

## 버지니아의 시험도로(Smart Road)에 대한 고찰

윤 경 구\* · 김 동 호\*\* · 김 도 완\*\*\*

### 1. 시험도로 개요

버지니아의 시험도로(Smart Road)는 포장공용성 모델의 개발, 역학적 포장설계법 개발 및 검증, ITS(Intelligent Transportation Systems) 개발 및 적용 등을 위해 기상실험장비를 갖추고 실동 차량하중에서 연구가 가능한 미국의 종합적이고 유일한 시험도로이다 (AI-Qadi, 2000)

스마트로드는 남서 버지니아 I-81 고속도로와 블랙스버그(Blacksburg) 사이의 고속도로를 연결하는 9.6km의 시험도로로 건설되고 있으며, 1단계의 포장에 관련 된 연구를 위해 3.2km의 시험도로가 완공되어 연구 중에 있으며, 단계적으로 9.6km의 전 시험도로를 건설할 예정이다.

스마트로드의 포장에 관련된 여러 실험장비는 포장재료의 특성과 공용성에 대한 연구를 가능하게 하였으며, 기상 실험설비는 모든 환경적인 변화에 대한 포장체의 거동 및 내구성능에 대한 연구를 가능하게 하였다. 스마트로드의 기상실험장비는 자연현상에서 발생할 수 있는 강우와 강설의 조건을 만들기 위해 76개의 스노우 타워(snow

tower)를 사용함으로써 현장 기후의 시뮬레이션이 가능토록 한 유일한 장비로써, 이 타워들은 시간당 100mm의 눈보라와 강설, 50mm까지의 강우량을 만들어내며, 360도 회전이 가능하고, 바람의 상태를 조정하기 위해 도로를 따라 설치되어 있다.

시험도로의 포장은 아스팔트포장 구간과 연속 철근콘크리트포장 구간으로 구성되어 있으나, 주요 연구는 연성포장에 치중되어 있다. 아스팔트포장 구간은 12개의 단면(cell)으로 구성되어 있으며, 각각의 단면은 약 100m의 길이를 가지고 있다. 모든 12개의 단면은 포장체에 매설된 센서를 통해서 면밀히 모니터링 되고 있으며, 그 결과는 광섬유망을 통해 중앙제어실로 직접 전송되고 있다.

포장계측은 차량하중과 환경하중의 변화에 대한 포장체의 공용성 변화를 측정하기 위해 진행되고 있다. 이때, 현장측정인자는 변형률, 토압, 처짐, 습도, 온도, 동결심도 등이며, 측정결과는 포장체의 정확한 공용성 모델의 개발과 포장설계

\* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 조교수 kkyun@kangwon.ac.kr

\*\* 강원대학교 토목공학과 박사과정 dhkim@mirae.kangwon.ac.kr

\*\*\* 강원대학교 토목공학과 석사과정 kdw0828@hanmail.net

\*\*\*\* 영동전문대 토목과 전임강사 composites@mail.yeongdong.ac.kr



법 개발 및 검증 등에 이용된다.

포장계측 데이터를 중앙제어실로 전송하기 위해서 통신용 광케이블은 맨홀을 가진 지하암거에 설치함으로써 차량이 고속력으로 안전하게 주행할 수 있도록 하였으며, 이러한 통신네트워크는 지하파이프, 전원, PVC 파이프 등으로 구성되었다. 맨홀과 병커는 도로의 양옆에 위치하며 각 병커는 파이프를 통해 전원을 공급받고 포장계측센서와 연결된 데이터 수집시스템이 있다. 각 병커에는 낙뢰에 의해 계측시스템이 파손되는 것을 방지하기 위해 낙뢰방지시스템을 도입하였다. 광섬유 네트워크는 현장의 데이터 수집시스템에서 수집된 디지털 데이터를 중앙 제어실로 전송하기 위해서 사용된다.

각 단면의 계측센서 매설은 계측기와 데이터 수집장치의 연결길이를 짧게 하여 오차발생을 최소화하기 위해서 두 개의 단면배치는 반대로 하

여 인접하게 하였다. 따라서 두 개 단면의 센서들의 와이어가 하나의 병커에 연결되어, 12개의 연성포장단면에 총 6개의 데이터 수집병커가 설치되었다. 그림 1은 스마트로드의 개념도를 나타낸 것이다.

