

# 방사성탄소분석에 의한 곡물주정 감별



이 창 우

〈한국원자력연구소 원자력팀장〉

## ■ 목 차 ■

1. 서 론
2. 방사성 탄소의 특성
3. 방사성탄소의 환경내 거동
4. 발효주정에서 방사성탄소
5. 주정중의 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ ) 측정
6. 결 론

## 1. 서 론

술의 원료가 되는 주정은 에틸알콜이 주성분으로써 곡물 등의 전분을 발효시켜 제조한다. 현재 음료용 또는 연료용으로 사용되는 대부분의 에틸알콜은 발효에 의해 생산되고 있다. 한편 에틸알콜은 석유정제로 얻어지는 원료물질로부터 화학적으로 쉽게 합성할수 있는데 이 화학합성알콜은 공업용 또는 의약용으로 용도가 한정되어 있고 식용으로 상용은 법에 의해 금지되어 있다.

매년 우리나라에서 술의 원료로 소요되는 주정의 상당부분을 외국에서 수입하고 있는데 이때 수입되는 주정이 발효주정인지 혹은 화학합성에틸알콜인지 확인해 볼 필요가 있다. 발효주정과 합성알콜을 분별하는 데는 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ )의 존재가 중요한 단서가 된다.

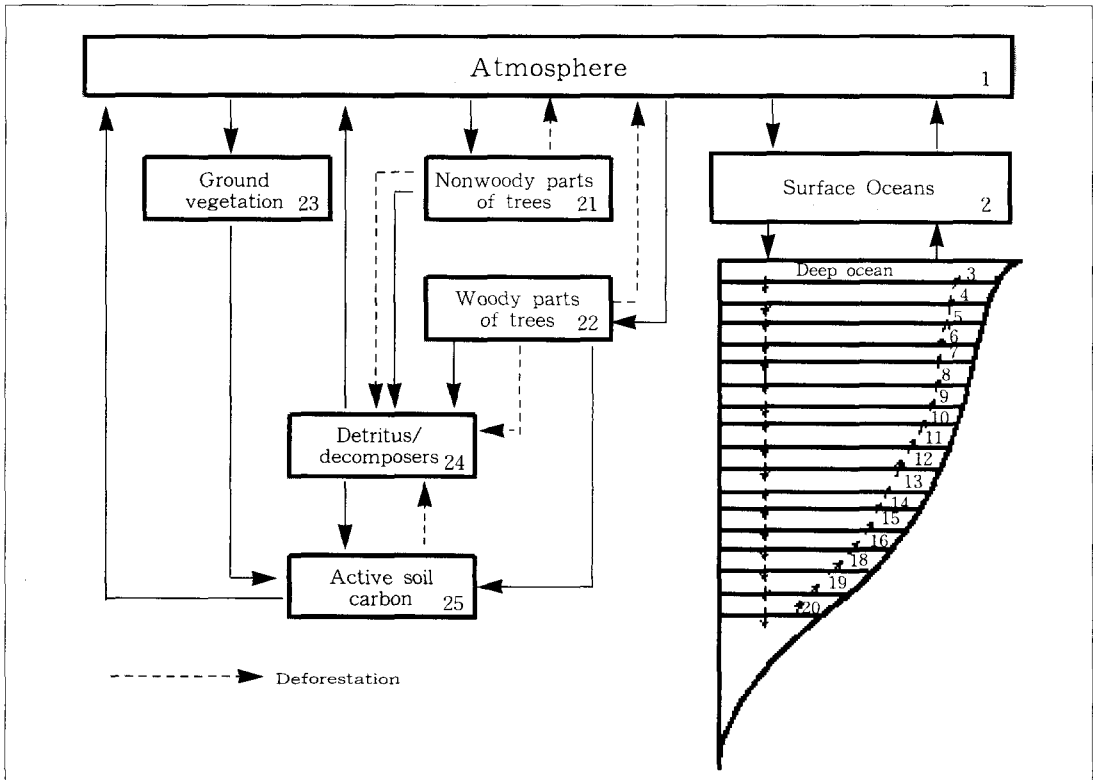
본고에서는 곡물주정과 합성주정의 분별에 관련된 방사성탄소의 특성 및 관련기술에 대해 고찰하였다.

