

재활용을 고려한 역공급사슬 시뮬레이션 모델 개발

임석진* · 박병태**

*인덕대학 테크노경영과 · **명지전문대학 산업시스템경영과

A Development of Reverse Supply Chain Simulation Model Considering a Recycling

Seok Jin Lim* · Byung Tae Park**

*Dept. of Technology & Systems Management, Induk University

**Dept. of Industrial and System Management, Myongji College

Abstract

Recently, an industrial production-distribution planning problem has been widely investigated in Supply Chain Management(SCM). One of the key issues in the current SCM research area is reverse logistics network. This study have developed a simulation model for the reverse logistics network. The simulation model analysis reverse logistics network issues such as inventory policy, manufacturing policy, transportation mode, warehouse assignment, supplier assignment. Computational experiments using commercial simulation tool ARENA show that the real problems. The model can be used to decide an appropriate production-distribution planning problem in the research area.

Keywords : Reverse logistics, Production-distribution planning, Simulation, SCM

1. 서론

과거에는 제품 생산자들이 고객의 주문에 따라 비용 최소화와 신속한 배송과 같은 소비자 만족도 향상을 추구하기 위한 제품의 생산과 소비자에게 공급을 위한 하기 부문에 집중하였다. 이를 위해 최적의 공급사슬 네트워크의 설계 및 공장, 물류창고의 생산계획 및 재고관리, 배송계획 등의 설계 및 운영에 대한 많은 연구가 진행되었다.

하지만 최근 환경오염과 자원고갈로 인한 많은 문제점을 양상하고 있는 최종소비자들에 의해 사용된 제품의 사후처리 및 회수와 같은 활동에 대한 책임을 고려하지 않았다. 따라서 사용된 후 버려진 엄청난 양의 폐기물들은 대부분 소각되거나 매장되어 왔다. 또한, 유한한 천연자원과 막대한 양의 에너지의 무분별한 사용

으로 인하여 지구환경이 파괴되고 있는 현실이다.

이러한 이유로 위기의식을 느낀 전세계 국가들은 WTO등이 주축이 되어 국제 환경규제 및 환경법규강화 그리고 기후변화협약등과 같은 프로그램을 통하여 에너지 절약법의 제정, 유해물질 규제 그리고 ISO 14000과 같은 국제표준을 만들어 적극 대처하고 있다.

EU에서는 2006년 1월부터 시행한 WEEE Directive를 통하여 대부분의 가전제품에 대하여 회수/처리 의무 및 비용을 생산자가 부담하도록 하였으며 재사용/재활용을 또한 50 ~ 70% 이상, 재생율은 60 ~ 80% 이상이 되도록 강제하고 있으며 특히, '08.1 부터 납, 수은, 카드뮴, 크롬, PBB, PBDEs등과 같은 유해물질 사용금지하도록 규제하고 있다.

일본에서는 '01.4부터 가전 리사이클법을 시행하여 냉장고, 세탁기, 에어컨, TV와 같은 대상 제품에 대하

† 본 연구는 인덕대학 학술연구비 일부지원에 의해서 수행되었음.

† 교신저자: 임석진, 서울특별시 노원구 월계4동 산76 인덕대학 테크노경영과

M · P: 011-314-5448, E-mail: bigteach@induk.ac.kr

2009년 10월 19일접수; 2009년 12월 9일 수정본 접수; 2009년 12월 9일 게재확정

여 회수/처리비용은 소비자가 부담하고 회수/처리의무는 생산자가 담당하여 재활용율을 50% ~ 60% 이상 되도록 실시하고 있다.

국내에서는 2001년 1월부터 시범시행하고 '03.1부터 본격시행한 자원의 절약과 재활용촉진에 관한법률에 의하여 냉장고, 세탁기, 에어컨, TV와 같은 대상제품에 대하여 회수비용은 소비자 부담하지만 회수/처리의무 및 처리비용은 생산자 부담하게 하는 정책을 시행중이다.

이러한 자원보전 및 환경오염방지를 위한 국제규제 등과 같은 활동의 필요성으로 인해 국가 뿐 아니라 제품생산기업도 폐기물 회수 및 폐기처분 활동에 참여해야만 하는 상황에 직면해있다.

본 연구에서는 가전제품을 생산공급하는 공급사슬상에서 고객의 주문에 따른 생산 및 재고계획의 수립과 동시에 폐가전을 회수하여 재활용 및 처리과정을 다루는 시뮬레이션모델에 관한 것이다.

