

## 우뭇가사리로부터 레볼린산 생산공정을 위한 2단 산 가수분해

김준석<sup>†</sup>

경기대학교 화학공학과  
443-760 경기도 수원시 영통구 의의동 산96-4  
(2013년 5월 8일 접수, 2013년 6월 3일 채택)

### Production of Levulinic Acid from *Gelidium amansii* Using Two Step Acid Hydrolysis

Jun Seok Kim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, San 64-6 yuii-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi 443-760, Korea  
(Received 8 May 2013; accepted 3 June 2013)

#### 요 약

현재 1,2세대 바이오매스에 비해 상대적으로 값싸며 대량생산이 가능한 3세대 바이오매스인 해조류를 이용하여 다양한 바이오화합물 생산에 관한 연구들이 주목받고 있다. 이러한 이유는 해조류는 다른 바이오매스에 비해 빨리 자라 나고, 큰 장비 없이도 쉽게 수확할 수 있다는 장점뿐만 아니라 다양한 화합물로 전환할 수 있는 당이 풍부하고 공정을 통해 쉽게 전환할 수 있기 때문이다. 이러한 해조류로부터 다양한 바이오화합물을 생산하는데 있어서 한 가지로 resins, plasticizers, textiles, animal feed, coatings, antifreeze의 상업화된 공정에 사용할 수 있는 레볼린산(levulinic acid)이 있다. 본 연구에서는 해조류로부터 효과적으로 레볼린산을 생산하는데 있어서 온도, 시간, 산의 농도의 실험조건과 2단 산 처리 공정(two step acid treatment)을 통해 생산을 최적화 하는 조건을 탐색해 보았다. 첫번째 단계로는 상대적으로 저온에서 침지 공정을 통해 고상으로는 다양한 용도로 사용될 수 있는 셀룰로오스를 회수하고, 액상으로는 갈락토오스를 회수하였다. 2번째 단계로는 고온에서 회분식 공정을 통해 갈락토오스를 레볼린산으로 전환하였다. 실험 결과 2 단 산 처리 공정을 통해 초기바이오매스 기준 20.6%의 레볼린산 수율을 확보하였다.

**Abstract** – The study of bioproduct production from inexpensive biomass such as marine biomass has recently attracted considerable attention. Because, marine biomass which compared to land biomass, it can be grown rapidly and is easily cultivated without the need for expensive equipment. In addition, the carbohydrate contents are similar or higher than land biomass such as woody biomass and can be easily converted to chemicals through proper chemical processes. In the production of various biochemicals from marine biomass, levulinic acid is a highly versatile chemical with numerous industrial uses and has the potential to become a commodity chemical. It can be used as a raw material for resins, plasticizers, textiles, animal feed, coatings and antifreeze. In this study, experiments were carried out to determine the optimum conditions of temperature, acid concentration and reaction time for production of levulinic acid from marine biomass, *Gelidium amansii*, using two-step treatment. In the first hydrolysis step, solid-state cellulose which was used to produce ethanol by fermentation and liquid-state galactose which used to produce bioproduct such as levulinic acid were obtained through acid soaking. In the second hydrolysis step, the liquid-state galactose was converted into levulinic acid via a high-temperature reaction in a batch reactor. As a result, the overall production yield of *Gelidium amansii* to levulinic acid in the two-step acid hydrolysis was approximately 20.6% on the initial biomass basis.

**Key words:** Red Algae, Acid Hydrolysis, Levulinic Acid

#### 1. 서 론

현대사회는 산업화 이후 석유를 이용한 다양한 공정을 통해 유용한 화학물질을 얻어 왔다. 하지만 현재 많이 사용되어지는 석유는 수급, 환경오염 등의 많은 문제점들에 직면하고 있다. 지속적인 수요 증가와 함께 석유 공급의 독점에 따라 수급 불안정이 갈수록 심

화되고 있으며, 화석연료의 연소에서 발생하는 환경 오염물질의 폐해도 심각한 실정이다. 반면 이를 해결하기 위한 다양한 형태의 대체 자원 개발 노력들도 활발하게 이뤄지고 있고, 이에 대한 대안 중 한가지로 자연계에 풍부히 존재하며 지속적 생산이 가능한 생물체 및 관련 부산물인 바이오매스를 이용하는 바이오화합물에 대한 많은 연구개발이 진행되고 있다. 또한 이를 통해 중간 생성물 또는 부산물을 통해 공업적으로 활용 가능한 경제성 있는 여러 화학물질 생산에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다[1-5].

