

고체 발효를 이용한 생물전환기술

Bioconversion Technology Using Solid State Fermentation

이소영*, 임성일 | 전통식품연구단

So-Young Lee*, Sung-Il Lim | Traditional Food Research Group

서론

대부분의 화학 공정은 고온 고압에서 작용하는 화학촉매나 유기용매를 이용하는데, 화학촉매 공정의 최적화는 시간과 노력이 많이 소요되며 비용이 많이 들 뿐만 아니라 공정에 이용되는 출발물질과 중간 혹은 최종산물이 인간의 건강 및 환경에 위대한 영향을 끼치는 경우가 많다. 또한 에너지를 많이 사용하며 각종 부산물도 다량 발생시킨다. 이에 비해 미생물을 이용한 목적 물질의 생산은 에너지 소모가 적고, 환경 친화적이라는 장점이 있다. 때문에 미생물을 이용한 생물전환기술은 화학합성 기술의 대안으로 여겨지고 있다. 식품, 의약품, 화장품, 정밀 및 범용 화학제품에서부터 연료산업에 이르기까지 생물전환기술을 이용하여 생산되는 제품의 비중은 점차 증가하고 있는 추세로 2010년에는 약 10~20%, 2050년경에는 약 50%에 이를 것으로 전망되고 있다.

미생물을 이용해 물질을 합성하는 방법에는 액

침 배양(submerged fermentation, SmF)과 고체 배양(solid state fermentation, SSF)의 두 가지 타입이 있다. 1940년경 페닐실린 대량생산에 SmF를 이용한 이래로 대부분의 발효 공정이 SmF를 중심으로 발전해 오면서 SmF 시스템은 기술의 성숙화 단계를 지나 안정화 단계에 다다른 상태이기 때문에 이의 개선을 통한 생산능의 향상은 크게 기대하기 힘든 실정이다. 그러나 SSF 기술은 낮은 에너지 소모량과 높은 생산성에도 불구하고 대량화 및 표준화의 어려움으로 인해 발효 공학에서 무시되어 오다 최근 들어 다품목 소규모 생산의 필요성 대두, 농축산 부산물 및 폐기물, 음식물 쓰레기, 산업 폐기물 등과 같은 바이오매스로부터의 소재 개발 연구가 각광받게 되면서 다시금 주목받고 있는 기술이다. 또한 EVOP(evolutionary operation) 등과 같은 수학적 모델링 최적화 도구, 중간 생성물 및 생성량 예측을 가능하게 하는 metabolic flux analysis 기술, 고체 발효 최적화 균주개발을 가능하게 하는 미생물대사공학 기술, 다양한 디자인의 bioreactor

개발 등과 맞물려 진보하고 있는 배양 기술이다. 이에 본문에서는 바이오매스로부터 소재를 개발하는데 있어 중요한 기술인 SSF 시스템의 생물 발효 조와 활용방안에 대해 소개하고자 한다.

고체 발효 시스템이란

고체 발효(solid state fermentation, SSF)는 Aw 0.40~0.90 정도의 낮은 수분을 함유한 고체 매체에 접종한 미생물이 배지 표면에서 자란 후 점차 기질 내부 입자 사이의 공간을 통해 증식하면서 목적 물질을 생산하게 하는 형태의 발효 기술이다. SSF는 기질의 가격이 저렴할 뿐만 아니라 기질의 낮은 수분함량으로 인해 공정 중 잡균의 오염가능성이 낮고, 용적량이 많으며, 생성물의 추출 분리 시 SmF에 비해 적은 용매가 사용되어 폐용출수 처리 비용과 멸균 비용이 적다는 장점이 있다. 또한 배양 형태가 미생물이 자연적으로 서식하던 환경조건에 가깝기 때문에 생성량 자체나 생성물의 활성이 SmF에 비해 증가하는 경향이 있다. 반면에 낮은 수분 함량으로 인해 많은 대사열이 발생하며 기질 교환이 어려워 pH, 수분, 영양 조건의 변수 등을 조절하는데 어려움이 있다는 단점이 있다.

고체 배지 시스템에 영향을 미치는 요인

SSF 시스템 공정에 영향을 미치는 요인에는 기질, 초기습도, pH, 배지의 전처리, 상대습도, 배양 온도, 교환과 통기, 접종균의 나이와 크기, N, P 그

리고 미량원소들과 같은 영양성분의 보충, 추가 탄소원과 유도인자의 보충 등이 있다. 미생물의 성장은 산소와 이산화탄소의 확산과 효소, 영양소 및 대사산물의 전달에 크게 의존하게 되며, 이러한 물질 전달 현상은 발효 장치 안팎으로의 공기 bulk flow, 비강제 통기 중의 자연대류, 확산 및 전도, 발효장치 벽에서의 전도 및 강제 냉각, 발효장치 내의 교반으로 인한 전단력 효과에 영향을 받는다 (Fig. 1, 2).

기질

SSF 시스템은 농축산 부산물, 음식물 쓰레기, 축산 분뇨, 산업 폐기물 등과 같은 거의 모든 바이오매스를 기질로 사용할 수 있으며, 불활성 지지판에 영양성분을 주입하여 기질로 이용할 수도 있다. 그러나 주로 사용되는 기질은 농축산 부산물이 대부분이며, 이들은 starch, cellulose, lignocellulose, pectin 과 같이 polysaccharides 형태의 macromolecular 구조를 가지는 특징이 있다. 이런 polymer들을 효율적으로 사용하기 위해 grinding, chopping, 화학 및 효소적 가수분해를 통해 polymer의 크기를 줄이는 전처리를 실시하며, 균주의 성장을 위해 영양소를 첨가하고, pH와 수분 함량을 조절한 후 기질로써 이용한다.

