

Biomass의 고효율 효소당화에 적합한 Attrition Coupled Bioreactor 개발에 관한 연구 ; Agitated Bead Type Bioattritor를 활용한 섬유소 당화

이용현·박진서·윤대모
경북대학교 자연과학대학 유전공학과

Development and Evaluation of the Attrition Coupled Bioreactors for Enzymatic Hydrolysis of Biomass; Agitated Bead Type Bioattritor for Enzymatic Hydrolysis of Cellulose

Yong-Hyun Lee, Jin-Seo Park and Dae-Mo Yoon
Department of Genetic Engineering, College of Natural Sciences,
Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

ABSTRACT

The effective saccharification of cellulosic biomass to glucose is the most critical step for the conversion of renewable biomass to alternative liquid fuel. The enzymatic hydrolysis of biomass can be significantly enhanced provide the attrition milling media is added during hydrolysis. The enhancing mechanism of hydrolysis reaction in an agitated bead system was investigated. An attrition-reactor (bioattritor) which installed specially designed torque measuring apparatus was developed, and the optimal saccharification conditions of bioattritor were determined. The relationship between the power consumption required for agitation of attrition-milling media and enhanced extent of hydrolysis of biomass was compared to evaluate economic feasibility of the process.

서 론

섬유질 biomass는 매년 광합성에 의하여 재생되는 풍부한 자원으로 이를 알코올로 전환시켜 수송용 액체연료로 또는 단당류로 당화시켜 발효기질로 활용코저하는 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. Biomass의 활용을 위한 가장 핵심적인 연구과제는 불용성기질의 고효율 당화에 있다. 그러나 섬유질 biomass는 불용성일 뿐만아니라 효소분해를 받기 어려운 결정구조로 존재하여 그 분해속도가 느리고 또한 분해율도 낮아 이에 대한 개선이 요구되고 있다(1).

섬유소의 효소분해는 섬유소의 구조적 양상에 크게 좌우되며, 리그닌과 헤미셀룰로오스를 제거한 순수 섬유질의 경우 효소분해에 미치는 가장 중요한 구조적 양상으로는 섬유소 입자에 효소분자가 접근할 수 있는 가용표면적(accessible surface area)과 결정화도(degree of crystallinity)를 들 수 있다 (2,3). 가용표면적이 중요한 이유는 효소가수분해의 전제조건으로 효소분자와 섬유소입자

의 표면사이에 접촉이 이루어져야 한다는 사실에 기인하고 있다. 또한 결정화도는 섬유소 효소분해의 난이도를 나타내게 된다.

이와같이 섬유소의 분해는 그 구조적 양상에 크게 좌우됨으로 분해를 촉진시키기 위해서는 전처리와 같은 적절한 방법으로 섬유소의 구조를 변형시켜야 하며, 이상적인 전처리방법은 섬유소의 결정구조를 파괴함과 동시에 섬유소 입자의 가용표면적을 증대시키는 이중효과를 갖음이 바람직하며, 여러가지 물리적, 화학적, 생물학적 방법들이 제안되고 있다(4).

최근 섬유소를 효소당화시킬때 유리구와 같은 고체상 분쇄마찰매체(attrition-milling media)를 첨가하여 교반하면서 효소당화를 행한 결과, 섬유소분해속도 및 율이 현저히 증가한다는 보고가 있으며(5~9), 펄프공장 섬유질 폐기물을 기질로 실험한 결과 분해속도는 배가 되고 당화수율도 80%에 이르는 고무적인 결과를 얻은 바 있다(10). 이는 전처리와 효소당화를 동시에 행하는 새로운 섬유소 효소당화방법으로서 그 산업적 활용 가능성이 높

다고 하며 산업화를 목표로 한 기술적 가능성과 경제성을 면밀히 분석 검토할 필요가 있다. 이를 위해서는 적절한 분쇄마찰반응장치 (attrition coupled bioreactor)를 설계, 제작, 조작하고 이를 이용하여 장치에 부하되는 torque 그리고 분쇄마찰매체의 교반에 소요되는 power등을 정량적으로 측정하고 또한 소모되는 energy를 섬유소의 효소당화 촉진효과와 비교함이 필수적으로 요망된다.

본 연구의 목표는 에너지소모를 최소화하고 최대의 당화효과를 얻을 수 있는 고효율 당화장치의 개발을 목표로 impeller를 갖춘 agitated bead형 bioattritor를 제작하여, 최적조작 및 당화조건을 결정하고, 분쇄마찰매체의 교반에 부하된 torque를 측정하여 소요되는 power와 energy를 결정하며, 이들과 당화촉진과의 관계를 정량적으로 고찰함으로써 공업적 규모연구를 위한 기초자료를 확보함에 있다.

재료 및 방법

효소

사용효소는 *Trichoderma viride*의 배양액을 농축한 산업용 효소인 Celluclast(Novo)였다. Lowry method(14)로 분석한 soluble protein함량은 300mg/ml였다. 효소역가는 Mandels 등이 제안한 방법(11)으로 측정하였으며, filter paper activity는 402IU/ml, CMCase activity는 837IU/ml였고, specific filter paper activity는 1.33IU/mg였다.

