

Social Impact Assessment for Nano Technology Using a System Dynamics

Seoung Hun Bae* · Kwang Min Shin* · Jung Sun Lim* · Jin Seon Yoon*
Sang Kyu Kang* · Jun Hyun Kim* · Min Kwan Kim** · Chang Hee Han***†

*Korea Institute of Science and Technology Information, Professor

**Institution of Knowledge Services, Hanyang University

***Department of Business Administration, Hanyang University

시스템 다이내믹스를 활용한 나노기술의 사회영향평가

배성훈* · 신광민* · 임정선* · 윤진선* · 강상규* · 김준현* · 김민관** · 한창희***†

*한국과학기술정보연구원

**한양대학교 지식서비스연구소

***한양대학교 경상대학 경영학부

The study aims at quantifying the effect of nano technology in the fields of economics and social aspects by using the methodology of system dynamics. A case study which using selenium oxide nanoparticles as additive agent in order to enhance fuel efficiency was selected as an example of nano technology in economic and societal benefits. Additionally, models for exhaust gas from combustion of fuel (diesel) and related issues are developed to evaluate real-time assessment of the effect of nano technology. It was found that the selenium oxide nanoparticles increase fuel efficiency, and it also affects on the amount of exhaust gas and the respiratory disease related issues. The results of this study which give quantitative value for the effect of nano technology can be used as objective references in development of national policy.

Keywords : Nano Technology, Social Impact, System Dynamics

1. 서론

기술의 발전은 필연적으로 우리가 살아가는 생태계와 인간의 삶에 직·간접적인 영향을 미치게 되었다. 특히 나노기술과 같은 파급력이 높은 기술은 산업 영역 간 융합을 가져오고 신기술 개발, 연구조사, 투자활동 등에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 영향은 인간 생활이나 수명 등을 개선하거나 생태계 오염 정화 등 긍정적 효과를 낼

수 도 있으나 반대로 인간의 건강을 위협하거나 생태계를 교란시키는 등 부정적 효과도 발생한다. 따라서 기술 발전은 양날의 검처럼 긍정적인 면과 부정적인 면을 동시에 가지고 있으며 이를 사전에 확인해야 하는 중요성이 더욱 커지기 시작했다[3].

이에 정부는 「과학기술기본법」에 기술영향평가의 시행 근거를 마련하고, 2003년부터 현재까지 12개 주제에 대한 기술영향평가를 수행하여 과학기술의 양면성에 대한 인식과 이해가 높아지기 시작했을 뿐만 아니라, 평가 결과를 바탕으로 법·제도 측면에서 유용한 여러 가지 제안을 도출하기도 했다. 기술영향평가의 주요 평가부분은 경제적 영향측면과 사회영향의 측면을 살펴보고 있다. 이 중 사회

영향부분은 보통 전문가 집단과 시민포럼, 공청회 등을 거쳐 “A기술이 발전하면 B라는 영향을 미칠 것이다.”라는 식의 정성적 평가가 주로 이루어 졌다. 이러한 정성적 평가는 전문가 개인의 주관적인 견해가 포함될 여지가 있으며 주장을 뒷받침할 근거가 미약하다는 단점이 있다.

나노기술은 다양한 산업의 제조 과정에서 갖가지 형태와 절차로 개입할 수 있기 때문에 나노기술의 영향 범위는 매우 복잡하고 넓다. 따라서 나노기술의 사회영향을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 복잡하고 광범위한 상황을 반영할 수 있는 방법이 필요하다. 즉, 나노기술의 사회영향 평가를 위해서는 하나의 영향을 단편적으로 보기보다는 나노기술의 사회영향을 포괄적으로 볼 수 있으면서도 정량적으로 측정할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 사회 파급력이 큰 기술 중 하나인 나노기술을 바탕으로 시스템 다이내믹스 방법론을 활용하여 나노기술이 사회에 어떠한 영향을 미치는지 계량적으로 측정해보고 보고자 하였다

2. 이론적 배경

2.1 나노기술

나노기술이란 ‘물질을 나노미터 크기의 범주에서 조작·분석하고 이를 제어함으로써 새롭거나 개선된 물리적·화학적·생물학적 특성을 나타내는 소재·소자 또는 시스템을 만들어 내는 과학기술’¹⁾이라고 법으로 명시하고 있다. 앞서 정의된 나노기술은 기존 기술을 횡적으로 연결함으로써 융합을 발생시키고 이를 통해 새로운 기술영역과 제품영역을 구축하게 된다. 나노기술은 나노미터에서 나노물질 또는 구조물의 합성, 제어, 분석 등의 높은 기술 집약도가 요구된다. 사회·경제적 관점에서 나노기술은 기존 시장을 일부 또는 완전대체 하거나 새로운 시장을 창출하는 등의 효과를 가져 올 수 있다.

2.2 나노기술의 특성과 사회 영향 평가

나노기술은 다양한 산업의 제조 과정에서 다양한 형태와 절차로 개입할 수 있다. 디젤 연료(Diesel) 산업을 예로 들면, 나노기술이 디젤 연료의 촉매제에 사용되어 자동차 연비 향상에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 상황에서 나노기술을 이용한 ‘셀레늄 산화물 연료첨가제’는 디젤연료(Diesel) 산업에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 기존 연료인 Diesel 연료의 소비형태, 연료 사용 감소로 인한 환경오염 물질 배출 감소 등에도 영향을 미칠 수 있다. 이와 같이

나노기술의 영향 범위는 매우 복잡하고 광범위 하다. 따라서 나노기술의 사회영향을 보다 정확하게 측정하기 위해서는 복잡하고 광범위한 상황을 반영할 수 있는 방법론이 필요하다. 즉, 나노의 사회영향 평가는 단순한 한 가지 측면을 고려한 방법론을 선정하여서는 이루어질 수 없고, 보다 포괄적인 방법을 사용하여 측정해야 할 뿐만 아니라 정성적인 측면까지 모두 고려할 필요가 있다.