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: jskim84@kgu.ac.kr

이런 다양한 바이오화합물을 생산하는데 있어서 한가지로 resins, plasticizers, textiles, animal feed, coatings, antifreeze의 공정에 사용할 수 있는 레블린산(levulinic acid)이 있다[6].

바이오화합물을 생산하기 위해서 지금까지 옥수수, 사탕수수 등 유기물을 원료로 사용하기 때문에 친환경 측면에서 사용이 확대되어 왔다. 그러나 대부분의 원료물질이 식량이기 때문에 애그플레이션(Agflation)의 위험이 존재하여 앞으로 증가하는 다양한 화합물(예: 수송용 바이오에너지)에 대한 수요를 충족시키기에는 어려운 점이 있다[7]. 이에 식용으로 사용하지 않는 농임산 부산물인 볏짚, 폐목재 등 목질계 원료와 해양 바이오매스 등 2,3세대 바이오 원료 발굴을 통한 바이오화합물 생산 기술개발이 활발히 이루어지고 있다[4,8,9].

바다자원이 풍부한 국가에서는 해조류 및 수산물의 부산물을 이용한 바이오 화합물 생산에 대한 연구를 추진하고 있으며, 국내에서도 국토가 좁고 3면이 바다로 싸여 상대적으로 해양에너지가 풍부한 점을 활용하여, 최근에는 원료의 다변화를 위해 우뭇가사리를 포함한 다양한 해조류를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

해조류를 활용한 바이오화합물의 생산은 지상 식물을 이용한 생산에 비해 여러 가지 장점이 있다. 첫째, 대부분의 해조류는 목질계 원료와 마찬가지로 비식용이어서 원료 수급이 비교적 안정하다는 점이다. 두 번째로 지상 식물의 경우 한정된 토지를 활용해야 하므로 수요가 증가하면 경지의 확보에 어려움을 겪을 수 있지만 해조류는 해양을 활용하므로 가용 재배 면적이 넓어 경지 확보 어려움이 적다. 세 번째로 지상 식물의 대규모 경작 시 문제가 되는 물의 충분한 공급 문제가 해조류 양식에서 근본적으로 없다. 넷째, 해조류는 주로 연안 양식으로 행하여지고 성장 과정에서 바다의 유, 무기 영양분을 흡수하므로 연안의 부영양화 문제를 해결할 수 있다. 다섯째, 해조류는 여타 바이오원료에 비해 생장성이 우수하다. 특히 아열대 지방의 경우 연 4~6회 수확이 가능하다. 여섯째, 목질계를 바이오화합물의 원료로 사용할 경우 반드시 제거해야 하는 리그닌 성분이 존재하는데, 리그닌 성분은 단당체로 분해하기 힘들어 불순물로 남기 때문에 리그닌을 제거하려면 화학약품을 넣거나 열을 가해야 하는 과정이 복잡하다. 그러나 해조류는 리그닌 성분이 없으므로, 처리 공정이 상대적으로 간단하다. 마지막으로 해조류의 총에너지 전환수율이 높아 특히, 우리나라보다 인건비가 상대적으로 저렴하고 자연조건이 우수한 동남아 지역에서 대규모 양식을 통해 해양원료를 확보한다면 효율적으로 바이오화합물을 제조할 수 있다[10]. 해조류는 크게 대형조류(macroalgae)와 미세조류(microalgae)로 나누어지며 대형조류에는 다시 홍조류(red algae), 갈조류(brown algae), 녹조류(green algae)로 구분된다. 해조류는 긴 세월 동안 비료 또는 의약적인 목적으로 사용되어 왔으며, 특히 탄수화물의 구성성분비가 높다는 점과 쉽게 다른 화합물질로 전환이 가능하다는 점 때문에 다양한 화합물질 생산에 이용되어 왔다[10].

