

# 1, 2-Octanediol Galactoside 합성을 위한 최적 조건 및 정제 연구

정경환<sup>†</sup>

한국교통대학교 생명공학전공, 교수  
(2021년 12월 30일 접수: 2022년 2월 24일 수정: 2022년 2월 24일 채택)

## The Study of Optimal Conditions for Synthesis and Purification of 1, 2-Octanediol Galactoside

Kyung-Hwan Jung<sup>†</sup>

*Department of Biotechnology, Korea National University of Transportation,  
Jeungpyung, Chungbuk 27909, Republic of Korea  
(Received December 30, 2021; Revised February 24, 2022; Accepted February 24, 2022)*

**요 약** : 향균력과 보습력을 동시에 가지고 있는 화장품용 첨가제인 1, 2-octanediol (OD)의 피부 문제점을 개선하기 위하여 galactoside 유도체인 1, 2-octanediol galactoside (OD-gal)를 대장균  $\beta$ -galactosidase ( $\beta$ -gal)을 이용하여 합성하였다. 이 때,  $\beta$ -gal은 4.5 U/ml, OD 농도는 150 mM, pH는 7.0, 그리고, 온도는 37°C가 OD로부터 OD-gal을 합성하는 최적 조건이었다. 이 조건에 24 시간 동안 150 mM의 OD로부터 약 55.9 mM의 OD-gal이 합성되었고, 이 때, conversion 수율(mole 기준)은 약 37.2% 였다. 또한, 9 ml의 반응액에서 67.4 mg의 순수한 OD-gal을 정제할 수 있었으며, 반응액에 들어 있는 OD에서부터 정제를 포함하는 전체 합성수율은 weight 기준으로는 약 34.1% 이고, mole 기준으로는 약 16.2% 정도였다. 이러한 연구결과는 보다 안전한 화장품용 첨가제로서 OD-gal의 산업화에 기초자료로서 도움을 줄 것으로 생각된다.

**주제어** : 1, 2-옥탄디올 갈락토사이드, 베타-갈락토시테이즈, 화장품용 첨가제, 최적합성조건, 생산수율

**Abstract** : 1, 2-Octanediol (OD) as a cosmetic additive has been used simultaneously as a preservative and humectant. To solve the skin problem by 1, 2-octanediol (OD), we have synthesized 1, 2-octanediol galactoside (OD-gal) using *Escherichia coli*  $\beta$ -galactosidase ( $\beta$ -gal). Meanwhile, the optimal amount of  $\beta$ -gal, OD concentration, pH, and temperature for OD-gal synthesis were 4.5 U/ml, 150 mM, 7.0, and 37°C, respectively. Under these conditions, 150 mM OD was converted into about 55.9 mM OD-gal during 24 hours, in which the conversion yield (mole basis) was about 37.2%. In addition, OD-gal of 67.4 mg could be purified from a 9 ml reaction mixture, in which the overall synthesis yield from OD to the purified OD-gal was about

---

<sup>†</sup>Corresponding author  
(E-mail: [khjung@ut.ac.kr](mailto:khjung@ut.ac.kr))

34.1% (weight basis) and 16.2% (mole basis), respectively. We are expecting that these results will be helpful to develop a safer additive in the cosmetic industry as basic data.

*Keywords* : 1, 2-Octanediol galactoside,  $\beta$ -Galactosidase, Cosmetic additive, Optimal condition for synthesis, Production yield

