

유기산의 저해를 조절하기 위한 *Escherichia coli*의 전기투석배양

김인호* · 윤태호

충남대학교 화학공학과

Control of Organic Acid Inhibition in *Escherichia coli* Culture with Electrodialysis

In Ho Kim* and Tae Ho Yoon

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764

Abstract — *E. coli* growth is inhibited by organic acids produced in the broth. In order to reduce the inhibition, an electrodialysis unit was used. Model solutions (acetic acid plus distilled water or M-9 medium) were tested in the unit for investigating the optimum condition of current and voltage. Electrodialysis cultures were performed with the optimum condition where the highest current efficiency could be attained. The distilled water plus acetic acid gave us a higher current efficiency than the M-9 plus acetic acid. Electrodialysis efficiently removed acetic acid and so enhanced the specific growth rate of *E. coli* compared with the control experiment without electrodialysis.

일반적으로 발효 공정이 진행될 때 포도당과 무기염류를 기질로 섭취하는 미생물들은 대사 산물로서 산과 여러 가지 유기물을 생성하게 된다. 이때 생성되어진 산은 미생물의 성장을 저해한다(1). 이러한 저해 효과를 경감시키는 공정으로 여러 가지 연구가 수행되어 왔는데, 예를 들면 투석배양(2), 용매추출법(3), 진공증발배양(4) 등이 있다. 이들 중 투석배양법은 1960년대부터 연구되었으나 연구가 미흡한 상태였고(5), 막 장치의 개발이 활발했던 1970년대에 들어 체계적으로 연구되었다.

한편 1980년대에는 전기투석배양으로 해리된 이온-아세트산, 젖산 이온 등-들을 정전기적 인력과 이온교환막의 선택적 투과 능력을 이용하여 강제로 제거 농축하여 미생물 증식의 저해 요인을 제거할 수 있게 되었다. 전기투석장치에 사용된 이온교환막은 1950년대 상업적으로 생산되어 1960년대 대량으로 탈염 공정에 이용되었으며, 이 탈염 공정을 발효 공정에 응용하여 아세트산, 젖산과 프로피온 산의 정제에 대한 연구가 수행되었다(6-8).

전기투석이 진행되고 있는 동안 물의 전기분해와 염의 이동에 기인하는 pH 변화가 발생되고, 배지 내의 중요한 성분인 인산 이온이 이동하게 된다(9). 이때

전류 효율은 pH에 따라 변화하며 따라서 효율이 최대인 최적 전압을 찾고, 배지 내의 인산은 외부에서 공급해 줄 필요가 있다.

본 연구에서는 모델 용액으로 증류수 또는 M-9배지에 아세트산을 가해 전압 변화에 따른 아세트산 제거 속도를 관찰하였고, pH 변화에 따른 아세트산 제거 속도를 측정하였다. 그리고 모델 용액으로 실험한 결과로 얻은 최적 전압 상태에서 전기투석발효 실험을 수행하여 대장균이 증식하는 동안 아세트산 제거 효과를 관찰하며 아세트산의 제거가 대장균의 증식 속도에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 대조군으로서 회분배양과 유가배양을 수행하였고, 회분 및 유가배양과 결합한 전기투석배양을 실시하였다.

재료 및 방법

균주 및 배지 조성

사용 균주인 *E. coli* W3110(ATCC 27325)은 K-12 균주의 변형균주이며, 종배양용 배지로 포도당 5 g/l의 M-9(Table 1)배지를 사용하여 12시간 동안 종배양하였다. 주배양용 배지는 초기 포도당 20, 50, 100 g/l의 M-9배지를 사용하였고, 접종량은 10%(v/v)였다. 아세트산의 저해 효과를 보기 위하여 필요시 외부에서 아세트산을 가해 변화를 관찰하였다.

Key words: Electrodialysis, acetic acid, *E. coli* culture

*Corresponding author

분석 방법

아세트산 농도는 HPLC(Waters, U.S.A.)에 유기산 칼럼(Rezex column, Phenomenex, U.S.A.)을 장착하여, 포도당 농도는 Glucose Trinder(Sigma, U.S.A.)로 문헌(10)의 방법에 의해 측정하였다. 균체 농도의 측정은 600 nm에서 분광광도계(Milton Roy, Spectronic 20D, U.S.A.)를 사용하여 Optical density(O.D.) 값으로 측정하였고 O.D. 1은 0.4 g dry wt./l로 환산하였다.

전기투석장치

음이온교환막은 Neosepta AMX(Tokuyama Soda Co., Japan), 양이온교환막은 Neosepta CMX를 사용했다. 전기투석장치의 막 면적은 200 cm²이었다. Stack은 3구획으로 구성되었고, 아크릴 판과 실리콘 고무

판으로 막 사이의 공간을 만들었다. Anode로 백금선을, cathode로 스테인레스 망을 이용하였다(Fig. 1). 이온교환막 사이의 공간을 유지하고, 흐름을 돕기 위해 플라스틱 재질의 분배기를 삽입하였다. 전극 용액으로 음극은 0.1N NaOH, 양극은 0.1N H₂SO₄ 용액을 사용하였다.

전기투석실험

전기투석발효의 예비 실험으로 아세트산을 넣은 증류수와 M-9배지로 실험을 하였다. pH의 영향을 보기 위하여 암모니아수로 pH 조절을 하였다(Table 2). 전압은 power supply E-C 420(E-C apparatus corporation, U.S.A.)으로 공급하였으며 전류의 변화를 기록하여 전류 효율을 계산하였다. 전극 용액의 순환 속도는 각각 40 ml/min으로 하였고, feed의 유속은 60 ml/min으로 하였다.

Table 1. M-9 medium compositions

Composiotion	Concentration (per l)
MgSO ₄	0.24 g*
CaCl ₂	0.011 g*
KH ₂ PO ₄	3 g
Na ₂ HPO ₄	6 g
NaCl	0.5 g
NH ₄ Cl	1.0 g*
Glucose	x g

Initial pH 7.4 adjusted with NaOH
 *autoclaved separately
 x: variable

회분발효실험

포도당의 고갈 속도와 아세트산의 생성 속도를 측정하기 위하여 포도당의 농도를 변화시켰고, 필요시 외부에서 아세트산을 가하여 저해 효과를 관찰하였다(Table 3). 발효조 실험은 소형발효기(한국발효기, 모델 KF5)에서 1l 배양액을 채우고, 교반 속도는 300 rpm, 통기량은 2 vvm, pH는 7.4로 유지하였다.