2.3 사회영향 평가 방법론

산업 전반에 걸쳐 연구 및 신기술 또는 제품 개발, 공공 및 민간에 의한 투자, 경제 성장 등에서 큰 역할을 하고 있는 나노기술은 중요한 역할 만큼 사회·경제적으로 큰 영향을 미치고 있다. 특히, 다양한 산업에 걸쳐 융합의 형태로 응용되고, 결과에 따라 광범위한 사회적 파급 효과를 가져 올 수 있는 나노 기술의 본질적인 특성은 한가지의 특정 모델로 이를 평가하기 어렵게 만든다. 때문에 나노기술이 미치는 사회영향에 대한 평가 방법에 대한 연구나 사례에 대한 분석 등이 활발히 이루어지고 있지 못한 상황이다. 국내에서는 나노기술 이외에 2003년 NBIT 기술영향평가를 시초로 약 12회의 기술영향평가를 실시하였으며 사회영향 평가부분은 2011년 시나리오 기법을 활용한 ‘뇌기계 인터페이스 기술영향평가’를 제외하고 전문가로 구성된 ‘기술영향평가 위원회’, 일반 시민으로 구성된 ‘시민 포럼’ 등의 의견을 수렴하였으며 “A 기술 발전하면 B의 영향을 줄 것이다”라는 식의 정성적인 방법으로 제한적으로 기술되었다. 해외의 경우 Thien A. Tran, Tugrul Daim[23]의 논문에서 공공분야에서 수행된 기술영향평가와 비정부기관과 비즈니스목적으로 수행된 영향평가의 방법론 및 시행 년도에 따라 구분하였는데 주로 사용된 방법론은 시스템 다이내믹스, 요인분석, 시나리오 기법, 의사결정 분석, 델파이, 설문 및 모니터링 등의 방법론이 활용되었다[23].

2.3.1 시나리오 방법론

시나리오 방법론은 불확실한 세상에서 장기적인 안목을 가질 수 있도록 도와준다. 시나리오는 미래에 전개될 수 있는 상황에 관한 스토리이며, 이는 변하고 있는 환경을 인지하고 그에 맞춰 적용할 수 있도록 도와준다. 결국 시나리오 미래에 있을 법한 상황들을 명료히 이해하고 각각의 상황에서 가장 적절한 행보를 찾을 수 있게 해주는 것이다[24].

시계열 분석, 회귀 분석과 같은 전통적인 계량적 예측 기법은 미래가 늘 과거와 유사할 것이라는 전제에 기초한다. 그러나 시나리오 방법론은 불확실성을 받아들이고 직접적으로 예측과정에 도입하게 되며, 전문가의 주관적 판단과 지식을 바탕으로 관련 사건간의 상호 의존적 속성을 반영하여 환경변화를 예측하게 한다[20].

1) 나노기술개발촉진법 제2조1항.

<Table 1> Methodology Criteria

	Ecosystem Representation	Causality	Quantitative Measurements	Time Change
Survey and Monitoring	x	x	x	x
Factor analysis	x	o	△	x
Cost-Benefit Analysis	x	x	o	x
Scenario analysis	x	o	x	o
System Dynamics	o	o	o	o

2.3.2 ‘시스템 다이내믹스’ 방법론

‘시스템 다이내믹스는 MIT의 Jay. W. Foresters가 1962년 산업태동론(Industrial Dynamics)라는 책에서 처음 사용하였으며 이후 도시문제해결 및 국제환경문제의 분석까지 시스템 다이내믹스 기법의 사용범위를 확장시켰다.

본 연구에서는 기존 사회영향평가에서 주로 이루어지던 전문가들에 의한 정성적 평가를 탈피하여 데이터를 활용하여 정량적 수치를 제시하고자 하였으며 또한 나노기술의 특징을 반영할 수 있는 방법론을 선정하고자 하였다.

나노기술은 일반적으로 다른 산업 및 제품들과 결합한 형태를 보이고 있으며 나노미터의 크기로 인하여 다양한 곳에 활용이 가능하다. 따라서 나노기술이 활용되는 산업 및 영역은 무수히 많으며 이러한 방대한 관계를 표현할 수 있는 방법론이 필요하였다. 또한 나노기술의 사회영향을 보기 위해서는 나노기술이 직접적으로 사회·문화에 미치는 영향 이외에도 나노기술이 원인이 되어 파생되는 2차적인 파생 효과도 살펴보기 위해서는 나노기술과 영향간의 인과관계를 표현할 수 있어야 한다. 또 다른 중요한 선정요인으로는 이러한 영향관계를 수식 및 데이터를 통해 정량적으로 측정하고 표현할 수 있어야 하며 시간의 흐름에 따라 이러한 영향이 어떻게 변하는지를 살펴볼 수 있어야 한다. 다양한 방법론을 비교해본 결과 이러한 조건을 충족시키는 방법론으로 시스템 다이내믹스 방법론이 적절하였다.

2.4 시스템 다이내믹스 방법론의 절차와 한계

2.4.1 시스템 다이내믹스 방법론의 절차

시스템 다이내믹스 분석모형을 개발하고 시뮬레이션 및 검증을 거친 후 개발된 모형의 활용에 이르기까지의 절차는 다음과 같은 순으로 이루어진다[10].

첫째, 시스템 다이내믹스의 방법론은 현재 시스템의 문제가 무엇이고 이 문제를 해결위하여 문제를 단순화하는 과정으로 시스템에 직접적 또는 간접적으로 영향을

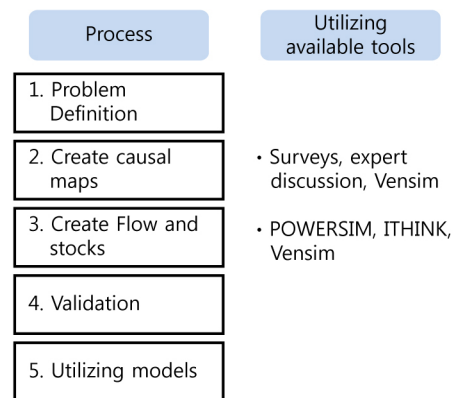
미치는 변수들을 찾아내야 한다. 변수의 숫자는 너무 많으면 모델링 과정이 복잡해져서 모델링 및 해석이 어렵게 되므로 적정한 수의 변수를 선정해야 한다.

