

반복적인 회분식 발효공정을 이용한 에탄올 생산성의 향상

김 휘 동 · 민 경 호 · 허 병 기
인하대학교 공과대학 생물공학과

Improvement of Alcohol Productivity by Means of Repeated Batch Fermentation

Hwi-Dong Kim, Kyung-Ho Min and Byung-Ki Hur
Department of Biological Engineering, Inha University

ABSTRACT

The functional relationship between the initial cell concentration and the ethanol productivity was investigated in the repeated batch fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 24858. The repeated batch fermentations were performed in the range of 60 to 150 g/l of initial sugar concentration and 17.5 g/l to 53.1 g/l of initial cell concentration. The time of one batch fermentation was 1 or 2 hours and the batch fermentation was repeated ten times in every repeated fermentation.

The functional relationship showed that the productivity increased non-linearly according to the increase of initial cell concentration regardless of initial sugar concentration. When the initial concentration of sugar was 60 g/l and that of biomass was 34.5 g/l, the fermentation was completed within one hour and its ethanol productivity was 26.7 g/l · hr, the latter including the times of cell separation, pouring the new substrate into a flask and sampling. When the initial sugar concentration was 120 g/l and the initial cell concentration 50.3 g/l, the fermentation was also finished within one hour and its productivity was 48.8 g/l · hr. The maximum ethanol productivity for eight different repeated fermentations in this work was 53 g/l · hr.

서 론

석유 자원이 고갈될 2000년대에 석유의 대체 연료와 화학 제품의 대체 기초 원료로 가장 각광을 받고 있는 화합물 중의 하나가 에탄올이다. 이러한 필연성으로 말미암아 고전적인 발효공정 중의 하나인 에탄올 발효공정에 대한 연구가 지속되고 있다. 현재 가장 활발히 진행되고 있는 연구는 에탄올 생산성을 경제적 수준까지 향상시키기 위한 발효 시스템의 개발이다. 발효와 동시에 에탄올을 분리해냄으로써 에탄올의 저해영향을 경감시킬 뿐만 아니라 발효

기 내의 균체 농도를 높임으로써 에탄올의 생산성을 향상시킬 수 있는 발효 시스템이 가장 많이 연구되어지고 있다. 현재 개발중인 발효 시스템은 추출, 증류 및 흡착의 개념을 도입한, 액-액 추출 발효(1-3), 감압 발효(4-5), 고상 흡착에 의한 선택적 발효(6), Gas-stripping 발효(7) 등의 시스템과 막 분리 공정의 개념을 도입한, 투석 발효(8, 9), 수상 stripping의 역삼투 발효(10), 유기상 stripping의 perstraction 발효(11), pervaporation 발효(12, 13) 등의 시스템으로 대별할 수 있다.

위의 시스템들은 각기 고유한 특성과 장점을 내포

하고 있으나 대부분 연구 초기 단계에 머무르고 있으며 산업화를 위해서는 해결되어야 할 문제점들도 많다. 감압 발효공정에는 진공에 의하여 증발된 에탄올 증기를 완전히 회수하기 어려울 뿐만 아니라 증기를 회수하기 위한 매우 낮은 온도의 냉매가 필요하다는 단점도 있다. 막분리공정이 발효 시스템에 상업적으로 이용되기 위해서는 발효공정에 안정하게 적용할 수 있는 우수한 분리 성능의 막분리 시스템의 개발이 선결과제로 남아 있다. 액-액 추출 공정은 에탄올의 생산비가 낮은 장점을 지니고 있으나 이 공정 역시 해결해야 할 문제점들이 많다. 이상계를 구성하는 고분자의 특성, 분자량, 농도, pH, 공존하는 무기이온의 농도 및 그 종류 등과 같은 조성상의 특성 규명은 물론 에탄올 상과 미생물 상의 분리 및 재순환에 대한 공정도 명확히 규명되어 있지 않은 초보적인 단계이다.(14)

본 연구에서는 발효 시스템을 구성하는 여러 공정 중 문제점이 가장 많은 분리공정을 보다 효율적으로 개선하고 에탄올의 생산성을 향상시키기 위하여 균체의 분리공정으로는 기계적 조작법인 원심분리공정을, 발효공정으로는 반복 회분식 공정을 이용하여 분리공정의 효율 개선 및 에탄올 생산성 향상에 대한 가능성을 타진하여 보았다.

