

고온균주에 의한 연료용 알콜발효



남 기 두

〈일산실업(주) 생산차장〉

I. 서 론

고온균주에 의한 산업적 연료알콜 발효공정의 실용화는 지금까지 열다소비성 공업으로부터 에너지 절약 공업 차원으로 한단계 진보될 것으로 기대된다. 현재 국내 발효주정 생산능력은 연간 755,000DM이며, 미국 등 외국에서 수입한 조주정(crude alcohol)을 정제하여 음용알콜(potable alcohol)로 정제하는 정제 주정생산능력이 858,000DM이다. 그러나 현재 정제주정생산 시설의 연간 가동율은 평균 48%에 지나지 않으므로 대체 에너지의 연료알콜 생산에 여유시설을 활용할 수 있다. 따라서 대체에너지 다양화 및 국가 안보전략적 차원에서 재생가능한 biomass로부터 생산한 biofuel인 연료알콜의 자원화는 석유의 수입의존도가 높은 우리 현실을 감안할 때 필수적이다. 또한 근래 대도시의 심각한 자동차 배기가스의 오염으로 대기환경이 급격히 악화되고 있는 실정이므로 청정 연료 대체 개발, 대기의 탄산가스 농도 저감을 통한 지구 온실화 방지에도 연료알콜 실용화로서 일조할 수 있을 것으로 본다. 그러나 현재로서는 국내 생산 가능한 주정원료의 안정적인 공급 정책을 활성화하고 국내외 원료확보를 위한 직간접 투자 등 보다 능동적인 정책이 어느때 보다 요망되고 있다. 그러므로 알콜의 대체연료화는 정책적인 뒷받침 없이는 실용화가 불가능하다. 뿐만 아니라 원료가 생산원가에 차지하는 비중이 70~80%정도인 점을 감안할 때 연료알콜 생산 기술개발 차원은 물론 음용알콜의 생산비용 절감차원에서도 새로운 기술개발 및 공정단순화는 매우 절박하며, 현재 국내 11개 주정공장에서 공통적인 현안 문제로서 생산수율 극대화 및 원가절감 차원에서 고온균주의 실용화는 하절기 냉각용수 부족 등 해결에 매우 현실적인 연구대안이며 생산현장에서 반드시 극복해야 할 애로 사항 중의 하나이다.

■ 目 次 ■

I. 서 론

II. 알콜발효 및 효과분석

III. 결 론

이와 같은 생산공장의 현실과 향후 반드시 실용화될 연료알콜의 생산비용 최적화를 위한 알콜발효 기술의 확립은 매우 중요한 바, 운전의 단순화, 당화 및 발효과정중 오염배제, 생산성 증가로 인한 유효 발효조 용량 감소 및 공장건설 초기투자비 절감뿐만 아니라 효율적인 생산관리를 통해 음용 및 연료알콜 생산수지를 개선함으로써 경쟁력을 확보할 수 있다고 사료되어 고생산성 고온균주의 개발에 관심이 최근에 집중되고 있는 실정이다. 따라서 경북대 자연대 미생물학과에서 개발한 고온균주를 분양받아 최적 알콜발효 조건을 고찰하고 산업규모 생산에서 원료기질 및 에너지 절약효과를 분석하고자 한다.

II. 알콜발효 및 효과분석

1. 생산 현장의 애로 사항

전분질 원료를 사용하여 연료 및 음용알콜을 생산할 경우 크게 원료의 분쇄, 증자, 발효 및 알콜 회수공정으로 구분된다. [그림3]과 같이 증자된 mash는 55~60°C로 냉각하여 당화효소제를 투입하여 1시간 동안 당화시킨 다음, 이어 효모의 최적 알콜발효 온도인 33°C까지 냉각하여 미리 배양된 효모를 발효 mash의 약 8%~10%를 접종시켜 알콜발효를 수행한다. 알콜발효가 진행됨에 따라 효모는 초기 24시간 동안 효모의 대수증식과 초기 왕성한 알콜발효로 인해 품온이 상승하게 된다. 따라서 발효품온 상승을 조절하여 heat shock를 예방하는 것은 최종 알콜수율과 직결되는 매우 중요한 관리요인이므로 내부

