

황등화강암 시편의 크기에 따른 건조무게와 특이점 분석

이대형 · 김석주*

경북도립대학교 토목공학과 교수

Analysis of the Influence of Sample Size on the Dry Weight and Singularity Weight of Hwangdeung Granite Rock Samples

Dae-Hyoung Lee · Suk-Joo Kim*

Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongbuk Provincial College

Abstract

The pertinent Korean Industrial Standard (KS F) requires that rocks dried at $105 \pm 5^\circ\text{C}$ be taken out of the oven into air and weighed on a scale. However, when rocks are exposed to air after the drying process, they absorb moisture, meaning that their weight will increase. In this study, eight cubic samples of Hwangdeung granite of different sizes were used to measure and compare the dry weight. The dry singularity weight measured in air was smaller than that measured in the drying oven. The difference in dry weight showed a positive correlation with sample size. Conversely, the difference in dry weight per unit weight of rock showed a negative correlation with sample size. The weight of a rock sample exposed to air is determined by the magnitude of the influence of convection currents occurring around the heated rock and the influence of moisture absorption in air. A singularity occurs when the magnitudes of these two effects are equal. The larger the rock sample, the longer the time taken for the singularity to occur, the greater the weight loss of the sample, and the longer the time taken for the sample to return to the initially measured weight on account of the greater moisture absorption for larger samples than smaller samples. In the future, research into the singularity and dry weights measured inside the drying oven will help to identify and address the limitations of the current KS F testing regulations.

Keywords: Hwangdeung granite, dry weight, convection, singularity

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Suk-Joo Kim
E-mail: smbstory@naver.com

Received: 20 February, 2024

Revised: 21 March, 2024

Accepted: 25 March, 2024

© 2024 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

우리나라의 한국산업표준(KS F)에는 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 노건조된 암석을 대기중에 꺼내어 저울에 무게를 측정하도록 하고 있다. 그러나 건조로 외부의 대기에 노출된 암석에서는 대기중의 수분을 흡수하여 무게가 증가하는 문제가 발생된다. 본 연구에서는 정육면체 모양으로 가공된 크기가 다른 8개의 황등화강암 시편을 사용하여 측정 방법에 따른 건조무게를 측정하고 비교 분석하였다. 대기중에서 측정된 특이점의 건조무게는 건조로 속에서 측정된 건조무게에 비하여 더 작게 나타났다. 건조 방법에 따른 건조무게의 차이는 암석의 크기와 양(+)의 상관관계를 나타내었고, 암석의 단위무게당 건조무게 차이는 암석의 크기가 클수록 오히려 작아지는 음(-)의 상관관계를 나타내었다. 대기중 노출된 암석의 무게는 가열된 암석

주위에서 발생하는 대류의 영향과 대기중 수분 흡수로 인한 영향의 크기에 따라 결정되며, 특이점은 두가지 영향의 크기가 같을 때 발생된다. 암석의 크기가 클수록 특이점 발생까지의 시간이 더 오래 걸리고 무게의 감소량도 증가되었다. 또한, 수분 흡수에 의한 초기 측정 무게까지 회복되는 시간도 더 오래 걸렸다. 향후, 특이점의 무게와 건조로 내부에서 측정된 건조 무게에 관한 연구를 통하여 현재 한국산업표준(KS F) 시험규정의 한계점을 보완할 수 있을 것이다.

