

시스템 원형을 활용한 시스템 다이내믹스 모형 구축: 대체연료차량 시장 모형의 예*

Building a Market Share Model of Alternative Fuel Vehicles: From Generic System Archetypes to System Dynamics Modeling*

권태형**

Kwon, Tae-Hyeong**

Abstract

This study investigates market barriers in increasing the market share of Alternative Fuel Vehicles (AFVs). In particular, this study first conceptualizes the AFVs market model with the aid of generic system archetypes suggested by Wolstenholme. Among four generic system archetypes suggested by Wolstenholme, the market structure of AFVs can be explained by the 'relative achievement' archetype. Starting from the generic system archetype, this study extends the model boundary step by step to take account of various model assumptions necessary to simulate the model numerically. If there is a significant network effect on vehicle operating costs, it is difficult to achieve the shift to AFVs even in the long term without a policy intervention because the car market is locked into the current structure. There are several possible policy options to break the 'locked-in' structure of the car market, such as subsidies on vehicles, subsidies on fuels, and a niche management policy..

Key words: 시스템 원형, 상대적 목표달성, 대체연료차량, 규모수익체증, 네트워크 효과
(Generic system archetype, Relative achievement, Locked-in,
Increasing return to scale, Network effect, Alternative Fuel Vehicles)

* 이 연구는 2008년도 한국외국어대학교 교내 학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임

** 한국외국어대학교 행정학과 조교수 (tkwon@hufs.ac.kr)

I. 서론

시스템 원형(genetic system archetypes)은 현실에서 반복적으로 발생하는 주요 시스템 문제의 기본적인 유형을 제시한 것이다. 시스템 원형은 시스템 문제의 진단을 용이하게 하고, 각각의 원형에 공통적인 처방을 제시함으로써 문제의 해결을 위해서도 유용하게 쓰인다. 가장 대표적으로 알려진 시스템 원형은 Senge(1990)에 의해서 제시된 것이다. Senge는 시스템에서 반복적으로 발생하는 대표적인 시스템 원형을 제시하고 각 시스템 원형의 구조와 패턴, 문제 해결방식을 제시하고 있다. 이후 Wolstenholme(2003, 2004)은 Senge의 시스템 원형 이론을 보다 일반화시킨 논의를 전개시켰는데, 본 연구는 Wolstenholme의 시스템 원형 이론에 기초하고 있다. 특히 본 연구는 시스템 원형의 논의를 시스템 다이내믹스 모형의 구축과정과 연계시키는 데에 주목적¹⁾이 있다. 물론 과거의 연구에서도 시스템 원형 논의를 포함한 정성적인 인과지도(causal loops)와 정량적인 시스템 다이내믹스 모형의 연계가 여러 측면에서 논의되었지만, 본 연구의 특징은 가장 기본적인 시스템 원형 논의로부터 정량적인 시스템 다이내믹스 모형을 단계적으로 발전시키는 것이다.

본 논문에서 모형 구축 과정은 대체연료차량 시장 모형을 사례로 하여 소개된다. 현재 고유가에 대한 대책으로서 또는 온실가스의 저감을 위한 방안으로서 하이브리드, 바이오에탄올, 수소전지 차량 등 다양한 형태의 대체연료차량의 도입이 시도되고 있다. 본 연구에서는 대체연료차량의 시장 확대에 어떤 장애가 있는지, 시장 확대를 위한 정책수단은 어떤 대안들이 있는지를 살펴보도록 한다. 단, 본 연구의 초점은 대체연료차량 시장 모형 자체의 자세한 설명에 있지는 않다.¹⁾ 본 연구의 주목적은 위에서 언급한대로 대체연료차량 시장 모형의 구축 방법론을 시스템 원형 논의를 통해서 설명하는 것이다. 이러한 모형 구축 방법론은 현실에서 상당한 일반화가 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 다음과 같은 구성으로 되어있다. 먼저 2장에서는 Wolstenholme이 제시한 시스템 원형 이론의 주요 내용을 검토한다. 기존 문헌 중 시스템 원형 이론으로 가장 많이 알려진 것은 Senge(1990)가 제시한 시스템 원형인데, Wolstenholme(2003, 2004)의 시스템 원형은 이를 보다 일반화한 것이라고 할 수 있다. 이어서 3장에서는 Wolstenholme의 시스템 원형 논의를 출발점으로 하여 대체연료차량 시장 모형을 구축하는 과정을 설명한다. 즉 정성적 모형인 시스템 원형으로부터 출발하여 정량적인 저장(stock)-유량(flow) 모형으로 발전시키는 과정을 단계적으로 설명한다. 이러한 단계적인 모형의 구축 방법은 주요 정책문제에 대한 시스템 다이내믹스 모형 구축의 일반적인 방법론의 하나로 제시된다. 4장에서는

1) 모형에 대한 보다 자세한 설명은 Kwon(2007)을 참조할 수 있다.

대체연료차량의 시장 확대를 위한 정책수단 변수를 모형에 도입한다. 정책모형의 출발점도 역시 Wolstenholme이 제시한 시스템 원형 이론에 기초하고 있다. 끝으로 5장에서는 시스템 다이내믹스 모형 구축의 방법론으로서 시스템 원형 활용의 의의를 최종적으로 설명하고, 또 모형 사례로 제시된 대체연료차량 시장분석의 주요 결과를 요약한다.

II. Wolstenholme의 시스템 원형 이론

시스템 다이내믹스 연구에서 시스템 문제의 일반적 유형을 구분하고자 하는 시도는 초창기 연구부터 지속되어 왔다. 여기에는 크게 저장(stock)-유량(flow) 모형에 기초한 시스템 원형 이론(예: Richmond & Peterson, 2000)과 인과지도(causal loops)에 기초하여 시스템의 일반적 유형을 구분하는 논의(예: Senge 1990)로 구분할 수 있다. 시스템 원형에 대한 논의 중 가장 널리 알려져 있는 것은 Senge(1990)가 제시한 시스템 원형 이론이다. Senge는 자기 강화적 또는 자기조절적 피드백이나 시간지체 현상이 결합되어 발생하는 많은 시스템 문제가 몇 가지 기본적인 유형으로 일반화할 수 있다고 보았다. Senge가 제시한 시스템 원형은 ‘성장의 한계 (limits to growth)’, ‘짐 떠넘기기(shifting the burden)’ 등으로 명명되어 그 이후 많은 사례에 응용되고 있다.²⁾ Senge는 시스템 원형에 관한 논의에서 각 유형별로 기본 피드백 구조, 시간에 따른 변화 패턴을 제시하고, 또한 각각의 문제 해결을 위한 전략도 동시에 제시하고 있다.

