용한 것과 마찬가지로 공동현상(cavitation)을 적용한 경우가 관입깊이 7cm, 직경이 3cm로 공동현상(cavitation)을 적용하지 않은 경우의 관입깊이가 4.5cm, 직경 2.3cm보다 관입깊이는 2.5cm, 직경은 0.7cm 정도 크게 나타났다. 위 두 경우 모두에서 공동현상(cavitation)의 효과를 확인 할 수 있었다. 본 시험의 조건이 비록 실제 현장에서 적용하는 압력과는 매우 큰 차이가 있고 적용시간도 매우 짧으나 시험조건 내에서 공동현상(cavitation)이 흙에 미치는 영향이 확연히 나타남을 알 수 있었다.

3.5 사질토 모형지반 관입시험

공동현상(cavitation)의 효과를 사질토 지반에 응용하기 위하여 모형시험을 실시하였다. 사질토 지반에 실시한 모형시험에는 지름 20cm, 높이가 50cm인 원형의 철

제 토조를 사용하였으며 강사장치(그림 4, 박종호, 2002)를 사용하여 균질한 지반을 조성하였다.

3.5.1 시험방법 및 순서

- 1) 시료를 준비하고 강사장치를 이용하여 균질한 상대 밀도로 약 깊이 50cm 정도의 모형지반을 조성한다.
- 2) 조성된 모형지반위에 압력조건을 변화시키면서 공동현상(cavitation)을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 주입시간을 달리 하면서 관입시험을 실시한다.
- 3) 주입이 끝나면 시멘트 밀크(또는 파라핀)를 이용하

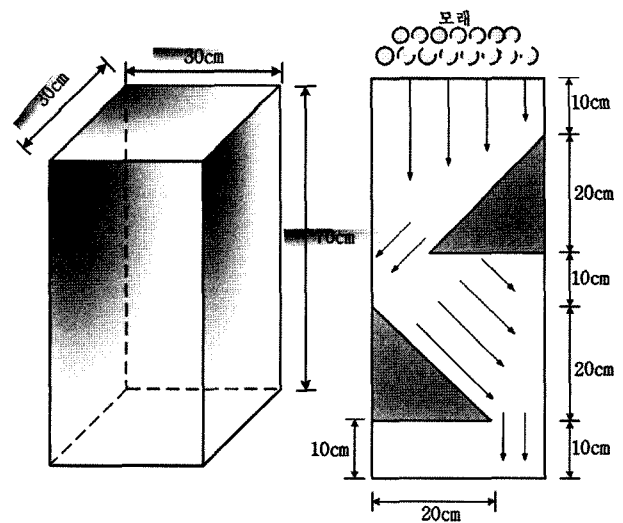


그림 4. 강사장치

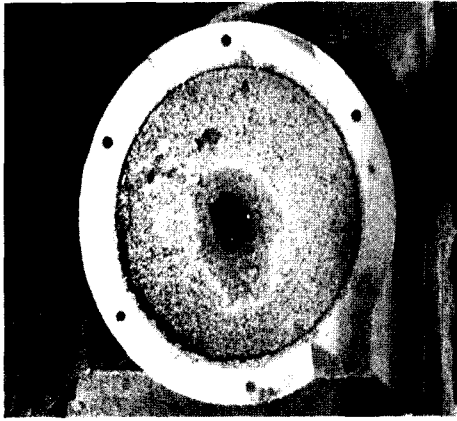


사진 5. 파라핀 주입후의 원형토조

여 관입된 지반에 주입한다(사진 5)

- 4) 시멘트 밀크(또는 파라핀)가 굳으면 모형지반에서 수거하여 구근의 형상, 부피, 직경, 관입된 깊이를 측정하여 경향을 파악한다.

3.5.2 사질토 모형지반 시험결과

노즐의 종류 및 시험조건에 따른 공동현상(cavitation) 효과를 파악하기 위하여 사질토 모형지반에 대하여 주입압력 및 주입시간을 변화시키면서 시험을 실시하여 형성된 구근의 크기 및 부피와 직경을 관찰하였다. 그 결과를 정리하면 표 4와 같다.

