

## 수성 그라비아 잉크의 누적 증발량에 따른 pH 및 점도 변화의 연구

임서준<sup>1</sup> · 정지현<sup>2\*</sup> · 정진도<sup>3</sup>

<sup>1</sup>호서대학교 대학원 에너지기후환경융합기술학과

<sup>2</sup>서울한영대학교 환경스마트기술전공

<sup>3</sup>호서대학교 환경공학과

## Study on pH and Viscosity Changes of Water-based Gravure Inks as a Function of Cumulative Evaporation

Seojun Lim<sup>1</sup>, Jihyun Chung<sup>2\*</sup>, and JinDo Chung<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy-Climate-Environment Convergence Technology, Graduate School, Hoseo University

<sup>2</sup>Environmental Smart Technology Major, Seoul Hanyeong University

<sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, Hoseo University

**Abstract** Gravure printing dominates food packaging, yet conventional solvent-borne inks emit VOCs. This study quantifies pH and viscosity drift of water-based gravure inks under open-system evaporation using cumulative evaporation (E%) as a state variable. A base ink (S-A1) and two amine-adjusted inks with the same base formulation were examined: S-B1 with ammonia (bp -33°C) and S-B2 with AMP-95 (bp 163-165°C). Samples (350 g) were evaporated at 40°C/40% RH in identical beakers (6.5 cm i.d.) with 650 rpm stirring, and mass loss was recorded to compute E%. After rapid cooling and temperature control ( $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ), pH was measured at 0, 30, and 60 s and viscosity at 25°C (120 s, duplicate mean). Stabilization rates in the 30-60 s interval (SR=58.3% and 72.7% at  $\epsilon=0.05$ ) justified using the 60 s pH value. For S-A1, pH decreased quasi-linearly (slope  $-0.065$  pH/%;  $r=-0.90$ ) with a three-stage pattern, while viscosity increased ( $\eta=55.59+14.04E$ ;  $r=0.95$ ) and accelerated beyond  $E\approx 3\%$ . For S-B1/S-B2, pH followed  $\text{pH}=8.97-0.176E$  ( $r=-0.94$ ) and viscosity followed  $\eta=65.21+10.33E$  ( $r=0.98$ ), with a similar transition near  $E\approx 3\%$ . Surface observations indicated aggregation/skin at  $E\approx 3\%$  and gelation near  $E\approx 5\%$ . These results define an E%-based control window and support evaporation-stage correction rules considering amine volatility.

**Keywords** Water-based gravure ink, Cumulative evaporation (E%), pH stability, Viscosity growth, Amine volatility

## 서 론

그라비아 인쇄는 국내 식품 포장재의 대부분의 비중을 차지한다. 미세 패턴 재현력과 색 재현성이 높아 플라스틱 필름, 알루미늄, 종이 등 여러 사용처로 폭넓게 적용되며 특히 식품포장재로 많이 사용된다. 기존 그라비아 공정 라인에는 MEK, EA, 에탄올 등 유기용매 잉크를 사용해 왔다<sup>1)</sup>. 건조는 빠르고 잉크 전달은 안정적이지만, VOCs 배출과 작업자 건강 위해, 환경 오염 문제의 문제점이 있었다<sup>2)</sup>. 최

근에는 MEK 저감과 상대적으로 독성이 낮은 용매로의 전환이 진행 중이다. 하지만 점진적 개선만으로는 분명한 한계가 있으며 이 구조적 과제를 풀 대안으로 그라비아 공정의 수성잉크 본격 도입이 필요하다<sup>3)</sup>.

수성잉크의 가장 큰 장점으로서는 주 용제가 물이어서 VOCs 배출을 크게 줄일 수 있다<sup>4)</sup>. 인화점이 높아 화재 위험이 낮고, 현장의 냄새 및 환기 부담도 완화된다. 특히 식품 포장재처럼 인체와의 접촉 가능성이 있는 인쇄물에서는 화학적 안정성 측면에서 유해성으로부터 노출을 저감할 필요성이 있다. 이에 따라 현재 중국을 포함한 주요 인쇄 국가에서 그라비아 공정용 수성잉크의 상용화 사례가 보고되고 있으며, 국내 또한 그라비아 수성 기술이 현재 시점에서 높은 상용화 가능성을 보여준다.

