



# 시편 성형기법에 따른 국내 다짐 노상토의 변형특성

## Deformational Characteristics of Compacted Subgrade Soils in Korea with Specimen Construction Methods

권 기 철\*      황 창 일\*\*  
Kweon Gi chul      Hwang, Chang Il

### Abstract

Deformational characteristics of subgrade soils are important properties in the mechanistic analysis and design of pavement system. In this study, to evaluate the effect of specimen construction methods on deformational characteristics of subgrade soils in Korea, resonant column tests were performed for specimens constructed by various methods. Specimen construction method affected to the modulus value but the variation in the normalized modulus reduction curve was almost identical. The effects of specimen construction method on modulus are decreased with increasing confining pressure. The average maximum variation in the modulus value with different specimen construction methods was estimated as 16.8%. The differences in the modulus value of the specimens with same water content and dry density conditions that made by gyratory compaction and impact compaction were very small within 5.2%. The impact compaction method was proposed as a specimen construction method for determining the design input parameter testing considering that impact compaction method is much simpler and require less expensive specimen construction equipment and setup than gyratory compaction method.

**Keywords :** *subgrade soils, deformational characteristics, specimen construction methods, resonant column, compaction*

### 요 지

노상토의 변형특성은 포장체의 역학적 해석 및 설계에서 매우 중요한 입력물성치다. 본 연구에서는 시편 성형방법에 따른 국내 노상토의 변형특성 평가를 위하여, 다양한 성형기법을 적용하여 만들어진 시편에 대한 공진주시험을 수행하였다. 시편 성형방법에 따라서 최대탄성계수는 영향 받았으나 정규화탄성계수 감소곡선은 영향받지 않았다. 시편 성형기법의 영향은 구속응력이 증가할 수록 감소하였다. 시편 성형방법에 따른 탄성계수의 평균적인 최대편차는 16.8%로 나타났다. 동일한 함수비 및 건조단위중량 조건에서 선회다짐과 충격다짐으로 성형된 시편의 탄성계수 차이는 5.2% 이내로 매우 작았다. 충격다짐의 장점은 선회다짐에 비하여 보다 간편하고 시편성형 장비비용이 저렴하여 실무적용성이 우수함을 고려하여 설계입력물성치 결정을 위한 시편성형기법으로서 충격다짐기법을 제안하였다.

**핵심용어 :** 노상토, 변형특성, 시편성형기법, 공진주시험, 다짐

\* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 부교수  
\*\* 정회원 · 흥한건설(주) 사원



## 1. 서론

탄성계수를 중심으로 한 노상토의 변형특성은 역학적-경험적 포장설계법에서 기본입력물성치로 사용되고 있다. 2002 AASHTO 포장설계법에서는 노상토의 설계입력물성치로 회복탄성계수를 기초로 한 변형특성을 사용하고 있으며, 현재 개발이 진행중인 한국형 포장설계법에서는 국내 노상토의 재료적 특성 및 경험하는 응력, 환경조건에 합당한 탄성계수를 설계입력물성치로 적용하고 있다(건설교통부, 2006; AASHTO, 2002; AASHTO, 1986).

노상토의 변형특성은 매우 다양한 요소의 영향을 받기 때문에 설계대상 포장구조물이 경험하는 하중조건 및 환경조건에 부합되는 변형특성을 입력물성치로 사용하여야 한다. 노상토의 변형특성의 영향요소에 대한 연구와 관련해서는 간극비, 건조단위중량, 함수비, 과압밀비 등과 같은 재료적인 요인과 변형률 크기, 구속응력, 하중주파수, 하중반복횟수 등과 같이 시료가 경험하게 되는 시험조건으로 나누어 연구가 활발히 진행되고 있다(권기철, 2000; 건설교통부, 2006; 김동수 등, 2005; 최준성 등, 2003; Kweon 등, 2000).

그러나 노상토의 변형특성에 대한 영향요소 중 설계입력변수 결정을 위한 시험에 사용하는 시편의 성형방법에 따른 영향규명은 미흡한 실정이다. 동일한 재료적 특성, 즉 동일한 건조단위중량(간극비) 및 동일한 함수비로 성형된 시편이라 할지라도 재성형 시편의 다짐성형방법에 따라서 재료의 입자배열구조는 변화하게 된다. 만일 입자배열구조의 영향을 받는 재료라면 재성형 시편의 성형방법에 따라서 서로 다른 변형특성을 나타내게 된다. 따라서 설계입력변수를 재성형 시편을 사용하여 결정하는 경우에는 시편 다짐방법에 따른 특성을 고려하여 최적의 시편 성형기법을 적용하여야 한다.