이에 본 연구에서는 홍조류인 우뭇가사리(*gelidium amnasil*)를 이용한 레블린산 생산에 대하여 연구해 보았다. 우뭇가사리의 주 성분인 글루코오스와 갈락토오스에 대해 효과적인 사용을 위하여 2단계 산 가수분해 방법을 통해 당 성분의 분리 및 레블린산 생산에 대해 진행하였다. 1단계 산 가수분해로는 액상으로 효과적으로 갈락토오스를 회수함과 동시에 글루칸을 고상에 잔류시켜 고상으로 발효가능당을 확보하고자 하였고, 2단계 산 가수분해 방법을 통해 회수된 액상의 갈락토오스를 가수분해를 통해 레블린산을 생산하고자

하였다. 각각의 단계에 대해 반응표면분석법(Response Surface Method)을 통해 온도, 황산의 농도, 반응 시간에 따라 최종적으로 레블린산(Levulinic acid)을 생산하는 최적 조건에 대하여 알아보았다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 원료

본 연구에 사용된 홍조류 계열의 바이오매스는 우뭇가사리이었다. 바이오매스의 반응 표면적을 높이기 위해 물리적 방법으로서 커터밀(cutter mill)을 사용하였고, 잘게 부순 바이오매스는 40 mesh의 sieve를 통과시켜 균일한 크기의 바이오매스를 선별하여 사용하였으며, 이후 Dry oven을 사용하여 45 °C에서 수일 동안 수분이 제거되도록 건조한 후 NREL 분석법[11]을 기초로 한 성분분석 및 가수분해 실험에 사용하였다.

### 2-2. 1단계 산 가수분해

먼저 250 ml의 병에 15 g의 우뭇가사리와 황산 1.5, 9 wt%의 농도로 1/6의 고/액비로 90 mL를 첨가하였다. 이 후 60~80 °C의 온도 범위에서 24~72시간 동안 150 rpm으로 진탕 반응기를 사용하여 1차 산 가수분해를 진행하였다. 반응 후 회수된 시료는 원심분리기(centrifuge)를 이용하여 4,000 rpm에서 원심분리를 통해 고상과 액상으로 분리하였다. 회수된 시료들은 고상의 경우 2 L 증류수에 의해 세척하여 중화하여 건조 후 성분분석을 실시하였고, 액상의 경우 회수하여 분석 후 다음 2단계 산 가수분해에 사용하였다.

### 2-3. 2단계 산 가수분해

2단계 산 가수분해는 1단계로부터 선정된 조건에서 회수된 용액 5 ml를 증류수 또는 황산과 혼합하여 각각 3.5, 7 wt%의 황산 농도로 조정하였다. 이 용액을 내구성 및 내화학성이 강한 스테인레스 스틸(Stainless steel) 회분식 반응기(141 cm<sup>3</sup>)에 넣고 140~180 °C의 온도 범위에서 20~60분 동안 반응시켜 당(sugar)을 레블린산으로 가수분해 하였다. 회수된 반응기는 냉각수를 통해 급속 냉각되었고, 이 후 용매를 회수하여 분석을 하였다.

### 2-4. 반응표면분석법

해조류인 우뭇가사리로부터 레블린산 생산을 위한 모델을 확립하기 위하여 반응표면분석법(Response Surface Methodology, RSM)에 의한 실험 계획을 설정하였다. 실험계획을 통해 최적화 된 조건을 탐색하기 위하여 2단계 산 공정에 대하여 각각 3수준-3인자 Central Composite Design (CCD)를 적용하였다.

반응표면분석법은 실험 분석 후 1단계 산 가수분해에서는 가장 높은 글루코오스 및 갈락토오스 회수율을 나타내는 조건을 확보하였고, 2단계 산 가수분해에서는 가장 높은 레블린산 수율을 나타내는 조건을 확보하였다.

