

## 셴드 터널에서의 뒷채움 주입에 관한 실험적 연구

민덕기 · 백진욱\*  
토목공학과

### <요 약>

본 연구에서는 셴드 터널에서의 뒷채움 주입시 주입압의 변화에 따른 주입효과, 정량적 주입에 의한 충전률, 지반의 포화도 및 밀도에 따른 주입 효과 등을 규명하기 위하여 주입 실험을 실시하였다. 이를 위하여 테일보이드의 영향을 고려할 수 있는 모형 주입 실험기를 제작하였으며, 3종류의 모래 시료에 대하여 실험을 실시하였다. 모형 실험을 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 모형 실험 결과 주입비는 주입압, 주입 방법, 주입량, 쉘타임, 시료의 입경, 밀도와 상관관계가 있음을 알 수 있었다.
2. 입도 균등의 경우 주입압이 커질수록, 입경이 클 수록 주입 효과가 크게 나타났으며, 주입압은 토질의 투수성에 반비례하였다.
3. 시료의 포화에 의한 주입 효과는 주입에 따른 시료 내 간극수압의 증가로 건조 시료의 주입에 비해 현저히 적었다. 밀도의 차이에 의한 주입효과는 지반의 간극비에 의해 지배되는 흙의 투수성에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

---

## An Experimental Investigation on Backfill Injection of Shield Tunnelling

Min, Tukki · Paek, Chinwook  
Dept. of Civil Engineering

### <Abstract>

The effects of injection on the tail - void of shield tunnels are investigated through

---

\*현대건설 건설부

experimental model tests. Three different sand samples are selected for this purpose. The results of the experiments are listed as follows.

1. Groutability ratio depends on injection pressure, method and volumn of grouting, gel time, and properties of the sample soil such as grain size distribution and density.
2. The effects of injection improve as the injection pressure increases and/or the grain size gets bigger.
3. The required pressure for injection is inversely proportional to the permeability of the sample soil.
4. The grout zone is influenced by void ratio of soil.

## 제1장 서론

최근 산업이 발전하고 도시의 과밀화 현상이 발생하면서 지하철 등의 대중교통시설의 건설, 상·하수도, 전력, 통신 등 공공 서비스 시설의 급격한 증가, 정비가 필요하게 되고, 이러한 시설물들을 교통량이 많은 대도시의 중심이나, 교통량은 적으나 대단히 좁은 도로 밀을 건설하는 상황에 이르렀다. 이같은 상황에서는 종래 널리 쓰였던 개착공법으로는 여러 가지 곤란한 문제가 발생함에 따라 기계 굴착이 보편화되었으나, 지질이 변화하는 구간에서는 기존의 기계 굴착이 여러 가지 어려움에 봉착하여 이를 해결할 수 있는 방안으로 샬드 공법이 제안되었다.

샬드터널에서 설계·시공상 가장 문제가 되는 항목은 토피가 얇고, 주택이나 구조물 밑을 통과하는 경우의 지표면 침하방지대책에 있다. 샬드공사에 의한 지반 침하는 원지반의 조건에 따라 달리 나타나지만, 완전한 지반 침하의 억제는 불가능하다. 공사에 수반하여 지반 침하가 발생하는 요인으로서는 샬드장비 외경과 세그먼트 외경과의 사이에 존재하는 공극(테일보이드)이 가장 큰 요인으로 작용하며, 샬드의 형식, 굴착 방법, 막장의 안정 기구, 추진 방법에 따라서도 크게 좌우된다. 테일보이드에 기인한 지반 침하를 최소한으로 억제하기 위한 방법의 하나로 뒷채움 주입이 있다. 뒷채움 주입 작업은 샬드 추진에 따라 발생하는 테일보이드를 세그먼트에 설치되어 있는 주입공(그라우트홀)에서 몰탈 등의 주입재를 그라우트 파이프로 주입하면서 충전하는 작업이다.

뒷채움주입은 연약지반개량공법의 한 종류인 약액주입공법이 모체라 할 수 있다. 약액 주입공은 유럽에서 개발되어 미국 특히 일본에서 크게 발전되었다. 국내에서도 연약지반 처리공법의 일환으로 물유리 등의 화학 약액에 의한 공법에 관한 연구가 있었으며 최근에 와서 본 공법에 대한 관심이 높아짐에 따라 지하철공사 및 도심지에서의 기초굴착 현장에 지반변위의 방지 측면에서 주로 보조공법으로 폭 넓은 연구가 진행 중이다.

