

# CGS에 의한 기초지반보강에 관한 연구

## A Study on the Ground Improvement by Compaction Grouting System

천병식<sup>1</sup>, 권형석<sup>2</sup>

Byung-Sik Chun, Hyung-Seok Kwon

**Key Words** : *Compaction Grouting*(컴팩션그라우팅), *Ground Improvement*(지반개량),  
*Underpinning*(기초보강), *Densification*(조밀화)

### Abstract

The use of compaction grouting evolved in 1950's to correct structural settlement of buildings. Over the almost 50 years, the technology has been developed and is currently used in wide range of applications. Compaction grouting, the injection of a very stiff, 'zero-slump' mortar grout under relatively high pressure, displaces and compacts soils. It can effectively repair natural or man-made soil strength deficiencies in variety of soil formations. Major applications of compaction grouting include densifying loose soils or fill voids caused by sinkholes, poorly compacted fills, broken utilities, improper dewatering, or soft ground tunneling excavation. Other applications include preventing liquefaction, re-leveling settled structures, and using compaction grout bulbs as structural elements of minipiles or underpinning. In this paper, on the basis of the case history constructed in this year, a study has been performed to analyze the basic mechanism of the compaction grouting. Also, the effectiveness of the ground improvement and the bearing capacity of the compaction pile has been verified by the Cone Penetration Test(CPT) and Load Test. Relatively uniform compaction grouting column could be maintained by planning the quality control in the course of grouting. And, the Quality Control Plan has been conceived using grout pressure, volume of grout and drilling depth.

### 1. 서 론

최근 우리나라는 고속철도, 인천 국제공항, 도심지 지하철, 서·남해안 항만공사 등 대규모 국가 건설공사가 진행중에 있으며, 아울러 시공도중 터널붕락, 주변지반 및 인접구조물의 부동침

하, 측방유동에 의한 구조물의 변위 등 대조물 손상 등 기존의 주입공법들이 본질적으로 안고 있는 문제점들이 많다[1].

현재 국내에서 일반적으로 쓰여지고 있는 주입공법들은 지반개량 원리가 약액의 침투고결, 시멘트계의 맥상고결, 고압분사방식에 의한 배출치환 등이지만, Compaction Grouting System (CGS)은 slump치가 거의 없는 Soil-Cement의

\*1 정희원, 한양대학교 토목공학과, 교수

\*2 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

몰탈을 주재료로 하여 '비배출치환'이라는 독특한 원리로 주입하는 공법이다. 본 공법은 몰탈을 이용한 지반내에서의 정적다짐효과를 통하여 지반밀도 증대를 도모하는 비배출치환공법이므로 저공해, 저소음, 내구성 확보뿐만 아니라 주입 고결체의 강도가 매우 높아 건물의 기초파일로 사용될 정도로서 기존의 고압분사주입공법 등 타공법에 비하여 장점이 많은 공법이다[2].

본 공법은 근래 국내에도 도입되어 지반개량, 폐광충전재, 항만공사 등에 폭넓게 사용되고 있지만, 아직까지 본 공법에 대한 이론적인 이해가 불확실한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CGS 공법의 기본 메카니즘을 이해하기 위한 이론적 접근과 함께, 기초지반이 연약한 부지의 구조물 기초 pile 보강공사를 위하여 최근 수행된 CGS 시공현장에 대한 시공결과를 분석하여 본 공법의 효과를 검증하고, 이에 따른 시공중 품질관리방안을 제시하고자 한다.

## 2. 공법 개요

CGS 공법이란, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 비유동성의 몰탈형 주입재를 지중에 압입하여 원기둥 형태의 균질한 고결체를 형성함으로써 주변지반을 압축강화시켜 지반밀도를 증대시키는 지반개량공법으로서, 1950년대 초 미국 캘리포니아주의 주입기술자들이 Low Slump Mortar형 주입재를 이용한 실험을 시도하던 중 재하중을 받는 구조물 하부의 몰탈이 기초지반을 가압하여 느슨한 토질의 밀도를 증대시킨다는 사실에 착안하여, 주입용 pipe를 이용한 인위적인 밀도 증대 방안을 고안하게 된 것이다. 이러한 독특한 주입기술은 기존의 주입공법과는 달리 흙을 다지는 효과가 있어 'Compaction Grouting'이라고 명명되었고, 현재는 Low Slump Mortar Grouting 또는 Limited Mobility Displacement Grouting등으로 불리우고 있으며, 국내에서는 CGS공법으로 잘 알려져 있다[2, 3].

1980년 ASCE의 Grouting 위원회에서는 본공

법을 다음과 같이 정의하였다. "Compaction Grout는 Slump치가 1 inch(25 mm)이하인 주입재이다. Soil-Cement가 기본재료이며, 주입재의 소성확보를 위한 충분한 세립토(실트질 크기)와 내부 마찰각 증대를 위한 조립토(모래질 크기)로 구성된다. 이 주입재는 주변지반의 공극 속으로 침투되는 것이 아니라 지중에 균질한 구체를 형성하면서 지중에 방사형으로 압력을 가하여 주변지반의 압축변형을 조절하거나 구조물을 복원하는 것이다"[4].

