

생전분 직접 당화용 회전 원통형 Bioattritor의 조작조건과 동력소모량의 검토

박진서 · 이용현*

경북대학교 자연과학대학 유전공학과

Evaluation of Operation Condition and Power Consumption of the Rotating Drum Type Bioattritor for Direct Saccharification of Raw Starch

Park, Jin-Seo and Yong-Hyun Lee*

Department of Genetic Engineering, College of Natural Sciences
Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

Abstract — Raw starch can be effectively saccharified in an enzyme reaction system containing attrition-milling media. In order to develop an efficient attrition-coupled bioreactor(bioattritor), a rotating drum type bioattritor was constructed, and its optimal operation conditions and power consumptions were evaluated. The optimal conditions for 3l bioattritor were 4 baffled, baffle size of 1:0.05 (the ratio of drum diameter to baffle), drum rotation speed of 100 rpm, and 1.33 g of 3 mm glass bead/g of raw corn starch. The power consumption for rotation of drum and energy consumption for half saccharification of raw starch were also evaluated, and compared with enhanced rate and yield to predict the economic feasibility. Energy consumption at above conditions was measured to be around 0.18 watt·h per 1.0 g of glucose. The rotating drum type bioattritor seems to have an appropriated structure for industrial scale operation, and further investigation need to be conducted for scale-up.

생전분의 무증자 당화는 증자에너지가 불필요하고, 호화에 의한 전분의 구조적 팽윤을 수반치 않아 기질을 고농도로 첨가할 수 있고, 고농도 당화액을 얻을 수 있으며, 또한 고순도 당액을 얻을 수 있는 등 많은 장점이 있다. 그러나 전분질의 당화속도와 수율이 낮아, 많은 장점에도 불구하고 현재 산업적으로 활용되지 못하고 있다.

본 연구실에서는 생전분질의 효소당화시 생전분질-효소현탁액에 고품 분쇄마찰매체를 첨가, 교반하여 분쇄마찰 효과를 줌으로서 효소 당화작용을 현저히 촉진시키는 분쇄마찰매체 함유 효소반응계를 활용한 생전분의 고효율 무증자 직접 당화법을 보고한 바

있다(1). 이때 당화속도는 증자법과 거의 유사하였고 당화율은 증자법을 능가하는 결과를 얻었으며, 증자에 의한 전분의 팽윤현상을 수반치 않아 45%(w/v)라는 고농도로 생전분을 첨가하여 고효율, 고농도로 당화가 가능함을 보고한 바 있고(2), 또한 당화촉진 mechanism을 규명하였으며(3, 4), 무증자 직접 당화법을 도입한 새로운 HFCS 제조공정을 제시한 바 있다(5).

분쇄마찰매체 효소반응계를 산업적으로 활용하기 위해서는 에너지 소모가 적고 고효율로 당화를 행할 수 있는 분쇄마찰매체 효소반응기(bioattritor)의 개발이 필요하며, 특히 매체의 교반에 소모되는 에너지를 증자에너지와 비교 검토함이 요망된다. 전보에서는(6) impeller로 분쇄마찰매체를 교반하는 agitated bead type bioattritor를 제작하여 그 효율성을 전분의 효소당화 및 동력소모 관점에서 검토하였다. 또한 tumbling drum type bioattritor를 이용한 섬유소의 효소

Key words: Rotating drum type bioattritor, enzymatic, direct saccharification, raw starch, power and energy consumption

*Corresponding author

당화에 관한 연구(7)도 수행한 바 있다.

본 연구에서는 생전분의 직접 당화에 적합한 bioatritor의 개발을 목표로 원통형 반응조 자체를 회전시켜 분쇄마찰매체를 교반하는 회전 원통형 bioatritor의 효용성과 최적 조작조건을 검토하였고, 조작조건에 따른 소모동력량의 변화를 측정하였으며, 또한 소모에너지량과 효소 당화속진과의 상관관계를 규명하였다. 이는 산업적 활용성이 있는 고효율 생전분 직접 당화용 bioatritor의 개발에 필요한 기초자료가 된다.

재료 및 방법

효소, 기질 및 분쇄마찰매체

사용효소는 국내 HFCS 제조 또는 주정 생산업체에서 전분질 증자당화에 사용되고 있는 상업용 당화효소인 Diazyme L-30D(Miles)과 액화효소인 Termamyl(Novo)로서 이를 5:4 비율로 혼합 사용하였다. 옥수수전분(corn starch)을 기질로 사용하였으며, 분쇄마찰매체는 직경 3 mm의 유리구(glass bead)를 주로 이용하였다.

회전 원통형 Bioatritor의 구성

회전 원통형 bioatritor(7)는 반응조인 drum, drum 회전용 roller, 동력소모량 측정장치, 그리고 rpm and temperature controller로 구성되었다. 반응조는 Fig. 1과 같이 직경 15 cm, 길이 21 cm인 용량 3l의 PVC통으로서 실험목적에 따라 baffle의 모양, 크기 및 수를 변형시켰으며, drum의 내경과 baffle 크기의 상대비가 1:0.05, 1:0.1가 되는 반응조를 주로 사용하였다. 또한 직경이 21 cm인 6l 용량의 반응조도 사용하였다.

Bioatritor의 조작에 소모되는 동력 측정

소모동력은 반응조의 회전속도를 일정하게 유지하는데 필요한 motor에 부하되는 전압과 전류를 측정 후 모터의 고유 동력소모치인 0 rpm에서의 값을 감하여 얻었으며, 전류는 0.4~0.9 Amphere, 전압은 20~70 Volt 범위내에 있었다.

