creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

교육학석사 학위논문

인지 진단 이론을 활용한 중학교 2학년 학생들의 옴의 법칙 관련 인지 요소 숙달 확률 분석

2023년 8월

서울대학교 대학원

과학교육과 물리전공

민태호

인지 진단 이론을 활용한 중학교 2학년 학생들의 옴의 법칙 관련 인지 요소 숙달 확률 분석

지도교수 유 준 희

이 논문을 교육학석사 학위논문으로 제출함
2023년 8월

서울대학교 대학원
과학교육과 물리전공
민태호

민태호의 교육학석사 학위논문을 인준함
2023년 8월

위 원 장 이 경 호 (인)

부위원장 조 정 효 (인)

위 원 유 준 희 (인)

국문초록

맞춤형 교육 지원을 위한 방안 중 하나로 인지 진단 이론이 주목받고 있다. 인지 진단 이론이 적용된 평가 문항들은 학습자가 해당 문항을 해결하는 데 필요한 능력, 기술, 지식, 인지 과정 등을 통합하여 의미하는 인지 요소를 측정하며, 특정 인지 요소를 측정하는 문항들로 구성된 검사지에 대한 학습자의 응답으로부터 각 인지 요소의 숙달 여부를 추정한다. 본 연구에서는 많은 학생이 어려움을 느끼는 옴의 법칙 단원의 형성평가 응답 데이터에 인지 진단 이론을 적용하여 학생들이 숙달하지 못한 인지 요소가 구체적으로 무엇인지 알아보고, 옴의 법칙에 대한 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부는 어떤 관계가 있는지 확인하고자 하였다.

이를 위한 연구의 과정은 다음과 같다. 우선 본 연구에서 분석한 자료는 옴의 법칙 형성평가의 응답 결과이다. 형성평가는 중학교 2학년 교과서 5종과 학업 성취도 평가 문항을 참고하여 22문항으로 제작되었으며, 경기도 소재 중학교 2학년 학생 306명을 대상으로 평가가 이루어졌다. 인지 진단 이론을 적용하여 형성평가의 응답 결과를 분석하기 위해서는 문항과 인지 요소 간의 관계를 보여주는 Q행렬을 작성해야 하므로, 선행연구와 교과서를 분석하여 옴의 법칙과 관련된 인지 요소를 도출하고 전문가 검토를 거쳐 형성평가 22문항에 대한 Q행렬 초안을 작성했다. 본 연구에서 사용된 옴의 법칙 관련 인지 요소는 '현상에 포함된 과학 원리 설명하기', '과학적 원리를 실제 생활에 적용하기', '탐구 문제를 발견하고 가설 설정하기', '(문제 해결을 위한) 탐구 방법을 설계하고 수행하기', '수집된 자료를 분석하고 해석하기', '탐구 문제에 대한 결론이나 해결방안 제시하기' 등 6가지였다. 분석의 타당성을 확보하기 위해 모든 문항에 같은 답을 고른 불성실 응답 6건을 제외한 뒤 문항의 신뢰도와 양호도를 확인했다. 신뢰도와 양호도를 확인하기 위한 프로그램은 IBM SPSS Statistics 26였으며, 신뢰도는 Cronbach α 값으로, 양호도는 문항

반응 이론에 의해 도출된 추측도, 난이도, 변별도 모수와 문항 특성 곡선으로 확인하였다. Cronbach α는 .907로 아주 신뢰할 만한 수준으로 나타났고, 문항 반응 이론의 모수들과 문항 특성 곡선을 확인했을 때 부적합한 문항은 발견되지 않아 22문항 모두 분석에 사용하기로 결정했다. DINA 모형과 인공신경망 분석, 전문가 검토를 거쳐 최종 Q행렬을 결정하였고, 인지 요소별 숙달 확률은 최종 Q행렬을 사용하여 R Studio에서 CDM package를 통해 제공되는 DINA 모형으로 분석했다. 마지막으로 IBM SPSS Statistics 26을 사용하여 응답 패턴별 능력 추정치를 산출하고 선형회귀를 통해 능력 추정치와 각 인지 요소 사이의 관계를 확인했다.

학생의 인지 요소별 숙달 확률을 분석한 결과 '현상에 포함된 과학 원리 설명하기', '과학적 원리를 실제 생활에 적용하기', '탐구 문제에 대한 결론이나 해결방안 제시하기' 등 3개 인지 요소는 숙달 확률이 평균 이상인 인지 요소였고, '탐구 문제를 발견하고 가설 설정하기', '(문제 해결을 위한) 탐구 방법을 설계하고 수행하기', '수집된 자료를 분석하고 해석하기' 등 3개 인지 요소는 숙달 확률이 평균 이하인 인지 요소로 나타났다. 능력 추정치에 대한 비표준화 계수가 높은 인지 요소는 '현상에 포함된 과학 원리 설명하기'와 '수집된 자료를 분석하고 해석하기' 순서였으며, 능력 추정치가 같은 피험자들이라도 숙달하지 못한 인지 요소는 서로 다를 수 있음을 확인하였다. 연구의 결과를 통해 옴의 법칙 성취기준 도달을 위한 학습 지원 방안을 제안하였다.

주요어 : 인지 진단 이론, 인지 요소, Q행렬, 옴의 법칙, 형성평가
학 번 : 2020-24500

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1
1.1 연구의 필요성 ····· 1
1.2 연구 문제 ····· 3
1.3 연구 과정 개요 ····· 4

Ⅱ. 이론적 배경 ····· 5
2.1 옴의 법칙과 학습 ····· 5
2.1.1 옴의 법칙 ····· 5
2.1.2 옴의 법칙 학습의 어려움 ····· 6
2.2 인지 진단 이론 ····· 8
2.3 과학에서의 인지 요소 ····· 10

Ⅲ. 연구 방법 ····· 14
3.1 평가 대상 및 평가 방법 ····· 14
3.2 문항 분석 및 Q행렬 작성 ····· 14
3.2.1 옴의 법칙 관련 인지 요소 ····· 14
3.2.2 Q행렬 초안 ····· 19
3.3 문항 및 Q행렬 검증 ····· 21
3.3.1 신뢰도와 양호도 검증 ····· 21
3.3.2 최종 Q행렬 결정 ····· 25
3.4 분석 방법 ····· 31
3.4.1 인지 진단 모형의 적용 ····· 32
3.4.2 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부 비교 ····· 33

Ⅳ. 연구 결과 및 논의 ····· 35
4.1 인지 요소별 숙달 확률 ····· 35
4.2 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부의 관계 ··· 41

Ⅴ. 결론 및 제언 ····· 44

참고문헌 ····· 47
부록 ····· 55
Abstract ····· 70

표 목 차

[표Ⅱ-1] TIMSS 2007~2023 과학 인지 영역 비교 ····· 12
[표Ⅲ-1] 김희경, 정혜경(2020)의 인지 요소와 TIMSS 2011 인지 영역의 대응 ····· 18
[표Ⅲ-2] Q행렬 초안 ····· 20
[표Ⅲ-3] 문항별 추측도 ····· 22
[표Ⅲ-4] 문항별 난이도 ····· 23
[표Ⅲ-5] 문항별 변별도 ····· 24
[표Ⅲ-6] 문항별 인지 요소의 상대적 중요도 ····· 28
[표Ⅲ-7] 인공신경망에 의해 추정된 Q행렬 ····· 29
[표Ⅲ-8] Q행렬 최종안 ····· 31
[표Ⅳ-1] 문항별 모수 ····· 35
[표Ⅳ-2] 능력 추정치에 대한 선형회귀 결과 ····· 42
[표Ⅳ-3] 능력 추정치가 .64인 피험자의 인지 요소별 숙달 여부 ····· 43
[표Ⅳ-4] 일부 피험자의 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부 ····· 43

그 림 목 차

[그림Ⅰ-1] 연구 과정의 개요 ····· 4
[그림Ⅲ-1] 1번 문항 ····· 19
[그림Ⅲ-2] 17번 문항 ····· 20
[그림Ⅲ-3] 문항 특성 곡선 ····· 25
[그림Ⅳ-1] 인지 요소별 숙달 확률 ····· 36

[그림Ⅳ-2] A1 인지 요소를 포함하는 문항 예시 ····· 37
[그림Ⅳ-3] A1, A2 인지 요소를 포함하는 문항 예시 ····· 38
[그림Ⅳ-4] A3 인지 요소를 포함하는 문항 예시 ····· 39
[그림Ⅳ-5] A4 인지 요소를 포함하는 문항 예시 ····· 39
[그림Ⅳ-6] A5 인지 요소를 포함하는 문항 예시 ····· 40
[그림Ⅳ-7] A5, A6 인지 요소를 포함하는 문항 예시 ····· 41

Ⅰ. 서론

1.1 연구의 필요성

코로나 팬데믹으로 인한 원격수업이 실시된 이후 교육 불평등(황승우, 서경혜, 2021; Kang, 2021), 학습 손실(Dorn et al., 2020) 등의 문제가 전 세계적으로 보고되었으며, 국내에서도 학습격차 심화의 문제가 거론되고 있다(계보경 등, 2020). 특히 과학 학습에서는 낮은 학교급에서 발생한 학습격차가 상위 학교급까지 지속될 수 있기 때문에(Morgan et al., 2016) 학습격차 해소를 위한 적극적인 개입이 요구된다. 이러한 학습격차 문제의 대응 방안 중 하나로 학습자의 개인차를 반영하는 맞춤형 교육이 주목받고 있다(최성광, 2022).

평가 결과로부터 학습자의 상태에 관한 상세한 정보를 도출하여 맞춤형 교육을 지원하기 위한 통계적 기법들이 제시되었으며, 그중 하나는 문항 반응 이론(item response theory)에 의해 산출된 능력 추정치를 활용하는 것이다(Chen et al., 2005). 문항 반응 이론에서는 각 문항의 추측도(guessing), 난이도(difficulty), 변별도(discrimination) 등 문항 특성에 기반하여 응답 패턴별로 능력 추정치를 산출한다. 그러나 능력 추정치를 활용하는 것은 규준지향평가에 해당하며, 이는 피험자가 무엇을 알고 모르는지에 관한 구체적인 정보에 주목하지 않는다는 한계가 있다(황정규 등, 2011). 이를 보완할 방법으로 인지 진단 이론(cognitive diagnostic theory)을 활용할 수 있다(김희경 등, 2014). 미국의 교육 정책인 아동 낙오 방지법(No Child Left Behind)과 함께 등장한 인지 진단 이론은 평가 결과로부터 학습자의 강점과 약점에 대한 상세한 정보를 얻는 것을 목적으로 한다(Tatsuoka, 2009). 인지 진단 이론이 적용된 평가 문항들은 학습자가 해당 문항을 해결하는 데 필요한 능력, 기술, 지식, 인지 과정 등을 통합하여 의미하는 인지 요소(cognitive attribute)를 측정하며

(Tatsuoka, 1983), 특정 인지 요소를 측정하는 문항들로 구성된 검사지에 대한 학습자의 응답으로부터 각 인지 요소의 숙달 여부를 추정한다(성태제, 2018). 따라서 학습자는 평가 결과로부터 자신이 숙달한 인지 요소와 숙달하지 못한 인지 요소에 대해 상세한 피드백을 제공받을 수 있다(Jang, 2008).

인지 요소 숙달 여부를 추정하기 위해서는 각 문항과 인지 요소 간의 관계를 나타내는 Q행렬을 작성해야 한다. 인지 진단 이론을 검사에 적용하는 방법은 사전에 Q행렬과 문항을 개발하고 평가 결과를 분석하는 방법과, 인지 진단 이론을 상정하지 않고 개발 및 검사가 완료된 평가 문항에서 인지 요소 및 Q행렬을 산출하여 분석하는 방법이 있는데(김희경, 정혜경, 2020), 전자의 방법이 분석의 타당도가 더 높은 방법이지만 문항 개발의 어려움 등의 이유로 과학교육 평가에서의 연구는 대부분 후자의 방법으로 이루어졌으며, 그 결과 TIMSS 등 넓은 내용 영역을 포함하는 평가에 인지 진단 이론이 적용되어왔다(김지영 등, 2015; Hu et al., 2021; Kabiri et al., 2017). 한정된 내용 영역에 관한 인지 요소를 도출하고 이를 평가하기 위한 문항을 개발 및 적용한 연구도 일부 존재하지만(Chen et al., 2017; Gao et al., 2020), 해당 연구에서 사용된 인지 요소들은 개념 이해에 초점을 두고 도출되었기 때문에 지식의 영역에 한정되어 있으며, 적용이나 추론을 포함하는 과학의 다양한 인지 요소를 한정된 주제에 적용한 선행연구는 찾아보기 어렵다.

한편 2015 개정 교육과정의 중학교 2학년 과학에 포함된 옴의 법칙은 다양한 인지 요소를 포함하고 있어 학습자들이 어려움을 느끼는 주제 중 하나이다. 옴의 법칙 문제 해결을 위해서는 대수적 조작이 필요하므로 수학에 의존하며, 동시에 올바른 물리적 속성에 대한 이해가 필요하므로 과학에도 의존하기 때문이다(Sambamurthy & Edgcomb, 2018). 특히 옴의 법칙에서 변수 간 관계를 이해하기 위해서는 그래프 해석이 필요한데, 그래프 해석은 국내외를 막론하고 과학 문제 해결에서 학생들이 흔히 겪는 어려움 중 하나이다(권경필, 이세연, 2020; Ivanjek et al., 2016). 뿐만 아니라 옴의 법칙 공식에 맹목적으로 의존하여 오개념이 생기기도

하므로(Hussain et al., 2012; Smail et al., 2012) 각 변수에 대해 올바른 지식을 가지고 있는지도 점검할 필요가 있다. 2015 개정 교육과정에서는 옴의 법칙에 해당하는 성취기준을 '저항, 전류, 전압 사이의 관계를 실험을 통해 이해한다'로 제시하고 있는데(교육부, 2015), 이는 성취기준 도달을 위해 가설 설정, 실험 설계, 결론 도출 등 실험과 관련된 인지 요소도 필요함을 시사한다. 이처럼 옴의 법칙은 지식, 적용, 추론에 해당하는 폭넓은 인지 요소를 요구하므로, 학습 후에도 숙달하지 못한 인지 요소가 있을 수 있으며, 성취기준 도달을 위해서는 다양한 인지 요소의 숙달 여부를 점검할 필요가 있다.

1.2 연구 문제

본 연구에서는 옴의 법칙 성취기준 도달에 필요한 인지 요소를 도출하고, 중학교 2학년 학생을 대상으로 적용된 옴의 법칙 형성평가의 응답 결과에 인지 진단 이론을 적용하여 인지 요소별 숙달 확률을 추정하였다. 이를 통해 학생들이 전반적으로 어려워하는 인지 요소가 무엇인지 확인할 수 있다. 또한 각 문항에 대한 응답 패턴별로 문항 반응 이론에 기반한 능력 추정치와 인지 진단 이론에 기반한 인지 요소별 숙달 여부를 비교하였다. 이를 통해 피험자의 능력에 따른 인지 요소별 숙달 여부가 어떻게 나타나는지 확인함으로써 옴의 법칙 단원에서 피험자의 능력 향상을 위한 교육적 제언을 도출하고자 하였다. 본 연구의 연구 문제는 다음과 같다.

1. 중학교 2학년 학생들의 옴의 법칙 관련 인지 요소의 숙달 확률은 어떠한가?
2. 중학교 2학년 학생들의 옴의 법칙 관련 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부의 관계는 어떠한가?

1.3 연구 과정 개요

본 연구의 연구 문제에 답하기 위한 과정은 다음과 같다. 본 연구는 중학교 2학년 학생을 대상으로 실시된 옴의 법칙 형성평가의 응답 결과를 분석한 연구이므로 자료 수집이 가장 먼저 이루어졌다. 이후 Q행렬 작성을 위해 선행 문헌으로부터 옴의 법칙 관련 인지 요소를 도출하였고, 형성평가 문항을 분석하여 Q행렬 초안을 구성하였다. 모든 문항에 같은 답을 고른 무의미 응답을 제거하고, 분석을 위해 응답을 정답(1)/오답(0)의 이분 표현으로 변환하는 전처리 과정을 거쳤다. 인지 진단 이론 적용에 앞서 문항의 신뢰도와 양호도를 검증하여 부적합 문항이 있는지 확인하였고, DINA 모형과 인공신경망, 전문가 검토를 거쳐 최종 Q행렬을 결정했다. 최종 Q행렬을 사용하여 인지 요소별 숙달 확률을 분석하였고, 이를 응답 패턴별 능력 추정치와 비교한 뒤 결과를 해석했다. 연구 과정을 요약하면 [그림 Ⅰ-1]과 같다.

[그림 Ⅰ-1] 연구 과정의 개요

Ⅱ. 이론적 배경

2.1 옴의 법칙과 학습

2.1.1 옴의 법칙

Kipnis(2009)에 따르면 초기 전기 이론에서 물리학자들은 전기를 서로 다른 두 변수로 설명했다. 첫 번째 변수는 멈춰 있는 전기의 편차, 즉 현대의 전압에 해당하는 개념으로, degree of electricity(Cavendish, 1771) 또는 electrical tension(Volta, 1779)이라는 단어로 쓰였다. 두 번째 변수는 전기 충격의 강도로 측정되는 이동하는 전기로, 현대의 전류 개념에 해당한다. 1800년대에 서로 다른 두 전도체 사이에 전해질 용액이 넣었을 때 두 전도체는 전기를 흐르게 하는 기전력을 만들어냄이 밝혀지면서(Volta, 1800) 전압은 열린회로에서 전기적 인력 또는 척력을 띠는 현상, 전류는 닫힌회로에서 나타나는 현상으로 설명되었다(Ampère, 1820). 당시에는 전류의 세기(intensity of current)를 측정할 때 전류에 의해 탄 도선의 길이를 측정했는데(Wilkinson, 1804) 다수의 실험에서 탄 도선의 길이가 볼타 전지의 금속판 넓이에 비례함이 밝혀져(Children, 1809; Cuthbertson, 1804) 전류의 세기와 전압의 관계에 대해 간접적으로나마 실험적 확인이 이루어졌다. 한편 당시의 물리학자들은 금속의 전도도(conductivity)에 주목했는데, 이 전도도는 물질 고유의 성질이 아닌 현대의 전기 저항에 반대되는 개념으로, 물에 젖은 피부는 전도도가 증가한다거나(Volta, 1800) 금속과 액체가 접촉한 표면에서는 전도도가 증가한다는 등의(Volta, 1802) 연구가 이루어졌다. 이외에도 전도도와 전류의 세기 사이의 관계(즉 저항과 전류의 세기 사이의 관계)를 밝히려는 실험적인 시도가 있었으나 대부분 정성적인 설명에 머물렀다.