## 1. 서론

화장품용 첨가제 중에서 1, 2-octanediol (Molecular formula:  $C_8H_{18}O_2$ , CAS number: 1117-86-8, 일명 Caprylyl glycol)은 항균력과 보습력을 동시에 가지고 있어서 여러 제형의 화장품에 많이 사용되고 있다[1,2]. 하지만, 1, 2-octanediol (OD)에 의한 피부 문제점 등이 많이 알려지고 있어서[3,4,5], 이를 극복하기 위한 연구가 본 연구팀에 의해서 그 동안 시도되어 왔다. 이미 수행된 연구에서 OD로부터  $\beta$ -galactosidase ( $\beta$ -gal)를 이용하여 OD에 galactose 한 분자를 결합시킨 1, 2-octanediol galactoside (OD-gal)가 합성되어지는 것을 확인하고[6], 이 때, 합성된 OD-gal의 항균력과 인간 피부세포(HaCaT cell, human keratinocyte cell)에 대한 독성을 분석을 수행하여 보았다. 그 결과 OD-gal은 미생물에 대하여 어느 정도 항균력을 유지하고 있었으며, 인간 피부세포에 대한 독성이 OD에 비하여 괄목할 정도로 작다는 것을 확인할 수 있었다[7]. 특히, 대장균에 대한 항균력에 대하여서는 실제 시판하고 있는 제품에서도 확인할 수 있었다[8]. OD-gal을 이러한 결과를 근거로 OD의 galactoside 유도체를 합성하여 보다 피부에 안전한 화장품용 첨가제를 개발할 가능성이 있다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 선행연구[6,7]와 연관된 계속 연구로서 OD-gal의 산업적 이용을 위한 경제성 있는 합성공정 개발을 위한 기초연구이며, 이를 위하여 첫 단계로  $\beta$ -gal을 이용한 OD-gal 합성반응의 최적조건을 찾기 위한 연구를 진행하였고, 두 번째로 최적조건에서 순수한 OD-gal을 어느 정도 수율로 얻을 수 있는지에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 결과를 기반으로 상업적인 OD-gal 합성 및 정제를 위한 기초 data를 구축할 수 있었으며, 이를 바탕으로 보다 안전한 OD-gal의 화장품 첨가제로서의 산업화 연구를 가속화 시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시약

1, 2-Octanediol은 Sigma-Aldrich (St Louis, MO, USA)에서 구입하였고, TLC (thin-layer chromatography) plate는 MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG (Düren, Germany)의 precoated plates SIL HD UV<sub>254</sub> (MN809222)를 사용하였다. OD-gal 정제를 위한 Silica gel은 Zeochem (Uetikon am See, Switzerland)의 ZEOprep 60 (60-200  $\mu$ m)을 사용하였으며, 그 외 사용된 시약은 reagent-grade를 사용하였다.

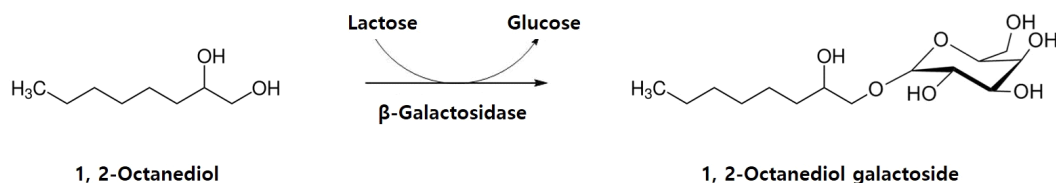


Fig. 1. Enzymatic synthesis of OD-gal using  $\beta$ -gal.

## 2.2. $\beta$ -Gal을 생산하는 재조합 대장균

본 연구에 사용된 효소  $\beta$ -gal은 재조합 대장균에서 만들어졌으며, 재조합 대장균 세포 자체를 효소  $\beta$ -gal로 실험하였다. 재조합 대장균은 *araBAD* 프로모터 시스템에 의하여 발현이 조절되는 vector에  $\beta$ -gal 유전자가 삽입되어 있으며, 이러한 재조합 대장균 제작, 재조합  $\beta$ -gal을 함유한 대장균의 배양방법, 그리고 효소  $\beta$ -gal의 unit를 측정하는 방법 등에 대하여서는 선행연구에서 자세히 기록하였다[9].

## 2.3. $\beta$ -Gal을 이용한 OD-gal 합성 최적 조건 및 정제

OD-gal 합성조건 최적화 연구는 50 ml conical tube에서 수행하였다. 300 g/l의 lactose와  $\beta$ -gal (대장균 세포), OD를 50 mM phosphate buffer에 녹인 후, shaking incubator (100 rpm) 에서 36 시간 동안 반응시켜 OD-gal을 합성을 확인하였다. 본 연구에서는 반응액의  $\beta$ -gal과 OD양, 그리고 pH와 온도의 최적 합성 조건에 대하여 조사하였다.

OD-gal 정제를 위하여 9 ml 반응액을 용매 (water-immiscible solvent)로서 9 ml ethyl acetate (EA) 혹은 9 ml methylene chloride (MC)를 이용하여 추출/분획하였다. 자세한 추출/분획 방법은 선행 논문에서 자세히 기술하였으며 [10,11], 본 연구에서는 3회 추출/분획을 실시한 후, 약 8 ml의 물 층을 모아서 OD-gal 정제를 위하여 silica gel chromatography (silica gel: 250 ml, 이동상; acetonitrile : distilled water = 85 : 15 (v/v))를 실시하였다. 그리고, OD-gal이 포함된 분획을 TLC 분석으로 확인한 후, 이를 모아서 rotary vacuum evaporator를 이용하여 농축하였다.