샬드터널공사가 최근 국내에서도 몇 차례 시도된바 있다. 그러나 뒷채움 주입시 아직까지는 경험도 축적이 되어 있지 않을 뿐 아니라 적당한 시공 지침도 주어지지 않아 주먹구구식으로 시공이 되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 뒷채움 주입의 영향을 고려하기 위하여 모형 주입시험기를 제작하였으며, 이를 이용하여 뒷채움 주입 시 주입압의 변화에 따른 주입 효과, 정량적 주입에 의한 충전율, 지반의 포화도 및 밀도에 따른 주입 효과 등

을 규명하였다. 실험시 시료는 실험의 편의상 사절도로 제한하였다.

## 제 2 장 쉘드터널의 지반 변위 메커니즘

쉘드 굴착에 의한 지반변위 메커니즘은 표 2.1에 보이는 바와 같이 선행침하, 막장전 용기, 테일침하, 테일보이드에 의한 침하, 후속침하로 크게 5가지로 나눌 수 있다. 침하를 유발하는 요인들로는 쉘드경, 토피, 지반상향등의 현장조건, 쉘드공사의 시공 상태 등에 따라 다르며, 이중 선행, 쉘드경, 토피 등의 계획설계조건과 토층구성, 각층의 강도, 변형특성, 지하수위분포 등의 지반 조건은 노선이 결정된 시점에서 정해지는 고유의 조건이다. 또한 쉘드기중, 보조공법, 뒷채움주입, 시공관리상태 등의 시공조건은 노선이 선정된 후에도 변동하는 것으로 지반변위의 요인이라 할 수 있다. 따라서 지반변위가 나타나는 방식은 지반의 종류, 쉘드기중, 시공상황에 크게 좌우된다.

표 2.1 지반변위의 메커니즘

침하의 종류	원인	지반상태의 변화	변형메커니즘
① 선행침하	지하수위저하	유효토피압의 증가	압축·압밀침하
② 막장전침하 용기	막장붕괴,과대취입 및 막장압입	지반의 응력 해방, 교란부하도압	탄소성변형
③ 테일침하	쉘드기중과시 교란	교란	압축
④ 테일보이드 침하	테일보이드의 발생	지반의 응력해방	탄소성변형
⑤ 후속침하	이상전요인 (잔유분)		압축 및 크리프 침하

## 제 3 장 시료 및 실험 장치

일반적으로 쉘드터널에서의 뒷채움 주입은 세그먼트가 쉘드테일에서 이탈할 때 발생하는 테일보이드(스킨플레이트 두께+테일크리어린스에 의해 결정되는 세그먼트 배면의 공극)에의 주입·충진 기술로 취급된다. 그렇지만 세그먼트 배면에 존재하는 공극은 이 테일보이드만은 아니고 막장 굴착에 따른 여굴 혹은 부분 붕괴에 기인하는 공극, 지중응력해방에 의한 지반의 이완(교란)에 따른 토립자 간극의 증가가 예상된다. 뒷채움주입의 최대 목표가 지반변형방지라는 것을 고려하면 뒷채움주입이 대상으로 해야 할 공극은 쉘드굴진시 발생하는 전공극을 대상으로 삼아야 할 것이다.

### 3.1 시료

시험에 사용한 시료는 시험 편의 상 사질토로 한정하였다. 시험에 사용된 모래는 입경 별로 체분석하여 표 3.1과 같은 입경을 가진 3종류(No. I, No. II, No. III)로 구분하여 사용하였다. 투수성은 입경이 클수록 크게 나타났다. No. II 시료는 주문진 표준사를 사용하였다.

표 3.1 모래의 물리적 특성

시 료	입 경 (mm)	비 고
No. I	10 <sup>#</sup> ~30 <sup>#</sup> (0.59~2.00)	
No. II	30 <sup>#</sup> ~50 <sup>#</sup> (0.297~0.59)	주문진 표준사
No. III	50 <sup>#</sup> ~70 <sup>#</sup> (0.210~0.297)	

주입제는 물시멘트비 2.5, 규산비=20%인 배합을 선택하여 실시하였다. 실험에 이용한 배합시방 예는 표 3.2에 나타내었다.

