

무증자 전분당화용 분쇄마찰매체 함유 효소반응기의 조작조건과 동력소모의 검토

이용현* · 박진서

경북대학교 자연과학대학 유전공학과

Evaluation of Operational Conditions and Power Consumption of a Bioattritor for Enzymatic Saccharification of Uncooked Starch

Lee, Yong-Hyun* and Jin-Seo Park

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

Uncooked starch can be effectively saccharified in an enzyme reaction system containing attrition-milling media. To develop the high efficiency bioattritor, an agitated bead type bioreactor was constructed, and its effectiveness was evaluated. The optimal operation condition of bioattritor was found to be 300 g glass bead/L, 200 rpm, standard type impeller for 220 g/L of uncooked corn starch. The torque under the various operational conditions were also measured. The interrelationship between energy consumption for agitation of attrition-milling media and enhanced extent of saccharification of uncooked starch was evaluated. Power consumption was measured to be around 1.53 watt/L under the optimal operation condition. The attrition coupled enzyme reaction system is identified to be a very excellent energy saving process for saccharification of uncooked starch, and seems to have a bright prospect of industrial application.

전분의 효소당화에는 증자 당화법이 주로 이용되고 있지만, 무증자 당화법은 증자에너지가 불필요하고, 증자하지 않음으로 호화에 의한 전분의 구조적 팽윤현상을 수반치 않음으로 기질을 고농도로 첨가하여 당화시킬 수 있고, 또 고농도 당화액을 얻을 수 있어 농축에 필요한 에너지를 절감할 수 있는 등 많은 장점이 있다. 이와같은 잇점 때문에 국내외적으로 무증자 당화에 관한 관심이 높으며, 관련 연구가 활발히 진행되어 상당한 성과를 얻고 있다(1-10). 그러나 아직 무증자 당화법은 증자 당화법에 비하여 전분질의 당화속도가 느리고 당수율이 낮아 이에 대한 개선이 요망되고 있으며, 이와같은 결정적인 제한요소를 극복하지 못함으로써 무증자 당화법이 가진 많은 가능성에도 불구하고 현재까지 국내외적으로는 산업적 활용에는 이르지 못하고 있다.

본 연구실에서는 지금까지 연구된 무증자 당화법과는 상이한 분쇄마찰매체 함유 효소반응계를 활용한 전분질의 고효율 무증자 당화법을 연구해 오고 있으며, 그 대요는 전분질을 무증자 효소당화시킬 때 생전분질-효소 현탁액에 고품매체를 첨가하여 교반함으로써 당화를 현저히 촉진시키는 방법이다(11). 분쇄마찰매체 함유 효소반응계에서 무증자 전분 및 전분질을 당화시킨 결과 당화속도는 증자법과 유사하고 당화율은 증자법을 능가하는 매우 고무적인 결과를 얻었으며(12), 증자에 의한 전분의 팽윤현상을 수반치 않음으로서 45%(w/v)라는 고농도로 전분을 첨가해 고효율, 고농도 당화가 가능함을 보고한 바 있고(13), 당화촉진 mechanism을 관찰한 바 있으며(14), 또한 무증자 당화법을 도입한 새로운 주정생산공정을 제안한 바 있다(15).

Key words: Bioattritor, torque, energy consumption, uncooked corn starch, enzymatic hydrolysis

*Corresponding author

이와같은 효소반응계는 고형매체를 함유하며 이를 교반할 때 동력이 소모되므로 소모 교반에너지를 측정하여 증자법의 증자에너지 소모량과 비교 검토함이 필요하며, 또 에너지 소모가 적은 반면 고효율로 당화를 행할 수 있는 bioatritor의 개발이 필요하다. 이를 위해서는 적절한 장치를 설계, 제작, 조작하고 이로부터 분쇄마찰매체의 교반시 장치에 부하되는 torque를 정량적으로 측정하여 부하되는 energy와 생전분의 효소당화와의 상관관계를 비교, 검토하는 것이 요망된다.

본 연구의 목적은 불용성 기질인 생전분의 고효율 당화 및 에너지 소모를 최소화할 수 있는 분쇄마찰매체 함유 효소반응기의 개발을 목표로, impeller로 고형매체를 교반하는 agitated bead type bioatritor를 제작하여 최적 조작조건을 결정하였고, 또 impeller에 부하되는 torque를 측정하여 소모되는 에너지와 효소 당화속진과의 관계를 정량적으로 고찰하는 등 산업적 규모의 활용을 위한 기초자료를 확보하고자 연구하였다.

재료 및 방법

효 소

사용효소는 국내 HFCS 제조 또는 주정생산업체에서 전분질 당화에 사용하고 있는 상업용 당화효소인 Diazyme L-30D(Miles 사)과 액화효소인 Termamy(Novo 사)로써 이를 5:4 비율로 혼합 사용하였다.

기 질

시판 옥수수전분을 사용기질로 하였다.

분쇄마찰매체

분쇄마찰매체는 직경 3mm의 유리구(glass bead)를 주로 사용하였으며, 비중이 가벼운 같은 직경의 polyacetal 구와 teflon 구도 병용하였다. 사용한 분쇄마찰매체의 물리적 양상은 전보에 보고한 바 있다(12).