기질

본 실험의 사용 기질은 α -cellulose(Sigma)로서 순도는 99.5%, 평균입자크기는 100-200mesh였다.

분쇄마찰매체

분쇄마찰매체는 직경 3mm의 유리구 (glass bead)를 주로 사용하였으며, 비교를 목적으로 보다 비중이 가벼운 같은 직경의 polyacetal구와 teflon구도 병용하였다. 사용한 분쇄마찰매체의 물리적 양상은 전보에 보고한 바 있다(12).

Bioattritor의 구조

Bioattritor는 controller, torque 측정장치를 내장한 회전축, 그리고 1L용량의 agitated vessel로 구성되어 있다. Controller에는 교반속도 조절기 및 계측기(최대 900rpm), temperature controller(최대 70°C), ampere and voltage 계측기로 구성되어 있다. 회전축의 회전에는 1/8HP의 정밀 AC motor를 사용하였으며 분쇄마찰매체의 교반시 부하되는 power를 torque 측정장치로 계측할 수 있도록 설계하여 동력소모와 당화촉진효과를 정량적으로

비교할 수 있도록 하였다. 반응조는 회전축에 부착된 각종 impeller로 분쇄마찰매체-섬유소-효소의 혼합 현탁액을 교반하는 agitated 형으로서 용량은 1L로 stainless steel로 제작하였으며 외부에 온도조절을 위한 water jacket를 부착하였고, 그 규격은 Fig.1과 같다.

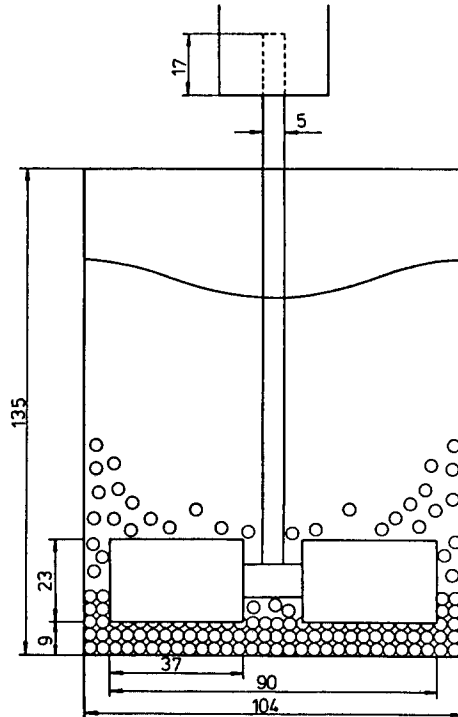


Fig. 1. The shape and dimension of reaction vessel of agitated bead type bioattritor (dimension; mm).

Torque 및 동력소모 측정

반응조내의 분쇄마찰매체 함유 섬유소-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 양 회전축의 이완되는 각도가 sensor에 의해 감지되어 전기적 신호로 바뀌어지도록 제작하였다 (Fig. 2).

Impeller의 교반에 소요되는 power와 torque와의 관계는 다음과 같이 나타낼수 있다(13).

$$P = \text{Torque} \times \text{Rate of Angular Displacement.}$$

$$P = F \times d \times W$$

$$= F \frac{d(\pi)N}{30}$$

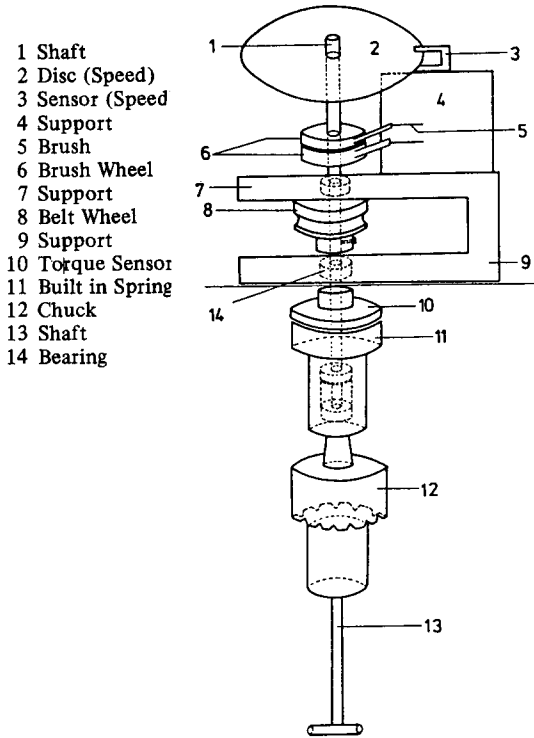


Fig. 2. Arrangement of torque measuring apparatus.

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

Bioatritor에서의 섬유소 효소당화

Bioatritor에서 섬유소 당화는 α-cellulose 50g/1, 증류수 0.75L, 0.2M Na-citrate buffer (pH 4.8) 0.25L를 혼합하고 glass bead (직경 3mm) 600g/1를 첨가하여 30분간 방치 swelling 시켰다. 반면 55°C항온조건에서 따로 30분간 예열한 효소액 0.05 L를 첨가하였다. 당화는 55°C에서 행하였으며 500rpm, 90° 각도 impeller를 사용하여 교반시켰다. 최적조건을 조사하기 위해서 기질농도, 교반속도, 분쇄마찰매체 첨가량 및 종류, impeller의 모양등을 각각 변화시키면서 당화시켰다. 본 실험에 사용된 각종 impeller의 형태 및 규격은 Fig.3와 같다.