## 2. 포장 설계

스마트로드의 주요 연구과제 중 하나는 실제 차량하중과 환경하중 조건에서 중·장기 포장의 공용성을 고찰하기 위해서 포장시스템의 반응(response)을 계측하는 것이다. 포장시스템은 6종류의 재료를 이용하였는데, 표층, HMA 중간층, 개립도 배수층, 시멘트 안정처리층, 골재층, 인조 섬유층 등이다. 이러한 재료들을 이용해 12개의 포장단면을 효율적이고 체계적으로 건설하였다. 표 1은 각 단면별 포장위치 및 단면구성을 나타낸 것이다.

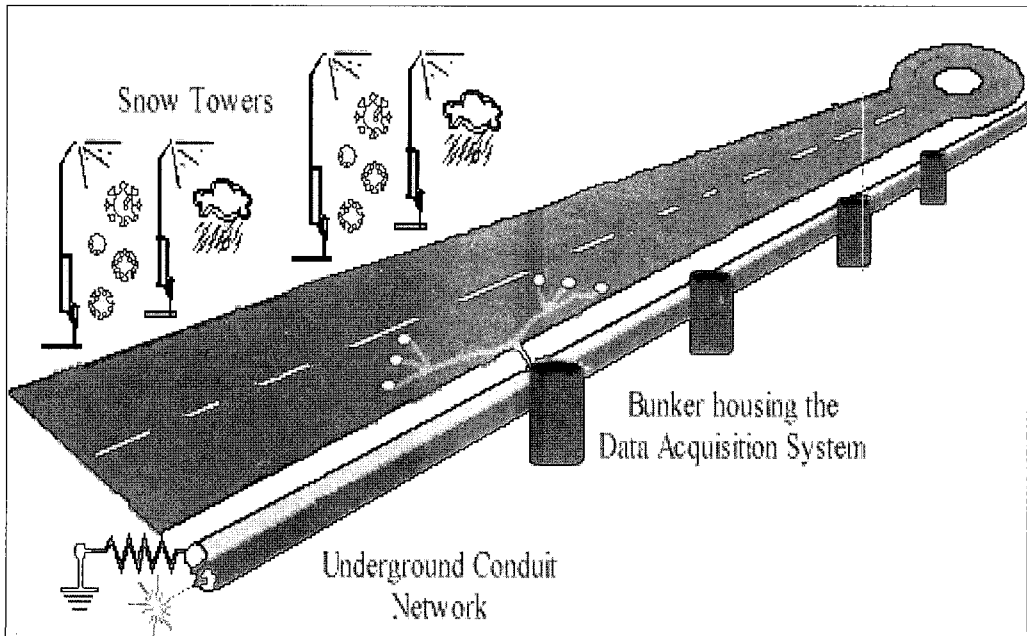


그림 1. 스마트 로드 의 개념도



표 1. 포장설계 단면

Section	Station Start	Station End	Bunker Station	Lane Length(m)	Surface 38mm	BM-25.0 (mm)	SM-9.5A	OGDL (mm)	21A (mm)	21B (mm)	Total (mm)	Fill/Cut
A	102.67	103.71	103.71	104	SM-12.5D	150	0	75	150	175	588	Fill
B	103.71	104.61	103.71	90	SM-9.5D	150	0	75	150	175/GT	588	Fill
C	104.61	105.48	105.48	87	SM-9.5E	150	0	75	150	175/GT	588	Fill
D	105.48	106.65	105.48	117	SM-9.5A	150	0	75	150	175/GT	588	Fill
Bridge	106.65	107.70										Fill
E	107.70	108.46	108.46	76	SM-9.5D	225	0	0	150	75/GT	488	Fill
F	108.46	109.40	108.46	94	SM-9.5D	150	0	0	150	150	488	Fill
G	109.40	110.20	110.30	90	SM-9.5D	100	50	0	150	150/GT	488	Fill
H	110.30	111.20	110.30	90	SM-9.5D	100	50	75	150	75	488	Cut/Snow
I	111.20	112.18	112.18	98	SM-9.5A*	100/RM	50	75	150	75	488	Cut/Snow
J	112.18	113.10	112.18	92	SM-9.5D	225	0	75/MB	0	150	488	Cut/Snow
K	113.10	113.96	113.96	86	OGFL+ SM-9.5D	225/SR	0	75 (Cement)	0	150	488	Cut/Snow
L	113.96	115.00	113.96	104	SMA-12.5	150/RM	0	75 (Cement)	150	75	488	Cut/Snow
CRCP	115.00	118.00						Asphalt				Cut/Snow
CRCP	118.00	121.85						Cement				Cut/Snow
Bridge	121.85	122.85										