### 2-5. 갈락토오스와 레블린산의 성분 분석

액상의 시료를 정량 및 정성 분석을 하기 위하여 HPLC(High Performance Liquid Chromatography; Waters Co., USA)를 사용하였다. 분석에 앞서 1단계 및 2단계에서 회수된 액상 시료를 CaCO<sub>3</sub>를 이용하여 pH 5~6으로 중화를 하였고, 중화 후 0.2 µm 필터를 이용하여 미세입자를 제거하였다.

HPLC에 사용된 컬럼(Column)은 Aminex HPX-87 P column을 사용하였고 검출기는 Waters 410 RI detector를 이용하여 분석하였다. 사용된 이동상은 0.018 M의 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 사용하였으며, 이때 이동상의 유속은 0.6 ml/min, 검출기의 온도는 85 °C로 맞추어 분석을 실시하였다.

2단계 가수분해 후 생성된 레불린산의 경우 식 (1)와 같이 이용하여 수율을 계산하였다[6].

$$\text{레불린산 수율(\%)} = \frac{\text{2단계 반응 후 생성된 레불린산(g)}}{\text{우뭇가사리의 갈락토오스 (g)}} \times 100(\%) \quad (1)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 성분

레불린산으로 전환이 가능한 우뭇가사리의 당성분을 분석하기 위하여 미국 신재생 에너지 연구소(NREL)의 분석방법에 따라 분석을 실시하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 홍조류는 일반적으로 agarose와 agarpectin 및 셀룰로오스로 구성되어 있는데, agarose와 agarpectin은 갈락토오스(D-galactose)와 3,6-anhydro-L-galactopyranose로 전환이 가능하다. 분석결과 레불린산으로 전환이 가능한 6탄당의 글루코오스 18.46%와 갈락토오스 28.41%를 성분 분석을 통해 확인하였다. 기타 성분의 경우 HPLC 장비만으로는 측정이 되지 않는 3,6-anhydro-L-galactopyranose 및 lipid에 의한 것으로 예측된다. 본 논문에서는 측정 가능한 당을 기준으로 실험을 진행하였다.

#### 3-2. 1단계 가수분해를 통한 갈락토오스의 수율

Central Composite Design을 통해 온도, 시간, 농도의 다양한 변수로부터 가장 높은 당(sugar)을 회수할 수 있는 실험 조건과 결과를 Table 2에 나타내었다. 실험을 통해 초기 바이오매스 기준 1단계 가수분해 후 26%에서 85%까지 바이오매스의 회수율이 감소하였고, 바이오매스의 회수율은 실험 조건이 강해질수록 감소하였다. 이를 통해 갈락토오스와 같은 당 혹은 지질(lipid)성분이 액상으로 추출되는 것을 예상할 수 있었으며, 이것의 확인을 위하여 각 조건에 따른 액상에서의 갈락토오스의 회수율을 Table 2에 나타내었다. 실험 조건인 70 °C, 9 wt%의 황산 농도로 72시간 동안 1/6의 고/액비로 침지 공정을 하였을 때 91.04%의 가장 높은 갈락토오스 회수율과 함께 높은 글루코오스 회수율을 확인 할 수 있었다.

1단계 가수분해의 갈락토오스의 회수율에 대한 반응표면분석법의 회귀방정식(regression equation)을 통해 갈락토오스의 회수율과 실험인자(factor)들과의 실험적인 식을 다음과 같이 나타내었다 ( $R^2=0.9793$ )

$$Y = 72.04 + 21.35X_1 + 26.81X_2 + 10.56X_3 + 2.7X_1X_2 + 0.88 X_1X_3 - 2.17X_2X_3 - 19.74 X_1^2 - 11.77X_2^2 - 4.37X_3^2 \quad (2)$$

Y는 초기바이오매스의 성분기준 갈락토오스의 회수율이고,  $X_1$ ,  $X_2$ ,

Table 1. Composition of *Gelidium amansii*

Main fraction	Composition (%)
Glucose	18.46
Galactose	28.41
Mannose	7.91
Others	45.22