Bioatritor의 구조

사용한 bioatritor는 각종 controller, torque 측정장치를 내장한 회전축, 1l 용량의 agitated vessel로 구성되어 있다. Controller에는 교반속도조절기 및 계측기(최대 900 rpm), temperature controller(최대 70°C), 전류·전압 측정장치로 구성되어 있다. 회전축의 교반에는 1/8HP의 정밀 AC motor를 사용하였으며, 분쇄마찰매체의 교반에 소요되는 power 및

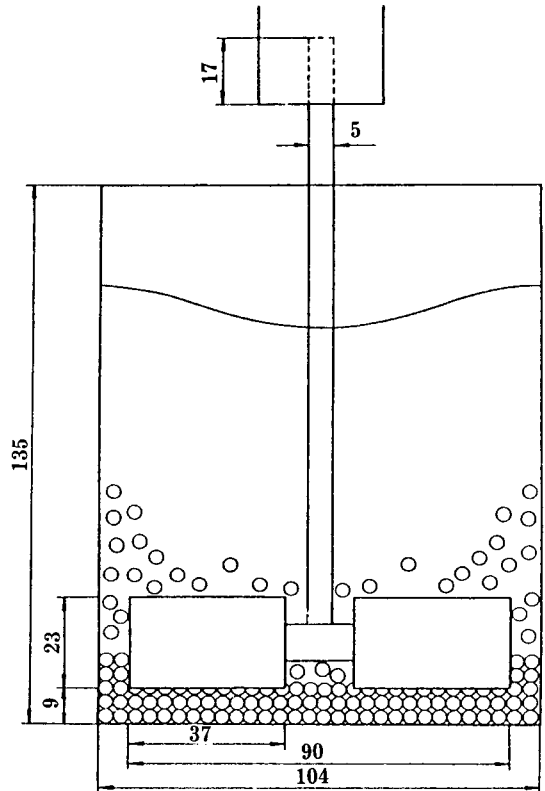


Fig. 1. The shape and dimension of agitated bead type bioatritor (dimension; mm).

energy는 부하되는 torque를 측정 환산하였다. 반응조는 impeller를 이용하여 분쇄마찰매체-전분질-효소의 혼합현탁액을 교반하는 agitated bead type으로서 용량은 1l이며 stainless steel로 제작하였으며 외부에 온도조절을 위한 water jacket을 부착하였고 그 규격은 Fig.1과 같다.

Torque 및 동력소모 측정

반응조내의 분쇄마찰매체 함유 전분질-효소 현탁액의 교반시 impeller에 부하되는 torque는 motor에 연결된 상면 회전축과 impeller에 부착된 하면 회전축을 연결하는 일정한 탄성계수를 지닌 spiral spring coil에 부하되는 force의 차이에 따른 양회전축의 이완되는 각도를 sensor로 감지하여 측정하였으며, impeller의 교반에 소요되는 power와 torque와의 관계는 다음 식으로 구하였다(16).

$$P = \text{Torque} \times \text{Rate of angular displacement}$$

$$P = F \times d \times w$$

$$= F \times \frac{d \times \pi \times N}{30}$$

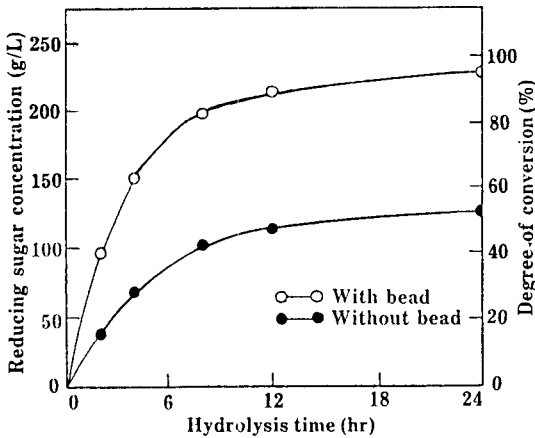


Fig. 2. Hydrolysis of corn starch with and without glass bead; 220 g/L slurry concentration, 300 g glass bead/L, 200 rpm, 55°C.

where P=Power, watt (joule/sec)

d=Distance from axis to the point of measurement, m

N=Reciprocal per minute, rpm

F=Force, newton

w=Angular velocity, m/sec

Bioatrittor 에서의 당화

당화는 용량 1/의 반응조에서 행하였으며, 반응조에서 분쇄마찰매체 함유 전분질-효소-완충액 현탁액이 차지하는 부피는 0.66/이며, 이중 전분질-효소-완충액 현탁액이 차지하는 부피는 0.59/였다. 0.2M Na-citrate buffer(pH 3.8)에 건조된 무증자 옥수수 전분 220g/l, glass bead(직경 3mm) 300g/l, 당화효소 4 ml/l, 액화효소 3.2 ml/l 농도가 되도록 첨가하여 반응조에서 55°C, 200 rpm, 90°각도의 표준형 impeller를 사용하여 교반시키면서 당화하였다. 최적 조작조건은 기질농도, 교반속도, 분쇄마찰매체 첨가량 및 종류, impeller의 모양을 변화시키면서 당화시켜 결정하였다.

당분석

포도당은 효소적 방법인 P.G.O(Peroxidase-Glucose Oxidase-o-parainisidine, Sigma)법으로 정량하였으며(17), 환원당은 DNS(3,5-dinitro salicylic acid)법으로 분석하였다(18).