기존의 약액이나 시멘트계 주입재는 암반의 절리나 파쇄대, 흙의 공극을 충전시키면서 지반 강도증대 또는 차수 등의 목적으로 이용되지만, 비유동성의 주입재가 지반에 덩어리채로 들어가 균질한 고결체를 형성시키고 지반밀도를 증대시키는 등의 다짐(compaction)효과를 발휘한다는 생각은 하지 못하였는데, 점차 이러한 주입기법이 유용하고 응용범위가 넓다는 사실을 인식하게 되었다.

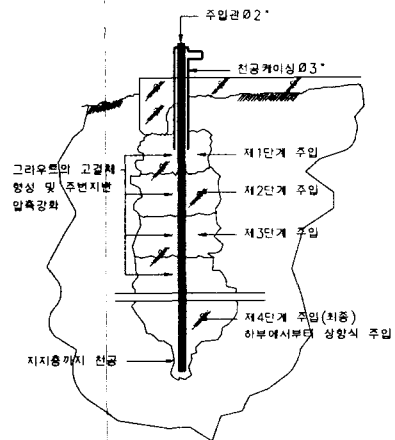


Fig. 1 CGS 주입 형태

CGS공법은 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 기존의 주된 3 가지 주입방식, 즉, 시멘트계의 맥상 고결, 약액의 침투고결, 고압분사방식에 의한 배출치환 등과는 전혀 다른 '비배출치환'이라는 독특한 원리의 주입공법이다.

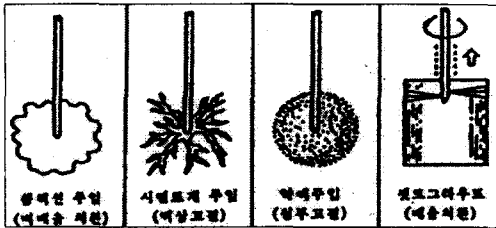


Fig. 2 주입공법별 주입방식 비교

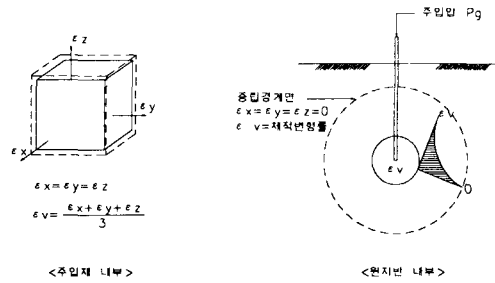
3. 이론적 고찰

CGS공법은 이론적 배경보다는 경험적 방법에 의하여 진보를 하여 왔으나, 50년의 역사를 거치는 동안 비교적 많은 실험적 고찰과 함께 최근에는 이론적 접근이 활발히 이루어 지고 있다.

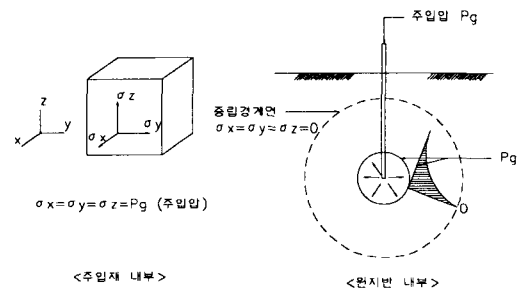
주입과정중 주입 고결체의 형성과 팽창으로 주입재에 인접한 흙은 심각한 응력과 변형을 받게 되고 그 결과 고결체 경계면에서는 국부적인 피압대가 형성되고 어느정도 이격된 곳의 흙은 응력분포가 규칙적이고 변형이 탄성적인 콤팩션을 받게된다. 본 공법의 효과를 예측하고 설계에 반영하기 위해서는 Vesic의 지반공동확장 메카니즘을 적용할 필요가 있으며[5], 본 공법에 대한 적용내용은 다음과 같다.

- (1) 흙과 콤팩션 주입재 사이에는 뚜렷한 접촉면이 있다.
- (2) 충전과 소성변형에 의해 가장 연약한 부분을 치환하는 경향이 있다.
- (3) 주입 고결체의 형태는 토질의 물리적·역학적 특성 및 상재구조물의 하중 등 여러 요인에 의하여 불규칙한 형태로 고결될 수도 있으나 균질토에서는 대개 구형으로 형성된다.

균질하고 등방성인 지반일 경우 지중에 가해지는 주입압은 주입공의 선단을 중심으로 하는 구형의 중립경계면을 통하여 소산되고, 그 중립경계면에서는 주입에 따른 응력과 변형의 영향은 없다.



(a) 주입에 따른 변형률 상태



(b) 주입에 따른 응력상태

Fig. 3 CGS 주입에 따른 응력과 변형의 관계

지중에서의 변형률은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있으며, 균질하고 선형탄성적인 등방성 재료일 경우에 CGS에 의한 지반의 체적변형율은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_v = \frac{V_k}{V_{nb}} \tag{1}$$

여기서,  $V_k$  : 주입재의 체적

$V_{nb}$  : 중립경계면내 흙의 체적

흙의 체적변형계수(bulk-modulus)를 식 (2)와 같이 정의한다.

$$E_b = \frac{P_k}{\epsilon_v} \text{ 또는 } \epsilon_v = \frac{P_k}{E_b} \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)로부터 다음의 식 (3)을 구한다.

$$\frac{V_g}{V_{nb}} = \frac{P_g}{E_b} \quad (3)$$

지반의 밀도증가량  $\Delta\gamma$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta m}{V_{nb} - V_g} \quad (4)$$