주요어: 황등화강암, 건조무게, 대류, 특이점

서론

암석의 비중과 단위중량을 측정하기 위해서는 암석을 노건조하여 순수한 암석의 무게를 측정해야 한다. 우리나라의 건조암석의 무게 측정을 위한 규정인 KS F 2503(2019)과 KS F 2504(2020) 그리고, KS F 2518(2020)에서는 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 노건조한 후 건조로에서 시료를 꺼내어 저울에 무게를 측정하도록 규정하고 있다. 또한, 한국암반공학회의 암석의 흡수율 및 비중 측정 표준시험법(KSRM, 2006)에서는 $105 \pm 3^\circ\text{C}$, Brown(1981)에서는 $105 \pm 5^\circ\text{C}$, ASTM D2216-19(2019)에서는 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 노건조하여 암석의 무게를 측정하도록 규정하고 있다. 그러나, 노건조된 시료는 무게측정을 위해 대기중에 노출시 대기중의 수분을 흡수하여 시간이 지남에 따라 시료의 무게가 증가된다(Kim, 2022). 이러한 무게 오차의 발생을 제거하기 위하여 Lee and Lee(2010)는 암석의 무게를 가열중인 건조로 속에서 측정하는 방법을 제안하기도 하였으나, 앞에서 언급한 현재의 규정된 시험방법들을 따를 경우 무게 측정시 대기중 수분 흡수의 영향을 근본적으로 제거할 수 없는 한계점이 존재한다. Kim(2023)은 노건조된 암석의 대기중 무게 증가에 관한 연구에서 무게 특이점(Singularity)이 존재하며 특이점의 무게를 암석의 건조무게로 간주할 수 있다고 하였다. 그러나, 건조로 속에서 측정된 건조무게와 대기중에서 측정된 특이점의 건조무게의 관계에 대한 직접적인 비교 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 8개의 화강암 시편에 대하여 건조로 속에서의 건조무게와 건조로 외부에서 측정된 특이점의 무게를 측정하여 비교 분석하였다. 실험 대상 암석으로 전라북도 익산시 황등면에서 주로 생산되는 황등화강암(Hwangdeung Granite)을 사용하였다. 황등화강암은 다른 화강암에 비하여 내습성이 좋아 고급 석재공예품으로 많이 활용되었다. 익산 미륵사지 석탑(국보 제11호), 익산 왕궁리 오층석탑(국보 제289호), 익산 연동리 석조여래좌상(보물 제45호) 등이 대표적이다. 매장량은 10억 6,200만 m^3 로 추정되며 주로 회백색을 나타낸다. 역학적 특징으로 하중지지력 및 충격저항성, 온도저항성 및 변형저항성, 낮은 철분함량으로 인한 내부식성, 마모저항성 및 충격저항성 등의 장점이 있어 우리나라에서 생산되는 화강암중 최고 수준의 품질로 평가된다.

암석의 건조무게 측정을 위해 본 연구에서는 2가지 종류의 실험을 수행하였다. 첫 번째로 가열중인 건조로 속에서 암석의 무게를 측정하였고, 두 번째는 KS F 2503(2019)과 KS F 2504(2020), KS F 2518(2020)의 규정에 따라 노건조 후 시료를 꺼내어 대기중에서 무게를 측정하였다. 그 후, 2가지 실험의 결과를 비교하여 암석의 무게 특이점을 확인하고, 무게측정 방법에 따른 암석의 건조무게 차이의 크기와 발생 원인을 규명하고, 암석의 크기와 건조무게의 관계성을 분석하였다.

건조로 내부에서의 건조무게

본 연구에서는 무게와 크기가 가장 작은 HD-1 부터 가장 큰 HD-8 까지 8개의 암석 시편을 준비하였다(Fig. 1). 건조된 암석의 무게변화에 관한 분석이 연구의 핵심 관점이므로 암석의 무게와 크기를 변수로 채택하였고, 암석 종류는 황등화강암(Hwangdeung Granite)으로, 형상은 정육면체로 가공하여 암질의 종류와 형상에 대한 변수는 발생되지 않도록 하였다.