Wolstenholme의 시스템 원형 이론은 이러한 Senge의 시스템 원형 이론을 보다 일반화한 것이라고 할 수 있다. Wolstenholme(2003, 2004)도 시스템 원형을 시스템 구조의 동태적 특성, 특히 직관에 반하는 시스템 속성의 일반적 유형을 파악하기 위한 것으로 인식하여 Senge의 시스템 원형 이론과 동일한 문제인식에 기초하고 있다고 할 수 있다. 그런데 Wolstenholme의 시스템 원형 이론이 Senge의 시스템 원형 이론에 비하여 진전된 것은 그 일반화 논의에 있다. Senge의 시스템 원형 이론은 현실에서 자주 발생하는 주요 시스템 원형들의 특징을 제시한 것에 의의가 있지만, 그 유형들을 인과고리의 피드백 특성에 기초하여 일반화하는 논의로 진전시키지는 못하였다. Wolstenholme의 시스템 원형 이론의 의의는 시스템 유형들을 의도된 효과와 의도하지 않은 효과의 피드백 특성에 의하여 일반화한 이론을 정립한 것이다. 이러한 일반화에 기초하여 Senge가 제시한 시스템 유형들도 각각의 하위 유형으로 설명이 가능해진다(Wolstenholme, 2003).

2) Senge(1990)의 논의는 또한 Meadows(1982)가 제시한 시스템 원형 이론을 발전시킨 것이다(김동환, 2001).

이러한 시스템 원형 이론은 시스템 다이내믹스 모형 구축의 초기단계에서 문제의 개념적인 분석을 위해 활용될 수도 있으며, 또는 모형의 최종 결과를 효과적으로 전달하기 위한 수단으로서도 유용하게 활용될 수 있다. 무엇보다도 Wolstenholme은 동태적인 문제인식을 도와주기 위한 의사소통의 수단으로서의 활용을 강조한다(Wolstenholme, 2003). 즉 시스템 원형은 정량적 시뮬레이션 이전 단계의 개념적 모형으로서도 중요한 의의가 있지만 그 자체로 시스템적인 문제를 설명하기 위한 의사소통의 틀로서 중요한 역할을 갖는 것이다.

본 연구는 시스템 원형 이론이 의사소통의 틀로서 중요한 역할을 함에 동의하면서도 시스템 원형과 정량적 시뮬레이션 모형과의 관련성에 보다 주목하고자 한다. 즉 시스템 원형의 논의가 정량적 시뮬레이션 모형의 구축에서 어떻게 활용될 수 있는가 하는 것을 대체연료차량의 시장모형을 예로 들어 설명한다. 앞에서 언급한대로 모형 자체에 대한 상세한 논의는 별도의 논문에서 제시되어 있으므로 본 연구는 모형 구축 과정에서 시스템 원형의 활용과 관련된 방법론에 초점을 두도록 한다. 그러면, 모형 구축의 출발점이 되는 Wolstenholme의 시스템 원형 이론의 주요 내용을 좀 더 소개하도록 한다.

Wolstenholme(2003, 2004)에 따르면 모든 변화를 위한 행태는 두 가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫째는 자기강화 피드백 효과에 의해 시스템의 확장을 의도하는 것이고, 둘째는 자기조절 피드백 효과에 의해 시스템의 균형, 조절을 의도하는 것이다. 하지만 위의 의도한 효과 이외에 의도하지 않은 시스템의 작용에 의해 발생하는 기제들이 시스템 문제의 원인으로 작용한다. 이와 더불어 Wolstenholme은 시스템 내부의 경계(boundary)를 강조한다. 즉 의도하지 않은 효과를 포함하는 시스템의 총체적인 인식이 어려운 것은 각 조직별로 주어진 경계내에서 문제를 인식하기 때문이라는 것이다. 다만 이러한 시스템 경계라고 하는 것은 실질적으로 정보교류가 완전히 차단된 것일 수도 있고, 약간의 시간지체만 초래하는 경계 등 다양한 형태를 가질 수 있다. 마지막으로 Wolstenholme의 시스템 원형 이론에서 중요한 요소는 시간 지체(delay) 현상이다. 특히 어떤 행위에 의해 의도하지 효과의 작용에는 보통 시간 지체가 발생하기 때문에 이러한 것이 문제의 총체적인 파악에 어려움을 초래한다는 것이다.

위의 인식에 기초하여 Wolstenholme(2003, 2004)이 제시한 시스템 원형의 특징을 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 조직의 행위에 의해 발생하는 의도된 피드백 효과(intended consequence)가 작용한다. 둘째, 조직의 다른 부문 또는 외부에서 의도된 피드백 효과에 대한 반작용으로 의도하지 않은 효과(unintended consequence)가 발생하는 것이 시스템 문제의 고유성격이라고 할 수 있다. 셋째, 의도하지 않은 피드백 효과가 작용하는 데에는 보통 시간지체가 발생한다. 넷째, 조직의 경계 때문에 보통 최초의 행위자는 의도하지 않은 효과의 발생을 인지하기 어렵다. 다섯째, 모든 시스템 유형에 대해 문제를 해결하기 위한 시스템

원형이 존재한다.

여기서 의도된 피드백 효과(ic)와 의도하지 않은 피드백 효과(uc)는 앞에서 언급했듯이 자기강화 피드백일 수도 있고 자기조절 피드백일 수도 있는데, 각각이 어떠한 피드백 성격을 갖느냐에 따라서 시스템 원형은 크게 네 가지 유형으로 구분된다. 첫째, 과소달성(underachievement) 유형은 자기강화 피드백의 ic와 자기조절 피드백의 uc로 구성되어 있다. 의도된 효과의 실현이 의도하지 않은 효과에 의해 저지되는 구조를 나타낸다. 둘째, 조절실패(out of control) 유형은 자기조절 피드백의 ic와 자기강화 피드백의 uc로 구성된다. 조절을 위한 행위가 의도하지 않은 효과에 의해 실패하는 유형을 나타낸다. 셋째, 상대적 목표달성(relative achievement) 유형은 자기강화 피드백의 ic와 역시 자기강화 피드백의 uc로 구성된다. 여기서는 의도된 목표달성이 다른 목표달성의 희생을 통해서만 가능한 상황이다. 넷째, 상대적 조절(relative control) 유형은 자기조절 피드백의 ic와 역시 자기조절 피드백의 uc로 구성된다. 의도된 조절이 상대방의 균형을 무너뜨려서 상대방의 조절 행위를 초래하는 상황을 나타낸다.³⁾