현재 보고되어 있는 몇몇의 시편 성형방법에 대한 국내 연구의 대부분은 시편 성형방법에 따른 강도특성 변화에 대한 것이다(박승목 등, 2003; 류기원

등, 1999; 김영목 등, 2004; 차민경, 2005). 그러나, 포장설계에 있어서는 강도특성이 아니라 탄성계수 중심의 변형특성이 사용되므로, 강도특성에 대한 연구성과들을 직접적으로 적용하기 힘들다. 또한 기존의 연구들은 시편 성형방법에 따른 입자배열 구조 변화의 영향만을 평가한 것이 아니라 다짐방법에 따른 다짐 에너지 및 건조단위중량의 변화영향을 복합적으로 평가하고 있어서 시편 성형방법의 영향만을 별도로 고려하기 힘든 상황이다.

설계입력물성치 평가에 사용되는 시편의 성형방법은 실제 현장에서 다짐이 수행되는 조건과 잘 부합되어야 함은 물론 실무에서 적용편의성을 충분히 확보할 수 있는 간편한 방법이어야 한다. 본 연구에서는 시편 성형방법에 따른 변형특성을 규명하고자 다양한 기법으로 성형된 시편에 대한 공진주시험(RC: Resonant Column)을 수행하여 탄성계수의 크기와 정규화탄성계수감소곡선에 대한 영향을 평가하였다. 시편 성형기법으로는 진동다짐, 정적다짐, 충격다짐, 선회다짐방법을 적용하였으며, 시험시료는 노상토 3종과 입상보조기층 재료 1종을 대상으로 하였다. 현장 다짐조건에 대한 모사성 및 시편 성형의 편의성을 고려하여 최적의 설계입력변수 평가시험에서 적용할 시편 성형기법을 제시하고자 한다.

## 2. 노상토 재료의 재성형 시편 성형기법

대부분의 국내 노상토 재료는 모래성분을 다량 함유하고 있는 화강풍화토 계열의 토사특성이 있다(권기철, 2000). 이러한 재료적 특성을 고려하여 다짐 에너지를 진동의 동적하중을 사용하는 진동다짐, 정적하중에 의한 정적다짐, 다짐봉을 사용하여 충격하중을 유발하는 충격다짐, 그리고 다짐 로울러 장비의 특성을 모사한 선회다짐기법을 적용하였다. 모든 경우에 5층의 층 다짐을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 다짐기법을 정리하여 표 1에 나타내었다.



표 1. 노상토 재료 시편 성형기법

시편 성형 기법	다짐 하중	성형방법 개요
진동다짐 (Vibratory Compaction)	진동 하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 압축공기 햄머를 사용하여 진동하중 재하</li> <li>• AASHTO에서 입상재료의 시편 성형기법으로 사용</li> <li>• 시편 성형과정에서 매우 큰 소음 발생</li> </ul>
정적다짐 (Static Compaction)	정적 하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유압잭을 이용하여 정적하중 재하</li> <li>• AASHTO에서 노상토의 시편 성형기법으로 사용</li> <li>• 시편이 커지면 별도의 시편 성형장치 필요</li> </ul>
선회다짐 (Gyratory Compaction)	선회 하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 로울러 다짐을 선회하중으로 모사</li> <li>• 아스팔트 콘크리트 시편의 다짐기법으로 널리 적용</li> <li>• 별도의 선회다짐장비 필요</li> </ul>
충격다짐 (Impact Compaction)	충격 하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다짐봉의 낙하 충격하중 이용</li> <li>• 다짐시험에서 적용하는 다짐방법으로 현업 기술자들에게 매우 친숙</li> </ul>

AASHTO에서는 입상의 재료에 대해서는 진동다짐기법을, 노상토에 대해서는 정적다짐기법을 적용하고 있다(AASHTO, 1982, 1992, 2002). 진동다짐방법은 현장에서 입상재료의 다짐에 진동 로울러가 사용되고 있는 특성을 반영한 것이며, 압축공기햄머로 진동하중을 발생시켜 시편 다짐과정에 대단히 큰 소음이 유발된다. 노상토에 대한 정적다짐방법은 점성이 있는 노상토 재료의 다짐에서 대부분 정적으로 로울러가 사용되고 있는 점을 반영한 것으로 다짐에너지와는 무관하게 수평방향으로 변위가 완벽하게 억제된 다짐몰드 내부의 시편을 강력한 정적하중으로 압축하여 목표로 하는 건조단위중량의 시편을 얻는 다짐기법이다. 본 정적다짐방법으로 직경 70mm 이상의 시편에서 목표 건조단위중량을 얻기 위해서는 대단히 큰 정적하중을 필요로 하며 별도의 다짐장비가 요구되는 단점이 있다.