열교환용 coil이나 외부 열교환기(external heat exchanger)로서 발효품온을 조절함으로써 냉각 에너지가 필요하게 된다. 따라서 고온 발효공정의 균주가 개발되면 품온관리가 용이하고 최종 발효 mash의 품온이 높은 만큼 연속증류기에서 알콜을 회수하는데 소비되는 에너지를 절약할 수 있어 고온발효공정의 개발 및 확립이 생산현장에서는 시급히 해결을 요하는 과제로 판단된다. 특히 국내 대부분의 주정공장은 대도시에 위치하거나 공업단지내에 있어도 공업용수 부족으로 생산작업에 상당한 제약을 받고 있는 실정으로 고온성 균주를 사용함으로써 냉각수 절약뿐만 아니라 용수 악화로 인해 발효초기 품온관리 실패로 인한 수율저하를 배제할 수가 있다. 따라서 현재 개발된 고온성 균주의 특성을 현장 생산규모에서 실용화 의미는 대단히 크다.

2. 원료 수입가격 추이

국산원료 비중이 매년 낮아지고 있는 추세로 1996년 현재 14.29%에 불과하나 국내 잉여 농산물인 곡물과 일부 고구마는 농민의 소득과 직결되며 농업정책과 밀접한 상관이 있으므로 매우 중요한 의미를 지닌다. 그러나 대부분의 원료를 수입해야 하므로 원료의 안정적인 확보를 위해 옥수수 및 타피오카(Tapioca or Cassava chips, TC) 생산국가에 현지 생산자와 계약재배를 하거나 현지법인과 consortium을 형성하여 진출하는 적극적인 방안을 모색할 수 있다. 그러나 궁극적으로 국내 부존자원의 활용과 개발, 향후 전개될 목질계 기질의 실용화에도 지속적인 연구개발이 요구된다.

<표 1>

Tapioca cost imported(USD/Ton).

Origin	1994. 5	1995. 1	1996. 3	1996. 8	1996. 9	1996. 10	1996. 11	1996. 12
Indonesia	120	176	186			144	137	
Vietnam				188	169			145

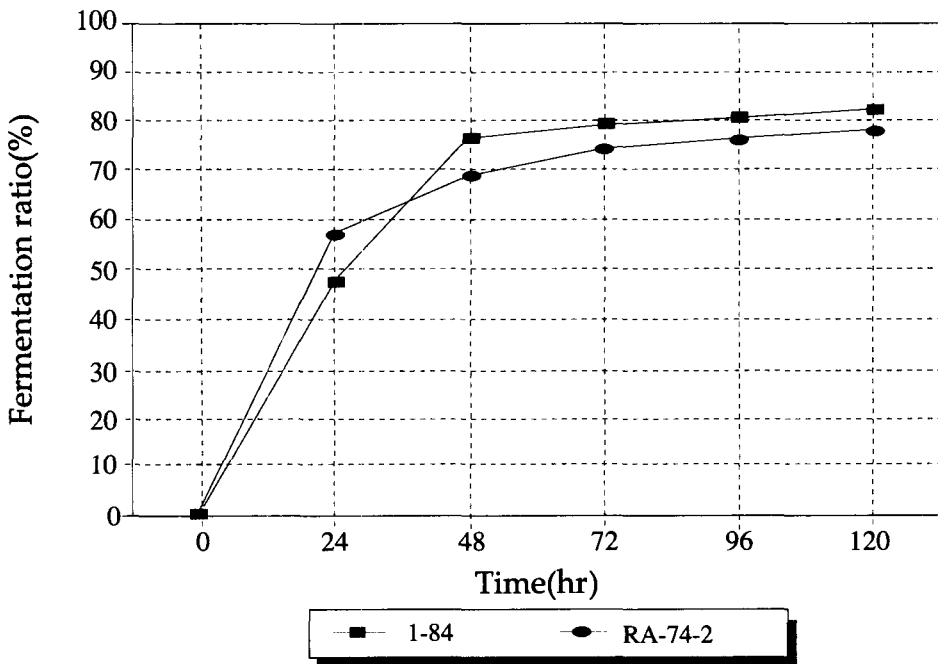
또한 다양한 원료를 사용하는 우리나라의 경우 연속알콜발효 공정채택에 어려움이 많으나 원료 수급 안정성, 저장성, 폐수처리등을 고려하여 원료를 결정하지 않으면 안된다. 또한 최근 국제 곡물가격의 폭등으로 수입원료의 가격은 <표1>과 같이 1994년 이후 계속하여 인상되고 있는 추세이나 1996년 8월 톤당 188달러를 고비로 하반기에는 다소 안정세를 찾고 있으며, 수입원료의 경우 국제 곡물가격 변화에 따라 가격이 연동되고 있는 추세이다.

