

디젤과 디메틸에테르의 연료로서의 환경적 특성 비교

한순례, 정연수*

서울시립대학교 화학공학과
130-743 서울특별시 동대문구 전농동 90

(2008년 5월 28일 접수; 2008년 6월 17일 채택)

Comparisons of Environmental Characteristics between Diesel and Dimethyl Ether as Fuels

Soon Rye Han and Yonsoo Chung*

Department of Chemical Engineering, University of Seoul
90 Jeonnong-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea

(Received for review May 28, 2008; Revision accepted June 17, 2008)

요 약

천연가스로부터 합성가스를 거쳐 제조되는 디메틸에테르가 디젤 대체연료로서 가지는 환경적 가치를 평가하기 위하여 전과정평가를 실시하였다. 전과정평가를 위한 시스템 경계 안에는 디젤과 디메틸에테르 두 물질에 대한 원료 물질의 획득부터 연소를 통한 최종 소비까지의 과정이 포함되었다. 디젤과 디메틸에테르 각각에 대한 목록분석을 실시한 결과 천연자원의 소모와 대기오염물질의 배출이 두 물질과 관련된 가장 중요한 환경오염인자라는 것을 알 수 있었다. 두 물질에 대한 영향평가의 결과로부터 인간의 건강과 생태계 보전이라는 측면에서는 디메틸에테르가 환경적으로 우수하지만 천연자원의 고갈이라는 측면에서는 디젤이 보다 우수함을 알 수 있었다. 목록분석과 영향평가의 결과를 바탕으로 디젤 대체연료로서 디메틸에테르가 가지는 환경적 가치를 제고하기 위한 방안을 제시하였다.

주제어 : 전과정 평가, 디메틸에테르, 디젤, 대체연료

Abstract : Life cycle assessment was carried out to evaluate the environmental values of dimethyl ether as a diesel alternative fuel with the assumption of dimethyl ether production from natural gas via synthesis gas. The whole life cycles from raw material acquisitions to the final usages of diesel and dimethyl ether were involved in the assessment. Inventory analysis showed that the most significant environmental impacts came from resource depletions and air emissions. Impact assessment revealed that dimethyl ether was environmentally better in the aspect of human health and ecosystem quality but worse in resource depletions compared with diesel fuel. Suggestions for environmental improvement of dimethyl ether as a diesel alternative fuel were prepared based on the assessment results.

Keywords : Life cycle assessment, Dimethyl ether, Diesel, Alternative fuel

1. 서 론

산업혁명 이후 화석연료의 소비가 급격히 증가함에 따라 대기 중 이산화탄소의 농도가 약 25% 증가하였으며, 지구 대기권의 평

균 기온이 이미 0.5℃ 상승하였다. 산업혁명 이전에 비해 이산화탄소의 농도가 약 2배가 될 것이라 예측되는 2030년대에는 온난화 정도가 더욱 심해져서 대기 온도가 1.5~4.5℃만큼 증가할 것으로 추정된다. 이러한 상황에 대처하는 국제적 노력의 일환으로

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: yonsoo@uos.ac.kr

화석연료의 사용 억제, 재생성 대체에너지의 개발, 에너지효율의 향상 및 청정연료의 개발 등 온갖 슬기가 총동원되고 있다.

대표적인 산업용 연료인 디젤의 경우 디젤엔진의 개량을 통한 대기오염물질 배출의 저감과 에너지 이용 효율의 증대를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 동시에 디젤을 대체할 수 있는 보다 청정한 대체연료의 개발을 위한 연구가 다각도로 실시되고 있다.

디젤의 대체연료로서 주목되고 있는 디메틸에테르는 가장 간단한 에테르 형태인 CH_3OCH_3 의 분자구조를 가지며, 온화한 조건 하에서 액체로 존재하는 화학물질이다. 디메틸에테르는 공기 중에서 오랫동안 노출되어도 과산화물 형태가 생성되지 않는 안정한 화합물이며 비활성적이고 부식성이 없다. 또한 디메틸에테르는 마취성이 강한 디에틸에테르와는 달리 발암성 및 마취성이 없어 인체에 무해한 무색 기체이며 물리적인 성질이 LPG와 유사하여 동일한 방법으로 저장 및 운송이 가능하며, 발열량도 메탄에 비해 높고 황 함량도 없어 연료로서의 가치가 높은 것으로 알려져 있다[1].

오스트리아의 AVL사와 네덜란드의 TNO사에서 US-FTP 75 테스트 사이클을 이용하여 실시한 승용차 배출가스 테스트에 의하면 디젤엔진에 디메틸에테르를 연료로 사용하였을 경우 배출되는 배기가스는 매우 청정한 수준을 보이며, 다른 연료에 비해 디메틸에테르만이 ULEV (ultra low emission vehicle)의 규제치를 만족하는 것으로 알려져 있다[2]. 이는 디젤 대체연료로서 디메틸에테르를 이용하는 경우 넓은 범위에서 잠재적인 환경 및 사회적 이익이 따를 수 있음을 의미하는 것이다.

여기서는 디젤 대체연료로서 디메틸에테르가 갖는 환경적 가치를 정량적으로 평가하기 위하여 전과정평가[3] 기법을 사용하였다. 디젤과 디메틸에테르 각각에 대한 목록분석을 통해 에너지와 자원의 사용, 폐기물의 배출 등을 정량화하였으며, 목록분석의 결과를 바탕으로 환경영향평가 도구인 Eco-indicator 99[4]를 이용한 영향평가를 수행하였다. 목록분석과 영향평가의 결과를 바탕으로 보다 환경친화적인 디메틸에테르 생산 및 사용을 위한 방안을 제시하였다.

2. 전과정평가의 목적 및 범위

여기서 실시한 전과정평가의 목적은 연료물질로서 디젤과 디메틸에테르가 갖는 환경적 가치를 정량적으로 평가하고 비교하는데 있다. 전과정평가를 통해 두 연료물질의 환경적 특성을 전체론적 관점에서 비교, 확인하고자 하였으며 얻어진 결과는 보다 환경친화적인 디메틸에테르 생산공정의 개발을 위한 지침을 마련하고 나아가 관련 정책의 결정을 위해서 필요한 정보를 제공하는데 이용될 수 있을 것이다.

디젤과 디메틸에테르 두 연료물질의 생산을 위한 원료물질의 획득, 제품의 생산, 수송 및 최종 사용까지의 전과정을 시스템의 경계 안에 포함하였다. 두 물질 모두 디젤엔진을 장착한 차량의 연료로서만 사용된다고 가정하였다. 두 물질의 환경영향을 정확히 비교하기 위하여 같은 거리를 주행할 수 있는 연료의 양을 기능단위로 채택하여 평가를 수행하였는데 디젤 1 kg으로 주행

할 수 있는 거리를 기능단위의 기본으로 채택하였다.

