Korean J. Appl. Microbiol. Bioeng.
Vol. 8, No. 3, 207~212 (1980)

總 說

단세포 단백질의 식품기능성

고려대학교 식품공학과
李 哲 鎬

Functional Properties of Single-Cell Protein

Cherl-Ho Lee
Department Food Technology, Korea University, Seoul, Korea

서 론

앞으로 예견되는 세계의 식량난, 특히 단백질 자원의 고갈에 대비하기 위한 여러가지 방안 중에 미생물의 단세포 단백질(Single-Cell Protein, SCP)은 가장 유망한 단백질 자원으로 간주되고 있으며, 이의 산업적 생산을 위한 연구는 지난 20여년 동안 꾸준히 진행되어 왔다. 1967년과 1974년 두 차례에 결쳐 미국 MIT 공과대학에서 개최된 Single-Cell Protein Conference를 계기로 이 때까지 연구되어 온 유용 미생물의 증식, 발효기술과 영양학적인 연구결과가 집대성된 바 있다[1].

단세포 단백질의 이용 방법은 크게 두가지로 나누어 동물의 사료로 사용하여 간접적인 단백질 자원으로 이용하는 것과, 직접 인류의 식품에 사용하는 방법이 있다. 사료용 단세포 단백질의 생산은 소련을 비롯한 동구의 여러나라에서 이미 크게 산업화되어 있으며 연 백만톤 생산능력을 가진 대단위 공장들이 건설되어 있는 실정이다.

단세포 단백질을 직접 식품에 이용하기 위하여는 무엇보다 먼저 균체 자체의 유동성 여부, 유해물질의 혼입 여부 및 구성 성분의 안전성에 관한 시험이 요구된다. 특히 n-paraffin계의 탄화수소를 배지로 사용할 경우 균체에 혼입될 수 있는 불순물과 기타 발암 물질에 대한 안전성은 오랫동안 단세포 단백질의 식량 자원화를 저해하는 요인이 되어 왔다. 1977년 이태리의 Milan에서 열린 PAG Symposium on Single-Cell Protein Products for animal and human feeding에서는 이러한 안전성 문제가 집중적으로 토의되었다. 이 심포지움에서 얻어진 결론은 탄화수소를 기질로하여 증식된 미생물에서 검출되는 기수의 탄소수를 가진 지방산과 배지에서 혼입되는 n-paraffin은 공히 인체의 대사과정에서 소화 이용될 수 있음이 판명되었다[2]. 이 밖에 단세포 단백질을 식품의 주요 단백질 공급원으로 사용할 때에는 과량의 RNA가 섭취 될 수 있으며 이로 인하여 혈액내의 Uric acid 농도가 높아져 신경통의 일종인 Gout를 일으키게 되는데 이러한 증세를 막기 위하여 성인 기준 1일 RNA 섭취량 2g 이하로 유지하도록 권장되고 있다[3].

이러한 일련의 연구 결과, 단세포 단백질의 안전성은 일반적으로 인정되고 있으나 아직도 이 단백질 자원의 식품이용은 그 초보단계에서 벗어나지 못하고 있다. 그 중요한 요인으로 경제성을 들 수 있는데, 현재 단세포 단백질의 생산가격은 대두 단백질에 비교하여 높은 실정이다. 이러한 상황은 앞으로 급격한 기술 혁신이 일어나든지 아니면 인구의 증가로 인하여 지구상의 식량 생산이 그 절대량에서 부족될 때까지 계속될 것으로 보인다. 그러나 현 시점에서 단세포 단백질의 식품이용을 확대할 수 있는 방법은 이 단백질이 가지고 있는 특수한 물리·화학적 기능성을 개발하여 다소 비싼 가격이더라도 그 특수한 기능 때문에 식품에 널리 사용되도록 제품 개발을 하는것이 바람직하다. 이러한 관점에서 단세포 단백질이 가지고 있는 물리·화학적 식품 기능성을 고찰하고 그 개발 가능성을 논하려 한다.

형태에 따른 기능성

단세포 단백질의 기능성은 그 형태 및 구조적 차원에서 아래와 같이 분류할 수 있다.

