

탄소배출비용을 고려한 물류의 최적 운송수단 의사결정 시스템 설계

송 병 준[†] · 구 제 권^{**} · 송 상 화^{***} · 이 종 연^{****}

요 약

본 논문은 운송비용과 탄소배출비용을 고려한 최적 운송수단 선정에 대한 물류의사결정 시스템을 설계하고자 한다. 기존 연구는 운송비용과 운송모드별 용량을 고려하여 최적의 운송수단을 선정하였으나, 온실가스 배출규제에 대응하기 위해 운송비용과 용량 뿐만 아니라 탄소배출비용을 통합적으로 고려하여 물류체계를 설계할 필요성이 높아지고 있다. 따라서 본 논문에서는 탄소배출을 고려한 우리나라의 복합운송에 대한 운송수단 선택과 비용과 CO₂배출의 Trade-off관계에 대한 집점을 찾아 분석하고 향후 나아갈 방향에 대해 제시하고자 한다. 탄소배출비용을 고려한 최적 운송수단 의사결정 문제는 혼합정수계획 모형으로 모델링되었으며, 운송비용과 탄소배출비용 사이의 관계를 분석하기 위하여 서울-부산 간 컨테이너 운송에 있어서의 다양한 시나리오를 도출하였다. 각각의 시나리오는 개발된 의사결정 시스템을 통하여 분석되었으며, 분석결과 단위 이동 거리당 탄소배출량이 낮은 것으로 알려져 있는 해상운송과 같은 대량운송 수단이 경우에 따라 더 많은 탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 귀랑운송 수단의 경우 항만이나 철도역까지의 트럭운송에서의 우회가 증가된 탄소 배출의 주요 원인이었다. 제안된 물류의사결정 시스템은 녹색물류 및 그린SCM에서의 탄소배출비용과 물류비용사이의 관계를 이해하는데 역할을 할 것으로 기대된다.

키워드 : 탄소배출비용, 녹색물류, 물류 의사결정, 운송모드선택, 의사결정시스템

Design of a Logistics Decision Support System for Transportation Mode Selection considering Carbon Emission Cost

Byung Jun Song[†] · Je Kwon Koo^{**} · Sang Hwa Song^{***} · Jong Yun Lee^{****}

ABSTRACT

This paper considers logistics decision support system which deals with transportation mode selection considering transportation and carbon emission cost. Transportation and carbon emission costs vary with the choice of transportation modes and to become competitive companies need to find proper transportation modes for their logistics services. However, due to the restricted capacity of transportation modes, it is difficult to balance transportation and carbon emission costs when designing logistics network including transportation mode choice for each service. Therefore this paper aims to analyze the trade-off relationship between transportation and carbon emission cost in mode selection of intermodal transportation and to provide optimal green logistics strategy. In this paper, the logistics decision support system is designed based on mixed integer programming model. To understand the trade-off relationship of transportation and carbon emission cost, the system is tested with various scenarios including transportation of containers between Seoul and Busan. The analysis results show that, even though sea transportation combined with trucking is competitive in carbon emission per unit distance travelled, the total cost of carbon emission and transportation for the sea transportation may not have competitive advantage over other transportation modes including rail and truck transportation modes. The sea-based intermodal logistics service may induce detours which have negative impacts on the overall carbon emission. The proposed logistics decision support system is expected to play key role in green logistics and supply chain management.

Keywords : Carbon Emission Cost, Green Logistics, Logistics Decision, Transportation Mode Selection, Decision Support System

† 정 회 원 : KNET 물류사업개발팀장(제1차자)
 ** 정 회 원 : 개우 로지스틱스
 *** 정 회 원 : 인천대 동북아물류대학원 교수
 **** 증신회원 : 충북대학교 컴퓨터교육과 교수(교신저자)

논문접수: 2011년 9월 8일
 수정일: 1차 2011년 10월 6일
 심사완료: 2011년 10월 7일

1. 서론

온실가스로 인한 지구온난화 문제가 심각한 환경문제로 대두되면서 녹색성장이 최근 화두가 되고 있다. 또한 각국의 환경에 대한 관심이 높아지면서 지구 온난화 방지를 위한 국제협약인 교토 의정서가 발효되었고, 온실가스 발생 감축은 선택이 아닌 의무사항으로 다가오고 있다. 이에 따라 우리나라는 2009년 7월, 2020년까지 세계 7대, 2050년까지 세계 5대 녹색강국 진입을 비전으로 설정하였고, 2009년 12월에 개최된 제15차 기후변화협약 당사국총회에서 2020년까지 우리나라의 온실가스배출을 BAU (Business As Usual) 대비 30% 줄일 것임을 선언하고 에너지·지속가능발전 등 저탄소 녹색성장 정책을 포괄하는 '저탄소 녹색성장 기본법'을 제정하였다. 이 기본법을 바탕으로 자발적 감축량을 설정하고 실질적인 온실가스 감축 정책을 추진하고 있다. 저탄소 경제시스템 구축을 통하여 지속적인 경제성장을 유지하고, 에너지 비용을 낮춤으로써 산업의 경쟁력을 제고하며 삶의 질을 높일 수 있는 경제-사회-환경 구축이 필요할 것이다[1]. 탄소배출에 직접적인 관련이 있는 물류부분은 상당한 영향을 입을 것으로 예상되며, 국가 전체 온실가스 배출량 중 20%를 발생시키고 있는 수송부분의 경우, 배출량 중 약 30%가 화물운송단계에서 배출되고 있어 친환경적인 물류활동의 확산에 대한 사회적 필요성이 부각되고 있다.[2]

제품을 공로운송, 철로운송, 해로운송의 형태 중, 어떠한 운송수단을 통해 운송하는가에 따라서 물류비용과 탄소배출량은 크게 달라진다. 일본국토교통통성의 「數字でみる鐵道」 자료에 따르면, ton·km당 이산화탄소 배출량은 철도가 0.02kg, 자동차는 0.35kg이고, ton·km당 에너지 소비량은 철도가 497 Kcal, 자동차는 2,879 Kcal이다. 수단별로 환경과 에너지의 소비량을 비교해보면, 철도의 CO₂ 배출량은 ton·km당 자동차의 약 1/18, 에너지소비량은 ton·km당 약 1/6에 불과한 것으로 알려져 있다. 따라서 현행 도로 중심의 수송체계를 철도와 해운을 통한 녹색물류체계로 전환할 필요성이 증가하고 있다. 반면, 기업은 최대한의 이익을 위해 서비스수준을 유지하는 선에서 전체 비용을 최소화 하는 방법을 선택할 것이다. 친환경 정책의 공감대는 형성되었지만, 제품의 생산프로세스부터 고객에게 전달하는 수송프로세스까지 각 단계에서 배출되는 탄소를 줄이는 것은 많은 비용과 시행착오를 겪을 수밖에 없다. 이에 본 연구는 운송 수요가 많은 서울에서 부산까지의 컨테이너 운송에 있어 운송 모드별 운송 비용과 탄소배출량을 고려한 최적모델링을 통해 정부와 기업간의 상충관계를 분석하여 향후 녹색성장의 방향을 제시하고자 한다.

에너지소비를 줄이고 탄소배출을 감소시키기 위해 지나친 도로운송보다는 철도와 배를 이용한 친환경 운송을 활성화 시켜야 한다. 하지만, 기업의 탄소배출 절감에 대한 인센티브가 미비하기 때문에 탄소배출을 고려하기 보다는 운송시간이나 편리성 등에 의하여 운송을 수행할 것이며, 이에 반해 정부는 사기업에 대한 탄소배출 절감 유도로 탄소배출권

시장에서 유리한 고지를 점하는 것이 향후 세계 환경에서의 우리나라의 역할이 두드러질 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서는 탄소배출을 고려한 우리나라의 복합운송에 대한 운송수단 선택과 비용과 CO₂배출의 Trade-off관계에 대한 접근을 찾아 분석하고 향후 나아갈 방향에 대해 제시하고자 한다. 이를 위하여 본 논문은 혼합정수계획모형(Mixed Integer programming)을 제안하여 정량적인 데이터를 분석을 통해 우리나라의 컨테이너 운송에 대한 의사결정모형을 제시하고자 한다. 아울러 본 논문에서 다루고자 하는 탄소배출을 고려한 운송모드 선택 문제의 대상과 범위는 다음과 같다. 운송의 영역은 우리나라에서 가장 인구가 많고 물동량이 많은 구간인 서울-부산간 상·하행 왕복 운송을 기준으로 하며, 운송의 종류는 도로운송, 철도운송, 연안운송 3개의 모드를 고려하였다. 항공운송의 경우 국내 공항 간 취급하는 컨테이너 물동량이 미비하여 본 연구대상에 부적합하기 때문에 제외하였다. 운송화물은 복합운송의 대상이 주로 해외 수·출입 품목이기 때문에 비용과 효율면에서 월등한 컨테이너를 이용한다.

2. 이론적 배경

Green SCM(Supply Chain Management)은 환경관리와 공급사슬관리에 기반을 두고 있다. Qinghua·Joseph(2004)은 GSCM의 범위는 녹색 구매에서부터 통합된 그린 공급사슬까지이며, 공급자로부터 제조자 그리고 소비자와 심지어 회수물류(RL: Reverse Logistics)까지라고 정의하였다.[3] Samir(2007)는 제품 설계에서부터 자재조달과 선택 그리고, 제조프로세스와 완제품을 고객에게 전달하는 것까지 모든 공급사슬 관리에 환경을 통합한 것이라고 정의하였다.[4] GSCM은 기존 SCM 개념에 역물류 또는 회수물류(Remove Logistics; RL)의 활동(재사용, 소각, 재제조, 재활용 등)들을 포함한다.