균주

SSF 시스템은 기질의 수분 함량이 낮기 때문에 세균보다는 진균류인 곰팡이와 효모가 성장하기 적합한 형태의 발효 시스템이다. 특히 *Rhizopus* sp., *Neurospora* sp., *Penicillium* sp., *Aspergillus*

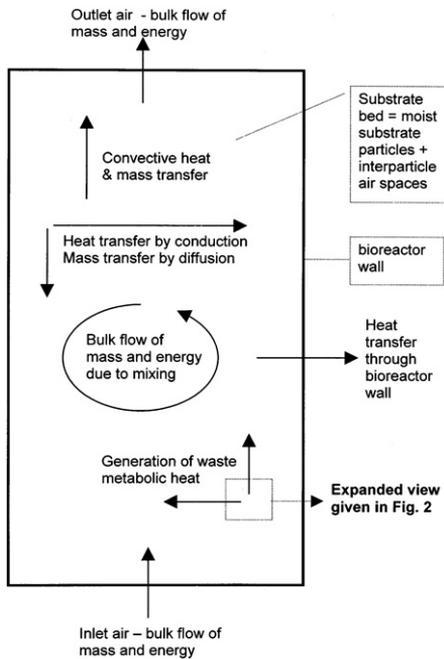


Fig. 1. Phenomena occurring at the macroscale during SSF within bioreactors

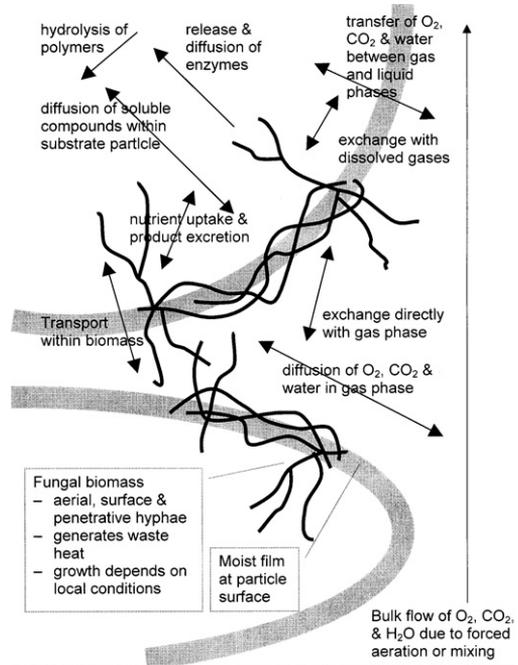


Fig. 2. Phenomena occurring at the microscale during SSF within bioreactors

sp., *Trichoderma* sp. 및 *Mucor* sp. 곰팡이 중에는 기질로 사용하는 바이오매스를 분해시킬 수 있는 cellulase, xylanase, pectinase 등과 같은 효소를 생산하는 종이 많으며, 그 외에도 식품 산업에 유용하게 이용될 수 있는 효소 및 향기 성분과 식품 및 의약품에 사용가능한 생리활성물질 그리고 농업계에 사용 가능한 살충물질을 생산하는 능력을 가진 균주가 많기 때문에 SSF 시스템에 적용시키기 유리한 것으로 알려져 있다. 반면, 생육하는데 높은 수분활성도를 요구하는 세균은 일반적으로 SSF 시스템에 부적합하다고 생각되어 왔으나 *Bacillus* sp., *Staphylococcus* sp., *Brevibacterium* sp. 등의 박테리아는 SSF 공정으로도 잘 관리되고 조작될 수 있음이 보고되고 있다. 현재까지는 SSF 시스템

에 이용할 수 있는 미생물이 주로 진균류에 치중되어 있어 이것이 SSF 시스템의 단점으로 작용하고 있기는 하지만, 최근 미생물대사공학을 이용하여 고체 발효에 적용이 가능한 미생물을 생산하기 위한 연구가 시행되어 일부 성과를 보이고 있기 때문에 기술적으로 해결 가능한 문제점이라 할 수 있다.

수분

수분 함량이 너무 높으면 고체 배지의 공극 사이에 물이 채워지게 되어 공기의 유입이 어려워 혐기 조건이 형성될 수 있으며, 수분 함량이 너무 낮으면 미생물의 성장이 저해될 수 있다. 고체 발효를

실시하기 위해서는 최하 12% 이상의 수분을 함유하고 있어야 하는데, 일반적으로 SSF 시스템에서 수분은 30~85%로 매우 넓은 범위를 보인다. 균주별로는 진균류의 경우 20~70% 정도, 세균의 경우 70% 이상의 수분 함량을 필요로 한다. 따라서 균주의 특징과 기질의 입자 특성에 부합하도록 교반과 통기를 통해서 기질 입자 간의 산소 전달을 촉진하고 수분 함량을 조절해야 한다.

pH

진균의 경우 pH 2~9의 넓은 범위에서 배양이 가능하나 최적 범위는 곰팡이 3.8~6.0, 효모 4~5이다. 이 범위의 pH에서는 세균에 의한 오염이 억제되기 때문에 진균류를 이용한 발효일 경우 공정 관리가 쉬울 수 있다. 배양기간 동안 pH를 조절하기 위해 질소원을 공급하거나, 완충작용이 있는 물질을 기질과 함께 공급하기도 한다.