표 1. 식용 단세포 단백질의 가공형태와 식품 기능성

가공형태	식품기능성
전체세포	수분흡착력, 유지흡착력, 조직향상력, 방향, 증량재.
세포벽물질	팽윤성, 수분흡착력, 증량재
분리단백질	유화성, 점성, 결착성, 조직형성능력 (curd, 방적)
가수분해물질	정미성분 (방향, 고기맛)

(1) 전체 세포의 물리·화학적 기능
(2) 세포벽의 기능
(3) 분리 단백질의 기능
(4) 가수분해 물질의 기능

이들 단세포 물질들이 가질 수 있는 식품 기능성은 다양하며 표 1과 같이 요약될 수 있다.

전체세포로 된 단세포 단백질

전체세포로 된 단세포 단백질은 미생물의 종류에 따라 단백질 함량이 총 건물중량의 40~60% 정도되는 것으로, 첨가된 식품의 단백질 함량을 증가시키는 이 외에 여러가지 물리·화학적 기능을 가지고 있다. 현재 미국 Amoco Co. 에서 생산되는 것은 Torular yeast를 에틸알콜 배지에 증식시킨 후 건조시킨 것으로 Torutein이라는 상품명으로 판매되고 있다. 또한 최근 미국의 Anheuser-Busch Inc. 에서는 맥주 발효 부산물로 얻어지는 효모를 정제, 건조한 것을 Brewers Dried Food yeast라는 이름으로 판매하고 있으며 이들의 식품 기능성이 광범위하게 연구되고 있다. 이들의 식품 기능성으로 중요한 것은 표 2에서 보는 바와 같이 높은 수분 흡착력, 조직 향상력 및 맛의 증진 등을 들 수 있다. 특히 맥주 부산물로부터 얻어지는 건조 효모는 가격이 저렴하여 다른 단백질 원료의 절반 가격으로 구입이 가능하다고 한다[4]. 건조효모의 첨가량은 식품의 종류에 따라 원료의 3~10%까지 사용되고 있다.

세포벽 분리물질

표 2. 식용 건조효모의 기능성[4]

기능성	능력	첨가식품예(첨가량%)
수분흡착력	330%	빵류(3~10%)
유지흡착력	100%	햄버거(5%)튀김류(3%)
조직향상력	탄력성증가	면류(9%)
방 향 성	고깃맛	육제품(3~5%)

단세포 단백질을 전체세포의 형태로 식품에 사용할 때에는 세포막으로 보호되어 있기 때문에 세포내의 영양물질의 소화 흡수가 용이하지 못하며 세포 내용물질들의 특수기능을 기대할 수 없다. 그러므로 세포벽을 파괴하여 그 내용물질을 추출·정제 함으로써 이용도를 높일 수 있다. 세포벽을 파괴하여 세포 내용물질을 추출하는 방법은 크게 나누어 아래의 네가지 방법을 들 수 있다.

(1) 자기소화법 (Autolysis)
(2) 세포벽 분해 효소 (lytic enzyme)의 이용
(3) 산·알카리에 의한 가수분해
(4) 기계적 힘에 의한 파괴

이 외에도 최근 여러가지 방법이 연구되고 있으며 그 중 특기할 만한 것은 열에 민감한 세포벽 분해 변이종 효모의 개발이다. 이것은 현재 MIT 연구팀이 진행하고 있는 과제로서 25°C에서 배양된 *Saccharomyces cerevisiae*의 변이종을 37°C로 Heat shock를 주면 자발적인 세포벽 분해가 일어나는 것이다. 그러나 아직 이 방법은 효모의 연령, 최적농도 등에서 더 연구되어야 할 문제점이 많이 남아있다[5].

가수분해 물질

단세포 단백질의 가수분해 물질 중 특히 중요한 것은 yeast extract이며 이것은 고깃맛과 유사한 방향과 맛을 내는 정미물질로 건조스프, 육가공 제품의 원료로 식품에 널리 사용되고 있다. 조미료로서 yeast extract는 고가의 제품으로 현재 단세포 단백질의 이용면에서 가장 경제성이 높고 산업화될 수 있는 품목이다.

