

영양강화제 중 황산동의 성분 규격 시험법 개선

— 연구노트 —

송태웅¹ · 조근희² · 임지현³ · 송채연⁴ · 양소원⁴ · 이 찬⁵ · 서희재⁴ · 이옥환^{1,3} · 최선일^{1,2}

¹강원대학교 식품생명공학과, ²강원대학교 푸드바이오테크학과, ³강원대학교 식품환경융합학과
⁴선문대학교 식품과학과, ⁵중앙대학교 식품공학과

Improvement of Analytical Methods for the Specification of Copper Sulfate in Fortifying Nutrient

Tae-Woong Song¹, Geun-Hee Cho², Ji-Hyun Im³, Chaeyeon Song⁴, Sowon Yang⁴,
Chan Lee⁵, Hee-Jae Suh³, Ok-Hwan Lee^{1,3}, and Sun-Il Choi^{1,2}

¹Department of Food Science and Biotechnology, ²Department of Food Biotechnology, and
³Department of Food Biotechnology and Environmental Science, Kangwon National University
⁴Department of Food Science, Sun Moon University
⁵Department of Food Science and Technology, Chung-Ang University

ABSTRACT This study aimed to improve and validate the specification analysis method for copper sulfate, a fortifying nutrient used in food additives in South Korea. The existing method prescribed by the Korean Food Additives Code lacks clear conditions and procedures for saturating hydrogen sulfide to detect alkali and alkaline earth metals. A simple hydrogen sulfide generation device was developed to address these limitations, and the optimal reaction parameters were established, including diluted hydrochloric acid-to-ferrous sulfide ratios and reaction times. Under the optimized conditions, three replicate experiments were conducted, resulting in a residual weight of 3.20 ± 0.30 mg, which satisfied the Korean Food Additives Code requirement of less than 4 mg and the Certificate of Analysis (CoA) specification of less than 0.03%. In addition, intra-day and inter-day analyses were performed to verify the reproducibility and optimization of the proposed method, yielding values of 3.04 ± 0.28 mg and 2.78 ± 0.51 mg, respectively. These findings confirmed the validity of the optimized method. This study is expected to enhance the safety of experimenters working with toxic gases and the general applicability of the analysis by providing clear conditions and procedures for generating hydrogen sulfide in detecting alkali and alkaline earth metals during the purity analysis of copper sulfate.

Keywords: copper sulfate, fortifying nutrient, hydrogen sulfide, alkali metal and alkaline earth metal, optimization

서 론

현대 사회에서 가공식품의 의존도가 높아지면서, 식품첨가물은 식품산업에 있어 필수적인 요소로 자리 잡았다(Choi, 2016). 실제로 식품첨가물의 사용량이 증가하면서 식품첨가물을 취급하는 기업과 제품의 종류가 증가하였고, 그로 인해 시장 규모 또한 빠른 속도로 성장하는 추세를 보인다(MFDS, 2016). 식품첨가물은 제품의 품질을 향상하고 보존 기간을 연장하는 데 기여하며, 최종적으로 소비자에게 더 안전한 제품을 제공하는 역할을 하고 있다. 국내 식품의약품안전처에서 지정된 159종의 영양강화제는 식품 가공 과정에서 손실된 영양소를 보충하고 강화하는 역할을 담당하고

있으며, 최근 몇 년 동안 식품의 영양 품질 개선 및 유해한 부산물 형성을 저해시킬 수 있는 이점으로 주목받고 있다(Im 등, 2024; Shi 등, 2024).

하지만 이러한 영양강화제를 포함한 식품첨가물의 이점에도 불구하고, 안전성에 대한 우려로 인하여 소비자들의 인식이 대부분 부정적일 때가 많다. 식품첨가물은 소비자들에게 큰 감각적 즐거움과 상업적 편의성을 가져다줄 수 있지만 사용 규격 및 기준에 맞지 않는 첨가물의 사용과 남용은 인간의 건강에 잠재적 위험을 초래할 수도 있다(Wu 등, 2022). 이러한 부정적인 인식을 개선하고, 더욱 안전한 식품첨가물 사용을 위해서는 철저한 안전 관리 방안이 필수적으로 이루어져야 한다(Jung, 2009). 또한, WTO의 무역 개방

Received 25 March 2025; Revised 14 April 2025; Accepted 14 April 2025

Corresponding author: Sun-Il Choi, Department of Food Biotechnology, Kangwon National University, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon 24341, Korea, E-mail: csi23@kangwon.ac.kr

© 2025 The Korean Society of Food Science and Nutrition.