Table 2. Experimental design and results (first hydrolysis)

No.	Temperature (°C)	Acid Conc. (wt%)	Time (h)	Galactose Recovery (%)
1	60	5	72	31.91
2	70	9	24	76.73
3	70	5	48	73.09
4	60	1	48	1.87
5	70	9	72	91.04
6	80	1	48	27.92
7	70	5	48	72.45
8	80	9	48	84.71
9	60	5	24	10.09
10	80	5	72	87.52
11	60	9	48	47.63
12	70	5	48	72.10
13	70	5	48	72.86
14	80	5	24	62.18
15	70	5	48	71.56
16	70	1	72	39.42
17	70	1	24	16.42

$X_3$ 는 각각 온도 농도 그리고 시간을 나타낸다. 반응표면분석법의 canonical analysis를 통해 1단계 가수분해에서 다양한 최적화 조건이 계산되므로 좀 더 효과적인 분석을 위하여 ridge analysis를 통해 1단계 가수분해에서의 최적화 조건을 분석하였다. 그 결과 식 (2)를 통해 1단계 가수분해를 통해 최적화된 갈락토오스 회수율 조건은 76.19 °C에서 8.97 wt%의 황산농도로 49.52시간 동안 1/6의 고/액비로 침지 반응을 하였을 때 초기 바이오매스의 성분 기준 94.96%의 갈락토오스 회수율을 얻을 수 있다고 분석되었다. 분석된 결과를 확인하기 위하여, 위의 최적화된 조건을 이용하여 실험을 하였고, 그 결과 1단계 가수분해를 통해 91.05%의 갈락토오스를 회수할 수 있었다.

#### 3-3. 2단계 가수분해를 통한 레불린산의 수율

1단계 가수분해의 최적화된 조건으로부터 회수된 다량의 갈락토오스와 글루코오스를 함유한 액상을 이용하여 2단계 가수분해에 적용하여 보았다. CCD를 통해 온도, 시간, 농도의 다양한 변수로부터 가장 높은 레불린산을 생산할 수 있는 조건을 Table 3에 나타내었다. 실험을 통해 초기바이오매스의 당(sugar) 기준 1단계 액상을 2단계 가수분해 후 22.77%에서 45.84%까지의 레불린산 수율을 확인하였다. 2단계 가수분해의 레불린산 생산 수율에 대한 반응표면 분석법의 회귀방정식을 통해 레불린산과 실험인자(factor)들과의 실험적인 식을 다음과 같이 나타내었다.

$$Y = 36.64 + 8.80X_1 - 0.04X_2 + 2.01X_3 - 2.56X_1X_2 - 1.33 X_1X_3 + 0.035X_2X_3 - 2.32 X_1^2 + 0.028X_2^2 - 0.78X_3^2 \quad (3)$$

Y는 초기 바이오매스의 당성분 기준 레불린산의 수율이고,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ 는 각각 온도 농도 그리고 시간을 나타낸다. 분석에서 각각의 인자들의 중요성은 t-test와 p-values로 모형의 적합도를 확인하였다. p-values는 각각의 인자들의 중요성을 확인하기 위한 도구로 사용되어지며, 또한 이것은 인자들의 상호관계를 이해하는데 필요로 한다.

Table 4를 통해 일차적으로 가장 큰 영향을 미치는 것은 온도라는 것을 확인할 수 있었고, p-value(<0.0001)을 통해 이것의 영향이 유

**Table 3. Experimental design and results (secondary hydrolysis of first hydrolyzed liquor)**

No.	Temperature (°C)	Acid Conc. (wt%)	Time (min)	Levulinic acid Yield (%)
1	140	5	60	25.26
2	160	7	20	32.53
3	160	5	40	37.16
4	140	3	40	24.57
5	160	7	60	40.79
6	180	3	40	45.84
7	160	5	40	36.72
8	180	7	40	39.01
9	140	5	20	22.77
10	180	5	60	41.66
11	140	7	40	27.98
12	160	5	40	36.53
13	160	5	40	36.47
14	180	5	20	44.48
15	160	5	40	36.33
16	160	3	60	39.17
17	160	3	20	31.05

