

장석 기반 글루프 유약의 특성 연구

- 용제 조성 변화에 따른 유동 거리 분석을 중심으로 -

Characteristics of Feldspar-Based Gloop Glazes

- Focusing on the Analysis of Flow Distance According to Flux Composition -

황 세 훈 Hwang, Se-hoon

김 대 용 kim, Dae-yong

서울과학기술대학교 Seoul National University of Science and Technology

투 고 일	2026. 02. 19
심사(수정)일	2026. 03. 09
게재 확정일	2026. 03. 09

장석 기반 글루프 유약의 특성 연구

- 용제 조성 변화에 따른 유동 거리 분석을 중심으로 -

Characteristics of Feldspar-Based Gloop Glazes

- Focusing on the Analysis of Flow Distance According to Flux Composition -

황 세 훈 Hwang, Se-hoon*

김 대 용 Kim, Dae-yong**

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적
2. 연구 범위 및 방법

II. 이론적 고찰

1. 글루프 유약의 정의
2. 장석의 화학적 특성과 역할
3. 프리트의 화학적 특성과 역할

III. 연구 및 결과

1. 실험 재료
2. 실험 방법
3. 실험 설계
4. 실험 결과 및 분석

IV. 결론

□ 참고문헌

Abstract

This study systematically analyzed the melting characteristics of feldspars and the effects of frit addition to control the fluidity of gloop glazes, employed for three-dimensional surface expression in contemporary ceramics. Various feldspars were classified into soda-based and potash-based groups according to their chemical composition, and their melting behaviors were quantitatively evaluated through inclined flow tests with stepwise frit additions.

The experimental results showed that soda-based feldspars exhibited significant fluidity with

* 서울과학기술대학교 일반대학원 도예학과 박사과정

** 서울과학기술대학교 도예학과 교수, 교신저자(dky@seoultech.ac.kr)

small amounts of frit, while potash-based feldspars required higher frit contents to achieve comparable flow. These differences were attributed to the types and proportions of alkali components in the feldspars. Additional experiments using alternative fluxes, including limestone and Ferro Frit 3134, confirmed that effective melting characteristics could be achieved with lower addition levels than the primary flux (Ferro Frit 3124).

This study provides quantitative data for feldspar selection and determining appropriate frit addition levels in gloop glaze production, thereby offering practical guidelines that help potters select suitable materials and compositions for desired flow effects.

본 연구는 현대 도예에서 입체적 표현 기법으로 활용되는 글루프 유약의 유동성 제어를 위해 장석의 용융 특성과 프리트 첨가 효과를 체계적으로 분석하였다. 다양한 장석을 화학 조성에 따라 소다계와 칼리계로 분류하고, 각각에 프리트를 단계별로 첨가하여 경사면 흐름 테스트를 통해 유동 거리를 정량적으로 측정하였다.

실험 결과, 소다계 장석은 적은 양의 프리트로도 뚜렷한 유동성을 보인 반면, 칼리계 장석은 더 높은 프리트 함량에서 유의미한 유동성을 나타냈다. 이러한 차이는 장석의 알칼리 성분 종류와 함량에 기인하는 것으로 분석되었다. 석회석과 페로 프리트 3134를 대체 용제로 활용한 추가 실험에서는 페로 프리트 3124보다 적은 첨가량으로도 효과적인 용융 특성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 글루프 유약 제작 시 장석 선택과 프리트 첨가량 결정에 필요한 정량적 데이터를 제공함으로써, 도예가들이 원하는 흐름 효과에 따라 적절한 재료와 조성비를 선택하는 데 실용적 지침을 마련했다는 점에서 의의가 있다.

Key-words 글루프 유약 Gloop Glaze, 장석 Feldspar, 용제 Flux, 유동 거리 Flow Distance

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

현대 도예에서 유약은 더 이상 단순한 표면 장식의 개념을 넘어 입체적 표현의 핵심 도구로 자리잡고 있다. 전통적으로 유약의 결함으로 간주되던 크롤링(crawling)이나 기포, 유약의 흘러내림 등은 과거 기능성 도자기에서 지양되었으나, 21세기 현대 도예에서는 이러한 현상을 의도적으로

활용하여 독창적인 질감 표현의 수단으로 재해석하고 있다.²⁾

글루프 유약(gloop glaze)은 이러한 현대 도예의 새로운 미학을 대표하는 기법이다. (그림 1)과 같이 점성이 높은 유약이 소성 과정에서 중력의 영향을 받아 흘러내리면서 독특한 질감과 형태를 만들어낸다.⁴⁾ ‘글루프 유약’이라는 명칭은 현재까지 학술적으로 엄밀히 정립된 용어라기보다는, 주로 영미권 도예 작가 커뮤니티와 상업 유약 시장에서 통용되는 실무적 명칭이다. 이 용어는 점도 높은 액체의 끈적이는 움직임을 나타내는 영어 의성어 ‘gloop’에서 유래했으며, 소성 중 유약이 용융되어 흘러내리는 물성을 직관적으로 반영한 것이다. 본 연구에서는 글루프 유약을 ‘장석질 원료를 주성분으로 하여, 소성 과정에서 높은 점도를 유지하며 용융 및 유동함으로써 입체적 질감과 흐름의 흔적을 의도적으로 생성하는 유약 기법’으로 정의한다.⁵⁾

글루프 유약의 기법적 기원은 일본 시노(志野) 유약의 전통에서 찾을 수 있다. 아라카와 토요조(荒川豊蔵, 1894~1985)는 장석질 유약을 두껍게 시유하여 유백색의 불투명한 유리질과 불균일한 표면 질감, 부분적 균열과 화색(火色)을 특징으로 하는 모모야마(桃山) 시대 시노유를 현대에 재현한 작가이다(그림 2). 이러한 시노유의 특성—두꺼운 장석질 유약층, 높은 점도, 의도적 흐름—은 오늘날 글루프 유약의 기술적 토대와 맞닿아 있다. 타쿠로 쿠와타(桑田卓郎, 1981~)는 아라카와의 시노유에서 영감을 받아, 균열과 크롤링 효과를 활용한 매화피(梅花皮), 즉 카이라기 기법(かいらぎ)을 현대적으로 재해석하였다(그림 1).⁶⁾ 유약이 덩어리지거나 끈적하게 흘러내리는 이러한



(그림 1) 타쿠로 쿠와타(桑田卓郎), <Bowl>, 2014, porcelain, glaze, pigment, steel. h.30.0 × w.39.0 × d.38.0 cm.¹⁾



(그림 2) 아라카와 토요조(荒川豊蔵), <Tea bowl, "Kooriume", shino type>, 1970, stoneware. National Crafts Museum, Kanazawa, Japan.³⁾

1) Takuro Kuwata (2026,03,20). Takuro Kuwata Official Website [웹사이트].

<http://www.takurokuwata.com/>

2) Frolova, N. (2021). *A question of mastery: Defects and layers*. (Master's thesis). Nova University Lisbon, Lisbon, Portugal. 16.

3) National Crafts Museum (2026,03,20). Collection [웹사이트].

<https://www.momat.go.jp/craft-museum/en/collection/cr0760>

4) Wizard Glaze (2025,03,25). How to apply gloop glaze [인터넷 블로그].

<https://wizardglaze.com/blogs/wizard-glaze/how-to-apply-gloop-glaze>.