Green SCM에서 고려되고 있는 것 중에 하나가 바로 탄소(온실가스) 배출이다. 온실가스는 지구의 심각한 온난화를 가져왔으며 이에 따른 이상기후들이 발생하는 주범으로 알려져 왔다. 따라서 네트워크 설계에서도 탄소배출을 고려한 운송 네트워크 설계 연구가 진행되고 있다. Ramudhin et. al.(2008)은 탄소배출을 고려한 녹색 공급사슬 네트워크 설계에 대한 연구를 하였다[5]. 이 연구는 혼합정수계획법을 사용하여 공급사슬상에서 탄소배출권을 거래하는 것을 고려하였다. 또한, 공급자 선정과 제품 할당, 용량구성과 운송수단 조절을 통해 허용된 탄소발자국(Carbon footprint)내에서 공급사슬을 평가하였다. Hugo and Pistikopoulos(2005)는 공급사슬 네트워크 설계와 장기간의 계획(Planning)을 환경을 고려하여 모델을 제시하였다.[6] 이러한 연구에서는 다른 한편으로 탄소배출을 줄이기 위해 각국에서는 탄소배출 저감 장치 부착, 친환경 운송수단 사용으로 정책적인 연구가 혼합되어 있다. 이 중, 친환경 운송수단으로의 이동(Modal Shift)은 국제적으로 많이 사용되고 있는 녹색물류정책의 한

에이다. 도로운송보다 상대적으로 온실가스를 적게 배출하는 철도운송과 연안운송은 친환경적 운송수단이나 환적비용과 시간적제약이 존재하므로 활성화되어 있지 않은 것이 현실이다.

복합운송(multimodal transport)에 대하여 1991년 UNCTAD/ICC의 복합운송증권에 관한 규칙(UNCTAD/Rules for Multimodal Transport Documents)에 의하면, 복합운송은 “적어도 두 가지 이상의 다른 운송수단에 의하여 물품을 운송하기 위한 단일계약(single contract)에 의해 이루어지는 물품운송”으로 규정하고 있다. 또한 1980년 UNCTAD의 유엔국제물품복합운송조약(United Nations Convention on International Multimodal Transport of Goods)에 의하면 “국제복합운송이란 복합운송계약에 기초하여 적어도 두 가지 이상의 운송방법에 의한 운송으로서 복합운송인이 운송물품의 수령지와 인도지가 다른 두 나라 사이의 운송”이라고 규정하고 있다. 이처럼 복합운송이란 특정 화물을 육상·해상·내수·항공·철도·도로운송 중에서 적어도 두 가지 이상의 운송형태를 복합적으로 이용하여 출발지에서 목적지까지 운송구간을 일관운송 하는 것을 말한다. 복합운송의 핵심에는 각기 다른 형태의 운송수단을 시간적, 공간적 손실 없이 효율적으로 연결될 수 있도록 적절한 장비와 지원 시스템에 있어서 적기수송에 대한 신뢰성이 가장 중요한 요소로서 내륙수송 수단과의 적절한 연결과 더불어 각종 정보의 제공 등으로 모든 운송체인을 가장 효율적으로 관리 및 운영에 있다.

복합운송의 방식 중 타 운송간의 연계기술에는 공로-철송 연계 기술인 DMT(Dual Mode Train)가 있으며, 철송-연안운송 연계 기술인 열차 페리(Ferri-Rail) 시스템이 있다. 그리고 연안운송-공로의 연계기술에는 Ro-Ro(Roll-on Roll-off) 선박 시스템이 있다. DMT의 종류에는 앞서 언급한 피기백(piggy-back), 바이모달(Bimodal), 모달로(Modalohr), 카고비머(Cargo Beamer) 등이 있다.[7] 복합운송에 관한 연구는 구축 및 활성화 방안, 평가 등에 대한 정책 연구와 복합운송을 고려한 네트워크 설계 문제로 나뉜다. 구축 및 활성화 방안, 평가 등에 대한 연구는 이성원 외3(2007)은 경제적 지표(거리, 속도, 비용 등), 사회적 지표(교통사고, 시스템 만족도 등), 환경적 지표(에너지 소비 및 대기오염 관련 지표 등)로 구성된 평가지표를 제시하였다.[8] 복합운송체계 개선과 관련된 의사결정방법으로는 임영태 외1인(2005)가 자기포락기법, 비용편익분석을 이용한 AHP의 쌍대비교 평가를 연구하였다.[9] Ferreira(1995) 철도화물 운송은 거의 복합운송으로 이루어지며 복합운송은 트럭에 의한 pre-haulage, 환적, 철도수송(or 바지운송), 환적, 그리고 트럭에 의한 end-haulage 등의 최소 5개의 요소로 이루어진다고 언급하였다[10].

정승주(2004)는 물류경쟁력 강화를 위한 철도화물 운송 활성화 전략에 관해 연구하였다. 이 연구에서 현재의 거리비례제는 화물운송수요의 제고 측면에서 장거리 운송특성이 있는 철도운송에는 바람직하지 않은 운임체계라고 하였다

[11]. 장거리화물에는 할인운임을 적용하고 있지만, 현실적으로 화주에게 유인책이 되지 못한다고 하였다. 특히 내륙의 항구라고 할 수 있는 수도권 지역의 의왕 ICD (Inland Container Depot)는 전용 CY (Container Yard) 하치장 용량 부족, 공용 CY 활성화 저조 등의 이유로 활성화가 되지 않고 있으며, 환적으로 인한 시간과 비용의 소요로 인하여 철도운송이 활성화 되어 있지 않은 것이 현실이다[12].

다음으로 연안운송에 대해 살펴보면, 부산-군산-인천항로(1998, 대한통운), 부산-광양항로(2004년, 한진), 부산-인천간(2006년, 한진) 항로가 개설되어 있었으나 수익의 부재로 인하여 운행이 중단되었다가, 인천항의 적극적인 지원으로 인하여 2009년에 다시 부산-인천항로 구간에 215 TEU급 퍼더션 2척의 운항(한진)이 재개되었다[13]. 이용실적이 저조한 원인은 LCL화물의 철도운송 활용시 트럭운송이 2번 발생되며 충분한 물동량이 거래 되지 않기 때문이라고 하였다. 또한, 이 연구에서 현황분석과 설문조사를 통해 컨테이너화물의 연안운송 제약요인을 분석하고 이에 활성화 정책방안을 제시하였다. 이 연구에 의하면, 화주들은 수송수단 선택에 있어 운송시간 및 운송비를 가장 중요시하며, 이와 관련하여 운송비용 및 운송시간을 동시에 고려한 선택순위는 도로운송, 철도운송, 연안운송의 순서로 연안운송이 상대적으로 저조한 실정이다. 또한, 화주들이 연안운송을 선택하는 이유는 규모의 경제에 따른 운송비의 절감이 가장 큰 이유이며, 연안운송시간이 과다하기 때문에 여유기일이 있는 화물이나 공 컨테이너를 운송하는 것이 대부분이다.

복합운송과 네트워크를 함께 고려한 관련 연구는 일반적으로 확정된 양의 제품을 출발지에서 목적지까지 운송하는데 소요되는 비용과 시간을 최소화하기 위한 연구가 대부분이다. Castelli et al.(2004)는 복합운송의 일정계획 문제에 대하여 복잡한 운송경로를 한 번에 한 경로에 대하여 Lagrangian Relaxation을 사용하여 일정을 수정해가는 경험적 알고리즘을 제시하였다[14]. Ham et al.(2005)는 전통적인 경로 생성, 배치, 방법 설정과 할당으로 진행되는 4단계 배송 절차의 대안으로 O-D간, 복합운송 수단 및 입출고와 운송 흐름을 통합한 수리적인 모델을 제시하였다[15]. Cho et al.(2006)은 수출입 컨테이너 화물의 운송비용과 운송시간을 고려한 최적 복합운송 경로를 구하기 위해 Label setting 알고리즘을 응용하여 모델을 제시하였다[16]. Song et al.(2007)은 복합운송을 이용하여 복수의 O-D 사이의 화물 운송 시 운송비용과 운송시간이 최소가 되는 운송경로 및 각 물량의 할당량을 선정하는 알고리즘을 제안하였다[17]. 또한 Athanasios·Whitney(2000)은 복합운송을 이용하여 운송 도중에 운송시간의 지연 방지를 위한 운송의 경로와 수단을 변경하는 알고리즘을 제안하였다[18]. 김일동 외 2명(2009)는 운송비용과 시간을 고려한 것뿐만 아니라, 수요자의 재고 수준을 고려하면서 다양한 운송 수단을 이용하는 복합운송을 통해 설정해놓은 고객 서비스 수준을 유지할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안하고 실제 사례를 이용하여 기존 공급 방법과 비교·평가 하였다[19]. Pierre et al.(2004)

는 복합운송에 있어 터미널의 최적 지점을 혼합정수계획법을 이용하여 휴리스틱 접근법을 사용하였다[20].

기존의 연구들은 모두 비용과 시간을 고려하여 네트워크를 설계한 연구들이다. 하지만 본 논문에서는 운송모드에 따른 비용뿐만 아니라 CO₂를 고려한 설계를 목적으로 한다. 따라서 이의 관련 연구는 기존의 네트워크 디자인에 탄소배출 제약식을 넣은 형태로 연구가 되고 있다. 국내에서는 김상현·고창두(2002)가 회생량모델을 이용하여 CO₂배출량에 기초한 컨테이너화물의 운송경로 선택에 관한 연구를 하였다[21]. 이 연구에서는 연안운송의 운송시간을 50% 감소시킨 경우 도로운송에 대한 연안운송의 경쟁력 향상 효과가 높았음을 알 수 있었다.

Winebrake et al.(2008)은 에너지와 환경 그리고 경제 등 서로 다른점에서 복합운송 최적화 경로를 산출하고 그 결과를 비교 분석하였다. 이 연구는 GIS기반의 미국 전역의 복합운송망을 이용하여 최소비용, 최단시간, 오염물질 최소배출이 가능한 경로를 산출하여 3가지의 사례를 들어 설명하였다[22]. 하지만 물동량에 대한 고려 없이 개별 화주입장에서의 최적경로를 제시하였다. 본 연구도 마찬가지로 물동량을 무작위 생성하여 개별 화주입장에서 최적경로를 찾는 방법은 같지만, 우리나라 운송사의 실제 운임을 고려하여 설계하였기 때문에 이 연구와 차별점이 존재한다. 본 연구에서는 GSCM의 총체적인 분야를 다루는 것이 아닌, Operation부분의 분배(Distribution)와 수송(Transportation) 운영에 있어 탄소배출을 고려한 기업의 의사결정 가이드라인을 제시하고 향후 녹색성장에 대해 다룬다.

