

진공의 압력과 시간을 달리할 때 시멘트시험편의 유효공극률 변화

이상규 · 이태종* · 김형찬

한국지질자원연구원

Effective Porosity Variation of Cement Samples According to Vacuum Pressure and Time

Sang Kyu Lee, Tae Jong Lee*, and Hyoung Chan Kim

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

요 약: 진공 수포화 과정에서 진공시간과 진공압력을 달리하면서 진공시간 및 압력이 유효공극률 산정에 미치는 영향을 살펴보았다. 시멘트와 모래의 무게비가 1대1인 3개의 시멘트 시험편과 100% 시멘트 모르타르 3개 등 총 6개 시험편을 이용하여 진공 압력을 2, 4, 6, 8, 10 torr, 진공시간을 20, 40, 60, 80, 100분으로 달리하며 측정되는 유효공극률을 비교하였다. 평균 약 25%와 40%로 비교적 큰 유효공극률을 갖는 시멘트 시험편에 대하여 진공압력이 10, 6, 2 torr 일 때 진공시간이 100 ~ 20 분으로 변화하는 3개 시험군 끼리의 결과를 비교하면, 절대편차의 평균값이 0.6%에서부터 0.5%, 0.2%로 작게 나타났다. 진공시간이 100, 60, 20분일 때 진공압력을 각각 2 ~ 10 torr로 변화시키면서 수행한 실험군 끼리의 유효공극률을 비교해도 진공시간이 짧아지면 절대편차의 평균값이 커지는 경향이 있었다. 이로부터 진공압력/진공시간에 관한 국제암반역학회(ISRM) 표준(제안)시험법의 “6 torr 이하/ 1시간 이상”의 단서로 유추할 수 있었다. 동일한 진공압력에서 진공시간이 20분씩 줄어들 때의 효과와 동일한 진공시간일 때 진공압력이 2 torr씩 낮아질 때의 효과를 정성적으로 밖에 확인할 수 없었는데 그 이유로 습식진공으로 포화된 시험편 내 수분이 105°C 오븐 내에서의 건조과정 후에도 완전히 건조되지 않아서 시험편의 초기 함수정도를 동일하게 할 수 없기 때문임을 밝혔다.

주요어: 진공압력, 진공시간, 유효공극률, 보정유효공극

Abstract: Effective porosity has been measured for cement specimen as a function of vacuum time and pressure in the vacuum saturation process. Six cement specimen are used; three of them are made of the same ratio of cement and sand, the other three are 100% cement mortar, of which average porosity is about 25% and 40%, respectively. Using the 6 samples, measured effective porosities are compared and examined with 5 different vacuum pressures (2, 4, 6, 8, 10 torr) and times (20, 40, 60, 80, 100 minute), respectively. Comparing measured effective porosity from experiments when vacuum time varies from 100 minute to 20 minute with 20 minute step and vacuum pressure is fixed to 10, 6, and 2 torr, average deviation decreases as 0.6, 0.5, and 0.2% respectively. Comparing measured effective porosity from experiments when vacuum pressure varies from 2 torr to 10 torr with 2 torr step and vacuum time is fixed to 100, 60, and 20 minute, average deviation increases as vacuum time decreases. These results can be a background of suggested method of ISRM that describes the vacuum time longer than 60 minute and vacuum pressure higher than 6 torr. In this study, only qualitative discussion can be possible for the effects on the effective porosity by decreasing 20 minute vacuuming time at the same pressure or by decreasing 2 torr of vacuum pressure at the same vacuum time. This is because the sample could not reached to perfectly dried condition even though the sample were dried at 105°C and following the ISRM suggested method, so that initial water content could not be the same at each experiment.

Keywords: vacuum pressure, vacuum time, effective porosity, compensated effective porosity

2012년 10월 12일 접수; 2012년 10월 31일 수정; 2012년 11월 19일 채택;

*Corresponding author

E-mail: megi@kigam.re.kr

Address: KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu,
Daejeon 305-350, Korea

서 론

암석의 공극률은 암석내의 총 공극 부피의 전체 부피에 대한 비로 정의되며 지하 환경에서 유체의 저장 능력을 나타내는 척도로서 작용하는 매우 중요한 물성 중의 하나이다. 특히, 유효공극률(effective porosity)은 암석내 공극들 중에서 고립되지 않고 서로 연결되어 유체의 드나들이 자유로운 공극의 전체 부피에 대한 비로서, 일반적으로 공극률이라고 하면 유효공극률을 가리킨다.

유효공극률의 정확한 측정을 위해서는 오랜 시간동안 정밀한 계측기를 사용하여 계측해야 하지만 일반적으로 공학적인 목적에서는 많은 양의 시료에 대한 빠른 공극률 산출이 요구되므로, 관련 학회에서는 일정부분의 오차범위 내에서 정확도와 정밀도를 확보할 수 있는 선에서 표준시험법을 제시하여 사용하고 있다. 즉, 표준시험법은 같은 암석에 대해 여러 번 반복측정하거나 동일한 조건에서 실험자가 달라도 일정 오차범위 내에서 동일한 측정값을 도출할 수 있는 최소한의 약속을 정한 것으로 이해할 수 있다.

그러나 표준시험법에 의해 측정한다 하더라도 동일한 시료에 대해 반복적으로 측정할 경우 상당한 오차범위를 보이거나 암석에 따라서는 참값과는 상당한 차이를 보이는 경우가(이상규와 이태종, 2010) 발생할 수 있다. 이는 표준시험법이 이러한 특수한 경우나 최근의 급속한 전자 계측 장비 및 측정 기술의 발달을 반영하지 못하는 데서 기인한 것이다. 표준시험법의 이러한 문제를 발견하고 최근의 기술 발달을 반영하여 개선하기 위해서는 좀 더 엄격한 환경에서 정밀하고 정확한 측정 기술이 필요하다. 이러한 노력의 일환으로 저자들은 최근 유효공극률의 정밀한 측정에 대한 연구 결과를 발표한 바 있다. 즉, 이상규와 이태종(2010)은 유효공극률의 산출에 있어서 매우 중요한 건조질량 혹은 고체질량의 정밀한 측정에 대해 연구하였고, 이상규 등(2012a)는 암석시료의 유효공극을 완전 포화하기 위한 진공포화법에 대하여 고찰한 바 있다.

한국암반공학회(2006)와 국제암반역학회(ISRM, 1979)에서는 진공을 이용한 포화법을 표준시험법으로 제안하고 있다. ISRM의 진공포화법은 물속에 넣은 시료를 진공포화장치에서 진공상태를 일정시간 이상 유지시키면 공극내를 점유하고 있던 공기가 빠져 나오면서 물로 채워지도록 하는 방법이다. 즉, 시험편을 800 Pa (6 torr) 이하의 진공상태에서 1시간 이상 수침하여 포화시키도록 하고 있으나 진공압력과 진공시간에 관한 근거를 제시하지는 않고 있다. 뿐만 아니라, '6 torr 이하'와 '1 시간 이상'은 그 범위가 비교적 넓어서 표준시험법의 압력/시간을 만족한 상태에서 진공압력을 더 낮게 하거나 진공시간을 더 길게 할 경우 측정되는 시험편의 유효공극률이 얼마나 달라질지도 짐작하기 어렵다. 따라서, 이 연구에서는 진공의 압력과 시간을 달리할 경우 측정되는 시험편의 유효공극률이 어느 정도 변화하는지를 살펴보았다.

실험방법과 실험장치

실험방법

유효공극률의 산출은 암반공학회와 ISRM의 표준(제안)시험법 중에서 부력을 이용하는 방법을 사용하였다. 시험편의 겉보기부피(V)를 캘리퍼스 측정치로 산출하지 않고 부력을 이용하여 산출한 이유는 매끄럽지 않은 시험편의 표면에 의해 기인되는 오차를 배제하기 위함이다. 유효공극률은 다음의 식(1)을 이용하여 산출할 수 있다.

$$n = \left(\frac{V_v}{V} \right) \times 100 = \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_{sub}} \right) \times 100(\%) \quad (1)$$

$$M_{sub} = M_{sub_sample+cradle} - M_{sub_cradle}$$

여기서, n : 유효공극률(effective porosity)

V : 겉보기부피(bulk volume)

V_v : 공극의 부피(pore volume)

M_{sat} : 표면건조포화질량(saturated-surface-dry mass)

M_s : 고체(입자) 질량(grains mass)

M_{sub} : 시험편의 물속 질량(weight of sample soaked in water)

$M_{sub_sample+cradle}$: 시험편과 cradle의 물속 질량

M_{sub_cradle} : cradle 만의 물속 질량

물속질량(M_{sub}), 표면건조포화질량(M_{sat}), 고체질량(M_s) 측정을 포함하여 시험편의 유효공극률을 산출하기 위한 거시적 공정은 다음과 같이 하였다. 우선 2일(48시간) 이상 상온에서 보관하던 시험편을 여과수 속에서 48시간(3, 4일째) 동안 보관한다. 그 후, 수침진공 시간을 포함하여 48시간(5, 6일째) 동안 여과수속에 두었다가 물속질량과 표면건조포화질량을 측정한다. 다음 자연순환건조기(오븐)(Jeiotech, ON-02GW, B)에 시험편을 넣어 48시간(7, 8일째) 건조시키며 변화하는 질량을 전자저울(METTLER TOLEDO, XS1003SV)로 모니터링하여 고체질량을 산출하였다(이상규와 이태종, 2010). 진공압력과 진공시간을 달리하는 '수침진공' 이외의 여러 단위 공정(즉, 물속 보관, 수침진공 후 물속보관, 건조와 무게모니터링 등)들로부터 유발될 수 있는 오차 요인을 줄이기 위하여 제 과정의 시간을 길게 설정하였다.