Bioatritor에서의 당화

구연산 완충용액(pH 3.8)에 생옥수수 전분 225 g/l, glass bead(3 mm) 1.33 g/1 g of raw corn starch, 당화효소 4 ml/l, 액화효소 3.2 ml/l를 첨가하여 55°C,

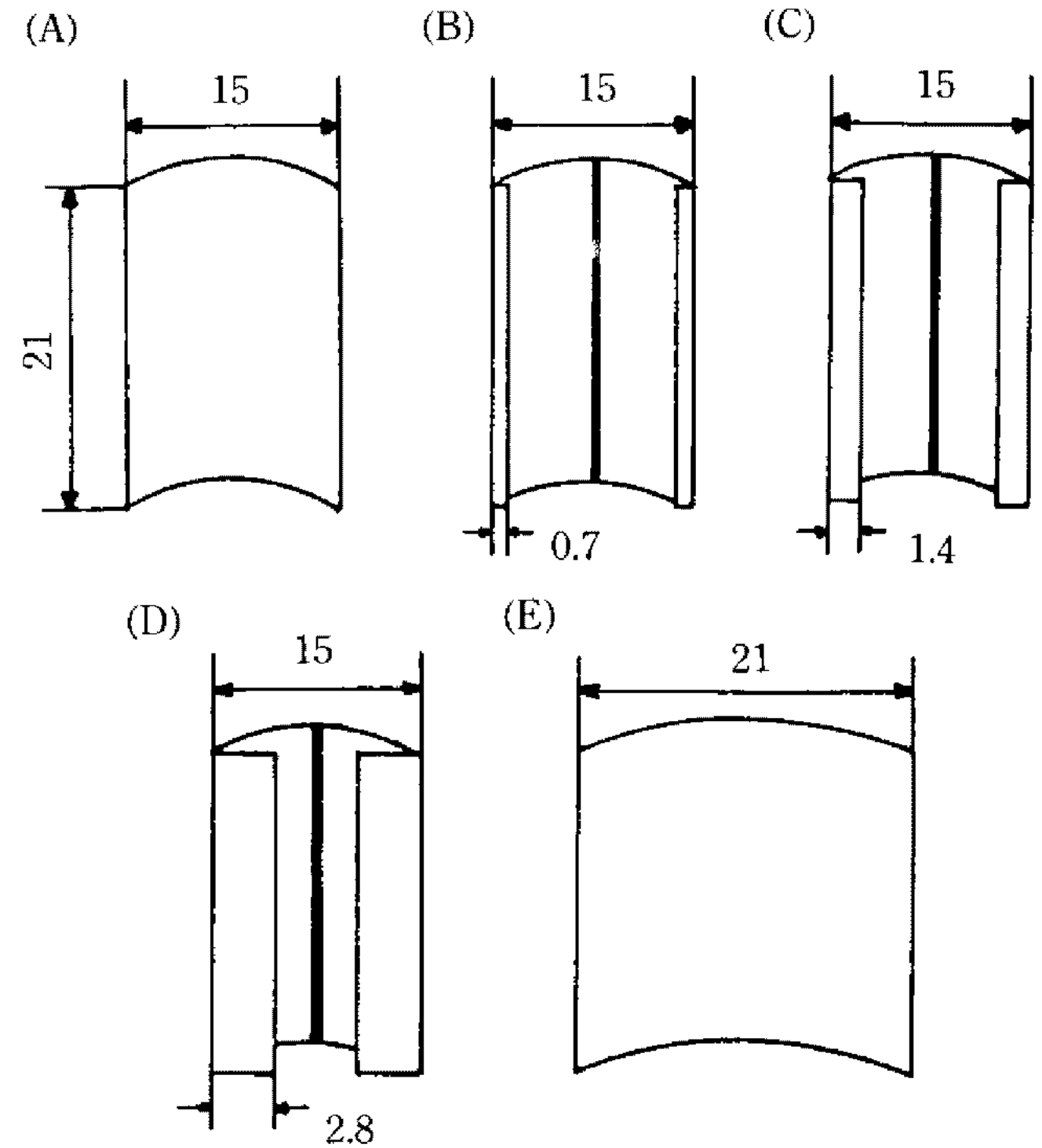


Fig. 1. The cross-sectional picture and dimension of reaction vessels (dimension: cm).

(A) 1:0.0 baffle, (B) 1:0.05 baffle, (C) 1:0.1 baffle, (D) 1:0.2 baffle, (E) 6l reaction vessel

100 rpm에서 반응시켰다. 또한 baffle의 수 및 크기, 분쇄마찰매체의 크기와 첨가량, 회전속도를 달리하면서 실험하였다.

당분석

포도당은 효소적 방법인 PGO(peroxidase-glucose-parainisidine)법으로 정량하였으며(8), 환원당은 포도당을 표준물질로 하여 DNS법(9)으로 측정하였다.

결과 및 고찰

회전 원통형 Bioatritor를 이용한 생전분의 직접 효소당화

Fig. 2는 반응조 내경과 baffle 크기의 상대비가 1:0.05인 4개의 baffle을 부착한 3l 용량의 반응조에서 분쇄마찰매체를 첨가한 군과 첨가하지 않은 군의 생전분의 직접 효소당화 결과를 비교한 것이다. 매체를 첨가하지 않은 군은 첨가전분의 반이 당화되는데 10시간이 소요되었으며, 24시간 후의 당농도는 140 g/l으로 당수율은 0.48에 불과하였다. 반면 유리구를 첨가한 경우는 첨가전분의 반 당화에 2.4시간이 소요되었고, 24시간 후의 당농도는 240 g/l, 당수율은 0.