2. 역공급사슬 모델

2.1 공급사슬

공급사슬 (Supply Chain)이라함은 원재료부터 고객에 이르기까지의 전과정을 이르는 말이며, 공급사슬을 구성하는 공급자, 생산자와 같은 각 부분들 사이의 물류, 정보, 자금의 흐름을 총체적으로 관리하여 공급사슬의 효율을 증가시키는 전략에 관한 연구이다 (Thomas and Griffin, 1996).

그림 1은 공급사슬에 대하여 설명하는 것이다.

고객의 요구에 따라 제품을 생산하는데 소요되는 생산비용과 원재료와 완제품을 보관비용, 공급자에서 생산자로, 생산자에서 수요자에게 원재료나 제품을 운송하는데 소요되는 운송비용 등 공급사슬 전과정에서 발생하는 비용을 최소화하고 동시에 고객서비스를 만족시키기 위한 재고관리, 생산계획 및 통제, 수송계획 등 각 활동을 통합적으로 관리하고자 하는 데 목적이 있다.

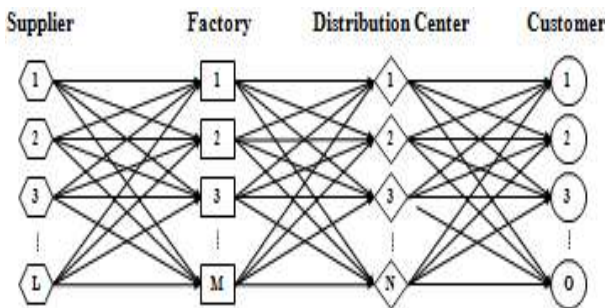


그림 1. 공급사슬 모형

즉 고객의 주문량에 따라 지리적으로 분산되어 있는 생산자들중 제품의 생산을 담당할 생산자를 선정하고 생산량을 할당하고 창고에 보관할 재고량을 결정하고 각 부분간 운송량의 결정을 재고비용, 생산비용, 운송비용등의 합을 최소화하기 위한 최적 생산-분배 모형을 제시하고자 하는 많은 연구가 수행되었다.

Chandra 와 Fisher(1994)는 single production facility, multi-product에서 고정비용, 재고비용, 운송비용을 최소화하기 위한 production scheduling과 vehicle routing 문제를 연구를 수행하였다. Ingalls(1998)는 시뮬레이션을 이용하여 공급사슬을 분석하기 위한 분석적 방법론을 제안하였다. Evans(1998) 등은 물류시스템의 동적양태에 대하여 시뮬레이션하고 모델링하기 위한 일반적인 방법론을 제안하였다.

2.2 국내 가전제품 재활용 시스템

환경오염감소와 자원재활용과 같은 시대적 요구로 인해 국내 가전업계 대응은 다음과 같다. 2000년 6월 1일부터 폐전자제품 생산자 재활용활동을 위해 생산자가 재활용체 운영을 위한 생산자전담기구를 설치하여 운영중이며 권역별 폐전자제품 재활용센터 설치, 운영중이다.

권역별로 설치된 재활용센터의 현황을 보면 다음과 같이 구축되어 운영되고 있다. 수도권은 가전3사가 주축이 되어 2003년 06월에 경기도 용인시에 설치되었으며 중부권은 충남 아산에 설치가 되어 1998년 05월부터 가동중이다. 영남권은 경상남도 칠서에 설치가 되어 2001년 07월에 설되었으며 호남권은 전남 장성에 2008년 2월에 설치하여 가동중이다. 또한 제주도에도 2006년 4월에 설치되어 운영중이다. 2003년에 연간 91만대 처리용량규모로 구축되어 운영중이며 특히, TV및 초과물량은 협력업체를 육성하여 활용되고 있다. 2007년 현재 전국 설치된 5개 리사이클링센터를 통해 10만6000톤의 폐가전제품을 재활용처리하고 있다.

또한, 제품의 설계/제조단계부터 재활용 용이한구조로 설계하도록 하였으며 환경성을 고려한 재질 및 생산공정을 개선하려는 노력을 보이고 있다. 또한, 정부에서는 폐기물예치금 부과 면제 및 협약기업을 지원하는 등 다양한 지원체계를 구축하고 있다.

