

# 역학적 특성을 이용한 노상다짐도 평가를 위한 기초연구

## Soil Compaction Management Methodology using Mechanical Property

최준성\*1) , 강규진\*\*2) , 김종민\*\*\*3) , 노한성\*\*\*\*4) , 김태수\*\*\*\*\*5)

Choi, Jun Sung · Kang, Gyu Jin · Kim, Jong Min · Roh, Han Sung · Kim, Tae Soo

### 1. 서론

현재 국내의 도로 설계는 흙의 동탄성계수와 같은 역학적 정수를 기준으로 하고 있지만 고속도로 노상의 시공관리에 있어서는 최적함수비와 최대건조단위중량을 이용한 다짐도를 이용하고 있다. 또한 유지관리를 위한 도로평가에서는 FWD 등과 같은 비파괴시험으로부터 탄성계수 등을 역산하여 도로의 구조적 능력을 평가하고 있다. 그러나 다짐도를 이용한 시공관리는 흙의 역학적 특성을 고려하지 않고 있어 노상의 설계와 탄성계수 등을 이용한 관리기법(PMS)과는 개념적인 차이가 크다. 따라서 고성능의 도로건설과 설계에서 시공 및 유지관리까지 도로의 역학정수를 이용한 현장관리기법 개발을 위해서는 현재의 다짐평가방법을 개선해야 할 필요성이 있다.

### 2. 연구방향과 진행사항

다짐도를 이용한 시공관리와 탄성계수를 이용한 도로의 설계 및 관리기법에는 개념적인 차이가 크게 존재한다. 따라서 시공단계부터 탄성계수와 같은 역학적 정수를 이용함으로써 시공관리와 도로설계 및 관리의 개념적인 차이를 줄이고 체계적인 다짐관리기법 개발을 목적으로 하며 이를 위하여 삼축압축시험, 공진주시험, 탄성파 시험 등을 실시하였다. 그리고 실내시험결과를 이용하여 최적다짐도 평가방법, 기본물성을 통한 간이 다짐도 산정법 및 탄성계수를 이용한 다짐관리기법을 제안하고자 한다.

본 논문에서는 계획되어 있는 전체 7개 지역중에서 우선적으로 포항, 무안, 영광, 중부내륙의 네 지역에서 채취한 48개 시료에 대해 실내시험을 수행하였으며 실내시험은 크게 기초물성시험, 삼축압축시험, 기타 역학적 시험으로 나누어 수행하였다. 다짐시험은 다짐에너지별 특성을 파악하기 위하여 다섯 종류의 다짐에너지별로 시험을 수행하였다. 계획되어 있는 각각의 시험종류는 다음과 같다.

- 기초물성시험 : 비중시험, 입도분석, 액성한계 및 소성한계시험
- 삼축압축시험 : 비압밀비배수, 압밀비배수, 압밀배수
- 기타 역학적 시험: 공진주시험, 다짐시험

### 3. 실내시험결과를 이용한 노상토 최적다짐 평가방법 고찰

본 절에서는 최적다짐 평가방법을 고찰하기 위하여 수행한 실내시험 결과와 함께 이 결과와 ASTM자료를 이용하여 최적다짐 평가방법을 고찰한 것을 나타내었다.

\*1) 인덕대학 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · 02-902-7658(E-mail:soilpave@induk.ac.kr)

\*\*2) 연세대학교 토목공학과 박사과정 · 02-312-5101(E-mail:kgjin@yonsei.ac.kr)

\*\*\*3) 세종대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 02-3408-3293(E-mail:jongmin@sejong.ac.kr)

\*\*\*\*4) 한국도로공사 연구개발실 지반연구그룹 책임연구원 · 공학박사 · 02-2230-4655(hsroh@freeway.co.kr)

\*\*\*\*\*5) 한국도로공사 연구개발실 지반연구그룹 연구원 · 02-2230-4656(tskim@freeway.co.kr)



### 3.1 기초물성시험

포항, 무안, 영광, 중부내륙 시료를 대상으로 하여 비중시험, 입도분포시험, 액성한계시험과 소성한계시험을 수행하여 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 기초물성시험결과

		포항	중부내륙 노상토	무안	영광
비 중		2.62	2.62	2.66	2.65
액성한계		25.27	27.29	33.5	32.8
소성한계		20.65	18.47	10.69	11.35
No.200통과량		13.86	21.05	36.98	38.51
흙의 분류	동일본류법	SW	SW	SW-SC	SW-SC
	AASHTO	A-1-b	A-2-6	A-6	A-6

