

## 여러 가지 다짐평가 장비의 적용성에 대한 모형 시험

백인철<sup>1</sup>, 유완규<sup>2\*</sup>, 김병일<sup>3</sup>, 김주형<sup>4</sup>

### Model Tests for the Applicability of various Testing Devices for Measuring Degree of Compaction

In-Chul Back<sup>1</sup>, Wan-Kyu Yoo<sup>2\*</sup>, Byoung-Il Kim<sup>3</sup> and Ju-Hyong Kim<sup>4</sup>

**요 약** 현재 미국, 유럽, 일본 등을 중심으로 기존의 다짐평가시험보다 빠르고 간편하게 다짐도를 평가할 수 있는 장비들이 개발되어 사용되고 있지만 국내에서는 아직 이러한 다짐평가장비의 사용이 보편화 되어 있지 않다. 이 연구에서는 모형지반에서 진동핸드롤러를 이용하여 다짐을 실시하고 기존 다짐평가 방법인 들밀도시험결과와 새로운 다짐평가장비인 지오게이지(geogauge), 간이지지력측정기(CASPFOL), 동평판재하시험기(LFWD), 동적콘관입시험기(DCP) 결과를 비교 분석하고 시험장비간 상관성 평가를 수행 하였다. 그 결과 상관계수는 70~95%로 대부분 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

**Abstract** Although various fast and simple, testing devices have been developed in many countries such as the U.S, Japan, and European countries, these testing devices are not commonly used in Korea. In this study, compaction for the field density test was carried out with a hand-guided vibrating roller. The results of the field density test were compared with those of the new testing devices such as the geogauge, soil impact hammer(CASPFOL), light falling weight deflectometer(LFWD), dynamic cone penetration(DCP). Regression analyses were conducted with the data from new testing devices. The analysis results showed that the correlation coefficients were high in the range of 70~95%.

**Key Words** : 다짐평가, 지오게이지(geogauge), 간이지지력측정기(CASPFOL), 동평판재하시험기(LFWD), 동적콘관입시험기(DCP)

## 1. 서론

현대에 이르러 토목구조물은 과거에 비해 큰 규모와 높은 정밀성을 요구하고 있다. 이에 따라 지반을 조성할 때 넓은 지역을 필요로 하게 되고 성토 및 절토의 중요성이 점차 커지고 있는 실정이다. 최근 국내에서는 시공장비 개선으로 성토다짐의 시공속도는 매우 빨라지고 있지만 다짐도 평가방법은 이에 미치지 못하고 있는 실정이

다. 성토된 지반위에 도로나 철도, 기타 구조물 축조 후에 가장 큰 문제를 야기시키는 경우에는 성토지반의 지지력 부족, 부등침하 등을 들 수 있고, 이러한 문제점은 대부분 성토다짐의 불량에 의한 것이다. 현재 국내의 성토 다짐 평가는 들밀도시험, 평판재하시험, CBR 등이 이용되고 있는데 이들 시험은 절차가 복잡하고 휴대성이 떨어지며 결과를 얻는데 일정시간이 소요된다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 유럽, 미국 그리고 일본 등을 중심으로 새로운 다짐평가장비인 지오게이지(geogauge), 동평판재하시험기(LFWD), 동적콘관입시험기(DCP), 간이지지력측정기(CASPFOL) 등이 개발되었다. 이러한 장비들은 미국군법, 영국도로연구 실험방법 등에서 사용되도록 규정되어 있으며 독일에서는 동적탄성계수  $E_{vd}$  (MPa)를 결정하기 위하여 LFWD를 사용하도록 되어있다. 또한 DCP의 경우 미국, 유럽에서 지반의 동적물성치 추정을 위한 현장 방법으로 많이 이용되고 있다. 이 연구

이 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업 (06건설핵심D02)의 지원으로 연구되었음

<sup>1</sup>명지대학교 토목환경공학과 석사과정

<sup>2</sup>명지대학교 토목환경공학과 박사과정

<sup>3</sup>명지대학교 토목환경공학과 교수

<sup>4</sup>한국건설기술연구원 국토지반연구부 선임연구원

\*유완규(lyu5553@mju.ac.kr)

에서는 기존 다짐평가방법인 들밀도시험과 새로운 다짐 평가장비 시험결과를 비교 분석하여 현장 적용성을 검토 하고 각 시험장비간 상관관계를 알아보고자 한다.

