

온도에 따른 암석시편의 건조무게 특이점 분석

Dry Weight Singularity Analysis of Rock Specimen Depending on Temperature

김 석 주[†]
Sukjoo Kim

Received: July 6th, 2023; Revised: July 17th, 2023; Accepted: August 10th, 2023

ABSTRACT : The Korean Industrial Standards (KS F) have a various regulations for measuring the weight of dried soil and rock. However, if the dried weight is measured in air after drying at $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ or $105\pm 5^{\circ}\text{C}$, a weight singularity occurs, in which the weight decreases and then increases as the measurement time continues. In this study, basaltic rock from Ulleung Island was oven dried at 40 to 110°C . The weight was measured on an electronic scale with a sensitivity of 0.0001g (0.1mg) to find weight singularities. A method to easily determine the dry weight using the weight singularities was presented. As a result of analyses of the singularity of rock specimen according to temperature, the singularities were appeared in the temperature range of 40 to 110°C , and the weight of the singularity was smaller as the heating temperature increased. In particular, the weight singularity duration appeared, and the duration of the singularity was shorter as the heating temperature increased. The results of the convection measurement experiment showed that the cause of the singularity is the convection phenomenon caused by the contact of the heated rock with the air. The weight decrease of oven dried rock occurs when the effect of convection is dominant over the effect of air moisture absorption. Conversely, the weight increase of rock occurs when the effect of air moisture absorption is dominant over the effect of convection.

Keywords : Basaltic rock, Dry weight, Singularity, Duration, Convection

요 지 : 한국산업표준(KS F)에는 건조된 흙과 암석의 무게를 측정하는 다양한 규정들이 있다. 그러나, $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 또는 $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 로 건조 후 공기 중에서 건조무게를 측정하면 측정시간이 지속됨에 따라 무게가 감소 후 증가하는 무게 특이점이 나타난다. 본 연구에서는 울릉도 현무암질 암석을 $40\sim 110^{\circ}\text{C}$ 로 노건조 하였고, 0.0001g(0.1mg) 감도의 전자저울에 무게를 측정하여 무게 특이점을 찾았고, 나타난 무게 특이점을 이용하여 건조무게를 쉽게 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 온도에 따른 암석시편의 특이점을 다양하게 분석한 결과, 특이점은 $40\sim 110^{\circ}\text{C}$ 의 온도구간에서 모두 나타났고 가열온도가 높을수록 특이점의 무게가 작게 나타났다. 특별히, 무게 특이점이 지속되는 현상이 나타났고, 가열온도가 높을수록 특이점의 지속시간이 짧게 나타났다. 대류측정 실험의 결과에 의하면 특이점의 발생 원인은 가열된 암석이 공기와의 접촉에 의해 발생된 대류현상이 원인이라는 것을 알 수 있었다. 노건조된 암석의 무게 감소는 대류발생으로 인한 영향이 공기 중 수분 흡수의 영향보다 우세할 때 발생된다. 반대로 암석의 무게 증가는 공기 중 수분 흡수의 영향이 대류발생으로 인한 영향보다 우세할 때 발생된다.

주요어 : 현무암, 건조무게, 특이점, 지속시간, 대류

1. 서 론

지반을 구성하는 흙시료의 가장 기본적인 물성치 중의 하나는 흙의 무게이다. 흙의 무게와 부피를 측정하면 흙의 밀도를 구할 수 있고, 흙과 물과 공기로 구성된 삼상(三相)의 무게 및 부피 비율에 따라 건조단위중량, 습윤단위중량, 포화단위중량, 수중단위중량이 결정된다. 단위중량과 토층의 두께를 이용하여 연직응력(연직토압)과 수평응력(수평토압)을 산정한다. 또한, 실내다짐시험의 최대건조단위중량 결과와 현장다짐시험의 건조단위중량 결과를 비교하여 현장의

다짐도(상대다짐도)를 관리하므로 순수한 흙의 무게를 정확히 측정하는 것은 지반공학적 관점에서 매우 중요하다. 건조된 흙시료의 무게를 결정하는 방법으로 우리나라의 한국산업표준인 KS F 2104(2018)와 KS F 2301(2020), KS F 2302(2017), KS F 2306(2020), KS F 2308(2022), KS F 2324(2022), KS F 2341(2017) 그리고, ASTM D2216-19(2019)에서는 건조로 속에서 흙시료를 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 건조한 후 꺼내어 저울에 무게를 측정하도록 규정하고 있다. 또한, 건조암석의 무게 측정을 위한 규정인 KS F 2503(2019)과 KS F 2504(2020) 그리고, KS F 2518(2020)의 기준에서도

[†] Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongbuk Provincial College (Corresponding Author : smbstory@naver.com)

105±5°C로 노건조한 후 저울에 무게를 측정하도록 하고 있고, 한국암반공학회의 암석의 흡수율 및 비중 측정 표준시험법에서도 105±3°C로 암석을 노건조하여 무게를 측정하도록 규정하고 있다(KSRM, 2006). 그러나, 노건조된 시료는 무게측정을 위해 공기 중에 노출 시 공기 중의 수분을 흡수하여 시료의 무게가 증가되는 결과가 발생된다. 이와 같은 무게 오차가 발생하는 문제점을 해결하기 위해 Lee & Lee(2010)는 건조로 속에 저울을 설치하여 시료와 외부 공기와의 접촉을 차단한 상태에서 건조암석의 무게를 측정하는 방법을 제안하기도 하였으나, 앞에서 언급된 현재 규정된 시험방법들을 따를 경우 무게 측정 시 공기 중 수분 흡수의 영향을 근본적으로 제거할 수 없는 한계점이 여전히 존재하므로 건조무게를 특정 값으로 결정하기 곤란한 문제가 발생된다. 이러한 문제점에 대한 연구들 중 흡시료를 대상으로 한 건조무게 측정에 관한 Kim(2023)의 연구결과에 따르면 110±5°C로 노건조된 흡시료가 공기 중에 노출되면 시간이 지남에 따라 무게가 감소한 후 다시 증가하는 특이점(Singularity)이 나타나고, 이 특이점이 건조무게 중 가장 작은 값을 나타내므로 발생한 특이점 무게를 건조무게로 간주할 수 있다고 하였다(Fig. 1).

