

최대상대밀도 산정 간편법 제안을 위한 실험연구

An Experimental Study for Suggestion of Simple Method of Determining the Maximum Relative Density

이 종 진¹ Lee, Jong-Jin

김 명 모² Kim, Myong-Mo

이 승 현³ Lee, Seung-Hyun

김 병 일⁴ Kim, Byoung-Il

Abstract

Although the relative density is an important factor showing mechanical properties of granular soils, the methods for its estimation have not been satisfactorily standardized. Many researchers have proposed various methods to determine max. and min. dry density, but the results, especially for max. dry density, show significant differences. In this study, a simple and practical method of evaluating the max. relative density was proposed, which could give reliable results in comparison with conventional methods. The experiment was carried out by varying the number of blows and the layers of the sample for each mold and the results were compared with those of Bowles method.

요 지

상대밀도는 사질토의 역학적 특성을 나타내는 중요한 요소 중의 하나이지만 아직까지도 최대 및 최소 상대밀도를 결정하는 방법이 명확하게 규정되지 않았다. 최대 및 최소상대밀도를 결정하는 방법은 많은 학자들에 의해 연구되었으나, 기존의 방법들은 시간과 노력이 많이 소요될 뿐만 아니라, 특히 최대상대밀도는 실험방법에 따라서 상당한 차이를 보여주고 있다. 이 연구에서는 기존 방법으로 구한 최대상대밀도와 큰 오차를 보이지 않으면서도 간편하고 실질적으로 이용하기 편리한 간편법을 제안하고자 한다. 실험은 타격수와 층수를 달리해 가면서 작은 몰드를 사용하여 실시하였으며, 실험결과를 Bowles 방법과 비교하였다.

Keywords : Maximum relative density, Simple method, Bowles method, Small mold

1. 서 론

사질토에 있어서 밀도 또는 간극비가 전단강도를 비롯한 흙의 역학적 성질을 지배하는 중요한 요소임은 일반적으로 확인되고 있다. 그러나 밀도나 간극비는 절대적인 수치로서, 그 값으로 직접 흙의 역학적 상태와 관련시키기는 어렵다. 사질토의 역학적 상태를 정량적으로 표현하기 위해 현재의 상태가 그 흙의 가장 잘 다져

진 상태(최대상대밀도)와 가장 느슨한 상태(최소상대밀도) 사이의 어느 정도인가를 퍼센트(%)로 나타내는 상대밀도가 사용되고 있다(Lambe & Whitman, 1979).

현재까지 최대 및 최소상대밀도를 산정하는 방법들이 많이 연구되어 실험법이 매우 다양하나 실험방법에 따라 차이가 크며 아직까지 실험방법이 표준화되지 않았다. 국내의 한국공업규격(2004)에 규정된 방법은 ASTM에서 1969년에 정한 방법(ASTM D2049-69)과 거의 유

1 정희원, 한국수자원공사 단지사업처 차장 (Member, Assistant Manager, Dept. of Land Project, Korea Water Resources Corporation)

2 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

3 정희원, 선문대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., SunMoon Univ.)

4 정희원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., MyongJi Univ., bikim@mju.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

사하며, 또한 ASTM은 1983년에 개량된 방법(ASTM D4253-83 & D4254-83)을 새로 규정한 실정이다.

그러므로 이 연구에서는 최대상대밀도를 산정하는 보다 간편한 방법을 새롭게 제안하고자 기초적인 실험을 수행하였다. 기존에 발표한 연구(권, 1986)에 의하면 상하진동방식으로 에너지를 가하는 ASTM 방법에 의한 최대상대밀도보다 수평타격으로 에너지를 가하는 Bowles 방법이 더 큰 값을 준다고 하며, 따라서 이 연구에서는 최대상대밀도 산정을 위해서 좀 더 큰 상대밀도를 얻을 수 있는 수평타격 방식으로 실험을 수행하였다. 또한 간편성과 앞으로 이루어져야 할 기계화의 용이성을 위하여 상당히 작은 몰드를 사용하였으며, 구속하중도 가하지 않았다.

2. 최대 및 최소 상대밀도 실험법

현재까지 제안된 최대 및 최소밀도의 실험법은 표 1 및 2와 같다. 표에 있는 방법 이외에도 피크노미터(pycnometer)방법(British Standard 812, 1975), 레이닝

(raining)방법(Walker & Whitaker, 1967) 등이 있고, 현장에서의 표준관입시험(Terzaghi & Peck, 1967 ; 김상규, 2004)에 의해서도 추정할 수 있다. 표 1과 2에서 보는 바와 같이 최대상대밀도 실험법은 매우 다양하나 최소상대밀도 실험법은 “C”방법(즉, 용기에 시료를 천천히 떨어뜨리는 방법)이 대부분을 차지하고 있다. 표 1 및 2에서 분류기호의 설명은 다음과 같다.