시험편과 시험편 받침(cradle)의 물속질량($M_{sub_sample+cradle}$)과 시험편 받침만의 물속질량(M_{sub_cradle})은 물속무게 측정장치(이상규 외, 2012a)를 이용하여 시험편 받침을 지지하는 매달림 로드(suspension rod)를 수면 하부 일정한 깊이에 위치하도록 하여 측정하였다. 시험편 받침만의 물속질량을 측정할 때는 11회 측정 후, 가장 큰 2개와 가장 작은 2개를 제외하고 나머지 7개를 평균하여 사용하였다. 시험편의 표면건조포화질량은 물티슈를 꼭 짰 후 시험편을 감싸서 시험편 표면의 물기를 일정한 정도로 제거한 다음 측정하였으며, 시험편의 고체질량은 105°C 오븐에서 48시간 동안 건조하면서 표면건조포화

Table 1. Comparison of weight of specimen E1 between minimum weight during 48 hours after drying process started and 4 hours before.

vacuum pressure/time	4 hours before (g)	minimum weight (g)	weight change for the four hours (%)
2 torr/100 min	72.669	72.655	0.02
2 torr/ 80 min	72.826	72.809	0.02
2 torr/ 60 min	72.869	72.862	0.01
2 torr/ 40 min	72.914	72.907	0.01
2 torr/ 20 min	72.918	72.911	0.01

질량을 측정할 시점($t = 0$)으로부터 48시간 동안의 최소 질량에 오븐 내부와 외부에서의 공기부력차를 계산으로 보정한 값을 이용하였다. 이때, 오븐 외부의 온도와 압력은 25°C, 1기압으로, 오븐 내부는 105°C, 1기압으로 간주하였고 습도는 고려하지 않았다. 48시간 동안의 최소 질량은 모두 4시간 전의 질량과 0.1% 이내에 있었으므로 ‘4 시간 간격으로 측정된 질량이 0.1% 이내로 변할 때 시험편은 건조된 것으로 간주한다’는 ISRM 제안시험법을 만족하였다(Table 1).

Table 1은 앞에서 언급한 거시적 공정에 따라서 시험편 E1을 진공압력을 2 torr로 고정하고 진공시간을 100분, 80분, 60분, 40분, 20분으로 달리했을 경우, 수침진공한 후 105°C 오븐에서 48시간 동안 건조하며 얻은 최소 무게와 이로부터 4시간 전의 무게를 비교한 것인데 4시간 간격의 무게가 모두 0.02% 이내에 있음을 볼 수 있다.

실험에서 사용한 시험편은 시멘트와 모래의 무게 비를 1 : 1과 1 : 0 (100% 시멘트)으로 하여 만든 시멘트 모르타르를 두 개의 원주형 아크릴 틀에 부은 후 90일 이상 충분히 양생한 다음, 각각 3등분 하여 얻은 직경 약 30 mm, 길이 약 60 mm의 원주형 시멘트 시험편이다. 시멘트 시험편은 일반적인 암석에 비해 비교적 균질하며 큰 유효공극률을 갖고 있어 진공의 압력과 시간 변화에 따른 미세한 변화에 민감하게 반응할 것으로 기대하였다.

시멘트와 모래의 무게 비가 1 : 1인 시멘트 시험편을 E1, E2, E3로, 1 : 0인 시멘트 시험편을 O1, O2, O3로 칭하였다. 시험편 E1, E2, E3로는 진공압력(p)을 각각 2, 6, 10 torr로 고정하고 진공시간(t)을 100, 80, 60, 40, 20분으로 달리하며 유효공극률의 변화를 관찰하고, 시험편 O1, O2, O3로는 진공시간을 각각 100, 60, 20분으로 고정하고 진공압력을 2, 4, 6, 8, 10 torr로 달리하며 유효공극률의 변화를 관찰하였다. 이러한 일련의 실험을 SET 1(실험군)이라 하였다(Table 2). 이후 SET 1에 대한 대조군(SET 2)의 실험을 수행하였는데, E1, E2, E3로는 진공압력을 각각 2 torr, 6 torr, 10 torr로 설정하고 진공시간을 100분간으로 하여 각각 3회씩 측정하였고, O1, O2, O3로는 진공압력을 2 torr로 설정한 상태에서 진공시간을 각각 100분, 60분, 20분으로 하여 역시 각각 3회씩을 수행하고 각각의 유효공극률을 산출하였다(Table 2). 실험군과 대조군

Table 2. Summary of samples and experiments in this study.

sample	SET 1		SET 2 (3 times each)	
	pressure	time	pressure	time
E1		100 min	2 torr	100 min
E2	2 torr	80 min	6 torr	100 min
	6 torr	60 min		
E3	10 torr fixed	40 min	10 torr	100 min
		20 min		
O1	2 torr		2 torr	100 min
O2	4 torr	100 min	2 torr	60 min
	6 torr	60 min		
O3	8 torr	20 min fixed	2 torr	20 min
	10 torr			

실험 사이에 6개 시험편의 초기 함수정도를 같게 하려는 노력으로 105°C 건조오븐에서 추가로 48시간 동안 건조시켰으나 결과적으로 큰 효과를 얻지는 못하였다. 진공압력(p)과 진공시간(t)을 2 ~ 10 torr와 100 ~ 20분으로 변화시킨 이유는 한국 암반공학회와 ISRM의 표준(제안)시험법(암석의 공극률 및 밀도 측정 표준시험법)에서 제시한 ‘6 torr 이하와 1시간 이상’의 p, t 값을 중앙으로 하여 이 보다 크거나 작은 값들을 선택하였기 때문이다.

동일한 시험편의 유효공극률을 산출할 때 진공을 반복하면 공극률이 높아질 수 있는 가능성으로부터 야기될지도 모르는 결과 도출의 오류를 배제하기 위하여 이 실험에서는 동일한 진공압력일 때는 진공시간이 긴 경우에서부터 진공시간이 짧은 경우의 순서로, 동일한 진공시간일 때는 고진공으로부터 저진공의 순서로 실험을 진행하였다.

습식진공수포화장치

유효공극률 산출을 위하여 이 연구에서는 습식 진공포화법을 이용하였는데, 습식진공포화장치로는 진공압력 시스템의 반복성이 이미 확인된(이상규 외, 2012a) 분리형(dual) 건식진공 수포화장치 중에 시험편을 담는 용기가 설치된 진공수침장치만을 사용하여 구성하였다(Fig. 1 참조). 진공수침장치(대한랩테크, LVO-2030) 내, 1리터의 용기 속에 0.8리터의 여과수를 채우고 여과수 속에 시멘트 시험편을 넣어 최대진공속도가 237 l/min 인 진공펌프(EDWARDS, RV12)를 연결하였다. 시스템의 진공압력(p)과 시간(t)은 진공조절기(Vacuubrand, VSP 3000)와 VACUUM-CONTROL software로 조절한다. 진공수침장치와 진공펌프 사이에는 안전저류조(safety reservoir) 두 개를 냉동수분분리기(cold trap) 전·후에 설치하여 수분 분리를 위하여 냉매조(cold trap bath) 속에 넣은 유리재질의 수분분리기의 파손에 대비하였다. 여과수 속에 시험편을 넣은 상태에서 진공을 해야 하는 습식진공포화장치를 빈번히 사용하면 유리재질의 수분분리기 속에 많은 양의 물이 포획되는데 여기서는 포획수의 배출을 용이하게 하는 유리재질 수분분리기(Fig.

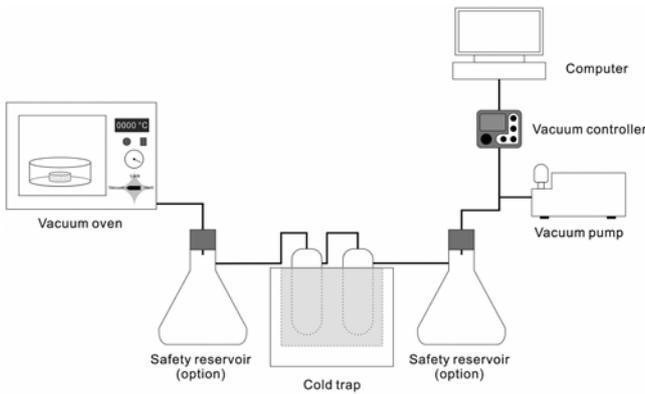


Fig. 1. Schematic diagram for a wet-type vacuum saturation system.

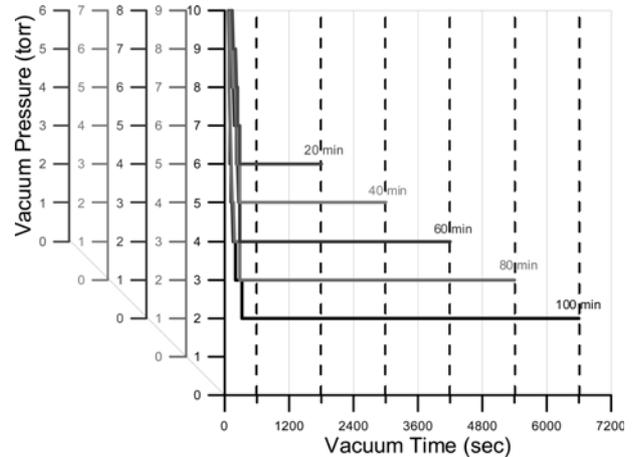


Fig. 3. Pressure monitoring inside the vacuum oven for 5 times (100, 80, 60, 40, and 20 minutes) at 2 torr of vacuum pressure setting during wet-type vacuum saturation process of E1 specimen.