전류가 자기장을 유도하는 전자기 현상이 발견된 후 도선의 탄 길이

대신 도선 주위의 자화된 바늘의 분포를 확인하는 방식으로 전류의 세기를 측정하게 되어 보다 정밀한 실험이 가능해졌다(Davy, 1821). 1825년 옴은 전류가 도선을 흐를 때 발생하는 '힘의 손실(loss of force)' ν를 아래와 같이 기술하였다(Ohm, 1825).

$$\nu = m\log(x+a)$$

여기서 x는 도선의 길이, m과 a는 실험적으로 측정된 상수이다. 이후 옴은 장치와 절차의 일부 결함을 수정하고 더 높은 정확도를 얻기 위한 새로운 실험을 수행했고, 1826년 전류에 의해 발생한 자기력 X와 도선의 길이 x 사이에 아래와 같은 관계식이 성립함을 발표했으며, 이는 새로운 측정 결과를 만족시켰다(Ohm, 1826).

$$X = a/(b+x)$$

여기서 a와 b는 실험적으로 측정된 상수이다. 옴은 전지의 기전력이 변할 때 b는 일정하지만 a는 변하는 것을 확인하였고, a는 전압 E, b는 전원의 내부 저항을 포함한 나머지 저항으로 해석하였다. 이에 따르면 $b+x$는 회로 전체의 저항이 된다. 자기력 X는 전류의 세기 I의 척도라 추정하고 위 식을 현대적인 표현으로 나타내면 아래와 같다.

$$I = E/(R+r)$$

즉 전기회로에서 전류의 세기는 전원의 전압에 비례하고, 회로 전체의 저항에 반비례한다. 우리나라 중학교 2학년 교육과정의 경우 하나의 저항에 대해서만 옴의 법칙을 적용하므로, 어떤 저항에 흐르는 전류의 세기 I는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I = V/R$$

여기서 V는 저항에 걸리는 전압이고, R은 저항의 크기이다.

2.1.2 옴의 법칙 학습의 어려움

전기회로는 많은 학생이 학습에 어려움을 겪는 주제이며(임아름 & 전영석, 2014) 대표적인 어려움 중 하나는 옴의 법칙 학습에서의 어려움이다(Kipnis, 2009). 예를 들어, 전류, 전압, 저항 사이의 공식을 개념에 대

한 이해 없이 단순 적용하게 되면 전류가 흘러야 저항이 생긴다거나(Engelhardt & Beichner, 2004; Popat, 2021) 전류는 전압의 원인이라는(Cohen et al., 1983; Engelhardt & Beichner, 2004) 등의 오개념이 생길 수 있으며, 수학적 기술의 부족으로 어려움을 겪거나(Sambamurthy & Edgcomb, 2018) 하나의 저항에 대해 적용되는 공식과 회로 전체의 저항에 적용되는 공식을 혼동하는(Kipnis, 2009) 등의 어려움이 보고되었다.

국내 교육과정의 경우 중학교 2학년 과학에 해당하는 성취기준 [9과09-03]에 옴의 법칙과 관련된 내용이 포함된다. 해당 성취기준은 저항, 전류, 전압 사이의 관계를 실험을 통해 이해하는 것을 요구하므로(교육부, 2015) 선행연구에 비추어봤을 때 성취기준 도달을 위한 과정에서 다음과 같은 어려움이 예상 가능하다. 첫째, 전류, 전압, 저항의 개념에 대해 올바른 지식을 가지고 있지 않을 수 있다. 여러 선행연구에서 학생들은 전류와 전압의 개념을 구별하지 못하고 혼용해서 사용함이 확인된 바 있는데(Licht, 1987; McDermott & Shaffer, 1992), 전기회로에 대한 효과적인 추론을 위해서는 정확한 개념 이해가 필수적이므로(Burde & Wilhelm, 2017), 옴의 법칙 성취기준 도달 여부를 추정하기 위해서는 전류, 전압, 저항의 개념을 정확하게 이해하고 있는지 확인해야 한다. 둘째, 전류, 전압, 저항 사이의 관계를 실제 전기회로 또는 새로운 상황에 적용하지 못할 수 있다. 전류, 전압, 저항의 개념을 알고 수학적 표현이 가능한 학생 중에서도 실제로 개념들을 관련시키거나 회로 상황에 적용하는 데에 어려움을 겪는 경우가 있으므로(McDermott & Shaffer, 1992) 학생들이 올바른 지식을 가지고 있는지 여부와 함께 실제 회로 또는 상황에 지식을 적용할 수 있는지에 대한 확인이 요구된다. 셋째, 전류, 전압, 저항 사이의 관계를 알아보는 실험에 대한 이해가 부족할 수 있다. Palmer(1966)는 옴의 법칙 실험에서 전류계나 전압계의 사용 방법에 대한 설명이 부족하며, 실험을 통해 보여주고자 하는 것이 V/I가 일정하다는 것인지 V=IR의 관계가 성립한다는 것인지 명확하지 않음을 지적한 바 있다. 실험은 과학의 추상적인 개념에 대한 이해와 직결되므로(Tamir, 1976) 실험의 목적과 과정, 결론을 명확하게 짚고 넘어가지 않

을 경우 학생들은 실험과 지식을 연결 짓지 못할 수 있으며, 따라서 성취기준 도달 여부를 확인하기 위해서는 교과서에서 제시하는 옴의 법칙 실험에 대한 이해를 확인해야 한다. 넷째, 전압에 따른 전류의 세기 측정 결과와 같이 변수 간의 관계를 보여주는 표나 그래프에 대한 이해도가 떨어질 수 있다. 특히 그래프 해석은 학생들이 과학 문제 해결 과정에서 겪는 어려움 중 하나이며(권경필, 이세연, 2020), 그래프의 단위, 눈금, 대응점을 잘못 읽거나(김유정 등, 2009), 기울기의 개념에 대해 해석하지 못하는 등의(Ivanjek et al., 2016) 어려움을 겪는다.

이처럼 옴의 법칙 성취기준 도달 여부를 확인하기 위해서는 전류, 전압, 저항의 개념과 그들 사이의 관계에 대한 지식뿐 아니라 그 지식을 실제 회로나 상황에 적용하는 능력, 변수 간의 관계를 알아보기 위한 실험의 가설을 설정하고, 절차를 설계하고, 결론을 도출하는 능력, 표나 그래프를 해석하는 능력 등 다양한 인지 요소에 대한 숙달 확률 추정이 요구된다. 학생 개개인이 숙달한 인지 요소와 숙달하지 못한 인지 요소에 관해 상세한 피드백을 제공할 수 있는 인지 진단 이론이 등장하면서(Jang, 2008), 교육과정에서 중요도가 큼에도 많은 학생이 어려움을 느끼는 옴의 법칙 단원에 인지 진단 이론을 적용함으로써 옴의 법칙 성취기준 도달을 위해 필요한 인지 요소가 무엇인지, 학생들이 숙달하지 못한 인지 요소는 구체적으로 어떤 것인지 분석한 연구가 필요한 시점이다.

2.2 인지 진단 이론

인지 진단의 시작은 정수 뺄셈 문제에서 피험자의 오류를 진단해주는 컴퓨터 프로그램인 BUGGY로 알려져 있다. BUGGY는 피험자의 문제 해결 과정에서 발견되는 오류에 기반하여 피험자의 인지 상태를 진단하였으며, 이는 분수와 덧셈 등 다른 분야 프로그램의 개발로 이어졌다. 그러나 대부분의 피험자가 문제를 푸는 동안 일정한 규칙을 사용하지 않았기 때문에 BUGGY의 측정 방식은 불안정함이 보고되었으며(Sleeman et al., 1989), 따라서 인지 진단에서 미시적인 수준의 성취를 진단하는 것은

타당하지 않다고 볼 수 있다. 한편 평가의 점수만을 진단의 척도로 사용하는 것은 지나치게 거시적이므로, 어느 수준의 진단 정보가 가장 적절한지에 대해 여러 연구가 수행되었으며(Birenbaum et al., 1993; Tatsuoka et al., 1989), 선행연구들은 공통적으로 피험자에게서 발견되는 오류의 규칙은 불안정하지만 그 규칙의 원천은 수용가능한 수준의 안정성을 가짐을 밝혀냈다. 결론적으로 인지 진단의 단위는 오개념의 원인 또는 교육적으로 관련된 인지적 구성요소(cognitive components)로 사용되며, 이러한 구성요소를 인지 요소라 한다(Tatsuoka, 2009).

적용된 검사에서 모든 문항이 하나의 인지 요소만을 포함하지는 않으므로, 특정 인지 요소가 포함된 문항들의 정답률로는 해당 인지 요소의 숙달 여부를 추정할 수 없다. 따라서 각 인지 요소에 대한 피험자의 숙달 여부를 추정하기 위해서는 통계적 모형이 필요하며, 인지 진단 이론에서 사용되는 통계적 모형을 인지 진단 모형(cognitive diagnostic model)이라 한다. 인지 진단 모형을 사용하여 평가 결과를 분석하기 위해서는 각 문항과 인지 요소 간의 관계를 나타내는 Q행렬을 작성하게 된다(Tatsuoka, 1983). Q행렬은 문항을 의미하는 행과 인지 요소를 의미하는 열로 구성되어, 각 문항이 특정 인지 요소를 포함하는지 여부를 보여준다. 따라서 J개의 문항과 K개의 인지 요소로 구성된 검사의 Q행렬은 $K \times J$ 차원의 행렬로 표현된다. Q행렬이 타당하지 않을 경우 그 Q행렬을 바탕으로 분석된 결과 또한 타당하지 않을 수 있으므로(de la Torre, 2008; Rupp & Templin, 2008), 타당한 Q행렬의 개발은 인지 진단 모형을 적용함에서 있어 중요한 과정 중 하나라고 할 수 있다.

Tatsuoka(1983)에 의해 최초의 인지 진단 모형인 규칙장 모형(Rule Space Model)이 제안된 이후 DINA, DINO, NIDA, NIDO, Fusion 모형 등 다양한 인지 진단 모형이 개발되었다. 인지 진단 모형은 비보상적(noncompensatory) 모형과 보상적(compensatory) 모형으로 분류되는데, 비보상적 모형에서는 각 문항에 포함된 인지 요소를 모두 숙달한 경우 해당 문항을 맞힐 수 있다고 가정하고, 보상적 모형에서는 각 문항에 포함된 인지 요소 중 일부만 숙달하더라도 해당 문항을 맞힐 수 있다고 가

정한다. DINA, NIDA, Fusion 모형 등은 비보상적 모형에 속하고, DINO, NIDO 등의 모형은 보상적 모형에 속한다. 일반적으로 교과 학습의 평가에서는 비보상적 모형이 적합하다고 알려져 있다(김희경, 정혜경, 2020).

피험자의 응답 결과에 인지 진단 모형을 적용하면 인지 요소별로 숙달 확률이 추정되며, 이는 해당 인지 요소에 대한 피험자의 성취도로 간주할 수 있다(김희경, 정혜경, 2020). 추정된 숙달 확률에 따라 성취도를 3단계(Roussos et al., 2007) 또는 4단계(김희경, 정혜경, 2020)로 구분하기도 하지만, 과학교육 평가에 인지 진단 모형을 적용한 대부분의 선행 연구에서는 이분 분류를 사용하였다(Hu et al., 2021; Zhou & Traynor, 2022). 즉 특정 인지 요소에 대하여 인지 진단 모형이 추정한 숙달 확률이 0.5 이상이면 '숙달', 0.5 미만이면 '미숙달'이다.

2.3 과학에서의 인지 요소

과학교육 평가에서 타당한 인지 요소와 Q행렬을 도출하여 인지 진단 모형을 적용하기 위한 여러 연구가 수행되었다. 인지 요소의 정의를 위해 PISA의 과학 역량(scientific competencies), TIMSS의 인지 영역(cognitive domain), 교육과정 등이 활용되었다.

Tu et al.(2018)은 새로운 방식의 인지 진단 모형인 DINA-GD를 제안하고, 그 성능을 조사하기 위해 호주, 캐나다, 영국, 홍콩-중국, 미국 등 5개국에서 수집된 PISA 2006 과학의 20문항에 대한 응답 데이터를 분석하여 OECD 보고서의 결과와 비교하였다. 해당 연구에서는 PISA 2006의 세 가지 과학 역량, 즉 과학적 문제 식별하기(Identify scientific issues), 현상을 과학적으로 설명하기(Explain phenomena scientifically), 과학적 증거 사용하기(Use scientific evidence)가 인지 요소로 사용되었다. 연구 결과 도출된 각 인지 요소에 대한 숙달 비율은 OECD 보고서의 분석 결과와 유사한 것으로 나타났다.

TIMSS의 과학 인지 영역은 복수의 연구에서 인지 요소 도출의 근거

로 활용되었다(김지영, 김수진, 2009; 김지영 등, 2015). TIMSS 인지 영역은 크게 지식(knowing), 적용(applying), 추론(reasoning)의 세 영역으로 구분되며, 각각의 인지 영역 안에는 세부 영역이 존재한다. [표Ⅱ-1]은 TIMSS 2007~2023까지의 전체 인지 영역을 비교한 것이다. TIMSS Framework에 제시된 각 인지 영역을 살펴보면, TIMSS 2007과 2011에서는 총 19개의 세부 영역이 존재하나, TIMSS 2015 이후에는 지식에서는 '회상/인식하기', '정의하기', '과학적 도구의 사용법 설명하기'가 '회상/인식하기'로 통합되고, '모형 사용하기'와 '해답 찾기'가 '모형 해석하기'로 통합되어 16개의 세부 영역으로 재편됐음을 알 수 있다. TIMSS 2007~2023까지 과학 인지 영역의 정의를 비교한 상세 내용은 [부록 A]에 수록하였다. 김지영, 김수진(2009)은 중학교 2학년 과학 시험 결과를 분석하기 위해 TIMSS 2007 인지 영역에 근거하여 도출된 5가지의 인지 요소, 즉 회상하기, 자료 해석하기, 계산하기, 설명하기, 종합하기를 사용하였다. 연구 결과 숙달 비율이 가장 높은 인지 요소는 정보 해석하기였고, 숙달 비율이 가장 낮은 인지 요소는 종합하기였다. 김지영 등(2015)은 전문가 검토를 통해 TIMSS 2011의 19개 인지 영역을 11개로 통합하여 TIMSS 2011 과학 결과의 국제 비교를 위한 인지 요소로 활용하였으며, 우리나라 학생들은 회상/인식하기, 설명하기, 분류하기, 통합하기, 가설 설정 및 실험 설계하기를 어려워하고, 모형 사용하기, 자료 분석하기, 결론 도출하기, 평가 및 정당화하기를 쉬워하는 것으로 나타나 김지영, 김수진(2009)의 연구와 그 결과를 일부 공유하였다.

인지 영역	TIMSS 2007, 2011	TIMSS 2015, 2019, 2023
지식	회상/인식하기	회상/인식하기
	정의하기	
	과학적 도구의 지식 보여주기	
	기술하기	기술하기
	예를 이용하여 설명하기	예시 제공하기
적용	비교/대조/분류하기	비교/대조/분류하기
	모형 사용하기	모형 해석하기
	해답 찾기	
	관련짓기	관련짓기
	정보 해석하기	정보 해석하기
	설명하기	설명하기
추론	분석하기	분석하기
	통합/종합하기	종합하기
	가설 설정/예상하기	예상하기
	설계하기	설계하기
	결론 도출하기	결론 도출하기
	일반화하기	일반화하기
	평가하기	평가하기
	정당화하기	정당화하기

[표Ⅱ-1] TIMSS 2007~2023 과학 인지 영역 비교

Kabiri et al.(2017)은 8학년 학생들의 과학 역량 숙달을 진단하고자 TIMSS, PISA, NAEP, AAAS, NRC 등 대규모 평가틀의 문헌을 검토하여 인지 요소를 도출하고, 일반 진단 모형(General Diagnostic Model)을 적용하여 TIMSS 2011 응답 데이터를 분석하였다. 해당 연구에서 사용된 인지 요소는 기초 과학 지식(Basic science knowledge), 일상생활에서 과학 사용(Using science in real life), 자연 현상의 과학적 설명(Explaining of natural phenomena scientifically), 예상(Predicting), 모형 사용(Using models), 데이터 표현을 통한 의사소통(Communicating via a representation of data), 과학적 추론(Scientific reasoning), 과학적 탐구(Scientific inquiry) 등 8가지였으며, 이 중 일상생활에서 과학 사용의 숙달 비율이 가장 높고 과학적 탐구의 숙달 비율이 가장 낮았다.

Hu et al.(2021)은 과학적 설명(scientific explanation)을 평가하기 위해 현상 관찰하기(Observing the phenomenon), 현상 기술하기

(Describing phenomena), 데이터 수집하기(Obtaining data), 데이터 분석하기(Analyzing data), 사실 사용하기(Using facts), 반영하기(Constructing reflection), 이론을 체계적으로 사용하기(Systematic use of theory), 과학적 추론하기(Scientific reasoning) 등 과학적 설명과 관련된 8개의 인지 요소를 정의하였다. 인지 요소는 미국, 싱가폴, 러시아, 영국, 호주, 중국의 4학년 학생들의 TIMSS 2011 과학 응답 데이터에 적용되었으며, 연구 결과로부터 과학적 설명의 학습 경로를 제안하였다.

김희경, 정혜경(2020)은 2017 중학교 3학년 학업성취도 평가 과학 결과 분석을 위해 2015 개정 교육과정의 성취 기준과 과학과 교과 역량에 근거하여 교과 전문가, 평가 전문가의 논의 및 통계 분석을 통해 다음과 같은 8개의 인지 요소를 도출하였다: 현상에 포함된 과학 원리 설명하기; 과학적 원리를 실제 생활에 적용하기; 탐구 문제를 발견하고 가설 설정하기; (문제 해결을 위한) 탐구 방법을 설계하고 수행하기; 수집된 자료를 분석하고 해석하기; 모형을 활용하여 현상을 설명하기; 탐구 문제에 대한 결론이나 해결 방안 제시하기; 증거에 기반하여 논증하기 (주장을 펼치거나 반론 제시하기). 연구 결과 현상에 포함된 과학 원리 설명하기, 수집된 자료를 분석하고 해석하기, 탐구 문제에 대한 결론이나 해결 방안 제시하기의 인지 요소는 성취 수준이 우수한 학생의 비율이 높았으나, 탐구 방법을 설계하고 수행하기, 모형을 활용하여 현상을 설명하기, 증거에 기반하여 논증하기의 인지 요소는 성취 수준이 기초 미달인 학생의 비율이 높았다.

이처럼 과학교육 평가에서 인지 진단 모형을 사용하려는 여러 연구자의 시도가 있었으며, 인지 요소는 피험자의 인지적 영역에 초점을 두고 도출되었음을 알 수 있다. 한편 선행연구들에서는 평가의 범위가 광범위한 내용 영역을 포함하는 것으로 나타났는데, 인지 진단 모형을 적용할 때 내용 영역이 한정되어 있지 않을 경우 상세한 피드백을 제공하기 어려울 수 있으므로, 한정된 내용 영역에서 이루어진 평가를 대상으로 인지 진단 모형을 적용한 연구가 이루어질 필요가 있다.