3. 30 l 및 2,000 l pilot fermentor에서 변온발효

옥수수의 경우 [그림 1]과 같이 발효속도가

알콜발효 초기에는 RA-74-2의 고온균주에 의한 고온변온발효(high temperature gradient fermentation, HF: 효모접종 후 38°C에서 냉각 없이 24시간 노출 후 정상발효온도로 유도)에서 초기에는 발효속도가 빠르나 시간이 경과함에 따라 낮았으며 최종 발효수율은 정상 및 고온변온발효에서 각각 81.41%, 78.13%였다.

알콜 발효요(mash)의 경시적 평균 발효품의 변화는 [그림 2]와 같이 *S. cerevisiae* IFO 1-84 균주는 33°C에서 전배양된 효모를 접종하여 알콜발효를 수행하였다. 이때 대수증식기에 도달함과 동시에 알콜발효가 또한 왕성하여 품온이 35°C까지 상승하였다. 따라서 적정 알콜발효 품온 유지를 위하여 33°C까지 냉각시켰으나 이후부터는 품온이 일시적으로 35°C까지 상승하여도 냉

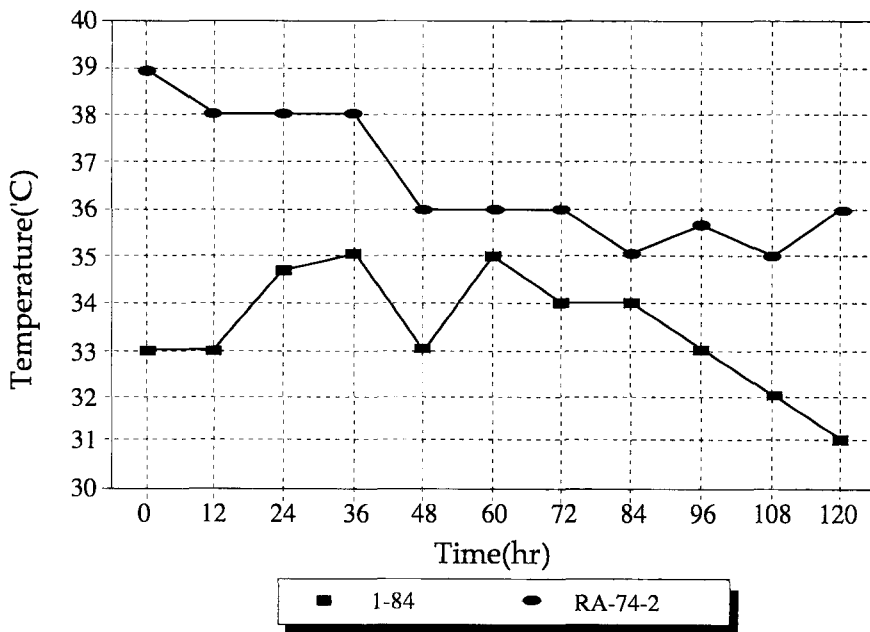


[그림 1] Profiles of alcohol fermentability using corn in 30 l fermentor. Yeast was inoculated at 33°C for normal fermentation(NF) with *S. cerevisiae* IFO 1-84 and at 38°C for high temperature gradient fermentation(HF) with RA-74-2, respectively. Alcohol fermentation was carried out without control of mash temperature.

