

토조실험과 수치해석을 이용한 막장면 그라우팅 DSM공법의 안정성 검토

김영욱¹, 박영복¹, 김이삭¹, 김낙경^{2*}

¹명지대학교 토목환경공학과, ²성균관대학교 건축토목공학부

Inspecting Stability of DSM method with Grouting on Tunnel Face using Chamber Test and Numerical Analysis

Young-Uk Kim¹, Young-Bok Park¹, Li-Sak Kim¹, Nak-Kyeong Kim^{2*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

²Division of Architecture and Civil Engineering, Sungkyunkwan University

요약 도심지에서는 고도의 경제성장과 더불어 증가되는 교통량을 수용하기 위하여 도로와 철도 신설에 따른 지하터널 공사가 활발히 진행되고 있다. 지하공간 개발에서는 토사터널 구간이 많을 수 있고 이에 따른 막장 및 천단부 안정성을 고려한 여러 공법들이 개발 적용되고 있다. 그 중 최근에 적용예가 많은 공법으로 DSM(divided shield method)를 들 수 있는데, 이는 Messer Shield 공법에 근간을 두고 있으며, Messer Shield 공법의 장점을 흡수하고 문제점을 개선하여 안정성 및 시공성을 크게 개선한 비개착 특수터널 공법이다. 이 연구에서는 DSM 공법에서 터널 막장면 그라우팅이 터널의 시공성 향상에 미치는 영향을 대형 토조와 수치해석을 수행하여 검토하였다. 실제도로 크기의 1/2인에 해당하는 터널을 모사하기 위한 토조를 제작하여 실험 수행하였다. 또한 MIDAS GTS를 사용하여 수치해석 분석을 통해 DSM모사 토조의 지반 거동과 비교하였다. 터널 표면 침하와 안정성을 단계별 굴착을 통해 측정하였으며, 수치해석과 비교분석하였다. 연구 결과 그라우팅을 통한 막장 안정을 지표의 침하뿐만 아니라 터널 각 부재의 응력은 모두 안정성 범위에 들어가 있었으며, 이를 통하여 DSM 공법의 기술을 개선하고 터널의 안정성 및 시공성 향상을 기대할 수 있는 기초자료를 확보하였다.

Abstract In urban areas, underground tunnel construction sites have spread widely to accommodate rapidly increasing traffic volume along with a high-degree economic growth. Earth tunneling might be adapted frequently for the underground space securing, and various tunneling methods have been developed to stabilize the tunnel face and crown. Among them, the DSM (divided shield method) is gaining popularity for its enhanced stability and construction efficiency. This method has its foundation from the Messer Shield method, which is one of the trenchless special tunneling methods. This study examined the effects of face reinforcement on construction the sequence through a large scale soil chamber test and numerical analyses. The chamber has a size of a 1/2 scale of the real tunnel. Surface settlements were measured according the tunneling process. Commercially available software, MIDAS GTS, was used for numerical analysis and its result was compared with the values obtained from the chamber test. The results of the study show that both settlements of the embanked soils and the stress of the tunnel girder are located within the safe criteria. Overall, this study provides basic data and the potential of using a reinforced tunnel face to enhance DSM applications.

Keywords : Chamber test, DSM, MIDAS GTS, Numerical analysis, Trenchless tunneling

본 논문은 2014년도 명지대학교 교책중점연구소 지원으로 연구되었음.

*Corresponding Author : Nak-Kyeong Kim(Sungkyunkwan Univ.)

Tel: +82-031-290-7521 email: nkkim@skku.edu

Received January 18, 2016

Revised March 2, 2016

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

1. 서론

사회의 발전에 따라 도시기능이 활발해지면서 주요 도심지 및 수도권에는 지하철과 통신구 같은 여러 종류의 지하 구조물이 축조되고 있다. 과밀화된 교통난과 지하매설물의 장애 및 발파 진동과 소음으로 인한 주변피해로 인해 지하 구조물 개착공사를 하지 못하고 민원까지 발생하는 경우가 생겨 지하 터널 공사로 대체되는 경우가 자주 발생하는데,[1] 이에 따라 상거 목적을 달성하기 위한 터널 굴착공법이 현재까지 끊임없이 발전, 활용되고 있다. 현재 우리나라에서 막장 자립이 확실한 암반지층 구간에 널리 시공되고 있는 NATM공법은 매우 이론적인 경제 공법이라고 할 수 있다. 그러나 토사층과 같이 막장 자립이 우려되는 경우에는 화약발파로 인한 낙반사고의 문제가 있어 NATM공법 시공이 힘들며[2] 도로 및 철도 횡단과 같은 주요시설의 하부를 통과함에 있어 특수장비와 강제 가설재를 이용하여 안전하게 시공할 수 있는 터널 굴착 방안들이 개발되어 많은 시공 실적을 쌓고 있다.

