

전분 기질에 대한 *Saccharomyces cerevisiae* CHY1077과 *Zymomonas mobilis* CHZ2501의 에탄올 발효 비교

최기욱[†] · 강현우 · 김영란* · 정봉우*

(주)창해에탄올 창해연구소
561-203 전주시 덕진구 팔복동 3가 829
*전북대학교 화학공학부
561-756 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14
(2008년 7월 11일 접수, 2008년 8월 1일 채택)

Comparison of Ethanol Fermentation by *Saccharomyces cerevisiae* CHY1077 and *Zymomonas mobilis* CHZ2501 from Starch Feedstocks

Giwook Choi[†], Hyunwoo Kang, Youngran Kim* and Bongwoo Chung*

Changhae Institute of Cassava & Ethanol Research, Changhae Ethanol Co., Ltd. 829, 3-Ga Palbok-dong, Dukjin-ku, Jeonju 561-203, Korea
*Chonbuk National University, School of Chemical Engineering, 664-14, Dukjin-dong, Dukjin-gu, Jeonju 561-756, Korea
(Received 11 July 2008; accepted 1 August 2008)

요 약

유가의 급등과 화석 연료의 고갈, 환경 오염문제 등에 대비하기 위하여 대체 수송 연료로서의 바이오에탄올에 대한 관심이 고조되고 있으며, 이에 따라 바이오에탄올 생산비용 절감을 위한 연구가 매우 활발하다. 본 연구에서는 에탄올 생산성 향상을 위하여 *Zymomonas mobilis*의 에탄올 발효특성을 *Saccharomyces cerevisiae*와 비교하였다. 음료용 에탄올 생산균주로 오랫동안 사용되어 온 효모와 연료용 에탄올 생산균주로서의 *Z. mobilis*의 가능성을 검토한 바 최종 에탄올 생성 농도는 큰 차이가 없었으나, 에탄올 생성속도는 *Z. mobilis*가 *S. cerevisiae*에 비해 2배 이상 빨랐다. 에탄올 생산성을 비교해 보면 현미, 쌀보리, 카사바의 경우 *Z. mobilis*는 2.19 g/l·h, 2.60 g/l·h, 3.12 g/l·h인 반면 *S. cerevisiae*는 0.68 g/l·h, 1.03 g/l·h, 1.28 g/l·h 이었다. 증류액 내의 불순물은 *S. cerevisiae*는 iso-amylalcohol이 *Z. mobilis*는 ethyl heptanoate 농도가 상대적으로 높았다.

Abstract – The production of ethanol by microbial fermentation as an alternative energy source has been of interest because of increasing oil price. *Saccharomyces cerevisiae* and *Zymomonas mobilis* are two of the most widely used ethanol producers. In this study, characteristics of ethanol fermentation by *Saccharomyces cerevisiae* CHY1077 and *Zymomonas mobilis* CHZ2501 was compared. Brown rice, naked barley, and cassava were selected as representatives of the starch-based raw materials commercially available for ethanol production. The volumetric ethanol productivities by *Saccharomyces cerevisiae* from brown rice, naked barley and cassava were 0.68 g/l·h, 1.03 g/l·h and 1.28 g/l·h respectively. But for the *Zymomonas mobilis*, 2.19 g/l·h(brown rice), 2.60 g/l·h(naked barley) and 3.12 g/l·h(cassava) were obtained. *Zymomonas mobilis* was more efficient strain for ethanol production than *S. cerevisiae*.

Key words: Bioethanol, *Zymomonas mobilis*, *Saccharomyces cerevisiae*, Starch Feedstock

1. 서 론

최근 유가의 급등과 화석연료의 고갈, 환경오염에 대비하기 위하여 대체 수송 연료로서의 바이오에탄올에 대한 관심이 급증하고 있으며 이에 따라 에탄올 생산성 향상을 위한 균주 개발과 효율적인 공정 개발에 대한 중요성이 부각되고 있다[1-3]. 국내의 경우, 산업적으로 전분질계 원료를 에탄올 발효에 이용하고 있으며, 에탄올 발

