

# 지하연속벽 공법 자동화 도입 타당성 검토

## Feasibility Study to Apply Automated Trench Cutter

박 경 순\* · 구 자 경\*\* · 이 태 식\*\*\*

Park, Kyoung Soon · Koo, Ja Kyung · Lee, Tai Sik

### 요 약

도심지에서 수행하는 공사가 확대되면서 소음, 진동 등을 최소화하는 공법으로 지하연속벽 공법이 제안되어 많은 활용이 이뤄지고 있다. 지하연속벽 공법은 기존 공법에 비해 대심도 굴착이 가능하며, 소음과 진동이 적어 활용도가 높음에도 불구하고 굴착 작업 간 수직도 확보를 위해 많은 시간이 소요된다. 공법의 적용이 이뤄지고 있는 현장방문 결과 건설기계를 통해 작업이 진행됨에도 불구하고 장비를 조작하는 조작자의 경험과 직관에 더 높은 의존도를 갖고 있는 것이 큰 문제로 조사되었다. 본 연구는 지하연속벽 공법의 주요 장비인 트렌치커터 운전기사 및 관련된 기술자들과의 인터뷰를 바탕으로 공법과 장비의 특성을 조사하고 Cost-concern Matrix를 통해 굴착장비의 자동화 도입 타당성을 검토하였다. 연구를 통해 지하연속벽 공법에서 굴착 작업을 수행하는 트렌치커터를 자동화 하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

키워드: 지하연속벽 공법, Cost-concern Matrix, 건설자동화, 트렌치커터

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

지하굴착 과정에서 지하수의 침출과 사면붕괴를 방지하기 위해 다양한 흠막이 공법이 개발되어 사용되고 있다. 기존에 시공되어 온 흠막이 공법의 대다수는 타입공법으로 소음, 진동으로 인해 도심지에서 시공에 적용하기에는 무리가 있으며, 구조물 대형화에 따른 근입 깊이 증대를 충족시키기에 많은 무리가 있다.

이를 해결하기 위해 개발된 것이 지하연속벽 공법으로 이 공법은 근입부의 연속성이 보장되어 차수성이 우수하고, 단면강성이 크기 때문에 굴착공사로 인한 주변지반의 변형을 최소화시킬 수 있다. 또한 대규모, 대심도 굴착공사 시 영구 벽체로 사용될 수 있고, 공사로 인해 유발되는 소음, 진동이 적어 도심지 공사에 적합하다.

지하연속벽 공법은 시공 특성상 대규모 건설기계에 대한 의존도가 높은 공법으로 지하연속벽 굴착에 사용되는 장비인 트렌치커터(Trench Cutter) 작업이 공사전체에 많은 시간과 비용을 차지한다. 또한 트렌치커터를 이용한 굴착 작업은 공법 적용에 따른 시공품질에 직접적인 영향을 미치

는 중요한 작업이다. 그러나 이러한 중요성에도 불구하고 트렌치커터를 통해 공사 품질을 확보하는데 많은 어려움이 있어 트렌치커터와 관련된 작업이 개선되어야 할 필요가 있다. 이에 본 연구는 지하연속벽 공법의 굴착작업요소분석을 통해 지하연속벽시공의 문제점을 개선하고, 시공성을 향상시킬수 있는 지하연속벽 공법의 자동화도입의 타당성을 검토하였다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 지하연속벽 공법과 관련하여 문헌조사와 함께 공법에 대한 시공경험이 있는 시공기술자 및 장비 업체 전문가를 인터뷰하고 공법이 적용 중인 한 개 현장을 방문하여 관련 자료를 수집하였다. 조사된 자료를 바탕으로 지하연속벽 공법 프로세스의 자동화요소 분석을 통해 각 작업의 Cost Impact와 AHP에 의한 자동화 선호지수(ACI)를 도출하여 Cost-Concern Matrix를 통해 지하연속벽 공법의 자동화 도입을 타당성을 검토하였다.

## 2. 지하연속벽 공법 특성 분석

### 2.1 공법 개요 및 기존 공법과의 비교

지하연속벽 공법은 흠막이 공법의 하나로써, 지반을 굴착할 때 굴착면의 붕괴와 지하수의 침투를 방지하기 위해 일정폭의 TRENCH 굴착부분에 벤토나이트 안정액을 공급하면서 원하는 깊이까지 굴착한 후 지중에 무근, 또는 철근 콘크리트의 타설하여 벽체를 조성하는 공법이다. 각각의 PANEL을 연속적인 벽체로 형성이 가능하며, 이 벽체는 차수벽으로써 댐의 기초 또는 건축구조물의 가설 또는 영구벽체로 사용된다.