유기배양실험

초기 포도당의 농도를 낮추고 발효 개시 12시간

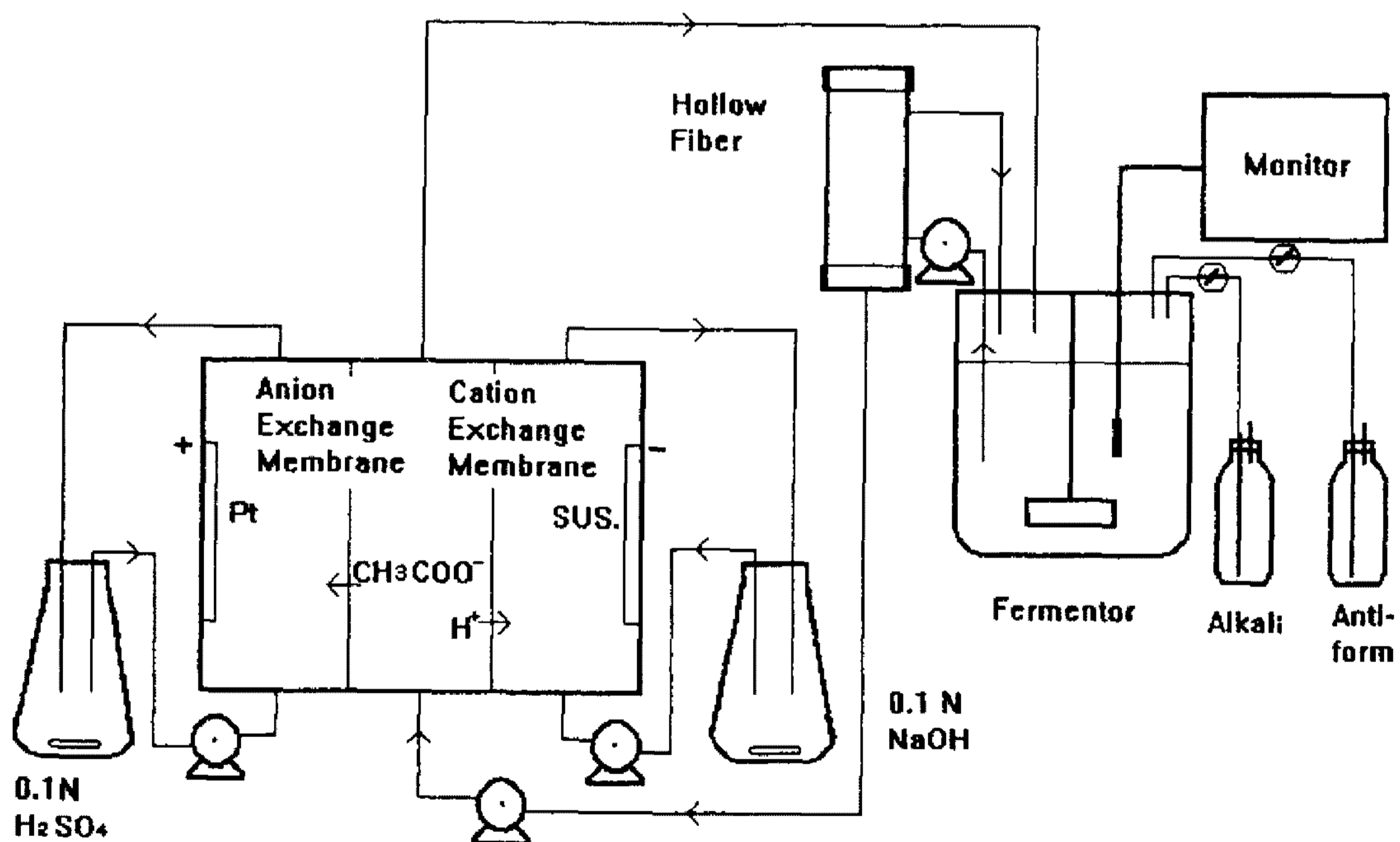


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

후에 초기의 포도당의 농도와 같은 양의 포도당을 나누어 공급하였다(Table 4). 포도당의 투입 방식을

변화시켰고, 염의 추가 여부에 따른 변화를 관찰하였다. 또한 아세트산의 저해 효과를 극대화하기 위하여 외부에서 아세트산을 추가하였다.

Table 2. Experimental conditions for electro dialysis

Exp. No.	Model solution	pH control	Voltage
# 1	D.W. 1 l+ Acetic acid 10 g	NH ₄ OH 25% sol'n	2~10 V
# 2	"	None	"
# 3	M-9. 1 l+ Acetic acid 10 g	NH ₄ OH 25% sol'n	5~10 V
# 4	"	None	"

전기투석발효실험

초기 포도당의 농도를 변화시켜 회분식 전기투석 발효를 실시하였고, 유가식 전기투석배양에서는 유가 배양의 조건과 동일하게 실험을 수행하였다(Table 5). 필요시 외부에서 아세트산을 가하여 저해 효과를 관찰하였다. 배양액에 의한 이온교환막의 오염을 최소화하기 위하여 발효 수행중 배양액을 0.1 μm의 미세 공을 가진 실관막(Hollow fiber, Amicon, U.S.A.)을 통과하여 발효조로 순환시켰다. 실관막에 걸리는 압력은 7 psi 미만이 되도록 조업을 하였고, 전기투석 장치로의 feed 유속은 전기투석 예비 실험과 동일하게 수행하였다.

Table 3. Batch culture conditions and data

Exp. No.	Initial glucose concentration (g/l)	Final cell O.D.	Final acetic acid concentration (g/l)	Y _{X/S} (%)	Y _{P/S} (%)	Remark
# 5	50	8.4	12.3	6.7	24.6	Fig. 5A
# 6	100	10.1	9.2	5.5	12.0	Fig. 5B
# 7	50	6.4	15.6	12.2	26.7	Initial acetic acid 10 g/l Fig. 5C

Table 4. Fed-batch culture conditions and data

Exp. No.	Initial glucose concentration (g/l)	Fed glucose (g)	Final cell O.D.	Final acetic acid concentration (g/l)	Y _{X/S} (%)	Y _{P/S} (%)	Remark
# 8	20	20	13.4	14.8	13.4	8.5	10g acetic acid & salt added Fig. 6A
# 9	50	50	8.3	16.0	4.2	20	Fig. 6B

Table 5. Electro dialysis culture conditions and data

Exp. No.	Initial glucose concentration (g/l)	Fed glucose (g)	Final cell O.D.	Final acetic acid concentration (g/l)	Y _{X/S} (%)	Y _{P/S} (%)	η (%)	Remark
# 10	50	0	10.2	13.4	8.2	26.8	38	Fig. 7
# 11	20	20	20.4	12.1	20.4	5.3	25	10 g acetic acid & salt added Fig. 8A
# 12	50	50	13.3	21.6	5.3	21.6	35	Fig. 8B

결과 및 고찰

전기투석실험

Fig. 2는 pH를 7.4로 조절하면서 전기투석을 실시하여 구한 전류 효율 대 전압의 결과이다. 전류효율(η)은 이동한 아세트산의 당량÷(시간×전류)으로 계산하였다(9). M-9배지에 아세트산을 가해 실험을 한 경우, 증류수에 비해 전류 효율이 30% 정도 낮게 나오고 최적 전압은 증류수의 6.2V보다 높은 8.3V의 결과를 보인다. 증류수에 비해 M-9배지의 효율이 낮은 이유는 아세트산 이온보다 이동도가 높은 M-9배지 내의 이온들이 먼저 이온교환막을 통해 이동하기 때문이다. 그리고 최적 전압보다 높은 전압에서 전류 효율이 감소하는 이유는 막표면에서의 농도 분극 현상에 의해 물의 전기분해가 심화되기 때문이며 증류수의 경우 이온의 수가 M-9배지에 아세트산을 가한 경우보다 적으며 농도 분극 현상이 빨리 일어나 최적 전압이 낮게 나오는 것으로 생각된다.