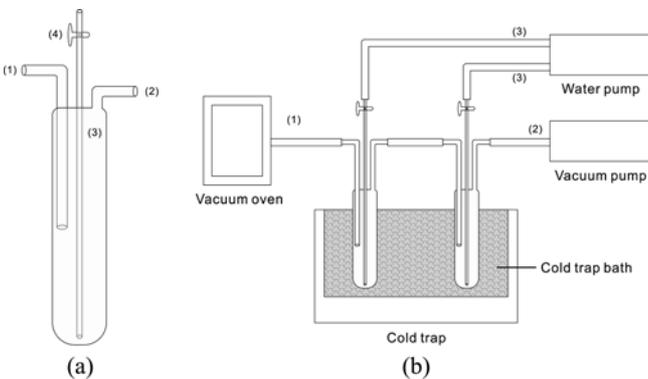


Fig. 2. Schematic diagram for (b) a serial cold trap system including (a) designed water trap (Lee and Lee, 2012).

2(a)와 포획수 배출장치(Fig. 2(b))(이상규와 이태중, 2012)를 고안하여 사용하였다. 내압 유리로 만든 수분분리기 내부의 포획수 배출관(3) 하단의 단면을 작게 하여 포획수 배출을 용이하게 하였으며, 포획수 배출관 외부 위쪽에 잠금장치(4)를 부착한 일체형 수분분리기이다. (1)은 진공수침장치로, (2)는 진공펌프로 연결되며 (3)은 소형 펌프로 연결하여 펌프를 작동할 때마다 수분분리기 내부의 포획수를 외부로 배출하게 된다.

결과 및 고찰

본 실험에 앞서 우선 진공수침장치 내의 압력이 진공포화시간동안 사전에 설정한 압력으로 일정하게 유지되는지에 대한 검토가 필요하다. 이는 진공수침장치 내의 압력이 이 실험에서 매우 중요한 변수이므로 실험자료의 해석에 있어서 매우 중요하다. Fig. 3은 E1 시험편에 대하여, 2 torr의 진공압력으로 100, 80, 60, 40, 20분 이상 수침진공하기 위하여 각각 10분씩을 더한 110, 90, 70, 50, 30분 동안 진공하면서 매 10초 마다 기록한 압력 변화의 그래프를 보인 것이다. 실험에서 사용한 압력조절기는 계기 상에는 소수 이하 첫째 자리까지 표시되지만, 저장 파일에는 반올림하여 단 단위까지만 기록된다. 그래프를 보면 진공 조절이 매우 정교하게 이루어졌음을 알 수 있

다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 진공시스템을 가동하기 시작한 후 2 torr에 도달하기까지는 어느 정도의 시간이 필요하고 할 때마다 약간씩 시간차이가 나기는 하나, 이 실험 장치에서는 어떤 경우에도 10분 이내에 충분히 원하는 진공압력에 도달한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 표기된 진공시간($t = 100, 80, 60, 40, 20$ 분)에 여유시간 10분을 더하여 진공하였다.

동일한 진공압력으로 진공시간을 변화시킬 때

부력을 이용하는 표준시험법에 따라서 습식 진공포화법에 의해 E1, E2, E3 시험편의 물속질량(M_{sub}), 표면건조포화질량(M_{sat}), 및 48시간 건조 중의 최소질량으로부터 오븐 내·외부에서의 공기부력 차를 보정한 고체질량(M_c)를 산출하고 이로부터 고체밀도와 유효공극률을 계산하여 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 고체밀도를 보면, 압력/시간을 2 torr/100분 ~ 2 torr/20분, 6 torr/100분 ~ 6 torr/20분, 10 torr/100분 ~ 10 torr/20분으로, 순차적으로 수행한 실험군(SET 1)에서나 2 torr/100분, 6 torr/100분, 10 torr/100분으로 3회 수행한 대조군(SET 2)에서나 눈에 띄는 차이 없이 모두 절대편차의 평균값(average deviation)이 0.01 이내이며, E1, E2, E3가 각각 2.56, 2.56, 2.55 g/cm³의 고체밀도를 갖는다.

한편, 유효공극률은 시험편 E1의 실험군과 대조군에서 평균 25.34%와 25.18%로 나타났고, E2는 각각 24.90%와 24.61%를, E3는 25.48%와 25.12%를 나타내 3개의 시험편에서 모두 대조군보다 실험군에서 다소 크게 나타났다. 일반적으로 동일한 시험편에 대하여 같은 진공압력일 때 진공시간이 짧을수록 공극내 공기가 물로 충분히 치환될 시간이 부족하여 결과적으로 유효공극률이 작게 산출될 것이라고 예측할 수 있다. 또한 실험군에서와 같은 진공압력과 제일 긴 진공시간(100분)으로 반복 수침진공한 대조군에서는 누적하여 수행할수록 유효공극

Table 3. Solid density and effective porosity for specimen E1, E2, and E3.

Sample/SET	Exp. order	P (torr)/ t (min)	M_{sub} (g)	M_{sat} (g)	M_s (g)	solid density (g/cm ³)			effective porosity (%)		
						each	ave.*	ave. dev.**	each	ave.	ave. dev. (% dev.)
E1	SET 1	1	44.087	82.261	72.645	2.54			25.19		
		7	44.385	82.482	72.799	2.56			25.42		
		13	44.453	82.528	72.852	2.57	2.56	0.01	25.41	25.34	0.06
		19	44.488	82.542	72.897	2.57			25.34		(0.24 %)
		25	44.485	82.545	72.901	2.57			25.34		
	SET 2	31	44.508	82.547	72.939	2.57			25.26		
		37	44.540	82.572	72.991	2.57	2.56	0.00	25.19	25.18	0.06
		43	44.551	82.578	73.037	2.56			25.09		(0.24 %)
E2	SET 1	5	44.911	83.457	73.769	2.56			25.13		
		8	45.029	83.551	73.933	2.56			24.97		
		14	45.070	83.562	73.970	2.56	2.56	0.00	24.92	24.90	0.13
		20	45.113	83.594	74.068	2.56			24.75		(0.53 %)
		26	45.103	83.578	74.073	2.56			24.70		
	SET 2	32	45.145	83.606	74.099	2.56			24.72		
		38	45.170	83.632	74.170	2.56	2.56	0.00	24.60	24.61	0.07
		44	45.196	83.641	74.216	2.56			24.51		(0.29 %)
E3	SET 1	2	44.244	82.715	72.776	2.55			25.83		
		9	44.440	82.818	73.030	2.55			25.50		
		15	44.433	82.801	73.044	2.55	2.55	0.00	25.43	25.48	0.15
		21	44.523	82.881	73.151	2.56			25.37		(0.60 %)
		27	44.516	82.864	73.181	2.55			25.25		
	SET 2	33	44.559	82.892	73.223	2.55			25.22		
		39	44.600	82.936	73.302	2.55	2.55	0.00	25.13	25.12	0.07
		45	44.613	82.934	73.349	2.55			25.01		(0.29 %)

*ave.: average, ** ave. dev.: average deviation

률이 커질 것이라고 예상할 수 있는데 이 실험의 결과는 이러한 예상과 다른 결과이다. 유효공극률의 절대편차의 평균값(ave. dev.)에서는 E1의 경우 실험군과 대조군에서 모두 0.06(0.24%)의 값을 보이며, E2는 0.13(0.53%)과 0.07(0.29%), E3는 0.15(0.60%)과 0.07(0.29%)의 값을 보여서 대조군보다 실험군에서 다소 큰 경향을 나타낸다. 이것은 대조군에서는 동일한 압력/시간으로 반복 한 반면, 실험군에서는 같은 진공압력이지만 진공시간을 달리하여 얻었기 때문에 미세하게 커진 개별 편차 때문인 것으로 판단된다. 그러나 모든 경우에서 편차의 절대값은 매우 작은 것으로 정밀한 실험이 이루어졌음을 알 수 있다.

진공압력이 10, 6, 2 torr일 때의 실험군끼리의 결과를 비교 하면, 각각 5회에 대한 절대편차 평균값의 백분율이 0.60%에서부터 0.53%, 0.24%로 고진공으로 갈수록 작아짐을 볼 수 있는데 이것은 표준시험법에서 6 torr 이하로 진공압력을 규정한 의미와 상통한다고 볼 수 있다. 또한 이들을 시험편 3개(E3, E2, E1)의 유효공극률(25.48, 24.90, 25.34)의 절대편차의 평균값 0.23(0.9%)과 비교하면, 비록 동일한 시멘트 모르타르로 동일한 틀에서 양생하여 만들었다 하더라도 수침진공의 진공압력, 진공시간 변화에 따른 유효공극률의 변화 효과를 정량적으

로 확인하는 것과 같은 정교한 실험을 하기에는 너무 큰 물성과 구조적 차이를 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4의 (a), (b), (c)는 각각 E1, E2, E3의 표면건조포화질량(M_{sat}), 물속질량(M_{sub}), 고체질량(M_s)를 실험 진행 순서에 따라서 나타낸 그래프이다. 실험군(SET 1)의 경우, 표면건조포화질량과 물속질량은 실험이 반복되면서 같은 유형으로 증가하는데 증가율이 둔화되다가 4번째(즉, 2, 6, 10 torr/40분 때)에 극대값을 보이며 5번째(2, 6, 10 torr/20분)에서는 감소하는 경향이 있다. 실험 횟수가 증가함에도 표면건조포화질량과 물속질량이 감소하는 것은 분명 같은 진공압력일 때 진공시간이 40분에서 20분으로 줄어든 효과이다. 대조군(SET 2)에서의 표면건조포화질량과 물속질량은 동일한 진공압력으로 시간을 100분으로 늘리니까 다시 증가하지만 횟수를 거듭할수록 증가율이 감소한다. 10 torr 때(c) 보다 2 torr 때(a) 실험군의 첫 번째부터 네 번째까지의 누적 질량 증가량이 큰 것은 고진공에서 수포화 성능이 크다는 것을 의미한다.