여기서,  $\Delta m$  : 주입에 의하여 늘어난 흙의 무게  
 $= V_g \cdot \gamma_s$

$\gamma_s$  : 주입전단에서의 흙의 단위중량

따라서,  $\Delta\gamma$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_s \cdot V_g}{V_{nb} - V_g} \quad (5)$$

$$= \gamma_s \cdot \frac{V_{nb}}{V_{nb} - V_g} \cdot \frac{P_g}{E_b}$$

$$E_b = \gamma_s \cdot \frac{V_{nb}}{V_{nb} - V_g} \cdot \frac{P_g}{\Delta\gamma} \quad (6)$$

또한, 지반이 받는 콤팩션의 정도를 지중에 압입된 주입재의 체적과 연관지어 개량대상 토체의 상대적인 콤팩션 증가를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta RC = \frac{100W}{\gamma_{max}} \left[ \frac{1}{V_o - (V_g - V_s)} - \frac{1}{V_o} \right] \quad (7)$$

여기서,  $W$  : 개량대상 토체의중량

$V_o$  : 개량대상 토체의 원체적

$\gamma_{max}$  : 흙의 최대밀도

$V_g$  : 주입재의 체적

$V_s$  : 지표면 상승에 대한 체적수정

상기와 같은 주입압과 대상지반과의 응력-변형 거동특성 뿐만 아니라, CGS공법에 대해서는 주입재의 점성, 주입압, 주입율, 주입량 등과 같은 주입 특성치와 흙의 컨시스턴시 및 흙의 종류들과의 상관관계도 이론적으로 정량화된 분석이 이루어져야만 최적설계 및 시공이 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 설계와 시공

CGS공법의 설계 및 시공 계획도는 Fig. 4와 같다. 주입설계의 첫 단계는 대상지반의 토질공학적인 측면과 구조물의 구조적 문제점을 함께 이해하는 것이다. 이를 위해서 지반조사와 구조물에 대한 철저한 검토를 통해 공법의 적용성 및 적합성을 판단하여야 한다.

본 공법의 주요 설계 재요소는 주입재료, 주입압, 주입율, 주입량, 주입방식 등이며 설계시 고려되는 모든 재요소들은 주입 고결체의 형상, 수압파쇄현상 등 주입효과에 지대한 영향을 주게 되므로 어느 한가지 소홀함 없이 세심한 주의를 필요로 한다. 그리고 주입효과의 극대화를 위해 시공현장에서 시험주입을 행하여 본 시공에 반영하는 피드백(feed-back)과정이 필요하다.

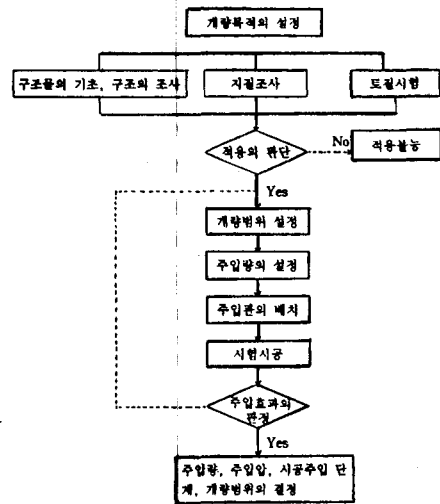
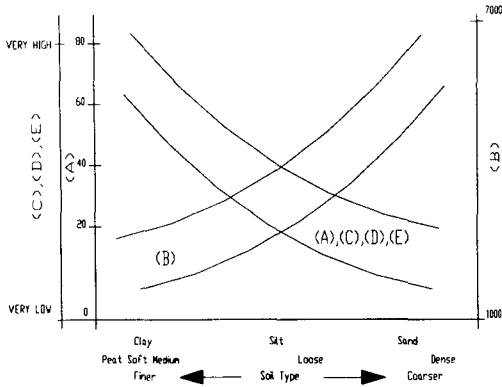


Fig. 4 CGS공법의 설계 및 시공흐름도

CGS공법에 대해서는 아직까지 설계 및 시공에 적용할 수 있는 주입재의 점성, 주입압, 주입율, 주입량 등과 같은 주입특성치와 흙의 토질공학적인 특성치와의 상관관계(범위)가 이론적으로 정량화된 분석이 이루어지지 못하고 있지만 현재까지의 시공경험으로부터 규명된 특성을 정리하면 Fig. 5와 같다[3].



A : 주입재 점도 B : 주입압 C : 주입율  
D : 주입량 E : 밀도증대효과

Fig. 5 주입특성치와 흙의 종류와의 상관성

Fig. 5에 의하면, 일반적인 주입재의 점도는 slump치 25 mm를 기준으로 하지만, 피트, 연약한 점토나 실트질 점토와 같이 컨시스턴시가 낮은 흙에 대해서는 25 mm의 slump치는 실제 시공시 유동성이 부족하다는 것을 알 수 있다.

주입압의 경우 흙의 종류에 따른 상관성이 다른 주입특성치들과는 정반대되는 성향(조립토, 상대밀도가 클수록 압력이 크게 필요함)을 나타낸다.

주입율과 주입량은 컨시스턴시가 낮은 흙에서 많고 컨시스턴시가 높은 흙에서는 적다. 따라서 주입에 따른 지반의 밀도증대효과도 흙에 따라 변화하게 된다.