\*Corresponding Author: Jihyun Chung  
Seoul Hanyeong University, Guro-gu, Seoul, Republic of Korea  
Tel: +82-2-2669-2459 Fax: +82-2-3282-5463  
E-mail: jjh4356@naver.com

유기용매 잉크인 MEK, EA, 에탄올 등은 용해도가 높은 단일상 균질 용액으로써, pH 개념이 없고, 점도 관리가 핵심 변수로 작동한다<sup>5)</sup>. 수성잉크는 물을 용제로 한 분산형 체계의 잉크이며, 안료 입자가 현탁되어 있다<sup>6)</sup>. 분산 응집을 억제하려면 알칼리 영역에서 표면전하를 지속적으로 유지해야 한다. 따라서 전하 안정성을 위한 pH 제어와 유동 특성 관리를 위한 점도 제어를 동시에 수행해야 하며, 이는 공정관리의 복잡성을 높이는 근본적인 원인이 된다<sup>6)</sup>.

그라비아 인쇄공정은 개방형 공정으로써 공정 운용상의 가장 큰 제약 사항이 발생한다. 롤러 및 닥터 블레이드, 담금 용기에서 잉크가 지속적으로 공기와 접촉한다. 그 과정에서 물과 휘발성 아민이 지속적으로 증발하고, 물질 조성은 시간에 따라 변한다. pH와 점도 값 역시 동시에 변동한다. 결국 누적 증발량의 변화를 전제로 pH와 점도를 단계적으로 재조정하는 운전 규칙이 필요하다<sup>7)</sup>.

증발 환경에서 수성잉크 물성 변화를 정량화한 자료는 현장 적용의 기초가 될 수 있다. 특히 증발량 변화에 따른 pH 및 점도의 동시 응답을 정량적으로 확인 할 필요성이 있다. 이에 관련 선행연구는 제한적이며, 증발의 변화를 축으로 두 변수를 하나의 관점에서 체계적으로 분석한 보고는 국내외에서 드물다. 더 나아가 잉크에 투입되는 아민 종의 휘발성 차이가 이러한 동시 응답에 미치는 영향을 비교하여 정량한 연구도 아직 확인되지 않는다.

따라서 본 연구는 다음의 과학적·산업적 목표를 설정한다. 누적 증발량에 따른 pH의 정량적 변화 패턴과 60 s 내 안정화 메커니즘을 규명한다. 누적 증발에 수반되는 점도의 비선형 증가 양상과 임계 전환점을 도출한다. 두 물성의 교차 거동을 계량화하여 공정 품질관리 기준을 제시한다. 고 휘발성 아민과 저휘발성 아민의 pH 안정성 차이를 정량 비교하고 기작적 해석을 제공한다<sup>8,9)</sup>.

본 연구는 정확한 계측 조건과 데이터 처리 방법론을 통해 수성잉크의 증발 중 물성 변화를 체계적으로 규명하고, 그라비아 인쇄 공정에서의 수성잉크 실용화를 위한 과학적 근거를 제공하고자 한다.

## 실험방법 및 조건

### 1. 시험 시료

본 연구는 Table 1에 따라 S-A1, S-B1, S-B2의 3개 시료를 사용하였다. S-A1은 국내에서 상용적으로 사용되는 배

합 구성인 바이너(수분산성 수지), 가용성 수지(분산 안정화/레트다운), 안료, 물, 소포제, 습윤제로 구성된 베이스 시료이다. S-B1과 S-B2는 S-A1의 베이스 조성을 그대로 유지한 채, 아민 종만 달리해 초기 pH를 조정한 비교 시료이다. S-B1에는 고휘발성 아민인 암모니아(끓는점  $-33^{\circ}\text{C}$ )<sup>8)</sup>를, S-B2에는 저휘발성 아민인 AMP-95(끓는점  $163\text{--}165^{\circ}\text{C}$ )<sup>9)</sup>를 각각 추가하였다. 실제 수성 그라비아 잉크는 pH 8.5를 중심으로 pH 9.0 범위까지 운용되는 경우가 많으므로, 본 연구는 베이스 조성은 고정하고 아민 2종을 투입해 pH만 정렬하여 비교하였다.

### 2. 실험 환경조건

사용되는 모든 계측기는 측정 소급성이 확보된 교정된 장치를 사용하였다. 실험 절차는 Fig. 1에 요약하였다. 증발 조건과 측정 조건은 다음과 같이 설정하였다.

#### 2.1. 증발 환경조건

본 연구의 증발 환경은 항온항습 챔버를 이용하여 전 과정 동일 조건( $40^{\circ}\text{C}/40\% \text{RH}$ )으로 실험하였다.

이하 ‘증발 환경조건’은  $40^{\circ}\text{C}/40\% \text{RH}$  항온항습 챔버 조건을 의미한다. 시험 용기는 내경 6.5 cm, 내부 높이 13 cm의 원형 비커를 사용하여 노출 표면적을 동일화하였다. 교반 속도는 650 rpm으로 유지하였고, 시료 투입량은 350 g으로 통일하였다.