일반적으로, 건조무게 측정 시 입경이 작은 흡시료의 경우에는 무게 측정을 위해 불가피하게 용기를 사용하게 되며, 용기와 시료의 무게를 동시에 측정한 후 용기의 무게를 제하여 무게 오차를 제거할 수 있다. 반면, 시료가 암석인 경우에는 무게 측정 시 용기를 사용하지 않고 저울에 무게를 직접 측정할 수 있다.

본 연구에서는 용기 사용으로 인한 오차 발생의 가능성이 없고, 순수한 시료만의 건조무게를 측정할 수 있는 암석시편을 실험대상으로 선정하여 건조온도에 따른 무게를 측정하여 특이점을 측정하였고, 이 특이점이 암석의 건조무게로 간주될 수 있는지를 확인하고 발생한 특이점의 다양한 특성을 종합적으로 분석하였다. 또한, 대류에 의한 무게 감소 실험을 수행하여 무게 특이점의 발생원인을 규명하고자 하였다.

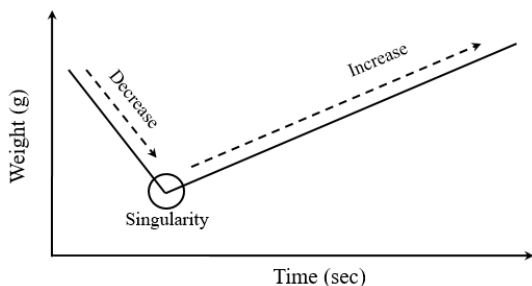


Fig. 1. Shape of weight singularity (Kim, 2023)

2. 암석시편의 무게와 특이점

실험에 사용된 암석시편은 인위적 가공이 없는 자연상태의 암석시료를 대상으로 선정하였고, 해당 조건을 만족하는 울릉도 현포에 위치한 한국해양과학기술원(KIOST) 소속의 울릉도독도해양연구기지 인근의 해변자갈퇴적층(몽돌해변)에서 채취되었다(Fig. 2). 울릉도는 화산활동에 의해 생성된 현무암질 암석이 주로 나타나며, 몽돌해변의 암석은 높은 파도 에너지에 의해 암석 간의 마모가 발생되어 전반적으로 둥근 외형이 나타났다. 6방향으로 측정된 사진에서도 둥근 외형을 확인할 수 있다(Fig. 3).

채취된 암석시편은 해수에 의해 수분 흡수가 진행된 상태이므로 수분 제거를 위해 110±5°C에서 10일간 노건조를 선행적으로 수행하였다. 실험에서 계획한 노건조 시 온도설정 구간은 40~110°C이며, 10°C 간격으로 110°C, 100°C, 90°C, 80°C, 70°C, 60°C, 50°C, 40°C의 총 8단계로 구분되었고, 계획된 온도로 건조된 암석시편은 건조로에서 꺼내어 저울에서 10초 단위로 무게를 측정하였다. 건조로(202-0B)의 가열온도는 ±1°C 감도로 제어하였다(Fig. 4). 암석시편의 무게는 초기 측정무게를 회복할 때까지 지속되었고, 각 온도별 10회씩 측정하였다. 한편, 40°C 이하에서는 무게 특이점이 나타나지 않아 실험 시 온도 구간을 최저 40°C로 설정하였다. 또한, 건조된 암석시편의 정밀한 무게 측정을 위해 0.0001g(0.1mg)

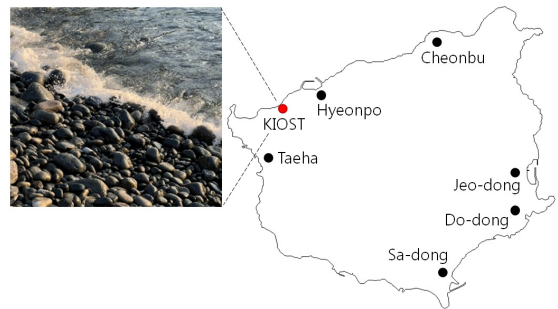


Fig. 2. Beach gravels in Hyeonpo, Ullung Island

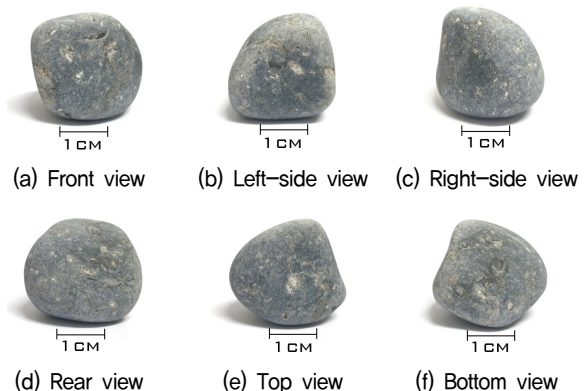


Fig. 3. Shapes in 6 directions of basaltic rock specimen

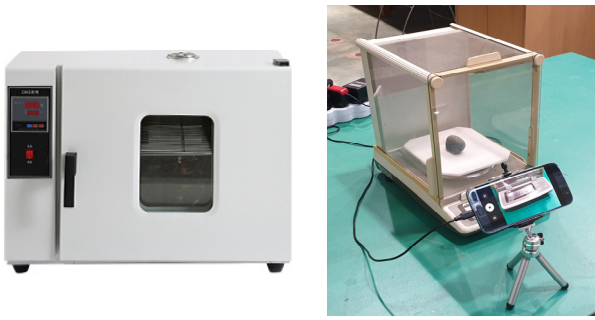


Fig. 4. Drying oven (202-0B) Fig. 5. Electronic scale (HR-200)

