

화석에너지원의 LCI구축 및 온난화가스 배출량 분석:일본의 사례

尹 性二* 小川 芳樹**

(* 일본 에너지경제연구소, 종합연구부 전문연구원,
**일본 에너지경제연구소, 종합연구부 부부장, 제3연구실 실장)

Study of Green House Effects of Each Fossil Energy Examining from Mining to Combustion

SungYee YOON, Yoshiki OGAWA,

I. 서 론

기후변화 협약에 관련하여 2010년까지의 온실효과 가스의 억제목표를 결정한 교토의정서가 채택되었다. 이 결과로 각국가가 2010년을 목표로 에너지분야의 구체적인 대책의 검토가 시작되고 있다. 지금까지 각국의 수년간에 걸친 검토는 경제사회의 구조변혁을 목표로 하는 에너지산업의 규제완화가 중요과제였지만 교토합의로 인해 논의의 방향성에 있어서 재차 규제의 선택이 농후해 질 것으로 예측된다.

에너지의 소비는 그 생산지에서 소비지까지 일정한 체인을 형성해서 여러 가지 활동이 시스템화된 결과이다. 온실효과 가스는 이렇게 시스템화된 생산, 가공, 수송이라는 공급과정에서 각각의 연료소비 등에 의해서 배출된다. 또 이들 온난화 가스중 메탄은 CO₂보다 온실효과가 더욱 크며 채굴 등의 단계에서 많이 배출된다. 따라서 지구온난화 문제의 해결을 위해 온실효과 가스 삭감의 목적을 가지고 에너지 정책을 구상한다면 채굴에서 연소까지 전과정의 온실효과를 누적해서 생각할 필요성은 논의의 가치조차 없다고 해도 과언이 아닐것이다.

이러한 사회분위기에 대응하여 본 논문에서는 지

속가능한 개발을 위해 연구되고 있는 LCA의 수법 중 LCI의 구축을 시도하고, IPCC의 제2차 평가보고서¹⁾를 시작으로 하는 현시점까지 발표된 문헌과 데이터를 가능한 한 수집해서 채굴에서 연소까지의 종합적인 온실효과를 평가했다. 분석에 사용된 데이터는 가능한 한 세계평균치에 가깝도록 조정해서 원단위를 도출하는데 노력했다. 또하나 본연구의 결과에 의미를 부여하고자 하는 것은 진발열량과 총발열량의 비교분석을 함으로써 향후 국제사회에서 논의될 가능성이 있는 문제에 관해 언급하였다는 것이다. 이러한 의미에서 채굴에서부터 최종 소비까지의 지구 온난화 평가를 함께 함으로써 금후 에너지정책을 결정할 때 하나의 토론자료로서 쓰여졌으면 하는 바람이다. 분석에서 쓰여진 데이터가 아직 세계평균과 반드시 정합성을 가진다고는 하기 어려운 부분이 있지만 그러한 데이터로부터의 오차는 시간을 가지고 수정 해가야 할 문제로 남겨두고 싶다. 그리고 LCI의 구축에 있어서도 인벤토리의 범위를 설정하는 데 설비의 평가등 몇가지 한계성을 내포하고 있다는 것을 언급해 두고자 한다.

마지막으로 본 논문은 LCA의 수법연구가 아니고 에너지 정책 수립을 위한 평가수법으로서 LCI를 사용하고 있다는 것을 말해 두고자 한다.

II. IS14040에 근거한 LCI구축과 배출계수의 평가

1. 인벤토리의 설정

여기에서는 LCA를 하는데에 있어서 기본적인 작업수준으로는 크게 목적과 범위의 설정, 인벤토리 분석, 영향평가, 결과의 해석, 보고, 크리티칼 리뷰의 6 단계로 나누어 진행되고 이들관계에 있어서 상호간의 피이드 백을 통하여 최종적으로 LCA는 완성된다. 본 장에서는 LCICO₂의 평가를 수행하는 과정에서 가장 중요한 포인트인 인벤토리를 어떻게 설정하느냐 하는 문제에 관해서 명확하게 하고자 한다. 그리고 평가의 대상이 하나의 제품에 국한 되지 않고 화석에너지원의 각각을 비교 평가 하기 때문에 크리티칼 리뷰에 관계되는 부분에 대해서는 피이드 백의 과정을 거쳐서 그 문제점을 해결하기로 한다.

이하의 분석에 있어서는 채굴과 수송, 그리고 정제와 연소의 과정을 분석범위로 하며 석탄, 석유, LNG, LPG를 그 대상으로 한다. 각 과정의 설비제조를 위한 투입에너지와 운용을 위한 투입에너지중 설비의 제조를 위해 투입된 에너지와 유발에너지에 대해서는 평가의 범위에서 제외한다. 또 석유제품의 수출부분에 대해서도 고려하지 않기로 한다. 논문 전반의 추계분석에 쓰여진 수법으로서 Bottom-Up 수법을 기본으로 한다.

2. 연료별 이산화탄소 배출계수의 고려

일본을 포함한 세계의 몇 개 국가의 에너지 발전스 통계²⁾는 에너지를 원단위로부터 열량단위로 변환하는 계산에서 총발열량(HHV)의 칼로리를 사용하고 있다. 실험실에서 실지로 측정가능한 열량은 수분이 액체상태에서 존재하는 총발열량 베이스의 값을 가지고 있기 때문이다. 이산화탄소 배출의 총량을 계산하는 경우에 있어서도 각 에너지원의 배출계수는 총발열량 베이스의 것을 사용하고 있다. 총발열량 베이스로 본 배출계수³⁾의 대소관계는 천연가스(LNG)를 100으로 할 때 석탄:석유:LPG:천연가스(LNG)

가 183:139:121:100으로 된다.

이미 설명한 바와 같이 총발열량은 실험실에서 실제로 측정된 에너지의 연소 발열량이지만 이경우는 수분이 액체로 존재하고 있다. 실제 에너지의 연소에서는 수분은 잠열을 흡수·기화해서 기체로 존재하기 때문에 칼로리 베이스로 등가에너지 관계를 생각한다면 발열량을 진발열량(LHV)을 기초로 해야 한다는 것이 타당할 지도 모른다. 국제 에너지 기구는 실제로 세계전체의 에너지통계를 정비하는데 있어서 진발열량 베이스로 하고 있다³⁾.