#### 2.2. 측정 환경조건

##### 2.2.1. 누적 증발량 측정 조건

증발 환경조건 노출 직후 질량을 재측정하여 증발량을 산출하였다. 반복 노출·측정 과정에서 발생하는 시료 손실량은 제외하여 증발에 의한 질량 감소만 반영하였다.

##### 2.2.2. pH 및 점도 측정 조건

pH 안정화 구간을 특정하기 위해 전극 투입 후 0 s, 30 s, 60 s에서 연속 3회 측정하였다<sup>12,13)</sup>. pH와 점도는  $25^{\circ}\text{C}$ 에서 측정하였다<sup>10,11)</sup>. 증발 직후 시료를 챔버에서 꺼내  $5^{\circ}\text{C}$  항온수조에 1차 침지하여 급속 냉각한 뒤, 가열식 교반기를 이용하여 온도를  $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 까지 미세 조정하였다. 점도는 스피들 속도를 조정해 토크가 80%를 초과하지 않도록 설정하고, 120 s 기준으로 동일 조건에서 2회 반복 측정하였다<sup>14)</sup>.

**Table 1.** Experimental ink formulations (amine as the single variable)

Component	Water-dispersible resin	Pigment (Blue)	Water	Defoamer	Soluble resin	Wetting agent	Amine (NH <sub>3</sub> )	Amine (AMP-95)
S-A1	20	30	30	0.15	20	0.5	-	-
S-B1	20	30	30	0.15	20	0.5	1.0	-
S-B2	20	30	30	0.15	20	0.5	-	1.0

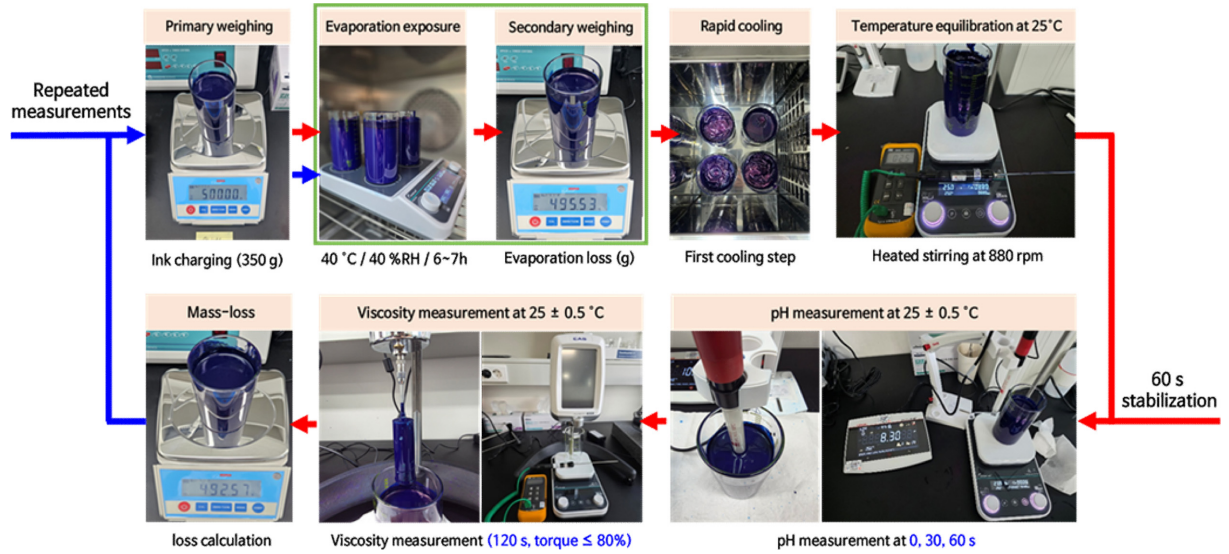


Fig. 1. Post-evaporation conditions and procedures for pH and viscosity measurements.

### 3. 데이터 처리 및 계산식

#### 3.1. 공통 표기 기호

본 연구에서 사용한 기호는 다음과 같다.

