

# 화강풍화토와 유기계 고화제를 이용한 흙포장의 사용성에 관한 실험적 연구

## Experimental study on usability of soil pavement using weathered granite soil and organic solidification agent

황성필<sup>1</sup>, 정재형<sup>2\*</sup>, 이용수<sup>3</sup>, 이태형<sup>4</sup>

Sung-Pil Hwang<sup>1</sup>, Jae-Hyeung Jeoung<sup>2\*</sup>, Yong-Soo Lee<sup>3</sup>, Tae-Hyung Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Institute, KICT, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712, Republic of Korea

<sup>2</sup>Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Institute, KICT, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712, Republic of Korea

<sup>3</sup>Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Institute, KICT, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712, Republic of Korea

<sup>4</sup>Deputy General Manager, Tunnel Safety Section, KISTEC, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-758, Republic of Korea

### ABSTRACT

The method to replace asphalt and cement is needed to reduce the carbon emission on road. Polymeric material which is light and easy to handle while having complex function with less carbon emission would be highly effective when it replaced soil pavement containing cement. This study is intended to identify the usability of soil pavement containing organic solidification agent only through the field test. Pavement on bike trail still satisfied required bearing capacity coefficient in 3 months. Pavement after passing 1.6 bil units of bike through pavement acceleration test that simulated a long-term serviceability during a short-time still remained unaffected, demonstrating a long-term serviceability of soil pavement.

### 요 지

도로분야에서 탄소배출을 줄이기 위해서는 아스팔트 및 시멘트를 대체하는 공법이 필요하다. 고분자 재료는 가벼우면서 가공이 쉬워 여러 가지 복합기능을 가지는 재료로, 제조과정에서 탄소배출이 적어 시멘트 등이 사용되는 흙포장을 대체한다면 그 효과가 클 수 있다. 본 연구에서는 유기계 고화제만 적용한 흙포장의 현장시험을 통한 사용성을 파악하였다. 실 규모의 자전거도로로 조성된 포장체는 3개월 노출 후에도 노상의 지지력계수 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 포장 구조체의 장기 공용성을 단기간에 모사하는 포장가속시험으로 16억대의 자전거가 통과한 후 포장체의 상태에는 큰 변화가 없는 것으로 나타나 흙포장으로서 장기 공용성을 만족하는 것으로 평가되었다.

**Keywords** : Organic solidification agent, Soil pavement, Long-term serviceability

## 1. 서 론

도로현황조사(MOLIT, 2015)의 조사결과에 따르면 2014년 국내 도로의 포장률은 91% 이상으로 나타난다. 고속도로, 국도, 자전거도로 및 주차장 등 대부분의 장소가 이용이 편리하도록 포장되어 있고, 대부분 내구성 및

내후성에 대비하기 위해서 아스팔트 및 콘크리트를 이용하고 있다. 그러나 아스팔트 및 콘크리트 포장공법은 재료의 제조, 운반 및 시공과정에서 탄소배출량이 많아 탄소배출량을 감소시키려는 정부 정책과 부합되지 않고 있다. 이러한 문제 해결을 위해서는 제조과정 및 시공과정에서 탄소배출량을 저감시킬 수 있는 콘크리트 및 아스팔트 이외의 재료 개발이 필요하다. 특히, 아스팔트 및 시멘트 콘크리트 포장으로 획일화 되어있는 우리나라의 상황을 개선하기 위해서 자전거도로, 산책로 등 일부 특수한 도로에서

Received 22 Jul. 2015, Revised 20 Oct. 2015, Accepted 26 Oct. 2015

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0378; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: jjhcivil@kict.re.kr (J. Jeoung)

라도 우선 적용 할 수 있는 대체 포장기술의 개발이 시급하다.

흙포장 공법은 원지반의 흙을 포장재료로 이용하여 운반과정에서 발생하는 탄소배출량이 적고, 단순한 시공방법을 사용하기 때문에 장비의 사용이 적어 탄소배출량을 획기적으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 흙포장은 흙, 무기계 고화제, 혼합수, 골재 등을 혼합, 포설 후 전압하여 포장체를 시공하는 방법을 말한다. 무기계 고화제로는 시멘트, 석회, 석고 등이 사용되고 있으며, 사용되는 환경에 따라서 pH를 조절하는 혼화제를 첨가하기도 한다. 고화제 중에서 시멘트는 가격이 저렴하고 성능이 확실하여 가장 많이 사용되고 있지만, 흙포장체에서 6가크롬이 용출되거나(Ju et al., 2003; Jung et al., 2009), 초기 균열발생이 많이 발생되고, 탄소배출량 증가의 원인인 시멘트를 사용하는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 제조공정에서 탄소배출이 적은 유기계 고화제를 흙포장에 적용하여, 무기계 고화제를 사용한 흙포장으로 대체 가능성을 평가하고자 하였다.

우리나라에서 유기계 고화제를 사용한 흙포장에 대한 연구는 다소 부족한 상황으로서, Lee(2009)의 연구에서는 흙과 시멘트의 혼합물에 유기계 고화제인 스티렌-부타디엔 공중합체(일명 라텍스 폴리머)를 첨가하여 일축압축 강도 특성 연구를 수행하였으며, Lee et al.(2010)의 연구에서는 개질 수용성 고분자 첨가에 따른 일축압축강도의 변화를 관찰하였다. Hwang et al.(2014)의 연구에서는 3종의 유기계 고화제를 사용하여, 유기계 고화제 종류에 따른 특성을 파악하고, 양생방법에 대한 강도발현의 차이점에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 흙포장의 특성을 파악하는 연구만 수행되어 유기계 고화제를 현장에 적용하여 실제 도로로서의 사용성에 대한 검증은 이루어지지 못하였다.

실제 도로로서의 사용성을 검증하기 위한 시험방법은 많지만, 차량하중을 직접 포장체 표면 상부에 반복적으로 작용시켜 이때 발생하는 파괴현상을 측정하거나 관찰하여 아스팔트 혼합물의 공용성능을 평가하는 것이 가장 간단한 방법일 것이다. 하지만 이를 위해서는 많은 시간과 공간이 필요하므로 소성변형저항성, 수분민감도, 피로파괴 등과 같은 도로포장의 공용성능을 실내에서 촉진하여 평가하기 위한 포장가속시험(Accelerated Pavement Test, APT)이 널리 사용되고 있다(Epps, 2001).