재료 및 방법

균주 및 초기 균체농도

본 연구에 사용된 균주는 *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 24858이다. 4°C 사면 배지 상에 냉장 보관된 균주를 YM 액체 배지에 접종하고 30°C에서 16시간 동안 진탕배양한 후 에탄올 발효 실험의 접종용 균주로 사용하였다.

초기 당 농도가 120g/l 인 본 연구의 발효 배지 200ml가 주입된 500ml Erlenmeyer 플라스크 5 내지 20개에 접종용 균주 배양액 20ml를 가하고 30°C에서 150rpm으로 20시간 진탕배양하였다. 본 실험에서 고안한 Erlenmeyer 플라스크 원심분리기를 이용하여 초기 균체농도가 Table 1과 같이 되도록 하였다. 초기 균체농도 제조 방법은 발효 실험에 관한 설명에서 자세히 언급하였다. Table 1은 반복 회분식 발효 실험에 사용될 초기 균체농도를 결정하기 위하여 수행된 회분식 발효 실험의 초기 균체농도를 나타낸다. Table 2는 10회 반복된 회분식 발효 실험에서 1회 회분식 발효 시간이 1시간인 경우와 2시간인 경우에 사용된 균체의 초기 농도를 나타내

Table 1. Initial biomass concentrations for batch fermentations.

(Unit: g/l)

| S ₀ | X ₀ | | | | | | | | |
|----------------|----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0-1 | 1-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 |
| 60 | 0.6 | 8.4 | 15.3 | 26.2 | 33.5 | | | | |
| 80 | 0.3 | 7.9 | 15.6 | 27.6 | 32.3 | 41.7 | | | |
| 120 | 0.3 | 7.7 | 14.3 | 27.1 | 30.1 | | 51 | 65 | |
| 150 | 0.3 | 7.8 | 15.2 | 27.1 | 35.5 | 47.5 | | | 78 |
| 200 | 0.4 | 8.5 | 14.5 | 25.5 | 34.5 | 45.4 | | 63.4 | 77.9 |
| 230 | | 8.5 | 15.2 | 25.2 | | 46.1 | | | |

Table 2. Initial biomass concentrations used for repeated batch fermentations.

| Fermentation time[hr.] | S ₀ [g/l] | | | |
|------------------------|----------------------|------|------|------|
| | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 1 | 30.3 | 40.5 | 50.5 | 57.5 |
| 2 | 17.4 | 25.6 | 33.5 | 42.3 |

고 있다.

발효 기질

본 연구에서 사용한 발효 기질의 기본 조성은 포도당 100g/l, NH₄Cl 1.3g/l, MgSO₄ · 7H₂O 0.12g/l, CaCl₂ 0.06g/l, Yeast extract 8.5g/l이다. 회분식 발효의 초기 당 농도는 60, 80, 120, 150, 200 및 230g/l 이 되도록 하였으며 반복 회분식 발효 실험을 위한 초기 당 농도는 60, 90, 120 및 150g/l 이 되도록 하여 실험을 수행하였다. 초기 당 농도의 변화에 따른 다른 성분의 조성은 위의 기본 조성에 대한 당의 변화량에 비례적으로 변화시켰다.

발효 배지의 pH는 1N HCl과 1N NaOH 용액을 사용하여 4.5 내지 4.6 사이의 값이 되도록 조절하였다. 발효배지의 멸균은 당과 나머지 성분을 분리하여 수행함으로써 갈변화 현상을 방지하였다.

발효 실험

본 연구의 발효 실험은 크게 두 종류로 나누어진 다. 첫번째 발효 실험은 당 농도 변화에 따라서 발효가 종료되는 시간이 1시간, 2시간, 3시간 등이 되는 초기 균체농도를 결정하는 실험이다. 두번째 발효 실험은 앞에서 결정된 초기 균체농도를 사용하여 발효가 1시간 또는 2시간 내에 종료되는 발효 실험을 최소한 10회 반복적으로 수행하는 실험이다. 각각의

