

성토재료의 조립자율 보정에 의한 다짐도 평가에 관한 연구

A Study on Estimation of Degree of Compaction by Correction for Coarse Particle Ratio of Fill Material

유재원¹, 임종철^{2*}, 서민수³, 김창영⁴, 강상균⁵

Jae-Won Yoo¹, Jong-Chul Im^{2*}, Min-Su Seo³, Changyoung Kim⁴, Sang-Kyun Kang⁵

¹Member, Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

²Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

³Non-Member, Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

⁴Non-Member, Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

⁵Non-Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

ABSTRACT

The degree of compaction of embankments is generally measured using the sand replacement method or a soil density gauge. However, these methods include coarse particles, which are relatively large. The degree of compaction is overestimated if the in-situ soil density is simply compared with the density obtained from a Proctor compaction test (KS F 2312, 2001), because the density of coarse particles is higher than that of soil. However, there is no recommended correction for the coarse particle ratio in Korea, thus intentionally increasing the degree of compaction for structures to which large loads are applied or for which compaction is critical. Here, a correction considering the Korean Proctor compaction test and the difference between the maximum allowable particle sizes was recommended after corrections for coarse particle ratios in other countries were collected and analyzed. The degree of compaction was re-estimated by applying the recommended correction to the results of both Proctor compaction and sand replacement tests. The degree of compaction without the correction of coarse particle ratio was overestimated, because the re-estimated degree of compaction decreased as the coarse particle ratio increased. The relatively accurate results obtained from the field application of the correction will offer long-term cost savings due to reduced maintenance fees during operation.

요 지

현장에서 일반적으로 성토체의 다짐도 판정을 위해 사용되는 방법으로 들밀도시험이나 밀도계에 의한 측정 등이 사용되는데 이 방법들을 적용시 성토재료에 입경의 크기가 비교적 큰 조립자가 일정량 포함되어 있다. 조립자는 밀도가 흙 보다 높기 때문에 조립자를 고려하지 않고 현장에서 측정된 밀도를 실내다짐시험(KS F 2312, 2001)에서 얻은 최대건조밀도와 비교하여 다짐도 만족 여부를 판단하게 되면 다짐도는 과대평가 된다. 하지만 현재 우리나라 규정에는 조립자율에 따른 보정 방법이 명확하게 제시되어 있지 않아 큰 하중이 작용하거나 다짐이 매우 중요한 구조물 등에서는 다짐도의 기준을 더 크게 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국외의 여러 가지 조립자 보정 방법을 종합하고 분석하여 우리나라의 실내다짐시험 방법, 허용최대입경 차이 등을 고려하여 적용 할 수 있는 방법을 제안하였고, 제안된 방법에 의해 실내다짐시험과 현장에서의 들밀도시험을 수행하고 다짐도를 재평가 하였다. 그 결과 제안된 조립자 보정 방법에 의해 재산정된 다짐도는 조립자율이 높을수록 감소하여 조립자 보정을 하지 않았을 경우 다짐도는 과대평가되는 것으로 분석되었고, 조립자 보정을 통해서 산정된 다짐도를 실제 현장에 적용 할 경우, 추후 유지·보수 측면에서 더 효율적인 것으로 판단된다.

Keywords : Degree of compaction, Soil density, Coarse particle, Proctor compaction test, Maximum allowable particle size, Fill material

Received 22 Jan. 2018, Revised 4 Mar. 2018, Accepted 7 Mar. 2018

*Corresponding author

Tel: +82-51-510-2442; Fax: +82-51-518-3084

E-mail address: imjc@pusan.ac.kr (J. C. Im)

1. 서론

성토공사에서 품질관리기준은 일반적으로 성토재료의 실내다짐시험에 의한 최대건조밀도(γ_{dmax})와 현장 성토체의 건조밀도(γ_d)로부터 다짐도를 평가하는 방법을 흔히 사용하고 있고, 시방규정에 품질 및 관리기준에 대해서 명시되어 있다. 하지만 시방규정에 의한 다짐을 하더라도 상부에 건설된 구조물에 대한 지지력 부족으로 인해 다짐된 성토체에 침하나 균열이 발생하고, 도로 및 철도 노반 등에서는 외력에 의한 포장체의 파손이 발생하여 각종 사고의 원인이 되기도 한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 발생 원인에 대한 분석을 통해서 해결 방법이 제시되어야 한다. 성토재료인 흙은 흙의 종류, 최적함수비, 최대건조밀도, 다짐방법, 성토체의 강도 및 지지력 등을 고려하여야 하지만 건설현장에서 성토공사의 품질관리방법은 일반적으로 흙에 대한 기준으로 적용되어 있어 조립자가 다수 혼합되어 있을 경우 그대로 적용하기에는 어려움이 따른다.

