

*Lactobacillus acidophilus*와 *Propionibacterium freudenreichii* 로 혼합 배양한 Whey 발효물이 빵의 특성에 미치는 영향

† 윤 미 숙

서울보건대학 식품가공과

Fermented Whey Produced by Mixed Culture of *Lactobacillus acidophilus* and *Propionibacterium freudenreichii* : Effect on Quality Properties of Bread

† Mi-Suk Yun

Dept. of Food Technology, Seoul Health College, 121, Yongjidong, Seongnamsi, 461-250, Korea

Abstract

A mixed *Lactobacillus acidophilus* and *Propionibacterium freudenreichii* was cultured in the 10% whey broth with 0.5% yeast extract for 4 days. Viable cell numbers of *Lactobacillus acidophilus* and *Propionibacterium freudenreichii* were 2.4×10^9 cfu/mL after 36 hr and 9.42×10^8 cfu/mL after 96 hr. Consumption rate of lactose during fermentation was 87.5%. Propionic acid was produced 18.5 g/L and acetic acid was produced 4.8 g/L, as a result of that, comparison of propionic acid and acetic acid was 3.8:1. Volume of white pan bread was decreased as added amount of whey was increased. Hardness of white pan bread was decreased as added amount of whey was increased. Preservation period of white pan bread with 10% whey fermented product elongated 2 day compared to control.

Key words : propionic acid, white pan bread, preservation period

서 론

빵은 밀가루를 주재료로 하여 효모, 설탕, 유지 및 기타 곡물을 첨가하여 만든 것으로 탄수화물이 가장 많이 함유되어 있으며, 이외에 단백질과 유지가 함유되어 있다. 이러한 빵은 보존 동안 공기 중에 부유하고 있는 곰팡이가 오염되어 증식함으로써 부패되어 먹을 수 없게 된다¹⁾. 곰팡이 증식을 억제하기 위하여 수분활성도를 낮추거나²⁾, 약산을 사용하거나, 보존료로 sodium propionate와 calcium propionate를 식품첨가물³⁾로 사용하고 있다. 그러나 빵에 합성보존료의 사

용은 소비자가 기피하고 있어 미생물 발효로 제조한 천연 보존료 사용이 증가하고 있는 실정이다.

보존료인 프로피온산은 화학적 합성방법인 액상의 propane과 propionaldehyde를 산화시켜 만들었으나, 점차 미생물 발효를 이용한 생합성으로 만들고 있다. 이 발효 방법은 *Propionibacterium*을 이용하는데 *Propionibacterium*은 포도당과 유당을 분해하여 propionate, acetate, CO₂ 및 기타 산을 생성한다.⁴⁾ 미생물 발효법의 프로피온산 생산에 이용되는 기질로는 새말풀⁵⁾, 유청⁶⁾, 당밀⁷⁾ 등이 있다. 근래에는 치즈 부산물인 sweet, acid, salt 유청을 이용해 에탄올, 젖산, SCP(single cell protein)

† Corresponding author : Mi-Suk Yun, Dept. of Food Technology, Seoul Health College, 121, Yongjidong, Seongnamsi, 461-250, Korea.

Tel : +82-31-740-7141, E-mail : yunms@sh.ac.kr

등의 생산에 많은 관심을 가지게 되었다. 프로피온산을 생산하는 생물 공학적 방법은 부수적으로 bacteriocin을 생산하기 때문에 화학적 방법으로 만드는 것보다 장점이 있다⁸⁾. 유청을 발효하는 프로피온산 생산에서 *Propionibacterium*을 단독으로 발효시키는 것보다는 유산균으로 먼저 유당을 젖산으로 전환하고 전환된 젖산을 프로피온산으로 전환하는 것이 효과적이다.^{9,10)}

따라서 본 연구에서는 유청배지에 *Lactobacillus acidophilus*와 *Propionibacterium freudenreichii*를 혼합 배양하여 생성한 sodium propionate를 식빵에 첨가하여 빵의 품질 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 사용균주

한국미생물보존센터에서 분양받은 *Lactobacillus acidophilus*와 *Propionibacterium freudenreichii*을 발효용 균주로 하였다.