둘째, 선정된 주요 변수들의 상호관계에 대한 인과지도(Causal Loop Diagram, CLD)를 작성한다. 인과지도(casual map) 혹은 인과순환 지도(casual loop diagram)는 화살표로 원인과 결과변수의 인과관계를 표시한다. 인과지도는 시스템 변수의 관계를 설명하기 위해 변수들의 관계를 화살표로 표시한다.

셋째, 저장유량도(Stock Flow Diagram)을 작성한다. 저장유량도는 인과지도를 바탕으로 변수들 간의 관계를 컴퓨터 프로그램으로 시뮬레이션 하기 위해 영향관계를 수식으로 작성한다. 시스템 다이내믹스 구성하는 변수의 형태는 크게 변화율변수(Rate), 수준변수(Level), 보조변수(Auxiliary), 상수(Constant), 참조 함수(Loop-up function), 초기 값 변수(Initial) 등으로 구성되어 있다.

넷째, 모형의 타당성을 검증하여야 한다. 모형을 검증하는 방법으로는 모형의 건전성과 객관성 검증이 있다. 건전성 검증은 개발자의 논리대로 수식들이 연결되었는지를 확인하는 과정으로 모형의 단위 체크, 민감도 분석 등이 있다. 객관성 검증은 모형이 현실을 잘 반영하고 있는지를 확인하는 과정으로 객관성이 검증되면 사용자들은 모형을 신뢰하게 되는 것이다.

마지막 단계로, 모형의 활용이다. 모형을 활용하여 사례에 대한 분석·예측·평가 등의 작업을 수행하게 되는 데 이러한 모형의 작업과정은 시행착오와 피드백을 통한 개선을 통하여 더욱 정교하고 현실을 반영하는 모형으로 발전시킬 수 있다[13].



<Figure 1> System Dynamics Process

저장유량도를 작성하여 시뮬레이션을 수행하기 위해서 PowerSim, ithink, Vensim 등 다양한 컴퓨터 Tool이 개발되어있다.

이러한 Tool을 활용해 모델링을 하는 과정에서 변수의

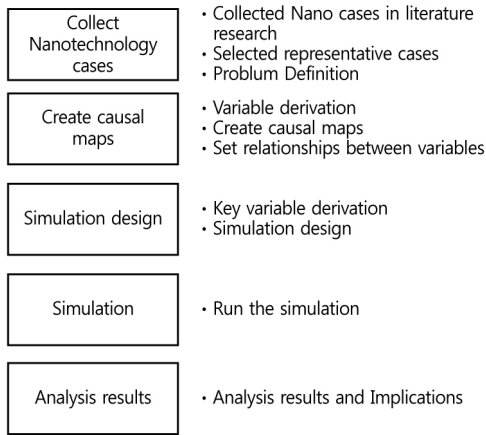
숫자가 너무 많으면 모델링 과정이 복잡해져서 모델링 및 해석이 어렵게 되므로 적절한 수의 변수를 선정해야 하는 어려움이 있으며 문제에 영향을 미치는 영향 변수들을 도출하여 인과지도를 작성하기 위해서는 문제에 대해 전문적이며 상당한 지식이 요구된다.

2.4.2 ‘Vensim’

본 연구에서 활용하는 Vensim 6.2버전은 미국의 Ventra System Inc.(www.vensim.com)에서 개발한 소프트웨어로 시스템다이내믹스 모형들을 개념화, 문서화, 시뮬레이션, 분석, 최적화를 지원하는 비주얼 모델링 도구이다. 변수의 수가 1,000개 미만인 조그만 모형인 경우는 itthink나 PowerSim으로 충분히 소화할 수 있으나, 변수의 수가 많아지고 처리하는 자료의 수가 많아지면 Vensim을 사용하는 것이 더 효과적이다.

3. 연구 모형

본 연구의 절차는 다음과 같다.



<Figure 2> Study Process Model

3.1 나노기술 사례 수집 및 선정

나노기술의 사례 중 데이터를 구할 수 있고 사회적 파급력이 큰 셀레늄 산화물 나노입자를 활용한 디젤촉매제를 본 연구에 대표 사례로 선정하였다. 셀레늄 산화물 나노입자를 디젤 자동차 연료에 첨가함으로써 연료의 연소 효율성을 높여 적은 양의 연료로도 많은 거리를 움직일 수 있도록 만드는 기술이다. 이를 통해 연료효율을 약 5% 정도 향상시켰으며, 약 10% 배기가스 저감효과를 보여 지구온난화의 원인인 이산화탄소의 양도 줄였다는 보고가 있다.

3.2 인과지도 작성

본 연구에서는 디젤연료에 셀레늄 산화물 나노입자를 섞은 디젤촉매제를 나노기술로 선정하였으며 이 사례의 주요한 기능은 자동차의 연비 향상 및 배기가스 저감효과이다. 연비 향상은 디젤에 수요에 영향을 미칠 것이며 따라서 디젤 수요에는 어떠한 요인이 있는지, 디젤 수요의 변화에 따라 배기가스 배출량 변화에 따라 발생할 수 있는 현상을 선행연구를 통해 변수를 도출한 후 이를 토대로 인과지도를 통해서 표현하고자 한다.

3.2.1 석유 분류 및 수요 영향요인

석유는 사용 목적에 따라 산업용, 수송용, 가정상업용, 발전용, 공공기타 등으로 분류되며 성분 및 끓는점의 차이에 따라 휘발유, 등유, 경유, 항공유, B-A유등 다양하게 구분된다. 석유 소비에 영향을 미치는 요인은 자동차 등록대수, 항공여객 및 화물 운송량, 난방 등 계절적 요인, 경제적요인 등이 있다.