## 2.4. TLC 분석

20 × 10 cm TLC plate에 1.0  $\mu$ l 시료를 loading하고 이동상 (ethyl acetate : methanol : distilled water = 17 : 2 : 1 (v/v))을 이용하여 전개하였다. 그리고 staining solution (1.5 g  $\text{KMnO}_4$ , 10 g  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 1.25 ml 10% NaOH in 200 ml distilled water)을 TLC plate에 뿌린 후, 80°C oven에서 15 분간 말려서 spot을 확인하였다.

최적 합성조건 조사를 위한 연구에서는 TLC plate 위의 합성된 OD-gal 이미지를 스캔한 후, AlphaEase FC software (Alpha Innotech, San Leonardo, CA, USA)를 이용하여 이미지 면적을 계산하고, 이를 이용하여 상대적인 OD-gal 합성량을 계산하여 분석하였다. 마찬가지로 OD 농도를 정량분석 할 경우에도 OD의 TLC plate 위의 이미지를 스캔하고, 이미 언급한 software로 OD의 이미지 면적을 계산하였다. 이 때, OD의 정량을 위한 standard curve를 만들기 위하여, 먼저 0.25~1.0%의 standard OD의 이미지 면적을 계산하였으며, 이를 이용하여, OD 농도와 이미지 면적과의 관계 그래프를 구하였다. 그리고, 이 그래프에서 구한 관계식을 이용하여 반응물에서의 OD 농도를 계산하였다. 반응물에서의 OD-gal 합성량은 합성반응에서 OD에서 OD-gal로 모두 conversion 되었다고 가정하고 OD 감소량으로부터 계산하였으며, OD로부터 OD-gal로의 전환수율 (conversion, %)은 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Conversion (\%)} = (\text{OD}_0 - \text{OD}_t) / \text{OD}_0$$

( $\text{OD}_0$  = 반응 초기의 OD 양,

$\text{OD}_t$  = t 시간에 OD 양)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 OD-gal의 최적 합성조건

OD-gal의 최적 합성조건을 조사하기 위하여 반응액 중의  $\beta$ -gal 농도, OD 농도, 그리고 반응액의 pH와 온도에 대하여 살펴보았다. 선행연구 [12,13]에서 수행했던 것과 같이 각각의 조건에서 TLC 분석을 실시하였고, 합성된 OD-gal의 이미지를 분석하여 상대적으로 최고의 OD-gal 합성을 보여주는 조건을 찾아냈다. 그 결과 Fig. 2와 같은 결과를 얻을 수 있었고, OD로부터 OD-gal의 최적 합성조건은  $\beta$ -gal은 4.5 U/ml, OD 농도는 150 mM, pH는 7.0, 온도는 37°C 였다.

