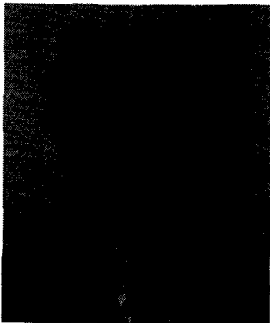


I. 서론

주정을 이용한 대체 에너지 개발방향



신 평 균

(KIST 환경연구센터 공학박사)

1970년대에 발생한 두차례의 원유가 파동은 그 때까지 주 에너지원으로 사용되어 온 석유에 대한 에너지원으로서의 위기를 유발하였고 그로 인해 석유를 대체할 수 있는 대체에너지원의 개발이 활발히 진행되기 시작하였다. 그러나 이러한 대체에너지원의 개발은 생산원가의 측면에서 석유의 생산원가에 비해 아직은 높기 때문에 유가의 변동에 크게 좌우되어 그 진척이 미진한 상태에 머무르고 있다. 그럼에도 대체에너지를 위한 연구가 계속되고 있는 것은 석유자원의 유한성과 화석 에너지를 사용함에 따른 이산화탄소의 발생으로 지구의 온난화 현상에 대한 우려가 증가하여 대체에너지원에 대한 관심이 끊이지 않기 때문이다.

대체에너지는 그 에너지원이나 생산된 에너지의 유형에 따라 표1과 같이 분류된다. 주정으로부터 미생물을 이용하여 발효에 의해 생산할 수 있는 대체에너지는 가스연료인 메탄으로 산업용 연료로 이용이 가능하고 액체 연료로는 수송용으로 이용하는 에탄올, 부탄올 등의 알콜류가 있다. 이들중 메탄은 주정을 원료로 사용하는 경우보다 도시 및 산업 폐기물이나 유기물이 다량 함유된 폐수로부터 생산하는 공정이 더 경제적이고 이러한 방향으로의 연구가 활발하다. 한편, 액체 연료인 알콜류중 부탄올은, 현재 휘발유와 혼합되어 자동차 연료(가솔)로 사용되고 있는 에탄올보다 수송용 연료의 혼합물로는 더 좋은 특성을 가지고 있다. 즉 부탄올은 에탄올과 비교할 때 연소열이 크고 물에 잘 섞이지 않으며, 낮은 증기압을 가지고 있다. 이러한 장점들에도 불구하고 발효에 의한 부탄올 생산은 거의 없고 에틸렌으로부터 화학합성에 의해 생산되고 있다. 발효에 의해 부탄올을 생산할 때 부탄올이 미생물에게 매우 유독하므로 발효액의 최종 부탄올 농도가 매우 낮다(약 1.4%). 또한 부탄올 발효는 부탄올 뿐만 아니라 아세트, 에탄올 등이 함

■ 目 次 ■

I. 서	론
II. 현	황
III. 전	망

게 생성되므로 부탄올 회수를 위한 비용이 많이 들게 되며 대량생산을 위해서는 반응기의 용량이 매우 커야하는 단점이 있다. 이러한 이유로 치즈의 부산물(whey)과 같은 부생 폐기물을 이용하여 부탄올을 생산하는 공정도 현재의 기술수준으로는 아직은 경제성이 없다.

현재 액체 대체연료로 가장 현실성이 큰 것은 에탄올이다. 앞서서도 잠깐 언급한 바와 같이 에탄올은 이미 휘발유와 혼합되어 수송용 연료로 사용되

고 있다. 에탄올의 경우에도 석유보다 생산원가는 비싸지만 브라질과 같이 농산자원(사탕수수)이 풍부하고 원유를 수입하는 나라에서는 대체연료로의 효용성이 크다. 우리나라의 경우, 주정을 이용하여 에탄올을 생산할 때 대체연료로 사용되기 위해서는 생산공정의 각 단계에서 원가 절감을 위한 보다 세심한 배려가 요구된다. 이후로는 주정으로부터 대체 연료용 에탄올 생산공정을 각 단계별로 검토해 보고자 한다.