3. 온실가스 배출량 산정 및 규제방식

21세기에 들어서서 환경의 시대로 인식되면서 대량생산과 소비로 이루어졌던 경제발전으로 인한 대기오염과 폐기물 문제를 적극적으로 해결하기 위해 전 인류의 생존이 걸린 문제로 부각되면서 환경에 대한 관심이 커졌다. 이러한 환경문제인식으로 인하여 유엔은 1990년 총회결의에 의거하여 기후변화협약을 제정하기 위하여 1992년 브라질 리우에서 기후변화협약(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)이 191개국이 참여한 가운데 채택되어 1994년 3월 발효되었다. 이 기후변화협약에는 기후변화에 대한 공동문제 인식과 대처방향을 규정하고 각 참가국에 대한 강제적인 배출감축의무는 다음에 언급할 교토의정서에 포함시켰다. 기후변화협약은 온실가스의 감축을 목표로 하며 회원국들의 보고의무와 더불어 기후변화에 주도적으로 역할을 할 선진국가를 지정하였다. 이후 1997년 교토의정서가 채택하여 37개국 선진국과 EU를 대상으로 온실가스 배출 감소에 합의하였다. 우리나라는 1993년 12월 기후변화협약에 47번째로 가입하였고, 교토의정서에는 2002년 11월에서야 가입하였다.

의정서에 따르면, 기후변화협약 Annex I국가들은 2008~2012년 기간 중 자국 내 온실가스 배출 총량을 1990년대 수

〈표 1〉 교토의정서 주요 내용

구 분	내 용
대상 국가	38개국(협약 Annex I국가 40개국 중 터키, 벨라루스 제외)
목표 연도	2008 ~ 2012년
감축 목표율	1990년 배출량 대비 평균 5.2% 감축
감축대상 온실가스	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs, SF ₆ 6종
온실가스 배출원	에너지 연소, 산업공정, 농축업, 폐기물 등으로 구분
온실가스 감축 도입수단	교토 메카니즘 도입

준대비 평균 5.2% 감축하여야 하며 그 세부사항은 〈표 1〉와 같다.

교토의정서는 의무이행을 촉진하기 위해 3가지의 교토 메카니즘을 도입하였다. 배출권 거래제도(ETS)와 청정개발체제(CDM), 공동이용제도(JI)를 만들어 의무이행을 촉진할 보조장치를 만들었다. 먼저 배출권 거래제도(ETS : Emission Trading System)은 온실가스 감축의무국 간에 배출 쿼터의 거래를 허용하여 배출권 초과 경우 배출권을 구매하고, 감축의무 초과달성 시 판매이익을 실현하는 탄소 시장을 도입하는 것이다. 다시 말하면, 온실기체 감축의무가 있는 사업장, 혹은 국가간 배출 권한 거래를 허용하는 제도이다. 기업들이 교토의정서 지정 6대 온실가스인 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화 질소(N₂O), 과불화탄소(HFCs), 수소불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)을 줄인 실적을 유엔 기후변화협약(UNFCCC)에 등록하면 감축한 양만큼 탄소배출권을 받게 되는 제도이다. 현재 가장 활발하게 거래되고 있는 것은 EU ETS이며, 현재 톤당 탄소배출권(CER : Certified Emission Reduction)의 가격은 12.79유로에 거래되고 있다.

배출가스량의 산정방법에는 연료법, 연비법, 톤킬로법 등이 있다. 연료 사용량에 따라 산정하는 연료법에는 수·배송 물류에 따라 발생하는 연료사용량을 기준으로 이산화탄소(CO₂) 배출량을 곱하여 계산하는 방법으로서 수·배송 수단은 트럭, 선박, 항공, 철도를 대상으로 한다. 운송에 있어 연료사용량 및 CO₂ 배출량을 직접 파악하는 계산식은 식(1)과 같다.

$$\text{연료법의 이산화탄소 배출량 계산} = \text{이산화탄소 배출량 (Kg)} = \text{연료사용량} \times \text{CO}_2 \text{ 배출계수} \quad (1)$$

CO₂ 배출계수란 연료사용량 단위당 CO₂의 배출량을 나타내는 계수이며, 연료의 종류별로 거의 일정하다. 철도 등에서 전화를 하는 경우의 전기사용량도 산정대상이 되며, 전기의 배출계수는 매년 바뀌기 때문에 최신자료를 사용해야 한다. 연비를 사용하여 산정하는 연비법은 차량별 운행일보를 작성하고 있으나 주행거리 등의 표시가 명확하게 구분할 수 없는 경우에 사용된다. 또한 공인된 연비를 사용하여 이산화탄소 배출량을 산정하여 식(2)와 같이 계산된다.

연비법의 이산화탄소 배출량 계산 = 이산화탄소 배출량 (Kg) = (주행거리 ÷ 연비) × CO₂ 배출계수 (2)

톤·킬로 법은 제품의 중량과 거리를 기준으로 성과지표로 활용되고 있는 기업의 경우 환경부하의 산출도 성과지표의 일관성을 유지하기 위해 동일한 방법을 요구할 경우 사용된다. 이산화탄소 배출량을 산정할 때 중량과 거리의 비율로 계산하는 경우의 식은 식(3)과 같이 계산된다.

톤·킬로 법의 이산화탄소 배출량 계산 = 이산화탄소 배출량(Kg) = (수송중량 × 수송거리) × CO₂ 배출 원단위 (3)

물류용기단위, 즉 Unit load로 판매물류를 대행하고 있는 사업자가 복수의 화주의 화물을 혼재하여 수송을 하는 경우는 각 화주의 배출량을 산정해야 하고, 이에 따라 CO₂ 배출량을 배분하는 것이 필요하다. 따라서 CO₂ 배출량은 수송거리와 밀접한 관계가 있으므로 수송량과 수송거리의 쌍방을 고려한 톤·킬로미터를 사용하여 배분할 수 있다. 한편, 국가에서 할당하는 기준은 무상할당과 유상할당으로 나누어 볼 수 있다. 무상할당이란 배출량을 경쟁없이 어떠한 기준에 의해 할당하는 것으로서 과거 배출량기준(Grandfathering), 현재활동기준(Output-based), 업종별 최고기술 기업 기준(Benchmarking)이 있다. 유상할당에는 경매방식을 통하여 기업별 할당량을 지정해 준다. 기본적으로 배출권거래제(ETS)에는 2가지 방식인 총량거래제(Cap and Trade)와 Baseline & Credit방식이 있다. 총량거래제도는 배출의무를 할당 후 거래하는 방식으로 교토 메카니즘 배출권 거래의 기본 방식이다. 현재 영국과 EU, 미국, 일본 배출권 시장에서 채택하고 있다. Baseline & Credit 방식은 검증 또는 인증 후 Credit을 발급하며 CDM(Clean Development Mechanism)의 탄소배출권(CER : Certified Emission Reductions)과 JI의 ERU(Emission Reduction Units)가 이에 속하며 일본과 캐나다에서 채택하고 있다. 청정개발체제(CDM : Clean Development Mechanism)는 선진국들이 개도국의 환경사업에 투자하여 발생한 온실가스 감축실적을 자국의 실적으로 인정하는 것을 말한다. 공동이용제도(JI : Joint Implementation)은 선진국가들 사이에서 온실가스 감축사업을 공동으로 수행하는 것을 인정하는 것으로 한 국가가 다른 국가에 투자하여 감축한 온실가스 감축량의 일부분을 투자국의 감축실적으로 인정하는 것이다. 이러한 3가지의 보조장치를 통하여 탄소배출에 대한 인식의 확산과 활성화를 통하여 탄소배출절감의 노력을 기울이고 있다.

각국은 이에 대응해 2020년 중기 감축목표를 국가별로 설정하여 온실가스 저감을 위한 노력을 하고 있으며, 영국은 1990년 대비 34%, 일본은 2005년 대비 15%, 미국 2005년 대비 17% 감축할 것을 제시하였다. 우리나라도 이에 따라 저탄소녹색성장법을 제정하고 녹색성장 5개년 계획을 2009년 발표하였다. 이에 따르면, 우리나라는 2020년까지의 온실가스 배출량 전망치(BAU) 대비 30% 감축을 목표로 한다.

녹색성장 5개년 계획은 향후 5년간 녹색성장 국가전략 기반이 될 수 있는 중기 계획으로 기존에 각 부처별 추진되어온 녹색뉴딜, 신성장동력사업, 국가에너지기본계획 등의 목표치 및 부처별 재정 투자계획 등을 제검토하고 통합 조정하였다.

2020년까지 세계 7대, 2050년까지 세계 5대 녹색강국의 진입을 비전으로 3대 전략과 10대 정책방향을 제시하였다. 물류에 관련된 사항으로 녹색 교통네트워크 확대, 녹색교통물류 체계로의 전환, 녹색교통물류 성장잠재력을 확충한다는 정책방향을 제시하고 있다. 녹색교통물류체계로의 전환은 화주, 운송업체 등과 「Modal Shift 협약」을 체결하여 철도 등 대량교통수단의 운송분담율을 증대시키는 정책이다. 이를 통해 친환경 우수 교통물류 운전자 지원, 연계교통망 효율화 등 다각적 대책을 병행하여 추진하고 있다. 또한, 항만, 산단 등 교통물류거점 연계교통망을 구축하고 5대권역 내륙물류기지 확충 및 내륙물류단지 16개소를 개발을 추진 중이다.