선회다짐방법은 실제 다짐 로울러의 하중재하 형태를 상재하중이 있는 상태에서 일정한 편심각을 두고 시편을 선회시키는 방법으로 모사하는 다짐기법이다. 본 시편 성형기법은 미국 텍사스주 교통국에서 개발되어, 많은 연구기관에서 여러 차례 개량되었다

(Butcher, 1997). 본 다짐방법은 아스팔트 콘크리트 시편의 성형에 보편적으로 적용되고 있으나 아직까지는 노상토와 같은 흙 재료에 대한 시편성형 다짐기법으로는 활발하게 적용되지 못하고 있으며, 토사 재료에 대한 다짐장비의 규격 또한 표준화되어 있지 못한 상태다.

충격다짐은 proctor 다짐시험에서와 같이 다짐 햄머의 낙하에 의한 충격하중으로 시편을 성형하는 기법이다. 다짐시험에서는 일정한 다짐에너지 조건을 확보하기 위하여 다짐봉의 무게, 낙하높이, 낙하횟수에 대하여 규정하고 있으나 시편 성형과정에서는 이러한 다짐에너지에 대한 세부적인 규정은 없는 상태이다. 이것은 다짐시험은 일정한 다짐에너지 조건에서 최대건조단위중량과 최적함수비를 결정하는 것이 목적이지만 시편 성형과정에서는 목표로 하는 건조단위중량과 다짐함수비가 설정되어 있기 때문에 다짐에너지의 크기를 일정하게 조절하는 것이 아니라 목표최대건조단위중량을 얻을 수 있도록 다짐에너지를 조절해야 하기 때문이다. 본 다짐방법은 일반적인 기술자들에게 가장 친숙한 시편 성형기법일 뿐 아니라, 시편 성형이 매우 간편하고 추가적인 장비를 거의 요구하지 않는 장점이 있다.

각각의 시편 다짐 성형방법에서 사용하는 다짐하중 특성을 비교해보면, 진동다짐은 시편의 전체 단면에 상당히 빠른 진동하중을 가하는 것이고, 정적다짐은 시편의 전체 단면에 정적의 하중을 재하하고, 선회다짐은 시편의 일부분에 상당히 느린 하중을 전단력과 함께 선회하며 재하하는 것이다. 충격다짐은 시편 단면의 일부분에 충격하중을 고르게 돌아가면서 가하는 것으로 진동, 정적, 선회다짐의 하중재하 요소를 모두 포함하고 있다. 이러한 시편 성형다짐 하중특성 중 노상토의 실제 현장에서 로울러에 의한 다짐과 가장 유사한 방법은 선회다짐방법으로 평가되고 있으나 아직까지는 노상토의 선회다짐에 대한 표준적인 규격이 없을 뿐 아니라 추가적인 고가의 시편 성형장치를 필요로 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 각 시료의 다짐시험에서 결정된 최



대건조단위중량의 95%에 해당하는 건조단위중량과 최적함수비(OMC)를 시편 성형의 목표값으로 결정하고 각각의 다짐방법으로 목표의 건조단위중량과 함수비가 얻어지도록 시편을 성형하였다. 이러한 조건은 설계입력변수 결정에 사용되는 조건과 일치한다(건설교통부, 2006). 성형된 시편의 시편 내부의 건조단위중량 차이를 최소화하기 위하여 모든 시편 성형에서 5층의 층다짐을 실시하였다.

진동다짐은 시편의 직경과 일치하는 다짐판을 다짐층 상부에 두고, 목표건조단위중량이 도달할 때까지 다짐판에 진동하중을 가하는 방법을 적용하였다. 정적다짐은 수평방향의 변위가 억제된 다짐몰드에 시료를 넣고 유압잭으로 정적하중을 목표건조단위중량이 얻어지는 수준까지 재하하는 방법을 적용하였다.

노상토와 같은 토사 재료에 대한 선회다짐장비가 개발되어 있지 못하여 노상토 전용의 선회다짐장비를 사용할 수 없었다. 아스팔트 콘크리트 재료에 대한 선회다짐장비를 사용하면 선회다짐으로 목표건조단위중량에 합당한 직경 150mm(또는 100mm)의 시편을 얻을 수 있었으나 노상토의 경우에는 추출된 시편을 트리밍(trimming)하는 것이 불가능하여 아스팔트 콘크리트용 선회다짐기를 사용할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 정적다짐장치를 개조하여 유압잭으로 시편에 5~10kg/cm<sup>2</sup>의 작은(정적다짐에서 적용되는 하중크기에 비하여) 상재하중을 재하한 상태에서 몰드를 약간의 편심각도를 주어 선회시키면 몰드 내부의 시료가 다짐되면서 상재하중이 줄어들고 충분히 상재하중이 줄어들면 또다시 상재하중을 증가시키고 선회를 반복하는 방법으로 선회다짐 효과를 유발하였다. 따라서 본 연구에서 적용한 선회다짐 방법은 엄밀한 의미의 정확한 선회다짐조건과는 다소 차이가 있고, 또한 선회다짐조건에서 상재하중의 크기, 편심각도, 선회속도 등이 명확히 규정된 상태가 아니다. 그러나 시편의 전체적인 다짐은 선회하중에 의해서 유발된 것으로 정적다짐이나 충격다짐 등에 비하면 선회다짐조건과 매우 근접한 조건에서