2. Starter Culture 배양

MRS 배지 55 g을 증류수 1,000 mL에 10분간 용해한 후 cap tube에 10 mL씩 분주하여 고압증기멸균(121°C에서 15분) 하였다. 멸균 후 MRS broth 2 mL를 *L. acidophilus* 종균에 넣어 희석한 후 1 mL 취하여 cap tube 2개에 접종하였다. 35°C의 인큐베이터에서 16시간 배양하여 균수가 $1 \sim 2 \times 10^7$ cfu/mL 되도록 하였으며 계대배양을 2회 더 하였다. 별도로 RCM (reinforced clostridial medium, Oxoid CM 149) 40 g을 취하여 증류수 1,000 mL에 10분간 용해한 후 cap tube에 10 mL씩 분주하여 고압증기멸균(121°C에서 15분) 하였다. 멸균 후 RCM 2 mL를 *P. freudenreichii* 종균에 넣어 희석한 후 1 mL 취하여 cap tube 2개에 접종하였다. 35°C의 인큐베이터에서 3일간 배양하여 균수가 $1 \sim 2 \times 10^7$ cfu/mL 되도록 하였으며 계대배양을 2회 더 하였다.

3. 유청 배지

탄수화물 63~75%, 단백질 11.0%, 수분 5.0% 이하, 회분, 8.0~8.8%, 산도 0.1~0.16%인 유청분말(Calpro Co., Ltd., USA) 100 g과 yeast extract 5 g을 증류수 1,000 mL에 희석하여 pH를 6.5로 조절 후 고압증기멸균(121°C에서 15분)하여 혼합균주용 배지로 하였다.

4. 본 배양 및 유기산 변화

계대배양한 *L. acidophilus*와 *P. freudenreichii*을 유청 배지 1,000 mL에 0.5%씩 접종하여 85 rpm의 35°C의 인큐베이터에서 회분식으로 4일간 배양하면서 12시간 간격으로 생균수, 유당, 프로피온산, 초산 등의 변화를 측정하였다. 배양하는 동안 12시간 간격으로 5M NaOH로 pH를 6.5로 조절하였으며 *L. acidophilus*은 MRS 배지에, *P. freudenreichii*는 RCM에 혐기적으로 배양하여 표준평판법¹¹⁾으로 생균수를 측정하였고, 배양 중 소모되는 유당과 생성되는 프로피온산, 초산의 양은 HPLC(LC1100 Series, Hewlett Packard Co., Ltd., USA)로 측정하였다. 유기산 측정용 시료를 12,000 rpm의 원심분리기(Supra21K, Hanil Co., Korea)에서 원심분리한 후 상등액을 취하여 millipore membrane filter(pore size 0.45 μ m)로 여과하였다. Aminex HPX-87H ion exclusion type(L300 mm \times 7.8 mm, USA)의 column을 사용하였으며 이동상은 35°C에서 5 mM H₂SO₄ 용액으로 0.6 mL/min의 속도로 흘러서 215 nm에서 ADC(RI Detector)로 검출하였다.

5. 식빵 제조

식빵용 재료로 밀가루는 단백질 12.5%, 회분 0.45%, 수분 13.5%의 강력 1등급(대한제분, 한국), 설탕은 순도 99.0%의 정백당(삼양사, 한국), 소금은 순도 99% (한주소금, 한국), SSL(sodium stearoyl lactylate, American Ingredients Co., Ltd., USA), 쇼트닝(서울하인즈, 한국), 생효모(조흥화학, 한국) 등을 사용하였으며 배합률은 Table 1과 같다. 배양한 유청 발효물을 2배 농축 후 일정량 취하여 식빵 제조에 첨가하였다. 식빵의 제조는 AACC 10-10b¹²⁾ 방법을 변형하여 쇼트닝을 제외한 재료를 반죽기(Hobart A200, Chausung, Taipei)에 넣고 저속 3분 중속 2분간 믹싱 후 쇼트닝을 넣고 저속 3분 중속 15분간 믹싱하였으며 반죽온도는 $27 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 조절하였다. 반죽을 배합기에서 꺼내어 온도 $27 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 75%의 발효기(Fresh proofer, Daeyung Bakery Machinery Co., Ltd., Seoul, Korea)에서 2시간 발효 후 180 g씩 분할하였다. 분할한 반죽을 등글리기하여 상온에서 15분간 중간발효 후 성형하여 식빵 팬에 3덩이를 팬닝하였다. 팬닝한 반죽을 온도 38°C , 상대습도 85%의 발효기에서 2차 발효하여 온도 200°C 의 오븐(FDO-7104, Daeyung Bakery Machinery Co., Ltd., Seoul, Korea)에서 30분간 구워 상온에서 2시간 냉각 후 비닐 포장지에 포장하여 시료로 사용하였다.

