

## 중등 영재의 정량 측정 수행과 해석: 공기 밀도 반복측정 수업 사례

서다은\*, 전영석\*\*

### 〈 요약 〉

본 연구는 중등 과학 영재 학생들을 대상으로, 고정 부피 용기의 감압 전후 상태를 비교하여 공기 밀도를 산출하는 탐구 수업을 설계하고 학습자의 수행과 해석을 분석하였다. 이 수업은 관찰을 정량화하여 증거로 전환하고, 반복 측정과 절차 개선, 데이터 해석을 중시하는 과학·공학적 실천을 반영한다. 학생들은 이론값 산출, 부피 측정, 밀도 계산, 결과 해석을 순차적으로 수행하였으며, 수업 후 작성된 답안을 통해 정밀도와 정확도, 불확도 표현을 중심으로 평가 준거를 도출하였다. 분석 결과, 다수의 학생은 관련 이론과 계산 절차를 개략적으로는 이해했으나, 실제 측정과 기록 단계에서 나타나는 미세한 차이를 적절히 다루지 못해 최종 추정이 흔들리는 양상을 보였다. 결과 해석 단계에서는 정확도와 정밀도의 구분이 불명확하거나 근거 제시가 미흡한 답변이 다수 확인되었다. 이러한 결과는 과학 교육에서 성과 중심 평가를 넘어, 불확도와 정밀도 및 정확도 개념, 반복 측정과 재측정, 원인 진단과 개선 계획을 포괄하는 성찰적 실천 중심의 전환이 필요함을 시사한다.

주요어 : 정량 측정, 측정 불확도, 정밀도와 정확도, 반복 측정, 과학 영재 학생

\* 서울둔촌초등학교 교사, dirhsa@naver.com

\*\* 서울교육대학교 교수, jhunys@snu.ac.kr

## I. 서론

최근 과학과 교육과정에서는 분자·상변화, 물질의 특성, 열에너지 등 여러 영역에서 정량적 측정 활동이 축소되는 경향이 관찰된다. 중학교 수준 열에너지 탐구 활동은 2007 개정 교육과정에서 ‘여러 가지 금속의 비열 측정하기’였으나, 2009 개정과 2015 개정 교육과정에서는 ‘질량이 같은 두 물체의 비열 비교하기’로 바뀌었고, 2022 개정 교육과정에서는 ‘온도 센서를 이용하여 여러 가지 액체의 비열 비교하기’로 대체되었다(교육부, 2007, 2015, 2022; 교육과학기술부, 2009). 물질의 특성 탐구 활동 또한 2009 개정의 ‘녹는점, 끓는점, 밀도, 용해도 등의 물질의 특성 측정하기’가 2015 개정의 ‘다양한 물질의 특성 측정하고 비교하기’로 축소·통합되었고, 2022 개정에서는 혼합물 분리 탐구활동과 통합되어 ‘혼합물 분리 실험을 설계하고 수행하기’로 변화하였다(교육과학기술부, 2009; 교육부, 2015, 2022). 이러한 국가 수준 교육과정의 변화는 교과서 및 실제 수업 현장에서 측정과 관련된 학습 경험이 점차 감소하고 있음을 시사한다. 이와 더불어 과학 영재교육에서도 측정능력을 체계적으로 다루는 활동은 찾아보기 어렵다. 2024 한국영재학회 추계학술대회에 실린 영재학생들의 R&E 연구 보고서를 살펴보면, 대부분이 대형 프로젝트 성격의 연구로 구성되어 있으며, 연구의 초점이 실험 장치의 성능이나 현상 설명에 치우쳐 있다(한국영재학회, 2024). 측정 절차의 설계, 반복측정, 유효숫자 처리, 불확도 표현과 같은 정량적 탐구 역량이 명시적으로 드러난 사례는 매우 제한적이었다. 이는 영재교육 현장에서 연구 주제의 창의성이나 결과의 화려함이 강조되는 반면, 데이터의 신뢰도와 정밀성, 탐구 과정의 성찰이 상대적으로 소외되고 있음을 보여준다.