포장가속시험과 실제 현장에서 측정한 공용성 결과와의 상관관계는 많은 연구를 통해 평가되었다. Lai(1986)와

Miller et al.(1995)은 포장가속시험으로 소성변형저항성을 측정하였고, 현장에서 측정한 소성변형 저항성과 비교하여 유사한 경향을 나타내는 것으로 평가하고 있다. West et al.(1991)은 포장가속시험으로 현장의 소성변형 저항성을 예측한 결과는 실측결과와 유사한 경향을 나타내 포장가속시험이 현장에서 발생하는 소성변형을 평가하고 예측할 수 있다고 보고하였다. 미연방도로국(FHWA)과 버지니아 교통국에서는 West Track의 10개 구간에 포장된 아스팔트 포장의 소성변형을 예측하기 위하여 포장가속시험으로 소성변형을 측정할 결과 West Track에서 측정한 결과와 매우 높은 상관관계가 있는 것으로 평가하고 있다(Williams et al., 1999).

따라서 본 연구에서는 유기계 고화제의 사용성을 평가하기 위해 포장가속시험으로 자전거도로로서의 공용성을 확인하였다. 또한 흙포장의 경우 등 물에 대한 내구성을 파악하기 위해, CBR시험 기준에 준하는 96시간 수침 후 일축압축강도를 평가하여 수침 전 후의 강도변화를 파악하였다. 그리고 흙포장을 실외 환경에 노출시켜 강우에 대한 내구성 및 겨울철 영하의 온도에서 동결에 대한 내구성을 파악하기 위해 자전거 도로 기준에 맞는 포장을 시공하여 실제 환경에 대한 사용성을 평가하였다.

## 2. 시험재료 시험방법

### 2.1 시험재료

본 연구에서 사용된 흙은 통일분류법(KS F 2324)상 SW에 해당되는 경기도 지역에서 채취된 화강풍화토이다. 사용된 화강풍화토의 기본적인 물성은 Table 1, 입도분포곡선은 Fig. 1, 최적함수비를 포함하는 다짐특성은 Fig. 2에 각각 나타내었다.

본 연구에서는 저분자가 여러 개 중합되어 이루어지며,

Table 1. Characteristics of granite soils

Type	Symbol and Unit	Characteristics
Specific Gravity	$G_s$	2.59
Maximum Dry Unit Weight	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.8
Optimum Moisture Contents	OMC (%)	9.0
California Bearing Ratio	CBR	32.0

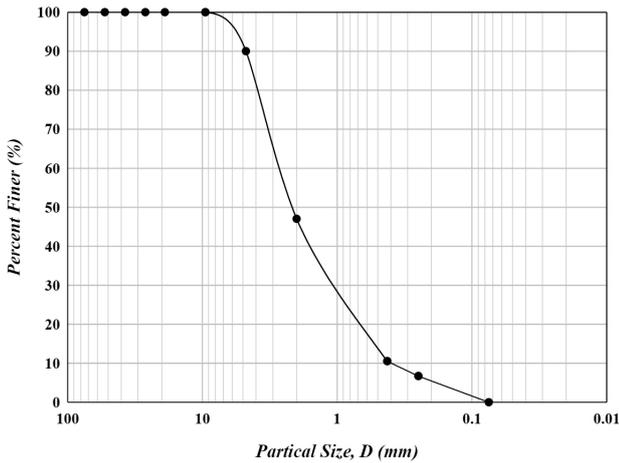


Fig. 1. Particle size distribution of granite soil

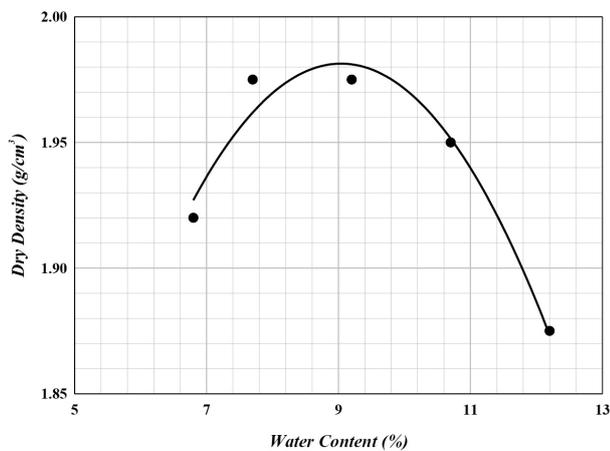


Fig. 2. Compaction test result of granite soil

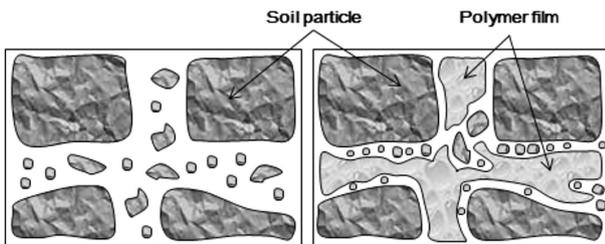


Fig. 3. Constitution of soil pavement

분자량이 5,000~20,000개 정도로 구성되는 유기물 고분자를 고화제로 사용하였다. 고분자 재료는 가벼우면서 복합기능을 추가할 수 있도록 가공이 쉬워 여러 가지 용도로 사용되고 있으며, 지반공학 분야에서는 수분흡수, 접착기능 및 점도조절기능으로 활용되고 있다. Lee et al.(2012)의 연구에 의하면, 흙포장에 사용된 유기계 고화제는 Fig. 3과 같이 흙 입자 사이의 필름막을 형성하고 망상구조로 연결되어, 지반의 압축·인장강도 및 부착성능을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 또한 유기계 고화제는 무기계 고화제

Table 2. Characteristics of binding materials

Type	Polymer1	Polymer2	Polymer3
Color	Ivory White	Ivory White	Ivory White
pH	5	10,5	7
Viscosity (Pa·s)	0,86	0,18	1,0 ~ 3,0
Specific Gravity	1,08	1,017	1,04
Contents of Solid Copolymer	54,5%	47,1%	56 ~ 58 %

와 혼합하여 사용할 수 있으며, 시멘트의 수화반응에 영향을 주지 않는 고화제를 선택하면, 수화반응을 순차적으로 발생시켜 유기, 무기 고화제간의 상생을 유도할 수 있다 (Ju et al., 2002). 이러한 의미에서 유기계 고화제는 흙포장 공법에서 발생하는 탄소 배출량을 획기적으로 줄일 수 있으며, 무기계 고화제의 단점을 보완해 줄 수 있는 주요한 재료로 판단하고 있다.