현장에서 일반적으로 성토체의 다짐도 판정을 위해 사용되는 방법으로 들밀도시험이나 밀도계에 의한 측정 등이 사용되는데 이 방법들을 적용시 성토재료에 입경의 크기가 비교적 큰 조립자가 일정량 포함되어 있다. 조립자는 밀도가 흙 보다 높기 때문에 조립자를 고려하지 않고 현장에서 측정한 밀도를 실내다짐시험(KS F 2312, 2001)에서 얻은 최대건조밀도와 비교하여 다짐도 만족 여부를 판단하게 되면 다짐도는 과대평가 될 것이다. 이러한 문제를 해결하고자 성토재료의 조립자 혼합율, 입경 등에 따른 건조밀도의 변화에 관한 여러 연구가 진행되었다. Jeoung et al.(2016)은 기존의 실내다짐시험의 단점을 보완하는 연구를 하고자 직경 100mm 이하의 성토재료를 이용하여 실내다짐시험, 대형원형몰드 다짐시험, 물치환 현장밀도시험을 수행하였고, 그 결과를 회귀분석하여 실내다짐시험과 현장밀도시험의 상관계수를 제시하였다. Kim et al.(2009)은 지름 480mm, 높이 495mm의 원통형 몰드를 제작하여 대형다짐시험을 통한 압버력과 토사가 혼합된 성토재료의 최대건조밀도에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 분석하였다. 현재 우리나라 규정에는 조립자의 혼합율(이하 '조립자율')에 따른 보정 방법이 명확하게 제시되어 있지 않아 대부분의 현장에서 조립자에 대한 보정을 하지 않거나, 철도 노반, 댐, 공항 활주로 등과 같이 큰 하중이 작용하여 다짐이 매우 중요한 구조물 등에서는 다짐도의 기준을 더 크게

적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실내다짐시험에서의 허용최대입경을 통과하는 시료를 '흙', 체에 남는 조립분을 '조립자' 그리고 '흙'과 '조립자'가 모두 포함된 시료를 '혼합토'라고 표기하고, 국외의 여러 가지 조립자 보정 방법을 종합하고 분석하여 우리나라의 실내다짐시험 방법, 허용최대입경 차이 등을 고려하여 적용 할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 제안된 방법에 의해 실내다짐시험과 현장에서의 들밀도시험을 수행하고 다짐도를 재평가하여 조립자 보정 전·후의 결과를 비교·분석하였다.

2. 국외의 조립자 보정 사례

2.1 조립자 보정의 개요

우리나라의 실내다짐시험(KS F 2312, 2001)에서는 흙 입자의 허용최대입경이 A, C, D시험은 19mm, B, E시험은 37.5mm로 허용최대입경의 기준이 정해져 있다. 하지만 실제 현장의 성토재료는 허용최대입경을 초과하는 조립자를 포함하는 경우가 많기 때문에 실내다짐시험에서 얻은 최대건조밀도 값을 현장에서의 조립자율에 따라 보정할 필요가 있다. 따라서 국외의 여러 가지 조립자 보정 방법을 분석하여 우리나라의 실내다짐시험 방법, 허용최대입경 차이 등을 고려한 적용 가능한 방법을 제안하고자 한다.

2.2 Walker and Holtz(1951)의 조립자 보정 방법

Walker and Holtz(1951)의 식은 현재 일반적으로 가장 널리 사용되는 식으로써 혼합토가 실내다짐시험에서 허용최대입경인 4.75mm에 남는 조립자를 포함한다면 혼합토 전체의 이론적 밀도는 식 (1)과 같다고 제안하였다. 하지만 Ito et al.(1991)은 Walker and Holtz(1951)의 식을 이용하여 혼합토의 압축곡선을 추정하여 실내시험의 압축곡선과 비교한 결과, 매우 흡사하다는 결론은 도출했지만, 이 식은 물리적인 의미가 명확하지 않고, 조립자율 40% 이상에서 각각의 측정 결과들의 분산이 크게 나타나 조립자율 40% 이상의 혼합토에서는 적용할 수 없다고 판단하였다.

$$\gamma_{dt} = \frac{1}{\frac{P}{\gamma_{dr}} + \frac{1-P}{\gamma_{ds}}} \quad (g/cm^3) \quad (1)$$

여기서, γ_{dt} : 혼합토의 조립자율을 보정한 건조밀도(g/cm^3)
 γ_{ds} : 흙의 건조밀도(g/cm^3)
 γ_{dr} : 조립자의 건조밀도(g/cm^3)
 $P(= \frac{W_r}{W_s + W_r})$: 조립자율(조립자 중량 백분율, 소수로 표현)
 W_s : 흙의 건조중량(g)
 W_r : 조립자의 건조중량(g)
($P=1$ 이면 $\gamma_{dt} = \gamma_{dr}$, $P=0$ 이면 $\gamma_{dt} = \gamma_{ds}$)