온도

발효 초기에는 고체 배지 층의 온도와 산소농도가 균일하나 발효가 진행되면 균체가 성장하면서 대사열을 발생하게 된다. 이와 더불어 고체 기질의 공극이 감소되어 열전달이 방해받게 되면서 고체 배지 층에 온도 구배가 형성되게 된다. SSF 시스템에 주로 이용하는 균주들이 20~50℃의 온도에서 생육 가능한 mesophilic microbial strains이기는 하나, 배양기간 동안의 온도 상승은 미생물 성장 및 생성물 형성에 큰 영향을 미치게 되므로 대사열의 제어는 SSF 시스템 공정 관리의 핵심이라 할 수 있다. 전통적으로 고체 배양장치에서의 온도 조절

은 통기 속도를 변화시켜 수행하는데, 온도가 낮으면 통기 속도를 감소시켜(이때 미생물의 산소 요구 최소량은 유지) 미생물의 호흡에 의한 온도 상승을 유도한다. 반면, 온도가 너무 높게 되면 통기량을 증가시켜 기질의 온도를 낮추면서 온도를 조절한다.

산소

고체 표면은 전달저항이 크기 때문에 고체 기질 내부로의 산소 반응 속도가 급격하게 감소하게 되므로, 고체 발효에서는 영양소보다 산소농도가 세포 성장을 제한하게 된다. 산소 전달은 고체 기질의 공극에서 일어나게 되므로 산소의 공급은 기질의 특성과 수분 함량에 영향을 받게 된다. 일반적으로 공극 부피가 크고 수분 함량이 낮을수록 세포 성장에 필요한 산소 전달이 용이한 것으로 알려져 있다.

고체 발효 생물반응기의 종류와 특징

고체 배양 공정은 회분식, 유가식, 연속식으로 운전할 수 있으며 대부분 회분식으로 수행되고 있다. 일반적으로 고체 배양장치에는 상자형 배양장치(tray bioreactor), 충전층 배양장치(packed bed bioreactor), 회전 드럼 배양장치(rotating drum bioreactor), 기체·고체 유동층 배양장치(gas-solid fluidized bed bioreactor), 교반 통기식 배양장치(stirred aerated bed bioreactor), 진동 드럼 배양장치(rocking drum bioreactor)가 있다.

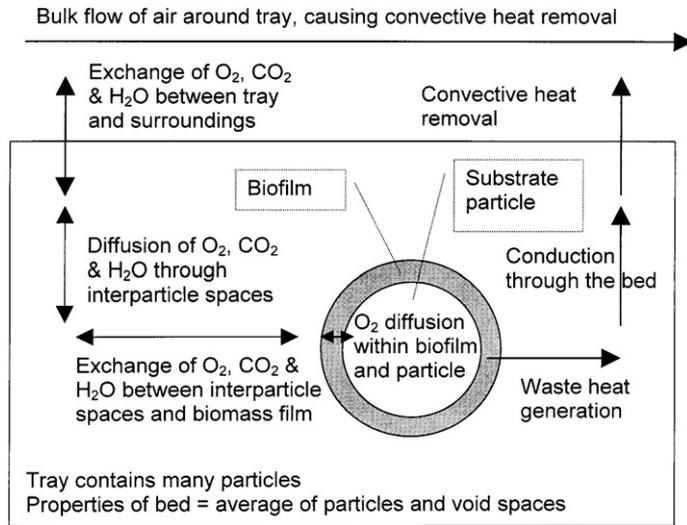


Fig. 3. The mass and heat transfer phenomena occurring in trays. Not all models consider all steps. The assumption of a biofilm at the surface is more appropriate for the growth of a unicellular microorganism than for a fungus.

Tray Bioreactor

이 반응기는 설계에 있어 아주 간단하며 무리한 통기나 혼합 장치가 없으나 적은 양의 발효만이 가능하다(Fig. 3). 그 이유는 통기를 유지하고 과열을 막기 위하여 얇은 층들을 사용하기 때문이다. 통기를 위하여 각 tray 아래쪽은 구멍이 뚫려 있고 tray 들은 차곡차곡 쌓여있다. 온도와 상대습도만이 조절할 수 있는 외부의 매개변수이다. 넓은 작업 공간이 필요하며, 노동 집약적이고 기계적으로 취급하기가 어렵기 때문에 tray 발효기는 많은 양의 생산에는 부적합하다.

Packed Bed Bioreactor

칼럼형 반응기로서 칼럼은 유리 및 플라스틱으

로 되어 있고 고체 기질은 통기를 위한 다공형 저부에 의해 지지된다(Fig. 4). 이 반응기의 단점은 생성물을 꺼내기가 힘들고, 불균일한 성장의 문제가 있으며 열 제거가 어렵다는 점인데 이를 개선한 형태가 zymotis packed bed bioreactor이다. Zymotis packed bed bioreactor 반응기는 열 제거 등이 용이하여 제품 개발에 효과적으로 쓰이고 있는데 주로 효소, 유기산 및 2차 대사물 생산에 사용되고 있다. 공업적으로 사용 시 발효 온도 조절은 칼럼 내부 사이에 존재하는 plate를 통해 가능하다.

