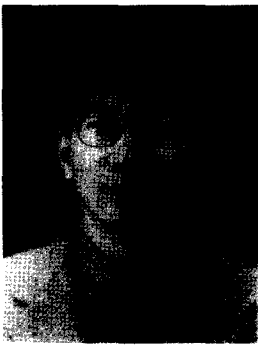


맥주의 향과 이취 성분에 대하여



박 승 국

(경희대학교 생명과학부 식품공학과)

1. 서론

요즘 국산 맥주의 품질은 예전보다 많이 향상되었으며, 다양하고 우수한 품질의 맥주가 외국으로부터 계속적으로 수입되고 있다. 그리고, 국내에서도 microbrewery에서 생산되는 여러 종류의 맥주가 소비자들로부터 좋은 반응을 얻고 있으므로 맥주에서 가장 중요한 요소인 향에 대한 이해가 매우 중요한 시기라고 볼 수 있다. 즉, 다양한 향기 특징을 갖고 있는 고품질의 맥주를 제조하려면 무엇보다도 맥주의 향에 대해서 과학적이고 체계적인 이해가 필요하다. 그러면, 품질이 우수한 맥주란 무엇인가? 즉, 맥주의 맛과 향이 좋은 것을 의미한다. 그러나, 고품질의 맥주를 제조할 때에는 좋은 향뿐만 아니라 좋지 않은 향 (이취, off-flavor) 성분이 동시에 존재하는 경우가 종종 있다. 과거에는 이취 성분이 있을 경우에 별로 대수롭지 않게 여기거나 또는 휘발성의 이취 성분을 날려보내는 등의 단순한 방법으로 제거를 하였으나, 소비자들이 요구하는 맥주의 품질기준이 높아짐에 따라서, 발효과정이나 숙성과정에서 가능한 이취가 발생되지 않도록 하여야 하며, 또한 병입 후 유통과정에서도 이취가 발생되지 않도록 노력하는 것이 중요하다. 즉, 병입된 맥주에서 발생하는 이취

■ 目 次 ■

1. 서론
2. 맥주의 일반적인 향기성분
3. 맥주에서 발견되는 이취 성분들
4. 맷음말

문제는 사실상 해결하기가 불가능하므로 병입 전 단계에서 이취의 발생을 예방하거나 최소화하는 것이 매우 중요하다는 의미이다.

최근에도 전 세계 맥주회사의 연구소와 대학의 실험실에서 맥주향에 대한 많은 논문이 발표되고 있고, 과거 수 십년간 맥주향에 대한 많은 연구가 진행된 덕택으로 맥주향에 대한 체계적이고 과학적인 이해를 할 수 있으나, 맥주의 향에 대한 연구가 그리 쉽지 않다는 사실은 현재까지도 맥주의 향을 인공적으로 합성하기가 쉽지 않다는 것을 보아서도 짐작할 수 있다.

즉, 맥주의 향은 매우 복잡한 성분으로 구성되어 있을 뿐만 아니라, 낮은 농도에서 매우 섬세하게 느껴지기 때문이다.

맥주는 맥주용 보리를 싹을 내어서 열에 의해 건조하고, 분쇄하고 (맥아), 끓는 물로써 당분을 추출시킨 후에 효모에 의해 알코올발효를 시켜서 만들게 된다. 맥아를 끓일 때에 호프를 넣고 끓임으로써 맥주의 독특한 향과 쓴맛성분을 갖도록 한다. 이와 같은 여러 단계의 제조공정에서 발생할 수 있는 좋은 향 성분과 또한 동시에 존재하는 이취 성분은 맥주의 품질에 매우 큰 영향을 미치므로 본고에서는 맥주에서 발견된 여러 종류의 향 성분과 이취 성분에 대해서 살펴보았다

2. 맥주의 일반적인 향기성분

맥주에 함유되어 있는 성분은 약 850가지로 알려져 있다 (Meilgaard, 1982). 이들 성분 중에서 단지 몇 가지가 맥주의 독특한 향을 나타내는 것은 아니며, 미량으로 존재하는 각각의 성분이 서로 어울려져서 맥주의 향을 나타낸다고 볼 수 있다.