시험결과, 일치형 노즐을 사용하고 동일한 주입시간 10초일 때 공동현상(cavitation)을 응용한 경우 구근의 부피는 500cm³, 구근의 직경은 6cm로 공동현상(cavitation)을 응용하지 않은 경우의 구근의 부피 180cm³, 구근의 직경 3.5cm 보다 부피는 320cm³, 직경은 2.5cm가 크게

측정되었다. 그러나 관입깊이는 상대적으로 3.5cm 정도로 작게 측정 되었다.

비일치형 노즐을 사용하고 동일한 주입시간 10초 일 때 공동현상(cavitation)을 응용한 경우 구근의 부피는 650cm³, 관입깊이 35cm, 직경은 5.7cm로 공동현상(cavitation)을 응용하지 않은 경우의 부피 350cm³, 관입깊이 23cm, 직경 5.4cm 보다 크게 나타났다. 특히 구근의 부피는 거의 1.8배, 관입깊이는 12cm 정도 차이가 났으며 직경은 0.3cm가 크게 나타났다. 또한 고압주입시 미치는 공동현상(cavitation)의 영향과 주입시간에 따른 구근의 변화를 비교하기 위해서 공동현상(cavitation)을 응용한 주입시간 5초일 때와 주입시간이 두 배가 큰 공동현상(cavitation)을 적용하지 않은 10초의 경우를 비교 하였다. 일치형 노즐의 경우 구근의 부피와 직경은 공동현상(cavitation)을 고려한 5초의 경우가 부피는 280cm³, 직경은 5.5cm로 공동현상(cavitation)을 응용하지 않은 경우의 부피 180cm³, 직경 3.5cm인 경우보다 부피는 100cm³, 직경은 2cm 크게 나타났으나 관입깊이는 약 3.5cm 정도 작게 측정되었다. 또한 비일치형 노즐의 경우는 구근의 부피, 관입깊이, 직경 세 가지 모두 주입시간이 2배인 공동현상(cavitation)을 응용하지 않은 경우보다도 공동현상(cavitation)을 고려한 5초일 때가 더 크게 측정되었다. 여기서 공동현상(cavitation)을 적용한 경우 즉 5초에 주입된 물의 양과 공동현상(cavitation)을 적용하지 않은 10초에 주입된 총 물의 양은 같다. 본 시험결과 공동현상(cavitation)에 의한 영향은 모형지반을 많이 관입시키기보다 구근의 부피와 직경의 변화에 영향을 주며, 또한 주입시간, 즉 주입된 물의 양에 대한 영향보다는 공동현

표 4. 노즐의 종류와 주입압에 따른 구근의 특성치

노즐종류	주입시간	특성치	물(10kg/cm ²) +공기(1kg/cm ²)	물(10kg/cm ²)+물(3kg/cm ²) +공기(1kg/cm ²)
일치형	10초	구근의 부피(cm ³)	180	500
		관입깊이(cm)	26.5	23
		직경(cm)	3.5	6
	5초	부피(cm ³)		280
		관입깊이(cm)		23
		직경(cm)		5.5
비일치형	10초	구근의 부피(cm ³)	350	650
		관입깊이(cm)	23	35
		직경(cm)	5.4	5.7
	5초	구근의 부피(cm ³)		500
		관입깊이(cm)		28
		직경(cm)		5.5

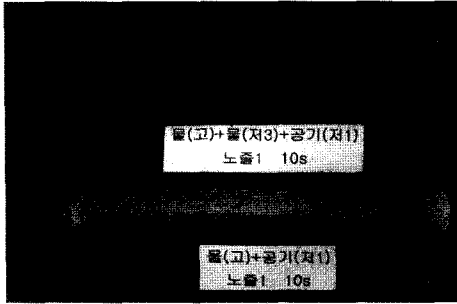


사진 6. 노즐(일치형)-주입시간(10초)

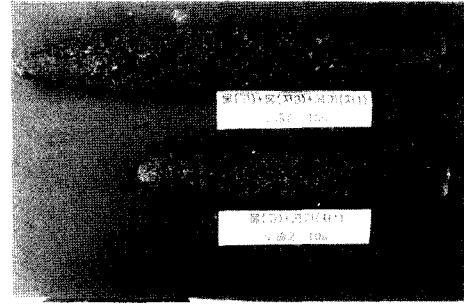


사진 7. 노즐(비일치형)-주입시간(10초)