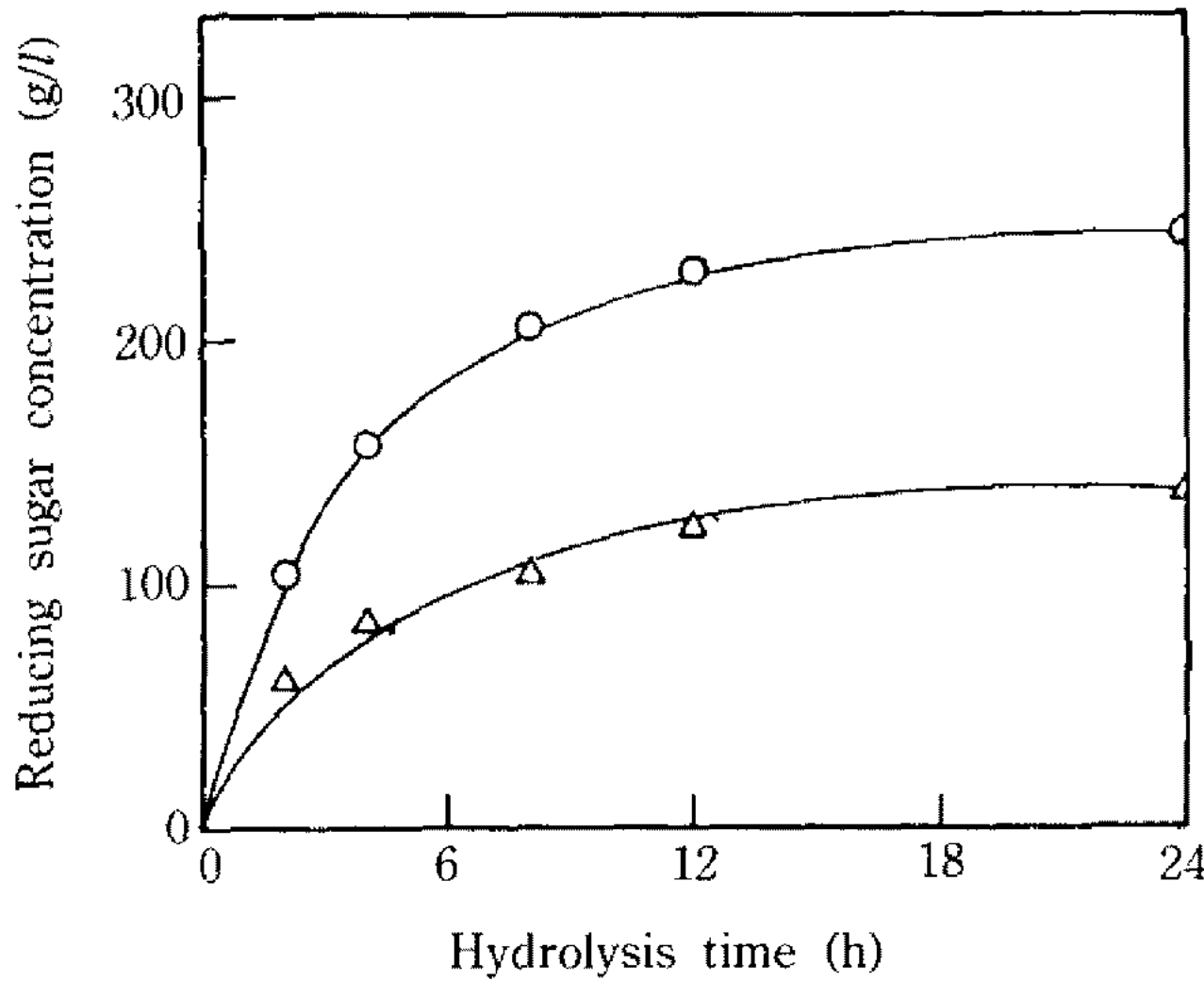


Fig. 2. Hydrolysis of raw starch in rotating drum type bioattritor with and without attrition-milling media; 225 g/l raw corn starch, 1.33 g of glass bead/g of raw corn starch, 100 rpm, 1:0.05 baffle, 55°C, pH 3.8.
 ○; with glass bead, △; without bead

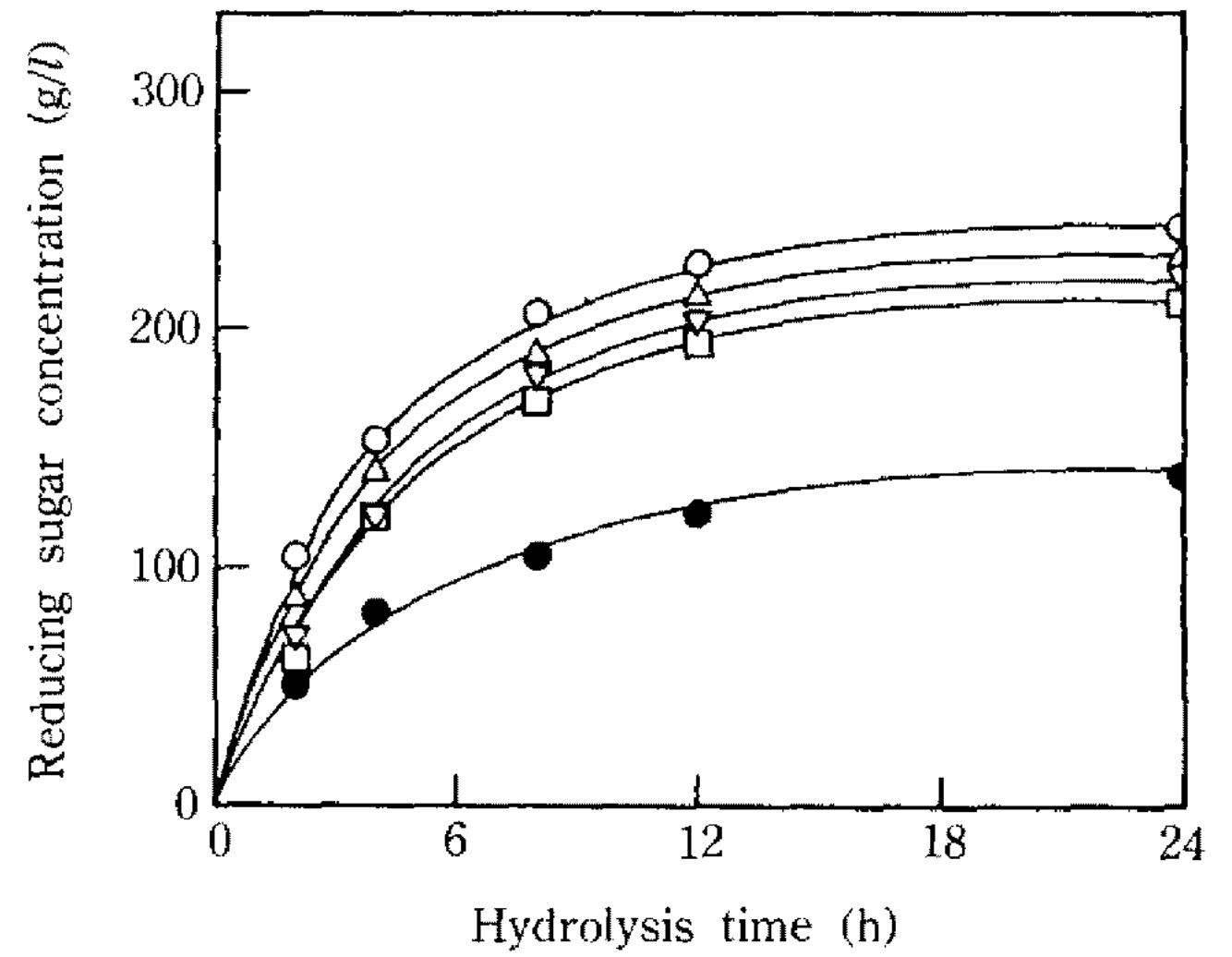


Fig. 3. Effect of baffle sizes in rotating drum type bioattritor on enzymatic hydrolysis of raw starch; 225 g/l raw corn starch, 1.33 g of glass bead/g of raw corn starch, 55°C.
 ▽; without baffle, ○; 1:0.05 baffle, △; 1:0.1 baffle, □; 1:0.2 baffle, ●; without bead, 1:0.05 baffle