※ Wearing surface : SM-9.5A, SM-9.5A\*, SM-9.5D, SM-9.5E, SM-12.5D, SMA-12.5, OGFC (open-graded friction course) 7가지 형태 이용

HMA층(hot-mix-asphalt) : BM-25타입 이용

OGDL(Open Graded Drainage Layer) : 12구간중 3개구간은 OGDL없이 건설하고 7개구간은 아스팔트, 2개구간은 포틀랜드 시멘트

Cement Stabilized Subbase : 10개 구간 - A21A 시멘트 안정 층은 15cm의 두께로 설치

Aggregate Subbase : A21B 골재보조기층- 12개 구간에 다른 두께로 설치

Geosynthetics : 5개구간-노반경계보조기층에 사용, galvanized mesh는 I 와 L단면

Geocompsite 막조직은 압력 흡수작용과 습도를 막는 용도 J와 K 단면에서 사용.

### 3. 계측센서 및 계측시스템

#### 3.1 계측센서 개요

##### 3.1.1 아스팔트 포장용 게이지 (Hot Mix Asphalt Strain Gage)

미국의 시험도로에서 현재 널리 사용되는 변형률센서는 H형태의 게이지로서 Penn State Test Track, Mn/Road, WesTrack, Ohio SPS, FHWA-

PTF, 중국의 RIOH-ALF, 러시아의 PRF-LA, 덴마크의 DRTM, 텍사스의 TxMLS 등에서 사용되어 왔으며, 생존률 및 설치 용이성 등이 높음으로 파악되고 있다. 주요 제조회사는 Dynatest, Tokyo Sokki, 그리고 Kyowa 등이며, 스마트로드에 사용된 게이지는 Dynatest Past-2AC이다. 이 게이지는 MnRoad와 오하이오주에서도 사용된 바 있으며, 정확도, 내수성, 민감도, 생존율 등이 큰 것으로 보고되고 있다(Baker, 1994).



### 3.1.2 쇠석골재 기층용 게이지 (Aggregate Dynamic Strain Gage)

기층/보조기층 경계면 또는 보조기층/노상 경계면에서 변형률을 측정하기 위해 스마트로드에서는 Geokon model 3900을 선택하였으며, 이 변형률 게이지는 Geokon VCE-4200(큰 플랜지 직경을 갖는)과 같은 형상이며 동적측정을 위해 직접 매립하도록 개발되었다. 이 게이지는 195mm 길이와 26mm 직경, 사용된 최대골재크기(25mm)보다 큰 38mm의 플랜지 직경의 형상을 가지고 있다.

### 3.1.3 진동현 변형률 게이지 (Vibrating Wire Static Gage)

지반의 수평변형은 Carlson J-1 and Geokon-VCE-4200 진동현 변형률 게이지를 사용하여 측정한다. 진동현 변형률 게이지는 온도나 습도의 영향에 의해서 야기되는 콘크리트 슬래브에 양생과 뒤틀림(warping)을 평가하는데 사용되었고, 정적변형을 측정하는 데도 사용할 수 있다. 이런 형식의 변형률 게이지는 뛰어난 생존성과 내구성을 지니고 있는 것으로 평가된다. 스마트로드에서는 Geokon-VCE-4200 진동현 변형률게이지를 선택하였으며, 길이는 152mm이며 400~1000Hz의 범위를 측정할 수 있다.

### 3.1.4 토압계 (Pressure Cell)

스마트로드에서 토압계는 Carlson, Kulite, Geokon 등의 제품을 평가하여 압력을 받는 부위의 크기, 측정범위 및 HMA 온도에서 견딜 수 있는 능력들을 고려하여 이 과업에서는 RST-TP-6-S 와 TP-9-S 제품을 선정하였다. 토압계의 평가는 Instron servo-hydraulic 기계를 사용하여 버지니아 공과대학에서 실험하였다. 두 개의 원형 스테인리스 강관을 서로 용접하여 원관 사이의 공간을 비압축성 유체로 가득 채웠으며 6mm trub는 hydraulic transducer와 셸을 연결하였다.