한편, NGSS(Next Generation Science Standards)에서는 측정을 과학적 탐구의 중심으로 규정하며, 과학·공학적 실천(Science and Engineering Practices, SEPs) 가운데 ‘탐구 계획과 수행(SEP3)’과 ‘데이터 분석과 해석(SEP4)’에서 이를 핵심 요소로 제시한다. SEP3에서는 관찰과 측정을 통해 데이터를 생산하고, 변인을 식별하며, 데이터의 양·정밀도·정확도 수준을 결정하고, 도구 선택과 절차 개선을 수행할 것을 요구한다. SEP4에서는 표·그래프·기초 통계를 활용하여 자료를 구조화하고, 측정오차와 표집 한계 등 해석상의 제약을 함께 제시할 것을 강조한다. 또한, 정밀도와 정확도를 높이기 위한 반복측정과 도구 개선의 필요성을 명시하며, 결론이 이러한 데이터에 의해 지지되어야 함을 분명히 하고 있다(National Research Council, 2013). 이러한 국제적 기준에 부합하여, 최근 해외에서는 측정 교육을 학습자의 탐구 역량과 직결된 핵심 역량으로 재조명하고 있다. 예를 들어, NIST(2021)와 TeachEngineering(2020)은 측정이 단순한 단위 변환 훈련이 아니라, 정확성(accuracy) 과 정밀성(precision)의 개념을 실제 맥락 속에서 경험적으로 익히게 하는 과정임을 강조하였다. 또한 SERC(Carleton College, 2019)는 측정과 불확도(uncertainty)의 통합 교육 모형을 제시하며, 불확도를 명시적으로 다루는 수업이 데이터 해석의 타당성을 높이고 과학적 사고를 촉진한다고 보고하였다. Labster(2023)는 가상 실험(virtual laboratory) 기반의 측정 학습에서 AR·VR 환경이 학습자의 몰입도와 개념 이해도를 향상시키는 효과를 보여주었으며, Hattie(2012)와 Edutopia(2020)는 명확한 목표 제시와 즉각적 피드백이 측정과정에서의 자기 성찰적 사고를 강화한다고 제안하였다. 이러한 논의는 과학 영재교육에서도 성과 중심의 일회성 탐구에서 벗어나, 정량적 측정 경험의 반복·비교·검증을 통해 탐구적 사고와 데이터 해석 능력을 기르는 방향으로의 전환이 필

요함을 시사한다.

이에 본 연구는 중등 과학 영재 학생을 대상으로 공기 밀도를 산출하는 측정 중심 수업을 설계하고, 학생들의 답변을 분석하여 정밀도·정확도·반복측정·불확도 표현 능력을 파악하고 이를 바탕으로 평가 준거를 제안하고자 한다.

본 연구에서는 측정과 관련된 핵심 개념을 다음과 같이 사용한다. ‘정확도(accuracy)’는 이론값 또는 기준값과의 근접성을, ‘정밀도(precision)’는 반복 측정값들 사이의 일치 정도를 의미한다. ‘오차(error)’는 학생이 인식하는 측정 과정의 차이와 원인(조작 실수, 도구 한계 등)에 대한 질적 진술을 가리키며, ‘불확도(uncertainty)’는 이러한 요인들을 반영하여 측정값의 신뢰도를  $\pm$ 범위로 정량화한 표현을 의미한다. 이후 분석에서는 이와 같은 정의에 따라 용어를 일관되게 사용하고자 한다.

## II. 연구 대상 및 방법

### 1. 연구 대상

본 연구는 2025년 2월 실험캠프에 참여한 중등 과학 영재 16명을 대상으로 하였다. 참가 학생들은 별도의 선발 시험을 거치지 않는 것으로, 과학 성취도가 높고 실험 경험이 풍부한 학생들로 구성되었다. 수업은 3시간 분량으로 진행되었으며, 주제는 공기의 밀도 측정이었다. 수업에서는 고정 부피의 진공 용기를 이용하여 감압 전후의 압력과 질량 차이를 측정하고, 이를 통해 공기 밀도를 산출하도록 하였다. 학생들은 각 단계(① 이론식 유도, ② 실험 설계, ③ 부피 측정, ④ 반복 측정, ⑤ 결과 해석)에 따라 탐구를 수행하였으며, 활동지에 제시된 문항에 대해 모두 손으로 직접 답안을 작성하였다.

실험 수업이 종료된 후 연구자는 학생들의 답안지를 수집하여 분석 자료로 사용하였다. 분석의 초점은 학생들이 제시한 정밀도와 정확도 인식, 불확도 표현, 반복 측정의 필요성 인식, 오류 진단 및 개선 제안에 두었다. 이와 같은 방법을 통해 측정 활동에서 학생들의 정량적 사고 수준과 해석 능력을 탐색하였다.

### 2. 연구 절차 및 분석 방법

#### 가. 수업 설계 및 절차

본 연구의 수업은 공기의 밀도를 측정하는 실험을 통해 정밀도·정확도·불확도 인식 능력을 평가할 수 있도록 설계되었다. 수업은 고정 부피의 진공 용기를 이용하여 감압 전·후의 압력 변화를 측정하고, 이로부터 공기 밀도를 산출하는 과정을 중심으로 구성하였다. 온도가 일정한 조건에서 용기의 내부 공기를 감압하면, 압력 변화에 따라 내부 공기의 질량이 감소한다.