94로서 당화속도 및 당화율이 현저히 증가하였다. 이와같은 반응속도와 수율은 전보(6)인 impeller 교반형 agitated bead type bioattritor에서 얻은 수준과 거의 유사한 결과로서, 회전 원통형 bioattritor도 생전분의 직접 효소당화에 적합한 형태의 효소반응기 (bioattritor)임을 알 수 있다.

Bioattritor의 조작조건과 생전분의 직접 효소당화

Baffle 크기 및 형태 : Baffle의 크기 및 숫자, 형태는 반응조내의 분쇄마찰매체의 교반양상에 크게 영향을 주게 되며, Fig. 3은 baffle의 상대비가 1 : 0.0, 1 : 0.05, 1 : 0.1, 그리고 1 : 0.2인 4개를 부착하고, 100 rpm에서 생전분을 직접 당화시킨 결과이다. 상대비가 1 : 0.05 나 1 : 0.1인 반응조에서 높은 당화결과를 보였으며, 그 이상의 상대비에서는 당화율이 오히려 감소하였다. 또한 baffle을 부착하지 않은 반응조에서도 비교적 원활한 효소반응이 이루어졌다.

반응조 내에서의 분쇄마찰매체의 운동양상은 baffle이 없을 경우 대부분의 매체가 반응조 하부에 침강한채 반응조 내부표면을 따라 이동하면서 교반되었다. 반면, baffle이 부착된 경우에는 baffle의 상대비에 따라 교반양상이 매우 상이하게 변화하였다. 즉 상대비가 비교적 적은 1 : 0.05인 경우에는 매체가 baffle에 의하여 일정한 높이까지 끌려올라간 후 중력에 의해 벽면을 따라 하강하는 양상을 보였다. 반면, 상대비가 1 : 0.1이나 1 : 0.2인 큰 baffle의 경우에는

반응조의 상부까지 끌려올라간 후 용액중에 끌고루 분산되거나 반응조 내부표면을 따라 같이 공회전하는 양상이 관찰되었다.

상대비가 비교적 적은 baffle의 경우 당화촉진 효과가 큰 baffle보다 우수한 것으로 보아, 매체가 반응조 하부에 대부분 침강된 상태에서 이동함으로써 매체와 매체간의 물리적 마찰이 극대화되도록 반응조를 설계 운전함이 요망됨을 알 수 있었다.

또한 상대비가 1 : 0.05인 baffle을 0, 4, 8개, 그리고 8개짜리를 1 cm 크기로 잘라서 무질서하게 반응조에 부착시켜 baffle 숫자의 영향을 검토한 결과는 Fig. 4와 같다. 당화는 baffle의 숫자에 의하여 크게 영향받지 않았으며, 무질서하게 부착시킨 경우는 일직선으로 배열한 경우보다 오히려 매체간의 물리적 마찰효과가 떨어져 반응이 감소되었다.

반응조의 회전속도 : 상대비가 1 : 0.05인 반응조의 회전속도를 50, 100, 그리고 200 rpm으로 달리하면서 직접 당화한 결과는 Table 1과 같다. 또한 baffle을 부착하지 않은 반응조와 상대비가 1 : 0.1과 1 : 0.2인 반응조의 결과도 나타내었다.

1 : 0.05와 1 : 0.1인 반응조에서는 100 rpm일 때 결과가 양호하였으며, 이 이상에서는 오히려 감소하였다. 반면 상대비가 1 : 0.2인 반응조에서는 회전속도에 큰 영향없이 유사한 당화속도와 당화율을 유지하였으며, 상대비가 낮은 반응조에 비하여 전반적으로