국외에서도 온실가스 저감정책을 개발/추진 중에 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 정한 온실가스 저감정책에는 배출 저감 수단 및 평가기준을 지정하고, 기후변화 대비 정책, 정부차원의 실질적 탄소 가격 제공 정책과 효과적인 기술 개발, 혁신 및 보급 등의 정책을 발표하였다. 이에 따라 미국은 저탄소 연료의 보급 및 소개와 고연비 차량 확대, 교통시스템 개선 등의 노력으로 탄소배출을 절감하려는 노력을 하고 있다. 영국은 최첨단 기술과 새로운 연료 개발에 대해 지원을 해주고 저탄소 대중교통수단의 공급, 교통수단 선택의 중요성 홍보, 저탄소 교통으로의 수단전환(Modal-Shift)를 통해 탄소절감의 노력을 기울이고 있다. 일본은 개인, 산업, 정부의 다양한 노력을 통해 탄소를 절감하고 지속가능한 교통물류 정책을 실현하고 있다. 가격이나 규제 정책의 사례를 보면 일정시간대에 화물수송을 하는 보스턴, 트럭수송제한을 하는 마닐라, 방콕, 도쿄, 화물전용도로를 구축한 뉴올리언스 항, Low emission zone을 지정한 스웨덴, 암스텔담, 런던 등이 있다. 이는 환경부하 저감에 탁월한 효과가 있으나, 물류비용의 부가적 발생, 교통사고 증가 등 부정적인 반응을 보이고 있다. 독일의 경우, 도시 내 화물 취급기업을 중심으로 중계기지를 건설하여 공동수배송과 정보공유를 통해 효율성을 확보하고 있다. 또한 총 수송거리가 단축되어 운송비와 탄소저감 두마리의 토끼를 잡는 효과를 거두고 있다. 다른 한편으로는 저공해 수송수단 이용의 장려를 통해 1980년 이후 30개 이상의 Multi-modal freight center를 개발하여 2015년까지 철도수송분담율을 25%까지 끌어올리는 목적을 가지고 있다. 철도 인프라 확장으로 능력을 확대하고 정부의 적극적 홍보 및 지원을 통해 탄소규제시대에 대응하고 있다. 우리나라도 저탄소녹색성장법 시행령인 목표관리제도를 도입하여 관리업체와 사업장의 온실가스 배출량 기준과 에너지 소비량 기준을 마련해 놓고 있으나, 할당 정책과 과태료 부과기준이 미비한 상황이다.

4. 물류의 최적 운송수단 의사결정 모형

기업이 다양한 측면에서 어떤 운송수단을 선택해야 하는지 의사결정 모형을 제시하기 위해 수리적 모델링 기법으로 제시하였다. 수리적 모델링은 보다 적은 자원으로 빠르고 정확하게 해를 구할 수 있어야 한다. 주어진 시나리오를 바탕으로 각 시나리오가 운송수단 선택에 어떠한 영향을 미치는지를 수치로 보여줌으로써 의사결정자에게 보다 정확한 의사결정을 할 수 있게 도와주는 역할을 해야 한다. 본 논문에서는 탄소배출 제약식을 추가하여 기업의 의사결정문제를 해결하기 위해 다양한 가정을 사용한다. 탄소배출을 고려한 의사결정 문제는 탄소배출의 최소, 운송비용의 최소, 탄소배출과 운송비용을 동시에 고려한 최소로 3가지 목적식이 존재하게 된다. 이를 위해서 수리적 모델링을 통해 정량적인 결과를 나타냄으로써 기업으로 하여금 의사결정의 프레임워크를 제시하였다. 모델은 혼합정수계획(MIP : Mixed Integer Programming)으로 모델링 하였고, 해를 구하기 위해 사용한 소프트웨어는 Xpress MP 7.0을 사용하였다.

K : O-D(Origin-Destination) pair, where $K=(o, d)$, $k \in K$

M : 운송수단 집합, where $m \in M$

L : 간선 집합, where $l \in L$

O_{km} : 수요지 k 로 운송수단 m 을 사용할 경우 배출하는 CO2 배출량

C_{km} : 수요지 k 로 운송수단 m 을 사용할 경우 발생하는 운송비

D_k : 수요지 k 의 요구량, if $D_k = 1$, then full container

T_{ml} : m 모드에 대한 간선 l , where T_{ml} is boolean

S_{kml} : 수요지 k 로 운송수단 m 을 사용할 때 간선 l 의 사용여부, where S_{kml} is boolean

u_l : 간선 l 의 용량

α : 비율조정 상수(탄소범위 구간 등분 이용)

β : 상수

x_{km} : 수요지 k 에서 운송수단 m 을 이용하는 의사결정변수, where $x_{km} \in \{0, 1\}$

[목적함수]

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} O_{km} \times x_{km} \tag{4}$$

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} C_{km} \times x_{km} \tag{5}$$

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \alpha C_{km} \times x_{km} + (1 - \alpha) O_{km} \times x_{km} \tag{6}$$

[제약식]

$$\sum_{m \in M} x_{km} = 1, \text{ for } \forall k \tag{7}$$

$$\sum_{(k \in K | S_{kml} = 1)} D_k \times x_{km} \leq u_l, \tag{8}$$

$$(\forall m \in M, l \in L | u_l) > -1 \cdot \beta \text{ and } T_{ml} = 1$$

$$x_{km} \in \{0, 1\} \tag{9}$$

(4)식은 탄소배출에 대한 목적식으로서 각 O-D pair K 에서 운송모드 m 을 사용할 때 발생하는 탄소배출량을 최소화하는 목적식이다. (5)식은 비용에 대한 목적식으로서 각 O-D pair K 에서 운송모드 m 을 사용할 때 발생하는 운송비용을 최소화 하는 목적식이다. (6)식은 위의 (4)식과 (5)식을 모두 합하여 비용과 탄소 모두 최소가 되는 최적값을 찾는 목적식이다. α 값은 상수로서 1이면 비용최소, 0이면 탄소배출 최소가 되는 변수이다. (7)식은 각 O-D pair K 대하여 무조건 하나의 운송수단 m 을 사용해야 한다는 제약식이다. (8)식은 각 O-D pair K 의 운송모드 m 이 간선 l 을 사용할 때 l 의 용량을 넘을 수 없다는 제약식이다. (9)식은 각 O-D pair K 에서 운송수단 m 을 이용하는 Path가 사용 또는 사용하지 않는다는 의사결정변수이다.

5. 테스트 시나리오 설계 및 효과 분석

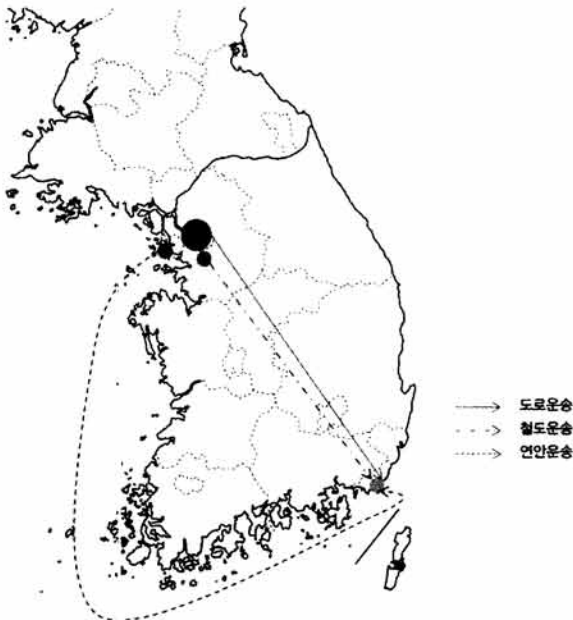
본 논문은 탄소배출과 운송비용의 관계에서 기업의 의사결정을 위한 하나의 모형을 제시하고자한다. 제시된 모형을 바탕으로 우리나라에서의 도로, 철도, 해운이 어떤 상황에서 가장 최적의 비용과 CO2배출이 이루어지는지 민감도 분석을 통하여 알아보기로 한다. 현재 우리나라의 내륙연계운송의 수송수단별 구성요소는 <표 2>와 같다.

구현된 시스템의 효과를 분석하기 위하여 고려된 서울-부산 간 컨테이너 운송에는 도로운송, 철도운송, 연안운송 등 3가지 운송수단이 존재하며, (그림 1)과 같다.

컨테이너의 운송을 담당하고 있는 기업들은 대부분 수/출입을 담당하고 있는 항구주변에 있는 수요지에 운송을 해야 하는 상황이다. (그림 1)과 같이 서울에서 부산까지 컨테이너를 운송할 수 있는 운송수단은 3가지가 존재하며, 도로운송, 철도운송, 해상연안운송이다. 도로운송은 출발지에서 도착지까지 직배송이 가능하다는 장점이 있는 반면, 운송비가 상대적으로 많이 들며 탄소배출이 많다는 단점이 있다. 철도운송은 그에 비해 상대적으로 운송비용이 저렴하며 탄소배출이 가장 적다는 장점이 있지만, Hub(즉, 의왕ICD)와 부산진까지의 도로운송이 필요하며 환적시간과 비용이 추가된다. 해상연안운송은 운임이 상대적으로 저렴한 대신, 출발지-인천항, 부산항-도착지까지의 도로운송이 필요하며 운송시간이 많이 소요되는 단점이 존재한다. 따라서 기업들은 컨

〈표 2〉 국내 내륙연계 운송 수단별 구성요소

구분	도로운송	철도운송	연안운송
주운송시간	수도권-부산항 : 평균9시간29분, 수도권-광양항 : 평균6시간28분	수도권↔부산항 : 8시간	인천항↔부산항 : 28시간 광양항↔부산항 : 5시간
구성 요소	내륙화물기지 : 의왕, 양산 ICD(장래 2개권역 확대) ODCY : 현재 입항지역과 철송지역의 ODCY 운영중 컨테이너터미널 - 부산항 : 6개터미널 - 광양항 : 광양1단계, 2단계 1차터미널	내륙화물기지 : 의왕,부곡ICD, 부산진역 철송영역 : - 자성대, 신선대, 감만터미널내 철송시설 - 광양항 1단계 철송시설 ODCY : 철송지역 ODCY 철도 노선 : 경부선과 전라선으로 나뉘고 각 중점에서 터미널까지의 인입선 연결	ODCY : - 컨테이너의 하역/선적전 대부분 ODCY 이용 터미널 : 인천항, 부산항, 광양항 항로 : 인천↔부산 : 정기선 광양↔부산 : 정기선 인천↔광양 : 부정기선



(그림 1) 서울-부산 간 컨테이너 운송수단

테이너를 어떻게 하면 최소의 비용으로 운송할 것인가에 대한 문제를 항상 고민하게 된다. 더욱이 정부의 녹색성장의 정책으로 인해 CO₂ 배출에 대한 환경적 요소가 제약으로 다가옴에 따라 최소의 비용으로 최소의 CO₂배출을 하는 운송수단을 선택해야 할 것이다. 하지만 어떠한 경우에 어떤 운송수단이 최적의 의사결정인지 그 기준이 애매모호한 실정이다. 컨테이너 운송을 담당하는 기업들이 고려하는 문제는 어떤 운송수단을 이용해야 하는지가 먼저 선행된다. 운송수단에 따라 탄소배출량이 다르며, 운송시간과 운송비용도 다르게 된다. 또한 운송거리에 따라 변화하기 때문에 기업은 이들에 대한 의사결정을 해야 한다.