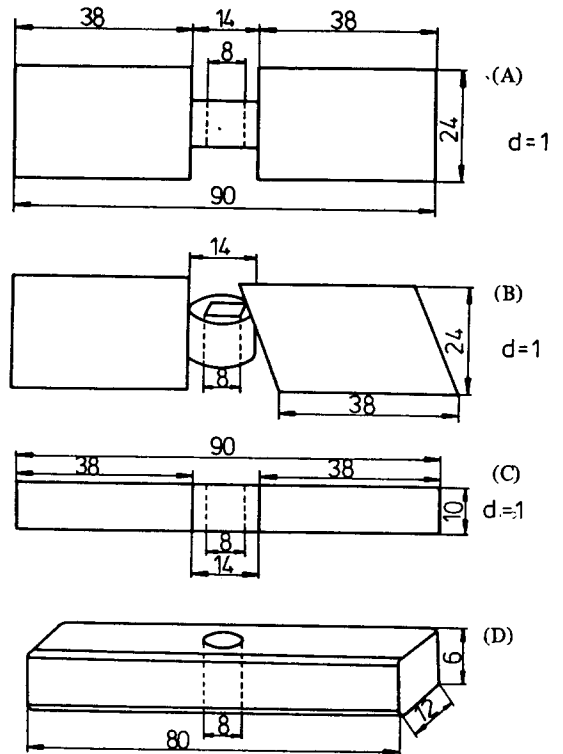


Fig. 3. Shape and dimension of impellers; standard (A), twist (B), sharp (C), rod (D). (dimension; mm)

분석방법

Soluble protein은 표준물질로 bovine serum albumin (Sigma)을 사용하여 Lowry법 (14)으로, 생성환원당은 표준물질로 glucose(Sigma)를 사용하여 DNS법(15)으로 측정하였다. Glucose는 효소적 방법인 PGO (peroxidase-glucose oxidase-o-parainisidine)법 (16)으로 정량하였다.

결과 및 고찰

Agitated Bead Type Bioatritor의 효용성 및 당화속진 Mechanism

Bioatritor의 효용성을 검토코저 섬유소-효소 혼합액에 분쇄마찰매체인 직경 3mm 유리구 600g/1를 첨가한 군과 유리구를 첨가하지 않은 군으로 구분하여 생성된 환원당의 농도를 비교한 결과는 Fig.4와 같다.

24시간 당화후 유리구 첨가군은 약 80%, 유리구를 첨가하지 않은 군은 약 40%가 환원당으로 전환되었다. 이와같은 고효율 당화는 섬유소를 물리, 화학적 방법으로

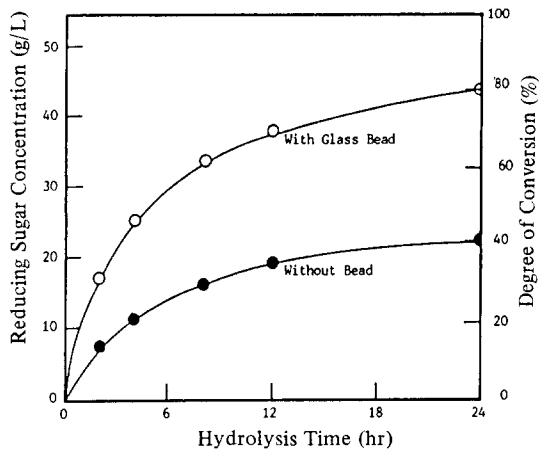


Fig. 4. Hydrolysis of α -cellulose with and without glass bead; 5% (w/v) slurry concentration, 600g glass bead/L, standard type impeller, 0.03L enzyme solution, 500rpm, 55°C.

● without glass bead, ○ with glass bead.

강력히 전처리하여 구조를 변형시키지 않은 통상의 섬유소 분해법으로 얻을 수 없는 높은 당수율로서(3), 분쇄마찰매체 함유 반응기인 bioattritor의 효용성을 잘 나타내고 있다. 분쇄마찰매체 함유 반응계에서 섬유소의 효소분해 mechanism은 Fig.5와 같이 모형화할 수 있으며, 유리구, 섬유소, 효소 분자의 크기를 상대적으로 표시하였다.

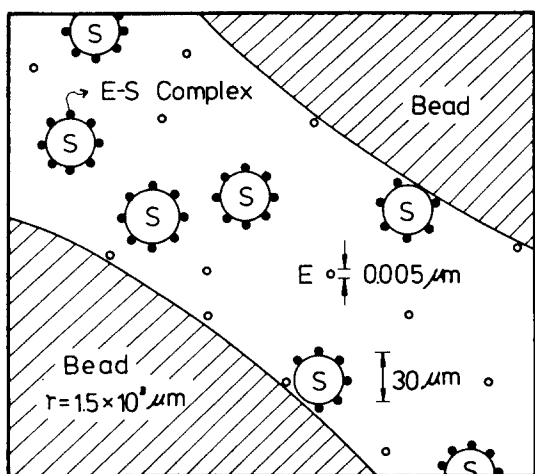


Fig. 5. Schematic model on enzymatic hydrolysis of insoluble cellulose in an attrition coupled reaction system; S is cellulose particle, E is enzyme.