감도의 AND사의 전자저울(HR-200)을 사용하였고, 가열된 암석시료의 열발산에 의한 기계적 오차를 제거하기 위하여 무게 측정부에 단열판을 설치한 후 무게를 측정하였다(Fig. 5). 실험은 110°C부터 40°C까지 단계적으로 온도를 감소시키면서 수행되었다.

노건조 온도 110°C에서 24시간 건조 후 측정된 암석시편의 무게는 Fig. 6과 같이 나타났으며, 무게가 감소한 후 무게 특이점(Singularity)이 나타났고 그 후 시간이 지남에 따라 무게가 서서히 증가하는 형태를 나타내었다. 이와 같은 형태는 다른 온도의 시험 결과에서도 동일하게 나타났다. 그러나, 특이점이 상당시간 지속하여 나타났는데, 이러한 결과는 흡시료를 대상으로 무게 특이점을 연구한 Kim(2023)의 기존 연구결과(Fig. 1)에서는 나타나지 않은 현상이다. 즉, 암석시편에서는 특이점이 점(Point)의 형태로 일시적으로 나타나는 것이 아니라 상당시간 지속하여 나타남을 알 수 있다.

암석시편의 건조무게는 Fig. 7과 같이 각 온도별 측정 무게의 초기점(A점), 특이점 시작점(B점), 특이점 종료점(C점), 무게 회복점(D점)의 4가지의 측정값으로 단순화하여 나타낼 수 있다. 여기서, W_i : 초기무게, W_s : 특이점 무게, T_o : 측정 시작 시간, T_s : 특이점 발생시간, T_e : 특이점 종료시간, T_r : 초기무게 회복시간이다. 실험 결과를 Fig. 7과 같이 단순화된 형태로 나타낸 결과(Table 1, Fig. 8) 가장 작은 무게를 나타내는 특이점이 40~110°C의 모든 온도에서 나타났고, Fig. 7과 같이 특이점이 일정 시간 동안 지속하여 나타났다. 한편,