결과 및 고찰

전분의 무증자 당화에 대한 Bioatrittor의 효율성

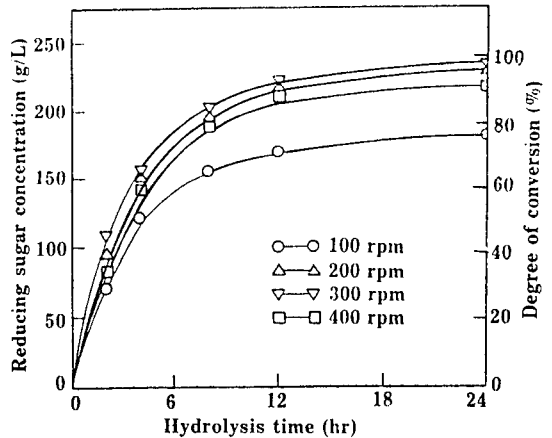


Fig. 3. Effect of agitation intensity on enzymatic hydrolysis of corn starch in a bioatrittor; 220 g/L slurry concentration, 300 g glass bead/L, standard type impeller, 55°C.

실제 제작된 bioatrittor의 효율성을 검토하기 위하여 비교적 순수한 옥수수전분을 기질로 무증자 효소 당화를 수행하였다. Fig.2는 corn starch 220g/l와 효소혼합액에 분쇄마찰매체인 직경 3mm 유리구 300g/l를 첨가한 후 200 rpm으로 교반하여 분쇄마찰효과를 주면서 55°C에서 24시간 당화시킨 군과 분쇄마찰매체를 첨가하지 않고 같은 조건에서 당화시킨 군의 생성환원당 농도를 비교하고 있다.

분쇄마찰매체를 첨가하지 않고 무증자 당화시킨 경우 그 분해속도 및 분해율이 매우 낮아 24시간 가수분해 후 옥수수전분에 함유된 전분의 약 50% 정도가 당화되었으며, 이는 무증자 당화의 한계성을 잘 보여주고 있다. 반면 분쇄마찰매체를 첨가한 경우는 24시간 가수분해 후 생성환원당은 230g/l, 당화율은 95% 수준으로 매우 높았으며, 이와같은 당화속도 및 당화율은 전보에 보고한 바 있는(12) 진탕장치를 이용한 무증자 당화결과를 능가하는 수준으로 8시간만에 기질의 약 80% 이상이 당화되는 결과를 보였다. 이로 볼 때 본 실험에서 사용한 agitated bead type bioatrittor는 매우 효율적인 무증자 당화 효소반응기임을 알 수 있다.

Bioatrittor의 조작조건 검토

Impeller의 교반속도의 영향: Bioatrittor의 최적 교반속도를 결정코자 교반속도를 100, 200, 300, 400 rpm으로 변화시키면서 당화시켜 생성된 환원당의 농도 및 수율을 경시적으로 비교하여 Fig.3에 나타내었다. 이 때 기질인 corn starch의 첨가량은 220g/l이었고 유리구 첨가량은 300g/l였다.

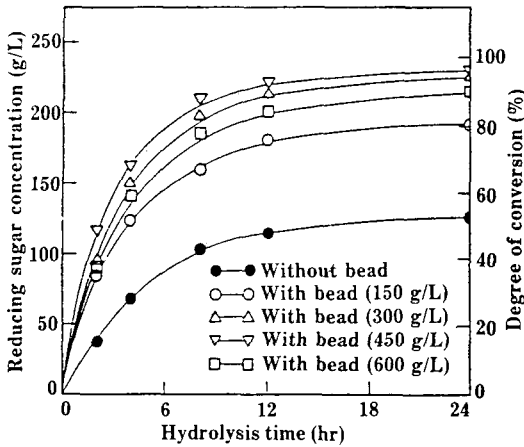


Fig. 4. Effect of the amount of glass bead charged on enzymatic hydrolysis of corn starch in a bioatritor; 220 g/L slurry concentration, 300 g glass bead/L, 200 rpm, 55°C.

교반속도가 증가할수록 당화율이 증가하였는데, 이는 유리구의 분쇄마찰작용이 증대됨에 기인한다. 그러나 교반속도가 300 rpm을 초과할 경우에는 당화속도 및 당화율의 증가가 둔화되기 시작하였으며, 교반속도가 400 rpm에 이르러서는 더이상 증대되지 않고 오히려 감소하였다. 이는 적정수준 이상의 교반강도하에서는 효소의 실활이 급속히 진행되어 생전분의 당화율이 감소되는 것으로 판단된다. Impeller의 교반에너지는 impeller의 회전속도에 비례하므로 가능한 되도록 낮은 교반속도를 택함이 유리할 것이며 이런 관점에서 200 rpm이 최적 교반속도로 여겨진다.

분쇄마찰매체 첨가량의 영향: 분쇄마찰매체인 유리구의 최적 첨가량을 조사하기 위하여 전분 농도를 220g/l로 고정하고 유리구의 첨가량을 0, 150, 300, 450, 600g/l로 변화시키면서 200 rpm, 55°C에서 무중자 당화시킨 결과는 Fig.4와 같다.