- 시료:  $j$  (S-A1, S-B1, S-B2),  $j = 1, \dots, J$
- 측정 시점:  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$
- 누적 증발량:  $E_{ij}$  (단위 %)
- pH:  $pH_{ij}$
- 점도:  $\eta_{ij}$  (mPa·s, 25°C)
- 기준 점도:  $\eta_0$

#### 3.2. pH 데이터 처리

본 연구는 pH를 0 s, 30 s, 60 s 3번 측정하여 값이 안정 범위로 진입하는 구간의 값을 활용하였다. 식 (1)을 이용해 0 s(i)에서 30 s(j) 구간, 30 s(i)에서 60 s(j) 구간의 변화 크기·방향을 정량화하고, 그 변화가 임계값  $\epsilon=0.05$  미만이면 안정으로 간주해 비율을 SR(%)로 산출하였다.

$$SR_{i \rightarrow j}(\epsilon) = \frac{100}{N} \sum_{k=1}^N 1(|\Delta pH_{i \rightarrow j, k}| < \epsilon) \quad (1)$$

#### 3.3. 점도 데이터 처리

점도( $\eta$ )는 동일 시점에서의 1차·2차 측정값의 산술평균을 대표 값으로 사용하였다.

$$\eta_{rep} = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} \quad (2)$$

#### 3.4. 증발 기울기 계산식

##### 3.4.1. 평균 정의

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad \bar{pH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n pH_i \quad \bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (3)$$

##### 3.4.2. pH에 대한 E의 기울기

$$b_{pH} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(pH_i - \bar{pH})}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \quad (4)$$

$$a_{pH} = \bar{pH} - b_{pH} \bar{E}$$

##### 3.4.3. 점도에 대한 E의 기울기

$$b_{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(\eta_i - \bar{\eta})}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \quad (5)$$

$$a_{\eta} = \bar{\eta} - b_{\eta} \bar{E}$$

#### 3.5. 상관계수(Pearson r) 계산식

##### 3.5.1. E와 pH의 상관계수

$$r_{E, pH} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(pH_i - \bar{pH})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (pH_i - \bar{pH})^2}} \quad (6)$$

##### 3.5.2. E와 점도의 상관계수

$$r_{E, \eta} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(\eta_i - \bar{\eta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta})^2}} \quad (7)$$

#### 3.6. 변동계수 CV 계산식

동일 조건에서 복제 시료  $j = 1, \dots, J$ , H 값:  $pH_j$ , 점도 값:  $\eta_j$

3.6.1. 평균

$$\overline{pH} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J pH_j \tag{8}$$

$$\overline{\eta} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \eta_j$$

3.6.2. 표준편차(SD)

$$SD_{pH} = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (pH_j - \overline{pH})^2}$$

$$SD_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\eta_j - \overline{\eta})^2} \tag{9}$$

3.6.3 변동계수(CV,%)

$$CV_{pH} = \frac{SD_{pH}}{\overline{pH}} \times 100\%$$

$$CV_{\eta} = \frac{SD_{\eta}}{\overline{\eta}} \times 100\% \tag{10}$$

4. 베이스 시료의 증발량 대비 pH 및 점도 변화측정

베이스 시료 S-A1 4개를 증발 환경조건에서 1시간 간격으로 총 6회에 걸쳐 증발량, pH, 점도를 측정하였다. 누적 증발량에 대한 pH 및 점도의 변화를 정량 분석하여 증발과 물성의 상관관계를 평가하였다.

5. 아민 2중 추가 시료의 증발량 대비 pH 및 점도 변화측정

S-A1 베이스 시료에, 각기 다른 아민 2종을 추가한 S-B1, S-B2 2개의 시료를 증발 환경조건에서 2시간 간격으로 총 3회에 걸쳐 증발량, pH, 점도를 측정하였다. S-A1 대비 초기 pH 차이에 따른 산염기 평형 변화와 유변 특성의 상대적 영향을 비교함으로써, 증발 구간별 pH 및 점도의 상관관계를 정량 평가하였다.

6. 누적 증발량에 따른 표면 변화측정

S-A1, S-B1, S-B2의 시료를 증발 환경조건에서 노출시키고, 누적 증발량에 따라 원형 비커의 증발 표면적에 응집 현상, 겔화현상 등 특이 현상이 관찰되면 누적증발량과 pH 및 점도를 기록하였다.

결과 및 고찰

1. 데이터 처리 결과

pH 데이터 처리 결과, 모든 실험의 30~60 s 구간에서 SR값이 58.3% / 72.7%으로 높은 안정화 값이 산출되었다. SR이 높을수록 pH 값의 변동성이 0.05 미만으로 판단된 부분으로써, pH 값의 높은 신뢰성을 갖는다. 결과적으로 pH의 값은 60 s에서 측정된 값을 활용하였다.

점도의 경우, 2회 측정된 평균 값을 그대로 사용하였다.

2회 측정된 데이터의 편차가 측정기기의 측정 오차율 범위보다도 매우 적은 수치에 근접하여 데이터의 신뢰성이 있음이 관찰되었다.