효 균주로서는 효모를 사용하고 있다. 전분질계 원료의 경우 원료 내 전분을 당으로 쉽게 전환하기 위하여 고온에서 원료를 팽윤시키는 호화 작용과 액화효소를 이용하여 전분 구조를 큰 단위로 끊어 주는 액화 과정을 거친 후, 당화효소를 이용하여 효모가 소모할 수 있는 당의 형태인 glucose, maltose 등의 형태로 전환시키는 당화 과정 등의 전처리 과정이 필요하며, 효모를 사용하여 에탄올 발효를 실시한다. 효모는 가장 오랫동안 사용되어 온 에탄올 발효 균주로 우수한 발효능과 식품으로서의 안정성까지 확인되었다[4, 5]. 그러나 최근에는 에탄올 생산성을 향상시키기 위하여 박테리아를 이용

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: changrd@chethanol.com

한 에탄올 발효 연구도 진행되고 있다. 그 중에서도 *Zymomonas mobilis*는 빠른 대사 속도와 에탄올 내성, 당 내성 또한 우수하여 바이오 에탄올 생산 균주로 주목받고 있다[6-9].

본 연구에서는 기존에 가장 많이 사용되어 온 발효 균주인 *Saccharomyces cerevisiae*와 ‘슈퍼 알코올 박테리아’로 불리는 *Zymomonas mobilis*의 에탄올 발효 특성을 규명하여 두 균주의 에탄올 생산성을 비교함으로써 산업적 이용 가능성을 확인코자 하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 사용된 재료 및 균주

사용된 원료는 음료용 에탄올 생산에 사용되고 있는 국내산 현미, 쌀보리, 베트남산 카사바를 1 mm 이하로 분쇄하여 이용하였다. 각 원료 내의 전분 액화에 사용된 효소는 *Bacillus licheniformis*에서 생산된 α -amylase인 Termamyl 120L (140 Kunit/g, Novozyme, Bagsvaerd, Denmark)을 사용하였고, 당화에는 glucoamylase인 Spirizyme plus (21 Kunit/g, Novozyme, Bagsvaerd, Denmark)와 복합효소제(5 Kunit/g, Changhae Ethanol Co., Ltd., Jeonju, Korea)를 이용하였다.

에탄올 발효에 사용된 균주는 (주)창해에탄올 연구소에서 N-methyl-N'-nitro-N-nitrosoguanidine(NTG) 처리를 통해 돌연변이한 우수 발효 균주 *Z. mobilis* CHZ2501과 산업용 효모 *Saccharomyces cerevisiae* CHY 1077을 사용하였고, 그 균주의 유지는 각각RM배지 (20 g/L glucose, 10 g/L yeast extract, 1 g/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 2 g/L KH_2PO_4 , 1 g/L $(NH_4)_2 SO_4$, 1 ml/L 1N-HCl(11X))와 YPD배지(2.5 g/L yeast extract, 2.5 g/L peptone, 100 g/L glucose, 0.25 g/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 1 g/L K_2HPO_4)를 이용하였다.

2-2. 원료의 전처리 및 배양 조건

원료의 전처리 및 배양은 Fig. 1과 같이 현미, 쌀보리, 카사바를 1 mm 이하로 분쇄한 분말 358 g에 물 1380 mL를 가한 후, 액화효소(Termamyl 120 L)를 0.27 g과 소포제(Antifoam 204, Sigma) 0.15 mL를 첨가하여 95 °C에서 2.5시간 호화, 액화 시킨 후 60 °C로 냉각하고 정제당화효소(Spirizyme plus) 0.51 g(복합효소제의 경우 2.11 g)을 첨가하여 1시간 당화한 후 35 °C로 냉각하여 동시당화 발효하였다. 발효 실험의 평균 접종량은 5%(v/v)이었으며, 모든 발효 실험은 2 L 둥근 플라스크를 이용하여 working volume 1.7 L 규모로 진탕 배양기 내에서 70 rpm으로 교반물이 가라앉지 않을 정도로 교반하며 35 °C 조건에서 수행하였다.

2-3. 전분 분석

원료 내의 전분 함량은 효소당화법으로 생성된 환원당을 HPLC (Waters, Milford, USA)로 분석하여 전분 함량을 환산하였다. 효소 당화법은 분쇄된 원료 분말 5 g을 칭량하여 증류수 100 mL와 액화 효소인 Termamyl 120 L을 4 mg을 첨가하여 95 °C에서 2시간 액화하였다. 그 후 60 °C로 냉각하여 0.1 N HCl로 pH를 4.5로 조절한 후 glucoamylase인 Spirizyme plus를 5 mg 첨가하여 60 °C에서 18 시간 당화 후 1 L로 부피보정하여 HPLC로 분석하였다.