이때 압력  $P_o$ (감압 전),  $P$ (감압 후), 질량  $m_o$ (감압 전),  $m$ (감압 후), 빠져나간 질량  $\Delta m$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{P}{P_o} = \frac{m}{m_o}, \Delta m = m_o - m = m_o \frac{P_o - P}{P_o}, \text{ 따라서 } m_o = \Delta m \frac{P_o}{P_o - P}$$

공기의 밀도  $\rho$ 는 측정된 용기 부피  $V$ 를 이용해 다음과 같이 계산된다.

$$\rho = \frac{m_o}{V} = \Delta m \frac{P_o}{(P_o - P)V}$$

수업의 구체적 절차는 Table 1과 같다.

Table 1. 발문 및 활동 요약

문항 번호	발문	활동
1	(실험설계) 전자저울, 진공용기와 기압계를 이용하여 공기의 밀도를 측정하는 방법을 설명하시오.	관계식 유도 및 필요한 물리량 파악
2	(이론값 계산) 현재 기온에서 공기의 밀도를 계산하시오.	이상기체 법칙을 이용한 이론값 계산
3	(측정 1) 진공 용기의 부피를 측정하시오.	수조, 물, 매스실린더를 이용한 부피 측정
4	(측정 2) [표]를 완성하시오 (질량, 압력 측정 후 공기 밀도 계산)	전자저울, 기압계, 온도계로 측정값 기록 및 계산
5	(반성) 측정한 공기 밀도 값의 정확도와 정밀도에 대해 설명하시오.	반복 측정 결과 및 이론값 비교를 통한 해석

학생들은 다음과 같은 절차를 따라 활동하였다.

① 공기 밀도 계산식을 유도하고, 측정해야 할 물리량(용기 질량, 내부 공기 질량, 감압 전후 압력, 온도 등)을 스스로 결정하였다.

② 공기의 조성비(질소 78.1%, 산소 21.0%, 아르곤 0.93%, 이산화탄소 0.03%)와 기온을 이용하여 이론 밀도값을 계산하였다.

③ 수조와 매스실린더를 이용해 진공 용기의 부피를 직접 측정하였다.

④ 전자저울, 기압계, 온도계를 사용하여 감압 전후의 온도·질량·압력을 세 차례 반복 측정하고, 이

를 바탕으로 질량차와 밀도를 계산하였다.

⑤ 반복 측정 결과를 비교하여 이론값과의 근접성(정확도), 반복값 간의 일치도(정밀도)를 근거로 판단하였다.

이와 같은 설계는 탐구 계획-실험 수행-데이터 해석-성찰적 판단의 연속 구조를 통해 학생들이 측정의 과학적 의미를 스스로 구성하도록 의도된 것이다.

#### 나. 분석 방법

수업 직후 연구자는 학생들이 작성한 활동지와 답안을 모두 수집하였다. 각 학생의 응답은 문항별로 전사되어 질적 코딩을 수행하였으며, 특히 정밀도 인식, 정확도 인식, 불확도 표현, 반복 측정의 근거 제시, 결과 해석의 일관성을 중심으로 분석하였다.

분석 과정은 다음 단계로 진행되었다.

자료 전사 및 1차 코딩 — 각 문항에 대한 응답을 ‘이론값 산출’, ‘측정 절차 기술’, ‘데이터 계산’, ‘결과 해석’의 4범주로 분류하였다.

2차 범주화 — 학생들의 진술에서 정밀도·정확도 구분, 불확도 표현 여부, 반복 측정의 필요성 언급 등을 세부 코드로 추출하였다.

교차 검증 — 2명의 연구자가 독립적으로 코딩하고 상호 불일치를 조정하여 신뢰도를 확보하였다.

사례 분석 — 대표적인 학생 응답을 발췌하여 탐구 과정에서의 사고 흐름과 오개념 양상을 질적으로 해석하였다.

또한 정량 분석을 위해 각 문항별 수행 수준을 3단계(‘명확함’, ‘부분적 이해’, ‘미흡’)로 구분하고, 응답 내 근거 사용 빈도와 정밀도·정확도 개념 구분 여부를 빈도 분석하였다(Table 2 참조).