본 연구에서는 다양한 석유 분류 중 디젤 차량에 사용되는 수송용 디젤(경유)를 활용하였다.

3.2.2 디젤

디젤 연료는 끓는점이 250~350℃ 사이에 있는 탄화수소들의 혼합물로서, 증류탑에서 등유 다음으로 유출되는 석유로 승용차 및 화물 자동차 연료로 많이 사용된다. 이러한 디젤 연료는 유황분이 함유되어 있어 공기 중으로 황산화물질을 배출시켜 인체 및 생태계에 다양한 피해를 유발시킨다.

① 디젤 연료 수요영향 요인

디젤 연료는 차량의 등록대수, 경유의 가격, 인구수, 연료효율 등 다양한 요인 등이 수요에 영향을 미친다. 선행연구를 통해 살펴본 디젤연료의 수요 영향요인은 다음과 같다.

<Table 2> Oil Demand Factors

Influencing Factors	Prior research
Petrol, diesel prices, consumption, vehicles, population, GRDP, the holiday season seasonal factors, the international oil price, exchange rate, month consumption	Choi[7]
Population, GRDP (gross domestic product in area), oil prices	Kim[11]
Transportation tax imposed, car mileage, fuel efficiency, emissions per holding structure	Lee[15]
Transport energy, environmental taxes	Lee[13]
GRDP, demographic changes, the vehicle holdings, power consumption, energy prices	Kim and Lee [9]

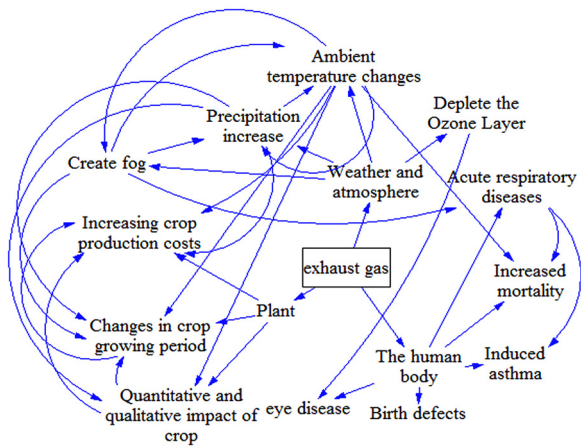
② 배기가스 피해요인

디젤연료에 셀레늄 산화물 나노입자를 섞은 디젤촉매제를 나노기술은 배기가스를 절감하는 기능을 보인다. 자동차 배기가스는 일산화탄소(66.1%), 질소산화물(22.1%), 휘발성 유기화합물(10.3%), 미세먼지(1.1%) 아황산가스(0.4%) 등의 오염물질이 배출된다[1]. 따라서 배기가스가 환경, 인체, 보건 등에 어떠한 영향을 미치는지 선행연구들을 조사하여 요인을 분석해보았다.

<Table 3> Damage Factor of the Emission Gas

Field	Factors	Prior research
The human body	Acute respiratory diseases	Smith[21]
	The prevalence increases	Bobak and Leon[4]
	Increased mortality	Gyeonggi Research Institute[22]
	Induced asthma	Chauhan et al.[5], Lee[14]
	Birth defects	An[2]
Various diseases including eye disease		
Plant	Quantitative and qualitative impact of crop	Choi[6]
	Changes in crop growing period	
	Increasing crop production costs	
Weather and atmosphere	Create fog	Oh[18]
	Precipitation increase	
	Ambient temperature changes	Lee[17]
	Deplete the Ozone Layer	

선행 연구를 통하여 도출된 피해 요인들 간의 관계를 교차영향분석법을 활용하여 요인들 간의 영향을 인과지도를 활용하여 작성하였다. 이 중 특히 인체에 미치는 영향을 중심으로 시뮬레이션 변수를 설정하여 시뮬레이션을 시도하였다.

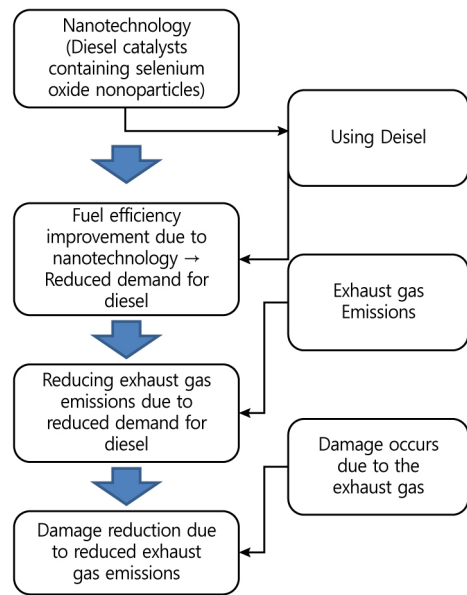


<Figure 3> Exhaust Gas Causal Map

4. 시뮬레이션 설계

4.1 나노기술과 디젤수요 및 배기가스 배출량간의 관계

자동차 연료로 사용되는 디젤연료는 연소 시 질소산화물 및 이산화탄소 같은 유독물질을 포함한 배기가스를 배출하게 된다. 디젤연료를 많이 사용하면 할수록 배출되는 배기가스의 배출량은 많아지고 디젤연료의 사용량이 감소할수록 배출되는 배기가스 배출량은 감소하게 될 것이다. 따라서 디젤의 수요와 배기가스 배출량은 정비례의 밀접한 관계를 가지고 있다고 볼 수 있다. 이렇게 배출된 배기가스의 유독물질은 대기 중에 퍼져 인체, 식물, 대기 및 기상 등에 직·간접적으로 다양한 피해를 미친다.