분쇄마찰매체 함유 반응계에서 불용성 섬유소의 효소 당화가 촉진되는 원인으로서는 분쇄마찰매체의 물리적 충격에 의한 섬유소 미세결정구조(microcrystalline structure)의 파괴, 물리적 충격으로 섬유소 입자에 균열이 생기고 그틈으로 물 분자가 스며들어 일어나는 섬유소의 구조적 팽윤, 분쇄마찰매체에 의하여 섬유소 입자가 작은 입자로 붕괴(fragmentation)되어 효소와 결합할 수 있는 가용표면적(accessible surface area)증대 등을 들 수 있다.

당화촉진 mechanism이 미세결정구조의 파괴에 의한 것인지 규명코저 bioattritor에 효소첨가없이 섬유소 50g/l와 분쇄마찰매체인 유리구 600g/l, 증류수를 넣고 500rpm의 속도로 24hr, 48hr, 그리고 72hr동안 교반하여 wet-milling한 후 시료를 채취하여 solvent drying(3)하여 그결정화도(crystallinity index)를 X선 회절법으로 측정한 결과는 Fig.6과 같다.

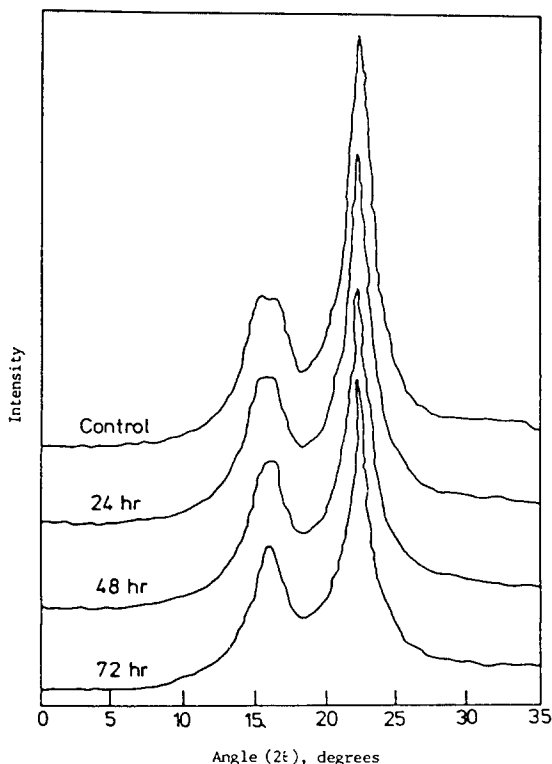


Fig. 6. The change of X-ray diffraction pattern of α -cellulose subjected to glass bead-milling up to 72 hr; without addition of cellulase in wet condition.

장시간 wet milling한 균의 X선회절모양이 분쇄마찰을 하지 않은 섬유소(control)와 큰 차이가 없는 것으로 보아 분쇄마찰매체에 의한 미세결정구조의 파괴는 적은 것으로 해석되며, 당화촉진은 분쇄작용에 의한 결정구조파괴가 아닌 다른 mechanism에 의한 것으로 판단된다. 섬유소 입자의 구조적 양상의 변화를 관찰코져 상기 실험에서 얻은 24hr시료를 선택하여 그 입자 구조를 현미경으로 관찰하였다 (Fig. 7).

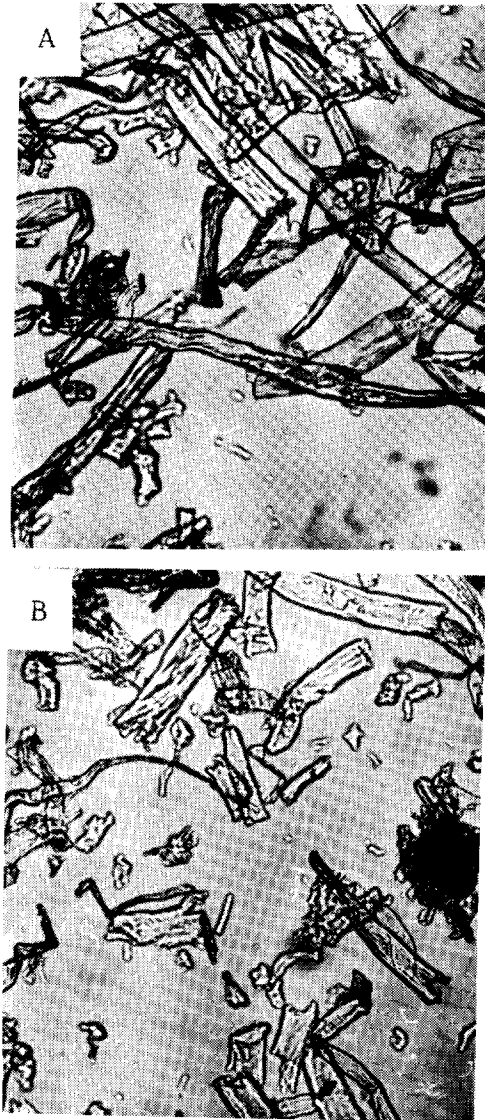


Fig. 7. Microscopic photograph of α -cellulose; original(A), and wet milled with glass bead for 24hr at 500rpm without addition of cellulase (B).