Table 1. Formulas for white pan bread (Unit : g)

Ingredients	Control	A	B	C
Bread flour	1000	1000	1000	1000
Water	630	600	580	560
Fresh yeast	20	20	20	20
Salt	20	20	20	20
Sugar	60	60	60	60
Shortening	50	50	50	50
Dough improver	10	10	10	10
Whey fermented	-	50	70	100
Total	1,790	1,810	1,810	1,820

6. 식빵의 비용적

유청 발효물의 첨가량을 달리하여 제조한 식빵을 2시간 냉각 후 종자치환법¹³⁾으로 부피를 측정하였다. 시료당 5개씩 측정하여 최대값과 최소값은 제외하고 3개의 평균값으로 하였다.

7. 식빵의 경도 측정

유청 발효물의 첨가량을 달리하여 제조한 식빵을 2시간 냉각 후 5cm 두께로 잘라 비닐 포장지에 공기가 투과되지 않도록 밀봉 포장하여 상온에 보존하면서 1일 간격으로 경도 변화를 측정하였다. 경도 측정은 Rheometer(CR-200D, Sun Co., Ltd, Tokyo, Japan)를 사용했다. 측정 조건은 table speed 100 mm/min, Chart speed 60 mm/min, Load cell range 1 kg, critical area 314 mm², % deformation 25%로 하였다. 시료당 10개씩을 측정하여 오차범위가 큰 최대값과 최소값은 제외하고 8개를 평균하였다.

8. 식빵의 보존성

유청 발효물의 첨가량을 달리하여 제조한 식빵을 2시간 냉각 후 2cm 두께로 잘라 비닐 포장지에 20개씩 밀봉 포장하여 32℃ 인큐베이터에 보존하면서 1일 간격으로 곰팡이 발생 빈도를 관찰하였다.

결과 및 고찰

1. 생균수 변화

10% 유청배지에서 혼합균주 *L. acidophilus*와 *P. freudenreichii*의 생균수 변화를 12시간 단위로 4일간 측정한 결과는 Fig. 1과 같다. *L. acidophilus*는 접종 후

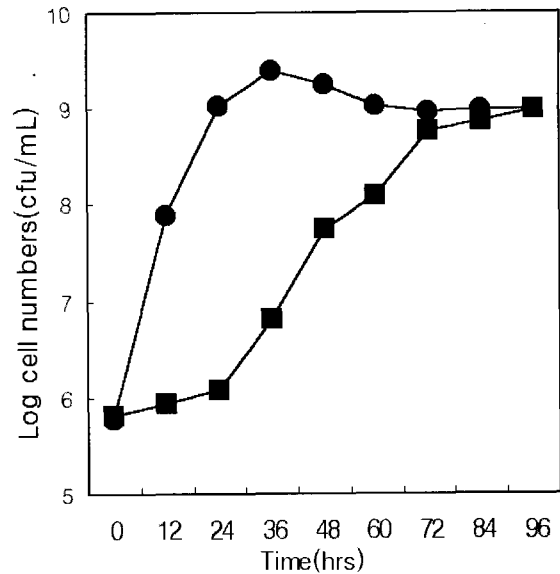


Fig. 1. Changes of log cell numbers in the mixed culture of *L. acidophilus* and *P. freudenreichii*.

● : *L. acidophilus*, ■ : *P. freudenreichii*.

