

# 탄소배출권 가격의 열역학적 계산



김덕진

엔테스(EnTEs) 대표  
entes@outlook.kr

## 1. 서론

전 세계 과학자들은 온실가스로 인한 기후변화 및 국가경제 악영향의 심각성을 학문적으로 증명 및 계산하고 있다. 그런데 탄소 가격은 왜 시장 논리 또는 정부 세급에 의해 결정되어야 하는가의 질문을 한다. 공정성, 합리성, 범용성, 법칙성을 기반으로 탄소단가 역시 학문적으로 증명 및 계산되어야 할 것이다. 본 연구에서는 환경학, 열공학, 경제학을 상호 융합하여 탄소배출권 가격은 학문적으로 계산될 수 있음을 제안하며, 탄소 1 ton을 배출하면 그 가격은 11,500 원으로 책정되었다. 2014년 전 세계 탄소 배출 비용은 362 조원으로 계산되었으며, 산업혁명 이후 200년 동안의 전 세계 탄소 배출 비용은 18,170 조원으로 계산되었다. 선진국에서 이 금액을 절대적으로 책임진다면 중진국 및 후진국 모두가 탄소배출에 대해 절대적인 책임을 질 수 밖에 없을 것이다.

현재 전 세계적으로 기후변화완화 정책이 추진되

## Plant Technology



고 있다. 여기서 기후변화를 야기하는 인자는 무엇인가 및 기후변화 완화 정책 추진의 기본 원칙은 무엇인가에 대한 명확한 답변이 필요하다. 전자에 대한 답변은 전 세계 과학자들이 학문적으로 증명 및 계산하였으며, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황의 6 종류가 주된 원인으로 결정되었다. 언론 매체를 보면, 탄소배출권 정책으로부터 고용창출, 생산유발, 파생상품 개발, 탄소금융, 신성장 동력, 이윤창출 등의 단어가 등장한다. 기후변화 완화 정책의 기본 원칙은 위 단어를 일 수는 없다. 위 단어를 추구하면 기후변화 완화에 도움이 된다는 것인가의 질문을 한다. 기후변화 완화 정책 추진의 기본 원칙은 인간의 쾌적한 삶을 위해서 즉 인간의 권리를 보호하기 위해서 일 수 있다. 그러나 인간의 권리는 위에서 언급한 단어들로 왜곡될 수 있다. 선행연구(1)에서 권리는 인간의 권리와 환경의 권리로 나뉘며, 환경의 권리는 인간의 권리와 정확히 동일하다는 것을 증명한 바 있다. 따라서 기후변화 완화 정책 추진의 기본 원칙은 환경

의 권리 보호임을 강조하고자 한다.

선진국의 플랜트를 후진국으로 이전한다면 탄소는 감축되는가의 질문을 한다. 선진국에 있는 플랜트는 각종 규제에 의해 탄소 감축 노력을 할 수밖에 없으나, 후진국에는 규제가 미비하기 때문에 공장 확장으로 인한 탄소는 더욱 증가할 수밖에 없다. 탄소는 국가와 관계없이 절대적으로 제거 되어져야만 감축되어지는 것이다. 시장을 통해 탄소를 거래하는 것이 올바른 정책인가의 질문을 한다. 인류의 의무인 탄소 감축을 시장에서 흥정을 통해 거래하는 것은 올바른 정책일 수 없다. 기후변화 등은 전 세계의 과학자들에 의해 학문적으로 증명 및 계산되고 있다. 그런데 왜 탄소 가격은 시장논리에 의해 결정되어야 하는가의 질문을 한다. 탄소 가격 역시 공정성, 합리성, 범용성, 법칙성을 기반으로 학문적으로 증명 및 계산되어야 한다.

환경열경제학(1)은 권리와 의무를 증명하고 그 양을 계산하는 학문이다. 본 연구에서는 탄소배출권 가격을 학문적으로 계산하고, 탄소배출권 정책에 대한 새로운 관점을 제시하고자 한다.