분쇄마찰매체인 유리구의 첨가량이 증가함에 따라 당수율이 증가되어 갔다. 그러나 300g/l이나 450g/l에서는 당수율의 차이가 별로 관찰되지 않았으며 600g/l에서는 오히려 당수율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 한정된 용적의 반응계에서 분쇄마찰매체인 유리구의 첨가량이 과다할 경우 유리구의 운동성이 오히려 감소됨으로 효과적인 분쇄마찰이 이루어지지 않게 되고 또한 유리구 사이로 현탁액이 자유롭게 이동하는데 지장을 주어 양호한 교반효과를 얻을 수 없는데 기인한다고 사료된다. 유리구의 양이 증가할수록 동력소모는 비례하여 증대됨으로

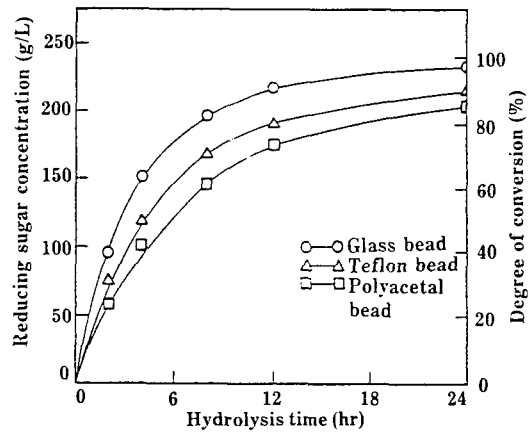


Fig. 5. Effect of different attrition-milling media of the same volume on enzymatic hydrolysis of corn starch in a bioatritor; 220 g/L slurry concentration, 300 g glass bead/L, 200 rpm, 55°C.

유리구 첨가량은 300g/l가 적절한 수준으로 판단된다.

분쇄마찰매체 종류별 영향: 분쇄마찰매체로 사용된 유리구는 비중이 2.54로 비교적 커서 이보다 비중이 가벼운 분쇄마찰매체를 사용하여 유사한 분쇄마찰효과를 얻을 수 있다면 교반시 소모되는 에너지를 줄일 수 있게 된다. 이를 검토하기 위하여 유리구보다 비중이 낮은 teflon(비중 2.17), polyacetal(비중 1.43)을 분쇄마찰매체로서 첨가된 유리구와 동일한 부피만큼 첨가하여 실험한 결과는 Fig.5와 같다. 이 때 기질 첨가농도는 220g/l였다.

상기에서와 같이 분쇄마찰매체로서 유리구를 첨가한 경우는 24시간 가수분해 후 생성환원당 농도는 230g/l, teflon 첨가군은 224g/l, polyacetal 첨가군은 215g/l로서 비중이 가장 큰 유리구를 첨가하였을 경우 가장 높은 당화율을 나타내었으며, 비중이 큰 매체일수록 비중이 작은 매체에 비하여 더 우수한 당화 촉진효과를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 유리구보다 비중이 작은 teflon과 polyacetal도 우수한 당화 촉진효과를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이는 적절한 매체를 선택할 경우에는 동력소모를 대폭적으로 줄이면서도 훌륭한 당화 촉진효과를 얻을 수 있을 것임을 예시하고 있다.

이와같이 당화속도 및 당화율면에서는 유리구가 가장 적절한 분쇄마찰매체를 알 수 있다. 그러나 사용 분쇄마찰매체의 종류에 따라 교반시 소모되는 에너지가 상당한 차이가 예상되며 적절한 분쇄마찰매체의 선별은 동력소모와 당화 촉진효과와의 관점

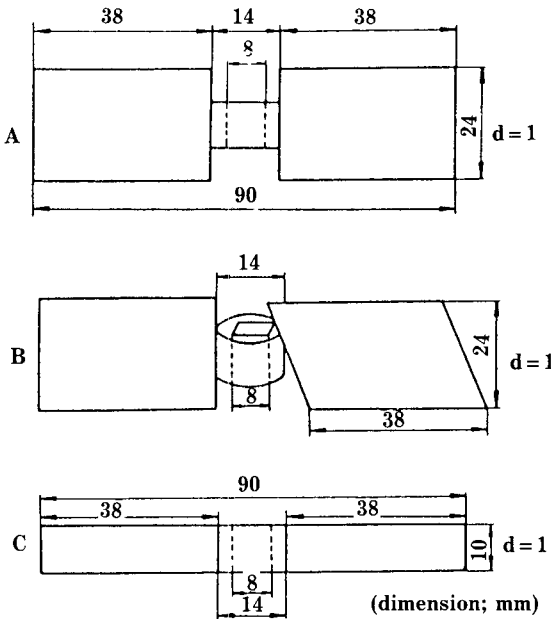


Fig. 6. Shape and dimension of impellers; standard (A), 45°-angle (B), sharp (C).

에서 정량적인 검토가 필요하다.

Impeller의 형태에 따른 영향: 반응조내의 전분 현탁액과 분쇄마찰매체의 효과적 교반은 교반속도에외에도 그 형태가 매우 중요하다. 또한 impeller의 형태에 따라 부하되는 power의 양도 크게 영향을 받게 된다. 이를 검토하기 위하여 Fig.6에 도시된 3종의 impeller를 활용하여 당화시킨 결과는 Fig.7과 같다. 이 때 기질농도는 220g/l, 분쇄마찰매체인 유리구 첨가량은 300g/l였다.

Fig.7에서와 같이 impeller의 회전방향과 90°를 이루고 있는 표준형 impeller(A)의 경우 가장 우수한 당화 결과를 얻었으며, 표준형 impeller와 크기는 같으나 impeller를 45°로 눕힌 45° angle형(B)도 우수한 당화효과를 나타내었다. 그러나 높이가 낮은 sharp형 impeller의 당화 촉진효과는 다소 열등하였다. 표준형 impeller가 가장 당화 촉진효과가 큰 impeller 형태로 사료되며, 45° angle형 impeller도 당화율이 우수하고 동력소모도 표준형에 비하여 적을 것으로 예상되므로 훌륭한 impeller 형태로 응용될 수 있을 것으로 보인다.