1) Flavor unit

Meilgaard (1982)는 맥주에는 850 가지가 넘는 향기성분이 있는데, 이들은 제각기 다른 최소감지농도 (flavor threshold)를 갖으며, 시료에 존재하는 각각의 향성분의 농도를 최소감지농도로 나눈 값을 Flavor Unit (FU)이라고 하였다. FU를 감지하는 정도는 개개인마다 많은 차이가 있으나 일반적으로 FU가 2.0 이상일 경우에는 “느낄 수 있는 정도가 매우 크다”라고 말할 수 있다. 1.0 에서 2.0 사이에서는 “느낄 수 있는 정도”이며 0.5 에서 1.0 사이에서는 개인에 따라서 예민한 사람은 느낄 수 있어도 예민하지 않은 사람에게는 느낄 수 없는 농도범위이다. FU가 0.2 에서 0.5 일 경우에는 대부분의 사람들이 감지하지 못할 정도로 낮은 농도이며, 0.2 이하일 경우에는 거의 대부분의 사람들이 향기를 느낄 수 없는 범위의 농도로 볼 수 있다. 일반적으로 pale lager의 경우에는 에탄올, 탄산가스 등이 2.0 FU 이상의 농도로 존재하며, 나머지는 2.0 FU이하의 농도로써 전체적인 pale ale의 향을 나타낸다. 그러나, FU가 1보다 낮다고 하여도 유사한 화학적 구조를 갖는 화합물들은 서로 합해져서 향기의 강도가 높아질 수 있다. 약 25 가지의 화합물들이 0.5 이상의 FU를 갖으며, 이들은 서로 합해져서 1.0 FU이상을 나타낸다고 볼 수 있다. 약 220 여가지 화합물의 최소감지농도는 에탄올일 경우에 1.3%를 비롯해서 가장 낮은 농도인 0.00007 ppb의 tert-amyl mercaptan이 있다 (Meilgaard, 1974).

2) 호프향

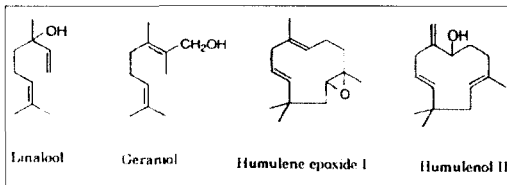
맥주에서 호프의 향은 맥주의 쓴맛과 함께 매우 중요한 요소이다. 특히, 전통적인 pilsner 맥주나 영국식 ale에서는 호프의 향이 바로 이들 맥주의 생명임을 알 수 있다. Linalool, geraniol, humulene epoxide I, humulenol II 등

< 표 1 > 맥주에 존재하는 대표적 알코올 성분들 (농도의 단위, ppm)

합물	최소감지농도	일반적 농도 범위	FU	향기 특성
Ethanol	13,000	25,000-50,000	1.8-3.6	알코올
Isobutanol	200	4-57	0.0-0.3	알코올
Isoamyl alcohol	70	25-123	0.4-1.8	알코올, 와인
Active amyl alcohol	65	7-34	0.1-0.5	알코올, 와인
2-Phenethanol	125	5-102	0.0-0.8	장미

대표적인 호프향 성분의 화학적 구조는 그림 1에 나타나 있다. 호프향의 화학적 성분에 대해서는 이미 잘 알려져 있으나, 최고급호프에서 나타나는 향기성분의 화학적 정체에 대해서는 현재까지도 확실하게 알지를 못하고 있는 실정이다.

[그림 1] 호프에서 확인된 대표적 향성분.