- A : 시료자체에 외력을 직접 가하는 방법
- B : 시료를 채운 용기에 외력을 가하는 방법
- C : 용기에 시료를 천천히 떨어뜨리는 방법
- D : 시료를 반전시키는 방법
- E : 떨면서 끌어올리는 방법
- a : 용기의 체적을 일정하게 하고, 시료의 질량을 재는 방법
- b : 시료의 질량을 정해두고 용기에 담긴 시료의 체적을 재서 구하는 방법

표 1. 최대상대밀도의 실험방법(日本土質工學會, 1979)

분류	용기	진동(또는 타격)	재하 유무	주요조작 및 조건	제안자
A-a	표준몰드	공기 또는 전기식 해머	없음	3층, 각 층마다 15분간 작동	Kolbuszewski (1918)
	표준몰드 또는 (CBR몰드)	Kang형 래머	없음	3층, 각 층마다 1.5분(3분) 작동	Akroyd (1957)
	CBR몰드	콘크리트용 봉상의 바이브레이터	없음	약 5분 작동	北郷, 木崎 (1959)
B-a	금속제 원관	용기외벽에 바이브레이터 부착	없음	1분 작동	Jones (1958)
	원관 용기	나무망치	0.043 (kgf/cm ²)	3층, 각 층마다 측벽을 50회 연타	小田, 鈴木 (1971)
	스테인레스 용기	나무봉	없음	12층, 각 층 방향당 5회 합계 40회 (전 8 방향) 타격	畑中, 陶野 (1974)
B-b	금속제 몰드	진동대	0.141 (kgf/cm ²)	3600rpm으로 8분간 상하로 진동시킴	ASTM (1969)
	몰드 (5~10cm 지름)	캠에 의한 낙하장치	0.032~0.066 (kgf/cm ²)	캠에 의하여 몰드 전체를 1cm 높이에서 매초 1회의 비율로 900회 낙하	三笠, 高田, 望月 (1970)

표 2. 최소밀도의 실험방법(日本土質工學會, 1979)

분류	용기	주입기구	주요조작 및 조건	제안자
C-a	-	깔때기	자유낙하고 ≒ 13mm	Peck, Hanson, Thornburn(1953)
	용기지름은 시료 최대 직경의 약 8배보다 큰 것	깔때기	낙하고 ≒ 0mm	Burmister(1958)
	CBR몰드	비이커	낙하고 ≒ 0mm	北郷, 木崎(1959)
	다짐용 표준몰드	스푼	-	Hutchinson, Townsind(1961)
	철제몰드	깔때기	낙하고 ≒ 0mm	Schultze, Muhs(1967)
D-b	유리실린더	-	용기를 수회 거꾸로 한 후 재빨리 원상태로 돌린다	Kolbuszewski(1948)
E	원통용기	망	떨면서 끌어올린다	谷本, 岩崎(1965)

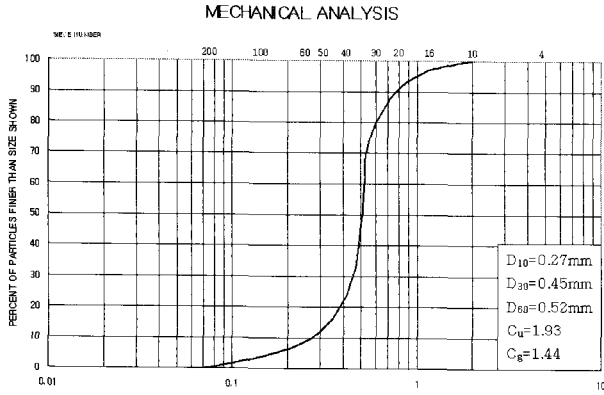


그림 1. 실험에 사용된 시료의 입도분포곡선

3. 실험

3.1 시료 및 실험기구

(1) 시료

시료는 완전 건조된(oven dry) 모난 모래를 사용하였으며, 이 시료의 입도분포는 그림 1에 나타나 있다. 시료의 유효입경(D_{10})은 0.27mm, 균등계수(C_u)는 1.93, 곡률계수(C_g)는 1.44이다.

(2) 실험기구

실험의 중요한 기구인 몰드는 간편 실험법에서는 여러 가지 크기의 작은 몰드(총 9개)를 새로 제작하여 사용하였으며, Bowles 방법에서는 기존의 몰드를 사용하였다. 또한, 몰드는 크기가 작으므로 몰드 안쪽모서리에서 아칭효과에 의해 잘 다져지지 않을 수 있으며, 이러한 효과를 파악하기 위해 모서리를 부드럽게 처리한 몰드를 사용하여 최대상대밀도 실험을 수행하였다. 간편법 및 Bowles 방법에 사용된 실험기구는 다음과 같다.

① 간편법에 사용된 실험기구

실험에는 몰드, 고무망치, 깔때기, 곧은 날, 저울, 솔 등이 사용되었으며, 몰드의 크기 및 형상은 각각 표 3 및 그림 2와 같다.

② Bowles 방법에 사용된 기구

Bowles 방법에서 몰드는 칼라와 깔라를 부착할 수 있는 장치를 포함한 표준몰드(안지름 10.16cm, 높이 11.64cm, 체적 944cm³)를 사용하였으며, 무게 12.2kg의 구속하중 추를 사용하여 Bowles 방법의 조건을 만족시켰다. 또한, 612g의 고무망치로 시험시 몰드 측벽을 타격하였다. 그

표 3. 간편법에 사용된 몰드의 크기(단위 cm)

지름(ϕ)	깊이(d)
5	3
	4
	5
6.5	4
	5
	6
7.5	6
	7
	8

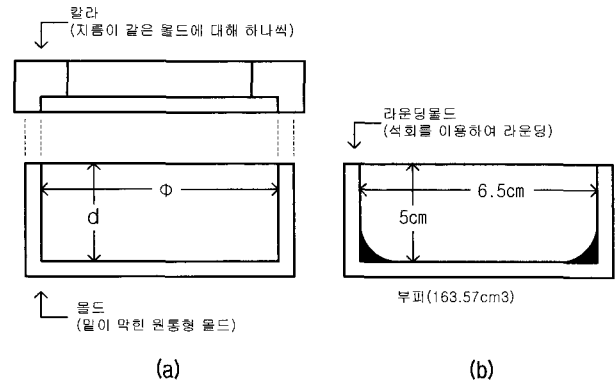


그림 2. 몰드와 깔라의 형상

밖에 깔때기, 저울, 곧은 날, 솔 등을 사용하였다.