### 3.2 최적다짐도 평가방법 제안

현재 최적다짐도를 구하기 위해서는 현장시료에 대한 실내다짐시험을 실시하여 그 결과를 도시하여 선정한다. 그러나 이렇게 구한 다짐결과는 실험자의 도시방법 및 다짐에너지의 미묘한 차이와 시료자체의 세립 분함유량 등 여러 변수에 의해 조금씩 차이를 보이게 된다. 따라서 동일 기준의 다짐결과를 얻기 위하여 기존의 다짐시험결과와 비교할 수 있는 간단한 시험과 계산식만으로 기준이 될 수 있는 최적다짐도를 구하고 이를 기준으로 실내다짐결과의 정도를 판단할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

#### 3.2.1 실내다짐시험

포항, 무안, 영광, 중부내륙 노상토 시료에 대해 실내 다짐시험을 실시하였다. 다짐방법은 노상의 다짐에 이용되는 한국공업규격(KS F-2312)의 수정다짐방법 중 D-다짐방법을 채택하였으며 각 사이트 별로 5회 이상의 다짐시험을 실시하여 최대건조단위중량( $V_{dmax}$ )과 최적함수비(OMC)를 산정하였다. 그림 1은 네개 지역에 대해 수행한 실내다짐시험 결과중 평균값을 나타내었으며 이들 결과를 이용한 네개 지역의 다짐시험결과의 평균값을 표 2에 정리하였다.

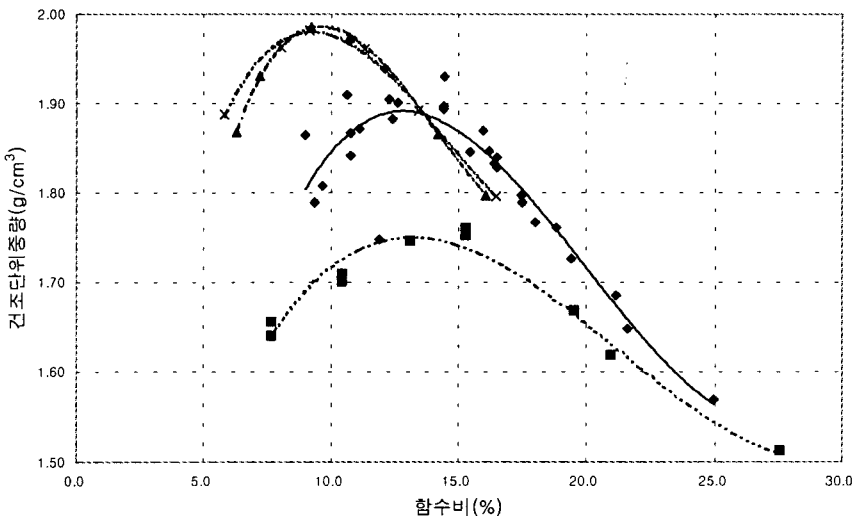


그림 5 네 개지역에 대한 다짐시험결과(D다짐)



표 2. 실내 다짐시험 결과 ( $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$ =최대건조 단위중량, OMC(%)=최적함수비)

포함		중부내륙 노상도		무안		영광	
$\gamma_{dmax}$	OMC	$\gamma_{dmax}$	OMC	$\gamma_{dmax}$	OMC	$\gamma_{dmax}$	OMC
1.98	9.3	1.98	9.5	1.9	13.6	1.75	14.5

이러한 다짐에너지별 다짐시험결과와 기초물성시험결과를 이용하여 함수비와 다짐에너지사이의  $OMC = \alpha \log E(nerge) - \epsilon$  의 상관관계가 있음을 알 수 있었고, 식에서  $\alpha$ ,  $\epsilon$ 의 값과 다짐에너지를 알게되면 최적함수비를 구할 수 있다. 여기서  $\alpha$ ,  $\epsilon$ 의 값을 기본물성 중 액성한계와의 상관관계를 이용하여 구하였으며 이 상관관계를 통하여 구한  $\alpha$ ,  $\epsilon$ 의 값을 위 식에 대입하면 액성한계 값만으로 OMC를 구할 수 있다. 아래 그림은 무안지역의 시료를 이용하여  $\alpha$ ,  $\epsilon$ 의 값과 액성한계의 상관관계를 예로써 제시한 것이다. 이와같이 추후 보다 많은 데이터가 축적되면 각 기초물성과 다짐도와의 상관관계가 밝혀질 것이다.