Fig.7 중 (A)균은 분쇄마찰매체로 전처리하지 않은 원래의 섬유소를 나타내며 (B)균은 유리구로 wet milling한 섬유소로서 긴 세상의 구조를 갖고 있는 원 섬유소 입자가 분쇄마찰매체에 의하여 단편적으로 파괴되어 fragmentation 되는 것을 볼 수 있다. 분쇄마찰매체는 섬유소의 미세결정구조에는 거의 영향을 미치지 않으나 섬유소를 단편적으로 fragmentation시켜 가용표면적을 증대시킬 수 있으며, 이 현상이 당화촉진효과와 밀접한 관련이 있지 않나 사료된다. 섬유소 입자의 fragmentation은 효소를 첨가한 당화시스템의 경우 효소에 의한 섬유소 입자의 침식작용과 매체의 분쇄마찰효과가 상호보완관계를 유지 크게 촉진되게 되며, 실제로 분쇄마찰매체 함유 반응계에서 섬유소-효소 현탁액은 colloid 상으로 분산됨이 관찰되었으며, 이와 같은 섬유소의 fragmentation에 의한 가용표면적의 증가가 중요한 효소당화 촉진 mechanism이라 유추된다.

섬유소 효소분해에 대한 Bioatrittor의 최적당화조건 검토

1. 최적교반강도의 조사.

적절한 교반강도를 결정하기 위하여 기질농도 5% (w/v), 유리구 첨가량 600g/l, 55°C로 고정된 bioatrittor의 교반속도를 200-700rpm 까지 변화시키면서 당화하여 생성환원당 농도의 변화를 Table 1(A)에 나타내었다.

교반속도가 500rpm 이하에서는 교반속도가 증가할수록 당화율이 증가하였으나, 일정 교반속도 (600rpm) 이상에서는 오히려 당화율이 감소하였다. 반응조내의 섬유소-효소-매체 혼합액의 유동패턴을 관찰하여 보면, 500rpm이하의 교반강도에서는 매체의 대부분이 반응조 저부에 가라앉은 상태에서 분쇄마찰작용을 하는 반면, 600rpm 이상에서는 매체가 혼합액중에 골고루 분산되어 같이 공회전하였다. 이와같은 유동패턴하에서는 분쇄마찰매체간의 충격, 마찰작용이 현저히 감소되며 원활한 효소당화 촉진효과를 줄 수 없게 된다. 적절한 유동패턴의 유지에 bioatrittor의 조작 및 설계에서 유의하여야 할 중요한 요소로서, 본 장치의 경우 최적 교반속도는 500rpm전후임을 알 수 있다.

2. 분쇄마찰매체 첨가량의 영향.

적정 유리구 첨가량을 조사하기 위하여 기질농도 5% 인 반응조에 섬유소와 유리구의 비율 1 : 10(500g/l), 1 : 12(600g/l), 1 : 14(700g/l)으로 변화시키면서 55°C, 500rpm에서 24시간 당화시킨 결과를 Table 1(B)에 나타내었다. 섬유소대 유리구의 무게 혼합비가 1 : 12인 600g/l를 반응조에 첨가했을때 가장 높은 당수율을 나타내고 있으며, 이 이상의 첨가량에서는 오히려 당수율이 감소하였다. 이는 한정된 용적을 갖는 반응기에서 유리

Table 1. Progress of hydrolysis of α -cellulose under the various operational and experimental conditions.

| | Reducing Sugar Concentration, g/L | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|
| | 4hr | 8hr | 12hr | 24hr |
| A. Agitation Speed | | | | |
| 200rpm | 12.5 | 18.5 | 21.5 | 24.5 |
| 300rpm | 17.0 | 25.5 | 30.0 | 34.5 |
| 400rpm | 21.0 | 30.0 | 34.5 | 36.5 |
| 500rpm | 25.0 | 33.5 | 41.0 | 44.0 |
| 600rpm | 24.0 | 32.0 | 40.0 | 42.5 |
| 700rpm | 15.5 | 22.5 | 25.0 | 29.5 |
| B. Amount of Glass Bead | | | | |
| 500g/L | 22.0 | 27.5 | 30.0 | 32.5 |
| 600g/L | 25.0 | 33.5 | 41.0 | 36.5 |
| 700g/L | 20.0 | 26.5 | 28.5 | 44.0 |
| 900g/L | 12.5 | 18.0 | 20.5 | 22.5 |
| C. Different Milling-Media | | | | |
| Glass Bead | 25.0 | 33.5 | 41.0 | 44.0 |
| Teflon | 21.0 | 28.5 | 33.0 | 39.0 |
| Polyacetal | 17.5 | 23.5 | 28.5 | 33.5 |
| D. Shape of Impeller | | | | |
| Standard | 25.0 | 33.5 | 41.0 | 44.0 |
| Twist | 18.5 | 28.5 | 34.5 | 39.5 |
| Rod | 17.5 | 26.5 | 32.0 | 37.0 |
| Sharp | 10.0 | 17.0 | 21.5 | 27.0 |
| E. Cellulose Concentration | | | | |
| 50g/L | 25.0 | 33.5 | 41.0 | 44.0 |
| 75g/L | 26.5 | 36.0 | 43.5 | 51.0 |
| 90g/L | 30.0 | 40.5 | 51.5 | 60.0 |
| F. Control Condition | | | | |
| | 11.0 | 16.0 | 19.5 | 23.0 |

Control condition; 50g cellulose/L, 500rpm, no bead, standard type impeller, 55°C, pH 4.8, 1L vessel.