증류수에 아세트산을 가하고 초기 pH를 NH₄OH 용액으로 7.4에 맞추어 8.3V 조건으로 pH 조절을 하지 않고 전기투석을 하면 5시간 후의 pH는 3.5로 감소한다(Fig. 3A). 이처럼 pH가 떨어지게 되면, 아세테이트 이온과 H⁺ 이온이 결합하게 되어 해리된 아세테이트 이온의 수가 감소하므로 아세트산의 제거 속도도 감소하게 된다. M-9배지에서 pH 조절을 하지 않았을 경우 5시간 후의 pH는 6.0으로 증류수의 경우에 비해 pH가 덜 감소한다(Fig. 3B). 이것은 배지 성분 중의 인산 이온이 완충 역할을 하기 때문이다.

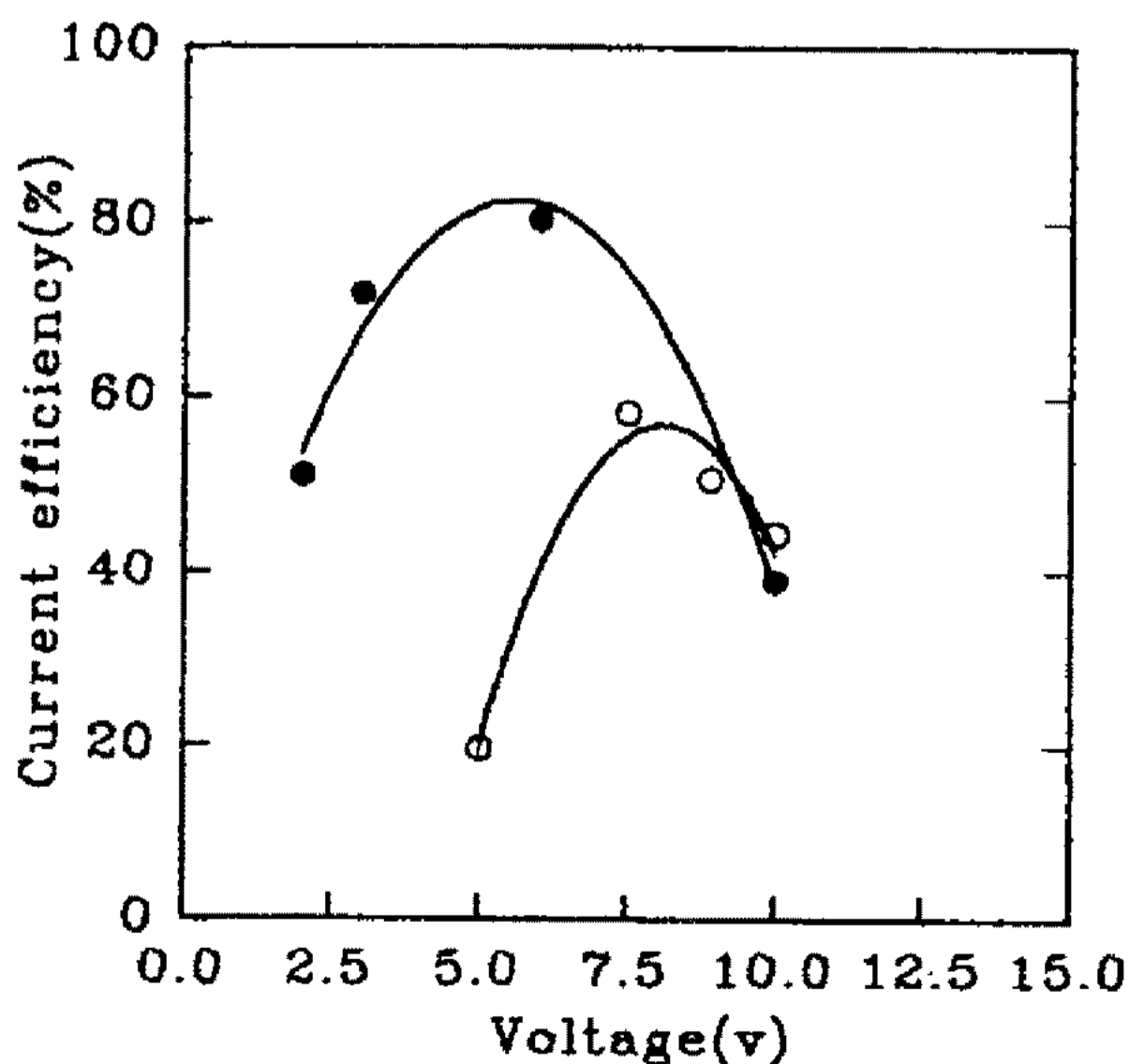


Fig. 2. Current efficiency versus voltage. ●: Distilled water with acetic acid 10 g/l, ○: M-9 medium with acetic acid 10 g/l

이와 같은 pH 하강은 전압이 높아질수록 빨리 진행되는 경향을 보였다(Fig. 4). 이것은 이온교환 막과 용액상 간에 일어나는 농도 분극 현상이 높은 전압에서 빨리 나타나는 것을 반영한다(11). pH 조절을

