

# 경제적인 폐기물 소각처리 방안



장 동 순  
충남대학교 환경공학과 교수

생활쓰레기와 같은 폐기물의 소각은 태운다는 점에서 연소이다. 그러나 연료로 사용되는 폐기물의 성상이 다양하고 일관성이 없으며 많은 公害물질(공해물질)을 함유하고 있다는 점에서 화석연료인 도시가스나 미분석탄 등의 연소方法과는 根本的인 차이를 나타낼 수 있다. 최근 폐기물 소각로 건설과 운영은 소각로가 냄새나 비산먼지를 발생시키는 환경혐오시설이라는 점과 함께 소각처리시에 발생하는 다이옥신이 치명적인 독성도를 가졌다는 점에서 여론의 주목을 받아왔다. 특히 다이옥신의 고도처리를 위해서는 활성탄이나 SCR과 같은 高價의 후처리 장치 외에도 연소로 내의 완전연소를 위한 높은 온도의 운영이 불가피하게 요구되고 있다.

극도로 열악한 "dirty fuel"을 매우 청정하게 태워야한다는 점에서 폐기물 소각은 동그란 네모 또는 감성과학이나 정성과학 같은 단어가 가지는 것과 같은 근본적인 모순을 가지고 있다고 볼 수 있다. 이를 극복하기 위해서는 다른 화석연료 연소기술 以上의 고도 첨단 技術의 개발이 요구되며, 이에 따른 소각효율의 제고 및 경제성이 중요한 사안으로 대두되고 있다.

폐기물 소각처리 방안의 효율성능과 그에 따른 경제성 제고를 위해서는 사람마다 다양한 意見이 제시될 수 있으나, 필자는 투입되는 폐기물의 분리수거에 의한 연료의 동질성 향상문제, 소각로 내의 열 및 물질전달과 난류반응에 대한 深度있는 연구, 그리고 다이옥신 배출기준치 완화 등을 거론하고자 한다.

첫째, 투입되는 폐기물의 분리수거에 의한 투입 연료의 동질성 문제는 어떻게 보면 매우 진부한

제안 같지마는 연료의 동질성은 효율적 연소의 가장 기본적인 문제이며 간과해서는 안 될 사항이라 생각한다. 비근한 예를 들어 석유를 대체할 합성연료로서 석탄에서 제조되는 석유의 조성은 C/H비가 기존 석유의 C/H비의 2배 정도이다. 이러한 변화는 사소한 것 같지마는 기존 연소장치를 모두 바꾸어야 하는 문제점으로 대두될 만큼 근본적인 것이다. 이러한 점에 비추어 볼 때 투입되는 폐기물의 수분량, 발열량, 조성 및 그리고 성상 등의 현격한 변화는 조성이 일정한 저질의 쓰레기가 일관성 있게 투입되는 것보다 오히려 효율적인 연소의 관점에서 어려운 상황일 수 있다고 생각한다. 비록 스토커 소각로 같이 소각 특성시간이 길고 연소특성이 제반 변수에 덜 민감한 시스템일지라도 과도한 부담될 것은 분명하며, 合理的인 설계 및 운영의 장애요인이 되는 것이다.

둘째, 소각시스템에 대한 열 및 물질 전달 그리고 난류반응 등에 대한 체계적이고 深度있는 연구가 수행되어 소각로 설계에 활용되어야 한다는 것이다. 구체적 예로 소각로 고형폐기물에서 휘발가스에 의한 화염형성의 위치와 크기는 이에 따른 복사 열전달에 의한 고형폐기물의 건조, 휘발화 그리고 固-氣, 二相 연소反應의 촉진 등 스토커 소각로 효율을 결정짓는 중요한 메커니즘이라 할 수 있다. 그러나 이에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않으며, 이러한 근본적인 연구에 대한 장애요인 중의 하나가 쓰레기 조성의 일관성 없음도 기인한다고 할 수 있다.