3) Alcohols

맥주의 알코올 종류 중에서, 에탄올이 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 고급알코올 (또는 fusel 알코올)이라 부르는 성분은 모든 맥주에서 비교적 높은 농도로 존재한다. 맥주에서 발

견되는 알코올의 종류는 <표 1>에 나타나있다 (Meilgaard, 1982; Siebert, 1988). 이들 중에서 propyl-, butyl-, amyl alcohol은 맥주에서 알코올계통의 독특한 향기특성이 있으며, 2-phenethanol은 장미 냄새와 같은 특성이 있다. 탄소의 숫자가 6에서 10개로 구성되는 지방성 알코올은 코코넛 같은 냄새가 나기는 하지만, 맥주에서는 이들의 FU가 1.0 이하로 존재하므로 실제 맥주 향에는 별 영향을 미치지 않는다.

4) 산 (acids)

맥주에서 산성분은 탄산가스를 포함해서 약 110 가지의 산성분이 알려져 있으나, 대부분의 산성분은 향기에 영향을 주지 않는다고 알려져 있다. 그러나, 몇몇 성분들 즉, caprylic, caproic, 등은 염소젖 냄새와 같은 특성이 있고 isovaleric은 오래된 호프 냄새 특성으로 인하

< 표 2 > 맥주에 존재하는 대표적 산 성분들 (농도의 단위, ppm).

화합물	최소감지농도	일반적 농도 범위	FU	향기 특성
탄산가스	1,000	3,000-5,500	3.0-5.5	Carbonation
Acetic acid	175	30-280	0.2-1.6	초산, 식초
Butyric acid	2.2	0.5-3.3	0.2-1.5	버터, 치즈
Isovaleric acid	1.5	0.1-3.4	0.1-2.3	치즈, 오래된 호프
Caproic acid	8	1-6	0.1-0.8	기름, 땀냄새
Caprylic acid	15	2-15	0.1-1.0	Caprylic
Capric acid	10	0.1-4	0.1-0.4	소기름

〈 표 3 〉 맥주에 존재하는 대표적 ester 성분들 (농도의 단위, ppm)

화합물	최소감지농도	일반적 농도 범위	FU	향기 특성
Ethyl acetate	30	8-48	0.3-1.6	용매, 과일, 단냄새
Isobutyl acetate	1.6	0.01-0.25	0.01-0.15	바나나, 용매
Isoamyl acetate	1.2	0.6-7	0.5-5.8	바나나, 용매
Ethyl caproate	0.21	0.1-0.5	0.5-2.4	사과, 과일, 단냄새
Ethyl caprylate	0.9	0.1-1.5	0.1-1.7	사과, 과일, 단냄새
Ethyl caprate	1.5	0.01-1	0.01-0.7	Caprylic, 과일
2-Phenyl acetate	3.8	0.05-2	0.01-0.5	장미, 꿀, 단냄새

여 맥주에 좋지 않은 영향을 준다고 알려져 있다.

5) Ester

맥주에서 발견된 ester화합물은 맥주의 향에 매우 중요하며 발효과정에서 효모에 의해서 만들어진다.

특히, ethyl caproate는 사과향기 특성이 있으며, isoamyl acetate는 바나나, ethyl acetate는 과일 또는 용매 냄새를 갖고 있다. 비교적 작은 분자의 ester화합물은 일반과일의 향기를 갖고며, 사슬이 중간 정도의 체인을 갖는 ester 화합물은 약간의 열대 과일향기 특성이 있고, 사슬이 긴 체인을 갖는 ester는 열대과일의 향기특성이 강하다 (Meilgaard, 1982; Siebert, 1988).

6) Ketone 과 Aldehyde

Vicinal diketone을 제외하고 맥주에서 ketone계 화합물이 향에 미치는 영향은 그리 크지 않다.

특히, diacetyl은 낮은 최소감지농도를 갖고 있으며 매우 불쾌한 냄새의 화합물이다. Aldehyde의 경우에도 낮은 최소감지농도를 갖고며, 종종 맥주에 좋지 않은 냄새를 갖게 한다.