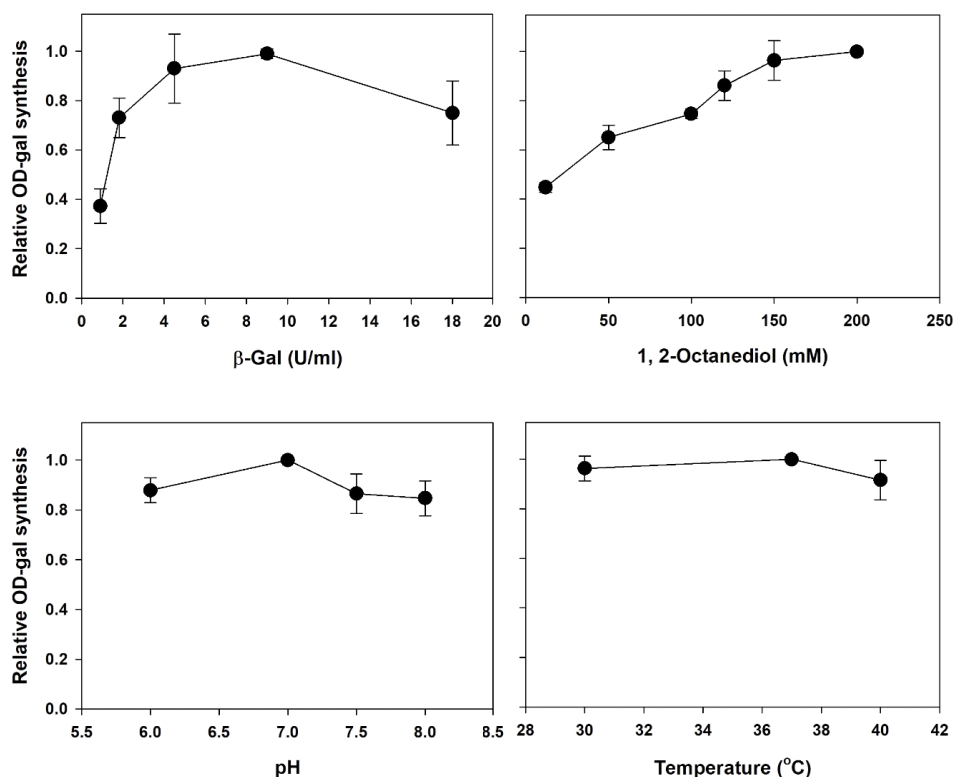


Fig. 2. Optimal conditions for OD-gal synthesis by *E. coli*  $\beta$ -gal. (A) optimization of the amount of  $\beta$ -gal (50 mM HD, pH 7.0, 40  $^{\circ}$ C); (B) optimization of HD concentration (4.8 U/mL  $\beta$ -gal, pH 7.0, 40  $^{\circ}$ C); (C) pH optimization (4.8 U/mL  $\beta$ -gal, 75 mM, 40  $^{\circ}$ C); (D) temperature optimization (4.8 U/mL  $\beta$ -gal, 75 mM, pH 7.0). Lactose concentration in the reaction mixture was 300 g/L. Values of relative OD-gal synthesis were calculated on the basis that the maximum synthesis of OD-gal was 1.0 under each condition, in which OD-gal syntheses were measured as scanned TLC spot areas. All measurements were conducted three times ( $n=3$ ) using the same sample, and the average and standard deviation were calculated.

### 3.2. 최적 반응조건에서 OD-gal의 합성

OD로부터 OD-gal 최적 합성조건은 찾아낸 후, 그 조건에서 OD-gal 합성반응을 수행하였다. Fig. 3과 같이 24 시간 동안 합성반응을 수행하여, OD-gal 합성을 TLC 분석으로 확인하였다. 그리고, OD-gal 합성량을 정량적으로 분석하기 위하여, OD의 감소량을 측정하여 OD-gal의 합성량을 계산하기로 하였다. 이를 위하여 Fig. 3에서와 처럼 0.25에서 1.0%의 OD standard를 합성 반응액과 같이 TLC 분석하였으며, 이를 이용하여 TLC plate 위의 standard OD 이미지 면적

과 OD 농도와의 상관관계를 구하였다. Fig. 3과 같은 TLC 분석을 2회 더 수행하여, 총 3회 실시하였으며, 그 결과 Fig. 4와 같은 TLC plate 위의 이미지 면적과 OD 농도와의 직선관계식을 얻을 수 있었으며, 이를 이용하여 합성반응 중 OD-gal의 합성량을 계산하는데 사용하였다. 이때, 최적 조건에서 처음 반응액 중에 약 2% (150 mM)의 OD가 첨가되기 때문에 OD의 정량분석을 실시할 때에는 반응액을 1/2 희석하여 TLC 분석에 사용하였다.

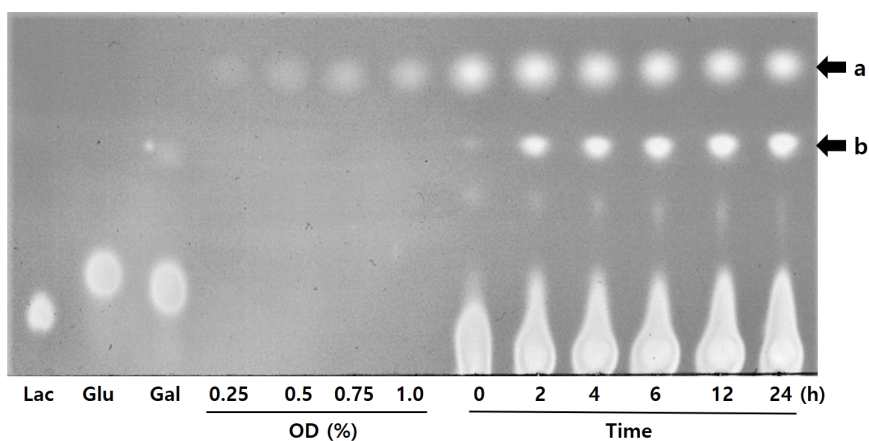


Fig. 3. TLC analysis of OD-gal synthesis under optimal conditions during 24 hours. Standard OD samples were analyzed simultaneously at the range from 0.25 to 1.0%. Lac, Glu, and Gal indicate 1% standards of lactose, glucose, and galactose, respectively. Arrow a and b indicate OD and OD-gal, respectively.