## 2 방사성 탄소의 특성

자연계에 존재하는 탄소는 원자번호가 6이고 원자량이 12인( $^{12}\text{C}$ ) 안정탄소가 대부분이고 원자량 13인 ( $^{13}\text{C}$ ) 안정탄소가 미량 섞여 있다. 여기에 안정탄소와 화학적인 특성과 자연계 내에서 거동이 동일한 원자량이 14인 방

사성탄소( $^{14}\text{C}$ )가 있다. 방사성탄소로서는  $^{10}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}$ , 및  $^{15}\text{C}$ 가 있으나 수명이 짧아 환경중에 존재하지 않으므로 본고에서 방사성탄소라 함은  $^{14}\text{C}$ 를 지칭하는 것으로 한다. 이 방사성탄소는 지구의 성층권에서 우주선이 질소원자에 충돌할 때 질소원자의 파쇄에 의해 생성되는 자연 방사능으로 볼 수 있으나 근래 대기권 핵폭발실험과 원자력발전소에서 배출되는 방사성탄소가 자연계에 추가되고 있다. 방사성탄소는 붕괴하여 초기양의 절반으로 감소하는데 걸리는 반감기는 5730년이고 붕괴할 때마다 평균에너지가 49.3KeV인 베타방사선을 방출한다. 성층권에서 생긴 방사성 탄소는 곧 산화되어 이산화탄소( $^{14}\text{CO}_2$ )로 변하여 대기권의 안정

이산화탄소와 섞이게 된다. 우주선에 의한 방사성탄소 생성속도는 평방센티미터당 매초 평균 2.5개 정도이고 연간 생산량은  $1.4 \times 10^{15}$  Bq( $\text{yr}^{-1}$ )로 추산되고 있다. 이 생산량은 지구 자장상태와 우주선량에 영향을 받으므로 태양 활동주기인 11년을 주기로 변동폭을 보이는 것으로 알려져 있다. 대기중의 이산화탄소는 식물의 광합성작용으로 탄수화물로 고정되어 생체 주요구성물과 생명유지의 에너지원으로 사용되므로 이때 방사성탄소도 함께 고정된다. 따라서 식물체에서의 안정탄소에 대한 방사성탄소의 존재비는 대기중의 그것과 평형에 있다고 가정하고 있다. 여기에서 방사성탄소의 준위란 안정탄소에 대한 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ )의



[그림 1] 생태계내에서의 탄소순환 모델.

1) Bq: 베크렐, 방사능을 나타내는 단위로서 초당 한번 붕괴되는 방사능량을 1베크렐로 정의

방사능량(Bq/kg-carbon)을 말한다.