다짐이 이루어진 것으로 판단된다. 이러한 불완전한 선회다짐 성형기법의 적용에도 불구하고 국내 노상토의 경우에는 시편 성형방법에 따른 변형특성의 차이가 매우 작은 것으로 나타나 최적의 다짐기법을 제안하는 데는 큰 문제가 없었다. 자세한 내용은 시험 결과 부분에 상세히 서술하였다.

다짐시험에 사용하는 다짐봉의 크기로는 직경 70mm 또는 50mm 크기의 시편 성형이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 노상토 재료에 적용하는 D다짐에서 사용되는 다짐봉의 1회 낙하 때의 다짐에너지 밀도와 비슷하게 조절된 소형의 시편 성형전용다짐봉을 제작 사용하였다. 제작된 시편 성형용 다짐봉은 직경 25mm 낙하높이 400mm 무게 1.17kg의 체원을 갖는다. 최적함수비 조건에서 95% 다짐도에 해당하는 다짐밀도를 획득하는데 각 층당 20회 정도의 낙하횟수가 필요한 것으로 나타났다.

본 연구에서 적용한 진동다짐, 정적다짐, 선회다짐, 충격다짐에서 동일한 함수비의 시료로 동일한 다짐도의 시편을 획득하는 데 필요한 에너지는 서로 다를 것이다. 또한 이러한 다짐에너지는 다짐시험에서 사용되는 다짐에너지와도 상이할 것이다. 그러나 시편성형과정의 다짐에너지 자체의 크기는 시편의 강도특성 및 변형특성에 직접적인 영향을 미치지 않는다. 부연하면 다짐에너지가 성형된 시편의 다짐도와 입자배열 구조에 영향을 미치고 이러한 차이가 역학적 특성에 영향을 미치므로, 시편성형기법의 영향을 평가하기 위해서는 다짐에너지를 일정하게 하여 서로 다른 건조단위중량에서의 시편을 시험하는 것이 아니라, 다짐에너지가 서로 다르더라도 동일한 건조단위중량의 시편에 대한 결과를 비교하는 것이 필요하다.

### 3. 시험시료 및 시험절차

#### 3.1 시험시료

본 연구에서는 국내 도로현장에서 사용중인 노상



토 시료 3종을 채취하여 시험을 수행하였다. 노상토 시료와 함께 입상보조기층 재료 1종을 추가로 채취하여 함께 시험을 수행하였다. 시험시료의 기초물성 시험결과는 표 2와 같다.

표 2. 시험시료 기초물성 특성

구 분		노 상 토			보조기층
		HSG-2	HSG-3	NSG-1	HSB-3
입도 시험 결과	D <sub>95</sub> (mm)	19.0	7.4	41.0	27.0
	곡률계수, C <sub>C</sub>	0.7	0.7	2.0	2.4
	균등계수, C <sub>U</sub>	12.0	4.8	8.8	35.3
	#200 통과량(%)	2.9	1.3	3.1	0.7
	#4 통과량(%)	77.3	92.5	50.9	37.7
흡입자 비중		2.63	2.65	2.50	2.51
소성지수 (PI, %)		6.1	NP	7.6	NP
흙 분류	통일분류	SP	SP	SW	GW
	AASHTO 분류	A-2-4	A-1-b	A-2-4	A-1-a
다짐 시험 결과	최적함수비 (OMC, %)	9.2	10.2	19.0	6.8
	γ <sub>d,max</sub> (t/m <sup>3</sup> )	2.100	1.978	1.650	2.423

### 3.2 시편 성형 및 공진주시험절차

모든 시편은 다짐시험에서 결정된 최적함수비와 95% 최대건조단위중량을 목표로 성형하였다. 본 연구에서 적용한 모든 시편 성형방법에서 5층의 층다짐을 적용하여 시편내부의 건조단위중량 차이를 최소화하고자 하였다. 표 3은 각각의 성형기법으로 성

표 3. 성형된 시편의 함수비 및 다짐도

구 분	시편 성형기법에 따른 시편 성형상태							
	진동다짐		정적다짐		선회다짐		충격다짐	
	함수비 (%)	다짐도 (%)	함수비 (%)	다짐도 (%)	함수비 (%)	다짐도 (%)	함수비 (%)	다짐도 (%)
HSG-3	10.6	95.2	10.6	94.6	10.3	94.8	10.0	94.5
HSG-2	9.1	96.4	8.6	94.5	9.3	94.2	9.5	93.4
NSG-1	19.5	93.3	19.6	95.3	19.4	93.1	19.6	92.2
HSB-3	6.7	95.8	6.5	94.6	6.6	93.2	6.6	95.2

형된 시편의 함수비 및 다짐도를 정리한 것이다.