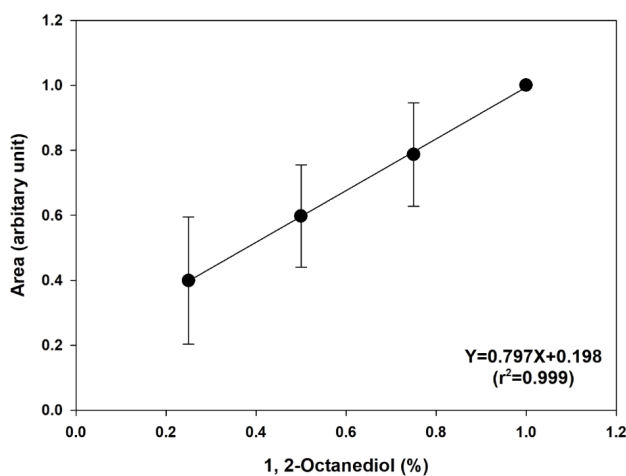


Fig. 4. Relationship between OD concentrations (%) and relative area of OD's spots on TLC plate. Area values of each OD concentration were calculated on the basis that the area of 1% OD was 1.0. TLC analysis of standard samples (0.2~1.0% OD) was carried out three times (n=3), and the average and standard deviation were calculated. The result of linear regression of OD (%) vs. relative area was shown at the right bottom of the figure.

Fig. 5는 Fig. 3 실험과 같은 최적 합성조건에서의 실험을 2회 더 실시하여, 총 3회 TLC 분석하여 얻은 결과이며, OD의 감소와 OD-gal의 합성 그리고, OD로부터 OD-gal이 conversion되는 수율(% , mole 기준)을 보여 주고 있다. 24 시간

동안 OD는 150 mM에서 약 94.1 mM로 감소하였고, OD-gal은 약 55.9 mM 합성되었다. 그리고, 이 때, OD에서 OD-gal로의 conversion 수율은 약 37.2% 였다.

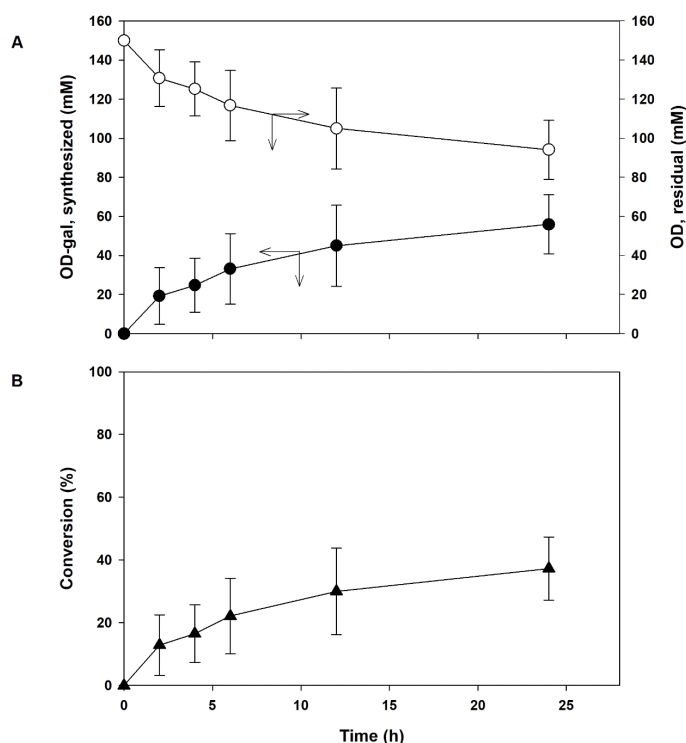


Fig. 5. Time-course profiles of OD and OD-gal under optimal conditions for OD-gal synthesis; (A) synthesized OD-gal and residual OD, (B) the percent conversion (mole basis) of OD to OD-gal. All measurements were performed three times ( $n=3$ ) using the same sample, and the average and standard deviation were calculated.