2.3 영국의 조립자 보정 방법

영국의 보정 방법(Barnes, 2000)은 실내다짐시험 결과를 현장다짐시험의 결과와 직접 비교할 수 있도록 20mm 보다 큰 조립자를 포함하는 현장 성토재료에 대해서 20mm 이하의 흙을 사용하는 실내다짐시험에서 얻어진 최대건조밀도와 최적함수비에 대해 보정을 하였다. 영국의 보정 방법에서는 조립자의 함수비는 거의 없다고 가정하여 최대건조밀도와 최적함수비의 보정식을 다음의 식 (2), 식 (3)과 같이 제안하였다. 이 방법은 입도의 적용 가능한 범위가 Table 1의 입도 영역 (5)인 '20mm체 통과율이 70% 이상, 37.5mm체 통과율이 90% 이상, 63mm체 통과율이 100%'인 경우에만 사용할 수 있는 한계가 있고, 허용 최대입경이 20mm이다. 하지만 우리나라 실내다짐시험의 허용최대입경은 Table 2와 같이 시험종류에 따라 각각

19mm, 37.5mm로 영국 실내다짐시험의 허용최대입경과는 그 크기와 범위의 차이가 있다. 따라서 만약에 우리나라의 실내다짐시험에 적용을 한다면 20mm와 비슷한 19mm인 A, C, D시험에 대해서만 적용이 가능할 것으로 판단된다.

$$\gamma_{dtmax} = \frac{\gamma_{dmax}}{B + \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_{dr}}(1-B)} \quad (g/cm^3) \quad (2)$$

여기서, γ_{dtmax} : 혼합토의 조립자율을 보정한 최대건조밀도(g/cm^3)

γ_{dr} : 조립자의 건조밀도(g/cm^3)

γ_{dmax} : 흙의 최대건조밀도(실내다짐시험에서 구함, g/cm^3)

B : 37.5mm 체를 통과한 흙의 질량 백분율(소수로 표현)

$$\text{보정 } w_{opt} = \frac{B}{100} \times \text{시험 } w_{opt} \quad (3)$$

여기서, w_{opt} : 최적함수비(%)

B : 37.5mm 체를 통과한 흙의 질량 백분율(소수로 표현)

Table 1. Requirement of soil particle size for Proctor compaction tests in U.K (BS 1377-4, 1990)

Range	Percent passing by weight (%)		
	20 mm	37.5 mm	63 mm
(1)	100	100	100
(2)	95	100	100
(3)	70	100	100
(4)	70	95	100
(5)	70	90	100
(X)	< 70	< 90	< 100

Table 2. Proctor compaction tests in Korea (KS F 2312, 2001)

Type	Rammer weight, W (kg)	Rammer drop distance, h (cm)	Diameter of mold (cm)	No. of soil layers, N_d	No. of blows per layer, N_h	Soil passing sieve size (mm)
A	2.5	30	10	3	25	19.0
B			15	3	55	37.5
C	4.5	45	10	5	25	19.0
D			15	5	55	19.0
E			15	3	92	37.5

2.4 미국의 조립자 보정 방법

미국의 조립자 보정 방법(AASHTO T 224-01, 2004)은 Table 3과 같이 AASHTO T-99, T-180(2015)의 실내다짐 시험에서 A, B방법의 시험방법이 사용될 때 4.75mm체에 남는 조립자가 40% 이내인 혼합토이거나, T-99, T-180의 C, D방법의 시험방법이 사용될 때 19mm체에 남는 조립자가 30% 이내인 혼합토에 적용된다. 이 방법에 의한 혼합토의 최대건조밀도와 함수비의 보정식은 각각 식 (4), 식 (5)와 같다. 이 방법은 AASHTO T-99와 T-180의 시험이 서로 다짐층수와 다짐회수가 다르지만 동일한 식이 사용되어 허용최대입경이 같으면 조립자율에 의한 보정식을 동일하게 사용 가능한 것으로 판단된다. 하지만 4.75mm체에 남는 조립자가 40% 이내인 혼합토와 19mm체에 남는 조립자가 30% 이내인 혼합토인 경우에 대해서만 사용할 수 있는 제한사항이 있고, 우리나라 실내다짐시험(KS F 2312, 2001) 방법에서 허용최대입경이 37.5mm를 사용하는 B, E시험에 적용할 수 없고, 19.0mm인 A, C, D시험에 대해서만 적용이 가능할 것으로 판단된다.

$$\gamma_{dt} = \frac{\gamma_{ds}\gamma_{dr}}{\gamma_{ds}P + \gamma_{dr}(1-P)} \quad (g/cm^3) \quad (4)$$

여기서, γ_{dt} : 혼합토의 조립자율을 보정한 건조밀도(g/cm^3)

γ_{ds} : 흙의 건조밀도(g/cm^3)

γ_{dr} : 조립자의 건조밀도(G_{sr} (비중) $\times 1.0(g/cm^3)$; 보통 G_{sr} 은 2.6정도를 사용, g/cm^3)

$P(= \frac{W_r}{W_s + W_r})$: 조립자율(조립자 중량 백분율, 소수로 표현)

W_s : 흙의 건조중량(g)

W_r : 조립자의 건조중량(g)

($P=1$ 이면 $\gamma_{dt} = \gamma_{dr}$, $P=0$ 이면 $\gamma_{dt} = \gamma_{ds}$)

$$w_t = w_s(1-P) + w_rP \quad (\%) \quad (5)$$

여기서, w_t : 혼합토의 함수비(%)

w_s : 흙의 함수비(%)

w_r : 조립자의 함수비(대부분의 현장에서 0.02, 약 2% 정도로 추정, %)