Drum Bioreactor

드럼 반응기는 점종물이나 생성물에 손상 없이 적당한 통기와 혼합작용을 하도록 설계되었다. 혼합과 통기를 하는 방법으로는 용기 전체를 회전시

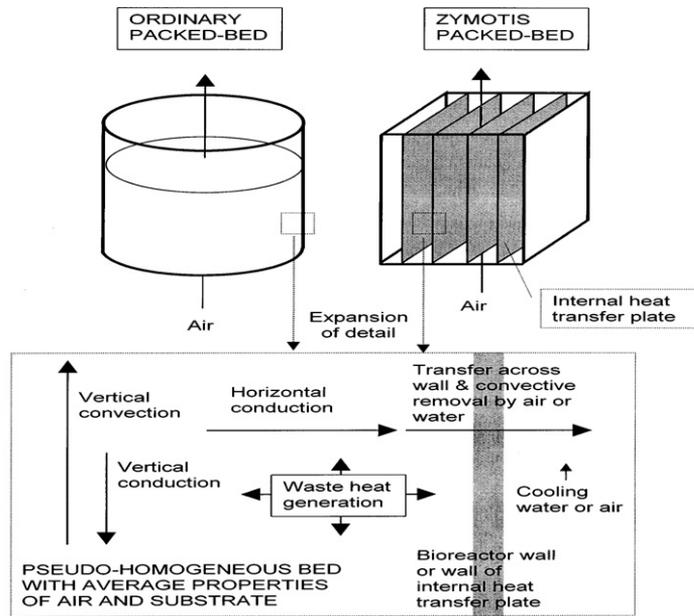


Fig. 4. The mass and heat transfer phenomena occurring in packed-beds. Both ordinary and zymotis packed-beds are shown.

키거나 패들과 배플과 같은 혼합 장치를 사용한다 (Fig. 5). 회전과 혼합작용을 계속하거나 주기적으로 하여 표면 질량 열전도와 영양소가 고르게 분포 되도록 한다. 드럼 바이오 반응기 내의 점증물의 성장은 tray 반응기보다 원활하며 균일하다. 그러나 드럼 반응기나 혼합 반응기 내의 혼합작용에 의한 전단력의 증가로 균 배양물이 손상을 입는 경향이 있으므로 생성물 수율을 최대화하기 위해 절충이 필요하다. 공기는 입구를 통하여 공급하며 잉여분은 출구로 배출된다. 드럼 반응기에서는 온도 조절이 힘든데 이는 쉬는 작용 및 미생물 성장 시의 고온 발열 때문으로, 최적 온도를 초과하면 생산물 형성에 지장이 있다. 또한 대량 생산을 위한 드럼 반응기를 사용하는 데는 공정상의 취급 및 처리에 문제가 있다.

Gas-solid Fluidized Bed Bioreactor

유동층 발효기에서는 고체 기질이 상층으로의 강제통풍에 의해 유동 상태를 유지하는데, 기질이 가루이기 때문에 표면적이 넓어 미생물의 생장이 용이하다(Fig. 6). 기질과 발효기 내부의 조건을 거의 일정하게 유지할 수 있고, 물, 영양분, 산, 알칼리 등의 공급과 pH 조절이 쉬우며, 발생열과 이산화탄소 제거 및 산소 공급이 쉬워 생산성이 높게 나타난다.

고체 배양장치의 계측 및 제어

고체 배양장치에서 제어 시스템의 주목적은 미

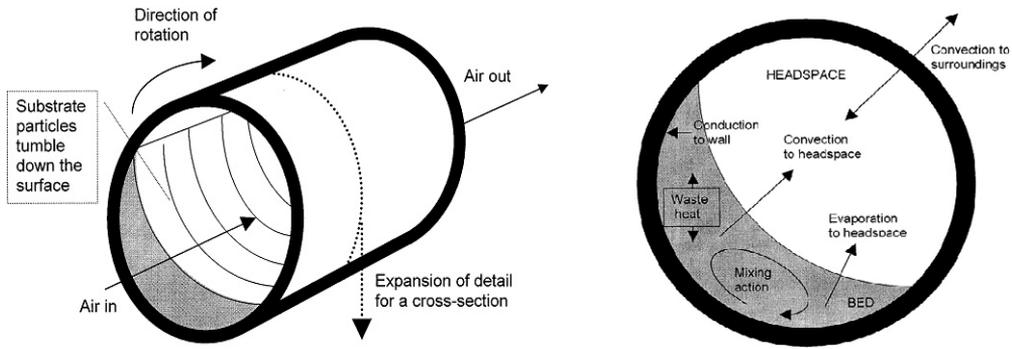


Fig. 5. The mass and heat transfer phenomena occurring in rotating drum bioreactors. The bioreactor can be rotated either continuously or intermittently. During the static periods, the mass and heat transfer phenomena are similar to those shown for trays in Fig. 2.

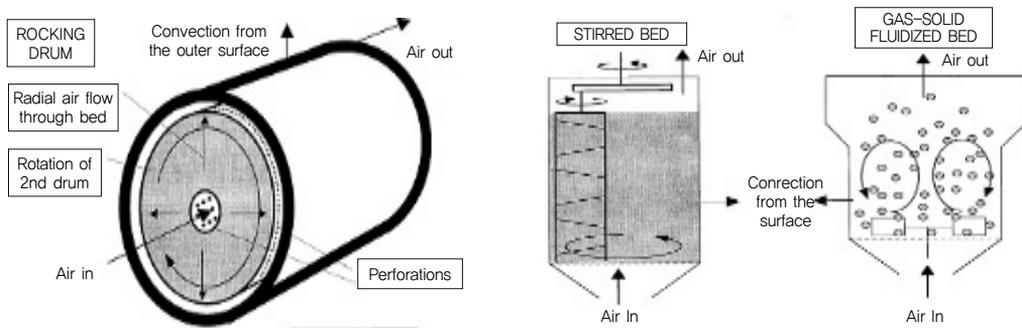


Fig. 6. Bioreactors with mixing and forced aeration : the rocking drum, the stirred bed and the gas–solid fluidized bed. Within the substrate bed and the most important processes in the energy balance are waste heat generation, convective heat removal and evaporation of water into the flowing air stream. Perfect mixing of the bed is usually assumed. Note that stirred–beds are often operated with only intermittent mixing, and in this case they behave like packed–beds during the static periods.