자기소화법은 효모의 생육은 정지되나 자체내의 효소작용은 활성을 잃지 않는 조건에서 일정시간 처리함으로써 세포벽 뿐만 아니라 내용물질까지 가수분해되어 유리아미노산, 핵산 등의 정미성분을 형성케 하는 방법이다[6]. 여기에 작용하는 주요 효소는 β-glucanase, protease 등으로 이들 효소를 반응조에 첨가하여 자기소화 반응을 촉진시킬 수 있다[7]. 효모의 자기소화 반응에 가장 많이 쓰이는 방법은 효모현탁액을 효소의 활성이 최고치에 도달하는 온도 40~60°C에서 2~3일간 항온 보관하는 것이다. 朴은[8] 빵 효모의 자기소화 방법에 관한 연구에서 효모의 연령이 대수적 성장기일 때 가장 활발한 자기소화가 일어났으며 식염, 알콜 등의 plasmolyzer의 첨가와 반응조의 교반은 자기소화 반응을 2~4배 촉진시킴을 발견하였다. 효모의 자기소화 정도, 첨가물의 종류 등을 조절함으로써 여러

가지 맛과 염도를 가진 제품을 만들 수 있으며 농축을 조절하여 paste 나 분말의 형태로 만들 수 있다.

기계적 분해물질

기계적 힘에 의한 세포벽의 파괴법은 다른 방법과 달리 세포 내용물의 원형을 거의 손상함이 없이 분리할 수 있는 이점이 있으며 이 방법으로 세포벽 물질과 농축 단백질을 분리할 수 있다.

표 3은 제빵용 효모를 기계적 분해를 하였을 때 각 분획에서 얻어지는 양을 나타내고 있다[9].

표 3. 효모의 세포벽 분리 물질의 수율[9]

수율(총 효모의 중량 %)

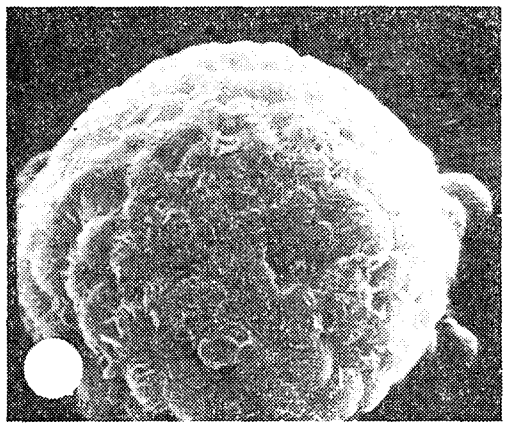
분획	건물량	질소	RNA	아미노산
세포벽 물질	18	14	10	12
농축 단백질	55	60	12	70
단백질 침전시 상등액	27	26	78	18

Tsang 등은 기계적 힘에 의한 세포벽 파괴와 알카리 가수분해를 병행함으로써 건조 효모 중의 단백질 90% 이상을 추출해낼 수 있었다[10].

단세포 단백질의 형태와 물성과의 관계

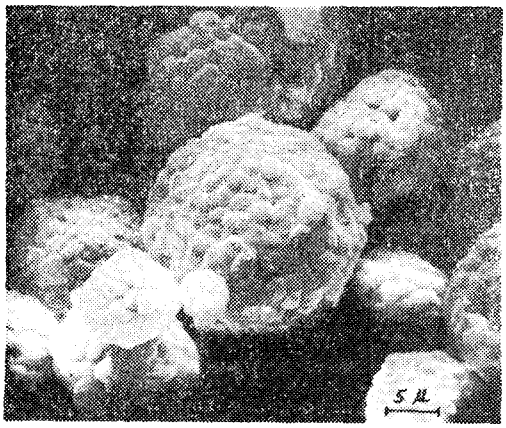
단세포 단백질의 물리적 성질 특히 수용액 중에서의 유체 변형성은 단세포 단백질의 형태와 구조에 따라 크게 좌우된다. 단세포 단백질의 형태와 구조는 Biomass 의 수확, 건조 방법 등에 의하여 결정되며 가수분해, 세포벽 파괴와 같은 이차 가공 중에 그 구조가 변화하게 된다.