5) 본 연구의 핵심 개념에 대해서는 다음과 같은 용어를 사용한다. ‘유동성(fluidity)’은 유약이 소성 과정에서 용융되어 흐르는 정도를 측정하는 개념으로 사용하며, ‘유동 거리(flow distance)’는 경사면 흐름 테스트(Inclined Plane Flow Test)에서 측정된 정량적 수치를 지칭한다. ‘용융 특성(melting characteristics)’은 장석 및 용제의 화학적 조성에 따른 용융 온도, 점도, 유리질 형성 등을 포괄하는 상위 개념으로 사용한다.

6) Clark, G. (2025,03,27). POV | Garth Clark's open letter to Takuro Kuwata. Cfileonline.

<https://cfileonline.org/pov-garth-clarks-open-letter-to-takuro-kuwata/>

표현은 주로 장석 함량이 높은 유약의 물리적 특성에서 비롯된다. 높은 점도로 인해 발생하는 균열과 크롤링은 조성비를 조절함으로써 제어가 가능하며, 이를 통해 작가의 의도에 따른 다양한 시각적 효과를 구현할 수 있다.⁷⁾

본 연구는 장석을 주성분으로 하는 글루프 유약의 조성비 변화가 용융 정도와 흐름에 미치는 영향을 분석하고, 이를 시각적 표현 기법으로 활용하기 위한 기초 자료를 마련하는 데 목적이 있다. 구체적으로는 서로 다른 종류의 장석과 용제인 페로 프리트 3124(Ferro Frit 3124)의 조합에 따른 용융도와 유동 거리를 관찰하고자 한다. 이 연구는 비교적 단순한 조성으로도 글루프 효과를 재현할 수 있는 유약 설계 및 개발에 실질적인 가이드라인을 제공하여, 장석계 글루프 유약 개발에 기여할 것으로 기대된다.

2. 연구 범위 및 방법

본 연구는 현대 도예의 글루프 유약 기법 연구를 위해 국내외에서 공급되는 7종의 장석 및 장석계 광물을 실험 대상으로 선정하였다. 이들은 화학적 조성에 따라 나트륨 함량이 높은 소다계 장석과 칼륨 함량이 높은 칼리계 장석으로 분류하였다. 네펀린 사이나이트(Nepheline syenite)는 실리카 함량과 용점이 낮은 하석 섬장암으로, 용융 특성이 소다 장석과 유사하여 소다계 군으로 취급하였다. 부여장석은 화학 조성상 소다계에 속하지만, 나트륨과 칼륨의 함량 차이가 크지 않고 높은 실리카 함량으로 인해 칼리계와 유사한 용융 특성을 보여, 실험에서는 칼리계와 동일한 조건을 적용하였다.

장석과 용제의 상호작용이 유약의 용융성에 미치는 영향을 분석하기 위해, 용제인 페로 프리트 3124를 단계별로 첨가하였다. 소다계 장석에는 3%, 6%, 9%를, 상대적으로 용점이 높은 칼리계 장석에는 3%, 6%, 9%, 12%, 15%를 각각 첨가하여 비교 분석하였다. 또한 일부 실험군에서는 페로 프리트 3134(Ferro Frit 3134)와 석회석을 대체 용제로 사용하여 다양한 용융 특성을 관찰하였다. 유약의 균열 제어를 위해서는 리튬-알루미늄 규산염 광물인 페탈라이트를 6% 치환하여, 유동성과 균열 패턴의 변화를 평가하였다.⁸⁾

유약의 유동성을 정량적으로 평가하기 위해 70° 경사면 흐름 테스트를 고안하여 적용하였다. Xiu는 동일 유약을 15°에서 75°까지 다섯 단계의 경사각에서 소성한 결과, 경사각과 유동 거리 사이에 양의 상관관계가 나타남을 보고하였다.⁹⁾ 본 연구에서는 이러한 경향을 고려하여, 높은 경

7) 이지숙 (2020). 장석을 이용한 시노유 개발 연구. 석사학위논문. 명지대학교 산업대학원. 17.

8) Digitalfire (2025,03,25). Petalite [인터넷 블로그]. <https://digitalfire.com/material/petalite>

9) Xiu, Y. (2023). Design and development of ceramic glaze flow tester with adjustable tilt angle. *Journal of Ceramic Processing Research*, 24(5), 868-873.

사각이 조성 간 유동 거리 차이를 관찰하는 데 유리하다고 판단하였다. 다만 75° 이상에서는 유약이 경사면을 이탈할 가능성이 있으므로, 충분한 유동성을 확보하면서도 안정적으로 관찰할 수 있는 70°를 경사각으로 설정하였다. 각 조성의 유약을 15g 정육면체 시편으로 제작하고, 1250°C에서 20분간 소성한 후 경사면을 따라 흘러내린 거리를 측정하였다. 실험의 구체적 조건은 III장에서 상세히 기술한다.

다만 본 연구는 장식과 용제의 화학적 조성 변화가 유동성에 미치는 영향을 탐색하는 데 초점을 맞추었으므로, 소성 온도는 1250°C 단일 조건으로 한정하였다. 또한 각 조성별 시편은 단일 시편으로 제작하여 측정하였기에, 동일 조성에 대한 반복 실험을 통한 통계적 재현성 검증은 후속 연구의 과제로 남겨두었다. 유약 표면의 광택도와 백색도에 대해서는 정밀 측정 장비의 제약으로 인해 시각적 비교 평가에 의존하였으며, 정량적 측정은 향후 연구에서 보완할 필요가 있다.

II. 이론적 고찰

1. 글루프 유약의 정의

글루프 유약은 현대 도예에서 주목받는 입체적 표현 기법으로, 두껍고 점도 높은 유약층이 소성 중 용융되어 흐르거나 방울 맺히는 현상을 시각적 요소로 활용한다. 일반 유약이 소성 시 얇고 평탄한 유리질 막을 형성하는 것과 달리, 글루프 유약은 점성 높은 물질이 녹아내리듯 흘러 굽은 방울이나 입체적 능선 형태의 특징적 질감을 만들어낸다.¹⁰⁾

Frolova에 따르면, 글루프 유약은 유약과 점토 사이의 중간 단계에 위치하며 소성 온도, 시간, 유약 두께, 소지 특성 등이 흐름의 정도를 결정한다.¹¹⁾ 이러한 조

건의 조합에 따라 글루프 유약은 (그림 3)과 같이 유약 자체의 흐름을 조형 요소로 활용하거나, 크롤링에 의한 균열 패턴을 의도적으로 형성하는 등 다양한 방식으로 표현된다.

현대 도예 영역에서는 타쿠로 쿠와타 외에도 다양한 작가들이 글루프 유약의 가능성을 탐구하고 있으며, 이들의 작업 방식을 분석하면 유동 흐름(flow drip)형, 적층 질감(layered texture)형, 균열



(그림 3) 황세훈, <잔향(殘香)>, 2024, 내화물, 글루프 유약, 구아이악 우드 오일, h.50.0 × w.40.0 × d.40.0 cm

10) Wizard Glaze. op. cit.

11) Frolova, N. op. cit., 62.

패턴(crawling pattern)형의 세 가지 기법적 유형으로 분류할 수 있다.¹²⁾ 이러한 유형은 상호 배타적이지 않으며, 유동성, 점도, 도포 두께, 소성 조건의 조합에 따라 복합적으로 나타난다.

