

연약지반 개량을 위한 PBD 시공품질 자동측정시스템 개발

김민호¹, 문상돈², 김항영³, 김태영^{3*}

¹전북대학교 고온플라즈마응용연구센터구축사업단, ²전북대학교 기계설계공학부,

³전북대학교 기계시스템공학부

Development of Automatic PBD Construction Quality Measurement System for Soft Ground Improvement

Min-Ho Kim¹, Sang-Don Mun², Hang-Young Kim³ and Tae-Young Kim^{3*}

¹High-enthalphy Plasma Research Center, Chonbuk National University

²Division of Mechanical Design, Chonbuk National University

³Division of Mechanical System, Chonbuk National University

요 약 간척지나 해안지역과 같은 연약지반에 건축 및 토목공사를 위해서는 지반의 강도를 높이기 위한 연약지반 개량공사가 필수적이다. 연약지반 개량 공법은 여러 가지가 있으나 우리나라를 비롯해 세계적으로 연직배수공법을 주로 사용하고 있다. 연직배수공법은 연약한 점성토 지반 내에 인공적으로 연직 배수재를 다수 설치하여 배수거리를 단축시킴으로써 압밀을 촉진시키고, 그에 따른 강도증가 효과를 얻을 수 있는 공법이다. 연직배수재로는 경제성과 시공성이 우수한 PBD가 널리 사용되고 있다. PBD 시공품질은 시공 깊이, 압력, 수직도 등에 영향을 받게 된다. 본 논문에서는 PBD 시공시 배수재의 시공 심도, 압력, 수직도를 자동측정하여 작업자가 실시간으로 모니터링 할 수 있고 시공결과를 자동 저장하는 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 시공 불량 요인이 발생시 자동 경고하여 불량률을 줄일 수 있고, 장비의 이상 발생시 자동 제어시스템을 가동하여 작업의 안전성을 확보하도록 하였다.

Abstract Soft ground improvement is essential to enhance strength of ground for construction in reclaimed land or shore. There are many method of soft ground improvement, and vertical drain method was widely used in many countries including korea. As vertical drain method is to plant many Prefabricated Vertical Drains in soft ground, it promotes consolidation and enhances strength. The PBD(Plastici Board Drain) that is excellent economy and workability was widely used in many countries as Prefabricated Vertical Drains. Construction quality of PBD is affected installation depth, pressure, perpendicularity. This paper describes the system developed that can automatically measure installation depth, pressure and perpendicularity for PBD. This system can reduce fraction defective of construction by auto faulty alarm and keeps the safety of operator by auto control system.

Key Words : PBD(Plastic Board Drain), Soft Ground, Measurement System, Prefabricated Vertical Drains

1. 서론[1]

고함수비의 연약지반을 개량하여 도로, 철도, 공항, 항만, 단지 조성등 각종 구조물의 기초로 활용하기 위해서는 지중에 함유되어 있는 간극수를 조기에 지상으로 배출시켜서 간극수의 배출로 인한 지표면의 침하를 조기에

완료시키고, 지지력을 증대시키는 연약지반 개량공사가 필요하다. 연약지반을 개량하는 대표적인 공법으로 샌드 드레인(sand drain)과 샌드 콤팩션 파일(sand compaction pile) 조성, 그라벨 드레인(gravel drain)과 그라벨 콤팩션(gravel compaction) 공법, 팩드레인(pack drain) 공법, 플라스틱 보드 드레인(plastic board drain: PBD) 공법 등이

*교신저자 : 김태영(kimty@jbnu.ac.kr)