4.1 주입재의 구성과 배합

본 공법의 재료 배합시에는 내부마찰과 응력해방 메커니즘의 복잡한 관계를 바탕으로 주입재를 통제할 수 있는 유동학적 특성을 반드시 고려하여야 하는데, 여기서 주입재의 유동학적 특성은 골재와 세립토의 입도조성과 주입재의 슬러프 및 컨시스턴시에 의해 좌우되며, 특히 #200체(0.074 mm)보다 작은 세립분의 경우에는 그 양의 조절에 각별히 주의하여야 한다.

주입재료의 선정, 배합시에는 반드시 골재 체 분석시험을 통하여 입경가적 곡선이 Fig. 6에 보이는 Ideal-Line에 근접하도록 해야 하며, 이는 재료분리, 펴핑한계, 고결체의 형성 및 수압파쇄 현상 등에 근거하여 수많은 현장시험을 통해 얻어진 것이다.

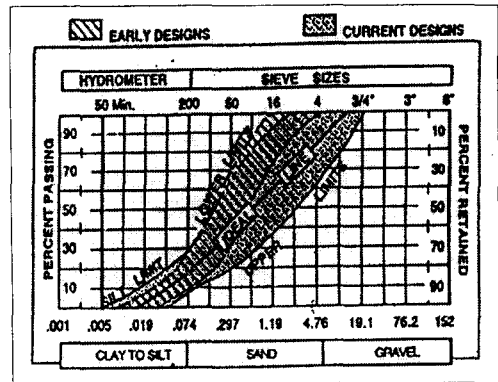


Fig. 6 주입재 배합의 Ideal Line

주입 목적에 따라 주입재의 구성은 달라질 수 있는데, 주변지반의 조밀화 즉, 지반개량이 주된 목적일 경우, 주입 고결체 자체의 강도는 그다지 중요한 요소가 아니므로 시멘트는 섞지 않고 적당한 입도분포와 수분을 함유한 실트질 모래가 유리하다. 반면에 주입 고결체를 말뚝 등의 구조요소로 이용할 경우, 고결체의 강도는 매우 중요한 요소가 되므로 소요강도에 적합한 양의 시멘트와 골재(일반적으로 직경 5 mm 이하)를 첨가해야 한다.

그리고 현장의 여건에 따라 플라이애쉬, 벤토나이트, 카오리나이트 등과 화학첨가제를 사용할 수도 있으며, 대표적인 표준 배합비는 다음 Table 1과 같다.

Table 1 CGS의 표준 배합비

시멘트	골재/세립토	물	비 고
240 kg	0.84 m <sup>3</sup>	0.4 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> 당

만일 세립분의 함량이 지나치게 많거나 물의 양이 많으면 주입재 자체의 내부마찰이 부족하여 유동성(슬럼프치 5 cm 이상)을 가지게 되므로 Grease와 같이 거동하게 되고, 고결체의 형상 및 주입재의 통제가 어려워지며, 수압파쇄 등을 야기하여 주입효과는 크게 떨어지게 된다. 따라서 주입재는 될 수 있는 한 된반죽이 좋다. 그러나 세립분의 양이 너무 적고 골재나 모래의 양이 많으면 주입재의 내부마찰이 커서 주입시 펌핑이 곤란하게 되고, 재료분리가 생겨 고결체의 균질성이 결여되고, 주입관 내에 Dry Packing 또는 Sand Blocking 현상이 발생하는 등 주입이 불가능하게 된다.

#### 4.2 주입압

주입과정중 가해지는 주입압은 지반의 최대주입력과 최소주입력 상태를 복잡하게 변화시키며 주입관의 선단에서 최대가 되고 멀어질수록 감소한다. 또한 지반의 토질특성 및 상재구조물 하중등의 구속응력과 관계되며 지표면이나 구조물의 융기 등은 가장 일반적인 주입시공의 제한요소이다. 지표면의 융기가 관찰되면 콤팩션의 응력이 구속응력을 초과했음을 나타내며, 지반이 다져지기보다는 파괴되었음을 의미하며, 그 이후의 주입이나 최소한 그 단계의 주입은 실제적으로 큰 효과가 없다. 따라서 주입압의 상한(지표면이나 구조물의 융기를 일으키는 압력)은 현장여건에 맞게 설정되어야 한다.

#### 4.3 주입양과 주입율

주입양이 많을수록 지반개량으로서의 주입효과는 좋으나, 정압주입 개념으로 허용 주입압을 통해 조절해야 한다. 주입은 어느 정도의 펌핑간격(보통 6~10 초)을 두고 행해지므로 펌핑시 1회 토출량을 미리 계량하여 총 주입양을 계산한다. 주입율은 펌핑간격으로 결정되는데, 주입율이 낮을수록 현저히 많은 주입양이 주입될 수 있으며, 이는 주입에 따른 지반의 안정과 주입압

의 자연소산에 걸리는 시간적 여유가 주어지기 때문이다. 따라서 주입율은 전적으로 현장의 토질특성에 의존되는 변수이며, 배수성이 나쁘거나 지표 근처에서는 0.5~1.0 ft<sup>3</sup>/min의 낮은 펌핑속도가 이용되며, 배수성 및 건조토에서는 1.0~4.0 ft<sup>3</sup>/min의 중간 펌핑속도가 이용되고, 공극이 큰 느슨한 사질토에서는 4.0~12.0 ft<sup>3</sup>/min 또는 그 이상의 빠른 펌핑이 가능하다.