## 2. 탄소 제거에 필요한 최소일 계산

혼합기체 중에 포함된 물분율  $y$  의 탄소를 제거하기 위해 탄소포집장치를 설치하고 전기를 투입하면 탄소가 100%로 포집된다. 여기서 핵심은 탄소포집장치 설치를 위해 초기투자비가 소요되며, 포집을 위해 전기가 투입되어야 한다는 것이다. 물질  $i$  포집을 위해 필요한 최소일은 열역학적으로 계산되며, 그 수식은 다음과 같다.

$$w_i = R_i \cdot T_0 \cdot \ln(y_i / 100\%) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1)$$

여기서  $w$ 는 물질 1 kg을 포집하기위해 투입되어야할 최소일 또는 최소전기,  $R$ 은 기체상수,  $T_0$ 는 외기온도,  $y$ 는 가스 중의 물질 물분율, 하첨자  $i$ 는 포집될 물질을 뜻한다. 일반적으로  $T_0$ 는 288.15 K를 적용하고, 이산화탄소의 기체상수  $R$ 은 0.1889 kJ/kgK이다. 산업혁명 이전 대기 중 탄소 몰농도는 0.03% 정도이었으나, 현재 0.05%에 근접하고 있다. 따라서 대기 중 몰농도 0.05%의 탄소를 1 kg 포집하기위해 투입되어야할 최소일은

414 kJ/kg으로 계산된다. 대기 중의 탄소는 나무가 일을 하여 포집하고 있고 나무의 최소일은 414 kJ/kg이다. 환경의 권리는 인간의 권리와 동일하므로, 인간은 탄소 제거 일에 대한 노동비를 환경에 지불해야 한다.

위키백과사전에 “광합성”을 검색하면 다음과 같다. 일반적인 녹색식물의 광합성시 에너지 변화는 112 kcal/mol 이고 빛의 자유에너지는 120 kcal/mol이므로 8 kcal/mol 손실은 엔트로피에 의한 것이다. 열역학 제 2 법칙적으로 자연의 광합성 또한 엔트로피와 엔탈피의 상호작용에 의한 에너지 변환이 일어나는 것이다. 위는 나무는 다양한 일을 하고 있고, 그 일은 열역학적으로 해석된다는 뜻이다. 따라서 식물학 역시 환경열경제학의 좋은 연구 주제가 될 수 있다.

## 3. 탄소 배출권 가격 계산

유럽 거래시장에서 탄소 1 ton 당 가격은 약 3~30 유로 정도이며, 심하게는 0.3 유로까지 떨어진 적이 있다. 기후변화 완화 정책이 인간의 권리를 추구하는 것이라면 위 시장가격이 맞을 수 있다. 그러나 환경의 권리를 추구하는 것이라면 그 가격은 상수가 되어야 한다. 환경은 대기 중 탄소를 제거하기 위해 과거 45억년 동안 일을 하였고, 지금도 일을 하고 있고, 인간이 산업혁명 이후 현재까지 배출한 탄소를 미래 수만년 동안 일을 하여 제거할 것이다. 환경이 하는 일의 양은 경제적 시장과 관련이 전혀 없다. 우리나라는 2015년 1월 17일 탄소시장을 부산에 개설하였고, 탄소 1 톤당 7,860 원을 시작으로 2015년 10월 7일 11,300 원, 2016년 4월 25일 18,450 원이 되었다.