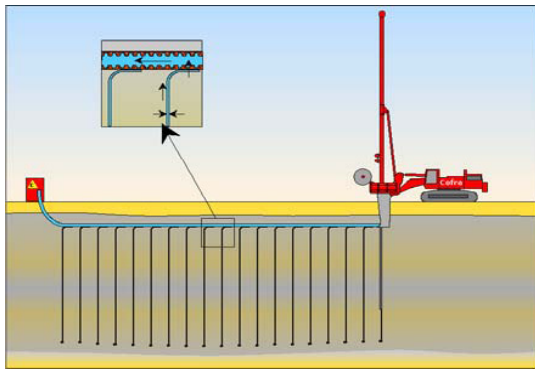
접수일 10년 10월 20일

수정일 11년 01월 27일

게재확정일 11년 02월 10일

활용되고 있으나 모래나 자갈 등의 천연재료의 고갈 등으로 인하여 현재는 플라스틱 보드 드레인(PBD) 공법이 가장 일반적으로 쓰이고 있다.

PBD 공법은 하모니커 또는 벌집형의 플라스틱 코어재를 필터용 천으로 감싸서 만든 플라스틱 드레인 보드(plastic drainboard)를 지중에 타입하여 타입된 드레인 보드 주변의 간극수를 보드를 통하여 지표면으로 신속하게 배출시키는 공법이다[2]. 그림 1은 이러한 PBD공법의 개략도이다. 이 공법은 장비가 간편하고, 시공속도가 비교적 빠르고, 플라스틱 드레인 보드 자재비가 비교적 저렴할 뿐만 아니라 케이싱 파이프의 지중관입으로 인한 지반교란의 최소화가 가능하기 때문에 그 사용이 증가하고 있다.



[그림 1] PBD 시공 개략도

PBD공법의 시공이 증가함에 따라 시공품질관리에 대한 요구도 높아지고 있다. 하지만 기존 시공기록계에서는 케이싱의 심도만 관리하는 시공실적 위주의 결과만을 출력하고 있다. 연약지반 개량공사 감리단의 높아진 요구와 고품질 PBD시공을 위해서는 여러가지의 계측요소와 개선된 장치를 이용하여 품질관리를 해야 한다. 또한 불량률을 낮추면서 공사비 절감을 위해 작업속도를 높일 수 있는 자동화 요구가 높아지고 있다.

이러한 요구를 실현하기 위해 심도 측정뿐만 아니라 케이싱 인발시 자재의 따라오름을 측정하고 정확한 수직관입을 위한 경사도 측정, 안전한 시공과 일정한 관입방향 관리를 위한 유압측정을 하여야 하며 이러한 데이터들을 종합적으로 분석하여 그에 따라 장비를 자동제어를 해야 한다. 또한 모든 작업상황과 시공결과는 사후관리와 감리단에 자료 제출을 위해 PC에 저장되고 실시간으로 출력되어야 한다.

본 연구는 이러한 요구를 실현할 수 있는 실시간 PBD 시공품질 자동측정시스템 개발을 목표로 하였다.

2. 설계

PBD 시공품질 자동측정시스템 설계를 위해 가장 먼저 시공시 압력, 각도, 깊이를 측정하기 위한 센서를 선정하였다.

압력센서는 굴삭기 유압모터의 유압을 측정하기 위한 센서로 유압모터의 토출부에 장착할 수 있는 형태로 최고 측정 압력은 유압모터 최고 토출압력보다 2배정도 큰 600bar인 사양을 선정하였다.

각도 센서는 굴삭기에 부착되는 PBD 타설 장비에 부착하여 시공시 장비의 각도를 측정하기 위한 센서로써 실외 환경에서 눈, 비, 바람, 먼지 등을 견딜 수 있는 센서를 선정하였다. 또한 타설장비의 앞뒤 및 좌우 각도를 동시에 측정 할 수 있도록 2축용으로 하였다. 측정범위는 시공 함격 범위가 $\pm 2^\circ$ 인 점을 감안하여 $\pm 5^\circ$ 인 것으로 선정하였다.