Fig. 4에서 고체질량의 변화를 보면 우선, 실험군과 대조군의 초기 함수정도를 같게 하려는 노력으로 두 실험군 사이에 105°C의 건조오븐에서 추가로 수행한 48시간의 건조과정으로도 별 효과를 얻지 못했음을 알 수 있다. 즉, 추가건조가 효력

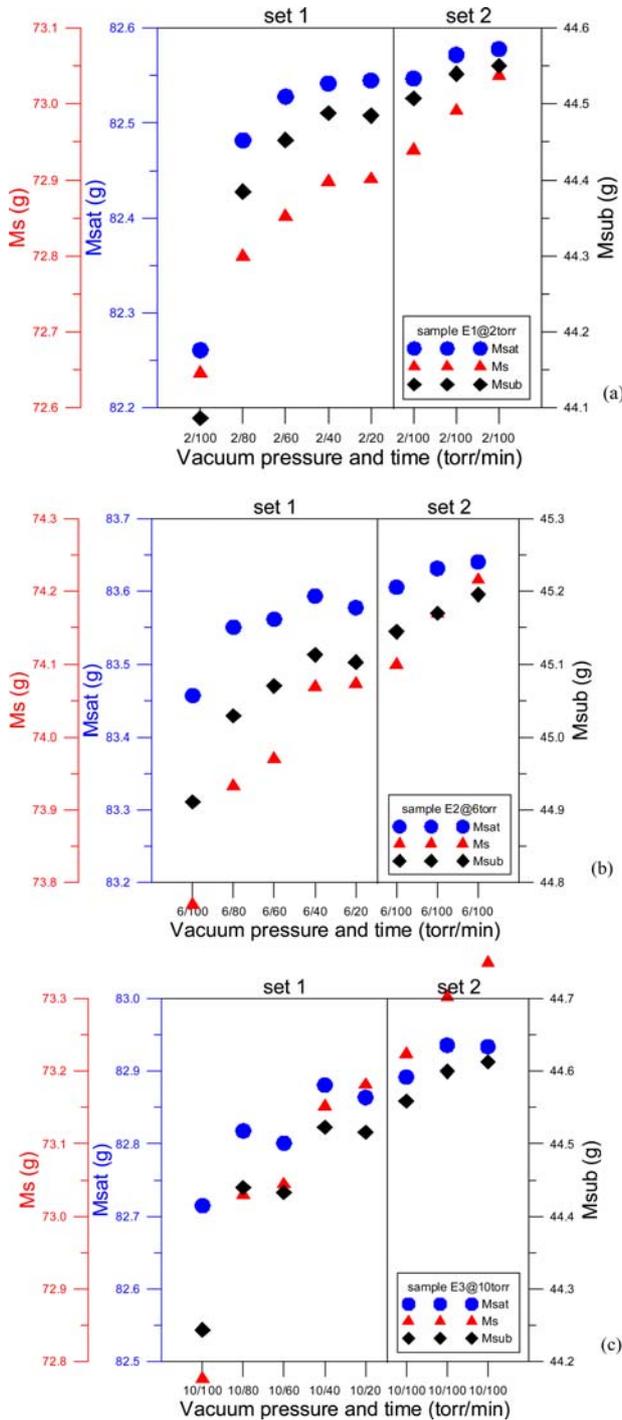


Fig. 4. Variation of M_{sat} , M_s , and M_{sub} for specimen E1 (a), E2 (b), and E3 (c) at different vacuum pressure as a function of experiment order.

이 있었다면 SET2의 첫 번째 건조질량(M_s)이 감소했을 것이나 모두 증가되어 나타났다. 반면, 105°C의 건조오븐에서 48시간 동안 건조시키며 제거할 수 있는 시험편 내 수분의 양이 비슷하여 대조군에서의 고체질량 증가율이 실험군 표면건조포화질량나 고체질량의 80분 이하 진공시간(실험군의 2, 3,

4, 5번째)에서의 증가율보다 큰 것을 볼 수 있다.

하나의 시험편에 대하여, 실험군 5회와 대조군 3회 등 총 8회 수행한 유효공극률 산출 실험에서, 105°C의 건조오븐으로 48시간 동안 시험편을 건조시켜도 내부의 수분을 완전히 제거하지 못하여 매번 시험편의 초기 함수정도가 점점 증가하게 되며 따라서 진공압력/진공시간 변화에 따른 유효공극률의 변화를 정성적으로 파악할 수밖에 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 표준시험법에 의해 시험편의 유효공극률을 산출할 때 “건조질량으로 간주”한 건조시료의 초기 함수정도가 매우 큰 영향을 미침에도 불구하고 현행의 표준시험법에서 초기 함수정도에 대한 규약이 없다는데 근본적인 한계가 있음을 의미한다. 또한 시험편의 초기 함수정도를 제어하기 위하여 시험편 내부의 수분을 일정 수준까지(바람직하게는 거의 완벽하게) 제거하는 기술이 필요함을 의미한다고 볼 수 있다. 반대로 현행 표준시험법에 시험편의 초기 함수정도에 대한 규약이 없는 것은 시험편의 내부 수분을 완벽하게 제거할 수 있는 방법이 마땅하지 않다는 것을 의미한다고 볼 수도 있으므로 참값에 가까운 공극률을 산출하기 위해서는 시험편의 초기 함수정도를 제어하거나 100%에 가깝게 수분을 제거할 수 있는 기술개발이 필요하다고 생각된다.

$M_{sat,n}$ 과 $M_{s,n}$ 을 각각 동일한 시료에 대해 n 번째($n = 1 \sim 5$ 는 실험군, $n = 6 \sim 8$ 은 대조군) 유효공극률을 산출했을 때 얻은 표면건조포화질량과 고체질량이라고 하면, $\delta M_{w,n} = M_{sat,n} - M_{s,n-1}$ 은 $n-1$ 번째 고체질량을 초기 질량으로 하여 n 번째의 수침진공으로 시험편이 수포화되며 공극을 치환한 물의 질량이 된다. 순증된 물의 질량을 초기 고체질량으로 정규화(normalize)하여 백분율로 표시하고, 각 시험편(E1, E2, E3)의 $n=2$ 때의 순증된 물의 질량을 100%로 하여 $n=5$ (즉, 진공시간이 20분인 때)까지의 값과 $n=5$ 때의 순증된 물의 질량을 100%로 한 상대값을 표시하면 Table 4의 B와 같다. 앞에서 설명한 거시 공정에 따라서 시험편 E1을 2 torr/100분으로 수침진공한 후에 $M_{sat,1}$ (82.261 g)으로부터 건조하고 공기부력차를 보정하여 $M_{s,1}$ 으로 72.645 g을 얻었다. 다시 이것을 E1의 초기 질량으로 하여 2 torr/80분 수침진공 하여 $M_{sat,2}$ (82.482 g)를 얻었는데 이 때 수포화된 물의 질량은 9.837 g이 된다. 같은 방법으로 2 torr/60분 수침진공하여 순증된 물의 질량은 9.729 g인데 이것은 이전 단계에서의 순증된 물의 질량의 98.90%에 해당한다. $n=5$ 인 때(2 torr/20분)에 증가된 물의 질량, 9.648 g은 98.08%에 해당한다. E2의 경우에는 $n=5$ 일 때, 97.22%까지, E3의 경우에는 96.72%까지 순증된 물의 질량이 감소하는데 이것은 같은 진공시간(20분)이라 하더라도 진공압력이 2 torr일 때보다 10 torr일 때 상대적으로 덜 수포화되는 현상을 보인 것이다.

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 각각 E1, E2, E3의 고체만의 부피(V_s), 공극의 부피(V_v), 수침진공으로 시험편 공극에 채워진 물의 부피(δV)를 실험 진행 순서에 따라서 나타낸 그래프이다.

Table 4. Amount of water substitute the pore space at each experimental order.

Sample	P (torr)/ t (min)	Exp. order (n)	M_{sat_n}	M_{s_n}	δM_{w_n}	A		B	
						$(\delta M_{w_n}/M_{s_{n-1}}) \times 100$ (%)	$A_n/A_2 \times 100$ (%)	$A_n/A_5 \times 100$ (%)	
E1	2/100	1	82.261	72.645	-	-	-	-	
	2/80	2	82.482	72.799	9.837	13.54	100	101.96	
	2/60	3	82.528	72.852	9.729	13.36	98.90	100.84	
	2/40	4	82.542	72.897	9.690	13.30	98.51	100.44	
	2/20	5	82.545	72.901	9.648	13.23	98.08	100	
E2	6/100	1	83.457	73.769	-	-	-	-	
	6/80	2	83.551	73.933	9.782	13.26	100	102.86	
	6/60	3	83.562	73.970	9.629	13.02	98.44	101.25	
	6/40	4	83.594	74.068	9.624	13.01	98.38	101.20	
	6/20	5	83.578	74.073	9.510	12.84	97.22	100	
E3	10/100	1	82.715	72.776	-	-	-	-	
	10/80	2	82.818	73.030	10.042	13.80	100	103.39	
	10/60	3	82.801	73.044	9.771	13.38	97.30	100.60	
	10/40	4	82.881	73.151	9.837	13.47	97.96	101.28	
	10/20	5	82.864	73.181	9.713	13.28	96.72	100	

전 단계에서, 105°C의 건조오븐으로 48시간 건조한 시험편을 다음 단계의 수침진공으로 시험편 공극에 충전한 물의 부피 (δV)는 물의 밀도를 1 이라 했을 때, $\delta V_n = M_{sat_n} - M_{s_{n-1}} = \delta M_{w_n}$ 와 같다. 편의상 $\delta V_{n-1} = \delta M_{w_n}$ 이라 하여 V_{s_n} , V_{v_n} 와 나란히 표현하였다.