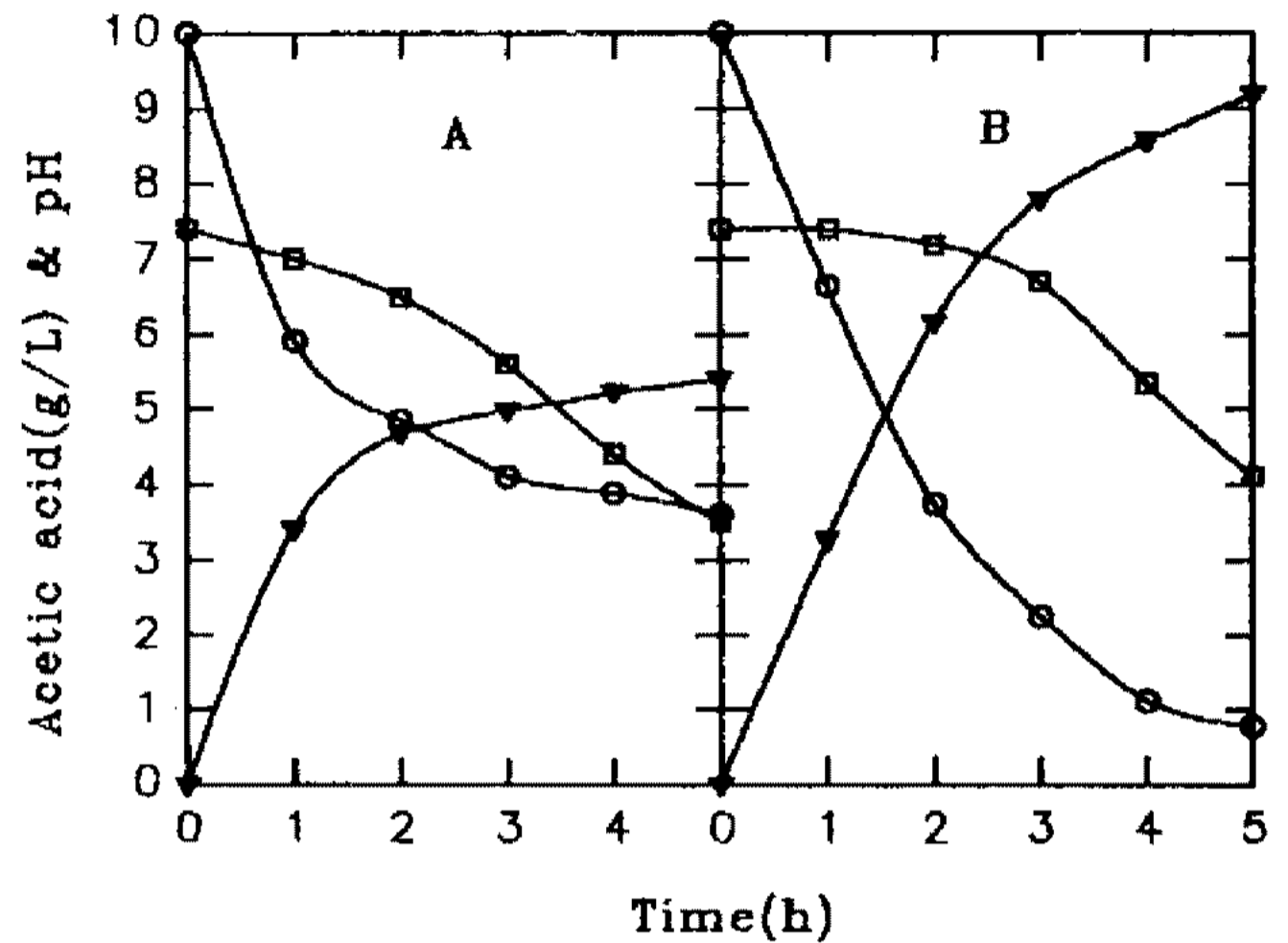


Fig. 3. Variation of acetic acid concentrations in two reservoir and pH change in the model solutions; Initial voltage=8.3 v.

Model solution A: Distilled water with 10 g/l acetic acid, B: M-9 medium with 10 g/l acetic acid, ○: Fermentor side acetic acid concentration, ▽: Dialysate side acetic acid concentration, □: Fermentor side pH

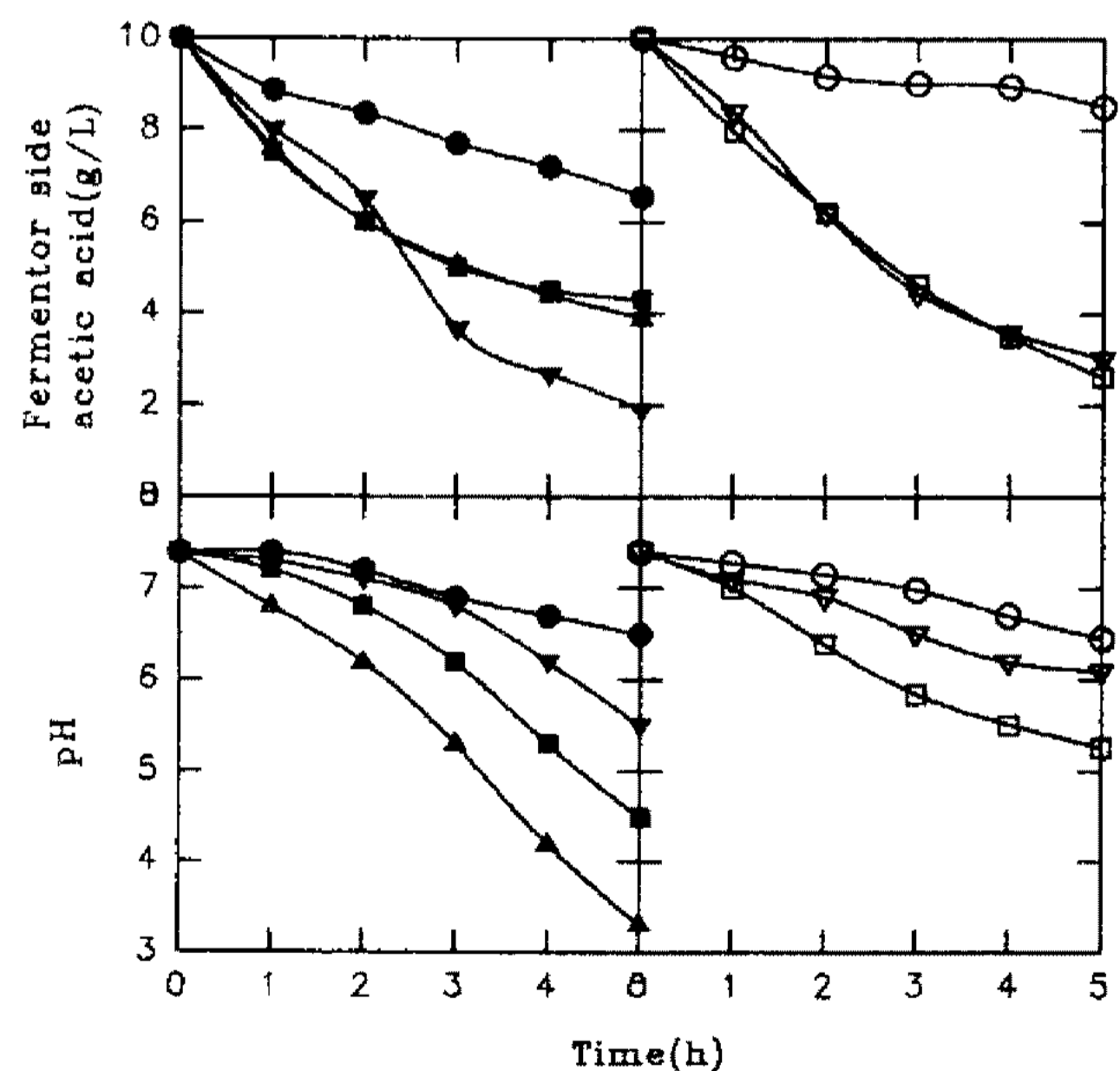


Fig. 4. Variation of fermentor side acetic acid concentration and pH at different voltages in the model solution.

Closed symbol: distilled water with 10 g/l acetic acid, Opened symbol: M-9 medium with 10 g/l acetic acid, ● (2V), ▽ (3V), ■ (6V), ▲ (10V), ○ (5V), ▽ (7V), □ (10V)