구의 첨가량이 과다할 경우 섬유소 현탁액의 유동성과 유리구의 운동성이 감소하여 효과적인 분쇄마찰을 할 수 없는데 기인한다고 유추된다.

3. 분쇄마찰매체의 종류에 따른 영향.

교반시 소모되는 에너지는 비중이 큰 분쇄마찰매체에 의해 주로 결정됨으로 적절한 분쇄마찰매체의 선정은 중요하다. 본 실험에서는 분쇄마찰매체로서 유리구(비중 : 2.56)보다 비중이 적은 폴리아세탈(비중 : 1.43)이나 테프론(비중 : 2.17)을 유리구와 같은 부피로 첨가하

여 실험하였으며, 그 결과를 Table 1(C)에 나타내었다. 분쇄마찰매체의 비중이 클수록 우수한 당화 촉진효과를 주었다. 그러나 비중이 가벼운 폴리아세탈이나 테프론도 훌륭한 당화 촉진효과를 나타내었다. 위에서 실험한 매체 이외에도 교반에너지를 줄일 수 있는 적절한 분쇄마찰매체의 선정은 중요한 연구과제로서 이를 위한 동력소모와 당화촉진효과의 상관관계에 대한 정량적인 연구가 필요하다.

4. Impeller의 형태에 따른 영향.

Impeller의 형태는 동력소모와 현탁액의 교반양상에 큰 영향을 준다. Impeller의 모양을 Fig. 3에 도시한 바 있는 네가지로 변형시키면서 실험한 결과를 Table 1(D)에 나타내었다. Impeller의 회전방향과 90°를 이루고 있는 standard형(A) impeller가 가장 우수한 당화율을 나타내었으며, A형 impeller의 각도를 45°로 비스듬히 배치하여 부하되는 torque를 감소시킨 twist형 (B)도 rod형(D)과 더불어 우수한 당화촉진효과를 나타내었다. 이와같은 변형된 형태의 impeller는 torque부하 및 동력소모가 standard형에 비하여 적은 것으로 예상되며 적은 동력소모로 우수한 당화촉진효과를 얻을 수 있는 impeller의 형태로 사료된다.

5. 기질농도의 영향.

통상의 당화법에서는 과량의 기질을 첨가할 경우 유동성 수분의 부족에 의해 당화저해현상이 일어남으로서 섬유소당화가 저해를 받게 된다. 분쇄마찰매체 함유 반응계에서 기질농도 증가에 따른 당화저해 현상여부를 조사하기 위하여 유리구 첨가량을 600g/1로 고정하고 기질농도를 5%, 7.5%, 9%로 변화시키면서 24시간 당화하였으며, 그 결과를 Table 1(E)에 나타내었다.

75g/l, 90g/l와 같은 고농도에서도 당화의 가능성을 예시하고 있다. 그러나 당농도는 증가되었으나 당수율(degree of conversion)의 관점에서는 기질첨가량 50g/l에 비하여 다소 낮아 이에 대한 보완책이 필요하다.

Bioattor의 조작조건에 따른 Torque의 변화

1. 교반속도와 Initial Torque의 변화.

Fig. 8은 각종 교반속도하에서의 initial torque (A), 이를 앞에서 제시한 수식을 이용하여 power값으로 환산한 결과(B) 그리고 교반시 motor에 부하되는 power(C)를 나타낸다.

Initial torque는 200-500rpm 범위에서 직선관계가 아닌 exponential한 관계가 관찰되는 반면, 600rpm 이상에서는 큰 증가가 없었는데, 이는 앞에서 언급한 바 있는 반응조내의 현탁액의 flow behavior와 밀접한 관계가 있다. 즉 이 속도이상에서는 현탁액의 운동양상이 변하고 있음을 시사하고 있다. 500rpm에서 부하되는 torque 값을 앞에서 제시한 관계식을 적용, power로 환산하면 4.4 joule/sec (or watt)로 계산된다. 이는 motor에 부하되는 power를 측정하여 얻은 6watt와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 여기에서 motor에 부하되는 power는 실제 현탁액의 교반에 소요되는 power에서 motor 자체의 작동에 소요되는 기본 동력소모라 할 수 있는 0 rpm에서의 power를 감한 값을 말한다.