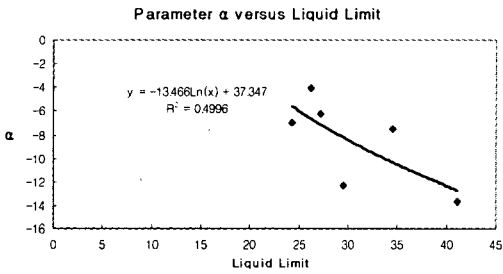


그림 6. 액성한계 —  $\alpha$  상관관계(무안)

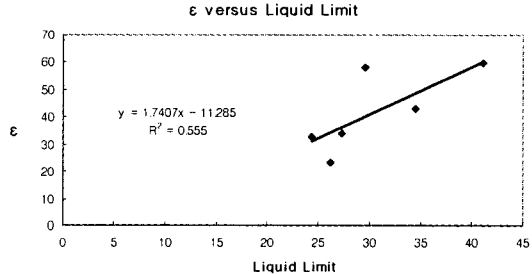


그림 7. 액성한계 —  $\epsilon$  상관관계(무안)

3.2.2 다짐도 간이 산정법

ASTM D5080에서는 3개의 다짐시험결과를 이용하여 빠르게 다짐도를 구할 수 있는 방법을 제안하고 있다. 본 논문에서는 이 방법을 이용하여 최적다짐도를 비교할 수 있는 기준으로 이용하여 실내다짐시험과의 결과비교를 수행하였다.

그림 2와 그림 3은 ASTM D5080의 간이산정방법과 함수비를 구하는 그래프를 나타낸 것이다.

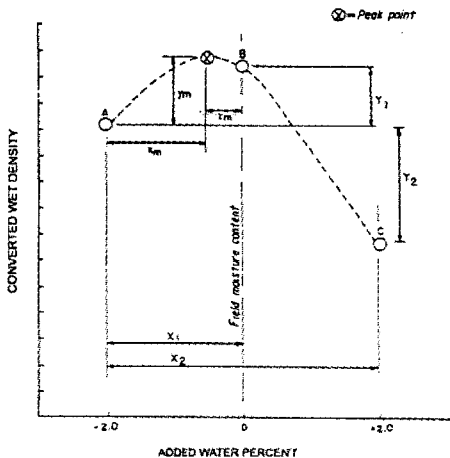


그림 8. 다짐곡선에서 최대점을 구하는 방법

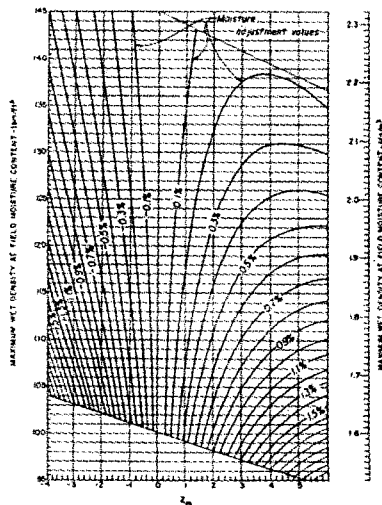


그림 9. 함수비 보정 그래프



표 3은 3.2.1절의 실내다짐시험으로 구한 다짐시험결과와 ASTM5080의 간이산정법으로 구한 다짐도를 구한 것이며 표 3의 오차는 실내다짐시험을 기준으로 계산한 값이다. 표 3을 보면 실내다짐시험결과와 간이산정법의 결과가 최대건조단위중량의 경우 최소 0.51에서 최고 5.71%의 범위를 보이고 있으며 이중에서 포항시료와 중부내륙 노상토만이 5% 이내의 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 최적함수비의 경우 최소 2.47%에서 최대 14.71%의 오차범위를 보이며 포항시료만이 5%미만의 값을 보이고 나머지 시료의 경우 포항시료보다 큰 값을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 표 3의 결과와 표 1의 기본물성시험결과를 비교해보면 최대건조단위중량에서 작은 오차범위를 보이는 포항시료와 중부내륙 노상토의 경우 액성한계, 소성한계, 통일분류법에 의한 흙의 분류가 같은 공통점을 찾아낼 수 있으며 200번체 통과량이 20%내외의 값을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 사실로 미루어볼 때 간이산정법을 이용하여 다짐도를 구하는 경우 실내다짐시험에 가까운 최대건조단위중량의 값을 구하기 위해서는 200번체 통과량 20% 내외 등의 조건을 갖는 흙에 대해서 이용하여야 할 것으로 생각된다.