## 2. 새로운다짐 평가장비

### 2.1 지오게이지(Geogauge)

Geogauge의 기술은 원래 지뢰 발견을 위한 방위산업에 의해 발전되었다(그림 1)[1]. Geogauge의 무게는 약 10kg이고 280mm의 직경에 높이 254mm이다. 지반과의 접촉부는 외경 114mm, 내경 101mm의 나이트 모양의 링으로 되어있다[2]. Geogauge에 달린 shaker라는 장치는 100~196Hz 범위내의 특정한 25개 진동수에서 매우 작은 동력을 발생시킨다. 이것은 geogauge의 본체에 달린 지오폰 센서로 측정된 매우 작은 변위량( $\delta$ )을 측정한다. Geogauge 강성 측정값( $H_{SG}$ )은 25번의 다른 진동수에서 측정된 25개 강성지수 값을 평균한 값이다.  $H_{SG}$ 는 다음 식에 의해 흙의 탄성계수( $E_G$ )로 변환된다.

$$E_G = H_{SG} \frac{(1-\nu^2)}{1.77R} \quad (1)$$

$E_G$  : 탄성계수(MPa),  $H_{SG}$  : geogauge 강성 읽음 값 (MN/m),

$\nu$  : 포아송비,  $R$  : 지반 접촉부 반경(57 mm)

### 2.2 간이지지력측정기(CASPFOL)

CASPFOL(그림 2)은 래머(중추)를 일정한 높이에서 지반에 자유낙하시킬 때에 발생하는 충격가속도의 최대 값을 측정하여 CBR값,  $K_{30}$ 값(지반반력계수),  $q_c$ 값 등과 의 상관관계를 얻는 장비이다. CASPFOL은 본체와 표시부로 구성되며, 직경 50mm, 질량 4.5kg의 래머를 높이 45cm에서 자유 낙하시켜 래머에 내장된 가속도계에서 충격가속도를 측정하고 내부의 관계식으로부터  $K_{30}$ 등을 계산하여 표시한다. 가속도계에서 측정한 충격가속도의 최대값을 찾아 그 값을 CPU에 기록하고 impact값( $I_a$ )을 환산하여 최대값을 화면에 표시하도록 되어있으며,  $I_a$  값은 식(2)에 의해 산정된다.

$$\text{Impact 값 } (I_a) = \frac{\text{가속도 (gal)}}{2.78 \times 980 \text{ (gal)}} \quad (2)$$

### 2.3 동평판재하시험기(LFWD)

LFWD는 원위치 시험장치인 평판재하시험의 대안으로 FWD를 독일에서 휴대용으로 개발한 것이다. 현재 시판중인 LFWD는 여러 종류가 있으며, 각 시험기 종류에 따라 디자인과 작동모드가 다양하나 작동원리는 매우 비슷하다. 일반적으로 LFWD는 재하장치와, 재하판, 그리고 중앙부의 처짐을 측정하는 지오폰 센서로 구성되어 있다.

LFWD 장비는 여러 나라 제품이 있는데 이 연구에서는 독일에서 제작한 “Light Drop Weight Tester ZFG2000”을 사용하였다(그림 3). 동적 재하를 위한 추는 10kg이며 펄스의 폭은 18ms이다. 재하판의 직경은 300mm이며 재하로 인한 처짐은 0.2~30mm까지 측정할 수 있다. 재하판 중앙에서 측정된 변위량을 내장된 PC 소프트웨어를 이용하여 식(3)에 의해 LFWD 탄성계수( $E_{LFWD}$ )로 계산된다.

$$E_{LFWD} = \frac{2(1-\nu^2)\sigma \times R}{\delta_c} \quad (3)$$

$\sigma$ : 작용한 응력,  $R$ : 재하판의 반경

### 2.4 동적콘관입시험기(DCP)

DCP(Dynamic Cone Penetration)는 남아프리카에서 포장부의 현장 평가를 위해 개발되었다(그림 4)[3]. DCP는 시험방법이 매우 간결하고 경제적이다. 또한 최소한의 유지가 필요하고, 현장에서 이용하기가 쉽고, CBR시험처럼 포장부를 파지 않고도 포장부와 노반부의 현장 강도/강성 값의 연속적인 측정을 할 수 있다는 장점이 있다[4]. DCP의 제원은 상부는 575mm 높이에서 8kg의 추를 떨어뜨릴 수 있도록 되어 있고, 하부는 끝부분이 60°이며, 직경이 20mm인 교체 가능한 콘으로 구성되어있다. 시험은 575mm 높이에서 추를 떨어뜨려 매회 타격시 관입 깊이를 측정한다. 관입속도(PR)는 1회 타격시 관입 깊이이며, 타격당 관입 깊이를  $x$ 축, 지반 깊이를  $y$ 축에 적용시켜 그래프로 나타내어 관입량을 연속적으로 표현한다.