이처럼 글루프 유약은 기법적 유형에 관계없이 두꺼운 유약층, 높은 점도, 의도적 흐름 제어라는 세 가지 핵심 특성을 공유하며, 이는 곧 장식질 유약의 물리적 특성과 밀접하게 연관된다.

2. 장식의 화학적 특성과 역할

장석(feldspar)은 지각에 가장 풍부한 광물 중 하나로, 전체 지각 구성의 약 60%를 차지한다.¹³⁾ 그 자체로 고온에서 용융되어 유리질을 형성하는 성질로 인해, 약 1300°C의 온도에서 단독으로 녹아 유약과 같은 유리질 막을 형성할 수 있다.¹⁴⁾ 그렇기에 Daniel Rhodes은 장석을 "그 자체로 천연 유약이며, 규사와 알루미늄을 함유한 용제(Flux)와 필요한 알칼리가 결합된 형태"로서 고온 소성 시 유약 역할을 한다고 표현하였다.¹⁵⁾

화학적으로 장석은 (K, Na, Ca)(AlSi₃O₈)의 조성 범위를 갖는 테크토실리케이트 구조의 광물로, 함유된 알칼리 성분에 따라 칼륨 함량이 높은 칼리장석과 나트륨 함량이 높은 소다장석으로 구분된다. 자연 상태에서는 성분이 혼합된 형태로 산출되며, 이 혼합 비율에 따라 분류된다.

장석의 가장 중요한 특성은 다른 세라믹 원료의 용융점을 현저히 낮추는 강력한 용제 작용이다. 예를 들어, 순수한 고령토의 용융점은 1800°C 이상이지만, 장석과 혼합하면 약 1280°C에서 용융이 시작된다.¹⁶⁾ 이는 장석에 포함된 알칼리 산화물(K₂O, Na₂O 등)이 규산 구조의 결합을 약화시켜 용융을 촉진하기 때문이다. 장석은 경제성과 안전성이 뛰어나며 다양한 온도 범위에서 활용 가능하기에 도예 분야에서 이상적인 용제로 평가받는다.¹⁷⁾

장석의 용융 특성은 그 종류에 따라 차이를 보인다. 칼리 장석은 약 1200°C에서 백유석(leucite)으로 분해되기 시작하여 1320~1370°C에서 완전 용융되며, 특징적인 우윳빛 유리질을 형성한다. 반면 소다장석은 분해 과정 없이 약 1200°C 이하에서 투명한 유리질로 용융된다.¹⁸⁾ 이러한 차이는 유약 설계 시 중요한 고려사항이 되며, 많은 도예가들이 두 종류의 장석을 혼합하여 넓은 온도 범위에서 안정적인 용융 특성을 얻고자 한다.

이러한 용융 과정에서 장석은 유약 내에서 복합적인 역할을 수행한다. SiO₂와 Al₂O₃를 공급하

12) 유동 흐름형의 대표적 작가로는 브라이언 기니에프스키(Brian Giniewski), 적층 질감형으로는 브라이언 로셰포트(Brian Rochefort), 균열 패턴형으로는 타쿠로 쿠와타의 카이라기 기법이 있다.

13) 이병하 (2014). *나만의 유약 만들기-종합편*. 서울: 예경. 43.

14) Rhodes, D. (2023). *도예가를 위한 점토와 유약 (이부연 외 역)*. 서울: 한양대학교출판부. (원저 1957). 48.

15) *ibid.*, 223.

16) 이병하. *op. cit.*, 45.

17) Rhodes, D. *op. cit.*, 72.

18) 이병하. *op. cit.*, 43.

여 유리질 구조를 형성하고, 알칼리 산화물로 용융 온도를 낮추며, Al_2O_3 로 점도를 조절하는 역할을 한다.¹⁹⁾ 다만 장식만으로 제조된 유약은 점도가 낮아 흘러내리기 쉬워 고령토나 점토를 첨가하여 알루미늄 함량을 높이고 유동성을 조절하는 것이 일반적이다.²⁰⁾ 고온(약 1180°C)에서 가스를 방출해 유약 내 기포를 형성할 수 있으며, 장식 함량이 높은 유약은 냉각 시 균열이 발생하기 쉽다는 기술적 과제가 있다.²¹⁾

이상의 특성을 종합하면, 장식은 유약의 기본 구조와 용융을 담당하는 핵심 원료이지만 글루프 유약에서 요구되는 점성 있는 흐름과 정밀한 점도 제어를 장식 단독으로 달성하기에는 한계가 있다. 따라서 장식의 용융 특성을 보완하고 유약의 화학적 안정성을 강화할 수 있는 프리트(frit)에 대한 이해가 필요하다.

3. 프리트의 화학적 특성과 역할

프리트는 유약의 주성분으로 사용되는 용융점이 낮은 일종의 인공 유리질 재료로, 규산화합물과 붕산화합물 등의 원료를 특정 비율로 배합하여 1100~1300°C에서 가열 용융한 후 급냉하여 분쇄한 것이다.²²⁾ 본질적으로 미리 용융된 유리라 할 수 있으며, 이 프리트화 과정을 통해 원래의 개별 원료들이 화학적으로 결합된 새로운 단일 물질로 변환된다.²³⁾

프리트는 유약이 상대적으로 낮은 온도에서도 충분히 용융될 수 있도록 하는 데 탁월한 효과를 보인다. 예를 들어 콘 10(1300°C)에서 용융하는 유약 조성에서 약 25%를 프리트로 대체하면, 콘 6(1200°C)의 낮은 온도에서도 동등한 수준의 용융도를 달성할 수 있다.²⁴⁾ 이는 프리트가 이미 용융된 상태로 제조되었기 때문에 재용융이 용이하며, 이를 통해 전체 유약 시스템의 용융 온도를 효과적으로 낮출 수 있기 때문이다.

이러한 프리트 중 현대 도예 분야에서 널리 활용되는 제품들은 대부분 환경 및 건강상의 이유로 납을 포함하지 않는 보로실리케이트 유리 조성을 기반으로 한다. 대표적인 예로 페로 프리트 3124는 납이 없는 고칼슘-보로실리케이트 프리트로, CaO ~14%, Na_2O ~6%, B_2O_3 14%, Al_2O_3 10%, SiO_2 55%(중량 기준) 정도의 균형잡힌 화학 조성을 지닌다. 이 프리트는 1250°C 범위에서 적합한 용융 특성을 보여 도예계에서 널리 사용되고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 프리트는 장식 단독으로는 달성하기 어려운 글루프 유약의 용융성

19) 정동훈 (2011). 도예가를 위한 유약연구. 파주: 한국학술정보, 17.

20) 이병하. op. cit., 77.

21) ibid. 47.

22) 한두희, 이정화 (2002). 프리트, 점토, 및 안료의 혼합에 따른 법랑 색상 에 관한 연구. *한국산학기술학회논문지*, 3(2), 101.

23) Digitalfire (2025,03,25). Frit [인터넷 블로그]. <https://digitalfire.com/glossary/frit>

24) Digitalfire (2025,03,25). Ferro Frit 3124 [인터넷 블로그]. <https://digitalfire.com/material/ferro+frit+3124>

과 점도 제어를 보완하는 핵심 재료로 기능한다. 따라서 Ⅲ장에서는 이러한 장석과 프리트의 조합이 실제 유동성에 어떠한 영향을 미치는지를 실험을 통해 체계적으로 검증한다.