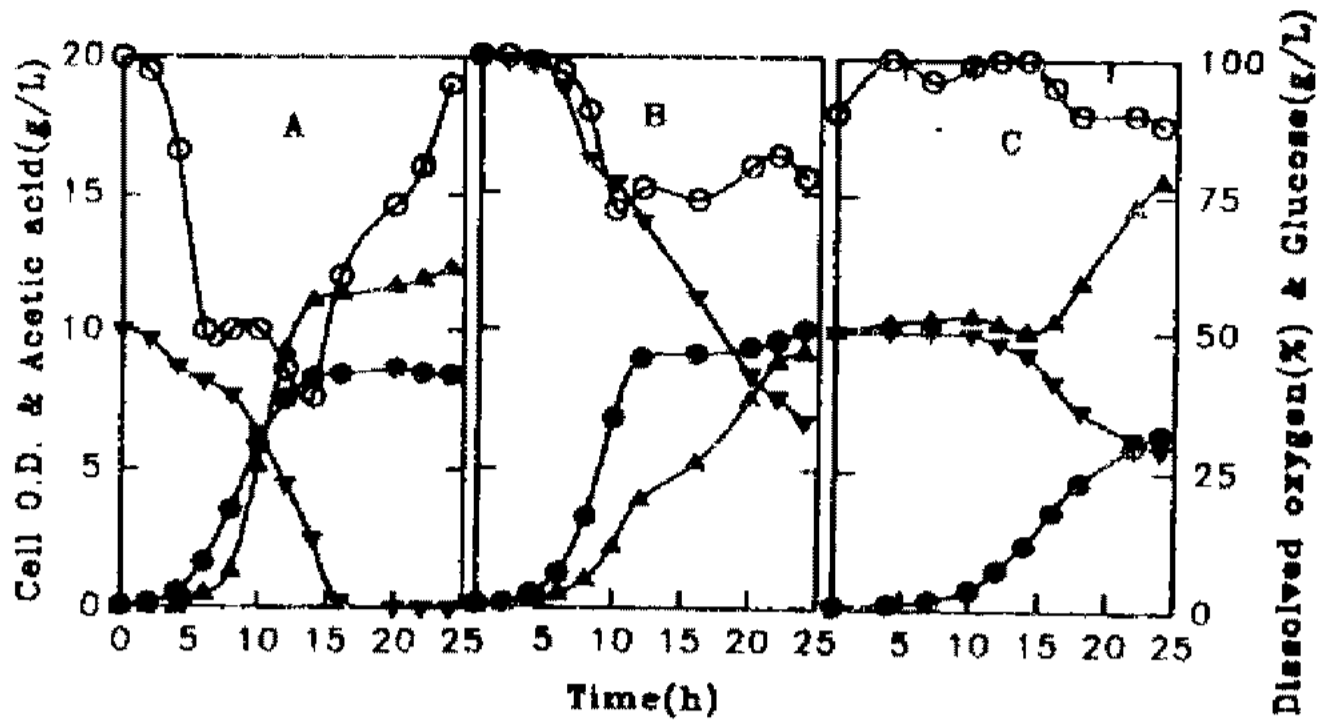


Fig. 5. Batch culture profile.
 A: Glucose 50 g/l, M-9 medium, B: Glucose 100 g/l, M-9 medium, C: Glucose 50 g/l, M-9 medium + Acetic acid 10 g, ●: Cell O.D., ▼: Glucose in fermentor, ▲: Acetic acid in fermentor, ○: Dissolved oxygen

하면서 전기투석을 실시하면 cathode의 전극 용액 쪽으로 NH_4^+ 이온이 이동하지만 pH 감소에 인해서 생기는 아세테이트 이온의 감소를 억제하여 아세트산의 이온 수를 유지시키므로 전체적인 전류 효율은 증가하였다.

회분발효실험

초기 포도당 농도를 50 g/l로 실험한 경우 24시간 발효 후, 최종 세포 농도는 O.D.로 8.4이었고, 아세트산의 최종 농도는 12.3 g/l였다(Table 3). 이 경우 10시간까지의 비성장속도는 0.42 h^{-1} 이었다가 점차로 감소하였다(Fig. 5A). 아세트산이 다량으로 생성되는 시점은 대수 성장기에 접어들면서 발효조내의 용존 산소량이 50% 미만일 때이고 더불어 아세트산 농도가 급속히 증가한다. 이런 사실은 세포 내 호흡이 어려울 경우 세포 활성이 감소하여 포도당의 대부분을 유기산 생성에 소모한다는 보고와 일치한다(12). 초기 포도당 농도 50 g/l의 배지를 사용할 경우 발효 개시 후 15시간이 경과하면 포도당이 거의 고갈되었다. 아세트산 생성이 더 많이 되도록 초기 포도당 농도를 100 g/l로 올려 실험한 경우에는 포도당의 기질 저해 효과가 나타나 용존산소가 높았고 아세트산이 서서히 생성되었다. 초기 포도당 100 g/l의 경우 최종 세포 농도는 O.D.로 10.1이었고, 아세트산의 최종 농도는 9.2 g/l, 잔존 포도당은 33 g/l로 세포 활성이 전반적으로 낮았다(Fig. 5B).

아세트산의 저해 효과를 잘 관찰하기 위하여 발효를 시작할 때 미리 10 g/l의 아세트산을 가하여 비성장 속도를 관찰하였다(Fig. 5C). 아세트산의 초기 농도가 10 g/l인 경우 10시간이 지난 후에야 대수 성장기에 도달하였으며 비성장속도는 낮은 값을 보였다($\mu=0.17$

h^{-1}). 발효 개시후 24시간까지 포도당의 소비가 20 g에 그쳤으며 수율 면에서 보면 $Y_{X/S}=12.2\%$, $Y_{P/S}=26.7\%$ 로 Fig. 5A의 경우보다 세포 수율이 높았다. 이 경우 최종 세포 농도는 O.D.로 6.4이고, 배지로 분비된 아세트산 농도는 5.6 g/l이었다.

Table 3의 결과를 보면 초기 포도당 농도가 100 g/l인 경우 세포의 수율이 5.5%로 초기 포도당 농도 50 g/l인 경우에 비해서 낮은 값을 보였다. 이는 최종 세포농도는 비슷하지만 포도당의 소모량이 많으므로 상대적인 수율의 감소를 보인다. 초기 아세트산의 농도가 10 g/l인 경우 세포 성장이 둔화되어 용존 산소량이 85% 이상을 유지하는 것으로 보아 대장균의 호흡율을 감소시키는 것을 보였다. 따라서 호흡에 의해 발생하는 이산화탄소의 양이 적으므로 포도당은 세포와 아세트산을 만드는 데에 많이 사용되고, 호흡에 적게 사용되어 $Y_{X/S}$ 와 $Y_{P/S}$ 는 아세트산을 첨가하지 않은 경우보다 높은 값을 보인다. 아세트산이 첨가된 경우의 $Y_{X/S}$ 가 첨가되지 않은 경우의 $Y_{X/S}$ 보다 높은 이유를 정량적으로 생각하면 다음과 같다. 전자의 경우 포도당 소모량이 20 g으로 후자의 포도당 소모량인 50 g에 비해 40%에 불과하였고, 반면에 전자의 세포 O.D.는 후자의 세포 O.D.의 76%까지 성장을 하였다. 따라서 전자의 세포수율($Y_{X/S}=12.2\%$)이 후자의 세포수율($Y_{X/S}=6.7\%$)보다 큰 값을 보였다.

유기배양실험

발효 초기의 포도당 농도를 낮추고, 아세트산의 저해 효과를 잘 볼 수 있도록 세포가 대수 성장기에 도달한 후 외부에서 아세트산을 가하여 저해 효과를 관찰하였다(Fig. 6A). 초기의 포도당 농도를 20 g/l로 하고, 7시간 후 대장균이 대수 성장기에 도달한 후 아세트산 10 g을 투입하여 비성장속도의 변화를 관찰하였다($\mu=0.54 \text{ h}^{-1} \rightarrow \mu=0.08 \text{ h}^{-1}$). 발효 개시 12시간 후부터 매 시간마다 50배 농축된 M-9배지 4 ml와 포도당 4 g을 1시간 간격으로 5번 공급하였다. 이 경우 외부에서 아세트산이 유입되면 대장균의 활성이 감소하여 용존 산소량이 증가하고 포도당의 소모 속도와 아세트산의 생성 속도는 감소하였다. 최종 세포 농도는 O.D.로 13.4였고, 생성된 아세트산의 양은 4.8 g이었다(Table 4).