생물 성장과 생성물 형성의 최적온도조건 및 수분 함량을 제어하는 것이다. 이러한 목적 달성을 위해 온도, 유입 공기의 유량 및 습도와 교반조건(교반 주기 및 강도) 등의 운전 변수를 조절할 수 있다.

온도, 유출 공기 중의 산소 및 이산화탄소 농도의 계측 및 제어

이들 상태 변수는 온라인 측정이 가능하다. 열전대를 발효 장치의 여러 곳에 설치하여 실시간 온도 측정이 가능하며 기체 분석은 산소 분석기와 이산화탄소 분석기를 사용하고 휘발성 생성물의 경우에는 기체크로마토그래피가 이용된다.

수분 및 pH의 측정

수분 측정은 진공건조기, 수분방출분석기, Karl Fischer 적정법, 기체크로마토그래피, 적외선 분석법 및 핵자기 공명법 등으로 수행할 수 있으며 가장 간편한 진공건조기를 이용하는 방법이 일반적이다. 고체 기질 층의 수분활성도 측정은 습도계를 이용한다. pH의 측정은 끝이 납작한 전극으로 고체 표면의 pH를 직접 측정하거나 고체 시료를 분산시킨 용액 또는 추출액의 pH를 측정한다.

균체량 측정

균체량의 측정은 매우 중요한 변수임에도 불구하고 온라인 측정법은 개발되어 있지 않다. 오프라인 측정법으로는 고체 기질로부터 분리하여 측정하거나 분리하지 않고 균체 성분이나 대사산물을 측정할 수 있다. 단세포 미생물의 경우에는 기질로

부터 세척하여 생균수를 측정할 수 있다. 균체량을 측정하는 또 다른 방법은 대사활성도를 측정하는 것으로, 대사활성도(metabolic activity)를 측정할 수 있는 간접적인 방법으로는 미생물 성장에 따른 산소 소비량과 이산화탄소 배출량을 측정하는 것이다.

활용방안

SSF 시스템은 전통적으로 식품산업에 이용되어 왔으며, 그 밖에 효소, 항생제, 2차 대사산물, 유기산의 제조에 이용되어 왔다. 최근 들어서는 전통적으로 이용되어온 이들 분야에서 뿐만 아니라 바이오매스의 사료 및 비료화, 농축산업을 비롯한 다양한 분야에서 배출되는 산업 폐기물의 bioremediation에 이용할 수 있는 기술로써 각광받고 있으며, 전 세계적으로 관심을 가지고 연구를 진행 중인 biofuel 생산에도 필요한 기술이다. 특히 바이오매스의 구성성분을 특이적으로 잘 분해하는 미생물을 분리하고 개발하여 SSF 시스템에 적용하면 biofuel 제조 공정이 더 간단해질 수 있기 때문에 SSF 시스템을 이용하고자 하는 시도가 증가하고 있다. 그 외에도 생리활성성분을 함유하고 있는 다양한 농산물 원료에 SSF 시스템을 적용하여 생리활성성분을 증대시키고, 새로운 신규대사물질을 얻고자 하는 연구가 시행되고 있는데, 특히 한의학계에서는 한약재의 효능 증대 및 약재에 포함된 독성 물질과 농약을 detoxification하기 위한 방법으로 SSF 시스템을 도입하고 있다. 활용방안 중에서 전통적으로 SSF 시스템이 많이 도입된 분야에 대해서는 간단히 언급하고(Table 1), 최근 주목받고 있는 활용방안에 대해 자세히 설명하고자 한다.

SSF 시스템의 전통적인 활용분야

SSF의 시스템은 과거에는 주로 아시아권의 발효 식품제조 공정에 이용되어 왔는데, 대표적인 예로 *Aspergillus oryzae*를 쌀에 접종하여 koji를 제조하는 기술을 들 수 있으며, 그 밖에 치즈나 술, 간장, 양조식초 등의 발효 양조산업은 SSF를 식품산업에 응용한 대표적인 예이다. 그 외에도 식품 산업에

이용되는 amylase, lipase, cellulase, pectinase 등과 같은 효소생산에서도 SmF 시스템에서 보다 높은 생산성을 보여 산업적으로 많이 이용되고 있다. 그 외에 3-methylbutanol과 acetaldehyde와 같은 향료나 citric acid, lactic acid 같은 유기산 그리고 항생제를 비롯한 2차대사산물 등의 생산에도 이용되고 있다(Table 1).