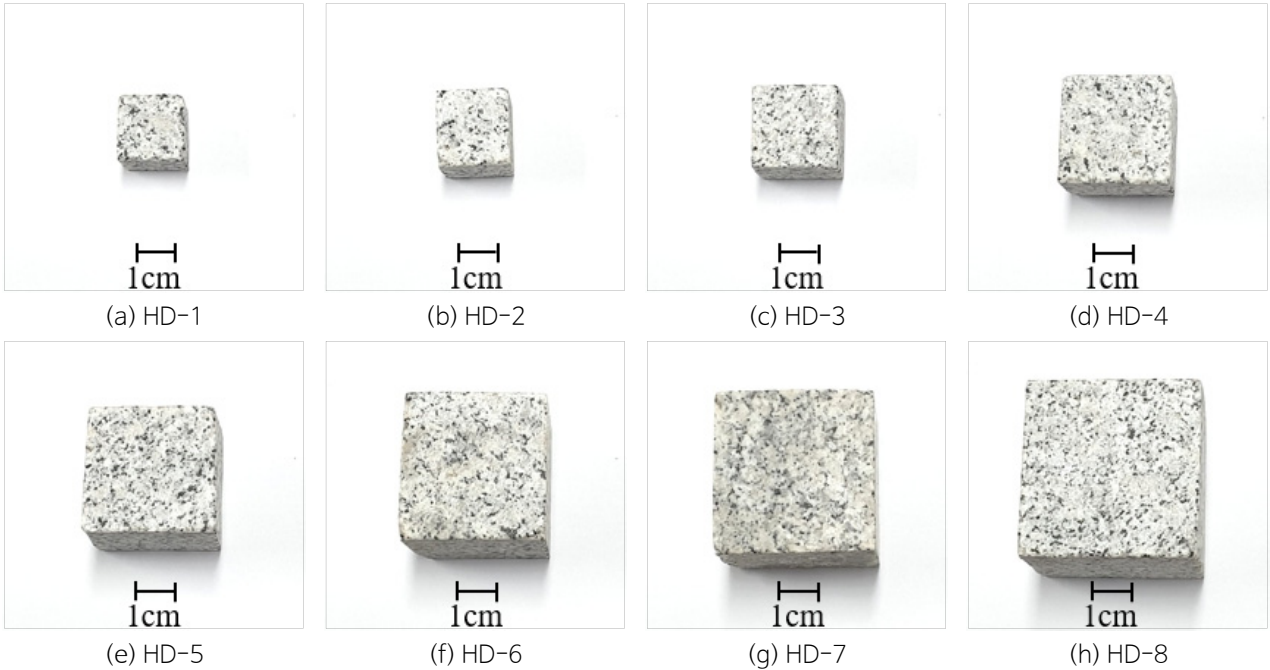


Fig. 1. Photographs of the samples of Hwangdeung granite analyzed in this study.

첫 번째 수행된 실험에서는 건조로 내부에서 측정된 암석의 무게(이하 ‘건조로 내부무게, W_{inner} ’로 명한다)를 측정하여 순수한 암석만의 무게를 측정하였다. 이때, 암석의 건조 온도를 한국산업표준(KS F 2503, KS F 2504, KS F 2518)에서 규정한 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 범위중 최대 온도인 110°C 로 설정하여 암석 내부의 수분을 보다 확실하게 제거 하였다. 한편, 건조로 내부의 암석 무게를 측정하기 위해서는 건조로 외부에 위치한 저울에 하중을 전달할 수 있는 장치가 필요하다. Lee and Lee (2010)는 건조로의 상부에 구멍을 만들어 하중전달 장치를 상향으로 설치하였다(Fig. 2). 그러나, 이 경우 건조로 내부의 가열된 공기가 밀도 차이와 대류 발생으로 인해 건조로 상부의 구멍으로 분출되었으며, 그 결과 암석의 무게가 일정값에 수렴되지 않는 문제가 발생되었다. 더욱이, 매달린 암석의 무게 측정을 위한 도구(E: Hanging Weighing Scoop)가 건조로의 상부와 접하여 설치된 저울(A: Balance)에 연결되었고, 건조로 장치로부터 발생하는 진동 등의 다른 하중은 저울로

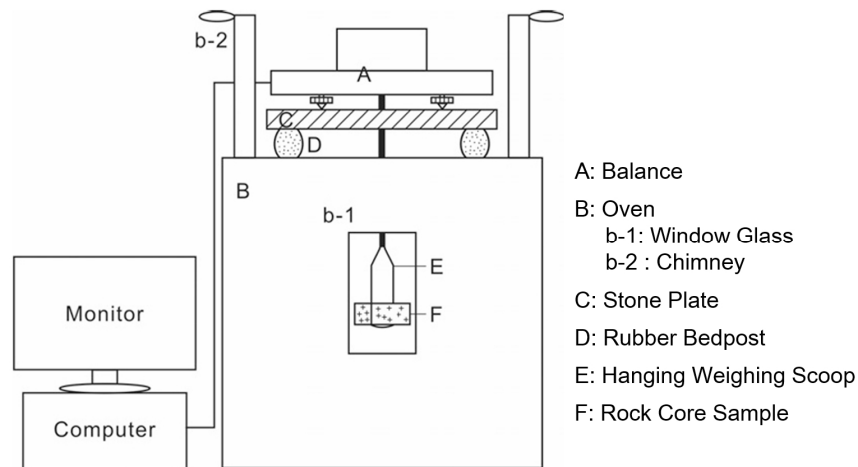


Fig. 2. Apparatus for monitoring sample weight (Lee and Lee, 2010).

전달되지 않도록 건조로와 저울 사이에 고무 재질의 장치(D: Rubber Bedpost)를 사용하였으나, 건조로의 진동을 근본적으로 제거하지 못한 측정시스템의 구조적 한계점이 확인되었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 건조로 하부에 하중전달 장치를 설치하고 건조로와 저울을 물리적으로 분리하여 건조로에 발생하는 진동이 저울에 전달되지 않도록 하였다. 그 결과 가열 공기의 대류현상에 의한 영향이 현저히 감소된 상태에서 무게를 측정할 수 있었다. 이때, 0.0001 g (0.1 mg) 감도의 전자저울(HR-200)을 사용하여 암석의 정밀한 무게를 측정하였다.