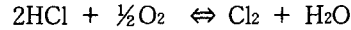
셋째, 다이옥신 문제에 있어서는 다이옥신의 독성도 평가와 배출기준치 설정에 있어서 지나치게

엄격한 기준이 설정되어 낭비적인 소각로 設計와 운영이 이루어지고 있지는 않은가 하는 것이다. 물론 일산화탄소, 분진, 냄새 물질, 산성 가스 등에 대한 기준의 배출규제의 엄격함의 유지에는 異見은 없으나, 규제농도에 대한 측정마저도 쉽지 않고, 그 농도에서 인체에 대한 위해도도 확실히 입증된 다이옥신에 대한 규제치는 10배 정도 완화할 필요가 있다고 생각한다. 이러한 主張에 대한 판단은 (1)현재 소각로의 다이옥신 배출현황과 (2)다이옥신에 대한 동물간의 독성도의 큰 차이와 (3)인체에 대한 직접적인 독성 사례에 대한 不在 등을 나타내는 여러 자료를 (4)동양의학의 체질론과 氣味論 등에 근거하여 분석함으로써 내린 결론이다.

### 소각로에 투입되는 폐기물 연료의 동질성 제고의 重要性

스트커와 같은 생활폐기물 소각처리 공정에서 지적되는 점은 폐기물 성상의 일관성 부재로 인하여 열량, 완전연소, 대기오염제어 등 모든 관점에서 운전이 매우 어려워지며, 가장 보수적이고 낭비적인 소각운영을 할 수밖에 없다는 점이다. 첫째 열량면에서 보면 수분을 多量으로 함유하고 있는 주방용 쓰레기를 약간의 가연성 물질과 보조연료를 사용하여 다이옥신 발생원천 제어나 SNCR의 운전 적정온도 유지를 위하여(막대한 기화열 손실을 감안하고도) 고온의 연소조건을 유지하여야 한다는 점이다. 두번째는 다양한 종류, 성상, 크기, 화학적 조성을 가진 폐기물의 소각은 완전연소를 위해 폐기물의 물리화학적 성분이 균일하지 않을 때 가장 처리하기 힘든 폐기물에 맞추어 최대한의 잉여공기와 난류강도가 유지되어야 한다. 이 결과로 원치 않는 막대한 양의 비산분진이 발생할 수 있다. 또한 불필요한 잉여공기 투입에 의한 산소의 농도 증가는 다이옥신의 전구체로 사용되는 염소분자의 생성을 유발시킨다. 즉 잉여공기 다량투입에 의한 산소농도의 증가는 온도가 떨어지는 후류영역에서 부식이나 다이옥신 생성에 치명적인  $Cl_2$ 의 농도는 증가한다. 아래 식은 Deacon Reaction에 의한  $Cl_2$

생성 반응을 나타낸다.



위에서는 단지 대표적인 몇 가지 例를 열거하였을 뿐이고, 소각로에 투입되는 폐기물의 물리화학적 조성이 다양하면 할수록 소각로의 내구성, 열효율, 대기오염제어 등의 관점에서 저열량의 폐기물이 일관성 있게 투입되는 경우와 比較해서도 운전 조건설정은 쉽지 않을 것이 예상된다.

폐기물 분리수거에 의해 소각되는 폐기물의 동질성의 중요성을 강조하기 위해 여러 연소특성이 연료의 종류와 성상에 따라 얼마나 큰 역할을 하는지 例를 들어보자. 우리가정에 공급되는 LPG나 LNG같은 도시가스의 경우 연소 성능의 일관성을 위해 한국가스공사는 많은 노력을 기울이고 있다. 그것은 공급되는 도시가스 산유국에 따라 조성 차이가 나며 연료의 발열량 조절을 위해 空氣를 얼마나 混合하는가 등으로 요약될 수 있다. 이 경우 버너나 연소로의 특성이 같을 경우 연소성능 일관성을 나타내기 위한 도시가스의 호환성은 화염의 전파속도(Weaver Flame Speed Factor)와 열량공급량(Wobbe Number)에 의해 左右되기 때문이다. 이러한 호환지수가 잘 일치하지 않을 경우 불완전연소가 나타난다. 극단적인 경우가 LNG의 LPG로의 연료교체시 공기압력의 조절이 제대로 이루어지지 않은 경우 넘비바닥이 잠깐동안에 시커멓게 변하는 현상들을 볼 수 있다.