본 연구에서는 이러한 고분자 재료 중 환경 독성이 적어 흙포장에 적용 가능한 여러 종류의 유기계 고분자를 선별하고, 흙과 혼합시켜 접착성 및 반응성을 확인한 후 3종류를 선정하여 흙포장으로 사용성에 대한 특성을 제시하고자 하였다. 이를 통해 시멘트 등 다른 고화제의 첨가 없이 산책로 및 자전거도로의 가능성을 평가하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 유기계 고화제는 비닐아세테이트/말레인산염 효소 습제 함유 코폴리머(Vinyl Acetate/Maleate Copolymer with enzymatic wetting agent, 이하 폴리머1), 스티렌-부타디엔 공중합체(Styrene-Butadine Copolymer, 이하 폴리머2)와 아크릴계 접착제(Acryl Ester Copolymer, 이하 폴리머3)이며, 각각 다른 기본물질을 사용하고 있으므로 고화원리가 다르지만 흙포장 시공 현장에서 동일한 작업공정으로 진행할 수 있는 액상 형태의 수용성 재료로서 시장에서 구입 가능한 제품들이다. 고화제로 사용된 유기계 고화제의 특성은 각 제조사의 물질안전보건자료(MSDS)에 나타난 내용을 Table 2에 나타내었다.

## 2.2 시험방법

### 2.2.1 흙포장의 수분민감도 현장평가시험

Hwang et al.(2014)의 연구에 의하면, 유기계 고화제의 경우 온도 섭씨 17도~21도, 습도 30%~50%의 실험실 환경에서 공기중 양생 및 온도 섭씨 105도의 건조로 양생을 수행하여 일축압축시험 결과를 비교한 경우 양생방법

Table 3. Mixing ratio

Type	Mixing Ratio		
	Binding Material (g)	Water (g)	Granite Soils (g)
Polymer 1	1.5	7.5	100
Polymer 2			
Polymer 3			

에 의한 차이보다는 함수비와 일축압축강도의 상관성이 더 큰 것으로 보고하였다. 또한 유기계 고화제를 사용한 경우 투수성이 증가하는 것으로 분석되어 현장에서 강우 등 조건에 따라 사용성에 대한 정밀한 평가가 필요한 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 유기계 고화제의 사용성에 대해 평가를 하기 위하여 공시체를 96시간(4일) 수침시킨 후 일축압축 시험으로 일축압축강도를 측정하여 수침 전 일축압축강도와 비교하였고, 실제의 현장상황과 동일한 상태에서 수분의 접촉 및 동결 등의 각종 기상상황에 노출시키는 현장시험을 수행하였다.

유기계 고화제의 강우에 대한 내구성을 파악하기 위하여 건조로에서 24시간 양생된 공시체를 96시간 수침하여 일축압축강도를 측정하였다. 수침 전 일축압축강도와 비교를 위하여 Hwang et al.(2014)의 연구에서 수행되었던 일축압축시험과 동일한 공시체의 준비하였다. 화강풍화토는 건조로에서 사전에 24시간 건조하여 자연함수비의 영향이 없도록 준비하였으며, 유기계 폴리머 고화제는 흡수료 무게의 1.5%를 첨가하고 공시체 제작 시 최적함수비(9%)가 되도록 조절하였다. 공시체는 지름 50mm, 높이 100mm로 제작하였고, 강철 몰드에서 A다짐 에너지로 다짐 후 양생하였다. 시험은 3종의 고화제를 사용한 공시체를 수침 후 일축압축강도 및 함수비를 측정하였으며, 고화제의 혼합비율은 화강풍화토 100g당 고화제와 물의 무게에 대한 비율로 Table 3에 나타내었다.

유기계 고화제의 강우에 대한 내구성을 현장과 동일한 조건에서 파악하기 위하여 현장시험을 약 3개월간 수행하였다. 흙포장을 산책로 및 자전거 도로에 적용하는 경우에는 흙포장체의 강도를 일반 차량의 교통하중 기준으로 정하지 않으며, 보수용 트럭(1ton)의 통행을 상정하여 설계하고 있다. 일본 토목연구소(PWRI, 2009)에서는 0.3MPa ~0.7MPa를 제시하고 있으며, Lee(2012)의 연구에서는 보수용 트럭(1 ton)의 통행을 고려하여 하중지지능력 관점에서 1.55MPa를 제시하고 있다. 자전거 도로로서 요구되는



Fig. 4. Soil pavement using Polymer 3

하중지지능력 관점에서의 강도는 시험에 사용된 3종의 고화제가 모두 만족하여, 경제성이 3종의 고화제 중 가장 우수한 폴리머 3을 현장시험의 재료로 선정하여 현장시험을 진행하였다.