HMA에 매설하기 위해 와이어는 200° C를 견딜 수 있는 것을 사용하고 토압계는 HMA 온도에서 견딜 수 있게 175° C에서 시험하였다.

### 3.1.5 습도계 (Time Domain Reflectometry Probe)

TDR방식은 흙의 함수량 측정에 매우 적절한 것으로 알려져 있으며, 스마트로드에서는 과업의 적용성, 사용성, 수명 및 경제성에 기초로 하여 여러 TDR을 평가한 후 Campbell Scientific에서 제조된 CS615와 CS610 습도계를 선정하였다. CS610은 300mm 길이인 세 개의 평행한 conducting rod를 포함하고 있으며, 로드를 지지하고 있는 CS615에 에폭시 헤드는 bistable multivibrator로 형성된 전기적 구성요소를 포함하고 있다. multivibrator의 진동횟수는 conductingrod에 둘러싸인 재료의 유전량에 의존하며 multivibrator로부터 웨이브는  $1.6 \sim 0.7 \times 10^{-3}$ 의 범위에 있다. CS610은 데이터 수집을 위해 Tektronix 1502 B가 요구되는 반면에 CSC615는 이 프로젝트에 이용되는 데이터 수집장치에 직접적으로 연결될 수 있다. 따라서, CS615가 스마트로드의 주 센서로 사용되었으며, CS 610은 두 TDR 탐침의 성능을 비교하여 선정하였다.

### 3.1.6 동결심도계 (Resistivity Probe)

동결심도계는 지반의 동결깊이를 측정하기 위해 원형탐침을 따라 설치된 컨택터 사이의 전기적 저항을 측정하여 결정된다. 이것은 동결된 흙과 동결되지 않은 흙의 체적저항 차이에 기초하여 결정한다. 동결심도는 저항탐침 아래 인접한 한 개의 전극봉과 높은 값에서 낮은 값으로 진행하는 저항깊이를 기록하는 것 사이에 연속적인 저항을 측정하여 결정된다. 저항 게이지는 25mm PVC봉으로 만들어져 있으며 대표적인 저항값을 얻기 위해 게이지 속의 텅빈 구리링은 전표면적에 걸쳐 흙의 분자와 실제 전기적 접촉이 있어야



한다.

### 3.1.7 온도계 (Thermocouple)

포장체 내부의 온도를 측정하기 위하여 사용된 Thermocouple은 버지니아 공과대학에서는 아주 우수한 것으로 나타났다. 사용수명과 현장설치, 그리고 경제성을 고려하여 T-type Thermocouple 이 스마트로드에 사용되었다. 최대 작동 범위는 230° C이다.

### 3.1.8 표고 측정계 (Liquid Level Gage)

표고측정계는 소성변형의 깊이를 측정하기 위해서 개발되었으며, 원리는 압력의 차를 이용하여 측정한다. 게이지는 12mm의 지름과 42mm의 길이를 가진 압력측정기로 구성되어 있다.

## 3.2 계측센서 매설현황

스마트도로에 사용된 계측센서들은 HMA 변형률게이지, 쇠석골재용 변형률 게이지, 진동현 변형률 게이지, 토압계, 온도계, 습도계, 동결심도계, 표고측정계 등이며, 표 2는 스마트로드에서 이용된 센서들을 정리한 것이다. 또한, 표 3은 단면별 계측센서 매설현황을 나타낸다. 표 3에서 보는

바와 같이 스마트로드에서는 총 500여개의 계측 센서만을 매설하여 최적의 수량으로 최대의 효율성을 확보하려 하였다.

표 2. 스마트 로드의 계측센서

센서 종류		센서 명
변형률계	아스팔트 포장	· Dynatest Past-Π-AC · Kyowa strain gage
	콘크리트 포장	· Geokon VCE-4200
	골재 층	· Geokon model 3900 (Aggregate)
토 압 계		· RST-TP-6-S · RST-TP-9-S
온 도 계		· T-type Thermocouple
습 도 계		· Cambell Scientific TDR CS615, CS610
동결심도계		· Resistivity Probes

## 3.3 계측시스템

데이터 수집장치(Data Acquisition System)는 정적측정과 동적측정으로 구분하여 포장층의 온도, 습도, 동결 깊이 등의 환경적인 영향을 고려하는 정적측정에는 DaqBook 200 module를 사용하였고, 교통하중에 의한 동적측정을 위해서는 WaveBook 512를 사용하였다. 사진 1, 2는 정적