시공깊이를 측정하기 위해 케이싱을 이송하는 와이어를 감고 푸는 드럼 회전량으로 시공 심도를 측정하기 위한 엔코더와 자재의 이송을 따라 움직이는 롤러의 회전량으로 자재의 따라오름량을 측정하기 위한 엔코더를 선정하였다. 심도와 따라오름 측정 허용 오차가 1cm인 점을 감안하여 1회전당 200펄스를 발생하는 엔코더로 하였다.

압력 및 각도 센서의 신호선 배선이 길어 전압 출력방식은 신호의 출력이 감소할 수 있어 전류출력 방식을 채택하였다. 센서의 전류신호를 전압신호로 변환해 주고 입력 및 출력 신호선 커넥터블럭 역할을 해주는 신호변환기판을 설계하였다. 신호들을 입력받아 컴퓨터에서 인식할 수 있는 디지털로 변환해 주는 DAQ보드는 3개의 아날로그 입력(압력센서, X축 각도센서, Y축 각도센서)과 2개의 카운터 입력(심도, 따라오름 로터리 엔코더), 4개의 디지털 출력(심도 상한경고, 심도하한 경고, 압력 경고, 불량경고) 기능을 가지고 있는 보드를 선정하였다.

[표 1] 각종센서 및 DAQ 보드 사양 및 모델명

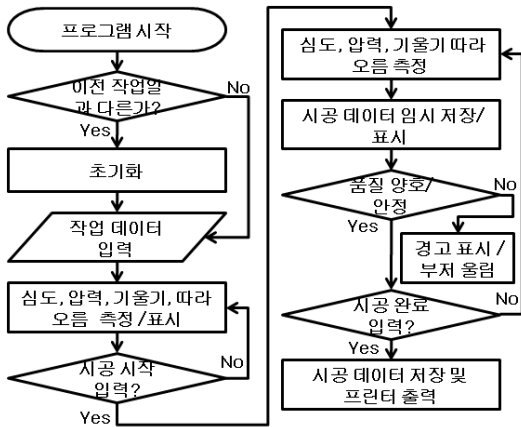
| 품명 | 사양 | 제조사 | 모델명 |
|--------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|
| 압력 센서 | 최고 측정 압력 : 600bar, 전류출력방식 | 한영닉스 | PT300 GB-0500-HAD |
| 각도 센서 | X, Y축 $\pm 5^\circ$, 전류출력방식 | 다스테크놀로지 | DM2 |
| 엔코더 | 입력전압 24V, 200펄스/1회전당 | Autonics | E50S8-200-3-1-24 |
| DAQ 보드 | AI : 8채널, Counter: 2채널, DO : 8채널 | National Instrument | PCI-6221 |

표 1은 측정시스템 개발을 위해 선정된 압력센서, 각도센서, 로터리 엔코더, DAQ 보드의 사양과 제조회사,

모델명을 보여주고 있다.

센서와 로터리 엔코더를 동작하기 위한 입력 전압은 굴삭기의 축전지 전압 24V를 전압변화 없이 사용하기 위하여 모두 24V인 것으로 선정하였다.

그림 2는 시공장비 운전자에게 작업 상황을 실시간 모니터링해 주고 시공 품질을 기록해 주는 측정 프로그램의 흐름도를 보여 주고 있다.