표 3.2 배합시방 예

	사용재료
A 액	시멘트(200g) + 벤토나이트(40g) + 물(500cc)
B 액	규산(100cc)

### 3.2 실험 장치

실험에 사용한 실험 장치의 개략도를 그림 3.1에 나타내었다.

실험 장치는 A액과 B액을 구별할 수 있도록 2개의 그라우트 탱크를 마련하였다. 탱크는 분리가 가능하여 주입 후 세척하여 사용할 수 있다. 주입시의 주입압은 수동으로 조절할 수 있으며 압력이 일정하게 유지될 수 있도록 하기 위하여 피스톤부에 2개의 오링을 설치하였으며, 나사의 성질을 이용한 손잡이를 돌려 일정하게 주입압을 유지시킬 수 있다. 시료가 들어있는 튜브는 시료의 밀도를 조정할 수 있으며, 투명한 아크릴 관으로서 직경 6 cm, 높이 33 cm 로 체적은 933.05 cm<sup>3</sup> 이다. 시료가 통과하는 관은 비닐관으로서 6

$\text{kg/cm}^2$ 까지의 압력을 견딜 수 있는 관을 이용하여 고압의 주입에도 이용할 수 있도록 하였으며, 실험 후 뒷채움재에 의하여 관이 막히는 것을 방지하기 위하여 주입 후 바로 분리하여 세척이 가능하도록 제작하였다. 압력계이지는  $0\sim 4 \text{ kg/cm}^2$ 의 측정범위를 갖는 계기를 선택하였으며, 역시 주입후 뒷채움주입재로 인해 압력계이지의 성능에 이상이 없도록 분리하여 세척이 가능하도록 제작하였다.

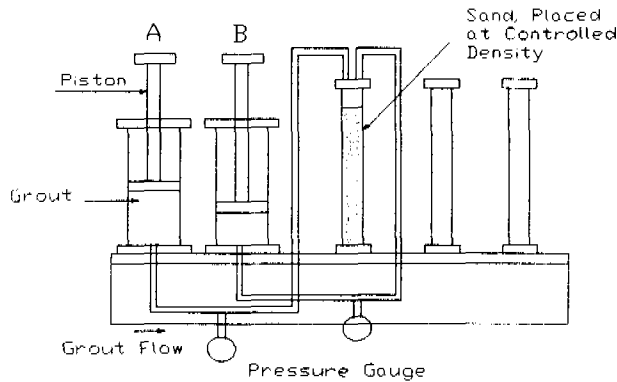


그림 3.1 모형실험장치 개략도

## 제 4장 모형주입시험 및 결과분석

실험은 먼저 시료로 사용하는 모래를 24시간 건조로에서 노건조 시킨 후 밀도를 조정하여 주입용 몰드에 설치하였다. 시료의 설치시 테일보이드를 고려하기 위해 기 계산된 밀도를 이용해 공극으로 남아 있는 주입용 몰드의 상단부를 테일보이드로 간주하였다. 실험에서는 먼저 주입압을 관리하였다. 주입압은  $0.5, 1, 1.5, 2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ 로 각각 변화시켜 가며 세 종류의 시료에 주입하였다. 실제 시공된 경우를 보면 주입압은 세그먼트 주입구에서  $1\sim 3 \text{ kg/cm}^2$ 이 일반적으로 사용하고 있다.

또한 주입 방식을 2액 1계통식(1.5 Shot System), 2액 2계통식(2 Shot System)으로 변화시켜 가며 주입하였다. 주입방식은 겔타임을 기준으로 하여 세 가지로 나눌 수 있는데 통상 겔타임 20분 이상으로 해도 되는 경우에 쓰이는 1액 1계통식, 두개의 주입관에서 나온 두 액이 혼합되는 순간 겔화되는 2액 2계통식, 그리고 이들의 중간계통식으로서 겔타임이 2~10분 정도이고 보편적으로 많이 사용하는 2액 1계통식이 있다. 그러나 쉘드터널의 뒷채움공은 세그먼트에 있는 주입구의 한정성으로 인해 세그먼트의 설계 및 제작이 제고 되어야 하며 통상 2액 1계통식을 채택하고 있다.