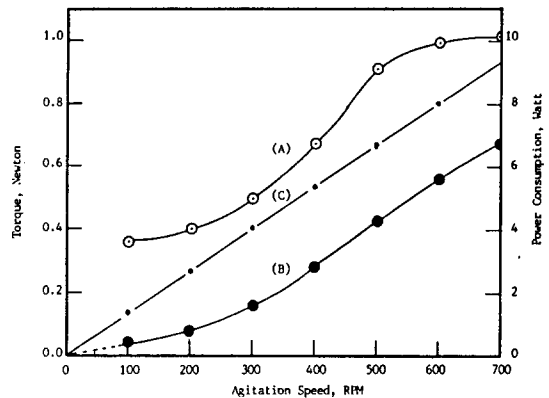


Fig. 8. The relationship between initial torque and agitation speed as rpm(A) and power consumed (B, C) for agitation of impeller of different speed.

○ initial torque

● power consumption calculated from initial torque

■ power consumption of motor

2. 분쇄마찰매체 첨가량 및 종류에 따른 Torque 변화.

분쇄마찰매체인 유리구의 첨가량을 변화시키면서 initial torque를 측정된 결과는 Table 2(B)와 같다. 유리구 첨가량이 증가할수록 initial torque가 증가하였다. 또한 분쇄마찰매체로서 유리구를 비중이 적은 teflon과 polyacetal로 대체할 경우의 initial torque를 측정된 결과는 Table 2(C)와 같다. 비중이 증가할수록 torque값이 증가하였으나, teflon의 torque값은 유리구와의 차이가 적은 반면, polyacetal은 상대적으로 매우 낮았다. 비중이 가장 적은 polyacetal은 torque부하가 적는데 비하여 비교적 당화촉진효과가 높아 훌륭한 매체이라 짐작된다.

3. Impeller의 형태와 Torque의 변화.

Impeller의 형태가 initial torque에 미치는 영향도 Table 2(D)에 표시하였다. Standard형(A) impeller의 경우 initial torque가 0.92 Newton으로 가장 높았으며, twist형(B), sharp형(C), rod형(D) impeller는 각각 0.58, 0.44, 0.42 Newton으로 상대적으로 낮았다. 주목할 만한 사실은 impeller를 45°로 부착한 twist형 (B)의 경우 standard형에 비하여 torque값은 0.58수준으로 낮은 반면 당화촉진효과는 Table 1(D)에서와 같이 큰 차이가 없어 적은 동력소모로 높은 당화촉진효과를 얻을 수 있는 효율성 높은 impeller로 사료된다.

Table 2. The initial torque, power, energy consumption for half saccharification of α -cellulose and energy required for production of 1g of glucose in bioatritor.

| | Initial torque (N) | T _{1/2} (hr) | Power (watt/L) | Energy (watt.h/L) | E/G (watt.h/g) |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| A. Agitation Speed | | | | | |
| 300rpm | 0.48 | 9.30 | 4.53 | 42.13 | 1.53 |
| 400rpm | 0.68 | 7.00 | 6.40 | 44.80 | 1.63 |
| 500rpm | 0.92 | 5.00 | 14.43 | 72.15 | 2.62 |
| 600rpm | 1.02 | 4.00 | 19.23 | 76.92 | 2.80 |
| B. Amount of Glass Bead | | | | | |
| 500g/L | 0.80 | 8.20 | 12.57 | 103.07 | 3.75 |
| 600g/L | 0.92 | 5.00 | 14.43 | 72.15 | 2.62 |
| 700g/L | 1.15 | 10.00 | 18.07 | 180.70 | 6.57 |
| C. Different Milling Media | | | | | |
| Glass Bead | 0.92 | 5.00 | 14.43 | 72.15 | 2.62 |
| Teflon | 0.82 | 7.20 | 12.87 | 92.66 | 3.37 |
| Polyacetal | 0.32 | 9.00 | 5.03 | 45.27 | 1.65 |
| D. Shape of Impeller | | | | | |
| Standard | 0.92 | 5.00 | 14.43 | 72.15 | 2.62 |
| Twist | 0.58 | 6.40 | 9.10 | 58.24 | 2.12 |
| Rod | 0.42 | 7.30 | 6.60 | 48.18 | 1.75 |
| Sharp | 0.44 | 24.30 | 6.91 | 439.27 | 15.97 |
| E. Cellulose Conc. | | | | | |
| 50g/L | 0.92 | 5.00 | 14.43 | 72.15 | 2.62 |
| 75g/L | 0.96 | 10.40 | 15.07 | 156.73 | 3.79 |
| 90g/L | 1.05 | 11.30 | 16.50 | 186.45 | 3.77 |
| F. Standard | | | | | |
| | 0.92 | 5.00 | 14.43 | 72.15 | 2.62 |

Standard hydrolysis condition; 50g cellulose/L, 500rpm, 600g glass bead/L, 3mm glass bead, standard type impeller, 55°C, pH 4.8, 1L vessel.

T_{1/2}; Half Saccharification Time, Energy; Energy Consumption for Half Digestion, E/G; Energy Required for Production of 1g of Glucose.

4. 섬유소 농도와 Torque의 변화.

섬유소 농도를 변화시키면서 initial torque를 측정하면 결과는 Table 2(E)와 같다. 섬유소 농도가 증가함에 따라 torque 값은 완만하게 증가하였으며, 이로 미루어 분쇄마찰매체 함유 반응기에서 부하되는 torque는 기질인 섬유소보다는 주로 비중이 무거운 분쇄마찰매체인 유리구에 의하여 형성됨을 알 수 있다. 섬유소 농도 증가시 torque 증가가 완만함은 적은 동력소모로 효율적 고농도 당화가 가능함을 예시하고 있다.