Ⅲ. 연구 및 결과

본 장에서는 글루프 유약의 유동성을 제어하기 위한 연구 과정 및 결과를 단계별로 제시한다. 먼저 실험에 사용된 재료와 유약의 유동성을 평가하는 방법을 설명하고, 초기 탐색 연구를 통해 파악된 유동성과 조성 간의 관계가 본 실험 설계에 어떻게 적용되었는지 밝힌다. 마지막으로 장석 및 프리트 조합 실험의 구체적인 조성과 그 결과를 제시하고 분석한다.

1. 실험 재료

본 연구에서는 글루프 유약의 유동성 및 용융 특성을 체계적으로 평가하기 위해 국내외에서 수급 가능한 장석 및 장석계 광물을 주요 실험 재료로 선정하였다. 이들 장석은 화학적 조성 중 알칼리 성분에 따라 나트륨 함량이 높은 소다계 장석과 칼륨 함량이 높은 칼리계 장석으로 분류하였다.²⁵⁾

〈표 1〉 장석 7종 성분 분석표(단위: wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	LOI
인도소다	69.5	18.5	11	0.5	-	-	-	0.09	-
민스파 200	68.6	18.5	6.5	4.1	1.5	-	-	-	-
네플린 사이나이트	60.4	24.5	10.1	5.1	-	-	-	-	-
부여	75.9	14.3	5.22	4.1	0.32	-	-	0.13	0.03
인도칼리	68.2	18.5	3.0	10.2	-	-	-	0.08	0.1
커스터	68.5	17.5	3.0	10.4	1.5	-	-	-	-
G-200	67.5	18.5	3.25	9.4	1.15	-	-	0.09	0.12

소다계로는 인도소다, 민스파 200, 부여소다를 선정하였다. 네플린 사이나이트는 실리카 함량과 융점이 낮은 하석 섬장암으로, 용융 특성이 소다 장석과 유사하여 소다계 군으로 취급하였다. 부여 장석은 소다 장석계이지만 몰 비례 상 나트륨과 칼륨의 함량 비율 차이가 크지 않고, 높은 실리카 함량으로 인해 칼리계와 비슷한 용융 정도를 보이므로 칼리계 조성비로 실험을 진행하였다.

칼리계로는 인도칼리, 커스터, G-200을 선정하였으며, 이들은 높은 칼륨 함량으로 인해 소다계

25) 모든 원료의 화학적 조성 데이터는 공급업체 또는 제조사의 성분 분석표를 기반으로 하였으며, 공급업체 자료가 불완전한 경우(페로 프리트의 CaO 누락 등)에는 제조사 원본 데이터를 참조하였다. 석회석과 페달라이트는 동일 산지 원료의 일반적인 성분 분석 데이터를 기준으로 사용하였다.

장석보다 용융점이 높은 특성을 보인다.

〈표 2〉 장석 7종 몰 퍼센트(mol%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
인도소다	76.02	11.93	11.66	0.35	0	0	0	0.04
민스파 200	76.24	12.11	7.00	2.90	1.79	0	0	0
네펴린 사이나이트	68.75	16.44	11.15	3.70	0	0	0	0
부여	82.15	9.12	5.48	2.83	0.37	0	0	0.05
인도칼리	77.02	12.31	3.28	7.35	0	0	0	0.03
커스터	76.14	11.46	3.23	7.37	1.79	0	0	0
G-200	76.00	12.27	3.55	6.75	1.39	0	0	0.04

용제로는 II장에서 논의한 페로 프리트 3124를 기본 재료로 선정하였다. 〈표 3〉에 제시된 바와 같이, 이 프리트는 CaO, Na₂O, B₂O₃, Al₂O₃, SiO₂가 균형 있게 구성되어 다양한 장석과의 호환성이 우수할 것으로 판단되었다.

〈표 3〉 용제 4종 성분 분석표 (단위: wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	B ₂ O ₃	Li ₂ O	Fe ₂ O ₃	LOI
페로 프리트 3124	54.9	10.0	6.4	0.7	14.3	13.7	-	-	-
페로 프리트 3134	46.6	2.0	10.1	-	19.5	22.8	-	-	-
석회석	0.2	1.0	-	-	54	-	-	1.0	43.8
페탈라이트	78.5	16.5	-	-	-	-	4.5	-	-

〈표 4〉 용제 4종 몰 퍼센트 (단위: mol%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	B ₂ O ₃	Li ₂ O	Fe ₂ O ₃
페로 프리트 3124	58.04	6.22	6.55	0.47	16.19	12.49	0	0
페로 프리트 3134	47.48	1.20	9.98	0	21.29	20.05	0	0
석회석	0.33	0.99	0	0	98.02	0	0	0.63
페탈라이트	80.76	9.99	0	0	0	0	9.30	0

일부 실험군에서는 비교 분석을 위해 페로 프리트 3134와 석회석을 대체 용제로 사용하였다. 페로 프리트 3134는 페로 프리트 3124보다 알루미늄 함량이 낮고 붕산과 소다 함량이 높아 더 낮은 온도에서도 우수한 용융 특성을 나타낸다(표 4). 석회석은 CaO 함량이 매우 높아 소량만으로도 유약의 용융 특성을 변화시킬 수 있는 재료로 선정하였다.

또한, 유약의 열팽창계수를 낮춰 균열을 감소시키는 리튬(Li₂O, 4.5%)의 화학적 특성에 주목하여 페탈라이트를 일부 실험군에 첨가하였다.

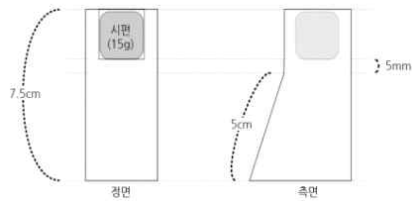
끝으로 유약의 작업성 향상을 위해 모든 실험 조성에 CMC를 0.15% 첨가하였다.²⁶⁾

26) CMC(Carboxymethyl cellulose)는 유약 슬립의 점도와 부착력을 높여 성형 시 안정적인 형태 유지를 돕는 증점제이다.

2. 실험 방법

장석과 용제의 화학적 조성이 유약의 용융성에 미치는 영향을 분석하기 위해 용제인 페로 프리트 3124를 차등적으로 적용하였다. 부여장석을 제외한 소다 장석계에는 3%, 6%, 9%의 비율로 프리트를 첨가하였으며, 용융점이 상대적으로 높은 부여장석과 칼리 장석계에는 추가적으로 12%, 15%의 비율을 적용하여 비교 분석하였다. 특정 페로 프리트 3124 실험군에서는 대신 석회석과 페로 프리트 3134를 대체 용제로 사용하여 유약의 용융 특성 변화를 관찰하였다.