\*일반회원 · (주)태조엔지니어링 기술연구소 연구원, 공학석사, ligerz@hanmail.net

\*\*일반회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사, nalty@hanyang.ac.kr

\*\*\*중신회원, 한양대학교 건설환경시스템공학부 교수, 공학박사, cmtsl@hanyang.ac.kr

본 연구는 건설교통부의 2005년도 건설핵심기술개발사업[05건설핵심 D01]과 BK21 2단계 사업의 지원으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케한 지원당국에 감사드립니다.

본 공법은 개발초기에는 단순 차수벽이나 가설 토류벽으로 사용되었으나 기술의 진보, 시공방법 및 장비의 발달로 최근에는 토지이용율의 극대화가 가능해졌다. 또한 최근 대도시 밀집지역에서 H-파일(H-pile), 시트 파일(sheet pile) 등의 타설시 소음 및 진동의 건설 공해가 사회 문제화 되고, 민원의 대상이 됨에 따라 저진동, 저소음으로 강성이 큰 안전한 벽체를 형성할 수 있다는 장점뿐만 아니라, 최대 80m~100m까지 대심도 굴착이 가능하여 지하구조물의 영구벽체 시공 공법으로 광범위하게 적용되고 있다. (표 1)

표 1 흙막이 공법의 비교

구분	H-pile + 토류판	현장타설말뚝 (CIP) 공법	소일시멘트벽 (SCW) 공법	널말뚝공법	지하연속벽 공법
개요	천공후 H파일 삽입 굴착 및 토류판 설치	시추기로 천공 및 철근삽입 콘크리트 타설	천공후 주입재와 지반혼합 H파일을 보강재로 이용	계획심도까지 강널말뚝 항타차수벽과 도차수벽의 역할 동시 수행	특수장비로 트랜치 굴착 후 철근망 삽입 후 Conc 타설
장점	시공 간단 소음의 영향 자재 재사용 가능	벽체강성 우수 평면에 적정 성능 장비	차수효과 큼 토사유실이 매우 적음 공기가 짧음	시공이 빠름 차수효과 우수 대규모 공사에 적용	벽체강성 우수 완전차수 가능 건물벽체로 사용 가능 대심도 굴착 가능
단점	보조차수 필요 토사유출로 주변지반 침하 우려 연약지반에 불가	암반층은 시공에 많은 시간 소요 보조차수 필요	자갈, 암층 시공 곤란 H파일 불가	항타소음 발생 연결부 이탈 시 상당히 큰 충격, 밀한 모래지반 시공 곤란	공사비가 비교적 고가 장비규모 커 철거한 시공 관리 요구
대상 지역	얕은심도 굴착 배면에 보조공법 적용 가능할 경우	깊은 심도 굴착 곤란 대책이 없는 지역	사질층이 높고 지하수가 심한 지역	연약지반이나 지반도 차수가 필요한 지역	도심지 근접대규모 굴착 지역

## 2.2 시공프로세스 분석

하나의 차수벽 구간을 설치하는 과정은 크게 8단계로 구분되며, 그림 1과 같다.