또한 현장에서 많이 사용하는 방식인 주입량에 의한 관리도 해보았다. 이는 테일보이드의 제적을 계산하여 기 계산된 체적만큼의 주입재를 주입하는 방식이다. 주입량은 주입재

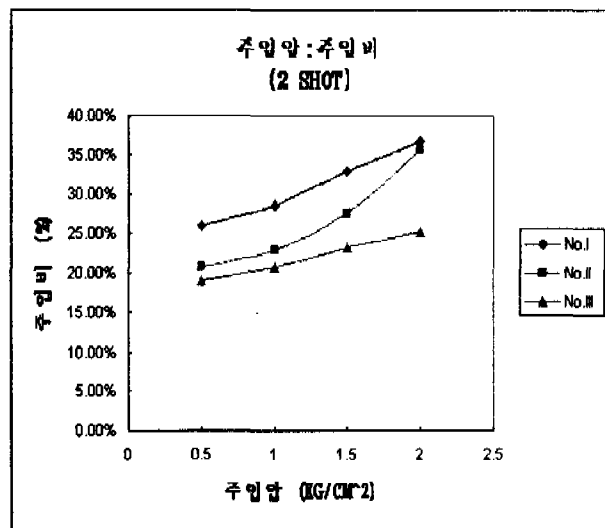
가 지반으로 침투, 가압에 의한 압입, 탈수압밀 등의 영향으로 테일보이드 계산량의 150~200%가 되는 경우가 많다. 그러나 본 연구에서는 테일보이드 만큼의 뒷채움재만을 주입하였다. 이는 주입재의 침투 및 주입에 따른 손실율을 구하기 위해서이다. 마지막으로 각 시료의 밀도변화에 따른 주입비 및 각 시료들의 포화에 따른 주입효과를 규명하기 위해 실험을 실시하였다.

#### 4.1 주입압에 의한 주입 효과

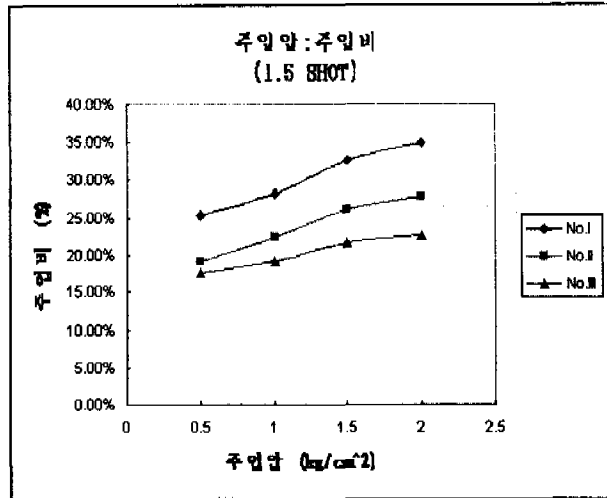
그림 4.1(a), 그림 4.1(b)는 주입압의 변화에 따른 주입비를 나타내고 있다. 주입압은  $0.5 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$  로 변화시켜가며 실험하였다.

주입압이  $0.5 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$  의 범위인 경우 주입비는 시료 I 인 경우가 26.09%~36.73%, 시료 II 인 경우가 20.82%~35.55%, 시료 III 인 경우는 19.09%~25.18%의 값을 보였다. 실험 결과 주입압이 커질수록, 입경이 클수록 주입의 효과가 크게 나타났고, 주입압은 토질의 투수성에 반비례함을 알 수 있었다. 이는 약액이 흙입자 내에서 일반적인 층류의 흐름인 Darcy의 법칙을 따르기 때문으로 사료된다. 약액의 주입에 관계가 있는 지반상의 특성으로는 일반적으로 투수성과 흙속의 물의 상태가 문제가 되는데 여기서 투수성은 주로 지반의 간극비에 따라 지배되며 흙속의 물의 상태는 포화도와 물의 흐름정도에 영향을 받는다.

또한 주입방식에 의한 주입비의 차이는 2 Shot의 경우가 1.5 Shot에 비해 약 3% 정도 주입비가 큰 것으로 나타났으며, 이는 짧은 쉘타임 때문에 1.5 Shot의 경우 2 Shot에 비해 테일보이드와 시료의 공극에서의 상대적 반응속도가 빠르기 때문으로 판단된다.