폐가전이 처리되는 경로는 다음과 크게 3가지로 구분하여 처리되고 있다. 우선 가장 대표적인 회수형태로서 가전제품을 생산하는 업체들이 신제품을 팔면서 헌 제품을 수거해 오는 경우다. 전체 회수량의 62%가량이 이렇게 회수된다. 두 번째는 가정에서 쓰레기 종량제 스티커를 붙여 배출하는 것이다. 이렇게 지자체가 처리하는 게

30%가량 된다. 마지막은 제사용업자들에게 팔려나가는 경우다. 판매 대리점을 통해 상당수가 회수되고 지자체 물량도 협약을 맺어 대부분 센터로 모아져서 처리된다.

2.3 역공급사슬 모형

공급사슬은 고객주문에 의해 공급자로부터의 원재료 조달, 생산자에서 생산 그리고 고객에 전달하는 전방향 흐름(Forward flow)을 통하여 제품을 공급하였으며 이 과정에서 생산량, 재고량, 운송량 등을 결정하였다.

역공급사슬(Reverse Supply Chain)은 이러한 전방향 흐름을 통해 공급된 제품에 대해 사용 후 폐기되는 제품으로 인해 불가피하게 발생하는 폐기물의 양을 최소화 할 수 있도록 제품 및 폐기물의 발생을 최소화하기 위한 생산방법, 소비방법, 물류시스템으로의 대체화 방안에 대한 연구를 실시하였다. 또한 제품수명을 다했거나 했거나 사용중 고장, 또는 신제품과 대체하면서 발생되는 유해하거나 유해하지 않은 제품 및 포장재 등의 폐기물 모두를 역방향흐름(Backward flow)을 통하여 재회수하고 분류한 후 자원의 특성에 따라 제사용·재활용을 위하여 필요한 적정 프로세스를 실시할 수 있는 곳으로 전달하여 부가가치를 재창출하는 활동과 관련된 모든 물류관리 기술 및 활동 전체를 의미한다.

그림 2는 공급사슬에 대하여 설명하는 것이다.

제품수명을 다하거나 사용중 파손 등에 의해 발생한 제품 및 포장재 등과 같은 폐기물을 곧바로 매립 또는 소각과 같이 최종 폐기처리하지 않고 수거한 후 적절히 분류하고 필요시 이차 프로세스를 통해 최대한 재사용될 수 있도록 하는 환경친화적 SCM이다.

역공급사슬 설계시 다음과 같은 요소를 고려하여야 한다.

- (1) 폐기물의 수거방법 및 위치
- (2) 제사용 또는 폐기물의 분류를 위한 거점이 위치
- (3) 수거된 폐기물의 처리를 위한 일정 및 이동계획
- (4) 폐기물 수거, 분류, 처리를 위한 정보의 수집과 활용방안

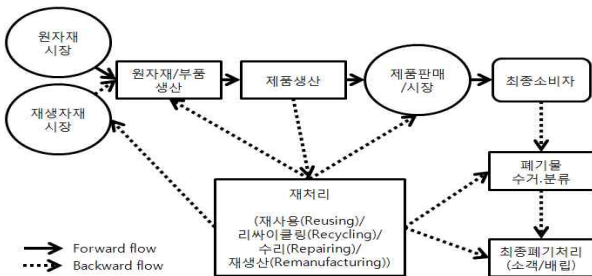


그림 2. 역공급사슬 모형(김현수, 2001)

3. 역공급사슬 모델링

3.1 모델링 방법론

본 연구의 대상이 되는 역공급사슬에는 기존의 공급사슬상에 존재했던 고객의 수요, 제품의 생산 시간, 운송 시간 등과 같은 요소뿐 아니라 폐기물의 회수량과 같은 여러 불확실성 요소를 포함하고 있다. 이로 인해 역공급사슬 전체의 모델링과 분석에 있어 고도의 기술이 요구되며 다양한 방법론이 연구 개발되고 있다.

기존 공급사슬에서 연구되었던 확정적 모델(Deterministic Model)을 다루는 최적화(Optimization)와 확률적 모델(Stochastic Model)을 다루는 시뮬레이션(Simulation)과 같은 방법론이 연구되었다. 모델의 특성상 공급사슬에 존재하는 여러 불확실성을 다루는데 있어 최적화 방법론에 비해 시뮬레이션에 대한 많은 연구가 수행되었다.

이에 본 연구에서는 역공급사슬상의 불확실성을 모델링에 반영할 수 있으며 또한 이에 대한 분석을 통해 기업의 의사결정에 활용할 수 있는 장점으로 시뮬레이션을 이용한 모델링을 수행 할 것이다.