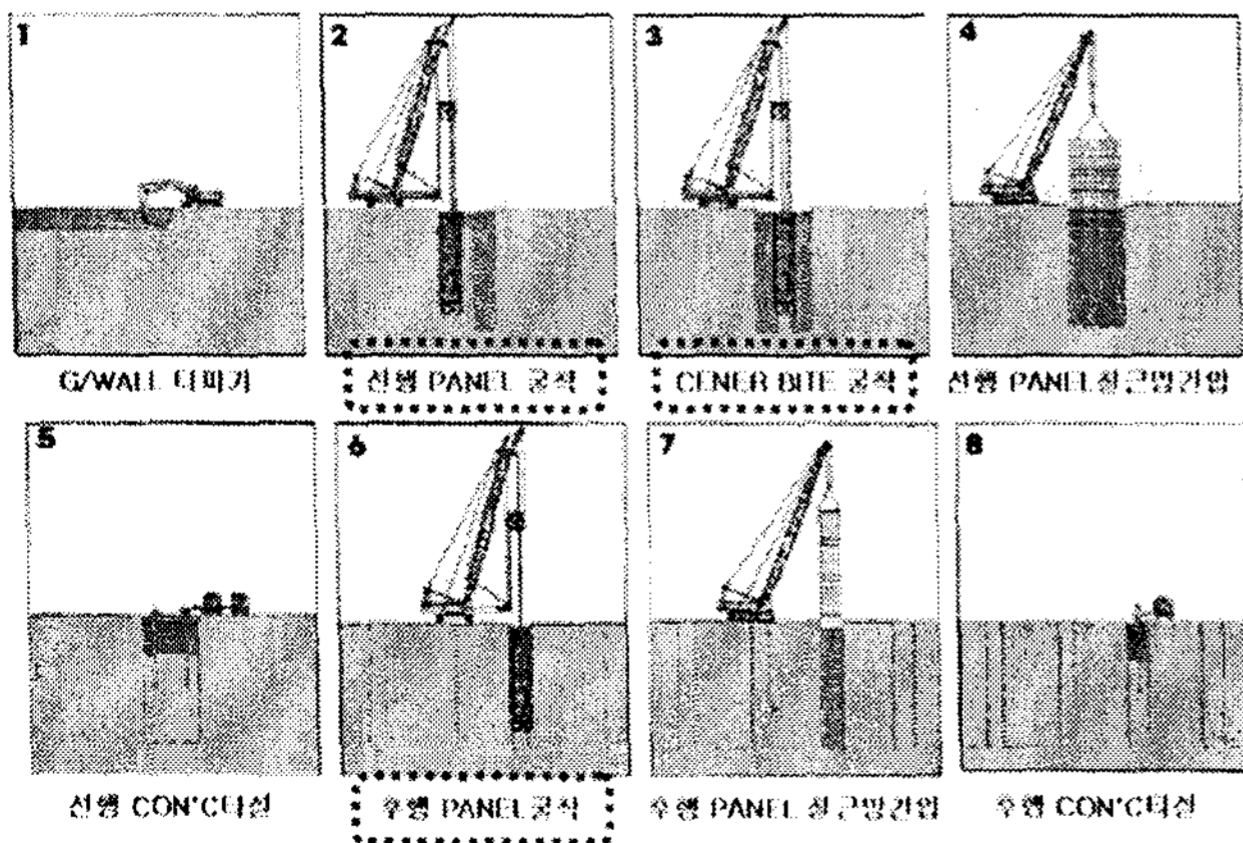


그림 1 지하연속벽 단계별 시공순서

- ①굴착을 위한 준비작업으로 시공할 포인트를 표시하고 기계 설치를 위한 기본적인 터파기 작업 후 Guide Wall 설치
- ②굴착벽의 안전성 향상을 위하여 일정한 농도의 Bentonite용액을 주입하여 소요깊이까지 선행 PANEL 굴착
- ③CENER 굴착을 시행

- ④현장에서 조립된 철근망(Steel Cage)을 크레인을 이용하여 굴착공내에 설치
  - ⑤선행 CON'C 타설을 실시
  - ⑥일정간격을 벌려 연속시공 후 같은 방법으로 후행 PANEL 굴착,
  - ⑦후행 철근망 건입
  - ⑧후행 CON'C 타설
- 위의 8단계를 시공진행방향으로 소요깊이까지 작업을 반복 시행 한다.

## 2.3 지하연속벽 작업의 문제점

지하연속벽 시공기술자, 트랜치커터 운전자 그리고 장비 업체 전문가를 인터뷰하여, 지하연속벽 공법의 자동화 요인 도출을 위한 문제점을 검토하였다.

### 1) 트랜치커터의 수직도 확보

지하연속벽 공법에서 굴착장비인 트랜치 커터를 이용한 굴착 작업은 시공과정에서 매우 중요한 요소(Critical Element)로써 공기 및 공사품질에 직접적인 영향을 미친다.

굴착작업 간 굴착공의 수직도는 지하연속벽 공법 품질과 후속 공정에 직접적인 영향을 미치는 주요 공정임과 동시에 지하연속벽 공법의 시작이다. 굴착 과정에서 수직도의 확보는 트랜치커터의 운영에 영향을 받는다. 굴착 작업간 수직도가 확보되지 않을 경우 공사 품질이 저하됨과 동시에 비용 및 공기와 관련한 문제를 야기할 수 있다.

수직도를 보완하고 굴착의 신뢰성을 확보하기 위해 굴착작업 사이에 별도로 KODEN이라는 음파계측장비를 이용하여 일정 깊이를 굴착할 때 마다 수직도를 측정한다. 관련 시방서를 보면 지중 연속벽의 굴착 후 KODEN을 사용하여 수직도를 검측하고 감리자의 승인을 받도록 명시하고 있다.