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

체제하에서 식품산업의 국제화가 이루어짐에 따라, 영양강화제를 포함한 모든 식품첨가물은 국가별로 엄격한 규제를 받고 있다. 이에 따라 각 국가는 식품첨가물 기준과 규격을 지속적으로 제·개정하고 있으며, 이를 확인하기 위한 시험법도 꾸준히 개선되고 있다(Kwon 등, 2007). 국내 식품의약품안전처가 지정한 영양강화제 중 황산동은 미국, 일본, 중국, 호주 등 다양한 국가와 Codex Alimentarius Commission 등에서 식품첨가물로 지정되어 있어 국제적인 시험법 조화가 필요하며, 해외 수입에 의존하고 있어 명확한 성분 규격 시험법 제시가 시급하다.

황산동(cupric sulfate)은 대표적인 영양강화제로서 체내에 적혈구 내 헤모글로빈의 중심 원소인 철(Fe)의 흡수에 필수적인 구리(Cu)를 공급하는 역할을 수행한다. 또한, 식이 보충제로 사용될 때 높은 생체 이용률, 입증된 안전성 그리고 우수한 용해도를 나타내어 정확한 농도 조절이 가능하다는 장점을 가지고 있다(Miles 등, 1998). 따라서 황산동 내에 존재하는 미량의 불순물은 체내에 부정적인 영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라 식품의 품질과 맛에 영향을 미칠 수 있기 때문에 불순물을 검출하는 순도시험법은 필수적이다(Shuyuti 등, 2024).

현행 황산동의 순도시험법에서는 알칼리금속 및 알칼리토금속의 존재 여부를 확인하기 위해 시료 용액에 황화수소를 포화시키는 과정을 포함하고 있다. 이 과정에서 황화수소는 시료 내 반응성 금속 이온과 반응하여 침전을 형성하게 되며, 생성된 침전은 여과를 통해 제거된다(Smith와 Semon, 1924). 여과된 여액은 증발 및 건조 과정을 거친 후 강열되어 잔류물을 관찰함으로써, 알칼리금속 또는 알칼리토금속의 존재 여부를 간접적으로 판단하게 된다. 그러나 식품첨가물공전에 제시된 시험법에서는 황화수소의 포화 방법, 반응 시간 등에 대한 구체적인 지침이 부재하여, 실험의 재현성과 정밀도 확보에 한계가 존재한다. 특히 황화수소가 불완전하게 포화될 경우, 여과 과정에서 반응하지 않은 금속 이온이 남아 오차를 유발할 수 있다.

또한 황화수소는 다양한 조건에서 쉽게 발생시킬 수 있는 반면, 인체에 유해한 독성 가스로 잘 알려져 있어 실험 과정에서의 안전 확보가 무엇보다 중요하다(Jiang 등, 2016; Ng 등, 2019). 이에 본 연구에서는 황산동의 완전한 황화수소 포화와 실험자의 안전성을 동시에 확보하기 위해, 황화철과 묽은 염산의 반응을 통해 황화수소를 발생시키는 간단한 포화 장치를 설계하였다(Snell, 1930). 본 연구에서는 식품첨가물공전에 제시된 황산동의 순도시험법을 개선하고 검증하여, 황화철과 묽은 염산의 반응 비율에 대한 최적 조건을 제시하였다. 이를 통해 국내 기준 규격을 충족하는 결과를 도출하였으며, 연구 결과는 영양강화제로 사용되는 황산동의 품질관리와 더불어 황화수소의 안전성을 확보하는 데 기여할 것으로 사료된다.