(a) 2 Shot System 의한 주입비



(b) 1.5 Shot System 주입비

그림 4.1 주입압의 변화에 의한 주입비

4.2 주입량에 의한 주입효과

뒷채움주입량은 기하학적으로 결정되는 테일보이드 체적을 기본으로 산정하며, 이 테일 보이드 양에 대한 실주입량의 비로서 결정할 수 있다. 전공극량에 대한 실주입량을 충전율이라 정의할 수 있으며, 충전율은 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\text{충진율} = \frac{\text{주입량} \times \text{유효율}}{\text{전공극량}} \quad (4.1)$$

여기서, 유효율은 뒷채움주입량중 공극에 충전된 유효 뒷채움주입량의 주입량에 대한 비율을 의미한다. 그러나 뒷채움 주입공의 특성상 쉘드테일 이탈 후 신속하게 이루어지는 작업이므로, 미리 지반의 특성을 파악하여 주입량을 결정지어야 한다.

그림 4.2에는 정량적인 주입실험에 의한 결과치를 도시하였다. 시료의 입자가 클수록 주입비는 크게 나타났으며, 주입시의 최대 주입압을 측정된 결과 시료 I 인 경우 약 1.35 kg/cm<sup>2</sup>, 시료 II 인 경우 약 1.45 kg/cm<sup>2</sup>, 시료 III 인 경우는 약 1.6 kg/cm<sup>2</sup> 의 압력을 나타냈다. 실험 결과 뒷채움 주입시 테일보이드 뿐만 아니라 침투로 인해 발생하는 주입압은 토질의 투수성에 반비례함을 알 수 있다. 또한 주입비는 시료 I 일 경우가 주입 용적의 약 33.7%, 시료 II 일 경우 약 26.33%, 시료 III 인 경우 약 21.09%로 나타났다. 따라서 주입 후 발생하는 2차 공극을 방지하기 위해 적정량의 주입량의 결정은 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

주입방식에 의한 주입비는 2 Shot System의 경우가 약 1.5% 정도 크게 나타났다.