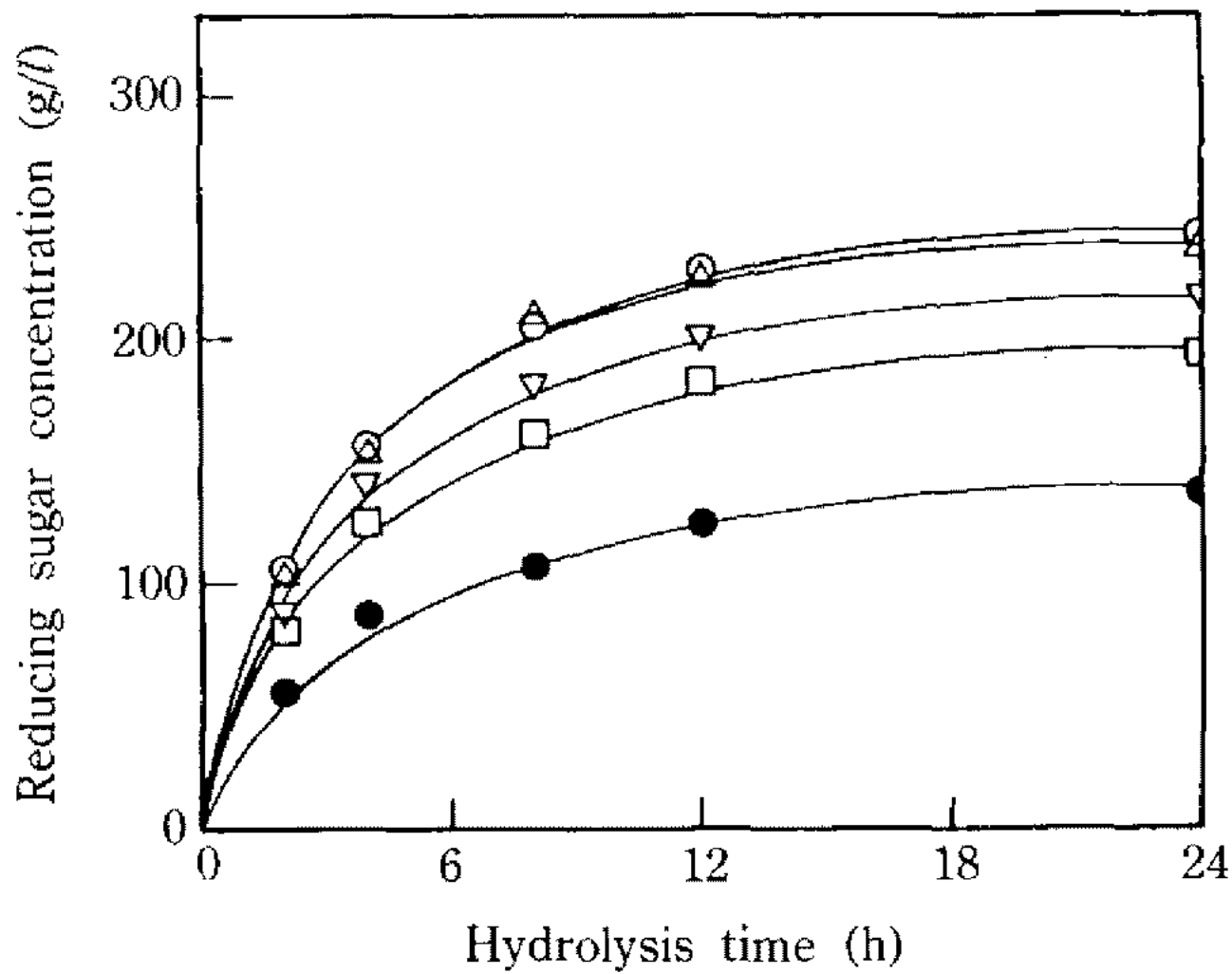


Fig. 4. Effect of baffle numbers in rotating drum type bioattritor on enzymatic hydrolysis of raw starch; 225 g/l raw corn starch, 1.33 g of glass bead/g of raw corn starch, 1:0.05 baffle, 55°C.
○; four baffle, △; eight baffle, □; random baffle, ▽; without baffle, ●; without bead

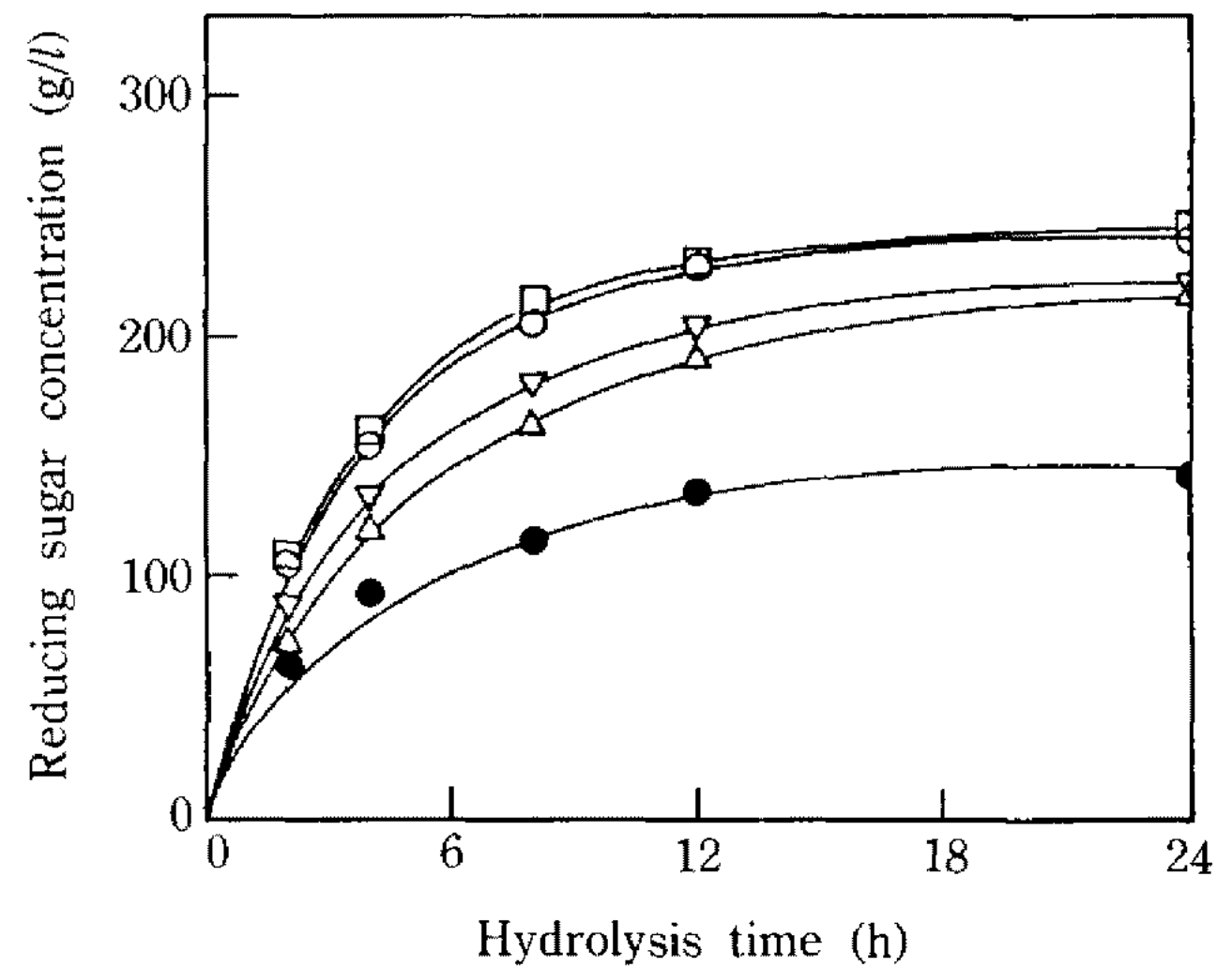


Fig. 5. Effect of amount of glass bead in rotating drum type bioattritor on enzymatic hydrolysis of raw starch; 225 g/l raw corn starch, 1:0.05 baffle, 55°C.
●; without bead, ▽; 0.67, ○; 1.33, □; 2.00, △; 2.67 g of glass bead/g of raw corn starch.