**Table 4. Significance of regression coefficient for yield of levulinic acid**

Variables	Regression Coefficient	Stand error	F-value	Significance level, P-value
Intercept	36.64	1.13	12.33	0.0016
X <sub>1</sub>	8.80	0.90	96.71	<0.0001
X <sub>2</sub>	-0.04	0.90	0.002	0.9653
X <sub>3</sub>	2.01	0.90	5.02	0.0600
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-2.56	1.27	4.09	0.0827
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	-1.33	1.27	1.10	0.3287
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.04	1.27	0.0007	0.9784
X <sub>1</sub> X <sub>1</sub>	-2.32	1.23	3.53	0.1023
X <sub>2</sub> X <sub>2</sub>	0.03	1.23	0.0004	0.9828
X <sub>3</sub> X <sub>3</sub>	-0.78	1.23	0.40	0.5457

**Table 5. ANOVA of RSM regression analysis**

Mode	SS	DF	MS	P
Regression	711.42	9	79.05	0.0016
Residual	44.86	7	6.41	
Total	756.28	16		

효하다는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 반응 온도가 레불린산 생산에 있어서 가장 큰 영향을 준다는 것이 입증되었다. 반응 시간 또한 p-value(<0.0600)을 통해 레불린산 생산 수율을 높이는 데 큰 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 하지만 황산의 농도의 경우 레불린산 생산 수율에는 큰 영향을 주지 못했(p-value <0.9653)

더 나아가 상반된 영향을 주었다. 이는 높은 산농도에 의하여 레불린산에서 더 과분해 되어 발생된 것임을 HPLC의 분석을 통해 확인해 볼 수 있었다.

ANOVA의 회귀모델은 이러한 모델이 의미 있다는 것을 나타내었고, 또한 그 증거로 낮은 p-value (0.0016)를 나타냈다(Table 6). 모형의 적합도를 알 수 있는 R<sup>2</sup>의 경우에도 그 값이 0.9407로서 실험값과 예측값이 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

식 (3)을 통해 2단계 가수분해를 통해 최적화된 레불린산 생산 조건은 180 °C에서 3 wt%의 황산농도로 48.22분 동안 회분식 반응을 하였을 때 초기 바이오매스의 성분 기준 45.88%의 레불린산 수율을 얻을 수 있다고 분석되었다. 분석된 결과를 확인하기 위하여, 위의 최적화 된 조건을 이용하여 실험을 하였고, 그 결과 최종적으로 2단계 가수분해를 통해 43.95%의 수율로 레불린산을 생산할 수 있었다.

### 3-4. 물질수지(mass balance)

원료인 우뭇가사리로부터 목표 물질인 레불린산의 생산하기 위하여 1단계로는 원료인 우뭇가사리로부터 액상으로 당을 회수하기 위한 침지공정을 진행하였고, 2단계로는 액상으로 회수된 당을 레불린산으로 가수분해 하기 위한 회분식 공정을 진행하여 전체 적인 흐름을 살펴보기 위하여 전체 물질수지식(mass balance)을 Table 6에 나타내었다.

초기 100 g의 우뭇가사리의 28.41 g의 갈락토오스와 18.46 g의 글루코오스로부터 1단계 가수분해를 통해 91.02%의 갈락토오스와 25.62%의 글루코오스가 액상으로 회수되었고, 이것의 2단계 가수분해를 통해 최종적으로 100 g의 우뭇가사리로부터 20.6 g의 레불린산을 생산할 수 있었다.

## 4. 결 론

우뭇가사리는 높은 당 함량뿐만 아니라 그 양이 풍부하고, 식량 자원으로 쓰이지 않는다는 점으로 인해 레불린산 생산을 하기에 적합하고 큰 잠재력을 지닌 바이오매스이다. 우뭇가사리로부터 레불린산을 생산하기 위하여 본 논문에서는 2단계의 표면분석법을 통해 최적화된 레불린산 생산 조건을 탐색해 보았다. 그 결과 1단계의 침지공정을 통해 76.19 °C에서 8.97 wt%의 황산농도로 49.52시간 동안 1/6의 고/액비로 침지 반응을 하였을 때 초기 바이오매스의 성분 기준 91.05%의 갈락토오스를 회수할 수 있었다.