2.5 일본의 보정 방법

일본지반공학회(Japanese Geotechnical Engineering Society, 1979)에서는 Walker and Holtz(1951)의 식을 식 (6)과 같이 수정하여 사용하고 있으며, 조립자율의 적용 범위를 30~40% 이내로 제안하였다. 조립자율의 적용 범위의 제한으로 인한 단점이 있지만, 일본지반공학회의 조립자 보정 방법에서는 실내다짐시험의 허용최대입경의 크기와는 상관없이 사용되어 허용최대입경에 대해서 범용성이 있고, 실내다짐시험 방법이 우리나라와 동일하기 때문에 우리나라에 적용하기에 적절한 것으로 판단된다.

$$\gamma_{dt} = \frac{1}{\frac{(1-P)}{\gamma_{ds}} + \frac{(1+w_r G_{sr})P}{G_{sr}\gamma_w}} \quad (g/cm^3) \quad (6)$$

여기서, γ_{dt} : 혼합토의 조립자율을 보정한 건조밀도(g/cm^3)

γ_{ds} : 흙의 건조밀도(g/cm^3)

w_r : 조립자의 함수비(소수로 표현)

G_{sr} : 조립자의 비중

γ_w : 물의 밀도(g/cm^3)

$P(= \frac{W_r}{W_s + W_r})$: 조립자율(중량 백분율, 소수로 표현, $P=0.3 \sim 0.4$ 의 범위를 적용)

$W_s = \frac{W}{1 + \frac{w}{100}}$: 흙의 건조중량(g)

Table 3. Comparison of Proctor compaction tests; KS F 2312 (2001), AASHTO T99 (2015) and AASHTO T180 (2015)

Type		Max. allowable particle size (mm)		No. of soil layers (No. of blows per layer)		
KS F 2312	AASHTO	KS F 2312	AASHTO	KS F 2312	AASHTO	
					T-99	T-180
A	A	19.0	4.75	3(25)	3(25)	5(25)
B	B	37.5	4.75	3(55)	3(56)	5(56)
C	C	19.0	19.0	5(25)	3(25)	5(25)
D	D	19.0	19.0	5(55)	3(56)	5(56)
E	-	37.5	-	3(92)	-	-

W : 흙의 습윤중량(g)

W_r : 조립자의 건조중량(g)

($P=1$ 이면 $\gamma_{dt} = \gamma_{dr}$, $P=0$ 이면 $\gamma_{dt} = \gamma_{ds}$)

3. 우리나라의 조립자 보정 방법의 제안

성토재료에 조립자율이 높을 경우 건조밀도는 상당한 차이가 나서 시방규정에 의한 다짐을 하더라도 다짐된 성토체의 품질에 문제가 발생할 수도 있다. 따라서 현장밀도 시험에서 허용최대입경 보다 큰 조립자를 제거한 후 밀도를 측정하거나, 조립자의 제거가 어려울 때는 실내다짐시험에서 허용최대입경이 37.5mm인 B, E 시험으로 다짐시험을 하는 것이 다짐도 평가시 조립자에 의해 발생하는 건조밀도의 차이를 감소시키는 방법이 될 수 있을 것이다. 하지만 이러한 방법들 역시 조립자에 대해서 고려하지 않기 때문에 오차가 포함될 수 밖에 없는 문제점이 있다.

우리나라 도로설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012; Ministry of Construction and Transportation, 1996)을 예를 들면 도로 노체 재료의 허용최대입경은 300mm 이하, 노상은 100mm 이하로 규정되어 있어 실내다짐시험의 허용최대입경 19.0mm, 37.5mm 보다 크기 때문에 현장밀도시험시 조립자 보정을 해야 하지만, 일반적으로 현장밀도시험에서 많이 사용되고 있는 들밀도시험(모래치환법에 의한 흙의 밀도시험방법, KS F 2311 (2001)에는 현장밀도시험시 조립자 보정에 대한 기준이 없다. 따라서 앞서 국외의 조립자 보정 방법을 종합하고 분석한 결과, 우리나라와 실내다짐시험 방법과 같고 허용최대입경의 크기에 상관없이 사용되는 일본지반공학회의 조립자 보정식과 같은 형태의 식 (7)과 같이 제안하였다. 여기서, 일본지반공학회 조립자 보정식에서는 흙의 건조밀도로부터 조립자율을 보정한 혼합토의 건조밀도를 산정하는 것으로 표현되어 있지만, 실제 이것은 실내다짐시험으로부터 산정된 결과를 나타내는 것이 합리적인 것으로 판단되어 최대건조밀도의 표현으로 수정하였다. 그리고 일본지반공학회에서는 조립자율을 30~40%로 제한하여 사용하지만, 조립자율이 40% 이하인 범위에서 결과들의 분산은 크지 않기 때문에 제안한 우리나라의 조립자 보정식의 조립자율 40% 이하의 범위 모두 사용 가능할 것으로 판단된다. 조립자율 40% 이상에서 사용하지 않는 이유는 Walker and Holtz(1951)의 연구에서 조립자율 40% 이상에서는 그 결과들의 분산이 크게 나타났고, 조립자율이 높