Table 1. Application of solid state fermentation on natural substrates

	Product	Microorganisms	Materials	
Food	Natto	<i>Bacillus natto</i>	Soybean	
	Tempeh	<i>Rhizopus oligosporus</i>	Soybean	
	Tape	<i>Amylomyces rouxii</i> , <i>Rhizobium chinensis</i>	Rice, cassava, maize	
	Ontjom	<i>Neurospora sitophila</i>	Peanut meal	
	Cheese	<i>Penicillium roqueforti</i>	Milk curd	
	Bread dough, Koji	<i>Sacchromyces cerevisiae</i> , <i>Lactobacillus sanfrancisco</i>	Wheat powder	
	Sake, shochu	<i>A. oryzae</i> , <i>A. kawachii</i>	Rice, barley	
	Soy sauce	<i>Aspergillus sojae</i>	Soybean, wheat	
	Miso	<i>A. oryzae</i>	Soybean, rice	
	Shaohsing wine	<i>Rhizopus</i> sp., <i>Mucor</i> sp.	Wheat(rice)	
	Kaoliang liquor	<i>Rhizopus</i> sp., <i>Mucor</i> sp.	Sorghum	
	Ragi	<i>Rhizopus</i> sp., <i>Saccharomycopsis</i> sp.	Rice	
	SCP	Many yeasts and molds	Starchy or cellulosic biomass	
	Enzyme	α - amylase	<i>Aspergillus oryzae</i> , <i>Rhizopus</i> sp., <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Bacillus</i> sp.	Wheat bran, cassava
		Glucoamylase	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus</i> sp., <i>Rhizopus</i> sp.	Cassava, wheat bran, corn
Cellulase		<i>Trichoderma reesei</i> , <i>A. niger</i> , <i>Penicillium</i> sp.,	Beet pulp, cellulosic biomass	
Xylanase		<i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Thermoascus lanuginos</i>	Wheat bran, jute fiber	
Pectinase		<i>Talaromyces flavus</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. carbanerius</i>	Fruit pomace, wheat bran,	
Glucose oxidase		<i>Penicillium notatum</i> , <i>Penicillium</i> sp.		
β - Galactosidase		<i>Kluyveromyces latis</i>	Whey* corn or wheat bran	
Protease		<i>Penicillium caseicolum</i> , <i>Mortierella renispora</i> , <i>A. oryzae</i> , <i>A. niger</i>	Wheat bran, dried skim milk	
Rennin		<i>Mucor pusillus</i> , <i>Mucor miehei</i>	Wheat bran	
Organic acid		Citric acid	<i>A. niger</i>	Sugarcane bagasse, fruit pomace, wheat bran
	Lactic acid	<i>Lactobacillus</i> sp., <i>Rhizopus oryzae</i>	Sweet sorghum, sugarcane bagasse* glucose	
Antibiotics	Gibberellic acid	<i>Gibberella fujikuroi</i>	Wheat bran	
	Red pigment	<i>Monascus anka</i>	Rice, bread flake	
	Penicillin	<i>Penicillium chrysogenum</i>	Sugarcane bagasse	
	Tetracycline	<i>Streptomyces viridifaciens</i>	Sweet potato residue	
	Cephalosporins	<i>Cephalosporium acremonium</i>	Barley	
	Iturin, surfactin	<i>Bacillus subtilis</i>	Soybean curd residue	

산업 폐기물 및 독성물질의 Bioremediation

Bioremediation이란 생물학적으로 유해한 유기화합물을 무해한 물질로 변화시키고, 유해한 무기물은 구조를 단순화하여 안전한 물질로 변화시켜 환경을 정화하는 방법인데, 농축산 폐기물이나 여러 산업현장에서 발생하는 유해한 바이오매스의 bioremediation에 가장 효율적인 방법으로 SSF 시스템이 주목받고 있다. DDT(dichloro diphenyl trichloroethane)에 오염된 토양을 *Bacillus* sp.와 *Pseudomonas* sp. 균주로 SSF 배양하였을 때, DDT가 분해되었다는 보고가 있으며, 곰팡이인 *Phanerochaete chrysosporium*을 이용하여 PAHs, PCBs, DDT, lindane, chlordane 등으로 오염된 토양을 bioremediation하는데 SSF 시스템을 적용한 연구가 보고되었다. 그 밖에 *Dichomitus squalens*, *Pleurotus* sp. 등의 곰팡이는 SSF 배양을 통해 토양에 오염된 pyrene을 분해하는 것으로 보고된 바 있다.

농산 폐기물의 Detoxification

농산 폐기물은 비료나 사료 등으로 재이용이 가능한데, 특정 농산 폐기물에는 hydrogen cyanide(HCN), caffeine, tannins, polyphenol 등과 같은 toxic compound가 있어 농산 폐기물의 재활용을 어렵게 하는 요인으로 작용하고 있다. 이러한 농산 폐기물에 SSF 시스템을 도입할 경우, toxic compound를 제거할 수 있는데, *Rhizopus* sp., *Aspergillus* sp., *Phanerochaete chrysosporium*을 이용한 SSF 공정을 통해 cassava peels, coffee husk, coffee pulp 등에 존재하는 HCN, soluble tannins, caffeine을 40~90% 가량 감소시킨 연구가

보고된 바 있다.

생물 비료 및 사료의 생산

사료, 퇴비, 생물 비료, 생물 촉진제 및 생물 농약으로의 농업 부산물 및 축산분뇨의 순환은 농축 산업에서 발생하는 부산물 관리의 중요한 부분이다. SSF는 특정 농업 부산물 및 축산분뇨에 적합한 미생물종을 이용하여 이 잔사들을 토양의 생산성 및 부식도 생성 능력을 회복시키는데 필요한 생물 비료 및 농약으로 이용할 수 있다.

또한 농산 부산물에 포함된 전분, cellulose, hemicellulose 등의 성분을 SSF 시스템으로 부분 분해하여 사료화시킬 수 있는데, 이때 미생물에 의해 생성된 효소를 그대로 사료에 잔류시킴으로써 가축의 소화 흡수를 높일 수 있는 사료를 만들 수 있다. 이용할 수 있는 미생물로는 *Bacillus* 속과 *Aspergillus* 속 균주가 있으며, packed-bed 또는 rotary drum type의 bioreactor가 주로 이용된다.