Ⅲ. 연구 방법

3.1 평가 대상 및 평가 방법

본 연구의 평가 대상은 경기도 소재 중학교 2학년 11개 학급 학생 306명이다. 옴의 법칙 단원 진도가 끝난 이후 2023년 5월 30일~6월 2일의 기간 동안 옴의 법칙 형성평가를 수행하였다. 문항은 오지선다의 선택형 문항으로만 제작되었고, 국내의 8학년 과학 교과서 5종의 출판사에서 제공되는 문제은행의 문항과 학업 성취도 평가 문항을 참고해 개발되었다. 문항의 개수는 총 22문항이다. 사용된 문항은 [부록 B]에 첨부했다. 형성평가는 Google 설문 형태로 제시되었으며, 피험자들은 학교에서 제공하는 태블릿 PC를 활용해 평가에 참여했다.

3.2 문항 분석 및 Q행렬 작성

분석에 앞서 모든 문항에 같은 답을 고른 불성실 응답 6건을 제외했으며, 나머지 300명 학생의 정오를 이진수(정답: 1, 오답: 0) 형태로 엑셀 파일에 정리해 분석하였다. Q행렬 구성을 위해 선행연구와 교과서를 분석해 옴의 법칙과 관련된 인지 요소를 도출하였고, 각각의 문항을 해결하는데 필요한 인지 요소가 무엇인지 전문가 검토를 거쳐 Q행렬 초안을 구성했다.

3.2.1 옴의 법칙 관련 인지 요소

여러 선행연구에서 과학의 다양한 인지 요소들을 제시하고 있다(김희경, 정혜경, 2020; Hu et al., 2021; Kabiri et al., 2017; Tu et al., 2018).

과학에 인지 진단 이론을 적용한 연구가 많지 않아 일반화된 인지 요소는 존재하지 않지만, 본 연구에서는 김희경, 정혜경(2020)이 제시한 과학의 8가지 인지 요소를 사용하고자 하였다. 그 이유는 다음과 같다. 첫째, 인지 요소가 우리나라의 과학과 성취기준과 교과 역량에 근거하여 개발되었으며, 중학교 학업성취도 결과 분석에 사용되었다(김희경, 정혜경, 2020). 따라서 우리나라 중학생들을 대상으로 적용된 본 연구에 적합한 인지 요소라 할 수 있다. 둘째, 자카드 계수와 Fusion 모형의 문항 모수 등을 확인하여 각 인지 요소의 필요성을 통계적으로 검증하는 과정을 거쳤으므로 해당 연구에서 제시한 인지 요소들이 신뢰할 만하다고 판단했다. 단 해당 연구에서는 8가지 인지 요소의 정의를 제시하지 않았으므로, 연구에서 제시된 Q행렬과 실제 문항을 분석해 각 인지 요소를 정의할 필요가 있었다. 인지 요소의 정의를 위해 다수의 선행연구(김지영, 김수진, 2009; 김지영 등, 2015; Kabri et al., 2017)에서 과학 인지 요소 도출의 근거로 사용된 TIMSS 평가틀의 인지 영역(cognitive domain)이 활용되었다. 김희경, 정혜경(2020)이 분석한 2017 중학교 3학년 과학 학업성취도 평가 문항을 TIMSS의 인지 영역을 인지 요소로 사용해 Q행렬을 구성하고, 이 Q행렬을 김희경, 정혜경(2020)이 제시한 Q행렬과 비교하여, TIMSS의 세부 영역과 김희경, 정혜경(2020)의 인지 요소를 대응시키는 과정을 거쳤다. TIMSS 평가틀의 경우 TIMSS 2011까지는 19개의 인지 영역을 제시하였으나, TIMSS 2015부터는 일부 인지 영역이 통합되어 16가지로 제시했는데, 김희경, 정혜경(2020)의 인지 요소와 비교하기 위해서는 세분화된 것이 적합하다고 판단하여 TIMSS 2011 평가틀로 2017 과학 학업성취도 평가 문항의 Q행렬을 도출 및 비교했다. TIMSS 2011 평가틀은 크게 '지식(Knowing)', '적용(Applying)', '추론(Reasoning)'의 세 인지 영역으로 구성된다. '지식'은 '회상/인식하기(Recall/Recognize)', '정의하기(Define)', '과학적 도구의 사용법 설명하기(Demonstrate Knowledge of Scientific Instruments)', '기술하기(Describe)', '예를 이용하여 설명하기(Illustrate with Examples)'의 5개 세부 영역을 포함한다. '적용'은 '비교/대조/분류하기(Compare/Contrast/Classify)', '모형 사용하기(Use Models)',

‘관련짓기(Relate)’, ‘정보 해석하기(Interpret Information)’, ‘해답 찾기(Find Solutions)’, ‘설명하기(Explain)’ 등 6개 세부 영역을 포함한다. ‘추론’은 ‘분석하기(Analyze)’, ‘통합/종합하기(Integrate/Synthesize)’, ‘가설설정/예상하기(Hypothesize/Predict)’, ‘설계하기(Design)’, ‘결론 도출하기(Draw Conclusions)’, ‘일반화하기(Generalize)’, ‘평가하기(Evaluate)’, ‘정당화하기(Justify)’ 등 8개 세부 영역을 포함한다. TIMSS 2011의 각 세부 영역에 대한 정의는 [부록 A]에 제시되어 있다.

분석 결과, 김희경, 정혜경(2020)의 인지 요소 중 ‘현상에 포함된 과학 원리 설명하기’는 TIMSS 2011 세부 영역 중 ‘회상/인식하기’, ‘정의하기’, ‘과학적 도구의 사용법 설명하기’, ‘기술하기’, ‘예를 이용하여 설명하기’에 대응되었다. 따라서 ‘현상에 포함된 과학 원리 설명하기’는 TIMSS 2011의 ‘지식’에 해당한다고 판단하여 ‘과학적 사실, 정보, 개념, 도구 및 절차에 대한 지식을 기술하거나 식별한다’로 정의했다. ‘과학적 원리를 실제 생활에 적용하기’의 경우 TIMSS 2011의 ‘비교/대조/분류하기’, ‘관련짓기’, ‘해답 찾기’, ‘설명하기’를 포함하고 있어 ‘적용’에 해당한다고 판단하고 ‘간단한 상황에서 과학적 지식과 이해를 직접적으로 적용한다’로 정의했다. ‘탐구 문제를 발견하고 가설 설정하기’는 TIMSS 2011의 ‘추론’ 영역 중 ‘가설설정/예상하기’와 대응되어 ‘탐구를 통해 답변할 수 있는 질문이나 시험 가능한 가설을 진술한다’로 정의했다. ‘(문제 해결을 위한) 탐구 방법을 설계하고 수행하기’는 TIMSS 2011 ‘추론’에서 ‘설계하기’에 대응되어 ‘과학적 질문에 답하거나 가설을 시험하는 데 적합한 탐구를 설계하거나 계획한다’로 정의했다. ‘수집된 자료를 분석하고 해석하기’는 TIMSS 2011 ‘적용’ 영역 중 ‘정보 해석하기’에 대응한다고 판단하여 ‘과학적 개념이나 원리에 비추어 관련 문장, 표 또는 그래프 정보를 해석한다’로 정의했다. ‘모형을 활용하여 현상을 설명하기’는 TIMSS 2011 ‘적용’ 영역 중 ‘모형 사용하기’에 대응되어 ‘다이어그램이나 모형을 사용하여 과학 개념, 구조, 관계, 과정 또는 생물학적, 물리학적 시스템이나 주기에 대한 이해를 보여준다’로 정의했다. ‘탐구 문제에 대한 결론이나 해결방안 제시하기’는 TIMSS 2011 ‘추론’ 영역 중 ‘결론 도출하기’에 해당하여 ‘증거 및

과학적 개념에 대한 이해를 바탕으로 질문이나 가설의 적절한 결론을 도출하고, 원인과 결과에 대한 이해를 보여준다'로 정의했다. 마지막으로 '증거에 기반하여 논증하기(주장을 펼치거나 반론 제시하기)'는 TIMSS 2011 '추론' 영역에서 '정당화하기'에 대응되어 '증거와 과학적 이해를 사용하여 설명과 해답을 정당화한다'로 정의했다. TIMSS 2011의 세부 영역 중 '분석하기', '통합/종합하기', '일반화하기', '평가하기'에 대응되는 인지 요소는 없었다. 이상의 내용을 정리하면 [표Ⅲ-1]과 같다.

본 연구의 목적은 중학교 2학년 학생들을 대상으로 옴의 법칙 관련 인지 요소의 숙달 확률을 파악하는 것이다. 따라서 국내의 중학교 2학년 과학 교과서 5종의 옴의 법칙 단원 내용을 분석하여, [표Ⅲ-1]의 8가지 인지 요소 중 옴의 법칙 단원과 관련 있는 것으로 판단된 인지 요소만을 사용하고자 하였다. 교과서 분석 결과 옴의 법칙 단원은 '모형을 활용하여 현상을 설명하기', '증거에 기반하여 논증하기'와 관련성이 낮다고 판단했다. 결론적으로, 본 연구에서 사용하는 인지 요소는 다음과 같은 6가지 인지 요소이다.

A1. 현상에 포함된 과학 원리 설명하기
A2. 과학적 원리를 실제 생활에 적용하기
A3. 탐구 문제를 발견하고 가설 설정하기
A4. (문제 해결을 위한) 탐구 방법을 설계하고 수행하기
A5. 수집된 자료를 분석하고 해석하기
A6. 탐구 문제에 대한 결론이나 해결방안 제시하기

인지 요소 (김희경, 정혜경, 2020)	TIMSS 2011		
	정의	인지 영역	세부 영역
현상에 포함된 과학 원리 설명하기	과학적 사실, 정보, 개념, 도구 및 절차에 대한 지식을 기술하거나 식별한다.	지식	회상/인식하기
		지식	정의하기
		지식	기술하기
		지식	예를 이용하여 설명하기
		지식	과학적 도구의 사용법 설명하기
과학적 원리를 실제 생활에 적용하기	간단한 상황에서 과학적 지식과 이해를 직접적으로 적용한다.	적용	비교/대조/분류하기
		적용	관련짓기
		적용	해답 찾기
		적용	설명하기
탐구 문제를 발견하고 가설 설정하기	탐구를 통해 답변할 수 있는 질문이나 시험 가능한 가설을 진술한다.	추론	가설 설정/예상하기
탐구 방법을 설계하고 수행하기	과학적 질문에 답하거나 가설을 시험하는 데 적합한 탐구를 설계하거나 계획한다.	추론	설계하기
수집된 자료를 분석하고 해석하기	과학적 개념이나 원리에 비추어 관련 문장, 표 또는 그래프 정보를 해석한다.	적용	정보 해석하기
모형을 활용하여 현상을 설명하기	다이어그램이나 모형을 사용하여 과학 개념, 구조, 관계, 과정 또는 생물학적, 물리학적 시스템이나 주기에 대한 이해를 보여준다.	적용	모형 사용하기
탐구 문제에 대한 결론이나 해결방안 제시하기	증거 및 과학적 개념에 대한 이해를 바탕으로 질문이나 가설의 적절한 결론을 도출하고, 원인과 결과에 대한 이해를 보여준다.	추론	결론 도출하기
증거에 기반하여 논증하기	증거와 과학적 이해를 사용하여 설명과 해답을 정당화한다.	추론	정당화하기

[표Ⅲ-1] 김희경, 정혜경(2020)의 8가지 인지 요소와 TIMSS 2011 인지 영역의 대응

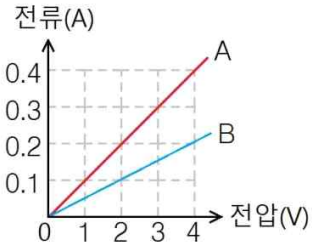
3.2.2 Q행렬 초안

인지 진단 이론 적용을 위해서는 Q행렬을 작성해야 한다(Tatsuoka, 1983). 본 연구에서는 22개의 문항과 6개의 인지 요소가 존재하므로 Q행렬은 6×22차원의 행렬로 표현된다. 각각의 문항이 문제 해결 과정에서 필요로 하는 인지 요소는 1, 필요로 하지 않는 인지 요소는 0으로 표기하여 Q행렬을 작성하였고, 물리교육 전문가 9명(석사 과정 6명, 박사 과정 3명)에게 Google 설문으로 피드백을 받은 뒤 Zoom에서 원격으로 2차례의 논의를 거쳐 Q행렬 초안을 완성하였다. 예를 들어, 1번 문항의 경우 전압에 관한 지식만으로 해결하는 문항이므로([그림Ⅲ-1] 참조) 6가지 인지 요소 중 A1(현상에 포함된 과학 원리 설명하기)만을 필요로 하는 문항이며 (1, 0, 0, 0, 0, 0)과 같이 나타낼 수 있다. 한편 17번 문항을 해결하기 위해서는 저항을 구하는 공식을 알아야 하고, 이를 적용해 계산해야 하며, 그래프를 해석할 수 있어야 한다([그림Ⅲ-2] 참조). 따라서 A1(현상에 포함된 과학 원리 설명하기), A2(과학적 원리를 실제 생활에 적용하기), A5(수집된 자료를 분석하고 해석하기)가 필요한 문항이며 (1, 1, 0, 0, 1, 0)으로 표기된다. Q행렬 초안은 [표Ⅲ-2]와 같다.

1. 전압에 대한 설명으로 옳은 것은?
① 전하의 흐름이다.
② 전류를 흐르게 하는 원인이다.
③ 단위는 A(암페어)를 사용한다.
④ 전류의 흐름을 방해하는 정도를 의미한다.
⑤ 저항이 일정할 경우 전압이 클수록 전류의 세기는 감소한다.

[그림Ⅲ-1] 1번 문항

17. 그림은 두 니크롬선 A, B에 걸린 전압과 전류의 관계를 나타낸 것이다. A, B의 저항으로 옳은 것은?



	A (Ω)	B (Ω)
①	0.1	0.05
②	0.1	0.5
③	1	2
④	10	20
⑤	20	10

[그림Ⅲ-2] 17번 문항

문항	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0
5	1	1	0	0	0	0
6	1	1	0	0	0	0
7	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0
9	0	0	1	1	0	0
10	0	0	0	1	0	0
11	0	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	0	1	0
15	1	1	0	0	1	0
16	1	1	0	0	1	0
17	1	1	0	0	1	0
18	0	0	0	0	1	1
19	0	0	1	1	0	0
20	0	0	0	0	1	1
21	0	0	0	0	1	1
22	0	0	0	0	1	1

[표Ⅲ-2] Q행렬 초안

3.3 문항 및 Q행렬 검증

피험자들의 응답 데이터로부터 문항의 신뢰도와 양호도를 검증하고 DINA 모형과 인공신경망, 전문가 검토를 통해 최종 Q행렬을 결정하여 인지 진단 모형을 적용하기 위한 준비 과정을 거쳤다.

3.3.1 신뢰도와 양호도 검증

문항의 신뢰도와 양호도를 확인하기 위해 사용한 프로그램은 IBM SPSS Statistics 26이다. 신뢰도의 경우 Cronbach α 값을 확인하여, 0.7 이상이면 수용할 만한 수준의 신뢰도로 판단할 수 있다(Nunnally & Bernstein, 1994). 양호도의 경우 문항 반응 이론에 의해 도출된 추측도, 난이도, 변별도 모수와 문항 특성 곡선을 확인하여 부적합한 문항이 있는지 검증하였고, 부적합 문항이 존재할 경우 해당 문항은 분석에서 제외하고자 하였다.

검증 결과는 다음과 같다. 우선 신뢰도 분석 결과 Cronbach α는 .907로 나타났다. 이는 문항 내적 일관성 신뢰도가 매우 높다고 할 수 있는 값이다(성태제, 2002). 문항반응이론을 적용한 분석 결과는 문항별 추측도를 [표Ⅲ-3]에, 난이도를 [표Ⅲ-4]에, 변별도를 [표Ⅲ-5]에 제시했으며, 문항 특성 곡선은 [그림Ⅲ-3]에 나와 있다. 2번 문항의 추측도가 .441로 다소 높기는 하지만 난이도와 변별도는 수용 가능한 범위이며, 문항 특성 곡선에서 큰 문제를 보이는 문항은 발견되지 않았다. 따라서 22개 문항 중 부적합한 문항은 없다고 판단하고 모든 문항을 분석에 사용하였다.

문항 번호	Value	Standard Error	Z
1	0.001	0.017	0.036
2	0.441	0.141	3.118
3	0.001	0.020	0.030
4	0.004		
5	0.068	0.109	0.622
6	0.176	0.068	2.586
7	0.052	0.120	0.431
8	0.051	0.050	1.014
9	0.163	0.091	1.790
10	0.148	0.126	1.182
11	0.035	0.029	1.222
12	0.002	0.043	0.044
13	0.262	0.065	4.014
14	0.173	0.044	3.895
15	0.197	0.080	2.457
16	0.131	0.058	2.252
17	0.148	0.061	2.422
18	0.228	0.042	5.389
19	0.231	0.042	5.476
20	0.235	0.054	4.317
21	0.181	0.073	2.468
22	0.163	0.040	4.104

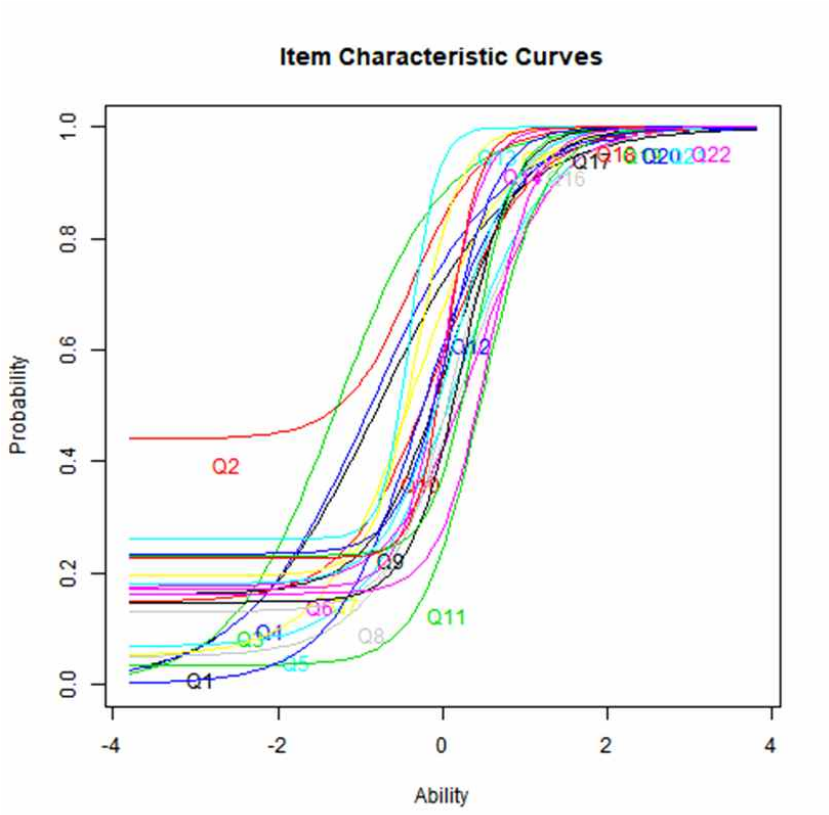
[표Ⅲ-3] 문항별 추측도

문항 번호	Value	Standard Error	Z
1	-0.781	0.138	-5.671
2	-0.366	0.356	-1.027
3	-1.280	0.157	-8.174
4	-0.870		
5	0.145	0.227	0.637
6	0.409	0.170	2.413
7	-0.358	0.223	-1.603
8	0.202	0.128	1.583
9	0.064	0.192	0.332
10	-0.048	0.261	-0.183
11	0.476	0.095	5.027
12	-0.236	0.113	-2.098
13	-0.395	0.104	-3.793
14	-0.009	0.083	-0.111
15	-0.313	0.129	-2.436
16	0.162	0.127	1.276
17	0.233	0.125	1.866
18	0.056	0.073	0.762
19	0.378	0.104	3.655
20	0.079	0.113	0.695
21	0.102	0.148	0.685
22	0.538	0.104	5.196