DCP는 깊이에 따른 다짐 수준과 균일성 모두를 확인할 수 있어 포장공사의 품질 조절을 위한 훌륭한 장비임을 확인된 바 있으며 시험 층의 두께 결정에도 사용할 수 있는 장점이 있다[4]. 최근 10년 동안 미국에서는 DCP시험 결과와 CBR, 입상토의 전단강도, 최근에는 노상의 회복탄성계수(MR), 탄성계수( $E_s$ ) 그리고 흙의 분류와 같은 공학적 특성치와의 상관관계에 대해 많은 연구가 진행된 바 있다. 이 연구에서는 Konard and Lachance(2000)가 제

안한 DCP-PR과  $E_{PLT}$ 의 관계식인 식 (4)를 이용하였다 [5].

$$\text{Log}(E_{PLT}) = (-0.88405)\text{Log}(PR) + 2.90625 \quad (4)$$

$E_{PLT}$  : PLT 탄성계수(MPa)

$PR$  : 평균 DCP-PR(mm/blow)

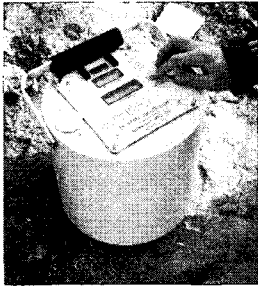


그림 1. Geogauge

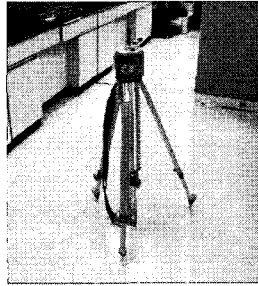


그림 2. CASFOL

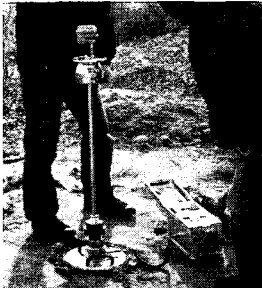


그림 3. LFWD



그림 4. DCP

### 3.2 시험방법

시험부지에 그림 5와 같이 1.5×8×1(폭×길이×깊이, m)의 구덩이를 굴착하여 흙을 채워 다진 후 시험을 수행하였으며, 그림 6과 같이 모형시험을 위한 구덩이에 Sample A, B를 20cm 두께로 다져 2층으로 구성하였고, 각각의 층을 55Hz 진동의 핸드롤러를 이용하여 총8회 다짐하였다. 다짐도 측정은 그림 7과 같이 4개의 구역으로 나눠 2회 다짐마다 각각 시험을 수행하였다. 시험은 지반의 교란을 최소화하기 위하여 geogauge - CASPFOL - LFWD - DCP - 들밀도시험 순으로 수행하였다. 들밀도 시험은 기존 다짐도 평가시 널리 사용하는 방법으로 새로운 다짐평가기기의 결과와 비교하기 위하여 함께 수행하였다.



그림 5. 핸드롤러를 이용한 모형지반 다짐

### 3. 현장모형시험

#### 3.1 시험부지 및 재료

시험은 경기도 OO대교 현장 부지에서 수행하였고 사용된 흙은 현장에서 구덩이를 굴착하여 얻은 Sample A와 인근 공사장에서 채취한 Sample B(화강풍화토)를 이용하였다. 표 1에 Sample A, B의 기본 물성치를 표기하였다.

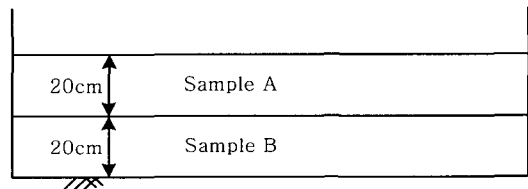


그림 6. 모형시험 측면도

표 1. 시험에 사용된 흙의 기본 물성치

흙 종류	비중, $G_s$	아터버그 한계		OMC (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	통과증량백분율			USCS
		LL(%)	PI(%)			No. 10	No. 40	No.200	
Sample A	2.67	NP	NP	10.7	18.9	71.0	41.4	7.0	SP-SM
Sample B	2.70	NP	NP	10.9	20.2	60.8	26.4	1.9	SW