KODEN은 사질토층에서 일반적으로 10~30m 굴착시 마다 측정이 이뤄지며, 굴착이 완료된 이후에도 측정을 실시한다. 강암층일 경우 몇cm~수m를 굴착할 때 마다 측정이 이뤄지는 경우도 발생할 수 있다. 문제는 이러한 KODEN 작업에 소요되는 시간이 한 시간 이상씩 소요되기 때문에 작업 중간에 생략을 하는 경우도 발생하고 작업 절차에 따라 진행되는 경우에는 작업 진도를 확보하기 어렵다는 문제가 있다.

### 2) 기술자의 노하우가 절대적으로 요구됨

지하연속벽은 트랜치 커터장비를 이용한 기계작업 임에도 불구하고 기술자 및 인부들의 Know-how와 경험이 대단히 중요한 것으로 나타났다.

암반지층이 많은 한국의 지질특성을 고려할 때 숙련된 기술자가 작업에 참여해야 하나 현실적으로 숙련된 기술자의 공급이 부족한 실정이다.

또한 숙련된 기술자가 참여하는 경우에도 기계적 기술한계와 문제상황을 기술자의 경험과 판단으로 으로 감지하고 대처해야 하기 때문에 이 과정에서 작업관리자와 기술자간의 커뮤니케이션에 명확하지 못하다는 것이 문제로 파악되었다.

### 3) 작업 개선 및 장비 보완 필요

인터뷰를 통해 실질적으로 작업개선과 시공성 향상을 위

해 기계적인 보완 시급한 것으로 판단되었다. 그러나 장비의 가격이 고가(한대에 약 15억 원 이상)이며 소모성 부품인 커터날 또한 고가이다. 이에 따라 대부분 국내 장비업체가 외국에서 수입 Lease 형태로 운용되어지며, 이에 따라 직접적인 개발은 어려운 상황이다.

### 3. 지하연속벽 굴착작업의 주요 요인 검토

#### 3.1 작업 비용

지하연속벽 공법은 기본적으로 공사비의 30~40%를 차지하는 토공사에 포함되며, 지하연속벽 공법 자체가 토공사에서 차지하는 비중은 적용 구간에 따라 상이하다. 그러나 대상 현장에서 획득한 자료를 통해 지하연속벽 공법의 전체 작업내역 중 굴착작업이 전체 공사비의 60%이상으로 매우 높은 비중을 차지하는 것을 알 수 있다. 이는 지하연속벽 공법을 자동화 하는데 있어 굴착 작업을 개선할 경우 가장 높은 자동화 효과를 볼 수 있음을 간접적으로 나타내는 것이다(표 2).

표 2 지하연속벽공사의 작업내역

작업내역	D800	단위	수량	단가	금액	%
안내벽설치해체		M	401	115	46,115	2.26
굴착(T=800)	매립	M2	2,687	60	161,220	7.90
굴착(T=800)	퇴적토	M2	14,877	70	1,041,390	51.06
굴착(T=800)	풍화암	M2	481	80	38,480	1.89
벽면정리		M2	6,937	9	62,433	3.06
철근망 가공조립		TON	2,224	110	244,640	12.00
Con'c타설		M3	16,702	5	83,510	4.09
폐액처리		M3	6,100	20	122,000	5.98
굴착토잔토처리	슬래임포함	M3	15,880	10	158,800	7.79
연결철근퍼기		M	1,600	8	12,800	0.63
두부정리		M	401	55	22,055	1.08
cap beam 설치		M	401	65	26,065	1.28
장비동원		SET	1	20,000	20,000	0.98
합계					2,039,508	100

이와 함께 지하연속벽 공법의 주요 장비인 트랜치 커터와 KODEN 작업을 수행하는 작업자의 인건비를 조사하였다.

표 3 주요 작업의 인건비

구분	단위 : 만원		
	연봉	월급	일급(28일 기준)
전문 굴착기사	3,500	291.7	10
KODEN 작업자	2,000	166.7	6

#### 3.2 작업 시간 및 인원

작업인원은 굴착 및 KODEN 작업에 각 1명씩 소요되며, 야간 작업이 요구되는 경우 2교대로 운영되어 작업별로 2명(주1, 야1)이 요구된다. 작업 소요 시간은 지반 상태에 따라 다르나 자료를 수집한 대상 현장의 경우 굴착속도를 기준으로 할 때 분당 60~80cm의 작업 속도로 하루에 1~3개 굴착공의 굴착이 가능한 것으로 조사되었으며, KODEN 작업의 경우 20m 마다 측정하는 것을 기준으로 할 때 1회에 약 60~90분이 소요되는 것으로 조사되었다. 표 4는 조사를 수행한 대상 현장에서 획득한 자료를 정리한 것이다.