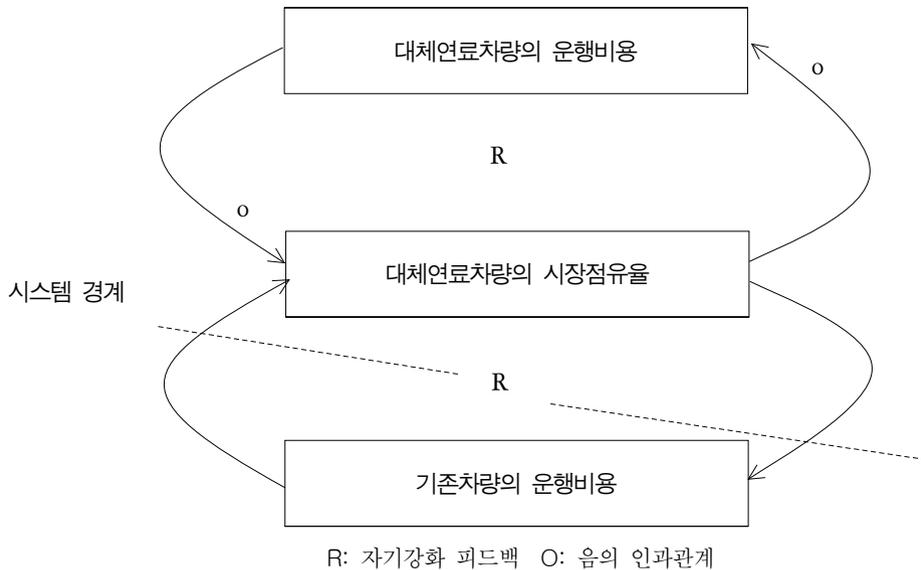
Ⅲ. 시스템 원형 이론을 활용한 대체연료차량 시장 모형 구축

1. 대체연료차량 시장구조의 시스템 원형

대체연료차량의 시장진입 문제는 단순히 생산비용이나 소비자 선호 문제 이외의 시스템적인 문제가 있는 것으로 파악된다. 이는 연료 공급의 편이성 등 차량운행 비용이 차량공급 규모와 자기강화적 피드백 현상을 나타내기 때문이라고 할 수 있다. 즉 이미 기존 가솔린이나 경유 차량이 차량 스톡의 대부분을 차지하고 있는 상황에서 다른 유형의 차량을 운행할 경우 연료공급이나 부품교체 등의 유지관리 측면에서 비효율성을 초래할 수 있다는 것이다. 이러한 시스템 문제는 Wolstenholme이 제시한 네 가지 시스템 원형 중에서 ‘상대적 목표달성(relative achievement)’ 유형의 문제에 해당한다. 즉 [그림1]에서 나타냈듯이, 각 유형의 차량 운행비용과 시장점유율 사이에는 자기강화적 피드백이 작용하고 있다. 자기강화적 피드백 효과는 차량 운행비용이 동종 차종의 규모 확대에 따른 네트워크 효과 또는 규모수익체증에 기인한다고 할 수 있다. 여기서 차량 운행비용의 규모수익체증이 발생하는

3) 김창욱 외(2008)는 Wolstenholme의 시스템 원형 유형을 ‘제어 실패형’, ‘원상 회귀형’, ‘불균형 심화형’, ‘성장 한계형’으로 각각 명명하고 있다. 상당히 일리 있는 구분이라고 할 수 있지만, 본 연구에서는 Wolstenholme의 제시한 명칭을 가능하면 그대로 직역하도록 한다.

원인들은 다음과 같이 설명할 수 있다. 첫째, 연료공급 비용의 경우 차량 규모가 클수록 단위당 공급 비용이 일반적으로 저하될 것으로 기대된다. 예를 들면 새로운 연료공급 인프라를 필요로 하는 대체연료차량의 경우 소수 차량에만 연료공급을 한다면 그 단위비용이 클 수 밖에 없을 것이다. 둘째, 차량의 유지관리 비용도 차량보유가 증가함에 따라 단위당 비용이 저감될 수 있을 것으로 기대된다. 차량유지를 위한 부품공급도 대량공급시 단위비용이 저감될 수 있을 뿐만 아니라, 차량관리 서비스 비용도 소위 ‘learning by doing’ 효과에 의해 차량공급이 증가함에 따라서 낮아질 것으로 기대된다.



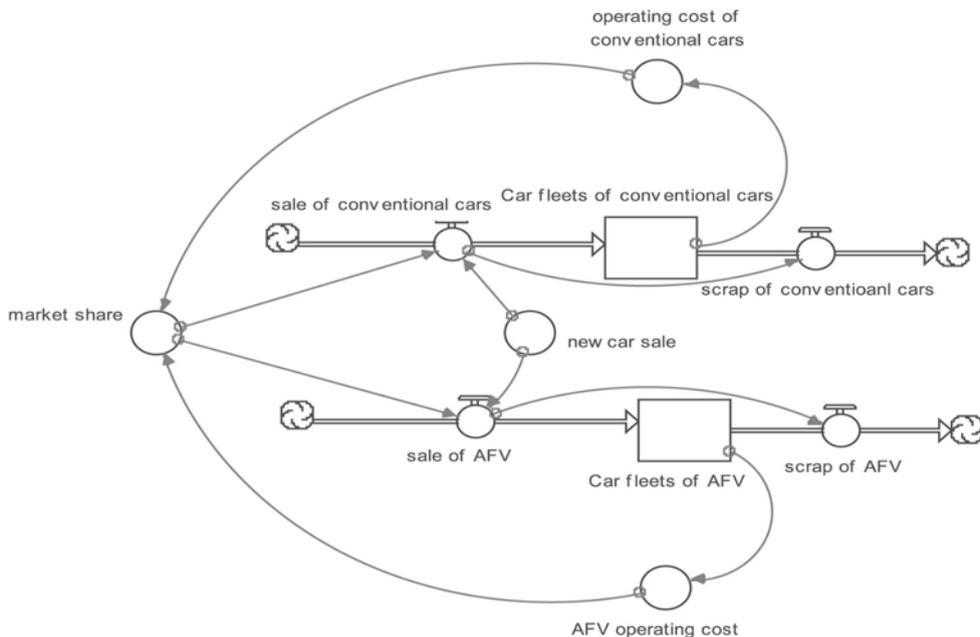
[그림 1] 상대적 목표달성 유형으로 나타낸 대체연료차량 시장구조의 문제