한편 초기 포도당 농도를 50 g/l로 하고 발효 개시 12시간 후에 50 g의 포도당을 투입하였다(Fig. 6B). 포도당의 농도가 급격히 상승하면서 아세트산의 생성 속도가 급속하게 증가하였다. 이 경우 최종 세포 농도는 O.D.로 8.3으로 회분실험의 Fig. 5A의 경우와 비슷한 세포 농도를 보였으며 투입한 포도당은

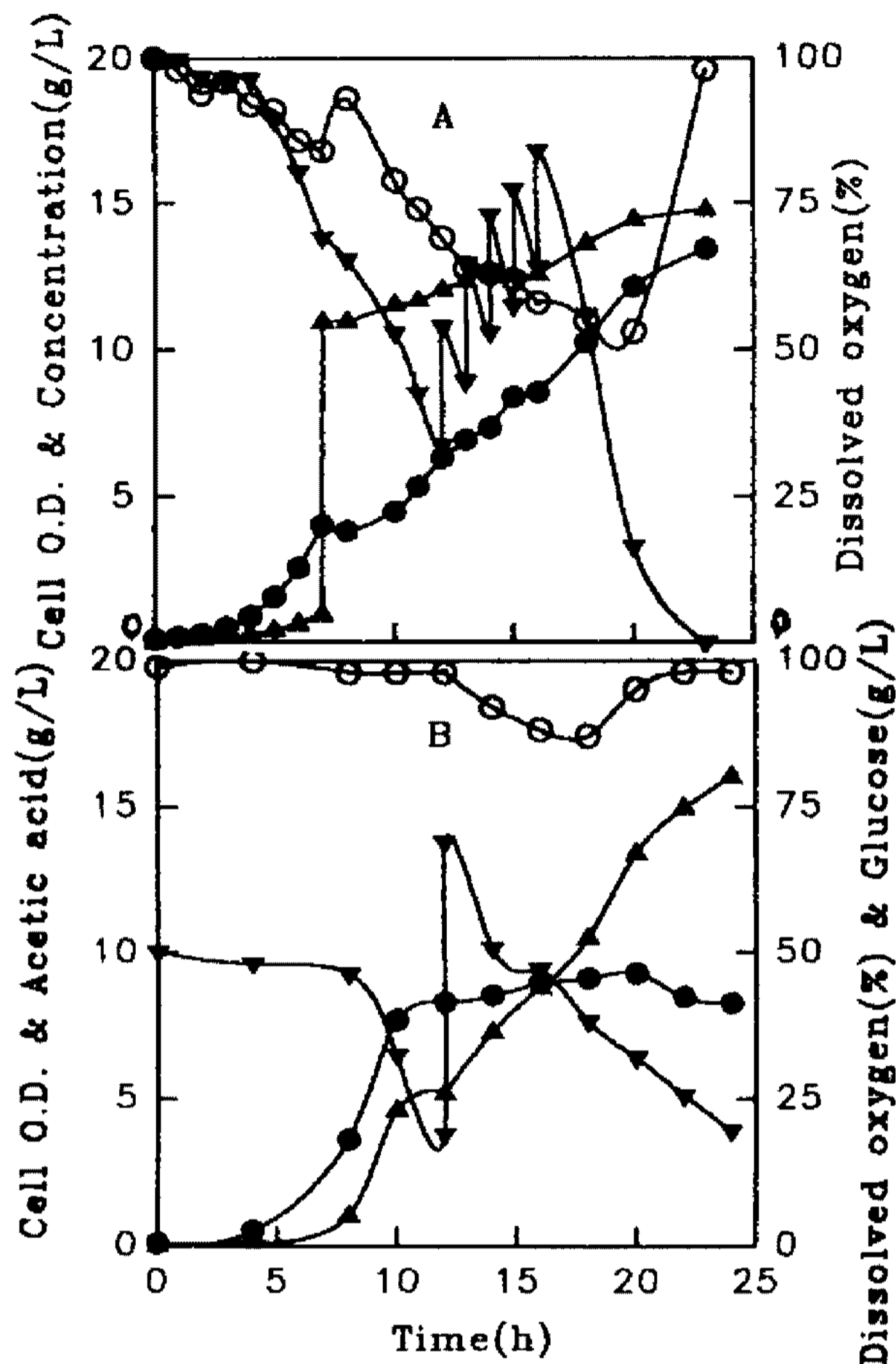


Fig. 6. Fed-batch culture profile. A: Glucose 20 g/l+20 g, M-9 medium+Acetic acid 10 g, B: Glucose 50 g/l+50 g, M-9 medium.

아세트산으로 빨리 전환되었다. 이때 최종 아세트산의 농도는 16.0 g/l이었다.

Table 4의 결과를 보면 초기 포도당 농도가 20 g/l이고 매시간 마다 적절한 양의 포도당과 염 성분들을 넣어 주었을 때 아세트산의 저해 효과에도 불구하고 세포의 수율 면에서 상당한 증가를 보였고, 이에 반해서 아세트산의 생산은 상당히 작은 값을 보였다. 이것은 외부에서 적절한 양의 포도당과 농축된 M-9 배지 성분이 지속적으로 공급되면 회분배양에 비하여 세포 수율이 증가하고, 최종 세포 농도 역시 증가함을 관찰할 수 있었다. 또한 염 성분들이 고갈된 상태에서 과량의 포도당만이 기질로 사용될 경우 세포의 증식은 억제되는 반면, 공급되는 포도당의 대부분이 아세트산으로 전환됨을 보여 주었다.

전기투석발효실험

초기의 포도당 농도를 50 g/l로 하고 회분식 전기투석발효 실험을 수행하였다. 이 경우 대수 성장기에 생성되는 아세트산이 전기투석장치를 통하여 외부로