IPCC는 온실효과 가스의 국가별 보고서를 위한 가이드라인의 작성⁴⁾에 있어서 세계 대부분의 나라가 진발열량을 베이스로 에너지통계를 정비하고 있다는 것을 이유로 가이드라인 안에서는 진발열량 베이스의 이산화탄소 배출계수를 제시하고 있다. 이 가이드라인 작성 작업은 IPCC와 UNEP, IEA, OECD의 공동작업으로 진행되었다. 이 배출계수와 IEA의 에너지 통계를 사용하여 세계각국의 이산화탄소 배출을 산출한 보고서⁵⁾가 최근 IEA로부터 발표되고 그 중에서도 진발열량 베이스의 이산화탄소 배출계수가 정비되어 있다.

진발열량을 베이스로 하는 배출계수에 의한 그 대소관계는 천연가스(LNG)를 기준치 100이라고 하면 석탄:석유:LPG:천연가스(LNG)는 169:131:112:100으로 된다. 이와같이 사용하는 발열량에 의해서 화석에너지간의 이산화탄소 배출계수의 크기는 상당한 차이가 있다는 것을 확인해 두지 않으면 안된다.

또 IEA는 총발열량에 대한 진발열량의 비율은 천연가스의 경우에 0.9, 석유, 석탄의 경우에 0.95로 평가하고 있고, IPCC의 가이드라인은 이점을 확인하고 있다. 따라서 이 이후의 분석에서 총발열량 베이스로 본 것으로 변환할 필요가 있는 경우는 이 비율을 기본적으로 사용하였다. 발열량의 적용에 있어서는 총발열량 기준으로 아래와 같은 값을 사용하였다.

석탄은 일반탄(수입탄)을 기준으로 6200kcal/kg이고 석유(원유)는 9250kcal/l이며 천연가스는 9800kcal/m³를 사용하였으며 LNG는 13000kcal/kg, LPG는 12000kcal/kg를 기준 발열량으로 하였다.

생산, 수송, 가공단계의 연료소비에 의한 이산화탄소 배출과 석유, 가스전의 수반 이산화탄소의 방출을 포함한 온실효과의 크기는 1990년에 일본 에너지종합연구소⁶⁾, 일본에너지경제연구소⁷⁾, 전력중앙연구소⁸⁾ 등의 연구가 있다. 이러한 연구는 메탄의 누설에 대한 평가가 빠져있는 점과 일본국내에 평가의 시점을 맞추어 결과를 도출하고 있다. 그리고 총발열량과 진발열량의 논의에 대한 논술은 전혀 언급되지 않고 있다. 또한 LCA적 관점에서 평가대상의 데이터에 대한 공정성과 데이터의 공정성등에서도 많은 문제점을 내포하고 있다. 본연구의 특징은 평가대상을 지구온난화 문제로부터 제기하여 글로벌적인 관점에서 평가하고 있다는 점과 메탄누설, 그리고 총발열량과 진발열량에 대한 분석이 특징이라고 할 수 있다. 그러한 의미에서 선행연구와는 생각방법과 계산수법에서 완전한 차이를 가지고 있다.

III. CO₂ 및 메탄의 배출원단위 추계

1. CO₂배출원단위의 추계

1) 석유와 천연가스의 생산단계의 플레어 연소

1996년까지의 천연가스의 총생산량, 재압입량, 플레어연소량, 시장판매를 위한 생산량의 변화는 매년 프랑스의 CEDIGAZ가 발표하고 있는 통계⁹⁾가 있다. 1996년 천연가스 생산관련의 데이터는 총생산량 2조8,871억Nm³, 플레어 연소량 1,164억Nm³, 시장판매를 위한 생산량 2조3,095억Nm³이다. 1996년의 천연가스의 총생산에 대한 플레어 연소량의 비율은 4.0%이다. 플레어연소의 비율은 1980년까지는 10% 전후였지만 그 이후 1985년부터는 4%에서 5%의 값을 유지하고 있다. 따라서 플레어 연소에 의한 이산화탄소 배출량은 62.4조 g-C(탄소환산 그래프)으로 추계된다.

천연가스에 대해서는 크게 원유생산과 함께 산출되는 수반가스와 그렇지않은 비수반가스(구조성 가스)로 나눌 수 있다. 일본의 석유광업연맹이 1991년에 조사한 보고서¹⁰⁾에 의하면 평균적인 석유수반가스의 양은 1바렐(B)당 734cf(입방피트)로 되어있다.

이것에 1996년의 원유생산량 257.6억 바렐(7,038.6만B/D)를 곱하면 석유수반가스의 총량은 5,355억Nm³가 된다.

CEDIGAZ의 데이터에 의하면 1996년의 천연가스의 총생산량은 2조8,871억Nm³이기 때문에 석유수반 가스는 18.5%가 되고 나머지 81.5%가 구조성 가스가 된다.

천연가스(석유수반 가스를 포함)의 플레어 연소에 의한 이산화탄소 배출총량 62.4조g-C(탄소환산 그래프)을 석유수반가스 비율 18.5%로 배분하면 원유생산의 플레어 연소에 따른 이산화탄소 배출량은 11.6조g-C과 같이 추계된다. 이것을 1996년 원유생산량의 석유환산 값으로 나누면 원유생산의 플레어 연소에 따른 단위 열량당 이산화탄소 배출량은 진발열량 베이스로 보았을 때는 0.32g-C/1000kcal이고 총발열량 베이스로 보면 0.31g-C/1000kcal가 된다. 석유수반 가스는 원유의 생산활동에 따라서 발생하기 때문에 플레어 연소에 따른 온실효과는 석유로 카운트 했다.

1996년의 LNG의 무역량¹⁰⁾은 1,007억Nm³(7,190만톤)이다. 천연가스의 생산량에 대해서 LNG무역량(생산량)은 4.4%의 비율을 점하고 있다. 1991년의 일본에너지경제연구소의 보고서에서 1987년 기준의 3.0%와 비교하면 LNG생산의 비율이 확실하게 증가하고 있다.