이상의 조성에 따른 유동 특성을 정량적으로 평가하기 위해 경사면 흐름 테스트를 적용하였다. 본 테스트의 경사각 70°는 I장에서 기술한 바와 같이, 경사각과 유동 거리의 양의 상관관계에 근거하여 조성 간 차이를 충분히 변별할 수 있으면서도 시편이 경사면을 이탈하지 않는 범위에서 설정한 것이다(그림 4). 각 유약 조성물에 CMC 0.15%를 첨가하여 15±0.1g의 2cm 정육면체 시편으로 성형한 뒤, 70° 경사와 높이 7.5cm의 내화물 구조물 위에 배치하고 1250°C에서 20분간 유지하는 조건으로 소성하였다.²⁷⁾



(그림 4) 경사면 흐름 테스트

소성 후 유약의 유동성은 <표 5>와 같은 객관적 기준에 따라 5단계로 분류하였다.

<표 5> 경사면 흐름 테스트에 따른 유동성 평가 기준

상태	이동거리(cm)	비고
비유동(Non-flowing state)	0	유리질화는 진행되었으나 유동성이 거의 없는 상태
최소유동(Minimal flow state)	완충구간(≤0.5)	완충 구간(5mm) 내에서만 형태 변형이 관찰되는 상태
저유동(Low flow state)	0-1	경사면 시작점에서 1cm 이하로 흐름이 발생한 상태
중유동(Medium flow state)	1-3	경사면 시작점에서 1-3cm 범위 내 흐름이 발생한 상태
고유동(High flow state)	≥3	경사면 시작점에서 3cm 이상 흐름이 발생한 상태

일부 실험에서는 경사면을 완전히 초과하여 흐르는 예외적인 유동 현상이 관찰되었으나, 이는 특수한 조성에서만 나타나는 현상으로, 일반적인 장석계 글루프 유약의 유동성 평가에는 상기 5단계 분류를 적용하였다(<표 5>).

유동 거리는 70° 경사면이 시작되는 지점(5mm 완충 구간 이후)부터 유약이 흘러내린 최대 지점까지 디지털 캘리퍼스를 사용하여 정밀 측정하였다. 경사면을 초과하여 흐른 경우에도 동일한 방식으로 총 유동 거리를 측정하였다.

27) 모든 소성은 Shimpo사의 0.2m³용량 전기가마(Model: DUB-10)를 사용하였으며, 프로그램 A-7 소성 패턴에 따라 진행하였다.

각 조성별 시편은 1개씩 제작하여 측정하였다. 이는 실험 조성의 전체적 경향을 탐색적으로 파악하기 위한 것으로, 개별 조성에 대한 통계적 재현성 검증보다는 장식 유형 간 비교와 프리트 첨가량에 따른 변화 경향 도출에 초점을 두었다. 따라서 본 연구에서 제시하는 유동 거리 수치는 해당 조성의 절대적 특성값이라기보다는 상대적 비교를 위한 참고 지표로 해석하는 것이 적절하며, 유의미한 차이로 판단된 조성에 대해서는 향후 반복 실험을 통한 검증이 필요하다.

유약 표면의 광택도와 백색도는 I장에서 언급한 바와 같이 육안에 의한 시각적 비교로 평가하였으며, 관련 서술은 정성적 경향의 기술로 한정한다.

3. 실험 설계

1) 기초 연구

장식 및 프리트 조성이 글루프 유약의 유동 특성에 미치는 영향을 분석하기 앞서, 기존 글루프 유약의 조성과 유동성 간의 상관관계를 파악하기 위한 탐색적 연구를 선행하였다.

실험군은 총 10종으로 구성하였다. 우선 온라인 유약 데이터베이스인 Glazy.org에서 유동성 정보가 검증된 표준 레시피 6종을 선정하였다. 여기에 성분비 조절을 통해 유동성 변화를 유도하도록 독자적으로 재설계한 변형 레시피 4종을 추가하였다. 이는 기존 유약의 일반적 경향성을 확인함과 동시에, 특정 성분의 증감이 유동성에 미치는 영향을 비교 분석하기 위함이다<표 6>.

<표 6> 샘플 글루프 유약의 광물질 조성비 (단위: wt%)²⁸⁾

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
부여규석	25	25	25	25	25	25	29	29	32	32
카올린	EPK 25	EPK 25	EPK 25	EPK 20	EPK 25	인도네 시아 25	EPK 23	EPK 23	EPK 23	EPK 23
장식	네플린 25	네플린 25	네플린 25	네플린 25	인도 소다 25	인도 소다 25	인도 칼리 25	인도 소다 25	민스파 200 15	민스파 200 9
프리트	3124 25	3134 25	3124 25	3124 25	3124 25	3124 25	3124 11	3124 11	3124 21	3124 21
석회석	-	-	5	-	-	-	12	12	9	15

10가지 유약 샘플의 화학 조성을 분석하여 제겔식(Seger formula)을 산출하고, 유동성과의 상관관계를 분석하였다. B₂O₃는 유약학의 실무적 관행에 따라 RO 그룹으로 분류하였다<표 7>.

28) S3은 S1 조성(100 wt%)에 석회석을 추가 5 wt%(외함)로 더해 총 105 wt%가 되도록 설계한 조성이며, S4는 S1에서 카올린 함량을 25 wt%에서 20 wt%로 줄여 총 95 wt%가 되도록 조정된 조성이다. 이는 석회석 추가 여부와 카올린 비율 변화에 따른 유동성 차이를 비교하기 위해 의도적으로 설계한 것이다.

〈표 7〉 샘플 글루프 유약의 제겔식

	$RO(CaO+B_2O_3) + R_2O(Na_2O+K_2O)$	Al_2O_3	SiO_2
S1	0.566 + 0.434	1.18	5.31
S2	0.623 + 0.377	0.96	3.91
S3	0.647 + 0.353	0.96	4.32
S4	0.644 + 0.356	0.85	4.22
S5	0.599 + 0.401	1.15	5.77
S6	0.601 + 0.399	1.21	5.86
S7	0.733 + 0.267	0.89	4.81
S8	0.714 + 0.286	0.87	4.67
S9	0.740 + 0.260	0.87	4.31
S10	0.836 + 0.164	0.67	3.40

유동성 평가는 앞서 설명한 경사면 흐름 테스트를 통해 실시하였다(그림 5). 시편이 놓인 위치와 70도 경사가 시작되는 지점 사이에 0.5cm의 거리를 두어, 유약의 미세한 변화까지 관찰할 수 있도록 하였다. 경사면 흐름 테스트 결과, 각 샘플의 유동성은 다음과 같이 측정되었다(표 8).

〈표 8〉 기초 연구 유약 시편의 유동 거리 측정 결과 (단위: cm)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
유동 거리	≤0.5	10.47	3.66	9.61	≤0.5	0	2.73	3.04	3.72	5.5
유동 분류	최소	최고	고	최고	최소	-	중	중	고	최고



(그림 5) 기초 연구 유약 시편의 소성 결과

측정된 유동성과 제겔식을 비교한 결과, 유동성을 좌우하는 세 가지 핵심 변수가 도출되었다. 첫째, RO/R₂O 비율이 높을수록($RO \geq 0.7$) 유동성이 증가하였다. 둘째, Al₂O₃ 함량이 낮을수록 유동성이 증가하는 명확한 상관관계가 관찰되었다. 셋째, SiO₂ 함량은 중간 범위(4.0~5.0)에서 최적의 유동성을 보였으나, 단독 변수로는 유동성을 설명하기 어려웠다.