HPLC분석에 사용된 컬럼은 Rspack KC-811(8×300 mm) column (Showa Denko, Tokyo, Japan)을 사용하였고 검출기는 Refractive Index Detector(Waters 2414, Milford, USA)를 사용하였다. 이동상으로 H_2SO_4 0.25%(v/v) 용액을 분당 1 mL로 흘려 보냈다.

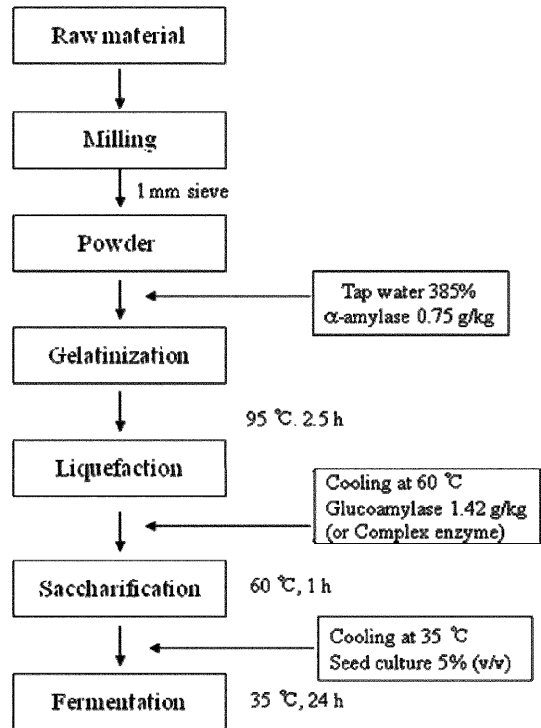


Fig. 1. Schematic diagram showing experimental procedure and conditions.

2-4. 당, 유기산 분석 방법

배양액 내의 잔당(residual direct reducing sugar, RDS)과 유기산 성분은 배양액 10 mL를 원심 분리하여 상등액 만을 0.45 μ m filter (Type PVDF filter, Whatman)를 이용하여 여과한 후 HPLC(Waters, Milford, USA)를 이용하여 분석하였다. 단, 배양액 내의 잔류 총당(residual total sugar, RTS)의 분석은 다음과 같이 실시하였다. 먼저 분석 시점의 배양액 50 mL를 취하고 물 70 mL와 5% HCl 100 mL를 가하여 95 °C water bath(JISICO, Seoul, Korea)에서 2.5시간 산당화 시킨 후 냉각하였다. 28% NaOH 용액으로 중화한 다음 500 mL 메스플라스크에 옮긴 후 물을 첨가하여 500 mL로 부피보정한 다음, 그 액을 RTS 시료로 0.45 μ m filter를 이용하여 여과하고 HPLC를 이용하여 분석하였다.

HPLC를 이용한 당 분석은 Rspack KC-811(8×300 mm) column (Showa Denko, Tokyo, Japan)을 사용하여 refractive index detector (Waters 2414, Milford, USA)로 측정하였고, 유기산의 분석은 Rspack KC-811(8×300 mm) column(Showa Denko, Tokyo, Japan)을 사용하여 dual λ absorbance detector(Waters 2487, Milford, USA)로 215 nm에서 측정하였다. 당과 유기산의 분석 모두 황산 농도를 0.25%(v/v)로 제조한 용액을 이동상(mobile phase)으로 사용하였고, flow rate는 1 mL/min, column 온도 60 °C, sample injection volume 은 20 μ L를 주입하여 20분간 분석하였다.

2-5. 에탄올 농도 및 불순물 분석 방법

배양액 내의 에탄올 농도는 배양액 100 mL를 간이 증류하여 얻은 증류액을 기체 크로마토그래피(Agilent 4890, Agilent Technologies, Wilmington, DE., USA)를 이용하여 분석하였다.