1996년 LNG로 전환된 천연가스량¹⁰⁾은 1,007억Nm³이다. 위에서 설명한 바와 같이 LNG로 전환된 천연가스 량의 13.65%, 137억Nm³가 시장판매를 위한 천연가스 생산량중 액화과정에서 연료로 소비된 것으로 추계된다. 따라서 두부분을 합한 1,144억Nm³가 시장판매를 위한 천연가스 생산량으로 부터 LNG 생산에 쓰여진 것으로 추계된다. 천연가스 총생산량과 시장판매를 위한 천연가스 생산량의 비율로 부터 천연가스 총생산량 중에서 LNG생산에 쓰여진 것은 1,431억Nm³이다.

천연가스 총생산량에 대한 플레어 연소의 세계평균의 비율은 4.0%이지만 근대적인 LNG의 생산설비에 있어서, 생산시에 소각되는 천연가스량은 비교적 적게 1%정도⁸⁾이기 때문에 1996년의 LNG생산에 따른 플레어 연소량은 LNG생산에 쓰여진 천연가스

총생산량 1,431억Nm³로부터 14.31억Nm³이다. 이 플레어 연소에 따른 CO₂ 배출량은 0.766조g-C이다. 이것을 LNG 생산시 천연가스 량에 대해서 열량 환산하여 그 값으로 나누면 LNG 생산 때의 플레어 연소에 의한 열량 단위당 CO₂ 배출량은 진 발열량 베이스로 0.86 g-C/1,000kcal, 총발열량 베이스로 0.78g-C/1000kcal이다.

플레어 연소에 의한 CO₂ 배출 총량으로 부터, 위에서 서술한 석유생산 및 LNG를 생산 할 때의 플레어 연소에 의한 CO₂ 배출량을 빼면 LNG로 전환된 것 이외의 비 수반 천연가스를 생산할 때의 플레어 연소에 의한 CO₂ 배출량이 50.0조g-C로 계산된다. LNG 이외의 비 수반 천연가스의 시장판매용 생산량은 1조7,681억Nm³이기 때문에 이것을 열량으로 환산한 값으로 나누게 되면 플레어 연소에 의한 단위발열량의 CO₂ 배출량이 진 발열량 베이스의 값으로 3.21g-C/1,000kcal이고 총 발열량 베이스의 값으로는 2.89g-C/1,000kcal이다.

2) 천연가스 생산에 따른 수반CO₂ 배출의 추계

일본이 수입하고 있는 LNG중 각 생산지의 가스전으로부터 배출되는 수반CO₂의 비율을 가스전별로 보면 인도네시아의 아룬의 비율이 현저하게 높게 나타나 있다. 일본의 LNG 수입량에 대해서 1987년 시점에서 평균을 내면 7.2%이지만 공급구성이 변화하면 이 수치도 변화한다. 실제로 1996년의 일본의 LNG수입량에 대한 평균치를 계산하면 인도네시아의 바다크나 그 밖의 다른 여러나라의 LNG의 웨이트가 크기 때문에 평균치는 6.2%로 저하한다.

1996년의 일본의 LNG 수입량 3,923.7만톤에 대해 수반CO₂의 방출량은 30.0억Nm³ 즉, 1.6조g-C이 되므로 LNG를 열량환산한 값으로 나뉘보면 단위열량당의 CO₂ 배출량은 진발열량을 베이스로 3.42 g-C/1,000kcal, 총발열량의 베이스로는 3.07g-C/1,000kcal이다. 세계의 수반 CO₂ 배출량에 관해서는 데이터의 입수가 불가능하여 LNG에서 구한 이들의 값을 LNG이외의 비수반 천연가스에 관해서도 적용하기로 했다. 또 석유생산에 따르는 수반CO₂의 방출에 관해서는 (재)에너지종합공학연구소의 보고서의

총발열량 베이스로 0.03g-C/1,000kcal라는 수치를 그대로 이용했다. 작은 값이기 때문에 진발열량 베이스에서도 0.03g-C/1,000kcal가 된다.

표 1. LPG의 CO₂배출계수에 관한 분석결과

(단위:g-C/1,000kcal)

		수반가스 LPG	구조가스 LPG	석유정제 LPG	가중 평균
생 산 과 수 송	생산	4.77	4.77	0.42	3.68
	수반CO ₂	0.05	3.99	0.05	0.49
	플레어연소	0.79	-	0.79	0.70
	수송	2.37	2.37	1.14	2.06
	제유소	-	-	3.91	0.98
소 계		7.98	11.13	6.31	7.92
연 소		68.58	68.58	68.58	68.58
합 계		76.56	79.71	74.89	76.50

자료 : 重田潤, 화석연료 이용을 위한 이산화탄소 배출량의 정량적 평가, 에너지 종합공학, 1990.10의 자료로부터 계산한 것임.

3) LPG연료의 계산

LPG(액화석유가스)에 대한 분석의 출발점은 (재단법인)에너지종합공학연구소의 보고서¹¹⁾가 있으며 여기에서 정리한 결과의 데이터를 기본으로 사용한다. LPG의 생산원으로서 석유정제에 따른 LPG이외에 사우디아라비아, 쿠웨이트 등과 같이 유전의 수반가스로부터 분리 액화해서 생산되는 것과 LNG 플랜트를 포함한 구조성 가스전으로부터 분리 액화해서 생산되는 것이 있다. 일본의 경우 수반가스 LPG 63.75%, 석유정제 LPG 25%, 구조가스 LPG 11.25%라고 하는 공급구성비로 되어있기 때문에 여기서는 이 공급 구성비로서 가중평균 한 값을 LPG의 계산에 관한 총발열량 베이스의 출발점의 데이터로 했다. 진발열량 베이스의 값은 0.95로 나눔으로써 구했다. 이러한 계산방법은 글로벌적인 평가방법으로서 문제점을 내포하고 있지만 세계 각국에서 행해지고 있는 석유정제에서 생산되는 데이터가 없기 때

문에 어쩔수없이 가장 근사치를 구할수 있게 이상의 방법을 사용하였다.