Table 1. Effect of baffle size and rotation speed on enzymatic hydrolysis of raw starch (Unit: g/l)

	Hydrolysis time (h)			
	4	8	12	24
1 : 0.00 Baffle				
50 rpm	126	160	180	204
100 rpm	135	180	205	221
200 rpm	130	172	192	212
1 : 0.05 Baffle				
50 rpm	131	165	192	210
100 rpm	160	205	220	242
200 rpm	150	185	201	220
1 : 0.10 Baffle				
50 rpm	130	177	203	221
100 rpm	140	190	212	230
200 rpm	122	170	185	210
1 : 0.20 Baffle				
50 rpm	120	163	185	202
100 rpm	130	172	190	208
200 rpm	112	158	179	199

Conditions: 225 g/l raw corn starch, 1.33 g of glass bead (3 mm)/g of raw corn starch, 3 l drum, 55°C.

낮았는데, 이는 매체가 부유된 상태로 있어 마찰운동없이 감소하기 때문이다. 최대 당화율은 1 : 0.05 반응조를 100 rpm으로 회전하였을 때 얻어졌다.

분쇄마찰매체 첨가량과 크기 : 분쇄마찰매체인 유리구(glass bead)의 첨가량을 0, 0.67, 1.33, 2.00, 2.67 g/g of raw corn starch로 변화시키면서 당화시킨 결과는 Fig. 5와 같다. 유리구의 첨가량이 1.33 또는 2.00 g/g of raw corn starch일 때 우수한 결과를 보였으며, 2.67 g/g of raw corn starch에서는 오히려 당수율이 감소하였는데, 이는 impeller 교반형 bioattritor에서 얻은 결과(6)와 유사하였다. 분쇄마찰매체를 과다하게 첨가할 경우 매체간의 운동공간이 부족하여 충분한 분쇄마찰 효과가 이루어지지 못함을 알 수 있었다. 동력소모를 고려한다면 적정 유리구 첨가량은 1.33 g/g of raw corn starch로 판단된다.

또한 유리구 크기의 영향을 검토코져 직경이 3, 6, 그리고 13 mm인 유리구를 사용하여 생전분을 직접 효소 당화시킨 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 당화촉진 효과는 직경에 반비례하였으며, 3 mm의 유리구에서 가장 좋은 결과를 보였는데, 이는 직경이 적을수록 매체중량에 대한 표면적이 증가함으로 분쇄마찰효과가 증대되기 때문이다.

Bioattritor의 용량 : 용량이 큰 6 l 반응조에서 당화시킨 결과를 Fig. 7에 나타내었으며, 이때 반응조 내면 이동속도를 3 l 반응조와 동일하게 유지코져 70 rpm에서 반응시켰다. 반응조 용량은 당화속도와 당화율에는 큰 영향을 미치지 않았으며, 양호한 결과를 얻었다. 이는 반응조 내면속도를 일정하게 유지하면 반응조의 용량에 관계없이 매체의 운동양상을 유사