이를 해결하기 위한 시나리오를 가정하여 이 장 마지막에 설명하도록 한다. 다음 장에서는 각 요구사항들을 만족하면

〈표 3〉 실험 데이터 항목과 단위

항 목	단 위
운송모드별 탄소배출량	톤·KM
O-D간 거리	KM
O-D간 수요	FEU
운송모드별 1FEU당 운송비용	원
현재 탄소배출권 1톤당 가격	원

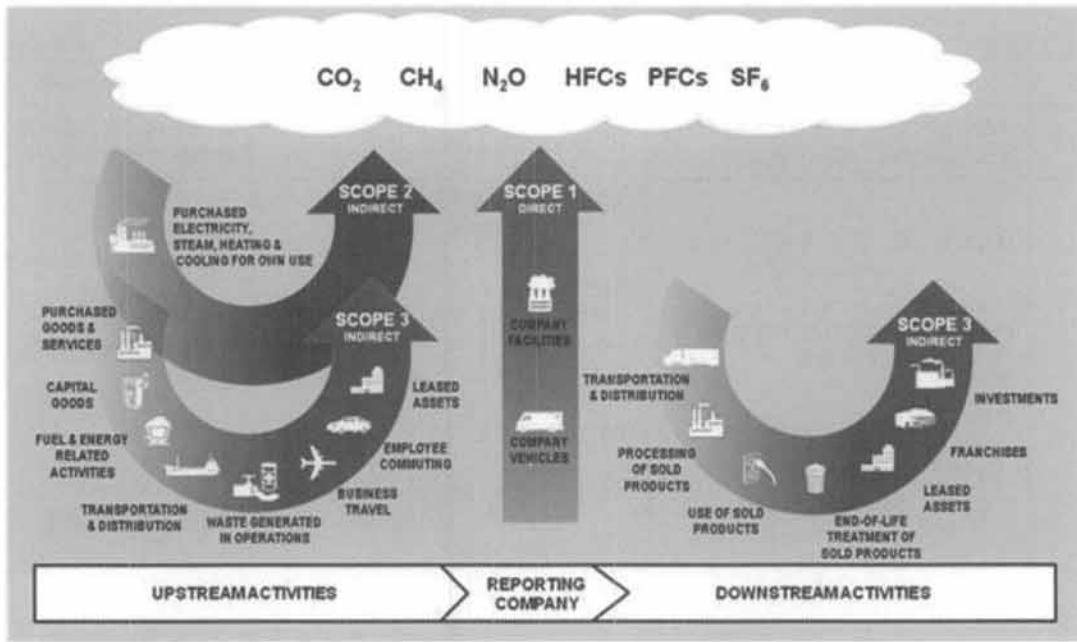
서 최적의 해를 도출하기 위한 수리적 모델링에 대해서 설명하기로 한다.

본 논문에 필요한 데이터는 <표 3>과 같다.

운송모드별 탄소배출량은 현황에서 언급한 탄소계산 방법 중, 톤·KM방법을 사용했다. 운송거리에 따라 컨테이너를 운송하는데 드는 탄소배출량을 알 수 있기 때문이다. 하지만, 운송거리는 식(10)과 같이 계산이 가능하나, 컨테이너의 무게는 평균적으로 가늠하기가 어려웠다. 따라서 본 논문에서는 적 컨테이너, 즉 FULL 컨테이너로 가정하고 그 무게를 선행연구를 통해 박용안(2003)이 사용한 계수 16톤/TEU를 사용하여 단위를 변환하였다.[23] 본 논문에서는 40FT 1FEU를 기준으로 하고 있기 때문에 32톤/FEU로 변환하여 계산하였다. 운송모드별 1FEU당 운송비용은 <표 4>와 같다.

〈표 4〉 운송모드별 1FEU당 운임

운송모드	운임
도로운송	643,000
철도운송	337,771
연안운송	410,000



(그림 2) GHG Protocol Scope (자료 : <http://www.ghgprotocol.org>)

운송모드별 톤/KM 탄소배출량은 WRI(World Resource Institute)에서 2008년 규정한 GHG 프로토콜(Green House Gas Protocol) 배출 도구를 적용하여 계산하였다.

(그림 2)와 같이 GHG 범위(Scope)에는 3가지의 종류가 있다.

범위(Scope)는 온실가스 산정 및 보고의 목적상, 직·간접 배출원을 규명하고, 투명성을 개선하며 다양한 조직형태와 다양한 종류의 기후변화대책 및 사업목표의 효용성을 제고하기 위해 3개의 범위(Scope)가 설정되었다. 범위 1과 2는 복수의 사업자가 같은 범위 내에서 배출량을 산정하지 않도록 신중하게 설정되었으며, 이는 중복산정이 문제시 될 수 있는 온실가스 프로그램에서의 범위를 쉽게 다룰 수 있도록 하고 있다. 범위 1은 직접적으로 온실가스를 배출하는 배출원을 포함하며, 기업 소유나 통제하에 있는 보일러, 난로, 자동차 등의 연소로 인한 배출, 기업 소유 혹은 통제하에 있는 설비시설의 화학적 생산 활동으로 인한 배출 등을 들 수 있다. 범위 2는 사업자가 소비하는 구입전력으로 인해 발생하는 온실가스 배출을 산정하며, 구입전력은 사업자가 직접 구매하여 소비한 전력과 사업자의 조직범위 내에서 사용한 전력으로 정의된다. 범위 2에 해당하는 배출량은 물리적으로 전력이 발생하는 설비시설에서 생긴다. 마지막으로, 범위 3은 모든 기타 간접적인 배출의 취급에 대한 선택적 카테고리이다. 범위 3에서의 배출은 사업자 활동의 결과이지만 사업자가 직접 소유하거나 통제하지 않는 배출원으로부터 발생하는 온실가스의 배출을 일컫는다. 범위 3은 구입자재의 추출 및 생산, 구입연료의 수송, 판매한 생산품 및 서비스의 사용에 의한 배출 등을 포함한다. 따라서 본 연구에서는 컨테이너 수송을 위한 운송수단(트럭, 기차, 배)을 이용하는 것이기 때문에 범위 3에 포함된다.

하지만 GHG 프로토콜의 범위 3은 범위가 너무 광범위해서 적절히 분류되어 있는가에 대한 고민이 필요하다. 특히, 가치사슬에서 기업의 아웃소싱으로 인한 탄소배출에 대한 책임이 누구에게 있는가에 대한 애매모호한 기준이 될 수 있다. 세계적인 운송회사 DHL은 BLICC(Business Leaders Initiative on Climate Change)의 참여기업으로서 스웨덴에서 배출되는 전체 온실가스의 98%가 아웃소싱 운송업체의 우편물 운송과정에서 발생한다는 사실을 확인하였다. 이에 DHL은 아웃소싱 업체와의 하청계약서에 운송서비스 시 사용한 차량 데이터, 이동거리, 연료효율성과 기타 기본 데이터를 포함시킬 것을 요구하여 아웃소싱 운송기관의 계산공식을 통해 총 배출량을 계산하고 있다. 따라서 GHG 프로토콜1에서 사용하는 CO₂계수는 <표 5>와 같다.

<표 5> 운송모드별 탄소배출량 계수

운송모드	탄소 배출량 계수(Ton·KM)
도로운송	0.000204039553298878
철도운송	0.0000174173165146928
연안운송	0.000221904618028416

자료 : WRI(World Resource Institute)

O-D간 수요는 서울 지역의 500개, 부산/경남 지역 500개 총 1,000개의 O-D를 랜덤으로 생성하였다. 이 수요를 생성하기 위해 난수를 생성하고 그에 따른 O-D간 거리를 각 우편번호에 해당하는 거리를 위/경도 정보를 통해 다음과 같은 식(10)로 계산하였다.

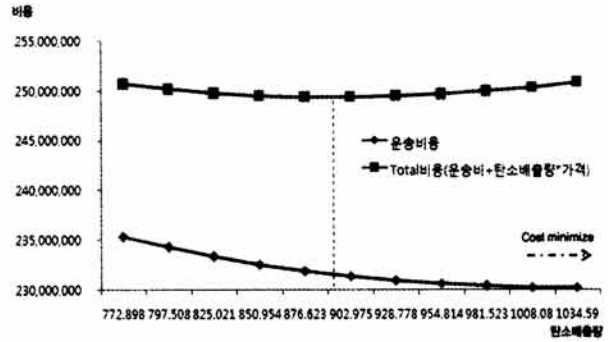
위/경도 데이터를 이용한 두 지점사이의 거리를 구하는 공식 = $1.6 \times 69 \times \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2}$ (10)

위도와 경도로 표시된 두 지점(A, B) 사이의 거리를 구하고 1.6과 69를 곱해서 두지점간의 거리를 계산 하였다. 1.6을 곱하는 것은 rail에서 km로 환산하기 위한 것이며, 69를 곱하는 것은 지구가 타원인 것을 감안하여 거리를 구하기 위한 것이다. 운송비용에는 국내 컨테이너화물 취급업체의 비용을 인터뷰한 결과 육상과 해상 운송비용을 구할 수 있었다. 철도운송 운임은 코레일 홈페이지에서 자세하게 명시되어 있어 적용할 수 있었다. 다음으로, 탄소배출권의 가격은 현재 유럽 ETS(Emission Trading Scheme)에서 거래되고 있는 가격을 기준으로 하였다. 2011년 5월 16일 기준 탄소배출 1톤당 2.79유로로 거래되고 있으며, 고시환율 기준 19861.21원으로 환산된다.