철도 지하횡단 시공법 선정기준(철도교설계기준, 2012)에서 제시하고 있는 비개착공법들은 제각기 시공특성이 상이하어 현장조건에 가장 적합한 공법 선정이 중요하다. 이 중 DSM 공법은 지층이나 단면 형상에 관계없이 범용적으로 적용할 수 있으며, 타 공법에 비하여 시공성 및 경제성 등의 장점이 두드러진 공법이라 할 수 있다.[3]

DSM(Divided Shield Method) 공법은 복합지층 및 연약지반 구간에서 터널 천단부 강관다단 그라우팅을 선행 시공하여 Arc-Sliding방지 및 주변지반 변형을 극소화하며, Shield를 여러 조각으로 쪼개어서(DSM Plate) 한 장씩 추진하고 대형단면인 경우 적정단위로 분할하여 굴진 한다는 개념[4]이다. 공법 적용 시 여전히 막장의 안정이 문제가 많이 되어 안정용 토류판 설치 등에 따른 시공속도 및 효율 저하 등의 문제점이 있어 이를 고도화하기 위한 연구가 여전히 필요한 실정이다.

Yoo, C.(2002)와 Hong, Y, H.(2013) 등은 그라우팅이 터널의 표면 안정을 강화시키는 방법이라 소개한 바 있으며, 주입재의 침투로 인한 주변 지반의 이완 및 변형을 방지하는 방법으로 잘 알려져 있다.[5,6] 이 연구에서는 막장의 그라우팅으로 인하여 막장안정화를 유발하며 DSM의 시공성을 향상시키는 가능성에 대하여 고찰하

여, 토조 시험과 수치해석 검증을 통한 결과를 검토하였다. 실제 터널의 반으로 줄여 제작된 토조의 표면침하를 시공단계별 측정하였으며, 그 결과를 수치해석과 비교하였다.

2. DIVIDED SHIELD METHOD (DSM)

DSM(Divided Shield Method) 공법은 Messer Shield 공법에 근간을 두고 있다. Messer란 독일어의 Mess, 즉 Knife(칼)를 뜻하는 것으로써 토사지반에 쉽게 관입시킬 수 있는 선단부의 형태를 말한다.[7] Messer Shield 공법은 재래식 공법인 봉지공법에서 굴착 원지반의 안정을 위해 사용되어온 나무널말뚝 대신에 강널말뚝을 대체 사용함으로써 시작되었다.[8] 이와 같은 형태의 강널판을 본격적으로 정형화하여 Messer Shield 공법으로 개발한 나라는 1950년경의 서독이었는데, 본 공법은 서독 Bonn 교외의 하수도 공사와 뮌헨시 지하철역 대단면 굴착 공사에 활용되었다. 한편, 일본은 1970년대 Messer Shield 공법을 도입하여 연구와 실험을 거듭하면서 특유의 Messer로 개발시켜 안전성, 우수한 성능 및 경제성 등을 검증하고 많은 종류의 터널공사에 활용하고 있다. 우리나라는 1981년에 본 공법을 도입하였으며 1983년 지하철 318공구 본선부 99m 공사를 시작으로 영동선 철도 횡단 터널공사, 고속도로 횡단 터널공사, 지하철 터널공사, 전력구 및 통신구 공사, 각종 암거공사 등에 다수 적용되었다.

DSM 공법은 그동안의 공법 설계, 시공 경험을 바탕으로 Messer Shield 공법의 문제점을 개선하고 시공 System을 Level-Up 시켜 여러 특허를 등록하고 다양한 기술을 결합시켜 안정성 및 시공성을 크게 개선한 비개착 특수터널 공법이다.

일반적인 DSM공법의 절차는 다음과 같다. 그라우팅을 시행하여 지반을 고결한 후 요구하는 단면 외부에 강관(DSM Plate)을 배열하여 추진하고, 추진 완료 후 후방에 복공재(각관, 토류판)를 형성시키며, 그 내부에서 지반을 굴착한 후 지보공을 설치 반복하여 굴착을 완료한다. 다음 지보공 주변은 1차 라이닝(1:3 폴탈) 타설 후 내측에 방수 및 본체 구조물을 타설하는 공법이다.