2. 베이스 시료의 증발량 대비 pH 및 점도 변화측정 결과

Fig. 2는 S-A1 시료 4개의 누적 증발량 대비 pH와 점도 변화의 평균 거동을 나타낸다. 이하 (가)-(다)에서는 Fig. 2를 바탕으로 누적 증발량과 pH, 점도, 그리고 pH-점도의 상관관계를 정량적으로 논의한다.

2.1. 누적 증발량과 pH의 상관관계

누적 증발량이 증가할수록 pH는 전체 범위(0-5%)에서 거의 선형적으로 감소하며, 전체 평균 회귀 기울기가 약 -0.065 pH·%와 Pearson r=-0.90으로 강한 음의 상관으로 나타났다.

세부적으로는 0-2%구간에서 pH가 기울기:-0.138pH·%로 가장 가파르게 감소 한 뒤, 2-3.5% 구간에서는 기울기:-0.012pH·%로써 pH가 8.1-8.2 부근에 머무는 평탄·완충된 구간이 나타나고, 3.5-5.0% 구간에서는 기울기:-0.062pH·%로 다시 완만한 하강구조로 전환되었다. 동일한 4개의 시료 모두 CV가 1.5% 이하로 유지된다는 점은 이 3단 패턴이 재현되는 구조적 경향임을 뒷받침한다.

2.2. 누적 증발량과 점도의 상관관계

점도는 누적 증발량 증가에 따라 전체적으로 선형에 가깝게 상승하며, 평균 Pearson r=0.95로 강한 양의 상관으로 증가 경향으로 나타났다.

구간별로 보면 0-2%에서 기울기가 8.03 mPa·s·%로 완만한 증가가 나타나고, 2-3%에서는 기울기가 10.96mPa·s·%로써 소폭 커지는 전이 양상이 관찰되었으며, 3-5%에서는 기울기가 22.52 mPa·s·%로 크게 증가하면서 점도 상승이 가속되고 시료 간 산포(CV)도 14%로 확대되었다. 증발이

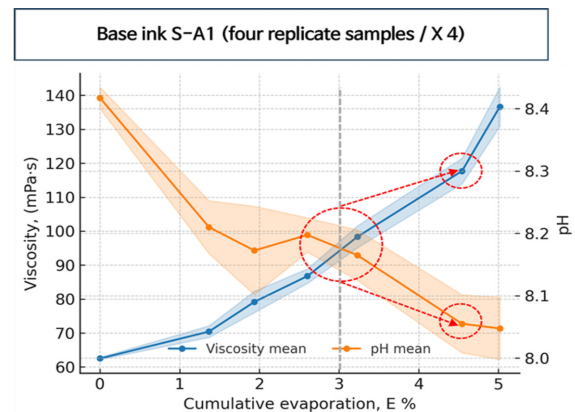


Fig. 2. Correlation between viscosity and pH as a function of cumulative evaporation (E%) for S-A1.

일정 수준을 넘으면 고농축 상태에서 점도 민감도가 커지는 거동이 뚜렷해지는 경향이 관찰되었다.

### 2.3. pH-점도의 상관관계

누적 증발이 진행될수록 pH는 감소하고 점도는 증가하는 역상관 구조가 일관되게 형성되며, 특히 3%를 경계로 변화 특성이 달라지는 것이 관찰되었다. 3% 미만에서는 pH와 점도 변화 폭이 비교적 제한적이고 변동성도 작아 완만한 관리 영역으로 볼 수 있는 반면, 3% 이상에서는 점도가 급격히 상승하고 변동성도 커져 고점도·고변동성 영역으로 전환되는 것을 확인하였다.

## 3. 아민 2종 추가 시료의 증발량 대비 pH 및 점도 변화측정 결과

Fig. 3은 S-B1과 S-B2 시료에서 누적 증발량에 따른 pH 및 점도 변화의 평균 거동을 나타낸다. 이하 (가)-(다)에서는 Fig. 3을 바탕으로 누적 증발량과 pH, 점도, 그리고 pH-점도의 상관관계를 정량적으로 논의한다.

### 3.1. 누적 증발량과 pH의 상관관계

각기 다른 아민을 투입한 pH 9.0 이상의 S-B1과 S-B2 시료조건에서도, 누적 증발량이 증가할수록 pH가 뚜렷하게 감소하는 경향을 보인다. S-B1의 전체 기울기가  $-0.190\text{pH}\cdot\%$ , Pearson  $r=-0.93$ 로 관찰되었고, S-B2의 전체 기울기가  $-0.165\text{pH}\cdot\%$ , Pearson  $r=-0.99$ 로 기울기 값이 유사하였다. 두 개 시료 모두 CV가 0.24-1.18%로 낮은 수치로 기록됨으로써 아민 조건이 달라도 pH 감소 민감도·재현성이 비슷하게 유지되었다.