경우에 대한 초기 당 농도와 균체농도는 Table 1과 Table 2와 같다. 본 연구에서는 회전식 진탕 배양기를 사용하여 발효 실험을 수행하였다. 진탕 배양기의 작동 조건은 온도 30°C, 150 rpm이었다. 초기 균체농도 결정을 위한 발효 실험에서는 초기 균체농도 및 당 농도에 따라 시료 채취 시간 간격을 20분에서 4시간 사이에서 조절하여 발효 시간에 따른 발효 특성치의 변화 경향을 분명히 알 수 있도록 하였다. 반복적 회분식 발효 실험에서 발효가 끝난 500ml Erlenmeyer 플라스크를 Erlenmeyer 플라스크 원심분리기에 장착한 후 5분 동안 2000 rpm으로 회전시키면 균체는 삼각 플라스크 벽면에 붙게 된다. 원심분리기를 멈춘 후 용액을 따라내면 균체는 벽면에 남게 되고 나머지 용액만 흘러나오게 된다. 초기 당 농도가 60 내지 150g/l 인 용액 230ml를 균체만 남아 있는 Erlenmeyer 플라스크에 주입한 다음 1내지 2분 동안 잘 흔든 후 시료를 채취한다. 그 다음 1시간 또는 2시간 발효시킨 후 시료를 채취하고 다시 원심 분리법에 의하여 균체를 분리하는 조작을 반복한다. Table 2의 초기 당 농도 및 초기 균체농도의 발효 실험을 위의 방법으로 10회 반복 수행하면서 반복적인 회분식 발효에 의한 발효 특성을 규명하였다.

시료 분석

시료 채취 후, 즉시 시료가 담긴 시험관을 100°C 끓는 물에서 3분간 중탕하였다. 시험관을 상온으로 냉각시킨 후 4000 rpm에서 20분간 원심 분리하였다. 상등액은 잔당과 에탄올 농도 분석에, 침전물은 균체농도 분석에 사용하였다. 포도당 농도는 Glucose Analyzer (TOA, Glu-11, Japan)를 사용하여 분석하였으며, 에탄올 농도는 n-propanol을 기준 물질로 하여 Gas Chromatography (Hewlett Packard, HP-5890 Series II)를 사용하여 분석하였다. 균체농도는 균체 시료를 3회 세척한 후 95°C의 건조기에서 건조시켜 항량이 되었을 때의 값으로 하였다.

결과 및 고찰

초기 균체농도에 따른 발효 시간과 에탄올 농도 사이의 관계

Fig. 1은 초기 당 농도를 60g/l로 고정시켰을 때 초기 균체농도에 따른 발효 시간과 생성 에탄올 농도 사이의 함수 관계를 나타내고 있다. 초기 균체농도가 0.6g/l인 경우 발효 시간과 생성 에탄올 농도

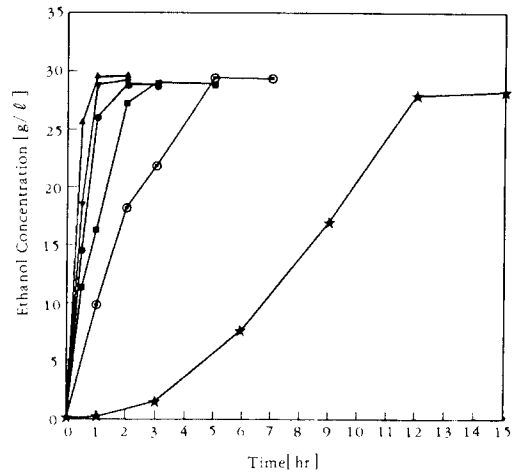


Fig. 1. Fermentation time vs. ethanol concentration with initial biomass concentration: $S_0 = 60g/l$ (* $X_0 = 0.60g/l$, $\circ X_0 = 8.40g/l$, $\blacksquare X_0 = 15.30g/l$, $\blacktriangle X_0 = 25.60g/l$, $\bullet X_0 = 26.16g/l$, $\blacktriangledown X_0 = 33.50g/l$).

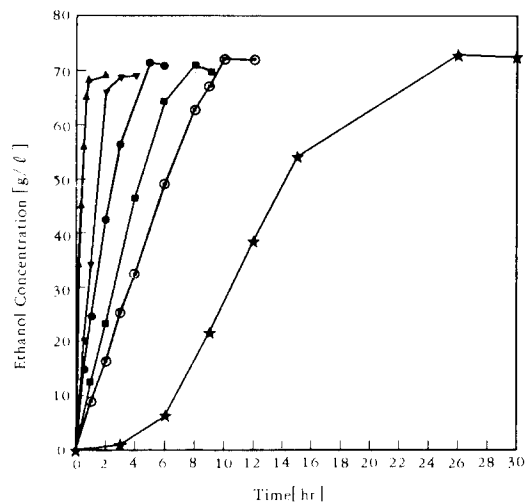


Fig. 2. Fermentation time vs. ethanol concentration with initial biomass concentration: $S_0 = 150g/l$ (* $X_0 = 0.30g/l$, $\circ X_0 = 7.80g/l$, $\blacksquare X_0 = 15.20g/l$, $\blacktriangle X_0 = 29.30g/l$, $\bullet X_0 = 39.20g/l$, $\blacktriangledown X_0 = 79.00g/l$).