현장시험은 경기도 연천군 연천읍에 위치한 한국건설기술연구원 SOC 실증연구센터 부지에서 자전거 이용시설 설치 및 관리지침(MOLIT, 2015)을 만족하는 폭 1.5m, 길이 8m, 두께 0.2m의 흙포장을 조성하였고, 재료 및 조성방법은 실내시험과 같은 조건이 유지되도록 동일한 재료 및 배합비를 이용하였다. 3.5ton의 다짐롤러를 이용하여 A다짐시험의 다짐에너지인 550 kN·m<sup>3</sup>의 다짐에너지가 적용되도록 하였다. 다짐에너지 적용을 확인하기 위하여 흙포장 후 2곳에 현장다짐도 시험을 수행하였고, 시험결과 건조단위중량은 19.52kN/m<sup>3</sup>, 19.58kN/m<sup>3</sup>으로 화강풍화토의 최대건조단위중량의 98% 수준으로 다짐시공되어 실내시험의 공시체와 동일한 수준의 흙포장이 시공된 것으로 판단된다.

흙포장의 강우 등에 대한 내구성을 평가를 위하여 포장 후 1주간 양생 된 포장면에 평판재하시험을 실시하였고, 강우 등의 조건에 약 3개월 노출 후 2차 평판재하시험을 수행하여 결과를 비교하였다. Fig. 4는 현장시험시공 조성 후 1주의 양생기간동안 보온 유지를 위해 보온재를 설치해 양생중인 상태를 나타내고 있다.

### 2.2.2 흙포장의 포장가속시험

포장가속시험은 포장구조체를 실물크기로 조성하여 실제와 유사한 환경하중 및 교통하중을 단기간에 모사하여 포장구조체의 공용성을 파악하기 위해 수행되는 시험이다. 본 연구에서는 흙포장에 대한 자전거도로로서의 공용성을 파악하기 위하여 경기도 화성시 동탄면 도로교통연

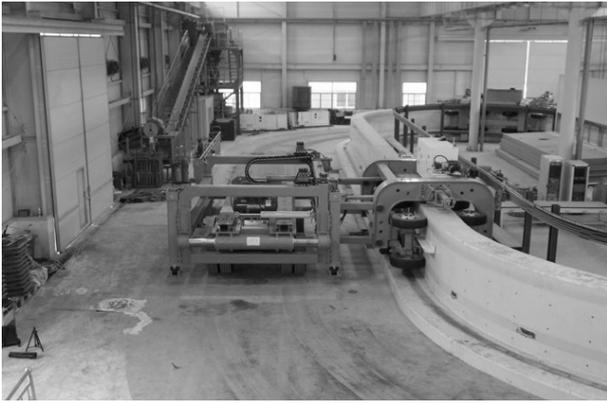


Fig. 5. Accelerated Pavement Tester

Table 4. Features of Accelerated Pavement Tester

Classification	Specification
Test Section	2X[Width:3.5 m, length: 4.0 m, depth:0.2 m]
Load	18 ton
Speed	Average : 20 Km/h
	Maximum : 30 km/h
Environmental Condition	-20 °C ~ + 60 °C

구원의 포장가속시험동에 설치된 포장가속시험기로 시험을 수행하였다. 포장가속시험은 혼합교통의 다양한 영향 인자를 일원화하기 위해 표준화한 기준 축하중인 등가단축하중(ESAL)을 사용하며, AASHTO설계법의 표준단축하중(8.2ton, 18kilo pounds(kips))을 기준으로 하였다.

본 실험에서는 18ton의 포장가속시험기를 사용하여 시험을 진행하였고, 장비의 사진 및 제원은 Fig. 5와 Table 4에 나타내었다. 18ton의 포장가속시험기는 2개의 축으로 되어있어, 1축의 하중은 9.0ton(20kips)이다. 재하된 하중은 Table 5를 이용하여 표준단축하중 1회 재하 시의 1.61배 만큼 재하된 것으로 계산된다. 이를 자전거 도로의 사용기준으로 환산하기 위해 자전거 1회 통행하중을 평균 100kg으로 가정하면, 10대의 자전거를 1개조로, 1조의 통행하중은 1ton(2 kips)으로 나타낼 수 있다. 시험하중인 9.0ton의 축하중 1회를 재하하면, 자전거 1조가 8,000회 재하되는 효과가 흙포장 표면에 가해지는 것으로 볼 수 있다. 본 포장가속시험은 9.0ton의 축하중을 10,000회 반복하여 재하되어, 자전거 1조가 약 1억 6,000만회 통행한 결과로 판단할 수 있다. 이는 자전거 1대 기준으로 16억대의 자전거가 통행한 결과로, 하루 약 4만대의 자전거가 통행하는 것으로 가정하면 약 11년간 사용된 흙포장의 결과를

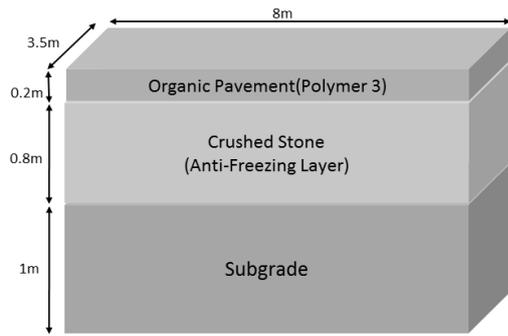
Table 5. Axle load equivalency factors for flexible pavements (AASHTO, 1986)

Axle Load (kips)	Pavement Structural Number (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.030	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2

나타내는 것으로 볼 수 있다. 즉, 보수 등의 작업 없이도 10년 이상 자전거 도로를 활용 하였을 때의 결과를 나타내는 것으로 포장가속시험의 결과로 흙포장의 공용성 평가가 가능한 것으로 판단된다.

포장가속시험을 위해 사용된 유기계 고화제는, 자전거 도로로서의 강도를 만족하면서 경제성이 3종의 시험체 중 가장 우수한 폴리머 3을 현장시험과 동일하게 적용하였다. 포장가속시험은 Table 4의 포장가속시험기 제원에 맞도록 제작된 시험장의 조건을 만족시키기 위하여 폭 3.5m, 길이 8m와 두께 0.2m로 조성하였고, 포장층 하부에 0.8m의 쇄석층과 쇄석층 하부에 1m의 노상을 Fig. 6과 같이 설치하였다. 재료 및 조성방법은 실내시험과 같은 조건이 유지 되도록 동일한 재료를 이용하였다. 다짐의 경우 3.5ton의 다짐롤러를 이용하여 A다짐시험의 다짐에너지인 550 kN·m<sup>3</sup>의 다짐에너지가 적용되도록 하였다.