주입율이 대상 지반의 조건에 비해 너무 높으면 주입초기에 수압파쇄현상이 일어나 주입효과가 크게 떨어진다. 수압파쇄지수( $V_g/k$ )를 주입율( $V_g$ )과 지반의 투수계수( $k$ )와의 관계로 정의하면, 일반적으로  $V_g/k \geq 50$  m<sup>3</sup>/일 때 수압파쇄현상이 발생하는 것으로 알려져 있다.

#### 4.4 주입방식 및 주입순서

본 공법의 주입방식에는 Top-Down방식의 하향 주입방식과 Bottom-Up방식의 상향 주입방식 및 두 방식의 조합형이 있다. 주입방식 결정시에는 개량 대상지반의 토질구성과 구조물의 구조 등 모든 현장조건을 고려해야 하며 일반적으로 Top-Down방식은 천층개량 및 구조물 복원에, Bottom-Up방식은 지반개량에 주로 이용되며 가장 일반적이고 경제적이다.

주입공의 배치나 간격의 결정은 경제성이나 주입효과면에서 매우 중요하다. 일반적인 주입공 배치는 Grid형으로 바닥판 모양의 사각형이나 삼각형이 주가 되며, 주입공 간격은 대개 1.0~3.0 m이나, 시공목적에 따라 융통성 있게 조절되고 흔히 1.5~2.0 m를 적용한다.

구조물이나 대상 지반의 주변 둘레를 1차 주입공으로, 각 사각형모양의 주입공 중앙부에 2차 내지 3차의 주입공을 배치, 주입함으로써 목적하는 지반개량효과를 극대화시킬 수 있다. 그러나 미리 설정된 구조물 융기량의 허용치를 주입과정 중 반드시 계측하여 주입작업을 중지하고 다음의 주입공으로 옮겨가는 등의 현장여건에 적합한 주입순서를 정하여야 한다.

#### 4.5 시공중 품질관리 방안

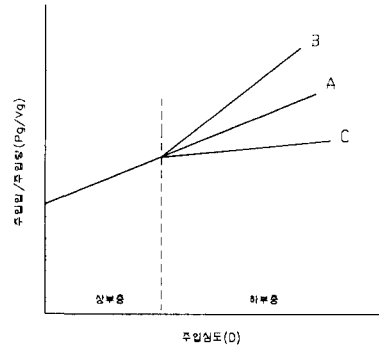
현재까지 CGS공법에 의한 지반개량 효과는 시공전 토질특성치를 고려한 주입 설계후 시험 시공을 거쳐 시공을 하게 되고, 시공후 지반개량 효과 확인을 위하여 CPT, PMT, SPT 및 코어 채취에 의한 강도측정 등의 방법을 사용하여 소요 지반밀도 증대의 확보 유무를 판단하고 있다. 따라서 계획된 주입량에 따른 주입시공을 수행한 후, 필요시 2차, 3차의 추가 주입을 실시하기도 한다.

이는 토층 및 토질조건의 불규칙적인 변화에 따른 본질적인 문제점이기도 하지만, 아직까지 주입시공중 주입상태에 대한 품질관리 방안이 마련되어 있지 않은 실정이므로 시공중 적절한 방법에 따라 품질관리를 수행하면, 지반개량 효과 또는 주입 고결체의 형상에 대하여 보다 나은 품질관리를 이룰 수 있을 것이다.

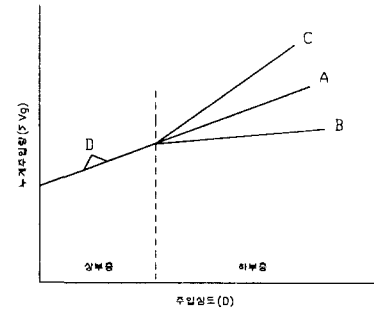
본 연구에서는 여러가지 CGS 시공현장에 대한 시공자료를 토대로 하여 몇가지 시공중 품질관리 방안을 모색하여 보았다.

CGS공법은 기존의 주입공법과는 달리 정량주입방식과 정압주입방식을 복합적으로 사용하는 공법이므로, 주입압  $P_g$ 와 주입량  $V_g$ 는 비례함을 알 수 있고, 동일한 주입량을 주입하기 위한 주입압은 지중심도가 깊어질수록 커지게 된다. 이러한 주입특성을 도식적으로 표현하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

시공중 기록되는 주입량과 주입압 및 주입심도의 변화양상을 도식적으로 처리하면, Fig. 7(a)의 경우 지반의 컨시스턴시가 변화하면  $P_g/V_g$ 이 변화함을 알 수 있고, Fig. 7(b)의 경우 지층경계면과 같이 지반조건이 변화함에 따른 주입 고결체의 형상변화를 예측할 수 있다. 따라서 이러한 주입관리도를 작성해놓으면 시공 도중에 비교적 신속히 대처함으로써 품질관리의 정확성을 기할 수 있을 것으로 보며, 향후 이러한 주입관리 방안에 대한 많은 연구가 필요한 실정이다.