Biofuel 생산

Biofuel은 자연계에 있는 바이오매스로부터 만들어지는 지속 가능한 에너지원을 말하며, bioethanol, biodiesel, biomethane의 세 가지 타입이 있다. SSF 시스템은 주로 bioethanol과 biodiesel 생산에 이용되고 있으나, 음식물 쓰레기 및 가축분뇨를 바이오매스로 이용할 경우에는 biomethane도 생성할 수 있다. 일반적인 biofuel의 생산 공정에는 전처리 및 당화 공정이 포함되어 있다. 현재는 주로 산, 알카리, 효소 처리를 통해 바이오매스를 당화시키고 있는데, 효소처리의 경우 경제성 있는 당화 효

을 얻기 위해서는 효소의 작용이 용이하도록 바이오매스를 물리적, 화학적, 미생물학적 방법을 이용하여 전처리하는 과정이 필요하며, 효소가 고가라는 문제점이 있다. 그리고 산 및 알칼리 처리의 경우는 목적물질 이외의 부산물이 많이 생성되며, 폐액처리에 따른 추가 공정이 발생할 수 있고 환경오염을 유발하기 쉽다는 문제점이 있다. 그러나 SSF 시스템을 이용하여 바이오매스에 균주를 직접 처리하거나, 효소와 균주를 함께 처리하면 이러한 전처리 및 당화 공정을 제거, 축소할 수 있기 때문에 공정이 단순해지고 시간이 절약되어 비용이 절감될 뿐만 아니라 환경오염문제를 유발하지 않아 친환경적으로 바이오연료를 생산할 수 있다. 또한 바이오에탄올 생산 후 남은 잔사에는 단백질과 조지방이 그대로 남아 있기 때문에 가축사료로도 이용할 수 있다. 이용 가능한 균주는 biofuel의 원료가 되는 바이오매스의 종류에 따라 다른데, 사탕무, 사탕수수 등의 당질계 원료는 주로 *Sacchromyces cerevisiae*를, 전분질계 원료의 경우 *Schwanniomyces castellii*를 사용하여 bioethanol을 제조할 수 있다. 셀룰로오스계 원료는 cellulase와 *Sacchromyces cerevisiae*를 함께 사용하여 제조하거나 전처리 단계에 *Trichoderma* sp.를 사용하여 bioethanol을 생산하는 방법이 보고된 바 있다. 그러나 아직까지는 이용 가능한 미생물군이 상당히 제한적이기 때문에 유전자 조작을 통해 바이오매스에 직접 작용하면서 biodiesel이나 bioethanol을 생산할 수 있는 균주를 개발하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

생물 전환을 통한 생리활성물질 생산

농산물 원료를 대상으로 발효를 진행하게 되면

분자구조가 작아져 target 기관으로의 흡수가 용이해지며, 새로운 물질이 생성됨에 따라 영양성분이나 기타 생리활성물질들이 더욱 풍부해지는 경향이 있다. 또한 앞서 언급한 바와 마찬가지로 발효를 진행하게 되면 농산물 내부에 존재할 수 있는 배당체나 외부에서 유래된 농약 등의 독성물질이 미생물에 의해 분해되는 detoxification 현상이 관찰되기도 한다. 때문에 생리활성성분을 함유하고 있는 다양한 농산물 원료를 발효 처리하여 생리활성성분을 강화시키거나 새로운 신규대사물질을 얻고자 하는 연구가 주목을 받고 있다. 특히 SSF 시스템은 농산물 원료를 추출하거나 현탁하여 발효를 진행해야 하는 SmF와는 달리, 농산물 원료를 온전히 기질로 이용할 수 있기 때문에 고농도의 최종 산물을 얻을 수 있어 생물전환을 통한 생리활성물질 생산에 적합한 기술이라 할 수 있다. 이러한 SSF 시스템에 사용하는 균주는 주로 생물전환능력이 뛰어나면서 균체 자체도 생리활성물질을 생산하는 버섯 균사체나 *Aspergillus* sp. 균주들이 이용되고 있는데, *Phellinus baumii*(장수상황버섯)를 이용하여 골쇄보, 천련자, 도엽, 외송 등의 한약재를 고체 발효하자 트롬빈 저해 활성이 발효 전에 비해 증가하였다는 연구가 보고된 바 있다. 또한 수삼을 영지버섯, 노루궁뎅이버섯과 상황버섯 균사체를 이용하여 고체 발효시킨 결과, 그 열수 추출물의 비장세포 증식활성, IL-2 생성능 및 마크로파지 활성이 발효 전 수삼에 비해 증가되는 등 생리활성물질의 생물전환에 있어 SSF 시스템이 유용한 기술임이 보고되고 있다(Fig. 7).