사이의 함수 관계는 전형적인 회분식 발효의 함수

관계이다. 초기 균체농도를 증가시키면 지연 시간 없이 에탄올이 생성될 뿐만 아니라 그 생성속도 또한 급격히 증가됨을 알 수 있다.

초기 당 농도가 60g/l 일 때 발효가 한 시간 내에 종료되는 균체의 초기 농도는 26.16g/l 와 33.5g/l 사이에 존재함을 알 수 있다.

Fig. 2는 초기 당 농도가 150g/l 인 경우 초기 균체농도에 따른 발효 시간과 생성 에탄올 농도 사이의 함수 관계이다. 초기 접종 균체농도가 0.3g/l 일 때는 발효가 완전히 종료되는데 24시간 정도 소요되었으나 초기 균체농도가 79g/l 일 때는 약 50분만에 발효가 종료되었다.

초기 균체농도와 발효 종료시간 사이의 함수 관계

Fig. 1과 Fig. 2와 같은 발효 실험을 초기 당 농도가 90, 120, 200, 230g/l 인 경우에도 Table 2의 초기 균체농도에 대하여 수행하였다.

Fig. 3은 Table 2의 각 경우에 대한 발효 실험 결과로부터 얻은 초기 균체농도와 발효 종료시간 사이의 함수 관계를 나타내고 있다. 이 결과에 의하면 초기 당 농도가 60g/l 일 때 발효가 1시간만에 종료되는 초기 균체농도는 29g/l 근방이며, 초기 당 농도가 120g/l 일 때 발효가 1시간만에 끝나는 초기 균체농도는 64g/l 근방이었다.

Fig. 4는 발효 종료 시간을 매개 변수로 했을 때 초기 당 농도와 초기 균체농도 사이의 함수 관계를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 발효가 1시간 이내에 완료되는 초기 당 농도와 초기 균체농도 사이의 함수 관계는 개략적으로 선형 관계를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 발효가 종료되는 시간이 2시간 이상인 경우에는 발효 종료 시간이 큰 경우의 초기 당 농도 증가분에 대한 초기 균체량 증가분의 비가 발효 종료시간이 작은 경우의 비보다 작아지는 비 선형 함수를 나타내고 있다. 초기 당 농도를 일정하게 고정시켰을 때 발효 종료시간이 증가할수록 단위 발효 종료시간 증가에 대한 초기 균체 감소량은 점점 줄어드는 경향을 나타내었다. 환언하면 초기 당 농도 120g/l 인 경우 발효 종료시간을 4시간에서 3시간으로 1시간 줄이기 위하여 증가시켜야 할 초기 균체량보다 3시간에서 2시간으로 줄이기 위하여 증가시켜야 할 초기 균체량이 훨씬 큰 값을 나타내었다.

반복 회분식 발효 특성

Fig. 5는 초기 주입 당 농도가 60g/l 이고 초기 균체농도가 34.5g/l 이며, 1회 회분 발효 시간이 1

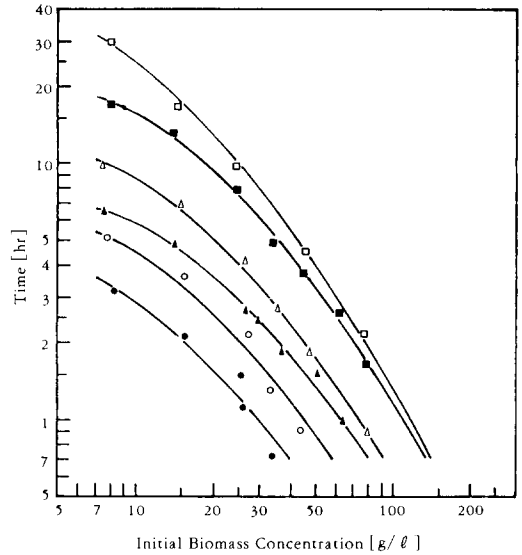


Fig. 3. Time for Complete Fermentation of Initial Sugar Concentration as Function of Initial Biomass. (Initial Sugar Concentration: ● 60g/l, ○ 80g/l, ▲ 120g/l, △ 150g/l, ■ 200g/l, □ 230g/l)