5.8×10^5 cfu/mL의 균수가 급격히 증가하여 배양 36시간에 2.4×10^9 cfu/mL로 최고값을 나타냈고 이후에는 정지기 상태를 유지하여 대수기는 36시간까지로 나타났다. Lee¹⁴⁾는 *L. acidophilus*를 12% whey broth에 배양 시 배양 24시간까지는 균수가 급격히 증가하였고 그 이후는 정지기라는 연구와 유사한 결과를 나타냈다. 또한 Lin 등의¹⁵⁾ 고압증기 멸균한 10% 탈지분유에 *L. acidophilus*, *L. bulgaricus*를 접종하여 37℃에서 배양 시 대수기 정점에서의 균수가 $10^9 \sim 10^{10}$ cfu/mL라고 한 것보다도 유사한 결과를 나타냈다. 한편 *P. freudenreichii*의 생균수 변화는 접종 후 6.5×10^5 cfu/mL의 균수가 배양 24시간까지는 증가율이 작았으나 24시간 이후에는 증가율이 커 배양 84시간에 7.42×10^8 cfu/mL로 24시간부터 84시간까지가 대수기로 나타났다. Elizabeth 등¹⁶⁾이 보고한 *P. freudenreichii* var. *shermanii*는 배양 40-80시간에 가장 활발하여 이때를 대수기라고 한 것과 동일한 결과를 나타냈다.

*L. acidophilus*와 *P. freudenreichii*는 lactose를 기질로 한 혼합 배양시 *L. acidophilus*의 증식이 빠르고 *P. freudenreichii*의 증식이 느리게 나타난 것은 *P. freudenreichii*의 증식이 느린 특성뿐만 아니라, Inn 등은 포도당을 기질로 하여 *L. plantarum*과 *P. shermanii*을 혼합 배양하면 먼저 *L. plantarum*이 포도당을 젖산으로 전환하고 *P. shermanii*는 *L. plantarum*이 생성한 젖산을 프로피온산으로 전환한다고 한 연구 결과¹⁷⁾에

기인된다고 생각된다.

2. 유당, 프로피온산 및 초산의 변화

10% 유청배지에서 혼합균주 *L. acidophilus*와 *P. freudenreichii*에 의한 유당의 소모율 및 프로피온산과 초산의 생성량을 12시간 단위로 HPLC로 4일간 측정 한 결과는 Fig. 2와 같다. 배양 초기 유청 배지의 유당 함량은 48 g/L이었으나 배양 96시간 동안 일정비율로 감소하는 경향을 보여 배양 96시간에는 6 g/L로 87.5%가 소모되었다. 프로피온산의 생성량은 배양 12시간 까지 거의 없었으나 배양 24시간에 1.5 g/L이었고 배양 96시간에 18.5 g/L를 나타냈다. 초산은 배양 96시간 까지 완전한 생성량을 나타냈으며 그 생성량은 배양 96시간에 4.8 g/L를 나타냈다. Elizabeth 등¹⁶⁾은 12% 유청배지에 yeast extract를 1.0% 첨가하여 UHT(ultra high temperature) 살균 후 *L. casei*와 *P. freudenreichii* subsp. *shermanii*를 혼합 배양시 pH를 조절하면서 70시간 발효하였을 때 3% 이상의 프로피온산을 얻었다고 하였는데 본 실험에서는 1.85%로 다소 낮은 수율을 나타냈다. 한편 배양 후기에 프로피온산은 초산 생성량의 3.6~3.8배인 것은 Steven 등¹⁸⁾이 회분식으로 포도당을 기질로 한 *P. acidipropionici*를 배양시 배양 60시간에 프로피온산이 10.2 g/L, 초산이 2.6 g/L 생성하여 그 비

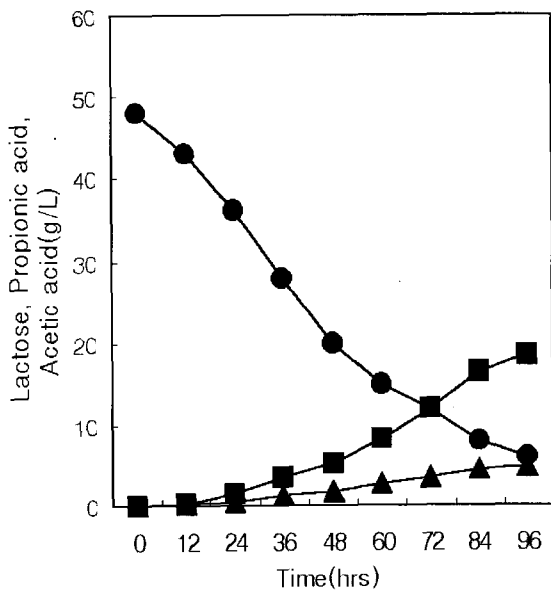


Fig. 2. Lactose utilization and propionic acid and acetic acid production by the mixed culture of *L. acidophilus* and *P. freudenreichii*.