Table 2. 수행 수준 분류 기준

문항 번호	문항 내용	수행 수준	판정 기준(활동지 응답 기준)
1	실험설계 (관계식·물리량)	명확함	관계식을 $\rho = \frac{m_o}{V} = \Delta m \frac{P_o}{(P_o - P)V}$ 까지 일관되게 전개하고, $\Delta m \cdot P_o \cdot P \cdot V \cdot \rho$ 의 의미를 구분하여 정확히 서술하며, 필요한 물리량( $M_o, M, P_o, P, V$ 등)과 측정 시점·방법을 구체적으로 기재함
		부분적 이해	$\Delta m$ 정의와 압력비-질량비의 핵심 연결은 있으나, 기호 의미를 끝까지 정리하지 못하거나 최종식을 완성하지 못함 / 주요 물리량 대부분은 언급하였으나, 일부 항목 누락 또는 기호-측정방법 대응이 모호함
		미흡	압력-질량 비례, $\Delta m$ 정의 등 핵심 관계가 불분명하거나, 수식 전개가 미완·부정확하여 밀도식으로 이어지지 못함 / 어떤 값을 언제·어떻게 측정하는지 알기 어려울 정도로 물리량이 누락·부정확함
2	이론값	명확함	공기 평균 분자량, 온도 환산(K), 압력 단위 변환을 명시하고, g/L 단위로 1.18

			-1.22 g/L 범위에 도달함
	계산	부분적 이해	계산 경로는 타당하지만, 온도·압력 보정이나 단위 변환 과정을 생략하거나, 중간 값·단위 기록이 불완전함
		미흡	계산이 공란이거나 상태량 대입이 부정확하여, 결과값의 타당성을 판단하기 어려운 수준임
3	측정1: 진공 용기 부피 측정	-	부피 값의 분포(평균, 표준편차, 범위 등)와 이상값 사례를 기술적으로 분석하였음.
4	측정2: 질량·압력· 밀도 계산	-	밀도 분포 및 이상치 분석을 중심으로 해석하였음.
5	반성: 정확도·정 밀도 (불확도 포함)	명확함	기준값(이론값)을 제시하고 이를 바탕으로 오차율(%)을 계산하여 산출하거나, 측정값의 편차를 통계적으로 처리하여 제시함.
		부분적 이해	기준값과의 대략적 비교("가깝다/멀다")나 반복값 간격 서술("비슷하다/차이가 크다")은 있으나, 오차율 계산 등 정량적 근거가 없거나, 정밀도·정확도·불확도 개념과의 연결이 불분명함.
		미흡	기준값 언급 없이 자신의 측정값만 옳다고 보거나, 정확도·정밀도에 대한 판단이 거의 드러나지 않음.

이러한 복합적 분석 절차를 통해 학생들의 측정 개념 이해 수준과 탐구적 사고 구조를 파악하였다.

### III. 결과 및 논의

#### 1. 측정 수행 및 계산 과정의 특징

학생 16명의 답안에서 공통적으로 관찰된 특징은, 이론식 유도과 밀도 계산 절차에 대한 이해 수준은 전반적으로 높았으나 실제 측정 과정에서의 데이터 일관성과 단위 처리의 불안정성이 두드러졌다는 점이다.

Figure 1.에서 보인 바와 같이 16명 중 12명은 용기 부피를 1.36-1.40 L 범위로 측정하여 높은 정밀도를 보였으나, 일부 학생은 (S2, S8) 수조 내 수위 차를 읽는 과정에서 부피 오차가 크게 나타났다. 또한 질량과 압력 측정값을 기록할 때 단위를 누락하거나, 압력 단위를 kPa와 mmHg 사이에서 혼용하는 사례가 있었다. 이와 같은 현상은 측정의 정밀도와 정확도 구분이 미흡할 때 발생하는 대표적인 오류로, 국제 연구에서도 유사한 양상이 반복적으로 보고된다. NIST(2021)는 학생들이 반복 측정값의 일치만을 근거로 '정확하다'고 판단하는 경향을 지적하였으며, TeachEngineering(2020)은 이러한 오류를 방지하기 위해 실험 단계마다 결과값에 대한 오차율을 계산하고 오차 원인을 스스로 설명하도록 지도할 것을 제안한 바 있다.

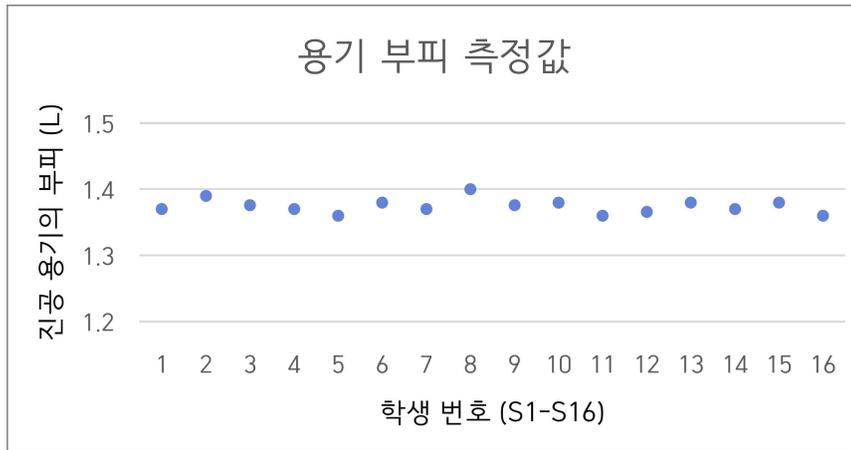


Figure 1. 학생별 용기 부피 측정값 (단위:L)

본 수업에서도 일부 학생은 계산 결과를 이론값과 비교하지 않고 측정값 간의 일치 정도만으로 결과를 평가하였다. 이는 정밀도(precision)와 정확도(accuracy)의 개념이 개별적 조작 경험에 비해 추상적으로 인식되고 있음을 보여준다.