다음으로 액상으로 회수된 당을 2단계 회분식 공정을 통해 레불린산으로 가수분해 하였고, 표면분석법을 통해 180 °C에서 3 wt%의 황산농도로 48.22분의 최적화된 조건을 이용하여 45.88%의 레불린산을 생산할 수 있다고 예측되었다. 최적화된 조건을 통해 최종적으로 초기 바이오매스의 성분 기준 43.95%의 수율로 레불린산을 생산할 수 있었고, 선형화 회귀분석을 통해 반응 온도 농도 및 시간에

**Table 6. Mass balance of the overall process including first hydrolysis and second hydrolysis**

Raw Materials (Solid)	1st Acid Hydrolysis		2nd Acid Hydrolysis	
		Liquid product	Solid residue	Final Liquid product
Galactose (g)	28.41	25.86	1.66	3.76
Glucose (g)	18.45	4.73	5.69	1.36
Levulinic acid (g)	-	8.93	-	20.6

따른 높은 적합도( $R^2=0.9407$ )의 식을 찾아낼 수 있었다.

## 감 사

본 연구는 2012학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제; 2012-073) 지원에 의하여 수행되었습니다.

## References

1. Fang, Q. and Hana, M. A., "Experimental Studies for Levulinic Acid Production from Whole Kernel Grain Sorghum," *Biore-sour. Technol.*, **81**, 187-192(2002).
2. Chheda, J. N., Yuriy, R. L. and Dumesic, J. A., "Production of 5-Hydroxymethylfurfural and Furfural by Dehydration of Biomass-derived Nono- and Poly-saccharides," *Green Chem.*, **9**, 342-350(2007).
3. Kim, K. S. and Kim, J. S., "Characterization of Pretreatment for Barley straw by Alkaline Solutions," *Korean Chem. Eng. Res. (HWA-HAK KONGHAK)*, **50**(1), 18-24(2012).
4. Jeong, G. T. and Park, D. H., "Production of Levulinic Acid from Marine Algae *Codium fragile* Using Acid-Hydrolysis and Response Surface Methodology," *The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering*, **26**, 341-346(2011).
5. Jeong, G. T. and Park, D. H., "Production of Sugars and Levulinic Acid from Marine Biomass *Gelidium amansii*," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **161**, 41-52(2010).
6. Bozell, J. J., Moens, L., Elliott, D. C., Wang, Y., Neusenswender, G. G., Fitzpatrick, S. W., Bilski, R. J. and Jarnefeld, J. L., "Production of Levulinic Acid and Use as a Platform Chemical for Derived Products," *Resour. Conserv. Recycl.*, **28**, 227-239(2000).
7. Rosegrant and Mark, W. T., "Biofuels and Grain Prices," International Food Policy Research Institute, USA(2008).
8. Park, J. Y., Kang, M. S., Kim, J. S., Lee, J. P., Choi, W. I. and Lee, J. S., "Enhanced of Enzymatic Digestibility of Eucalyptus Grandis Pretreated by NaOH Catalyzed Steam Explosion," *Biore-sour. Technol.*, **123**, 702-712(2012).
9. Kim, T. H., "Sequential Hydrolysis of Hemicellulose and Lignin in Lignocellulosic Biomass by Two-stage Percolation Process Using Dilute Sulfuric Acid and Ammonia Hydroxide," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(11), 2156-2162(2011).
10. Singh, A., Nigam, P. S. and Murphy, J. D., "Renewable Fuels from Algae: An Answer to Debatable Land Based Fuels," *Biore-sour. Technol.*, **102**, 10-16(2011).
11. Sluiter, A. and Sluiter, J., "Summative Mass Closure," NREL, NREL/TP-510-48087, 1-10, USA(2011).