을 경우 조립자와 조립자 사이의 간극이 다 채워지지 않기 때문에 조립자율이 40% 이상인 경우 성토재료로서 부적합할 것으로 판단된다. 현장 다짐도의 만족 여부는 기존의 다짐도 평가방법인 식 (8)을 이용하여 판단한다.

$$\gamma_{dtmax} = \frac{1}{\frac{1-P}{\gamma_{dsmax}} + \frac{(1+w_r G_{sr})P}{G_{sr} \gamma_w}} \quad (g/cm^3) \quad (7)$$

여기서, γ_{dtmax} : 혼합토의 조립자율을 보정한 최대건조밀도(g/cm^3)

γ_{dsmax} : 흙의 최대건조밀도(실내다짐시험에서 산정, g/cm^3)

w_r : 현장 조립자의 함수비(소수로 표현, 0.02 권장, 정확한 산정을 위해 시험치를 사용)

G_{sr} : 현장 조립자의 비중(2.6 권장, 정확한 산정을 위해 시험치를 사용)

γ_w : 물의 밀도($1.0g/cm^3$)

$P = \frac{W_r}{W_s + W_r}$: 조립자율(중량 백분율, 소수로 표현). $P \leq 0.4$ 범위에 한해서 적용

$W_s = \frac{W}{1 + \frac{w}{100}}$: 현장시험재료 중 흙의 건조중량(g)

W : 현장시험재료 중 흙의 습윤중량

w : 현장시험재료 중 흙의 함수비

W_r : 현장시험재료 중 조립자 건조중량(허용최대입경 체에 남는 시료 건조 후 측정, g)

$$\gamma_{dt} \geq R \cdot \gamma_{dtmax} : OK \quad (8)$$

$$\gamma_{dt} < R \cdot \gamma_{dtmax} : N.G \implies \text{추가 다짐 실시}$$

여기서, R : 기준 다짐도

γ_{dt} : 현장밀도시험에서 측정된 혼합토의 건조밀도(g/cm^3)

γ_{dtmax} : 혼합토의 조립자율을 보정한 건조밀도(g/cm^3)

4. 조립자 보정의 결과 및 분석

본 연구에서는 실내다짐시험(KS F 2312, 2001)과 들밀

도시험(KS F 2311, 2001)을 실시하고, 앞서 제안한 조립자 보정 방법을 적용하여 다짐도 변화를 비교·분석하였다.

에서 각 구간의 성토공사에 사용된 혼합토로써 물성값은 다음 Table 4와 같고, 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다.

4.1 실내다짐시험 및 들밀도시험

4.1.1 지반재료

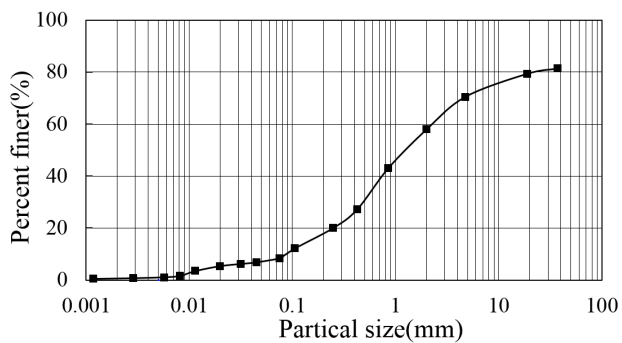
시험에 사용된 지반재료는 ‘국도 7호선 확장 공사’ 현장

4.1.2 실내다짐시험

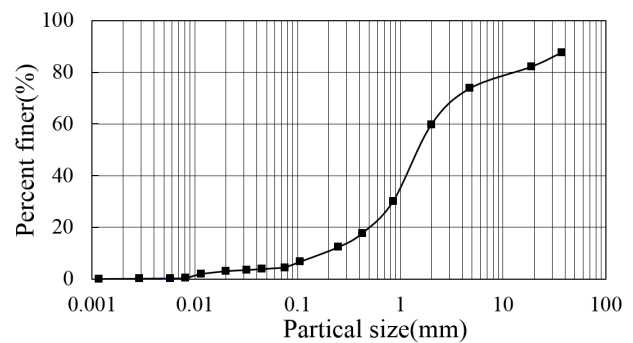
실내다짐방법(KS F 2312, 2001)은 현장의 각각 성토공사 종류를 시방 규정에 따라 도로구간의 노체와 노상은 A, D다짐시험, 보강토 옹벽구간의 뒤채움부는 E다짐시험을