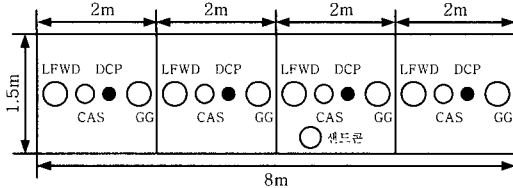


그림 7. 구역별 시험의 위치

### 4. 시험결과 및 분석

#### 4.1 상대다짐도와 시험결과의 상관관계

들밀도시험으로 얻어진 건조단위중량을 실내다짐시험으로 얻은 최대건조단위중량( $\gamma_{dmax}$ ) 백분율로 나타낸 상대다짐도와 각 다짐평가장비 결과를 비교하여 layer 1(Sample A)결과를 표 2와 그림 8에 나타내었고, layer 2(Sample B) 결과를 표 3과 그림 9에 나타내었다. DCP의 경우 결과의 원활한 비교를 위하여 식 (4)를 이용하여 DCP-PR을  $E_{PLT}$ 로 변환하여 사용하였다. layer 1의 결과(그림 8)에서 상대다짐도의 증가에 따라 모든 시험장비의 결과도 증가하는 것으로 나타났다. layer 2의 결과(그림 9)에서는 상대다짐도의 변화에 따른 시험결과에 특정한 경향이 보이지 않고 있다. 이러한 원인은 layer 2의 경우 최적함수비(10.9%)보다 큰 함수비(15.4~16.7%)에서 다짐이 실시되었고, 다짐횟수가 증가하여 상대다짐도가 증가할수록 지반의 수분이 지표면으로 방출되어 지표가 더욱 연약해 지는 현상이 시험 중 발생하였는데 LFWWD,

CASPFOL, geogauge와 같이 지표면에서 결과를 측정하는 시험장비가 함수비의 영향을 크게 받았기 때문인 것으로 판단된다.

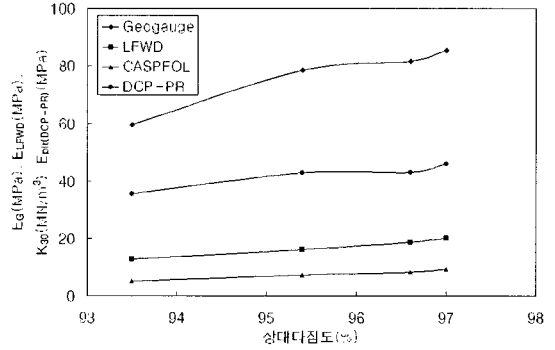


그림 8. 상대다짐도-시험결과 관계(Layer 1)

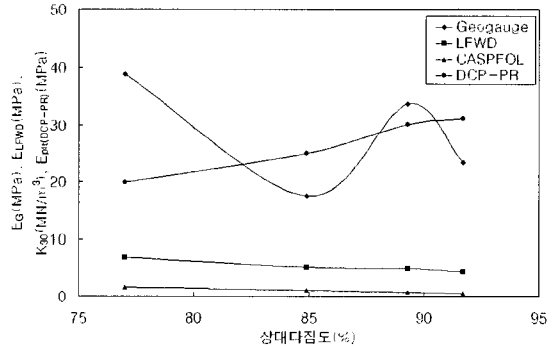


그림 9. 상대다짐도-시험결과 관계(Layer 2)

표 2. 상대다짐도-시험결과(Layer 1)

다짐횟수	시험구역 : 구역 2					
	Layer 1(sample A, 20cm)					
	상대다짐도 (%)	함수비 (%)	$E_G$ (MPa) geogauge	$E_{LFWDD}$ (MPa) LFWDD	$K_{30}$ (MN/m <sup>3</sup> ) CASPFOL	$E_{PLT}^*$ (MPa) DCP
2	93.5	11.5	59.67	12.85	5.18	35.52
4	95.4	11.8	78.63	16.25	7.3	42.94
6	96.6	12.0	81.77	18.75	8.48	43.13
8	97	11.6	85.43	20.15	9.46	46.20

표 3. 상대다짐도-시험결과(Layer 2)

다짐횟수	시험구역 : 구역 2					
	Layer 2(sample B, 40cm)					
	상대다짐도 (%)	함수비 (%)	$E_G$ (MPa) geogauge	$E_{LFWDD}$ (MPa) LFWDD	$K_{30}$ (MN/m <sup>3</sup> ) CASPFOL	$E_{PLT}^*$ (MPa) DCP
2	77	16.7	38.85	6.86	2.06	19.94
4	84.9	16.2	17.51	5.10	0.82	24.93
6	89.3	15.4	33.72	4.85	1.32	30.10
8	91.7	16.2	23.32	4.30	0.08	31.18