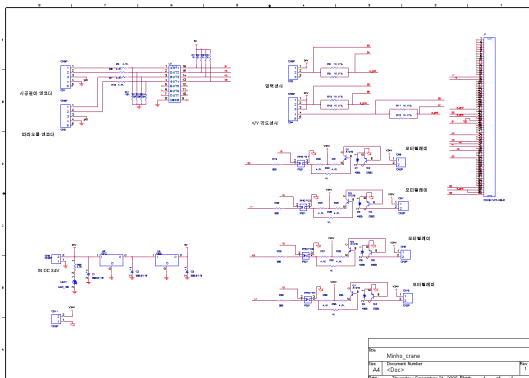


[그림 2] 측정 프로그램 흐름도

3. 제작

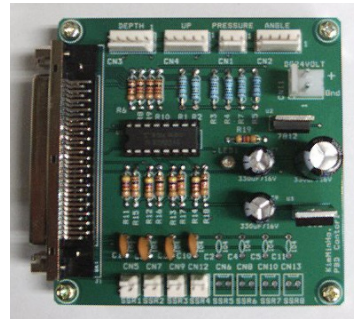
3.1 신호변화보드

신호변화보드는 센서의 출력신호를 DAQ보드가 입력받을 수 있는 신호로 변화하여 주고, 센서에 전원을 공급하고, 각종 측정값을 바탕으로 PC프로그램에서 분석하여 출력되는 경고와 제어신호를 출력해주는 기능을 가진다.



[그림 3] 신호변환 회로 설계도

신호변화보드 제작을 위하여 그림 3과 같이 회로 설계를 완성하였으며 이를 바탕으로 PCB기판을 제작하고 그림 4 (a)와 같이 신호변환보드를 제작하였다. 그림 4 (b)는 신호변환 회로와 각종센서 및 엔코더들의 배선 연결과 컴퓨터와의 배선을 용이하게 하고, 신호변환 회로 기판을 보호하기 위해 제작된 커넥터 박스이다.



(a)



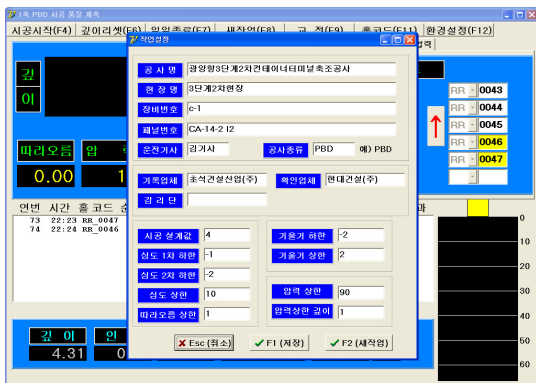
(b)

[그림 4] 신호변환보드(a)와 신호변환 커넥터 박스(b)

3.2 측정 프로그램

자동측정 프로그램은 첫째 PBD 시공시 자재 시공심도 및 따라오름량과 관입각, 관입압을 작업자가 PC 모니터를 통해 실시간으로 모니터링할 수 있고, 둘째 시공결과값을 출력하고 전산화하며, 셋째 시공값들이 시방값을 초과하거나 미달시 작업자에게 경고음으로 알리고 장비를 상황에 맞게 자동제어할 수 있는 기능을 갖도록 설계 제작되었다.

프로그램은 Window XP에서 구동할 수 있도록 하였다. 프로그램 개발 툴은 볼랜드사의 Delphi 7.0을 사용하였으며 DAQ보드와 연동하기 위하여 DAQ보드 제조사 (National Instrument)에서 제공하는 드라이버와 DLL함수들을 이용하였다.



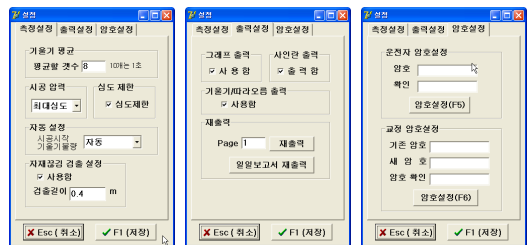
[그림 5] PBD 시공 자동 측정 프로그램 시작 화면

프로그램을 시작하면 그림 5와 같은 화면이 나타나고 여기에서 공사명, 현장명, 장비번호등 작업 기록에 필요한 데이터들을 입력하고 저장할 수 있다. 프로그램의 메인화면은 그림 6과 같다. 메인화면은 심도, 따라오름, 압력, 각도 값을 실시간으로 표시해 주고, 작업이 진행되는 방향과 작업하는 홀코드 번호를 보여주고 시공된 홀들의 기록데이터와 현재 홀의 기록 예정 데이터를 보여준다. 또한 케이싱의 타설 깊이를 그래픽적으로 실시간으로 보여 준다.