시공 후 1주일간 양생한 포장체의 구조평가를 위한 비파괴시험 중 가장 널리 사용되는 시험인 비파괴포장표면 처짐시험(Falling Weight Deflectometer, FWD)시험(Fig. 7)을 수행하였다. FWD시험은 일정한 질량의 추를 포장체 표면에 놓인 완충장치가 부착된 원형 재하판에 자유낙하시켜 순간적인 충격하중으로, 포장체의 표면에 유발된 처짐을 측정하는 장비이다(Baek et al., 2001). 측정된 처짐



(a) Sectional view of pavement



(b) Soil pavement

Fig. 6. Features of pavement



(a) Under loading



(b) Measurement of displacement

Fig. 7. FWD test

을 분석하여 포장체의 구조평가를 수행하였고, 포장가속 시험 10,000회 왕복수행 후 FWD시험을 다시 수행하여 시험 전후의 구조평가 변화를 확인하였다.

### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1 흙포장의 수분민감도 평가

##### 3.1.1 수침에 따른 일축압축강도 변화

기존 연구에서 폴리머의 첨가는 압축 및 인장강도, 부착 성능, 지지력 등을 향상 시키는 것으로 보고됐으나, 특정 고화제의 사용만 평가되어 일반화하기에는 부족하였다. Hwang et al.(2014)의 연구에서는 양생조건에 따른 유기계 고화제의 강도 특성을 분석하였고, 특히 본 연구에서 사용된 고화특성이 다른 3가지 유기계 고화제에 대한 특성을 분석하여 나타내었다.

본 연구에서는 유기계 흙포장의 단점으로 알려져 있는 수분에 대한 민감도를 실험실에서 예측하기 위해 24시간 건조로 건조 후 96시간 수침에 따른 일축압축강도 특성을 파악하였고, Hwang et al.(2014)의 결과와 비교하여 Table 6에 나타내었다. 24시간 건조된 공시체를 96시간 수침시켜 일축압축강도를 측정하여 강도변화를 파악한 결과 폴리머 1의 경우 385kPa로 일축압축강도가 감소하여 24시간 양생 일축압축강도의 11%까지 감소하였다. 폴리머 2에서는 24시간 건조된 공시체를 96시간 수침시킨 일축압축강도가 233kPa로 24시간 양생 일축압축강도의 13%로 감소하였고, 폴리머 3은 24시간 건조된 공시체를 96시간 수침시킨 일축압축강도가 272kPa로 24시간 양생 일축압축강도의 13%로 감소하였다.

96시간 수침 후 폴리머 1의 강도가 가장 큰 것으로 나타났지만 24시간 양생 후 최고 강도와 비교하여 강도의 감소

Table 6. Unconfined compressive strength and water content

Type		Drying Time in a Drying Oven		After Water-Logged
		3 Hour	24 Hour	
Polymer 1	Unconfined compressive Strength (kPa)	1170.0	3460.0	385
	Water Content (%)	1.1	0.2	10.9
Polymer 2	Unconfined compressive Strength (kPa)	280.0	1,683.0	233
	Water Content (%)	2.0	0.3	10.5
Polymer 3	Unconfined compressive Strength (kPa)	237.0	2,099.0	272
	Water Content (%)	2.0	0.4	10.6

도 가장 큰 것으로 나타났다. 이것은 폴리머 1이 비닐아세테이트/말레인산염 효소 습제 함유 코폴리머(Vinyl Acetate/Maleate Copolymer with enzymatic wetting agent)를 원료로 하고 있어서 수분이 건조 또는 휘발됨에 따라 직접적으로 고화되는 성질을 가지기 때문으로 3가지 고화제 중 수분에 가장 민감한 것으로 파악된다. 또한 시험 후 측정된 함수비에서 폴리머 1의 함수비가 10.7%가 증가하여 3종의 폴리머 중 가장 크게 증가하였고, 이는 폴리머 1이 수분에 비교적 더 민감한 것으로 판단할 수 있다. 폴리머 2는 스티렌-부타디엔 공중합체(Styrene-Butadiene Copolymer)를 원료로 하고 있어 온도 냉각에 의해 고화되는 성격이 3종의 고화제 중 가장 강하며, 폴리머 3은 아크릴계 고화제(Acryl Ester Copolymer)를 원료로 하여 발열반응을 통해 고화가 더욱 촉진되는 성격이 3종의 고화제 중 가장 강한 것으로 파악된다. 전체적으로 유기계 고화제는 강도 발현의 특성에 다소 차이가 있지만, 함수비에 따라 강도가 변하는 기본적인 특성을 가지는 것으로 파악된다. 이러한 특성은 무기계 고화제인 시멘트 등을 사용하여 양생 시 수중에서 양생하게 되면 강도발현이 좋아지는 현상과는 대비되는 특성을 가지며, 양생 후 수분에 의해 강도변화가 거의 발생하지 않는 무기계 고화제의 특성에도 상반되는 것으로 나타났다.

수분 변화에 따른 유기계 고화제의 변형특성을 파악하기 위해 각 조건에 따른 응력-변형률 그래프를 Fig. 8~ Fig. 10 나타내었다. 일반적으로 시멘트 및 석회 등을 사용하여 고화 처리한 고화토는 일축압축강도가 증가하면 파괴 시 변형률이 줄어드는 경향을 가지고 있다. 하지만 유기계 폴리머 3종에서 일축압축강도가 증가되면서 변형률도 함께 증가하는 경향을 나타내었고, 수침 후 압축강도가 감소하면서 변형률도 함께 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 양생에 의해 압축강도와 인장강도가 동시에 증가한 후 수침에 의해 압축강도와 인장강도가 동시에 감소하는 것으로 판단할 수 있다.