각하지 않고 방치하였음에도 더이상 품은 상승은 없었다. 그 이유는 알콜발효 초기단계에서 균체증식과 알콜발효가 왕성할 때 발효조의 방열손실보다 내부 알콜발효 생성열이 크므로 결국 품온이 상승하게 되나 이후 시간이 경과함에 따라 효모균체 증식은 중지되고 잔당분만 알콜발효가 진행됨(후발효)에 따라 발효조 내부 알콜발효 생성열이 발효조의 방열량보다 오히려 적으므로 품온은 점점 떨어지나 외부실온에 크게

의존된다.

2,000 l fermentor에서 *S. cerevisiae* IFO 1-84와 RA-74-2균주를 33°C(정상발효)와 38°C(고온변온발효)에서 종효모를 각각 접종하여 알콜발효를 수행한 결과, 쌀보리 및 TC의 경우 알콜발효속도가 거의 비슷하였으나 옥수수에서는 *S. cerevisiae* IFO 1-84균주를 이용한 정상발효보다 RA-74-2의 발효수율이 1.2% 정도 낮았고<표 2>, 알콜발효 과정 중 품온의 변화는 30



[그림 2] Temperature profiles in 30 l CSTR fermentor. Alcohol fermentation was carried out as in Fig. 1.

<표 2> Comparison of alcohol yield obtained from 2,000 l fermentor using industrial substrates.

Raw material	Tapioca		Corn		Naked barley	
	1-84	RA-74-2	1-84	RA-74-2	1-84	RA-74-2
Starch Value(%)	73.00		68.21		66.55	
FR(%)	84.46	83.42	81.41	80.25	79.00	78.13
Yield(l/Ton) *	459.7	454.0	414.0	408.1	392.0	387.6

* Yield(l/Ton) was calculated as follow;

$$\text{Yield} = \text{starch value} \times 10 \times \text{FR} \times 0.7154 \times 0.99 / 0.95$$

l fermentor와 비슷한 경향을 보였다(data not shown).

4. 수율비교

2,000 l fermentor에서 확인된 알콜발효 수율과 원료 전분가를 기준으로 정상발효와 고온변온발효의 예상수득량을 비교하면 <표 2>와 같이 정상발효보다 RA-74-2 고온균주에 의한 고온변온발효 시험구의 수율이 원료에 따라 4.4~5.9 l/Ton이 낮았다. 그러나 고온변온발효 특성이 인정되므로 연료 및 음용 알콜발효에 적용은 가능하리라 판단된다. 여기서 정상발효보다 다소 낮은 발효수율은 하절기 냉각수 부족으로 알콜발효 자체가 불가능한 극한적 기후조건을 극복할 수 있을 뿐만 아니라 냉각수 절약, 알콜발효요(fermented mash)의 현열증가로 인해 알콜회수에 소요되는 증류에너지가 감소되므로 수율감소 부분과 에너지 감소효과가 연료용 알콜발효에서는 서로 상쇄될 수 있을 것으로 예상된다.

5. 에너지 절감 및 수율 감소요인 분석

회분식 알콜발효를 중심으로 고온균주의 사용에 의한 냉각 에너지 절감효과, 고온 노출(heat shock)에 의한 수율변화를 검토하였다.

1) mash의 냉각열량

[그림 3]과 같이 10단계 작업공정에서 32°C까지 냉각하여야만 현재 산업적으로 사용하고 있는 *S. cerevisiae* IFO 1-84 균주의 경우 알콜발효가 가능하다. 즉 알콜발효 최적온도 33°C까지 냉각시킨 후 주모조에서 전배양된 효모를 발효 mash에 접종하여 정상발효를 유도하는 반면 38°C의 고온균주를 산업적으로 사용할 경우 60°C에서 38°C까지 18°C만 냉각하면 되므로 $\Delta t=5^\circ\text{C}$ 만큼 냉각용 에너지를 절약할 수가 있다. 따라서 <표 3>과 같

이 하루 95%의 주정 50kl를 생산할 경우를 전제로 하여 에너지 절감요소를 분석하고자 한다.