재료 및 방법

실험 재료

본 연구에서 사용한 식품첨가물 등급의 황산동은 실험에 사용된 황산동($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)은 Jost Chemical Co.에서 제조된 고체 제형의 제품($\geq 100\%$)을, (주)이니시스아이앤씨를 통해 수입 및 구매하여 사용하였다. 제품 성적서를 통해 본 제품이 국내 식품첨가물공전에서 제시된 기준 및 규격에 적합한 제품임을 확인하였다. 요오드칼륨(99.5%), 치오시안산암모늄(99.5%)과 0.1 N 치오황산나트륨 용액, 그리고 전분(Extra Pure grade)은 Duksan에서 구매하여 사용하였다. 황화수소 반응에 필요한 묽은 염산의 경우 염산(35~37%)을 Duksan에서 구매하여 국내 식품첨가물공전에서 제시된 방법으로 제조하여 사용하였으며, 그 외에 실험에 필요한 황산($\geq 95\%$)과 초산($\geq 99.7\%$)은 Daejung, 황화철은 Junsei Chemical Co., Ltd.에서 구매하여 사용하였다.

영양강화제 황산동 정량시험

황산동의 함량 및 규격을 측정하기 위한 정량시험법은 국내 식품첨가물공전을 참고하였다(MFDS, 2024). 황산동 0.7 g을 칭량하여 공전 플라스크에 취하고 증류수 100 mL, 초산 2 mL, 요오드화 칼륨 5 g을 가하여 용해시킨 후, 즉시 밀전하여 5분간 암소 방치하였다. 이후 0.1 N 치오황산나트륨 용액으로 엷은 황색이 될 때까지 적정한다. 치오시안산암모늄 2 g 및 전분시액 3 mL를 첨가하고 다시 0.1 N 치오황산나트륨 용액으로 유백색이 될 때까지 적정하여 최종 소비량을 측정하였다. 또한 동일한 방법으로 공시험을 진행하여 종말점 기준을 보정하였다. 공전에서 제시된 계산식에 따라 식품첨가물 황산동($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)의 순수함량을 도출하였다.

영양강화제 황산동 순도시험

황산동의 순도시험법은 용상, 유리산, 비소, 납 그리고 알칼리금속 및 알칼리토금속 측정법을 포함하며, 해당 시험법 모두 식품첨가물공전에서 제시된 시험법을 따라 시행하였다(MFDS, 2024). 먼저 황산동의 용상을 확인하기 위해 황산동 1 g을 증류수 20 mL에 용해시킨 후 해당 시험용액의 탁도를 비교하였으며, 유리산 순도시험법은 황산동 1 g을 증류수 20 mL에 녹이고 메틸오렌지시액 2방울을 가한 후 시험용액의 색이 녹색으로 변화 여부를 측정하였다.

비소의 함량 측정을 위해 국내 식품첨가물공전에서 제시된 비소시험법 중 유도결합 플라즈마 발광광도법에 따라 시험하였다. 비소의 경우 황산동 0.25 g을 증류수 5 mL에 용해시키고 초산 2 mL 및 요오드화 칼륨 1.5 g을 가하여 5분간 방치한 후, L-아스코르빈산 0.2 g을 가하여 용해시킨 것을 시험용액으로 하였다. 본 시험용액과 공시험용액을 1:1 염산, 1.0% 수소화붕소나트륨 용액, 0.5% 수산화나트륨 용액과 함께 환원기화장치에 주입하였으며, 분석은 유도결합 플

라즈마 광방출 분광광도계(ICP-OES, iCAP 7400 Duo, Thermo Fisher Scientific)를 사용하였다. 분석 가스는 아르곤(Ar)을 사용하였고, 비소는 189 nm의 단파장에서 axial 관측 모드로 측정하였으며, 시료 주입은 ASX-520 autosampler(CETAC Technologies)를 이용하였다.

납의 함량 측정 또한 국내 식품첨가물공전에서 제시된 유도결합 플라즈마 발광광도법에 따라 시험하였다. 황산동 5 g을 도가니에 담아 건조 후 탄화시킨 다음 550°C에서 회화하였다. 이후 도가니에 존재하는 잔류물을 증류수로 적서준 다음 염산 4 mL를 가하여 용질이 굳어질 때까지 증발건고시켰다. 해당 도가니에 0.5 N 질산 용액을 가한 후 가온하면서 용해한 후, 추가로 질산 용액을 가하여 25 mL로 정용한 것을 시험용액으로 하였다. 본 시험용액을 1:1 염산, 1.0% 수소화붕소나트륨 용액 및 0.5% 수산화나트륨 용액과 함께 환원기화장치에 주입하고, ICP-OES를 이용하여 납의 흡광도 및 발광광도를 측정하였다. 분석 시 아르곤(Ar)을 분광 가스로 사용하였고, 납은 283 nm의 단파장에서 axial 관측 모드로 분석하였다. 시료 주입은 ASX-520 autosampler를 사용하여 수행하였다.