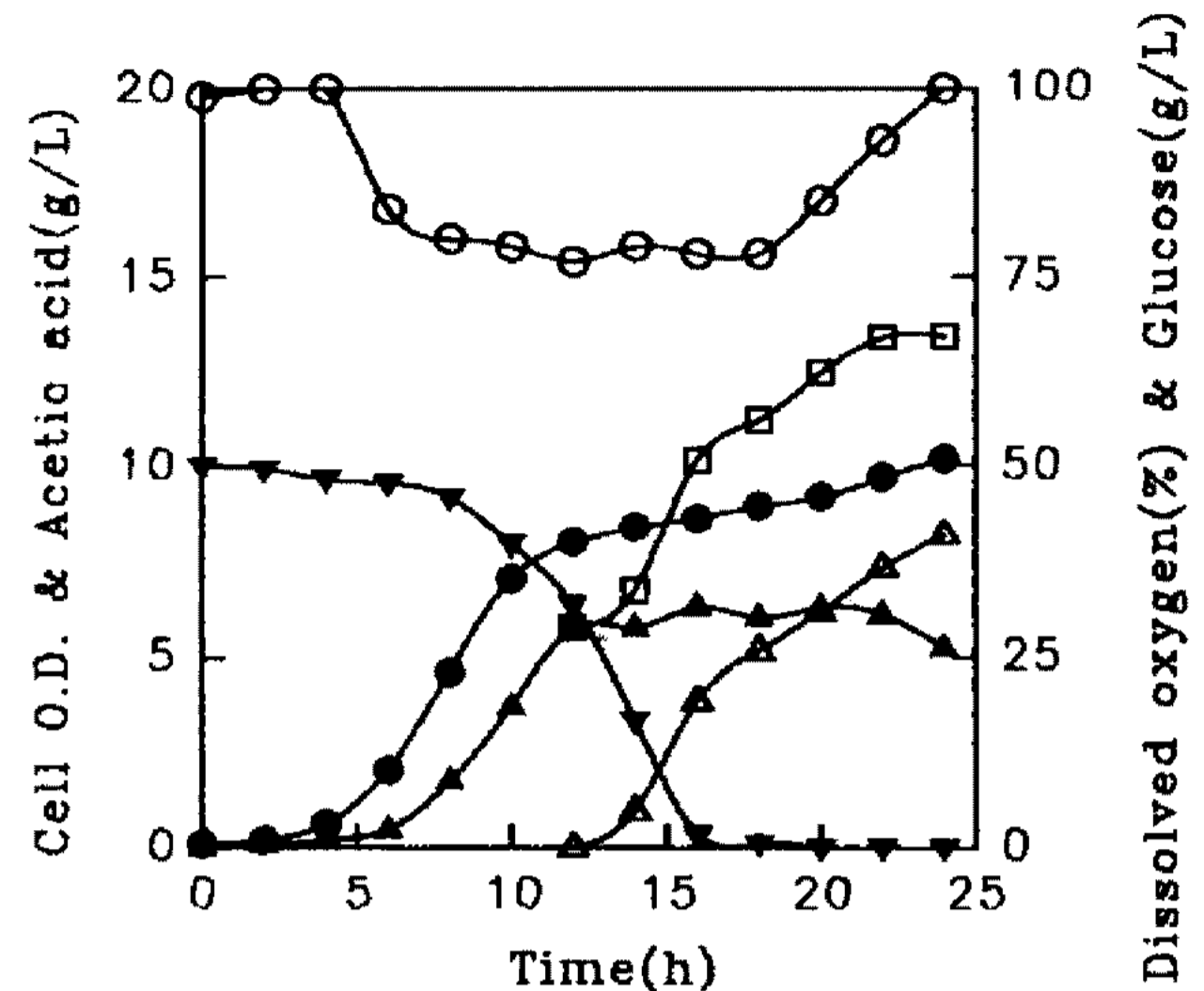


Fig. 7. Electrolysis culture profile. Glucose 50 g/l, M-9 medium, Initial voltage=8.3 V, ●: Cell O.D., ▼: Glucose in fermentor, ▲: Acetic acid in fermentor, ▽: Glucose in dialysate, △: Acetic acid in dialysate, ○: Dissolved oxygen, □: Total acetic acid

제거되므로 발효조 내의 아세트산 농도는 5 g/l 수준의 농도로 유지되었다. 발효 개시 후 16시간이 되면 발효조 내의 포도당이 모두 고갈되고 세포내 대사물을 이용하여 대장균의 세포 성장이 미약하게 일어나고 대장균의 내부에 있던 아세트산이 외부로 확산이 되므로 전체 아세트산 양은 증가하였다(Fig. 7). 이 경우 최종 세포 농도는 O.D.로 10.2의 값을 보였고 Fig. 5 A에 비하여 25%의 증가를 보였다(Table 5).

초기의 포도당 농도를 20 g/l로 하고 유가식 전기투석발효를 실시하였다(Fig. 8A). Fig. 6A와 같은 실험 조건으로 발효를 하고, 발효 개시 12시간 후에 전기투석을 실시하였다. 초기의 비성장속도는 0.56 h^{-1} 이고 아세트산을 가한 후 0.13 h^{-1} 로 감소하였으나 전기투석을 실시하여 아세트산이 효율적으로 제거되므로 발효조 내의 아세트산 농도가 감소하여 Fig. 6A의 전기투석을 수행하지 않았을 경우보다 아세트산 투입 후의 비성장 속도가 높았다($\mu=0.08 \text{ h}^{-1} \rightarrow \mu=0.13 \text{ h}^{-1}$). 최종 세포 농도를 살펴보면 O.D. 20.4로 전기투석을 수행하지 않았을 경우보다 50% 이상의 세포 농도 증가를 보였다. 생성된 아세트산의 양은 2.0 g으로 Fig. 6A에 비하여 55%의 감소를 보였다.

초기 포도당 농도를 50 g/l로 하고 발효 개시 후 12시간 후에 50 g의 포도당을 추가로 넣고 전기투석을 실시하였다(Fig. 8B). 이 경우 발효조 내의 아세트산 농도는 일정한 수준의 값을 보였다. 발효 개시 후 24시간 후의 최종 세포 농도는 O.D.로 13.0이었고, 생성된 아세트산의 농도는 21.6 g/l였다. 전기투석을