표 4 작업 인원 소요 시간

구분		세부 사항
작업 인원	굴착 operator	2명(주/야)
	Koden	2명(주/야)
작업 시간 요소	일반작업(토사/모래)	2~3시간
	Koden 측정	60~90분(일반적으로 20m 마다 측정)
	굴착속도	최고 60~80cm/min
	작업량	1~3 holes/day

조사된 자료를 바탕으로 생산성을 검토하기 위해 30m 작업을 기준으로 정리한 것은 표 5와 같다.

표 5 작업 요소별 소요 시간과 비중

생산성 데이터(작업시간 %), 30m		
Task	Man-time	%
굴착 및 포지셔닝	150	46.15
수직도 보정 및 점검	60	18.46
Communication	20	6.15
KODEN(검사)	90	27.69
Idle time	5	1.54
계	325	100

### 4. 자동화 도입의 타당성 분석

지하연속벽 공법은 1) 장비에 대한 의존도가 높고, 2) 작업이 지루하고 반복적이며, 3) 추가 작업이 요구되고, 4) 많은 시간이 소요되며, 5) 작업 실패 시 과도한 추가비용이 발생하는 특성을 갖고 있다. 이러한 요인들은 건설기계 자동화 도입이 요구되는 일반적인 특성으로 간주된다. 본 연구에서는 지하연속벽 공법 자동화의 타당성을 정성적, 정량적으로 분석하기 R. L. Tucker(1996)의 Cost-Concern Matrix를 이용하였다.

#### 4.1 자동화요소 가중치 산정

문헌조사와 현장실무자의 인터뷰를 근거로 트랜치 커터 굴착작업을 품질을 1로 할 때, 생산성, 장비조작, 작업자 능숙도, 안전 등 자동화의 핵심요소를 자동화 필수요소 항목에 대해 AHP(Analytic Hierarchy Process)방법을 이용하여 가중치를 산정하였다. 결과는 표 6과 같다

표 6 요소별 가중치 산정

	품질	생산성	조작	인력효용	안전	합계	가중치
품질	2	3	3	5	1.889	0.378	
생산성	1/2	2	3	5	1.275	0.255	
조작	1/3	1/2	4	5	1.015	0.203	
인력효용	1/3	1/3	1/4	5	0.590	0.118	
안전	1/5	1/5	1/5	1/5	0.231	0.046	
합계	2.367	4.033	6.450	11.2	21	5.000	1

#### 4.2 Automation Concern Index 도출

굴착 행위시 요구되는 세부 Task를 굴착장비의 포지셔닝 및 굴착, KODEN 작업, 수직도 보정작업, 의사소통 산정하여 이를 자동화 요소 가중치를 적용하여 Automation Concern Index를 도출하였다(표 7).

표 7 Automation Concern Index for Task

	품질	생산성	조작	인력효용	안전	ACI
가중치	0.378	0.255	0.203	0.118	0.046	
의사소통	0	1/4	0	1/2	0	0.123
기계 포지셔닝 및 굴착	1	3/4	1	0	0	0.772
KODEN 작업	1	3/4	1/2	1/2	1/3	0.745
수직도 보정작업	1/2	1/4	1/2	1	0	0.661

### 4.3 Cost Impact

앞서 현장 조사를 통해 도출된 표 2의 지하연속벽 토공사 전체비용내역 중 트랜치커터 굴착작업의 요소비용 60.85%에 대비 세부작업요소(Task)별 작업시간(%)을 곱하여 자동화요소의 Cost Impact를 산정하였다.

표 8 Cost Impact

지하연속벽 굴착작업 세부 요소	Task Cost (%) = 60.85	Cost Impact (%)
	Work Time(%)	
굴착 및 포지셔닝	46.15	28.08
수직도 보정작업	18.46	11.23
Communication	6.15	3.74
KODEN 작업	27.69	16.85
Idle time	1.54	0.94

### 4.4 Cost Concern Matrix

Automation Concern Index와 Cost Impact를 바탕으로 도출된 Cost-concern matrix는 그림 2와 같다.