아울러 프리트만 달리한 S1(페로 프리트 3124)과 S2(페로 프리트 3134)의 극적 유동성 차이(≤ 0.5cm 대 10.47cm)는, 이 세 변수 외에도 프리트 자체의 알루미늄과 붕산 함량이 유동성에 결정적으로 작용함을 보여주었다. 그러나 기초 연구에 사용된 유약들은 장식 외에 카올린, 규석, 탄산 칼슘 등 다수의 부재료를 포함하고 있어 장식 자체의 고유한 특성이 유동성에 미치는 영향을 분리하여 관찰하기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 복합적인 재료 변수를 제거하고 장식과 용제만으로 이루어진 이원계 실험을 설계하였다. 이러한 단순화 과정은 다성분계 유약에서 관찰하기 어려웠던 장식의 개별적 특성과 용제와의 반응성을 정밀하게 파악하는 토대가 될 것이다.

2) 본 실험 조성

앞서 소개한 7종의 장식(소다계 4종, 칼리계 3종)을 대상으로 각 장식의 특성과 프리트 첨가량에 따른 유동성 변화를 체계적으로 탐구하기 위한 실험 조성을 설계하였다.

소다계 장식은 일반적으로 칼리계 장식보다 용융점이 낮은 특성을 고려하여 최대 9%까지 프리트를 첨가하였고, 칼리계 장식에는 더 넓은 범위인 15%까지 프리트를 첨가하여 다양한 유동성 단계를 관찰할 수 있도록 설계하였다(표 9). 부여장식의 경우, 화학 조성상 소다 성분이 칼리 성분보다 많지만 전체 용제 비율이 적고 실리카 함량이 높아 용융점이 높은 특성을 보인다. 따라서 본 실험에서는 칼리계 장식과 유사한 범위의 프리트를 첨가하여 그 특성을 탐구하였다.

〈표 9〉 장식 종류별 실험 조성 (단위: wt%)

장식 유형	장식 종류	장식 함량	페로 프리트 3124 첨가 범위
소다계	인도소다	100-91	0, 3, 6, 9
	민스파 200	100-91	0, 3, 6, 9
	네플린 사이나이트	100-91	0, 3, 6, 9
칼리계	부여장식	100-85	0, 3, 6, 9, 12, 15
	인도칼리	100-85	0, 3, 6, 9, 12, 15
	커스터	100-85	0, 3, 6, 9, 12, 15
	G-200	100-85	0, 3, 6, 9, 12, 15

기초 연구에서 확인된 용제 종류에 따른 유동성 차이를 더욱 체계적으로 검증하기 위해, 페로 프리트 3124 외에 페로 프리트 3134와 석회석을 대체 용제로 사용한 조성을 추가하였다. 3134는 3124에 비해 알루미늄 함량이 현저히 낮고(2.0% 대 10.0%) 붕산 함량이 높아(22.8% 대 13.7%) 뚜렷한 용제 특성 차이를 보일 것으로 예상되었다(표 4). 또한 석회석의 CaO는 본 실험의 소성 온도(1250℃)에 해당하는 중고온 영역에서 효과적으로 작용할 것으로 기대되었다.

대체 용제 실험에서는 장식의 용융 특성을 고려하여 차등적인 첨가량을 적용하였다. 소다계 장

석 3종은 기본적으로 용융점이 낮아 소량의 용제만으로도 유동성 변화를 관찰할 수 있을 것으로 예상되어 3%의 대체 용제를 적용하였다. 반면, 용융점이 상대적으로 높은 칼리계 장석과 부여장석에는 충분한 용융 효과를 관찰하기 위해 9%의 대체 용제를 적용하였다(표 10). 이러한 차등적 접근은 장석 유형별 특성에 맞춘 맞춤형 유약 개발 가능성을 탐구하기 위한 것이었다.

〈표 10〉 대체 용제 실험 조성 (단위: wt%)

장석 유형	장석 종류	장석 함량	페로 프리트 3134	석회석
소다계	인도소다	97	3	-
	민스파 200	97	3	-
	네플린 사이나이트	97	3	-
칼리계	부여장석	91	9	-
	인도칼리	91	9	-
	커스터	91	9	-
소다계	G-200	91	9	-
	인도소다	97	-	3
	민스파 200	97	-	3
칼리계	네플린 사이나이트	97	-	3
	부여장석	91	-	9
	인도칼리	91	-	9
소다계	커스터	91	-	9
	G-200	91	-	9

추가적인 탐색적 실험으로, 리튬-알루미늄 규산염 광물인 페탈라이트($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$)를 첨가한 조성을 일부 테스트하였다. 페탈라이트는 리튬(Li_2O) 함량이 4.5%로, 열팽창계수에 영향을 미쳐 유약의 균열 특성에 변화를 줄 수 있는 재료이다. 본 실험에서는 별도의 프리트 첨가 없이 중량 기준으로 장석 94%와 페탈라이트 6%로 단순 조성을 구성하여, 페탈라이트 첨가가 각 장석 유형에 미치는 기본적인 영향을 관찰하고자 하였다(표 11).

〈표 11〉 페탈라이트 첨가 실험 조성 (단위: wt%)

장석 유형	장석 종류	장석 함량	페탈라이트
소다계	인도소다	94	6
	민스파 200	94	6
	네플린 사이나이트	94	6
칼리계	부여장석	94	6
	인도칼리	94	6
	커스터	94	6
소다계	G-200	94	6

4. 실험 결과 및 분석

1) 장식 종류별 유동성 평가 결과

본 절에서는 앞서 설계한 실험 구성에 따른 유약의 유동성 측정 결과를 제시하고, 이를 바탕으로 장석 종류, 프리트 첨가량, 대체 용제 및 페달라이트 첨가에 따른 영향을 체계적으로 분석한다.

7종의 장석에 대해 페로 프리트 3124를 단계적으로 첨가한 결과, 장석에 따라 뚜렷한 유동성 차이가 관찰되었다. <표 12>는 각 장석과 프리트 첨가량에 따른 유동 거리를 정리한 것이다.

<표 12> 장석 종류별 페로 프리트 3124 첨가량에 따른 유동 거리 (단위: cm)

	0%	3%	6%	9%	12%	15%	참조 그림
인도소다	0	0	0.2	1.74	-	-	그림 7
민스파	0	0	최소	1.34	-	-	그림 8
네플린 사이나이트	최소	1.42	4.06	5.57	-	-	그림 6
부여	0	0	0	0.16	2.65	4.09	그림 10
인도칼리	0	0	0	최소	0.99	2.74	그림 11
커스터	0	0	0	최소	0.64	2.37	그림 12
G-200	0	0	0	최소	1.07	3.22	그림 9

소다계 장석 중에서는 네플린 사이나이트가 가장 활발한 유동성을 보였다(그림 6). 프리트 3% 첨가만으로도 1.42cm의 유동 거리를 보였으며, 9% 첨가 시에는 5.57cm로 모든 실험 구성 중 가장 높은 유동성을 나타냈다. 이는 네플린 사이나이트가 가진 낮은 실리카 함량(60.4%)과 높은 알칼리 함량(Na_2O 10.1%, K_2O 5.1%)이 상대적으로 낮은 용융점을 초래하기 때문으로 분석된다.