3.2 실험방법 및 실험계획

실험은 작은 몰드를 사용한 간편법을 몰드크기 및 다짐층수, 그리고 타격수를 달리해 가면서 수행하였으며, 결과를 기존의 최대상대밀도 산정실험방법과 비교하기 위해 Bowles 방법으로 최대상대밀도실험을 수행하였다. Bowles 방법은 폭넓게 적용하여 타격횟수를 15, 25, 50, 100, 200 등으로 바꿔가며 실험하였다. 또한 rounding한 몰드에 대하여 간편법으로 실험하였다. 구체적인 실험 내용은 표 4와 같으며, 간편법 및 Bowles 방법의 실험법은 각각 다음과 같다. 표 4에서 한 층당 타격횟수 200회와 500회는 같은 지름을 갖는 몰드 중에서 밀도가 가장 크게 얻어진 몰드를 택하여 실시하였다.

(1) 작은 몰드를 사용하는 방법(간편법)

① 같은 양의 시료를 깔때기를 이용하여 계획된 층수만큼 표면이 평평하도록 붓는다. 이 때 각 층마다 몰드 측벽의 중간부분을 고무망치로 5회 타격한 후 몰드를 90° 정도 돌리는 방식으로 실험하며,

표 4. 실시한 최대상대밀도 산정 실험의 종류

몰드		실험방법	층수	다짐에너지 (타격횟수)				
지름	깊이							
5	3	간편법	3층		20회	50회	100회	
5	4	간편법	3층		20회	50회	100회	
5	5	간편법	3층	20회	50회	100회	200회	500회
6.5	4	간편법	3층		20회	50회	100회	
6.5	5	간편법	3층	20회	50회	100회	200회	500회
6.5	6	간편법	3층		20회	50회	100회	
7.5	6	간편법	3층	20회	50회	100회	200회	500회
7.5	7	간편법	3층		20회	50회	100회	
7.5	8	간편법	3층		20회	50회	100회	
5	3	간편법	6층		20회	50회	100회	
5	4	간편법	6층		20회	50회	100회	
5	5	간편법	6층	20회	50회	100회	200회	500회
6.5	4	간편법	6층		20회	50회	100회	
6.5	5	간편법	6층	20회	50회	100회	200회	500회
6.5	6	간편법	6층		20회	50회	100회	
7.5	6	간편법	6층	20회	50회	100회	200회	500회
7.5	7	간편법	6층		20회	50회	100회	
7.5	8	간편법	6층	20회	50회	100회	200회	500회
10.2	11.6	Bowles 방법	5층	15회	25회	50회	100회	500회
6.5	5	rounding 방법	3층	20회	50회	100회	200회	500회
6.5	5	rounding 방법	6층	20회	50회	100회	200회	500회

각 몰드에 대해 층수와 타격수를 달리하면서 최대상대밀도를 구한다.

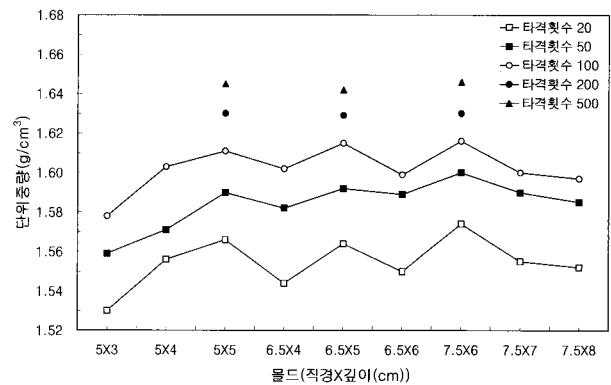
- ② 마지막 층을 다진 후에는 몰드에서 칼라를 떼어내고 여분의 모래를 곧은 날로 제거한다. 이 때 몰드 주변에 남아있는 흙을 솔로 조심스럽게 제거한다.
- ③ 시료의 무게를 측정하여 최대건조단위중량을 산정한다.
- ④ 같은 실험을 각각에 대해 3회 실시한다.

(2) Bowles 방법

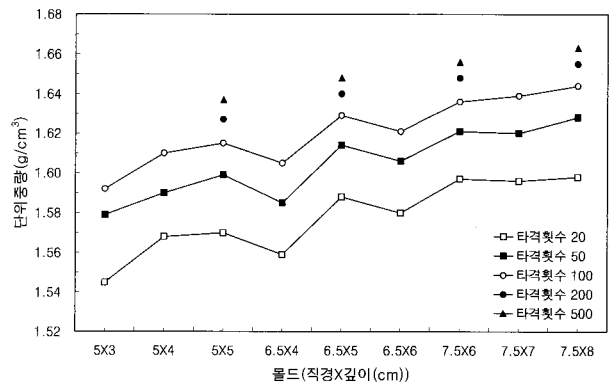
- ① 같은 양의 시료를 몰드 안에 5층으로 나누어 넣는다. 이 때 각 층마다 구속하중추로 몰드를 구속하고 고무망치로 몰드의 측벽을 일정한 타격수로 두드린다.
- ② 마지막 층을 다진 후 몰드에서 칼라를 떼어내고 곧은 날로 몰드 위에 있는 여분의 흙의 제거한다.
- ③ 시료의 무게를 측정하여 최대건조단위중량을 산정한다.
- ④ 같은 실험을 3회 실시하며, 타격수를 15, 25, 50, 100, 200 등 5가지로 변화시켜 실험한다.