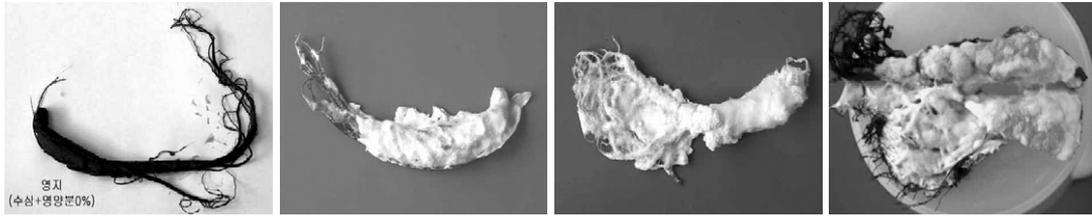


Fig. 7. Mycelia growth of the fermented Korean ginseng with *G.lucidum*, *H. erinaceum*, *P. linteus*. (a) No nutrient(no growth), (b) The fermented Korean ginseng with *G. lucidum* mycelium, (c) The fermented Korean ginseng with *H. erinaceum* mycelium, (d) The fermented Korean ginseng with *P. linteus* mycelium.

결론

SSF 시스템은 SmF에 비해 생산성이 높고 에너지 소모 및 운전비용이 적은 생물전환기술이지만 시스템에 적용 가능한 균주의 제한성과 대량화의 어려움으로 인해 산업분야에서의 이용이 많지 않았다. 그러나 미생물대사공학의 발전과 생물반응기에 대한 수학적 모델링 개발, 다양한 디자인의 bioreactor 개발로 인해 SSF 시스템은 상업적 규모로 이용할 수 있을 정도로 scale-up 되고 있다. 또한 오염과 에너지 소모는 적고 생산효율이 높은 청정기술과 자원의 재활용에 대한 관심이 높아짐에 따라 생물전환기술로 SSF 시스템을 이용하고자 하는 시도가 증가하고 있다. 때문에 대단위 공정에서 냉각 및 열전도 조건만 좀 더 쉽게 조절할 수 있게 되면 SSF 시스템은 더욱 매력적이고 실용적인 생물전환기술이 될 것으로 생각된다. 특히 생리활성 성분을 함유하고 있는 다양한 농산물 원료에 SSF 시스템을 적용하여 생리활성성분을 증대시키고, 새로운 신규대사물질 생산하는 연구에 이용할 수 있는 가능성이 충분하기 때문에 농산물의 고부가가치 창출에 크게 기여할 수 있을 것이다. 또한

우리나라와 같이 사료용 곡물과 원유를 거의 전량 수입하는 나라에서는 이 기술을 발전시켜 벼, 밀, 보리, 짚, 콩, 깨 등의 국내 농산물 폐기물로부터 고단백질 사료나 bioethanol 같은 에너지원을 공급 받는다면, 농산물 폐기물의 고부가가치화와 자원의 재활용이라는 두 가지 이점을 동시에 얻게 될 것이다.

● 참고문헌 ●

1. Singhania RR, Patel AK, Soccol CR, Pandey A, Recent advances in solid-state fermentation, *Biochem Eng J*, 44(1), 13-18, 2009
2. Mitchell DA, Cunha LEN, Machado AVL, A model-based investigation of the potential advantages of multi-layer packed beds in solid-state fermentation, 48(2), 195-203, 2010
3. Yu J, Tan T, Ethanol production by solid state fermentation of sweet sorghum using thermotolerant yeast strain, *Fuel processing technology*, 89, 1056-1059, 2008
4. Park CK, Kim H, Tu Q, Yu KW, Jeong HS, Lee

- HY, Jeong JH, Chemical composition and immunostimulating activity of the fermented korean ginseng with mushroom mycelium by solid culture, *J Korean Soc Food Sci Nutr*, **38**(9), 1145-1152, 2009
5. Krishna C, Solid-state fermentation system, *Crit Rev Biotechnol*, **25**(1), 1-30, 2005
 6. Prabhakar A, Krishnaiah K, Janaun J, Bono A, An overview of engineering aspects of solid state fermentation, *Malays J*, **1**(2), 10-16, 2005
 7. Lee SG, Park SG, Industrial biotechnology : Bioconversion of biomass to fuel, chemical feedstock and polymers, *Korean Chem Eng Res*, **44**(1), 23-34, 2006
 8. Michell DA, Krieger N, Stuart DM, Pandey A, New developments in solid-state fermentation II. Rational approaches to the design, operation and scale-up of bioreactors, *Process Biochem*, **35**, 1211-1225, 2000
 9. Pandey A, Soccol CR, Mitchell D, New developments in solid state fermentation : I-bioprocesses and products, *Process Biochem*, **35**, 1153-1169, 2000
 10. Pandey A, Solid-state fermentation, *Biochem Eng J*, **13**, 81-84, 2003
 11. Couto SR, Sanroman MA, Application of solid-state fermentation to food industry-A review, *J Food Process Eng*, **76**, 291-302, 2006
 12. Ventura J, Gutiérrez-Sánchez G, Fungal cultures of tar bush and creosote bush for production of two phenolic antioxidants (pyrocatechol and gallic acid), *Folia Microbiol (Praha)*, **54**(3), 199-203, 2009
 13. Aguilar C, Carbo AA, Avila CM, Fungal production of an ellagitannin-derived antioxidant phenolic by solid-state fermentation, *N Biotechnol*, **25**, 68, 2009
 14. Vadiveloo J, Nurfariza B, Fadel JG, Nutritional improvement of rice husks, *Anim Feed Sci Technol*, **151**(3/4), 299-305, 2009
 15. Rossi SC, Vandenberghe LPS, Pereira BMP, Improving fruity aroma production by fungi in SSF using citric pulp, *Food Res Int*, **42**(40), 484-486, 2009

이 소 영 공학박사

소 속 : 한국식품연구원 전통식품연구단

전문분야 : 발효미생물, 생리활성평가

E-mail : sylee09@kfri.re.kr

T E L : 031-780-9348