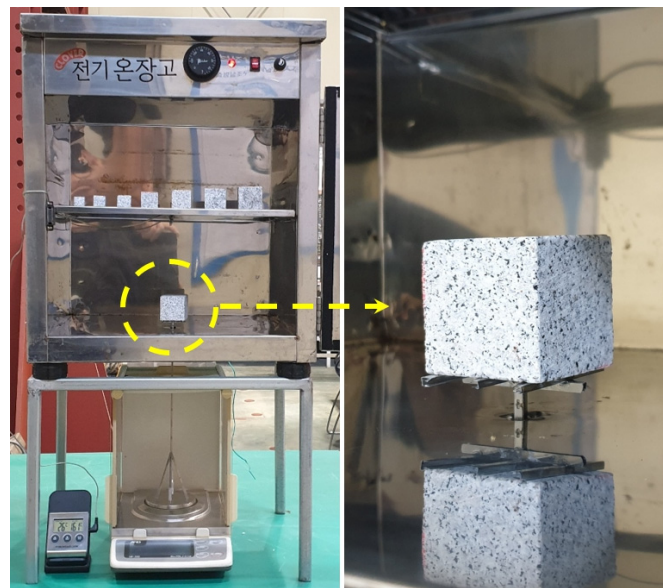


Fig. 3. Photograph of the drying oven (CL-50) and electronic scale (HR-200) used in this study.

Fig. 1의 암석 시편은 자연상태에서 채취된 것이므로 암석 내부에 다량의 수분을 흡수하고 있다. 수분 제거를 위한 암석의 노건조 시간에 관하여 KS F 2518(2020)에서는 24시간, KS F 2503(2019)과 KS F 2504(2020)에서는 질량의 변화가 없을 때 까지 건조하도록 규정하고 있다. 한편, 암석의 노건조 시간과 무게의 변화에 관한 Lee and Lee(2010)의 연구 결과에 의하면 24시간의 노건조로 암석의 무게가 일정한 값으로 수렴되지 않는 결과가 확인되므로, 보다 완벽한 수분제거를 위해 본 연구에서는 8개의 암석 시편 전체를 110°C에서 30일간 선행적으로 노건조하였다. 그 후, 각각의 암석을 24시간 이상 추가적으로 노건조하여 건조로 내부에서 각 10회씩 무게를 측정하였다. 측정 결과 8개 암석 시편 중 HD-1 암석에서 가장 작은 11.7035 g, HD-8 암석에서 가장 큰 186.8639 g의 건조무게가 확인되었다(Table 1).

건조로 내부에서 암석의 무게를 측정하면 외부 공기(대기)로부터의 영향이 전혀 없는 상태에서 무게를 측정하게 되어 순수한 암석만의 무게를 측정할 수 있다. 그러므로 ‘암석의 건조무게’라는 용어와 개념에 가장 적합한 무게 측정 방법은 건조로 내부에서 건조무게를 측정하는 것이라 할 수 있다. Table 1의 결과는 건조로 내부에서 무게가 측정된 8개 암석의 순수한 건조무게를 나타낸다.

Table 1. Dry weight of the Hwangdeung granite samples measured in the drying oven

Rock sample	HD-1	HD-2	HD-3	HD-4	HD-5	HD-6	HD-7	HD-8
Dry weight (g)	11.7035	17.1774	23.9806	49.1890	78.4739	108.8175	145.3838	186.8639

대기중 무게와 특이점

두 번째 수행된 실험에서는 HD-1 부터 HD-8 까지의 8개의 암석시편을 110°C로 24시간 가열한 후 건조로 외부의 상온 상습의 대기중에서 각 10회씩 시간에 따른 무게를 측정하였다. 그 결과, Fig. 4에 나타낸 HD-1 암석의 무게 변화와 같이 무게가 감소 후 증가하는 특이점이 나타났다. 특이점은 실험에 사용된 8개의 황등화강암 시편 모두에서 나타났고, 건조로 외부의 대기중에서 측정된 무게(이하 ‘건조로 외부무게, W_{outer} ’로 명한다)중에서 가장 작은 값을 나타낸다. 무게 변화는 가열된 암석 주위에서 발생된 대류의 영향과 대기중 수분 흡수의 영향에 의해 결정되며, 노조건 온도에 따른 현무암의 무게 변화와 특이점에 관한 연구에 의하면 가열된 암석 주위에서 발생된 대류의 영향이 대기중 수분 흡수의 영향 보다 클 때 무게가 감소하며 반대일 때 무게가 증가된다는 것이 확인되었다(Kim, 2023).