4) 천연가스 및 LNG의 생산·수송·가공단계의 연료소비 추계

III.1에서 이미 자세히 언급했듯이 1996년의 LNG 생산시에 있어서 천연가스의 연료소비는 13.65%, 137억Nm³이다. 이것을 CO₂ 배출량으로 환산하면 7.37조g-C가 되고 LNG로 변환된 천연가스의 열량 환산치로 나뉘보면 열량단위당 CO₂배출량은 진발열량 베이스로 8.29g-C/1,000kcal이고 총발열량 베이스로는 7.33g-C/1,000kcal이다.

천연가스의 생산에 따른 채굴, 수집, 또는 분리를 위한 동력으로서의 연료소비에 관해서는 유감스럽게도 현재까지의 경우 적용할 수 있는 적절한 데이터를 입수할 수가 없다. 원유의 생산시에 있어서 같은 목적의 연료소비에 관해서는, 1990년의 (재)에너지종합공학연구소가 일본에 수입하고 있는 중동원유의 대표값 데이터를 베이스로해서 총발열량 베이스로 0.27g-C/1,000kcal(진발열량 베이스 0.28g-C/1,000kcal)라고 하는 값을 추계하고 있다. 이들은 채굴이나 수집에 2차회수, 3차회수등 연료소비의 증가를 동반하는 고도기술을 필요로 하지않는 비교적 조건이 좋은 원유에서의 수치라고 생각된다. 원리적으로 생각하면 원유생산과 천연가스 생산에서 채굴, 수집, 또는 분리의 동력에 그만큼 큰 차가 있다고는 생각하기 어렵다. 따라서 이번 분석에서는 원유생산과 같은 크기의 연료소비에 따르는 CO₂ 배출이 천연가스 생산에서도 일어난다고 가정해서 전체의 추계를 진행하기로 했다.

천연가스의 파이프라인에 의한 육상수송을 위한 연료소비는 미국 에너지성의 데이터를 출발점으로 했다. 이 데이터에 의하면, 미국의 수송파이프라인 연료의 비율은 천연가스의 시장판매용 생산량에 대해 3% 내지 4%대의 크기를 가지고 있다. 1996년의 경우는 3.79%이었다. 1996년의 수송파이프라인 연료 7조1,100만cf를 미국가스협회에 의한 1996년의 미국의 수송도관연장(輸送導管延長) 426,000km¹⁰⁾에서 제외하면 수송파이프라인 1km당 연료소비는 47.26Nm³가 된다. 이 수치가 이하에서 나타내는 추

계에 있어서 연료소비의 원단위가 된다.

IEA(국제에너지기구)가 정리한 레포트에는 주요지역에 있어서 1992년의 파이프라인 거리와 천연가스 생산량의 데이터가 나타나져 있다. 유감스럽게도 세계 천연가스 파이프라인의 수송도관연장을 구할 수는 없지만 OECD 가맹국과 구소련·동구제국이 대부분을 카바하고 1992년의 천연가스 파이프라인의 수송도관연장은 911,189km, 천연가스생산량은 1조5,810억Nm³로 나타나어져 있다. 따라서 이 수송도관연장에 먼저 말한 수송파이프라인 연료소비의 원단위 47.26Nm³를 곱하여 1992년의 연료소비를 추계하면 430.6억Nm³가 된다. 이 파이프라인 연료가 천연가스 생산량에 차지하는 비율은 2.72%이다.

미국의 경우는 수송 파이프라인의 연료율이 3.79%이었지만 이와같은 추계에 의해서 1%정도 낮은 연료소비 비율이 구해진다. 러시아의 파이프라인 연료와 수송 로스가 천연가스 생산량에 접하는 비율은 9%에서 10%로 되어있다. 위에서 설명한 파이프라인 연료의 비율을 빼면 수송로스는 6%에서 7%의 크기로 되어있지만 이 비율은 잘 알려져 있는 러시아의 수송 비율과 거의 일치하고 있다. 이 수송 로스가 후술하는 구소련의 천연가스 공급활동에 있어서 메탄 누설의 큰 요인의 하나이다.

LNG 이외의 비 수반천연가스의 시장 판매용 생산량 1조7,681억Nm³에 수송 파이프라인의 연료비율 2.72%를 곱하면 파이프라인의 연료소비는 481억Nm³가 된다. 이 연료의 소비에 의한 CO₂ 배출량은 25.8조g-C이기 때문에 LNG 이외의 비수반 천연가스의 열량환산 값으로 나누면 단위열량당 CO₂배출량은 진발열량 베이스로 1.65g-C/1,000kcal이고 총발열량 베이스로 1.49g-C/1,000kcal가 된다.

2. 메탄 누설의 추계

1) IPCC에 따른 메탄누설 총량의 평가

IPCC의 제2차 평가 보고서 등의 1992년 부터 현재까지 출판된 IPCC의 평가 보고서에서 그림2에 나타낸 바와같이 다양한 메탄배출의 분석결과가 정리되어 있다. IPCC의 리포트에 의하면 자연발생원 및 인간기원을 합하여 지구전체에서 메탄의 총배출량은

표 2. 생산, 수송, 가공단계에 있어서 각 화석에너지의 CO₂배출의 추계결과

(단위:g-C/1000kcal)

		진발열량 베이스					총발열량 베이스				
		석탄	석유	LPG	천연가스	LNG	석탄	석유	LPG	천연가스	LNG
탄 산 가 스	생산	3.24	0.28	3.87	0.28	8.29	3.08	0.27	3.68	0.27	7.33
	플레어 연소	-	0.32	0.74	3.21	0.86		0.31	0.70	2.89	0.78
	수반탄산 가스	-	0.03	0.52	3.42	3.42		0.03	0.49	3.07	3.07
	수송(육상)	0.89		0.11	1.65		0.85		0.10	1.49	
	수송(해상)	1.95	0.83	2.06		1.54	1.85	0.79	1.96		1.39
	정제	-	1.93	1.03	-	-		1.83	0.98		-
소계		6.08	3.39	8.33	8.56	14.11	5.78	3.24	7.91	7.72	12.57

5억3,500만톤(4억1,000만톤에서 1억2,000만톤)으로 평가되어 있다. 습지, 흰개미, 해양 등의 자연발생원에 따른 것은 1억6,000만톤(1억1,000만톤에서 2억1,000만톤)으로 총량의 약30%를 점하고 있다.