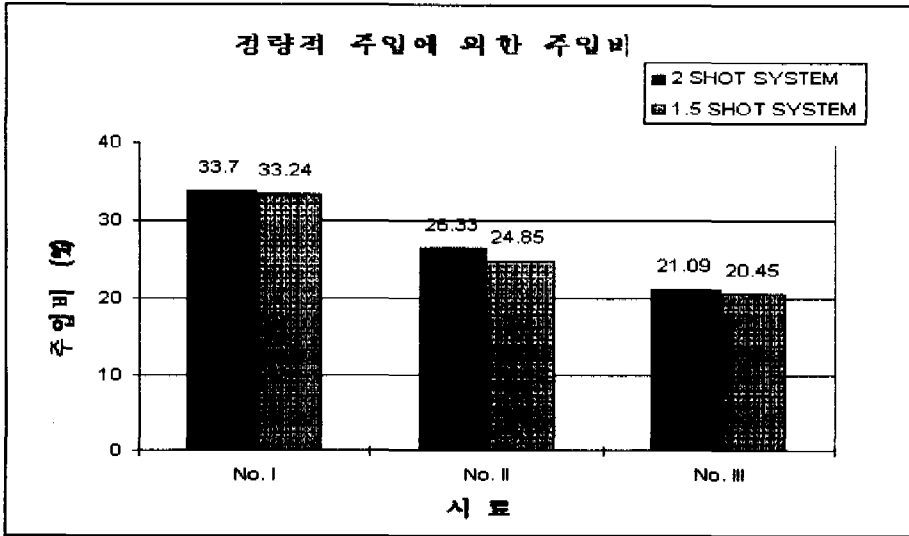


그림 4.2 정량적주입에 의한 주입비

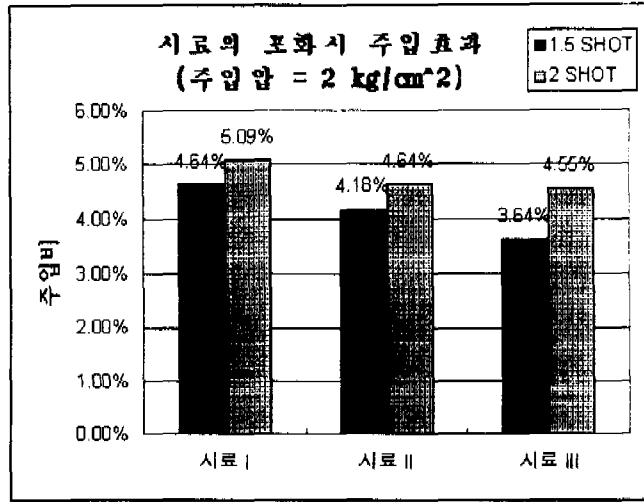
#### 4.3 시료의 밀도와 포화도에 의한 주입효과

월드터널의 테일보이드부가 지하수위 아래에 존재하는 경우, 터널주변지반은 포화상태로 존재할 것이며 이때의 주입효과를 알아보기 위해 실험을 실시하였다. 실험은 시료튜브에 밀도가 기조정된 시료를 24시간 포화시킨 후 실시하였다. 테일보이드부의 공극은 물의 영향을 받지 않고, 공극 자체를 유지한다고 가정하였다.

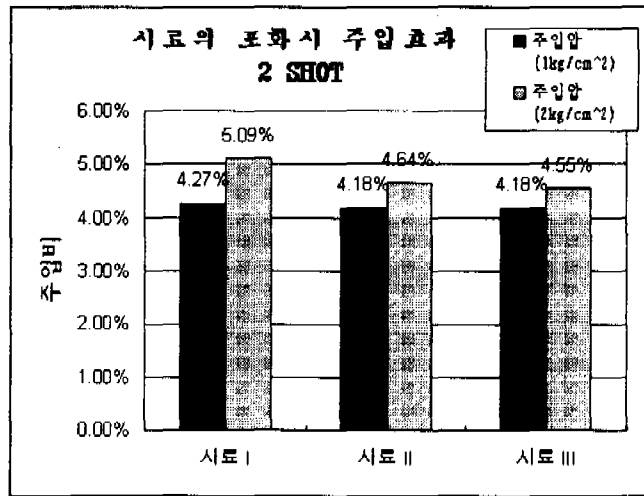
그림 4.3(a) 및 그림 4.3(b)는 주입방식과 주입압의 변화에 따른 포화시료에의 주입효과를 나타내고 있다. 대체적으로 주입압력이 증가할수록 주입비가 크게 나타났으나, 주입압으로 인한 시료내의 간극수압의 증가로 인해 주입압의 증가폭에 비해 주입비는 크게 증가하지 않았다. 주입압이  $2 \text{ kg/cm}^2$  일 경우 건조시료와 비교할 때 약  $\frac{1}{7} \sim \frac{1}{10}$  정도의 주

입비를 나타내었다. 또한 시료의 입경이 클수록 주입비가 크게 나타났다. 그러나 이 또한 건조상태의 시료에 비해 증가 폭이 크지 않았다. 주입방식에 의한 주입비 역시 건조시료의 경우와 비슷한 경향을 보였다. 또한 그림 4.3(a)에서와 같이 시료의 입경이 작아 질수록 2 Shot System에 비해 1.5 Shot System의 주입비가 상대적으로 작게 나타났으며 이는 침투가 거의 발생하지 않아 A액과 B액의 반응이 용이했기 때문으로 사료된다.





(a) 주입압 = 2kg/cm<sup>2</sup>



(b) 2 Shot System

그림 4.3 시료의 포화에 의한 주입비

다음은 입경이 0.210~0.297 mm 의 범위에 있는 시료 III에 밀도를 변화 시켜 주입하여 보았다. 표 4.1과 같이 느슨한 상태와 조밀한 상태에서의 주입효과를 비교하였다. 여기서 느슨한 상태와 조밀한 상태란 두 시료의 상대적 비교이며 토질 역학적 정의는 아니다.

표 4.1 시료의 물성치

(No. III 시료)	e	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )
Loose Sand	0.81	1.42
Dense Sand	0.52	1.73

그림 4.4에는 밀도 변화에 따른 주입비를 나타내고 있다. 느슨한 경우 주입압이 0.5~1.5 kg/cm<sup>2</sup> 으로 커짐에 따라 주입비는 19.09~23.36%로 증가하였으며, 조밀한 경우는 10.17~14.67% 로 느슨한 상태에 비해 약 9%정도 주입비가 작게 나타났다. 이는 뒹채움재의 주입으로 인한 영향범위는 지반의 간극비에 의해 지배되는 흙의 투수성에 크게 영향 받음을 알 수 있었다.