특히, 짧은 사슬의 불포화 aldehyde는 높은 감지농도를 갖고며, 신선한 풀잎 특성의 비교적 좋은 냄새를 갖고나, C-7에서 C-10까지의 긴 사슬의 aldehyde는 반대의 특성이 있다. Nonanal은 최소감지농도가 15-20 ppb로서 곤충이나 오렌지 같은 냄새가 나고, trans-2-nonenal은 높은 온도에서 장기간 보관된 맥주에서 자주 발견되며, 산패된 냄새나 골판지 냄새가 난다는 점을 감안해야 한다.

3. 맥주에서 발견되는 이취 성분들

종종 맥주에서 좋지 않은 냄새를 발견하게 된다. 이들 이취 성분에 대해서는 이미 많은 연구가 이루어져 있으며, 현재까지도 발생원인에 대한 연구가 진행되고 있기는 하나, 대체적으로 발생요인과 경로가 잘 정립 되어있는 편이다.

맥주에서 발생하는 이취 성분은 대개의 경우 단일 또는 극히 적은 숫자의 화합물에 기인하는 경우가 많으나, 이러한 성분들은 매우 낮은 농도에서도 냄새가 나는 불안정한 화합물이므로 분석하는 데에 많은 어려움이 있다. 〈표 5〉는 맥주에서 발견되는 이취에 대한 냄새표현과 가능한 발생원인에 대한 것이다.

< 표 4 > 맥주에 존재하는 대표적 aldehyde와 ketone 성분들.

화합물	최소감지농도	일반적 농도 범위	FU	향기 특성
Acetaldehyde	10 ppm	1.2-24 ppm	0.1-2.4	사과껍질, 풀잎
Nonanal	18 ppb	1-14 ppb	0.06-0.8	곤충, 오렌지
trans-2-Nonenal	0.11 ppb	0.0-2 ppb	0.0-18	골판지, 종이, 산패
Diacetyl	0.1 ppm	0.01-0.4 ppm	0.1-4	버터스카치, 버터

1) 휘발성 황화합물

휘발성황화합물 (황화합물)은 매우 낮은 농도에서도 강한 자극적인 냄새를 갖는 화합물이므로 <표 6>, 특히 분석하는 데에 많은 어려움이 있다. 따라서, 정밀 분석적인 방법보다는 코로써 직접 냄새를 맡아봄으로써 황화합물에 대한 평가를 하는 경우가 대부분이다.

황화합물 중에서 대표적인 것은 황화수소 (hydrogen sulfide, H₂S)이며, 썩은 계란냄새를 나게 하는 화합물로서 맥주에서는 8 ppb 또는 이 이하에서도 감지가 가능하다. 9종류의 ale 효모와 9종류의 lager효모에 대한 황화합물 발생량을 비교 실험한 결과, lager효모가 ale효모보다도 상당히 많은 양의 황화수소, meth-

< 표 5 > 맥주에서 발견될 수 있는 이취 성분들 (Papazian, 1990)

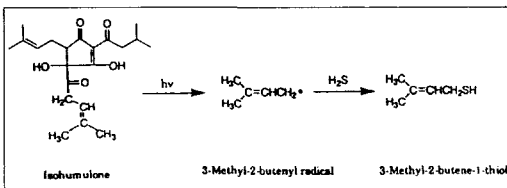
Meilgaard Ref. No.	향기 표현	가능한 발생요인
0110	<i>Alcoholic</i>	High starting gravity, excessive attenuation
0111	<i>Clove</i>	Characteristic wheat beer, wild yeast contamination
0112	<i>Winey</i>	From oxidation, except strong lagers or barley wines
0123	<i>Solvent-like</i>	From warm fermentation, plastic, wild yeast
0133	<i>Estery, Fruity</i>	From warm fermentation, yeast strain, low nutrient
0150	<i>Green apple</i>	High fermentation temperature, insufficient yeast pitching, beer racked too early
0220	<i>Sherry</i>	Warm fermentation or oxidation, very old beer oxidation
0224	<i>Almond, Nutty</i>	Oxidation, very old beer
0503	<i>Medicinal/ Phenolic</i>	From water supply (chlorine residue), wild yeast
0620 fined	<i>Butter/Diacetyl</i>	High initial fermentation temperature, racked, cooled or too soon, <i>Pediococcus</i> contamination
0710	<i>Sulfury, SO₂</i>	Wild yeast contamination
0721	<i>Skunky</i>	Beer exposed to light
0732 coliform	<i>Canned corn DMS</i>	DMS, insufficient kettle boil, wort chilled too slowly, contamination
0800	<i>Cardboard/ Stale</i>	From oxidation of amino acids during aging, at bottling, in bottle
0910	<i>Sour/Vinegar</i>	<i>Acetobacter</i> contamination
0920	<i>Sour/Lactic</i>	<i>Lactobacillus</i> contamination