전과정평가는 ISO 14040[5]을 비롯한 Vigon et al.[6]과 Fava et al.[7, 8, 9]에서 정의된 방법 및 과정을 좇아 실시되었으며 GaBi[10], SimaPro[11], TEAM[12] 등 상용 프로그램을 사용하여 목록분석을 수행하였고, Eco-indicator 99[4]를 이용하여 영향평가를 실시하였다. 디메틸에테르 생산공정의 환경성 향상을 위한 방안을 마련하기 위하여 전과정해석이 실시되었다.

3. 목록분석

3.1. 디젤에 대한 목록분석

디젤연료에 대한 전과정평가의 시스템 경계 안에는 원료물질인 원유를 채굴하는 과정, 원유정제를 위한 수송과정, 원유정제를 통한 디젤의 생산과정, 소비지로의 수송과정 및 차량 연료로서의 연소과정이 포함되었다. 원료물질인 원유는 전량 외국에서 생산되어 유조선을 통해 국내로 수입되는 것으로 가정하였다. 원유정제를 통해 생산된 디젤이 최종 소비지로 수송되는 과정의 지리적 범위는 국내로 가정하였으나 원유정제 및 최종 소비과정의 지리적 범위는 국내로 한정하지 않았다.

원유 채굴과정을 통해 획득되는 주요 천연자원은 원유와 천연가스 등이다. 부산물인 천연가스는 원유와 천연가스를 분리하는 공정에서 연료로 쓰이고 남은 만큼 생산된다[13]. 원유 채굴과정 중에 발생하는 환경부하에 대한 할당 계산은 생산되는 원유와 천연가스의 질량 비에 의해 이루어졌다. 원유의 채굴과정에는 여러 형태의 다른 연료나 물질이 사용되지만 전기에너지를 제외하고는 사용량이 상대적으로 적어 무시하였다. 유정에서의 원유 손실 및 채굴과정에서 발생하는 기체 성분 역시 그 상대적 크기가 작아 무시하였으며 원유 채굴을 위한 시설 및 장비의 생산과 유지에 관련된 환경적 흐름 역시 같은 이유로 목록분석에서 제외하였다. 원유 채굴에 대한 자료는 Sheehan et al.[14]과 미국환경청의 보고서[15]를 기초하였다. 수입되는 원유는 전량 유조선을 통해 수송된다고 가정하였으며 여기서는 2001년과 2002년의 국내 원유수입자료를 바탕으로 계산이 이루어졌다. 원유는 원유정제공정으로 수송되어 분별증류를 통해 분리, 정제되는데 이 때 생산되는 물질의 일부가 디젤연료이다. 투입된 원유에 대한 디젤의 생산비율은 원유의 품질과 원유정제공정의 설비 특징 및 국내 석유소비 추이에 따라 다소 차이를 나타내는데, 여기서는 2000년의 국내 원유정제 평균 실적에 바탕을 두고 계산을 실시하였다. 원유정제공정에서 발생하는 환경부하에 대한 할당 계산은 디젤과 다른 생산물들의 질량 비에 의해 이루어졌다. 원유정제공정에서는 황산화물에 의한 대기오염을 줄이고 장치의 부식을 방지하기 위하여 탈황작업이 이루어지는데 이 과정에서 황화수소가 발생하게 되고 폐놀, 아민 등의 각종 용제가 추출용매로 사용된다. 원유정제공정에는 원유 및 다양한 탄화수소 등 여러 물질이 관련되며 천연가스, 수증기, 전기 등 다양한 형태의 에너지와 촉매와 같은 물질 역시 관련된다. 원유정제공정에 대한 자료는 미국석유회사의 보고서[16]를 기초하였다. 생산된 디젤의 소비지로의 수송과정은 일반적인 석유제품의 수송과정과 동일하다고 가정하였다. 여기서는 2000년의 국내 석유 제품 수송에 대

Table 1. Life-cycle inventory data of diesel fuel

Inventory Parameter	LCI Result (g/kg diesel)
Resources	
Water	7,290
Crude oil	3,380
Natural gas	151
Lignite	125
Coal	15
Bauxite	1
Air emissions	
CO ₂	5,030
NOx (NO ₂ included)	84
Particulates (PM10)	83
SOx (SO ₂ included)	25
CO	23
Hydrocarbon	10
Dust (SPM)	1
Water emissions	
Sulphates	1
Solid wastes	
Production waste (not inert)	11
Final waste (inert)	7
Slag	5
Oil	5

한 자료를 이용하여 계산을 실시하였다. 디젤의 최종 소비과정은 디젤엔진에서의 연소과정이다. 여기서는 AVL사와 TNO사가 실시한 승용차 배출가스시험의 결과[2]를 바탕으로 기능단위인 디젤 1kg에 대한 연소 후 오염물질의 배출량을 계산하였다.

목록분석은 상용 전과정평가 프로그램[10, 11, 12]을 이용하여 수행하였다. 여러 프로그램을 동시에 이용하여 부족한 자료의 비교 및 상호 지원을 통해 자료의 질을 높이고자 하였다. 목록분석을 통해 수집, 정리된 물질 가운데 기능단위 당 1g 이상의 사용량 및 배출량을 보인 물질에 대하여 그 값을 정리한 것이 Table 1이다. 가장 두드러진 자원투입 요소는 물의 이용이었으며 그 다음으로 중요한 천연자원은 지층으로부터 생산되는 원유와 천연가스 등이었다. 원유와 천연가스를 분리하는 공정에서 연료로 쓰이는 천연가스의 양은 목록에서 제외되었다. 대기배출물의 경우, 질량 기준으로 배출량의 95% 이상이 이산화탄소로 이루어짐을 알 수 있었다. 기능단위 당 5kg이 배출되는 이산화탄소는 원유채굴과정에서 이용되는 천연가스의 연소와 원유 및 디젤의 수송 그리고 디젤 연료의 최종사용 과정에서의 연소에 기인하였다. 그 외의 대기오염물질로는 소량의 질소산화물, 미세먼지, 황산화물, 일산화탄소, 탄화수소 등이 배출되었다. 수질오염물질은 황산염이 가장 많이 배출되었으나 그 양은 매우 적었다. 고형 폐기물 역시 소량 배출되었는데 주로 쓰레기 형태였다.

3.2. 디메틸에테르에 대한 목록분석

디메틸에테르에 대한 전과정평가의 시스템 경계 안에는 원료물질인 천연가스를 채취하고 액화하는 과정, 액화된 천연가스를

합성공정으로 수송하는 과정, 합성을 통한 디메틸에테르의 생산 과정, 소비지로의 수송과정 및 차량 연료로서의 연소과정이 포함되었다. 천연가스 채굴 및 액화과정의 공간적 경계는 인도네시아로 가정하였다. 생산된 디메틸에테르를 최종 소비지로 수송하는 과정의 지리적 범위는 국내로 가정하였으나 디메틸에테르의 생산 및 연소를 통한 최종 소비 과정의 지리적 범위는 국내로 한정하지 않았다.