Bioatritor를 활용한 섬유소 효소당화의 경제성

Table 2는 initial torque 외에도 섬유소 첨가량의 반이 당화되는데 소요되는 시간, 부하되는 initial power, 그리고 섬유소 농도의 반이 당화되는 시간동안 교반에 소요되는 에너지 및 glucose 1g을 생성하는데 소요된 에너지 등을 요약하고 있다. 당 농도가 가장 높은 standard condition의 경우 glucose 1g을 생성하는데 소요된 에너지는 2.62 wath/g 이었다. 그러나 교반강도의 감소, 유리구보다 비중이 가벼운 polyacetal의 사용, impeller형태의

변화에 의하여 glucose 1g 생성시 소요되는 에너지를 감소시킬 수 있었다. 본 실험에 사용된 장치는 실험실적 규모로서 여기서 얻은 자료로 정확한 경제성을 평가 또는 예측하기는 어렵다. 뿐만 아니라 Table 2에서 제시된 energy consumption은 torque를 기준으로 환산한 결과이고 당화가 진행됨에 따라 torque값이 감소하므로 실제로 위의 수치보다 더 적은 energy가 소요된다. 또한 적절한 교반강도, 분쇄마찰매체의 선별, impeller의 형태개량등 장치 및 조작조건들은 energy consumption에 중요한 변수로 작용한다. 따라서 이와같은 조작조건을 보다 최적화하고 또한 장치를 scale-up할 경우 단위 용적당의 동력소모는 한층 감소될 것이다. 분쇄마찰매체의 교반에 소요되는 동력소모는 당화촉진효과의 증대에 따른 당화시간의 단축과 섬유소의 고효율 전환의 결과로 얻어지는 고농도 당화액의 확보등에 의하여 충분히 보상되리라 보며, 비록 연구가 더 필요하지만 경제적 전망은 밝다고 사료된다.

요 약

에너지소모를 최소화하고 최대의 당화효과를 얻을 수 있는 고효율 당화장치의 개발을 목표로 impeller교반형 bioattritor를 설계, 제작하여 불용성 섬유소를 기질로 실험하였다. Bioattritor의 효용성과 효소당화촉진 mechanism을 규명하였으며, 최적 운전조건을 검토하였다. 분쇄마찰매체함유 반응기에 일정한 탄성계수를 지닌 spiral spring coil을 내장한 torque측정장치를 개발, 부하되는 torque, power, 그리고 소요에너지를 측정하여 이를 당화촉진과 비교함으로써 bioattritor의 경제성을 검토하였다. 분쇄마찰매체함유 반응계를 이용한 섬유소효소당화에 있어 분쇄마찰매체의 첨가량 및 종류, impeller형태, 교반속도는 중요한 요소로서 작용하였다. 비록 더 연구가 필요하나 분쇄마찰매체의 교반에 소모되는 동력은 당화촉진효과의 증대에 따른 당화시간의 단축과 섬유소의 고효율전환에 따른 고농도당의 확보등에 의해 보상되리라 예상된다.

감 사

본 연구는 86-88년도 한국과학재단 목적기초연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이용현(1984), 유전공학, **4**, 12.
2. L.T.Fan, Y.H. Lee and D.H. Beardmore(1980), *Advances in Biochemical Engineering*, **14**, 101.
3. L.T.Fan, Y.H. Lee and D.H. Beardmore(1980), *Biotechnol. Bioeng.*, **22**, 177.
4. L.T.Fan, Y.H. Lee and M.M. Gharpuray(1982), *Advances in Biochemical Engineering*, **23**, 157.
5. R.G. Kelsey and F. Shafizadeh(1980), *Biotechnol. Bioeng.*, **22**, 1025.
6. M.G. Neilson, R.G. Kelsey and F. Shafizadeh(1982), *Biotechnol. Bioeng.*, **24**, 293.
7. S.K.Ryu and J.M. Lee(1983), *Biotechnol. Bioeng.*, **15**, 53.
8. E. O. Jones and J. M. Lee (1986), *Biotechnol. Bioeng.*, **31**, 35.
9. K. D. Oh and C. Kim (1987), *Korean J. of Chem. Eng.*, **4(2)**, 105.
10. Y.H. Lee(1985), *J. Natural Sciences of Kyungpook National University*, **3**, 115.
11. M. Mandels, R. Andreotti and C. Roche(1976), *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, **No. 5**, 21.
12. 이용현, 조구형(1986), 한국산업미생물학회지, **14(1)**, 29.
13. J.Y. Oldshue(1983), *Fluid Mixing Technology*, p 46. McGraw-Hill, New York.
14. O.H. Lowry, N.J. Rosebrough, A.L. Farr and R.J. Randall(1951), *J. Bio. Chem.*, **193**, 265.
15. G.L. Miller(1959), *Anal. Chem.*, **31**, 426.
16. Sigma Corporation(1984), *Sigma Diagnostics Glucose Procedure* No. 510.

(Received May 19, 1989)