2. 시스템 원형으로부터 시스템 다이내믹스 모형의 구축

본 연구에서 대체연료차량 시장의 시스템 다이내믹스 모형 구축은 앞에서 소개된 시스템 원형을 출발점으로 하여 단계적으로 모형을 확대 발전시키는 방법을 따른다. 즉 시스템 원형을 저장(stock) - 유량(flow) 모형으로 전환시킨 후 정량적인 시뮬레이션을 위해 필요한 추가적인 변수와 조건들을 차례로 모형에 도입하는 것이다. 물론 모형 구축 과정은 사례에 따라서 다양한 방법과 순서로 전개될 수 있다. 예를 들면 시스템 원형에 추가적인 변수와 다양한 인과관계를 포함하는 보다 확대된 인과지도(causal loops) 모형 작성을 우선할 수도 있고, 또는 시스템 원형의 논의와 별개로 저장 - 유량 모형을 직접 구축하는 접근 방법도

있다. 본 연구에서는 시스템 원형에 기초하여 최소한의 변수를 포함하는 저장 - 유량 모형을 작성한 후, 정량적인 분석을 위해 필요로 하는 최소한의 조건들을 찾아서 추가적으로 모형에 포함하는 방식으로 시스템 다이내믹스 모형을 확대 발전시키는 방법론을 소개한다.

먼저 [그림2]는 앞에서 논의된 시스템 원형을 발생시킬 수 있는 최소한의 저장 및 유량 변수만을 모형에 포함하고 있다.⁴⁾ 모형에서는 차종별 차량 운행비용과 차량 규모 사이에 자기강화 피드백이 작용하고 있다. 인과지도를 저장 - 유량 모형으로 전환하는 과정에서 저장 변수와 유량 변수를 구분해야 하는데, 특히 저장변수는 시스템의 동태적 특성과 밀접한 관련을 갖는다. 본 모형에서는 차종별 차량 스톡규모를 저장변수로 설정하고 있다. 즉 시장 점유율과 비용과의 인과관계를 나타낸 시스템 원형에 차종별 차량 스톡규모라는 새로운 변수가 추가된 것이다. 이는 차량 운행비용에 영향을 미치는 것은 시장점유율 자체라기보다는 시장점유율이 누적적인 영향을 미치는 차량 스톡규모이기 때문이다. 또한 차량 운행비용은 시장점유율에 영향을 줌으로써 차량 스톡규모에 다시 영향을 주는 자기 강화적 피드백을 형성한다. 이는 이미 시스템 원형에 관한 논의에서 확인된 효과라고 할 수 있다.

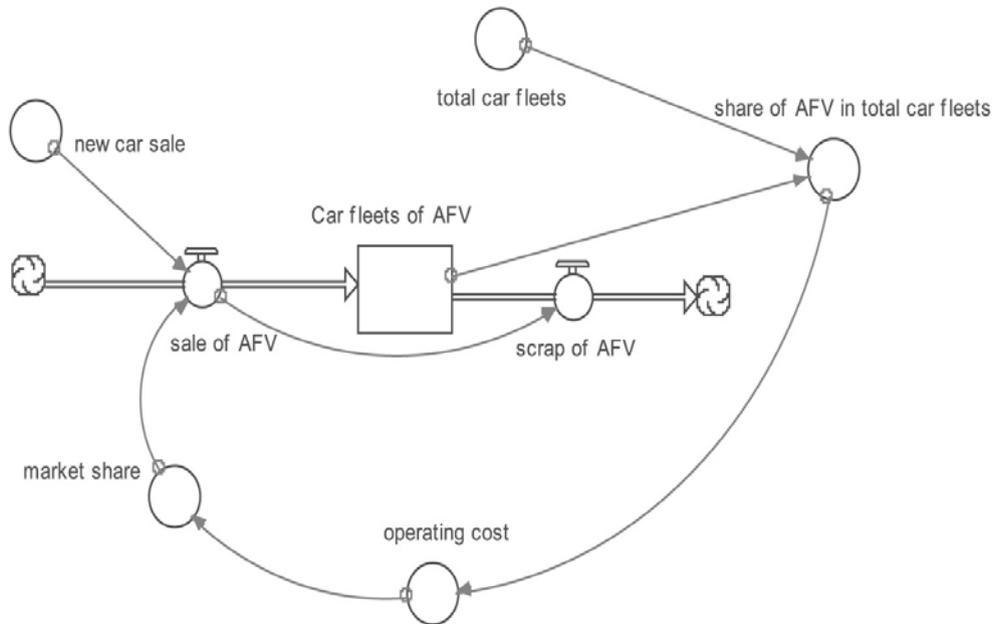


[그림 2] 대체연료차량 시장구조 시스템 원형을 전환한 저장 - 유량 모형

4) 그림에서 AFV는 대체연료차량(Alternative Fuel Vehicles)을 나타낸다.

시스템 원형을 직접 전환한 저장 유량 모형인 [그림2]에서는 저장 변수로서 기존 차량과 대체연료차량의 차량 스톡규모를 포함하고 있다. 하지만 한 가지 차종의 시장점유율이 정해진다면 다른 차종의 시장점유율도 정해지기 때문에 모형에는 한 차종의 시장점유율만을 포함하는 것으로 충분하다. [그림3]은 [그림2]에서 대체연료차량만을 포함한 모형이다. [그림2]보다 간결한 구성이기 때문에 이후의 모형 구축을 용이하게 해준다. 단, 이때 비용함수 등의 변수들은 기존차량 대비 상대가격으로 나타내주어야 한다.

한편 [그림3]의 모형을 정량적으로 시뮬레이션하기 위해서는 변수들 간의 관계를 수리적으로 나타내는 많은 추가적인 가정이 필요하다. 먼저 [그림3]에서는 차종별 스톡규모가 운행비용에 영향을 준다고 가정했으므로 차종별 스톡규모와 운행비용간의 함수식을 결정해 주어야 한다. 차종별 스톡규모가 증가할수록 규모의 경제, 네트워크 효과 등에 의해서 차량 운행의 상대비용이 감소한다는 것이 본 모형의 주요한 전제이므로 이러한 관계를 적합한 함수식으로 나타내주어야 한다. 특히 네트워크 효과의 크기에는 많은 불확실성이 있으므로 그 효과의 정도를 계수로 나타낼 수 있는 함수식을 도입하는 것이 유용할 것이다. 이는 나중에 살펴보듯이 민감도 분석에 활용될 수 있다.