Lee 등[11]은 British Petrolium 에서 생산된 *Candida lipolytica* 의 분무 건조된 효모의 형태와 물성에 관하여 연구하였다. Candida 효모를 수확 후 분무 건조하면 그림 1 에서 보는 바와 같이 수백개의 효모 세포가 모인 구형의 덩어리를 형성하며 그 내부에 동공을 갖는 분무 건조물의 특징적인 형태를 가지게 된다. 이러한 형태는 수용액 중에서 그대로 유지되나 0.1N—NaOH 용액 중에서는 일부 세포가 떨어져 나가고 그 표면이 물에 불린 것과 같은 형태가 된다. 그림 2 는 Scanning Electron Microscope (SEM) 으로 본 알카리처리된 효모 덩어리의 표면을 보여주고 있다.

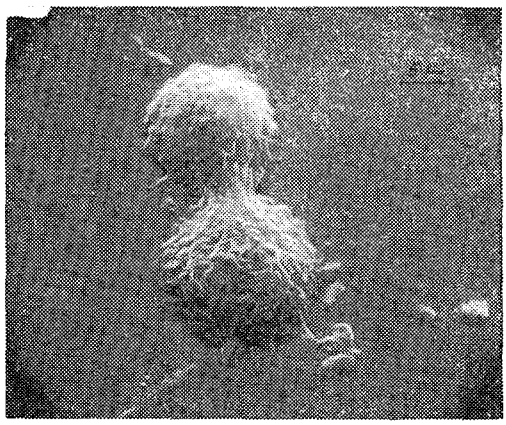


〈그림 2〉 SEM 으로 본 알카리 처리된 건조 효모의 형태 (0,1 N-NaOH, 25°C, 1 시간)

알카리에 의한 세포벽 표면의 변화는 세포 외벽의 manan 층이 알카리에 의하여 선택적으로 가수



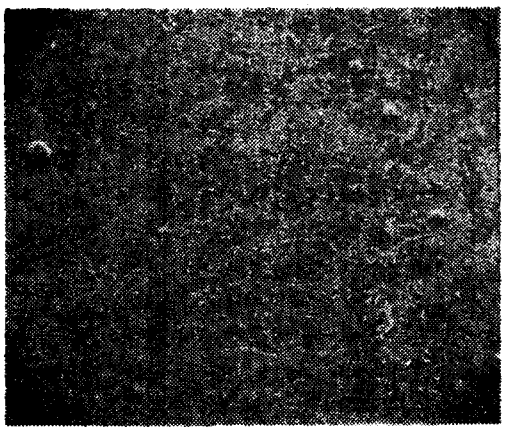
〈그림 1〉 SEM 으로 본 분무 건조 효모의 형태



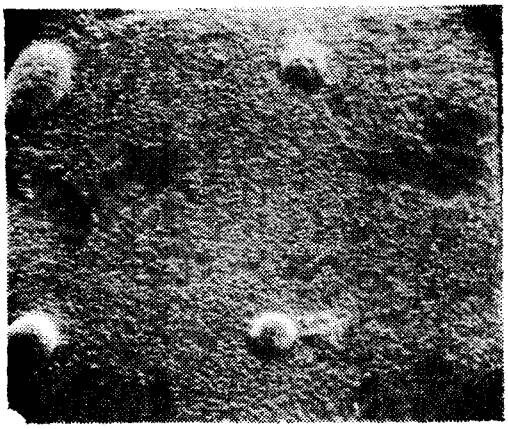
〈그림 3〉 SEM 으로 본 산 처리된 건조효모의 형태 (6N-HCl, 55°C, 1 시간)

분해되었음을 보여주고 있다. 건조효모는 산 처리에 의하여 비선택적 가수분해를 일으키며 가수분해 효과는 산의 농도가 높을수록 또한 반응온도가 높을수록 현저히 나타난다[11]. 그림 3은 건조효모를 6N-HCl 용액에서 55°C로 1시간 동안 처리했을 때의 형태를 보여주고 있다. 구형의 건조효모 덩어리가 녹아버린 듯한 형태를 볼 수 있으며 분리된 개개의 세포들의 흔적도 많지 않다.