사용된 컬럼은 Supelco 6.6% CARBOWAX 20M(Supelco,

Belefonte, USA) 이었고, detector는 FID였다. 내부 표준 물질로는 isopropanol을 사용하였고, carrier gas로는 질소를 사용하였다. injector, oven, detector의 온도는 각각 200 °C, 100 °C, 250 °C 이었고, 운전 조건은 100 °C에서 1 분, 12 °C/min으로 120 °C까지 승온 시킨 후 20 °C/min으로 200 °C 까지 승온시켜 3분간 유지하였다.

최종 배양액내의 불순물 농도 분석은 배양액 100 mL을 간이 증류하여 얻은 증류액을 INNOWAX column(HP 19091N-233, 30 m × 0.25 mm × 0.5 μm)이 장착된 기체 크로마토그래피를 이용하여 분석하였고, 기체 크로마토그래피의 운전조건은 40 °C에서 1분, 6 °C/min으로 100 °C 까지 승온 시킨 후, 8 °C/min으로 200 °C 까지 승온시켜 10분간 유지 하였다. 사용한 외부 표준물질은 acetaldehyde, acetone, methyl acetate, ethyl acetate, methanol, sec-butyl alcohol, n-propyl alcohol, ethyl isovalerate, iso-butyl alcohol, ethyl heptanoate, iso-amyl alcohol 및 n-propanol 이었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. *S. cerevisiae*와 *Z. mobilis*의 에탄올 발효 속도 비교

기존의 에탄올 발효균주로 잘 알려진 *S. cerevisiae*와 본 연구에 사용된 *Z. mobilis*를 동일 조건하에서 에탄올 발효속도를 비교하였다. 원료는 각각 현미와 쌀보리, 카사바를 이용하였으며, 각 원료의 전분 함량은 효소당화법을 이용하여 현미, 쌀보리, 카사바 순으로 69.87, 58.07, 70.39%로 확인되었다.

각 원료 분말에 물을 가하여 호화 및 액화의 과정을 거친 후, 정제당화효소를 사용하여 1시간 당화시킨 후 동시당화 발효조건에서 중균을 5%(v/v)로 접종하여 시간에 따른 에탄올 생성량을 비교하였다. 그 결과는 Fig. 2와 같다.

*S. cerevisiae*와 *Z. mobilis*의 발효 종료시간은 각각 현미의 경우 110시간, 36시간 이었으며, 쌀보리는 72시간, 24시간 이었고, 카사바는 72시간, 24시간으로 세가지 전분질 원료에서 *Z. mobilis*가 *S. cerevisiae*에 비해 현저하게 에탄올 생성 속도가 빨랐다. 각 원료별 최종 에탄올 생성량은 각 원료의 전분 함량에 따라 차이가 나지만, *S. cerevisiae*와 *Z. mobilis*간에는 거의 차이가 나지 않았다. *Z. mobilis*의 대사속도가 *S. cerevisiae*에 비해 월등히 빨라 에탄올 생성 속도 면에서 우수한 결과를 보인 것으로 판단된다[10]. 두 균주 간의 에탄올 생산성(productivity)의 비교는 Table 1과 같이 현미, 쌀보리, 카사바 각각 *Z. mobilis*는 2.19 g/l-h, 2.60 g/l-h, 3.12 g/l-h인 반면 *S. cerevisiae*는 0.68 g/l-h, 1.03 g/l-h, 1.28 g/l-h로 두 균주 모두 카사바에서 가장 우수하였고, 현미에서 두 균주 간의 차이가 현저하게 나타났다.

현미를 이용한 발효의 경우 두 균주 모두 다른 원료에 비해 에탄올 발효가 1.5배 가량 느리게 진행되는 것을 볼 수 있었으나 Fig. 3과 같이 정제당화효소 대신 복합효소제를 사용한 경우 *S. cerevisiae*와 *Z. mobilis* 모두 에탄올 생성 속도를 타 원료와 동일한 수준으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 복합효소제는 α-amylase, β-amylase, glucoamylase 등의 당화관련 효소 이외에 부수적으로 protease, lipase, cellulase, pullulanase 등의 미량 효소와 배양과정에 다양한 대사물질 등을 생산 할 수 있는 *Aspergillus usarii mut. Shiro-usarii* 고체 국의 건조물이다. 이러한 복합효소제에 포함된 여러 당화효소의 작용으로 현미의 복잡한 전분 구조에 대한 당화작용이 용이하고, 복합효소제 배양과정 중에 생성되는 다양한 아미노산 관련 대사 물