## 2. 정밀도·정확도 인식과 불확도 표현

학생들의 답변에서 ‘정밀하다’는 표현은 주로 “반복 측정에서 비슷한 값이 나왔다”는 단순 기술로 제시되었으며, “이론값에 근접했다”는 판단을 ‘정확하다’는 용어로 표현한 경우는 절반 이하(7명)에 그쳤다. 특히, 이론값을 근거로 오차율을 산출하거나, 측정값의 편차를 통계적으로 처리한 답안은 3명뿐이었다. 이는 SERC(Carleton College, 2019)가 보고한 “학생들은 불확도를 측정값의 불일치로만 인식하며 체계적 오차나 측정 도구의 한계로부터 발생하는 불확도를 고려하지 않는다”는 결과와 일치한다. 불확도 개념은 과학 교실에서 명시적으로 다루어지지 않으면 학생의 경험적 감각으로만 이해되기 쉽기 때문이다. 이에 따라 측정 수업 설계 시에는 불확도 추정(uncertainty estimation)과 데이터 해석(data interpretation)을 분리하지 않고 통합적으로 다루는 교수 전략이 필요하다.

Labster(2023)는 가상 실험 환경에서 측정의 불확도를 시각화하면 학생들이 오차의 원인을 더 명확히 인식할 수 있으며, 이러한 시각적 피드백이 정밀도·정확도 개념의 통합 이해에 효과적임을 제시하였다.

## 3. 반복 측정과 데이터 기반 해석

Figure 2.에 나타난 바와 같이 공기 밀도 측정 결과의 평균값은 1.16 g/L로, 이론값 1.18 g/L에 근접하였으나, 개별 학생의 결과 편차는  $\pm 0.09$  g/L 수준으로 나타났다. 반복 측정 간 변동 폭이 큰

학생들은 대부분 압력값의 읽기 오류나 기압계 단위 전환에서 혼란을 겪은 것으로 나타났다.

이상값을 보인 학생들의 측정값을 구체적으로 살펴보면, 각기 다른 오류 양상이 나타났다. 예를 들어 S5의 세 차례 측정에서 감압 후 압력(P)은 집단 중앙값(약 502 hPa)보다 일관되게 높게 기록되어  $\Delta P = P_0 - P$ 가 작아지는 경향을 보였고,  $\Delta m$ 이 약 1 g 내외일 때는 밀도가 1.6-1.8 g/L 수준으로 과대 산출되었다. 반면 3회차에서는  $\Delta m$ 이 약 0.5 g로 작게 기록되어  $\rho$ 가 0.893 g/L까지 떨어지는 등, 같은 학생 내에서도  $\Delta m$ 과  $\Delta P$ 의 조합에 따라 밀도 추정값이 크게 요동쳤다. S6의 경우에는  $\Delta m$ 이 0.23 g으로 집단 중앙값(0.88 g)보다 현저히 작게 기록되어, 공기 밀도가 0.332 g/L로 과소 산출되었고, S11은 세 차례 모두  $\Delta m$ 을 1.68 g으로 동일하게 기록하여  $\rho$ 가 약 2.1 g/L로 일관되게 높게 유지되었다. 이러한 사례는 감압 후 압력과 질량 변화의 작은 기록 차이가 밀도 계산식

$$\rho = \frac{m_o}{V} = \Delta m \frac{P_o}{(P_o - P)V}$$
에서 크게 증폭되며, 반복 측정값의 산포뿐 아니라 각 회차의 측정·기록 과정 자체를 성찰적으로 점검하는 것이 중요함을 보여준다.

그러나 일부 학생은 이러한 편차를 “기구의 오차 때문”이라고 단순 언급하는 데 그쳤으며, 측정 과정에서 스스로의 절차적 오류(예: 감압 밸브 조작 시의 누기, 수조 온도 변화 등)를 진단하는 진술은 드물었다. 이는 반복 측정이 단순한 절차 반복이 아니라, 측정 행위에 대한 반성적 고찰 과정이어야 함을 시사한다.