Table 4. Physical properties of soil

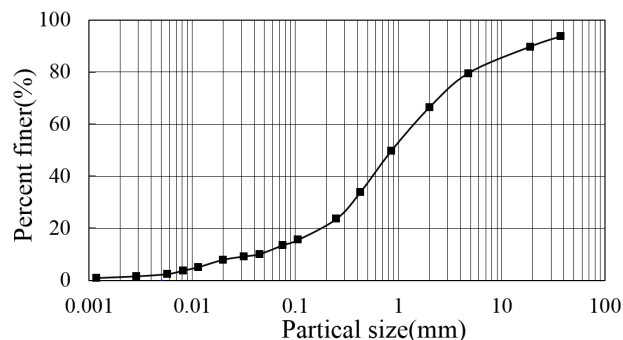
Sample location Geotechnical properties	Sta. 0+20~0+80	Sta. 0+400~0+520	Section of reinforced earth retaining wall
USCS	SW-SM	SM	SW
Water content(%)	13.7	11.3	10.5
Liquid limit, LL(%)	32.44	40.26	N,P
Plastic limit, PL(%)	27.10	32.77	N,P
Plasticity index, PI	5.34	7.49	-
Specific gravity, Gs	2.648	2.651	2.652
D10	0.085	0.044	0.17
D30	0.490	0.360	0.850
D50	1.220	0.840	1.480
D60	2.300	1.450	2.050
Uniformity coefficient	48.89	32.95	12.06
Coefficient of curvature	2.43	2.03	2.07
Gravel and sand (%)	91.77	86.52	95.51
Silt and clay (%)	8.23	13.48	4.49



(a) Sta. 0+20~0+80



(b) Sta. 0+400~0+520

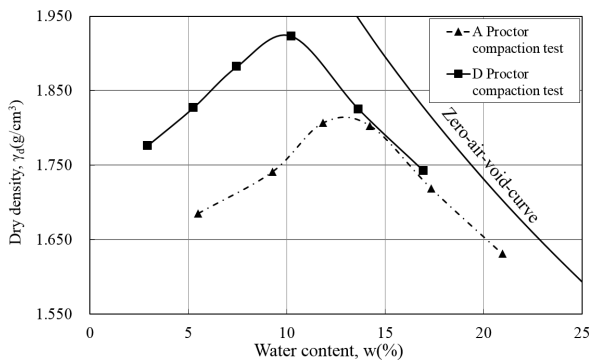


(c) Section of reinforced earth retaining wall

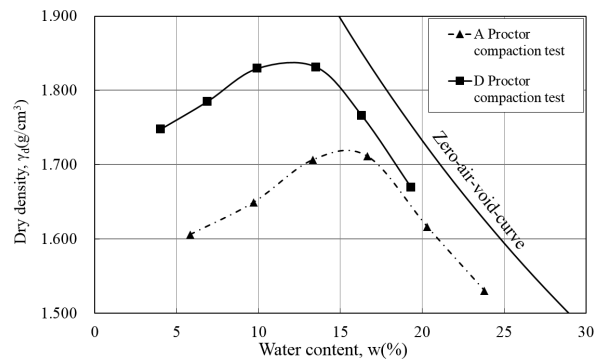
Fig. 1. Particle-size distribution curves of three samples

Table 5. Results of Proctor compaction tests (KS F 2312, 2001)

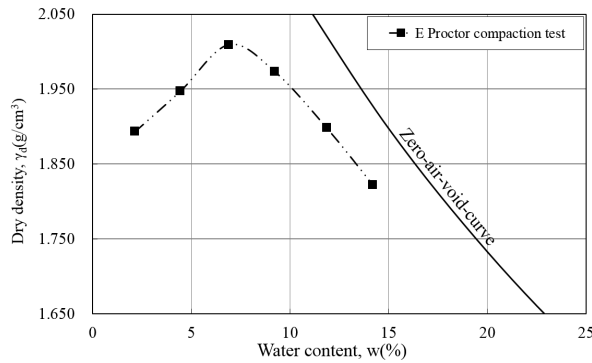
Location	Construction type	USCS	Compaction type	Optimum water content, w_{opt} (%)	Maximum dry density, γ_{dmax} (g/cm^3)
Sta. 0+20~0+80	Road bed	SW-SM	A	13,10	1,814
	Subgrade		D	9,80	1,924
Sta. 0+400~0+520	Road bed	SM	A	15,30	1,719
	Subgrade		D	12,10	1,837
Section of reinforced earth retaining wall	Backfill	SW	E	7,30	2,010



(a) Sta. 0+20~0+80



(b) Sta. 0+400~0+520



(c) Section of reinforced earth retaining wall

Fig. 2. Result of Proctor compaction tests (KS F 2312, 2001)

Table 6. Results of sand replacement tests

Location	Construction type	Dry density, γ_{ds} (g/cm^3)				
		1	2	3	4	5
Sta. 0+20~0+80	Road bed	1,679	1,663	1,673	1,669	1,655
	Subgrade	1,859	1,871	1,865	1,873	1,883
Sta. 0+400~0+520	Road bed	1,605	1,597	1,585	1,576	1,602
	Subgrade	1,787	1,802	1,798	1,793	1,774
Section of reinforced earth retaining wall	Backfill	1,934	1,943	1,958	1,928	1,949

실시하였다. 최적함수비와 최대건조밀도의 결과를 Table 5와 같이 정리하였고, Fig. 2와 같이 다짐곡선으로 나타내었다.