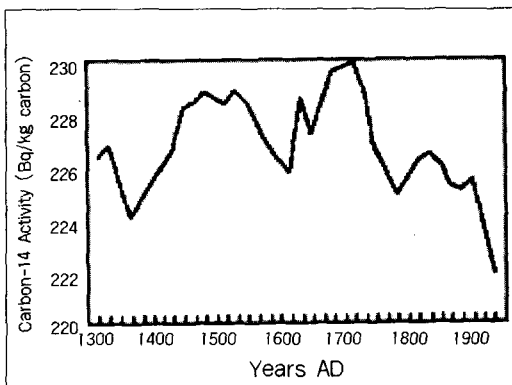
### 3. 방사성탄소의 환경내 거동

생물환경내에서 방사성탄소는 안정탄소와 동일한 거동을 갖고 있으나 시간에 따라 붕괴해 가는 점이 다르다. 탄소의 거동을 설명하기 위한 지구규모의 순환모델이 여러 연구자에 의해 발표되었는데 그중 한 예를 그림1에 나타내었다. 이 모델은 대기-해양 사이의 탄소확산이동과 육상생태계의 탄소이동을 25개 구역으로 나누어 설명하고 있다. 우주선에 의하여 생성된 방사성탄소는 이산화탄소형태로 광합성 작용에 의해 식물체에 흡수되고 차례로 먹이사슬을 따라 동물로 이동한다. 동·식물에 섭취된 <sup>14</sup>C는 배설물 또는 죽은 사체의 부식에 따라 생태계로 재순환되나 일부는 퇴적물과 함께 지하에 묻혀 폐쇄계에 갇힌채로 수천만년을 지나 석탄이나 석유등 화석연료로 변한다. 한편 해양 역시 이산화탄소의 흡수체이며 가장 큰 폐쇄계로 작용한다. 이러한 폐쇄계에 고장된 방사성탄소의 감소와 우주선에 의해 생성되는 량이 서로 평형을 이루며 생태계의 방사성탄소 준위는 일정한 값을 유지한다. 산업혁명 이전의 생태계내에서 방사성탄소의

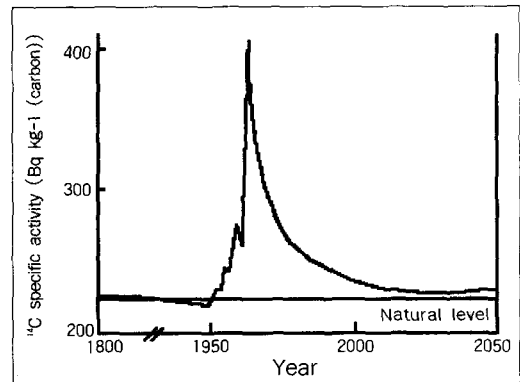
존재비는 비교적 일정하다고 가정되고 있다.

그러나 근래의 방사성탄소의 환경내 변동을 설명하기는 간단치 않다. 오랫동안 지하에 묻혔던 화석연료에는 <sup>14</sup>C이 붕괴 소멸되어 거의 남아있지 않다. 19세기 산업혁명 이후 화석연료의 사용으로 방출된 막대한 량의 이산화탄소는 온실가스로써 지구온난화의 원인으로 주목받고 있지만 방사성탄소의 측면에서 보면 이것은 감손이산화탄소(<sup>14</sup>C가 소멸된 CO<sub>2</sub>)로써 대기중 방사성탄소 존재비를 희석시키는 효과를 나타낸다. 이러한 현상을 처음 설명한 사람의 이름을 따서 Suess효과라 부르기도 한다. 그림 2에는 1300년대부터 1950년까지의 <sup>14</sup>C 준위의 변동을 나타낸 그림이다. 방사성탄소의 자연준위는 탄소 1kg당 226 Bq(226 Bq/kg-carbon)정도로 가정되는데 그림 2에서 보면 1900이후 감소하여 1950년에는 3.7% 정도 감소되었다.

한편 생태계에 방사성탄소를 추가하는 요인이 있으니 대기권 핵실험이나 원자력발전소에서 핵분열 생성물 또는 방사화 생성물으로써 방출되는 것이다. 이것은 우주선 생성기원에 대비하여 인공방사성탄소라 부를 수 있다. 1950년대 시작된 대기권 핵실험에서 방출된 방사성탄소량은  $3.55 \times 10^{17}$  Bq에 달하는 것으로 추



[그림 2] 방사성탄소 <sup>14</sup>C의 백그라운드 준위 변동, AD1300-AD1950.