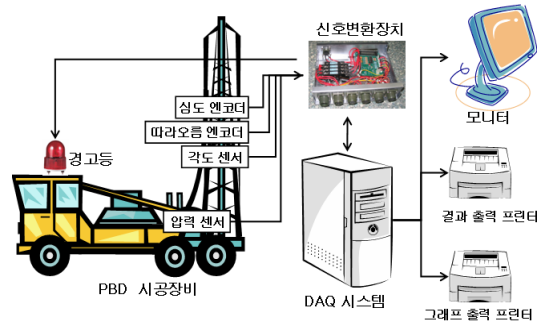
[그림 6] PBD 시공 자동 측정 프로그램 메인 화면

프로그램의 모든 메뉴와 작업관련 명령은 조작을 빠르게 하기 위하여 단축키들을 사용할 수 있도록 하였다. 가장 빈번히 사용하는 “시공시작”과 “시공완료” 명령은 터치스크린 모니터를 사용하여 손으로 메인화면의 시공측정값 표시창을 클릭해도 실행되도록 하였다.



[그림 7] 환경설정 화면

엔코더 와 압력센서, 각도센서의 값을 교정하기 위해 교정 기능을 두어 오프셋값과 게인값을 조정할 수 있도록 하였다. 환경설정 메뉴에서는 그림 7과 같이 측정과 관련된 옵션 값과 출력과 관련된 옵션값을 설정하고 운전자 암호와 교정을 위한 암호를 설정할 수 있는 기능을 두었다.



[그림 8] PBD시공품질 자동측정 시스템 개략도

그림 8은 PBD시공품질 자동측정 시스템의 전체적인 개략도로 각각의 장치들간의 신호를 주고받는 경로와 배선관계를 나타내고 있다. PBD시공품질 자동측정 시스템은 심도, 따라오름, 각도, 압력 값을 측정할 수 있는 센서들과 센서의 신호를 DAQ 시스템의 입력 신호에 맞게 변환해 주는 신호변환장치, 신호변환장치를 통하여 입력되는 아날로그신호를 디지털신호로 변화해 주고 제어신호를 출력하는 DAQ시스템 과 모니터, 시공 품질 데이터와 실시간 신호를 프린터하는 출력 시스템으로 구성되어 있다.

DAQ시스템과 모니터 및 프린터 장치들은 상용화된 인터페이스 방식으로 연결되었으며 센서와 신호변환장치는 탈착이 용이하고 외부 환경에 견딜 수 있는 방식의 커넥터와 배선도를 설계하여 제작하였다.

결과 출력 프린터는 한 홀 한 홀 시공 할 때마다 즉시 한 줄씩 출력하여야 하기 때문에 연속용지를 사용할 수 있고 한 줄씩 출력하고 대기할 수 있는 기능이 있는 도트

프린터를 사용하였다. 심도, 따라오름, 각도, 압력값은 또한 실시간 연속 데이터로 임시저장 후 일정 시간마다 그래프로 출력할 수 있도록 그래프 출력용 프린터를 별도로 연결하여 사용할 수 있도록 하였다.



[그림 9] 개발 장비로 측정 중인 시공 모습

그림 9는 개발된 측정장비를 장착하고 시공 중인 PBD 시공장비의 모습이고, 그림 10은 측정장비가 설치된 PBD 시공장비의 운전석 모습이다. 운전석에는 모니터, 키보드, 마우스 및 프린터가 설치되어 있다.