고농도기질 첨가의 영향: 분쇄마찰매체 함유 효소 반응계를 이용한 전분질 당화에서는 증가하지 않음으로서 전분질의 팽윤현상이 일어나지 않아 전분을 증가법에 비하여 고농도로 첨가하여 당화시킬 수 있

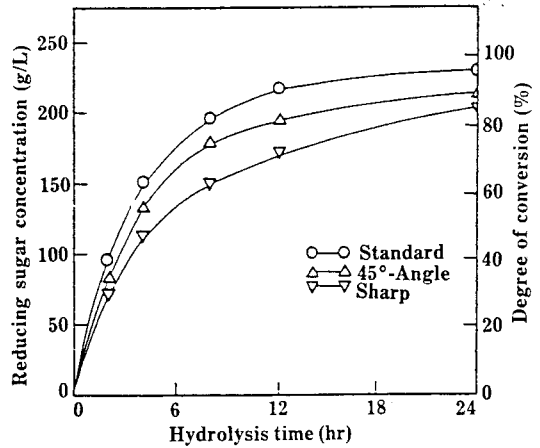


Fig. 7. Effect of impeller type on enzymatic hydrolysis of corn starch in a bioatritor; 220 g/L slurry concentration, 200 rpm, 300 g glass bead/L, 55°C.

Table 1. Effect of substrate concentration on enzymatic hydrolysis of corn starch in a bioatritor; 300g glass bead/L, 200 rpm, standard type impeller.

Substrate Conc.	Time	Time				
		2 hr	4 hr	8 hr	12 hr	24 hr
220 g/L	RSC*	99	150	192	220	230
	DC**	41	62	80	90	95
350 g/L	RSC	154	208	285	323	347
	DC	40	54	74	84	90
400 g/L	RSC	145	211	286	334	378
	DC	33	48	65	76	86
450 g/L	RSC	134	198	257	302	342
	DC	27	40	52	61	69
500 g/L	RSC	110	176	220	275	314
	DC	20	32	40	50	57

*RSC; Reducing Sugar Concentration, g/L

**DC; Degree of Conversion, %

는 장점이 있다. 분쇄마찰매체 함유 효소반응기인 bioatritor에서 효율적으로 당화가 가능한 전분농도를 검토하기 위하여 기질농도를 220, 350, 400, 450, 500g/l로 변화시키면서 당화하여 그 결과를 환원당 농도 및 당수율로써 Table 1에 나타내었다. 이 때 효소첨가량은 기질농도 증가량에 비례하여 첨가하였다.

전분농도가 증가함에 따라 환원당 농도가 증가되었고, 특히 전분농도를 400g/l이라는 매우 높은 수준으로 첨가하였을 경우에서도 24시간 경과 후에 기

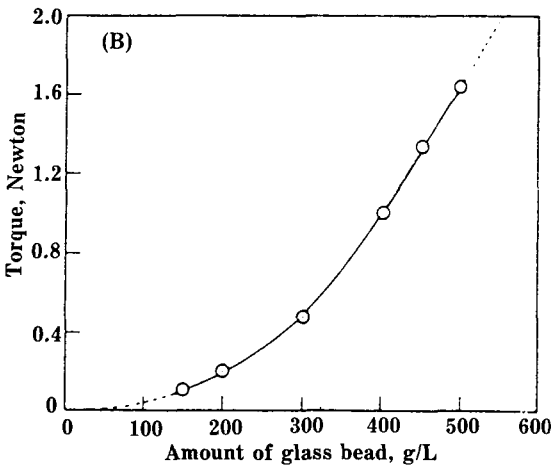
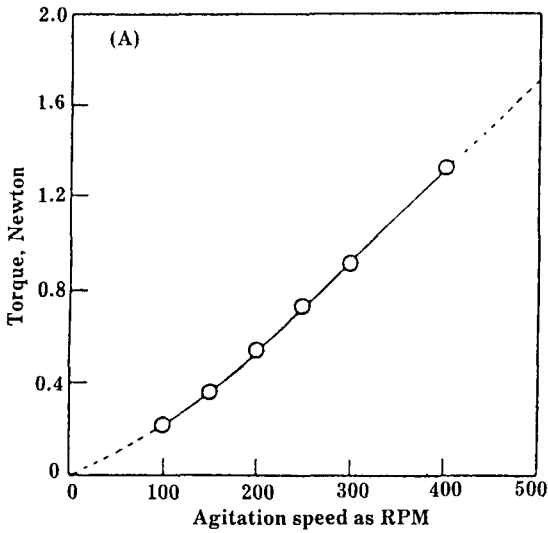


Fig. 8. Effect of agitation speed as RPM (A) and amount of glass bead (B) on initial torque.