Fig. 1. DSM procedure

3. 토조 실험

토조실험을 최초로 계획할 때의 주목적은 현장에서 많이 진행되고 있는 수치해석의 DSM공법으로의 확대적용이었다. 수치해석을 토조실험으로 검증하고 높은 신뢰도를 확보하면 다양한 조건들을 변형시키면서 막장면을 보강한 DSM 공법의 안정성을 분석하고자 하였다. DSM 터널의 막장면 그라우트에 따른 안정성 평가를 위한 토조실험에서 단계별 굴착에 의한 침하량을 측정하기 위하여 콘크리트 토조(폭3.0m x 높이2.5m x 길이2.5m x 두께0.15m)를 2차선 기준도로의 1/2에 해당하는 크기로 제작하여 지상에 설치하였다. 지보재는 H형강 125×125×7×9 제원의 강재를 사용하였으며 추진 판별은 축소된 실물모형 실험에 맞추어 1/2크기로 줄여 제작하였다. Fig. 2는 토조실험용 토조 제작도의 적용단면이다.

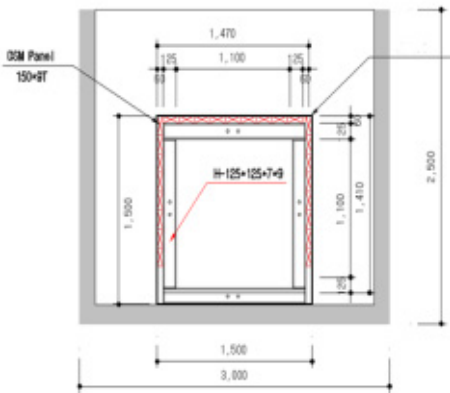


Fig. 2. DSM cross-sectional

실험 과정은 다음과 같다. 단면과 축척 결정 후 토조에 흙을 채우기 위하여 개구부를 폐쇄한다. Table. 1은 토조채움용 흙의 물성치다. 다음 (c)와 같이 토조 내의 지반을 채우며 60cm마다 그라우트에 의한 지반강성 증대를 모사하기 위하여 표면다짐 및 그라우팅 된 파이프 위치를 설정하였다. 토조 내의 흙을 모두 채운 후 성토상단부를 마무리 하고 (d)와 같이 변위계와 LVDT를 설치한다. 실제 시공 단계별 굴착을 진행하여 최종 침하량을 측정을 통해 결과를 분석하였다.

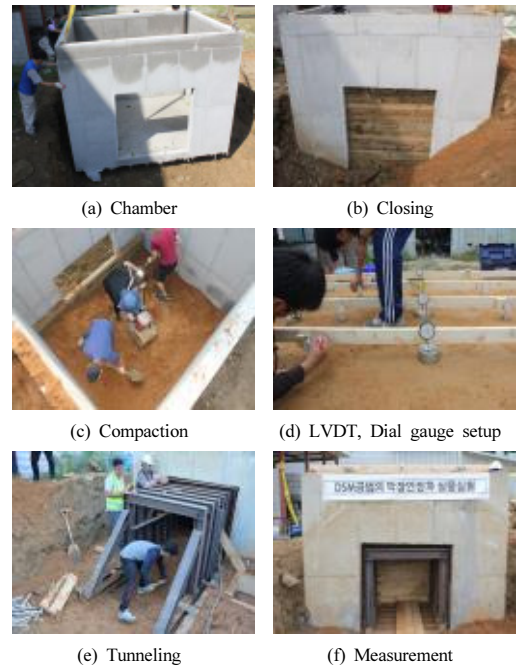


Fig. 3. Chamber Test

Table 1. Physical properties of soil

USCS	G_s	Cohesion (kPa)	Friction (°)	Max. Dry Density (kN/m^3)	LL	PI
SP-SC	2.6	2kPa	38.716°	18.6	33	13

Fig. 4는 성토지반 상단부에 변위계를 설치하여 DSM 공법의 단계별 굴착으로 인해 발생하는 지반변위를 측정하는 위치를 표시하고 있으며, 굴착이 진행될수록 침하량을 측정하여 수치해석과 비교자료를 활용하였다.