건조효모의 덩어리는 고압 균질화에 의하여 개개의 세포로 분리될 수 있으며 그림 4와 5는 서로 다른 용매에서 균질화된 건조효모의 형태를 보여주고 있다.



〈그림 4〉 수용액 중에서 균질화된 건조효모(9000 psi, 5회 반복)



〈그림 5〉 0.1N-NaOH 용액 중에서 균질화된 건조효모(9000psi, 5회 반복)

0.1N-NaOH 용액에서 균질화된 효모의 세포는 수용액에서 균질화된 것보다 주위에 내용물이 많이 유출된 것이 보이며 세포 자체는 납작한 형태를 보이고 있다.

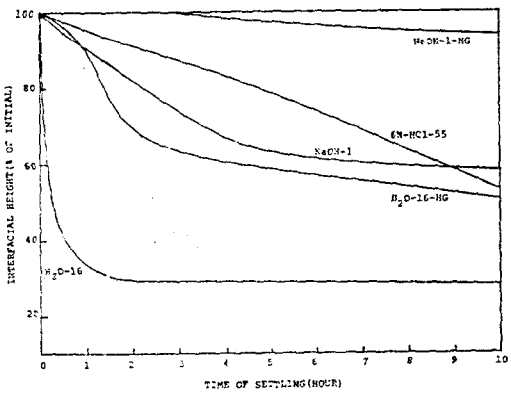
이상과 같은 형태의 변화는 건조효모의 분산 안정성(dispersion stability)과 유체 변형성에 직접적인 영향을 주게된다. 그림 6은 그림 1~5까지에서 보인 다섯가지 처리에 의한 건조효모 현탁액의 침강속도를 나타내고 있다.

건조효모의 덩어리로 존재하는 수용액 중의 효모는 정치 1시간 이내에 거의 완전히 침전되어 분리되나 수용액 중에서 균질화되어 개개의 세포로 존재하는 분산용액은 최초 두시간 동안 다소 빠르게 침강하다가 분리층 높이 60% 수준에서 서서히 침강하며 침전층의 높이도 균질화하지 않은 것보다 2배 이상이 된다. 0.1N-NaOH 용액에 분산된 것은 더욱 서서히 침강하며 6N-HCl에 가수분해된 것은 아주 완만히 침전하며 시간의 경과에 따라 침전속도의 변곡점을 나타내지 않는 것이 특징이다. 알카리 용액에서 균질화된 것은 정치 3시간 동안 안정한 분산상태를 보였으며 상당히 안정한 분산용액을 만들 수 있음을 알 수 있다.

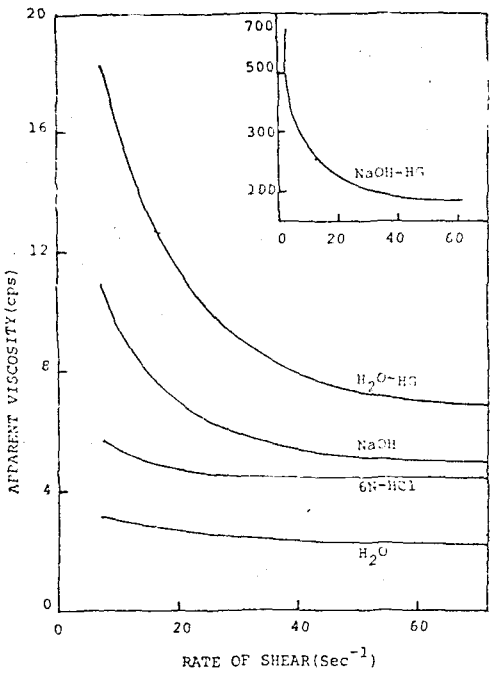
동일한 효모의 농도에서 효모의 덩어리가 적어지면 적어질수록, 또한 세포벽에 손상이 크면 클수록 점성이 커짐을 알 수 있다. 효모의 분산용액은 그 점성이 커질수록 Newtonian flow에서 벗어나 Pseudoplastic 액성을 가지게 된다.