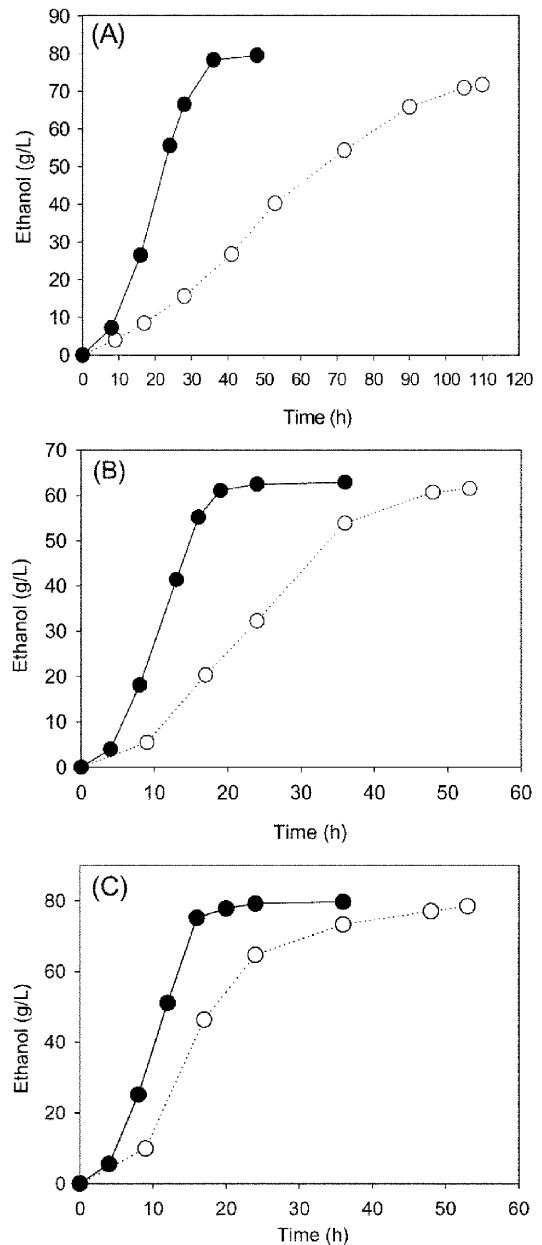


Fig. 2. Bioethanol production of *S. cerevisiae* (○) and *Z. mobilis* (●) using glucoamylase from brown rice (A), naked barley (B), and cassava (C).

Table 1. Comparison of ethanol productivity of *S. cerevisiae* CHY1077 and *Z. mobilis* CHZ2501

Strain	Brown rice	Naked barley	Cassava
<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	0.68 (110 h)	1.03 (72 h)	1.28 (72 h)
<i>Z. mobilis</i> HZ2501	2.19 (36 h)	2.60 (24 h)	3.12 (24 h)

Unit: Ethanol productivity (g/l-h)

질들이 에탄올 생성을 촉진시킬 수 있는 것으로 사료된다. 반면 카사바의 경우는 전분 구조가 단순하여 정제 당화효소(glucoamylase)의 작용만으로도 *Z. mobilis* 생육 속도에 알맞은 기질을 제공할 수 있어 그 차이가 적은 것으로 판단된다.