### 4.2 시험장비 결과간 상관관계

Layer 1과 2에서 측정된 여러 시험장비(geogauge, LFWD, CASPFOL, DCP)로 얻어진 시험결과들의 상관관계를 파악하기 위하여 회귀분석을 수행하여 그 결과를 그림 10~15에 나타내었다. 그림 13~15에서 보는 바와 같이 DCP와 다른 연속다짐평가 장비들 사이의 상관관계는 다른 평가장비들 간 상관관계에 비해 다소 작은 것(결정계수( $R^2$ ) = 66~76%)으로 나타난 반면, 다른 평가장비 간 상관관계는 그림 10~12에서 보는 바와 같이 대부분 높은 상관성(결정계수( $R^2$ ) = 86~95%)을 보이는 것으로 나타났다. 특히, LFWD로 산정된 동적탄성계수( $E_{LFWD}$ )와 CASPFOL 지반반력계수( $K_{30}$ ) 사이에는 95%의 매우 높은 상관성을 나타내었다(그림 12). 이러한 결과가 나타난 이유는 LFWD와 CASPFOL 두 장비 모두 동적충격하중을 지반에 작용시켜 계수(modulus)를 산정하는 장비의 측정 매커니즘에 의한 결과인 것으로 판단된다. 반면, DCP의 경우 다른 장비들의 측정 매커니즘과 달리 지층 내부에도 타격을 가하여 지층전체에 대한 계수를 직접적으로 산정하므로 다른 장비들과 상관성이 다소 작게 산정된 것으로 판단된다.