본 분석에서는 에너지 산업에 있어서 메탄 배출의 값을 총량으로서 IPCC의 보고서 값을 사용하였다. 또 석탄 연소에 따른 메탄 배출은 중앙치 불명(메탄환산 100만톤에서 3,000만톤)으로 평가되어 있고 용도를 고려해서 분석하지 않으면 안되는 소비단계의 배출이기 때문에 본 분석에서는 제외 하였다.

메탄은 탄산가스 보다도 강력한 온실효과를 가지고 있는 온실효과 가스이다. 그 온실효과의 크기는 일반적으로 지구온난화 문제를 생각할 때 메탄의 경우 온실효과의 적산 연수 100년을 적용하여 CO₂에 대해서 21배의 크기로 평가하는 것이 보통이다. 따라서 여기서는 IPCC 등의 일반적인 평가 방법에 따라서 메탄의 지구온난화 포텐셜 지수 21을 사용해서 아래와 같이 분석을 하였다.

2) 화석연료의 각 단계에 있어서 메탄누설의 추계

본 논문의 분석에서는 1991년의 에너지 경제 연구소 보고서의 방법론을 참고로 앞에서 설명한 바와같이 메탄누설의 총량에 관해서 IPCC로 부터 새로운 데이터가 발표되어 있기 때문에 이 데이터를 가지고 계산을 하였다.

이에 따르면 석탄채굴에서 배출되는 메탄누설을 탄소환산 하면 172조g-C로 된다. 1996년의 석탄생산량 46.1억톤을 열량환산 한 값으로 이 값을 나누면 석탄채굴에서의 메탄누설에 따른 온실효과의 크기는 열량단위당 진발열량 베이스로 6.20g-C/1000kcal이고 총발열량 베이스로 6.01g-C/1000kcal로 된다.

같은 IPCC보고서에 따르면 석유산업에 있어서 메탄의 연간 생산량은 메탄환산해서 1,500만톤으로 평가되어 있다. 이 메탄누설은 지구온난화 포텐셜 21을 적용해서 CO₂의 온실효과로 환산하면 85.9조g-C이 된다. 이 값으로 원유생산량을 열량환산한 값으로 나누면 석유산업의 메탄누설에 따른 온실효과의 크기(CO₂ 환산 값)는 진발열량 베이스로 열량단위당 2.38g-C/1,000kcal이고 총발열량 베이스로 2.27g-C/1,000kcal가 된다.

또 동일한 IPCC의 보고서에 따르면 천연가스 산업에 있어서 메탄의 연간 총 배출량은 메탄환산 4,000만톤으로 평가되어 있다. 이 값은 1996년의 비수반천연가스(구조성 천연가스)의 총생산량 2조3,530억 Nm³에 대해서 2.4%를 점하고 있다. LNG의 액화기지는 근대적인 설비를 전제로 하고 있기 때문에 LNG의 생산에 소요한 천연가스의 총생산량1,431억 Nm³에 대해서 메탄누설은 1%정도의 크기로 볼 수 있다. 따라서 LNG생산에 따른 메탄누설의 총량은 14.31억Nm³이고 메탄환산101.4만톤으로 추계된다.

표 3. 각 화석에너지의 메탄누설에 의해서 발생하는 온실효과

(단위:g-C/1,000kcal)

	석 탄	석 유	LPG	천연가스	LNG
총발열량 베이스	6.01	2.27	3.46	12.89	5.88
진발열량 베이스	6.20	2.38	3.72	14.32	6.54

이 메탄누설을 지구온난화 포텐셜을 사용해서 CO₂의 온실효과로 환산하면 5.81조g-C로 된다. 이 값을 LNG로 전환된 천연가스량을 열량환산 한 값으로 나누면 LNG생산에 의해서 생기는 메탄누설에 따른 온실효과의 크기는 열량 단위당 진발열량 베이스로 6.54g-C/1,000kcal이고 총발열량 베이스로는 5.88g-C/1,000kcal이다.

LNG생산에 따른 메탄누설량을 천연가스 산업전체의 메탄누설량으로부터 빼면 LNG 이외의 비 수반 천연가스의 공급에 따라서 생겨나는 메탄누설량이 메탄환산 3,898.6만톤으로 계산 되었다. 이 값을 LNG 이외의 비 수반 천연가스의 생산량을 열량환산 한 값으로 나누면 메탄누설에 따른 온실효과의 크기는 진발열량 베이스로 열량단위당 14.32g-C/1,000kcal이고 총발열량 베이스로는 열량단위당 12.89g-C/1,000kcal이다.

LPG의 생산에 따르는 메탄누설은 LPG의 공급원이 석유정제 과정과 부생물, 수반가스 분리의 플랜트 그리고 비 수반가스 분리 플랜트의 3가지 과정으로 나누어져 있기 때문에 단순히 특정 지을수는 없다. 석유정제 과정과 수반가스 분리 플랜트의 경우는 석유계의 공급루트이고 비 수반가스 분리 플랜트는 천연가스계 공급루트라고 할 수 있다. 본 분석에서는 2-1에서 설명한 바와같이 일본이 수입하고 있는 LPG의 공급구성이 석유정제에 의한 것이 25%, 수반가스에 의한 것이 63.75%, 비 수반가스에 의한 것이 11.25%이기 때문에 이 공급 구성비를 사용해서 메탄누설에 따른 온실효과 의 크기를 추계했다. 즉 이 공급 구성비에 기초하게 되면 석유계 공급루트의 LPG가 88.75%이고 천연가스계 공급루트의 LPG가 11.25%이기 때문에 이 비율에 의해서 석유와 천연가스에서 생기는 메탄누설에 따른 온실효과의 크기를 가중평균 하였다. 이 결과 LPG의 메탄누설에 따

른 온실효과의 크기는 진발열량 베이스로 열량단위당 3.72g-C/1,000kcal이고 총발열량 베이스로는 3.46g-C/1,000kcal이었다.

이상을 정리하면 각 화석연료의 공급과정에서 메탄누설에 따라 생기는 온실효과의 크기는 표3과 같이 종합할 수 있다.