[표Ⅲ-4] 문항별 난이도

문항 번호	Value	Standard Error	Z
1	1.210	0.201	6.017
2	2.375	0.921	2.580
3	1.563	0.269	5.802
4	1.297		
5	1.802	0.529	3.405
6	2.067	0.564	3.664
7	1.799	0.414	4.344
8	1.856	0.356	5.221
9	2.178	0.611	3.566
10	1.837	0.563	3.263
11	2.700	0.540	5.002
12	1.846	0.282	6.555
13	6.072	1.640	3.702
14	4.097	0.962	4.260
15	3.748	1.079	3.474
16	2.720	0.660	4.120
17	3.185	1.022	3.115
18	5.197	1.549	3.355
19	3.870	1.048	3.691
20	3.303	0.859	3.847
21	2.600	0.761	3.415
22	3.405	0.975	3.492

[표Ⅲ-5] 문항별 변별도



[그림Ⅲ-3] 문항 특성 곡선

3.3.2 최종 Q행렬 결정

피험자의 실제 응답 결과로부터 Q행렬을 타당화하는 일반화된 방법은 존재하지 않지만, 몇 가지 선행연구에서 통계적인 Q행렬 타당화 방법을 제시하였다. 첫 번째 방법은 베이지안 방법론을 사용하는 것이다(de la Torre, 2008; de la Torre & Chiu, 2016). de la Torre(2008)는 베이지안 방법론의 MCMC(markov chain monte carlo) 추정 알고리즘을 사용하여 DINA 모형의 오차를 평가하였다. 두 번째 방법은 다중선형회귀를 사용하는 것이다(김성훈, 2005; 김희경, 정혜경, 2020). 김성훈(2005)에 따르면 Q행렬을 독립변수, 각 문항의 정답률을 종속변수로 두고 선형회귀를 수행할 경우 R^2 또는 adjusted R^2를 Q행렬의 적합도로 판단할 수 있으며, R^2 0.85, adjusted R^2 0.69 정도가 나온다면 해당 Q행렬을 사용할 수 있

다고 제안하였다. 세 번째 방법은 인공신경망을 사용하는 것이다(이상빈 등, 2018; 이영주, 2014; Qin & Guo, 2023). Q행렬 초안과 인지 진단 모형을 사용하여 피험자의 인지 요소별 숙달 확률을 추정했을 때, 이것이 피험자의 실제 응답을 예측할 수 있는지 인공신경망을 적용해 확인할 수 있다.

본 연구에서는 인공신경망을 활용하여 Q행렬을 타당화하고자 하였다. 그 이유는 다음과 같다. 첫째, 베이지안 방법론의 경우 입력값, 즉 각각의 인지 요소가 서로 독립적이라는 가정이 필요한데(오일석, 2008) 본 연구에서 사용하는 과학의 6가지 인지 요소는 서로 독립적인 관계라고 보기 어렵다. 둘째, 다중선형회귀를 사용하려면 인지 요소의 숙달 확률과 문항에 대한 응답 간의 선형성이 성립한다는 가정이 필요하기 때문에(김명종, 2012) 피험자의 실제 응답 데이터를 분석하기에는 제약이 있다. 셋째, 큰 표본 크기를 가정하는 다른 방법과 달리, 인공신경망을 사용하여 Q행렬을 타당화하는 것은 작은 크기의 표본으로도 가능하다(Shu et al., 2013). 피험자 수가 300명 가량으로 표본이 크지 않으며, 인지 요소와 응답이 서로 독립적이지도, 선형적이지도 않은 복잡한 상관 관계가 예상되는 본 연구의 특성상 인공신경망을 활용하여 Q행렬의 타당성을 분석하는 것이 가장 적합하다고 판단하였다.

Q행렬 검증에 인공신경망을 사용하는 연구는 아직 초기 단계로, 대부분의 연구는 Q행렬 타당화 방법을 제안하는 수준에 그치고 있으나, 입력 노드 간의 상대적 중요도(relative importance)를 활용하는 방법은 500~1000명 정도의 소규모 피험자에게서 수집된 실제 데이터를 사용한 복수의 연구에서 사용된 바 있기 때문에(이영주, 2014; 조영희, 2017) 본 연구의 Q행렬 타당화 방법으로 선택하였다. 즉 Q행렬 초안을 사용해 DINA 모형으로 도출된 인지 요소별 숙달 여부를 입력값으로, 문항별 정답 여부를 출력값으로 설정한 뒤, 각 문항에 대한 각 인지 요소의 상대적 중요도로 Q행렬의 타당성을 추정하는 것이다. 상대적 중요도 산출에 사용된 방법은 Garson(1991)의 가중치(weights) 방법이다. 입력 노드 i에서 은닉 노드 j를 거쳐 출력 노드 o의 값을 추정한다고 할 때, 출력 노드에 대한

입력 노드 i와 은닉 노드 j의 기여도(contribution) c_{ijo}는 다음과 같다.

$$c_{ijo} = w_{ij} \times w_{jo}$$

여기서 w_{ij}는 입력 노드 i와 은닉 노드 j 사이의 가중치, w_{jo}는 은닉 노드 j와 출력 노드 o 사이의 가중치이다. 은닉 노드 j에 대한 m개의 입력 노드 k의 상대적 기여도(relative contribution) r_{ijo}는 다음과 같다.

$$r_{ijo} = \frac{|C_{ijo}|}{\sum_{k=1}^{m} |C_{kjo}|}$$

n개의 은닉 노드가 존재할 때 입력 노드 i의 총 기여도 S_i는 다음과 같다.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} r_{ijo}$$

입력 노드 i의 상대적 중요도 RI_i는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$RI_i = \frac{S_i}{\sum_{k=1}^{m} S_k}$$

여기서 각 입력 노드, 즉 인지 요소들의 상대적 중요도 중 가장 큰 값으로 각각의 인지 요소의 상대적 중요도를 나누어 정규화할 수 있다. 인공신경망 모형은 이영주(2014)의 연구와 동일하게 은닉층 1개, 은닉층의 노드 수는 입력 노드 수의 1.5배로 설정했다. [표Ⅲ-2]의 Q행렬 초안을 DINA 모형에 적용하여 각 피험자의 인지 요소별 숙달 여부를 도출하고, 각각의 문항에 대해 피험자의 인지 요소별 숙달 여부를 입력값으로, 해당 문항의 정답 여부를 출력값으로 인공신경망을 구성하였다. 따라서 인공신경망의 입력 노드의 수는 인지 요소의 개수인 6개, 은닉 노드의 수는 입력 노드의 1.5배인 9개, 출력 노드의 수는 특정 문항의 정답 여부이므로 1개이다. 입력층에서 은닉층으로의 활성화 함수는 relu 함수를, 은닉층에서 출력층으로의 활성화 함수는 sigmoid 함수를 사용하였다. 모형의 loss는 mean square error로 평가하였고 optimizer는 adam을 사용했다. epoch 수는 1,000회, batch size는 64개이다. 이 같은 인공신경망 모형을

문항별로 총 22개 구성하였다.

인공신경망을 구축해 계산한 문항별 인지 요소의 상대적 중요도는 [표Ⅲ-6]과 같다. 각각의 문항 해결에 어떤 인지 요소가 필요한지에 대한 상대적 중요도의 기준은 분명하게 정해져 있진 않으나(이영주, 2014) 본 연구에서는 9명의 전문가 검토를 거쳐 도출된 Q행렬 초안의 타당성이 현저히 떨어지지는 않으리라는 가정하에 Q행렬 초안과 인공신경망으로 예측된 Q행렬이 크게 다르지 않은 상대적 중요도의 값을 기준으로 삼고자 하였다. 이에 따라 어떤 문항에서 특정 인지 요소의 상대적 중요도가 0.8 이상일 때 해당 문항은 그 인지 요소를 필요로 한다고 판단했다. 이 조건에 의해 인공신경망으로 예측된 Q행렬은 [표Ⅲ-7]이다. Q행렬 초안과 차이가 있는 인지 요소는 음영 처리하였다.

문항	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	1.000	.433	.435	.327	.700	.381
2	1.000	.560	.328	.418	.686	.793
3	1.000	.789	.741	.649	.543	.909
4	1.000	.846	.543	.545	.497	.642
5	.801	1.000	.663	.767	.405	.671
6	1.000	.890	.667	.677	.731	.768
7	.746	.889	1.000	.732	.781	.707
8	.235	.623	.542	1.000	.519	.568
9	.740	.766	1.000	.969	.742	.674
10	.383	.570	.789	1.000	.498	.303
11	.301	.360	1.000	.491	.569	.785
12	.421	.683	.562	.660	1.000	.542
13	.763	.503	.556	.437	1.000	.516
14	.583	.573	.640	.758	1.000	.663
15	.809	.939	1.000	.964	.907	.744
16	.789	1.000	.554	.480	.984	.772
17	.966	1.000	.491	.309	.907	.645
18	.852	.671	.628	.601	.946	1.000
19	.609	.367	.851	1.000	.686	.820
20	.654	.378	.536	.361	1.000	1.000
21	.651	.501	.675	.723	.873	1.000
22	.736	.777	.606	.586	.847	1.000

[표Ⅲ-6] 문항별 인지 요소의 상대적 중요도

문항	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	1
4	1	1	0	0	0	0
5	1	1	0	0	0	0
6	1	1	0	0	0	0
7	0	1	1	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0
9	0	0	1	1	0	0
10	0	0	0	1	0	0
11	0	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	0	1	0
15	1	1	1	1	1	0
16	0	1	0	0	1	0
17	1	1	0	0	1	0
18	1	0	0	0	1	1
19	0	0	1	1	0	1
20	0	0	0	0	1	1
21	0	0	0	0	1	1
22	0	0	0	0	1	1

[표Ⅲ-7] 인공신경망에 의해 추정된 Q행렬

Q행렬 초안과 인공신경망으로 예측된 Q행렬은 총 6문항에서 7개 인지 요소에 대하여 다르게 예측한 것으로 나타났다. 이영주(2014)에 따르면 인공신경망으로 예측된 Q행렬은 통계적 추정치일 뿐이므로 무조건적으로 수용하는 것이 아니라 전문가의 검토 과정을 거쳐야 한다. Q행렬 초안과 인공신경망에 의해 도출된 Q행렬을 비교하여 물리교육 전문가 5명(석사 과정 3명, 박사 과정 2명)에게 Google 설문으로 피드백을 받고 검토를 거쳐 최종 Q행렬을 결정하였다. 검토 결과는 다음과 같다.

우선 3번 문항을 보면([부록 B] 참조), 전류의 세기와 전압, 저항 사이의 관계에 대한 지식(A1)은 필요하나 탐구의 질문이나 가설에 답하는(A5) 문항은 아니므로 A1 인지 요소만 필요하다고 판단했다. 7번 문항

은 가설 설정에 해당하는 A3 인지 요소만 필요하다고 판단했다. A2에 해당하는 TIMSS 2011의 비교/대조/분류하기, 관련짓기, 해답 찾기, 설명하기 모두 7번 문항과는 연관성이 떨어진다고 보았다. 15번 문항은 A1~A5의 인지 요소 중 A1, A2, A5의 인지 요소만 포함한다고 판단했다. 그 이유는 피험자의 예상되는 문제 해결 과정이 표로부터 전압과 전류의 세기 값에 대한 정보를 해석하고(A5), 저항을 구하는 공식을 회상하고(A1), 그 공식에 값을 대입하여 답을 구할 것으로(A2) 추정되기 때문이다. 제시된 표의 정보는 실험이 선행되어야 하는 것은 맞지만 가설 설정에 해당하는 A3나 실험 설계에 해당하는 A4 인지 요소는 문제 해결에 필요하지 않다고 보았다. 16번 문항은 표가 그래프로 바뀌었을 뿐 15번 문항과 같은 형태의 문항이므로 15번 문항과 동일하게 A1, A2, A5의 인지 요소가 필요하다고 판단했다. 18번 문항의 경우 Q행렬 초안에서는 정보 해석에 해당하는 A5 인지 요소와 결론 도출에 해당하는 A6 인지 요소만 필요하다고 보았으나, 문항 선지 중 '저항'이라는 단어가 나오는 선지가 있어 정확한 정오 여부를 알기 위해서는 저항의 의미도 알아야 하므로 지식에 해당하는 A1 인지 요소도 필요하다고 판단했다. 즉 18번 문항을 해결하는 데 필요한 인지 요소는 A1, A5, A6이다. 19번 문항은 실험의 목적과 설계를 파악해야 하는 문항이므로 A3, A4 인지 요소는 필요하나 결론 도출에 해당하는 A6 인지 요소는 무관하다고 판단했다.

결론적으로 3번, 7번, 15번, 16번, 19번 문항의 인지 요소는 Q행렬 초안을 유지하되 18번 문항에 대해서만 인공신경망에 의한 추정을 따라 A1 인지 요소를 추가하는 것으로 결정했다. 피험자의 인지 요소별 숙달 확률 분석을 위해 사용된 Q행렬 최종안은 [표Ⅲ-8]이다.

문항	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0
5	1	1	0	0	0	0
6	1	1	0	0	0	0
7	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0
9	0	0	1	1	0	0
10	0	0	0	1	0	0
11	0	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	0	1	0
15	1	1	0	0	1	0
16	1	1	0	0	1	0
17	1	1	0	0	1	0
18	1	0	0	0	1	1
19	0	0	1	1	0	0
20	0	0	0	0	1	1
21	0	0	0	0	1	1
22	0	0	0	0	1	1

[표Ⅲ-8] Q행렬 최종안

3.4 분석 방법

연구 문제에 답하기 위해 [표Ⅲ-8]의 최종 Q행렬을 사용하여 인지 진단 이론을 적용해 전반적인 인지 요소별 숙달 확률을 확인하였고, 응답 패턴에 따라 인지 요소별 숙달 여부를 독립변수로, 문항 반응 이론에 의해 도출된 능력 추정치를 종속변수로 선형회귀를 수행하여 인지 요소와 능력 추정치의 관계를 산출했다.

3.4.1 인지 진단 모형의 적용

본 연구에서 사용한 인지 진단 모형은 DINA(Deterministic Input, Noisy “And” gate)이다. 비보상적 모형 중 하나인 DINA는 과학교육 평가에서 흔히 사용되는 인지 진단 모형 중 하나이다(Hu et al., 2021; Zhou & Traynor, 2022). DINA 모형에서 피험자 i가 문항 j에 필요한 모든 인지 요소에 숙달했는지의 여부를 η_{ij}로 나타낼 때, η_{ij}는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{ij} = \prod_{k=1}^{K} (\alpha_{ik})^{q_{jk}}$$

여기서 a_{ik}는 피험자 i의 인지 요소 패턴 a_i의 k번째 원소를 의미한다. 해당 인지 요소를 숙달했으면 1, 숙달하지 못했으면 0이 된다. 예를 들어 피험자 1이 6개의 인지 요소에 대하여 첫 번째, 세 번째 인지 요소만을 숙달했다면 a_1=(1, 0, 1, 0, 0, 0)이 되고, a_{11}=1, a_{12}=0, a_{13}=1, ... 이 된다. K는 사용된 인지 요소의 개수이다. q_{jk}는 문항 j를 해결하기 위해 인지 요소 k가 필요한지 여부를 의미한다. 해당 인지 요소가 필요하면 1, 필요하지 않으면 0이 된다.

DINA 모형을 적용하기 위해서는 slip과 guessing의 두 가지 모수를 추정할 필요가 있다(Junker & Sijtsma, 2001). 그 이유는 실제 응답 결과에서 노이즈 요인으로 인해 이상적인 응답과 다른 결과가 나올 수 있으므로 실제 응답은 확률적으로 결정됨을 가정하기 때문이다. slip 모수 s_j는 η_{ij}=1임에도 틀릴 확률을 결정하는 모수로 다음과 같은 조건부 확률로 나타낼 수 있다.

$$s_j = P(X_{ij} = 0 | \eta_{ij} = 1)$$

반면 guessing 모수 g_j는 η_{ij}=0임에도 맞힐 확률을 결정하는 모수로 다음과 같은 조건부 확률로 표현된다.

$$g_j = P(X_{ij} = 1 | \eta_{ij} = 0)$$

slip과 guessing의 두 모수를 고려하여 정답을 맞힐 확률이 DINA 모

형의 문항 반응 함수이며, 그 식은 아래와 같다.

$$P(X_{ij}=1|\eta_{ij}) = (1-s_j)^{\eta_{ij}} g_j^{\,1-\eta_{ij}}$$

DINA 모형에서 피험자의 인지 요소 패턴을 추정하는 가장 보편적인 방법은 최대 우도 측정(Maximum likelihood estimation)이다(안희상, 2016). 모든 문항에 대한 피험자의 응답 결과가 주어졌을 때, 가능한 모든 인지 요소 패턴에 대하여 해당 응답 결과가 나올 우도(likelihood)를 계산하여 그 값이 최대가 되는 인지 요소 패턴을 해당 피험자의 인지 요소 패턴으로 추정하는 것이다. 우도는 각 문항에 대해 실제 응답과 같은 결과가 나올 확률을 모두 곱하여 구한다. DINA 모형에서의 우도 $P(Y_i|\theta)$는 다음과 같다.

$$P(Y_i|\theta) = \prod_{j=1}^{J} [\left\{(1-s_j)^{\eta_{ij}} g_j^{(1-\eta_{ij})}\right\}^{y_{ij}} \left\{1-(1-s_j)^{\eta_{ij}} g_j^{(1-\eta_{ij})}\right\}^{1-y_{ij}}]$$

여기서 y_{ij}는 문항 j에 대한 학습자 i의 실제 응답이며, 정답일 때 1, 오답일 때 0이 된다.

본 연구에서는 [표Ⅲ-8]의 최종 Q행렬을 사용하여 인지 진단 모형을 적용했다. 인지 요소별 숙달 확률 분석에 사용된 프로그램은 R Studio이며, CDM package를 통해 제공되는 DINA 모형을 사용하여 slip과 guessing 모수를 추정하고 최대 우도 측정을 적용해 각 피험자의 인지 요소별 숙달 여부를 도출하였다.