우리나라의 공업용 사용 전기단가는 약 80 원/kWh 정도이며, 기본 단가를 포함하면 약 100 원/kWh 정도로 추정된다. 1 kWh는 1 초당 1 kJ의 전기를 1 시간 동안 사용한 에너지량이므로, 1 kWh는 3,600 kJ이다. 따라서 환경으로부터 탄소 1 ton을 제거하기 위한 최소 전기비용은 414 kJ/kg×100 원 / 3,600 kJ 즉 11,500 원 (9.0 유로)이다. 나무 한 그루가 1년 동안 평균적으로 약 10 kg의 탄소를 흡수할 수 있으므로, 1 ton의 탄소를 흡수하기 위해서는 단순 계산으로 100년이라는 시간이 소요된다. 100년 동안의 나무 유지관리비 및 임야 임대료

등을 고려할 때 탄소 1 ton당 11,500 원의 단가는 매우 낮은 금액임을 알 수 있다. 위 단가는 탄소를 방출하면 무조건 책정되는 최소 금액으로서 가장 강력한 정책임을 알 수 있다. 즉 오늘 방출한 탄소는 나무를 구매하지 아니면 직접제거 하든지 등의 방법으로 오늘 제거하라는 정책이다.

탄소 몰농도 5%의 연돌에서 탄소포집장치로부터 탄소 1 ton을 제거하기 위한 최소일은 163 kJ/kg이다. 따라서 그 비용은 163 kJ/kg×100원/3,600 kJ 즉 4,500원(3.6 유로)이다. 환경으로 방출하면 11,500 원이고, 탄소포집장치를 설치하면 4,500원 + 에너지 재투입 비 + 초기투자비 + 유지비로서 그 가격은 매우 높을 수밖에 없고, 이것이 탄소를 제거하는 설비인지 아니면 탄소를 더욱 방출하는 설비인지 의문이 있게 된다.

전 세계 연구자들은 왜 위와 같은 간단한 방법을 지금까지 제안 못하였는가의 의문이 있게 된다. 그 답변은 다음과 같다. 1) 탄소 단가는 시장이 결정해야 한다 및 정부가 세금으로 결정해야 한다는 프레임이 벗어나지 못하였다. 2) 환경학, 열공학, 경제학을 동시에 융합해야만 제안될 수 있다. 3) 환경의 권리는 인간과 동일하다는 것이 증명되어야 한다.

## 4. 탄소 배출권 할인/할증 제도

본 연구는 탄소 감축 거래제가 아니라 탄소 제거 의무제이다. 따라서 탄소를 배출하면 무조건 의무금이 책정된다. 탄소 100 ton을 방출하였다면, 그 의무금은 100 × 11,500 = 1,150,000원이다. 정부와 업체가 탄소 배출량을 80 ton으로 약속하였으나, 업체가 20 ton 더 배출하였다면, 거래제에 의한 금액은 20 × C 로서, 거래제에 의한 단가 C는 57,500원이다. 즉 탄소 배출 단가는 2016년 4월 25일의 18,450원이 아니라, 57,500원(45 유로) 정도 되어야 적절한 수준임을 제시한다. 따라서 본 제안의 계산법이 가장 강력한 정책이 된다. 본 가격이 매우 높다고 할 수 있으나, 위에서 언급하였듯이, 100년 동안 성장한 나무 한그루 값이 얼마인지를 생각해야 한다. 초과된 20 ton에 시장가격 18,450원을 곱하면 369,000원이다. 이것을 100 ton으로 환산하면 탄소

1 ton 당 3,690원이다. 즉 이 단가를 적용하여 절대 정책을 추진한다면, 2016년 4월 25일자를 기준으로 거래제와 의무제는 동일한 정책 효과가 된다.

할인/할증 제도를 적용할 수 있다. 감축할수록 할인을 해주고, 증가할수록 할증을 하는 제도이다. 그 기본 수식은 다음과 같다.

$$D = C_0 \times E^n / P^n \quad (2)$$

여기서,  $D$ 는 의무금,  $C_0$ 는 11,500원/ton과 같이 국가 및 업체의 구분 없이 책정되는 탄소배출단가,  $E$ 는 실제 탄소배출량,  $P$ 는 정부와 업체가 합의한 탄소 목표량, 윗첨자  $n$ 은 기후변화완화 의무지수로서 할인/할증의 강약을 결정한다. 인류는 성장할 수밖에 없으므로 현실적으로 할인이 아닌 할증이 발생할 가능성이 매우 높다. 따라서  $n$  값으로 후진국 소유의 플랜트에는 1.0, 중진국 소유의 플랜트에는 1.2, 선진국 소유의 플랜트에는 1.4, 탄소감축 목표 달성이면 2.0 등으로 차등 적용하는 것도 하나의 방법일 것이다.