모든 경우에 95% 다짐도, 최적함수비(OMC)를 목표로 하였으나, 완벽하게 목표에 부합되는 시편을 성형하는 것이 불가능 하였다. 표 3에 정리한 바와 같이 실제 성형된 시편의 조건은 시편 성형방법에 따라 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 시편 성형의 다짐방법에 따른 변형특성에 대한 영향은 건조단위중량 및 함수비 차이의 영향에 비하여 작은 것으로 알려져 있다(Tatsuoka 등, 1991). 따라서 표 3에 나타난 바와 같이 작지만 각 시편의 다짐도와 함수비 차이에 따른 영향을 별도로 고려하지 못한다면 시편 성형기법의 영향을 신뢰성 있게 평가하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 각각의 시료에 대하여, 동일한 최적함수비 조건에서 다짐도 90%, 95%, 100%로 변화시키고 동시에 동일한 95% 다짐도 조건에서 OMC-2%, OMC, OMC+2%로 함수비를 변화시키며 다짐도의 영향과 함수비의 영향을 별도로 평가하는 공진주시험을 추가하여 수행하였다. 함수비 및 다짐도 변화에 따른 공진주시험 시편은 모두 충격다짐으로 성형하였다.

시편은 직경 50mm 높이 100mm 크기로 성형하였다. 성형된 시편의 양단부를 석고로 처리하여 공진주시험장치에 거치한 후 2시간 이상의 석고양생시간을 둔 후 구속응력에 따른 시험을 수행하였다. 모든 시험은 배수조건에서 시험 수행하였다. 구속응력의 크기는 80kPa, 41kPa, 21kPa, 10kPa, 0으로 높은 구속응력단계부터 적용하였다.

### 4. 시편 성형기법에 따른 최대탄성계수 변화

시편 성형기법에 따른 최대탄성계수의 변화를 그림 1에 일례로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 시편 성형기법에 따라 최대전단탄성계수의 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 앞에서도 언급했듯이 각각의 시편 성형방법에 따라 성형된 시편의 최대건조단위중량과 함수비가 완벽하게 일치하지는 않는 상태다. 따



라서 그림 1에 나타난 차이가 모두 시편 성형기법에 따른 영향이라고 고려할 수는 없고, 각 시편의 다짐도와 함수비 차이 영향을 별도로 고려하여야 한다.

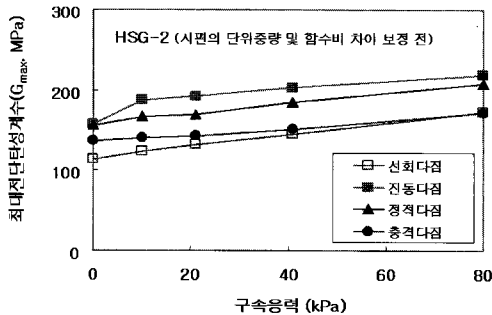
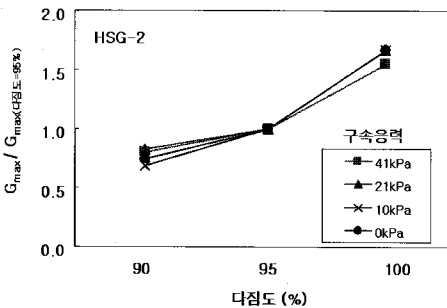
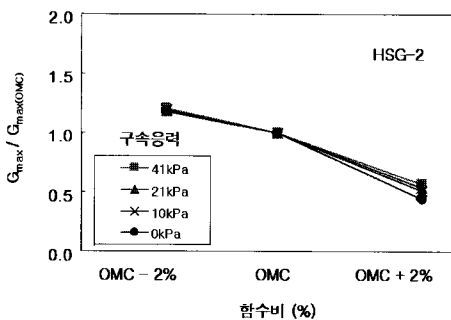


그림 1. 시편 성형기법에 따른 최대전단탄성계수 변화 일례 (HSG-2)