표 3. 실내다짐시험과 간이법으로 산정된 다짐도의 비교

구분 \ 다짐횟수	포항		중부내륙 노상토		무안		영광	
	$\gamma_{d\max}$	OMC	$\gamma_{d\max}$	OMC	$\gamma_{d\max}$	OMC	$\gamma_{d\max}$	OMC
실내다짐시험	1.98	9.30	1.98	9.50	1.90	13.60	1.75	14.50
간이산정법	2.02	9.53	1.97	10.40	1.99	11.60	1.85	13.15
오 차(%)	2.10	2.47	0.51	9.47	4.74	14.71	5.71	9.31

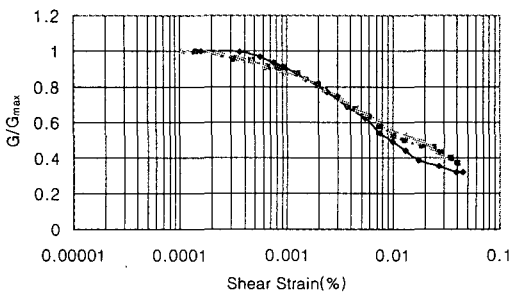
#### 4. 역학적 특성을 이용한 노상 다짐도 평가를 위한 기초연구

본 절에서는 역학적 특성을 이용한 노상 다짐도 평가를 위해 수행한 공진주시험결과 및 추후 각 살내실험이 완료된 후의 역학적 특성을 이용한 노상 다짐도 평가방법을 서술하였다.

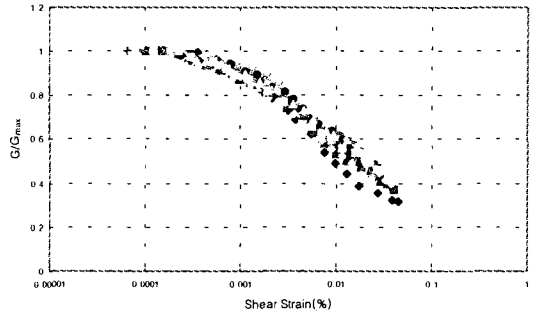
##### 4.1 공진주시험결과

그림 4는 포항, 무안, 영광, 중부내륙 노상토에 대한 공진주시험결과를 나타낸 것이다. 시료성형시에는 3.2.1절의 실내다짐시험 결과를 이용하여 최적다짐상태로 시료를 성형하였으며 구속압 조건은 노상토에 가해질 수 있는 구속압의 크기를 고려하여 각 시료별로 40kPa, 70kPa, 105kPa로 하였다. 그림 4를 보면 변형률의 변화에 따른  $G/G_{\max}$ 의 크기가 각 지역시료별로 차이가 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 구속압의 크기가 100kPa이하로 그리 크지 않아 각 시료의 동적특성을 충분하게 발휘하지 못하는 것으로 생각된다. 그리하여 본 논문에서는  $G/G_{\max}$ 의 값을 이용하는데 있어서 각 시료별로 각각 이용하지 않고 12개의 결과를 모두 하나의 결과로 회귀분석하여 이용하도록 하였다.

그리하여 현재 진행중에 있는 진동삼축시험, 실내탄성파시험 결과들과 함께 변형률별 탄성계수의 값을 연관지음으로써 다짐도-탄성계수와의 관계에서 소정의 다짐도를 이용하여 현장다짐을 수행하고 있는 현재의 방법을 설계 탄성계수를 획득할 수 있을 때까지 다짐관리를 할 수 있도록 발전시켜 나아갈 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 무안지역 공진주시험 결과



(b) 4개지역에 대한 공진주시험결과

그림 4. 공진주시험결과

4.2 역학적 특성을 이용한 노상도 다짐도 평가방법

지금까지 기본물성, 간이산정법을 이용한 다짐도 산정방법, 공진주시험결과 등을 서술하였다. 이들 실내 시험결과외에 현재 삼축압축시험 및 진동삼축시험, 실내탄성파시험 등을 실시하여 내용을 보강하고 있으며 현재까지의 내용을 바탕으로 보다 정확한 다짐도를 구하고 관리하기 위한 방안을 제안하고자 한다. 현재의 다짐도를 구하는 방법은 시료를 채취하여 실험실에서 다짐시험을 수행하고 이들 결과를 이용하여 최적다짐도를 구하고 있다. 이러한 방법은 타격시 햄머 높이의 작은 변화, 시료 성형시 세립분 함유량의 차이 등의 미묘한 문제만으로도 많은 변화를 보일 수 있다. 따라서 이러한 차이를 최소한으로 줄이기 위하여 간이산정법으로 구한 다짐도를 기준으로 하여 실내다짐시험결과와 적부판정을 거쳐야 할 것으로 판단된다.