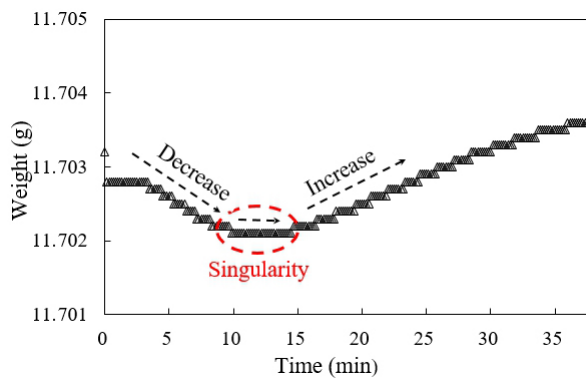


Fig. 4. Dry weight change and singularity of rock sample HD-1.

Kim(2023)은 건조된 암석의 특이점에 대하여 Fig. 5와 같이 설명하였는데, 무게변화의 과정을 무게 감소 영역(Decrease zone), 특이점 영역(Singularity zone), 무게 증가 영역(Increase zone)으로 구분하여 설명하였다. 암석 시편의 건조무게 변화를 건조무게 측정을 처음 시작한 초기무게(A점)과 특이점 시작점(B점), 특이점 종료점(C점), 무게 회복점(D점)으로 구분하고 무게와 시간을 초기무게(W_i), 특이점 무게(W_s), 측정 시작시간(T_o), 특이점 발생시간(T_s), 특이점 종료시간(T_e), 초기무게 회복시간(T_r)으로 나타내어 설명하였다. 본 연구에서도 Fig. 5의 그림을 이용하여 건조무게와 특이점을 설명하고자 한다.

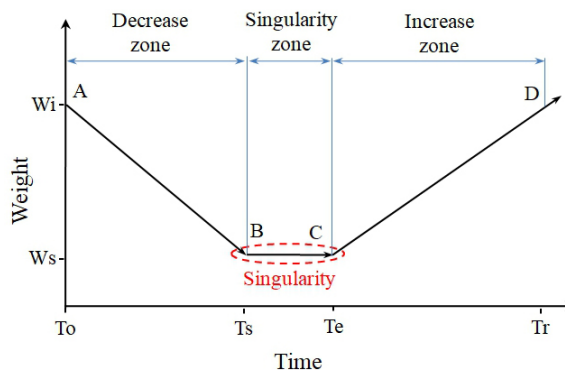


Fig. 5. Shape of the weight singularity of a typical rock specimen (Kim, 2023).

8개 암석의 대기중 건조무게 측정후 무게변화를 건조무게 측정을 처음 시작한 초기점(A점)을 기준으로 각각 나타낸 결과 건조무게의 변화와 특이점의 형태가 Fig. 5와 같이 무게 감소 영역(Decrease zone), 특이점 영역(Singularity zone), 무게 증가 영역(Increase zone)의 형태로 나타났다(Fig. 6). 즉, 8개의 암석 시편 모두 시간이 지남에 따라 무게가 감소한 후 증가하는 특이점이 나타났는데, 크기가 가장 작은 HD-1 암석에서는 초기점(A점, W_i)부터 특이점(B점, W_s)까지의 무게 감소량이 상대적으로 작게, 크기가 가장 큰 HD-8 암석에서는 무게 감소량이 상대적으로 크게 나타났다. 이와 관련하여 암석의 크기에 따른 특이점의 특성을 확인하기 위한 다양한 분석이 수행되었다.

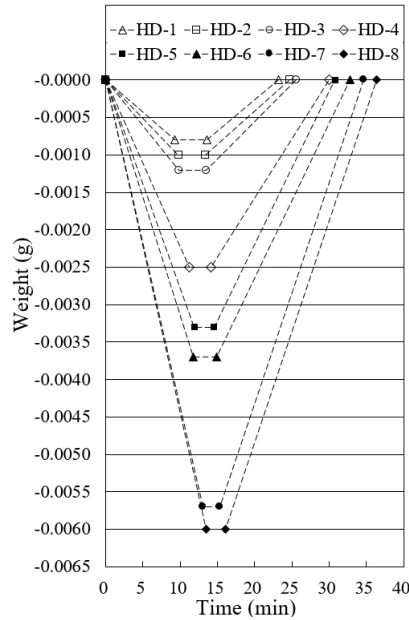


Fig. 6. Dry weight and singularity of the measured rock samples.

초기점 무게 대비 특이점 무게 감소

초기점(A)과 특이점(B) 사이의 무게 감소량($W_i - W_s$)은 건조로 내부에서 측정된 건조무게의 크기, W_{inner} 에 비례하여 증가하였다(Fig. 7). 성질이 같은 암석에서 무게와 크기가 큰 경우 비표면적이 커지고 공기와의 접촉면이 증가된다. 그 결과 대류 발생의 크기가 증가하여 무게가 감소된다.