증자요를 발효조에 이송하여 32°C까지 정상 알콜발효를 위해 냉각해야 할 열량(Q_1)은 $Q=c_{pm} \Delta t$ 공식으로 계산할 수 있다. 여기서 c_p 는 비열, m 은 질량, Δt 는 온도차를 말한다. 즉,

$$Q_1=1 \times 480 \times (100-33)=32160 \times 10^3 \text{ kJ/d}$$

가 되고, 38°C에서 고온알콜발효를 수행할 경우 발효조에 이송된 증자요의 냉각열량(Q_2)는,

$$Q_2=1 \times 480 \times (100-38)=29760 \times 10^3 \text{ kJ/d}$$

이므로 10단계에서 38°C의 고온발효를 수행할 경우 절약 가능한 열량(Q_3)은

$$Q_3=1 \times 480 \times (38-33) \times 10^3=2400 \times 10^3 \text{ kJ/d}$$

이다.

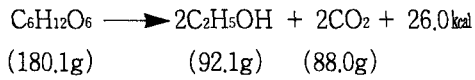
2) 알콜발효중 품온변화

전배양된 효모 접종이후 24시간 이내에 효모의 증식과 함께 초기 왕성한 알콜발효의 물질대사가 진행됨에 따라 여기서 유리되는 에너지에 의해 알콜발효 mash는 적은인 33°C보다 상승하게 된다. 이때 과도하게 유리되는 에너지가 효모 증식 및 알콜발효에 영향을 미친다. 특히 효모증식이 지연되면 초기 알콜발효가 늦어 2차 오염이 일어날 가능성이 높고, 수율이 현저히 저하되는 원인이 될 뿐만 아니라 종국에는 발효정지 상태를 초래하여 수율 및 생산성을 크게 좌우하므로 효모 특성에 맞는 최적 알콜발효온도 조절

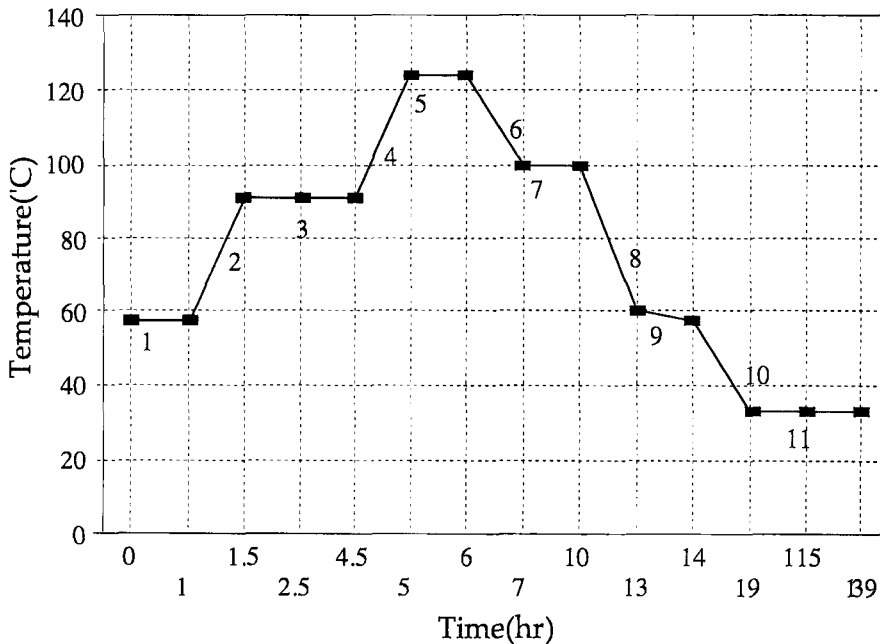
<표 3> Alcohol production conditions from starchy raw materials.

Cooking condition(°C/hr)	124°C/h
Mash flow(kl/d)	480
Total sugar(%)	18.0
Mash alcohol concentration(%)	10.0
Fermentation ratio(%)	86.3
Distillation efficiency(%)	99.0
Daily product capacity(kl/d)	50

은 중요한 발효조 관리 요인중의 하나이다. 이때 발생하는 열량은 다음과 같이 계산할 수가 있다.