4. 결과 및 분석

노건조시킨 모래로 총 9개의 몰드를 새로 제작해서



(a) 3층



(b) 6층

그림 3. 간편법에 대한 시험결과

간편법으로 실험한 결과는 표 5 및 그림 3과 같다. 표 5 및 그림 3에서는 보는 것처럼 같은 크기의 몰드를 사

표 5. 간편법에 의한 실험결과

몰드		타격회수	평균건조밀도* (g/cm ³)	
지름	깊이		3층	6층
5	3	20	1.530	1.545
		50	1.559	1.579
		100	1.578	1.592
5	4	20	1.556	1.568
		50	1.571	1.590
		100	1.603	1.610
5	5	20	1.566	1.570
		50	1.590	1.599
		100	1.611	1.615
		200	1.630	1.627
		500	1.645	1.637
6.5	4	20	1.544	1.559
		50	1.582	1.585
		100	1.602	1.605
6.5	5	20	1.564	1.588
		50	1.592	1.614
		100	1.615	1.629
		200	1.629	1.640
		500	1.642	1.648
6.5	6	20	1.550	1.580
		50	1.589	1.606
		100	1.599	1.621
7.5	6	20	1.574	1.597
		50	1.600	1.621
		100	1.616	1.636
		200	1.630	1.648
		500	1.646	1.656
7.5	7	20	1.555	1.596
		50	1.590	1.620
		100	1.600	1.639
7.5	8	20	1.552	1.598
		50	1.585	1.628
		100	1.597	1.644
		200	-	1.655
		500	-	1.663

*3회 실험값을 평균한 값

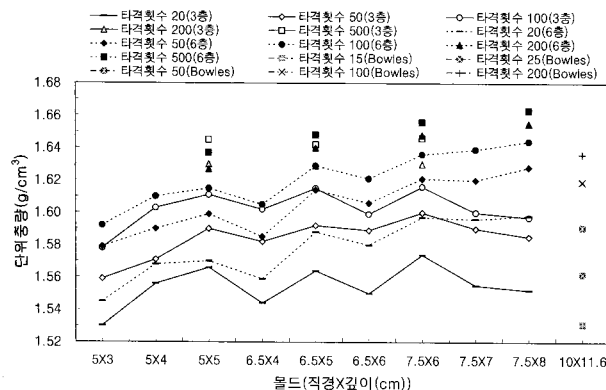


그림 4. 간편법과 Bowles 방법에 대한 시험결과

용하는 경우에는 타격횟수가 커짐에 따라 3층 및 6층 다짐 모두 단위중량이 커짐을 알 수 있다. 그러나 같은 지름의 몰드에서 몰드 깊이와 단위중량의 관계는 몰드

표 6. Bowles 방법에 의한 실험결과

몰드		타격회수	평균건조밀도* (g/cm ³)
지름	깊이		
10	11.6	15	1.531
		25	1.562
		50	1.591
		100	1.619
		200	1.636

*3회 실험값을 평균한 값

표 7. rounding 몰드의 간편법 실험결과(지름 : 6.5cm, 깊이 : 5cm)

층 수	타격회수	평균건조밀도* (g/cm ³)
3 층	20	1.565
	50	1.599
	100	1.616
	200	1.625
	500	1.640
6 층	20	1.599
	50	1.618
	100	1.633
	200	1.640
	500	1.646

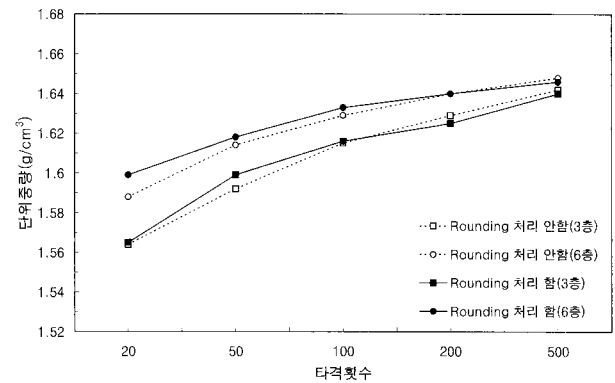


그림 5. rounding 처리한 경우와 처리하지 않은 경우의 비교

지름에 따라 또한 다짐층수에 따라 경향이 다르게 나타났다. 또한, 그림 4에서 보는 것처럼 에너지가 큰 다짐층수 6층의 단위중량이 다짐층수 3층의 경우보다 대부분 크게 얻어진 것으로 알 수 있다.

한편, 표 6은 Bowles 방법으로 실험한 결과이며, 그림 4에는 간편법 실험결과 이외에 Bowles 방법의 실험결과도 정리되어 있다. 그림 4 및 표 5와 6을 비교하면 3층다짐의 경우에는 간편법의 몰드크기가 커짐에 따라 간편법과 Bowles 방법의 단위중량 차이는 대체로 줄어들었으며, 6층 다짐의 경우에는 간편법이 오히려 더 큰 것을 알 수 있다.