본 연구팀에서 이미 수행한  $\beta$ -gal을 이용한 transgalactosylation 반응으로 chlorphenesin (CPN), phenoxyethanol (PE), 1, 2-hexanediol (HD), benzyl alcohol (BzOH), 그리고 phenylethanol (PhE)의 galactoside 유도체가 합성되었다. 그 때의 각각의 합성 수율(mole basis)은 약 64-67% [14,15], 약 37.5-50% [16,17], 약 96% [10], 약 72% [12], 그리고 약 57.9% [13] 정도였다. 여기서 분자 구조가 유사하고 탄소 수에서 2개가 적은 HD의 galactoside 유도체인 1, 2-hexanediol galactoside (HD-gal) 합성 수율과 본 연구에서 합성한 OD-gal과의 합성 수율을 비교하여 보면, 약 96%와 37.4%로 약 2.5배 이상 차이가 난다. 다시 말하면, HD-gal의 합성 수율이 OD-gal 합성 수율보다 약 2.5배 이상 더 큰 것으로 관찰된다. 이러한 현상은 탄소 수 6개와 8개인 두가지 1, 2-alkanediol의 탄소 개수의 차이에서 비롯된 결과라고 생각되며, 이러

한 차이가 HD와 OD의 물에 대한 용해도(HD = 7.5 g/l, OD = 3.0 g/l) 차이를 만들고, 대장균 세포 안에 발현되어 있는  $\beta$ -gal과의 반응에 참여하는 분자수의 차이를 초래했을 것으로 추론된다. 아마도 이러한 이유가 OD의 합성 수율이 HD에 비하여 감소된 것에 대한 적절한 설명일 것으로 생각된다.

### 3.3. 반응물에서 OD-gal의 정제

최적 조건에서 합성반응을 수행한 후, 반응액에서 OD-gal을 정제하는 첫 단계로서 반응액 9 ml를 MC와 EA를 이용하여 3회 추출/분획하는 실험을 수행하였다. 추출/분획을 실시할 때, 먼저 물 층을 모은 후, 이 물 층을 다시 용매로 추출/분획하는 방법을 3회 연속해서 실시하였다. 이때, 매회마다 물과 용매층을 모두 모아서 TLC 분석을 Fig. 6과 같이 실시하였다. Fig. 6에서와 같이 MC를 이용하여 추출/분획할 때, 물층으로

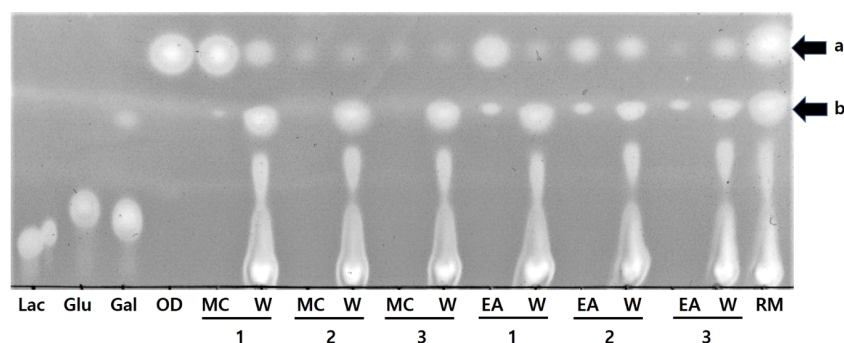


Fig. 6. TLC analysis after the extraction of the reaction mixture using MC and EA. MC, EA, and W indicate the phases of methylene chloride, ethyl acetate, and water, respectively, after the extraction of the reaction mixture. Numbers 1, 2, and 3 represent the first, second, third extraction, respectively, using MC and EA. Lac, Glu, Gal, and OD represent 1% standards of lactose, glucose, galactose, and 1, 2-octanediol, respectively. RM represents a reaction mixture. Arrows a and b indicate OD and OD-gal, respectively.

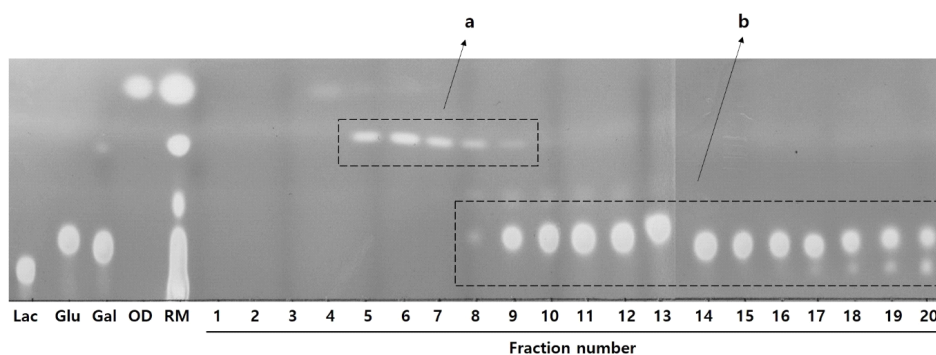


Fig. 7. TLC analysis of the fractions from silica gel chromatography for purified OD-gal. Lac, Glu, Gal, OD, and RM represent 1% standards of lactose, glucose, galactose, 1, 2-octanediol, and reaction mixture, respectively. Dashed boxes a and b indicate OD-gal and monosaccharides, respectively.