고화제 3종 중 폴리머 1은 강도발현 및 수침에 의한 강도저하가 가장 격렬하게 나타났으며, 비교적 고가이어서 현장시험에서 제외하였다. 폴리머 2는 비교적 강도변화는 적었으나, 변형율이 크게 나타났고 변형율의 변화도 크게 나타나 사용성 측면에서 폴리머 3보다 불리한 것으로 판단되었다. 따라서 실험체의 시험결과를 바탕으로 성능적으로 우수하고, 경제적인 폴리머 3을 현장에 적용하여 사용성에 관한 실험을 수행하였다.

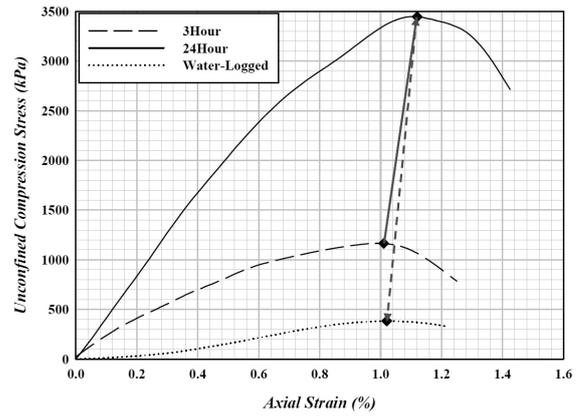


Fig. 8. Stress Variation of Polymer 1

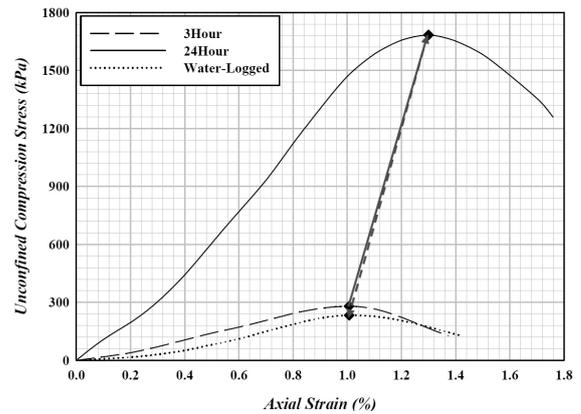


Fig. 9. Stress Variation of Polymer 2

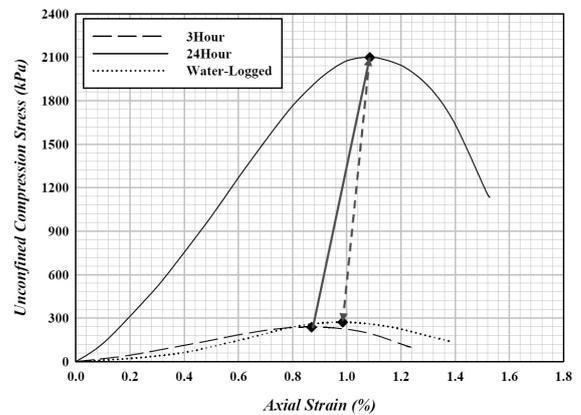


Fig. 10. Stress Variation of Polymer 3

### 3.1.2 강우 조건에 대한 흙포장의 강도 특성

흙 포장이 실제 강우조건에서 수침 후 일축압축강도 변화와 동일한 결과를 나타내는지 확인하기 위해 강우조건에 노출될 수 있도록 현장시험을 수행하였다. 시험기간 중 강수량 등의 조건을 확인하기 위해, 기상청의 데이터를 사용하여 Table 7에 나타내었다. 데이터는 시험장소인 연천

Table 7. Weather information of field test

Type	2014. 12	2015. 1.	2015. 2.
Precipitation day (day)	7	8	8
Maximum rainfall (mm/day)	6.9	6.6	9.5
Highest temperature (°C)	7.0	9.7	10.3
Lowest temperature (°C)	-15.6	-13.0	-14.3

Table 8. Result of Plaste Bearing Test

Rainfall condition	Ultimate load (kN/m <sup>2</sup> )	Settlement (mm)	Allowable bearing capacity (kN/m <sup>2</sup> )
Before	630	1.35	Over 210
After	630	2.03	Over 210

에서 가장 근접한 동두천의 기후자료를 활용하였고, 월별 강수일수, 강수량, 최저 및 최고 기온으로 구분하였다. 실내시험에서 사용된 96시간의 수침조건과 비교하여 강우에 의해 물속에 잠겨있는 시간은 적었지만, 실제 흙포장을 사용하는 조건과 동일한 조건으로 볼 수 있어 사용성을 평가하기에 적합할 것으로 판단된다. 또한 현장의 경우 최저 온도가 영하로 떨어져 흙포장에 흡수된 수분이 얼어 부피가 팽창하고, 낮에는 기온이 올라가면서 흙포장에 흡수된 수분이 녹으면서 부피의 변화가 지속적으로 발생하는 조건이 추가적으로 작용하여 흙포장의 사용성이 실제 현장 조건과 동일하게 평가된 것으로 판단된다.

여러 조건이 복합적으로 작용하면서 실제 흙포장을 사용하는 조건과 동일한 조건에서 3개월간 노출시켰고, 노출 전 후의 변화 관찰을 위하여 평판재하시험을 수행하였다. 평판재하시험의 측정 결과를 하중강도-침하 곡선으로 분석하여 Table 8에 나타내었다. 평판재하시험결과 최대 재하하중은 630kN/m<sup>2</sup>으로, 안전율 3을 고려한 허용지지력은 210kN/m<sup>2</sup>이상으로 나타낼 수 있다.