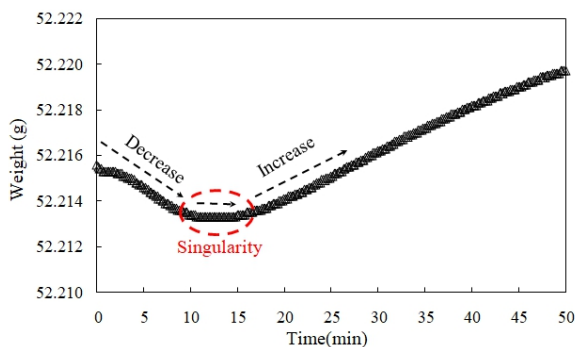


Fig. 6. Weight of rock specimen in air after 110°C heating temperature

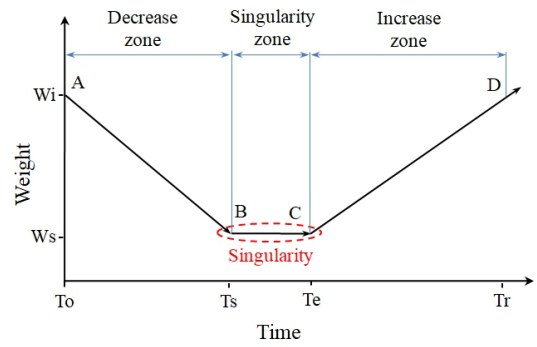


Fig. 7. Shape of weight singularity of rock specimen

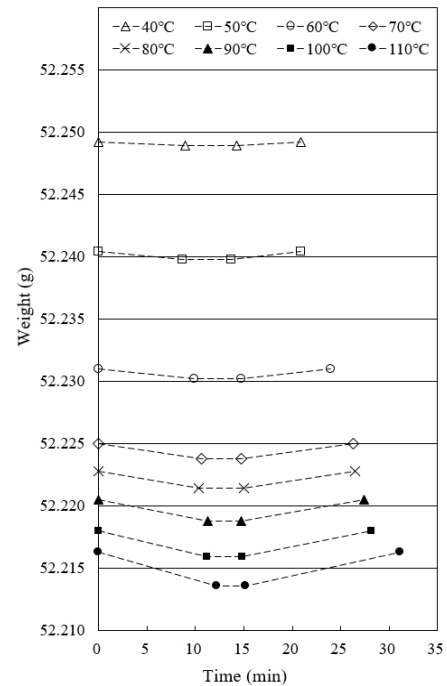


Fig. 8. Shape of simplified weight singularity

Table 1. Dry weight of rock specimen depending on temperature

Temperature (°C)	Measurement	Initial point	First singularity point	Last singularity point	Recovery point
40	Time (min)	0	8.9667	14.2833	20.8333
	Weight (g)	52.2492	52.2489	52.2489	52.2492
50	Time (min)	0	8.6458	13.6979	20.8667
	Weight (g)	52.2404	52.2398	52.2398	52.2404
60	Time (min)	0	9.8824	14.7255	23.9902
	Weight (g)	52.2310	52.2302	52.2302	52.2310
70	Time (min)	0	10.5897	14.7436	26.3333
	Weight (g)	52.2250	52.2238	52.2238	52.2250
80	Time (min)	0	10.3333	15.0000	26.4500
	Weight (g)	52.2228	52.2214	52.2214	52.2228
90	Time (min)	0	11.2833	14.6833	27.4500
	Weight (g)	52.2205	52.2188	52.2188	52.2205
100	Time (min)	0	11.1667	14.8333	28.1500
	Weight (g)	52.2180	52.2159	52.2159	52.2180
110	Time (min)	0	12.1818	15.2121	31.1061
	Weight (g)	52.2163	52.2136	52.2136	52.2163

30°C 이하의 온도에서는 특이점이 발생되지 않았는데, 대략 40°C 이상의 온도에서 특이점이 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 8의 단순화된 무게 변화에서 가열온도가 높을수록 무게가 작게 나타나며, 가열온도가 낮을수록 상대적으로 무게가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 가열온도가 높을수록 특이점 발생 시 무게의 감소가 더 크게 나타남을 알 수 있는데 이러한 결과는 가열온도와 특이점의 무게 사이에 음(-)의 관계가 있음을 나타낸다(Fig. 9).

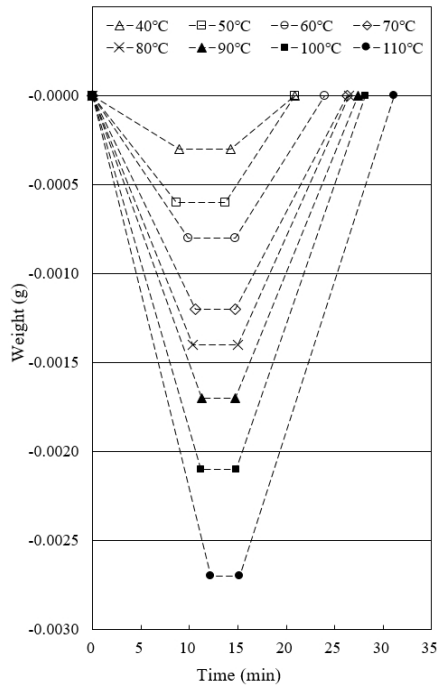


Fig. 9. Difference of singularity weight reduction

3. 무게특이점 분석(온도-시간-무게 관계)

암석시편에 나타난 무게변화는 특이점의 다양한 특성을 나타낸다. Fig. 10은 Table 1의 온도-시간-무게 관계를 3차원

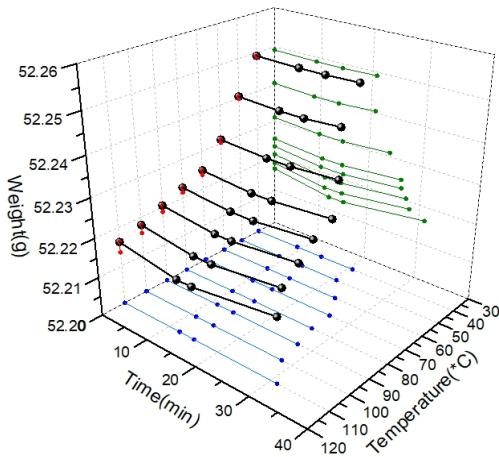


Fig. 10. 3D shape of weight singularity

으로 나타낸 그림이며, 가열온도와 측정시간에 따라 무게 변화에 일정한 경향성이 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 온도-시간-무게의 관계를 상호 비교하였고, 건조무게와 특이점에 대한 다양한 특성에 관하여 Fig. 7에 나타낸 개념과 기호를 사용하여 자세한 분석을 하였다.

3.1 초기점 무게의 분포

가열온도의 크기에 따라 암석시편의 초기점 무게(W_i)가 감소하였다(Fig. 8, Fig. 10). 가열온도가 높을수록 초기무게가 작게, 반대로 가열온도가 낮을수록 높게 나타났다(Fig. 11). 실험구간 내에서는 가열온도에 따라 2개의 직선형태로 기울기가 나타났는데, 65.51°C를 기준으로 작은 온도 구간에서 급한 기울기, 높은 온도 구간에서는 보다 완만한 기울기가 나타났다.

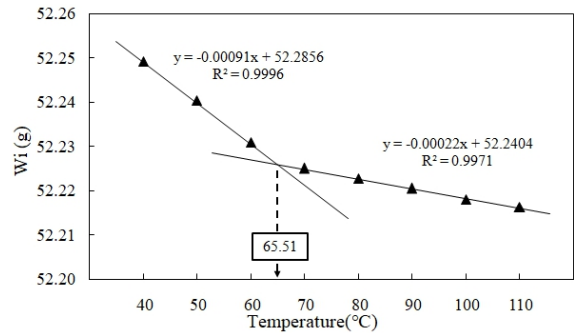


Fig. 11. Distribution of initial weight

3.2 특이점 무게의 분포

실험구간인 가열온도 40~110°C의 온도 범위에서는 특이점이 모두 나타났는데, 가열온도가 높을수록 특이점의 무게가 감소하였다. 암석시편의 특이점 무게(W_s) 분포에서도 가열온도에 따라 2개의 직선형태가 나타났다. 가열온도가 높을수록 특이점 무게가 작게, 가열온도가 낮을수록 높게 나타났다(Fig. 12). 특이점의 분포는 65.88°C를 기준으로