알칼리금속 및 알칼리토금속을 측정하기 위해서 황산동 6 g을 증류수 150 mL에 녹인 후 진한 황산 3 mL를 가하여 용해시킨 후 약 70°C로 가온하면서 황화철 5 g과 묽은 염산 250 mL를 반응시켜 발생하는 황화수소를 해당 시험 용액에 포화시켰다. 이후에 실온에서 식히고 증류수를 약 280 mL까지 첨가한 다음 여과지(5C 110 mm, ADVANTEC)를 깔 때기에 넣고 시험 용액을 여과하였다. 해당 여과액에 증류수를 가하여 300 mL로 정용하였으며, 그중 100 mL를 석영도가니에 취하여 수욕 상에서 용질이 굳어질 때까지 증발건고 하였다. 550°C에서 향량이 될 때까지 강열한 후 석영도가니의 무게를 측정하였다.

개선 사항 최적화 및 검증

황산동의 순도시험법 중 알칼리금속 및 알칼리토금속 측정 시험법 중 황화수소 포화 조건에 대한 구체적인 방법이 제시되어 있지 않아 황화수소 발생 조건의 최적화를 위해 황화철과 묽은 염산의 반응 비율을 증가시키면서(1:10, 1:

20, 1:30, 1:40, 1:50) 황화수소를 포화시켰다. 또한 도출된 최적 조건에 대한 일내분석(intra-day) 및 일간분석(inter-day)과 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)를 통한 재현성 및 정밀성을 확인하였다(Cho 등, 2024).

결과 및 고찰

황산동 정량시험

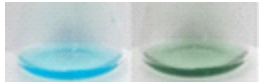
영양강화제 중 황산동의 정량시험법을 재현한 결과는 Table 1에 나타내었다. 식품첨가물은 과도하게 섭취할 경우 인체 건강에 잠재적인 위험을 유발할 수 있기 때문에 정확한 정량분석은 필수적으로 이루어져야 한다(Dönmez 등, 2020). 국내 식품첨가물공전에서 제시한 황산동의 규격은 황산동($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)으로서 98.5~104.5% 이내로 도출되는 것을 기준으로 하고 있다(MFDS, 2024). 본 실험에 사용한 황산동의 정량분석 결과 $98.92 \pm 0.1\%$ 로 모두 규격에 적합한 것으로 나타났다.

황산동 순도시험

황산동의 용상, 유리산, 비소, 납 그리고 알칼리금속 및 알칼리토금속에 대한 순도시험법 결과는 Table 1에 나타내었다. 용상은 물질이 용매 내에 고르게 섞여 있는 상태를 말한다. 국내 식품첨가물공전에서 제시된 시험법에 따라 황산동의 수용액 용상을 확인한 결과, ‘징명하다’는 결과에 부합하였다. 또한 황산동의 유리산 순도시험법을 진행한 결과, 해당 시험 용액의 색이 녹색으로 변하는 것을 확인하였다. 해당 순도시험법은 황산동의 수용액에 존재하는 유리된 산을 확인하기 위한 과정으로, 시험법에서 사용된 메틸오렌지는 보통 페놀프탈레인과 함께 수용액의 산-염기 상태를 나타내기 위해 주로 사용되는 지시약의 일종이다. 황산동은 수용액 상태에서 Cu^{2+} 으로 해리되면서 pH를 변화시키는 매개체를 제공하기 때문에, 수용액 내의 상태를 산성의 환경으로 유도하며, 이러한 조건에서 Cu^{2+} 과 메틸오렌지와의 복합체는 특정 파장에서 녹색을 띠게 된다(Noelle 등, 2019).