<Figure 4> Nano Technology Applied to Diesel Fuel

셀레늄 산화물 나노입자가 포함된 디젤 촉매제의 주요 혜택은 자동차 연비 향상 및 배기가스 저감효과에 있다. 셀레늄 산화물 나노입자가 포함된 디젤 촉매제의 주요한 기능인 자동차연비 향상은 디젤수요에 영향을 미치는 다양한 요인(연료효율, 석유가격, 소비량, 차량대수, 인구수, GRDP, 휴가철의 계절요인, 국제석유가격, 환율, 전월소비량, 세금 부과, 승용차의 주행거리, 배기량별 보유구조 등) 중 연료 효율과 관련이 있다. 따라서 셀레늄 산화물 나노입자가 포함된 디젤 촉매제의 사용은 자동차의 연료효율을 향상시켜 궁극적으로는 디젤의 수요를 변화시킬 수 있는 요인으로 볼 수 있다. 또한 디젤수요에 영향을 미치는 많은 요인 중 디젤수요를 증가시키는 요

인을 선행연구서 가장 많이 나온 요인인 인구수, GRDP, 가격 중 “인구가 증가하면 디젤 수요가 증가할 것”이란 전제로 인구요인을 디젤수요 증가요인으로 한정하였다.

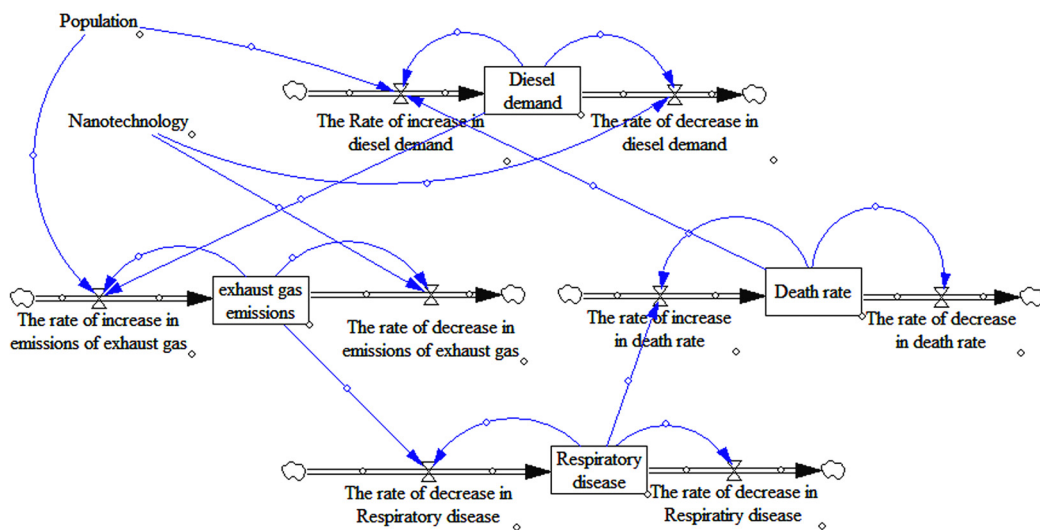
이러한 디젤의 수요 변화는 배기가스의 배출량을 변화시키며 배기가스 배출량 변화는 배기가스로 인하여 발생할 수 있는 피해(급성호흡기 질환 유병율 증가, 사망률 증가, 천식유발, 기형아 출산, 안질환 등 각종 질병, 농작물의 양적 질적 영향, 작물의 생육기간 변화, 작물 생산 비용 증가, 안개생성, 강수량 증가, 대기온도 변화, 오존층 파괴 등)를 줄이는 구조를 가지게 된다.

4.2 시뮬레이션 변수 설정

셀레늄 산화물 나노입자가 포함된 디젤 촉매제에 영향을 받는 디젤연료와 배기가스 배출량, 호흡기질환, 사망률에 관한 시뮬레이션 모델이다. 시뮬레이션을 통해 셀레늄 산화물 나노입자가 포함된 디젤 촉매제가 디젤의 수요를 변화시켰을 시 배기가스 배출량, 호흡기 질환, 사망률에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하기 위해 시뮬레이션을 구성하였다. 시뮬레이션모델을 설정하기 위해 디젤 수요, 대기가스 배출량, 호흡기 질환, 사망률을 저장 변수로 설정하였으며 인구수, 나노기술을 유량변수로 설정하였다.

<Table 4> Setting Parameters

	Variable
Variable flow	nano technology, population
Variable stocks	Diesel demand, emissions, respiratory diseases, mortality



<Figure 5> Simulation Models of the Effects of Nano Technology

4.3 기초관계 균등화 단위 모델링

객관적이고 타당한 연구결과를 얻기 위해 본 연구에서는 연구자의 사고를 가능한 한 배제하면서 인과지도를 시스템 다이내믹스 모델로 변환시키는 “기초관계의 균등화 단위 모델링(Normalized Unit Modelling By Elementary Relationship, NUMBER)”을 사용한다. “기초관계의 균등화 단위 모델링”이란 저장(stock-수준변수)과 유량(flow-변화율 변수)간의 관계를 모두 기초적인 관계로 설정하고, 이들 변수들의 측정단위를 0에서 1까지의 값으로 균등화시키는 것이다[8].

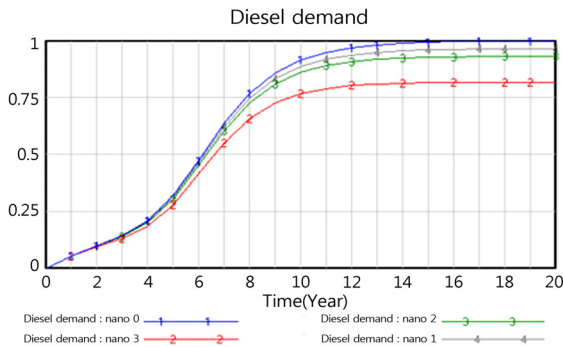
4.4 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 인구증가로 인하여 디젤 수요가 증가하지만 셀레늄 나노입자를 첨가한 디젤촉매제의 사용으로 효율이 증가해 디젤의 수요를 감소시킨다고 보았다. 이들의 관계를 설명하면 첫째, 기본적으로 디젤의 사용량에 영향을 미치는 요인은 나노기술과 인구이며 나노기술로 인하여 디젤의 사용량이 감소하며 인구요인으로 인하여 디젤 수요는 증가한다. 이러한 디젤수요의 변화는 배기가스 배출량에 영향을 미친다. 둘째, 배기가스의 증가/감소는 대기의 미세먼지 농도 및 각종 유해가스를 더욱 발생/감소시켜 인체에 영향을 주며 특히 호흡을 통해 이를 들이마시게 되므로 호흡기 질환의 발병률을 증가/감소시킨다. 셋째, 호흡기질환의 발생은 특히 면역체계가 취약한 영아 및 노약자, 환자 등의 면역력 및 혈관 등에 영향을 미쳐 사망률에 영향을 미치게 된다.