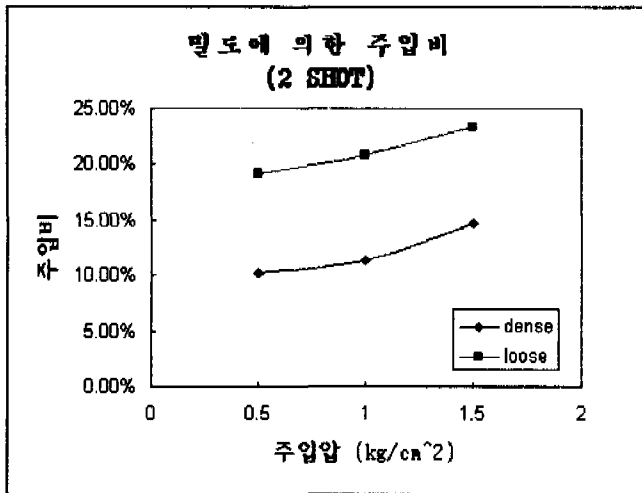


그림 4.4 밀도변화에 따른 주입비

### 제 5 장 결 론

월드터널에서의 테일보이드의 영향을 고려하기 위하여 모형주입실험기를 제작하였으며, 3종류의 모래 시료에 대해 각각 주입압, 주입량, 시료의 밀도 및 시료의 포화도에 따른 주입실험을 실시하였다. 모형주입실험을 통해 얻은 결과를 분석, 정리하면 다음과 같다.

(1) 주입압의 변화에 의한 주입비는 입경이 큰 시료 I 의 경우 26.09~36.73%, 주문진표 준사인 시료 II 의 경우 20.82~35.55%, 입경이 작은 시료 III 은 19.09~25.18% 로 나타났으

며, 주입압이 커질수록 입경이 클수록 주입효과가 크게 나타났다.

(2) 정량적 주입의 경우 침투로 인한 손실율은 시료 I의 경우 주입용적의 약 33.7%, 주 문진표준사인 시료Ⅱ가 약 26.33%, 시료Ⅲ은 약 21.09%로 나타났으며, 주입압이 토질의 투수성에 반비례함을 알 수 있었다. 이로 인해 주입후 발생하는 2차공극을 방지하기 위해 주입량의 결정은 매우 중요하리라 판단된다.

(3) 시료의 포화에 따른 주입비는 건조시료 주입비의 약  $\frac{1}{7} \sim \frac{1}{10}$  정도의 주입비를 나타냈으며, 이는 시료내의 간극수압 증가로 판단된다.

(4) 간극비가 0.81인 느슨한 시료와 간극비가 0.52인 촘촘한 시료에 주입한 결과 느슨한 시료에 비해 촘촘한 시료가 약 9% 정도 주입비가 작게 나타났으며 이는 뒷채움재의 주입으로 인한 영향범위가 지반의 간극비에 의해 지배되는 흙의 투수성에 크게 영향 받음을 알 수 있었다.

본 연구는 입도가 균등한 이상적인 모래지반에 대하여 실험을 실시하여 분석하였다. 그러나 쉘드터널의 특성상 테일보이드의 부분적인 변형은 불가피하며, 뒷채움공의 신속성으로 이를 최대한 억제하여 지반변위를 최소화하여야 할 것이다. 또한 지속적인 계측을 실시하여 뒷채움주입후 주입재의 변형이나, 주입재의 체적 변화로 인한 2차공극의 발생을 방지하여야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- (1) King, J. C. and Bush, E. G. W., "Symposium on Grouting: Grouting of Granular Materials," P. of ASCE, J. of SMFE, Vol. 87, SM2, pp.1~32, April, 1961.
- (2) Peck, R.B. (1969), "Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground", State-of-the-Art Report, Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found.Eng., Vol.3, pp.225-290.
- (3) 日本材料學會 土質安定材料委員會編, "藥液注入工法", 鹿島出版社 發行, 東京, P.154 - 233, 1971
- (4) 森麟, "藥液注入工法の現状と將來の展望", 土と基礎, Vol.26, No. 8, pp.1-2, 1978
- (5) 秦柄益, 千柄植, "藥液注入에 의한 固結土의 工學的 特性", 大韓土木學會誌, Vol. 28, No. 6, pp.97~107, 1980.12
- (6) 秦柄益, 千柄植, "물유리계 注入材를 주로 한 地盤強度增大", 大韓土木學會論文集, 第4卷, 第2號, pp89~99, 1984.6