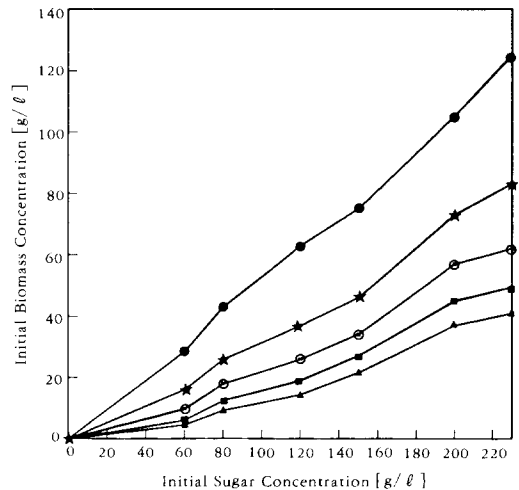


Fig. 4. Initial Sugar Concentration vs. Initial Cell Concentration for Time which Fermentation Completed (● Time 1hr., ★ Time 2hr., ○ Time 3hr., ■ Time 4hr., ▲ Time 5hr.)

시간인 반복 회분식 발효에서 발효 실험의 반복 횟수에 따른 발효 특성치의 변화 경향을 나타내고 있

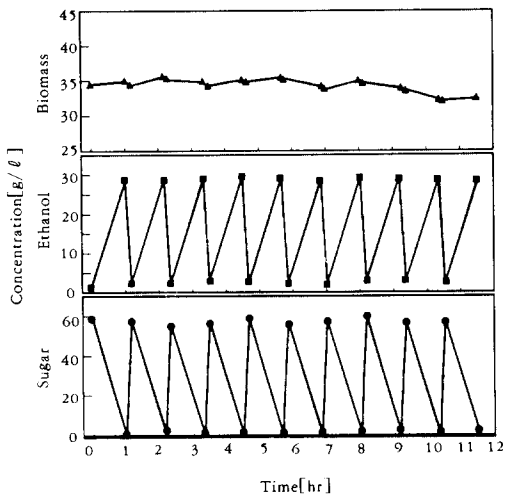


Fig. 5. Fermentation Characteristics vs. Fermentation Time in Repeated Batch Fermentation : $S_0=60g/l$, Fermentation Time = 1hr.

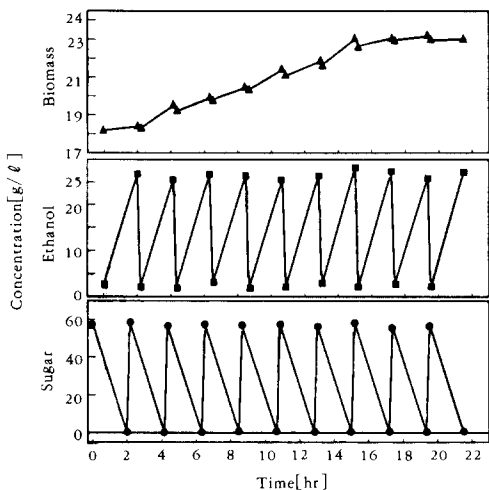


Fig. 6. Fermentation Characteristics vs. Fermentation Time in Repeated Batch Fermentation : $S_0=60g/l$, Fermentation Time = 2hr.

다. 초기 당 농도가 $60g/l$ 인 경우 1시간 내에 발효가 종료되는 초기 균체농도는 $29g/l$ 근방의 값이라는 것을 Fig. 4로부터 알 수 있다. 따라서 초기 균체농도 $34.5g/l$ 를 사용하면 발효가 1시간 이내에 종결되리라고 예측할 수 있다.

예측한 것과 같이 실제 반복 회분 실험에서 최초 1시간 발효 실험 후에 당은 모두 소모되었을 뿐만 아니라 발효 시간을 1시간으로 하여 10회 반복 실험하는 동안 당이 완전히 소모되지 않는 경우는 없었다.