질의 86%가 당화되었으며 최종 환원당 농도가 378g/l라는 높은 수준에 이르렀다. 그러나 이보다 높은 45, 50%에서는 오히려 당수율 및 최종 환원당 농도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와같은 초고전분농도하에서는 유동성 수분이 대부분 전분입자에 흡입되어 전분현탁액이 교반되기 어려운 진한 paste 상태로 전환되어 효소반응이 어렵고 또한 분쇄마찰매체가 감소됨에 기인한다. Bioatritor를 활용함으로써 35 또는 40%와 같은 매우 높은 고농도 전분질에서도 높은 당수율 및 당농도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이와같은 고농도 전분질 당화는 기존의 증자 당화법으로는 얻기 어려운 수준이며, 앞

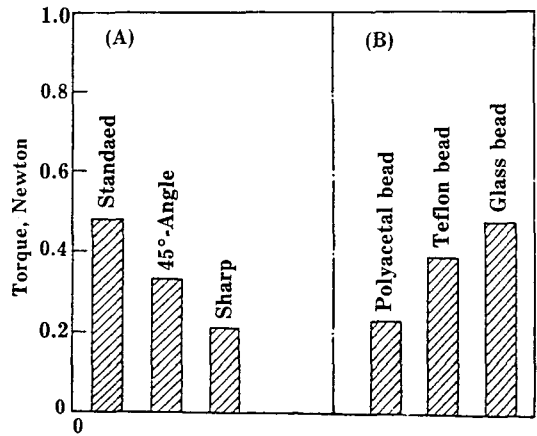


Fig. 9. Effect of impeller shapes (A) and different attrition-milling media (B) on initial torque.

으로 무증자 당화에 적절한 효소의 개발, 교반조건의 향상, fed-batch식 전분질 투입방법의 도입 등 무증자 당화법을 최적화함으로써 보다 단시간 내에 고농도 전분질의 고효율 당화가 가능하리라 예상된다.

Bioatritor의 조작조건이 Torque 및 Power Consumption에 미치는 영향

Impeller의 교반속도와 Torque의 변화: Bioatritor의 impeller 교반속도 변화에 따른 initial torque 변화를 검토하기 위하여 전분질 220g/l, 유리구 300g/l를 포함한 반응액에서 교반속도를 변화시키면서 initial torque의 변화를 측정할 결과를 Fig.8에 나타내었다.

400 rpm까지 교반속도와 torque 값과는 거의 직선적인 관계로 교반속도가 증가할수록 impeller에 부하되는 torque 값도 급속히 증가하였으며 교반강도는 분쇄마찰매체 함유 효소반응기의 소모에너지량을 결정하는데 매우 중요한 요소가 됨을 알 수 있다.

본 연구에서 주로 사용하고 있는 교반속도인 200 rpm에서 부하되는 initial torque를 앞에서 제시한 관계식을 적용하여 power로 환산하면 1.53 watt/l에 해당되며, 이는 적은 동력소모로도 우수한 당화 촉진효과를 얻을 수 있음을 의미한다.

분쇄마찰매체인 유리구 첨가량과 Torque의 변화: 유리구 첨가량에 따른 initial torque의 변화를 검토하기 위하여 유리구의 첨가량을 증가시키면서 initial torque의 변화를 측정할 결과는 Fig.8과 같다. 이 때 220g/l의 기질을 첨가하였으며 교반속도는 200 rpm이었다.

Fig.8에서와 같이 유리구 첨가량이 증가함에 따라 initial torque가 거의 무게에 비례하여 급속히 증가하였으며, 분쇄마찰매체 첨가량도 power 소모에 결정적인 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.

분쇄마찰매체의 종류와 Torque 변화 : 분쇄마찰매체 종류에 따른 initial torque의 변화를 검토하기 위하여 유리구보다 비중이 작은 polyacetal이나 teflon을 유리구 첨가와 동일한 부피만큼 첨가하여 분쇄마찰매체 함유 효소반응기에서 효소당화시 initial torque를 측정된 결과는 Fig.9와 같다.

유리구(비중 2.54)와 teflon(비중 2.17)간에는 torque의 차이가 적은 반면, 비중이 가벼운 polyacetal의 경우 유리구에 비하여 initial torque 값이 다소 낮았다. Polyacetal은 Fig.5에서 보듯이 당화효과도 양호할 뿐만 아니라, 부하되는 initial torque도 유리구나 teflon보다 적어 훌륭한 분쇄마찰매체로 이용될 수 있을 것으로 보인다. 본 실험에서 사용한 분쇄마찰매체 이외에도 당화 촉진효과가 크면서도 동력소모가 적은 적절한 분쇄마찰매체를 선별하는 것이 중요한 연구과제로 남아 있다.

Impeller의 형태와 Torque의 변화 : Impeller의 형태에 따른 initial torque를 검토하기 위하여 Fig.6에 도시한 바 있는, 3종의 impeller를 교환하여 당화시킬 때 impeller의 형태가 initial torque에 미치는 영향도 Fig.9에 나타내었다.

본 실험에 사용된 높이 2.4 cm인 standard형(A형)의 경우 initial torque가 0.81 N/l였으며, 45°-angle형(B형)의 경우는 0.56 N/l, 동일한 크기로 높이가 1.0 cm로 낮은 sharp형(C형)은 0.34 N/l로 상대적으로 낮았다. 45°-angle type impeller(B형)는 Fig.7에서 보듯이 당화 촉진효과는 표준형에 비하여 다소 낮으나, 표준형보다 torque가 작아 적은 동력소모로도 우수한 당화 촉진효과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

기질농도와 Torque의 변화 : 기질농도를 증가시키면서 initial torque를 측정된 결과 기질농도가 증가함에도 불구하고 initial torque 값은 거의 변화가 없었다. 즉 기질의 농도는 initial torque에 거의 영향을 미치지 않으며, 부하되는 torque는 전분현탁액의 교반보다는 주로 분쇄마찰매체의 교반에 소모됨을 알 수 있다. 앞에서 언급하였듯이 분쇄마찰매체 함유 효소반응기에서는 기질을 고농도로 첨가하여도 고수율당화가 가능하였으며 또한 기질농도를 증가시켜도 torque 값의 증가가 거의 없는 것으로 미루어 고농도 기질 당화는 에너지 절약의 관점에서 고무적인 당화법이라 할 수 있다.