그러나 복합효소제를 이용하여 현미, 쌀보리와 같은 곡류 원료에서의 에탄올 발효 속도를 향상시켰다 할지라도 *S. cerevisiae*와 *Z.*

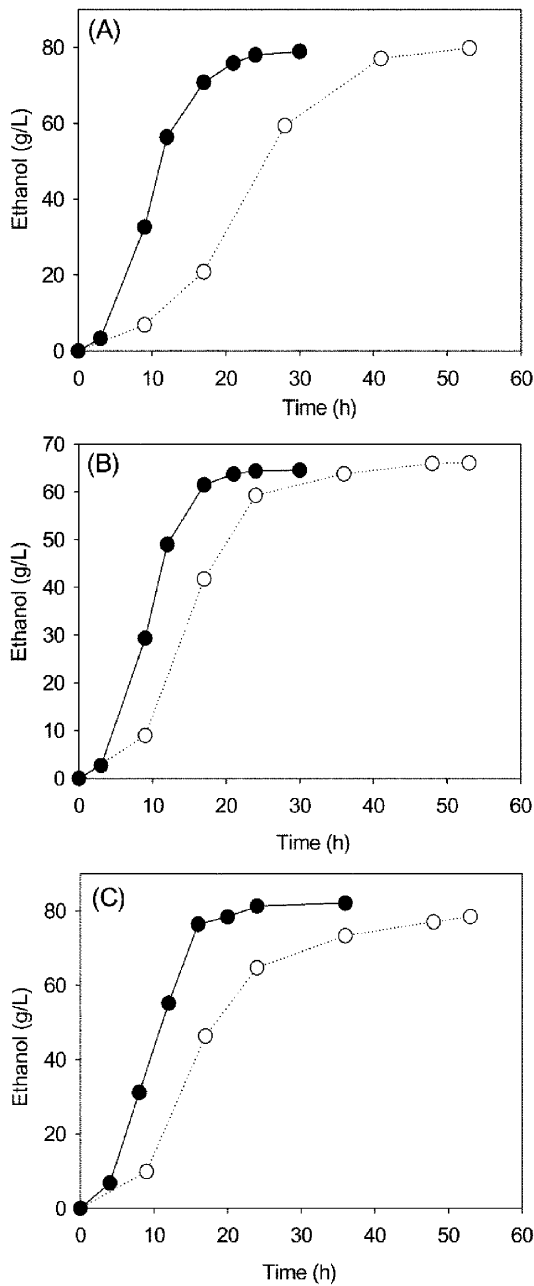


Fig. 3. Bioethanol production of *S. cerevisiae* (○) and *Z. mobilis* (●) using complex enzyme from brown rice (A), naked barley (B), and cassava (C).

mobilis 간의 에탄올 생산성 측면에서 *Z. mobilis*가 *S. cerevisiae*의 두배 이상 우수한 결과를 나타냈다.

3-2. *S. cerevisiae*와 *Z. mobilis*의 에탄올 발효 후의 잔당 비교

두 균주의 발효 후 잔당 비교는 전분질 원료의 에탄올 발효에 대한 경제성과 각 균주의 당 이용성에 관련이 있다. 두 균주의 에탄올 발효 후 잔당을 분석한 결과를 Table 2에 나타냈다. *S. cerevisiae*는 72~110시간 이상이 경과해야 대부분의 당을 모두 소모하는 반면 *Z. mobilis*는 24~36시간 만에 0.2% 수준의 잔당만을 남기고 모두 소모했다.

잔당의 대부분은 maltose 성분으로 효모를 이용한 발효구의 경우 72~110시간 경과 후에도 잔존하는 것으로 보아 glucoamylase 가 분해할 수 없는 α-1,6 glucoside 결합을 가진 이당류(melibiose)가 포함된 것으로 판단된다. 이는 pullulanase와 같은 α-1,6 glucanase 를 이용하면 당 이용율을 높일 수 있으나 경제성이 함께 고려되어야만 한다[11]. 반면, *Z. mobilis* 경우는 maltose에 대한 기질 제한성으로 인해 maltose가 *S. cerevisiae* 보다 많은 양이 잔존했지만 그 차이는 크지 않았고, 전분질 원료의 발효에서는 잔존하는 당화효소에 의해 maltose는 glucose로 전환이 가능하므로 적절한 발효 조건이나 당화효소 조건으로 극복될 수 있을 것으로 사료된다.

현미, 쌀보리, 카사바에 대한 각 균주의 당 소모는 두 균주 모두 카사바, 쌀보리, 현미의 순으로 그 이용율이 높았으며, 이는 앞서 말한 전분 구조에 따른 차이로 판단된다.

3-3. *S. cerevisiae*와 *Z. mobilis*의 에탄올 발효 후의 유기산 생성 비교

두 균주를 이용한 에탄올 발효 종료 후, 부산물인 유기산의 생성은 Table 3에 나타냈다. 생성된 유기산은 citric acid, tartaric acid, malic acid, succinic acid, lactic acid 이었고, *Z. mobilis*는 그 중 succinic acid가 현미, 쌀보리, 카사바 순으로 3.74, 9.4, 8.85 g/L로 다른 유기산에 비해 많은 양이 생성되었다. 이는 *Z. mobilis*의 대사적 특성상 TCA cycle에 의한 축적으로 *S. cerevisiae*에 비해 많은 양이나 발효 후 에탄올 회수시 증류과정에서 제거되므로 연료용 알코올 품질에는 문제되지 않을 것이다[12]. 그러나 유기산의 생성은 부산물이므로 그 생성량을 균체 자체의 이용량 만으로 최소화할 수 있다면 에탄올 수율 향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