● : Lactose, ■ : Propionic acid, ▲ : Acetic acid

율이 3.9:1인 것과 유사한 결과를 나타냈다.

3. 식빵의 부피

유청 발효물의 첨가량을 달리하여 제조한 식빵을 2시간 냉각 후 종자치환법에 의하여 부피를 측정한 결과는 Fig. 3과 같다. 대조구가 1,950 mL, 5% 첨가한 식빵이 1,948 mL, 7% 첨가한 식빵이 1,940 mL, 10% 첨가한 식빵이 1,930 mL로 대조구와 5% 첨가 시는 부피 차이가 거의 없었으나 발효물의 첨가량이 많을수록 부피 감소가 심하여 10% 첨가하였을 때는 대조구에 비하여 20mL의 부피감소를 나타냈다. 이러한 결과는 프로피온산과 그 염은 빵의 보존료로 곰팡이와 포자형성균의 증식에 저해 효과가 좋고 빵 효모에는 거의 작용하지 않는다고 하였으나¹⁹⁾, 본 실험에서 유청 발효물을 첨가한 빵의 부피가 작은 것은 발효물의 프로피온산염이 효모의 생육에 영향을 주었기 때문으로 생각된다.

4. 식빵의 경도

유청 발효물의 첨가량을 달리하여 제조한 식빵을 2시간 냉각 후 5cm 두께로 잘라 비닐 포장지에 공기가 투과되지 않도록 밀봉 포장하여 1일 간격으로 경도를

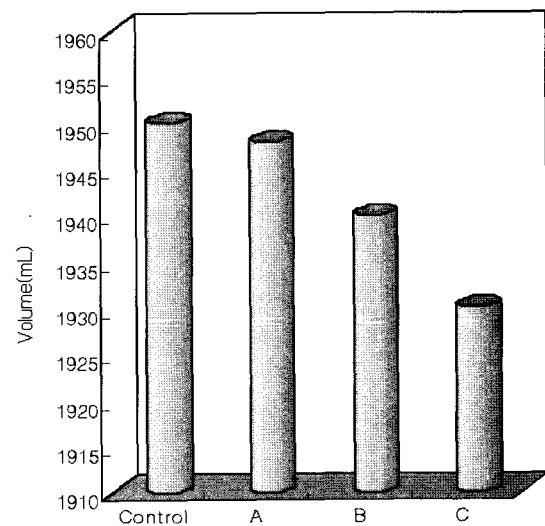


Fig. 3. Effect of whey fermented products on volume of white pan bread.

Control : White pan bread without whey fermented product,
 A : White pan bread with 5% whey fermented product,
 B : White pan bread with 7% whey fermented product,
 C : White pan bread with 10% whey fermented product.

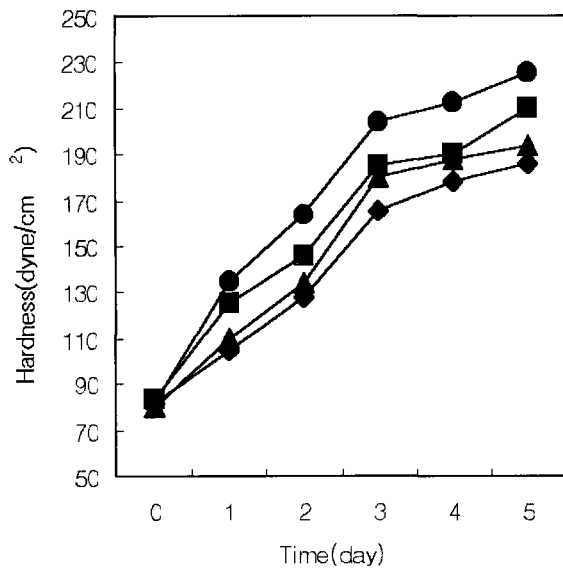


Fig. 4. Effect of whey fermented products on hardness of white pan bread.