## 5. 지구자원 채굴권의 제안

기후변화의 관점으로 출발하자면, 기후변화는 플랜트 업자가 배출한 탄소 때문이므로 탄소배출권이 추진되어야 한다. 환경의 권리는 인간의 권리와 동일하다는 관점으로부터 출발해 본다. 플랜트 업자가 배출한 탄소를 환경은 향후 수만년 동안 일을 하여 제거해야 한다. 따라서 탄소배출업자는 미래일에 대한 노동비를 환경에 지불해야 하므로 탄소배출권을 추진한다. 지구자원은 과거 45억년 동안 환경이 일을 하여 만들었다. 따라서 채굴업자는 과거일에 대한 노동비를 환경에 지불해야 하므로 지구자원 채굴권을 추진한다. 플랜트 업자는 탄소를 환경으로 배출하며, 채굴업자는 땅속에 묻혀있는 지구자원을 환경으로 배출한다. 플랜트 업자는 미래의 기후변화를 야기하며, 채굴업자는 과거 환경의 기후변화 완화 노력의 결과를 파괴한다. 이와 같이 탄소 배출 논리와 지구자원 채굴 논리는 같으므로, 지구자원 채굴권을 제안하며, 업자는 지구자원을 환경으로부터 채굴이

아닌 구매해야 함을 주장한다.

## 6. 2014년 및 200년간 탄소 포집 비용

2014년 화석연료 연소로부터 방출된 탄소량은 약  $3.15E13$  kg이므로 탄소포집을 위한 최소비용은  $3.15E13$  kg $\times$ 11,500원/ton 즉 362 조원이다. 이것은 매년 산림이 최소 362 조원 금액의 일을 해야 한다는 뜻이다. 탄소 감축의 의무가 있는 국가는 362 조원의 금액을 책정하고, 저개발 국가는 방출된 탄소만큼 묘목을 의무적으로 심는 것이 탄소감축 추진 방법이 되어야 할 것이다.

현 기후변화의 원인은 산업혁명 이후부터 방출된 탄소의 누적 때문이다. 현 탄소 물분율 0.05%에 탄소분자량 44를 곱하고 공기평균분자량 28.84를 나누면 그 질량분율은 0.076%이며, 산업혁명 이전 탄소 물분율 0.03%의 질량분율은 0.046%이다. 따라서 포집해야 할 탄소질량분율은 0.030%이다. 대기의 총질량은  $5.14E18$  kg이며 이중 0.030%의 탄소를 포집해야 하므로, 산업혁명 이후 증가된 탄소 질량은  $1.54E15$  kg이다. 2014년 탄소 방출량은  $3.15E13$  kg이며, 산업혁명 이후 200년 동안 2014년의 1/4 배 정도를 평균으로 취할 때 그 총량은  $1.58E15$  kg이다. 위 계산은 가정치를 적용하였으나, 정확한 값을 적용하더라도 큰 오차는 없을 것이다. 산업혁명 이후 발생된 탄소 최저 의무금은  $1.58E15$  kg  $\times$  11,500원/ton 즉 18,170 조원으로 계산된다. 만약 산업혁명 이후 지속적으로 묘목을 심고 그 숲을 유지 관리하였다면 200년 동안 총 181 조원만 투입해도 지금과 같은 심각한 상황에 직면하지 않았을 것이다. 산업혁명 이후 탄소누적에 대한 기후변화의 책임 비용인 18,170 조원이 의무금으로 책정되어 환경보전에 투입되어야 모든 국가가 환경보전의 의무를 동등하게 책임지는 것이다. 과거 45억년 동안 환경의 기후변화 완화 노력의 결과인 지구자원을 채굴했던 자원국가 역시 동일한 의무금이 책정되어야 할 것이다. 즉 지금이라도 선진국 18,170 조원 그리고 자원국 18,170 조원으로 온 지구를 산림으로 뒤덮어야 할 것이다.