우리가 흔히 보는 고체연료로서 연탄의 경우를 例로 들어보자. 연탄의 경우도 외국 무연탄을 사용하여 석탄의 발열량이 조금 높아지고 무기물인 회분의 조성이 바뀐다. 이렇게 되면 연탄은 필요한 시간동안 난방이 가능하지 않을 뿐만 아니라 상탄과 하탄이 용융부착되어 연탄교환이 어렵고 때로는 부스러지는 경우가 다반사이다. 이와 같이 연료의 조성상 크게 문제가 될 것 같지 않은 연탄의 경우에도 국내 무연탄의 안정적 공급이 어려워질 때 많은 문제가 나타나고 있다. 연탄을 역청탄을 탄화시킨 코크스로 만들어 체철용 또는 주물용 코크스로 19공탄을 만들어 밥을 짓는다면 어떻게 될 것인가

가? 이때는 강도나 열량면에서 제철용 코크스에 비해 떨어지는 주물용 코크스라 할지라도 높은 발열량에 의해 밥을 짓는 냄비가 녹아 구멍이 나는 현상이 발생한다. 겉으로는 크게 차이가 나지 않을 것 같은 연소시스템의 경우에도 실질적으로는 이와 같이 현격한 차이를 나타내는 것이다.

석탄을 사용한 화력발전소의 경우에도 사정은 크게 다르지 않다. 산지마다 다른 석탄의 발열량, 원소분석, 회재의 용융점, 공업분석, 그리고 석탄의 'grindability'에 따른 입도와 그 외 분포 등 연료 성상의 다양성은 연소효율의 향상과 대기오염 제어차원에서 많은 문제를 야기시킨다. 액상 폐기물이나 fume 소각로의 경우에도 연료 주입량이나 공연비 등 다른 조건이 모두 같다고 할 때도 공기나 액적을 구성하는 분자량의 차이에 의한 연소로 내 'penetration' 효과는 연소성능의 큰 차이를 나타낼 수 있다. 위에서 언급한 여러 당연하고 잘 알려져 있는 다양한 예를 다시 紙面을 할애하여 언급하는 이유는 폐기물 성상의 이질성이 폐기물의 소각성능에 얼마나 지대한 역할을 미칠 수 있는가를 강조하기 위한 것이다. 같은 氣相이나 液相의 연료에서도 분자량이 변함에 따라 연소성능에 영향을 미치는 상황임을 감안할 때 우리가 都市生活폐기물 소각처리에서 얼마나 무분별하게 물리화학적 조성이 틀린 다양한 종류의 쓰레기를 혼소하여 설계나 운전 또는 성능평가에 문제점을 야기시키고 있는지를 알 수 있을 것이다.

스토커 소각로와 같은 생활폐기물 처리시에 크게 문제가 되는 것은 수분이 다량으로 함유되어 있는 주방용 쓰레기와 각종 다양한 조대 쓰레기, 유리와 같이 녹는 물질 그리고 금속류 같은 비가연성 물질 등의 예는 누구나 알고 있는 사실일 것이다. 이렇게 다양하고 비균일한 폐기물을 그대로 투입하여 소각처리하고 거기다가 거기서 발생하는 다이옥신의 농도를 109개 중 하나의 농도로 정확하게 제어하고 소각로의 수명을 20년 유지하고 열병합 발전도 성공적으로 하는 것이 우리 소각의 당면목표라면 이것은 매우 현실성이 결여된 것이라는 생각이 든다.

결론적으로 연소의 효율과 대기오염제어장치의 경비절감을 위해서는 폐기물을 가급적 분리 수거하여 투입되는 폐기물의 조성에 따른 소각운전조건 설정에 대한 연구가 필요하다고 생각한다. 이러한 방법이 장기적인 안목에서 본 소각로 내구성, 연소의 효율성, 대기오염제어 경비의 저감 등에 이바지하여 경비저감을 가져올 수 있다고 생각한다. 이에 대한 대안으로 내세우는 필자의 제안은 두 가지로 요약할 수 있다.

첫째, 스토커 소각로에 투입되는 폐기물의 동질성을 최대한으로 유지하여 그에 알맞는 소각운전시스템을 개발하여야 한다. 즉 음식물 쓰레기의 소각처리 방법, 음식물 쓰레기가 아닌 가연성 물질의 소각처리 방법 등 쓰레기 성상에 따른 스토커 소각로 소각시스템 운영에 차별화를 강구해야 한다. 거기가다 염소를 함유하고 있는 PVC 등의 물질은 다이옥신 생성의 관점에서나 소각로의 내구성 관점에서 별도의 소각시설로 처리하여야 한다. 소각과 연소시스템에서 수분함량이 50%에 해당하는 음식물 쓰레기를 포함한 모든 쓰레기를 한꺼번에 성상의 변화를 수용해 가면서 다 태울 수 있다는 생각은 합리적인 것이 아니며 만용에 가깝다. 쓰레기의 질의 고하를 막론하고 성상을 가급적 균일화하여 쓰레기의 특성이 맞는 소각시스템과 운영방법을 개발하는 것이 필요하다고 생각한다.