원료물질인 천연가스는 원유와 마찬가지로 전량 수입에 의존하는데, 채굴된 천연가스는 다단냉동법에 의한 액화공정을 거쳐 불순물이 제거된 후 LNG 선을 통해 국내로 수송된다고 가정하였다. 천연가스 채굴에 관한 자료는 미국환경청의 보고서[15]를 기초로 하였으며 천연가스의 액화 및 수송과정에 대한 자료는 SimaPro[11]의 데이터베이스로부터 수집하였다. 여기서는 2000년과 2001년의 국내 천연가스 수입자료를 바탕으로 계산이 이루어졌다. 디메틸에테르는 주로 메탄올 탈수반응에 의해 생산되는데 이렇게 생산되는 디메틸에테르가 연료로 사용되기에는 가격 경쟁력이 매우 취약하다. 그러나 디메틸에테르를 천연가스로부터 직접 합성을 통해 제조할 경우 디젤 연료와 비슷한 가격으로 제조가 가능하여 대체연료로서의 경쟁력을 가질 수 있다[2]. 여기서는 수송된 천연가스가 수증기와 반응하여 합성가스로 전환되고 합성가스는 다시 직접 전환법에 의해 디메틸에테르로 전환된다고 가정하였다. 이러한 방법으로 디메틸에테르를 생산하는 상용공정이 아직 존재하지 않기 때문에 전산모사를 통하여 얻어진 공정의 기본설계 결과에 근거하여 디메틸에테르 생산공정에 대한 자료를 계산하였다. 합성가스 제조에 대한 자료는 Spath and Mann[17]과 공정 전산모사에 이용된 Aspen Plus의 데이터베이스[18]를 이용하였다. Figure 1은 디메틸에테르 생산공정을 개략적으로 보인 것이다. 디메틸에테르가 연료로서 이용될 경우 LPG와 매우 유사한 성질을 지니기 때문에 최종 소비지로의 수송과정은 LPG 유통체계와 같다고 가정하였다. 디메틸에테르의 최종 소비과정은 디젤 대체연료로서 디젤엔진에서의 연소과정이다. 디젤에 대한 목록분석과 마찬가지로 AVL사와 TNO사가 실시한 승용차 배출가스 시험의 결과[2]를 바탕으로 목록 계산을 실시하였다. 연료에 따른 경제성의 차이를 고려하기 위하여 디젤 1kg으로 주행할 수 있는 거리와 같은 거리

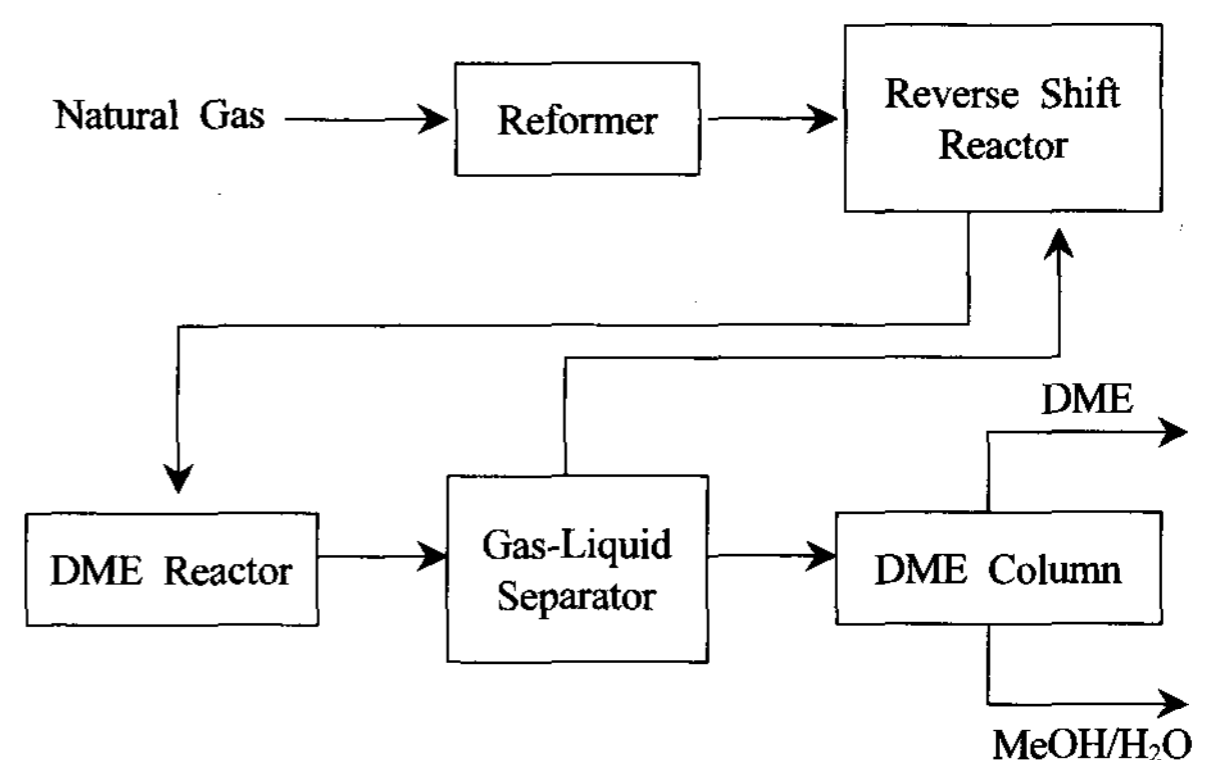


Figure 1. Schematic diagram of dimethyl ether synthesis process.

Table 2. Life-cycle inventory data of dimethyl ether fuel

Inventory Parameter	LCI Result (g/kg diesel equivalent)
Resources	
Natural gas	6,780
Water	1,720
Lignite	18
Crude oil	4
Marl	1
Air emissions	
CO ₂	4,650
Dimethyl ether	415
H ₂	76
CO	49
Methane	44
NO _x (NO ₂ included)	16
SO _x (SO ₂ included)	10
Methanol	2
Water emissions	
Water (process)	2,280
Solid wastes	
Production waste (not inert)	1

를 주행할 수 있는 디메틸에테르의 양을 기능단위로 채택하여 연소 후 오염물질의 배출량을 계산하였다.