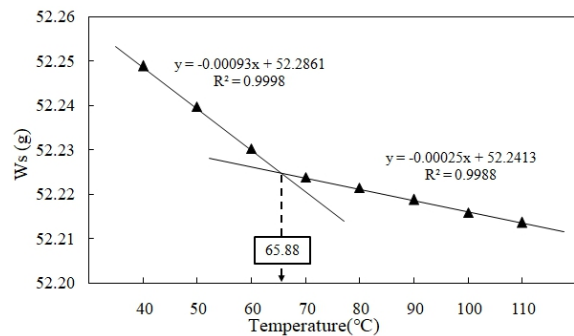


Fig. 12. Distribution of singularity weight

작은 온도 구간에서 급한 기울기, 높은 온도 구간에서는 보다 완만한 기울기를 나타내었다. 이러한 결과는 65.88°C를 기준으로 가열온도에 따른 암석시편으로부터의 열방출 특성이 변화됨을 의미하며, 초기무게 측정 시 나타난 변곡점의 온도가 65.51°C를 나타내는 원인도 동일한 것으로 판단된다.

3.3 초기점 무게 대비 특이점 무게 감소

초기점과 특이점 사이의 무게 감소량(Wi-Ws)은 가열온도가 높아짐에 따라 증가하였다(Fig. 13). 즉, 가열온도가 높을수록 특이점의 무게 낙폭이 증가하였다. 이러한 결과는 Fig. 9에서도 쉽게 확인된다. 가열온도가 높을 경우 상대적으로 높은 에너지가 방출되고 높은 에너지 방출 시 무게 감소가 증가됨을 알 수 있다.

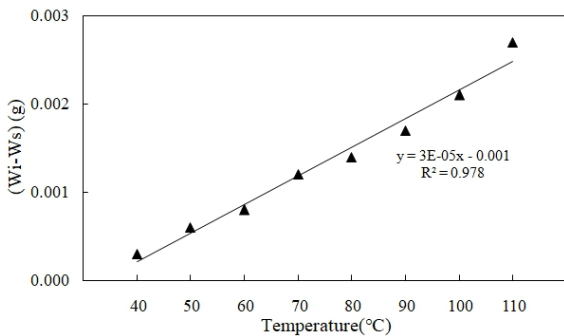


Fig. 13. Singularity weight reduction compared to initial weight

3.4 특이점의 발생시간

초기무게 측정 시점부터 특이점이 발생될 때까지 걸리는 시간(Ts)은 약 9~12분으로 나타났고, 가열온도가 높을수록 특이점 발생까지 더 오랜 시간이 걸렸다(Fig. 14). 가열온도가 높을 경우 열방출에 걸리는 시간이 보다 길어지기 때문으로 판단된다.

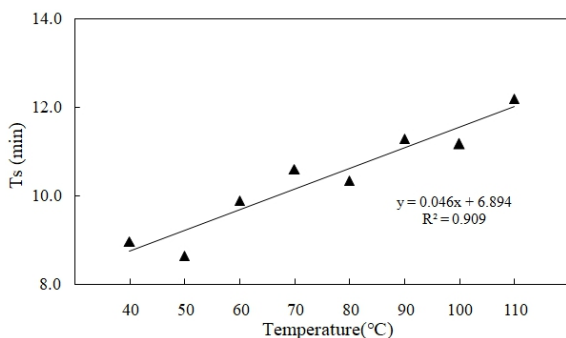


Fig. 14. Occurrence time of singularity

3.5 초기무게 측정 후 무게 감소 속도

초기무게 측정 시점부터 특이점이 발생될 때까지의 무게 감소량(Wi-Ws)과 시간(Ts)의 관계에서 무게 감소 속도를 비교하였다(Fig. 15). 열발산으로 인한 무게 감소와 시간의 관계에서 가열온도가 높을수록 방출 에너지량의 크기가 더 크고, 그 결과 무게 감소 속도가 증가한 것으로 판단된다.

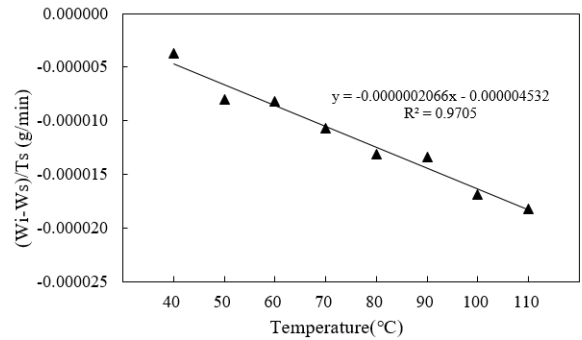


Fig. 15. Weight decrease rate after initial weight

3.6 특이점의 지속시간

본 연구의 결과 중 가장 특이할만한 내용은 특이점이 발생된 후 특이점 무게가 상당시간 지속되는 결과가 나타난 것이다. 흡시료를 대상으로한 기존의 특이점 연구에서는 Fig. 1과 같이 특이점이 점(Point)의 형태로 나타났으나, 암석시편의 경우 Fig. 7과 같이 일정 시간 동안 지속적으로 나타났다. 가열온도와 특이점의 지속시간(Te-Ts) 사이의 관계는 반비례하였다(Fig. 16). 즉 가열온도가 높을수록 특이점의 지속시간이 짧게 나타났다. 지속시간은 최소 3.03분(110°C)에서 최대 5.31분(40°C)으로 확인되었다.