● : White pan bread without whey fermented product, ■ : White pan bread with 5% whey fermented product, ▲ : White pan bread with 7% whey fermented product, ◆ : White pan bread with 10% whey fermented product.

측정한 결과는 Fig. 4와 같다. 제품을 제조한 직후의 경도의 발효물의 첨가량에 관계없이 80~83 dyne/cm² 이었으나 보존시간이 경과할수록 경도 값은 증가하였으며, 그 증가 경향은 대조구가 가장 컸고 발효물이 많이 첨가될수록 낮은 경도 값을 나타내 보존 5일째에 대조구가 225 dyne/cm², 5% 첨가시 210 dyne/cm², 7% 첨가시 194 dyne/cm², 10% 첨가시 186 dyne/cm²을 나타냈다. Lee²⁰⁾는 효모와 유산균으로 *L. brevis* L-62, 혼합유산균(CHN-22) 등으로 만든 발효액종을 냉동빵 제조에 첨가하여 경도를 측정된 결과 첨가하지 않은 제품보다 경도 값이 낮아 제품이 부드럽다고 하였고, Cha²¹⁾는 면 제조시 밀가루를 유산균으로 발효하여 얻은 발효액을 첨가하였을 때 유기산의 함량이 많을수록 노화가 지연된다고 하였는데 본 실험에서도 같은 경향을 나타냈다.

5. 식빵의 보존성

유청 발효물의 첨가량을 달리하여 제조한 식빵을 32°C에 보존하면서 1일 간격으로 곰팡이 발생 빈도를 측정된 결과는 Table 2와 같다. 보존 7일 동안 대조구는 20개 중 4일에 8개, 5일에 10개, 6일에 2개로 20개

Table 2. Effect of whey fermented products on preservation period of white pan bread

Treatment	Storage time(day)						
	1	2	3	4	5	6	7
Control	0	0	0	8*	10	2	-
A	0	0	0	7	8	4	1
B	0	0	0	0	5	9	6
C	0	0	0	0	0	0	4

Control : White pan bread without whey fermented product.

A : White pan bread with 5% whey fermented product.

B : White pan bread with 7% whey fermented product.

C : White pan bread with 10% whey fermented product.

* : Numbers of white pan bread contaminated by mold.

전부에 곰팡이가 발생하였고, 유청 발효물을 5% 첨가한 것은 보존 4일에 7개, 5일에 8개, 6일에 4개로 대조구보다 약간의 효과는 있으나 유의적인 차이는 없었고, 유청 발효물을 7% 첨가한 것은 보존 5일에 5개, 6일에 9개, 7일에 6개로 대조구보다 1일의 보존 효과가 있었으며, 유청 발효물을 10% 첨가한 것은 보존 7일에 4개에 곰팡이가 발생하여 대조구보다 2일 이상의 효과가 있는 것으로 나타났다. 유청을 *Propionibacterium*으로 발효시킨 발효물을 빵 제조에 첨가하면 보존기간이 연장되고²²⁾, Zhong 등²³⁾도 유청을 미생물로 발효하여 얻은 발효물을 분무건조하여 제빵에 첨가하였을 때 곰팡이 발생이 억제되어 보존성이 연장되었다고 하였는데, 본 연구에서도 유청 발효물의 첨가가 많을수록 연장효과가 있는 것으로 나타났다.

요 약

10% 유청배지에 *Lactobacillus acidophilus*와 *Propionibacterium freudenreichii*를 혼합 배양할 때 유청 발효물 중의 생균수의 변화, 유당 소모량, 프로피온산과 초산 생성량 등을 측정하였고, 유청 발효물을 식빵 제조에 일정량 첨가하여 식빵의 부피, 조직감, 보존성 등을 분석하였다. 4일 배양동안 *L. acidophilus*의 생균수는 배양 36시간에 2.4×10^9 cfu/mL, *P. freudenreichii*는 배양 96시간에 9.42×10^8 cfu/mL로 최대값을 나타냈고 *L. acidophilus*가 *P. freudenreichii*보다 빠르게 증식하였다. 유당의 소모율은 87.5%이었고, 4일 배양 후 프로피온산은 18.5 g/L, 초산은 4.8 g/L 생성되었으며 그 비율은 3.8:1이었다. 식빵의 부피는 유청 발효물을 많이 첨가