최대탄성계수에 대한 함수비 및 다짐도의 영향을 그림 2에 일례로 나타내었다. 다짐도가 증가할수록, 함수비가 감소할수록 탄성계수가 증가함을 확인할



(a) 최대탄성계수에 대한 다짐도의 영향



(b) 최대탄성계수에 대한 함수비의 영향

그림 2. 탄성계수에 대한 다짐도 및 함수비 영향 일례(HSG-2)

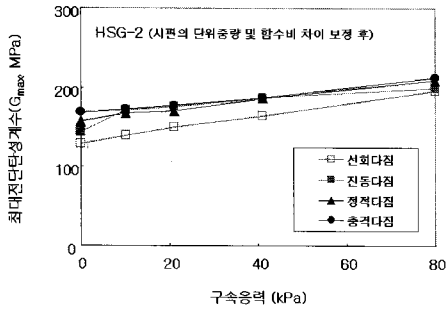
수 있다. 또한 그 영향정도는 구속응력의 크기에 따라서 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 구속응력에 따른 영향정도 차이를 무시하고 다짐도 및 함수비의 영향을 2차함수 형태로 회귀분석하여 영향정도를 평가하였다. 각각의 시료에 대하여 평가된 다짐도 및 함수비 영향정도를 고려하여 각각의 시편 성형기법으로 성형된 시편의 탄성계수를 95% 다짐도 및 최적함수비에서의 값으로 보정하여 다짐도 및 함수비 영향에 의한 차이를 보정하였다.

그림 3은 시편 성형방법에 따라 성형된 시편의 최대건조단위중량과 함수비 차이의 영향을 보정한 후 동일한 다짐도 및 함수비 조건(95%다짐도 및 OMC)에서 시편 성형방법에 따른 최대탄성계수를 비교한 것이다. 그림 3에 나타난 바와 같이, 국내 노상토의 경우 시편 성형방법에 따라서 탄성계수가 영향 받음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 적용한 시편 성형기법에 따른 탄성계수의 평균적인 최대편차는 16.8%로 나타났다. 따라서 설계입력변수 결정 시험에서 어떠한 시편 성형기법을 할 것인가는 매우 중요함을 확인할 수 있다.

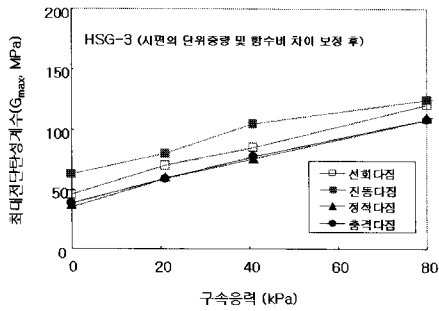
일반적으로 노상토 재료의 다짐 시공에 사용되는 로울러의 특성은 선화다짐과 유사하고, 보조기층 재료의 다짐은 진동다짐과 유사하다. 따라서 노상토의 경우에는 선화다짐을 기준으로 보조기층 재료의 경우에는 진동다짐을 기준으로 다짐방법에 따라 평가되는 최대탄성계수의 비를 그림 4에 나타내었다.

그림 4를 살펴보면, 시편 성형기법의 영향은 낮은 구속응력에서 크고 구속응력이 증가하면서 그 차이가 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 시편 성형기법에 따른 입자배열구조의 차이에 의한 영향이 구속응력이 증가하면서 줄어들고 있음을 나타낸다. 따라서 매우 높은 구속응력에서는 시편 성형기법에 따른 차이는 매우 작을 것으로 예상된다. 그러나, 노상토가 경험하는 구속응력범위는 본 연구에서 적용한 응력범위 이내에 있고, 이러한 구속응력범위에서는 시편 성형기법의 영향을 무시하기 힘들다.