[그림 3] 기존차량 변수를 생략한 대체연료차량 시장 모형

[그림3]에서 또 다른 주요 가정은 차량의 운행비용이 신차의 시장점유율에 영향을 준다는 것이다. 차종별 운행의 상대비용이 증가할수록 시장점유율은 감소하되 시장점유율에는 상한과 하한이 존재하므로, 시장점유율과 운행비용과의 정량적 관계는 로지스틱 함수 등을 이용하여 정량화 할 수 있다.

이밖에 모형의 현실적합성을 향상시키기 위해 많은 추가적인 가정을 모형에 포함할 수 있는데, 예를 들면 본 모형에서는 차종별 가격 격차가 초기년도에 존재하지만 대체연료 차량의 기술개발로 점차로 그 격차가 감소함을 가정하였다. [표1]은 본 모형의 주요 가정을 수식으로 나타내고 있다.⁵⁾ [그림4]는 이러한 추가적인 가정들이 포함된 대체연료차량의 시장 모형을 나타낸다.

[표 1] 대체연료차량 시장 모형의 주요 가정

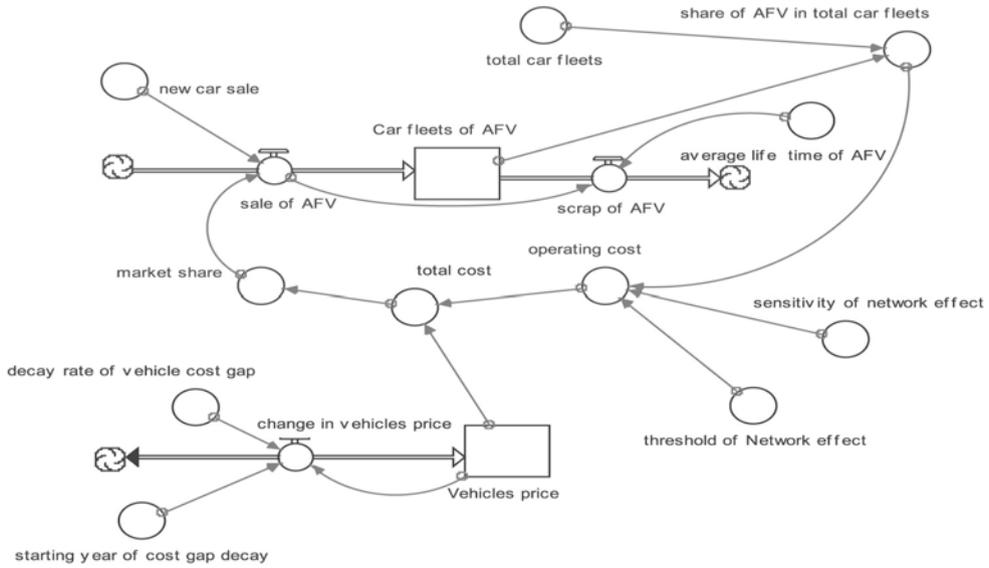
시장점유율(m)과 차량 비용(c)의 관계	$m(c) = \frac{1}{1 + \exp[-10 + 10c]}$
차량 운행비용(oc)과 차량스톡 비중(s)의 관계: 네트워크 효과	$oc = \exp \left[se \times \left(\frac{1-s}{0.5} - 1 \right) \right]$
차종별 차량가격	- 초기연도에 대체연료차량이 2배 높음 - 매년 10%씩 격차축소
차량의 총비용	$2/3(\text{차량가격}) + 1/3(\text{운행비용})$

3. 네트워크 효과에 따른 대체연료차량 시장점유율의 비교

[그림5]는 대체연료차량 시장모형의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 각각의 그래프는 네트워크 효과를 나타내는 민감도를 0.01, 0.34, 0.67, 1로 점차 증가시켰을 경우의 대체연료차량의 시장점유율 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 네트워크 효과의 민감도를 나타내는 계수 se값을 크게 할수록 대체연료차량의 시장점유율 증가가 미미함을 알 수 있다. 특히 네트워크 효과가 클 경우에는 차량가격 격차의 지속적인 감소에도 시장점유율 증대가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

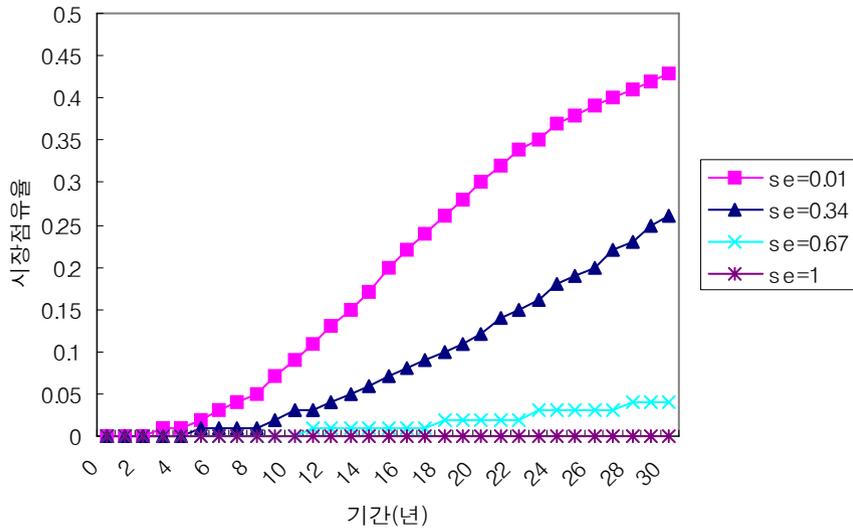
현실에서 대체연료차량 중 네트워크 효과가 비교적 작게 나타나는 경우는 하이브리드 차량이 대표적인 예라고 할 수 있다. 전기모터와 기존의 내연엔진을 동시에 사용하는 하이브리드 차량은 연료공급을 위해 기존 차량과 별도의 인프라의 구축이 필요하지 않으므로 차량의 운행비용이 차량의 스톡규모에 크게 영향을 받지 않을 것으로 판단된다. 반면에 수소전지 차량의 경우는 통상적으로 기존 차량의 연료공급방식과 상당히 다른 연료공급 인프라

5) 모형의 주요 가정에 대한 보다 자세한 설명은 Kwon(2007)을 참조할 수 있다.