[그림 3] 모델에 의한 대기중 <sup>14</sup>C 준위 변동 모사, 1800-2050

산되며 이로인하여 1960년초에는 대기중 방사성탄소준위를 자연준위의 2배 가까이 증가시켰다. 이후 대기권 핵실험 금지조약에 의해 핵실험이 지하화하면서 핵실험에 기인한 대기방출량이 줄어들면서 방사성탄소준위는 급격히 감소하고 있다. 그러나 원자력발전소는 여전히 인공방사성탄소 발생원으로 작용하여 그 준위를 증가시키는 역할을 하고 있다. 따라서 미래의 생태계 중 방사성탄소 준위 변동추세는 화석연료 사용에 의한 회석효과와 원자력 이용에 의하여 발생하는 방사성탄소의 양의 상관관계에 달려 있다. 대개중의  $^{14}\text{C}$ 준위 변동에 대한 예측모델 연구는 이러한 요소를 감안하여 미래의  $^{14}\text{C}$ 준위에 대한 추산치를 제시하고 있다. 이러한 연구결과의 하나는 그림 3에 나타낸바와 같은데 2050년경에 대기중 방사성탄소준위는 234 Bq/kg-carbon정도가 될 것으로 추정하고 있다.

#### 4. 발효주정에서 방사성탄소

식물은 광합성작용에 의해 대기중  $\text{CO}_2$ 를 탄수화물로 고정하여 생체 구성물질로 사용하거나 저장하고 또 에너지원으로 사용후  $\text{CO}_2$ 로 다시 배출하기도 한다. 따라서 식물체내의 방사성탄소의 존재비는 주변 대기중  $\text{CO}_2$ 중의 그 존재비와 평형에 있다고 가정할 수 있다. 이때 대기중의 방사성탄소존재비가 변화하면 그 환경중에서 성장하는 식물체중의 존재비도 대기와 평형을 이루며 변한다고 볼 수 있다. 주정제조에 쓰이는 원료는 곡물이나 타피오카 등에서 추출한 전분으로써 주 구성물질은 포도당이라 할 수 있다. 포도당이 효모의 발효대사 경로를 거쳐 에틸알콜로 전환될 때 화학식은 아래와 같이 표시 된다.



포도당의 탄소가 에틸알콜과 이산화탄소 구성물질로 전환될 때 방사성탄소도 안정탄소와 동일한 비율로 전환된다고 볼 수 있으므로 발효주정의 방사성탄소의 준위는 전분을 생산하는 작물체와 동일하다고 할 수 있으며 또한 작물의 성장기간중의 주변 대기중의 준위와 평형에 있게 된다. 전분을 얻기 위한 작물은 보통 1년에 한번 재배 수확된다고 가정하면 수확년도별 전분사용에 따른 곡물주정중의 방사성탄소 준위는 대기  $\text{CO}_2$ 중 준위의 연도별 변화추세와 동일할 것이다.

발효알콜중의 방사성탄소변동을 측정할 예를 그림 4에 나타내었다. 이 그림에서는 옛 소련연방인 그루지아 지방에서 생산된 포도주의 알콜에 함유된 방사성탄소 준위의 변동 추세를 잘보여 주고 있다. 1950년 이후 핵실험이 증가함에 따라 방사성탄소 준위의 변동 추세를 잘보여 주고 있다. 1950년 이후 핵실험이 증가함에 따라 방사성탄소의 준위는 급격히 증가하여 1964년 최고 준위를 나타내고 있는바 이것은 60년대초에 최고조에 달했던 대기권 핵실험영향을 잘 반영하고 있다. 이후, 핵실험 감소와 함께 그 준위는 감소경향을 보이고 있으나 1969년과 1977년에 있었던 핵실험영향을 나타내는 일시적 증가를 관찰할 수 있다. 그림 4에서 점선으로 표시한 것을 대기  $\text{CO}_2$ 중 방사성 탄소준위 변동을 나타낸 것인데 계절별 변동을 보이며 감소해가는 경향이 포도주알콜중의 준위와 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같은  $\text{CO}_2$ 중의 방사성탄소준위 변동은 성층권과 대류권 혼합 및 동절기 화석연료 사용량 변화 등에 기인한 것이다. 대기중의 준위는 대체로 여름에 높고 겨울에 낮는데 포도는 여름철에 성장하므로 와인중의 준위는 대기의 연간평균치 보다 높은 값을 보인다. 알콜중의 준위변동은 오스트리아산 포도주에서도 비슷하게 관측되므로써 지역적인 편차는 크지 않다고 알려