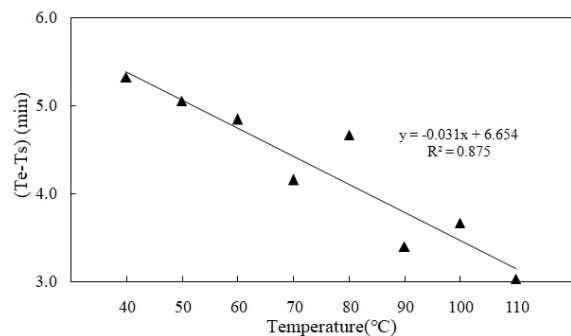


Fig. 16. Duration time of singularity

3.7 초기무게의 회복시간

초기무게 측정시점부터 특이점이 발생된 후 다시 초기무게를 회복할 때까지의 시간(Tr)을 비교하였다(Fig. 17). 가열

후 초기무게를 회복하는데 걸리는 시간은 40°C일 때 20.83 분, 110°C에서 31.10분으로 확인되어 가열온도가 높을수록 초기무게의 회복시간이 더 오래 걸림을 알 수 있다.

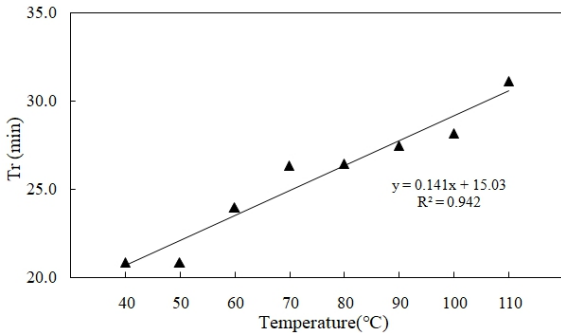


Fig. 17. Recovery time of initial weight

3.8 무게감소 시간과 무게증가 시간 비

초기무게 측정시점부터 특이점 발생까지의 시간(Ts)에 대한 특이점 종료 후 무게증가 시간(Tr-Te)을 비교하였다(Fig. 18). 온도에 따른 (Tr-Te)/Ts의 비는 69.15°C를 기준으로 낮은 온도에서는 1보다 작은 값, 보다 높은 온도에서는 1 이상의 값이 나타났다. 즉, 가열온도가 69.15°C 보다 높을 경우 특이점이 종료된 후 초기무게 회복까지의 시간이 상대적으로 더 오래 걸림을 의미한다.

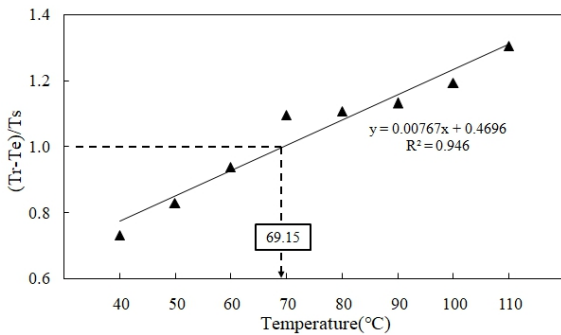


Fig. 18. Ratio of weight increase time to weight decrease time

3.9 무게회복 시간 비

초기무게 측정시점부터 특이점이 발생까지의 무게 감소 영역 시간(Ts)과 특이점 발생시점부터 초기무게 회복까지의 시간(Tr-Ts)을 비교하여 온도에 따른 (Tr-Ts)/Ts의 비로 나타내었다(Fig. 19). 그 결과, 무게회복 시간 비는 1.32(40°C) ~1.55(110°C)로 나타났다. 온도가 증가할수록 무게회복 시간 비가 증가하는 것은 Fig. 17의 결과와 같이 초기무게를 회복할 때까지의 시간이 더 오래 걸리기 때문으로 판단된다.

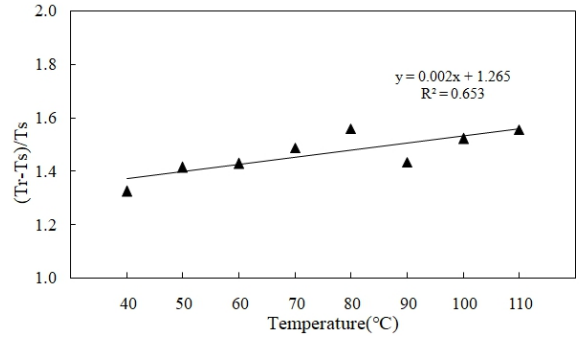


Fig. 19. Ratio of weight recovery time

3.10 특이점의 영향면적

Fig. 9는 암석으로 부터의 열발산이 진행되는 동안 열에너지의 감소로 인해 암석시료의 무게가 감소되는 면적을 나타낸다. Fig. 7에서는 사다리꼴 모양의 점 ABCD의 면적에 해당하며, 초기무게 측정 시점부터 특이점 발생까지 감소된 무게와 초기무게 회복점 까지의 시간을 무게(g)×시간(min)의 면적으로 나타낼 수 있다(Table 2, Fig. 20). 이 면적을 특이점의 영향면적(As)으로 간주하여 온도에 따라 비교하면 온도가 증가할수록 특이점의 영향면적이 증가하는데, 온도가 증가할수록 특이점 발생 시 무게감소가 크고 동시에 초기무게 회복시간도 길어지기 때문이다. 한편, 40°C에서는 특이점의 영향면적(As)이 0.003922(g·min)의 값으로 0에