표 1 대체에너지의 유형 및 이용분야

에너지원별	생산에너지 유형	이용분야
태양열	열(온수, 증기)	주택 및 산업용에너지
태양광	전력	낙도, 오지의 전력공급
바이오 에너지	가스연료 (메탄) 액체연료 (알콜)	산업용 수송용 (에탄올 등)
폐기물 에너지	열 (온수, 증기) 가스연료 (메탄등)	주택, 상업용, 산업용 및 발전에너지
석탄이용 기술	액체연료 (석탄액화) 석탄 가스	산업용 및 발전에너지
소수력	전력	발전에너지
풍력	전력	낙도, 오지의 전력공급
수소 에너지	가스연료 (수소)	전부분 에너지
연료 전지	전력 + 열 (열병합 시스템)	발전에너지 및 상용건물의 냉난방에너지
해양 에너지	전력	전력 에너지

※ 대체에너지 개발촉진법 시행령에 따른 대체에너지원임

에탄올 생산 공정

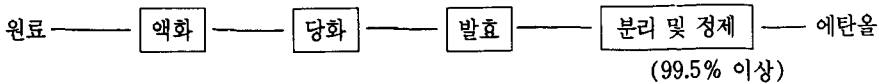


그림 1 에탄올 발효공정의 개략도

에탄올 생산공정은 그림1에서와 같이 네단계로 구분할 수 있다. 원료인 쌀보리, 절간고구마, 타피

오카 등을 분쇄시킨 뒤 증기로 증자(cooking)시키면서 액화효소를 첨가하여 원료중의 전분을 액화시

킨다. 이때의 온도는 90-95°C로 원료에 포함된 잡균을 멸균하는 효과도 있다. 고온증자의 에너지 소모를 절감하기 위해 저온증자 또는 무증자의 액화 방법들이 연구되고 있지만 저온에서 액화효소의 활성이 저하되고 오염균에 대한 별도의 대책이 요구되므로 고온증자에 의한 액화가 널리 채용되고 있다. 액화공정에서 전분을 포도당이 몇개씩 연결된 텍스트린으로 분해시킨 뒤 온도를 60°C 부근으로 낮추고 당화효소를 넣어 포도당을 생성시킨다(당화). 이때 당화는 약 70%를 기준으로 하는데 포도당 생성속도가 느려 전체 에탄올 발효공정의 속도를 결정하는 과정이 된다. 약 70%로 당화된 원료는 효모와 혼합되어 에탄올 발효를 시작한다. 발효산물인 에탄올과 원료인 당의 농도가 높을 때 효모의 성장과 에탄올 생성을 저해하므로 이들의 부작용을 최소화하는 방안이 모색되어야 한다. 이와 더불어 에탄올 발효에서 흔히 검출되는 젖산균들이 아세트산을 생성하는데, 아세트산의 농도가 0.5g/l 이하에서도 효모의 성장과 에탄올 생성에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되어 이러한 젖산균들에 의한 피해를 줄이는 연구도 중요하다 하겠다. 발효가 끝난 발효액은 분리정제 공정으로 보내져 1차 증류에서 약 60%, 2차 증류에서 95%의 에탄올로 정제한 후 무수 에탄올을 얻기 위한 3차 처리(공비 증류 등)의 단계를 거친다.

II. 현황

재래식의 주류 생산을 위한 에탄올 생산공정은 원료의 액화에서부터 발효의 단계까지 회분식이 사용되었다. 회분식의 가장 큰 장점인 운전이 간편하기 때문이다. 반면에 운전시간이 길고 발효액중의 에탄올의 농도가 낮아 전체 생산성이 낮다. 이보다 개선된 에탄올 생산 공정은 각 단계를 단순 연속식으로 운전하는 공정이다. 각 공정을 연속식으로 전환할 경우 조업시간의 단축으로 생산성이 향상된

다. 그러나 발효단계에서 발효조내의 균체 농도가 낮고 따라서 발효액중의 에탄올 농도도 낮아 효율적이지는 못하다. 또한 연속식 공정으로 전환할 때 당화 공정에서 값비싼 당화효소가 다량으로 소모되므로 원가에의 부담이 크다. 원가 절감을 위해서 당화효소의 회수나 당화효소를 고정화하여 사용하는 방법등이 제안되고 있으나 아직 실용화단계에 이르지 못하는 못했다. 또한 당화속도가 느려 당화가 불충분한 상태에서 원료를 발효조에 투입하면 원료에 포함된 당을 모두 소모하지 못하게 되어 생산성의 저하와 함께 당이 고농도 함유된 폐수를 처리해야 하는 부담을 안게 된다. 현재 우리나라의 실정은 발효를 제외한 액화, 당화, 분리정제를 단순 연속식으로 전환하는 단계에 있다.