반복 회분 실험을 수행하는 동안 매 발효 시작 초기 균체농도는 1시간 발효 후의 균체농도와 거의 동일한 값을 나타내어 1시간 동안 균체는 거의 성장하지 않은 것으로 생각되었다. 또한 10회 반복 실험에 소요된 약 12시간 실험 후의 균체농도는 반복 실험 초기 균체농도와 거의 같은 값인 $32.4g/l$ 를 나타내었다. 매 반복 실험마다 원심분리 후 균체를 제외한 용액 속에 섞여서 실험 플라스크 밖으로 배출되는 균체량을 측정하기 위하여 균체 분리 후의 용액을 시험관에 넣고 $4,000rpm$ 으로 30분 동안 원심분리하여 균체농도를 측정하였다. 이 결과에 의하면 원심분리 조작에서 밖으로 씻겨 나가는 균체는 1회당 $0.25g/l$ 미만이었다. 따라서 원심분리 과정에서 균체는 거의 실험 플라스크 밖으로 배출되지 않음을 알 수 있었다.

초기 당 농도가 $90, 120$ 및 $150g/l$ 인 경우에 대한 발효 1시간의 반복 회분 실험을 수행하였다. 각 경우 반복 횟수는 모두 10회였다. 초기 당 농도 $150g/l$ 를 제외하고는 초기 당 농도 $60g/l$ 의 반복 회분 실험과 동일한 경향의 실험 결과를 얻었다. 초기 당 농도 $150g/l$ 인 경우에는 균체 농축 과정에서 균체의 농도를 잘못 예측하여 실험 시작 후 측정된 균체농도는 예상 균체농도 $78g/l$ 보다 훨씬 낮은 값인 $59.5g/l$ 이었다. 이 때에도 발효 시간을 1시간으로 고정하고 10회의 반복 실험을 수행하였다. 발효 1시간 동안 초기 당의 90%가 소모되었으며 균체의 성장 경향을 찾아 볼 수 없었다.

Fig. 6은 초기 당 농도를 $60g/l$, 발효 시간을 2시간, 발효 반복 횟수를 10회로 한 반복 회분 발효 실험의 결과를 나타내고 있다. 이 경우 발효 2시간 만에 발효가 완료되는 예측 초기 균체농도와 비슷한 균체농도 $17.4g/l$ 를 사용하였기 때문에 매 반복 실험동안 초기 당은 모두 소모되었다. 그러나 Fig. 5의 실험과는 달리 균체는 매 발효 2시간 동안 성장 경향을 나타내어 반복 횟수가 증가함에 따라 균체농도는 $27g/l$ 까지 서서히 증가하였다. 발효 시간을 2시간으로 고정한 반복 회분식 실험에서 2시간만에 발효가 완료되는 예측 초기 균체농도를 사용하였을 때 초기 당 농도 $60g/l$ 인 경우에는 균체농도 $27g/l$ 까지, 초기 당 농도가 $90g/l$ 인 경우에는 균체농도

32g/l 까지 반복 실험 횟수에 따라 서서히 증가하였으나 초기 당 농도 120g/l 및 150g/l 인 경우에는 균체의 증가 경향을 찾을 수 없었다.

에탄올 생산성

반복 회분식 실험에서 발효가 끝난 후 균체 분리, 새로운 기질의 주입 및 시료 채취에 소요되는 시간은 약 10분이었다. Table 2에 기술한 1회 발효 시간이 1시간인 4종류의 반복 회분식 실험과 1회 발효 시간이 2시간인 4종류의 반복 회분식 실험 결과에 균체 분리, 기질의 주입 및 시료의 채취 시간을 고려하여 계산한 에탄올 생산성과 초기 균체농도 사이의 함수 관계가 Fig. 7에 표시되어 있다. 이 결과에 의하면 초기 균체농도가 낮은 경우 에탄올 생산성의 값은 초기 균체농도 값보다 다소 낮은 값을 나타내었으나 초기 균체농도가 증가하면 에탄올 생산성은 초기 균체농도 값에 근접하였다. 초기 당 농도 60g/l, 평균 초기 균체농도 33.77g/l, 1회 발효 시간 1시간, 반복 횟수 10회인 경우 에탄올 생산성은 26.74g/l · hr이었으며, 초기 당 농도 150g/l, 평균 초기 균체농도 53.1g/l 인 경우에는 에탄올 생산성이 52.7g/l · hr이었다. 본 연구에서는 1회 발효 시간을 1시간 및 2시간으로 고정하고 이 시간에 발효가 완료되는 균체농도를 사용하여 반복 회분식 발효를 수행하였으나 초기 균체농도를 증가시키고 1회 발효 시간을 30분대로 단축시키면 초기 당 농도 150g/l 이하인 경우에도 에탄올 생산성을 100g/l · hr 이상으로 증대시킬 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