anethiol, methyl thioacetate를 발생하였다 (Walker and Simpson, 1993). Methyl-, ethyl mercaptan은 썩은 양파나 김치를 담았던 플라스틱 용기에서 나는 냄새와 같이 매우 자극적인 화합물이다.

이들 황화합물이 맥주에 존재할 경우에는 화합물 자체가 매우 좋지 않은 냄새를 나게 할 뿐만 아니라, 맥주의 다른 좋은 향을 느낄 수 없도록 가림으로써 (masking), 맥주의 품질에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 또한, 황화합물은 2차적인 화학반응에 의해서 더욱 좋지 않은 냄새를 나게 할 수도 있다.

맥주병의 색은 주로 갈색으로 하며 이는 자외선의 빛이 병 내부로 투과하는 것을 막기 위한 것이다. 만일 자외선이 병 내부로 투과하게 되면, 맥주의 냄새가 스크크나 성냥불을 붙일 때에 나는 강한 자극적인 냄새를 나게 하는데 이는 황화수소와 isohumulone이 빛에 의해서 화학적으로 반응하여 3-methyl-2-butene-1-thiol이라는 화합물을 만들기 때문이다 (그림 2).

[그림 2] 3-methyl-2-butene-thiol의 생성과정 (Kuroiwa and Hashimoto, 1961)



거의 대부분의 맥주에서 존재하는 dimethyl sulfide (DMS)는 농도에 따라서 느낌이 다르나 일반적으로 30 ppb이상에서는 삶은 양배추나 캔에 담긴 옥수수의 냄새가 난다. DMS는 주로 맥아를 가열하여 건조시킬 때에, 맥즙 (wort)을 끓이거나 냉각시에 DMS의 전구체인 S-methyl methionine (SMM)의 분해로부터

만들어지게 된다. SMM은 맥아를 발아시키는 과정에서 생성이 되므로, SMM의 양은 맥아의 단백질 함량 및 효소에 의한 단백질의 변이와 관계가 있다. 따라서, 단백질 함량이 많은 맥아인 6열 (six-row) 맥아는 2열 (two-row) 맥아 보다도 많은 양의 SMM을 갖게 된다. 예를 들어, English pale ale용 맥아는 그램 당 1에서 2 μg 의 SMM이 있으나, 북미산 6열 맥아에는 8에서 10 μg 의 SMM이 있다. 발아된 맥아를 건조시킬 때에 SMM은 열에 의해 분해되어 DMS로 되나, 열에 의해서 휘발되므로 결국 높은 열로써 건조된 ale이나 짙은 색의 맥아는 lager용 맥아보다도 SMM의 양이 적은 편이다. 맥아즙을 가열시에도 열에 의해서 SMM은 DMS로 분해된다.

Dimethylsulfoxide (DMSO)는 DMS의 전구체로서 알려져 있으며 발효과정에서 효모에 의해 DMS로 환원된다 (Yang and Schwarz, 1998). 발효과정에서 SMM과 DMS는 탄산가스에 의해서 약 절반정도로 줄어들게 되며, 발효온도가 낮을수록 많은 양의 DMS가 맥주에 남아있게 된다. 따라서 적당한 농도의 DMS를 최종 맥주에 유지시키기 위해서는 맥아의 종류와 발아된 맥아의 건조 온도와 시간, 맥아즙의 가열온도, 발효 효모, 발효온도와 냉각시간, 온도 등을 고려하여야 한다.