연속식 발효 공정에서의 에탄올 생산성은 비생산성(specific productivity, g ethanol/g cell/h)과 균체농도에 좌우되는데 에탄올 생산성을 증가시키기 위해서는 비생산성과 균체농도를 증가시키는 방법이 요구된다. 균체의 농도를 증가시키기 위해 효모를 재순환시키는 고농도 에탄올 발효와 비생산성을 향상시키기 위해 발효와 증류를 병합하여 에탄올에 의한 효모에의 저해를 최소화하는 공정이 현재 외국에서 각광 받고 있는 최신의 방법이라 하겠다. 이와 더불어 발효조를 여러조 채용하여 발효조의 처리용량(throughput)을 증가시키고 비생산성도 개선하는 공정도 실용화되어 있다. 이들의 성격을 좀 더 자세히 기술해 보고 우리의 실정과 비교 검토해보겠다.

고농도 에탄올 발효

고농도 에탄올 발효는 균체의 농도를 증가시켜 에탄올 생산성을 크게 개선할 뿐만 아니라 현재 회분식에서 48-72시간 소요되는 발효시간을 2-4시간 정도로 단축시킬 수 있다. 한편 고농도의 당을 사용할 수 있어 증류의 부담도 대폭으로 줄일 수 있다. 이러한 고농도 에탄올 발효는 균체의 재

순환에 의해 가능한데 균체의 재순환 방법으로는 침강, 원심분리, 막사용 등이 있다. 침강의 경우 단순히 중력을 이용하므로 비용이 저렴하며 응집성의 효모를 사용할 때 효과적이거나, 일반적으로 응집성 효모의 발효능이 비응집성 효모보다 낮으므로 실용화에는 한계가 있다. 현재 실제로 균체 재순환에 응용되고 있는 방법은 원심분리법이다. 이 방법은 효율적이기는 하나 초기 투자비가 높고 운전비도 세가지 방법중에서 가장 높다. 막을 사용하는 경우, 운전비는 원심분리법보다 낮으나 아직 실험실에서 사용하는 단계에 머무르고 있다. 우리나라와 같이 주정을 원료로 에탄올을 생산할 경우에는 발효액중에 부유물(suspended solid)이 다량 포함되어 있어 균체를 재순환할 때 이들 부유물들도 함께 재순환되게 된다. 이들 부유물들이 재순환되어 발효조내에 축적되는 것보다 더 심각한 문제는 이들이 원심분리기의 노즐(nozzle)을 막아 조업을 불가능하게 하거나 막을 사용할 때 막을 막는 현상이다. 따라서 위의 세 방법의 어느 방법을 채택하더라도 이들 부유물을 발효 단계 이전에 제거하는 장치가 요구된다.

발효 - 증류 병합 발효

발효액중의 에탄올은 효모의 성장과 에탄올 생성에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 에탄올에 의한 효모에의 저해작용은 에탄올 농도가 20g/l 이하인 경우 아주 미미하나 그 이상의 농도에서는 저해작용은 에탄올의 농도에 따라 급격히 증가하는 현상을 보이고 에탄올 농도가 110g/l 이상에서는 효모의 성장과 에탄올 생성이 완전히 멈추는 것으로 나타났다. 이러한 에탄올에 의한 효모에의 저해작용을 감소시켜 비생산성을 증가시키기 위해서는 에탄올에 내성이 강한 효모 균주를 개발하거나 에탄올을 발효중 제거하는 방법이 있다. 이중 에탄올 내성이 강한 효모 균주를 개발하거나 에탄올을 발효중 제거하는 방법이 있다. 이중 에탄올 내성이 강

하며 발효능이 양호한 균주의 개발은 앞으로도 꾸준히 진행되어야 한다. 이와는 별도로 에탄올을 발효중 계속해서 제거해 발효액중의 에탄올의 농도를 저해농도 이하로 유지시키는 방법이 실용화되었다. 이러한 방법으로는 1) 발효와 증류의 공정 line을 감압하여 에탄올을 제거하거나 2) 발효액의 일부를 증류탑에서 증류시켜 에탄올을 제거하고 증류 잔액을 발효조로 재순환하는 방법이다. 1)의 경우 에탄올 발효중 발생하는 이산화탄소가 진공펌프의 부담을 가중시켜 효율이 떨어진다. 2)의 방법은 증류 잔액을 순환시킬 때 원료액과 함께 혼합하여 발효조에 투입하게 되면 원료액의 희석효과가 있어 고농도의 당을 원료로 사용하는 장점이 있다. 그러나 이 두가지 방법은 모두 오랜 시간 운전할 경우 효모의 성장에 저해를 주는 2차 발효 산물이 축적되어 발효조의 생산성이 감소하게 된다.