Fig. 8은 Table 1의 여러 초기 당 농도와 초기 균체농도에 대한 실험으로부터 구한 초기 균체농도와 에탄올 생산성 사이의 함수 관계이다. 이 경우의 에탄올 생산성은 단지 발효 시간만을 고려한 생산성을 의미한다. 이 결과에 의하면 초기 균체농도 50g/l까지는 선형적인 함수 관계를 나타내나 50g/l 이상의 범위에서는 균체가 증가함에 따라 에탄올 생산성의 증가량이 점점 줄어드는 경향을 보였다.

Fig. 7과 Fig. 8로부터 동일한 초기 균체농도에 대한 회분식 실험의 에탄올 생산성과 10회 반복 회분식 실험의 에탄올 생산성을 구하여 이들 사이의 함수 관계를 표시한 것이 Fig. 9이다. 이 그래프의 결과에 의하면 1회 회분 실험한 결과의 에탄올 생산성으로부터 반복 회분식 실험에 대한 에탄올 생산성을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 초기 균체농도 30 내지 60g/l 사이에서 동일한 균체농도에 대하여 회분

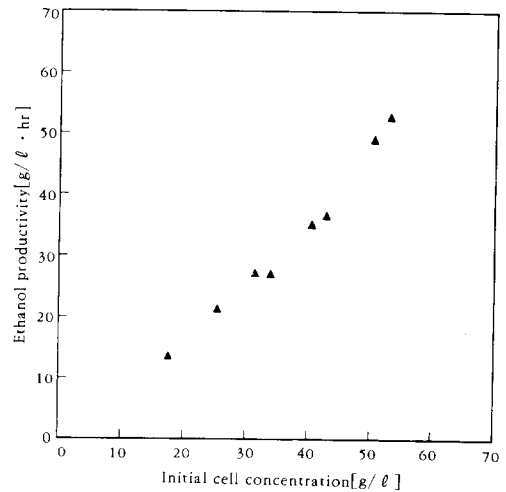


Fig. 7. Ethanol Productivity vs. Initial Cell Concentration in Repeated Batch Fermentation.

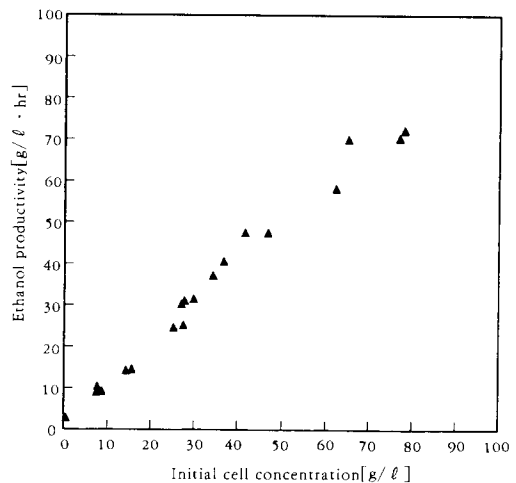


Fig. 8. Ethanol Productivity vs. Initial Cell Concentration in Batch Fermentation.

실험한 에탄올 생산성이 반복 회분 실험의 에탄올 생산성보다 다소 높은 것으로 나타나 있다. 이러한 결과는 반복 회분식 실험인 경우 균체의 분리 및 기질의 주입 등에 소요되는 시간을 에탄올 생산성 계산에 포함시킨 반면, 회분식 실험의 에탄올 생산성 계산을 위한 시간은 단지 발효 실험에 소요된 시간만 고려한 영향 때문이다. 실제 발효 시간만 고려하

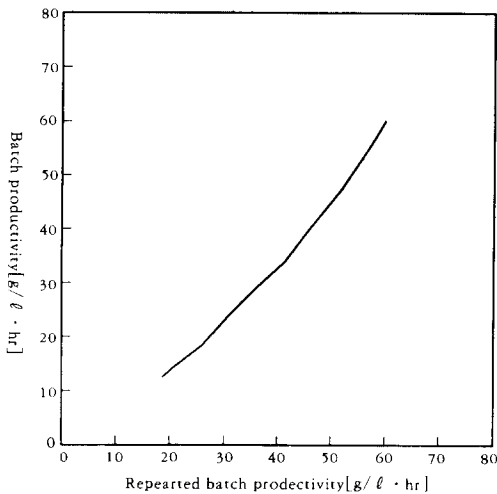


Fig. 9. Productivity Relationship between Repeated Fermentation and Batch Fermentation at Same Initial Cell Concentrations.