3) IPCC의 가이드 라인에 따른 메탄누설

IPCC는 각 국가로부터 개별국가별로 온실효과 가스의 배출목록을 제출 시키기 위해서 국별 보고서 작성을 위한 가이드 라인을 정리 발표하였다. 이 가이드 라인 안에는 국가별로 메탄누설에 따른 배출량을 정리하기 위해서 석유 및 천연가스의 공급과정의 각 단계를 나누어서 지역별로 메탄누설에 따른 온실효과의 크기를 구하는 배출계수를 종합 정리해 놓고 있다. 적산연수 100년의 지구온난화 포텐셜(GWP) 21의 환산계수를 사용해서 IPCC의 배출계수를 g-C/1,000kcal의 단위로서 CO₂ 환산한 온실효과로 정리하여 나타내고 있다. 본분석의 결과(표3)와 IPCC의 지역별로 본 배출계수(표3-3)을 비교해 보면, 먼저 LNG 이외의 비 수반 천연가스(구조성 천연가스)의 메탄누설에 따른 온실효과의 크기는 진발열량 베이스로 14.32g-C/1,000kcal라고 하는 결과를 얻었다. IPCC의 결과에 따르면 유럽이 2.961g-C/1,000kcal, 미국과 캐나다가 3.675g-C/1,000kcal 로서 상대적으로 작지만 다른 석유 수출국과 다른 지역에서 6.571g-C/1,000kcal, 구소련과 동구 지역에서 16.42g-C/1,000 kcal로 되어있기 때문에 큰 차이는 없다는 것을 알 수 있다. 구소련과 동구 지역은 수송로스가 6%에서 7% 전후로 대단히 큰 수치를 나타내고 있지만(Ⅲ.의2 참조), 분리, 수송, 배송단계의 메탄누설에 따른 온실효과가 다른 지역과 비교해서 대단히 크고 이러한 사실이 위의 결과

를 뒷받침하고 있다고 할 수 있다.

다음으로 LNG 생산과정의 메탄누설에 따른 온실효과의 크기는 본 분석에서는 6.54g-C/1,000kcal라는 결과를 얻었다. IPCC의 결과로 부터는 LNG 생산에 관련한 메탄의 온실효과를 직접 파악할 수는 없지만 LNG의 생산국이 인도네시아, 말레이시아, 브루나이, 알제리아, 아부다비등 석유수출 도상국이 많은 것을 고려하면 다른 석유 수출국의 메탄누설에 따른 온실효과의 크기 6.71g-C/1,000kcal를 참고로 할 수가 있을 것이다. 자릿수로서 틀리지 않다고 말할 수 있으며 LNG를 생산할 때의 메탄누설 비율을 1%로 설정하는 것은 이상과 같은 의미에서 타당성을 가지고 있다고 말할 수 있다.

마지막으로 석유공급 과정의 메탄누설에 따른 온실효과의 크기는 본 분석에서 2.38g-C/kcal로 계산되었다. IPCC의 석유공급 과정의 메탄누설에 따른 온실효과의 크기를 보면 석유만의 합계치는 각 지역 공통에서 0.103g-C/1,000kcal로서 대단히 작은 값으로 평가 되어있다. 수반가스에 따른 메탄누설은 석유에 포함되어 있지않고 천연가스에 포함되어 있을 가능성이 높다. III의1에서 정리한 석유수반가스의 생산량과 원유생산량의 비율을 열량환산해서 비교하면 전자가 9.4%에 대해서 후자가 90.6%로 된다. 이 구성비율로 석유와 천연가스의 메탄누설에 따른 온실효과를 가중평균 하여 각지역별로 수반가스의 생산을 포함한 석유 공급과정의 메탄누설에 따른 온실효과의 크기를 IPCC의 지역별 평가 결과로부터 계산하였다.

이 결과에 의하면 유럽 0.371g-C/1,000kcal, 미국과 캐나다 0.431g-C/1,000kcal, 타 석유수출국, 타 지역에서 0.710g-C/1,000kcal, 구소련과 동구지역에서 1.637g-C/1,000kcal였다. 금번의 분석결과 2.38g-C/1,000kcal과 비교하면 거의 비슷한 수준에 있다는 것을 알 수 있다. 메탄누설의 배출량의 데이터는 아직 신뢰도가 낮아 불확실성이 큰 부분이 있기 때문에 금후의 지속적인 과학적 연구에 의한 신뢰도 향상을 해야만 하는 중요한 분야의 하나라고 생각되어 진다.

이상에서 이산화탄소와 메탄의 배출량을 추계해 왔지만 이것만으로 채굴에서 연소까지의 소비에너지

에 의한 이산화탄소 배출량을 전부 계산했다고는 말할 수 없을 것이다. 왜냐하면 각 화석에너지의 수송 과정에는 일정한 가공이 첨가된 에너지를 수송기관의 연료로서 사용하고 있다. 예를들면 석탄과 원유의 수송선의 경우에는 배의 연료로서 중유를 사용하고 있고 LNG선의 경우에는 한 번 액화한 LNG가 수송과정에서 기화한 천연가스를 사용하고 있다. 수송연료인 중유와 천연가스에는 정제와 액화에 의한 일정한 연료소비가 포함되어 있다. 이와같이 가공과 전환에 필요한 연료소비분을 수송과정의 연료소비에 누적계상 하지않으면 소비지의 연소단계까지의 종합적 온실효과를 평가하고 있다고 볼 수 없다.

위에서 기술한 바와 같이 생산, 수송, 가공과 전환의 각각의 단계에 대응한 석유, 석탄, 천연가스가 연료로서 소비되고 있다. 소비지에 있어서의 연소단계만이 아니고 이들의 연료소비에 따른 메탄누설에 의한 온실효과도 평가대상에 포함시켜야 할 부분이다. 이와같은 생각하에 생산, 수송, 가공단계의 CO₂배출과 메탄누설에 따른 온실효과를 평가한 결과를 이하 3의 온실효과의 종합적 평가에서 나타낸다.