OD-gal이 완전히 모여지는 것을 확인할 수 있었다. EA를 사용하였을 경우에는 EA층에서 물층으로 이동하지 못한 OD-gal이 관찰되었다. 그래서, 반응액에서 OD-gal을 정제하기 위한 첫 단계로서 MC를 이용한 추출/분획을 사용하기로 하였다.

OD-gal의 정제를 위한 두번째 단계로 silica gel chromatography를 이용하였다. 이를 위하여 MC를 이용한 추출/분획을 3회 실시하고, 여기서 얻어진 약 8 ml의 물 층을 모아서 silica gel chromatography에 loading 하였다. 약 250 ml의 이동상을 흘려서, OD-gal이 포함된 분획을 Fig. 7과 같이 TLC 분석으로 확인하였다. 이 중에서

fraction number 5, 6, 그리고 7번을 모아서 rotary vacuum evaporator를 이용하여 농축하였더니, 67.4 mg의 순수한 OD-gal 추정 물질을 확인할 수 있었고, 이를 100배 희석하여 TLC를 분석한 결과 Fig. 8과 같이 순수한 OD-gal이 확인되었다. 그리고, 반응액에 들어 있는 OD에서부터 정제를 포함하는 전체 합성수율을 계산하여 보았더니, weight 기준으로는 약 34.1% 이고, mole 기준으로는 약 16.2%로 계산되었다. 한편, 선행연구에서 1, 2-hexanediol galactoside와 phenoxyethanol galactoside의 mole 기준 전체 합성수율은 약 8.9% [10]와 약 21.0% [11] 였

다. OD-gal의 선행연구 결과[6,7]와 함께 이러한 결과들은 앞으로 OD-gal의 화장품 첨가제로서의 상업적 이용을 위한 기초자료로서 유용하게 사용되어 질 수 있을 것으로 생각된다.

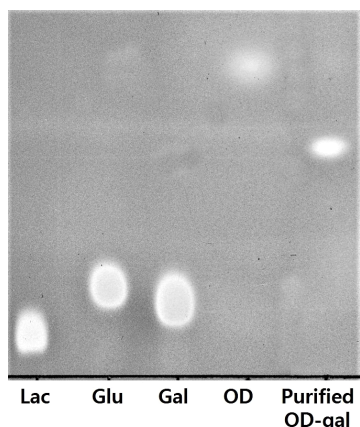


Fig. 8. TLC analysis of purified OD-gal. Lac, Glu, Gal, and OD represent 1% standards of lactose, glucose, galactose, and 1, 2-octanediol, respectively. Purified OD-gal represents 100 times-diluted purified OD-gal.

#### 4. 결론

대장균의  $\beta$ -gal을 이용하여 OD로부터 OD-gal을 합성하는 최적조건을 조사하였더니, 최적 합성조건은  $\beta$ -gal은 4.5 U/ml, OD 농도는 150 mM, pH는 7.0, 온도는 37°C 였다. 이 조건에 24 시간 동안 합성반응을 수행한 결과 150 mM의 OD로부터 약 55.9 mM의 OD-gal이 합성되었고, 이 때, conversion 수율(mole 기준)은 약 37.2% 였다. 그리고, 반응액에 들어 있는 OD에서부터 정제를 포함하는 전체 합성수율을 계산하여 보았더니, weight 기준으로는 약 34.1% 이고, mole 기준으로는 약 16.2% 였다. 이러한 합성반응의 정량적인 연구결과는 앞으로 OD-gal의 산업화를 위한 상업적 생산시스템 설계를 위한 기초자료로 쓰일 수 있을 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2020년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. 한국교통대학교 생명공학전공 안승혜, 이해원, 신재혁, 오승준, 이재혁 학생과 (주)케이티피 진홍중 소장님이 본 연구에 도움을 주었습니다.