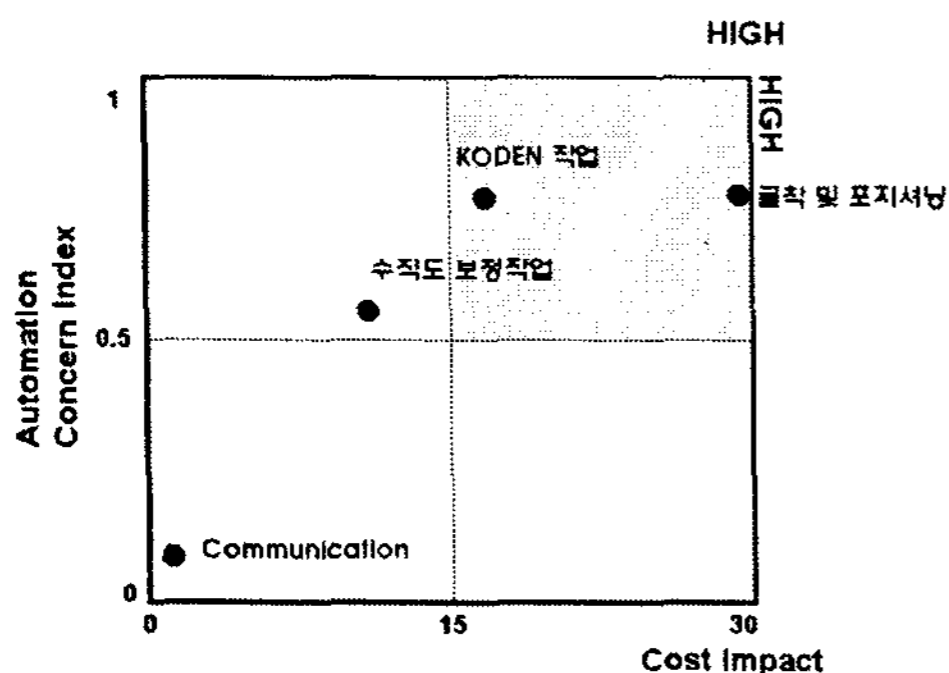


그림 2 Cost-Concern Matrix Results

그림 2에서 보여지는 바와 같이 굴착과 검측 작업은 자동화에 대한 관심(concern)이 높음과 동시에 비용 영향이 높아 자동화 도입이 적절한 것으로 나타났다. 이는 굴착 작업에 활용되는 트랜치커터와 KODEN 장비에 대한 자동화 검토가 타당한 것으로 판단할 수 있다.

### 5. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구는 지하연속벽 공법의 특성 분석과 문제점 검토하고 이를 바탕으로 Cost-Concern Matrix기법을 사용하여 지하연속벽 공법의 굴착작업 대상의 자동화 도입이 타당함을 도출하였다. 이를 통해 굴착작업 장비에 대한 자동화 적용 시 지하연속벽 공법의 시공성과 함께 비용, 품질 등 전반적인 개선이 이뤄질 것으로 기대된다.

향후 기술요소 분석 및 경제성 검토를 수행하여 구체적인 자동화 방안을 제한하고자 한다.

### 참고문헌

1. Sy-Jye Guo, R. L. Tucker, "A generic cost-concern matrix for identifying automation needs in construction", Automation on Construction, ELSEVIER, Vol. 5, Issue 2, 1996, pp. 91-104
2. 이승연, 살아있는 토목시공학, 구미서관, 2005, pp. 100-101
3. 박종혁, "지하연속벽 공법의 적용방안", 대우건설기술, 대우건설기술연구소, 통권 제 3호, 1989, pp. 87-97
4. 삼보지질(주) 웹사이트, <http://www.sambotf.co.kr/>
5. (주)지오반건설 웹사이트, <http://www.geovan.net/>
6. the BAUER Group 웹사이트, <http://www.bauer.de>
7. STS Instrument Co., Ltd., <http://www.sts.co.th>

### Abstract

According to increase of construction projects which is accomplished in the town, diaphragm wall method was proposed. This method diminished noise and vibration. And it is able to excavate deeper than other methods. But excavation work is difficult to maintain vertical and requires much time to work. Also the work result depends on know-how, experience and intuition of excavating machine operator. We interviewed technical experts related with slurry wall method and find equipment's characteristics. We used cost-concern matrix to investigate the propriety for the introduction of trench cutter automation. Through the research, it is proper to apply trench cutter automation.

Keywords : Cost-concern Matrix, Construction Automation, Diaphragm wall method, Trench-Cutter