3. 온실효과의 종합적 평가

지금까지 각 절에서 상세하게 설명한 바와같이 각 화석 에너지원의 온실효과의 크기를 비교 검토하는데 있어서는 크게 다음의 4가지를 고려할 필요가 있다. 첫째로 발열량을 어떻게 고려할 것인가이다. 선진국의 몇 개 국가와 일본 한국등의 에너지 통계는 수분이 액체상태로 존재하는 총 발열량을 사용하고 있지만 현실의 에너지 소비에서는 수분이 잠열을 탈취해서 기화시키고 있기 때문에 IEA(국제 에너지 기관)와 IPCC(기후변화 협약에 관한 정부관 패널)등 국제적 기관에서는 진발열량(저위 발열량)을 사용하고 있다. 세계의 전 국가가 국내 통계에 있어서 진발열량 통계로 정리하고 있다면 논의할 의미조차 없겠지만 그렇지 않은 나라도 많이 있기 때문에 어느 쪽을 사용해야 할 것인가에 대해서는 단번에 결론을 낼 수는 없을 것이다.

그렇지만 이와같은 발열량의 차이에 따른 배출계수의 비교에서는 충분히 고려할 필요가 있다고 생각된다. 두 번째로는 각 화석에너지원의 생산 가공 수

표 4. 화석연료별로 본 채굴에서 연소까지의 온실효과의 추계결과

(진발열량 베이스)

(단위:g-C/1,000kcal)

		석 탄	석 유	LPG	천연가스	LNG
탄 산 가 스	생 산	3.24	0.28	3.87	0.28	8.29
	플레어 연소	-	0.32	0.74	3.21	0.86
	수반탄산 가스	-	0.03	0.52	3.42	3.42
	수 송	2.93	0.86	2.24	1.83	1.85
	정 제	-	1.96	1.06	-	-
소 계		6.17	3.45	8.43	8.74	14.42
연 소 (LNG=100%)		108.02 (169%)	83.74 (131%)	72.01 (112%)	64.06 (100%)	64.06 (100%)
중 간 계 (LNG=100%)		114.19 (146%)	87.19 (111%)	80.44 (102%)	72.80 (93%)	78.48 (100%)
메 탄(CO ₂ 환산)		6.55	2.48	4.15	16.23	7.98
총 계 (LNG=100%)		120.74 (140%)	89.67 (104%)	84.59 (98%)	89.03 (103%)	86.46 (100%)

(총발열량 베이스)

(단위:g-C/1,000kcal)

		석 탄	석 유	LPG	천연가스	LNG
탄 산 가 스	생 산	3.08	0.27	3.68	0.27	7.33
	플레어 연소	-	0.31	0.70	2.89	0.78
	수반탄산 가스	-	0.03	0.49	3.07	3.07
	수 송	2.79	0.81	2.12	1.65	1.67
	정 제	-	1.86	1.01	-	-
소 계		5.87	3.28	8.00	7.88	12.85
연 소 (LNG=100%)		103.17 (183%)	78.11 (139%)	68.33 (121%)	56.39 (100%)	56.39 (100%)
중 간 계 (LNG=100%)		109.04 (157%)	81.39 (118%)	76.33 (102%)	64.27 (93%)	69.24 (100%)
메 탄(CO ₂ 환산)		6.35	2.36	3.87	14.65	7.19
총 계 (LNG=100%)		115.39 (151%)	83.75 (110%)	80.20 (105%)	78.93 (103%)	76.43 (100%)

송과정에서 필요로 하는 연료소비에 의한 CO₂배출의 온실효과이다. 석탄은 생산과 수송, 석유는 생산과 수송 그리고 정제, LNG는 생산과 액화 그리고 수송과 같이 각각의 화석에너지가 생산 가공 수송과정에서 CO₂를 배출하고 있고 이들은 일정한 온실효과를 가지고 있다. 또 생산과정의 플레어 연소와 수반 탄산가스의 방출도 고려하지 않으면 안된다. 글로벌적인 지구환경의 관점으로부터 이들의 생산, 수송, 가공과정의 연료소비에 따른 온실효과를 무시할 수는 없다. 세 번째로 각 화석 에너지원의 각 과정에서 생기는 메탄누설에 따른 온실효과이다. 메탄은 지구 온난화 포텐셜의 온실효과의 강도로 나타내는 지표로 보면 CO₂의 21배의 강도를 가지고 있다. IPCC의 평가에 따르면 자연 및 인간기원의 다양한 소스가 메탄을 대기중에 배출하고 있지만 석탄, 석유, 천연가스의 공급과정도 큰 배출원의 하나로 되어있다. 에너지산업의 공급활동에 있어서 메탄누설도 일정한 온실효과를 가지고 있고 이것 또한 무시할 정도의 것은 아니다. 네 번째로 라이프 사이클 어세스먼트의 관점이다. CO₂배출과 메탄누설에 따른 온실효과는 소비단계의 연소에 따른 부분만이 아니고 공급단계의 연료소비에 따른 효과도 그 각각의 과정을 누적해서 생각할 필요가 있다. 또 라이프 사이클 어세스먼트의 수법에 의하면 제유소와 액화플랜트등 생산과 수송에 관련된 설비의 제조에 따른 온실효과가스의 배출도 고려하지 않으면 안된다. 단 금번의 분석에서는 비교가능한 데이터가 수집되지 않았기 때문에 설비의 제조에 따른 온실효과는 분석대상에서 제외했다.

이상의 4가지 사항을 고려한 계산결과를 표4에 나타낸다. 총 발열량 베이스로 연소단계만을 생각하면 CO₂ 배출에 따른 온실효과의 크기는 석탄 : 석유 : LPG : LNG(천연가스)로 183 : 139 : 121 : 100으로 나타낼 수 있고 이것을 보면 화석에너지간에 상당한 격차가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 채굴에서 연소까지의 온실효과를 고려하면 진발열량 베이스로 석탄 : 석유 : LPG : 천연가스 : LNG의 관계는 140 : 104 : 98 : 103 : 100으로 나타났으며 총 발열량 베이스로는 석탄 : 석유 : LPG : 천연가스 : LNG의 관계가 151 : 110 : 105 : 103 : 100으로

나타났다. 어느 경우이던간에 이 결과는 각 화석연료간에 온실효과의 격차는 그다지 없었고 석탄과의 관계에서도 상당히 효과의 격차가 좁혀지는 결과가 얻어졌다.