반면 인도소다는 네플린 사이나이트보다 Na_2O 함량이 높음에도 불구하고(11%), 프리트 6%에서야 미약한 유동(0.2cm)이 관찰되었으며, 9% 첨가 시에도 1.74cm의 제한된 유동성을 보였다(그림 7). 이는 인도소다의 높은 실리카 함량(69.5%)과 상대적으로 낮은 총 알칼리 함량이 영향을 미친 것으로 판단된다.

민스파는 소다계 장석 중 가장 낮은 유동성을 보였다(그림 8). 프리트 6%에서 최소 유동 상태를 보였으며, 9% 첨가 시에도 1.34cm의 제한된 유동성을 나타냈다. 이는 민스파가 Na_2O (6.5%)와 K_2O (4.1%) 외에도 CaO (1.5%)를 포함하고 있음에도 불구하고, 전체적인 용제 성분의 함량이 다소 낮은 것에 기인하는 것으로 보인다.



(그림 6) 네플린 사이나이트의 프리트 첨가량에 따른 유동성 변화



(그림 7) 인도 소다장석의 프리트 첨가량에 따른 유동성 변화



(그림 8) 민스파 장석의 프리트 첨가량에 따른 유동성 변화

칼리계 장석들은 소다계 장석에 비해 전반적으로 더 높은 용융점을 보였다. 세 종류의 칼리계 장석(인도칼리, 커스터, G-200) 모두 프리트 9% 첨가까지는 최소 유동 상태에 머물렀으며, 12% 이상의 프리트 첨가 시에야 뚜렷한 유동성을 보이기 시작했다.

세 종류 중에서는 G-200이 가장 높은 유동성을 보였으며(15% 첨가 시 3.22cm), 그 다음으로 인도칼리(2.74cm), 커스터(2.37cm) 순이었다(그림 9)(그림 11)(그림 12). 이러한 차이는 각 장석의 미세한 화학 조성 차이와 함께 결정 구조, 입도 등의 물리적 특성 차이에서 기인하는 것으로 추정된다.

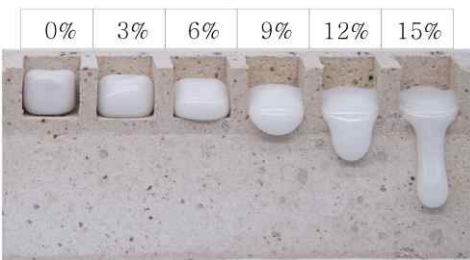
한편, 앞서 실험 재료에서 논의한 바와 같이 칼리계와 동일한 조건을 적용한 부여장석은, 칼리계 장석과는 구별되는 유동성 증가 패턴을 보였다(그림 10). 프리트 9% 첨가 시에는 0.16cm의 미미한 유동성에 그쳤으나, 12% 첨가 시 2.65cm로 급격히 증가하여 칼리계 장석의 15% 첨가 수준에 근접하였고, 15% 첨가 시에는 4.09cm로 모든 칼리계 장석을 능가하였다. 이러한 결과는 부여장석에 포함된 Na_2O 와 K_2O 가 복합적으로 작용하여, 일정 임계점 이상의 프리트 첨가 시 높은 실리카 함량의 영향을 상쇄하고 우수한 용융 특성을 발휘할 수 있음을 시사한다.



(그림 9) G-200 장석의 프리트 첨가량에 따른 유동성 변화



(그림 10) 부여장석의 프리트 첨가량에 따른 유동성 변화



(그림 11) 인도 칼리장석의 프리트 첨가량에 따른 유동성 변화



(그림 12) 커스터 장석의 프리트 첨가량에 따른 유동성 변화

실험 결과를 통해 각 장석 유형별로 유동성에 뚜렷한 변화를 가져오는 프리트 첨가량의 임계점이 관찰되었다:

소다계 장석: 네플린 사이나이트는 3%, 인도소다와 민스파는 6%에서 유동성이 시작되었다.

부여장식 : 9%에서 약간의 유동이 시작되어 12%에서 급격한 증가를 보였다.

칼리게 장식: 모든 칼리게 장식은 9%에서 최소 유동을 보이기 시작하여 12%에서 뚜렷한 유동성을 나타냈다.

이러한 임계점 차이는 장식의 고유한 화학적 특성에서 비롯된 것으로, 글루프 유약 개발 시 목표 유동성에 따른 프리트 첨가량 결정에 중요한 지표가 된다. 이어서 페로 프리트 3124 외의 대체 용제가 이러한 임계점과 유동성에 어떠한 변화를 가져오는지 분석하였다.

2) 대체 용제 효과 분석

페로 프리트 3124를 기준으로 한 실험에서 확인된 각 장식의 유동 특성을 바탕으로, 대체 용제인 석회석과 페로 프리트 3134, 그리고 균열 제어를 위한 페탈라이트의 효과를 비교 분석하였다. 이 실험은 동일한 장식에서 용제의 종류만을 변경했을 때 나타나는 유동성 변화를 관찰함으로써, 각 용제가 지닌 고유한 특성과 장식과의 상호작용을 이해하고자 하였다.

소다계 장식에는 페로 프리트 3124 3%를 석회석 3%와 페로 프리트 3134 3%로 각각 대체하였고, 부여장식과 칼리게 장식에는 페로 프리트 3124 9%를 동일한 비율의 대체 용제로 적용하였다. 균열 제어 효과를 검증하기 위한 페탈라이트는 모든 장식에 6%를 동일하게 첨가하였다. 장식별 대체 용제 첨가에 따른 유동 거리 비교의 결과는 다음과 같다<표 13>.

<표 13> 장식별 대체 용제 첨가에 따른 유동 거리 비교 (단위: cm)

	인도소다	민스파	네플린	부여	인도칼리	커스터	G-200	참조 그림
페로 프리트 3124	0	0	1.42	0.16	최소유동	최소유동	최소유동	-
페로 프리트 3134	0.18	최소유동	2.59	3.99	3.09	1.94	2.41	그림 14
석회석	0.62	최소유동	4.02	4.66	1.50	1.23	0.99	그림 13
페탈라이트	0.24	최소유동	2.08	1.31	1.20	0.13	0.86	그림 15

실험 결과, 용제에 따라 흥미로운 유동성 변화가 관찰되었다. 먼저 석회석을 대체 용제로 사용한 경우, 예상과 달리 많은 장식에서 페로 프리트 3124보다 우수한 유동성을 보였다(그림 13). 특히 네플린 사이나이트는 페로 프리트 3124 3% 첨가 시 1.42cm의 유동성을 보였으나, 석회석 3% 첨가 시에는 4.02cm로 약 2.8배 증가한 유동성을 나타냈다. 부여장식 역시 석회석 9% 첨가 시 4.66cm의



(그림 13) 석회석 대체에 따른 장식별 유동성 변화

높은 유동성을 보여, 페로 프리트 3124 9% 첨가 시의 0.16cm와 극명한 대조를 이루었다.

이러한 석회석의 우수한 용제 효과는 본 실험의 소성 온도인 1250°C가 석회석의 CaO가 효과적으로 작용하는 중고온 영역에 해당하기 때문으로 분석된다. CaO는 이 온도 범위에서 장석의 실리카 구조와 활발히 반응하여 공용점을 낮추는 역할을 하며, 특히 알칼리 성분이 풍부한 소다계 장석과의 상호작용이 더욱 활발한 것으로 나타났다. 인도소다를 비롯한 나머지 장석에서도 석회석은 페로 프리트 3124 대비 전반적으로 우수한 유동성을 보여, 석회석이 1250°C 조건에서 광범위하게 효과적인 용제임을 확인할 수 있었다.