Table 2. The relationship between the initial torque and enhanced extent of saccharification by attrition-milling effect after 4 hours.

	Initial torque (A), N	Enhanced extent of saccharification by attrition-milling effect after 4 hours (B), g/L	B/A
Agitation speed			
100 rpm	0.23	32	139.1
200 rpm	0.48	67	139.6
300 rpm	0.91	69	75.82
400 rpm	1.32	47	35.6
Amount of glass bead			
150 g/L	0.13	27	207.7
300 g/L	0.48	67	139.6
450 g/L	1.37	72	52.6
600 g/L	2.36	52	22.0
Different milling media			
Glass	0.48	67	139.6
Teflon	0.31	32	103.2
Polyacetal	0.23	20	87.0
Shape of impeller			
Standard	0.48	67	139.6
45°-Angle	0.33	42	127.3
Sharp	0.2	22	110.0
Starch concentration			
220 g/L	0.48	67	139.6
350 g/L	0.525	147	280.0
400 g/L	0.53	160	301.9
450 g/L	0.535	142	265.4
500 g/L	0.54	107	198.2

Initial Torque 값과 생전분 효소당화 진척도와와의 상관관계

Bioattritor의 여러 조작조건하에서 당화진척도와 부하된 initial torque의 상관관계를 규명하여 bioattritor 최적 조작조건을 결정코자, 지금까지 실험한 각종 분쇄마찰조건에서 4시간 효소당화 후 분쇄마찰효과에 의해 증가된 당농도(B), initial torque(A), 그리고 분쇄마찰매체 함유 효소반응기를 이용함으로써 증가된 당농도를 initial torque로 나눈 값을 Table 2에 나타내었다.

여기서 분쇄마찰효과에 의해 증가된 당농도는 분쇄마찰매체를 첨가한 군과 첨가하지 않은 군을 4시간 당화시켜 얻은 두 군의 당농도 차이로서 나타내었으며, 생성된 당농도를 initial torque로 나눈 수치는 energy input에 대한 당생성량의 비교로 옥수수 전분의 에너지 당화효율을 나타낸다.

교반속도 실험에서는 200 rpm의 경우 energy input에 대한 당수율이 가장 높아 최적 교반속도임을 알 수 있으며, 이 이상의 교반속도에서는 당농도는 높으나 에너지 소모가 급속히 증대됨으로 energy input에 대한 당화효율이 매우 낮음을 알 수 있다.

분쇄마찰매체 첨가량의 경우에는 150g/l의 경우가 가장 양호한 결과를 나타내나 최종 당수율이 낮아 실용화하기에는 비효율적인 당화조건으로 사료되어, 300g/l를 첨가하였을 경우가 최적 첨가량으로 판단된다. 분쇄마찰매체로는 유리구가 energy input에 대한 당효율이 가장 높아 가장 우수한 분쇄마찰매체를 알 수 있다. 또한 impeller 형태의 경우에는 표준형이 가장 우수한 impeller임을 알 수 있으며, 45°-angle type impeller도 energy input에 대한 당화효율이 비교적 높아 역시 훌륭한 impeller 형태로 사료된다. 고농도기질의 경우에는 initial torque는 별로 높지 않으나 앞에서 언급하였듯이 높은 당농도를 얻을 수 있어 energy input에 대한 당수율이 매우 높아, 고농도 효소당화는 그 의의가 매우 큼을 알 수 있다.

위에서와 같이 교반속도 200 rpm, 분쇄마찰매체로 유리구, 유리구 첨가량 300g/l, 그리고 표준형 impeller를 사용하였을 때 무중자 전분당화가 가장 효율적으로 이루어졌으며 제작된 bioatritor의 최적 조작조건으로 사료된다.

Bioatritor의 동력소모와 생전분 당화의 경제성 전망

분쇄마찰매체 함유 효소반응계를 활용한 옥수수 전분의 무중자 효소당화법에 대한 경제성을 검토함에는 여러 실험조건하에서 분쇄마찰매체를 포함한 반응액의 교반시 소요되는 동력을 측정하여 비교 검토함이 요망된다. 따라서 각종 실험조건하에서 옥수수 전분 첨가량의 반이 당화되는데 소요되는 시간, 부하되는 initial torque를 power로 환산한 결과, 그리고 옥수수전분의 반이 당화되는데 소요되는 동력소모량을 요약하여 Table 3에 나타내었다.

무중자 전분질 당화에 가장 효율적인 결과를 나타내는 최적 bioatritor의 조작조건에 경우에 initial power는 1.53 w/l, 동력소모량은 3.37 w·h/l 라는

Table 3. Comparison of power required for half digestion of uncooked starch in a bioatritor under the various saccharification conditions.