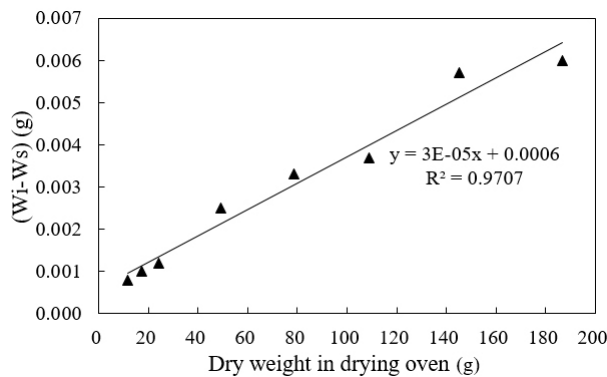


Fig. 7. Reduction in singularity weight (W_s) compared with initial weight (W_i).

특이점의 발생시간

8개의 암석 시편의 초기무게 측정 시점(T_0)부터 특이점이 발생될 때까지 걸리는 시간(T_s)은 약 9분 16초(HD-1)에서 13분 28초(DH-8)의 범위에서 나타났다. 크기가 큰 암석일수록 특이점 발생까지 더 오랜 시간이 걸렸다(Fig. 8). 이러한 결과는 암석의 크기가 클수록 열방출에 걸리는 시간이 보다 길어지기 때문으로 판단된다. 그러므로, HD-1 암석의 경우, 9분 16초까지는 대류발생에 의한 무게 감소 영향이 수분 흡수에 의한 무게 증가 영향보다 큰 상태이며, 특이점에서는 이 두 영향의 크기가 동일하다고 할 수 있다.

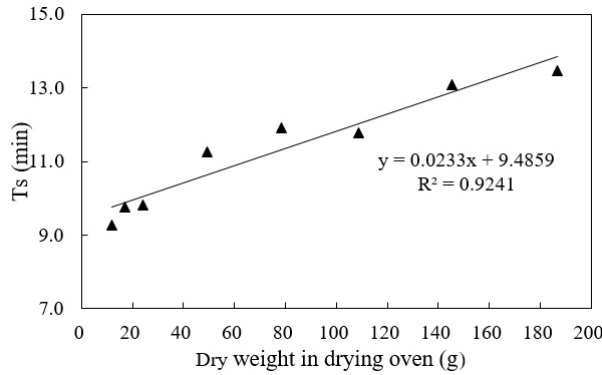


Fig. 8. Occurrence time of singularity (T_s).

특이점의 지속시간

분석 결과 중 가장 특이할 만한 내용은 특이점이 발생된 후 특이점 무게가 상당시간 지속되는 결과가 나타난 것이다. 특이점 값의 지속은 가열된 암석 주위에서 발생하는 대류에 의한 무게 감소의 크기와 대기중 수분 흡수로 인한 무게 증가의 크기가 같을 때 발생된다. 특이점의 지속시간($T_e - T_s$)은 건조로 내부에서 측정된 건조무게(W_{inner}) 즉, 암석의 크기와 반비례의 관계를 나타내었다(Fig. 9). 크기가 작은 암석에서 특이점의 지속시간은 길게 나타났고, 반대로 크기가 큰 암석에서 지속시간이 더 짧게 나타났다. 특이점의 지속시간은 최소 2분 35초(HD-8)에서 최대 4분 21초(HD-1)로 확인되었다.

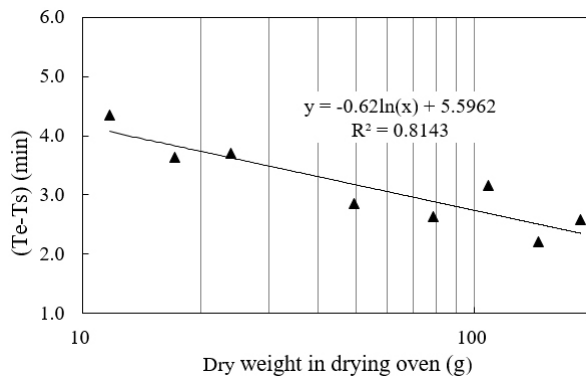


Fig. 9. Duration of singularity ($T_e - T_s$).

무게 감소 및 증가시간 비교

초기무게 측정시점(T_0)부터 특이점 발생까지의 시간(T_s)과 특이점 종료 후 무게 증가 시간($Tr - Te$)을 비교하였다. 건조로 내부에서 측정된 건조무게(W_{inner})에 따른 $(Tr - Te)/(Ts - T_0)$ 의 비는 1.04~1.51로 나타났다(Fig. 10). 암석의 크기가 크고 무게가 무거울수록 특이점 발생까지의 시간에 비해 특이점이 종료된 후 초기무게 회복까지의 시간이 상대적으로 더 길게 나타났는데, 암석의 크기가 클수록 열발산에 의한 대류의 발생이 무게 감소의 원인으로 상당 시간동안 작용하였기 때문으로 판단된다.