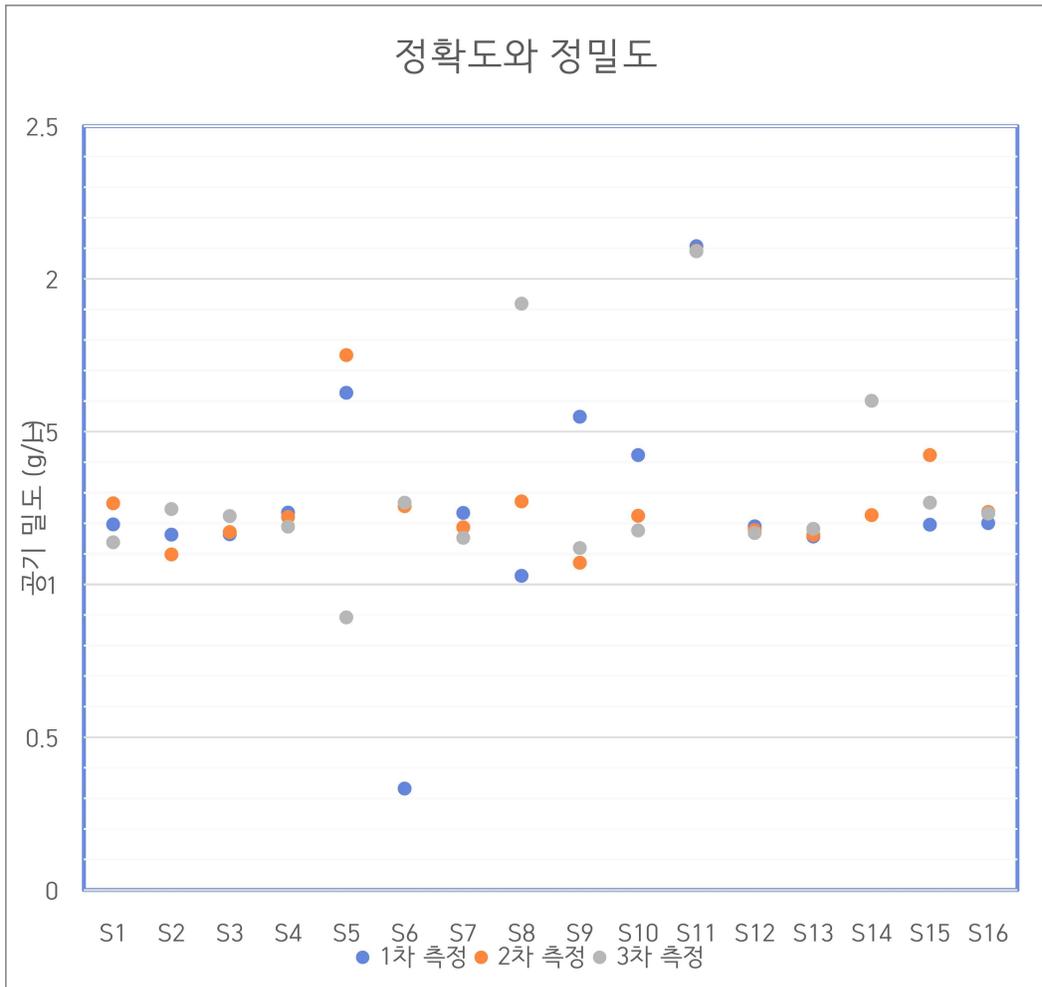


Figure 2. 학생별 공기 밀도 반복 측정 결과

Weaver et al.(2018)이 개발한 MIST(Measurement Instrument for Scientific Teaching)는 교사의 수업 설계에서 학생이 스스로 측정 절차를 점검하고 데이터의 신뢰성을 평가하는 활동을 포함해야 함을 강조한다. 본 연구 결과에서도, 학생이 오차 원인을 외적 요인으로만 귀인할 때 데이터 해석 능력의 발달이 제한됨을 확인하였다. 따라서 반복 측정 단계에서는 단순히 측정값의 일치 여부를 확인하는 것을 넘어, 측정 과정에서의 오차 전파와 도구 한계를 탐구하는 자기 피드백적 측정 루프(reflective measurement loop)를 체계적으로 설계해야 한다. 이러한 접근은 Edutopia(2020)와 Hattie(2012)가 강조한 ‘명확한 목표-피드백-자기평가’의 순환 구조와도 일치한다.