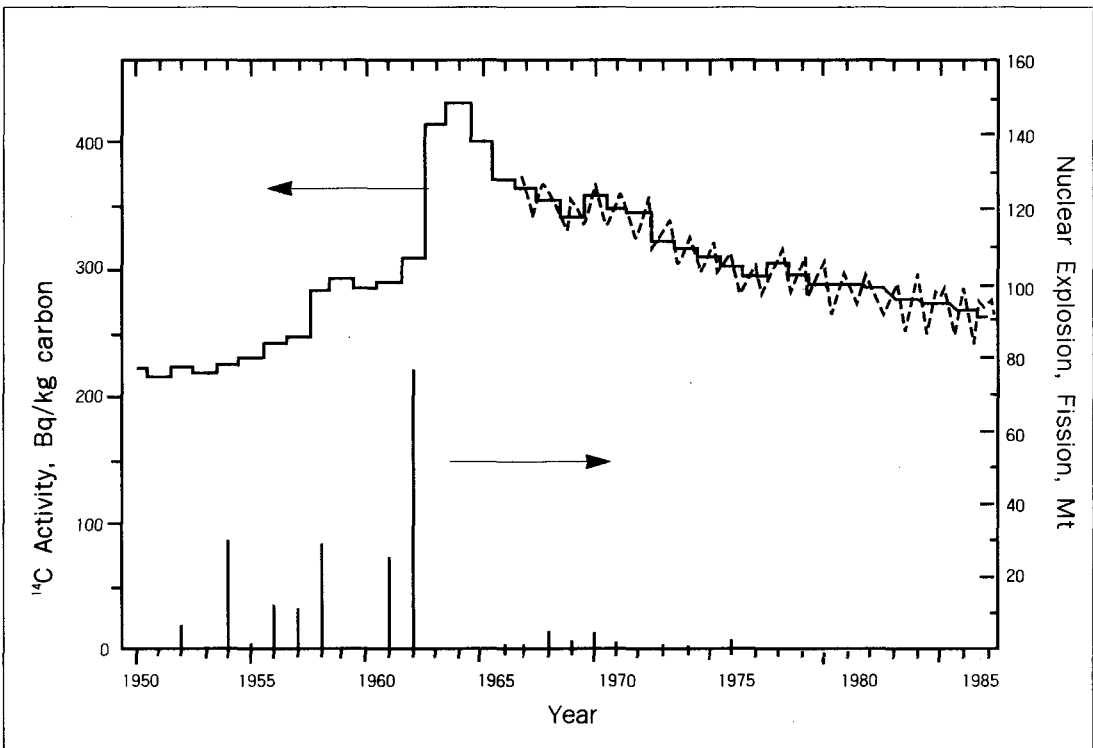
저 있다. 영국에서 보고된 바에 의하면 1980년 이후 영국에서 생산된 식품중 방사성탄소 준위는 지역적인 편차없이 매년 감소해 가는 경향을 보이고 있으며 1992년의 준위는 259 Bq/kg-carbon로 측정되었고 1995년에는 254Bq/kg-carbon정도에 이를 것으로 예측되었다. 이 준위는 자연준위 226 Bq/kg-carbon보다는 높은 값이다. 미래의 방사성탄소준위 감소 경향은 화석에너지와 원자력에너지 사용량에 의해 영향을 받을 것이다.

## 5. 주정중의 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ )측정

주정은 약 95%정도의 에틸알콜을 함유하고 있으므로 에틸알콜의 탄소성분중 안정탄소에 대한 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ )의 준위를 측정하여 백그라운드 및 표준시료와 비교한다.  $^{14}\text{C}$ 이 붕괴할

때는 약한 베타선을 방출하므로 근래는 이를 효율적으로 측정할 수 있는 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter)를 사용하여 방사성탄소 준위를 측정한다. 주정 10ml와 형광체 10ml를 테프론바이알에 넣고 혼합한후 액체섬광계수기로 일정기간 계측한 후 백그라운드계수를 보정하여 계측치를 구하게 된다.