구간 별로는 두 시료 평균을 계산하면, 0-2%에서 기울기  $-0.347\text{pH}\cdot\%$ 로 가장 급격히 감소 한 뒤, 2-3.5%에서 기울기가  $-0.205\text{pH}\cdot\%$ 로 다소 완화되는 전이를 거쳐, 3.5-4.6%에서 다시 기울기가  $-0.286\text{pH}\cdot\%$ 로 하강되는 경향이 확인되었으므로 이는, 이전 베이스 시료 실험과 유사한 3단 패턴

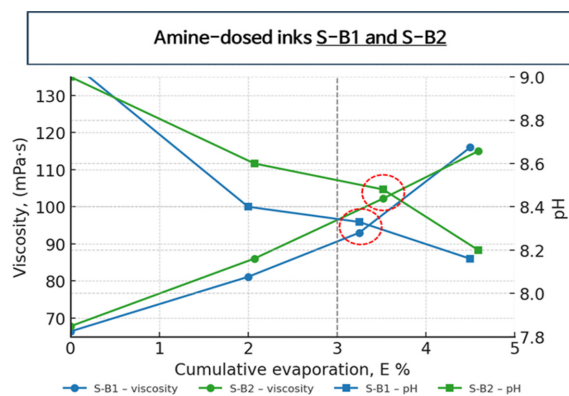


Fig. 3. Correlation between viscosity and pH as a function of cumulative evaporation (E%) for S-B1 and S-B2.

으로 관찰되었다.

### 3.2. 누적 증발량과 점도의 상관관계

점도는 아민 투입 조건에서도 누적 증발량에 대해 완전한 선형 증가를 보이며, Pearson  $r=0.95$ 로 강한 양의 상관관계가 확인되었다. 시료별 전체 평균 기울기 역시, S-B1에서 기울기가  $10.36\text{ mPa}\cdot\text{s}\cdot\%$ 로 관찰되었으며 S-B2에서 기울기가  $10.26\text{ mPa}\cdot\text{s}\cdot\%$ 로 사실상 동일해, 초기 pH와 아민 투입량 차이에도 증발 1%당 점도 상승 민감도가 동일 수준으로 나타났다.

구간별 평균으로는 0-2%에서 기울기가  $8.54\text{ mPa}\cdot\text{s}\cdot\%$ 의 완만한 증가 이후, 3-5%에서 기울기가  $16.52\text{ mPa}\cdot\text{s}\cdot\%$ 로 약 2배로 커지는 급상승으로 전환되며, CV는 10-13% 수준으로 유지되어 베이스 실험 결과와 동일하게 E% 단일 변수 기반 선형 모델이 점도 보정·제어에 유효하다는 근거가 된다.

### 3.3. pH-점도의 상관관계

아민 투입계에서도 베이스 시료 실험과 동일하게 역상관 구조가 유지되었다. 특히  $E\approx 3\%$ 를 경계로 거동이 달라지는데, 3% 미만에서는 pH와 점도가 비교적 완만하게 함께 이동하며 두 잉크의 차이도 제한적이지만, 3% 이상에서는 pH 변화 폭은 상대적으로 작아지는 반면 점도가  $20\text{ mPa}\cdot\text{s}$  안팎으로 빠르게 상승하고 잉크 간 격차 및 곡선 교차가 나타나는 고농축 영역으로 전환되었다. 따라서 아민 보정 조건에서도 3%를 기준으로 pH·점도 허용 범위와 보정 전략을 구간별로 차등 적용하는 접근이 타당하다고 정리된다.

## 4. 누적 증발량에 따른 표면 변화 측정

Fig. 4를 참조하면, 누적 증발량 3% 지점에서 응집 현상이 관찰되었고, 5% 구간에서는 증발 표면이 겔화 상태로 전이되는 양상이 관찰되었다.

## 5. 실험 고찰

누적 증발량(E%)이 증가할수록 pH는 감소하고 점도는 증가하는 경향이 반복적으로 관찰되었다. 이러한 pH 감소는 본 잉크가 알칼리 가용형 수지(ASR, 카르복실기 보유), 아크릴 라텍스, 안료, 물에 더해 휘발성 아민을 포함하는 조성이며, 개방계 증발에서 물만 감소하는 것이 아니라 휘발성 염기 성분도 함께 소실되어 용액의 염기성 기여가 약화되기 때문이다<sup>15-17)</sup>. 이에 따라 pH가 하강하면 Henderson-Hasselbalch 관계에 의해 ASR의 중화도(이온화도,  $\alpha$ )가 감소( $-\text{COO}^-$  비율감소,  $-\text{COOH}$  비율상승)하고, 알칼리 유지 능력과 분산 안정성이 동시에 약화되는 방향으로 평형이 이동한다<sup>16,18)</sup>.