최근에 미국 ASBC에서는 DMS전구체 양을 측정할 수 있는 표준방법을 확립하였다 (ASBC publication no. J-1998-1112-100). 이 방법에 따르면, 우선 동일한 맥아즙으로 부터 얻은 2가지 시료에서 한가지는 free DMS를 headspace GC로 분석하고, 다른 한가지 시료는 알칼리 가열 처리하여 발생하는 DMS를 측정한다. 알칼리 가열 처리하여 측정한 DMS 농도로부터 free DMS농도빼주면 DMS 전구체의 농도가 계산될 수 있을 것이다.

〈 표 6 〉 맥주에서 발견된 대표적 황화합물 (농도의 단위, ppm)

화합물	최소감지농도	일반적 농도 범위	FU	향기 특성
Hydrogen sulfide	8	0-20	0.0-2.5	썩은계란
Ethyl mercaptan	1.7	0-1	0-0.6	썩은과, 김치용기
tert. Butyl mercaptan	0.8	0-1	0.0-1.2	썩은 양파
Dimethyl sulfide	33	10-200	0.6-12	삶은양배추, 캔옥수수

2) Diacetyl

Diacetyl은 lactic acid와 함께 *Lactobacillus*나 *Pediococcus* 등의 박테리아에 의해서 생성되며 맥주에 버터스카치와 같은 냄새를 나게하므로 썩은냄새 같은 상한 느낌을 주게된다. Lactic acid 박테리아는 혐기성균이나 약간의 산소 존재 하에서도 생육할 수 있는 균으로서 호프와 약 5%정도의 알코올에서도 성장이 가능하다.

*Lactobacillus*에 의한 대사는 주로 lactic acid와 ethanol, 탄산가스를 만들고 diacetyl과 2,3-butanediol은 소량만을 만들뿐이다. *Pediococcus*는 맥주에서 성장할 수 있는 유일한 구균으로서 주로 lactic acid 만을 만든다고 알려져 있으나, 냄새가 날 수 있는 정도의 diacetyl을 만든다고 알려져있다.

3) Aldehydes

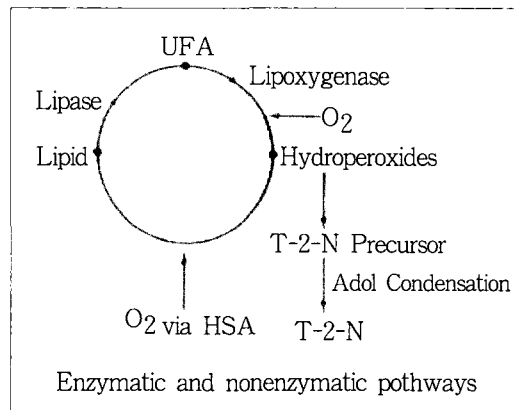
맥주의 aldehyde성분 중 이미 언급된 trans-2-nonenal (T2N)은 수개월 동안 비교적 오래 저장된 맥주 또는 김빠진 맥주에서 나는 산패되고 신선하지 않은 냄새 (staling)의 직접적인 원인물질으로서 맥주의 품질에 가장 심각한 영향을 미치는 화합물로 알려져 있다.

T2N은 종이나 골판지 냄새가 나며, 병입된 맥주를 저장하는 과정에서 병 내부의 산소에 의해서 계속적으로 증가하므로, T2N의 전구체가 많을 경우에는 맥주의 향품질에 매우 심각한 영향을 미치게 된다. 따라서, T2N이 얼마나 있는지를 측정하여 잠재적으로 T2N이 만

들어질 것을 사전에 예측하는 것이 중요하다.

측정방법으로써, 지방과 지방산의 효소 및 비효소적 분해 능력을 측정하는 것으로서 (그림 3), 즉, T2N의 전구체는 맥아제조과정에서 효소인 lipoxygenase (LOX)에 의해서 생성이 되므로 LOX의 효소활성도를 맥아제조과정에서 측정하면 전구체의 농도를 예측할 수 있다 (Fix, 1999).