본 논문에서는 3가지 시나리오가 존재한다. 먼저 시나리오 1은 각 운송수단의 용량이 현실적으로 지정되어있는 상황에서 데이터를 분석하고자 한다. 각 운송수단의 용량이 정해져 있는 경우, 기업은 어떤 한 운송수단만 선택하기는 용량의 제약 때문에 다른 운송수단을 선택할 수밖에 없다. 시나리오 2은 각 운송수단의 용량이 지정되어 있는 상태에서 탄소배출권의 가격의 변화에 따른 운송수단 선택 및 비용에 있어 데이터를 분석하고자 한다. 마지막으로 시나리오 3는 철도의 용량을 늘려 어느 정도 투자를 해야하는가에 따른 데이터를 분석하고자 한다.

본 연구를 위한 가정 사항을 정리하면 다음과 같다.

- 각각 500개의 출발지와 도착지가 주어졌다고 가정한다.
- 도로운송을 제외한 철도, 연안운송은 중간 기착지(즉, 허브)를 꼭 통과한다고 가정한다.
- 운송모드별 탄소배출량은 톤·KM를 사용한다고 가정한다.
- O-D간 수.크는 Full Container이며, 컨테이너 종류는 40FT로 가정한다.
- 운송모드별 1FEU당 운송비용은 <표 10> 운임을 기준한다고 가정한다.
- 탄소배출권의 1톤당 가격은 EU ETS(유럽 탄소배출권 시장)의 탄소배출권(CER) 1톤을 기준한다고 가정한다.
- 컨테이너 무게는 박용안(2003)이 사용한 16톤/TEU를 사용한다고 가정한다.
- 운송모드별 탄소배출량은 톤·KM 를 적용하여 WRI(World Resource Institute)에서 2008년 규정한 GHG 프로토콜 배출도구를 기준한다고 가정한다.
- 차량 고정비는 없다고 가정한다.
- 하역과 환적에 대한 CO₂발생량은 없다고 가정한다.



(그림 3) 운송비용과 탄소배출비용간의 Trade-off

시나리오 1에서는 용량이 정해져 있을 때, 기업이 다양한 측면에서 어떤 운송수단을 선택해야 하는지 탄소배출 비용 최소와 운송비용 최소의 Trade-off관계의 그래프를 나타내며 분석을 하도록 하겠다. 분석을 위해, 모델링에 있는 목적식 (3)의 α를 변화시켜 0~1사이에서 변화시켰으나, 변환 범위가 맞지 않아 탄소배출최소구간인 772.898과 최대배출 1034.59사이에서 10구간 등분하였다.

위의 모델링을 통한 결과가 (그림 3)과 같다. 먼저 탄소배출을 최소로 하는 목적으로 결과값을 분석해보니 총 탄소배출의 양은 772.898톤, 그 때의 비용은 235,307,000원이다. 탄소배출을 최소화 했을 때, 기업이 선택하는 운송수단은 총 500개의 요구 중 철도의 용량을 모두 채우고 나머지 340개의 O-D는 도로운송을 선택하는 것으로 나타났다. 다음은 운송비용을 최소로 하는 목적으로 결과값을 분석해보니 총 탄소 배출의 양은 1034.59톤으로 무려 261.692톤이 증가하였고, 그 때의 비용은 230,240,000원으로 5,067,000원 감소한 결과를 보였다. 이때에도 철도의 용량을 모두 채우고, 도로 229개, 배 111개를 선택하는 것으로 나타났다. 이렇게 탄소의 배출량이 증가한 원인은 비용을 줄이기 위해 상대적으로 값이 저렴한 해상운송을 선택하기 때문이며, 해상운송은 탄소배출절감효과가 그렇게 크지 않은 것으로 나타났다.

기업은 일반적으로 운송비용을 최소화 하는 경향을 보일 것이다. 따라서 기업은 탄소배출을 많이 할수록 운송비용이 절감되며, 그 이유는 해상 연안운송을 쓰는 것으로 나타난다. 해상 연안운송은 비용이 저렴하나 상대적으로 도로운송과 비슷한 탄소배출이 일어나기 때문에 탄소배출비용이 증가하게 된다. 따라서 위의 (그림 3)과 같이 탄소배출과 운송비용 사이에서 Trade-off 관계가 형성된다. 이 때, 탄소배출과 운송비용을 합한 목적식을 사용하면 (그림 3)과 같이 중간지점에서 최소비용이 존재하게 된다. 따라서 최적값은 현재의 탄소가격(19861.21원=EU ETS)을 고려한 최적탄소배출량은 890.827톤이며 그 때의 운송비용은 231,621,000원, 총 비용은 249,314,000원이다. 최저지점에서부터 탄소배출을 더 많이 하게 되면 탄소배출비용의 증가로 인한 총 비용이 다시 증가하게 되는 현상을 볼 수 있다. 트럭과 철도, 해상 연안운송의 사용빈도와 그에 따른 탄소배출량, 운송비용, 총 비용은 <표 6>과 같다.

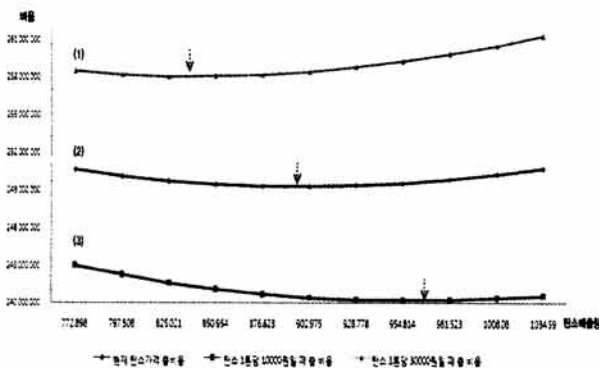
<표 6> 시나리오 1의 결과값

	탄소배출량	운송비용	총 비용	트럭	철도	해운
1	772.898	235,307	250,657	340	160	-
2	797.508	234,283	250,122	329	160	11
3	825.021	233,340	249,726	317	160	23
4	850.954	232,577	249,478	306	160	34
5	876.623	231,926	249,336	295	160	45
6	902.975	231,390	249,324	284	160	56
7	928.778	230,984	249,430	273	160	67
8	954.814	230,658	249,621	262	160	78
9	981.523	230,412	249,906	251	160	89
10	1008.08	230,285	250,307	240	160	100
11	1034.59	230,240	250,788	229	160	111
최적	890.827	231,621	249,314	289	160	51

이를 보면, 기업은 탄소배출을 최대한으로 함으로써 운송비용을 최소로 하는 정책을 사용할 것이나, 앞으로의 정부 탄소규제가 시행되면, 탄소배출에 대한 penalty(탄소배출비용)를 부과하게 될 것이고, 이에 따라 기업은 운송비용 최소보다는 탄소배출비용을 고려한 총 비용의 최적 포인트까지 감축하고자 노력할 것이다. 하지만 이는 탄소배출량과 운송비용간의 Trade-off 관계에서 톤당 탄소배출권의 가격변화에 따라 총 비용이 변화하게 된다. 따라서 다음은 탄소배출권의 가격변화에 따라 기업은 어떻게 의사결정을 해야 하는지 분석하도록 하겠다.

시나리오 2에서는 톤당 탄소배출권의 가격이 감소하거나 증가하게 되면 기업은 어떠한 의사결정을 할 것인지에 대해 분석하도록 한다. 탄소배출권의 가격이 증가되면 그만큼 총 비용이 증가하기 때문에, 기업은 시나리오 1에서보다 더 신중한 결정을 해야 한다. 아래 (그림 4)는 시나리오 2에 대한 결과 값을 나타낸 그래프이다.

(그림 4)에서 보는 바와 같이 탄소가격이 증가할수록(1번 그래프) 기업은 탄소배출을 더 작게 하는 경향을 보인다. 반면, 탄소배출권 가격이 감소할수록 탄소배출을 더 많이 하



(그림 4) 탄소배출권 가격에 따른 비용 그래프

<표 7> 시나리오 2의 최적값

톤당 탄소배출권 가격	탄소배출량	운송비용	총비용
30,000	834.373	233,049,000	258,081,000
현재(19861.21)	890.827	231,621,000	249,314,000
10,000	966.954	230,533,000	240,202,000

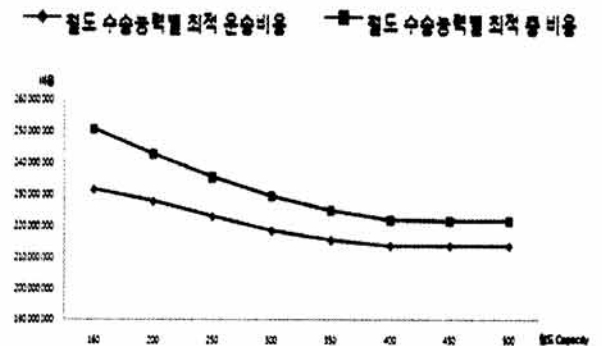
<표 8> 탄소배출권 가격에 따른 운송수단 선택

탄소배출권 가격	도로운송	철도운송	해상운송
19861.21원(현재)	289	160	51
10,000원(하락)	257	160	83
30,000원(상승)	313	160	27

는 경향을 보인다. 이는 기업의 입장에서 탄소배출절감대비 비용효과가 많기 때문에 최적포인트까지의 탄소배출을 절감하려는 노력을 할 것이다. 이에 따른 의미는 결론부분에서 살펴보도록 하겠다.