점도 증가는 우선적으로 증발로 연속상이 감소하면서 고형분 체적분율이 증가해 분산계가 고농축 상태로 이동하기

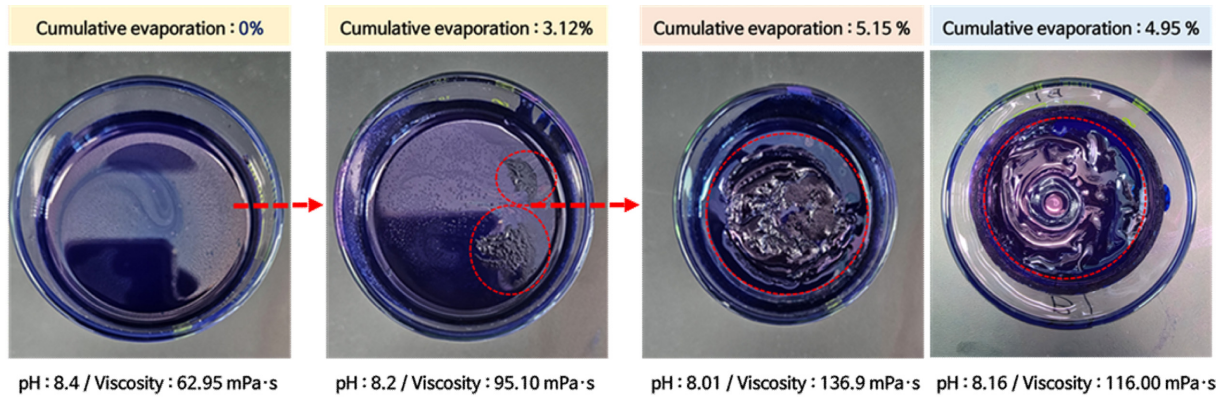


Fig. 4. Surface morphology of the water-based gravure ink as a function of cumulative evaporation (E%), pH, and viscosity.

때문에 발생한다<sup>15,19</sup>). 여기에 pH 하강과 이온환경 변화가 중첩되면 전하 안정화가 약해져 입자·수지의 플록/네트워킹이 발달하고, 구조 점도가 커져 점도 상승이 가속될 수 있다<sup>2,4</sup>). 따라서 pH가 점도를 직접 결정한다고 단정하기보다는, pH 변화가 분산 안정성 및 미세구조 변화를 매개하여 점도 거동에 기여하는 간접 연동으로 정리하는 것이 타당하다<sup>16,18</sup>).

또한 본 실험은 폐계 농축이 아니라 개방계 증발이므로, NH<sub>3</sub>와 같은 휘발성 염기 성분의 이탈이 우세한 경우 물 농축으로 [OH<sup>-</sup>]가 증가해 pH가 상승할 것 이라는 단순 가정이 성립하기 어렵고, 오히려 pH 하강이 나타날 수 있다<sup>16,20,21</sup>). 한편, 본 연구의 누적 증발량은 질량 감소 기반 상대변수이므로 물뿐 아니라 공용제·휘발성 아민 등 모든 휘발 성분의 손실을 포함하며<sup>15</sup>), 질량감소만으로 물/아민 손실을 성분별로 분리 정량하기에는 한계가 있다. 따라서 후속 연구에서는 HS-GC, 트랩 포집, 적정 등을 통해 아민 잔류량을 정량하여 pH 변화와의 관계를 추가로 검증할 필요가 있다.

## 요 약

누적 증발량이 증가할수록 pH는 감소하고 점도는 증가하는 경향이 베이스(S-A1)와 아민 투입계(S-B1/S-B2) 모두에서 반복적으로 확인되었다. 특히 누적증발량 3%를 경계로 3% 미만에서는 변화가 비교적 완만한 반면, 3% 이상에서는 점도 상승이 가속되고 변동성도 커지는 고농축 구간으로 전환되었다. 표면 관찰에서도 3%에서 응집/피막 징후, 5%에서 겔화 전이가 확인되어, 3%를 pH·점도 관리 및 보정 전략을 차등 적용해야 하는 공정 임계점으로 제시한다 이는 누적 증발량 3% 초과 시에 잉크 이송·레벨링이 불안정해져 닥터 스트릭/핀홀, 농도·색 균일도 저하, 망점 번짐 등 인쇄 품질 불량률이 증가되기 때문이다<sup>22,25</sup>).

pH는 30-60 s 구간에서 안정화가 확인되어 60 s 값을 대표

값으로 사용하였고, 점도는 2회 반복 평균으로 처리하였다.