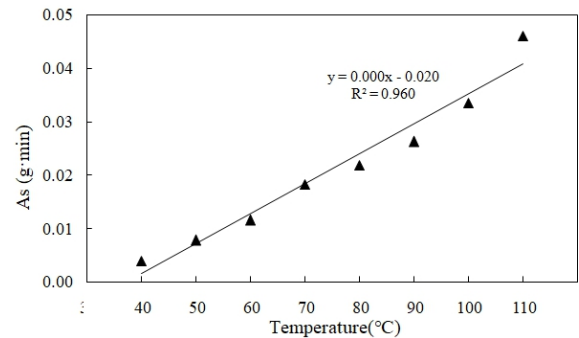


Fig. 20. Distribution of the singularity influence area

Table 2. Area of the singularity influence depending on temperature

Temperature (°C)	Singularity effect area (As, g·min)
40	0.003922
50	0.007776
60	0.011533
70	0.018292
80	0.021782
90	0.026222
100	0.033407
110	0.046084

가깝게 나타나, 40°C 이하에서는 무게 특이점이 나타나지 않음을 알 수 있다.

4. 무게 변화와 특이점의 발생원인

본 연구의 모든 실험결과는 가열된 암석시편이 공기 중에 노출되면 무게가 일시적으로 감소한 후 다시 증가한다는 사실을 보여준다. 그러나, Kim(2023)은 무게 감소와 특이점의 발생원인을 전도(Conduction), 대류(Convection), 복사(Radiation)의 복합적인 영향의 결과인 것으로 추정하였지만 실험결과를 통한 근거를 제시하지는 못하였다.

이와 관련하여 무게감소가 대류현상과 높은 관련성이 있을 것으로 예측되어 가열된 암석시료에 대한 대류 측정 실험을 추가적으로 수행하였다. 대류발생으로 인한 무게 변화만을 측정하기 위하여 전자저울의 상부에 대류흐름 측정 하중판(Load plate)을 설치하였고, 암석시료는 무게 측정부(Weight measure)와 접촉되지 않도록 상부공간에 시료판을 설치하여 위치시켰다(Fig. 21, Fig. 22). 비가열된 공기가 가열된 암석에 접촉되면 공기의 온도는 높아지고 밀도는 감소되어 상승기류가 발생된다. 즉, 가열된 공기가 암석 상부에 설치된 하중판을 밀어 올린다. 하중판과 연결된 기둥은 전자저울의 무게 측정부와 중력에 의해 접촉된 상태이며 초기 무게 값을 0으로 설정한 후 대류에 의한 무게감소를 측정하였다. 상승기류의 크기는 하중판에 감지된 무게 감소로 확인되며 상승기류의 크기가 클수록 상부 하중판에 더 큰 힘이 전달된다. 측정결과, 상승기류의 크기는 암석의 가열온도가 높을수록 더 크게 나타났다(Fig. 23). 가열온도 40°C에서 상승기류에 의한 가장 작은 무게 감소(-0.0025g)가 발생되었고, 가열온도 110°C에서 가장 큰 무게 감소(-0.0073g)가 확인되었다. 이러한 결과를 선행 수행된 특이점 측정 실험의 결과와 연결하여 분석하면 가열된 온도가 높을수록 대류에 의한 무게 감소가 더 크게 나타나므로 특이점의 무게 감소가

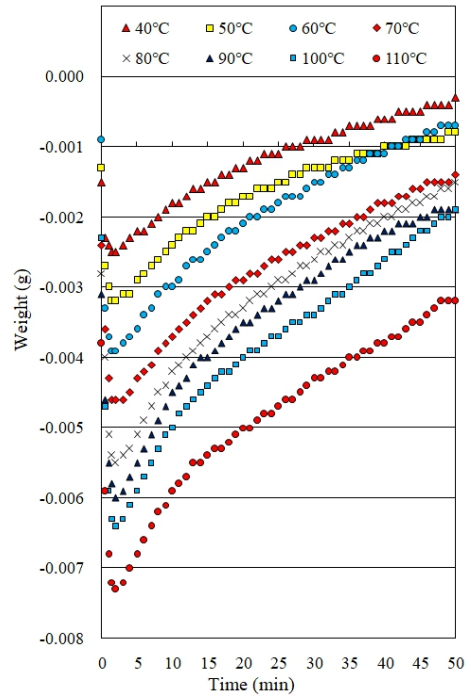


Fig. 23. Weight reduction by convection

대류현상과 그 크기에 관련된 것을 알 수 있다.

건조된 암석의 무게는 감소 후 증가 되었는데 무게 감소의 원인은 가열된 암석의 대류현상에 의한 영향으로 이해될 수 있고, 무게 증가의 원인은 공기 중 수분 흡수에 의한 영향으로 이해할 수 있다. Kim(2022)의 연구에 의하면 노건조된 흡시료를 데시케이터에서 상온으로 24시간 건조 후 공기 중에 노출 시 무게가 증가하였는데, 이러한 결과는 수분 흡수에 의한 무게 증가가 발생됨을 증명한다. 그러므로 노건조 시료의 무게 감소는 대류 발생으로 인한 영향이 공기 중 수분 흡수의 영향보다 우세할 때 발생되며, 반대로 무게 증가는 공기 중 수분 흡수의 영향이 대류 발생으로 인한 영향보다 우세할 때 발생된 것으로 이해된다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 자연상태의 암석시편을 40~110°C로 노건조 한 후 무게를 측정하여 온도에 따른 특이점의 발생과 그 특성을 분석하였고, 대류에 의한 무게 감소를 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 가열온도 40~110°C의 전체구간에서 특이점이 모두 발생되었고, 0.0001g(0.1mg) 감도의 저울을 사용하여 명확한 특이점 무게를 측정할 수 있었다. 암석시편에서 발생한 특이점은 무게감소 후 무게가 지속되는 형태를 나타