## 7. 탄소배출권의 목적 및 정책 추진 방향

구글에서 “탄소배출권의 목적”으로 검색하면, 국제신문 2014.01.08. 3면 단 하나의 웹페이지가 다음과 같이 검색된다. “탄소배출권의 목적은 온실가스 감축에 있다며 한국전력거래소의 지정 당위성을 강조한 전남도보다 부산시의 금융도시 논리가 타당하다고 본 것이다.” 그 신문에서의 핵심단어는 고용창출, 생산유발, 배출권 관련 파생상품 개발, 동북아 탄소금융 주도, 신성장 동력, 금융투자업자, 경쟁매매 등이다. 기후변화에 대한 각종 논문 및 보고서 상에 탄소배출권의 목적이 명확히 서술되어야 하며, 모든 정책은 그 목적에 맞게 추진되어야 할 것이다.

결자해지의 원칙에 따라 플랜트 업자가 탄소배출에 대한 의무금으로 부터 환경보호 수행을 직접해야 한다. 대표적인 환경보호 수행으로 식목이 있으며, 최소의 비용으로 최대의 식목을 할 수 있는 지역과 플랜트 업자가 자매결연하여, 플랜트 업자는 의무금을 지출하고, 그 지역의 주민은 식목 및 유지관리를 담당하고, 산림이 형성되면, 그 산림의 탄소포집은 플랜트 업자의 환경보호노력으로 인정하는 것이다. 대기업은 직접 환경보호 수행을 할 수 있으며, 중소기업은 정부의 협력 하에 환경보호를 수행할 수 있다. 이외의 다양한 정책이 있을 것이다. 핵심은 플랜트 업자들이 의무금을 국가나 국제기구에 수납하는 것이 아니라, 플랜트 업자가 직접 환경보호를 수행해야 하며, 국가는 플랜트 업자들이 올바르게 환경보호를 수행하고 있는지 관리하고, 국제기구는 각 국가를 관리해야 한다는 것이다.

## 8. 결론

탄소배출권 정책의 목적은 기후변화 완화임은 분명하다. 그러나 더 근원적 목적은 환경의 권리를 보호하기 위해서 임을 강조한다. 환경은 인간이 배출한 탄소를 미래 수만년 동안 일을 하여 제거할 것이므로, 미래 일에 대한 노동비를 탄소배출권 정책을 통해 환경에 지불해야 한다. 환경은 과거 45 억년 동안 기후변화를 야기하는 탄소를 일을 하여 지하에 매장하였으나, 인간이 채굴

을 통해 기후변화물질을 환경으로 배출하는 바, 과거 일에 대한 노동비를 환경에 지불하고 채굴해야 한다. 탄소 배출 비용을 공학적 관점으로 계산한 결과, 대기 중의 탄소 1 ton을 제거하기 위한 최소 비용은 11,500원 (9.0 유로), 2014년 탄소 배출 총 비용은 362 조원, 산업혁명 이후 탄소 배출 총 비용은 18,170 조원으로 계산되었다. 지구자원 채굴권 역시 위와 동일한 금액이 책정되어야 할 것이다. 위 금액을 환경에 어떻게 되돌려 줄 것인지에 대해서는 독자가 이해하고 있을 것이다. 모든 논문 및 보고서 상에 탄소배출권의 목적을 명확히 기입하여, 연구 및 정책이 그 목적에 벗어나지 않

도록 해야 한다. 환경정책의 근본 원칙은 환경의 권리 보호임을 강조한다.

## 참고문헌

1. Kim, D. J., 2016, "Thermodynamic Certification for Environmental Rights," Proceedings of the Korea Institute of Plant Engineering & Construction, Conference, it will be published. 