고체만의 부피(V_s)는 Fig. 5a의 첫 번째 즉, 2 torr/100분으로 수침 진공한 E1의 경우를 제외하면 실험 횟수가 거듭될수록 증가하는 추세를 보인다. 고체부피의 증가는 고체질량의 증가보다 물속질량의 증가가 상대적으로 작기 때문인데, 그 원인(예: 시험편의 팽창(swelling)이나 시험편 내 고립된 공극의 파괴)이 무엇인지는 확인할 수 없었다. 그림에서 공극의 부피(V_v)는 실험의 횟수가 증가함에 따라서 감소하는 것을 볼 수 있는데, 실험 횟수가 거듭될수록 표면건조포화질량에서 고체질량을 뺀 질량($V_v = M_{sat} - M_s$)이 점점 작아짐에 기인한다. 표면건조포화질량은 실험이 거듭될수록 시험편 내부의 공극들이 점점 완벽하게 물로 채워져서 증가율이 둔화되는 반면 105°C의 건조오븐으로 48시간 동안 건조시킬 수 있는 수분의 양은 일정해서 M_s 의 증가추세가 지속되는 점에서 타당하다. 그림의 V_s 로부터 δV 까지 수직으로 표시된 화살표는 다음 단계에서 수침진공함으로써 전 단계에서 평가되었던 공극의 부피가 물로 더 많이 채워진 것으로 평가된 부피를 의미하며 5번째 단계까지 감소하다가 진공시간을 100분으로 늘린 대조군에서 다시 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 각각 E1, E2, E3의 외견상의 유효공극률과 보정유효공극률이 실험이 누적됨에 따라서 어떻게 변하는지 보인 것이다. 3개의 시험편에서 참값에 가장 가까운 고체질량(M_s)는 건조과정 중에 시험편의 조각이 유실되지 않는 한 8회의 실험 중에 얻은 최소값이 될 것이므로 이 최소 M_s 를

이용하여 얻은 유효공극률을 보정유효공극률로 산출하였다. 그림에서 보면 실험군에서는 4 ~ 5번째 실험에서 일정 유효공극률로 접근하다가 같은 진공압력에서 진공시간을 100분으로 늘린 대조군에서 다시 증가하는 경향을 보인다.

동일한 진공시간으로 진공압력을 변화시킬 때

부력을 이용하는 표준시험법에 따라서 습식 진공포화법에 의해 시멘트와 모래의 무게 비가 1 : 0 즉, 100% 시멘트 모르타르로 만든 시험편 O1, O2, O3의 고체밀도와 유효공극률을 산출하고 이들을 Table 5에 정리하였다.

Table 5에서 우선 고체밀도를 보면, ‘압력/시간’의 조합을 2 torr/100분 ~ 10 torr/100분, 2 torr/60분 ~ 10 torr/60분, 2 torr/20분 ~ 10 torr/20분으로 순차적으로 수행한 실험군(SET 1)에서는 절대편차의 평균값(average deviation), 0.01 이내에서 O1, O2, O3 각각 2.62, 2.60, 2.59 g/cm³의 고체밀도를 보이고, 2 torr/100분, 2 torr/60분, 2 torr/20분으로 3회 수행한 대조군에서는 절대편차의 평균값, 0.01 이내에서 각각 2.62, 2.63, 2.59 g/cm³의 고체밀도를 보인다. O1, O3와 달리 O2는 실험군과 대조군의 고체밀도가 각각 2.60, 2.63 g/cm³으로 차이를 보이는데 이것은 대조군의 첫 번째 실험에서부터 깨진 조각 시험편을 이용했기 때문이다. 한편 유효공극률을 살펴보면, 시험편 O1의 유효공극률은 실험군(SET 1)과 대조군(SET 2)에서 평균 38.32%와 37.94%를 나타내고 있고, O2는 각각 40.96%와 41.19%를, O3는 39.85%와 39.31%의 유효공극률을 보인다.

O1, O3 시멘트 시험편에서 유효공극률이 대조군보다 실험군에서 다소 크게 나타나는데, 이러한 결과는 앞의 E 시험편에서와 같은 현상으로서 동일한 시험편에 대하여 같은 진공시

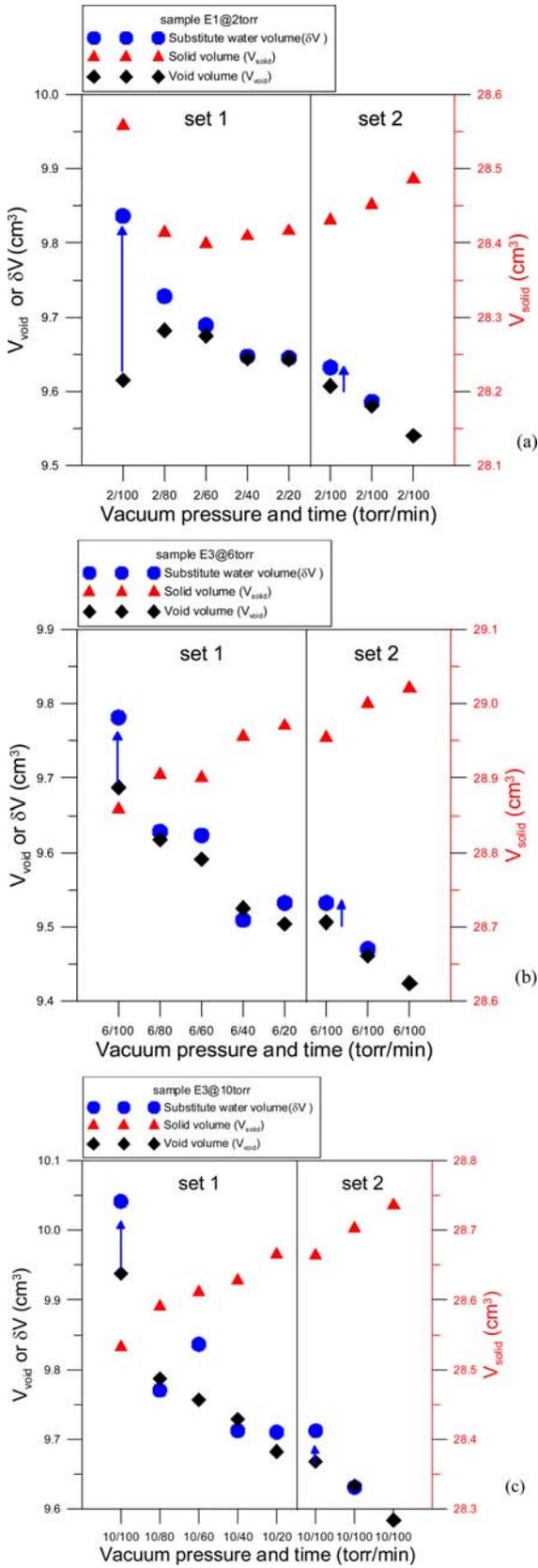


Fig. 5. Change of solid volume (V_s), void volume (V_v), and volume of water substituted the pore space at each experimental order for E1 at 2 torr (a), E2 at 6 torr (b), and E3 at 10 torr (c).

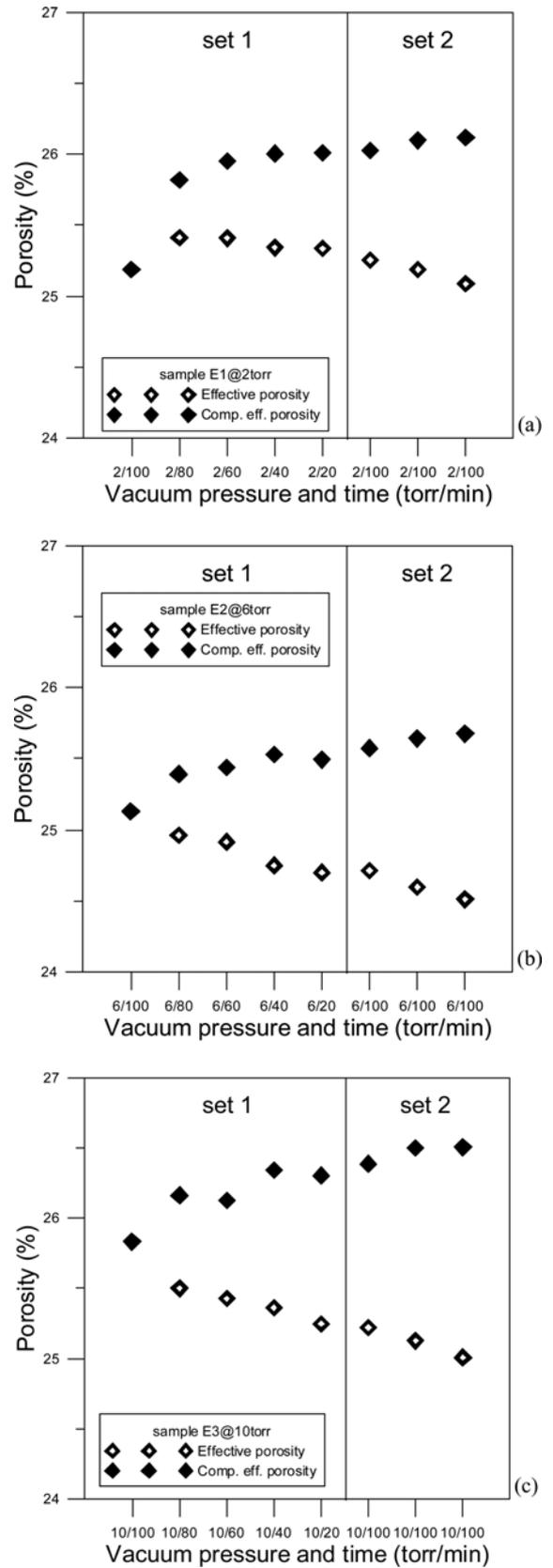


Fig. 6. Effective porosity and compensated porosity at each experimental order for E1 at 2 torr (a), E2 at 6 torr (b), and E3 at 10 torr (c).

Table 5. Solid density and effective porosity for specimen O1, O2, and O3.