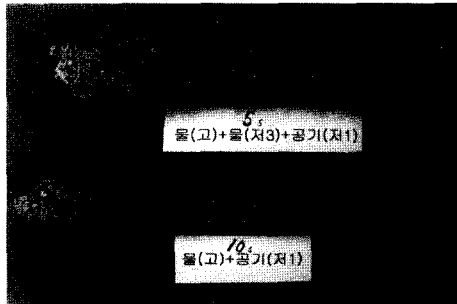


사진 8. 노즐(일치형)-주입시간 변화

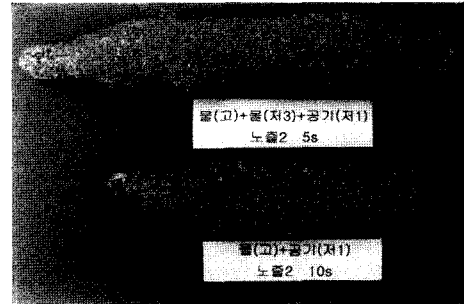


사진 9. 노즐(비일치형)-주입시간 변화

상(cavitation)효과에 의한 것이 구근의 부피 및 직경, 관입깊이의 변화에 더 큰 영향을 준다고 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 공동현상(cavitation)이론을 고압분사 주입공법의 효율 증대에 활용하기 위한 점성토 및 사질토 모형지반에 실내시험을 실시하였으며, 시행된 시험 조건 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 형성된 구근의 크기와 지반의 교란정도는 공동현상(cavitation)에 의해 크게 영향을 받으며 발생하는 공동(cavity)의압에 따라 다르며 공동현상(cavitation)이 잘 발생하는 최적의 조건이 존재한다.
- (2) 점성토 모형지반에 실시한 관입시험에서는 공동현상(cavitation)을 응용한 경우가 일치형 및 비일치형 노즐 모두에서 관입깊이와 직경이 크게 측정되었다.
- (3) 사질토 모형지반에서 실시한 그라우팅 시험에서 일치형 노즐의 경우, 주입시간이 10초일 때 공동 현상(cavitation)을 응용한 경우가 구근의 부피는 320cm^3 , 직경은 2.5cm 정도 컸으나 관입깊이는 상대적으로 3.5cm 작게 나타났다. 이와는 달리 비일치형 노즐의 경우는 구근의 부피, 직경, 관입깊이 모두 공동현상

(cavitation)을 응용한 경우가 크게 나타났다.

- (4) 점성토 및 사질토 모형지반에 실시한 시험에서 공동현상(cavitation)에 의한 영향은 관입깊이보다는 구근의 부피에 큰 차이를 보이는데 이는 공동현상(cavitation)에 의해 모형지반이 많이 관입되기 보다는 지반의 교란영역을 확장시키는데 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (5) 사질토 모형지반에서 실시한 그라우팅 시험에서 공동현상(cavitation)의 영향을 시간조건, 즉 물의 주입량에 따라 알아보기 위하여 공동현상(cavitation)을 고려한 주입시간 5초인 경우와 공동현상(cavitation)을 고려하지 않은 주입시간 10초인 경우와 비교하였다. 일치형 노즐 및 비일치형 노즐에서 주입시간의 영향보다 공동현상(cavitation)효과에 의한 것이 구근의 부피와 직경의 크기 변화에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (6) 이상의 결과를 통해 공동현상(cavitation)이 고압분사주입공법 효율증대에 영향을 줄 수 있는 가능성을 파악하였으며 향후 더 많은 시험을 통해 공동현상(cavitation)의 효과를 극대화 양은 물과 공기하기 위하여 노즐의 개량과 다양한 압력차에 따른 공동현상(cavitation)효과의 최대값을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 표준 EC(주) 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박중호 (2002), "가압그라우팅의 지반보강 효과", 박사학위논문, 명지대학교.
2. 윤중만, 홍원표, 유승경 (1996), "고압분사주입공법에 의한 지반 개량사례연구(1)-구조물 기초지반의 지지력 증대효과", 한국지반 공학회지, 12권 제4호, pp.33-45.
3. Park, Yong-Won, Kim, Byoung-Il, Lee, Sang-Ik, Park, Jong-Ho (2003), "Triaxial Test on Sand-Clay Composite Samples", *Proceedings of the 12 ARC Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.1, pp.521-524, Singapore.
4. Young, F. R. (2001), "Cavitation", Imperial College Press.

(접수일자 2004. 8. 17, 심사완료일 2005. 1. 17)