5. 시뮬레이션 결과 해석

5.1 나노기술의 의한 효과에 따른 디젤 수요변화

시뮬레이션에서 인구의 증가(0.1)로 인하여 디젤의 수요는 지속적으로 증가하게 된다. 그래프상 나노 0(1번) 그래프는 나노기술이 적용되지 않았을 시 인구증가에 따른 디젤 수요의 예상치이며 1로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 나노 1(4번) 그래프는 셀레늄나노입자를 포함한 디젤첨가제에 의해 자동차의 연비향상 효과가 5%(0.05)일 경우 디젤의 수요 예상치이다. 기존 나노기술이 사용되지 않았을 경우와 비교하여 큰 차이는 없으나 약 0.95로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 나노 2(3번) 그래프의 경우 나노기술에 의해 연비향상 효과가 10%(0.1)일 경우 디젤의 수요 예상치이다. 이 경우 디젤의 수요가 20년 후에는 약 0.9로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 나노 3(2번)의 경우 나노기술에 의해 연비향상 효과가 30%(0.3)일 경우 디젤의 수요 예상치이다.



<Figure 6> Diesel Demand Changes Due to Nano Technology

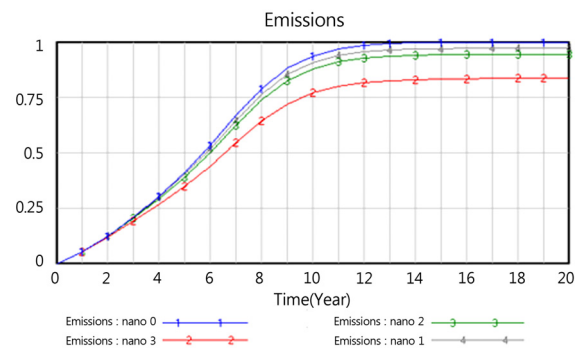
이러한 결과를 해석하면 인구증가로 인하여 디젤의 소모는 지속적으로 증가하나 셀레늄 나노입자를 포함한 디젤첨가제가 디젤의 소모를 억제하며 효과가 높으면 높을수록 디젤연료의 소모를 억제하는 효과가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 나노기술의 효과에 따라 디젤의 수요가 20년 후에는 나노기술을 사용하지 않았을 경우 대비 약 5%~20%의 디젤의 수요가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

이를 현실에 적용하면 다음과 같다. 대한석유공사에서 발표한 2013년도 수송 분야 디젤소비량은 약 178조 리터이며 이를 나노기술의 효과 중 최소치인 5%(0.05)인 경우와 연료효율 30%(0.3)개선의 상황을 적용하면 최소 5%에서 최대 20%의 디젤의 수요 억제할 수 있다고 볼 수 있다. 즉 디젤연료를 최소 약 8.9조 리터에서 최대 약 35.6조 리터를 덜 사용하게 할 수 있다고 볼 수 있다.

5.2 나노기술의 의한 효과에 따른 배기가스 배출량 변화

디젤의 수요증가로 배기가스 배출량 또한 지속적으로

증가하게 된다. 그래프 상 나노 0(1번) 그래프는 나노기술이 적용되지 않았을 시 디젤 수요에 따른 배기가스 배출량이 1로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 나노 1(4번)은 나노기술에 의해 연비향상 효과가 5%(0.05)일 경우 발생하는 배기가스 배출량이다. 기존 나노기술이 사용되지 않았을 경우와 비교하여 큰 차이는 없으나 약 0.95로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 나노 2(3번) 그래프의 경우 나노기술에 의해 연비향상 효과가 10%(0.1)일 경우 발생하는 배기가스 배출량이다. 이 경우 배기가스 배출량이 20년 후에는 약 0.9로 수렴하는 것을 볼 수 있다.



<Figure 7> Exhaust Gas Emissions Change Due to Nano Technology

또한 나노 3(2번)의 경우 나노기술에 의해 연비향상 효과가 30%(0.3)일 경우 배기가스 배출량이다.

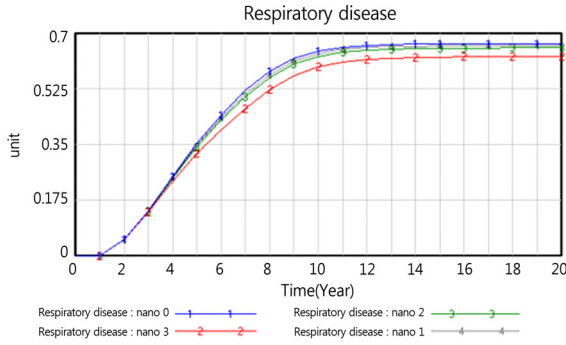
이러한 결과를 해석하면 디젤수요 증가에 의해 배기가스 배출량도 증가하고 있지만 셀레늄 나노입자를 포함한 디젤첨가제의 사용은 디젤수요를 억제시켜 배기가스 배출량도 감소시키는 것을 볼 수 있다. 즉 나노기술의 효과에 따라 나노기술을 사용함으로써 배기가스 배출량은 20년 후에는 나노기술을 사용하지 않았을 경우 대비 약 5%~20%의 배기가스 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

이를 현실에 적용하면 현재 수송 분야 배기가스 배출량은 약 4천 6백억 톤이며 이를 배기가스 배출량 감소의 최소치인 5%(0.05)인 경우와 배기가스 배출량 감소 20%(0.3)의 상황을 적용하면 최소 230억 톤에서 최대 920억 톤을 덜 배출할 수 있다고 볼 수 있다.