3.2 본 연구에서의 역공급사슬 모형

본 연구에서는 역공급사슬상에서 고객이 요구한 처리대상물을 분배센터(Distribution Center)와 수집센터(Collection Center)에서 1차 회수 및 처리하여 이를 공장으로 보내 재사용하거나 폐기하는 구조를 가진 모형이다.

다음 그림 3은 본 연구에서 고려하는 역공급사슬 모형을 나타낸 것이다.

고객은 처리대상물에 대하여 Recall과 Recycle을 요구하며 이를 제조업체가 고객에게서 처리대상물을 수거하여 분배센터나 수집센터에서 분류 및 재활용처리 작업을 수행하는 구조를 가진다.

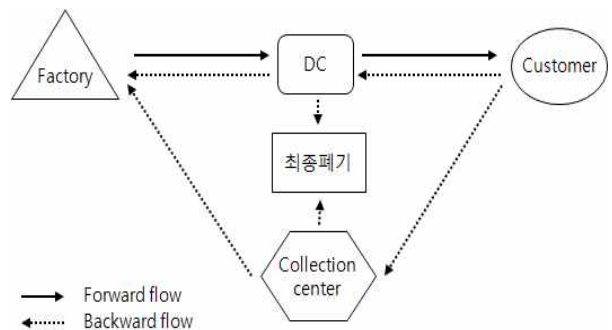


그림 3. 본 연구에서의 역공급사슬 모형

고객의 주문량에 대하여 Factory에서는 생산량과 재고량이 결정되어 생산되며 이후 고객에게서 회수한 처리대상물을 분배센터와 수집센터의 재고보유량을 분석하여 처리할 대상물을 보관할 센터를 결정하고 처리대상물의 처리결과에 따라 Factory의 생산량과 재고량을 재조정하는 모형이다.

3.3 시물레이션 모델링

본 연구에서 시물레이션으로 모델링을 수행하기 위해 정의된 개체, 변수 및 각종 통계량을 정리한 내용은 다음 그림 4와 같다.

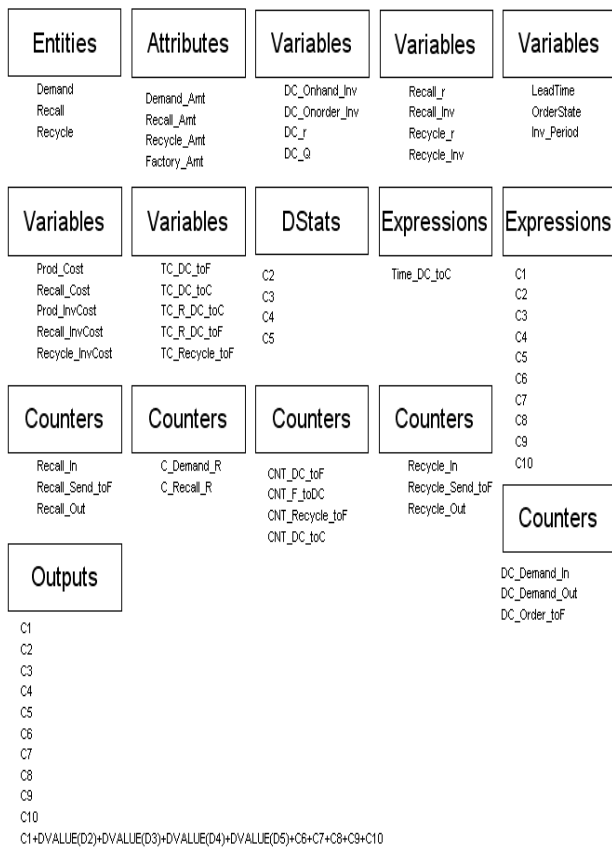


그림 4. 개체, 변수, 통계량

역공급사슬을 위한 시물레이션모델은 주문에 의한 생산 및 재고량을 결정하기 위한 Forward, 고객의 회수요청사항인 고장의 수리를 요구하는 Recall과 수명이 다하거나 고장에 따른 재활용처리를 요청하는 Recycle로 모듈을 구분하여 재고량을 고려한 처리장소를 결정하며 처리후 공장의 재고상황을 고려하여 분배센터와 수집센터에의 보관여부 및 공장으로 운송량을 계산한다.

다음 그림 5는 Forward Flow를 위한 모델링한 결과를 나타낸 그림이다.