IV. 결 론

연소단계에서의 CO₂배출이 상대적으로 적은 것로부터 LNG(천연가스)는 환경친화적 에너지라는 주장이 일반적으로 되어 있지만 채굴로부터 연소까지의 공급과정을 누적해서 지구적 관점으로부터 온실효과의 크기를 볼 경우에는 각 화석연료의 온실효과 크기의 격차가 줄어든다. LNG의 온실효과가 크게 되는 가장 큰 요인은 LNG의 액화플랜트에 있어서 연료소비량이 크기 때문이다. 천연가스의 온실효과가 크게 되는 또 다른 요인은 구소련과 동구, 개발도상국을 중심으로 천연가스의 공급과정에 있어서 메탄누설이 크기 때문으로 나타났다. 서구, 미국, 캐나다 등의 선진국에서는 천연가스의 공급과정에 있어서 구소련과 동구지역의 4분의 1에서 5분의 1의 크기이기 때문에 이점에 있어서는 주의를 요한다.

금번의 분석에서는 각 화석에너지원의 온실효과를 종합적으로 취급했지만 잘 생각해 보면 소비용도로 나누어서 에너지 효율등의 정보 또한 충분히 고려하면서 상세한 검토를 하는 것이 타당하다고 생각된다. 발전소, 자동차, 가정용기 등 소비용도에 따른 온실효과의 특성도 실제로는 크게 다를 것이라는 것은 쉽게 짐작이 가능하다. 본래는 이와 같은 개별의 소비용도의 특성에 맞추어서 적재적소에서 합리적인 에너지 선택을 해야한다고 생각된다.

지구환경문제에 관해서 구체적인 대책을 실시해 갈때는 국민 개개인의 이해와 합의가 무엇보다도 중요하다. 이르기 위해서는 과학적인 지식의 축적을 게을리 해서는 안된다. 금번의 분석에서도 지구적 관점으로부터 가능한 한 세계평균의 데이터를 사용했지만 아직 미비한 부분이 산적해 있는 것을 인정하지 않을 수 없다. IPCC와 같이 제1차, 제2차, 제3차의 단계를 거치면서 과학적 검토를 성실하게 이행하여 설득력 있는 데이터를 계속적으로 축적하는 작업에 큰 기대가 모아진다.

메탄누설, 플레어 연소등 에너지 공급에 따른 온실효과와 많은 부분은 이행기 경제국가 혹은 산유, 산가스 도상국에서 생기고 있고, 코스트의 효율이 좋은 대책을 구체적으로 실시 할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 이러한 점을 고려하면 한 특정국가 내에서의 대책의 실시, 목표의 달성만을 생각하지 말고 공동실시와 배출권 거래등을 통한 국제적인 대책의 실시에도 국제적 협조를 시도해 가면서 폭넓은 검토에 관심을 집중해야 할 것으로 생각된다.

금후의 장기적인 에너지의 수급과 자원의 부족량 등의 제반 사항을 고려하면 석탄, 석유, 천연가스의 그 어느 하나도 무시할 수 없다. 특정의 에너지원에 극단적으로 집중하는 것을 피하고 균형잡힌 에너지 정책을 추진하는 것 또한 중요한 과제중의 하나로 보아진다. 본연구의 결과는 이와같은 균형잡힌 정책을 추진해야 한다는 방향성이 타당하다는 것을 시사하고 있다고 볼 수 있다.

마지막으로 LCA의 전개에 있어서는 먼저 인벤토리 설정에 있어서 데이터의 제약으로 충분한 연구결과를 제시 하지 못했다. 그리고 영향평가에 있어서 수법 혹은 평가지수의 제시에 대한 어려움으로 본 연구를 LCI에 국한시켰다는 점 또한 한계로 지적할 수 있을 것이다. 단순히 BOD, COD등의 화학적 지수 계산에는 그다지 큰 어려움이 없었지만 환경호르몬과 같은 아직 검증되지 않은 영향평가를 한다는 것이 과제로 남아있다고 하겠다. 물론 연구의 목적이 지구온난화 가스의 정량적 평가라는 점을 감안하면 고려할 필요성은 없었다고 하겠으나 연구의 출발점에 서서 생각하면 아직 많은 과제를 안고 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1) IPCC, "Climate Change 1995-The Science of Climate Change," 제1작업부회 제2차 평가보고서, 1996년; IPCC, "Climate Change 1995- Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses," 제2작업부회 제2차 평가보고서, 1996년; IPCC, "Climate Change 1995-Economic and Social Dimensions of Climate Change," 제3작업부회 제2차 평가보고

서, 1996년.

- 2) 에너지경제연구원, "ENERGY BALANCES IN KOREA 1991년," 성진사, 1992년.
- 3) OECD/IEA, "Energy Balances of OECD Countries, 1994-1995", IEA, OECD, 1997 ; OECD/IEA, "Energy Statistics and Balances for Non-OECD Countries, 1994 -1995," IEA, OECD, 1997
- 4) IPCC, "Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions," IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol. 1, 1995 ; IPCC, "Greenhouse Gas Inventory Workbook," IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol. 2, 1995 ; IPCC, "Greenhouse Gas Inventory Reference Manual," IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol. 3, 1995.
- 5) IEA/OECD, "CO₂ Emissions from Fuel Combustion - A New Basis for Comparing Emissions of a Major Greenhouse Gas 1972 - 1995," 1997.
- 6) 통상자원에너지청 조사 위탁조사, "화력발전소 대기 영향평가 기술 실증 조사보고서,"(재단법인)에너지종합공학연구소, 1990.
- 7) 富館孝夫, 小川芳樹, "채굴에서 부터 연소까지의 토달적인 온실효과로 부터 본 화석연료의 비교," 에너지경제, Vol. 17, No. 7, (재)일본에너지경제연구소, 1991.
- 8) 神田義孝, "온실효과로 부터 본 화석연료의 비교" 전력중앙연구소조사자료J90904, (재)전력중앙연구소, 1990.
- 9) CEDIGAZ, "Natural Gas in the World - 1997 Survey," CEDIAZ, 1997년 및 과거 출판물.
- 10) 석유광업연맹, "석유, 천연가스 등의 자원에 관한 스타디(석광련 자원평가 워킹그룹보고서)," 1991.
- 11) 重田潤, "화석연료 이용을 위한 이산화탄소 배출량의 정량적 평가," 에너지종합공학, (재)에너지종합공학연구소, 1990.