둘째, 음식물 쓰레기를 직접 소각처리하기가 곤란할 경우 이러한 음식물 쓰레기를 위생매립지에 일차적으로 매립한 후 4~5년이 지난 후, 생물학적 분해가 어느 정도 진행되면 오염토양과 함께 시멘트 킬른과 같은 10,000~20,000ton級 대형킬른에서 현장처리하는 방법을 제안하고자 한다. 이렇게 될 경우 처리된 토양은 매립지 복토로 사용할 수 있으며 매립지 또한 반영구적으로 활용 가능한 장점이 있다. 그러나 이 방법은 위생매립에 의한 침출수와 LFG 처리의 완벽함이 전제되어야만 한다.

**열, 물질 전달 및 난류반응 고도연구의 중요성**

소각로의 효율적인 폐기물처리를 위해서는 열·

물질전달과 난류반응에 대한 소각로 상황에서의 深度있는 연구가 수행되어야 한다고 생각한다. 특히 스토커 소각로에서는 폐기물베드 내에서의 연소특성규명과 향상에 대한 연구, 휘발된 기체에 의한 기상반응에서의 복사열전달 문제 그리고 후연소로 영역에서의 완전연소와 SNCR 적용을 위한 난류반응에 대한 심도있는 연구가 소각로 경제성 제고에 절대적으로 필요하다고 생각한다. 이 문제는 다른 연소시스템에서 深度있게 논의되고 있는 문제이므로 여기서는 긴 토론을 생략한다.

**다이옥신 독성도에 대한 제한**

쓰레기 소각의 경제성 제고를 위해서는 분리, 수거와 高度연소기술에 따른 효율적인 소각도 중요하지만 다이옥신류의 규제치에 대한 문제 해결도 선행되어야 한다. 현재 다이옥신의 규제 농도는 0.1 ng-TEQ/Nm3 以下가 되도록 하고 있다. 이를 위해서 연소실 온도 850°C 이상, 체류시간 2초 등 고도연소기술로 완전연소를 유도하고 있다. 집진기의 온도 200°C 以下로 유지하여 후류영역에서 다이옥신 생성을 최소화함과 동시에 발생한 다이옥신을 각종 고가의 후처리 장치로서 배출 저감을 위한 노력을 경주하고 있다. 그러나 최신 국내 소각시설의 다이옥신류 배출현황, 공정 및 운전조건 자료에 의하면 10개의 대표적인 소각로의 다이옥신 배출농도는 A(0.06ng/m3), B(0.17), C(0.32), D(0.75), E(13.46), F(0.99), G(2.86), H(23.12), I(12.92), K(1.27) 등으로 규제치 0.1 ng-TEQ/Nm3을 만족하는 소각로는 A소각로 0.06의 한군데이고 나머지는 모두 2~3배에서 최대 100배 정도까지 초과하고 있다. 이 소각로들은 위의 규제치를 만족하기 위해 기존의 시설 외에 상당한 추가시설 투자를 하여야 하는 상황에 직면하고 있다.

다이옥신과 같은 독성물질의 독성효과는 독성물질의 투입량, 노출시간, 나이, 성별, 그리고 동물의 種類에 따라 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 같은 條件下에서 매우 세심하게 생육된, 같은 실험 동물이라 할 지라도 치사량을 나타내는 LD50 의

값에는 100배 정도 차이를 나타낼 수 있으며, 다른 동물간에는 심한 경우에 몇천 배의 농도차이가 예상될 수 있다는 것이다. 다이옥신의 LD50의 값도 이러한 現象에서 例外가 아니다. 아래에 제시한 LD50의 값에도 가장 취약한 guinea pig의 0.6 ~ 20 µg/kg에서 가장 저항력이 큰 hamster 1157~5051 µg/kg으로 몇천 배 정도의 농도차이를 보여주고 있다(표 1).