#### IV. 결론 및 제언

본 연구는 중등 과학 영재 학생을 대상으로 공기의 밀도를 측정하는 정량 탐구 수업을 설계·적용하고, 학생들의 수행 및 해석 과정을 분석하여 측정 개념 이해, 오차 인식, 반복 측정의 활용 수준을 탐색하였다. 수업은 감압 전후의 압력과 질량 변화를 측정하여 밀도를 계산하는 활동으로 구성되었으며, 이론식 유도, 부피 측정, 반복 측정, 결과 해석의 전 과정을 학생 스스로 수행하도록 하였다. 분석 결과, 학생들은 관계식 유도와 계산 절차는 대부분 정확하게 수행하였으나, 압력·질량 측정의 세부 정확도, 단위 변환, 불확도 표현에서는 어려움을 겪었다. 또한 정밀도와 정확도의 구분이 명확하지 않고, 반복 측정 결과를 단순한 '값의 일치'로 인식하는 경향이 나타났다. 특히 일부 학생들은 오차 원인을 실험기구나 환경 탓으로만 귀인하였으며, 자신의 조작 절차나 계산 방식의 문제로 반성하는 진술은 거의 없었다. 이러한 결과는 정량적 측정 활동이 축소된 교육과정의 영향과, 측정이 '단순한 실험 절차'로 여겨지는 교수·학습 문화가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

본 연구를 통해 얻은 교육적 시사점은 다음과 같다.

첫째, 정량적 측정 경험의 강화가 필요하다. 학생들은 반복 측정 과정에서 정밀도 개념을 경험적으로 익히지만, 그 차이를 수학적으로 해석하고 오차를 정량화하여 불확도로 표현하는 단계에서는 어려움을 겪는다. 이에 따라 과학 영재교육에서는 실험을 일회성 수행이 아닌 '재측정-비교-검증-개선'의 순환 구조로 설계하여 자기 성찰적 탐구 루프(reflective inquiry loop)를 경험하도록 해야 한다. 예를 들어 활동지에 ① "이번 측정 과정에서 가장 신뢰도가 낮다고 생각되는 단계는 어디인가요? 그 이유를 구체적으로 쓰시오."와 같이 과정 중 취약 단계를 진단하는 발문, ② "이론값과 비교했을 때 자신의 결과가 달라진 원인을 두 가지 이상 추론해 보시오."와 같이 결과와 이론값 사이의 차이를 설명하는 원인 추론 발문, ③ "다음 번 측정에서 불확도를 줄이기 위해 어떤 절차를 수정하겠습니까?"와 같이 향후 개선 방안을 계획하게 하는 발문을 포함하면, 학생이 자료 수집-해석-오차 진단-개선 계획으로 이어지는 순환 구조를 보다 명시적으로 경험할 수 있다.

둘째, 불확도(uncertainty)와 오차 해석 교육의 명시적 포함이 필요하다. SERC(Carleton College, 2019)의 불확도 통합 모델에서 제시하듯, 불확도를 단순한 값의 차이가 아니라 '데이터의 신뢰도를 ± 범위로 수량화하는 표현'으로 이해하도록 지도해야 한다. 이를 위해 오차 전파(propagation of error) 개념을 단순식 수준으로 소개하고, 측정값의 산포나 표준편차를 시각화하여 해석하게 하는 활동이 효과적이다.

셋째, 정확도와 정밀도의 구분을 명확히 하는 교수전략이 필요하다. NIST(2021)와 TeachEngineering(2020)은 측정 수업 초기 단계에서 두 개념을 구체적 사례와 연결해 설명할 것을 제안하였다. 예를 들어 동일 도구로 반복 측정해 일치도가 높은 사례(정밀도)와 기준값에 근접한 사례(정확도)를 대비시켜 학생이 구분하게 하는 방식이다.

넷째, 피드백 기반 평가 체제의 도입이 요구된다. Edutopia(2020)와 Hattie(2012)가 제시한 것처럼 명확한 학습 목표 설정과 형성 피드백 제공은 학생의 자기 평가 역량을 강화한다. 본 연구에서 학생들의 해석력 차이는 피드백 경험의 유무와 밀접히 관련되어 있었다. 측정 수업에서도 교사는 오차 원인, 계산 절차, 데이터 해석에 대한 즉각적 피드백을 제공함으로써 학습의 질을 높일 수 있다.

연구 결과를 바탕으로 교수·학습 설계 과정 및 정책 수립과 관련하여 다음과 같이 제언한다.

첫째, 과학·공학적 실천(Science and Engineering Practices) 관점에서 측정은 관찰을 수량화하고 증거를 구축하는 핵심 활동이다(National Research Council, 2013). 따라서 교육과정과 교과서에서 측정 단원을 단순 기술 습득 단계로 축소하지 말고, 탐구·모델링·데이터 해석을 연결하는 종합적 학습으로 재구성해야 한다.

둘째, 기술 통합형 측정 학습 환경을 구축할 필요가 있다. Labster(2023)와 PraxiLabs(2022)의 연구에 따르면 AR·VR 기반 시각화는 측정 오차와 변수 변동을 즉각적으로 보여주어 학생의 개념적 이해를 향상시키는 효과가 있다. 이러한 환경은 영재 학생에게 실제 실험의 복잡성을 안전하게 체험할 수 있는 기회를 제공한다.