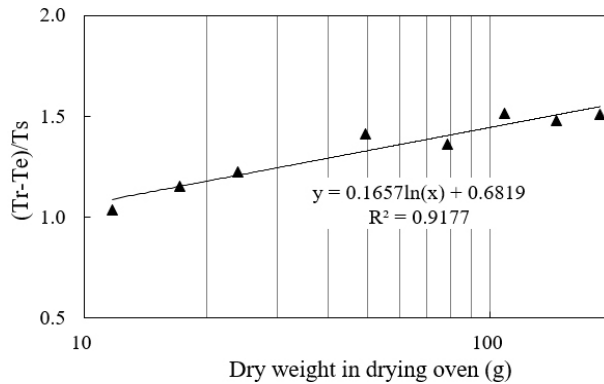


Fig. 10. Ratio of weight increase time ($Tr - Te$) to weight decrease time (T_s).

암석의 크기와 건조무게의 차이

2가지 실험의 결과에서, 노건조된 8개 암석 시편에 대한 대기중 측정된 특이점 무게(Singularity weight, W_s)와 건조로 내부무게(W_{inner})의 비교 결과, 8개 암석 모두에서 특이점의 무게가 더 작게 나타났다(Table 2). 일반적으로, 노건조된 암석이 대기중에 노출되면 수분 흡수의 영향으로 인해 시간이 지남에 따라 무게가 증가되지만, 110°C로 가열된 경우 암석의 주위에 발생된 대류현상으로 인해 암석의 무게가 감소되었으며, 그 결과 특이점의 무게가 건조로 내부무게보다 오히려 더 작게 나타나게 된다.

Table 2. Dry singularity weight of rock samples measured in air

Rock sample	HD-1	HD-2	HD-3	HD-4	HD-5	HD-6	HD-7	HD-8
Singularity weight (g)	11.7014	17.1746	23.9771	49.1832	78.4665	108.8088	145.3752	186.8537
Weight difference (g)	0.0021	0.0028	0.0035	0.0058	0.0079	0.0087	0.0092	0.0102
Weight difference rate (%)	0.01779	0.01646	0.01444	0.01188	0.01006	0.00795	0.00633	0.00546

건조로 내부무게와 특이점의 무게의 차이($W_{inner} - W_s$)는 암석의 크기와 무게가 무거울수록 더 크게 나타나는 양(+)의 상관관계를 보였다(Fig. 11). 이러한 결과는 크기가 큰 암석(HD-8)일수록 공기와 접하는 표면적이 증가하고 상대적으로 대류현상이 더 크게 발생하여 암석의 무게 감소에 더 크게 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 즉, 암석의 크기가 크고, 비 표면적의 크기가 클수록 대류현상이 더 크게 작용하고, 그 결과 대기중에 노출된 암석의 무게를 감소시켜 특이점 무게도 감소된다.

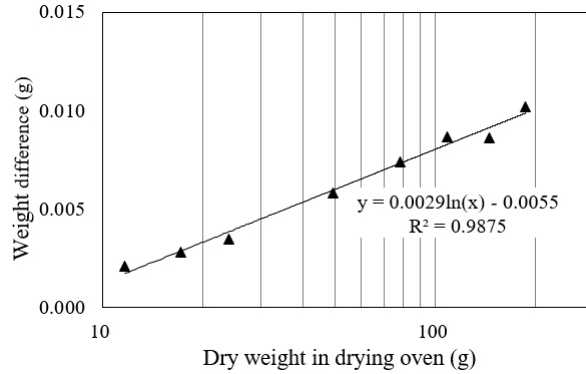


Fig. 11. Diagram of the difference between singularity weight and dry weight in the drying oven versus dry weight in the drying oven.

한편, 건조로 내부무게와 특이점의 무게 차이($W_{\text{inner}} - W_s$)를 건조로 내부무게(W_{inner})로 나누면 단위무게당 비율로 나타낼 수 있는데, 그 결과 HD-1에서는 0.01779(%)로 가장 크게, HD-8에서는 0.000546(%)로 가장 작게 나타났다(Fig. 12).