즉, 포도당 1 mole에서 26.0kcal에너지가 효모의 물질대사에서 유리된다. 따라서 상기 알콜생산 조건에서 총당농도가 18%이고, 발효수율이 86.3%일때 발효과정에서 유리될 수 있는 총발생



[그림 3] Profiles of cooking and alcohol fermentation temperature.

- 1 step : Hot process water, alpha-amylase and ground cassava are well mixed by means of the line mixer and then pumped into the cooker.
- 2 step : Preheat to 90°C for liquefaction.
- 3 step : Liquefaction with thermophilic alpha-amylase Termamy1 120L or bacterial alpha-amylase for 3hrs at 90°C.
- 4 step : Heat to 124°C with live steam.
- 5 step : Hold for sterilization.
- 6, 7 steps : The cooked mash is transferred from the cooker to the batch fermentor by means of *situ* pressure.
- 8 step : Cool to 60°C for saccharification.
- 9 step : Saccharification with enzymes for 1hr at 58~60°C.
- 10 step : After cooling to 33°C and then inoculate the precultured yeast corresponding to 10% based on the fermenting mash.
- 11 step : Alcohol fermentation(SSF) is carried out for 4~5days at 33°C.
- 12 step : Fermented mash is distilled in the distillation process and produce the potable or industrial(fuel) alcohol.

열량(Q₄)은,

$$Q_4 = 480 \times 0.18 \times 0.863 \div 180.1 \times 26 \times 10^3$$

$$= 10670 \times 10^3 \text{ kJ/d}$$

가 된다. 그러나 효모 접종 후 24시간 이내 초기 알콜발효는 원료 및 초기당화율 등 발효조건에 따라 다소 다르나 보편적으로 약 50%가 진행되는 경향이므로 이를 기준으로 Q₄ 열량으로부터 초기 발효때 발생하는 열량(Q₅) 및 이 열량으로 인한 최고 예상 품온상승(T_m)을 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$Q_5 = 10760 \times 10^3 \times 0.5 = 5380 \times 10^3 \text{ kJ/d}$$

따라서 최고 예상 품온상승(T_e)을 Q₅의 열량으로부터 계산하면,

$$T_e = 5380 \times 10^3 \div 480 = 11.2^\circ\text{C}$$

가 되므로 발효초기에 발효 mash의 최고품온(T_m)은 최고 43°C까지 상승이 가능하나 이는 순간적인 물질대사가 일어날 경우를 가정한 온도이다.

통상 알콜발효는 발효초기 24시간 이내에 왕성한 효모증식과 함께 약 50~60%의 알콜발효가 지속적으로 진행되므로 이때 유리되는 열량을 회분식 발효조의 경우 3~5회 정도 냉각을 시켜 최적발효온도를 조절 유지하고 있다. 또한 발효조의 표면에서는 발효조가 설치되어 있는 실내온도 및 환경조건에 따라 다르나 이중 열량의 일부가 연속적으로 방냉되고 있다. 특히 하절

기에는 용수 사정 악화로 발효초기 품온을 냉각 조절하지 못했을 경우 43°C까지 상승하고 현저한 발효수율 저하를 경험한 바 있다. 따라서 고온발효를 하므로써 종래 알콜발효적은 33°C보다 에너지를 절약할 수 있는 요인을 분석해 보았다. 고온발효의 효과는 냉각단계(38°C→33°C)와 품온 조절 단계에서 소요되는 냉각용수 절감을 통한 에너지를 절약할 수 있으며 종래 33°C 발효에 비해 총냉각 열량을 기준할 경우 약 21% 이상의 냉각 및 품온 조절용 에너지 절약이 가능하다(표 4).