3.4.2 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부 비교

본 연구에서는 능력이 높은 피험자와 능력이 낮은 피험자의 인지 요소별 숙달 여부를 비교하여 피험자의 능력을 높이기 위해 어떤 인지 요소에 주목해야 하는지 확인하고자 하였다. 피험자의 능력은 문항 반응 이론의 능력 추정치(ability estimates)로 산출하였다. 요인 점수(factor score)라고도 불리는 능력 추정치는 문항 반응 이론에서 산출된 피험자 능력 θ에 대한 사후분포(posterior distribution)의 기댓값을 의미한다. 능력 추정치는 피험자의 정답률뿐 아니라 응답의 패턴까지 고려하기 때문

에 피험자 능력에 대한 더 정확한 정보를 산출할 수 있다(강태훈, 심혜진, 2015). 응답 패턴별 능력 추정치 산출에 사용된 프로그램은 IBM SPSS Statistics 26이다.

능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부 사이의 관계를 확인하기 위해 사용한 방법은 선형회귀이다. 각각의 인지 요소에 대한 숙달 여부를 독립변수로, 능력 추정치를 종속변수로 하여 선형회귀의 비표준화 계수를 확인하면 숙달했을 때 능력 향상이 가장 큰 인지 요소가 무엇인지 알 수 있다. 피험자의 응답 패턴별 능력 추정치를 R Studio의 CDM package를 통해 추정된 인지 요소별 숙달 여부와 비교하여 능력 추정치와 그에 해당하는 인지 요소별 숙달 여부를 대응시켰다. 이후 선형회귀를 위해 IBM SPSS Statistics 26을 사용했으며 각각의 인지 요소와 능력 추정치 사이의 비표준화 계수를 확인했다. 비표준화 계수의 값이 큰 인지 요소를 숙달했을 때 능력이 더 많이 향상된다고 판단할 수 있다.

Ⅳ. 연구 결과 및 논의

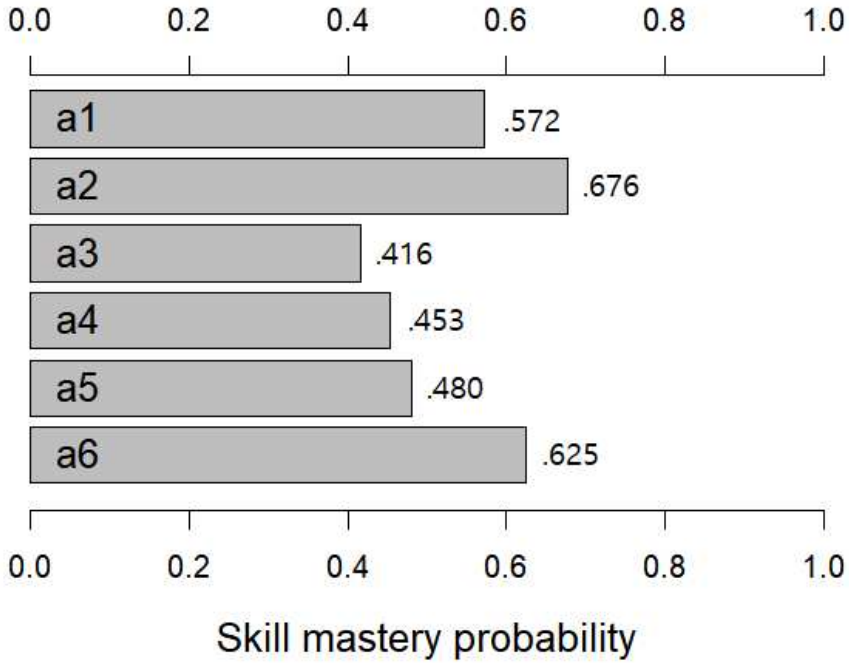
4.1 인지 요소별 숙달 확률

인지 요소별 숙달 확률을 추정하기에 앞서 slip과 guessing의 두 모수를 결정해야 하는데, 본 연구에서는 R Studio의 CDM package에서 피험자의 응답 결과로부터 모수를 추정하는 기능을 사용해 통계적으로 두 모수를 결정했다. 본 연구에서 사용한 문항별 slip과 guessing 모수는 [표Ⅳ-1]과 같다.

문항	guessing	slip
1	.343	.132
2	.495	.048
3	.540	.047
4	.477	.105
5	.171	.218
6	.227	.291
7	.360	.112
8	.148	.236
9	.316	.135
10	.297	.151
11	.057	.304
12	.252	.183
13	.410	.007
14	.220	.114
15	.414	.026
16	.207	.113
17	.208	.168
18	.307	.020
19	.247	.154
20	.329	.056
21	.316	.126
22	.175	.235

[표Ⅳ-1] 문항별 모수

[표Ⅲ-8]의 Q행렬과 [표Ⅳ-1]의 모수를 사용해 DINA 모형을 적용하여 산출한 인지 요소별 숙달 확률은 다음과 같다: A1의 숙달 확률은 .572, A2의 숙달 확률은 .676, A3의 숙달 확률은 .416, A4의 숙달 확률은 .453, A5의 숙달 확률은 .480, A6의 숙달 확률은 .625이다. [그림Ⅳ-1]은 인지 요소별 숙달 확률을 그래프로 나타낸 것이다.



[그림Ⅳ-1] 인지 요소별 숙달 확률

옴의 법칙 관련 인지 요소 중 중학교 2학년 학생들이 가장 많이 숙달하고 있는 인지 요소는 A2(과학적 원리를 실제 생활에 적용하기)이고, 두 번째로 많이 숙달한 인지 요소는 A6(탐구 문제에 대한 결론이나 해결방안 제시하기)였다. A1(현상에 포함된 과학 원리 설명하기)의 숙달 확률은 A2나 A6보다 낮았다. 반면 A3(탐구 문제를 발견하고 가설 설정하기), A4(탐구 방법을 설계하고 수행하기), A5(수집된 자료를 분석하고 해석하기) 인지 요소는 상대적으로 숙달하지 못한 것으로 나타났다. 전체 숙달 확률의 평균은 .537이다.

지식에 해당하는 A1 인지 요소의 숙달 확률은 적용에 해당하는 A2

인지 요소의 숙달 확률보다 낮게 나타났는데, 이러한 결과는 김희경, 정혜경(2020)의 선행연구와는 다른 결과이다. 이는 피험자들이 옴의 법칙 공식을 적용하는 데에는 능숙하지만 전류, 전압, 저항 개념의 정확한 정의나 단위는 혼동하고 있을 가능성을 보여준다. 학생들이 전류, 전압, 저항에 관한 올바른 개념 없이 옴의 법칙 공식을 맹목적으로 적용한다는 것은 여러 선행연구에서 지적된 바 있다(Hussain et al., 2012; Smail et al., 2012). 실제 문항을 보면 A1 인지 요소만을 포함하는 문항은 [그림Ⅳ-2]와 같이 개념의 정의와 단위 등을 묻는 반면, A1과 A2를 포함하는 문항은 [그림Ⅳ-3]과 같이 옴의 법칙 공식을 문제 상황에 적용하는 형태로 제시되었다. 옴의 법칙 단원에서는 공식의 적용보다 개념에 관한 지식의 인지 요소 숙달 확률이 낮았으므로, 옴의 법칙 단원 학습 시 공식을 문제 상황에 적용하는 것뿐 아니라 전류, 전압, 저항에 관한 정확한 개념과 단위도 지도할 필요가 있다.

1. 전압에 대한 설명으로 옳은 것은?
① 전하의 흐름이다.
② 전류를 흐르게 하는 원인이다.
③ 단위는 A(암페어)를 사용한다.
④ 전류의 흐름을 방해하는 정도를 의미한다.
⑤ 저항이 일정할 경우 전압이 클수록 전류의 세기는 감소한다.

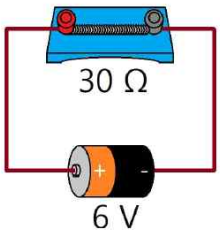
2. 저항에 대한 설명으로 옳은 것은?
① 저항의 단위는 V(볼트)이다.
② 저항은 물질의 종류와 관계없이 항상 같다.
③ 저항은 전류의 흐름을 방해하는 정도를 의미한다.
④ 저항은 전기 회로에서 전류를 흐르게 하는 능력이다.
⑤ 같은 전압을 걸어 줄 때 저항이 작은 물체에는 약한 전류가 흐른다.

[그림Ⅳ-2] A1 인지 요소를 포함하는 문항 예시

4. 어떤 저항에 10 V의 전압을 걸어 주었더니 세기가 0.2 A인 전류가 흘렀다. 같은 저항에 세기가 1 A인 전류를 흐르게 하기 위해 걸어 주어야 하는 전압은 몇 V인가?

① 2 V ② 5 V ③ 10 V ④ 50 V ⑤ 100 V

5. 그림과 같이 30 Ω의 저항과 6 V의 전지를 연결하여 회로를 구성하였다. 이때 회로에 흐르는 전류의 세기는? (단, 도선의 저항과 전지 내부 저항은 무시한다.)



① 0.1 A ② 0.2 A ③ 1 A

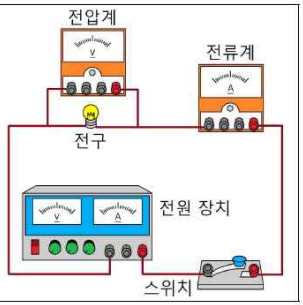
④ 2 A ⑤ 5 A

[그림Ⅳ-3] A1, A2 인지 요소를 포함하는 문항 예시

가설 설정에 해당하는 A3 인지 요소와 탐구 설계에 해당하는 A4 인지 요소는 숙달 확률이 가장 낮은 인지 요소였다. 김지영 등(2015)의 연구도 우리나라 학생들에게 어려운 인지 요소에 가설 설정 및 실험 설계하기를 포함한 바 있다. 해당 연구에서는 우리나라 과학 교과서의 탐구 활동에 가설을 세우거나 실험을 설계하는 탐구 과정 요소가 거의 포함되지 않았기 때문에 이러한 결과가 나타났다고 해석하였다. [그림Ⅳ-4]와 [그림Ⅳ-5]는 각각 A3와 A4 인지 요소를 포함하는 문항의 예시인데, 모두 실험 상황에서 문항이 출제되었음을 알 수 있다. 따라서 A3와 A4 인지 요소의 숙달 확률이 낮은 것은 피험자들이 옴의 법칙 실험에서 가설을 세우고 실험을 설계하는 경험을 거의 하지 못했기 때문에 어려움을 겪은 것으로 해석할 수 있다.

7. 다음은 전구를 이용한 실험이다.

(가) 그림과 같이 전구의 양 끝에 걸리는 전압과 전구에 흐르는 전류를 동시에 측정할 수 있도록 회로를 연결한다.
(나) 전구에 연결한 전압계의 눈금이 2 V, 4 V, 6 V가 되도록 전원 장치의 전압을 변화시키면서 전류의 세기를 측정하여 기록한다.

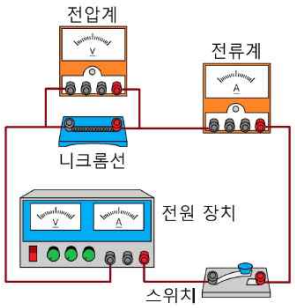


이 실험을 통해 알아보고자 하는 것으로 가장 적절한 것은?
① 저항과 전류의 세기 사이의 관계
② 전압과 전류의 세기 사이의 관계
③ 전압과 저항 사이의 관계
④ 전구에 불이 켜지는 이유
⑤ 전류의 세기와 전압을 측정하는 방법

[그림Ⅳ-4] A3 인지 요소를 포함하는 문항 예시

8. 다음은 니크롬선에 걸리는 전압에 따라 전류의 세기가 어떻게 변하는지 알아보기 위한 실험 과정이다.

(가) 전원 장치, 스위치, 니크롬선을 집게 달린 전선으로 연결한다.
(나) 니크롬선의 양 끝에 전압계를 병렬로 연결한다.
(다) 전원 장치와 니크롬선 사이에 전류계를 직렬로 연결한다.
(라) 전원 장치의 전압을 조절하여 니크롬선에 걸리는 전압이 1.5 V가 되었을 때 니크롬선에 흐르는 전류의 세기를 측정하여 기록한다.
(마) [ ]
(바) 전압에 따른 전류의 세기를 그래프로 나타낸다.

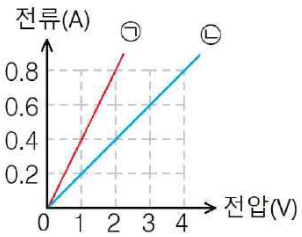


과정 (마)에 들어갈 내용으로 가장 적절한 것은?
① 측정된 전류의 세기와 전압을 비교한다.
② 측정된 전류의 세기와 전압으로부터 니크롬선의 저항을 구한다.
③ 전원 장치의 (+)극과 (-)극을 바꾸어 연결한 뒤 과정 (라)를 반복한다.
④ 니크롬선을 길이가 더 긴 니크롬선으로 바꾸어 과정 (라)를 반복한다.
⑤ 니크롬선에 걸리는 전압을 1.5 V씩 높이면서 니크롬선의 전압과 전류를 측정하여 기록한다.

[그림Ⅳ-5] A4 인지 요소를 포함하는 문항 예시

자료 해석에 해당하는 A5 인지 요소는 숙달 확률이 상대적으로 낮은 인지 요소에 해당하는데, 이는 우리나라 학생을 대상으로 과학 인지 요소의 숙달 확률을 분석한 여러 선행연구와는 다른 결과이다. 김지영, 김수진(2009)의 연구에서는 자료 해석하기의 숙달 확률이 .652로 해당 문헌에서 사용된 5가지 인지 요소 중 가장 높은 숙달 확률을 보였으며, 김희경, 정혜경(2020)의 연구에서는 .5351의 숙달 확률을 보여 마찬가지로 상위권의 숙달 확률을 가진 인지 요소였다. 김지영 등(2015)은 우리나라 학생들이 가장 쉬워하는 인지 요소가 자료 분석하기임을 확인했다. 그러나 본 연구에서 A5 인지 요소는 숙달 확률이 하위권으로 분류된 인지 요소였다. 이 같은 결과는 본 연구의 피험자들이 표나 그래프 해석 등 과학 문제 해결에 필요한 수학의 선행 지식을 습득하지 못했을 가능성을 보여준다. [그림Ⅳ-6]과 같이, A5 인지 요소를 묻는 문항들은 표나 그래프의 해석을 요구하는 문항들이었기 때문이다. 수학에서의 성취가 과학에 영향을 미침은 이미 여러 선행연구에서 논의된 바 있다(김선희 등, 2012; Wang, 2005). 특히 과학 문제 해결에서 그래프 해석에 어려움을 겪을 수 있으므로(권경필, 이세연, 2020; 김유정 등, 2009; Ivanjek et al., 2016) 학습에 앞서 표나 그래프 해석과 관련된 수학적인 선행 지식을 점검할 필요가 있다.

14. 그림은 니크롬선 ㉠, ㉡을 연결했을 때 전압과 전류의 세기를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

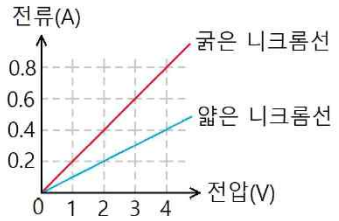


① ㉠에 2 V의 전압을 걸어 주면 0.8 A의 전류가 흐른다.
② ㉡에 2 V의 전압을 걸어 주면 0.4 A의 전류가 흐른다.
③ ㉠에 0.4 A의 전류를 흐르게 하려면 1 V의 전압을 걸어 주어야 한다.
④ ㉠, ㉡에 같은 전압을 걸었을 때 ㉡에 더 약한 전류가 흐른다.
⑤ ㉠, ㉡에 같은 세기의 전류가 흐를 때 ㉠에 더 큰 전압이 걸려 있다.

[그림Ⅳ-6] A5 인지 요소를 포함하는 문항 예시

결론 도출에 해당하는 A6 인지 요소는 여러 선행연구의 결과와 마찬가지로 숙달 확률이 높게 나타났다. 김희경, 정혜경(2020)의 연구에서는 해당 인지 요소의 숙달 확률 .5373으로 전체 8가지 인지 요소 중 3번째로 높았고, 김지영 등(2015)의 연구에서는 우리나라 학생들이 강점을 보이는 4가지 인지 요소 중 하나가 결론 도출하기였다. A6 인지 요소는 [그림Ⅳ-7]과 같이 A5 인지 요소와 함께 포함되는 문항만 존재했으며, A6 인지 요소를 단독으로 묻는 문항은 없었다. 즉 피험자들은 표나 그래프를 해석하는 것은 어려워하지만 일단 해석하고 나면 그로부터 결론을 도출하는 것은 어렵지 않게 할 수 있다. 이러한 결과는 우리나라의 교과서에서 학생들이 실험을 계획하는 활동보다 제시된 실험으로부터 결과를 도출하는 형태가 많기 때문으로(양일호 등, 2007) 해석된다.

18. 다음 그래프는 길이가 같고 굵기는 다른 두 니크롬선에서 전압에 따른 전류의 세기를 측정한 결과이다. 그래프로부터 알 수 있는 사실로 가장 적절한 것은?



① 같은 전압을 걸어 주었을 때 니크롬선이 굵을수록 센 전류가 흐른다.
② 같은 전압을 걸어 주었을 때 니크롬선이 얇을수록 센 전류가 흐른다.
③ 니크롬선의 길이는 전류의 세기에 영향을 주지 않는다.
④ 니크롬선의 굵기는 전류의 세기에 영향을 주지 않는다.
⑤ 니크롬선에 걸리는 전압이 커지면 니크롬선의 저항이 커진다.

[그림Ⅳ-7] A5, A6 인지 요소를 포함하는 문항 예시

4.2 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부의 관계

피험자의 능력에 따른 인지 요소별 숙달 여부가 어떻게 나타나는지 확인하기 위해 응답 패턴에 따른 문항 반응 이론의 능력 추정치를 산출하고, 각 응답 패턴에 해당하는 인지 요소별 숙달 여부를 대응시켜 비교하였다. [표Ⅳ-2]는 인지 요소의 숙달 여부를 독립변수로, 능력 추정치를 종속변수로 하여 선형회귀를 수행한 결과이다.

인지 요소	비표준화 계수	p-value
A1	.466	.000
A2	.099	.022
A3	.329	.000
A4	.266	.000
A5	.558	.000
A6	.168	.000

[표Ⅳ-2] 능력 추정치에 대한 선형회귀 결과

선형회귀 결과, 모든 인지 요소는 $p<0.05$에서 유의하였다. 즉 6가지의 모든 인지 요소는 그 인지 요소를 숙달했을 때 피험자의 능력이 통계적으로 유의하게 향상됨을 알 수 있다. 비표준화 계수를 확인했을 때 능력 추정치에 가장 영향이 큰 인지 요소는 자료 해석에 해당하는 A5 인지 요소이고, 지식에 해당하는 A1 인지 요소가 그 뒤를 이었다. 이는 A5 인지 요소와 A1 인지 요소를 숙달하는 것이 옴의 법칙과 관련된 피험자의 능력을 가장 많이 향상할 수 있음을 의미한다.