Sample/SET	Exp. order	P (torr)/ t (min)	M_{sub} (g)	M_{sat} (g)	M_s (g)	solid density (g/cm ³)			effective porosity (%)		
						each	ave.	ave. dev.	each	ave.	ave. dev. (% dev.)
O1	SET 1	3	38.858	77.842	62.855	2.62			38.44		
		10	17.425	34.889	28.178	2.62*			38.43		
		16	17.458	34.931	28.193	2.63*	2.62	0.00	38.56	38.32	0.21 (0.54%)
		22	17.498	34.989	28.280	2.62*			38.36		
		28	17.520	34.987	28.384	2.61*			37.80		
	SET 2	34	17.540	35.011	28.351	2.62*			38.12		
		40	17.572	35.032	28.412	2.62*	2.62	0.00	37.92	37.94	0.12 (0.32%)
		46	17.595	35.056	28.460	2.62*			37.78		
O2	SET 1	4	36.332	75.323	59.262	2.58			41.19		
		11	36.745	75.688	59.761	2.60			40.90		
		17	36.809	75.773	59.837	2.60	2.60	0.01	40.90	40.96	0.09 (0.23%)
		23	36.949	75.969	60.007	2.60			40.91		
		29	37.021	76.023	60.077	2.61			40.88		
	SET 2	35	34.775	71.248	56.244	2.62*			41.14		
		41	8.303	16.996	13.387	2.63**	2.63	0.00	41.52	41.19	0.22 (0.53%)
		47	8.367	17.065	13.506	2.63**			40.92		
O3	SET 1	6	36.765	75.396	59.840	2.59			40.27		
		12	36.978	75.588	60.104	2.60			40.10		
		18	37.082	75.689	60.412	2.59	2.59	0.00	39.57	39.85	0.26 (0.66%)
		24	37.127	75.738	60.462	2.59			39.56		
		30	37.181	75.800	60.441	2.60			39.77		
	SET 2	36	37.249	75.892	60.620	2.59			39.52		
		42	37.285	75.890	60.745	2.59*	2.59	0.00	39.23	39.32	0.13 (0.33%)
		48	37.326	75.877	60.756	2.59**			39.22		

*Part of specimen were used due to failure of the sample

**Part of specimen were used after second failure

간일 때 진공압력이 작아질수록(2 torr → 10 torr) 유효공극률이 작아질 것이라는 예상이나, 실험군에서와 같은 진공시간 동안 제일 큰 진공압력(2 torr)으로 3회 반복 수침진공한 대조군에서 많은 누적 횟수 때문에 유효공극률이 커질 것이라는 예상과도 다른 결과이다. 절대편차의 평균값(ave. dev.)은 O1의 경우 실험군과 대조군에서 0.21(0.54%)와 0.12(0.32%)의 값을 보이며, O2는 0.09(0.23%)과 0.22(0.53%), O3는 0.26(0.66%)과 0.14(0.36%)의 값을 보여서, O2를 제외한 2 개의 시멘트 시험편에서 대조군에서 보다 실험군에서 다소 큰 경향을 나타낸다. 이 현상 역시 E 시험편의 실험 결과에서와 같이 대조군에서는 동일한 진공압력과 시간으로 반복 실험한 반면 실험군에서는 같은 진공시간이지만 진공압력을 달리하여 측정했기 때문에 미세하게 커진 편차 때문인 것으로 판단된다.

진공시간을 100, 60, 20 분으로 하여 진공압력을 변화시키면서 수행한 실험군(SET 1)끼리의 유효공극률을 비교하면, 각각 5회의 절대편차의 평균값이 각각 0.5, 0.2, 0.7%로서 진공시간이 20분인 경우보다 진공시간이 60분, 100분인 경우가 더 작은 값을 갖는다. 시험편 O1은 실험군(SET 1)의 첫 번째 실

험 직후부터 시험편이 손상되었음을 감안할 때 이 현상 역시 표준시험법에서 1시간 이상 진공시간을 규정한 단서로 추측된다. 시멘트 시험편 3개(O3, O2, O1) 실험군의 유효공극률(38.32%, 40.96%, 39.85%)의 절대편차의 평균값, 0.93(2.3%)과 비교하면, 비록 동일한 시멘트 모르타르로 동일한 틀에서 양생하여 만들었다 하더라도 수침진공으로 진공압력과 시간 변화에 따른 유효공극률 변화 효과를 정량적으로 확인하려는 정밀 실험을 하기에는 상대적으로 큰 물성적, 구조적 차이를 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7의 (a), (b), (c)는 각각 O1, O2, O3의 표면건조포화질량(M_{sat}), 물속질량(M_{sub}), 고체질량(M_s)을 실험 진행 순서에 따라서 나타낸 그래프이다. 시험편 O1은 두 번째 실험부터 깨진 조각으로 실험을 진행하였고 O2는 실험군(SET 1)의 다섯 번째 실험 이후와 대조군(SET 2)의 첫 번째 실험 이후에 또 한번 깨져서 그 이후에는 남은 부분으로 실험을 진행했지만 실험군과 대조군의 질량차이가 너무 커서 대조군의 질량은 표현하지 않았다. O3는 대조군(SET 2)의 첫 번째 실험 이후와 두 번째 실험 이후에 한 번씩 깨져서 그 이후에는 남은 부분으로

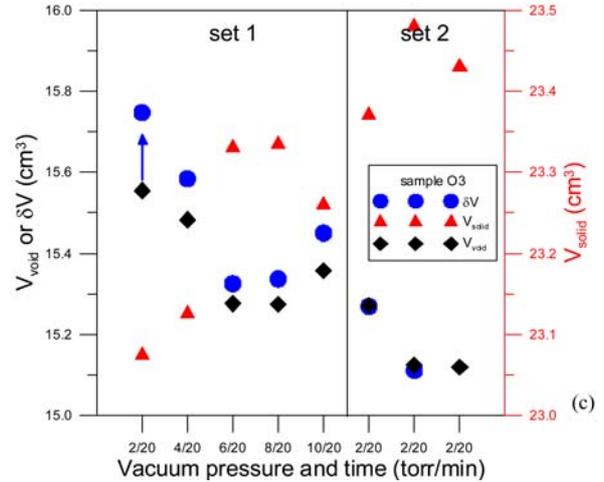
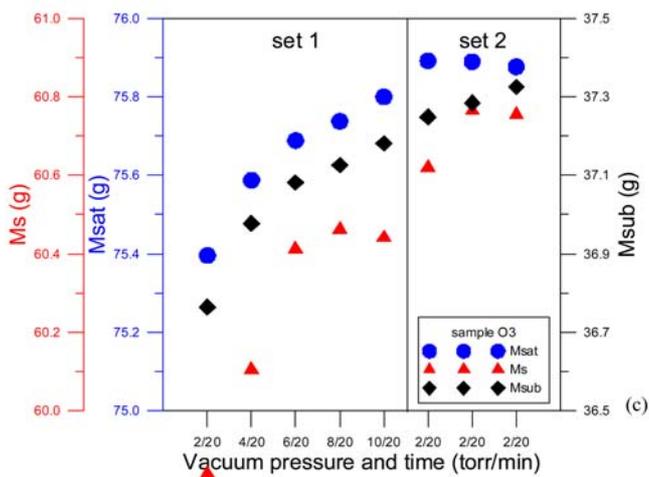
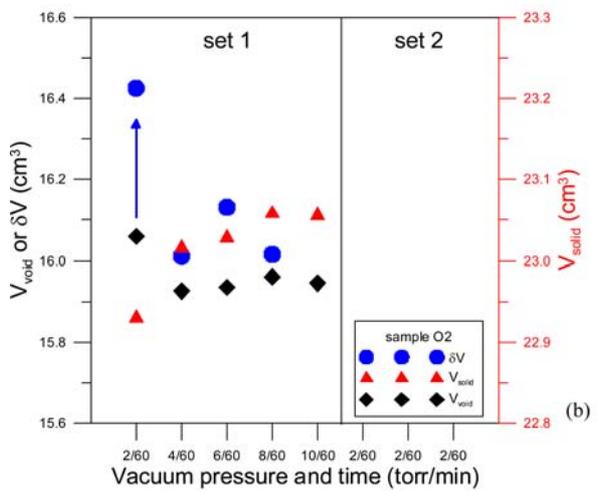
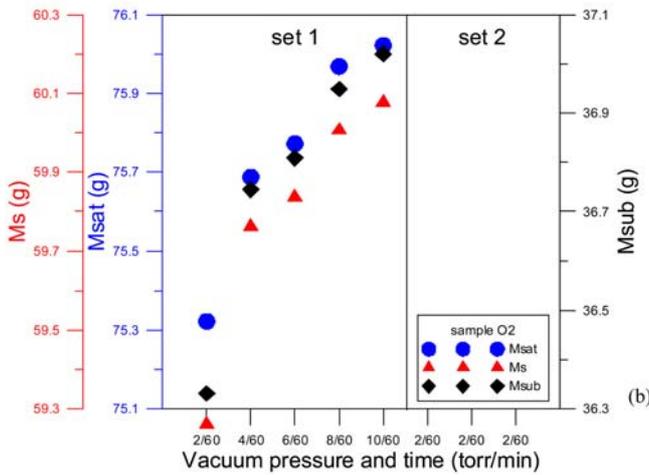
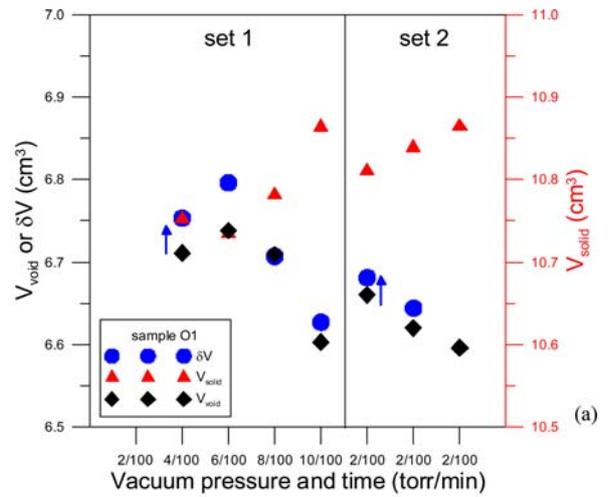
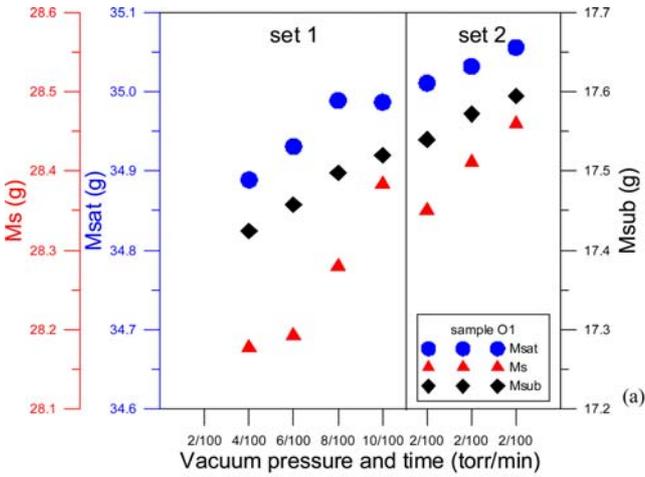