이때는 발효주정의 표준시료와 비교대상으로써 석유로부터 합성한 에틸알콜(함량95%) 시료를 함께 측정하여 비교평가한다. 석유중의 방사성탄소는 이미 붕괴소멸 되었다 할 수 있으므로 이로부터 합성된 에틸알콜중의 방사성탄소준위도 백그라운드 수준을 보인다. 표준 발효주정 선정시에는 세심한 주의가 필요하다. 이미 설명한 바와 같이 대기중 준위는 매년 감소해 가므로 주정내의 준위도 연도별 차이가 있게 된다. 가령 1997년산 주정분석시에는



[그림 4] 그루지아 지방에서 생산된 포도주 알콜과 대기 CO<sub>2</sub>중의  $^{14}\text{C}$ (준위변동, —; 포도주, ---; 대기중 CO<sub>2</sub>.)

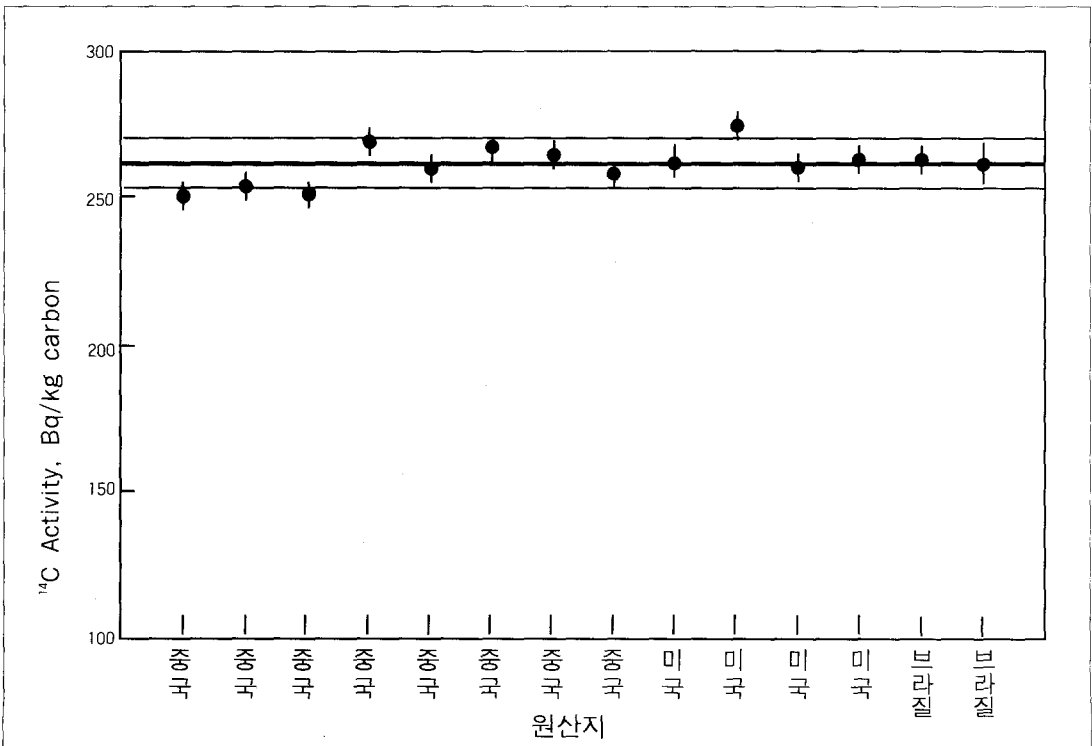
같은해의 곡물로 제조한 표준주정과 비교하는 것이 타당할 것이다. 그림5에는 산지별 수입 발효주정의 준위 측정결과를 예시하였다. 1997년산 발효주정의 계측치는  $260.0 \pm 9.0$  Bq/kg-carbon 정도로 나타났다. 이 수치는 주정곡물의 생산지, 수확시기 및 계측오차 등의 불확실성 요인에 영향을 받아 더 큰 편차를 보일 수 있다. 그림 5의 경우 계측치가 해당 영역내에 들어오면 발효주정으로 판단할 수 있다. 영국식품중  $^{14}\text{C}$ 준위 측정 연구에 따르면 1997년의 준위는 254Bq/kg-carbon보다는 낮은 것으로 예측되었다. 그림 5의 발효주정 측정결과는 이 예측치보다 약간 높은 값을 보여주고 있다. 또한 일본에서 1990년 생산된 쌀의 방사성탄소 준위는 257.7 Bq/kg-carbon 정도로 보고되었는데 이보다도 약간 높다.