셋째, 측정 평가 루브릭의 개발과 활용이 필요하다. Weaver et al.(2018)의 MIST 도구가 보여주듯, 측정 능력은 단순한 계산 정확도가 아니라 문제 인식-자료 수집-데이터 해석-오차 평가의 일관된 사고 흐름으로 측정해야 한다. 따라서 국내 영재교육에서도 정량적 측정 역량을 평가할 수 있는 과정 중심 루브릭을 체계적으로 도입해야 한다.

넷째, 교사 전문성 향상 프로그램이 병행되어야 한다. 측정 수업의 질은 교사의 실험 설계 능력과 피드백 전략에 크게 의존한다. 국제 사례처럼 교사 연수에 불확도, 오차 전파, 데이터 분석 기초를 포함하여 정량 탐구의 질적 수준을 높이는 것이 중요하다.

본 연구는 중등 과학 영재의 측정 활동을 통해 학생들이 과학 개념의 정량적 기반을 이해하고, 데이터의 신뢰도와 오차의 의미를 탐구할 수 있음을 확인하였다. 비록 일부 학생이 정밀도·정확도 구분에 어려움을 보였으나, 반복 측정과 자기 피드백을 포함한 수업 설계는 학생이 데이터 중심의 과학적 사고를 발전시키는 효과적인 발판이 되었다. 향후 연구에서는 다양한 물리량(예: 열전도율, 용해도, 전기저항 등)에 대한 정량 측정 탐구를 확대하고, 디지털 계측기와 센서 기술을 결합한 복합적 측정 수업 모형을 개발할 필요가 있다. 이러한 노력이 축적될 때, 과학 영재교육은 단순한 실험 기술 훈련을 넘어 '데이터 해석과 불확도 기반의 과학적 사고력'을 함양하는 방향으로 나아갈 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- Carleton College Science Education Resource Center (SERC). (2019).* Measurement uncertainty in the science classroom. Northfield, MN: SERC.
- Edutopia. (2020, March 10).* Using feedback to deepen scientific thinking. Retrieved from <https://www.edutopia.org>
- Hattie, J. (2012).* Visible learning for teachers: Maximizing impact on learning. London: Routledge.
- Korean Ministry of Education (교육부). (2007).* 2007 revised national science curriculum. Seoul: Author.
- Korean Ministry of Education (교육부). (2015).* 2015 revised national science curriculum. Seoul: Author.
- Korean Ministry of Education (교육부). (2022).* 2022 revised national science curriculum. Seoul: Author.
- Korean Ministry of Education, Science and Technology (교육과학기술부). (2009).* 2009 revised national science curriculum. Seoul: Author.
- Korean Society for Gifted Education (한국영재학회). (2024).* Proceedings of the 2024 Fall Conference of the Korean Society for Gifted Education. Seoul: Author.
- Labster. (2023).* Precision and accuracy in measurement (virtual lab). Retrieved from <https://www.labster.com>
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2021).* Precision, accuracy, and uncertainty in measurements. Gaithersburg, MD: NIST.
- National Research Council (NRC). (2013).* Next Generation Science Standards: For states, by states. Washington, DC: The National Academies Press.
- TeachEngineering. (2020).* Precision, accuracy, and measurement in engineering labs. University of Colorado Boulder.
- Weaver, G. C., Burgess, W. D., & Childress, A. L. (2018).* MIST: Measurement Instrument for Scientific Teaching. *CBE—Life Sciences Education*, 17(2), 1–9.

## Quantitative Data Collection by Secondary Science-Gifted Students: repeated-measures in an air-density lesson

Daeun Suh (Doonchon Elementary School)

Youngseok Jhun (Seoul National University of Education)

**Abstract** : This study has designed a lesson for secondary science-gifted students to estimate air density by comparing a fixed-volume container before and after depressurization, then analyzed the learners' performance and interpretations. The lesson embodies NGSS Science and Engineering Practices such as collecting data under a range of conditions and considering limitations of data analysis and seeking to improve precision and accuracy of data. Students derived a theoretical value, measured volume, computed density, and interpreted results; evaluation criteria were drawn from post-lesson responses focusing on precision, accuracy, and uncertainty. Many students understood the theory and steps but struggled with small discrepancies in measurement and record-keeping, yielding unstable estimates. At the interpretation stage, distinctions between accuracy and precision were often unclear and justifications weak. The findings support a shift toward process-oriented, reflective evaluation that foregrounds uncertainty, precision, and accuracy, and includes repeated measurement, error diagnosis, and improvement planning.

\* Key words : Quantitative Measurement, Measurement Uncertainty, Precision and Accuracy, Repeated Measurement, Science-Gifted Students

논문접수 : 2025.11.09.

수정본접수 : 2026.02.05.

게재승인 : 2026.02.25.