<표 8>를 보면 탄소배출권의 가격이 높아질수록 도로와 비슷한 탄소배출을 하는 해상운송의 사용이 감소되고 도로 운송에 대한 비율이 높아짐을 알 수 있다. 반면, 탄소배출권의 가격이 낮아질수록 탄소배출에 대한 부담이 적어 상대적으로 운송비용이 저렴한 해상운송을 이용함을 알 수 있다. 또한, 이 3가지의 경우 철도운송은 항상 160으로 모든 용량 이용함을 알 수 있다. 그렇다면 철도운송에 대한 용량을 어느 정도까지 투자해야 현재보다 비용이 더 감소될 수 있는 것인지에 대한 고민을 해 볼 수 있다. 다음 절에서 철도운송에 대한 용량을 변화시키면서 그 의미를 해석하도록 하겠다.

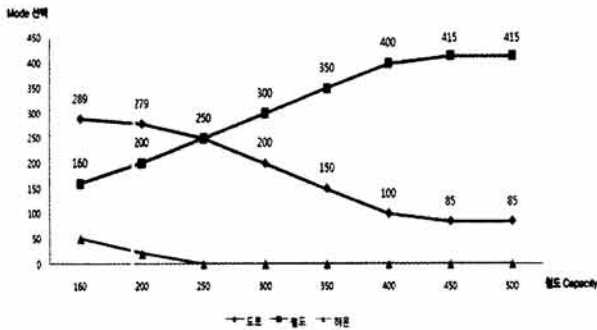
앞의 시나리오 2 결과에서 탄소배출을 고려할 때, 지정된 철도운송의 용량을 모두 사용하는 것으로 나타났다. 이번 시나리오 3에서는 철도운송의 용량을 기존보다 증가시켰을 때 운송비용과 총 비용의 변화 그리고 운송수단 선택에 대해 어떻게 변화하는지 알아보았다. 철도운송의 용량에 따른 최적 운송비용과 총 비용은 (그림 5)와 같다.



(그림 5) 철도 용량에 따른 최적 운송비용과 총 비용

〈표 9〉 탄소배출권 가격에 따른 운송비용과 총 비용

탄소 가격	19,861.21원			10,000원			30,000원		
	탄소 배출량	운송비용	총 비용	탄소 배출량	운송비용	총 비용	탄소 배출량	운송비용	총 비용
1	772.898	235,307	250,657	772.898	235,307	243,036	772.898	235,307	258,494
2	797.508	234,283	250,122	797.508	234,283	242,258	797.508	234,283	258,208
3	825.021	233,340	249,726	825.021	233,340	241,590	825.021	233,340	258,090
4	850.954	232,577	249,478	850.954	232,577	241,086	850.954	232,577	258,105
5	876.623	231,926	249,336	876.623	231,926	240,692	876.623	231,926	258,224
6	890.827	231,390	249,324	890.827	231,390	240,420	890.827	231,390	258,479
최적 부분	902.975	231,621	249,314	902.975	230,533	240,202	902.975	233,049	258,081
7	928.778	230,984	249,430	928.778	230,984	240,272	928.778	230,984	258,847
8	954.814	230,658	249,621	954.814	230,658	240,206	954.814	230,658	259,302
9	981.523	234,412	249,906	981.523	230,412	240,227	981.523	230,412	259,858
10	1008.08	230,285	250,307	1008.08	230,285	240,366	1008.08	230,285	260,257
11	1034.59	230,240	250,788	1034.59	230,240	240,586	1034.59	230,240	261,277



(그림 6) 철도 용량에 따른 운송수단 선택

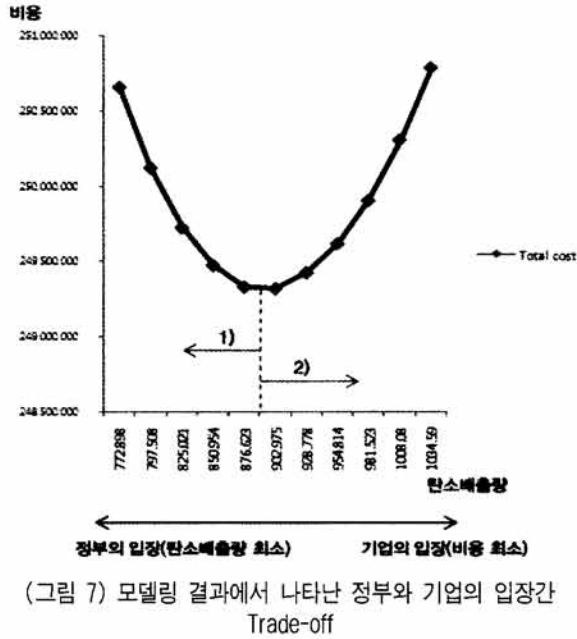
(그림 5)와 같이 철도 용량이 높아질수록 철도를 사용함으로써 탄소배출량이 감소하고 운송비용도 낮아졌음을 알 수 있다. 이는 철도가 다른 운송수단에 비해 운송비용도 적게 들며, 탄소배출 또한 월등히 적게 배출하는 이유 때문으로 분석된다. 때문에 해상운송은 철도 용량을 증가시킬수록 사용을 하지 않고 철도운송으로 대체하는 것으로 나타났다. 분석을 진행하면서 철도 용량을 450 이상 증가시켰을 때, 운송비용과 총 비용의 변화가 없었다. 따라서 분석구간 400~450 사이에서 어느 값 이상에서 값의 변화가 없는지 살펴보았다. 그 결과, 407이상 올려도 최적 운송비용은 달라지지 않았으며 탄소배출비용을 고려한 총 비용은 철도 용량이 415일 때 최적값이 나온다는 것을 발견하였다.

6. 결 론

세계적으로 온실가스 배출에 대한 규제가 높아지면서

2013년 우리나라도 탄소배출규제대상에 포함될 예정이기 때문에 더 이상 온실가스 배출에서 자유롭지 못한 실정이다. 이에 따라 운송의 대부분을 차지하고 있는 도로운송으로부터 발생하는 심각한 대기오염을 줄이고 친환경적인 철도나 해상운송에 대한 운송비용과 탄소배출을 동시에 고려한 모델을 제시하였다. 하지만 우리나라의 연안운송의 운임의 경쟁력이 터무니없이 부족한데다 오히려 환경적인 측면에서도 GHG 프로토콜에 의거하여 탄소배출이 도로운송과 비슷한 수준으로 나타나고 있음을 알 수 있었다. 또한 철도가 다른 운송수단에 비해 친환경적이긴 하지만, 허브에서의 환적 및 도착지와의 거리가 멀면 멀수록 도로운송에 의존도가 높아지기 때문에 비용과 환경적인 측면에서 도로운송과의 큰 차별성을 얻기 힘들다는 것을 알 수 있었다. 우리나라는 상대적으로 다른 나라에 비해 지리적으로 국토가 작고 거리가 짧기 때문에 복합운송을 위해 우회하면서 직선거리보다 거리가 상대적으로 길어지며 그에 따라 발생하는 비용이 높아지기 때문이다.

모델링 결과에서 알 수 있듯이 탄소배출과 운송비용 사이에서 Trade-off가 발생하고, 최적의 비용은 접점에서 발생한다. 기업은 탄소배출에 대한 penalty(즉, 비용)를 부과할 때 기업은 비용 때문에 탄소배출량을 억제하려고 한다. 또한, 정부는 기업과는 관계없이 국제 사회의 공약으로 내세운 감축량을 달성하기 위해 기업의 탄소배출량의 최소하지만 어느 지점까지 탄소배출을 감축해야 기업에 있어 최대의 이익이 되는지 계산이 필요하다. 따라서 본 연구에서 제시한 모델을 통해 기업의 의사결정의 최적포인트를 제시하였다. (그림 7)과 같이 정부에서 탄소배출에 대한 규제를 함으로써 기존의 운송비용에 탄소배출비용이 포함됨으로써 총



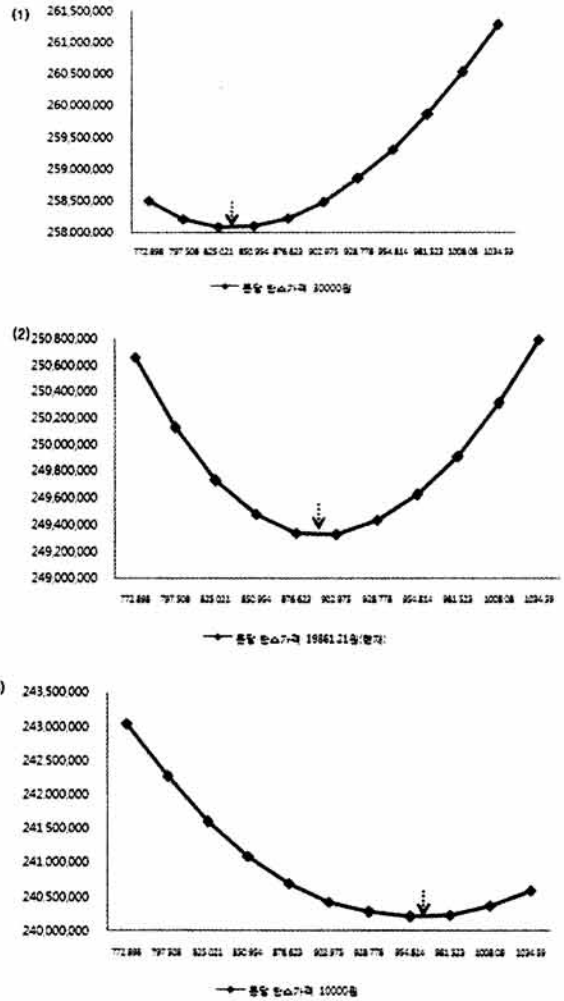
(그림 7) 모델링 결과에서 나타난 정부와 기업의 입장간 Trade-off

비용은 (그림 7)과 같이 나타나게 된다. 이 때, 총 비용의 최적 지점은 중앙에서 나타나게 된다.