표 1. 실험동물들간에 LD50값의 차이 (단위 : µg/kg)

guinea pig	0.6~20
rat	22~45
chicken	25~50
monkey	70
rabbit	115
dog	100~200
mouse	114~284
hamster	1157~5051

표 2에는 다이옥신을 포함하여 다양한 종류의 화학물질에 대한 급성 LD50의 값을 나타내었다. 표 1과 표 2를 比較하여 보면, 다이옥신의 독성도는 표 1에서 다이옥신에 가장 취약한 guinea pig의 값 중에서도 낮은 농도쪽 값이 사용되었음을 알 수 있다.

표 2. 여러 종류의 화학물질의 급성 LD50 값

Agent	LD50
Sugar	29,700
PBBs	21,000
Alcohol	14,000
Salt	3,000
Malathion	1,200
Asprin	1,000
DDT	100
Arsenic	48
Nicotine	1
Dioxin(TCDD)	0.001
Botulinus	0.00001

이상의 자료제시로써 독성효과는 같은 種일 경우에는 100배 정도까지, 異種間에는 몇천 배까지도

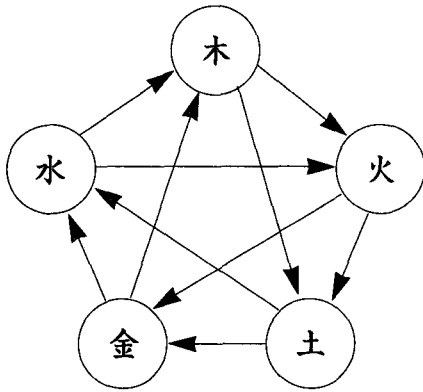
그 차이가 나타날 수 있으며 LD<sub>50</sub>의 농도책정에서는 가급적 안전한 쪽으로 保守의로 책정함을 알 수 있다. 이러한 독성도 차이에 대한 根本的인 질문은 왜 다른 種뿐만 아니라 같은 종간에도 이렇게 큰 차이를 나타내는 이유가 무엇인가? 또는 어떤 물질이 왜 어떤 동물에 대해서는 강력한 毒으로 작용하는데 어떤 동물에게는 그렇지 않은가? 다이옥신(TCDD)의 경우만 하더라도 hamster의 경우에는 LD<sub>50</sub>이 최대 5051 $\mu$ g/kg으로써 5mg/kg 까지 나타난 것은 guinea pig의 0.6 $\mu$ g/kg에 비해서 거의 10,000배 정도나 큰 저항력을 가진 경우라 볼 수 있다. 이것이 단순히 개체간의 健康차이에 의한 것인가? 아니면 이에 대해 다른 說明이 가능한 메카니즘이 있는 것인가?

본 논문에서는 동양의학의 최고의 경전으로 알려진 황제내경에 나타난 음양오행 이론에 의한 체질론과 氣味論으로 다이옥신 독성도의 큰 차이를 설명하고자 한다. 음양오행의 이론이 단순한 철학적인 空理空論이 아님은 세계적으로 가장 과학적인 言語로 알려진 훈민정음의 창제원리가 음양오행이라는 데서 알 수 있으며, 또한 최근 음양오행에 대한 과학적 接近에 의한 제도권내의 연구가 新科學 또는 氣科學分野에서 이루어지고 있다. 여기서는 음양오행이론 관점에서 본 독성학에 대한 새로운 見解를 제시하고자 한다. 음양오행 이론에 의하면 우주삼라만상을 구성하는 5가지 기본적인 기운이 있으며 이것은 木, 火, 土, 金, 水이다. 사람도 이 木, 火, 土, 金, 水 5가지 원소의 五行의 많고 작음에 따라 5장 육부의 크기가 결정되며 그 결과로서 5가지의 체질로 나누어지는 것이다.

구체적으로 木의 기운은 인체에서 간장과 담낭에서 나오므로 간과 담이 큰 사람은 木型의 사람이라 부르며 이런 사람은 간과 담이 큰 대신에 비장과 위장(土)과 폐와 대장(金)은 상대적으로 弱하다는 것이다. 이렇게 木의 기운을 많이 가지고 있는 사람은 木의 기운을 나타내는 신맛의 음식(팥, 아스피린, 국수)은 매우 싫어하며 자기가 부족한 土의 기운인 단맛이나 金의 기운인 매운맛을 좋아하게 되는 것이다. 이와 같이 동양의학에서는 인체