표 3. 단면별 계측센서 매설 현황

Section	Dynatest Gage	Kyowa Gage	Agg. Gage	Vibrating Wire	Pressure Cell	TDR CS615	TDR CS610	Thermo Couple	Liquid Level	Resistivity Probe	Total
A	11	3	6	6	12	4	2	17	1	1	63
B	21	0	3	0	12	10	5	6	1	1	59
C	3	2	0	0	6	0	0	6	1	0	18
D	3	0	3	0	6	2	0	6	1	0	21
E	3	0	0	0	3	4	2	8	0	1	21
F	3	0	3	0	6	4	2	8	0	1	27
G	9	0	3	3	12	4	5	14	1	0	51
H	9	0	0	0	9	4	2	8	1	0	33
I	17	0	6	3	15	4	4	14	2	1	66
J	6	0	3	0	9	4	3	10	1	1	37
K	12	0	6	3	12	4	3	6	2	1	49
L	7	6	3	3	15	4	3	12	2	1	56

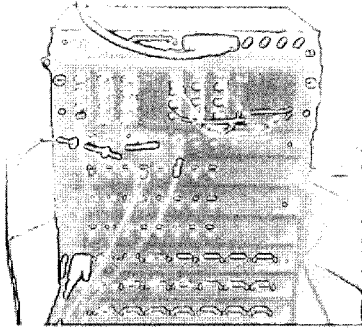
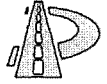


사진 1. DaqBook 200

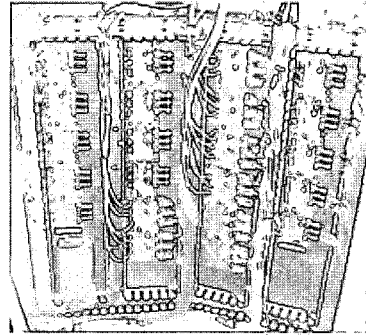


사진 2. WaveBook 512

및 동적측정 시스템을 나타낸 것이다.

#### 4. 계측센서매설

계측센서의 매설에 있어서 가장 중요한 것은 매설 후 센서의 생존을 확보에 있다. 타 시험도로에서는 게이지를 보호·지지하는 체어 또는 보호 박스를 사용하였으나, 스마트로드에서는 이러한 보조 기구들을 사용하지 않고 센서를 직접 각 층별로 설치한 것이 큰 특징이라 할 수 있다. 센서의 일반적인 설치순서를 요약하면 다음과 같다.

- ① 센서 매설 위치는 정밀 측량을 통해 위치도를 작성한다.
- ② 변형률게이지 및 토압계는 주행차량의 바퀴를 따라 매설하고, 환경센서(습도계, 온도계, 동결심도계)는 센터라인을 따라 매설한다.
- ③ 모든 센서는 와이어가 꼬이는 것을 방지하기 위해 충분한 길이를 갖도록 한다.
- ④ 각층이 완성된 후 센서 매설 위치는 정밀측량자료에 기초하여 정확히 표시한다.
- ⑤ 센서매설을 위해 포장체의 일부를 천공할 경우, 교란을 최소화하도록 센서에 적절한 범위

로 국한하여 천공하며, 필요시 특수 제작된 보조장치를 이용한다.

- ⑥ 센서 매설시 손상을 최소화하기 위해 바닥을 고른 후 센서 아래, 위로 고운 모래를 덮어 보호한다. 위에 덮어서 다짐을 할 경우는 동일 층의 재료를 덮고 조심하여 다진다.
- ⑦ 모든 게이지에 연결된 리드선은 적당한 폭과 깊이로 도랑을 파고 매설한다. 이때 방수용 테이프로 표면처리를 수행한 다음 매설한다. 매설시 고운 모래를 바닥과 윗면에 덮고, 동일 층 재료로 덮어 다진다.
- ⑧ 여러 센서의 와이어는 PVC 관등 보조 장치를 이용하여 노면 옆에 모으고 보호장치를 설치한다.

계측에 의한 데이터 수집은 설치 때부터 측정하여 기록하며, 계측계획은 다른 환경적인 영향을 고려하여 시행하였다. 계측센서를 이용한 계측 이외에도 주기적인 GPR 측정, FWD 시험, 실험실에서의 재료실험과 평가 등을 수행하였다. 사진 3~8은 현장에서 계측센서 설치과정을 나타낸 것이다.