또한 현재 삼축압축시험, 진동삼축시험, 실내탄성파 시험 등의 결과를 이용하여 그림 5와 같은 다짐도-탄성계수 상관관계를 제시하고자 함수비에 따른 삼축압축시험과 다짐시험을 실시하였다. 이 상관관계가 완료된 후에는 역학적 특성인 탄성계수에 의한 다짐도를 이용하여 시공관리를 수행할 수 있을 것이며, 궁극적으로는 그림 6과 같이 현장의 탄성계수시험으로부터 소정의 탄성계수의 값이 나올 때까지 현장다짐을 수행함으로써 역학적 물성을 전혀 고려하지 못하고 있는 다짐도를 대신할 수 있을 것으로 판단된다.

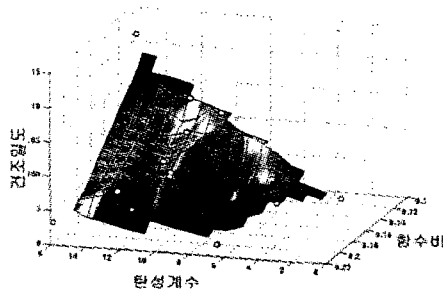
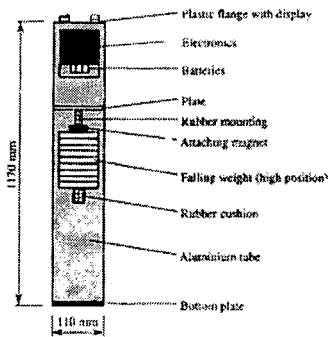


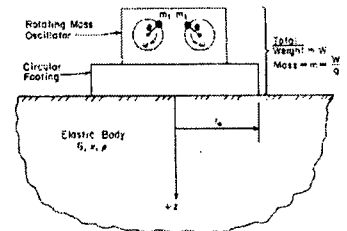
그림 5. 다짐도-탄성계수 상관관계(예)



(a) Handv FWD



(b) FWD



(c) 공진주파수 측정기

그림 6. 현장 탄성계수 측정방법

## 5. 결론

본 논문에서는 역학적 정수를 이용한 다짐관리기법을 제안하기 위해 간이산정법을 이용한 다짐도의 결정, 공진주사시험 결과를 이용한 변형률별 탄성계수의 산정 등을 서술하였다. 또한 위의 결과들을 하나로 하여 추후 국내 노상토에 대한 다짐도-탄성계수 상관관계를 맺고자 한다.

이러한 상관관계가 완성된 후에는 실내다짐시험 결과의 적부판정 뿐만 아니라 다짐도를 이용하여 흙의 역학적특성을 고려하지 못하는 현장다짐방법을 탄성계수를 이용하는 방법으로 발전시킴으로써 보다 합리적인 현장다짐을 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Mayne, P. W., Jones, J. s., Jr., Dumas J. C., "Ground response to dynamic compaction", ASCE, The Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, No. 6, June, 1984.
2. Kocher M. F., Summers J. D., "Wave Propagation Theory for Evaluating Dynamic Soil Stress-Strain Models", ASAE Paper, Vol. 31(3),No. 86-1053, 1988
3. Youd, T. L., "Compaction of sands by repeated shear straining", Jounal of the Soil Mechanics And Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. SM7, July, 1972.
4. ASTM, "Standard Test Method for Rapid Determination of Percent Compaction", Auunal Book of ASTM Standards, Vol 04.08, November, 1993
5. Noorany, I., " Variability in Compaction Control", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 7, July, 1990
6. Semmelink, C. J., Visser, A. T., "Effect of Material Properties on Compactability and Bearing Capacity", Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 4, July/August, 1994
7. Blotz, L. R., Benson, C. H., Boutwell, G. P., "Estimating Optimum Water Content and Maximum Dry Unit Weight for Compacted Clays", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, September, 1998, p.907