다단식 연속 발효

연속식 에탄올 발효를 수행할 때 고농도의 당을 사용할 경우의 여러가지 잇점을 앞에서 언급한 바 있다. 그리고 고농도의 당을 사용할 경우, 단순 연속식 발효에서는 당을 모두 소모하기 위해서는 발효조내의 체류 시간이 길어진다. 한 실험 결과에 의하면 당의 농도를 100g/l에서 160g/l로 높였을 때 당을 전부 소모하는 체류 시간이 9.5 시간에서 25시간으로 증가하였다. 이러한 오랜 체류시간의 문제를 개선하는 방안의 하나가 발효조 몇기를 series로 연결하여 다단식 연속 발효를 실시하는 것이다. 이러한 다단식 연속발효의 또다른 장점은 에탄올에 의한 효모에의 저해를 줄이는 효과도 있다. 즉 각 발효조의 운전조건(체류시간, 산소주입 등)을 조절하여 주 발효조는 효모의 생육에 저해를 주지 않는 에탄올 농도를 유지하고 아울러 공기를 공급하여 효모의 성장에 적절한 환경을 조성하고 이후의 발효조들에서는 효모의 성장보다 에탄올의 생성에 적절한 조건(혐기적 조건 등)으로 조절하여

에탄올 생성을 극대화하는 운전이 가능하다. 이 경우 주발효조 이외의 발효조에서는 소모해야 하는 당 농도의 부담이 작아 결과적으로 고농도의 당을 효율적으로 소모할 수 있다. 한편, 주발효조에 효모의 재순환 방식을 곁들여 주발효조를 고농도의 균체로 유지하면서 에탄올 발효를 수행하는 방식이 현재 실용화되어 있다. 이러한 방식은 우리나라와 같이 쌀보리와 같은 곡류를 원료로 사용할 때 불완전 당화에 의한 당의 유실을 줄일 수 없으므로 별도의 발효기를 두어 불완전 당화된 원료의 발효를 수행하는 방안등이 강구되어야 하겠다. 또한 여러 조의 발효기가 필요하므로 초기 투자비가 큰 단점이 있다.

한편, 에탄올을 발효액으로부터 분리 정제하여 무수 에탄올을 얻는 공정은 일반적으로 단순 증류를 통해 에탄올의 농도를 95%로 농축한 후 벤젠과 같은 유기 용매를 첨가하여 증류하는 공비 증류가 널리 채택되고 있다. 이러한 증류에 의한 에탄올 정제는 많은 에너지를 필요로 하는 공정이므로 이 공정의 개선은 에탄올 생성 원가에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 증류의 방법이외에 막 이용, 투과 증발법 등이 제안되어 연구가 진행 중이다. 막을 이용하는 경우 에너지 소모의 측면에서 가장 효율적이거나 막의 내구성등의 면에서 대규모 조업에 이용되기에는 한계가 있다. 투과 증발법의 경우에는 선택투과막을 사용하여 액이 이 막을 통해 이동하는 동안에 증발시켜 정제하는 방법이다. 현재 일부가 개발되어 사용되고 있으나 막 분리와 같이 보다 우수한 재질의 막개발이 요청된다. 이와 같은 새로운 정제 방법과는 별도로 기존의 증류법의 효율을 개선하기 위한 연구도 활발하다. 이중,

벤젠보다 더 효율적인 유기 용매를 사용하여 무수 에탄올을 만드는 것인데 표2에 여러 용매에 대한 무수 에탄올 정제 비용을 나타내었다. 이 표에서 보면 pentane을 사용하면 벤젠을 사용할 때 보다 더 경제적이다. 이 방법은 이미 실용화되어 있고 국내에서도 이의 실용화를 추진중에 있다.

표 2 무수 에탄올 생산을 위한 여러 증류법의 생산원가 비교

공 정	생산 원가(cent/1)
벤젠 공비 증류	4.24
pentane 공비 증류	3.78
diethyl ether 공비 증류	4.72
ethylene glycol 추출 증류	7.08

*1980년, 미국에서 감정한 것임

III. 전망

주정을 이용한 대체 연료로서의 에탄올 생산에 있어 여러 단계에서의 현황과 개선점을 간략히 살펴 보았다. 원유를 대신할 대체에너지의 개발에 있어 가장 우선적으로 고려해야 할 일은 생산원가를 절감하는 공정의 개발이다. 앞에서 언급한 내용들 외에도 생산 공정의 자동화, 운전 조건의 최적화, 폐수의 효율적 처리에 의한 메탄 가스의 회수 및 이용은 추가의 원가 절감효과가 있으리라 기대된다. 각 공정에서의 원가 절감과 보다 효율적 공정의 개발에 대한 노력은 유가의 상승과 환경에의 우려에 힘입어 대체 에너지로서의 역할을 할 시점을 앞당기리라 생각된다.