Fig. 7. Variation of M_{sat} , M_s , and M_{sub} for specimen O1 (a), O2 (b), and O3 (c) at different vacuum time as a function of experiment order.

Fig. 8. Change of solid volume (V_s), void volume (V_v), and volume of water substituted the pore space at each experimental order for O1 (a), O2 (b), and O3 (c).

실험을 진행하였다.

실험군(SET1)의 경우 표면건조포화질량과 물속질량은 실험이 반복되면서 증가하는데 점차로 진공압력을 약하게 하였으

므로 증가율이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 시험편 E의 실험 결과(Fig. 4)에서와는 달리 실험군의 5번째에서 물속질량의 감소를 볼 수 없는데 이것은 같은 진공시간일 때 진공압력을 8torr

Table 6. Amount of water substitute the pore space at each experimental order.

Sample	P (torr)/ t (min)	Exp. order (n)	$M_{sat,n}$	$M_{s,n}$	$\delta M_{w,n}$	A		B	
						$(\delta M_{w,n}/M_{s,n-1}) \times 100$ (%)	$(\delta M_{w,n}/\delta M_{w,2}) \times 100$ (%)	$(\delta M_{w,n}/\delta M_{w,5}) \times 100$ (%)	
O1	2/100	1	77.842	62.855	-	-	-	-	-
	4/100	2	34.889	28.178	-	-	-	-	-
	6/100	3	34.931	28.193	6.753	23.97	-	100.69	
	8/100	4	34.989	28.280	6.796	24.11	-	101.33	
	10/100	5	34.987	28.384	6.707	23.72	-	100	
O2	2/60	1	75.323	59.262	-	-	-	-	-
	4/60	2	75.688	59.761	16.426	27.72	100	102.56	
	6/60	3	75.773	59.837	16.012	26.79	97.48	99.97	
	8/60	4	75.969	60.007	16.132	26.96	98.21	100.72	
	10/60	5	76.023	60.077	16.016	26.69	97.50	100	
O3	2/20	1	75.396	59.840	-	-	-	-	-
	4/20	2	75.588	60.104	15.748	26.32	100	102.67	
	6/20	3	75.689	60.412	15.585	25.93	98.96	101.61	
	8/20	4	75.738	60.462	15.326	25.37	97.32	99.92	
	10/20	5	75.800	60.441	15.338	25.37	97.40	100	

로부터 10 torr로 2 torr 만큼 내리는 것이 같은 진공압력일 때 진공시간을 20분(40분에서 20분으로) 줄이는 효과보다 작다는 것을 의미한다. 그러나 이러한 사실이 유효공극률이 진공압력보다 진공시간에 더 민감하다고 일반화 할 수 있는지는 시험편 E (시험편 평균 유효공극률: 25.2%)와 O (시험편 평균 유효공극률: 39.7%)의 유효공극률에 차이가 있어서 단언할 수 없다. 그럼에도 불구하고 유효공극률이 상대적으로 작을 때 진공시간을 줄이면 시험편의 유효공극률이 민감하게 반응한다는 점은 유의할 사항이라고 본다. 20분 진공할 때(c) 보다 60분 진공할 때(b) 첫 번째부터 다섯 번째까지의 누적 질량증가량이 큰 것은 진공시간이 길수록 수포화가 더 많이 될 것이라는 점에서 당연하다. O3의 고체질량은 O1, O2와 달리 시험편 네 번째에서 극대값을 갖다가 다섯 번째에서 감소하는데, 이것은 105°C의 건조오븐에서 48시간의 건조로 제거 할 수 있는 시험편 내 수분의 양이 10 torr로 20분이라는 짧은 시간동안 수침진공 하여 얻은 시험편 내 수분의 순 증분 보다 많다는 것을 보인다.

여기서도, $n-1$ 번째 고체질량을 초기 질량으로 하여 n 번째의 수침진공으로 시험편이 수포화되며 증가 된 물의 질량과 고체질량을 기준으로 한 백분율을 계산하여 Table 6에 정리하였다. 순증 된 물의 질량을 각 시험편의 $n=2$ 때의 값을 100%로 하여 $n=5$ (즉, 진공시간이 20분인 때)까지의 값과 거꾸로 $n=5$ 때의 값을 100%로 한 상대값을 표시하면 Table 6의 B와 같다.

실험 도중에 시험편들이 손상되어 계산할 수 없는 항목들이 많았지만 O 시험편의 변화 거동은 E 시험편과 매우 유사함을 볼 수 있다. 같은 진공시간 끼리는 진공압력이 낮을수록(2 torr \rightarrow 10 torr), 그리고 6 torr/20분에서 10 torr/20분까지 변할 때

O3에 수포화되는 물이 6 torr/100분부터 10 torr/100분까지 변할 때 O1에 수포화되는 물 보다 더 감소되는데 이것은 같은 진공압력(10 torr)이라 하더라도 진공압력이 10 torr/100분인 때보다 10 torr/20분 인 때 상대적으로 덜 수포화되는 현상을 보인 것이다.

Fig. 8의 (a), (b), (c)는 각각 O1, O2, O3의 고체만의 부피(V_s), 공극의 부피(V_v) 그리고 수침진공을 통하여 시험편 공극에 채워진 물의 부피(δV : 편의상, $\delta V_{n-1} = \delta M_{w,n}$)를 실험 순서에 따라서 나타낸 그래프이다. 고체만의 부피(V_s)는 대체로 실험 횟수가 거듭될수록 증가하는 추세를 보인다. O3의 고체부피는 특히 시험편 네 번째에서 극대값을 갖다가 다섯 번째에서 감소하는데, 이것은 저진공(10 torr)짧은 시간(20분)의 수침진공으로는 시험편 내로의 수분의 충전이 적어서 고체질량은 감소(Fig. 7(c) 참조)하는데 반해 물속질량은 증가했기 때문이다. 공극의 부피는 실험의 횟수가 증가함에 따라서 대체로 감소하는 것을 볼 수 있는데, 표면건조포화질량은 실험이 거듭될수록 시험편 내부의 공극들이 점점 완벽하게 물로 채워져서 증가율이 둔화되는 반면 105°C의 건조오븐으로 48시간 동안 건조시킬 수 있는 수분의 양은 일정할 것이라는 점에서 타당하다.

Fig. 9의 (a), (b), (c)는 각각 O1, O2, O3의 유효공극률의 외견상 변화와 보정유효공극률이 실험이 누적됨에 따라서 어떻게 변하는지 보인 것이다. 그림에서 보면 시험편에서는 4 ~ 5 번째 실험으로 갈수록 일정 유효공극률에 접근하려는 경향이 있으며 같은 진공시간으로 진공압력을 2 torr로 늘린 대조군에서 다시 증가하다가 수렴하는 경향을 보인다. Table 7에는 2종(E, O), 6개의 시멘트시험편을 이용하여 진공압력/진공시간을 달리하면서 시험편 5회와 대조군 3회의 실험에 의해 산출된

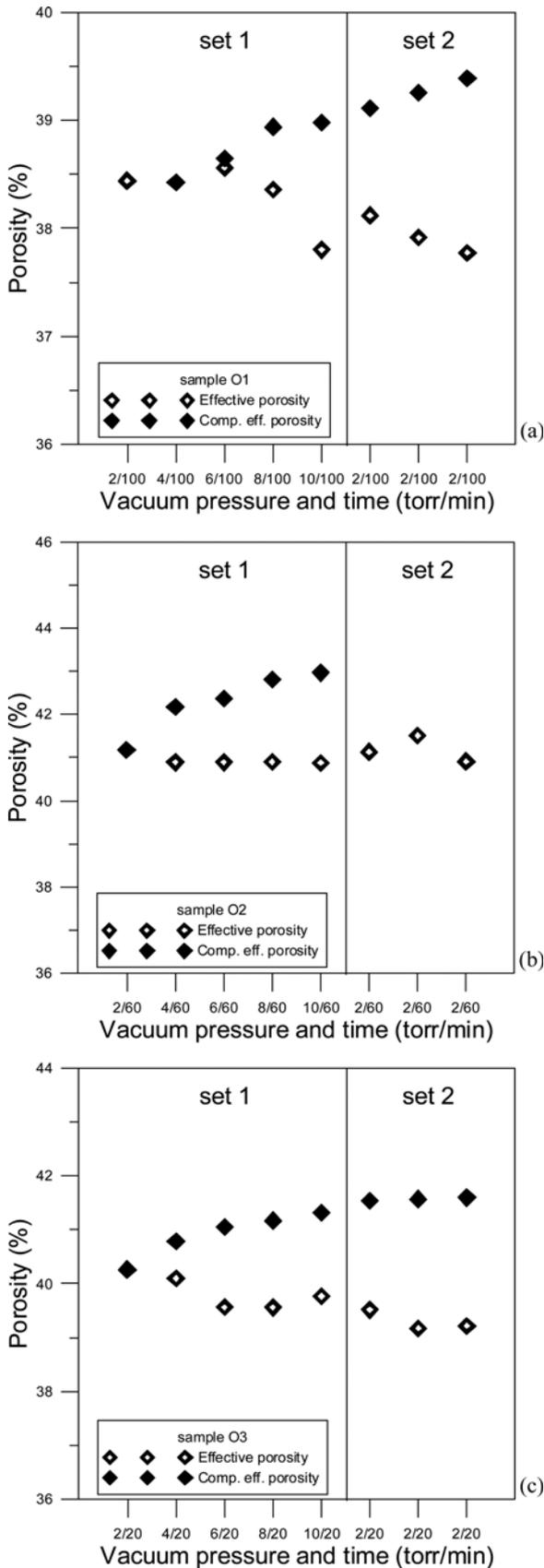


Fig. 9. Effective porosity and compensated porosity at each experimental order for O1 (a), O2 (b), and O3 (c).