[그림 10] 측정장비가 설치된 시공장비의 운전석

개발된 PBD 시공품질 자동측정시스템은 PBD 시공장비 운전자가 시공과 동시에 시공 상황을 모니터링하면서 시공결과를 저장 및 출력할 수 있었다. 또한 각도, 압력 등의 위험 신호 및 따라오름, 심도 불량률 즉각 감지하여 경고함으로써 작업의 안정성을 확보할 수 있었고, 시공 불량률을 줄일 수 있었다. 시공 불량발생시에는 즉각 재시공할 수 있어 시공품질의 우수성을 보장할 수 있었다.

| 연번 | 시간 | 홀코드 | 순번 | 설계 | 시공 | 인출 | 실입 | 경사각X | 경사각Y | 압력 | 코퍼 |
|----|-------|-----|-----|----|----|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 13:02 | JP | 623 | 1 | 43 | 44.32 | 0.14 | 44.18 | 0.65 | 0.33 | 247 S |
| 2 | 13:04 | JO | 623 | 2 | 43 | 44.38 | 0.19 | 44.19 | 0.34 | 0.18 | 256 S |
| 3 | 13:05 | JN | 623 | 3 | 43 | 44.57 | 0.2 | 44.37 | 0.38 | 0.05 | 254 S |
| 4 | 13:06 | JM | 623 | 4 | 43 | 44.39 | 0 | 44.39 | 0.41 | 0.17 | 253 S |
| 5 | 13:07 | JL | 623 | 5 | 43 | 44.6 | 0.22 | 44.38 | -0.15 | 0.18 | 212 S |
| 6 | 13:09 | JL | 622 | 6 | 43 | 44.57 | 0.16 | 44.41 | -0.14 | -0.23 | 248 S |
| 7 | 13:10 | JM | 622 | 7 | 43 | 44.5 | 0.07 | 44.43 | 0.24 | 0.03 | 239 S |
| 8 | 13:12 | JN | 622 | 8 | 43 | 44.44 | 0.13 | 44.31 | 0.23 | 0.22 | 257 S |
| 9 | 13:13 | JO | 622 | 9 | 43 | 44.42 | 0.21 | 44.21 | 0.25 | 0.2 | 253 S |
| 10 | 13:15 | JP | 622 | 10 | 43 | 44.47 | 0.26 | 44.21 | -0.25 | 0.2 | 248 S |
| 11 | 13:16 | JP | 621 | 11 | 43 | 44.48 | 0.23 | 44.25 | -0.44 | 0.1 | 251 S |
| 12 | 13:17 | JO | 621 | 12 | 43 | 44.41 | 0.26 | 44.15 | 0.15 | 0.26 | 245 S |
| 13 | 13:18 | JN | 621 | 13 | 43 | 44.51 | 0.07 | 44.44 | 0.1 | -0.01 | 250 S |
| 14 | 13:19 | JM | 621 | 14 | 43 | 44.06 | 0 | 44.06 | 0.28 | -0.04 | 246 S |
| 15 | 13:20 | JL | 621 | 15 | 43 | 44.54 | 0.02 | 44.52 | 0.2 | -0.25 | 226 S |
| 16 | 13:21 | JL | 620 | 16 | 43 | 44.53 | 0.19 | 44.34 | 0.39 | 0.04 | 249 S |
| 17 | 13:22 | JM | 620 | 17 | 43 | 44.62 | 0.21 | 44.41 | 0.48 | 0.07 | 245 S |
| 18 | 13:23 | JN | 620 | 18 | 43 | 44.4 | 0.18 | 44.22 | 0.43 | -0.23 | 248 S |
| 19 | 13:24 | JO | 620 | 19 | 43 | 44.51 | 0.25 | 44.26 | 0.4 | -0.37 | 249 S |
| 20 | 13:26 | JP | 620 | 20 | 43 | 44.36 | 0.13 | 44.23 | 0.53 | -0.36 | 252 S |

[그림 11] 개발 장비로 측정된 시공 품질 데이터

그림 11은 개발된 본 장비로 측정된 실제 작업현장의 시공 품질 데이터이다. 품질 데이터는 시공시간, 홀코드, 설계 시공깊이(m), 케이싱 타설깊이(시공(m)), 따라오름(인출(m)), PBD시공깊이(실입(m)), 경사각 X(°), Y(°), 시공 최대 압력(bar), 시공 결과 판정 값들로 되어 있다. 품질 데이터는 프린터 출력과 동시에 PC에 저장된다. 이러한 데이터는 시공에 대한 신뢰를 높이고 품질 향상과 시공방법 개선을 위한 기초자료로 활용되고 있다.