#### References

1. N. Halla, I. P. Fernandes, S. A. Heleno, P. Costa, Z. Boucherit-Otmani, K. Boucherit, A. E. Rodrigues, I. C. F. R. Ferreira, M. F. Barreiro, "Cosmetics preservation: A review on present strategies", *Molecules*, Vol.23, No.7, pp. 1571, (2018).
2. W. Johnson Jr., W. F. Bergfeld, D. V. Belsito, R. A. Hill, C. D. Klaassen, D. Liebler, J. G. Marks Jr., R. C. Shank, T. J. Slaga, P. W. Snyder, F. A. Andersen, "Safety assessment of 1, 2-glycols as used in cosmetics", *International Journal of Toxicology*, Vol.31(Supplement 2), pp. 147S-168S, (2012).
3. E. Lee, S. An, S. -A. Cho, Y. Yun, J. Han, Y. K. Hwang, H. K. Kim, T. R. Lee, "The influence of alkane chain length on the skin irritation potential of 1,2-alkanediols", *International Journal of Cosmetic Science*, Vol.33, Vol.5, pp. 421-425, (2011).
4. E. Q. Coelho, S. L. C. Wu, R. S. Nunes, V. M. S. Reis, "Contact urticaria following the use of a cosmetic containing caprylyl glycol: A case report", *Contact Dermatitis*, Vol.8, No.4, pp. 308-309, (2019).
5. F. C. Kreeshan, J. D. L. Williams, "Allergic contact dermatitis to caprylyl glycol: A novel para-preservative allergen", *Contact Dermatitis*, Vol.83, No.5, pp. 418-419, (2020).



6. H. -Y. Lee, H. -J. Jin, S. H. An, H. W. Lee, K. -H. Jung, "Confirmation of enzymatic synthesis of 1, 2-octanediol galactoside using mass spectrometry and NMR spectroscopy", *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, Vol.38, No.3, pp. 824-831, (2021).
7. J. -S. Kim, H. -J. Jin, K. -H. Jung, "Comparative study of antimicrobial and cytotoxic effects of 1, 2-octanediol and 1, 2-octanediol galactoside", *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, Vol.38, No.3, pp. 629-637, (2021).
8. K. -H. Jung, "Antimicrobial activity of benzyl alcohol galactoside against *Escherichia coli*", *Journal of Biotechnology and Bioindustry*, Vol.9, No.1, pp. 1-8, (2021)
9. K. -H. Jung, "Enhanced enzyme activities of inclusion bodies of recombinant  $\beta$ -galactosidase via the addition of inducer analog after L-arabinose induction in the *araBAD* promoter system of *Escherichia coli*", *Journal of Microbiology and Biotechnology*, Vol.18, No.3, pp. 434-442, (2008).
10. Y. -O. Kim, K. -H. Jung, " $\beta$ -Galactosidase-catalyzed synthesis of 1, 2-hexanediol galactoside and its purification using ethyl acetate extraction followed by silica gel chromatography", *Journal of Korean Oil Chemists' Society*, Vol.33, No.3, pp. 498-506, (2016).
11. K. -H. Jung, "Purifications of phenoxyethanol galactoside and chlorphenesin galactoside using solvent extraction followed by gel chromatography", *Journal of Oil and Applied Science*, Vol.34, No.4, pp. 954-961, (2017).
12. K. -H. Jung, "Enzymatic synthesis of benzyl alcohol galactoside using *Escherichia coli*  $\beta$ -galactosidase", *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, Vol.36, No.2, pp. 582-590, (2019).
13. K. -H. Jung, "Optimal conditions for phenylethanol galactoside synthesis using *Escherichia coli*  $\beta$ -galactosidase", *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, Vol.38, No.1, 99-106, (2021).
14. S. E. Lee, T. M. Jo, H. -Y. Lee, J. Lee, K. -H. Jung, " $\beta$ -Galactosidase-catalyzed synthesis of galactosyl chlorphenesin and its characterization", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol.171, No.6, pp. 1299-1312, (2013).
15. S. E. Lee, H. -Y. Lee, K. -H. Jung, "Production of chlorphenesin galactoside by whole cells of  $\beta$ -galactosidase-containing *Escherichia coli*", *Journal of Microbiology and Biotechnology*, Vol.23, No.6, pp. 826-832, (2013).
16. K. -H. Jung, H. -Y. Lee, "*Escherichia coli*  $\beta$ -galactosidase-catalyzed synthesis of 2-phenoxyethanol galactoside and its characterization", *Bioprocess and Biosystems Engineering*, Vol.38, No.2, pp. 365-372, (2015).
17. H. -Y. Lee, K. -H. Jung, "Enzymatic synthesis of 2-phenoxyethanol galactoside by whole cells of  $\beta$ -galactosidase-containing *Escherichia coli*", *Journal of Microbiology and Biotechnology*, Vol.24, No.9, pp. 1254-1259, (2014).