국내의 경우 원자력발전소 주변 술잎등에서

방사성탄소 준위 결과가 보고된 바 있으나 아직까지 곡류중의  $^{14}\text{C}$ 준위 측정치에 대한 보고는 없다. 한편 1996년 10월의 대전지방 대기  $\text{CO}_2$  중의 준위는 260~270 Bq/kg-carbon으로 측정된 바 있으므로 국내 곡류 중의 방사성탄소 준위도 비슷한 수준일 것으로 예측된다. 그러나 국내에서 소비되는 주정은 국산곡물로 제조된 것 뿐만 아니라 동남아, 미주 등지에서 생산된 곡물을 원료로 한 것들이므로 지역적인 편차를 고려하지 않고 국산곡물중의 방사성탄소준위를 기준으로 하는 것은 무리가 있을 수 있다.

### 6. 결 론

주정에 함유된 방사성탄소 준위는 발효주정 여부를 판별하기 위한 지표로 사용될 수 있다.



[그림 5] 산지별 주정의  $^{14}\text{C}$ 준위 (1997년산).

근래 대기중 방사성탄소 준위는 매년 감소해 가므로 곡물 추정중의 준위도 같은 경향을 보이고 있다. 그러나 원자력과 화석에너지 사용량의 변동이 대기중 방사성탄소 준위를 변화시킬 수 있다. 그러므로 매년 수확되는 곡물중의 준위변동 양상을 지속적으로 추적하여 곡물발효에 의한 추정여부를 평가해야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Source and Effects of Ionization Radiation, New York, United Nations, 1977.
2. R. L. Kathren, Radioactivity in the Environment: Sources, Distribution, and Surveillance, Harwood Academic Publishers, New York, 1986.
3. M. McCartney, et al, "Carbon-14 discharges from the Nuclear Fuel Cycle: 1. Global Effect," J. Environ. Radioactivity, 8, 143-155(1988).
4. M. Stuiver and G. W. Pearson, "High-Precision Calibration of the Radiocarbon Timescale AD 1950-500 BC," Radiocarbon, 28, 805-38(1986).
5. R. L. Otlet, et al, "Background Carbon-14 Levels in UK Foodstuffs, 1981-1995, Based Upon a 1992 survey," J. Environ. Radioactivity, 34(1), 91-101(1997).
6. A. A. Burchuladze, et al, "Anthropogenic <sup>14</sup>C Variations in Atmospheric CO<sub>2</sub> and Wines," Radiocarbon, 31(3), 771-776(1989).
7. F. Schonhofer, "<sup>14</sup>C in Austrian Wine and Vinegar," Radiocarbon, 34(3), 768-771(1992).
8. S. Shibata and E. Kawano, "Effects of Latitude and Population Density in the Growing Districts on <sup>14</sup>C content of Rice," Appl. Radiat. Isot., 45(3), 815-816(1994).
9. 이상국 등, "CO<sub>2</sub> 흡수법에 의한 환경시료 중 <sup>14</sup>C 정량," 방사선방어학회지, 22(1), 35-46(1997).

Because of indifference, one dies before one actually dies

무관심 때문에 사람은 실제로 죽기전에 죽어버린다(육체적인 죽음에 앞서 정신적으로 죽는다).

- Elie Wiesel -