3-4. *S. cerevisiae*와 *Z. mobilis*의 에탄올 발효 후의 불순물 생성 비교

에탄올 발효 후 배양액을 간이 증류하여 에탄올을 회수하고 그 증류액 내의 불순물을 비교하기 위해 gas chromatograph를 이용하여 분석하였다. 분석된 항목은 acetaldehyde, ethyl acetate, methanol, 2-butanol, n-propyl alcohol, iso-butanol, iso-amyl alcohol, ethyl heptanoate 로 Table 4와 같이 세가지 원료에서 모두 *S. cerevisiae*는 주로 iso-amyl alcohol이, *Z. mobilis*는 whisky의 ester 성분인 ethyl

Table 2. Analysis of residual directed sugars in fermented broth by *S. cerevisiae* CHY1077 and *Z. mobilis* CHZ2501

Feedstock	Brown rice		Naked barley		Cassava		
	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501	
Fermentation time	110h	36h	72h	24h	72h	24h	
Sugar (g/L)	Maltose	0.30	1.18	1.65	0.80	1.40	
	Glucose	1.90	0.74	0.29	0.23	0.00	0.10
	Fructose	0.00	0.70	0.00	0.75	0.00	0.30
	Ribose	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40
Total	2.20	2.83	1.47	2.63	0.80	2.20	

Table 3. Analysis of organic acids in fermented broth by *S. cerevisiae* CHY1077 and *Z. mobilis* CHZ2501

Feedstock	Brown rice		Naked barley		Cassava		
	Strain	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501
Fermentation time		110h	36h	72h	24h	72h	24h
Organic acid (g/L)	Citric acid	0.10	0.23	1.53	0.73	0.15	0.45
	Tartaric acid	0.11	0.02	0.42	0.14	0.00	1.07
	Malic acid	0.61	0.21	1.07	1.22	0.51	0.58
	Succinic acid	0.54	3.74	3.00	9.40	1.88	8.85
	Lactic acid	0.24	0.20	3.10	1.35	0.06	0.91

Table 4. Analysis of volatile compounds in fermented broth by *S. cerevisiae* CHY1077 and *Z. mobilis* CHZ2501

Feedstock	Brown rice		Naked barley		Cassava		
	Strain	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501	<i>S. cerevisiae</i> CHY1077	<i>Z. mobilis</i> CHZ2501
Fermentation time		110h	36h	72h	24h	72h	24h
Volatile compounds (ppm)	Acetaldehyde	17.4	25.4	18.4	139.1	35.3	70.3
	Ethyl acetate	1.3	3.2	2.1	2.6	5.0	2.6
	Methanol	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	6.2
	2-butanol	0.0	0.0	0.0	0.0	23.1	45.7
	n-propyl alcohol	4.1	60.1	8.1	44.5	0.0	0.0
	Iso-butyl alcohol	13.9	3.6	29.8	0.0	33.7	0.0
	Iso-amyl alcohol	109.4	15.9	165.2	33.4	227.7	22.0
	Ethyl heptanoate	7.9	457.8	0.0	199.8	0.0	178.0

heptanoate[13]의 함유량이 많았다. 이러한 불순물들은 다단 증류 과정에서 제거되므로 에탄올 품질과는 무관하며 증류탑 운전 전에 대한 참고 자료로 활용될 수 있다.