분리·농축 단백질의 기능성

단세포 단백질의 단백질 부분 만을 분리·농축하



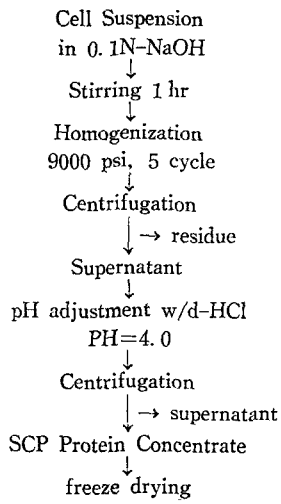
〈그림 6〉 여러가지 처리에 의한 건조효모 분산용액의 침전성

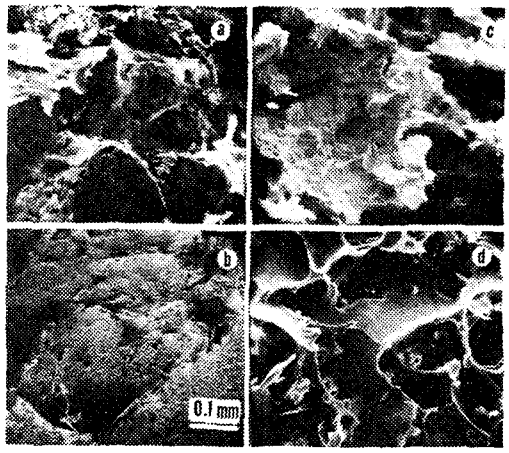


〈그림 7〉 여러가지 처리에 의한 건조효모 분산용액의 점성

는 기술은 아직 초보 단계에 있으며 그 공업적 생산이 실현되지 못하고 있다. Tsang 등[10]의 연구에 의하면 그림 8과 같은 공정으로 알카리 용액에 분산시킨 효모를 고압 균질화함으로써 90% 이상의 세포 단백질을 추출할 수 있으나, 이 추출된 단백질을 침전·농축시키는 것이 용이하지 않음이 알려

〈그림 8〉 분리·농축 단세포 단백질의 제조 공정





〈그림 9〉 분리·농축 단세포 단백질로 만든 curd의 SEM 미세구조

져있다. 이것은 추출 과정에서 단백질 분자의 과다한 손상으로 침전이 어려워지는 것으로 판단된다.

이들 분리·농축된 단백질은 70°C 부근에서 열에 의한 응고를 일으키며 pH 4.0 부근에서 물에 대한 최저 용해도를 나타낸다[12]. 분리·농축 단백질은 또한 Ca^{++}에 의하여 응고반응을 일으키며 대두단백질이나 우유단백질과 같이 Curd를 형성할 수 있다[12]. 그림 9는 분리농축 단백질을 등전점에서 응고시킨 것과 $CaCl_2$로 응고시킨 curd의 미세구조를 SEM으로 비교한 것이다. Glutaraldehyde(GA)로 고정한 것은 냉동건조 중의 미세구조 변화를 비교적 적게 하기 위한 것이다. 냉동건조 중의 미세구조 변화는 등전점 침전에 의한 것보다 Ca^{++}으로 침전시킨 경우가 더 크게 나타나고 있다.

이들 서로 다른 미세구조를 가진 curd의 물리적

표 4. 분리·농축 단세포 단백질로부터 얻어진 응고물의 물리적 특성

검체	수분흡착력 (gH_2O/g protein)	굳기 (kg force)	탄력성
신선한 curd			
YPC-I	3.3	1.9	1.7
YPC-Ca	4.2	0.8	1.6
냉동-해빙 curd			
YPC-I	2.6	3.1	1.8
YPC-Ca	2.7	2.8	2.3

1. YPC=Yeast protein Concentrate, I=등전점침전 Ca=Ca^{++}침전

특성을 비교하여 보면 표4와 같다. 응고물의 수분흡착력은 냉동-해빙 후 크게 감소되며 굳기(hardness)는 냉동-해빙 후 크게 증가된다. 냉동-해빙 후 벌집과 같은 규칙적인 미세구조를 갖게 되는 Ca^{++}침전에 의한 curd는 특히 높은 탄력성(springiness)를 가짐을 알 수 있다.