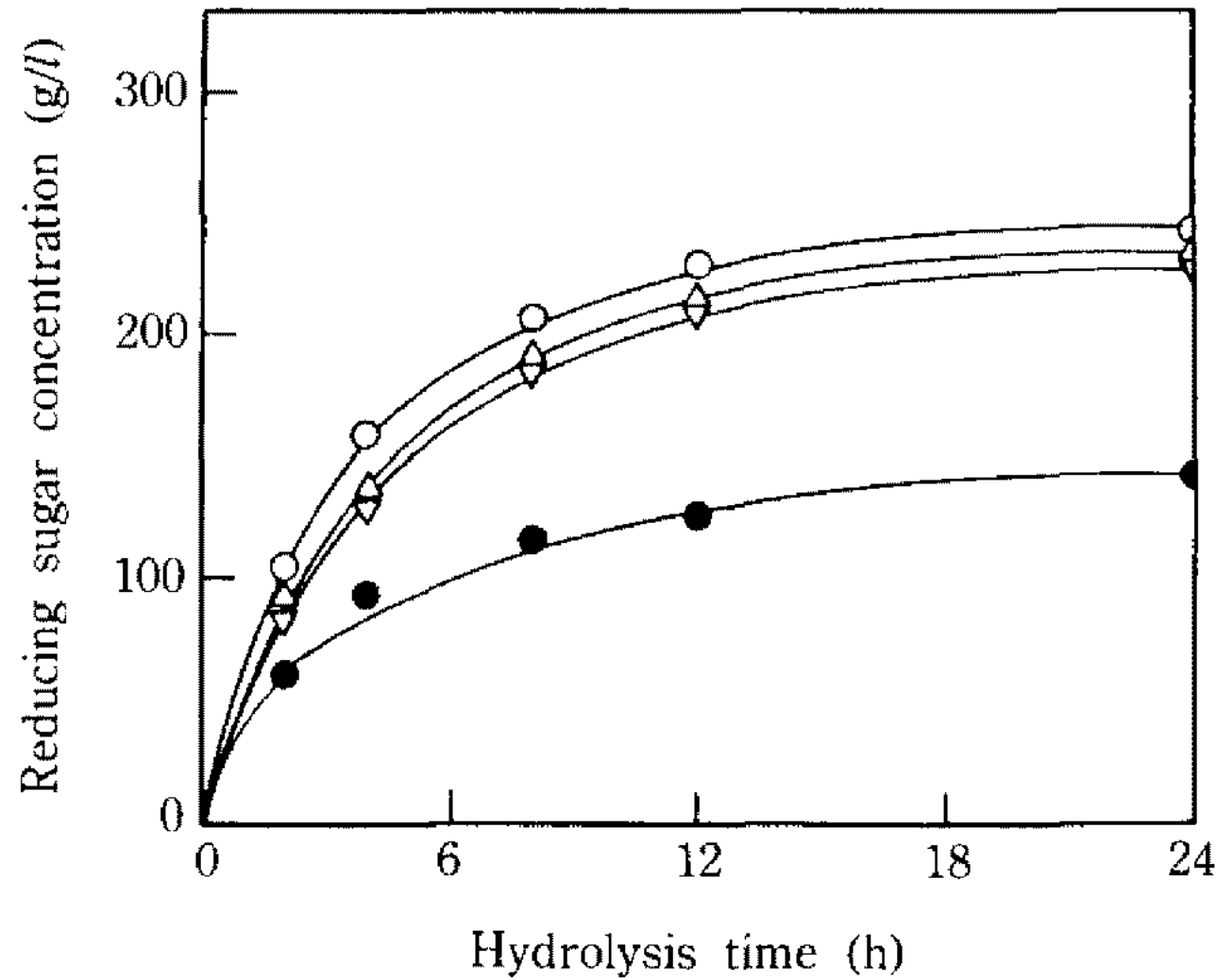


Fig. 6. Effect of the size of beads in rotating drum type bioattritor on enzymatic hydrolysis of raw starch; 225 g/l raw corn starch, 1.33 g of glass bead/g of raw corn starch, 1:0.05 baffle, 55°C.
 ●; without bead, ○; 3 mm glass bead, △; 6 mm glass bead, ▽; 13 mm glass bead

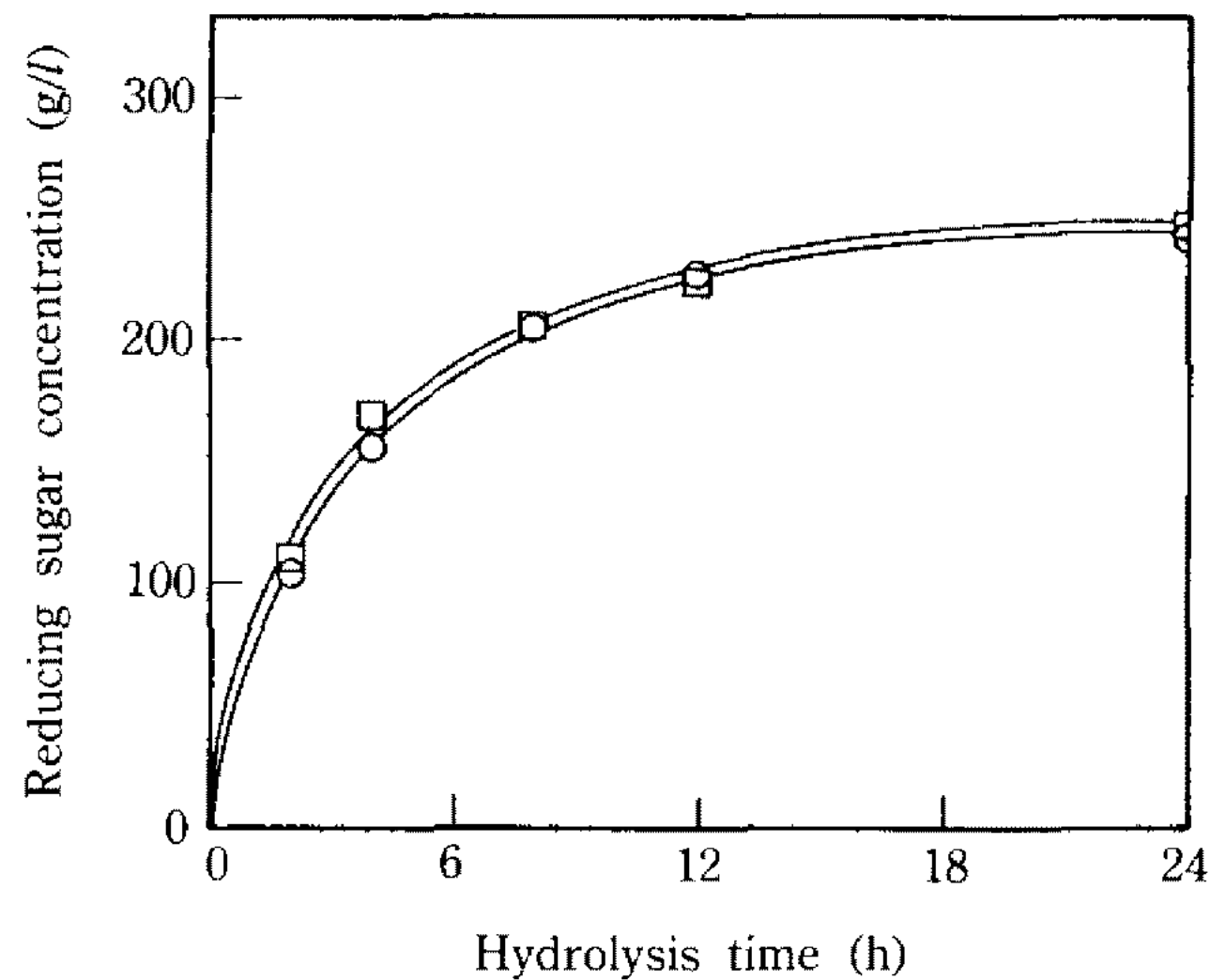


Fig. 7. Effect of volume size of bioattritor on enzymatic hydrolysis of raw starch; 225 g/l raw corn starch, 1.33 g of glass bead/g of raw corn starch, 1:0.05 baffle, 55°C.
 ○; 3 l drum, □; 6 l drum

하게 유지할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

회전 원통형 Bioattritor의 동력소모량의 검토

Table 2는 반응조의 내부구조별 및 각종 조작 조건하에서 장치의 회전에 필요한 반응용액 부피당 power 소모량(watt/l), 첨가 기질의 반이 당화되는데 소요되는 시간($T_{1/2}$), 첨가기질의 반을 당화시키는데 소요된 에너지량($W \cdot h/l$), 그리고 포도당 1g 생성시 소모에너지량($W \cdot h/g$)을 각각 표시하였다. 포도당 1g

Table 2. Comparison of power and energy required for half saccharification of raw starch under the various saccharification conditions