개별 피험자의 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부를 비교한 결과 능력 추정치는 인지 요소에 관한 상세한 정보를 제공하는 데 한계가 있음을 확인하였다. 예를 들어 [표Ⅳ-3]을 보면 162번과 169번으로 레이블링 된 두 피험자의 능력 추정치는 .64로 같지만, 162번 피험자는 A1~A6의 모든 인지 요소를 숙달한 반면 169번 피험자는 6개의 인지 요소 중 4개만 숙달한 것으로 나타났다. [표Ⅳ-4]에서는 99번 피험자의 능력 추정치는 .56, 239번 피험자의 능력 추정치는 .33으로 99번 피험자의 능력이 더 뛰어나다고 산출되었으나 99번 피험자는 4개의 인지 요소만을 숙달했고 239번 피험자는 6개의 인지 요소를 모두 숙달했음을 알 수 있다. 즉 능력 추정치가 높다고 해서 반드시 많은 인지 요소를 숙달하고 있는 것은 아니다. 특정 인지 요소를 포함하는 문항들을 집중적으로 틀린 피험자의 경우에는 이러한 결과가 나올 수 있다.

번호	능력 추정치	A1	A2	A3	A4	A5	A6
162	.64	1	1	1	1	1	1
169	.64	1	1	0	0	1	1

[표Ⅳ-3] 능력 추정치가 .64인 피험자의 인지 요소별 숙달 여부

번호	능력 추정치	A1	A2	A3	A4	A5	A6
99	.56	1	1	0	0	1	1
239	.33	1	1	1	1	1	1

[표Ⅳ-4] 일부 피험자의 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부

개별 피험자의 점수가 같더라도 숙달하지 못한 인지 요소는 다를 수 있음이 여러 선행연구에서 확인된 바 있으며(김지영, 김수진, 2009; 김희경, 정혜경, 2020) 이는 문항 반응 이론을 적용한 능력 추정치를 사용해도 마찬가지였다. 이는 본질적으로 규준지향평가인 능력 추정치 활용의 한계라고 할 수 있다. 인지 진단 이론은 개별 피험자의 강점과 약점에 대한 정보를 제공하기 때문에(Tatsuoka, 2009) 능력 추정치와 비교하여 피험자에 대해 더 풍부한 정보를 제공한다.

Ⅴ. 결론 및 제언

본 연구에서는 옴의 법칙 형성평가의 결과를 분석함으로써 많은 학생이 학습에 어려움을 겪는 옴의 법칙 단원에서 학생들이 숙달하지 못한 인지 요소가 구체적으로 무엇인지 알아보고, 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부를 비교하고자 하였다. 이를 위해 선행 문헌과 교과서를 분석하여 옴의 법칙과 관련된 인지 요소 6가지를 도출하였고, 전문가 검토를 통해 형성평가 문항에 대한 Q행렬 초안을 작성하였다. 이후 응답 데이터를 활용해 문항의 신뢰도와 양호도를 검증하고, Q행렬을 타당화하고, Q행렬 최종안을 사용하여 인지 요소별 숙달 확률을 추정했다. 마지막으로 응답 패턴에 따른 능력 추정치와 인지 요소별 숙달 여부의 관계를 선형회귀를 통해 확인했다. 본 연구의 결론으로서 중학교 2학년 학생들의 옴의 법칙 성취기준 도달을 위한 다음과 같은 학습 지원 및 형성평가 활용 방안을 제안한다.

옴의 법칙 학습 과정에 있어 국내의 8학년 과학 교과서 5종 모두 옴의 법칙 실험을 수행한 뒤 실험 결과로부터 전류, 전압, 저항 사이의 관계를 설명하는 순서를 따른다. 우선 옴의 법칙 실험을 진행할 때 학생들이 전류, 전압, 저항 사이의 관계를 알아보기 위한 실험의 가설을 설정하고 실험을 직접 설계해보는 경험이 필요하다. 모든 과학 교과서에서 옴의 법칙 실험을 완성된 형태로 제시하고 학생들은 제시된 실험 과정을 따라 수행하도록 기술되어 있는데, 그 결과 옴의 법칙 실험을 통해 답변할 수 있는 질문 또는 가설을 진술하거나(A3), 전류, 전압, 저항 사이의 관계를 알아보기 위한 실험을 설계 및 계획하는 데에(A4) 많은 학생이 어려움을 느끼는 것으로 나타났다. 반면 전압에 따른 전류의 세기에 대한 정보로부터 적절한 결론을 도출하는 것은(A6) 숙달 확률이 상대적으로 높았으므로, 실험의 가설 진술과 설계를 중점적으로 지도해야 한다.

실험 결과로부터 전류, 전압, 저항 사이의 관계를 설명하기에 앞서, 학

생들이 전압에 따른 전류의 세기를 나타낸 표 또는 그래프 정보를 해석할 수 있는지(A5) 점검하여 선행 지식이 부족한 학생에게는 이와 관련된 추가적인 학습을 제공한다. 표 또는 그래프 정보 해석은 상대적으로 숙달 확률이 낮은 인지 요소였기 때문이다. 옴의 법칙 공식을 학습할 때는 공식 자체와 함께 공식을 구성하는 각 개념의 정확한 정의와 단위를 명확히 지도할 필요가 있다. 학생들은 공식을 언어적, 개념적으로 학습하지 않고 단순 적용만 하려는 경향이 있으며(홍석인, 2003; Li & Singh, 2012) 본 연구에서도 옴의 법칙 공식을 문제 상황에 적용하는 인지 요소(A2)에 비해 전류, 전압, 저항의 정의나 단위를 식별하는 인지 요소(A1)의 숙달 확률이 낮았으므로, 공식뿐 아니라 관련 개념에 관한 지식의 학습도 이루어져야 한다. 특히 학생의 능력을 향상하기 위해서는 전류, 전압, 저항 개념의 지식이나(A1) 표 또는 그래프의 해석 능력을(A5) 숙달하도록 하는 것이 가장 효과적임을 확인하였는데, 이는 교육과정상에서 모두 옴의 법칙 단원의 선행 지식에 해당하는 인지 요소들이다. 옴의 법칙 단원이 많은 인지 요소를 포함하는 만큼 학생들의 선행 지식을 확인하는 작업이 중요하다고 할 수 있다.

단원 학습이 끝나면 형성평가를 통해 개별 학생의 강점과 약점을 파악한다. 인지 진단 이론을 활용하면 피험자의 상태에 대해 능력 추정치보다 상세한 정보를 확인할 수 있으므로, [부록 B]의 문항을 배포하여 응답을 수집하고 [표Ⅲ-8]의 Q행렬로 인지 진단 이론을 적용함으로써 개별 학습자의 인지 요소별 숙달 여부를 파악해 맞춤형 피드백을 제공할 수 있다.

본 연구는 많은 학생이 어려움을 느끼는 옴의 법칙 단원에 인지 진단 이론을 적용하여 구체적으로 어떤 인지 요소의 숙달이 부족한지 도출하고 이를 능력 추정치와 비교했다는 데에 의의가 있으나 다음과 같은 한계를 가진다. 첫째, 본 연구의 연구 참여자는 경기도 소재 1개 중학교의 2학년 학생으로, 표본이 모집단(우리나라의 중학교 2학년 학생)을 대표한다고 보기 어렵다. 향후 더 폭넓은 지역과 학교에서 응답을 수집하고 분석할 필요가 있다. 둘째, 분석에 사용된 표본의 수가 충분하지 않았다.

과학교육 평가에서 소규모 피험자를 대상으로 인지 진단 이론을 적용한 선행연구를 살펴보면 400~1000명 정도의 인원을 분석했음을 알 수 있다(김지영, 김수진, 2009; Chen et al., 2017; Gao et al., 2020). 본 연구의 연구 참여자는 306명이었고, 무의미 응답을 제거한 후 실제로 분석된 것은 300명의 데이터였으므로, 선행 문헌들보다는 상대적으로 적은 수였다. 차후 충분한 수의 데이터를 확보한 연구가 요구된다. 이러한 한계에도 불구하고 본 연구를 통해 옴의 법칙과 관련하여 학생들이 겪는 어려움을 구체화하고 맞춤형 교육의 가능성을 볼 수 있었다. 본 연구가 다양한 교육 현장에서 맞춤형 교육 지원에 도움이 될 수 있기를 희망한다.

참 고 문 헌

강태훈, 심혜진. (2015). 다분문항반응이론에서 두 가지 사후기대추정법을 통한 IRT 능력모수 추정의 정확성 비교 연구. **교육방법연구, 27**(1), 89-108.

계보경, 김혜숙, 이용상, 김상운, 손정은, 백송이. (2020). COVID-19에 따른 초중등학교 원격교육 경험 및 인식 분석 (이슈 리포트, GM2020-11). 한국교육학술정보원.

교육부. (2015). 과학과 교육과정. 교육부 고시 제 2015-74호.

권경필, 이세연. (2020). 제16회 국제중등과학올림피아드 물리 이론 문제에 대한 학생들의 풀이과정 분석. **국제과학영재학회지, 6**(1), 19-26.

김명종. (2012). 로지스틱 회귀분석과 인공신경망을 적용한 내부회계관리제도 평가모형의 성과비교. **국제회계연구, 46**, 1-30.

김선희, 김수진, 김지영. (2012). The relationship of cognitive attributes of mathematics and science. **교육과정평가연구, 15**(2), 191-215.

김성훈. (2005). 인지구조모형에 근거한 학생의 지식상태의 진단-규칙장이론(Rule-space theory)의 적용. **교육학연구, 43**(1), 81-107.

김유정, 최길순, 노태희. (2009). 고등학생들의 과학 그래프 작성 및 해석 과정에서 나타난 오류. **한국과학교육학회지, 29**(8), 978-989.

김지영, 김수진. (2009). 인지 진단 이론을 활용한 중학교 과학 시험 결과의 분석. **한국과학교육학회지, 29**(8), 812-823.

김지영, 김수진, 동효관. (2015). 인지진단이론에 근거한 TIMSS 2011의 과학 결과 분석을 통한 인지 속성의 국제비교. **한국과학교육학회지, 35**(2), 267-275.

김희경, 박종임, 정연준, 박상욱, 김창환, 이채희, 최재화. (2014). **맞춤형 교육 지원을 위한 형성평가 체제 도입**. 서울: 한국교육과정평가원.

김희경, 정혜경. (2020). 인지진단모형을 적용한 국가수준 학업성취도 평

가 과학과 세부 학습영역 분석 사례. **교육문제연구, 33**(4), 89-113.

성태제. (2002). **타당도와 신뢰도**. 서울: 학지사.

성태제. (2018). 인지진단모형에 의한 중1 수학 '수와 연산'의 형성평가 도구 개발과 분석. **교육평가연구, 31**(1), 29-53.

안희상. (2016). 인지진단 검사의 Q행렬 타당성 분석 방법 연구. 서울대학교 대학원 석사학위 논문.

양일호, 김석민, 조현준. (2007). 초· 중등학교 과학 실험수업의 유형 분석. **한국과학교육학회지, 27**(3), 235-241.

오일석. (2008). **패턴인식**. 서울: 교보문고.

이상빈, 김태호, 현윤진, 최숙기. (2018). 인공신경망(artificial neural network)을 활용한 일반계 고등학생의 비문학 독해 평가에서의 인지진단모형 적용 방안. **독서연구, 46**, 107-145.

이영주. (2014). 인공신경망에 근거한 인지진단모형 Q 행렬의 타당성 평가. 이화여자대학교 대학원 박사학위 논문.

임아름, 전영석. (2014). 초등학교 과학과 "전기회로" 단원 수업에서 겪는 교사와 학생의 어려움 분석. **초등과학교육, 33**(3), 597-606.

조영희. (2017). 인지진단모형을 활용한 어휘능력 부진 평가와 읽기장애 진단. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.

최성광. (2022). 현장 교사들의 코로나19로 인한 학습격차 대응 경험에 대한 초점집단면담(FGI) 연구. **학습자중심교과교육연구, 22**(5), 245-261.

홍석인. (2003). 물리시험 답안분석을 통한 교육대학생들의 전기에 관한 논리전개유형 및 오개념 분석. **과학교육논총, 15**, 189-208.

황승우, 서경혜. (2021). 코로나 19 시대 교육불평등 해소 정책에 대한 비판적 고찰. **교육과학연구, 52**(4), 179-207.

황정규, 서민원, 최종근, 김민성, 양명희, 김재철, 강태훈, 이대식, 김준엽, 신종호, 박인우, 김동일. (2011). **교육평가의 이해**. 서울: 학지사.

Ampère, A. M. (1820, September). Mémoire présenté à l'Académie

royale des Sciences, le 2 octobre 1820, où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courans électriques. In *Annales de Chimie et de Physique* (Vol. 15, pp. 59-76).

Birenbaum, M., Kelly, A. E., & Tatsuoka, K. K. (1993). Diagnosing knowledge states in algebra using the rule-space model. *Journal for Research in Mathematics Education, 24*(5), 442-459.

Burde, J. P., & Wilhelm, T. (2017). Concept and empirical evaluation of a new curriculum to teach electricity with a focus on voltage. In *PERC Proceedings* (Vol. 68, p. 2017).

Cavendish, H. (1771). An attempt to explain some of the principal phenomena of electricity, by means of an elastic fluid. *Philos Trans R Soc Lond, 61*, 584-677.

Chen, C. M., Lee, H. M., & Chen, Y. H. (2005). Personalized e-learning system using item response theory. *Computers & Education, 44*(3), 237-255.

Chen, F., Zhang, S., Guo, Y., & Xin, T. (2017). Applying the rule space model to develop a learning progression for thermochemistry. *Research in Science Education, 47*, 1357-1378.

Children, J. G. (1809). An account of some experiments performed with a view to ascertain the most advantageous method of constructing the voltaic apparatus for the purposes of chemical research. *J Natur Philos Chem Arts, 24*, 150-155.

Cohen, R., Eylon, B., & Ganiel, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American journal of Physics, 51*(5), 407-412.

Cuthbertson, J. (1804). Letter communicating an important and curious

distinguishing property between the galvanic and electric fluids. *J Nat Philos Chem Arts, 8(97-8)*, 205-206.

Davy, H. (1821). On the magnetic phenomena produced by electricity. *Philos Trans R Soc Lond, 111*, 7-19.

de la Torre, J. (2008). An empirically based method of Q matrix validation for the DINA model: Development and applications. *Journal of educational measurement, 45*(4), 343-362.

de la Torre, J., & Chiu, C. Y. (2016). A general method of empirical Q-matrix validation. *Psychometrika, 81*, 253-273.

Dorn, E., Hancock, B., Sarakatsannis, J., & Viruleg, E. (2020). COVID-19 and student learning in the United States: The hurt could last a lifetime. *McKinsey & Company, 1*, 1-9.

Engelhardt, P., & Beichner, R. (2004). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics, 72*(1), 98-115.

Gao, Y., Zhai, X., Andersson, B., Zeng, P., & Xin, T. (2020). Developing a learning progression of buoyancy to model conceptual change: A latent class and rule space model analysis. *Research in Science Education, 50*, 1369-1388.

Garson, G. D. (1991). Interpreting neural-network connection weights. *AI expert, 6*(4), 46-51.

Hu, T., Yang, J., Wu, R., & Wu, X. (2021). An International comparative study of students' scientific explanation based on cognitive diagnostic assessment. *Frontiers in Psychology*, 5916.

Hussain, N. H., Latiff, L. A., & Yahaya, N. (2012). Alternative conception about open and short circuit concepts. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 56*, 466-473.

Ivanjek, L., Susac, A., Planinic, M., Andrasevic, A., & Milin-Sipus, Z.

(2016). Student reasoning about graphs in different contexts. *Physical Review Physics Education Research, 12*(1), 010106.

Jang, E. E. (2008). A framework for cognitive diagnostic assessment. In C. A, Chapelle, Y.-R. Chung, & J. Xu (Eds.). *Towards adaptive CALL: Natural language processing for diagnostic language assessment* (pp.117-131). Ames, IA: Iowa State University.

Junker, B. W., & Sijtsma, K. (2001). Cognitive assessment models with few assumptions, and connections with nonparametric item response theory. *Applied Psychological Measurement, 25*(3), 258-272.

Kabiri, M., Ghazi-Tabatabaei, M., Bazargan, A., Shokoohi-Yekta, M., & Kharrazi, K. (2017). Diagnosing competency mastery in science: An application of GDM to TIMSS 2011 data. *Applied Measurement in Education, 30*(1), 27-38.

Kang, B. (2021). How the COVID-19 pandemic is reshaping the education service. *The Future of Service Post-COVID-19 Pandemic, Volume 1: Rapid Adoption of Digital Service Technology*, 15-36.

Kipnis, N. (2009). A law of physics in the classroom: The case of Ohm's law. *Science & Education, 18*(3-4), 349.

Li, J., & Singh, C. (2012, February). Students' difficulties with equations involving circuit elements. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1413, No. 1, pp. 243-246). American Institute of Physics.

Licht, P. (1987). A strategy to deal with conceptual and reasoning problems in introductory electricity education. In *Proceedings of the 2nd International Seminar Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics* (Vol. 2,

pp. 275-284).

McDermott, L. C., & Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American journal of physics, 60*(11), 994-1003.

Morgan, P. L., Farkas, G., Hillemeier, M. M., & Maczuga, S. (2016). Science achievement gaps begin very early, persist, and are largely explained by modifiable factors. *Educational Researcher, 45*(1), 18-35.

Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory (3rd ed.)*. New York, NY: McGraw-Hill.

Ohm, G. S. (1825). Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contaktelektricität leiten. *Annalen der Physik, 80*(5), 79-88.

Ohm, G. S. (1826). Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contaktelektricität leiten: Nebst einem Entwurfe zur einer Theorie des Voltaischen Apparates und des Schweiggerschen Multiplicators. *Journal für Chemie und Physik, 44*, 137-166.

Palmer, T. (1966). Difficulties in Ohm's Law - and in teaching it. *Education & Training (London), 8*(2), 77-80.

Popat, Y. (2021). Ohm's law: Misconceptions of the students at secondary and senior secondary level. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 5*(12), 88-91.

Qin, H., & Guo, L. (2023). Using machine learning to improve Q-matrix validation. *Behavior Research Methods*, 1-20.

Roussos, L. A., Dibello, L. V., Stout, W., Hartz, S. M., Henson, R. A., & Templin, J. H. (2007). The Fusion Model skill diagnosis system. In J. Leighton & M. Gierl (Eds.), *Cognitive diagnostic assessment for education* (pp. 275-318). New York: Cambridge

University Press.

Rupp, A. A., & Templin, J. (2008). The effects of Q-matrix misspecification on parameter estimates and classification accuracy in the DINA model. *Educational and Psychological Measurement, 68*(1), 78-96.

Sambamurthy, N., & Edgcomb, A. D. (2018). A Systematic Literature Review of Misconceptions in Linear Circuit Analysis. In *2018 ASEE Annual Conference & Exposition*.

Shu, Z., Henson, R., & Willse, J. (2013). Using neural network analysis to define methods of DINA model estimation for small sample sizes. *Journal of classification, 30*, 173-194.

Sleeman, D., Kelly, A. E., Martinak, R., Ward, R. D., & Moore, J. L. (1989). Studies of diagnosis and remediation with high school algebra students. *Cognitive Science, 1*3(4), 551-568.