[그림 4] 추가적인 가정을 포함한 대체연료차량 시장 모형

라의 구축을 요구하므로 차량의 운행비용이 차량 스톡규모에 크게 영향을 받을 수 있다. 이후의 논의는 대체연료차량 중에서 비교적 네트워크 효과가 큰 경우의 예를 기준으로 논의를 전개한다.

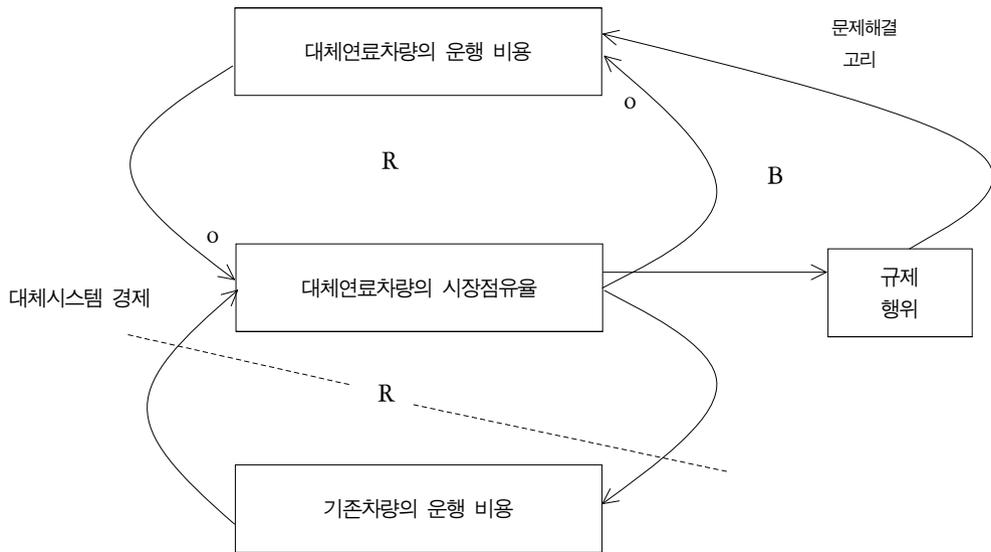


[그림 5] 네트워크 효과의 크기에 따른 대체연료차량 시장점유율의 변화

IV. 대체연료차량 시장 모형의 정책 시뮬레이션

1. Wolstenholme의 문제해결 시스템 원형

3장에서 차량의 스톡규모에 따른 네트워크 효과 또는 규모수익체증 현상이 크게 작용할 경우 차량가격 격차의 축소에도 불구하고 대체연료차량의 시장점유율의 증가가 어렵다는 것을 시뮬레이션 결과를 통해서 확인할 수 있었다. 본 장에서는 이렇게 시장의 고착(locked-in) 현상이 발생하였을 때, 대체연료차량의 시장점유율을 높이기 위해서 어떤 정책이 효과적인가를 분석한다.



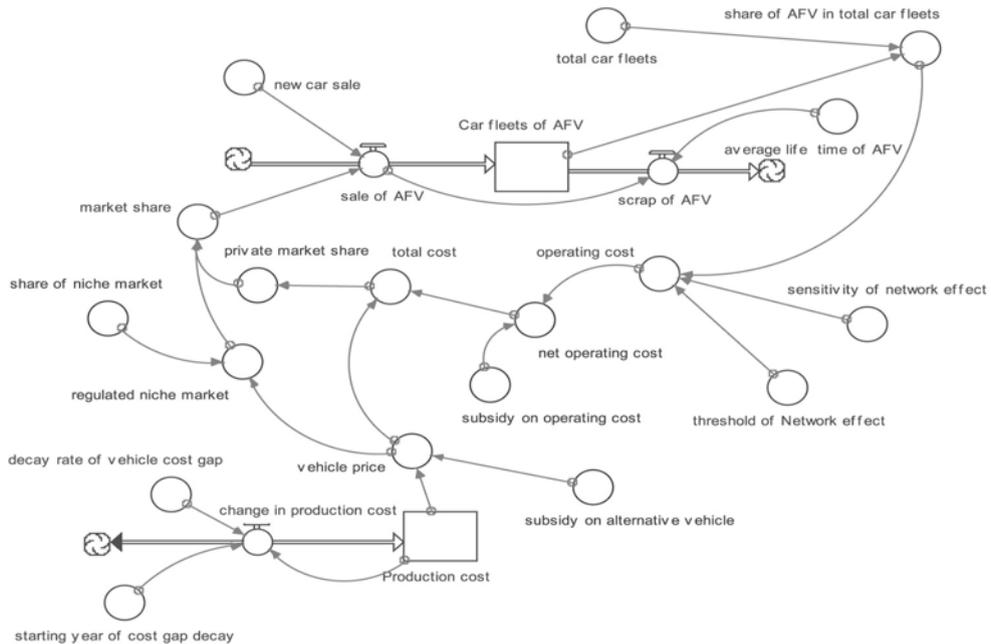
R: 자기강화 피드백 B: 자기조절 피드백 O: 음의 인과관계

[그림 5] 대체연료차량 시장의 문제해결 시스템 원형

Wolstenholme의 시스템 원형 이론은 시스템 문제의 유형을 의도한 효과와 의도하지 않은 효과가 어떤 피드백 특징을 갖는가에 따라서 4가지 유형으로 구분했을 뿐만 아니라 각각의 기본 유형에 대해서 문제해결 방식을 제시하고 있다. 대체연료차량 시장구조처럼 ‘상대적 목표달성’을 기본 원형으로 하는 시스템의 경우, 해결 방식은 새로운 균형에 이를 수 있도록 외부의 규제에 의해 새로운 자기조절 피드백 루프(feedback loops)를 삽입하는 것이

다. [그림6]은 대체연료차량 시장 모형에 이러한 문제 해결방식을 적용한 시스템 원형을 나타낸다. 즉 대체연료차량의 시장 확대를 위한 문제 해결방식은 네트워크 효과의 작용을 완화할 수 있는 정책수단을 시스템에 도입하는 것이다. 가능한 정책대안으로는 보조금 정책과 틈새시장 정책 등이 있다. 보조금 정책은 대체연료차량 구입이나 대체연료 구입에 보조금을 지급하는 것이며, 틈새시장 정책은 공공부문이나 택시 등 대중교통 부문 등에 한해 대체연료 차량의 구입을 의무화하는 방식으로 초기의 시장점유율을 높이는 정책이다.