할수록 작았으나 조직감은 유청 발효물이 많이 첨가될수록 낮은 경도 값으로 부드럽게 나타났으며, 보존성은 유청 발효물을 10% 첨가하였을 때 대조구에 비하여 2일 이상의 효과가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Yun, MS. Theory of baking and pastry. Jigumunhwas, Korea, p.121. 2003
2. Lee, JH. Survey of Microorganism Contamination in the Baking Process and Usage of Liquid Sugars for Shelf-Life Development of the Cake. Master's dissertation, Inha Univ., Korea, 1994
3. Mun, BS. Food additives. Suhagsa, Korea, p.104-105. 1998
4. Playne, MJ. Propionic acid and butyric acids. In: Comprehensive Biotechnology, vol. 3. Moo-Young M(ed.) Pergamon Press, New York, USA, p.731-755. 1985
5. Claussen, EC and Gaddy, GL. Fermentation of biomass into acetic and propionic acids with *Propionibacterium acidipropionici*. *Adv. Biotechnol.* 2:63-69. 1978
6. Blanc, P. and Goma, G. Propionic acid and biomass production using continuous ultrafiltration fermentation of whey. *Biotechnol. Lett.* 11(3):189-194. 1989
7. Paik, HD and Glatz, BA. Propionic acid production by immobilized cells of a propionate-tolerant strain of *Propionibacterium acidipropionici*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 42:22-27. 1994
8. Hettinga, DH and Reinbold, GW. The propionic acid bacteria-A review II. Metabolism. *J. Milk Food Technol.* 35(6):358-372. 1972
9. Sherman, JM. Propionic acid fermentation by the use of mixed strains of propionic bacteria. US Pat. 1,865,146. 1932
10. Willson, P. Propionic acid fermentation. US Pat. 1,898,326. 1933
11. Min, KC, Shim, UM., Lee, JU, Cho, SG, Kim, YG, Son, GM., Son, WS and Cho, NC. Laboratory of food microbiology. Kwangmunkag, Korea, p.199-202. 2000
12. A.A.C.C. Approved methods of the American association of cereal chemists, Minnesota, USA, 10-10b. 1991
13. Ronald, HZ. Bread lecture, American Institute of Baking. Manhattan, USA, p.1301-1303. 1993
14. Lee, JH. Effect of Whey Ferment Cultured by *Propionibacterium freudenreichii* KCCM 31227 on Rheological Properties of Dough and Quality Characteristics of White Pan Bread. Ph. D Dissertation, Konkuk Univ., Korea. 2004
15. Lin, MY and Young, CM. Folate levels in cultures of lactic acid bacteria. *Int. Dairy J.* 10:409-413. 2000
16. Elizabeth, AB, Thomas, MA, Nelson, G and Robert, DS. Propionic acid fermentation of ultra-high-temperature sterilized whey using mono- and mixed cultures. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 25:434-437.1987
17. Inn, HL, Fredrickson, AG and Tsuchiya, HM. Dynamics of mixed culture of *Lactobacillus plantarum* and *P. shermanii*. *Biotechnol. Bioeng.* 18:513-526. 1976
18. Steven, AW and Bonita, AG. Propionic acid production by a propionic acid-tolerant strain of *Propionibacterium acidipropionici* in batch and semi-continuous fermentation. *Appl. Environ. Microbiol.* 57(10):2821-2828. 1991
19. George, JB. Basic food microbiology, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, USA p.604-605. 1989
20. Lee, MG. Quality characteristics of frozen dough bread prepared with flour ferments containing wheat flour Koji and lactic acid bacteria. Ph. D. dissertation, Konkuk Univ., Korea. 2003
21. Cha, UJ. A study on properties of the flour-ferment with *Lactobacillus acidophilus* and the quality of noodles using the ferment. Ph. D. dissertation, Konkuk Univ., Korea. 2003
22. Herting, DC. and Drury, EE. Antifungal activity of volatile fatty acids on grains. *Cereal Chem.* 51:74-83. 1974
23. Zhong, G, Bonita, AG and Charles, EG. Propionic acid production by extractive fermentation. Solvent considerations. *Biotechnol. Bioeng.* 57(4):454-461. 1998

(2005년 3월 21일 접수; 2005년 5월 23일 채택)