5.3 나노기술의 의한 효과에 따른 호흡기 질환 변화

디젤에서 발생하는 배기가스는 호흡기 질환에도 영향을 주게 된다. 그래프상 나노 0(1번) 그래프는 나노기술이 적용되지 않았을 시 배기가스에 의한 호흡기 질환은 0.675 수준으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 나노 1(4번)의 경우 나노기술의 효과가 5%(0.05)일 경우 약 0.670로 수렴하며 나노 2(3번)의 경우 나노기술의 효과가 10%(0.1)일 경

우 20년 후에 호흡기 질환은 0.650로 수렴한다, 나노 3(2번)의 경우 나노기술의 효과가 30%(0.3)일 경우 호흡기 질환은 0.6 수준으로 수렴한다.



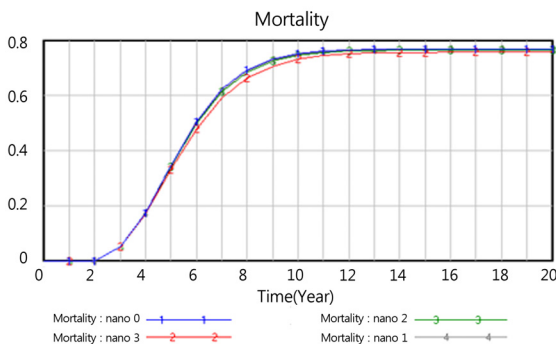
<Figure 8> Respiratory Disease Changes in Emissions Changes

이러한 그래프를 보면 나노기술에 의해 호흡기 질환의 변화는 민감하지 않으나 나노기술이 사용되지 않았을 경우에 비해 호흡기 질환은 최소 2%에서 최대 7.5% 정도 감소하는 효과를 볼 수 있다.

5.4 나노기술의 의한 효과에 따른 사망률 변화

호흡기질환의 발생은 특히 면역체계가 취약한 영아 및 노약자, 환자 등의 면역력 및 혈관 등에 영향을 미쳐 사망률에 영향을 미치게 된다. 그래프 상 나노 0(1번) 그래프는 나노기술이 적용되지 않았을 시 호흡기질환에 의한 사망률로 0.75수준으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 나노 1(4번)의 경우 나노기술의 효과가 5%(0.05)일 경우, 나노 2(3번)의 경우 나노기술의 효과가 10%(0.1)일 경우 20년 후에 호흡기 질환은 0.74~5로 기존 나노제품이 활용되지 않았을 때와 유사하게 나타나고 있다. 나노 3(2번)의 경우 나노기술의 효과가 30%(0.3)일 경우 사망률은 0.7수준으로 수렴한다.

이러한 그래프를 보면 나노기술에 의한 사망률 감소는 민감하지 않으며 나노기술이 사용되지 않았을 경우에 비해 사망률 최대 5% 정도 감소하는 효과를 볼 수 있다.



<Figure 9> Mortality Changes in Emissions Changes

6. 결론 및 정책적 함의

본 연구를 통해 나노기술중의 사례인 셀레늄 산화물 디젤 촉매제를 통해 사회에 미치는 영향을 시스템 다이내믹스 방법을 적용하여 살펴보았다. 시스템 다이내믹스는 컴퓨터를 이용하여 복잡한 다차원 계산을 동시에 행할 수 있다는 측면에서 장점을 갖는다.

본 연구에서 확인할 수 있는 몇 가지 중요한 연구결과는 다음과 같다. 첫째, 나노기술에 의한 디젤 소비 억제는 배기가스 배출량 및 호흡기질환, 사망률에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다. 둘째, 나노기술의 효과에 따라 디젤의 수요 및 배기가스 배출량이 억제되는 것을 확인 할 수 있었다. 디젤의 수요의 경우 2013년 수송 분야 디젤사용량을 기준으로 최소 약 8.9조 리터에서 최대 약 35.6조 리터를 절감할 수 있으며 배기가스 배출량은 최소 230억 톤에서 최대 920억 톤을 저감 할 수 있는 것으로 추정됐다. 셋째, 호흡기 질환 및 사망률은 나노기술에 의해 간접적으로 영향을 받긴 하지만 민감하지는 않은 것으로 나타났다.

이러한 연구를 토대로 이론적 기여 및 정책적 함의를 도출해 볼 수 있다. 먼저 이론적 기여는 정성적으로 이루어지던 사회영향평가를 계량적이나마 시스템 다이내믹스 방법론을 활용하여 실제 데이터(디젤소비량 및 배기가스 등)를 활용하여 정량적으로 영향을 살펴봄으로써 기존 정성적 평가에서 탈피를 시도하였다는 점을 들 수 있다.

두 번째로 나노기술에 의해 발생하는 1차적 영향 이외에 2차적으로 발생하는 파생효과를 연동시켜 광범위한 나노기술의 영향을 살펴보고자 하였다.

정책적 함의로는 첫째, 본 모형은 20년간 나노기술의 효과에 따른 관계를 정량적으로 살펴봄으로써 기존 기술영향 평가에서 전문가의 의견 및 설문 등 정성적으로 진행되었으나 시스템 다이내믹스를 활용하여 계량적 평가를 통해 보다 정책설정에 명확한 근거를 제시할 수 있게 되었다. 따라서 정확한 정책 제언 및 평가가 가능케 한다. 둘째, 호흡기 질환 및 사망률이 나노기술에 의해 직접적인 영향을 받고 있지는 않지만 나노기술의 효과, 즉 디젤연료소모 감소로 인하여 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 호흡기 질환 및 사망에 관련된 정책을 수립 시에 직접적 영향을 주는 요인이외에도 간접적 영향을 미치는 요인까지도 살펴봐야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

셋째, 몇 가지 주요 변수들에 대해서 개별적 처방을 내릴 것이 아니라 전체를 하나의 시스템(system)으로 생각하여 전체 변수에 대한 통합적 고려가 된 체계화된 처방이 제시될 필요가 있다. 이들은 각각 따로 해소될 문제가 아니라 다른 변수들과 총체적으로 고려될 필요가 있다는 점을 확인하였다.