4. 결론

PBD시공 작업시 자재 시공심도 및 따라오름량과 리더의 기울기, 관입 유압을 측정할 수 있는 센서들의 신호를 입력받아 ±0.1m이내의 심도측정오차, ±0.2°이내의 각도 측정오차, ±20Kg/cm²이내의 압력측정오차로 시공상황을 실시간으로 모니터링할 수 있고, 장비의 이상시 경고 및 자동 제어 기능과 시공데이터 전산화 기능을 갖춘 자동측정장비 개발을 완료하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 작업상황의 실시간 데이터와 시공결과 데이터를 전산화하고 실시간 출력으로 품질관리 및 공사 감리에 신뢰성을 줄 수 있다.
2. 측정된 데이터를 분석하여 이상시 작업자에게 알리고 장비를 자동제어하여 불량률을 최소화하고 작업의 안정성을 보장할 수 있다.
3. 측정기 설정과 조작에 의한 작업시간 지연을 최소화하여 생산성을 향상 시켰다.
4. 모든 시공홀에 대한 품질 평가 데이터를 전산화

므로 이를 이용하여 품질개선과 생산성 증대를 이루었다.

참고문헌

- [1] 김민호, 신예호, 김태영 “연약지반 개량을 위한 PBD 시공품질 자동측정시스템 개발”, Proc. of the KAIS Spring Conference, pp. 11159-1162, 2010.5.28.
- [2] 오성훈, “무진동 PBD(플라스틱 보드 드레인) 시공장비 구조 최적 설계”, 한국산학기술학회, 제8권, 5호, pp. 1300-1305, 10월, 2007.
- [3] 나영목, 김희홍, 권덕우, “초연약지반의 매립 및 지반 개량 사례 연구 (Ⅱ) - 지반개량 -”, 한국지반환경공학회, 제6권, 1호, pp. 33-44, 2월, 2005
- [4] 장용채, 김주한, 이진수, “유한요소해석을 이용한 연직배수재의 타설범위에 따른 개량효과에 관한 연구”, 한국지반환경공학회, 제6권, 1호, pp. 5-12, 2월, 2004.
- [5] 고경환, “PDB공법의 시공사례 동향과 해결과제”, 한국토목섬유학회, 제6권, 제2호, pp. 21-26, 4월, 2007
- [6] 손진현, 김지용, 변기준, 이병길, 유승경, 김태형, “부산시향 연약지반에 적용된 PBD공법의 지반개량 시공사례”, 한국토목섬유학회, 제5권, 제4호, pp. 1-10, 12월, 2006

김민호(Min-Ho Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 전북대학교 일반대학원 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 전북대학교 일반대학원 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2010년 4월 ~ 현재 : 전북대학교 고온플라즈마응용연구센터주축사업단 학술연구교수

<관심분야>

금속절삭 및 기계가공, 공장자동화 및 계측

문상돈(Sang-Don Mun)

[정회원]



- 1992년 2월 : 전북대학교 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 전북대학교 일반대학원 정밀기계공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 전북대학교 일반대학원 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학부 부교수

<관심분야>

자기연마가공, 특수가공, 기계가공

김항영(Hang-Young Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 전북대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 전북대학교 일반대학원 정밀기계공학과 박사과정수료
- 2008년 2월 ~ 현재 : (주)나베 대표이사

<관심분야>

금속절삭 및 기계가공

김태영(Tae-Young Kim)

[정회원]



- 1976년 2월 : 전북대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 1986년 2월 : 전북대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1979년 4월 ~ 현재 : 전북대학교 공과대학 기계시스템공학부 교수

<관심분야>

공작기계 및 기계가공, 기계계측