4.1.3 들밀도시험

현장밀도시험은 KS F 2311(2001)의 ‘모래치환법에 의한 흙의 밀도시험방법’인 들밀도시험을 각각의 구간에서 5개소씩 실시하고, 그 결과를 Table 6과 같이 정리하였다.

Table 7. Corrected maximum dry density with correction for coarse particle ratio(allowable maximum particle size: road bed 19 mm, subgrade 37.5 mm, backfill for reinforced earth retaining wall 37.5 mm)

Content	Uncorrected maximum dry density, $\gamma_{dsmax}(g/cm^3)$	Ratio of oversize particles, P					Corrected maximum dry density, $\gamma_{dtmax}(g/cm^3)$				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Sta.0+20~0+80 Road bed	1,814	0.16	0.10	0.15	0.14	0.18	1,892	1,866	1,892	1,885	1,906
Sta.0+20~0+80 Subgrade	1,924	0.05	0.08	0.06	0.10	0.08	1,945	1,960	1,949	1,966	1,958
Sta.0+400~0+520 Road bed	1,719	0.11	0.13	0.13	0.14	0.11	1,777	1,791	1,790	1,794	1,778
Sta.0+400~0+520 Subgrade	1,837	0.10	0.10	0.07	0.09	0.06	1,887	1,885	1,872	1,880	1,867
Section of reinforced earth retaining wall	2,010	0.24	0.32	0.23	0.31	0.27	2,103	2,138	2,099	2,132	2,116

Table 8. Change of degree of compaction after correction for coarse particles(Requirement for degree of compaction: min. 90% for road bed, min. 95% for subgrade, min. 95% for section of reinforced earth retaining wall)

Content	Uncorrected degree of compaction, $\frac{\gamma_{ds}}{\gamma_{dsmax}} \times 100$ (%)					Corrected degree of compaction, $\frac{\gamma_{dt}}{\gamma_{dtmax}} \times 100$ (%)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Sta.0+20~0+80 Road bed	92.56	91.68	92.23	92.01	91.23	88.74	89.12	88.42	88.54	86.83
Sta.0+20~0+80 Subgrade	96.62	97.25	96.93	97.35	97.87	95.58	95.46	95.69	95.27	96.17
Sta.0+400~0+520 Road bed	93.37	92.90	92.20	91.68	93.19	90.32	89.17	88.55	87.85	90.10
Sta.0+400~0+520 Subgrade	97.28	98.09	97.88	97.60	96.57	94.70	95.60	96.05	95.37	95.02
Section of reinforced earth retaining wall	96.22	96.67	97.41	95.92	96.97	91.96	90.88	93.28	90.43	92.11

4.2 조립자 보정 결과

본 연구에서 제안된 식 (7)에 의한 조립자 보정방법을 적용하여 실내다짐시험의 최대건조밀도를 보정한 결과를 Table 7과 같이 정리하였다. 결과를 보면, 조립자를 고려한 보정된 최대건조밀도가 기존의 최대건조밀도에 비해서 조립자율이 커짐에 따라 현장에서 도달해야 하는 최대건조밀도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 3 과 같이 조립자율과 보정하여 증가된 최대건조밀도를 실내다짐에서 획득한 최대건조밀도로 나눈 최대건조밀도비의 관계 그래프로 나타내면 조립자율이 증가함에 따라 경향은 거의 선형으로 비례하여 증가하는 것으로 나타나지만, 조립자율이 0.2 이후의 범위에서는 또 다른 선형모델의 형태로 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 조립자를 보정하기 전·후의 다짐도를 Table 8과 같이 정리하였다. 여기서, Sta. 0+20~0+80의 경우를 예를 들면, 노체의 다짐도 기준이 실내다짐시험 A다짐의 90%로 조립자 보정

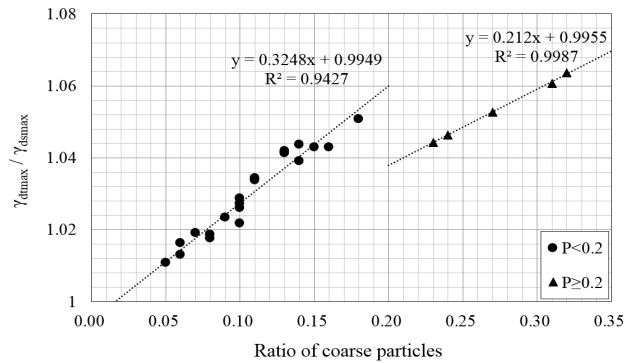


Fig. 3. Corrected maximum dry density normalized with uncorrected maximum dry density($\gamma_{dtmax}/\gamma_{dsmax}$) relative to ratio of coarse particles(P)