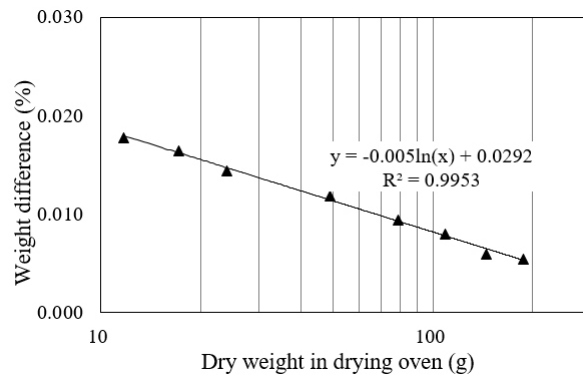


Fig. 12. Diagram of the percentage difference between singularity weight and dry weight in the drying oven versus dry weight in the drying oven.

그러므로, 2가지 실험의 결과에서 암석의 건조무게 차이($W_{\text{inner}} - W_s$)는 암석의 크기와 양(+)의 상관관계가 있으며, 암석의 단위무게당 건조무게 차이($W_{\text{inner}} - W_s$)/ W_{inner} 의 비율은 암석의 크기가 클수록 작아지는 음(-)의 상관관계가 있음을 알 수 있다.

결론 및 고찰

본 연구에서는 우리나라의 대표적인 화강암인 익산지역의 황등화강암을 대상으로 크기가 다른 8개의 정육면체의 암석 시편을 제작하고 노건조 방법에 따른 암석의 건조무게를 측정하여 비교 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 110°C로 노건조된 암석을 대기중에서 0.1 mg 감도의 저울에 무게를 측정할 경우, 8개의 암석 시편 모두에서 무게가 감소후 증가하는 특이점이 나타났고, 암석의 크기가 클수록 특이점이 나타나기까지의 무게 감소량이 더 크게 나타났다.
- (2) 암석 시편의 크기가 클수록 무게 측정시 더 긴 시간이 지난후 특이점이 나타났고, 특이점의 지속시간은 암석의 크

기가 클수록 짧게 나타났다.

- (3) 암석 시편의 크기가 클수록, 특이점의 발생까지 걸리는 시간보다 특이점이 종료된 후 최초 측정된 무게까지의 회복 시간이 상대적으로 더 길게 나타났다.
- (4) 건조로 내부에서 측정된 암석의 건조무게와 건조로 외부에서 측정된 특이점의 무게에 대한 차이는 암석의 크기와 양(+)의 상관관계가 있고, 암석의 단위무게당 건조무게 차이의 비율은 암석의 크기와 음(-)의 상관관계가 있다.

현재, 한국산업표준(KS F)에서는 노건조된 암석을 건조로 밖으로 꺼내어 대기중에서 무게를 측정하도록 규정하고 있으나, 대기중 수분 흡수의 영향으로 인하여 정확한 건조무게를 측정하기 어려운 한계점이 있다. 그러므로, 노건조후 건조로 내부에서 암석의 무게를 측정하면 순수한 건조무게를 알 수 있다. 그러나 암석 시료의 크기가 클 경우 측정 장치의 가용 용량 등에 대한 한계가 있어 모든 시료에 적용하기에 현실적인 어려움이 있다. 건조된 암석을 건조로 외부에서 측정해야 한다면 측정시간에 대한 규정이 필요할 것이나, 한국산업표준(KS F)에는 측정시간에 대한 규정이 없다. 현재의 실험 규정에 따라 건조로 외부에서 무게를 측정할 경우 가장 작은 무게를 나타내는 특이점의 무게를 이용하여 건조무게를 결정할 수 있으며, 시험규정의 한계점을 보완할 수 있을 것이다. 한편, 본 실험은 상온상습의 대기에서 수행되어 온도 및 습도 변화에 따른 실험결과의 정확도 검토는 수행되지 않았다. 또한, 건조로 내부에서 측정된 건조무게 186.8639 g 이하의 암석들을 대상으로 한 미시적인 관점에서 수행된 연구이다. 향후 다양한 암종에 대한 특이점의 비교연구가 수행될 필요성이 있다.

References

- ASTM D2216-19, 2019, Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI:10.1520/D2216-19.
- Brown, E.T., 1981, Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods, Pergamon Press, Oxford, 211p.
- Kim, S.J., 2022, 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, 32(3), 401-410 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.J., 2023, Dry weight singularity analysis of rock specimen depending on temperature, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 24(9), 25-32 (in Korean with English abstract).
- KS F 2503, 2019, Testing method for density and absorption of coarse aggregate (in Korean).
- KS F 2504, 2020, Testing method for density and absorption of fine aggregate (in Korean).
- KS F 2518, 2020, Standard test method for density and water absorption rate of natural stone (in Korean).
- KSRM (Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering), 2006, Standard test method for absorption and bulk specific gravity of rock, Tunnel and Underground Space, 16(2), 99-100 (in Korean).
- Lee, S.K., 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, 47(2), 183-190 (in Korean with English abstract).