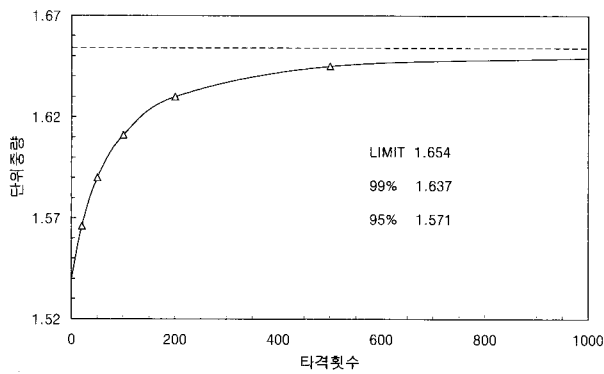
또한, 표 7은 rounding한 몰드를 사용하여 간편법으로 실험한 결과이며, 그림 5는 rounding한 몰드와 그렇지 않은 몰드의 시험결과를 비교한 것이다. 표 7의 rounding

표 8. 점근선 분석 결과

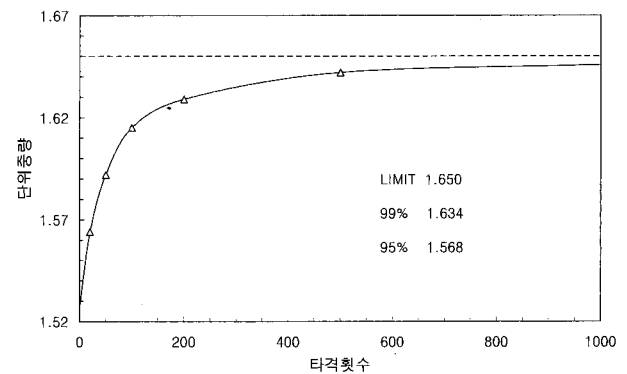
실험방법	몰드		층수	건 조 밀 도		
	지름	깊이		수렴치	99%	95%
간편법	5	5	3	1.654	1.637	1.571
	6.5	5	3	1.650	1.634	1.568
	7.5	6	3	1.664	1.647	1.581
	5	5	6	1.648	1.632	1.566
	6.5	5	6	1.653	1.636	1.570
	7.5	6	6	1.662	1.645	1.579
	7.5	8	6	1.668	1.651	1.585
Bowles법	10.2	11.6	5	1.656	1.639	1.573
Rounding 몰드(간편법)	6.5	5	3	1.645	1.629	1.563
	6.5	5	6	1.654	1.638	1.572

몰드는 간편법 실험 결과 다른 몰드에 비해 최대상대밀도가 큰 차이를 보이지 않으면서, 다루기에 너무 크지 않은 지름 6.5cm, 깊이 5cm인 몰드를 사용하여 다짐층수 3층 및 6층으로 실험하였다. 표 7 및 그림 5에서 보는 것처럼 대체로 rounding 처리를 한 몰드의 단위중량이 더 크게 나왔으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

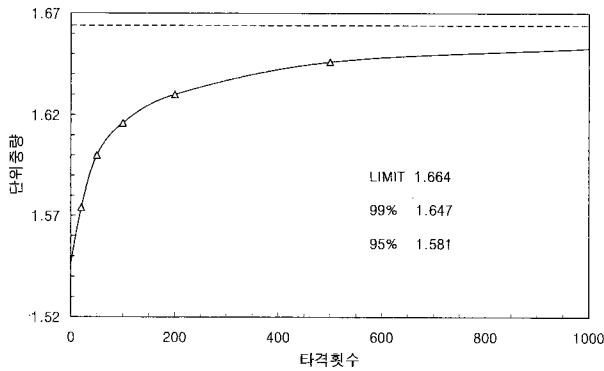
표 8은 실험결과 중에서 타격횟수 500회까지 실험한 몰드들에 대한 점근선 분석을 통하여 각각의 몰드에 대해 시료가 최대로 다져질 수 있는 밀도의 수렴치와, 그 수렴치의 95% 및 99%에 해당하는 밀도를 계산하여 나타