도로의 평판재하시험(KS F 2310)방법의 해설에서는 포장 파괴를 일으키는 한계 침하량에 대해서 명확한 정설은 없고, 관용적으로 아스팔트 포장은 2.5mm, 시멘트 포장의 경우 1.25mm를 적용한다. 또한 지지력 계수를 계산하는 침하량에 대해서는 도로의 경우 1.25mm로 나타내고 있다. 평가를 위해 Fig. 11의 하중강도-침하 곡선을 이용하여 도로 기준인 1.25mm에서 지지력 계수를 산정하였다. 도로의 다짐 판정 기준은 시멘트 포장 1.25mm 침하량에 대한 지지력 계수를 147.1MN/m<sup>2</sup>이상으로 규정하고 있

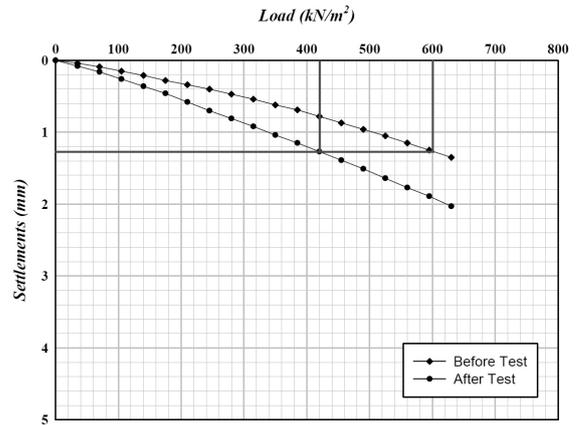


Fig. 11. P-S graph of soil pavement

다(MOLIT, 2009). 3개월 강우 적용 전의 결과에서 1.25 mm 침하량에 대한 하중강도는 600kN/m<sup>2</sup>이며, 이때의 지지력 계수는 240MN/m<sup>2</sup>이다. 3개월 강우 적용 후의 결과 1.25mm 침하량에 대한 하중강도는 420kN/m<sup>2</sup>이며, 이때의 지지력 계수는 168MN/m<sup>2</sup>으로, 3개월 강우 적용 전 후 모두 다짐 판정 기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

흙포장의 수분 민감도를 평가한 시험에서 96시간 수침 후 일축압축강도를 평가한 결과는 최대강도의 11%~13%로 감소하여 물에 약한 특성을 갖는 것으로 판단할 수 있었다. 하지만, 실제 현장조건에서 3개월간 노출 후 평판재하시험으로 측정된 결과 침하량은 1.5배 증가하였지만, 지지력계수로 평가하는 노상 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 두 시험의 결과로 유기계 고화제를 사용한 흙포장은 수침조건과 동일한 물속에 완전 잠긴 상태에서 장시간 노출되는 경우 물에 취약할 수 있지만, 현장시험과 같이 배수가 되어 물이 흐르는 조건에서는 장기간 노출되어도 사용이 가능한 것으로 나타났다. 유기계 고화제를 사용한 흙포장의 시공 시 배수를 원활하게 하고, 흙포장의 표면에 물이 스며들지 않도록 하는 코팅기능 추가되면 흙포장을 장기적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 흙포장의 포장가속 시험

포장구조체의 공용성은 실제 자전거도로의 일부 구간에 흙포장을 적용하거나, 포장가속시험을 통해 파악할 수 있다. 포장가속시험은 포장구조체를 실험크기로 조성하여 실제와 유사한 환경하중 및 교통하중을 단기간에 모사하는 실내시험이다. 실제 자전거도로에 적용하여 장기간 지속해서 관찰하는 방법은 행정사항 등 제약조건이 많아 포

Table 9. Results of FWD

Type	Load (kN)	Sensor location (inch)						
		0	12	24	36	48	60	72
Settlements before the Accelerated Pavement Test (micron)	46.72	760	182	29	18	16	21	6
	63.48	922	218	38	24	21	28	10
	48.56	791	182	27	18	17	22	6
	64.89	916	212	37	25	22	29	10
	48.42	791	173	25	18	17	22	6
	65.81	935	212	38	26	23	31	10
Settlements After the Accelerated Pavement Test (micron)	43.47	670	133	43	23	14	9	7
	59.45	822	176	59	33	20	13	9
	43.40	651	134	43	23	14	9	7
	59.80	798	176	58	34	20	14	10

Table 10. Resilient modulus and Effective modulus

Type	Resilient modulus	Effective modulus
Settlements before the Accelerated Pavement Test (Mpa)	3.52	287.10
Settlements After the Accelerated Pavement Test (Mpa)	3.68	304.69

장가속시험을 이용하여 흙포장의 공용성을 평가하였다. 흙포장의 가속시험 전 후 변화를 파악하기 위하여 포장체 구조평가를 위한 비파괴 시험 중 가장 널리 사용되고 있는 FWD 시험을 수행하였다. FWD 시험의 재하하중과 거리 별 변위는 Table 9와 같다.

FWD 시험의 결과를 미국도로교통공무원협회 설계가이드(AASHTO, 1998)의 AREA 방법으로 회복탄성계수 ( $M_R$ , Backcalculated subgrade resilient modulus) 및 유효계수(Effective modulus\*)를 계산하였고, 이 결과로 포장 구조체의 상태를 평가하였다. 포장가속시험 전 후의 결과는 Table 10과 같이 정리된다. 회복탄성계수는 포장가속 시험 전 3.52MPa에서 포장가속시험 후 3.68MPa로 5% 증가하였다. 유효계수는 포장가속시험 전 287.10MPa에서 포장가속시험 후 304.69MPa로 6% 증가하였다. 시험을 위한 흙포장은 흙포장의 주 재료인 화강풍화토의 최적함수비 만큼 첨가되는 건식포장공법으로 시공되어 다짐에 의한 강도증가가 발생할 수 있다. 시험을 위한 흙포장의 다짐 시공 시 3.5ton의 롤러를 이용하여 화강풍화토의 다짐 시험 결과와 유사한 조건을 만들었지만, 시험 시 포장가속 시험기의 하중이 18ton으로 다짐시 하중보다 큰 하중이 작용하여 다짐효과가 발생한 것으로 판단된다. 또한 포장 가속시험 후 다짐효과에 의해 효과가 일부 증가한 부분을



Fig. 12. Surface after Accelerated Pavement Test

상쇄하면, 포장가속시험으로 16억대의 자전거가 통행한 후에도 구조적으로 문제가 없는 것을 확인할 수 있었다.