의 건강에 영향을 미치는 가장 강력한 인자 중의 하나로 음식의 맛을 強調하고 있으며 이것이 동양 약리학의 핵심인 氣味論이다. 이 이론에 의하면 독이란 자기 체질에 맞지 않고 그 맛의 강도가 강하면 강할수록 毒이 된다는 것이다. 비근한 예가 감미료로 많이 사용되는 사카린 같은 것은 단맛인 土의 기운이 매우 강하므로 독성학 임상실험 결과에 의하면 실험동물인 쥐에 방광암을 일으키는 예는 음양오행의 土克水의 이론으로 설명된다. 또한 아스피린 개발 100주년 기념학회에서 널리 보고되었던 바와 같이 아스피린이 특정한 사람에게 위장 출혈을 일으키는 것은 강한 신맛의 아스피린에 의한 木克土현상이다. 표2에 의하면 아스피린이 농약인 말라티온보다 강한 독성을 나타내는 것으로 나타났다. 그리고 마이신과 같은 항생제가 혈변이나 피부병을 일으키는 것은 쓴맛의 항생제에 의한 火克金 등의 원리이다. 페니실린 충격과 같은 현상도 특정체질에게만 나타나는 현상임은 잘 알려진 사실이다. 본 논문에서는 이에 대한 자세한 紙面을 할애할 수 없으므로 표 3에 나타난 음양오행 속성표로 대체하고자 한다. 그러나 음양오행 이론에 기초하여 내릴 수 있는 정성적인 결론은 다이옥신은 guinea pig와 같은 동물에 비해 인체에게는 그만큼 큰 건강상 위해를 주지 않을 것이라는 것이다. 그것은 種間的 큰 체질차이와 이제까지 다이옥신에 의한 많은 환경사고에서 인체에 대한 危害가 크게 두드러지지 않았다는 점을 고려해서 내릴 수 있는 결론이다. 그러므로 다이옥신에 대한 배출 기준치를 현재 0.1ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>에서 1ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>로 완화하는 것이 가동중인 인체에도 영향을 주지 않으면서 소각로의 경제성을 회복시킬 수 있는 방법이라고 생각한다. 끝으로 부연하면 다이옥신에 대한 피해는 주로 간과 신·방광, 그리고 면역계통에서 발생하고 있다. 이것에 대한 동양의학적 대처방법은 간과 신·방광을 좋게하는 신음식과 콩과 같은 음식을 많이 먹고, 그리고 심포삼초를 강화시키는 방법을 강구하면 다이옥신에 대한 건강상의 피해는 크게 줄일 수 있다고 생각한다.

표 3. 음양오행의 원리와 체질 및 오행분류



相生 : 木生火, 火生土, 土生金, 金生水, 水生木

相克 : 木克土, 土克水, 水克火, 火克金, 金克木

五行	木	火	土	金	水
속 성	緩	散	固	緊	軟
설 명	따뜻하고 부드러운 에너지	폭발하듯 확산하는 열기	안으로 단단하게 뭉치는 힘	기장 또는 결정을 이루는 힘	차고 연하며 아래로 흐르는 기운
얼굴형태					
성 격	착하고 부드럽고 진취적이다.	예술적 정열적이고 폭발적이지만 뒤끝이 없다.	남에게 눈치를 안보고 비위가 좋고 확실하다.	규칙적이고 권위와 의리가 있다.	사근사근하고 참을성이 많고 비밀이 많다.
지배장부	간(-) 담(+)	심장(-) 소장(+)	비장(-) 위장(+)	폐(-) 대장(+)	신장(-) 방광(+)
지배부위	눈, 목, 고관절, 발, 편도선, 근육, 손톱, 발톱,	주관절, 얼굴상완, 혀, 피, 혈관, 주걱뼈	비계, 배, 무릎대퇴부, 입과 입술	피부, 코, 체모, 하완, 가슴, 향문, 손목, 관절	뼈, 골수, 힘줄, 귀, 허리, 이빨, 머리털, 음부, 발목
년	春	夏	長夏	秋	冬
일	새벽	오전	정오	오후	저녁
맛	酸(신맛)	苦(쓴맛)	甘(단맛)	辛(매운맛)	鹹(짠맛)
색 깔	청	적	황	백	흑
5 곡	팥	수수	기장	현미, 울무	서목태(콩)
5 축	개	염소	소	말	돼지
太過년도	92	98	94	90	96
기 타	아스피린	마이신	사카린	석유	-