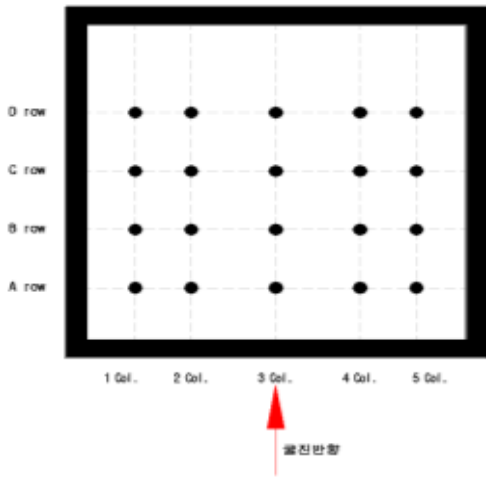


Fig. 4. Measurement locations at chamber

다음 그림은 시공단계별로 표면 침하량을 도식화 한 것으로 최대 침하량이 약 2mm로 측정되었다.

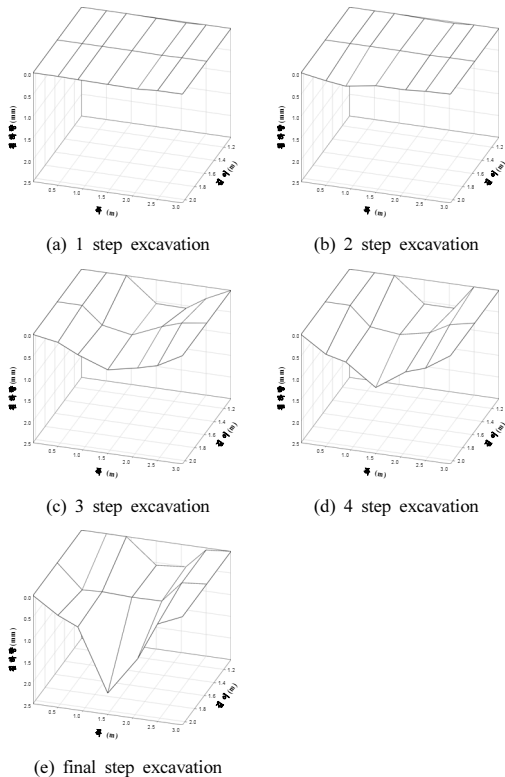


Fig. 5. Step-by-step excavation

4. 수치해석

본 수치해석 검토에서는 단일 토사지반으로 구성된 Mohr-Coulomb 연속체 모델을 적용하였으며, 지반조건이 절리가 거동을 지배하는 암반과는 달리 토사이므로 연속체 모델을 적용하였다. 안정성 해석은 토조시험에 사용된 지반조건, 하중조건 그리고 사용프로그램은 지반 해석전용 프로그램으로 터널 안정성 검토 시 많이 사용되고 있는 MIDAS GTS를 사용하여 3D해석을 수행하였다. 수치해석 수행 시 측면경계조건은 수평방향변위(X-축 변위)를 고정하는 롤러지점을, 하부경계조건은 수평방향변위는 허용하고 수직방향변위 (Y-축 변위)를 고정하는 롤러지점을 그리고 하부 양단 모서리는 수직 및 수평방향 변위를 구속하는 힌지 지점으로 설정하였다. 해석영역의 크기는 구조물의 형상, 크기, 지질 및 초기응력 상태 등에 의존하는데, 일반적으로는 굴착 시 지반의 응력 및 변위변화가 거의 없는 영역은 3.0D정도이다. 그러나 모형실험과의 유사성을 확인하기 위하여 실험 영역에 대한 모델링 영역을 설정하였다. 모델은 아래 Fig. 6 (a)와 같이 하였고 굴진장의 중방향은 0.3m이며, DSM Plate를 지중에 삽입한 후 지반을 굴착하였다. 그 후 DSM을 설치하고 굴착을 진행하는 순서로 해석단계를 정하여 수행하였다.