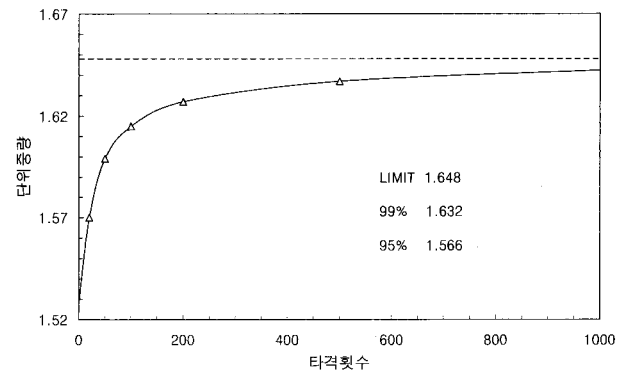
(a) 5X5cm(지름X깊이), 3층



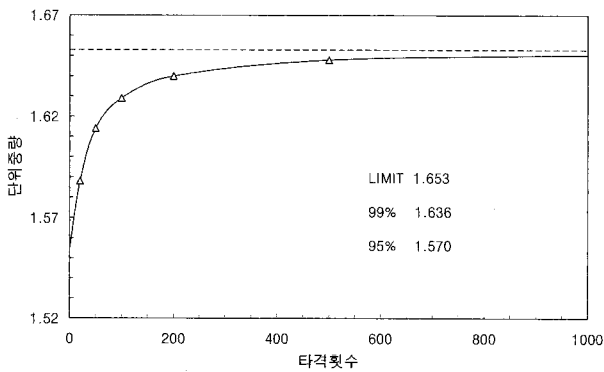
(b) 6.5X5cm(지름X깊이), 3층



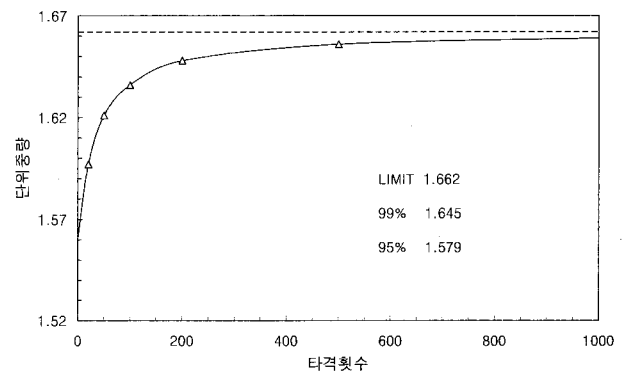
(c) 7.5X6cm(지름X깊이), 3층



(d) 5X5cm(지름X깊이), 6층



(e) 6.5X5cm(지름X깊이), 6층



(f) 7.5X6cm(지름X깊이), 6층

그림 6. 간편법에 대한 점근선 분석 결과

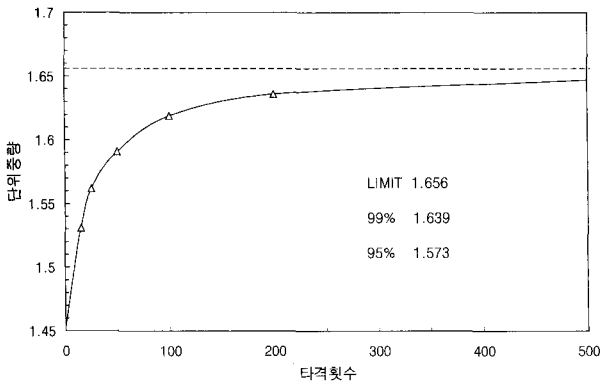
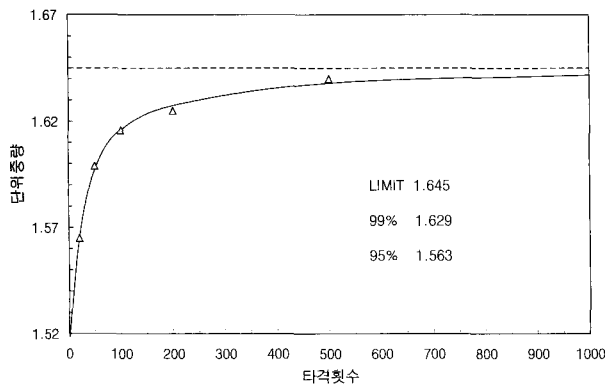
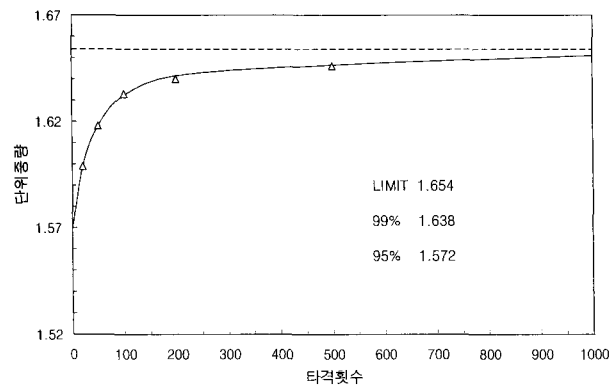


그림 7. Bowles 방법에 대한 점근선 분석 결과



(a) 6.5X5cm(지름X깊이), 3층



(b) 6.5X5cm(지름X깊이), 6층

그림 8. Rounding 몰드(간편법)에 대한 점근선 분석 결과

낸 것이다. 표 8을 그림으로 나타내면 그림 6~8과 같다.

이상의 실험결과로부터 1) 간편법에 대한 표준 몰드의 결정, 2) 그 선택된 몰드에 대해 표준이 될 수 있는 적당한 타격 횟수와 층수의 결정, 3) 이와 같이 결정된 간편법이 기존의 실험 방법과 비교하여 어느 정도의 타당성이 있는지 평가, 4) 간편법에 사용된 몰드의 크기가 기존의 몰드에 비해 상당히 작으므로 인해 생길 수 있는 영향에 대한 고찰 등에 관하여 분석하였으며, 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 표준 몰드의 결정

몰드의 결정기준은 ① 다루기에 편리한 크기일 것 ② 여타의 다른 몰드에 비해 건조밀도의 값이 너무 작지 않을 것 등으로 했다. 표 8을 보면 6층, 지름 7.5cm, 깊이 8cm인 몰드가 가장 큰 수렴치를 갖고 있지만, 실험을 해본 결과 지름이 7.5cm인 몰드는 비교적 무겁고 한 손으로 다루기 불편하다. 그러므로 지름이 6.5cm, 깊이 5cm인 몰드를 고려할 수 있는데, 이 몰드는 한 손으로 잡고 돌려가며 두드리기에 편하고 지름 5cm인 몰드보다 더 큰 최대상대밀도를 갖는다. 또한 지름 7.5cm인 몰드와 비교할 때 최대상대밀도의 수렴치는 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서, 지름 6.5cm, 깊이 5cm인 몰드가 가장 간편법에 적합한 몰드인 것으로 판단된다.