중금속은 우리의 식량 공급을 오염시키는 주요 요인 중 하나다(Mohammed 등, 2013). 중금속 과도 섭취로 인해 발

Table 1. Specification analysis of copper sulfate

Contents	Ministry of Food and Drug Safety specification	Results
Quantitative analysis (%)	98.5~104.5	98.92±0.1
Solution	Almost clear	Almost clear
Free acid	Green	
Purity analysis		
Arsenic (ppm)	≤4.0	Green
Lead (ppm)	≤10.0	ND ¹⁾
Alkali and alkaline earth metals (mg)	≤4.0	ND
		3.20±0.30

¹⁾ND: not detected.

생활 수 있는 심각한 문제 유발과 식품의 전반적인 가공 및 유통과정에서 검출될 시 추적이 어려워 중금속 검출을 위한 순도시험법은 현대 공중 보건에 반드시 필수적이다(Kwon 등, 2024). 따라서 국내 식품첨가물공전에서 제시된 유도결합 플라즈마 발광광도법을 참고하여 ICP-OES를 이용해 비소 및 납을 정량 분석한 결과 두 성분 모두 검출되지 않아 국내 식품첨가물공전에서 제시된 황산동의 규격에 부합하였다.

국내 식품첨가물공전에서 제시된 황산동의 알칼리금속 및 알칼리토금속 순도시험법에 따라 분석한 결과, 잔류물의 무게는 3.20 ± 0.30 mg으로 4 mg 이하의 기준을 만족하였다. 그러나 실험 과정 중 황화수소를 포화시키는 과정 및 조건이 정확하게 제시되어 있지 않아 해당 순도시험법의 부정확한 표현에 대하여 최적 조건을 제시하고자 하였다.

순도시험(알칼리금속 및 알칼리토금속)의 시험법 최적화 및 검증

황화수소는 발생시키기 위한 조건이 간단하며 비용이 저렴하고 물에 잘 용해되기 때문에 전반적인 연구에 널리 활용되고 있지만, 인체 내 독성이 보고되고 있어 실험자의 안전을 위해 정확한 제어가 필수적이다(Hong 등, 2020). 이를 고려하여 본 연구에서는 황화수소 발생을 위하여 기존에 일반적으로 사용되는 킵가스 장치를 참고하여 비교적 조작이 간편한 장치를 설계하였다(Fig. 1). 황화철과 묽은 염산의 반응으로 생성된 황화수소를 시험용액에 직접 통과시켜 충분히 포화시켰다. 그러나 국내 식품첨가물공전에서 제시된 시험법은 황화철과 묽은 염산의 정확한 반응 비율과 반응 시간이 제시되어 있지 않았고, 이에 따라 최적 반응 조건을 확인 및 제시하고자 하였다. 황화철과 묽은 염산의 반응 비율 범위를 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50으로 설정하여 순도시험법을 진행한 결과, 도출된 잔류물의 무게가 상이하게 도출되었다(Table 2). 황화수소의 포화 완료 여부는 반응기 내 황화철과 묽은 염산의 반응 시 발생하는 기포의 소멸과 침전 생성 여부를 기준으로 판단하였다. 반응을 30분 간격으로 관찰한 결과, 3시간 경과 시점부터 기포 발생이 정지되었고, 이후 반응액에서도 침전이 새롭게 형성되지 않는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 동일 조건에서 3회 반복 실험을 통해 재현되었으며, 이를 바탕으로 황화수소의 충분한 포화가 이루어진 것으로 판단하였다. 이에 따라 실험의 재현성을 확보할 수 있는 최적 반응시간을 3시간으로 설정하였다. 또한, 제시한 황화철과 묽은 염산의 반응 비율 중 1:50의 조건에서만 포화 및 여과 과정 후에 시험 용액의 색이 투명하게 나타났다. 이는 황화수소에 의해 Cu^{2+} 를 완전히 침전시켰음을 나타낸다(Table 2). 황산동은 황산과 가온 과정에 의해 분해되고 황화수소가 수용액 내에서 분해된 Cu^{2+} 과 결합하여 불용성 고체인 황화구리를 형성해 침전된다(Hong 등, 2020; ter Maat 등, 2007). 침전물은 여과되었으며, 여과되지 않은 미량의 불순물은 증발건고 및 강열 후 도가니 내에