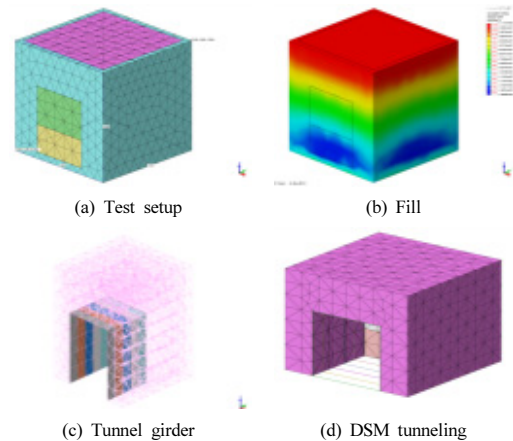


Fig. 6. FEM Modeling

3D분석의 대표적인 결과 그림은 Fig. 7에 나타났다. 변위 벡터의 최대값은 터널 외관의 중앙에 작용하며, 휨 응력의 최대위치도 중앙 천장임을 알 수 있다. 이들 모두

허용치보다 작아 안정한 결과를 나타냈다. 휨응력 뿐 아니라 침하와 전단응력 모두 그 결과의 범위는 안전범위 이내로 나타났다.

이는 터널 시공 후 모든 조건에서 H-beam과 DSM plate의 휨응력은 허용치인 140MPa보다 작아 안정한 결과를 나타내었으며 전단응력도 허용치인 580kPa보다 작아 전체적인 안정성에 영향이 없는 것으로 판단되었다.

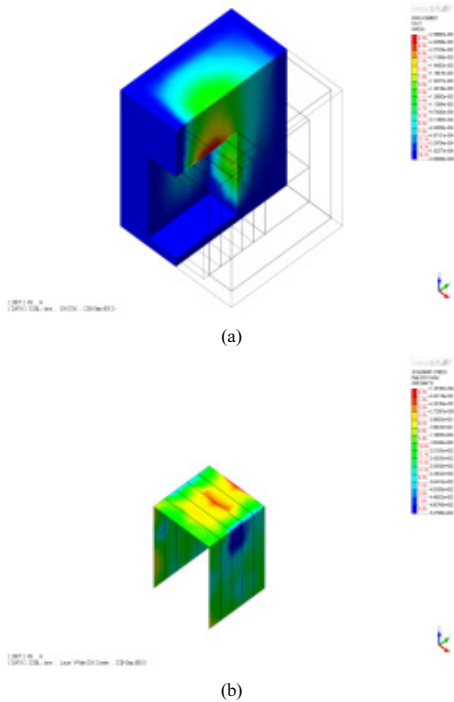


Fig. 7. 3-D Presentation of Results of Numerical Analysis
(a) Displacement Vectors
(b) Flexural Stresses in shields

다음 그림은 토조실험과 수치해석을 이용하여 침하량을 비교한 결과이다. 굴착단계가 진행될수록 침하가 커지고 그 양상도 두 그래프가 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 다양한 조건에서 토조실험을 추가적으로 수행하는 것 보다는 수치해석을 활용하여 터널의 거동을 해석하는 것이 더 경제적이다. 따라서, 다음의 그림으로 판단하여보면 실질적 터널의 1/2 축소모형 실험에 대한 분석도 충분히 수치해석으로 신뢰도 높은 결과를 도출할 수 있음을 알 수 있다. 만약 본 연구에서 수행한 결과를 활용, 실제 크기를 확장/확대 해석을 수행하면 현장에서의

터널 거동을 미리 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것이라 판단된다. 이를 토대로 향후 수치해석 결과에 좀 더 확장된 파라미터 연구로 적극 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