분리·농축된 단세포 단백질은 다른 종류의 단백질과 같이 섬유상 조직 형성 능력(fiber forming property)을 갖고 있으나 단세포 단백질 섬유는 다른 단백질 섬유에 비교하여 인장강도(Tensile serength)가 약하다. 섬유상 조직을 형성하기 위한 단백질 분자의 최소 크기는 약 10,000 이상이 됨이 이상적이나 Lindblom에 의하면 알카리 추출법에 의하여 효모에서 분리·농축된 단백질의 상당량이 분자량 5,000이하임이 밝혀졌다[14]. 단세포 단백질의 방적능(spinnability)를 증진시키기 위하여 다른 고분자 hydrocolloid(carageenan, alginate, CMC 등)를 첨가하거나 Bicomponent fiber를 형성시키는 방법 등이 연구되고 있다[15,16].

결 론

식용 단세포 단백질의 이용은 아직 초보단계에 있으나 이들의 기능성을 개발하여 그 경제성을 높임으로써 비로소 널리 보급될 수 있다. 건조효모의 수분 흡착력, 유지 흡착력, 조직 향상력, 정미·방향성 등은 빵류, 면류, 육류, 과자류에 그 이용도가 앞으로 확대될 것으로 보인다. 효모의 가수분해 물질인 yeast extract의 우수한 고깃맛은 여러가지 인스탄트 식품 및 조미료, 스프 등의 원료로서 각광을 받고 있다. 분리·농축 단세포 단백질의 기능성 개발은 앞으로의 식품과학에 주어진 과제로서 단세포 단백질을 식량 자원화하는데 결정적인 역할을 하게 될 것이다.

참 고 문 헌

1) Tannenbaum, S.R. and Wang, D.I.C.: *Single-cell protein* Ⅱ, The MIT Press, Mass, U.S.A., (1975).
2) The United Nations University: *PAG Symposium on Single-Cell protein Products for animal and human feeding*, *Food and Nutrition Bulletin*, **1** (1), 29 (1978).
3) Edozien, J. Co, udo, U.U., Young, V.R. and Scrimshaw, N.S.: Nature, **228**, 180 (1970).
4) Anheuser-Busch, Inc.: *Whiter, milder-flavored brewers yeast*, circle 893, st. Louis, Mo. U.S.A., (1979).
5) Sinskey, A.J., Boudrant, J., Lee, C.H., De Angelo, J., Miyasaka, Y., Rha, C.K., and Tannenbaum, S.R.: *presented in US-USSR Joint Meeting on Single-Cell Protein in Moscow*, June (1977).
6) Reed, G. and peppler, H.J.: *Yeast Technology*, AVI, Westport Connecticut, U.S.A., (1973).
7) Rombouts, F.M. and phaff, H.J.: *Eur, J. Biochem*, **69**, 109 (1976).
8) 朴章烈 : 고려대학교 식품공학과 석사학위논문 (1980).
9) Hedenskog, G. and Morgen, H.: *Biotech, Bioeng.*, **16**., 129 (1974).
10) Tsang, S.K., Lee, C.H., Rha, C.K.: *J. Food Sci.*, **44** (1), 97 (1979).
11) Lee, C.H., Tsang, S.K., urakabe, R., Rha, C.K.: *Biotech, Bioeng.*, **21** (1), 1 (1979).
12) Huang, F. and Rha, C.K.: *J. Food Sci.*, **36**, 1131 (1971).
13) Tsintsadze, T.D., Lee, C.H. and Rha, C.K.: *J. Food Sci.*, **43** (2), 625 (1978).
14) Lindblom, M.: *Biotech, Bioeng.*, **16**, 1495 (1974).
15) Rha, C.K.: *Utilization of Single-Cell protein for human food., in Single-cell protein* Ⅱ, ed. by Tannenbaum, S.R. and Wang, D.I.C. The MIT press, 587 (1975).
16) Kamath, J.A.: MIT, Cambridge, Mass, U.S.A., (1978).