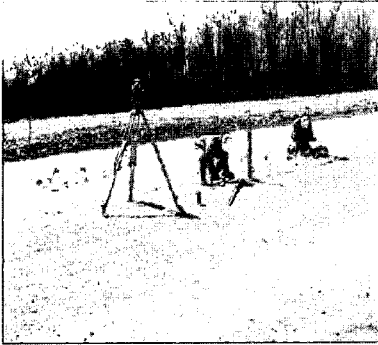


사진 3. 정밀측량



사진 4. 천공작업

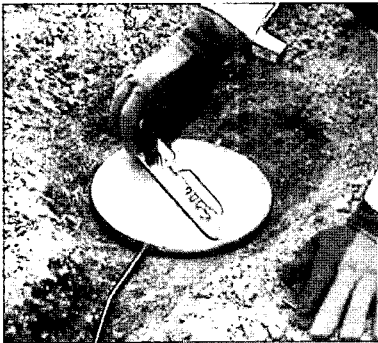


사진 5. 센서수평



사진 6. 와이어 보호처리



사진 7. 와이어 매우기

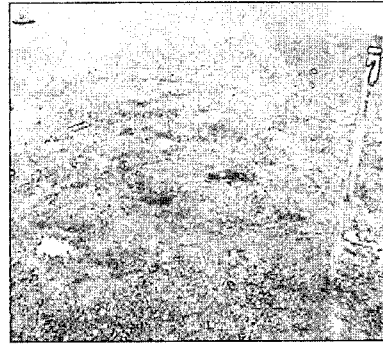


사진 8. 설치완료



## 5. 결 언

버지니아에 건설되고 있는 스마트로드(Smart Road)는 포장연구와 ITS(Intelligent Transportation Systems)을 도입한 Full scale 연구가 가능하도록 종합적 설비를 갖춘 미국의 유일한 시험도로라 할 수 있다. 특히, 강설과 강우를 시뮬레이션 할 수 있도록 설치한 76개의 snow tower로 구성된 기상설비는 시간당 100mm의 눈보라와 강설 50mm까지의 강우량을 만들어 내며, 360° 회전이 가능하도록 하여 기후에 따른 시뮬레이션을 시도한 것은 특이할 만한 사항이라 할 수 있다. 또한, 계측센서는 총 501개를 사용하여 타 시험도로에 비해 최소한의 센서를 사용하여 효율성을 극대화하려 하였으며, 센서매립 후 생존율 확보를 위해 다른 시험도로에서는 게이지를 보호·지지는 채어 또는 보호박스를 사용하였으나, 스마트 로드에서는 센서를 직접 각 층별로 설치한 것도 특징적이라 할 수 있다. 이러한 스마트로드에 대한 고찰 및 분석이 국내에 건설되고 있는 시험도로에 간

접적인 경험과 참고적인 자료로 활용되기를 기대한다.

## 참 고 문 헌

1. Al-Qadi, Imad L. Walid M. Nassar, Amara Loulizi, Gerardo W. Flintsch and Thomas E. Freeman " Flexible Pavement Instrumentation at The Virginia Smart Road" Transportation Research Board 79th Annual Meeting January 9-13 . 2000. Washington, D.C.
2. Baker, Haris B., M. R. Bush and D. A. Deusen, "Load Response Instrumentation Installation and Testing Procedures," Minnesota Road Research Project, Final Report, March 1994.
3. OECD Full-Scale Pavement Test., OECD, Paris, 1991.
4. Sargrand, S., Development of an Instrumentation Plan for The OHIO SPS Test Pavement (DEL-23-17. 48), Report FHWA/OH-94/019, Federal Highway Administration, Washington, D.C., July 1994.
5. Sebaaly, P., Tabatabee, N., Kulakowski, B., Scullion, T., Instrumentation For Flexible Pavements-field Performance of Selected Sensors, Report FHWA-RD-91-094, Federal Highway Administration, Washington, D.C., July 1991.

### 학회지 광고 모집 안내

학회지에 게재할 포장관련 업계의 광고를 모집합니다.

표 2 (앞표지 안쪽면, 칼라)	: 200만원
표 3 (뒷표지 안쪽면, 칼라)	: 200만원
표 4 (뒷표지, 칼라)	: 300만원
간지 (칼라)	: 200만원

위 금액은 4회 게재할 요금임.

연락처 : 학회사무국

☎ 525-7147