그러나 이같은 에너지 절약 효과보다는 오히려 하절기 용수부족이나 용수의 온도상승 등으로 인해 알콜발효 자체가 불가능 또는 발효중 발효품온을 조절 못해 정상적인 수율을 얻을 수 없거나 현저한 수율저하가 초래되어 생산원가의 70~80%를 차지하는 원료의 손실을 방지할 수 있다는 장점을 강조하고 싶다. 또한 이 계산에서는 배제되었으나 고온발효를 하므로써 발효가 끝난 mash의 품온이 33°C에서 발효한 것보다 상대적으로 높으므로 그만큼 높은 현열을 가지고 연속증류기에 공급되므로 증류에 소요되는 에너지가 절약될 수 있다.

3) 냉동기 설치시 투자비 절감효과 분석

<표 4>와 같이 정상발효와 고온변온발효시 냉

<표 4> Comparison of mash heat balance for alcohol fermentation with normal(33°C) and high(38°C) temperature.

Items	Q(Heat capacity, kJ/d)	
	Normal(33°C)	High(38°C)
A Q ₁ needed for cooling to optimum temperature(T _o)	32160 × 10 ³	29760 × 10 ³
B Q ₅ for maintaining the T _o	5380 × 10 ³	-
C Tatal Q	37540 × 10 ³	29760 × 10 ³
D Savable Q		7780 × 10 ³
E Saving ratio(%)		21%

각열량을 기준으로 필요한 냉동기의 냉동톤 (1RT=79680kcal/day)은 정상발효를 할 경우 발효조 냉각 및 품온조절에 필요한 냉동능력은 471RT(37540×10³/79680kcal/day)으로 계산되므로 고온변온발효시 필요한 냉동능력은 373RT(29760×10³/79680kcal/day)이므로 98RT의 냉동능력을 가진 설치비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 각종 부대설비 배관, 냉각수 보충수(make up), 운전비용을 절감할 수 있는 잇점이 있다.

4) 고온노출(heat shock)에 의한 발효수율 감소

여름철 실온 및 냉각수 수온증가 또는 냉각수 부족으로 무리한 생산작업을 수행하였을 경우 발효과정에서 생산되는 생성열로 인해 품온이 상승하여 효모가 heat shock를 받아 생산수율 저하를 초래하게 된다. 그러나 음용알콜 생산은 전매업으로서 배정생산량을 하지 않으면 안되는 현실적인 여건에서는 원료 및 수율 손실을 감수하고 생산을 감행하고 있는 실정이다.

따라서 heat shock로 인하여 발효수율이 저하되었을 경우 월간 원료 손실금액(loss of raw material, RM_{loss})은 다음식에 의하여 계산할 수 있다.

$$RM_{loss} = Y_{th}(1 - FR_f / FR_n) / Y_{th} \times RM_d \times P \times 30 \text{ (일/월)}$$

여기서 RM_{loss} : 원료 손실금액(원/월)

Y_{th} : 정상발효시 평균수득율(l/Ton)

FR_f : 품온관리 실패시 발효수율(%)

FR_n : 정상발효시 발효수율(%)

RM_d : 일일 원료사용량(Ton/d)

P : 원료 가격(원/Ton)

예를 들면 Tapioca 원료의 경우 사용량 : 120Ton/일, 원료 구입가격 : 124,500원/Ton, Y_{th} : 459.7 l/Ton, FR_n : 84.46%, FR_f : 83.46% 일때 효모가 heat shock으로 1%의 수율이 저하되었을 경우 :

$$RM_{loss} = 459.7(1 - 83.46/84.46) / 459.7 \times 120 \times 124,500 \times 30 = 5,318,222 \text{ 원/월}$$

의 원료 기질의 손실의 가져온다.