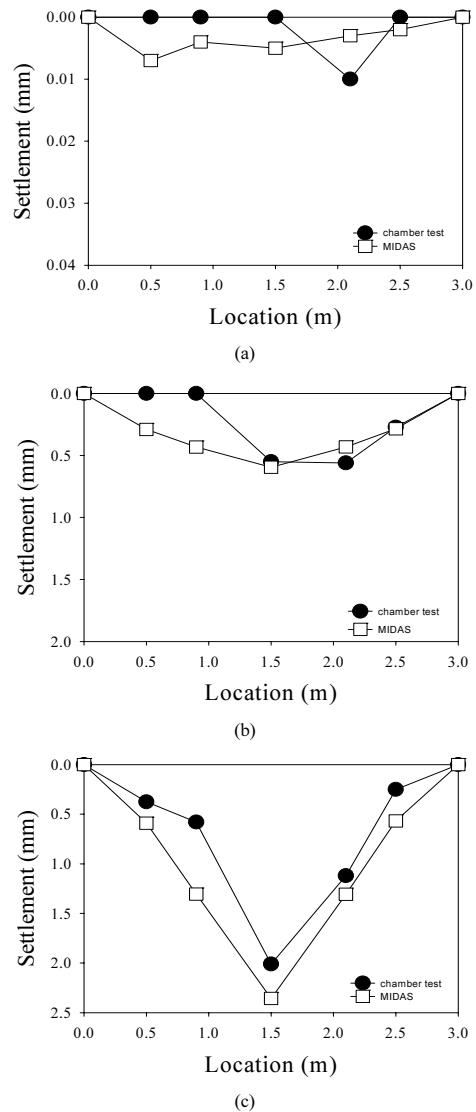


Fig. 8. Surface Settlements
(a) Entrance (b) Middle (c) End

5. 결론

이 연구에서는 도로 및 철도와 같은 주요시설의 하부

를 통과함에 있어 특수장비와 강제 가설재를 이용하여 안전하게 시공할 수 있는 터널 굴착방안 중 하나인 DSM 공법의 터널 표면 안정성에 대하여 토조실험 및 수치해석을 통하여 고찰하였다. 토조시험에 사용된 DSM 터널은 2차선 기준도로의 1/2크기로 제작하여 실험을 진행하였고 터널 표면의 침하와 안정성은 단계별 굴착 시 값을 측정하였다. 최대침하량은 약 2mm로 나타났다. 수치해석은 Mohr-Coulomb 연속체 모델을 적용하였으며, MIDAS GTS를 사용하여 수행하였고 토조의 지반 거동과 비교하였다. 모든 굴착단계가 진행될수록 침하가 증가하며 진행되었으나 프랑스 공업성 관리기준, 오스트리아 Alberg 터널 관리기준, 일본의 비도건설 관리기준에 의해 안정한 범주에 속하는 것으로 판단되었으며, 그 양상도 토조시험과 유사하게 나타났으며 모든 조건에서 H-beam과 DSM plate의 휨응력은 허용치인 140MPa보다 작아 안정한 결과를 보였다. 연구결과, 그라우팅이 지반을 강화시켜 안정성을 증대시키며 막장면 토류벽 설치 공정을 제거하여 작업 시간을 줄일 수 있는 가능성을 보여준다. 이 연구의 분석과 결과를 통해 DSM 공법의 기술을 더욱 개선한다면 터널의 안정성 및 시공성 향상의 잠재성을 판단할 수 있었다.

References

- [1] Shin, H. J., Shin, K. C. "A Case Study of the Underground Passage Ways Construction in Downtown", Architectural Institute of Korea Fall Conference, Daegu, Korea, Vol.31, No2, pp. 261-262, 2011
- [2] Kim, M. I., Lee, S. W. "A Study on a Method of Improvement from Domestic NATM Case", Journal of KIIS Vol. 9, No. 4, pp. 92~102, 1994
- [3] Kim, J. W., "A Study on the Field Application of DSM(Divided Shield Method) and Numerical Analysis" Master's thesis in Civil and Environmental Engineering Graduate School of Hanyang University, 2005
- [4] Kim, H. N., "A study on the Analysis for Major Factors in Selection Process of Non-Open Cut Construction Method" Master's thesis in Civil Engineering Graduate School Gyeongsang National University, 2013
- [5] Yoo, C. (2002): Finite-element analysis of tunnel face reinforced by longitudinal pipes, Computers and Geotechnics 29, Vol.29, No.1, pp. 73~94, 2002
- [6] Hong, Y. H., Yu, J. D., Byun, Y. H., You, B. C., Lee, J. S., "Integrity evaluation of grouting in umbrella arch methods by using guided ultrasonic waves" Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol.15 No.3, pp. 187~199, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.9711/KTAJ.2013.15.3.187>

- [7] Choi, K. H., "Ground movement due to messer shield excavation in urban tunnel" Master's thesis in Civil Engineering Graduate School Korea University, 2013
- [8] Park, D. K., "Study in the Method of MESSER SHIELD" Master's thesis in Civil Engineering Graduate School Donga University, 2000

김 영 옥(Young-Uk Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : The Pennsylvania State University 토목환경공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

토양오염 복원, 환경공학, 토질역학

박 영 복(Young-Bok Park)

[정회원]



- 2015년 9월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

<관심분야>

토질역학, 지반공학

김 이 삭(Li-Sak Kim)

[정회원]



- 2015년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

<관심분야>

토질역학, 지반공학

김 낙 경(Nak-Kyeong Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : Texas A&M Univ. 토질 및 기초(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 건축토목공학과 교수

<관심분야>

토질, 기초공학