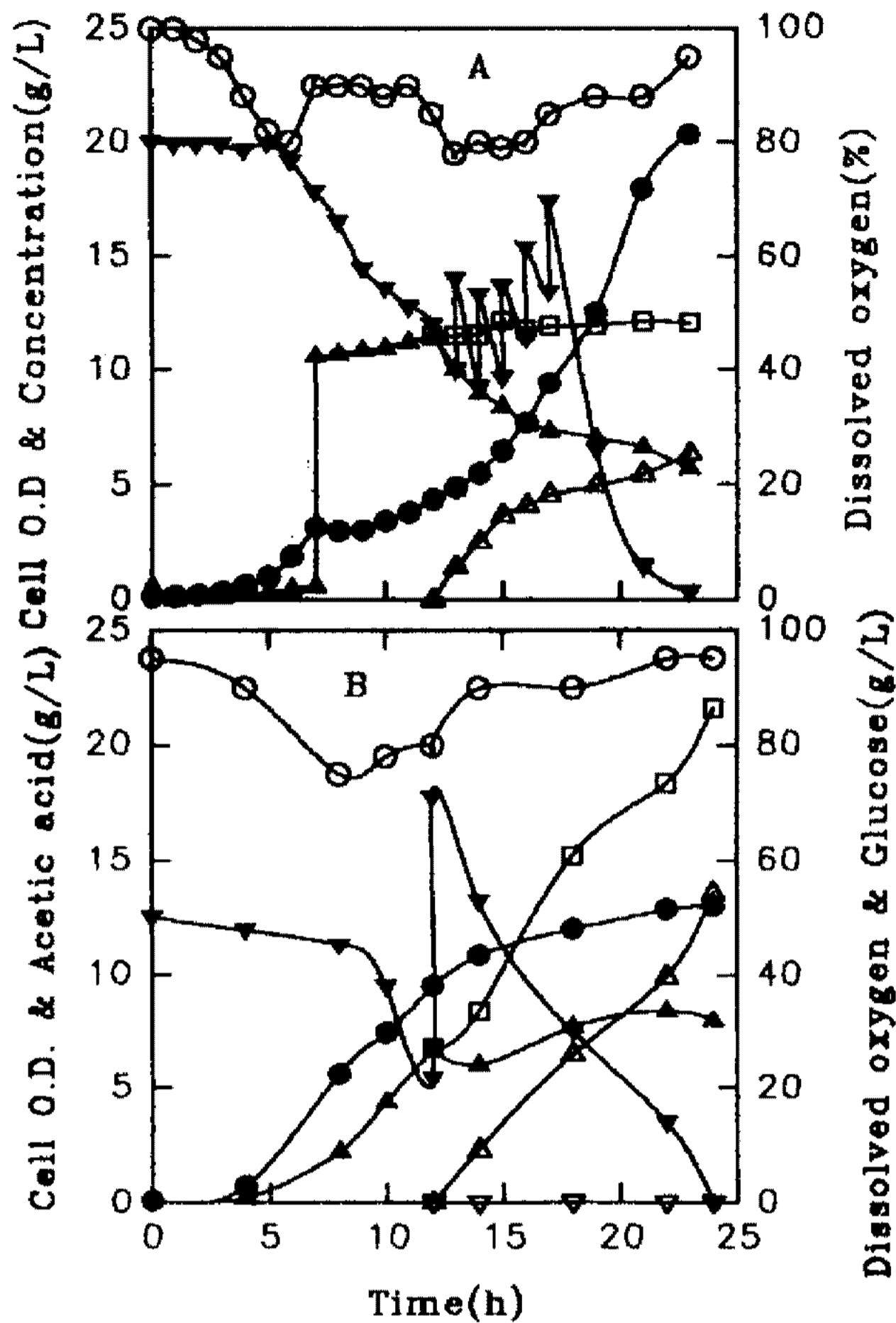


Fig. 8. Electrolysis culture profile.
Initial voltage=8.3 V, A: Glucose 20 g/l+20 g, M-9 medium+Acetic acid 10 g, B: Glucose 50 g/l+50 g, M-9 medium

실시하지 않은 유가배양실험의 Fig. 6B와 비교하면, 발효 개시 18시간 후에 유가배양의 경우 대장균이 사멸기로 접어들지만, 전기투석을 수행한 경우 세포 성장이 계속 진행되며 아세트산을 생성한다.

Table 5의 결과에서 Table 4의 유가배양에서와 마찬가지로 매 시간마다 적절한 양의 포도당과 염들이 추가된 경우 세포 수율이 높고 아세트산에 대한 수율이 낮다. 전기투석발효에서의 전류 효율에 대한 결과를 보면 Fig. 8A에서 전류 효율이 가장 낮은 값을 보인다. 이는 추가로 넣어준 염의 영향에 기인한다. 외부에서 염을 추가하면 발효조 내에 염 이온의 수가 많아진다. 이 때문에 이온교환 막을 통과하는 염 이온들의 수가 증가하고 이러한 영향으로 아세트산에 대한 전류 효율이 감소하게 된다. 대장균의 성장에 있어서 염의 추가는 세포 성장에 유익하지만, 반대로 전류 효율의 감소를 유발한다. 따라서 유가식 전기투석배양에서 염의 추가는 세포 성장과 전류 효율에 있어서 상반적인 효과를 보였다.

요 약

미생물의 성장을 저해하는 유기산은 전기투석장치를 이용하여 제거되어진다. 전기투석실험을 수행하여 각각의 전압에 따른 전류 효율을 계산하고, 전류 효율이 가장 높은 최적 전압을 구하였다. 전기투석실험에 사용되어진 모델 용액으로 배지 내의 염들에 대한 영향을 관찰하였고, 이러한 염 성분들은 전류 효율을 30% 감소시키며, 증류수에 대한 최적 전압보다 1.1 V의 상승을 유발시킨다.

회분발효실험을 통하여 포도당의 소모 속도와 아세트산 생성 속도를 관찰하고, 외부로부터의 아세트산 첨가에 의한 비성장속도의 감소($\mu=0.42 \text{ h}^{-1} \rightarrow \mu=0.17 \text{ h}^{-1}$)를 관찰하였다. 외부에서 아세트산이 첨가된 경우 세포의 호흡에 영향을 주어 호흡에 소모되는 기질의 소비를 감소시켜 세포와 아세트산 생성에 대한 수율이 증가함을 보였다.

회분식 전기투석배양을 실시한 결과 발효조 내의 아세트산이 전기투석장치를 통하여 외부로 제거되므로 아세트산에 의한 저해 효과를 경감시킬 수 있었다. 유가식 전기투석배양에서 전기투석을 실시하지 않은 경우보다 50%의 균체 농도가 증가한 결과를 얻었고, 생산된 아세트산의 양은 상대적으로 낮은 값을 보였다. 유가식 전기투석배양에서 염을 추가한 경우 가장 높은 균체 수율을 얻은 반면 전류 효율은 낮은 값을 보였다. 이는 발효조 내의 염 이온들이 이온교환막을 통하여 이동하므로 아세트산에 대한 전류 효율 값은 상대적으로 낮은 값을 보이게 된다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 지원(92-24-00-07)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Han, K.H. 1992. A study of acetic acid formation in *Escherichia coli* fermentation. Ph. D. Thesis, Dept. of Chem. Eng., Univ. Cal. Irvine, Irvine.
2. Schultz, J.S. and P. Gerhardt. 1969. Dialysis culture of microorganisms: design, theory, and results. *Bacteriol. Rev.* 33: 1-47.
3. Kula, M.R., K.H. Kroner, and H. Hustedt. 1982. Purification of enzymes by liquid-liquid extraction. *Adv. Biochem. Eng.* 24: 103-115.
4. Maiorella, B.L., H.W. Blanch, and C.R. Wilke. 1984. Economic evaluation of alternative ethanol fermentation processes. *Biotechnol. Bioeng.* 26:

- 1003-1025.
5. Gerhardt, P. and D.M. Gallup. 1963. Dialysis flask for concentrated culture of microorganisms. *J. Bacteriol.* **86**: 919-929.
 6. Nomura, Y., M. Iwahara, and M. Hongo. 1988. Acetic acid production by an electro dialysis fermentation method with a computerized control system. *J. Appl. Environ. Microbiol.* **54**: 137-142.
 7. Weier, A.J., B.A. Glatz, and C.E. Glatz. 1992. Recovery of propionic and acetic acid from fermentation broth by electro dialysis. *Biotechnol. Prog.* **8**: 479-485.
 8. Zhang, S.T., H. Matsuoka, and K. Toda. 1993. Production and recovery of propionic and acetic acid in electro dialysis culture of *Propionibacterium shermanii*. *J. Ferm. Bioeng.* **75**: 4, 276-282.
 9. Zhang, S.T. and K. Toda. 1994. Kinetic study of electro dialysis of acetic acid and phosphate in fermentation broth. *J. Ferm. Bioeng.* **77**: 3, 288-292.
 10. 김인호, 윤태호. 1994. 대장균의 실관투석배양. 한국 생물공학회지 **9**: 5, 492-498.
 11. Mas, L.J., P.M. Pierrard, P.A. Prax, and J.C. Sohm. 1970. Behavior of an electro dialysis unit cell. *Desalination* **7**: 285-296.
 12. Anderson, K.B. and K. Meyenburg. 1980. Are growth rates of *Escherichia coli* in batch cultures limited by respiration? *J. Bacteriol.* **144**: 114-123.

(Received 10 August 1995)