Smaill, C. R., Rowe, G. B., Godfrey, E., & Paton, R. O. (2011). An investigation into the understanding and skills of first-year electrical engineering students. *IEEE Transactions on Education, 55*(1), 29-35.

Tamir, P. (1976). The role of the laboratory in science teaching. Technical Report No. 10. Iowa City, IA: The University of Iowa.

Tatsuoka, K. K. (1983). Rule space: An approach for dealing with misconceptions based on item response theory. *Journal of Educational Measurement, 20*(4), 345-354.

Tatsuoka, K. K. (2009). *Cognitive assessment: An introduction to the rule space method*. New York, NY: Routledge.

Tatsuoka, K. K., Birenbaum, M., & Arnold, J. (1989). On the stability of students' rules of operation for solving arithmetic problems. *Journal of Educational Measurement, 26*(4), 351-361.

Tu, D., Zheng, C., Cai, Y., Gao, X., & Wang, D. (2018). A polytomous model of cognitive diagnostic assessment for graded data. *International Journal of Testing, 18*(3), 231-252.

Volta, A. (1779). Sur la capacité des conducteurs électriques & sur la commotion égale à celle de la bouteille de Leyde que peut donner un simple conducteur. *Observations sur la physique, 13*, 249-277.

Volta, A. (1800). On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philos Mag, 7*, 289-311.

Volta, A. (1802). Au Redacteurs de la Bibliothéque Britannique. *Bibliothéque Britannique, 19*, 274-289, 339-350.

Wang, J. (2005). Relationship between mathematics and science achievement at the 8th grade. *Online Submission, 5*, 1-17.

Wilkinson, C. (1804). Facts upon which deductions are made to shew the law of Galvanism. *J Nat Philos, 7*, 206-209.

Zhou, S., & Traynor, A. (2022). Measuring students' learning progressions in energy using cognitive diagnostic models. *Frontiers in Psychology, 13*.

[부록 A] TIMSS 2007~2023의 인지 영역

지식(Knowing)

인지 영역	TIMSS 2007, 2011	TIMSS 2015, 2019, 2023
지식 (Knowing)	회상/인식하기(Recall/Recognize): 과학적 사실, 관계, 과정 및 개념에 대해 정확히 식별하거나 서술한다. 특정 유기체, 재료 및 과정의 특징 또는 속성을 식별한다.	회상/인식하기(Recall/Recognize): 사실, 관계 및 개념을 식별하거나 서술한다. 특정 유기체, 물질 및 과정의 특징 또는 속성을 식별한다. 과학 도구의 적절한 용도 및 절차를 식별한다. 과학적 어휘, 기호, 약어, 단위 및 척도를 인식하고 사용한다.
	정의하기(Define): 과학적 용어의 정의를 제공하거나 식별한다. 관련 맥락에서 과학적 어휘, 기호, 약어, 단위 및 척도를 인식하고 사용한다.	
	도구와 절차 사용하기(Use Tools and Procedures); 과학적 도구의 사용법 설명하기(Demonstrate Knowledge of Scientific Instruments): 과학 기구, 장비, 도구, 절차, 측정 장비 및 척도에 대한 지식을 보여준다.	
	기술하기(Describe): 유기체, 물질 및 과학 과정을 기술하여 속성, 구조, 기능 및 관계에 대한 지식을 보여준다.	기술하기(Describe): 유기체와 물질의 속성, 구조, 기능 및 유기체와 물질 간의 관계, 과정, 현상을 기술하거나 식별한다.
	예를 이용하여 설명하기(Illustrate with Examples): 적절한 예를 사용하여 사실 또는 개념에 대한 진술을 지원하거나 명료화한다. 일반적인 개념에 대한 지식을 설명하기 위해 특정 예를 식별하거나 제공한다.	예시 제공하기(Provide Examples): 특정한 특징을 지닌 유기체, 물질, 과정의 예를 제공하거나 식별한다. 적절한 예를 들어 사실이나 개념에 대한 진술을 명료화한다.

적용(Applying)

<table>
<tr><th>인지 영역</th><th>TIMSS 2007, 2011</th><th>TIMSS 2015, 2019, 2023</th></tr>
<tr><td rowspan="6">적용
(Applying)</td><td colspan="2">비교/대조/분류하기(Compare/Contrast/Classify): 유기체, 물질, 과정의 그룹 간 유사점과 차이점을 식별하거나 기술한다. 주어진 특징과 속성을 기반으로 개별 물체, 물질, 유기체 및 과정을 구별, 분류한다.</td></tr>
<tr><td>모형 사용하기(Use Models): 다이어그램이나 모형을 사용하여 과학 개념, 구조, 관계, 과정 또는 생물학적, 물리학적 시스템이나 주기에 대한 이해를 보여준다. (예: 먹이 사슬, 전기 회로, 물 순환, 태양계, 원자 구조)</td><td rowspan="2">모형 사용하기(Use Model); 모형 해석하기(Interpret Models): 다이어그램이나 기타 모형을 사용하여 과학 개념에 대한 지식을 보여주고, 과정, 주기, 관계 또는 시스템을 설명하거나 과학 문제의 해답을 찾는다.</td></tr>
<tr><td>해답 찾기(Find Solutions): 개념의 직접적인 적용/설명을 포함하는 정성적 또는 정량적인 해답을 찾기 위해 과학적 관계, 방정식, 공식을 식별하거나 사용한다.</td></tr>
<tr><td>관련짓기(Relate): 관찰 또는 추론된 속성, 행동, 물체의 사용, 유기체, 물질을 근원적인 생물학적, 물리학적 개념에 대한 지식과 관련짓는다.</td><td>관련짓기(Relate): 관찰 또는 추론된 속성, 행동, 물체의 사용, 유기체, 물질을 근원적인 과학 개념에 대한 지식과 관련짓는다.</td></tr>
<tr><td>정보 해석하기(Interpret Information): 과학적 개념이나 원리에 비추어 관련 문장, 표 또는 그래프 정보를 해석한다.</td><td>정보 해석하기(Interpret Information): 과학 개념에 대한 지식을 사용하여 관련 문장, 표 또는 그래프 정보를 해석한다.</td></tr>
<tr><td>설명하기(Explain): 관찰 또는 자연 현상에 대한 설명을 제공하거나 식별하여 근원적인 과학 개념, 원리, 법칙 또는 이론에 대한 이해를 보여준다.</td><td>설명하기(Explain): 과학 개념이나 원리를 사용하여 관찰 또는 자연 현상에 대한 설명을 제공하거나 식별한다.</td></tr>
</table>

추론(Reasoning)

<table>
<tr><th>인지 영역</th><th>TIMSS 2007, 2011</th><th colspan="2">TIMSS 2015, 2019</th><th>TIMSS 2023</th></tr>
<tr><td rowspan="2">추론
(Reasoning)</td><td>문제
분석/해결하기(Analyze/Solve Problems); 분석하기(Analyze): 관련 관계, 개념 및 문제 해결 단계를 결정하기 위해 문제를 분석한다. 문제 해결 전략을 개발하고 설명한다.</td><td colspan="3">분석하기(Analyze): 과학 문제의 요소를 식별하고 관련 정보, 개념, 관계 및 데이터 패턴을 사용하여 질문에 답하고 문제를 해결한다.</td></tr>
<tr><td>통합/종합하기(Integrate/Synthesize): 다양한 요소 또는 관련 개념을 고려해야 하는 문제의 해답을 제공한다. 서로 다른 과학 분야의 개념을 연결하거나 관련짓는다. 과학 영역 전반에 걸쳐 통합된 개념과 주제에 대한 이해를 보여준다. 과학 문제 해결에서 수학적 개념이나 절차를 통합한다.</td><td colspan="3">종합하기(Synthesize): 다양한 요소 또는 관련 개념을 고려해야 하는 질문에 답한다.</td></tr>
</table>

추론 (Reasoning)	가설 설정/예상하기(Hypothesize/Predict): 과학적 개념에 대한 지식을 경험이나 관찰에서 얻은 정보와 결합하여 탐구를 통해 답변할 수 있는 질문을 진술한다. 과학적 정보 및 개념적 이해의 관찰, 분석에서 얻은 지식을 사용하여 시험 가능한 가정으로 가설을 진술한다. 증거와 과학적 이해에 비추어 생물학적 또는 물리학적 조건 변화의 영향을 예상한다.	질문/가설/예상 진술하기(Formulate Questions/Hypothesize/Predict): 탐구를 통해 답변할 수 있는 질문을 진술하고 설계에 대한 정보가 제공된 탐구 결과를 예상한다. 경험, 관찰, 과학적 정보의 분석으로부터 얻은 개념적 이해와 지식을 기반으로 시험 가능한 가정을 진술한다. 증거와 개념적 이해를 사용하여 생물학적 또는 물리학적 조건 변화의 영향을 예상한다.	예상하기(Predict): 탐구를 통해 답변할 수 있는 질문을 진술하고 설계에 대한 정보가 제공된 탐구 결과를 예상한다. 과학적 증거와 개념적 이해를 사용하여 생물학적 또는 물리학적 조건 변화의 영향 또는 동역학적 상황의 결과를 예상한다. 경험, 관찰, 과학적 정보의 분석으로부터 얻은 개념적 이해와 지식을 기반으로 시험 가능한 가정을 진술한다.
	설계/계획하기(Design/Plan); 설계하기(Design): 과학적 질문에 답하거나 가설을 시험하는 데 적합한 탐구를 설계하거나 계획한다. 측정 및 통제할 변수와 인과 관계의 측면에서 잘 설계된 탐구의 특징을 기술하거나 인식한다. 탐구 수행에 사용할 측정 또는 절차를 결정한다.	탐구 설계하기(Design Investigation): 과학적 질문에 답하거나 가설을 시험하는 데 적합한 탐구나 절차를 계획한다. 측정 및 통제할 변수와 인과 관계의 측면에서 잘 설계된 탐구의 특징을 기술하거나 인식한다.	설계하기(Design): 모형을 개발한다. 과학적 질문에 답하거나 가설을 시험하는 데 적합한 탐구나 절차를 계획한다. 측정 및 통제할 변수와 인과 관계의 측면에서 잘 설계된 탐구의 특징을 기술하거나 인식한다. 문제 해결을 위해 과학적 원리와 적절한 기술을 적용하는 계획을 설계한다.

추론 (Reasoning)	결론 도출하기(Draw Conclusions): 데이터나 주어진 정보로부터 패턴을 감지하고, 추세를 설명 또는 요약하고, 내삽 또는 외삽한다. 과학적 개념에 대한 증거 및 이해를 바탕으로 타당하게 추론한다. 질문이나 가설을 다루는 적절한 결론을 도출하고, 원인과 결과에 대한 이해를 보여준다.	결론 도출하기(Draw Conclusions): 관찰, 증거 및 과학 개념에 대한 이해를 바탕으로 타당하게 추론한다. 질문이나 가설을 다루는 적절한 결론을 도출하고, 원인과 결과에 대한 이해를 보여준다.
	일반화하기(Generalize): 실험이나 주어진 조건을 넘어서는 일반적인 결론을 내리고, 새로운 상황에 결론을 적용한다. 물리적 관계를 표현하기 위한 일반 공식을 결정한다.	일반화하기(Generalize): 실험이나 주어진 조건을 넘어서는 일반적인 결론을 내린다. 새로운 상황에 결론을 적용한다.

<table>
<tr><td rowspan="2">추론
(Reasoning)</td><td>평가하기(Evaluate): 대체 과정, 물질, 자료에 대한 결정을 내리기 위해 장단점을 평가한다. 생물학적, 물리학적 시스템에 대한 과학 및 기술의 영향을 평가하기 위해 과학적, 사회적 요인을 고려한다. 대체 설명, 문제 해결 전략, 해답을 평가한다. 결론을 뒷받침하는 데이터가 충분한지 탐구 결과를 평가한다.</td><td>평가하기(Evaluate): 대체 설명을 평가한다. 대체 과정, 물질, 자료에 대한 결정을 내리기 위해 장단점을 평가한다. 결론을 뒷받침하는 데이터가 충분한지 탐구 결과를 평가한다.</td><td>평가하기(Evaluate): 대체 설명을 평가한다. 대체 과정, 물질, 자료에 대한 결정을 내리기 위해 장단점을 평가한다. 모형의 장점과 한계를 평가한다. 결론을 뒷받침하는 데이터가 충분한지 탐구 결과를 평가한다. 성공과 제약의 기준에 따라 설계 계획을 평가한다.</td></tr>
<tr><td>정당화하기(Justify): 증거와 과학적 이해를 사용하여 설명과 해답을 정당화한다. 문제에 대한 해답, 탐구 결과 또는 과학적 설명의 합리성을 뒷받침하는 주장을 구성한다.</td><td colspan="2">정당화하기(Justify): 증거와 과학적 이해를 사용하여 설명, 문제에 대한 해답, 탐구 결론의 합리성을 뒷받침한다.</td></tr>
</table>

[부록 B] 옴의 법칙 형성평가 문항

1. 전압에 대한 설명으로 옳은 것은?
① 전하의 흐름이다.
② 전류를 흐르게 하는 원인이다.
③ 단위는 A(암페어)를 사용한다.
④ 전류의 흐름을 방해하는 정도를 의미한다.
⑤ 저항이 일정할 경우 전압이 클수록 전류의 세기는 감소한다.

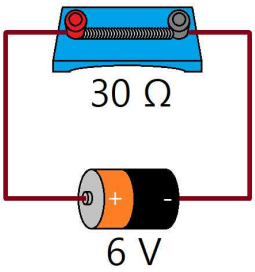
2. 저항에 대한 설명으로 옳은 것은?
① 저항의 단위는 V(볼트)이다.
② 저항은 물질의 종류와 관계없이 항상 같다.
③ 저항은 전류의 흐름을 방해하는 정도를 의미한다.
④ 저항은 전기 회로에서 전류를 흐르게 하는 능력이다.
⑤ 같은 전압을 걸어 줄 때 저항이 작은 물체에는 약한 전류가 흐른다.

3. 도체에 흐르는 전류의 세기는 전압에 (A)하고, 저항에 (B)한다. A와 B에 들어갈 말을 옳게 짝지은 것은?

	A	B
①	비례	반비례
②	비례	비례
③	반비례	비례
④	반비례	반비례
⑤	무관	반비례

4. 어떤 저항에 10 V의 전압을 걸어 주었더니 세기가 0.2 A인 전류가 흘렀다. 같은 저항에 세기가 1 A인 전류를 흐르게 하기 위해 걸어 주어야 하는 전압은 몇 V인가?
① 2 V ② 5 V ③ 10 V ④ 50 V ⑤ 100 V

5. 그림과 같이 30 Ω의 저항과 6 V의 전지를 연결하여 회로를 구성하였다. 이때 회로에 흐르는 전류의 세기는? (단, 도선의 저항과 전지 내부 저항은 무시한다.)



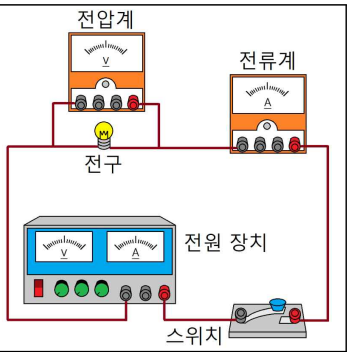
① 0.1 A ② 0.2 A ③ 1 A
④ 2 A ⑤ 5 A

6. 스피커의 소리를 크게 하려면 볼륨 조절기의 저항을 조절하여 센 전류가 흐르도록 해야 한다. 스피커의 소리를 크게 할 때 볼륨 조절기의 저항은 어떻게 변하며, 그 이유는 무엇인가?

① 볼륨 조절기의 저항은 커진다. 저항이 클수록 전압이 커지기 때문이다.
② 볼륨 조절기의 저항은 커진다. 저항이 클수록 전류의 세기가 커지기 때문이다.
③ 볼륨 조절기의 저항은 커진다. 저항이 클수록 전류의 세기가 작아지기 때문이다.
④ 볼륨 조절기의 저항은 작아진다. 저항이 작을수록 전압이 커지기 때문이다.
⑤ 볼륨 조절기의 저항은 작아진다. 저항이 작을수록 전류의 세기가 커지기 때문이다.

7. 다음은 전구를 이용한 실험이다.

(가) 그림과 같이 전구의 양 끝에 걸리는 전압과 전구에 흐르는 전류를 동시에 측정할 수 있도록 회로를 연결한다.
(나) 전구에 연결한 전압계의 눈금이 2 V, 4 V, 6 V가 되도록 전원 장치의 전압을 변화시키면서 전류의 세기를 측정하여 기록한다.

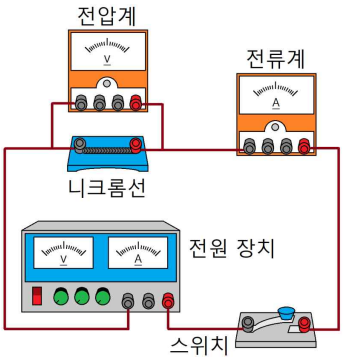


이 실험을 통해 알아보고자 하는 것으로 가장 적절한 것은?

① 저항과 전류의 세기 사이의 관계
② 전압과 전류의 세기 사이의 관계
③ 전압과 저항 사이의 관계
④ 전구에 불이 켜지는 이유
⑤ 전류의 세기와 전압을 측정하는 방법

8. 다음은 니크롬선에 걸리는 전압에 따라 전류의 세기가 어떻게 변하는지 알아보기 위한 실험 과정이다.

(가) 전원 장치, 스위치, 니크롬선을 집게 달린 전선으로 연결한다.
(나) 니크롬선의 양 끝에 전압계를 병렬로 연결한다.
(다) 전원 장치와 니크롬선 사이에 전류계를 직렬로 연결한다.
(라) 전원 장치의 전압을 조절하여 니크롬선에 걸리는 전압이 1.5 V가 되었을 때 니크롬선에 흐르는 전류의 세기를 측정하여 기록한다.
(마) [ ]
(바) 전압에 따른 전류의 세기를 그래프로 나타낸다.

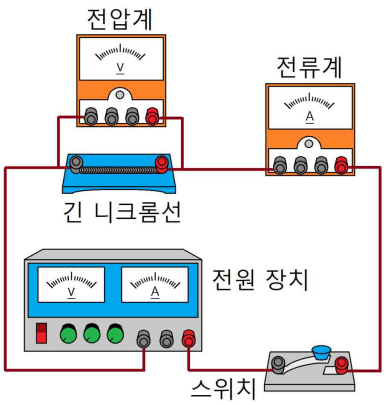


과정 (마)에 들어갈 내용으로 가장 적절한 것은?
① 측정된 전류의 세기와 전압을 비교한다.
② 측정된 전류의 세기와 전압으로부터 니크롬선의 저항을 구한다.
③ 전원 장치의 (+)극과 (-)극을 바꾸어 연결한 뒤 과정 (라)를 반복한다.
④ 니크롬선을 길이가 더 긴 니크롬선으로 바꾸어 과정 (라)를 반복한다.
⑤ 니크롬선에 걸리는 전압을 1.5 V씩 높이면서 니크롬선의 전압과 전류를 측정하여 기록한다.