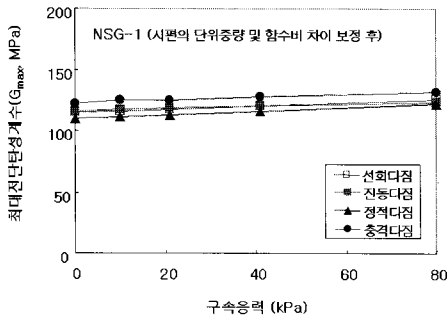
전체적으로 진동다짐에 의한 방법으로 성형된 시



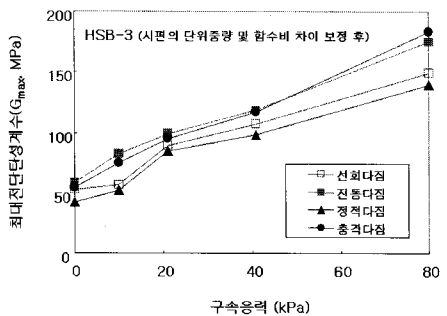
(a) HSG-2



(b) HSG-3

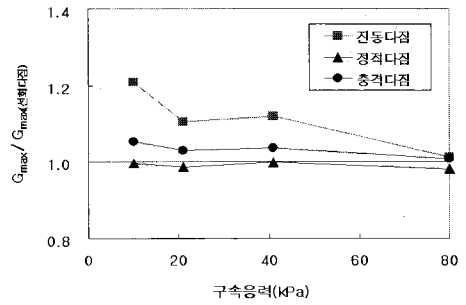


(c) HSG-1

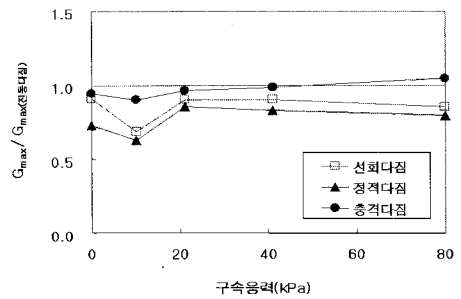


(d) HSB-3

그림 3. 다짐도 및 함수비 차이 영향을 고려한 시편 성형방법에 따른 최대탄성계수 변화



(a) 노상토, 선회다짐 기준



(b) 보조기층, 진동다짐 기준

그림 4. 시편 성형기법에 따른 최대탄성계수의 상대적 비교

편의 탄성계수가 가장 큰 것으로 나타났고, 그 다음으로 충격다짐, 선회다짐, 정적다짐의 순으로 나타났다. 노상토의 경우 선회다짐과 정적다짐이 매우 유사한 결과를 보이고 있으며 충격다짐의 경우에 선회다짐과의 차이가 5.19%로 매우 작음을 확인할 수 있다. 입상보조기층 재료의 경우에는 진동다짐과 충격다짐이 가장 유사한 탄성계수를 얻는 것으로 나타났고 그 차이는 평균 5.14%로 나타났다.

노상토의 경우 선회다짐이 실제 현장다짐조건과 가장 유사할 것으로 생각되나, 시편 성형이 까다롭고 고가의 시편 성형장비가 필요한 단점이 있다. 충격다짐은 일반적인 기술자들에게 매우 친숙하여 실무 적용성이 우수할 뿐 아니라 선회다짐과의 차이가 5.2% 이내에 들어 설계입력물성치 결정을 위한 시편성형기법으로서 가장 합당한 것으로 판단된다. 입상보조기층 재료의 경우에는 모델시료 사용과 하나 뿐인 시험시료 수의 제약이 있지만, 동적다짐과 충격



다짐의 차이 역시 5.2% 이내에 있고, 동적다짐기법은 시편 성형과정에 매우 큰 소음을 유발하는 단점이 있음을 고려하면, 노상토와 같이 충격다짐이 설계입력물성치 결정을 위한 시편 성형 기법으로서 가장 합당한 것으로 생각된다.

## 5. 시편 성형기법에 따른 정규화탄성계수 감소곡선

노상토 및 보조기층재료의 탄성계수는 흙의 종류, 건조단위중량, 함수비, 구속응력, 하중주파수 등 다양한 요소의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Kweon 등, 2000). 또한 탄성계수의 크기는 시편 성형기법의 영향을 받음을 본 연구를 통하여 확인하였다.

한편 노상토 재료의 정규화탄성계수 감소곡선은 시료의 교란유무, 하중주파수, 함수비 등에 무관하게 일정한 값을 나타내며 구속응력의 영향을 다소 받는 것으로 알려져 있다. 그림 5는 동일한 구속응력에서 결정된 시편 성형기법에 따른 정규화탄성계수 감소곡선 일례를 나타낸 것이다. 그림 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 시편 성형기법에 따른 정규화탄성계수 감소곡선은 매우 좁은 범위에서 서로 유사한 값으로 결정됨을 알 수 있다. 따라서 정규화탄성계수 감소곡선은 시편 성형기법에 무관하게 결정되는 것으로 판단된다.