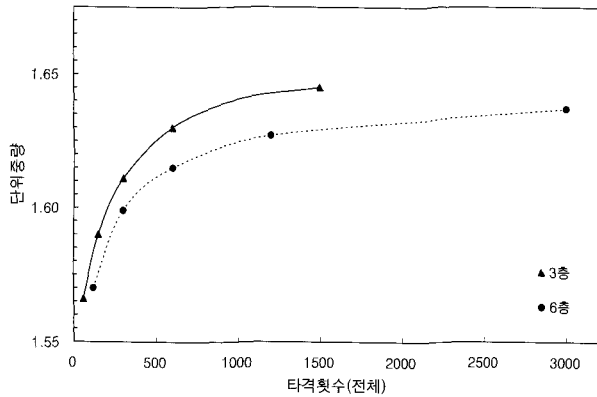
(2) 타격수와 층수의 결정

층수에 대해서는 각 층마다 입자의 이동이 어느 정도 이루어져야 하는 조건과 너무 자주 시료를 붓는다는 실험상의 어려움 즉 몰드에 충격을 가해 시료를 흐트릴 수 있는 가능성이 작아야 한다. 그림 9는 3가지 크기의 몰드에 대한 실험결과를 총타격횟수와 단위중량의 관계로 정리한 것이다. 그림 9(a)에서 보는 것처럼 몰드 크기가 지름 5cm, 깊이 5cm로 작은 경우에는 3층 다짐 결과가 6층 다짐보다 큰 단위중량이 얻어졌으며, 그림 9(b)는 3층다짐 및 6층다짐이 거의 같은 값을 보여주고 있으며, 그림 9(c)는 6층 다짐으로 실험한 경우가 다소 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 다짐층수와 단위중량의 관계는 뚜렷한 경향이 없는 것으로 판단되며, 앞에서 결정한 지름 6.5cm, 깊이 5cm의 몰드를 표준몰드로 사용한다면 각 층마다 1cm씩 붓는 5층 다짐이 적당하다고 판단된다.

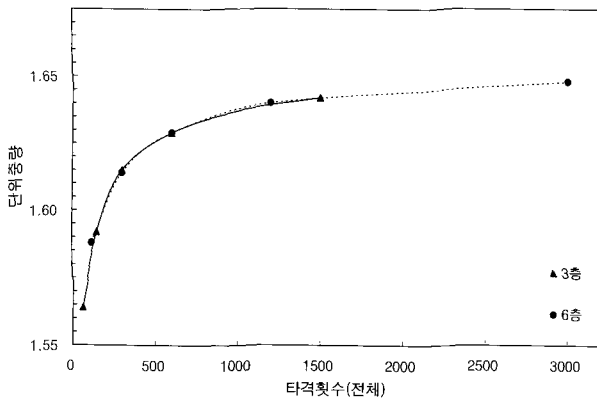
한편, 표 9는 점근선 분석에서 구한 건조밀도 99% 및 95%에 해당하는 타격횟수이다. 표 9를 보면 건조밀도 99%에 해당하는 타격수는 거의 200회 부근이고 95%에 해당하는 타격수는 15회 근처이다. 그러므로 타격횟수는 15회에서 200회 사이로 결정하면 무난하리라 보며 실험의 오차, 간편성 등을 고려하여 이 연구에서는 50회를 표준으로 제안한다.

(3) Bowles 방법과 간편법의 비교

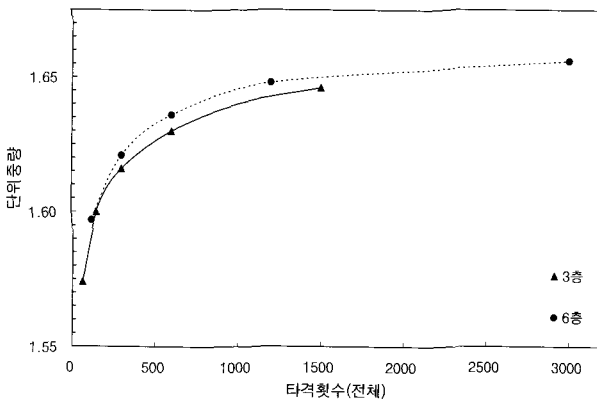
표 8에서 Bowles 방법과 간편법을 비교하면 지름이 7.5cm인 몰드의 경우는 각 깊이에 대해 모두(수렴치, 99%, 95%) Bowles 방법보다 큰 값을 보이며 표준몰드



(a) 5X5cm(지름X깊이)



(b) 6.5X5cm(지름X깊이)



(c) 7.5X6cm(지름X깊이)

그림 9. 간편법 결과의 총수에 대한 비교

(지름 6.5cm, 깊이 5cm)에서는 그림 10에서 보는 것처럼 거의 비슷한 값을 보여주고 있다. 더구나, 표 5를 이용하여 간편법의 표준타격수(50회)에서 구한 건조밀도와 Bowles 방법의 타격수(15~25회)에서 구한 건조밀도를 비교해 보면 간편법의 경우가 훨씬 크다. 그러므로, 간편법은 기존의 방법과 비교할 때 실험법으로서의 타당하다고 할 수 있다. 이상과 같이 제안된 간편법을 Bowles 방법과 비교해보면 표 10과 같다.