을 하지 않고 다짐도를 산정하였을 경우 5개소 전부 다짐도는 90%이상으로 모두다 만족하는 것으로 나타났지만, 조립자를 보정한 다짐도 만족여부를 판단한 결과 모두 90% 미만으로 요구하는 다짐도를 만족하지 못하는 것으로 분석되어 다짐이 더 필요할 것으로 판단된다. 나머지의

시험종류에서도 조립자를 보정함으로써 다짐도를 만족하지 못하는 구간이 발생하여 조립자율을 보정하고 산정한 다짐도는 보정하지 않았을 경우와 비교하여 감소하는 것으로 나타나 조립자율이 높을 경우 기존의 방법으로 산정된 다짐도는 과대평가되는 것으로 분석되었다. 또한, 일본 지반공학회에서 사용하고 있는 조립자 보정 방법 방법은 조립자율 0.3이하에서는 조립자에 의한 영향이 크지 않아 조립자율의 범위를 0.3~0.4로 제안하고 있지만, 조립자율이 0.3이하의 결과에서 Fig. 3과 같이 조립자율에 따른 최대건조밀도비의 차이가 발생하기 때문에 시험에 적용할 조립자율의 범위는 0.3이하를 모두 포함한 0.4이하가 적절할 것으로 판단된다. 이와 같이 조립자 보정 방법을 적용하여 다짐도를 비교하면 기존의 산정방식에 비해 더 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 국외의 여러 종류의 조립자 보정 방법을 분석하여 다짐시험 방법의 차이 등을 고려하여 우리나라에 적용할 수 있는 조립자 방법을 제안하였다. 또한, 제안된 방법에 의해 실내다짐시험과 현장에서의 들밀도시험을 수행한 결과를 통해 다짐도를 비교·분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 국내의 실내다짐시험(KS F 2312, 2001)의 결과를 이용할 수 있도록 Walker and Holtz(1951)의 식을 수정하여 다음의 식을 제안하였다.

$$\gamma_{dtmax} = \frac{1}{\frac{1-P}{\gamma_{dsmax}} + \frac{(1+w_r G_{sr})P}{G_{sr} \gamma_w}} \quad (g/cm^3)$$

- (2) 제안된 조립자 보정 방법에 의해 재산정된 다짐도는 조립자율이 높을수록 감소하여 조립자 보정을 하지 않았을 경우 다짐도는 과대평가되는 것으로 분석되었다.
- (3) 조립자 보정 방법을 적용하는 것이 실제 성토재료의 물리적 역학적 특성을 더 잘 반영하고 있어, 성토재료의 허용최대입경이 실내다짐시험 보다 큰 재료가 포함되어 있을 경우 조립자 보정을 하는 것이 조립자 보정을 하지 않은 경우와 비교하여 더 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것이며, 조립자 보정을 통해서 산정된 다짐도를 실제 현장에 적용 할 경우, 추후 유지·보수

측면에서 더 효율적인 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

References

1. AASHTO T99 (2015). *Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D. C.
2. AASHTO T180 (2015). *Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D. C.
3. AASHTO T224-01 (2004), *Standard Method of Test for Correction for Coarse Particles in the Soil Compaction Test*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D. C.
4. Barnes, G. E. (2000), *Soil Mechanics-Principles and Practiced*, 2nd Ed., Palgrave, p.463.
5. BS 1377-4 (1990), *Compaction-related tests*, British Standards, The United Kingdom.
6. Ito, M., Ohta, H., Ishiguro, T. and Yonetani, S. (1991), "Pre-compaction Pressure and Strength of Compacted Soils-Gravel Mixture", *Proceedings of the Society of Civil Engineers*, No. 439/3-17, pp.27-36. (in Japanese)
7. Japanese Geotechnical Engineering Society (1979), *Soil Testing Act*, 2nd revised edition, pp.5.1.16-5.1.18. (in Japanese)
8. Jeoung, J. H., Ryu, S. H., Choi, D. T., Park, K. S. and Hwang, S. P. (2016), "The Study of Compaction Characteristics of Cataclasite Fill Material using Large and Standard Compaction Tests", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.26, NO.4, pp.439-445.
9. Kim, D. S., Park, S. Y., Song, J. W., Kim, S. I., and Song, J. J. (2009), "A Study on the compaction characteristics of crushed rock-soil mixture for railway subgrade" *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.12, No.2, pp.183-189. (in Korean)
10. KS F 2312 (2001). *Test method for soil compaction using a rammer*, Korean Standards Association, Seoul, South Korea. (in Korean)
11. KS F 2311 (2001). *Test method for soil density by the sand replacement method*, Korean Standards Association, Seoul,

- South Korea. (in Korean)
12. Ministry of Construction and Transportation (1996), *Road Design Standard*, Ministry of Construction and Transportation, Seoul, South Korea, p.80. (in Korean)
 13. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), *Road construction Design Standard*, Korean Road Traffic Association, Seoul, South Korea, pp.4-22. (in Korean)
 14. Walker, F. C. and Holtz, W. G. (1951), "Control of Embankment Material by Laboratory Testing," *Proc. ASCE*, Vol.77, No.108, pp.1-25.