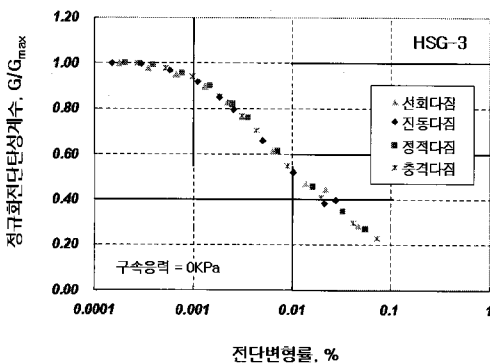


그림 5. 시편성형기법에 따른 정규화 전단탄성계수 일례

## 6. 결론

본 연구에서는 국내에서 사용되는 3종의 노상토와 1종의 보조기층재료에 대해 시편 성형기법에 따른 변형특성을 공진주시험을 통하여 평가하였다. 본 연구에서는 시편 성형기법으로 선화다짐, 정적다짐, 충격다짐, 진동다짐을 적용하였다. 각각의 성형기법으로 성형된 시편의 건조단위중량과 함수비 차이에 의한 영향은 다짐도와 함수비에 따른 공진주시험결과를 이용하여 보정하였다. 시험결과를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 국내 노상토의 경우 시편 성형방법에 따라서 탄성계수가 영향 받음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 적용한 시편의 경우 성형기법에 따른 탄성계수의 평균적인 최대편차는 16.8%로 나타났다. 따라서 설계입력물성치 결정시험에서 어떠한 시편 성형기법을 할 것인가는 매우 중요함을 확인할 수 있다.
- 2) 시편 성형기법의 탄성계수에 대한 영향은 낮은 구속응력에서 크고 구속응력이 증가하면서 그 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.
- 3) 평균적으로 진동다짐에 의한 방법으로 성형된 시편의 탄성계수가 가장 큰 것으로 나타났고 그 다음으로 충격다짐, 선화다짐, 정적다짐의 순으로 나타났다.
- 4) 노상토의 경우 선화다짐과 정적다짐이 매우 유사한 결과 보이고 있으며 충격다짐의 경우에도 선화다짐과의 차이가 5.2% 이내로 매우 작음을 확인할 수 있다. 충격다짐은 일반적인 기술자들에게 매우 친숙하여 실무적용성이 우수할 뿐 아니라 선화다짐과의 차이가 5.2% 이내에 들어 설계입력물성치 결정을 위한 시편 성형기법으로서 가장 합당한 것으로 판단된다.
- 5) 시편 성형기법에 따른 정규화탄성계수 감소곡선은 매우 좁은 범위에서 결정되었으며, 정규화탄성계수 감소곡선에 대한 시편 성형기법의 영향은 공학적 관점에서 무시 가능한 수준으로 판단된다.





## 감사의 글

본 연구는 Korea Pavement Research Program (KPRP) 연구결과의 일부로, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

건설교통부 (2006), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, KPRP-G-06.

권기철 (2000), “국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델”, 대한토목학회 논문집, 제30권, 제 3-D호, pp. 301-310.

김동수, 서원석, 권기철 (2005) “반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가” 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제6호, pp. 67-79.

김영목, 임현경, 서승중 (2004) “충남지역 화강 풍화토의 성토시 다짐조건에 따른 전단 특성에 대한 실험적 연구”. 대한토목학회 2004년도 정기 학술대회 논문집 pp. 2496-2501.

류기현, 박영목, 우문정, 김재석 (1999), “정적다짐법에 의한 노반재의 특성평가”, 대한토목학회 1999년도 학술발표회 논문집(II), pp. 327-330.

박승목, 이관호 (2003), “다짐방법에 따른 노상토의 설계입력변수 특성 연구”, 대한토목학회논문집 제23권 제4D호 pp. 439-448.

차민경 (2005), “선화다짐기를 이용한 국내 노상토의 다짐특성 평가 연구”, 경성대학교 토목공학과 석사학위논문.

최준성, 서주원 (2003) “아스팔트 포장하부구조 층모델 결정에 관한 연구” 한국도로포장공학회논문집, 제5권 4호, pp. 13-22.

AASHTO (1982), “Standard Method of Test For Resilient Modulus of subgrade Soils, AASHTO T-294-82”, AASHTO, Washington D.C.

AASHTO (1986), “AASHTO Guide for Design of Pavement Structure”, AASHTO, Washington D.C.

AASHTO (1992), “Resilient Modulus of Unbounded Granular Base/Subbase Materials and subgrade Soils-SHRP Protocol p-46 AASHTO T-294-921”, AASHTO, Washington D.C.

AASHTO (2002) “AASHTO Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures”, AASHTO, Washington D.C.

AASHTO (2002), “Standard Method of Test For Resilient Modulus of subgrade Soils, AASHTO T-309-99”, AASHTO, Washington D.C.

Butcher, M. (1997), “Determining Gyratory Compaction Characteristics using the Servopac Gyratory Compactor”, TRB

Kweon, G. C and Kim, D. S (2000), “Deformational Characteristics of Subgrade Soils in Korea”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 83-90.

Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991), “Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests,” Key Note Lecture for Session No. 1, *The 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, December.

접 수 일: 2007. 6. 27  
 심사 일: 2007. 7. 19  
 심사완료일: 2007. 9. 19