	HSF* (h)	Power (watt/l)	Energy (watt·h/l)	EG** (watt·h/g)
Rotation speed				
50 rpm	3.6	10.24	36.86	0.31
100 rpm	2.4	9.21	22.10	0.18
200 rpm	3.0	8.01	24.03	0.20
Amount of glass bead***				
0.67 g/g	3.0	8.45	25.35	0.21
1.33 g/g	2.4	9.21	22.10	0.18
2.00 g/g	2.3	10.34	23.78	0.20
2.67 g/g	4.0	11.45	41.80	0.38
Size of baffle				
1:0.00	2.8	9.61	26.91	0.22
1:0.05	2.4	9.21	22.10	0.18
1:0.10	3.2	9.41	30.11	0.25
1:0.20	3.6	10.01	36.04	0.30
Number of baffle				
0	3.0	9.61	28.83	0.24
4	2.4	9.21	22.10	0.18
8	2.3	8.84	20.33	0.17
Size of drum				
3 l	2.4	9.21	22.10	0.18
6 l	2.3	6.82	15.69	0.13
Size of bead				
3 mm	2.4	9.21	22.10	0.18
6 mm	3.4	9.41	31.99	0.27
13 mm	3.8	9.46	35.95	0.30
Optimal condition	2.4	9.21	22.10	0.18

*HSF: Half saccharification time, **EG: Energy required for production of 1 g of glucose, ***g of glass bead/g of raw corn starch
 Conditions: 225 g/l raw corn starch, 1:0.05 baffle, 100 rpm, 1.33 g of glass bead/g of raw corn starch, 3 l drum, 55°C.

생성시 소모에너지는 기질의 반이 당화에 소요된 에너지량을 생성 당농도로 나누어 산출하였다.

Power 소모량은 Table 2와 같이 매체량과 크기, baffle 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 반면 회전 속도에 대한 영향은 어떤 수준까지는 증가하다가 그 이상에서는 오히려 감소하였는데, 이는 매체의 공회전으로 표면마찰이 감소하는데 기인하는 것으로 사료된다. 또한 power 소모량은 drum 용량에 반비례

하여 감소하였다.

또한 경제성 평가는 power 소모량보다는 포도당 1g 생성시 소모되는 에너지량의 관점에서 고찰함이 바람직하다. 회전속도와 매체량이 증가함에 따라 소모에너지량이 감소하다가 어느 수준 이상에서는 증가하는 양상을 보였는데, 이는 당화속도가 감소하여 당화시간이 지연되었기 때문이다. 또한 에너지 소모량은 baffle의 수가 증가할수록 감소한 반면, 매체 및 baffle의 크기에 비례하여 증가하였다. 또한 반응조의 용량이 증가함에 따라 에너지 소모량은 감소하였는데, 이는 scale-up시 에너지 소모량을 더욱 감소시킬 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

최적 조작조건에서의 power 소모량은 9.21 watt/l였으며, 포도당 1g 생성에 소모되는 에너지는 0.18 watt·h/g로서, 전보(7)에서 보고한 impeller 교반형 bioattritor에 비하여 높았다. 이는 반응조 자체를 회전시키기 때문에 동력소모가 큰 것으로 사료된다. 그러나 연구 반응조의 규모때문에 상기 결과만으로 양 반응기의 동력소모 특성을 평가 비교하는 것은 다소 어렵다고 판단된다. 따라서 앞으로 보다 용량이 큰 장치를 활용한 scale-up 연구를 통하여 에너지소모 및 scale-up의 용이성에 대한 검토가 요망된다.

요 약

반응조 자체를 회전시켜 분쇄마찰매체를 교반하는 새로운 회전 원통형 bioattritor를 이용한 생전분의 직접 효소당화에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 회전 원통형 bioattritor의 효용성을 검토하였다. 또한 bioattritor의 조작조건 즉, baffle의 크기와 숫자, 회전속도, 분쇄마찰매체의 첨가량과 크기, 그리고 반응조의 크기등이 생전분의 효소당화에 미치는 영향을 검토하였으며, 3l 반응조의 경우 반응조 내경과 baffle의 상대비가 1:0.05이고 baffle이 4개 부착된 반응조에서 직경 3mm 유리구를 1.33 g/g of raw corn starch 첨가하여 100 rpm으로 회전하였을 때 가장 우수한 당화결과를 얻었다. 그리고 효소반응기의 조작시 소모되는 에너지를 당화촉진효과와 비교 검토하였으며,

상기 조작조건하에서 1g의 당 생성시 소모에너지는 0.18 watt·h/g였다. 소모에너지는 impeller 교반형 bioattritor보다는 다소 높았지만 산업적 규모로 scale-up하기 용이한 구조를 갖고 있어 후속 연구가 요망된다.

감사의 말

본 연구는 한국과학재단 '91년도 목적기초연구비(과제번호 890504)의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 이용현, 조구형. 1986. 마찰반응계에서 전분질의 무증자당화에 관한 연구. *산업미생물학회지* 14(1): 29-36.
- 이용현, 조구형. 1986. 분쇄마찰매체 함유 효소반응계를 이용한 무증자 corn starch의 고농도 당화와 당화액의 조성에 관한 연구. *산업미생물학회지* 14(5): 399-405.
- 박동찬, 이용현. 1990. Glucoamylase 및 α -amylase의 분쇄마찰매체 효소반응계에서의 생전분 효소분해 mechanism. *산업미생물학회지* 18(3): 260-267.
- 이용현, 박동찬. 1990. 분쇄마찰 효소반응계에서 생전분 효소당화를 위한 glucoamylase와 α -amylase의 보완작용. *산업미생물학회지* 18(4): 352-359.
- 이용현, 박동찬. 1992. 생전분의 고농도 무증자 당화법을 도입한 새로운 high fructose corn syrup 제조 공정. *산업미생물학회지* 20(4): 437-444.
- 이용현, 박진서. 1989. 무증자 전분당화용 분쇄마찰매체 함유 효소반응기의 조작조건과 동력소모의 검토. *산업미생물학회지* 17(4): 349.
- 이용현, 조구형, 박진서. 1989. Biomass의 고효율 효소당화에 적합한 attrition coupled bioreactor 개발에 관한 연구: tumbling drum type bioreactor를 활용한 섬유소 당화. *한국생물공학학회지* 4(2): 87-93.
- Sigma Co. 1991. Sigma Catalogue, Glucose Procedure No. 510.
- Miller, G.L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal. Chem.* 31: 426-428.

(Received February 6, 1993)