(a) 주입압/주입량( $P_g/V_g$ )과 주입심도(D)의 상관관계



(b) 심도별 누적 주입량( $\Sigma V_g$ )

- A : 상부층과 하부층이 균질할 때
- B : 상부층보다 하부층이 조밀할 때
- C : 하부층보다 상부층이 조밀할 때
- D : 중간에 약층이 있거나 국부적 파쇄발생

Fig. 7 시공중 품질관리 방안

### 5. 시공사례 : 울산 철도역사 기초 PILE 보강공사

#### 5.1 공사개요

울산 철도역사 기초지반 침하로 구조물의 주요부재에 균열이 발생하였으며, 원인은 기초지반이 압밀침하하여 말뚝에 과다한 부주면마찰력이 작용한 것으로 나타났다. 이에 대한 대책으로서 각각의 독립기초에 CGS공법을 적용하여 지반을 압밀, 강화하도록 한 현장이다[6].

본 공사는, Table 2에서 보는 바와 같이, 역사 광장에 CGS 시험시공 5공과 본시공 169공 등 총 174공이다.

**Table 2 공사 총괄표**

공 종	시공 내용 및 수량
기초보강공사	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Bottom-up(B/U) 주입방식 : 129공</li> <li>· Top-down(T/D) 주입방식 : 40공</li> </ul>
시험시공	<ul style="list-style-type: none"> <li>· CGS(B/U) 주입방식 : 5공</li> <li>· CPT(피조콘) 시험</li> <li>· CGS PILE 재하시험</li> <li>· Core채취 및 압축강도 시험</li> <li>· 지표 용기측량</li> </ul>

**5.2 현장조건 및 지반현황**

**(1) 현장조건**

울산 철도역사는 지상 3층과 지하 1층의 철근 콘크리트 구조물(연면적 3,493.47m<sup>2</sup>)로 기초부는 7-Type의 독립기초 군으로 되어 있으며, 총 47 개소의 기초군으로 구성되어 있다. 독립기초는 강관파일로 지지되어 있으며, Footing별 현황은 Table 3과 같다.

**Table 3 기초형식별 CGS 보강 내용**

기초 구분	기초크기	말뚝 개수	총 설치개수	CGS 시공개수
F-1	2.6×2.6×1.0	5 EA	23 EA	4 공/1 EA
F-1A	3.4×2.2×1.2	6 EA	3 EA	4 공/1 EA
F-2	2.2×2.2×1.0	3 EA	5 EA	3 공/1 EA
F-4	1.2×1.2×1.2	1 EA	8 EA	2 공/1 EA
F-5	-	13 EA	2 EA	-
F-6	-	10 EA	2 EA	-

\* 강관말뚝 : 총 237 개, φ406.4 mm, t = 9 mm, 타입심도 40 m(풍화암층), 허용지지력 75 ton/ea

**(2) 지질현황**

지층 구성은 상부로부터 매립층, 점토층, 모래

층, 모래자갈층, 풍화암층 순으로 되어있으며, 매립층은 자갈, 전석, 생활 쓰레기가 혼재되어 있으며, 점토층은 N치가 6 이하인 연약한 지층이다. 쓰레기 매립층 평균두께는 6.6 m(자갈전석층 포함), 연약층 평균두께는 24.4 m이며, 지하수위는 평균 GL(-)1.7 m이다.

**5.3 CGS 보강설계 내용**

CGS설계는 구조물의 총하중에 대하여 부마찰력으로 발생한 지지력 부족분을 기본적으로 CGS가 부담하도록 설계하였다.

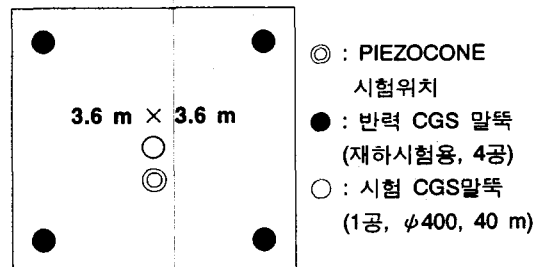
CGS보강을 위한 기초의 위치는 지하층 하부 기초 Footing(Type-1)과 지상 1층 하부기초 Footing(Type-2)으로 나뉘며, Type-1 및 Type-2의 기초 Footing은 각각 GL(-)6.5 m, GL(-)2.5 m에 위치한다. 각 기초별 현황에 따른 CGS 설계 수량은 Table 4와 같다.

**5.4 시험시공 및 시험**

본시공의 효율적인 작업수행을 목적으로 시험시공 및 시험을 실시하고, 그 결과를 토대로 지질특성, 주입재 배합비 및 주입압력, 주입후 보강효과 등을 파악하였다.

**(1) 시험시공 내용**

시험시공의 CGS 배치는 다음 Fig. 8과 같다.



**Fig. 8 시험시공 CGS 배치도**



Table 4 CGS 보강 내용

구 분	천 공		CGS 주입심도	주입공수	
	지상층	지하층		지 상	지 하
Type-1	Con'c Slab : 0.5 m	Con'c Slab : 0.5 m	GL(-) 40.0 ~ 6.5	33 공	40 공
	토사층 : 5.0 m	기초 Footing : 1.0 m			
	기초 Footing : 1.0 m 토사층 : 33.5 m	토사층 : 33.5 m			
Type-2	Con'c Slab/Asphalt포장 : 0.5 m 토사층 5.0 m 기초Footing : 1.0 m 토사층 : 33.5 m		GL(-) 40.0 ~ 6.5	96 공	

(2) 지표용기 측정

CGS 주입시 지표면의 용기발생 유무를 측정하기 위하여, Fig. 9에서 보는 바와 같이, CGS 말뚝을 기준으로 방사형태로 측량위치를 정하여 주입시 매 3 m마다 지표변위량을 측정하였다. 측량점 간격은 1 m로 하였다. 변위측정 시험결과, 평균변위 0.005 m로 나타났으며, 전체적으로 큰 지표용기는 없었다.

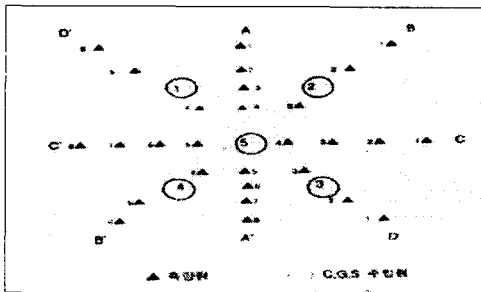


Fig. 9 시험시공시 주변측량 계획도

(3) 피조콘 시험

CGS 말뚝은 원 지반을 압축시키면서 지반을 개량시키므로 피조콘 시험을 통해서 주입전, 후의 지반강도 증가를 확인하여 CGS 시공효과를 파악하였다.

Piezocene 시험결과, Fig. 10에서 보는 바와 같이, CGS 시공후 대상지반은 심도에 따라 관입

저항치( $Q_c$ ) 및 콘마찰력 등이 크게 증가한 것으로 조사되었다. 이는 점토지반의 점착력 증대 및 밀도 증대 등의 지반개량 효과를 나타낸다.

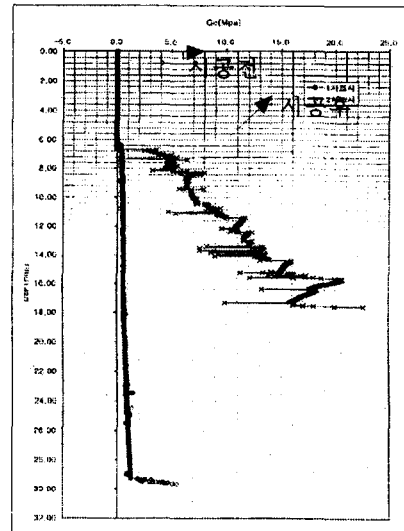


Fig. 10 주입전 및 주입후의 콘저항력 비교도

(4) CGS 말뚝재하시험

CGS 말뚝의 허용지지력 및 침하량 측정을 통한 설계하중의 만족여부를 판정하고자 ASTM 표준재하시험으로 정재하시험을 실시하였다.

말뚝재하시험 결과인 하중-침하 곡선을 살펴보면 하중증가에 따라 침하량이 미소량씩 증가하는 직선적인 지지거동을 보여주고 있으며, 최

중하중 재하시에도 항복 및 극한하중이 나타나지 않았다. Table 5에서와 같이 시험최대하중을 최소항복하중으로 가정하여 분석한 결과 허용지지력은 최소 43.43 ton/개 이상으로 나타났다.

**Table 5** 하중-침하량 곡선을 이용한 지지력 결과

분석방법	항복하중 (ton/본)	F.S	허용 지지력	비고	
전침하량 분석법	logP-logS	86.85 ↑	2.0	43.43 ↑	최대하중을 최소항복하중으로 가정.
	P-S	86.85 ↑	2.0	43.43 ↑	
	S-logt	86.85 ↑	2.0	43.43 ↑	
	P-△S/logt	86.85 ↑	2.0	43.43 ↑	
	Davisson	86.85 ↑	2.0	43.43 ↑	전침하량이 탄성변위량 이하
최소허용지지력	43.43 ton/개				

또한 침하량이 13.475 mm로서 전침하량 기준 (40.0 mm) 이하로 나타난 바, Table 6에 의하면 전침하량 분석법에 의한 항복하중은 최소 86.85 ton/개 이상으로 산출되어 설계하중 42.0 ton/개를 만족하는 것으로 나타났다.

**Table 6** 침하량에 의한 지지력 산정결과

Pile	분석법	전침하량 (mm)	전침하량기준 (mm)	허용지지력 (ton/개)
PLT-1 (시험시공 Pile)		13.475	40.0	43.43 ↑
기준	영국 (CP 2004) 말뚝 직경의 10%			

(5) Core 채취 및 압축강도시험

CGS 파일의 형성심도와 지중에서 양생된 파일의 일축압축강도를 확인하기 위하여 주입후 28일이 경과한 지점에서 CGS 고결체의 core를 채취하여 시험편을 제작한 후 일축압축강도 시험을 실시하였다.

Core 회수율 및 일축압축강도 시험결과는 다음 Table 7과 같다.

**Table 7** Core 회수율 및 강도

공 번	주입깊이 (m)	Core회수 길이(m)	TCR (%)	일축 압축강도	설계 소요 강도( $\sigma_{ok}$ )
시험 시공	38	36.8	96.8	278	150 kg/cm <sup>2</sup> 이상
본시공 No.131	33.5	32.6	97.3	292	
본시공 No.146	37.5	35.4	94.4	286	

**5.5 제안 시공중 품질관리 방법에 의한 본시공 CGS 평가**

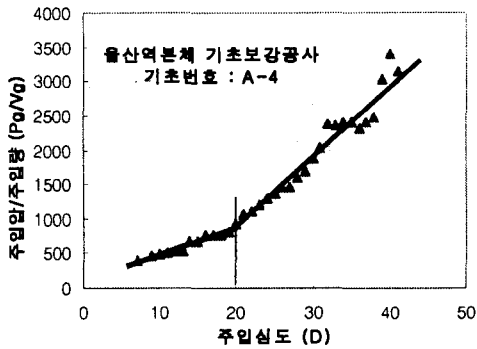
4.5절에서 언급한 시공중 품질관리방안에 따라 시공 CGS의 시공자료를 토대로 평가하여 보면 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)의 경우에 지반의 GL(-)20 m에서  $P_g/V_g$ 의 기울기 상부층보다 하부층이 다소 크게 변화하므로 하부층의 밀도가 상부층보다 큰 지반조건임을 확인할 수 있다. 하부 35 m 이후 주입상태가 다소 불규칙적인 것은 하부가 견고한 지반상태에서의 불규칙적인 주입특성을 나타내는 것이다. Fig. 11(b)를 통하여 전체 심도에 걸쳐 비교적 균일한 주입량이 주입되었다는 것과 이로부터 고결체의 형상이 비교적 균일하다는 것을 예측할 수 있다.

**6. 결론**

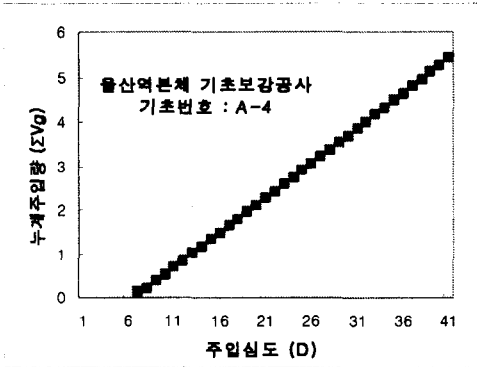
CGS 공법의 기본 메카니즘 및 실제 CGS 보강공사 현장의 시험시공을 토대로 한 지반개량 효과 분석 및 시공중 품질관리방안에 대한 연구 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) CGS(Compaction Grouting System)공법은 기존의 시멘트계의 맥상고결, 약액의 침투고결, 고압분사방식에 의한 배출치환 등과는 전혀 다른 '비배출치환'이라는 독특한 원리를 갖고 있어, 이에 대한 응력-변형 거동특성을 분석하였다.

(2) 연약지반상에 축조된 기초 pile이 불안정한 구조물에 대한 보강공사현장에서 수행한 시험시공 및 본시공 결과를 분석한 결과, CGS 고결체의 강도, 지반개량 효과 등은 소요 설계기준



(a) 주입압/주입량( $P_0/V_0$ )과 주입심도(D)의 상관관계



(b) 심도별 누적 주입량( $\Sigma V_0$ )

**Fig. 11 No. A-4 기초에 보강한 CGS 고결체에 대한 시공중 품질관리**

이상으로 확보되는 것으로 나타났다.

(3) 본 연구에서는 아직까지 주입시공중 주입 상태에 대한 품질관리 방안이 마련되어 있지 않은 실정이므로, 지반개량 효과 또는 주입 고결체의 형상에 대하여 보다 나은 품질관리를 도모하기 위하여, 주입압, 주입량 및 주입심도의 주입 특성을 도식적 작성하여 관리하는 방안을 제시하였다.

(4) CGS 공법은 지반개량 효과 및 주입 고결체의 강도가 우수하여 향후 각종 건설현장에서 적용성이 매우 높을 것으로 기대되며, 철도노반 보강, 터널주변 지반 보강, underpinning 및 대체용 pile, 폐광 및 공동 충전, 호안 및 해안구조물 하부 공극충진, 부등침하가 발생된 구조물 복원 및 침하방지 등에서 개량효과가 크다고 판단된다.

(5) CGS 공법의 최적설계 및 시공을 위해서는 주입압과 대상지반과의 응력-변형 거동특성 뿐만 아니라, 주입재의 점성, 주입압, 주입율, 주입량 등과 같은 주입특성치와 흙의 컨시스턴시 및 흙의 종류와의 상관관계를 정량화하기 위한 연구가 지속적으로 진행되어야 한다.

### 참고문헌

1. 천병식 외, 1998, "지반공학 -이론과 실제-", 구미서관, pp709~711
2. 천병식, 1995, "건설기술자를 위한 지반주입공법", 원기술, pp235~237
3. 천병식, 정덕교, 우근우, 정영교, 권용완, W.B. Samson, 1997, "기울어진 피해구조물의 원상복구를 위한 기초지반 개량공법에 관한 연구", 한국구조물진단학회 '97 가을학술발표회 논문집, pp235~240
4. ASCE, 1997, "Grouting : Compaction, Remediation and Testing", Proc. of sessions sponsored by the Grouting Committee of the Geo-Institute of the ASCE in conjunction with the Geo-logan '97 Conference, pp18~31
5. Vesic, 1972, "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division
6. 덴버코리아그라우팅(주), 1999, "울산역 본체 기초지반보강공사 결과보고서", pp12~17