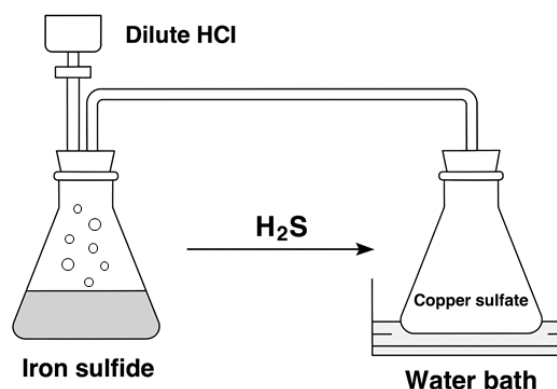


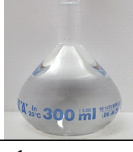
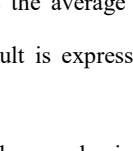
Fig. 1. Schematic diagram of hydrogen sulfide generation apparatus. In the left flask, hydrogen sulfide (H_2S) gas is generated through the reaction between iron sulfide (FeS) and dilute hydrochloric acid (HCl). The dilute HCl is introduced via a valve that allows precise control of both the flow rate and volume, while also preventing backflow of the generated gas. The resulting H_2S gas is delivered through a sealed pathway into a copper sulfate (CuSO_4) solution contained in the right flask, which is immersed in a water bath to maintain a constant temperature. This apparatus is designed to ensure experimental reproducibility and accuracy.

서 검출되었다. 해당 시험법 결과의 재현성을 확인하기 위해 진행한 일내분석 및 일간분석 결과는 각각 3.04 ± 0.28 mg과 2.78 ± 0.51 mg으로, 기준 규격인 4 mg 이하로 검출되었고, 1:50의 반응 조건에서 진행한 모든 결과값의 RSD 값은 20% 이하로 도출되었다(Table 2). 결과적으로, 본 연구에서 제시한 황화수소 발생 최적 조건은 황산동의 알칼리금속 및 알칼리토금속 불순물 검출을 위한 순도시험법의 재현성 및 신뢰성을 확보하는 동시에 연구자의 안전을 고려한 실험 환경을 조성하는 데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

요 약

전 세계적으로 현대 식품산업에 널리 이용되고 있는 식품첨가물의 안전한 사용과 관리를 위해 식품첨가물의 기준과 규격을 지속적으로 제시하고 있으며, 이에 대한 식품첨가물 시험법도 꾸준히 개선되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 식품의약품안전처에서 지정한 영양강화제 중 황산동의 시험법을 개선 및 검증하고자 하였다. 본 연구에서는 킵가스 장치를 참고하여 간편하게 조작할 수 있는 황화수소 포화 장치를 고안하였으며, 황화수소 발생을 위한 황화철과 묽은 염산의 최적 비율(1:50) 및 반응시간(3시간)을 제시하였다. 또한 식품첨가물공전 함량 규격에 만족할 뿐만 아니라 높은 재현성 및 정밀성을 나타내었다. 따라서 알칼리금속 및 알칼리토금속 순도시험법의 황화수소 포화 조건, 방법에 대한 실험기구 및 황화수소 발생 조건에 대해 제시함으로써 직관적인 실험방법 제시를 통해 시험법의 범용성 및 안전성과 영양강화제로서 황산동의 기준규격 관리 효율을 증진시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2. Alkali and alkaline earth metals content according to the ratio of iron sulfide and diluted hydrogen chloride

Ministry of Food and Drug Safety specification (mg)	Reaction ratio of iron sulfide to diluted HCl (w/v%)		Residue (mean±SD, mg)	Relative standard deviation (%)	Solution
≤4.0	1:10	Intra-day ¹⁾	730.38±225.03	30.81	
	1:20	Intra-day	699.86±80.96	11.57	
	1:30	Intra-day	364.09±55.22	15.17	
	1:40	Intra-day	69.33±23.84	34.38	
	1:50	Intra-day	3.04±0.28	9.21	
		Inter-day ²⁾	2.78±0.51	18.35	

¹⁾Intra-day: repeated measurements three times within the same day to assess precision; the result is expressed as the average of the three measurements.

²⁾Inter-day: measurements performed once per day over three consecutive days to evaluate reproducibility; the result is expressed as the average across the three days.