Ⅲ. 결 론

고온균주 RA-74-2는 원료 종류에 관계없이 고온변온발효에서 기준균주 *S. cerevisiae* IFO 1-84의 정상발효에 비해 알콜수율이 조금 낮거나 비슷하여 산업적으로 사용이 가능하다고 판단된다. 고온균주를 알콜발효에 이용할 경우 잇점으로는 여름철 수율감소 극복, 냉각 에너지 절약, 냉각용 냉동설치비 절감을 가져올 수 있으므로 음용 및 연료용 알콜발효에 유익할 뿐만 아니라 1994년 하절기와 같이 용수부족과 이상기온상승 등 기후 악조건하에서는 알콜발효 자체가 어려웠고 무리한 조업으로 인해 알콜발효 최적품은 유지관리 실패로 발효수율감소를 피할 수 없는 경우도 있다. 따라서 썩에너지 절약형 고온균주를 응용하여 연료와 음용 알콜발효공정 개발 및 수식으로 연료알콜 생산비를 더욱 낮출 수 있는 신기술의 꾸준한 개발이 요구되고 있으며 고생산성균주와 신공정개발로 연료알콜의 가격 경쟁력을 개선하므로써 심각한 도시 대기오염을 근본적으로 경감시킬 수 있는 가스홀의 실용화를 앞당길 수 있을 뿐만 아니라 국민건강을 위하고 주정공업이 발전할 수 있는 전기가 되었으면 한다.

【參考文獻】

1. 바이오마스에의 燃料, 化學燃料의 開發技術 資料集成, 1984, (株)フジテウノシステ, フジシステ出版部.
2. "수송용 연료로 이용할 에탄올 생산을 위한 공장 규모 연구" 1993. 92년차보고서, 동력자원부 92IC205-502DGI
3. Saiki T. 1987. New technology of

- ethanol fermentation. *微生物* 3:554-564
4. Ellis, G. 1981. Ethanol production by vapor compression distillation. Final report. DOE/R5/10240-2
 5. Alcohol Division & Alcohol Administration Office, 1992. Ethyl Alcohol for Industrial Use in Japan. Basic Industry Bureau.
 6. Nam Ki-Du, M. H. Choi, W. S. Kim, H. S. Kim, and B. H. Ryu. 1988. Simultaneous saccharification and alcohol fermentation of unheated starch by free, immobilized and coimmobilized systems of glucoamylase and *Saccharomyces cerevisiae*. *J. Ferment. Technol.* 66:427-432
 7. Whitney, G. K., C. R. Murray, I. Russell and G. G. Steward. 1985. Potential cost saving for fuel ethanol production by employing a novel hybrid yeast strain. *Biotechnol. letters* 7:359-354
 8. Godia, F., C. Cacas, and C. Sola. 1987. A survey of continuous ethanol fermentation systems using immobilized cells. *Process Bioindustry*. April, 43-48
 9. Hacking, A. J., I. W. F. Taylor and C. M. Hanas. 1984. Selection of yeast able to produce ethanol from glucose at 40°C. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 19:361-363
 10. Cysewski G. R. and C. R. Wilke. 1978. Process design and economic studies of alternative fermentation method for the production ethanol. *Biotechnol. Bioeng.* 20:1421-1444
 11. Dourado, A., G. Goma, U. Aluquerque and Y. Sevely. 1987. Modeling and static optimization of the ethanol production in a cascade reactor. I. Modeling. *Biotechnol. Bioengin.* 29:187-194
 12. Dourado, A., J. L. Calvet, Y. Sevely, and G. Goma. 1987. Modeling and static optimization of the ethanol production in a cascade reactor. II. Static optimization. *Biotechnol. Bioeng.* 29:195-203
 13. Suh Kuen hack and Nam Ki-Du. 1993. Form separation of yeast cells. *Korean J. Biotrechnol. Bioeng.* 8:282-286
 14. Sohn, H. Y., W. Park, I. Jin, and J. H. Seu. 1994. The fermentation characteristics of newly selected thermotolerant yeasts at high temperature. *J. Microbiol. Biotechnol.* 4:222-229
 15. Ryu, B. H., K. D. Nam, H. S. Kim, D. S. Kim, Y. A. Ji and S. J. Jung. 1988. Screening of thermotolerant yeast strain for ethanol fermentation. *Kor. J. Appl. Microbiol. Bioeng.* 16:265-269
 16. 남기두, 이인기, 조훈호, 최명호, 김운식. 1992. Pilot scale multi-stage CSTR에서 전분질 원료의 에탄올 발효. *한국산업미생물학회지*. 20:324-328
 17. 연료용 알콜 생산을 위한 고생산성 효모균주의 개발(961C201301DG1). 1997. 통산산업부