페로 프리트 3134를 대체 용제로 사용한 경우에도 대부분의 장석에서 페로 프리트 3124보다 우수한 유동성을 보였다(그림 14). 이는 페로 프리트 3134가 3124에 비해 알루미늄 함량이 현저히 낮고(2.0% 대 10.0%) 붕산 함량이 높은(22.8% 대 13.7%) 특성에 기인한다. 알루미늄은 유약의 점도를 증가시키는 역할을 하므로, 낮은 알루미늄 함량은 유약의 유동성 증가에 직접적으로 기여한다.

네플린 사이나이트는 페로 프리트 3134 3% 첨가 시 2.59cm의 유동성을 보여 페로 프리트 3124보다는 높지만 석회석보다는 낮은 중간적 효과를 나타냈다. 부여장석은 페로 프리트 3134 9% 첨가 시 3.99cm의 높은 유동성을 보였으며, 칼리계 장석들도 인도칼리 3.09cm, 커스터 1.94cm, G-200 2.41cm로 모두 향상된 유동성을 나타냈다.



(그림 14) 페로 프리트 3134 대체에 따른 장석별 유동성 변화

특히 주목할 점은 민스파의 경우인데, 모든 대체 용제 실험에서 최소 유동 상태를 보였다. 그러나 이는 페로 프리트 3124 3% 첨가 시의 비유동 상태와 비교하면 여전히 개선된 결과이다. 민스파의 이러한 특성은 상대적으로 낮은 총 알칼리 함량과 복잡한 화학 조성에 기인하는 것으로 보이며, 더 높은 용제 첨가량이나 소성 온도에서 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

페달라이트 6% 첨가는 장석 종류에 따라 상반된 유동성 변화를 보였다(그림 15). 부여 및 칼리 장석군에서는 유동성이 향상되었으나, 네플린 사이나이트는 4.06cm에서 2.08cm로 급감하여 리튬의 복합적 작용을 확인하였다. 한편, 기대했던 균열 제어 효과는 미미하였다. 대부분의 균열이



(그림 15) 페달라이트 대체에 따른 장석별 유동성 변화

시편의 90° 굴곡부에 집중된 점으로 보아, 본 실험에서는 구조적 응력과 유동성 증가에 따른 두께 감소가 화학적 조성보다 지배적인 요인으로 작용했음을 알 수 있다.

이상의 대체 용제 실험 결과를 종합하면, 글루프 유약의 유동성은 목표로 하는 표현 효과와 사용하는 장식의 특성에 따라 다양한 용제를 선택적으로 활용함으로써 제어할 수 있음을 알 수 있다. 다만 균열 제어를 위해서는 화학적 조성 조절만으로는 한계가 있으며, 소성 스케줄, 냉각 속도, 유약 도포 두께 등을 포함한 다각적 접근이 필요하다.

IV. 결 론

본 연구는 현대 도예에서 입체적 표현 기법으로 주목받고 있는 글루프 유약의 유동성 제어를 위해, 7종의 장식을 소다계와 칼리계로 분류하고 프리트의 단계별 첨가 및 대체 용제 실험을 통해 용융 특성을 정량적으로 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 장식의 화학적 조성은 글루프 유약의 유동성을 결정짓는 가장 근본적인 요인이었다. 소다계 장식은 적은 프리트 첨가량에서도 활발한 유동성을 보인 반면 칼리계 장식은 상대적으로 높은 프리트 함량을 필요로 하였으며, 소다계 3~6%, 칼리계 9~12%에서 유의미한 유동이 시작되는 뚜렷한 임계점이 관찰되었다.

둘째, 용제의 종류가 유동성에 미치는 영향은 프리트 첨가량 못지않게 중요하였다. 석회석은 1250°C에서 CaO의 활발한 반응으로 페로 프리트 3124보다 우수한 유동성을 보였고, 페로 프리트 3134 역시 낮은 알루미늄과 높은 붕산 함량으로 대부분의 장식에서 향상된 유동성을 나타냈다. 이는 기초 연구에서 도출된 유동성 핵심 변수(RO/R₂O 비율, Al₂O₃ 함량, SiO₂ 함량)가 장식과 용제 이원계에서도 일관되게 작용함을 뒷받침한다.

셋째, 페달라이트를 이용한 균열 제어 실험에서는 리튬 성분이 장식 종류에 따라 용제 또는 용융 억제제로 작용하는 복합적 효과가 관찰되었으나, 균열 감소 효과는 확인할 수 없었다. 이는 화학적 조성 조절만으로는 한계가 있으며, 냉각 과정에서의 열적 조건을 포함한 다각적 접근이 필요함을 시사한다.

본 연구는 조성별 단일 시편에 따른 통계적 재현성의 부재, 소형 시편으로 인한 실제 작품 규모와의 괴리, 그리고 이원계라는 단순화된 실험 조건이라는 한계를 지니며, 향후 이를 보완하는 확장 연구가 필요하다. 그럼에도 불구하고, 기존에 경험적으로만 접근되던 글루프 유약의 유동성에 대해 장식 유형별 프리트 첨가 임계점과 용제별 효과를 정량적으로 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

□ 참고문헌

- 이병하 (2014). 나만의 유약 만들기-종합편. 서울: 예경.
- 정동훈 (2011). 도예가를 위한 유약연구. 파주: 한국학술정보.
- Rhodes, D. (2023). 도예가를 위한 점토와 유약 (이부연 외 역). 서울: 한양대학교출판부. (원저 1957).
- 이지숙 (2020). 장석을 이용한 시노유 개발 연구. 석사학위논문. 명지대학교 산업대학원.
- Frolova, N. (2021). *A question of mastery: Defects and layers*. (Master's thesis). Nova University Lisbon, Lisbon, Portugal.
- 한두희, 이정화 (2002). 프리트, 점토, 및 안료의 혼합에 따른 법랑 색상에 관한 연구. *한국산학기술학회논문지*, 3(2), 101-106.
- Xiu, Y. (2023). Design and development of ceramic glaze flow tester with adjustable tilt angle. *Journal of Ceramic Processing Research*, 24(5), 868-873.
- Clark, G. (2025,03,27). POV | Garth Clark's open letter to Takuro Kuwata. Cfileonline. <http://cfileonline.org/pov-garth-clarks-open-letter-to-takuro-kuwata/>
- Digitalfire (2025,03,25). Ferro Frit 3124 [인터넷 블로그]. <https://digitalfire.com/material/ferro+frit+3124>
- _____ (2025,03,25). Frit [인터넷 블로그]. <https://digitalfire.com/glossary/frit>
- _____ (2025,03,25). Petalite [인터넷 블로그]. <https://digitalfire.com/material/petalite>
- National Crafts Museum (2026,03,20). Collection [웹사이트]. <https://www.momat.go.jp/craft-museum/en/collection/cr0760>
- Takuro Kuwata (2026,03,20). Takuro Kuwata Official Website [웹사이트]. <http://www.takurokuwata.com>
- Wizard Glaze (2025,03,25). How to apply gloop glaze [인터넷 블로그]. <https://wizardglaze.com/blogs/wizard-glaze/how-to-apply-gloop-glaze>