디메틸에테르에 대한 목록분석을 통해 수집, 정리된 물질 가운데 기능단위 당 1 g 이상의 사용량 및 배출량을 보인 물질에 대하여 그 값을 정리한 것이 Table 2이다. 디메틸에테르의 경우 가장 두드러진 천연자원 이용 요소는 천연가스와 물 등의 사용이었다. 이는 디메틸에테르의 주원료가 천연가스인 것과 많은

양의 물이 공정수로 이용되는 것에 기인한다. 주요 대기오염물질로는 질량 기준으로 전체 대기 배출량의 88% 이상을 차지하는 이산화탄소를 들 수 있으며 전체 배출의 8% 정도를 차지하는 디메틸에테르의 배출 역시 주목할 만하다. 기능단위 당 4.65kg이 배출되는 이산화탄소는 모든 수송과정과 연료의 최종 사용과정에서의 연소, 그리고 공정으로부터의 배출에 기인하며, 디메틸에테르는 공정으로부터의 증발에 의한 손실에 기인한다. 그 외의 대기오염물질로는 공정에서 배출되는 수소, 일산화탄소 및 메탄 등을 들 수 있으며 질소산화물 및 황산화물 역시 소량 배출되었다. 수질오염물질로는 공정 폐수가 거의 전부를 차지하였으며 다른 물질의 배출량은 무시할 정도로 작았다. 디메틸에테르의 생산과정에서 기능단위 당 약 1 kg의 메탄올이 부산물로 생성되는데 이는 회수하여 다른 공정에서 이용하는 것으로 가정하여 목록에서 제외하였다. 고형 폐기물은 극히 소량 배출되었다.

3.3. 목록분석에 의한 디젤과 디메틸에테르의 비교

같은 용도를 갖는 두 제품의 환경성을 비교하는 가장 간단한 방법의 하나는 두 제품의 전과정에서 이용되는 자원의 양과 배출되는 오염물질의 양을 직접 비교하는 것이다. 디젤과 디메틸에테르에 대한 전과정평가의 목록분석 결과로부터 두 연료의 목록분석에서 상대적으로 큰 결과값을 갖는 목록들은 물, 천연가스, 원유 등의 이용과 이산화탄소, 디메틸에테르, 공정 폐수 등의 배출임을 알 수 있다. 이들을 정량적으로 직접 비교한 결과가 Figure 2이다. 디젤의 경우 물과 원유 등의 자원 소모가 두드러진 반면 디메틸에테르의 경우 천연가스의 사용이 매우 많음을 알 수 있다. 두 연료 모두 이산화탄소와 같은 대기오염물질의 배출이 많으며 공정 폐수의 배출에 있어서는 디메틸에테르가 디젤에 비해 환경적으로 불리함을 알 수 있다. 목록분석의 결과를 전체적으로 볼 때, 디젤과 디메틸에테르 공히 천연자원의 소

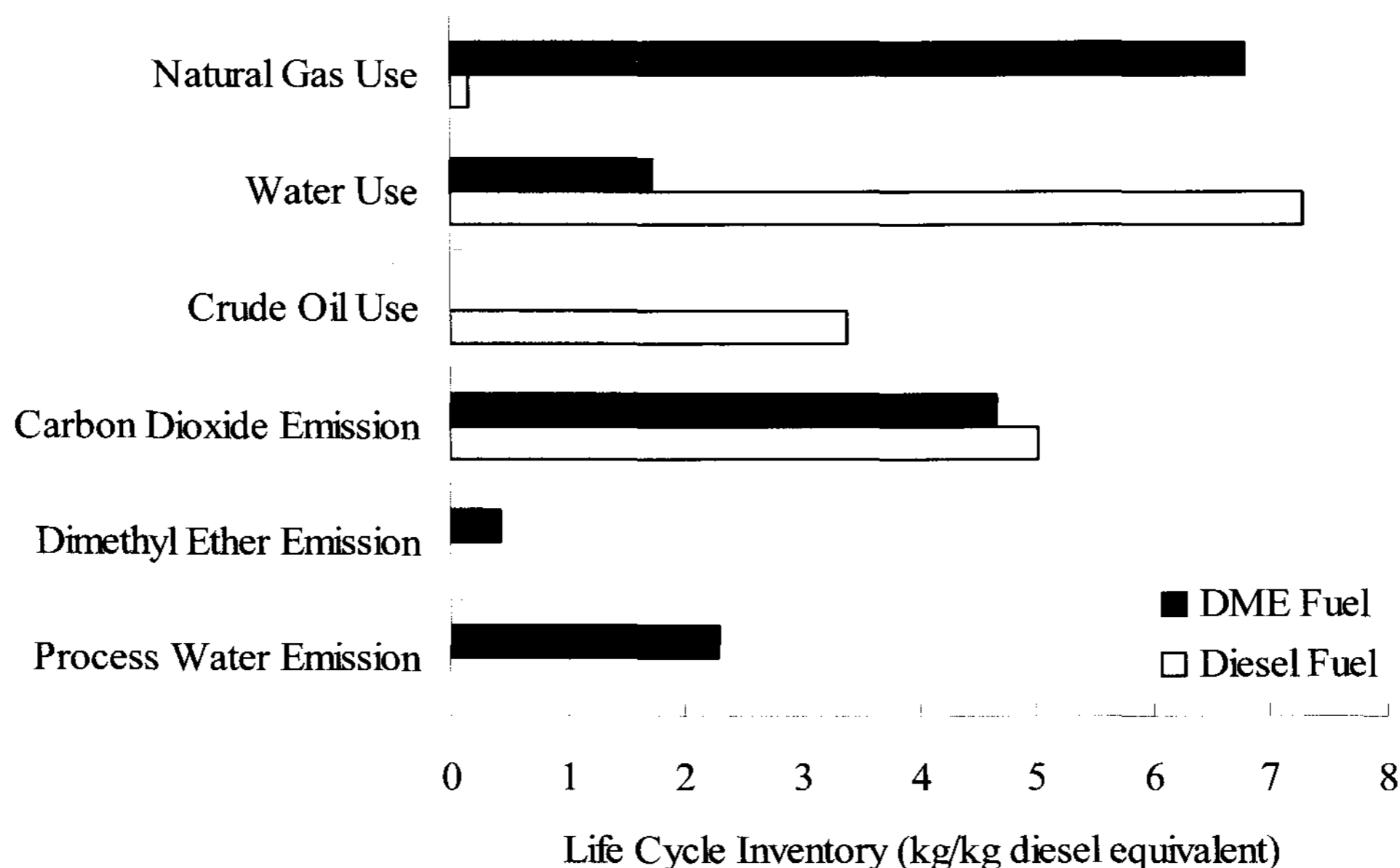


Figure 2. Inventory comparisons between diesel and dimethyl ether fuels.

모와 대기오염물질의 배출이 대규모로 이루어짐을 알 수 있다.

4. 영향평가

목록분석의 결과를 분류하고 특성화하여 정량화된 환경지표를 계산하는 영향평가는 제품 또는 공정의 전과정을 통해 발생하는 주요 환경부하의 정도 및 발생 원인을 파악하는데 매우 유용한 자료를 제공한다. 여기서는 디젤과 디메틸에테르의 잠재적 환경영향을 정량적으로 비교하기 위하여 일반적인 환경영향평가 도구인 Eco-indicator 99[4]를 사용하였다. Eco-indicator 99는 방사선, 호흡기 영향 무기물, 호흡기 영향 유기물, 발암 물질, 오존층 파괴, 기후 변화, 유독성, 산성화 및 부영양화, 토지 사용, 광물질 고갈, 화석연료 고갈 등으로 분류화된 영향요소를 포함하며 각 영향요소의 상호작용을 통한 건강, 생태계, 자원 등에 미치는 영향을 특성화 하여 영향지표를 계산한다. 앞서 설명한 것과 같이 목록분석에 쓰인 대부분의 자료는 국제적 평균값이다. 여기서는 목록분석에 쓰인 자료와 동일한 공간적 경계를 갖는 정규화 기준을 이용하였다. 따라서 여기서 얻은 영향평가의 결과는 국제적 평균값으로부터 계산된 것이다.