## 참고문헌

1. Simseker, O., Kurt, B., Arman, E. 2012. Effects of Different Solvents to Printability in Gravure Printing. *Asian J. Chem.* 24(11): 5253-5256.
2. Kim, K.-R. & Lee, Y.-K. 2020. Volatile content and VOCs emitted from inks used in the printing industry. *J. Odor & Indoor Environ.* 19(2):166-176.
3. Hong, Seok-In. 2025. Trends in eco-friendly printing technology for food packaging. *Food Science & Industry*, 58(1):66-75.
4. U.S. Environmental Protection Agency. 1997. Reducing VOCs in Flexography: A Case Study. U.S. EPA, Washington, DC, USA.
5. Dan, J. 1993. Development Trends of Water-Based Gravure Inks. *Korean J. Packag. Sci. Technol.* 3(1): n.p.
6. Rentzhog, M. 2006. Water-Based Flexographic Printing on Polymer-Coated Boards. Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
7. Lee, D.; Wohlfarth, J. 1999. Water-based gravure printing ink. US Patent 5,972,088.
8. Andre, R.S.; et al. 2022. Recent progress in amine gas sensors for food quality monitoring: Novel architectures for sensing materials and systems. *ACS Sens.* 7(8): 2104-2129.
9. Solvay S.A. 2020. Amine-imino dialcohol neutralizing agents for low volatile compound aqueous organic coating compositions and methods for using same. EP Patent 3242907B1.
10. Anchawale, S., Raghav Rao, M.P., Nerkar, Y. 2020. Optimization of water-based ink formulation: Influence of raw materials and their relative proportions on performance of printing inks. *J. Print Media Technol. Res.* 9(3): 145-161.
11. Salaoru, I., Morris, D., Ware, E., Nama Manjunatha, K. 2024. Influence of Surface Chemical and Topographical Properties on Morphology, Wettability and Surface Coverage of Inkjet-Printed Graphene-Based Materials. *Micromachines* 15(6): 681.
12. ISO. 2013. ISO 976: Rubber and plastics — Polymer dispersions and rubber latices — Determination of pH. ISO,

- Geneva, Switzerland.
13. American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Method 4500-H<sup>+</sup> B (Electrometric Method). APHA/AWWA/WEF, Washington, DC, USA.
  14. Fernandes, I.J., Aroche, A.F., Schuck, A., et al. 2020. Silver nanoparticle conductive inks: synthesis, characterization, and fabrication of inkjet-printed flexible electrodes. *Sci. Rep.* 10: 8878
  15. Barcelos, G.F.J., Souza, P.D.C. and Cotting, F. 2021. Analysis of drying process of water-based architectural paints. *Orbital: Electron. J. Chem.* 13(1): 1-10.
  16. Hester, R.D. and Squire, D.R., Jr. 1997. Rheology of Waterborne Coatings. *J. Coat. Technol.* 69(864): 109-114.
  17. Wang, T., Canetta, E., Weerakkody, T.G., Keddie, J.L. and Rivas, U. 2009. pH-dependence of the properties of waterborne pressure-sensitive adhesives containing acrylic acid groups. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 1(3): 631-639.
  18. Kheirandish, S., Guybaidullin, I., Wohleben, W. and Willenbacher, N. 2008. Shear and elongational flow behavior of acrylic thickener solutions. Part I: Effect of intermolecular aggregation. *Rheol. Acta* 47: 999-1013. (DOI:10.1007/s00397-008-0292-1).
  19. Krieger, I.M. and Dougherty, T.J. 1959. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Trans. Soc. Rheol.* 3: 137-152
  20. National Institute of Standards and Technology (NIST). Ammonia (CAS 7664-41-7), NIST Chemistry WebBook. (accessed 2025-12-15).
  21. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2004. Toxicological Profile for Ammonia—Analytical Methods (Chapter 7). U.S. DHHS.
  22. Gane, P.A.C., Matthews, G.P. and Schoelkopf, J. 2003. Offset ink tack and rheology correlation part 1: ink rheology as a function of concentration. *TAPPI J. Online Exclusive*, June 2003, 2(6).
  23. ASTM International. 1999. Standard terminology relating to print problems. ASTM D6488-99.
  24. Davies, G.R., Hawthorne, G., Bould, D.C. and Claypole, T.C. Automatic viscosity control in gravure printing. *Proceedings/Conference(TAGA)*
  25. Weichmann, A., Sprinzing, T. and Galus, M. 2023. Ink spreading in gravure printing. *Advances in Printing and Media Technology.* 49: 87-98.

투고: 2025.11.12 / 심사완료: 2025.12.01 / 게재확정: 2025.12.23