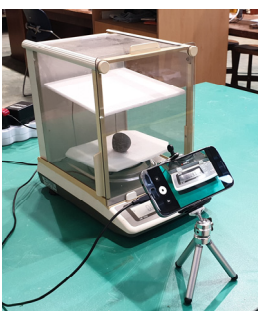


Fig. 21. Convection measurement

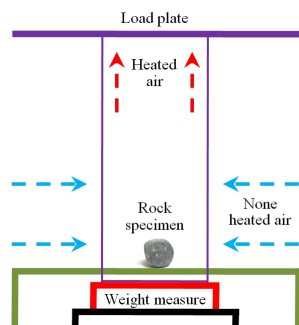


Fig. 22. Convection around heated rock specimen

내었는데 특이점의 모양이 점(Point)의 모양으로 나타나는 흡시료와는 다른 형태를 나타내었다.

- (2) 온도에 따른 초기점의 무게와 특이점의 무게는 가열온도가 높을수록 감소하였는데, 65~66°C 사이의 온도에서 변곡점을 가지는 2개의 직선형태로 나타났다. 또한, 가열온도가 높을수록 초기점과 특이점 사이의 무게 감소가 증가하였고, 특이점이 발생되는 시간도 최저 9분(50°C)에서 최대 약 12분(110°C)으로 증가하였다.
- (3) 온도의 증가에 따라 특이점 발생까지의 속도와 특이점의 지속시간은 감소하였으나, 초기무게의 회복시간은 온도가 높을수록 증가하였고, 특이점 발생시간과 이 후 초기무게 회복시간의 비도 증가하였다. 또한, 암석시료의 무게가 감소되는 특이점의 영향면적은 온도가 높을수록 증가하였다.
- (4) 110°C 가열 후 측정된 암석시편의 무게측정 결과, 특이점 분석에 의한 건조무게는 52.2136(g)으로 확인되어, 특이점 분석법을 이용하여 건조무게를 결정할 수 있다.
- (5) 대류시험 결과, 무게 특이점의 발생은 가열된 암석시편에서 발생하는 상승기류가 영향을 미친 것이며, 온도에 따른 대류 발생의 크기가 증가되어 특이점의 무게가 감소되었다.
- (6) 노건조 시료의 무게 감소는 대류 발생으로 인한 영향이 공기 중 수분 흡수의 영향보다 우세할 때 발생되며, 반대로 무게 증가는 공기 중 수분 흡수의 영향이 대류 발생으로 인한 영향 보다 우세할 때 발생된 것으로 이해할 수 있다. 그러므로, 무게 특이점이 일정시간 지속되어 나타나는 결과는 공기 상승으로 인한 대류의 영향과 공기 중 수분 흡수의 영향의 크기가 같을 때 발생된 것임을 알 수 있다. 향후, 공기 중 수분 흡수로 인한 무게 증가와 대류발생으로 인한 무게감소의 크기를 분리하여 측정하면 무게변화에 대한 보다 자세한 분석이 가능할 것으로 판단된다.
- (7) 암석의 온도가 높을수록 특이점의 지속시간이 짧게 나타났다는데, 이 결과는 향후 특이점과 가열온도에 따른 암석의 열발산에 따른 표면온도의 변화를 동시에 측정하여 설명할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 상온상습 상태에서 수행된 실험으로 실험과정 중 온도

와 습도를 직접 측정하지는 않았다. 온도 및 습도의 변화에 따른 특이점의 변화와 특성에 관하여는 향후 추가적인 연구의 필요성이 존재한다.

References

1. ASTM (2019), Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, D2216-19. ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI:10.1520/D2216-19.
2. Kim, S. J. (2022), A Experimental study of the weight increase of the oven dried weathered granite soil due to moisture absorbed during air exposure, The Journal of Engineering Geology, Vol. 32, No. 3, pp. 401~410 (In Korean).
3. Kim, S. J. (2023), Experimental study of the oven dried soil weight measurement using singularity analysis, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 24, No. 3, pp. 5~14 (In Korean).
4. KS F 2104 (2018), Standard test method of organic matter contents in soils by ignition loss (In Korean).
5. KS F 2301 (2020), Practice for preparing disturbed soil samples for soil testing (In Korean).
6. KS F 2302 (2017), Standard test method for particle size distribution of soils (In Korean).
7. KS F 2306 (2020), Standard test method for water content of soils (In Korean).
8. KS F 2308 (2022), Test method for density of soil particles (In Korean).
9. KS F 2324 (2022), Unified soil classification system (In Korean).
10. KS F 2341 (2017), Standard method for wet preparation of soil samples for particle size analysis and determination of soil constants (In Korean).
11. KS F 2503 (2019), Testing method for density and absorption of coarse aggregate (In Korean).
12. KS F 2504 (2019), Testing method for density and absorption of fine aggregate (In Korean).
13. KS F 2518 (2020), Standard test method for density and water absorption rate of natural stone (In Korean).
14. KSRM (2006) Standard test method for absorption and bulk specific gravity of rock, Tunnel and Underground Space, Vol. 16, No. 2, pp. 99~100 (In Korean).
15. Lee, S. K. and Lee, T. J. (2010), A new suggested method for determining solid weight of rock samples by weight monitoring during drying process, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 47, No. 2, pp. 183~190 (In Korean).