포장가속 시험 후 정성적인 평가로 포장면의 상태를 확인하였다. 포장면의 상태는 포장가속시험기의 바퀴가 지나간 부분에 파임현상이 발생하였고, 파임현상의 깊이는 3mm~5mm 로 측정되었다. 파임현상 이외에 균열 등 외형적인 손상은 발견되지 않았고, 무기계 고화제를 사용하는 경우 많이 발생하는 건조균열은 발생하지 않아 무기계 고화제보다 균열의 발생은 적은 것으로 나타났다. Fig. 12 은 포장가속 시험 후 흙포장의 포장표면 상태를 나타내고 있다.

\* Effective modulus of all pavement layers above the subgrade

## 4. 결론

유기계 고화제를 사용한 흙포장의 사용성에 대한 평가를 위하여 실내시험 및 현장시험의 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유기계 고화제를 이용해 제작한 공시체를 96시간 수침시킨 후 일축압축시험을 진행한 결과 3종의 고화제 모두 최대강도의 약 11% ~ 13% 수준으로 강도가 저하되었다. 이는 유기계 고화제가 무기계 고화제와 달리 물에 약한 성질을 가지는 것으로 평가되었다.
- (2) 폴리머 3을 이용하여 실제 자전거 도로와 동일한 크기의 도로를 조성하였고, 3개월간 강우에 노출시킨 후 평판재하시험의 결과를 비교하였다. 3개월 강우 노출 후 평판재하시험의 침하량은 1.5배 증가하였으나, 노상의 지지력계수 기준을 만족하는 것으로 분석되었다. 수중에 잠기는 수침시험조건이 아닌 흙포장 표면으로 수분의 이동이 가능하여 포장체가 수중에 잠기지 않는 조건에서는 흙포장의 사용성은 문제가 없는 것으로 나타났다.
- (3) 포장구조체의 장기 공용성을 단기간에 모사하는 포장 가속시험의 결과, 16억대의 자전거가 통과한 후 회복탄성계수는 5%, 유효계수는 6% 증가하였다. 다짐하중을 초과하는 포장가속시험기의 다짐효과에 의한 강도증가 효과를 제외하면, 포장체의 구조에는 변화가 없는 것으로 판단할 수 있다. 포장면은 휠 패스에 의한 3mm~5mm의 파임현상이 발생하였지만, 건조균열 및 사용에 의한 균열은 발생하지 않아 흙 포장의 장기 공용성에 우수한 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 유기계 고화제를 이용한 흙포장의 사용성을 확인한 결과 유기계 고화제만 사용한 흙포장은 현장에 적용 가능한 것으로 평가되었다. 하지만 물에 약한 성질을 가지는 것으로 나타나 흙포장용 배수구조물에 대한 검토가 필요하다.

## Acknowledgement

This research was supported by Development of Design and Construction Technology for Double Deck Tunnel in Great Depth Underground Space (14SCIP-B088624-01) from Construction Technology Research Program funded

by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

## References

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. (1986), *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO, Washington, D.C., pp.III-79~III-156.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials. (1998), *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures-Supplemental version*, AASHTO, Washington, D.C., pp.1-22.
3. Baek, J. E., Choi, J. S. and Kim, S. I. (2001), "Development of Estimation Procedure of Bedrock Depth for Flexible Pavement through Numerical Simulation of FWD Test", *Journal of KSCE*, Vol.21, No.5-D, pp.643-654.
4. Epps, A. L. (2001), *Performance prediction with the MMLS 3*, WesTrack Report Number 2134-S. Texas Transportation Institute, pp.4.
5. Hwang, S. P., Jeoung, J. H., Lee, Y. S. and Ryu, S. H. (2014), "Characteristics of Organic Polymer Soil Pavement Curing Condition", *Journal of KGES*, Vol.15, No.12, pp.35-42.
6. Ju, J. W., Park, J. B., Ju, J. Y. and Lee, D. S. (2003), "Production of soil mixed pavement using hydronium", *Journal of KSCE*, Vol.23, No.4C, pp. 213-219.
7. Ju, M. K., Yeon, K. S. and Yoshihiko Ohama. (2002), "Strength properties of SBR-modified concretes using ground granulated blast-furnace slag", *Journal of KCI*, Vol.14, No. 3, pp.315-320.
8. Jung, H. S., Jang, C. H., An, B. J. and Chun, B. S. (2009), "A study on environmentally friendly soil pavement materials using weathered soil and inorganic binder", *Journal of KGS*, Vol.10, No.4, pp.25-31.
9. Lai, J. S. (1986), *Evaluation of Rutting Characteristics of Asphalt Mixes Using Loaded Wheel Tester*. Project No. 8609, Georgia Department of Transportation.
10. Lee, J. H. (2009), *Materials characteristics of soil-cement pavement containing SBR latex*, Master's thesis, Kyung Hee University, pp.9-12.
11. Lee, Y. S., Jeoung, J. H., Yu, J. and Cho, J. W. (2010), "The strength characteristics of polymer-cement stabilization", *Proc. of 2010 Conference on Korean Geoenvironment Society*, Seoul, pp.468-471.
12. Lee, Y. S., Jeoung, J. H., Park, E. H., Ryu, S. H. and Jo, G. T. (2012), *Development of road subsoil stabilization technology using multi-complex polymer*, KICT 2012-055, pp.33-36.
13. Miller, T., K. Ksaibati, and M. Farrar. (1995). "Utilizing the Georgia Loaded-Wheel Tester to Predict Rutting". *Presented at the 74<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research*

Board, Washington, D.C.

14. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2009), *Road construction standard specification*, Seoul, pp(2-39).
15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2015), *Bicycle facilities Installation and care instructions*, Seoul, pp.9-39.
16. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2015), *Yearbook of road statistics*, Seoul, pp.17.
17. PWRI (2009), *Soil pavement handbook*, DaeSung, Japan, pp. 1-31.
18. West, R. C., Page, G. C., and Murphy, K. H. (1991), *Evaluation of the Loaded Wheel Tester*, Research Report FL/DOT/SMO/91-391, Florida Department of Transportation.
19. Williams, C. R. and B. D. Prowell. (1999), "Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results to WesTrack Performance", *Presented at the 78<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.