그러나 본 연구에서는 디젤 수요에 영향을 미치는 OPEC의 증·감산 및 국제 유가, 환율 등 모든 요인을 반영하

지 못하였으며 디젤 수요 감소에 따른 배기가스 배출량, 호흡기 질환 감소, 사망률 이외 다양한 사회문제를 반영하지 않고 단순화 시킨 경향이 있다.

Acknowledgement

이 논문은 국가나노기술정책센터의 ‘나노기술 영향 평가 연구’를 기초로 하여 작성되었음.

References

- [1] A White Paper of Environments, Seoul Metropolitan Government, 2004, pp. 1-353.
- [2] An, S.B., Study on the Effects of Air Pollution on Human. Kwangwoon Graduate School of Environmental Studies, Thesis(MA), 2005.
- [3] Bae, S.H., Lim, J.S., Shin, K.M., Yoon, J.S., Kang, S.K., Lee, S.H., Kim, M.K., Lee, J.W., Kim, J.H., Shin, M.S., and Han, C.H., An Analysis for Economic Value of Nano-Technologies : Focused on Secondary Batteries. *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2015, Vol. 38, No. 1, pp. 131-142.
- [4] Bobak, M. and Leon, M., Air pollution and infant mortality in Czech Republic. *Lancet*, 1992.
- [5] Chauhan, A.J., Inskip, H.M., Linaker, C.L., Smith, S., Schreiber J., Johnston, S.L., and Holgate S.T., Personal exposure to nitrogen dioxide(N₂O) and the severity of virus-induced asthma in children. *Lancet*, 2003, Vol. 361, No. 9373, pp. 1939-1944.
- [6] Choi, J.S., An Introduction of Environmental Science : The way of Conservation. *Donghwa Technology*, ISBN. 8942541003, 1994.
- [7] Choi, J.S., Study on the model which the price of petroleum affects consumption of petroleum : focused on gasoline, diesel, Seoul National University, Thesis(MA), 2014.
- [8] Kim, D.H., A Simulation Method of Causal Maps : NUMBER. *Korean System Dynamics Review*, 2000, Vol. 1, No. 2, pp. 91-111.
- [9] Kim, H.Y. and Lee, S.W., A The study of the energy consumption of petroleum in Incheon-Around from 1995 to 2009, *Current review*, 2011.
- [10] Kim, K.C., Jeong, K.Y., and Kim., S.Y., System Dynamics using VENSIM. *Seoul Economic Management*, ISBN. 978-89-97937-23-3, 2007.
- [11] Kim, S.J., Analysis of primary factors influencing on oil sale consumption of vehicles : Focusing on seoul and six metropolitan cities, Hanyang University Graduate School of Urban and Real estate Studies Thesis(MA), 2010.
- [12] Kwon, O.S., An Economic Cost Estimation of Air Pollution at Gyeonggi Area and Plan for Optimum Level Achievement. Gyeonggi Research Institution, ISBN. 89-8178-213X, 2003.
- [13] Lee, J.M. and Kim, H.H., The volatility of oil prices and oil consumption and energy, environment, transportation taxes. *Fiscal Policy Review*, 2011, Vol. 13, No. 3.
- [14] Lee, J.T., A Review of Domestic Research on Air Pollution and its affecting Human Health. BLUE SKY workshop paper, Friends of the Earth Korea, 2004, pp. 1-40.
- [15] Lee, S.G., Effects of Transportation Tax on Gasoline Consumption. Doctorate thesis, Graduate School of Dankook University, 2003.
- [16] Lee, S.K., The Effects of Transportation Tax on Gasoline Consumption, Energy Economic Research, 2003.
- [17] Lee, Y.J., Atmospheric Contamination by Exhaust Gases from Automobiles. *National Defense and Technologies*, 2002, Vol. 181, pp. 4-5.
- [18] Oh, G.J., Air pollution theory, assimilation techniques, environmental education committee Compilation Committee.
- [19] Park, H.Y., A Study on the Financial Feasibility of Urban Development Projects Using System Dynamics Analysis Model. Doctorate thesis, Graduate School of Gachon University, 2014.
- [20] Peter Schwartz, The Art of the Long View, 1991, 1996.
- [21] Smith, K.R., Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children. Thorax, 2000.
- [22] Social costs of air pollution and estimate the appropriate level of Gyeonggi-do Province plans to achieve, Gyeonggi Research Institute, 2003.
- [23] Thien, A.T. and Daim, T., A taxonomic review of methods and tools applied in technology assessment, Technological Forecasting and Social Chang, 2008.
- [24] Wack, P., Scenarios : uncharted waters ahead. *Harvard Business Review*, 1985, Vol. 63, No. 5, pp. 73-89.

ORCID

- Seoung Hun Bae | <http://orcid.org/0000-0002-0819-4386>
 Kwang Min Shin | <http://orcid.org/0000-0001-5879-6003>
 Jung Sim Lim | <http://orcid.org/0000-0002-2737-6118>
 Jin Seon Yoon | <http://orcid.org/0000-0001-6781-1834>
 Sang Kyu Kang | <http://orcid.org/0000-0002-5155-0980>
 Jun Hyun Kim | <http://orcid.org/0000-0001-6184-7924>
 Min Kwan Kim | <http://orcid.org/0000-0001-8197-3311>
 Chang Hee Han | <http://orcid.org/0000-0003-2414-8125>