4.1. 디젤에 대한 영향평가

Figure 3은 디젤에 대한 영향평가의 결과를 정규화 하여 나타낸 것이다. 정규화는 Eco-indicator 99에서 일반적으로 이용되는 가중치를 이용하여 실시하였다. Figure 3에서 환경영향요소 별 환경부하의 크기는 각 가로막대의 전체 길이로 나타나는 데 이로부터 화석연료의 사용 및 호흡기에 영향을 미치는 무기물질의 발생 등이 가장 중요한 환경부하라는 것을 알 수 있다. 또한 생태유독성, 산성화 및 부영양화, 기후변화 및 토지 이용 등의 환경부하 역시 무시할 수 없음을 알 수 있다. Figure 3은 각 환경영향요소의 환경부하를 그것을 유발하는 전과정 상의 과

정별로 다시 구분하여 표시하고 있다. 정규화된 값을 기준으로 과정별 환경부하의 발생 정도를 살펴보면, 최종 소비단계인 연료로서의 연소과정에서 가장 많은 환경부하가 발생하는데 그 상대적 크기는 전체의 62%에 달함을 알 수 있다. 그 다음으로 많은 환경부하가 발생하는 과정은 원유 채굴 및 정제 과정인데 두 과정 모두 14%에 해당하는 환경부하를 각각 발생하며 원유 수송과정에서도 10% 정도의 환경부하가 발생함을 알 수 있다. 이들에 비해 소비지로의 디젤 수송과정의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작았다.

4.2. 디메틸에테르에 대한 영향평가

Figure 4에 디메틸에테르에 대한 영향평가의 결과를 정규화 하여 나타내었다. 디메틸에테르의 경우 화석연료의 사용이 두드러진 환경부하라는 것을 알 수 있다. 생태유독성, 호흡기 영향 무기물질 및 기후변화 등의 환경부하는 그 크기가 상대적으로 작으며, 그 외 다른 환경부하는 매우 작은 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 정규화된 영향평가 결과를 바탕으로 디메틸에테르와 관련하여 발생하는 환경부하의 과정별 발생 정도를 살펴보면, 가장 많은 환경부하가 발생하는 과정은 전체의 32%에 해당하는 환경부하를 발생하는 최종 소비과정임을 알 수 있다. 그 다음으로 많은 환경부하는 천연가스를 채취하고 액화하는 과정, 액화된 천연가스를 합성공정으로 수송하는 과정 그리고 디메틸에테르의 생산 과정 등에서 고루 발생하는데 그 상대적 크기는 각각 22~24% 정도임을 알 수 있다. 디젤의 경우와 마찬가지로 최종 소비지로의 디메틸에테르 수송과정의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작았다.

4.3. 영향평가에 의한 디젤과 디메틸에테르의 비교

디젤과 디메틸에테르에 대한 전과정평가의 영향평가 결과로부터, 두 연료 모두 화석연료의 사용으로 인해 가장 두드러진

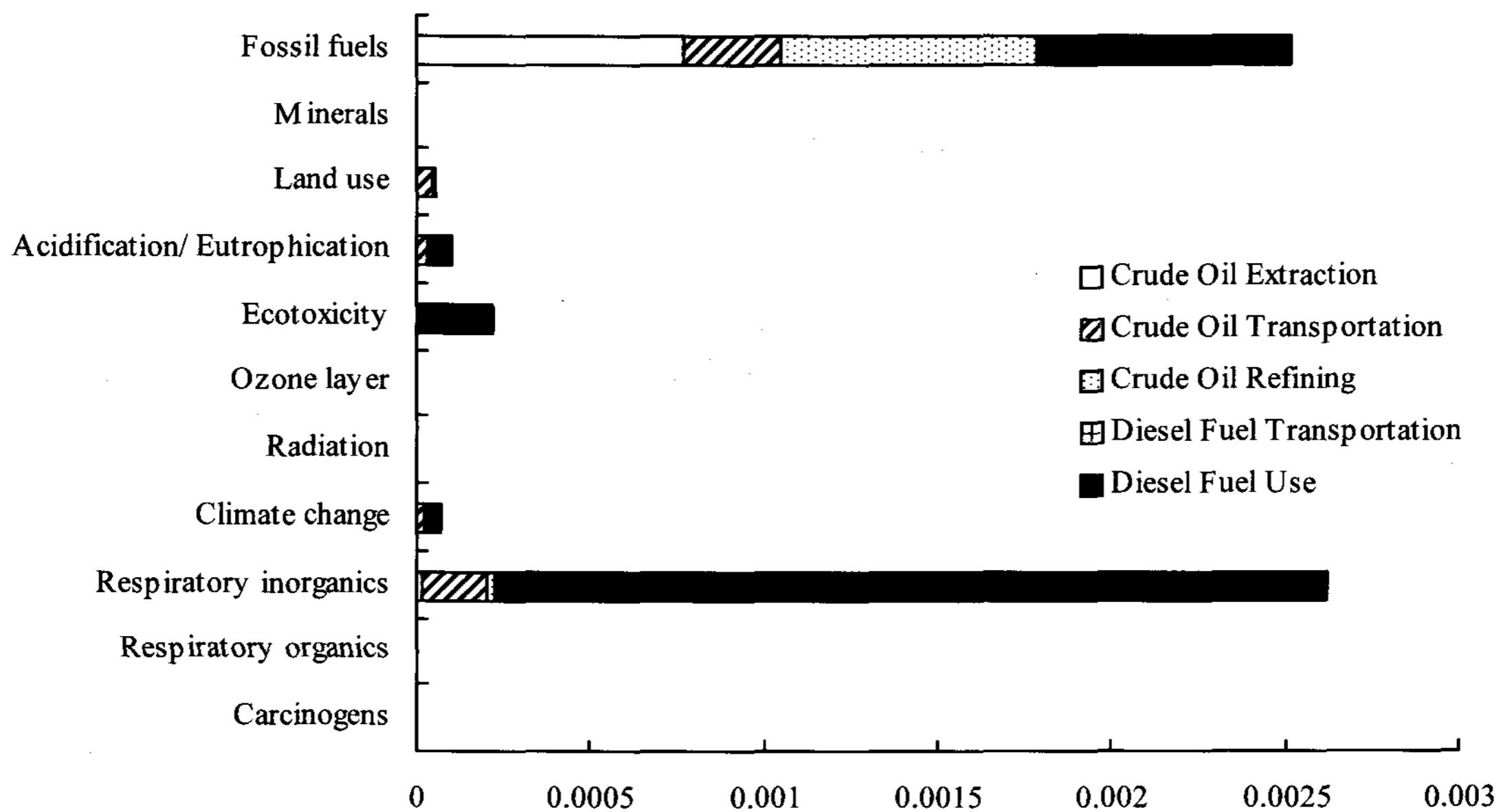


Figure 3. Normalized environmental impacts of diesel fuel.

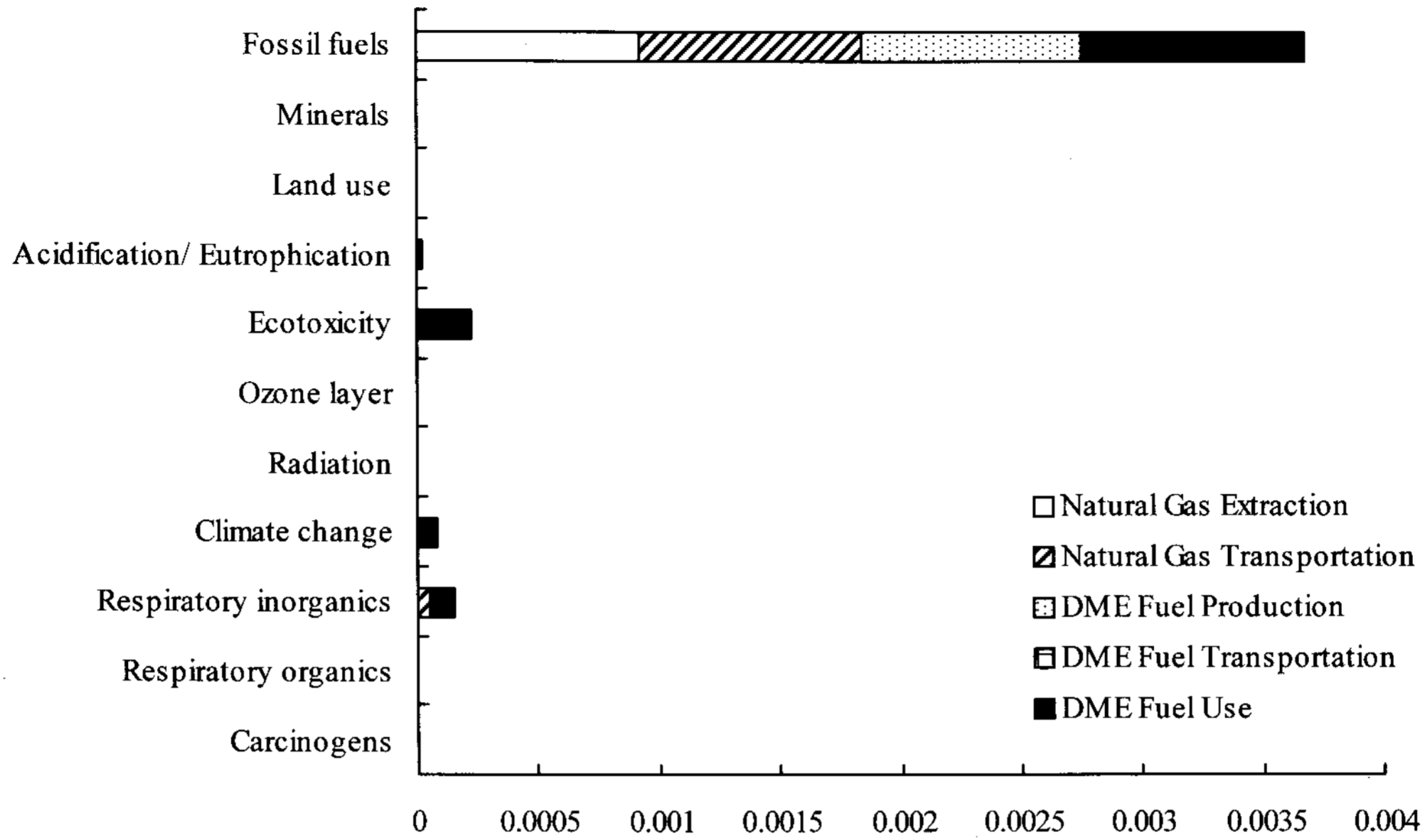


Figure 4. Normalized environmental impact of dimethyl ether fuel.

환경 부하가 발생함을 알 수 있으며 호흡기 영향 무기물질의 발생 역시 매우 중요한 환경부하임을 알 수 있다. 그 외에 생태유독성, 기후변화 및 산성화와 부영양화 등의 요소를 주목할 수 있으나 상대적 중요성이 작음을 알 수 있다. 이들을 포함한 모든 요소들에 대하여 발생하는 환경부하의 크기를 직접 비교하기 위하여 두 연료에 대한 영향평가의 정규화 된 결과를 하나로 정리한 것이 Figure 5이다. 디메틸에테르의 경우 화석연료의 소비로 인한 환경부하가 매우 크며 디젤의 경우에는 그것에 더해 호흡기 영향 무기물질의 배출에 의한 환경부하 역시 주요 요소임을 알 수 있다. Figure 5에 나타난 환경영향요소별 환경부하를 인간의 건강, 생태계의 질 그리고 천연자원 등의 영역별

영향에 대해 정리한 것이 Figure 6이다. 이 그림은 인간의 건강에 미치는 영향은 디젤이 디메틸에테르에 비해 월등히 크며, 천연자원 고갈에 대한 영향은 디메틸에테르가 디젤에 비해 크다는 것을 보이고 있다. 생태계의 질에 대한 두 연료물질의 영향은 비슷한데 그 정도는 인간의 건강이나 천연자원의 고갈에 대한 영향에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있다.

5. 전과정해석

여기에서 실시한 전과정평가의 목적은 연료물질로서 디젤과 디메틸에테르가 가지는 환경적 가치를 정량적으로 평가하고 비

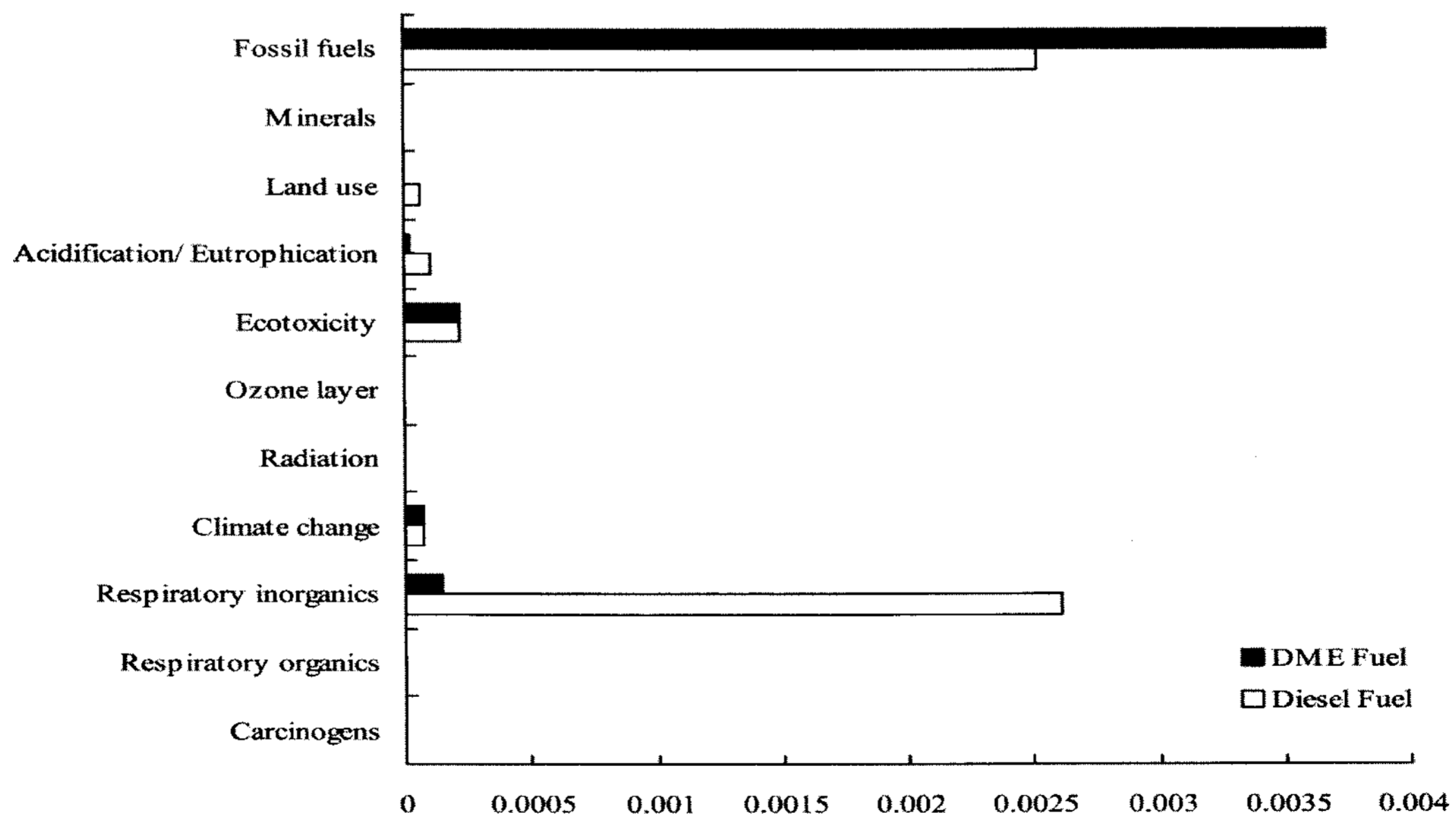


Figure 5. Environmental impact comparisons between diesel and dimethyl ether fuels.

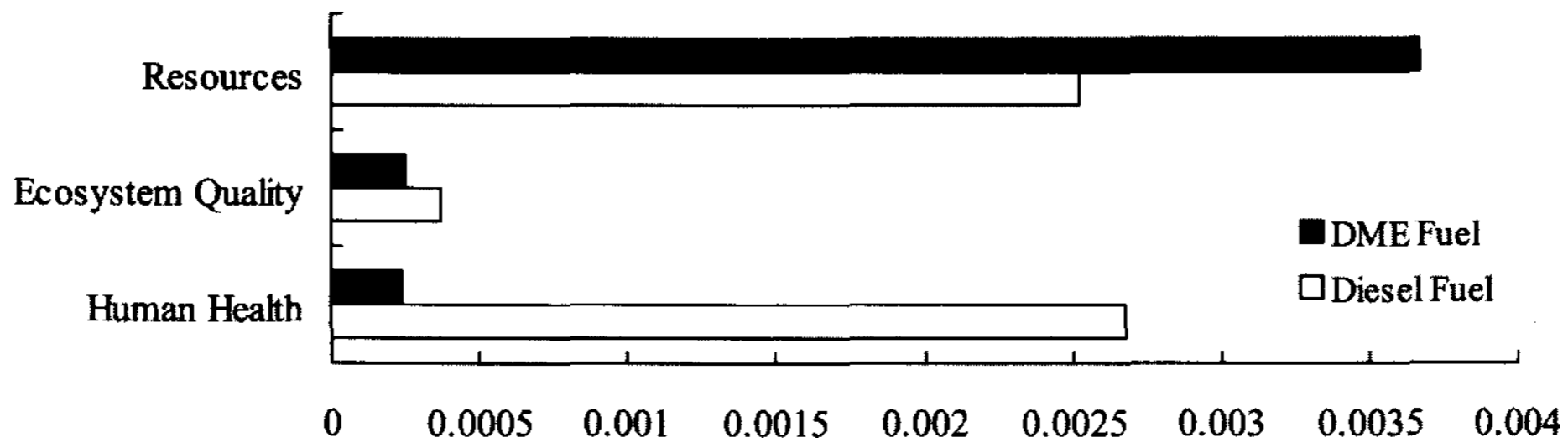


Figure 6. Summary of environmental impacts.

교하는데 있었다. 이를 위해 두 연료물질의 생산부터 최종 소비까지의 모든 과정이 가능한 한 동일한 시간적, 지리적 범위를 유지하도록 하였다. 이로 인해 시간적 범위가 최근으로 제한되지 않았으며 지리적 범위 또한 국내로 한정되지 않았다. 특히 최종 소비과정인 연소과정에서의 조건을 동일하게 유지하기 위하여 두 연료물질이 같은 엔진에서 연소된다고 가정하여 계산을 실시하였다. 전과정평가를 위한 자료 처리 및 계산방법과 과정은 ISO 14040[5]의 규정과 Vigon et al.[6] 및 Fava et al.[7, 8, 9] 등에서 정의된 것을 기초로 하였다. 목록분석의 계산은 GaBi[10], SimaPro[11], TEAM[12] 등 상용 프로그램을 이용하였으며, 영향평가는 Eco-indicator 99[4]를 이용하여 실시하였다.

전과정평가를 통해서 디젤을 대체할 연료로서 디메틸에테르를 생산하고 사용하는 과정에서 나타나는 주요 환경적 문제점은 천연자원의 고갈 및 대기오염물질의 대량 배출 등이며, 이러한 환경부하는 최종 소비지로의 수송과정을 제외한 모든 과정에서 고루 발생함을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 디메틸에테르의 환경적 가치를 제고하기 위한 몇 가지 방안을 점검하였다.

천연자원의 고갈이라는 문제를 해결하기 위한 방안 가운데 하나는 디메틸에테르의 생산을 위한 원재료의 대체이다. 디메틸에테르는 천연가스 외에도 석탄과 바이오매스 등으로부터 합성할 수 있다[2]. 석탄으로부터 디메틸에테르를 합성하는 경우의 반응경로는 천연가스를 주원료로 하는 경우와 매우 유사하여 먼저 수증기와의 반응을 통한 합성가스로의 전환이 이루어진 후 디메틸에테르로의 전환이 이루어진다. 석탄을 이용하여 합성가스를 제조하는 공정에 대한 투자비는 천연가스를 이용하는 공정에 대한 투자비의 3배에 달한다고 알려져 있으나 석탄은 매장량이 많고 다른 탄화수소에 비해 낮은 가격으로 사용이 가능하기 때문에 공정 전체의 경제성을 포함한 환경적 가치평가를 심도 있게 실시해 볼 필요가 있을 것이다. 바이오매스를 원재료로 하여 디메틸에테르를 생산하는 경우 역시 반응경로는 천연가스 및 석탄을 주원료로 하는 경우와 유사하다. 천연가스와 석탄이 재생이 불가능한 자원이라는 것과는 달리 바이오매스의 재생 가능하다는 특성으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 바이오매스를 주원료로 이용하는 경우 원료 공급을 위한 대규모의 토지 사용 등으로 인해 또 다른 환경문제가 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 전체론적 관점에서의 세밀한 평가가 필요할 것이다.

대기오염물질인 이산화탄소의 대규모 발생은 디젤과 디메틸에테르에 공통된 현상으로서 최종 소비지로의 수송과정을 제외

한 모든 과정에서 고루 발생한다는 특징을 갖는다. 이산화탄소의 발생은 최종 소비과정을 포함한 거의 모든 과정에서의 연소에 기인하는데 디메틸에테르를 생산하는 과정에서 반응 부산물로 발생하기도 한다. 연소과정에서의 이산화탄소 발생 저감을 위해서는 보다 효과적인 연소방법의 개발이라는 소극적 방안에 의지할 수 밖에 없지만, 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소의 저감은 공정에 이용되는 반응메커니즘의 연구 및 제어를 통해 보다 적극적인 해결책을 강구할 수 있을 것이다. 여기서는 천연가스와 수증기의 반응을 통한 합성가스의 제조를 가정하여 계산이 이루어졌으나 이에 대한 대안으로서 메탄의 부분산화반응을 이용한 합성가스의 제조 공정을 고려할 수 있을 것이다. 이 경우 발열반응으로 인한 에너지 측면에서의 이득으로 인해 더욱 경제적인 공정을 구성할 수 있다고 알려져 있다. 또한 생산과정에서 공정으로부터의 증발에 의한 디메틸에테르의 배출은 보다 세심한 공정의 관리를 통해 억제되어야 할 것이다.

이상에서 제시된 방안들에 대하여 각각 전과정평가를 실시하여 그 결과를 여기서 얻은 결과들과 비교한다면 보다 효과적인 디메틸에테르 생산 및 사용이 가능할 것이며 이를 통해 디젤 대체연료로서 디메틸에테르의 환경적 가치가 높아질 수 있을 것이다.

6. 결 론

전과정평가 기법을 이용하여 디젤을 대체할 연료로서 디메틸에테르가 가지는 환경적 가치를 평가하였다. 디젤과 디메틸에테르 두 연료물질의 환경적 가치를 정량적으로 평가하고 비교하기 위하여 두 물질의 생산을 위한 원료물질의 채굴과정부터 최종 소비단계인 디젤엔진에서의 연소과정까지를 전과정평가를 위한 시스템 경계 안에 포함하였다. 디젤과 디메틸에테르 각각에 대한 목록분석 및 영향평가를 실시하였으며 그 결과를 바탕으로 전과정해석을 실시하였다. 목록분석을 통해 물, 원유, 천연가스 등 천연자원의 소모와 이산화탄소, 디메틸에테르 등 대기오염물질의 배출이 두 물질과 관련된 가장 중요한 환경오염인자라는 것을 알 수 있었다. 두 연료물질에 대한 영향평가의 결과를 비교한 결과, 디메틸에테르가 디젤에 비해 인간의 건강과 생태계 질이라는 측면에서 우수하다고 판단되지만, 천연자원의 고갈이라는 측면에서는 디젤연료가 상대적으로 우수함을 알 수 있었다. 전과정평가의 결과를 바탕으로 디젤 대체연료로서 디메

틸에테르가 가지는 환경적 가치를 제고하기 위한 방안을 제시하였다.

참고문헌

1. Lee, Y. J., "DME, Multi Source-Multi Purpose Fuel," *News Inform. Chem. Eng.*, **20**(5), 515 (2002).
2. Oh, J., "Necessity of New Energy DME," *News Inform. Chem. Eng.*, **20**(5), 516-519 (2002).
3. Curran, M. A., *Environmental Life Cycle Assessment*, McGraw-Hill, New York, 1996.
4. Goedkoop, M., Effting, S., and Collignon, M., *The Eco-indicator 99, A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact assessment, Manual for Designers*, Pre Consultants, Amersfoort, 2000.
5. International Standard Organization, *ISO 14040*, 1st ed., International Standard Organization, 1997.
6. Vigon, B. W., Tolle, D. A., Cornaby, B. W., Latham, H. C., Harrison, C. L., Boguski, T. L., Hunt, R. G., and Sellers, J. D., *Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*, EPA/600/R-92/245, U. S. EPA Office of Research and Development, Washington, D. C., 1993.
7. Fava, J. A., Denison, R., Jones, B., Curran, M. A., Vigon, B., Selke, S., and Barnum, J., *A Technical Framework for Life-Cycle Assessment*, SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education, 1991.
8. Fava, J., Consoli, F., Denison, R., Dickson, K., Mohin, T., and Vigon, B., *A Conceptual Framework for Life-Cycle Impact Assessment*, SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education, 1993.
9. Fava, J., Jensen, A. A., Lindfors, L., Pomper, S., De Smet, B., Warren, J., and Vigon, B., *Life Cycle Assessment Data Quality : Conceptual Framework*, SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education, 1994.
10. IKP, *GaBi 3.0 User's Manual*, IKP, 1998.
11. Pre, *SimaPro 5.0 User's Manual*, Pre, 2001.
12. Ecobilan, *TEAM 3.0 User's Manual*, Ecobilan, 1999.
13. ANL, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I, 5th ed.*, EPA AP-42, Argonne National Laboratory, 1996.
14. Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., and Shapouri, H., *An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles*, TP-580-24772, National Renewable Energy Laboratory, 1998.
15. U. S. EPA, *Profile of the Oil and Gas Extraction Industry*, EPA/310-R-99-006, U. S. EPA Office of Compliance, Washington, D. C., 2000.
16. API, *The Generation of Wastes and Secondary Materials in the Petroleum Refining Industry*, American Petroleum Institute, 1991.
17. Spath, P., and Mann, M., *Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming*, TP-570-27637, National Renewable Energy Laboratory, 2001.
18. AspenTech, *Physical Property Data : Aspen Plus Steady State Simulation 10.0*, Aspen Technology Inc., 1999.