표 9. 건조밀도(99%와 95%)에 따른 타격횟수

총수	몰드		99%에서의 타격수	95%에서의 타격수
3	5	5	285	26
	6.5	5	257	23
	7.5	6	581	26
6	5	5	291	18
	6.5	5	150	8
	7.5	6	164	8
	7.5	8	148	12
전체 평균			268	17
총수:3 지름:7.5 깊이:6인 몰드를 제외한 평균			214	16

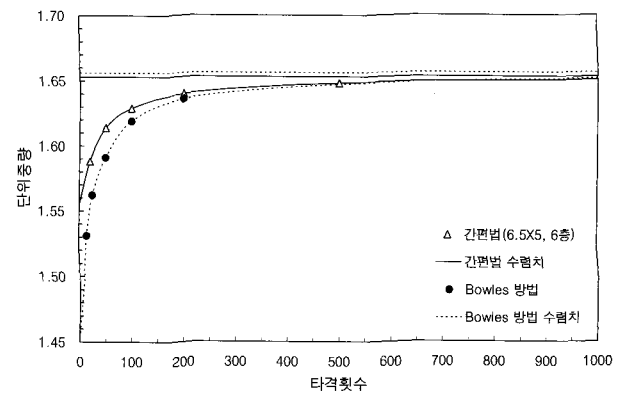


그림 10. 간편법(6.5X5cm, 6층)과 Bowles 방법의 비교

(4) rounding한 몰드의 효과

그림 5에서처럼 3층 다짐의 경우 처음에는 rounding 몰드가 약간 높은 값을 보여주다 나중에는 표준몰드가 더 큰 값을 보여준다. 그러나 6층 다짐의 경우에는 rounding 몰드가 약간 높은 값을 계속 나타내고 있다. 그러나 이런 정도의 차이는 실험상의 오차를 감안할 때 큰 차이는 아닌 것으로 판단된다.

이와 같이 간편법은 상당히 고무적인 실험 방법이지만 실험 과정에서 드러난 단점은 타격 에너지, 즉 타격의 세기를 어떻게 조절하는냐에 너무 큰 영향을 받는다는 것이다. 그러나 다행히 간편법에서는 Bowles 방법과 달리 작은 몰드를 사용하고, 구속하중(surcharge)를 사용하지 않으므로 앞으로 기계화를 실현하기에 훨씬 용이하다. 즉 기계화된 실험에서는 몰드를 어떤 틀에 고정시켜 실험하므로 손으로 잡고 실험하는 것보다는 더 정확할 것이고, 타격의 세기도 일정하게 유지할 수 있을 것이다. 그러므로 기계화된 실험을 통하여 타격수와 타격의 세기를 적절히 조절한다면 더 정확하고 더 일반적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

표 10. 간편법과 Bowles 방법의 비교

	Bowles 방법	간편법
시료	노건조 시료	동일
몰드	1000cm ³	174.7cm ³
칼라	몰드와 나사 등으로 부착 가능 (안지름이 몰드와 동일)	안지름이 몰드와 동일한 칼라로 실험시 손으로 살짝 눌러 고정
구속하중	12kg 이상의 동근 쇠판	없음
시료의 주입방법	시료를 몰드 속에 원운동하는 식으로 조심스럽게 붓는다	깔때기나 스푼을 이용하여 시료 표면이 평평하도록 붓는다
층수	5층	동일
타격방법	매층마다 고무망치로 15~20회 정도 몰드의 측벽을 세게 두드린다	매층마다 몰드의 측벽을 고무망치로 50회 타격 (5회 타격 후 90° 정도 몰드를 돌림, 진폭은 5cm~10cm, 타격속도는 초당 2~3회)

5. 결론 및 건의사항

- (1) 이 연구 결과 간편법의 표준몰드로 다루기 편리한 크기이면서 최대상대밀도의 값이 다른 몰드에 비해 뒤지지 않으며, 장래 기계화의 용이성을 고려하여 지름 6.5cm 깊이 5cm를 추천한다.
- (2) 간편법의 타격횟수로는 건조밀도 수렴치의 99%~95% 사이에 있는 타격횟수인 50회로 하고 층수는 시료의 분리를 방지할 만큼 많은 층수이면서 실험의 간편성을 살릴 수 있는 5층으로 제안한다.
- (3) 간편법과 Bowles 방법을 비교해 보면 오히려 간편법으로 구한 최대상대밀도가 더 크게 산정되어 간편법으로 최대상대밀도를 구하는 방법이 타당성이 있다고 판단된다.
- (4) 몰드의 크기가 작은 경우 발생할 수도 있는 rounding 효과는 무시해도 좋을 정도이다.
- (5) 간편법에 있어서 발생할 수 있는 개인차에 의한 건조밀도 값의 차이를 해결하는 방안과 더 넓은 범위의 실험을 위해 실험의 기계화가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 권오균 (1986), 상대밀도 산정에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 서울대학교, pp.23-26.
2. 김상규 (2004), 토질역학, 청문각, pp.18-19, pp.166-169.
3. 한국공업규격 (2004), KS F 2345 : 비점성토의 상대밀도 시험방법.
4. 日本土質工學會 (1979), 土質試驗法(第9章 砂의 最大密度·最小密度試驗), pp.174-175.
5. American Society for Testing and Materials (1969), D 2049-69 Standard Test method for Relative Density of Cohesionless soils, ASTM.
6. American Society for Testing and Materials (1983), D 4253-83 Standard Test method for MAXIMUM INDEX DENSITY OF SOILS USING A VIBRATORY TABLE, ASTM.
7. American Society for Testing and Materials (1983), D 4254-83 Standard Test method for MAXIMUM INDEX DENSITY OF SOILS AND CALCULATION OF RELATIVE DENSITY, ASTM.
8. British Standard 812 (1975), Sampling and Testing of Mineral Aggregates, Sand And Fillers.
9. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979), Soil Mechanics, John Wiley & sons, pp.30-31.
10. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), Soil Mechanics In Engineering Practice, 2nd ed, John Wiley.
11. Walker, B. P. and Whitaker, T. (1967), "An Apparatus for Foming Uniform Beds of Sand for Model Foundation Tests", Geotechnique, London, England, Vol.17, No.2, June, pp.161-167.

(접수일자 2007. 3. 8, 심사완료일 2007. 7. 12)