유효공극률과 보정유효공극률을 정리한 표이다. 진공시간의 이력이 같으면(E1, E2, E3 시험편) 진공압력이 큰(고 진공) 2 torr 때, 103.7%가 진공압력이 낮은(저 진공) 10 torr 때의 102.6% 보다 상대적으로 큰 값을 보이며, 진공압력의 이력이 같으면(O1, O2, O3 시험편) 진공시간이 긴 때가 진공시간이 짧은 때 보다 상대적으로 큰 값을 보임을 알 수 있다.

결론

시멘트와 모래의 무게 비가 1 : 1인 시멘트 시험편 3개로는 진공압력(p)을 각각 2, 6, 10 torr 로 고정했을 때 진공시간(t)이 100, 80, 60, 40, 20분으로 변화함에 따른 유효공극률의 변화를 대조군(2, 6, 10 torr/100분)의 실험 결과와 함께 검토하였으며, 시멘트와 모래의 무게 비가 1 : 0인 시멘트 시험편 3개로는 진공시간(t)을 각각 100, 60, 20분으로 고정했을 때 진공압력이 2, 4, 6, 8, 10 torr 로 변화함에 따른 유효공극률의 변화를 대조군(2 torr/100, 60, 20분)의 실험 결과와 함께 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2종 6개 시험편으로 진공압력과 진공시간을 달리한 각 8회의 유효공극률을 산출할 때 얻은 고체질량 중 최소값을 참값에 가장 가깝다고 보고, 이를 이용하여 재산출한 유효공극률을 보정유효공극률로 제시하였다. 6개 시험편의 유효공극률이 실험 횟수가 누적됨에 따라서 점점 작아지는 기현상과 달리 보정유효공극률은 점점 증가하면서 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 8회 실험 후의 보정유효공극률은 첫 번째 보다 최대 4.3% 크게 나타난다.

2. 동일한 진공압력에서 진공시간이 20분씩 줄어들 때의 효과와 동일한 진공시간일 때 진공압력이 2 torr씩 낮아질 때의 효과를 모두 정성적으로 확인하였다. 진공압력과 진공시간이 변화할 때 유효공극률의 증감을 정량적으로 제시하지 못하고 정성적으로 확인할 수 밖에 없었던 이유는 표준시험법에는 규정되어 있지 않은 시험편의 초기 함수정도(예: 완전 건조상태 또는 고체질량과 일정 % 이내의 상태 등)가 유효공극률 산출에 큰 영향을 미쳤기 때문이다. 평균 약 25%와 40%로 비교적 큰 유효공극률을 갖는 시험편의 유효공극률을 현행의 ISRM 제안시험법으로 산출할 때는 습식진공으로 포화된 시험편 내 수분이 105°C 오븐 내에서의 건조과정 후에도 완전히 건조되지 않아서 시험편의 초기 함수정도를 동일하게 할 수 없음을 확인하였다.

3. 진공압력이 10, 6, 2 torr 일 때 진공시간(t)이 각각 100, 80, 60, 40, 20분으로 변화하는 3개 실험군 끼리의 결과를 비교하면, 절대편차의 평균값이 0.6% 에서부터 0.5%, 0.2%로 현저히 작아짐을 볼 수 있는데 이것은 표준시험법에서 6 torr 이하의 고 진공을 규정한 의미와 상통한다. 또한 진공시간이 100, 60, 20분일 때 진공압력을 2, 4, 6, 8, 10 torr로 변화시키면서 수행한 실험군끼리의 유효공극률을 비교해도 진공시간

Table 7. Summary of compensated effective porosity for the specimen group E and O.

Sample/SET	P (torr)/ t (min)	Comp. eff. porosity (%)		Sample/SET	P (torr)/ t (min)	Comp. eff. porosity (%)	
		measured	relative			measured	relative
E1	2/100	25.19	100	O1	2/100	-	-
	2/80	25.82	102.5		4/100	38.43*	-
	2/60	25.96	103.0		6/100	38.65*	-
	2/40	26.01	103.3		8/100	38.94*	-
	2/20	26.01	103.3		10/100	38.98*	-
	2/100	26.03	103.3		2/100	39.11*	-
	2/100	26.10	103.6		2/100	39.26*	-
2/100	26.12	103.7	2/100	39.39*	-		
E2	6/100	25.13	100	2/60	41.19	100	
	6/80	25.39	101.0	4/60	42.18	102.4	
	6/60	25.44	101.2	6/60	42.37	102.9	
	6/40	25.53	101.6	8/60	42.82	103.9	
	6/20	25.49	101.4	10/60	42.97	104.3	
	6/100	25.58	101.8	2/60	-*	-	
	6/100	25.64	102.0	2/60	-**	-	
6/100	25.68	102.2	2/60	-**	-		
E3	10/100	25.83	100	2/20	40.27	100	
	10/80	26.17	101.3	4/20	40.79	101.3	
	10/60	26.13	101.1	6/20	41.05	101.9	
	10/40	26.34	102.0	8/20	41.17	102.3	
	10/20	26.31	101.8	10/20	41.33	102.6	
	10/100	26.39	102.1	2/20	41.54	103.2	
	10/100	26.50	102.6	2/20	41.57*	103.2	
10/100	26.41	102.6	2/20	41.60**	103.3		

*Part of specimen were used due to failure of the sample

**Part of specimen were used after second failure

60분일 때의 절대편차 평균값, 0.2%가 진공시간 20분 일 때의 0.7% 보다 현저히 작은 값을 보였다. 이것은 진공압력/진공시간에 관한 ISRM 제안시험법의 “6 torr 이하/1시간 이상”의 단서로 유추할 수 있었다.

4. 물속질량 또는 표면건조포화질량의 변화를 통하여 같은 진공시간일 때 진공압력을 2 torr (8 torr로부터 10 torr로) 내리는 것이 같은 진공압력일 때 진공시간을 20분(40분에서 20분으로) 줄이는 효과보다 상대적으로 작게 나타났다. 그러나 이러한 사실이 유효공극률이 진공압력보다 진공시간에 더 민감하다고 일반화 할 수 있는지는 시험편 E(실험군 평균 유효공극률: 25%)와 O(실험군 평균 유효공극률: 40%)의 유효공극률에 차이가 있어서 단언할 수 없다. 그럼에도 불구하고 유효공극률이 25% 정도일 때 진공시간을 줄이면 시험편의 유효공극률이 민감하게 반응한다는 점은 주목할 결과이다.

5. 직전 실험에서의 고체질량을 초기 질량으로 하여 다음 실험에서의 수침진공으로 시험편이 수포화되며 증가된 물의 질량을 진공압력/진공시간 쌍의 수포화 능력이라고 보고 이것을 초기 고체질량으로 정규화(normalize)하여 백분율로 표시하면, E1, E2, E3에서 각각 98.1%, 97.2%, 96.7%로 순증된 물의 질량이 감소한다. 비록 시험편의 초기 조건이 달라서 수포화의

절대 능력으로 간주하기는 어렵지만 같은 진공시간(20분)이라 하더라도 진공압력이 2 torr 일 때보다 10 torr 일 때 상대적으로 덜 수포화되는 현상을 대변한다고 본다.

앞으로, 참값에 가까운 시험편의 공극률을 산출하기 위해서는 시험편의 초기 함수정도를 제어하기 위하여 내부의 수분을 일정 수준까지, 바람직하게는 거의 완벽하게, 제거하는 기술의 개발이 필요하며 그렇게 되면 진공압력과 진공시간의 변화에 따른 공극률의 변화를 정량적으로 밝힐 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 “한반도 남동부의 지열이상대 특성규명 및 지열자원 부존 평가” 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

이상규, 이태중, 2010, “건조과정에서 무게 모니터링을 통한 암석 시험편의 고체무게 산출 방법”, 한국지구시스템공학회지, 제47권 2호, pp. 183-190.

- 이상규, 이태종, 2012, “수분분리기 및 이를 포함하는 수분 포획 장치”, 대한민국특허청, 출원번호 10-2012-0065145.
- 이상규, 이태종, 이영민, 2012a, “습식진공과 건식진공에 의한 시험편의 유효공극률 비교”, 제98회 춘계학술발표회, 한국지구시스템공학회, pp. 195-197.
- 이상규, 이태종, 김형찬, 2012b, 진공 압력과 시간을 달리할 때 시멘트시험편의 유효공극률 변화, 제99회 추계학술발표회 논문집, 한국지구시스템공학회, pp. 203-206.
- 한국암반공학회, 2006, “암석의 공극률 및 밀도 측정 표준시험법”, 터널과 지하공간, 16, No. 2, pp. 95-98.
- ISRM, 1979, Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties.