

## 연약지반에서 심층혼합처리공법의 개량체 형상변화에 미치는 시공조건 Effects of construction conditions on deep mixing method for soft ground

이광열<sup>1)</sup>, KwangYeol Lee, 황재홍<sup>2)</sup>, JaeHong Hwang

<sup>1)</sup> 동서대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Dongseo University

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS** : Deep mixing method has been used for ground improvement and foundation system for embankment, port and harbor foundations, retaining wall, and liquefaction mitigations. It has attractive benefits because it is not only improved strength of soft ground but superior for prevention of settlement. However, the quality controls of improved mass affect to the efficiency of the deep mixing method is not properly established. These effects vary depending upon the construction environments and conditions of agitation in consideration of an agitator. The strength and shape of the improved column are not unique and these are affected by mechanical properties of agitators.

In this study, in order to investigate the efficiency of deep mixing method for ground improvement on a soft clay ground, experimental studies are performed considering mechanical properties of agitator; the location of exit-hole of admixtures, an angle of mixing wing and a speed of revolution. The experiments are conducted with the simulated apparatus for deep mixing plant that reduced the scale in 1:8 of the real plant. According to the results, the diameter and shape of improved column mass vary depending on the mechanical properties and operating conditions of agitator. Its quality is better when the exit-hole of admixtures is located in the mixing wing, when an angle of mixing wing is large, and when the speed of revolution is rapid.

**Keywords** : Deep mixing method, Ground improvement, Experimental study, Agitator, Soft clay, Admixture

### 1. 서론

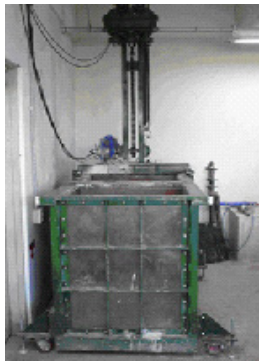
심층혼합처리공법(Deep Mixing Method)은 심부의 연약지반층에 석회, 시멘트 등의 안정재 또는 고화재를 주입하여 균일하게 혼합하여 포조란 반응 등의 고결작용에 의해 개량체 기둥을 형성하여 지반의 강도를 증가시키는 화학적 지반개량공법이다. 또한 이 공법은 연약지반의 지반침하 방지에도 효과적이다. 심층혼합처리공법의 일반적인 개량효과는 물리적인 연약지반개량공법의 개량효과에 비해서 훨씬 크며, 조기에 큰 개량 강도를 얻을 수 있다. 그러나 연약지반의 종류에 의한 개량 정도의 차이가 큰 단점을 가지고 있다. 공법의 개량효과는 교반혼합의 정도에 좌우되며, 안정재와 연약토를 어떻게 균일하게 혼합하느냐가 개량체의 품질을 좌우하며, 안정재를 부주의하게 취급하면 인체에 위험을 미치거나 혹은 주변의 pH를 높여서 문제가 될 수가 있다.

DMM 공법은 Broms and Boman(1975)에 의해 소개된 이후 일본 해양항만연구소에 의해 주로 이루어졌으며, 개량체의 역학적 성질에 관한 연구는 Terashi 등(1979, 1981), Kawasaki 등(1981), Kamon and Bergado (1992)에 의해 수행되었다. 이후 Miura 등(1998, 2001)과 Shen and Miura (1999)에 의해 연약점토내 개량체의 강도증가에 관한 모형실험 및 수치해석을 이용한 연구가 이루어졌으며, 국내에서는 심

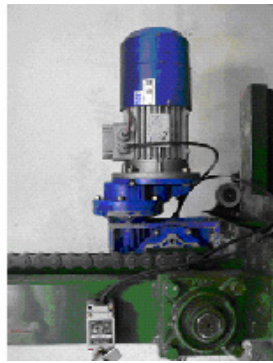
층혼합처리공법의 일종인 고압분사주입공법에 의한 개량사례가 Yoon 등(1996)에 의해 연구되었는데, 개량심도가 깊어짐에 따라 지반 개량체의 직경은 감소하며 단면의 형상은 불규칙하게 되는 것으로 나타났다. 국내외의 심층혼합처리공법과 관련한 연구는 대부분이 현장실험과 실내배합시험을 통한 연구가 수행되었다. 최근, Lee 등(2008)에 의해 심층혼합처리공법에서 교반기의 형상 및 모터효율에 따른 개량체 형상변화에 관한 연구가 수행되었는데, 다양한 지반조건 및 시공조건을 고려한 개량체 형상변화에 따른 검토는 이루어지지 않았다.

개량체의 형상을 파악하는 연구는 현장타설 후 물리탐사 방법을 이용한 연구가 주로 이루어지고 있으나, 지반의 불균질성과 타설장비 운영상의 표준화가 어려워 정확한 비교표준을 제시하는 데는 많은 무리가 따른다. 또한, 타설장비 운영상의 최적화를 위한 연구는 교반날개의 형식, 교반속도, 안정제의 분출방식 등의 개량체 형성에 영향을 미치는 요소들에 대하여 다양한 조건을 고려할 필요가 있다. 따라서 이러한 연구는 모형시험을 이용하는 방법이 가장 적절할 것으로 판단된다.

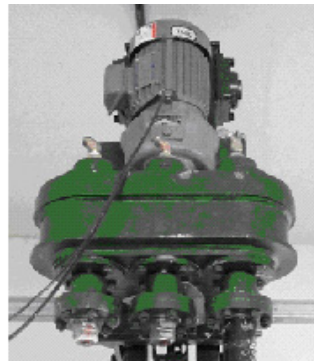
따라서 본 연구에서는 타설장비에 의한 심층혼합처리공법의 개량효과를 검토하기 위하여 교반날개의 각도, 양생기간, 혼화제 분출방식 등을 파라메타로 하여 모형시험을 실시하여, 다양한 조건에 의해 형성된 개량체의 형상 및 강도를 비교/분석하여 최적의 타설장비 운영조건을 도출하고자 하였다.



(a) 모형토조



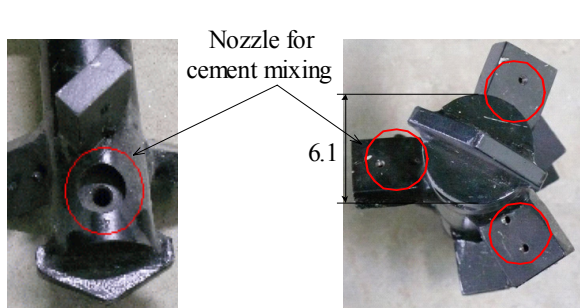
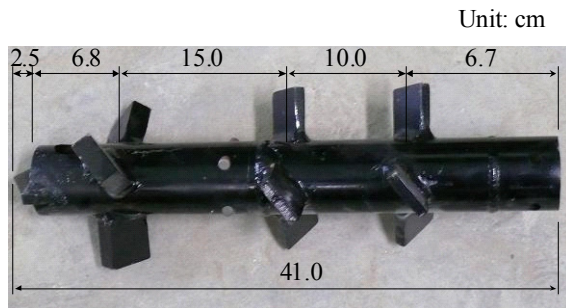
(b) 교반기관입제어 장치



(c) 교반기 회전제어장치



(d) 혼화제 공급 펌프



(e) 교반날개의 제원  
그림 1. 모형실험장치 제원

## 2. 실내모형실험 조건

실험장치는 그림 1에 나타낸 바와 같이 실제의 심층혼합처리 장비를 1:8로 축소하여 제작하였으며, 모형토조, 교반날개가 부착된 교반장치, 굴진장치, 혼화제 주입장치, 제어장치로 구성하였다. 교반장치내의 교반날개는 판형 날개로 1층에 3개씩 총 3층으로 구성되어 있으며, 릿드의 직경은 60.5mm, 교반날개의 길이는 44.5mm이며 교반날개의 회전직경은 150mm이다. 그리고 가장 아래에 위치한 3개의 교반날개에 직경 5mm의 분사구를 2개씩 설치하였다. 모형토조는 L700mm × B700mm × H1000mm로서, 유효개량

깊이는 800mm로 설정하였다. 제어장치는 교반장치의 회전속도와 관입 및 인발의 속도를 통제할 수 있도록 설계하였다.

본 연구의 시료는 점토를 사용하였는데, 함수비 60%의 점토시료를 골고루 교반하여 대형토조 내에 높이 10cm씩 9층으로 다진 후 한 달간 압밀과 배수를 시켜 지반을 안정화시켰다. 본 연구에서 사용한 점토시료 및 혼화제의 물성을 표 1~3에 나타내었다. 혼화제는 시멘트와 HWS고화제를 9:1(시멘트 9, HWS고화제 1) 비율을 적용하였으며, 분말 상태의 혼화제는 다시 물과 혼화제의 중량비를 1:1로 혼합하여 액체상태로 제조하였다.

표 1. 점토지반 재료물성

Cu	Cg	LL (%)	PL (%)	IP	Gs	$\gamma_{dmax}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	OMC (%)
93	6.42	27.0	22.2	4.92	2.68	1.45	7.2

표 2. 혼화제의 물리적 성질

Specific gravity	Surface Area (cm <sup>2</sup> /g)	Solidification		Test Method
		Initial (hr)	Final (hr)	
2.8~3.2	2800over	3~5.5	5.5~8.5	KS L 5201

표 3. 혼화제의 화학적 성질

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ignition Loss	Test Method
20~35	5~15	1~4	40~55	2~4	2~4	1~2	KS L 5120

표 4. 모형실험패턴

	혼화제 분사방식	양생기간 (day)	날개각도 (°)
Type-A	롯데분사타입	7, 14, 28	10, 20, 30, 40
Type-B	날개분사타입	7, 14, 28	10, 20, 30, 40



(a) 시료조성 (b) 교반축 토조 회전관입 (c) 혼화제 주입 및 인발 (d) 개량제 양생

그림 2. 실내모형실험 순서

시험방법은 그림2에 나타난 바와 같이, 점토로 형성한 모형지반내에 교반장치를 10cm/min로 유효깊이 까지 관입한 후, 같은 속도로 인발을 하는 데 이 시점부터 0.75L/min로 혼화제를 주입하며 교반장치를 인발한다. 실제 현장에서는 관입 및 인발을 수회 반복적으로 실시하여 개량체의 강도를 증가시키지만, 본 연구에서는 상하 1회의 교반작업을 실시해서 실험을 단순화하여 시공조건별 비교분석을 용이하게 하였다. 타설이 완료된 후에는 7일동안 모형토조에서 양생을 실시하고, 그 후에 양생수조에서 온도 20도, 습도 70%의 조건하에서 21일동안 양생을 실시하였다. 양생 후 개량체의 형상을 측정하고, 형상 측정 후에는 상하부 30cm씩 절단하여 공시체를 성형하고 0.1cm/min의 속도로 하중을 재하하여 일축압축

강도시험을 실시하였다. 교반날개의 각도, 교반속도, 양생기간 등의 다양한 조건에 따른 개량체의 형상 및 강도를 분석하기 위한 본 연구의 실험패턴을 표 4에 나타내었다.

### 3. 모형실험결과 및 고찰

교반장치의 날개각도 및 분사방식 등의 시험조건에 따른 개량체 형상을 그림 3에 나타내었다. 전체적으로 날개각도 및 재령기간에 관계없이 개량체 형태가 고르게 분포되었다. 본 연구에서는 개량체의 상부, 중간, 하부의 직경을 측정하여 개량체의 형상을 검토하였는데, 그림 4에 양생기간 및 날개각도에 따른 개량체의 상, 중, 하부 위치에 있어서의 개량체의 직경을 나타내었다. 상부가 중간 및 하부에 비해 약 2~5%로 크게 나타났으나, 대부분 거의 고르게 개량체가 형성되었으며, 특히 날개각도가 커질수록 개량체가 균질하게 형성됨을 알 수 있다. 전체적으로 설계규격(직경15cm)에 비하여 평균직경이 1.11~3.33 % 작게 나타났는데, 이는 본 연구에서 사용한 시료가 연약한 점토이므로 타설시에 지반교란이 발생하게 되고, 이 때 측압에 의한 영향으로 개량체의 소요직경이 작게 형성된 것으로 판단된다.

그림5는 양생기간별 교반날개각도에 따른 일축압축강도를 나타낸 것이다. 양생 후 개량체의 상하부 각각 2개의 공시체를 성형하여 일축압축강도시험을 수행하였는데, 본 그림에서는 상하부 일축압축강도의 평균치를 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이, 전체적으로 날개분사방식에 의한 개량체가 로트분사방식에 의한 개량체보다 높은 압축강도를 나타내었다. 또한 모든 케이스에서 재령기일이 길수록 높은 압축강도를 나타내었는데, 재령 28일인 개량체의 일축압축강도에 대한 재령 7일인 개량체의 일축압축강도는 약 37 %, 재령 14일인 개량체의 일축압축강도는 약 60 % 정도로 나타났다. 또한 같은 재령기일의 조건에서는 교반날개 각도가 커질수록 일축압축강도가 크게 나타났다. 또한, 날개각도가 커짐에 따라 일정하게 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 날개각도40°에 재령28일인 경우 일축압축강도가 14.1 kgf/cm<sup>2</sup>으로 가장 높게 나타났다. 하지만, 양생기간이 짧을수록 날개각도변화에 따른 일축압축강도의 차이는 작게 나타났다.


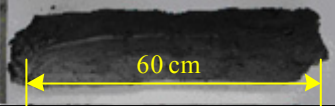




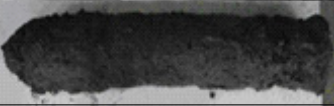
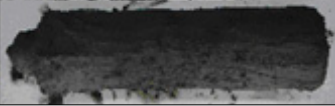
Angular of wings	노즐분사방식 (Type-A)	날개분사방식 (Type-B)
10°		
20°		
30°		
40°		

그림 3. 날개각도 및 분사방식에 따른 개량체 형상(재령 28일)

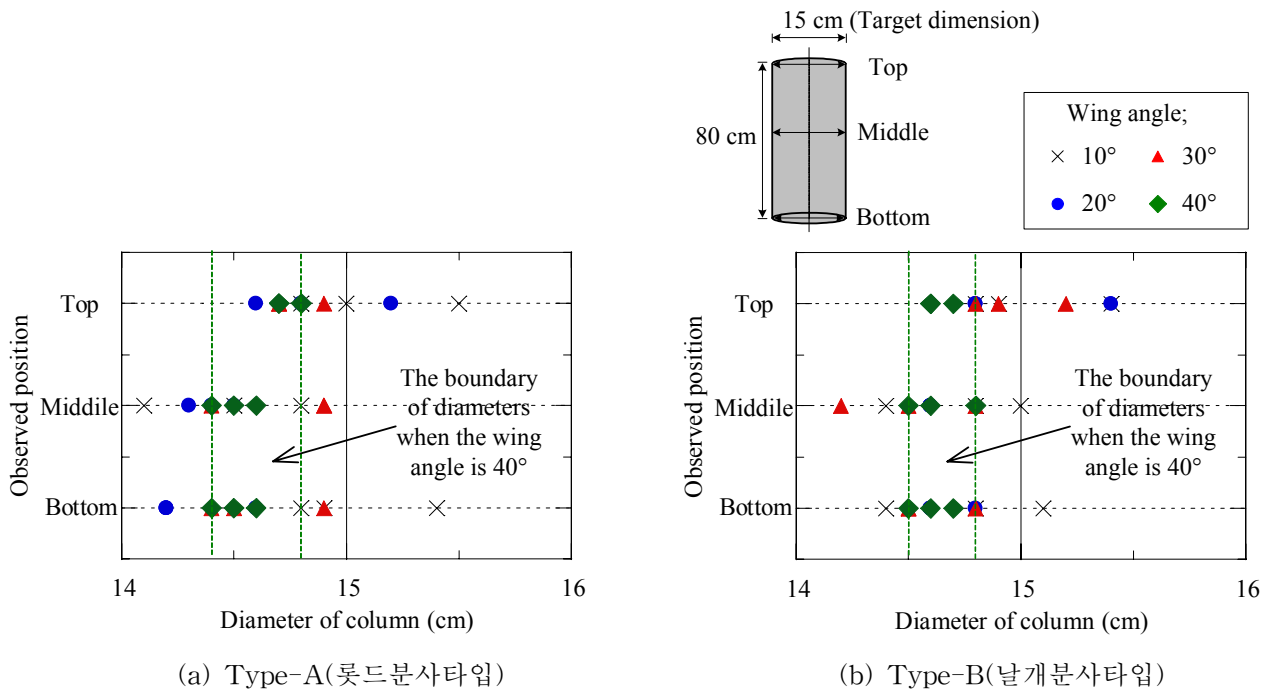


그림 4. 개량체의 위치별 직경

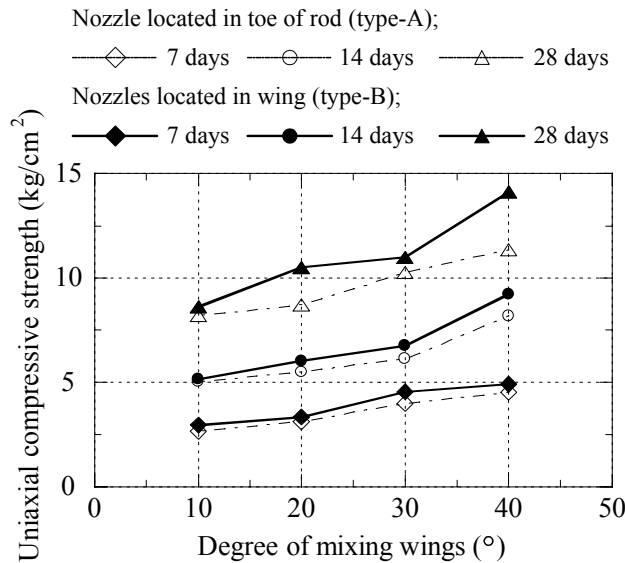


그림 5. 재령 및 교반날개 각도에 따른 개량체의 일축압축강도

#### 4. 결론

본 연구에서는 교반날개각도, 혼화제 분사방식, 양생기간 등이 개량체에 미치는 영향과 효율성을 분석하기 위하여 실내모형실험을 수행하였다. 본 연구에 따른 결론은 아래와 같다.

1. 개량체의 평균직경은 설계규격(직경15cm)보다 1.11~3.33 % 작게 나타났는데, 이는 연약한 점토가 혼화제 타설작업에 의해 교란이 발생하고, 그 후 교란된 시료가 측압에 의해 소요직경이 작게 형성된 것으로 판단된다. 또한, 이는 현장에서 수회의 교반작업을 반복적으로 실시하여 개량체의 강도 및 형

상을 품질관리하는 것에 반하여, 본 실험에서는 교반날개에 의한 개량(지반내 교반장치를 삽입하여, 혼화제를 분사하며 빼내는 작업)을 1회만 실시하였기 때문인 것으로 판단된다.

2. 교반날개각도 및 재령기일이 증가할수록 일정하게 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 날개 각도의 조정에 의해 약 50 % 이상의 일축압축강도를 증가시킬 수 있음을 보여주었다. 또한 날개분사 방식에 의한 개량체가 룯드분사식에 의한 개량체보다 압축강도가 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서는 시공조건별 효율을 비교하기 위한 목적으로, 1회의 타설작업(교반기의 근입, 약액주입, 교반을 1회 실시함)을 실시한 결과이므로 개량체의 개량효율은 저조하였으나 타설작업을 수회 반복할 경우 높은 개량효율이 예상된다. 날개각도에 따른 개량체의 형상 및 강도에 대하여 분석하였는데, 실제 현장에서의 교반장치의 날개각도는 일반적으로 모터효율에 따라 정해진다. 따라서 지반재료와 기계적 성능을 연계시켜 여러 가지 현장여건을 고려한 연구가 다음과제로 사료된다.

## 참고문헌

1. Broms, B. B. and Boman, P. (1975), Lime stabilized column, *Proc. 5<sup>th</sup> Asian Regional Conf. Indian Institute of Science*, Bangalore, India. 1: pp. 227~234.
2. Kamon, M. and Bergado, D. T. (1992), Ground improvement techniques, *Proc. of 9<sup>th</sup> Asian Regional Conf. on SMFE*, Bangkok, 2, pp. 526~546.
3. Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. (1981), Deep mixing method using cement hardening agent, *Proc. of 10<sup>th</sup> Int. Conf. on SMFE*, Stockholm, pp. 721~724.
4. K. Y. Lee, S. M. Kim and \*J. H. Hwang "FEffects of Mechanical Properties of Agitator on Deep Mixing Method for Soft Clays, *International Symposium on Lowland Technology*, Busan, Korea, 2008-9.
5. Miura, N., Shen, S. L., Koga, K. and Nakamura, R. (1998), Strength change of the clay in the vicinity of soil cement column, *Jouranal of Geothech. Engrg.*, JSCE, (596/III-43), pp. 209~221 (in Japanese).
6. Miura, N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T. S. (2001), Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*, 41 (5), pp. 33~45.
7. Shen, S. L. and Miura, N. (1999), Soil fracturing of the surrounding clay during deep mixing column installation, *Soils and Foundations*, 39 (5), pp. 13~22.
8. Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T. (1979), Engineering properties of lime-treated marine soils and deep mixing method, *Proc. 6<sup>th</sup> Asian Regional Conf. on SMFE*, pp. 191~194.
9. Terashi, M., and Tanaka, H. (1981), Ground improved by deep mixing method, *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on SMFE*, 3, pp. 777~780.
10. Yoon, J. M., Hong, W. P. and You, S. K. (1996), Case studies on ground improvement by high pressure jet - Grouting (1) - Effect in the improvement of bearing capacity for foundation ground-, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, pp. 12~4, 33~45.