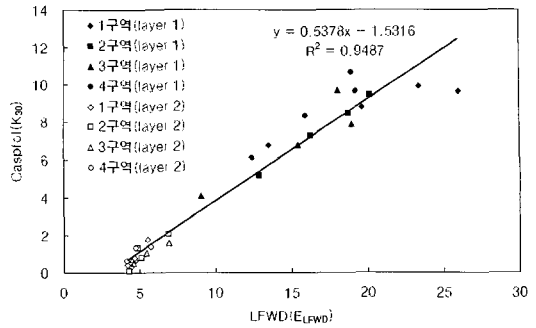


그림 12. CASPFOL-LFWD 상관관계

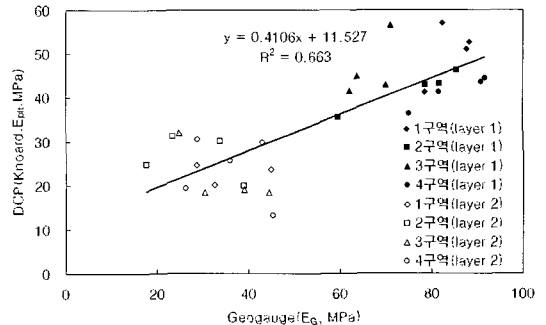


그림 13. DCP-geogauge 상관관계

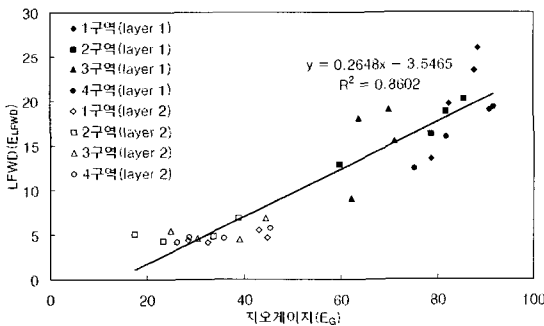


그림 10. geogauge-LFWD 상관관계

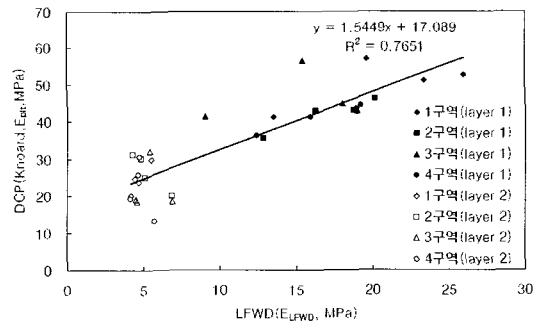


그림 14. DCP-LFWD 상관관계

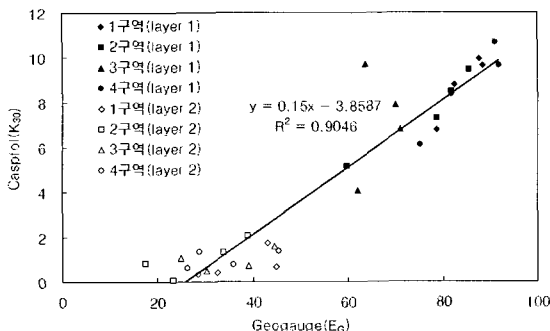


그림 11. geogauge-CASPFOL 상관관계

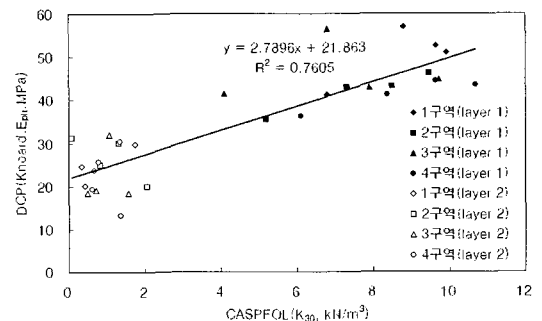


그림 15. DCP-CASPFOL 상관관계

## 5. 결론

모형시험을 통하여 진동핸드롤러 다짐횟수에 따른 여러 시험장비(geogauge, CASPFOL, LFWD, DCP)를 이용한 결과와 지반의 상대다짐도 변화를 비교 분석하였고 시험장비간 회기분석을 통하여 상호관계를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상대다짐도의 증가에 따른 geogauge 탄성계수( $E_G$ ), LFWD 탄성계수( $E_{LFWD}$ ), CASPFOL 지반반력계수( $K_{30}$ ), DCP(DCP-PR,  $E_{PLT}$ )의 결과는 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) geogauge, CASPFOL, LFWD은 상대다짐도뿐만 아니라 지반의 함수비에 민감한 것으로 나타나 이들 장비의 사용시 지반 함수비에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다.
- 3) geogauge, CASPFOL, LFWD, DCP의 상호관계는 70~95%로 높은 것으로 나타났으며, 특히 LFWD에서 산정된 동적탄성계수( $E_{LFWD}$ )와 CASPFOL의 지반반력계수( $K_{30}$ ) 사이에는 95%의 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구에 나타난 시험결과들은 극히 제한된 지반 조건에 대한 결과로 추후 다양한 지반 조건에 대한 추가적인 연구를 통해 이들 장비에 대한 신뢰성 있는 평가가 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Fiedler, S. et al. "Soil Stiffness Gauge for Soil Compaction Control.", Public Road Magazine, Vol. 61, No. 5, pp.5~11, April 1998
- [2] Lenke, L. R. et al, "Laboratory Evaluation of Geogauge for Compaction Control.", National Research Council, Washington, D.C, PP. 20~30, 2003
- [3] Kleyn, E. G., "The Use of the Dynamic Cone Penetrometer(DCP)", Report 2/74. Transvaal Roads Department, Pretoria, 1975
- [4] Konard, J-M., and Lachance, D. "Mechanical Properties of Unbound Aggregates from DCP and Plate Load Test." Proceedings of the Fifth International Conference on Unbound Aggregate in Roads, Nottingham, United Kingdom, 2000.
- [5] Chen, D. H. et al., "Application of the DCP in Evaluation of Base and Subgrade Layers", 80th Annual Meeting of Transportation Research Board,

Washington, D.C, 2001

### 백 인 철(In-Chul Back)

[정회원]

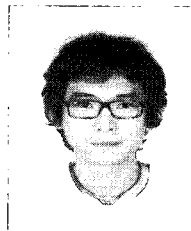


<관심분야>  
토질역학, 기초공학

- 2006년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

### 유 완 규(Wan-Kyu Yoo)

[정회원]



<관심분야>  
토질역학, 기초공학

- 2004년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 박사과정

### 김 병 일(Byoung-Il Kim)

[정회원]

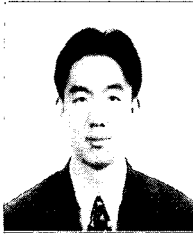


<관심분야>  
토질역학, 기초공학

- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

김 주 형(Ju-Hyong Kim)

[정회원]



- 1995년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원

<관심분야>

토질역학, 기초공학