	Half saccharification time, hr	Power, watt/L	Energy consumption, watt.h/L
Agitation speed			
100 rpm	4.10	0.37	1.52
300 rpm	2.40	4.36	10.46
400 rpm	3.30	8.44	27.85
Amount of glass bead			
150 g/L	4.20	0.42	1.76
450 g/L	2.30	4.37	10.05
600 g/L	3.20	7.54	24.13
Different milling media			
Teflon	4.00	1.00	4.00
Polyacetal	6.20	0.73	4.53
Shape of impeller			
45°-Angle	3.30	1.05	3.47
Sharp	5.20	0.64	3.33
Starch conc.			
350 g/L	3.20	1.52	4.86
400 g/L	4.20	1.46	6.13
450 g/L	6.20	1.40	8.68
500 g/L	12.00	1.36	16.32
Optimal*	2.20	1.53	3.37

*Optimal condition: 220 g corn starch/L, 300 g glass bead/L, standard type impeller, 200 rpm.

매우 적은 수치를 나타내었으며, 장치를 보다 큰 규모로 scale-up 시킬 경우는 위의 결과보다 더욱 적은 동력소모로 당화촉진이 가능하리라 전망된다. 뿐만 아니라 기질을 고농도로 첨가함으로써 고농도의 당화액을 얻을 수 있고 생성당농도당 에너지가 절감됨으로써 에너지 효율을 더욱 증대시킬 수 있게 된다.

이로 미루어 분쇄마찰매체의 교반에 소요되는 energy 소모는 당화 촉진효과에 의한 당화시간 단축, 고농도 옥수수전분을 이용한 고효율 전환의 결과로 얻어지는 고농도 당화액의 확보, 또한 막대한 양의 증자시 소모되는 에너지 절약 등으로 충분히 보상되리라 보여진다. 본 반응계의 경제성에 대한 정확한 평가는 scale-up을 위시한 다음 단계의 연구가 필요하다. 에너지 절약형 공정임을 알 수 있으며 산업적 활용전망은 매우 밝다고 하겠다.

요 약

전분질을 당화시킬 때 유리구와 같은 분쇄마찰매체 (attrition-milling media)를 첨가하여 교반함으로써 생전분질-효소 현탁액에 분쇄마찰효과를 주어 전분입자를 구조적으로 변화시켜, 당화를 현저히 촉진시키는 적절한 무증자 당화법을 연구해오고 있다. 본 연구는 전분질의 무증자 당화에 적합한 고효율 및 저에너지 소모형 분쇄마찰매체 함유 효소반응기의 개발을 목표로, impeller를 갖춘 agitated bead type bioattritor를 설계 제작하여 그 효용성을 검토하였다. 무증자 옥수수전분을 기질로 당화에 적합한 bioattritor의 최적 조작조건을 검토하였고, 일정한 탄성계수를 지닌 spiral spring coil을 내장한 torque 측정장치를 개발하여 부하되는 torque 및 분쇄마찰매체의 교반에 소요되는 energy를 측정하였고 중요 변수의 영향을 검토하였다. 또한 energy 소모와 생전분의 효소당화 촉진효과와의 상관관계를 규명하였으며, bioattritor의 경제성을 전망하였다. 전분질의 최적 당화조건에서 분쇄마찰매체의 교반에 소요되는 동력은 1.53 watt/l로서 매우 적었다. 분쇄마찰매체 함유 효소반응기는 에너지 절약형 공정으로 사료되며, 이를 이용한 무증자 전분 효소당화공정의 산업적 활용 전망이 예상된다.

사 사

본 연구는 1986-1988년도 한국과학재단 목적기초 연구비로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ueda, S. and Y. Koba: *J. Ferment. Technol.*, 58(3), 237 (1980).
2. Matsuoka, H., Y. Koba and S. Ueda: *J. Ferment. Technol.*, 60(6), 599 (1982).
3. Park, Y.K. and B.C. Rivera: *Biotechnol. Bioeng.*, 24, 495 (1982).
4. 배무, 이재문: 산업미생물학회지, 11(3), 18(1983).
5. 배무, 이재문: 산업미생물학회지, 11(3), 18(1983).
6. 배무, 이재문: 산업미생물학회지, 12(4), 261(1984).
7. 박관화, 오병화, 이계호: 한국농화학회지, 27(1), 52(1984).
8. Fujio, Y., D. Suyanada, P. S. Attasampuna and S. Ueda: *Biotechnol. Bioeng.*, 26, 315 (1984).
9. Svendsby, O., K. Kakutani, Y. Matsumura, M. Itazuka and T. Yamamoto: *J. Ferment. Technol.*, 59, 485 (1985).
10. 오성권, 권호정, 오평수: 산업미생물학회지, 15(6), 408(1987).
11. 이용현: 특허공보(B₁) 88-1443호, 대한민국특허청, 1988.
12. 이용현, 조구형: 산업미생물학회지, 14(1), 29(1986).
13. 이용현, 조구형: 산업미생물학회지, 14(5), 399(1986).
14. 조구형, 이용현: 산업미생물학회지, 14(5), 407(1986).
15. 이용현, 주류공업, 9(1), 47(1989).
16. Oldshue, J.Y.: *Fluid Mixing Technology*, McGraw-Hill, New York, p. 46-47 (1983).
17. Sigma Cooperation: Sigma Diagnostics Glucose Procedure No. 510; Sigma Catalog (1989).
18. Miller, G.L.: *Anal. Chem.*, 31, 426 (1959).

(Received June 14, 1989)

1. Ueda, S. and Y. Koba: *J. Ferment. Technol.*, 58(3),