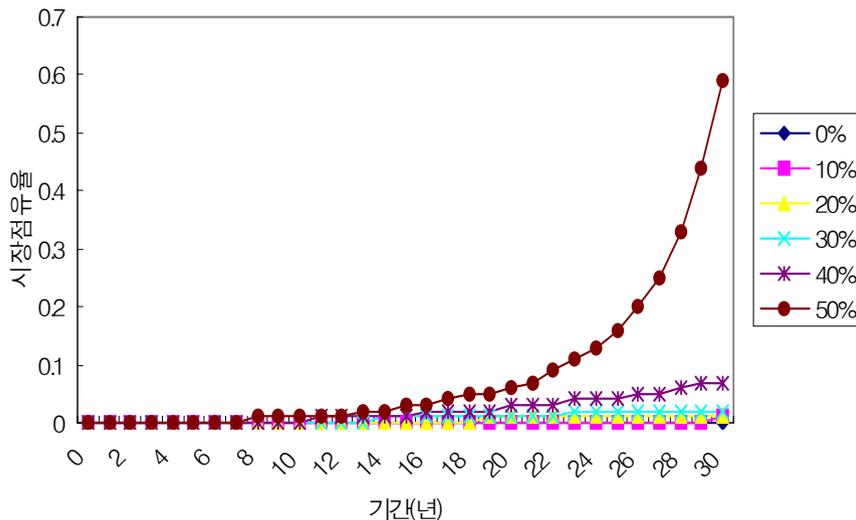
[그림7]은 [그림4]에서 제시한 대체연료차량 시장 모형에 정책변수를 새로이 포함한 시스템 다이내믹스 모형이다. 앞에서 언급된 차량보조금, 연료보조금, 틈새시장 관리정책이 주요 정책변수로서 모형에 추가되었다. 앞의 시스템 원형에서는 정책변수들이 자기조절 피드백의 일환으로서 모형에 포함되었지만, 여기서는 정책변수들이 외생변수로서 추가되었다. 이는 다양한 정책변수의 외생적인 변화에 따라서 결과가 어떻게 달라지는가 하는 것을 분석하기 위함이다.



[그림 7] 정책변수를 포함한 대체연료차량 시장 모형

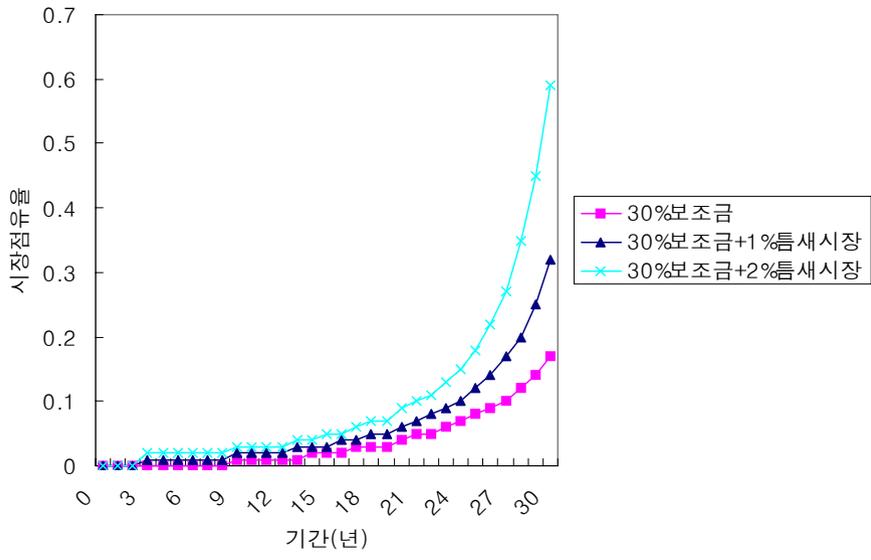
2. 대체연료차량 시장점유율 증대를 위한 정책 시뮬레이션

[그림 8]은 대체연료차량 구입에 대해 정부가 보조금을 지급할 때의 시장점유율의 변화를 나타낸다. 각각의 그래프는 대체연료차량 구입에 대해 기존 차량가격의 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%에 상당하는 보조금을 지급할 때 시장점유율의 변화를 나타낸다. 본 연구의 가정 하에서는 50% 상당의 보조금을 지급할 경우에 한해 대체연료차량의 시장점유율이 시뮬레이션 기간 동안 크게 증가하는 것으로 나타난다. 즉 보조금 정책이 ‘상대적 목적달성’의 원형에서 나타나는 시장구조의 고착(locked-in) 현상을 해소하는 효과가 있는 것으로 나타나지만, 상당한 정도의 보조금 지급이 필요한 것으로 분석되었다. 물론 현실에서 얼마 정도의 보조금이 유효할 것인가 하는 것은 네트워크 효과의 크기, 차량 가격의 차이 등 본 연구에서 가설적으로 정해진 변수 값들이 실제로 어떻게 나타나는가에 따라서 결정될 것이다. 한편 보조금이 차량 구입이 아니라 연료 구입에 지급될 경우에도 유사한 결과를 보인다. 앞에서 강조했듯이 본 연구는 차종별 생산비용의 변화 등 여러 가지 미래의 불확실한 변화에 대해 가설적인 가정을 하고 있으므로 시뮬레이션 결과의 구체적인 수치 값에 대해 과도한 의미를 부여하기 보다는 전체적인 패턴의 변화를 파악하는 것이 중요하다고 할 수 있다.



[그림 8] 보조금 정책에 따른 대체연료차량 시장점유율의 변화

[그림9]는 보조금 정책이외에 틈새시장 관리정책을 도입하였을 경우의 대체연료차량 시장점유율의 변화를 나타낸다. 여기에서는 틈새시장의 관리정책 없이 30%의 차량보조금 및 30%의 연료보조금을 지급할 경우와, 보조금 정책에 추가적으로 각각 1%, 2%의 틈새시장 관리정책을 도입할 경우의 시장점유율 추이를 나타내고 있다. 1% 틈새시장 관리정책의 의미는 공공부문이나 택시 등 전체 신차시장의 1%에 달하는 특정 틈새시장에 대해서 대체연료 차량구입을 의무화하는 정책수단을 의미한다. 시뮬레이션에서는 대체연료 차량 가격과 기존 차량가격의 차이가 50% 이내로 축소되는 시점에 틈새시장 관리정책을 도입하는 것으로 가정하였다. 분석결과에 의하면 틈새시장 관리정책의 시행은 보조금정책의 효과를 크게 배가시키는 것으로 나타난다.