감사의 글

본 논문은 2024년도 MFDS의 연구개발비(24192첨포안 041)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Cho GH, Im JH, Song C, et al. A study on the improvement and validation of analytical methods for food additives (fortifying nutrient) in Korean foods. *Food Sci Ind.* 2024. 57:320-331.
- Choi SH. Evaluation of food additive intake. *Food Sci Ind.* 2016. 49(1):38-47.
- Dönmez ÖA, Dinç-Zor Ş, Aşçı B, et al. Quantitative analysis of food additives in a beverage using high performance liquid chromatography and diode array detection coupled with chemometrics. *J AOAC Int.* 2020. 103:779-783.
- Hong T, Wei Y, Li L, et al. An investigation into the precipitation of copper sulfide from acidic sulfate solutions. *Hydrometallurgy.* 2020. 192:105288. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105288>
- Im JH, Cho GH, Song C, et al. Current permitted and research status of food additives (fortifying nutrient) in the inside and outside of the country. *Food Sci Ind.* 2024. 57:217-226.
- Jiang J, Chan A, Ali S, et al. Hydrogen sulfide – mechanisms of toxicity and development of an antidote. *Sci Rep.* 2016. 6:20831. <https://doi.org/10.1038/srep20831>
- Jung KH. Research directions for food additives safety. *J Food Hyg Saf.* 2009. 24:398-407.
- Kwon SY, Kim YI, Kim YK, et al. Microwave-assisted sample preparation for screening of heavy metal elements in food additives by ICP-MS. *LWT.* 2024. 208:116708. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116708>
- Kwon YK, Choi JD, Kim MS, et al. Management on standards and specifications for food additives. *Food Sci Ind.* 2007. 40(4):55-60.
- MFDS. Food additives code. 2024 [cited 2024 Nov 27]. Ministry of Food and Drug Safety. Available from: <https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#!/ext/Document/FA>
- MFDS. Production of food and food additives. 2016 [cited 2024 Nov 27]. Ministry of Food and Drug Safety. Available from: https://www.mfds.go.kr/brd/m_374/view.do?seq=29357&srchFr=&srchTo=&srchWord=%EC%B2%A8%EA%B0%80%EB%AC%BC&srchTp=0&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&Data_stts_gubun=C9999&page=1
- Miles RD, O'Keefe SF, Henry PR, et al. The effect of dietary supplementation with copper sulfate or tribasic copper chloride on broiler performance, relative copper bioavailability, and dietary prooxidant activity. *Poult Sci.* 1998. 77:416-425.

- Mohammed TY, Elbadry BEEM, Amin AS, et al. Determinations of revelant impurities in copper and sulphur compounds used as pesticides. *International Journal of Academic Research Part A*. 2013. 5:127-138.
- Ng PC, Hendry-Hofer TB, Witeof AE, et al. Hydrogen sulfide toxicity: Mechanism of action, clinical presentation, and countermeasure development. *J Med Toxicol*. 2019. 15:287-294.
- Noelle MK, Francesca DA, Simon BG, et al. Image-based detection of copper using methyl orange-zeolite. *Res J Chem Environ*. 2019. 23(5):16-22.
- Shi B, Wang H, Nawaz A, et al. Dual functional roles of nutritional additives in nutritional fortification and safety of thermally processed food: Potential, limitations, and perspectives. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2024. 23:e13268. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13268>
- Shuyuti NASA, Salami E, Dahari M, et al. Application of artificial intelligence in particle and impurity detection and removal: A survey. *IEEE Access*. 2024. 12:31498-31514.
- Smith GMcP, Semon WL. The mechanism of the precipitation of metals by hydrogen sulfide. A study of certain sulfur complexes of mercury. *J Am Chem Soc*. 1924. 46:1325-1343.
- Snell FD. Generation of hydrogen sulfide. *J Chem Educ*. 1930. 7:1901. <https://doi.org/10.1021/ed007p1901>
- ter Maat H, Al-Tarazi M, Hogendoorn JA, et al. Theoretical and experimental study of the absorption rate of H₂S in CuSO₄ solutions: The effect of enhancement of mass transfer by a precipitation reaction. *Chem Eng Res Des*. 2007. 85:100-108.
- Wu L, Zhang C, Long Y, et al. Food additives: From functions to analytical methods. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2022. 62: 8497-8517.