게 되면 동일한 초기 균체농도에 대한 반복회분식 발효의 평균 에탄올 생산성이 회분식 발효의 에탄올 생산성보다 다소 높게 나타났다. 회분식 발효에서는 원하는 초기 균체농도를 얻기 위하여 수행되는 균체 농축 과정에 소요되는 시간이 균체가 높은 경우 30 분 가량 소요되어 실제 발효 시에는 균체의 활성이 다소 저하되나, 반복 회분식 발효에서는 발효가 끝난 후 다시 새로운 배지가 주입될 때까지 7내지 8분만 소요되기 때문에 균체 활성의 저하에 커다란 영향을 미치지 않는 것으로 해석된다.

요 약

본 연구에서는 균주로 *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 24858을, 초기 당 농도로는 60, 90, 120 및 150 g/ℓ을, 1회 발효 시간으로는 1시간 또는 2시간을, 초기 균체농도로는 17.5g/ℓ 내지 53.1g/ℓ 사이의 값을 사용하여 10회 반복 회분식 실험을 수행하였다.

이 결과로부터 반복 회분식 실험에서의 평균 초기 균체농도와 에탄올 생산성 사이의 함수 관계를 규명하여 보았다. 초기 균체농도와 에탄올 생산성 사이의 함수 관계는 초기 균체농도가 증가함에 따라 초기 당 농도에 관계없이 에탄올 생산성이 비 선형적으로 증가하는 함수 관계를 나타내었다. 초기 당 농

도가 60g/ℓ 이고, 초기 균체농도가 34.5g/ℓ 인 경우 발효는 1시간 내에 완료되었으며 균체의 분리, 새로운 기질의 주입 등의 조작을 고려한 총 10회 반복 회분 실험의 에탄올 생산성은 26.7g/ℓ · hr이었다. 초기 당 농도가 120g/ℓ 이고 초기 균체농도가 50.3g/ℓ 인 경우에도 1시간 내에 발효가 완료되었으며 이때의 에탄올 생산성은 48.8g/ℓ · hr이었다.

본 연구에서 수행한 8종류의 10회 반복 회분식 실험을 통하여 얻은 최대 에탄올 생산성은 53g/ℓ · hr이었다.

감 사

본 연구는 1993년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 대하여 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. A. Philips and A. E. Humphrey (1983), "Process Biotechnology for the Conversion of Biomass into Liquid Fuels" in *Liquid Fuel Developments*, CRC, Series in Bioenergy Systems, D. L. Wise, Ed. (CRC Press, Boca Raton, FL) pp. 65-95.
2. M. Minier and G. Goma (1982), *Biotechnol. Bioeng.*, **24**, 1565.
3. S. Ishii, M. Taya and T. Kobayashi (1985), *J. Chem. Eng. Jpn.*, **18**, 125.
4. A. Ramalingham and R. K. Finn (1977), *Biotechnol. Bioeng.*, **18**, 538.
5. G. R. Cysewsi and C. R. Wike (1977), *Biotechnol. Bioeng.*, **19**, 1125.
6. H. Y. Wang, F. M. Robinson and S. S. Lee (1981), *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, **11**, 555.
7. P. A. Albertsson (1971), *Partition of Cell Particles and Macromolecules*, John Wiley and Sons., New York.
8. K. H. Kyung and P. Gerhardt (1984), *Biotechnol. Bioeng.*, **26**, 252.
9. B. J. Abbott and P. Gerhardt (1970), *Biotechnol. Bioeng.*, **12**, 577.
10. A. Garcia, E. L. Iannotti and J. L. Fisher (1986), *Biotechnol. Bioeng.*, **28**, 785.
11. G. T. Frank and K. K. Sirkar (1985), *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, **15**, 621.

12. W. J. Groot, C. E. Van Den Oever and N. W. F. Kossen (1984), *Biotechnol. Lett.*, **6**, 709.
13. M. A. Larrayoz and L. Puijaner (1987), *Biotechnol. Bioeng.*, **30**, 692.
14. B. L. Maiorella et al. (1984), *Biotechnol. Bioeng.*, **26**, 887.