[그림 9] 보조금과 틈새시장 정책에 따른 대체연료차량 시장점유율의 변화

V. 결론

본 연구에서는 대체연료차량의 시장구조에 관한 시스템 다이내믹스 모형의 전반적인 구축 과정을 설명하였다. 특히 본 연구에서 모형의 구축은 Wolstenholme(2003, 2004)의 시스템 원형 이론을 활용하였다. Wolstenholme은 4개의 시스템 원형을 제시하고 있는데, 그중 대체연료차량의 시장 확대 문제는 ‘상대적 목표달성’ 원형에 의해 설명할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 시스템 원형에서부터 출발하여 시스템 다이내믹스 모형을 단계적으로 구축하였다. 먼저 시스템 원형과 직접 관련된 최소한의 변수들만을 저장변수와 유량변수로 구분하여 시스템 다이내믹스 모형으로 전환시켰다. 다음 단계에서는 정량적 시물레이션을 위해 필요한 추가적인 변수들과 함수들을 찾아서 모형에 포함하였다. 이러한 과정을 통해 정량적인 시물레이션이 가능한 시스템 다이내믹스 모형을 구축하고 대체연료 차량의 시장점유율이 여러 가지 가설적 상황에서 어떻게 변화하는가를 분석하였다.

위의 방법론으로 구축된 대체연료차량의 시장모형 분석 결과에 따르면, 차량 운행비용의 결정에 네트워크 효과가 크게 작용할 경우, 기술개발에 의해 대체연료차량과 기존 차량간의 차량 구입비용의 격차가 향후 크게 줄어들더라도 대체연료차량의 시장 확대는 어려울 것으로 전망된다. 네트워크 효과가 큰 대체연료 차량으로는 별도의 연료공급 인프라가 필요한 수소전기차량 등을 예로 들 수 있다.

본 연구에서는 대체연료차량의 시장 확대를 위한 정책수단도 역시 Wolstenholme(2003, 2004)의 시스템 원형 이론에 근거하여 제시하였다. Wolstenholme의 시스템 원형 이론에 따르면, ‘상대적 목표달성’ 원형의 문제해결 방식은 새로운 균형에 이를 수 있도록 외부의 규제에 의해 새로운 자기조절 피드백 루프를 삽입하는 것이다. 대체연료차량의 시장구조 문제에 적용하면, 대체연료차량의 시장 확대를 위해서는 네트워크 효과의 작용을 완화할 수 있는 정책수단의 시행이 필요하다고 할 수 있다. 가능한 정책대안으로서는 보조금 정책과 틈새시장 정책 등이 있다. 보조금정책은 대체연료차량 구입이나 대체연료 구입에 보조금을 지급하는 것이며, 틈새시장 정책은 공공부문이나 택시 등 일부 틈새시장에 대해서 대체연료차량의 구입을 의무화하는 방식으로 초기의 시장점유율을 높이는 정책이다. 본 연구의 시물레이션 결과에 의하면, 이러한 정책수단을 도입하였을 경우 분명히 대체연료차량의 시장 확대에 효과적인 것으로 나타났다. 단, 정책강도가 현재 시장구조의 고착(locked-in) 효과를 깨뜨릴 수 있을 만큼 커야하며, 특히 보조금 정책과 틈새시장 정책이 모두 시행될 때 정책 효과가 크게 나타났다.

【참고문헌】

- 김도훈 · 문태훈 · 김동환. (1999). 『시스템 다이나믹스』. 서울: 대영문화사.
- 김동환. (2004). 『시스템 사고』. 서울: 선학사.
- 김동환. (2001). 정책평론과 시스템 다이나믹스. 『한국 시스템다이나믹스 연구』, 제2권 2호: 5-23.
- 김창욱 · 김선빈 · 김동환 · 안남성 · 최남희. (2008). 『시스템사고에 입각한 정책설계방안』. 서울: 삼성경제연구소 연구보고서.
- Arthur, W.B. (1994). Increasing Returns and Path Dependence in the Economy. Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- Farrell, A.E., Keith, D.W. and Corbett, J.J. (2003). A strategy for introducing hydrogen into transportation. Energy Policy 31: 1357-1367.
- Ford, A. (1999). Modeling the Environment: An introduction to system dynamics modeling of environmental system. Washington D.C.: Island Press.
- Grubler, A., Nakicenovic, N. and Victor, D.G. (1999). Dynamics of energy technologies and global change: implications for projections of future carbon dioxide concentration. Energy Policy 27: 247-280.
- Hoogma, R., Kemp, R., Schot, J. and Truffer, B. (2002). Experimenting for Sustainable Transport. London: Spon Press.
- Kaldor, N. (1972). The irrelevance of equilibrium economics. The Economic Journal, 82: 1237-1255.
- Kemp, R., Schot, J., and Hoogma, R. (1998). Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: The approach of strategic niche management. Technology Analysis and Strategic Management 10: 175-196.
- Kwon, T. (2007). A system dynamics model of Alternative Fuel Vehicles Market under Network Effect. Korean System Dynamics Review, Vol.8 No.2, pp.5-23.
- Kwon, T. (2004). Driving forces of the changes in CO2 emissions from car travel: Great Britain 1970-2030. Unpublished D.Phil. Thesis. Oxford, the UK: University of Oxford.
- Lane, D.C. & Smart, C. (1996). Reinterpreting ‘generic structure’: evolution, application and limitations of concept. System Dynamics Review Vol. 12. No. 2: 87-120.

- Meadows, D.H. (1982). Whole Earth Models and Systems. *Coevolution Quarterly Summer*: 98-108.
- Richmond, B. & Peterson, S. (2000). *An Introduction to System Thinking*. Hanover: High Performance Systems.
- Senge, P.M. (1990). *The Fifth Discipline: The Art & Practice of the Learning Organization*. New York: Currency.
- Senge, P.M., Kleiner, A., Roberts, C., Ross, R.B. and Smith, B. (1994). *The Fifth Discipline Fieldbook*. New York: Currency.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- Unruh, G.C. (2000). Understanding carbon lock-in. *Energy Policy* 28: 817-830.
- Winebrake, J.J. (1997). The AFV credit program and its role in future AFV market development. *Transportation Research part D* 2: 125-132.
- Wolstenholme, E.F. (2004). Using generic system archetypes to support thinking and modelling. *System Dynamics Review* Vol. 20. No. 4: 341-356.
- Wolstenholme E.F. (2003). Towards the definition and use of a core set of archetypal structures in system dynamics. *System Dynamics Review* Vol.19. No.1: 7-26.