정부에서 기업에 배출량 할당 시, 최적 지점을 기준으로 최적지점보다 감축량이 큰 경우 '1) 방향' 기업은 기존의 최적지점에서보다 탄소배출의 제약으로 인한 운송수단의 제한으로 도로운송의 비중을 높여야 함으로 그만큼의 손실이 발생하게 된다. 따라서 이에 규제 제약을 적정 수준으로 정함으로써 기업이 자발적으로 감축할 수 있도록 유도해야 함을 알 수 있다. 하지만 국제적 규약을 지키기 위한 정부의 규제가 강화되면, 기업은 증가된 비용만큼의 손실을 입게 되고, 정부는 이에 자금을 보조지원 해주어야 한다. 반면, 감축량보다 최적지점이 큰 경우 '2) 방향', 기업은 최적 지점까지의 탄소배출을 줄일 수 있는 여건이 마련되고, 탄소배출권 거래가 시작되면, 이에 따른 기업의 자산(이익)이 될 수 있다.

따라서 기업은 서울-부산 간 컨테이너 운송을 하는데 있어 본 연구를 통해 전략적 의사결정을 수립할 수 있다. (그림 8)과 같이 탄소배출권의 가격이 높아질수록 기업은 탄소배출에 대한 부담이 클 수밖에 없다. 따라서 기업은 최적 포인트까지 감축을 할 것이다. 기업에서는 탄소감축대비 비용이 절감되기 때문에 어느 정도까지 감축을 할 것이냐, 감축을 위한 투자대비 효용성이 작으면 다른 곳에 투자할 것이다. 또한 탄소배출의 허용량이 최적값보다 작을 경우, 기업의 자산이 커지는 반면, 탄소가격이 낮아질수록 탄소배출에 대한 부담이 없어 최적 탄소배출지점은 기존보다 높아지며, 기업은 탄소배출 절감에 대한 노력을 상대적으로 덜하게 된다. 따라서 본 연구를 통해 기업은 마지노선을 인식하고 정부와 협상할 수 있으며, 정부는 기업의 애로요인을 분석할 수 있다.

이상 4가지 시나리오를 통해 본 연구에 대한 의의를 제시하였다. 정리하자면 정부의 탄소배출에 대한 규제가 시작되



(그림 8) 탄소배출권의 가격에 따른 최적 포인트의 변화

면 기업은 탄소배출을 고려하여 운송수단을 선택해야 하고, 탄소배출비용을 고려하여 총 비용을 계산하여 의사결정을 해야 한다. 따라서 본 논문을 통해 탄소배출권 가격의 변화, 철도 용량의 변화를 통해 기업은 컨테이너를 운송하는데 있어 최적의 운송수단 의사결정을 위한 Framework를 제시하였다. 본 논문을 통해 정부와 기업 모두 기업의 물류비 절감과 나아가 국가물류비 절감, 탄소배출규제에 대응하기 위해 현재 추진되고 있는 녹색물류 정책의 성공을 위해 정부와 기업 모두 상생하는 모델을 연구해야 한다.

본 연구의 한계점으로는 시간을 고려하지 않았다는 점이다. 연안 운송의 경우 과도한 운송시간으로 특정제품이 아니고서는 사용하지 않는 것이 일반적이다. 하지만 본 연구에서는 각 운송수단의 비용 및 탄소배출량을 비교분석하기 위해 시간을 고려하지 않았다. 만약 시간을 고려하였다면, 해상운송은 배제되고 철도운송에서도 사용률이 변화하였을 것으로 사료된다. 다른 한가지의 한계점으로는 환적시간과 환적 탄소배출을 고려하지 않았다는 점이다. 환적에 대한 탄소배출은 그 양을 산정하기 어려울 뿐만 아니라 아직 연구가 미비한 실정이다. 또한 환적시간을 정확히 산정하기 어려워 이 연구에서는 고려되지 않았다. 따라서 향후 연구

에서는 이러한 한계점을 개선하여 다음 녹색물류에 대한 연구가 진행되었으면 하는 바람이다. 우리나라의 복합운송, 예를 들어 국내 한정지 아닌 세계 여러 경로 사례를 들어 우리나라-미주 간 항로의 복합운송의 적절한 운송수단은 어느 것인지 탄소배출과 운송비용을 적절하게 고려하여 각 경로별 최적 운송수단의 의사결정 모형을 제시하는 연구를 해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 김수이 외, "저탄소 경제시스템 구축 전략 연구", 에너지경제연구원연구보고서, 2008.
- [2] 임미순 외, "녹색물류를 위한 탄소저감 정책 평가항목에 관한 연구", 한국환경경제학회지, 제25집 제4호, 2009.
- [3] Qinghua Zhu, et al., "Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises", *Journal of Operations Management*, Vol.22, pp.265-289, 2004.
- [4] Samir K. Srivastava, "Green supply-chain management : A state-of-the-art literature review", *International Journal of Management Reviews*, Vol.9, pp.53-80, 2007.
- [5] Ramudhin, A., et al., "Carbon Market Sensitive Green Supply Chain Network Design". In proceeding of the IEEE International conference on Industrial Engineering and Engineering Management(IIEEM), Singapore, December, 8-11, 2008.
- [6] Hugo, et al., "Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks", *Journal of cleaner Production : Recent advances in industrial process optimisation*, Vol.13, pp.1471-1491, 2005.
- [7] 양창호 외, "항만 내륙간 첨단 연계 운송시스템 개발방안 연구", 한국해양수산개발원, 2002.
- [8] 이성원 외, "교통분야 온실가스 감축관련: 온실가스 감축대책 등 교통환경관련규제의 거시경제효과 분석", 건설교통부, 2001.
- [9] 임영태 외, "연계성을 고려한 수송물류결절점 평가기법 연구", 국토연구원, 2005.
- [10] Ferreira, et al., "Modelling intermodal freight terminal operators", *Road and Transport Research Journal* 4, pp.4-16, 1995.
- [11] 정승주, "Hub-and-spoke 운송전략을 고려한 철도화물서비스 네트워킹디자인모형의 개발", *교통학회지*, 제 22권 제 3호, pp.167-177, 2004.
- [12] 윤동희 외, "의왕 ICD 철도수송 활성화 방안에 대한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, 2008.
- [13] 정재운 외, "지속가능 물류를 위한 TP-SD 방법론 기반의 복합 운송체계 시뮬레이션 모델 개발", *한국 시스템다이내믹스 연구*, 제 11권 제 2호, 2010.
- [14] Castelli L., et al., "Scheduling multimodal transportation systems", *European journal of operational research* 155, pp.603-615, 2004.
- [15] Ham H., et al., "Implementation and estimation of a combined model of interregional, multimodal commodity shipments and transportation network flows", *Transportation research Part B, Methodological* 39(1), pp.65-79, 2005.
- [16] Cho Jae-Hyung, et al., "An Optimal Intermodal-Transport Algorithm using Dynamic Programming", *한국산업정보학회 논문지* 11, pp.20-33, 2006.
- [17] Song Haiqing, et al., "Minimum cost delivery problem in intermodal transportation networks", *Industrial Engineering and Engineering Management, IEEE International Conference*, pp.1502-1506, 2007.
- [18] Athanasios Ziliaskopoulos, et al., "An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays", *European J. Oper. Res.* 125, pp.486-502, 2000.
- [19] 김일동 외, "수요와 재고를 고려하는 복합운송 최적운영", 한국경영과학회 춘계학술대회, 2009.
- [20] Pierre Arnold, et al., "Modeling a rail/road intermodal transportation system", *Transportation Research E* 40, pp.255-270, 2004.
- [21] 김상현 외, "회생량 모델과 CO₂ 배출량에 기초한 수출입 컨테이너화물의 운송경로 선택에 관한 연구", *Journal of the Korea Society for Marine Environmental Engineering* Vol.5, pp.19-29, 2002.
- [22] Winebrake, J., et al., "Assessing Energy, Environmental, and Exonomic Tradeoffs in Intermodal Freight Transportation", *Journal of The Air&Waste Management Association* 58, pp.1004-1013, 2006.
- [23] 박용안, "경인권 컨테이너화물의 연안운송 활성화 방안", 한국해양수산개발원, 2003.



송 병 준

e-mail : bjsong12@naver.com

2005년 성균관대학교 정보통신정책학

(공학석사)

2010년 충북대학교 컴퓨터교육과

(박사수료)

1990년~2002년 대우통신, 대우정보시스템

2002년~현 재 (주)한국무역정보통신 물류사업개발팀장

관심분야: 녹색물류, 물류네트워크최적화, 글로벌 공급망관리,

RFID, Visibility



구 제 권

e-mail : sykoo99@nate.com
2011년 인천대학교 동북아물류대학원
(물류학석사)
2011년~현 재 대우로지스틱스 근무
관심분야: 녹색물류,SCM최적화,국제물류



송 상 화

e-mail : songsh@incheon.ac.kr
1997년 KAIST 산업공학(공학사)
1999년 KAIST 산업공학(공학석사)
2003년 KAIST 산업공학(공학박사)
2003년~2006년 IBM 전문차장
2006년~현 재 인천대학교 조교수
관심분야: SCM, 물류



이 종 연

e-mail : jongyun@chungbuk.ac.kr
1987년 충북대학교 전자계산기공학과
(공학석사)
1999년 충북대학교 전자계산학과
(이학박사)
1990년~1996년 현대전자산업(주) 소프트
웨어연구소와 현대정보기술(주) CIM사업부 책임연구원
1999년~2003년 강원대학교 삼척캠퍼스 정보통신공학과 조교수
2003년~현 재 충북대학교 컴퓨터교육과 교수
2001년~2009년 IEEE member
2003년~2004년 한국정보처리학회 논문지편집위원 데이터베이
스분과, 이사 역임
2007년~2010 한국산학기술학회 이사 역임
현 재 한국정보처리학회, 한국정보과학회, 한국컴퓨터교육학회
종신회원
2010년~현 재 한국컴퓨터교육학회 이사(현)
2010년~현 재 한국융합학회장(현)
관심분야: 질의처리 및 최적화, 근사질의응(AQA), 시공간
데이터베이스, 데이터 마이닝, 유통물류, GIS,
u-Learning과 평가방법