4. 결 론

바이오 에탄올에 대한 관심이 증대되는 국제 정세의 흐름에 맞춰 에탄올 발효 균주로 잘 알려진 *S. cerevisiae*와 *Z. mobilis*를 이용하여 산업용 전분질 원료인 현미, 쌀보리, 카사바로부터 에탄올 발효 특성을 비교하였다. 최종 에탄올 생성량에는 크게 차이가 없었으나 생성 속도면에서 *Z. mobilis*가 *S. cerevisiae*에 비해 2배 이상 빨랐다. 에탄올 생산성을 비교해 보면, 현미, 쌀보리, 카사바 순으로 *Z. mobilis*는 2.19 g/l/h, 2.60 g/l/h, 3.12 g/l/h, *S. cerevisiae*는 0.68 g/l/h, 1.03 g/l/h, 1.28 g/l/h 였다. 에탄올 발효 후 잔당은 두 균주 모두 0.3% 이하였으며, 유기산의 생성은 *Z. mobilis* 가 succinic acid를 3.7~9.4 g/L로 다소 많이 생산하였다. 발효 후 에탄올 증류액 내의 불순물을 비교해 볼 때 *S. cerevisiae*는 주로 iso-amyl alcohol이 *Z. mobilis*는 ethyl heptanoate의 함유량이 많았다.

감 사

본 연구는 농촌진흥청 [과제번호-20070201036039]의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Von Blottnitz, H. and Curran, M. A., "A Review of Assessments Conducted on Bio-ethanol as a Transportation Fuel from a Net Energy, Greenhouse Gas, and Environmental Life Cycle Per-

spective," *J. Clean. Prod.*, **15**(7), 607-619(2007).
 2. Willke, T. and Vorlop, K. D., "Industrial Bioconversion of Renewable Resources as An Alternative to Conventional Chemistry," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **66**(2), 131-142(2004).
 3. Aristidou, A. and Penttila, M., "Metabolic Engineering Applications to Renewable Resource Utilization," *Curr. Opin. Biotechnol.*, **11**(2), 187-198(2000).
 4. Camacho-Ruiz, L., Perez-Guerra, N. and Roses, R. P., "Factors Affecting the Growth of *Saccharomyces cerevisiae* in Batch Culture and in Solid State Fermentation," *Electron. J. Environ. Agric. Food Chem.*, **2**(5), 531-542(2003).
 5. Ergum, M. and Mutlu, S. F., "Application of Statistical Technique to the Production of Ethanol from Sugar Beet Molasses by *Saccharomyces cerevisiae*," *Bioresour. Technol.*, **73**(3), 251-255(2000).
 6. Kim, B. G. and Choi, C. Y., "A Study on the Ethanol Production by Immobilized Cells of *Zymomonas mobilis*," *Korean J. Chem. Eng.*, **1**(1), 13-19(1984).
 7. Dien, B. S., Cotta, M. A. and Jeffries, T. W., "Bacteria Engineered for Fuel Ethanol Production Current Status," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **63**, 258-266(2003).
 8. Ingram, L. O., Gomez, P. F., Lai, X., Moniruzzaman, M., Wood, B. E., Yomano, L. P. and York, S. W., "Metabolic Engineering of Bacteria for Ethanol Production," *Biotechnol. Bioeng.*, **58**(2), 204-214(1998).
 9. Rogers, P. L., Jeon, Y. J., Lee, K. J. and Lawford, H., "Zymomonas mobilis for Fuel Ethanol and Higher Value Products," *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, **108**, 263-288(2007).
 10. Rogers, P. L., Lee, K. J. and Tribe, D. E., "Kinetics of Alcohol Production by *Zymomonas mobilis* at High Sugar Concentrations," *Biotechnol. Lett.*, **1**(4), 165-170(1979).

11. Hsu, T., in Wyman, C. E. (ed), *Pretreatment of Biomass. In Handbook on Bioethanol - Production and Utilization*, Washington DC: Taylor & Francis, 179-212(1996).
12. Seo, J. S., Chong, H. Y., Park, H. S., Yoon, K. O., Jung, C. H., Kim, J. J., Hong, J. H., Kim, H. T., Kim, J. H., Kil, J. I., Park, C. J., Oh, H. M., Lee, J. S., Jin, S. J., Um, H. W., Lee, H. J., Oh, S. J., Kim, J. Y., Kang, H. L., Lee, S. Y., Lee, K. J. and Kang, H. S.,
“The Genome Sequence of the Ethanologenic Bacterium *Zymomonas mobilis* ZM4;” *Nat. Biotechnol.*, **23**(1), 63-68(2005).
13. Nijssen, L. M., Visscher, C. A., Maarse, H., Willemsens, L. C. and Boelens, M. H., *Volatile Compound in Food: Qualitative and Quantitative Data*, 7th ed., TNO Nutrition and Food Research Institute, The Netherlands, 661(1996).