9. 다음은 전류, 전압, 저항에 대한 실험이다.

[실험 과정]
(가) 그림과 같이 긴 니크롬선, 전원 장치, 스위치, 전류계, 전압계를 전선으로 연결한다.
(나) 스위치를 누르고 전원 장치를 조절하여 (㉠)
(다) 긴 니크롬선을 짧은 니크롬선으로 바꾸어 과정 (나)를 반복한다.

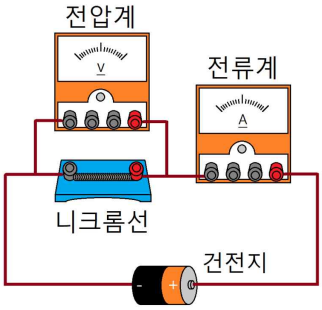
[실험 결과]
짧은 니크롬선에 3 V의 전압이 걸렸을 때 전류의 세기는 0.3 A였고, 긴 니크롬선에 3 V의 전압이 걸렸을 때 전류의 세기는 0.15 A였다.



실험 과정 (나)의 ㉠에 들어갈 내용으로 가장 적절한 것은?
① 니크롬선에 걸리는 전압이 0 V가 되게 한다.
② 니크롬선에 흐르는 전류의 세기가 0 A가 되게 한다.
③ 니크롬선에서 전압과 전류의 세기가 같게 한다.
④ 니크롬선에 걸리는 전압이 3 V일 때 전류의 세기를 측정한다.
⑤ 니크롬선에 흐르는 전류의 세기가 0.3 A일 때 전압을 측정한다.

10. 다음은 직렬로 연결된 건전지 개수에 따라 니크롬선에 걸리는 전압과 니크롬선에 흐르는 전류의 세기가 어떻게 변하는지 알아보기 위한 실험 과정이다.

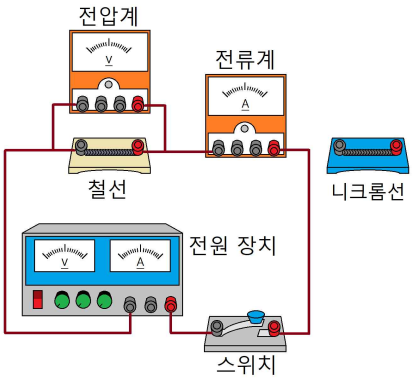
(가) 건전지 한 개와 니크롬선을 전선으로 연결한다.
(나) 니크롬선의 양 끝에 전압계를 연결하고 건전지와 니크롬선 사이에 전류계를 연결하여 회로를 만든다.
(다) 니크롬선에 걸리는 전압과 니크롬선에 흐르는 전류의 세기를 측정한다.
(라) (　　㉠　　) 니크롬선에 걸리는 전압과 니크롬선에 흐르는 전류의 세기를 측정하여 표에 기록한다.



과정 (라)의 ㉠에 들어갈 내용으로 가장 적절한 것은?
① 회로에서 건전지를 제거한 뒤
② 건전지 대신 전원 장치를 연결하고
③ 건전지의 (+)극과 (-)극을 바꾸어 연결한 뒤
④ 직렬 연결된 건전지를 2, 3, 4개로 늘려가면서
⑤ 니크롬선을 길이가 더 긴 니크롬선으로 바꾸고

[11-12] 연우와 채원이는 철선과 니크롬선을 사용해 다음과 같은 실험을 하였다. 철선과 니크롬선은 길이와 굵기가 같다. 물음에 답하시오.

[실험 과정]
(가) 전원 장치와 스위치, 철선, 전류계, 전압계를 그림과 같이 연결한다.
(나) 전원 장치의 전압을 조절하여 철선에 걸리는 전압이 1 V가 되었을 때 철선에 흐르는 전류의 세기를 측정한다.
(다) 철선에 걸리는 전압을 1 V씩 높이면서 철선에 흐르는 전류의 세기를 측정한다.
(라) 철선 대신 니크롬선을 연결하고 과정 (가)~(다)를 반복한다.



[실험 결과]

전압 (V)		0	1	2	3
전류 (A)	철선	0	0.60	1.20	1.80
	니크롬선	0	0.05	0.10	0.15

11. 연우와 채원이는 실험 과정을 보고 아래와 같은 대화를 하였다.

연우: 이 실험은 무엇을 알아보기 위한 실험이니? 채원: 이 실험은 전압이 증가할 때 (A)에 따라 전류의 세기가 어떻게 변하는지 비교하기 위한 실험이야.

A에 들어갈 내용으로 가장 적절한 것은?

① 물질의 종류 ② 전류의 방향 ③ 전류계의 연결 방법
④ 철선의 길이와 굵기 ⑤ 니크롬선의 길이와 굵기

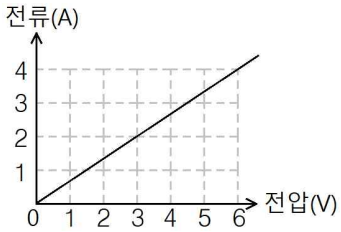
12. 연우와 채원이는 실험 결과를 보고 아래와 같은 대화를 하였다.

연우: 철선에 1 V의 전압을 걸어 주면 전류의 세기는 (㉠)가 되는구나. 채원: 맞아. 그리고 니크롬선에 흐르는 전류의 세기가 0.10 A가 되려면 (㉡)의 전압을 걸어 주어야 해.

㉠과 ㉡에 들어갈 값을 옳게 짝지은 것은?

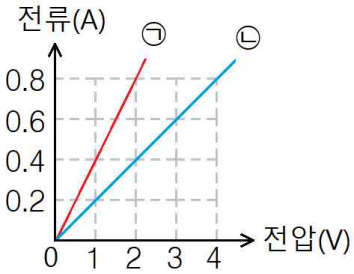
	㉠	㉡
①	0.05 A	1.20 V
②	0.60 A	1.20 V
③	0.60 A	2 V
④	1.20 A	2 V
⑤	1.20 A	3 V

13. 그림은 어떤 니크롬선에 걸어 준 전압과 전류의 관계를 나타낸 것이다. 이 니크롬선에 3 V의 전압을 걸어 주었을 때 니크롬선에 흐르는 전류의 세기는?



① 1 A ② 2 A ③ 3 A
④ 4 A ⑤ 6 A

14. 그림은 니크롬선 ㉠, ㉡을 연결했을 때 전압과 전류의 세기를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?



① ㉠에 2 V의 전압을 걸어 주면 0.8 A의 전류가 흐른다.
② ㉡에 2 V의 전압을 걸어 주면 0.4 A의 전류가 흐른다.
③ ㉠에 0.4 A의 전류를 흐르게 하려면 1 V의 전압을 걸어 주어야 한다.
④ ㉠, ㉡에 같은 전압을 걸었을 때 ㉡에 더 약한 전류가 흐른다.
⑤ ㉠, ㉡에 같은 세기의 전류가 흐를 때 ㉠에 더 큰 전압이 걸려 있다.

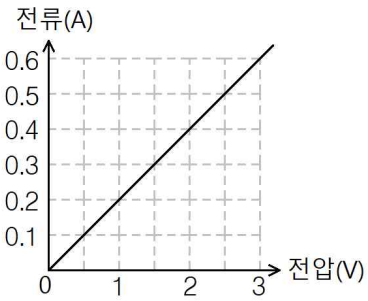
15. 어떤 니크롬선에 걸리는 전압을 변화시키면서 니크롬선에 흐르는 전류의 세기를 측정하였더니 다음 표와 같았다.

전압 (V)	1.0	2.0	3.0	4.0
전류 (A)	0.5	1.0	1.5	2.0

이 니크롬선의 저항은?

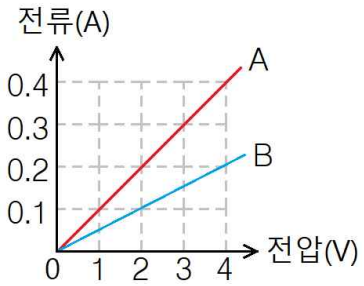
① 0.5 Ω ② 2 Ω ③ 5 Ω
④ 10 Ω ⑤ 20 Ω

16. 오른쪽 그림은 어떤 니크롬선에 걸어 준 전압에 따른 전류의 세기를 나타낸 것이다. 이 니크롬선의 저항은?



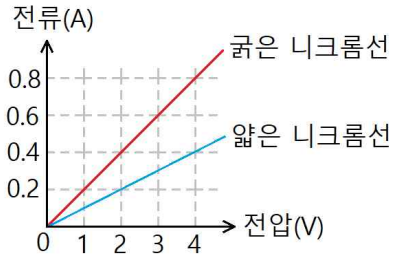
① 0.2 Ω ② 0.5 Ω ③ 5 Ω
④ 20 Ω ⑤ 50 Ω

17. 그림은 두 니크롬선 A, B에 걸린 전압과 전류의 관계를 나타낸 것이다. A, B의 저항으로 옳은 것은?



	A (Ω)	B (Ω)
①	0.1	0.05
②	0.1	0.5
③	1	2
④	10	20
⑤	20	10

18. 다음 그래프는 길이가 같고 굵기는 다른 두 니크롬선에서 전압에 따른 전류의 세기를 측정한 결과이다. 그래프로부터 알 수 있는 사실로 가장 적절한 것은?



① 같은 전압을 걸어 주었을 때 니크롬선이 굵을수록 센 전류가 흐른다.
② 같은 전압을 걸어 주었을 때 니크롬선이 얇을수록 센 전류가 흐른다.
③ 니크롬선의 길이는 전류의 세기에 영향을 주지 않는다.
④ 니크롬선의 굵기는 전류의 세기에 영향을 주지 않는다.
⑤ 니크롬선에 걸리는 전압이 커지면 니크롬선의 저항이 커진다.

[19-20] 다음은 굵기가 같은 짧은 니크롬선과 긴 니크롬선을 사용한 실험이다. 물음에 답하시오.

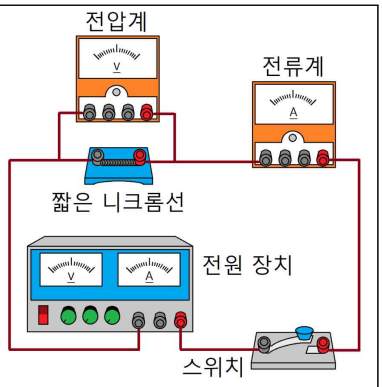
[실험 과정]

(가) 그림과 같이 짧은 니크롬선, 전류계, 전압계, 전원 장치, 스위치를 연결한다.

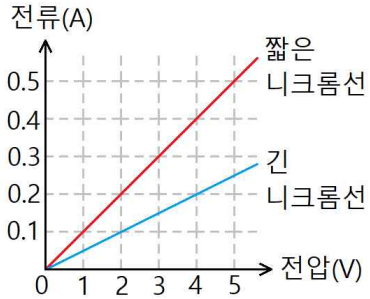
(나) 전원 장치를 조절하여 짧은 니크롬선에 걸리는 전압을 1 V씩 높이면서 짧은 니크롬선에 흐르는 전류의 세기를 측정한다.

(다) [ ]

(라) 과정 (나)~(다)에서 측정한 결과를 그래프로 나타낸다.



[실험 결과]



19. 실험 과정 (다)에 들어갈 내용으로 가장 적절한 것은?

① 짧은 니크롬선과 긴 니크롬선의 길이를 비교한다.

② 짧은 니크롬선에서 측정된 전류의 세기와 전압을 비교한다.

③ 짧은 니크롬선 대신 긴 니크롬선을 연결하고 과정 (나)를 반복한다.

④ 짧은 니크롬선에 걸리는 전압을 2 V씩 높이면서 전류의 세기를 측정한다.

⑤ 짧은 니크롬선에 흐르는 전류의 세기를 0.1 A씩 높이면서 전압을 측정한다.

20. 굵기가 같은 두 니크롬선을 사용한 위의 실험 결과로부터 알 수 있는 사실로 가장 적절한 것은?

① 같은 전압을 걸어 주었을 때 니크롬선의 길이가 길수록 센 전류가 흐른다.

② 같은 전압을 걸어 주었을 때 니크롬선의 길이가 짧을수록 센 전류가 흐른다.

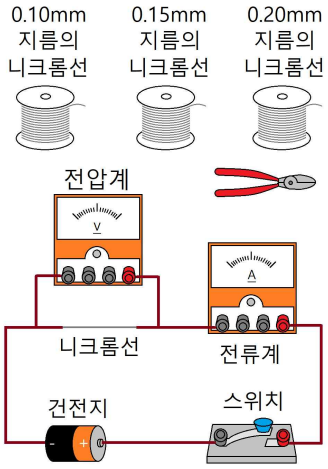
③ 전류의 세기는 전압에 반비례한다.

④ 전류의 세기는 니크롬선의 길이에 영향을 받지 않는다.

⑤ 니크롬선의 길이에 따라 전압과 전류의 측정 방법이 다르다.

[21-22] 서준이는 다양한 지름과 길이의 니크롬선을 가지고 다음과 같은 실험을 하였다. 물음에 답하시오.

[실험 과정]
(가) 지름이 각각 0.10 mm, 0.15 mm, 0.20 mm인 니크롬선을 10 cm 길이로 자른다.
(나) 과정 (가)의 니크롬선을 건전지, 전류계, 전압계, 스위치와 연결하여 전압과 전류의 세기를 각각 측정한다.
(다) 지름이 0.15 mm인 니크롬선을 각각 길이가 10 cm, 20 cm, 30 cm가 되도록 자른다.
(라) 과정 (다)의 니크롬선을 회로에 연결하여 전압과 전류의 세기를 각각 측정한다.



[실험 과정 (가)~(나)의 결과]

니크롬선의 지름 (mm)	전압 (V)	전류 (A)
0.10	1.5	0.34
0.15	1.5	0.78
0.20	1.5	1.38

[실험 과정 (다)~(라)의 결과]

니크롬선의 길이 (cm)	전압 (V)	전류 (A)
10	1.5	0.78
20	1.5	0.39
30	1.5	0.26

21. 실험 과정 (가)~(나)의 결과로부터 알 수 있는 사실로 가장 적절한 것은?
① 니크롬선의 길이가 같을 때, 니크롬선의 지름은 전류의 세기에 영향을 미치지 않는다.
② 니크롬선의 길이가 같을 때, 니크롬선의 지름이 클수록 니크롬선에 걸리는 전압이 커진다.
③ 니크롬선의 길이가 같을 때, 니크롬선의 지름이 작을수록 니크롬선에 걸리는 전압이 커진다.
④ 니크롬선의 길이가 같을 때, 니크롬선의 지름이 클수록 니크롬선에 흐르는 전류의 세기가 세진다.
⑤ 니크롬선의 길이가 같을 때, 니크롬선의 지름이 작을수록 니크롬선에 흐르는 전류의 세기가 세진다.

22. 실험 과정 (다)~(라)의 결과로부터 알 수 있는 사실로 가장 적절한 것은?
① 니크롬선의 지름이 같을 때, 니크롬선의 길이는 전류의 세기에 영향을 미치지 않는다.
② 니크롬선의 지름이 같을 때, 니크롬선의 길이가 길수록 니크롬선에 걸리는 전압이 커진다.
③ 니크롬선의 지름이 같을 때, 니크롬선의 길이가 짧을수록 니크롬선에 걸리는 전압이 커진다.
④ 니크롬선의 지름이 같을 때, 니크롬선의 길이가 길수록 니크롬선에 흐르는 전류의 세기가 세진다.
⑤ 니크롬선의 지름이 같을 때, 니크롬선의 길이가 짧을수록 니크롬선에 흐르는 전류의 세기가 세진다.

Abstract

Analysis of Cognitive Attributes Mastery Probability Related to Ohm's Law in Second Grade Middle School Students Using Cognitive Diagnostic Theory

Min, Taeho
Physics Major, Department of Science Education
The Graduate School
Seoul National University

Cognitive diagnostic theory is attracting attention as one of the measures to support customized education. Assessment items applying cognitive diagnostic theory measure cognitive attributes, which mean ability, skills, knowledge, or cognitive process to solve the items, and mastery of each cognitive attribute is determined from students' response data for the items. In this study, cognitive diagnostic theory was applied to the formative assessment response data of the Ohm's law, which many students find difficult, to find out what the cognitive

attributes were not mastered, and what relationship there was between the ability estimates and mastery of each cognitive attribute.

The research process is as follows. The data analyzed in this study are the response results of Ohm's law formative assessment. The formative assessment was produced with 22 questions by referring to 5 types of textbooks for 2nd grade middle school students and items for NAEA, and the assessment was conducted on 306 2nd grade middle school students in Gyeonggi-do, Korea. In order to analyze the response data of formative assessment by applying cognitive diagnostic theory, it is necessary to create a Q-matrix that shows the relationship between items and cognitive attributes. By analyzing previous studies and textbooks, cognitive attributes related to Ohm's law were derived and expert review was conducted. After that, a draft of the Q-matrix for 22 items of formative assessment was prepared. The cognitive attributes related to Ohm's law used in this study were 'illustrating scientific principles involved in phenomena', 'applying scientific principles to real life', 'discovering research problems and establishing hypotheses', 'designing and implementing inquiry process (to solve problems)', 'analyzing and interpreting collected data', and 'proposing a conclusion or solution to an inquiry problem'. To secure the validity of the analysis, the reliability and usability of the items were verified after excluding 6 insincere responses in which the same answer was chosen for all items. The program to confirm reliability and usability was IBM SPSS Statistics 26. Reliability was confirmed by Cronbach α value, and usability was confirmed by guessing, difficulty, discrimination parameters and item characteristic curves derived by item response theory. Cronbach α was found to be .907 at an excellent reliability, and when the parameters of item response theory and item characteristic curves were checked,

no inappropriate items were found, so it was decided to use all 22 items in the analysis. The final Q-matrix was determined through DINA model, artificial neural network analysis, and experts review, and the mastery probabilities for each cognitive attribute were analyzed with the DINA model provided through the CDM package in R Studio using the final Q-matrix. IBM SPSS Statistics 26 was used to calculate ability estimates for each response pattern, and the relationship between ability estimates and each cognitive attribute was verified through linear regression.

As a result of analyzing the mastery probabilities for each cognitive attribute of the students, 'illustrating scientific principles involved in phenomena', 'applying scientific principles to real life', 'proposing a conclusion or solution to an inquiry problem' were cognitive atttributes with an above-average mastery probability. However, 'discovering research problems and establishing hypotheses', 'designing and implementing inquiry process (to solve problems)', and 'analyzing and interpreting collected data' were identified as cognitive atttributes with mastery probabilities below average. Cognitive attributes with high weights for ability estimates were in order of 'illustrating scientific principles involved in phenomena' and 'analyzing and interpreting collected data', and it was confirmed that even among students with the same ability estimates, the cognitive attributes that they failed to master could be different. Through the results of this study, some methods for utilizing learning support to reach the achievement standard of Ohm's law were proposed.

keywords : cognitive diagnostic theory, cognitive attributes, Q-matrix, Ohm's law, formative evaluation
Student Number : 2020-24500