[그림 3] trans-2-Nonenal의 생성과 관련된 효소 및 비효소적 반응경로 (Fix, 1999).



4) 기타 이취 성분들

맥주에는 이미 언급된 대표적인 이취 물질 이외에도 다른 여러 가지 종류의 이취 성분이 발생될 수 있다.

최근, 일본의 기린맥주에서는 소비자들이 이취 문제가 있다고 접수시킨 자사제품의 맥주 시료 수종을 분석한 결과를 발표하였는데 (Sakuma 등, 2000), 캔맥주의 경우에는 내부

도장용으로 사용한 도료에서 용매와 같은 냄새를 확인하였으며, 이 물질의 정체는 butyl cellosolve로 확인이 되었다. 이는 캔제조 공정에서 캔의 내부 도장용으로 사용한 도료가 충분히 건조되지 않았으므로 맥주에 혼입된 것으로 확인이 되었다. 병맥주에서는 곰팡이냄새가 난다는 이유로 소비자들로부터 접수된 사례가 있었다. GC-MS와 GC-Olfactometry를 사용하여 분석한 결과 곰팡이 냄새는 trichloroanisole (TCA) 때문인 것으로 확인이 되었다. 맥주에 TCA가 오염된 이유는 아마도 맥주를 저장할 때에 주위에 곰팡이에 오염된 나무가 있었기 때문에 냄새성분인 TCA가 맥주로 옮겨간 것으로 추정하였다. 바다생물인 성게의 알과 같은 냄새가 난다는 시료를 분석해본 결과 브롬이 포함된 화합물인 2-ethyl bromo phenol로 추정이 되었다.

4. 맺음말

앞으로 우리나라에서도 다양한 향특성을 갖는 맥주의 수가 늘어나게 될 것이다.

그동안 단순하게 몇 가지 종류의 맥주를 생산해오고 있는 국내 맥주업체에서는 보다 다양한 특성을 갖는 우수한 품질의 맥주를 생산하기 위해서 맥주향에 대한 더욱 많은 연구와 노력을 아끼지 않아야 하고, 수입업체에서는 장기간의 수입과정에서 발생할 수 있는 변패된 맥주가 유통되지 않도록 맥주의 향성분의 특성과, 특히 이취에 대해서 더욱 많은 관심을 기울여야 할 것이다.

〈참고문헌〉

Fix, G. Principles of brewing science (2nd ed.). Brewers publications, pp 137-138 (1999).

Kuroiwa, Y., and Hashimoto. Composition of sunstruck flavor substance and mechanism of its evolution. Proc. Am. Soc. Brew. Chem. pp 26-38 (1961).

Meilgaard, M. Flavor and threshold of beer volatiles. Tech. Q. Master Brew. Assoc. Am. 11:87-89 (1974).

Meilgaard, M. Prediction of flavor differences between beers from their chemical composition. J. Agric. Food Chem. 30:1009-1017 (1982).

Papazian, C. Recognizing off-flavors in beer. New Brewers, 7:8-15 (1990).

Sakuma, S., H. Amano, and M. Ohkochi. Identification of off-flavor compounds in beer. J. Am. Soc. Brew. Chem. 58:26-29 (2000).

Siebert, K. J. A data base management system for flavor threshold information and an evaluation of strategies for identifying new flavor-active substances in beer. J. Am. Soc. Brew. Chem. 46:82-91 (1988).

Walker, M. D., W. J. Simpson. Production of volatile sulphur compounds by ale and lager brewing strains of *Saccharomyces cerevisiae*. Letters in Appl. Microbiol. 16:40-43 (1993).

Yang, B, and P. B. Schwarz. Application of nitrogen-purging of malt extracts to measure two dimethylsulfide precursors by headspace gas chromatography. J. Am. Soc. Brew. Chem. 56:81-84 (1998)