Forward Logistics

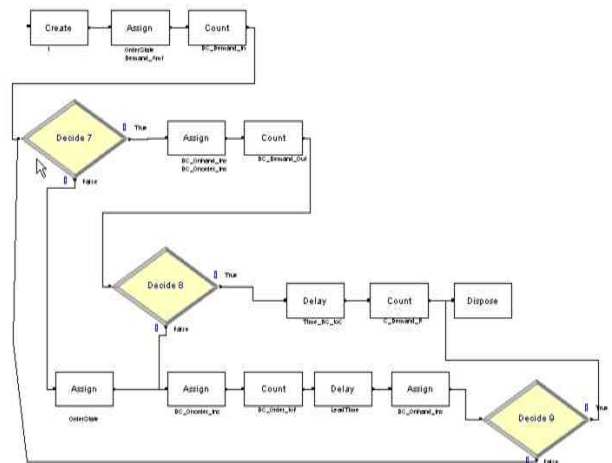


그림 5. Forward Flow 모델

다음 그림 6은 Recall 처리를 위한 모델링한 결과를 나타낸 그림이다.

Recall

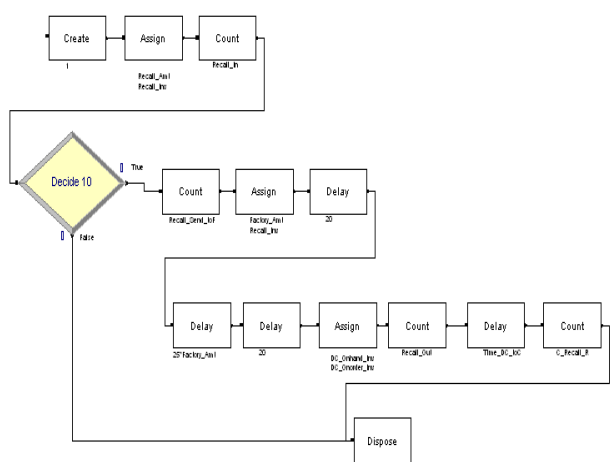


그림 6. Recycle 처리 모델

다음 그림 7은 Recycle 처리를 위한 모델링한 결과를 나타낸 그림이다.

Recycle

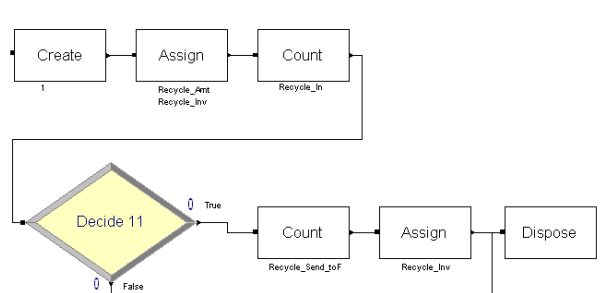


그림 7. Recycle 처리 모델

4. 실험 및 결과분석

4.1 실험데이터

본 연구를 위하여 가전제품의 생산과 회수에 대한 데이터를 활용하여 개발된 모델에 적용하여 유효성과 실용성을 검증하였다.

고객의 주문에 의해 생산이 이루어지고 가전업체의 통계자료를 일부 적용하여 본 연구에서 개발한 모델을 실험하기 위하여 이용된 데이터는 다음과 같다. (한국 전자산업환경협회, 2001). 개발된 시뮬레이션 모델을 실험하기 위한 역공급사슬의 구성은 다음 표 1과 같다.

표 1. Network Condition

단위:개

Factory	DC	Customer	Recycle Center
1	1	1	1

수요와 회수된 폐기물에 대한 Recycle 및 Recall 처리를 위한 데이터는 다음 표 2와 같다.

표 2. Demand and Recycle Quantity

	Demand	Recycle	Recall
Quantity	Unif(10,20)	Unif(3,5)	Unif(1,2)

회수된 폐기물에 대한 Recycle 및 Recall 처리비용, 수집장소 및 처리장소에 대한 데이터는 다음 표 3과 같다.

표 3. Demand and Recycle Quantity

	Rate	Collection Site	Working Area
Recycle	58 %	R/C	Factory
Recall	16 %	D/C	Factory
Dispose	26 %	R/C	Factory

고객에 배송하기 위한 신제품의 생산 및 회수된 폐기물에 대한 Recycle 및 Recall 시간에 대한 데이터는 다음 표 4와 같다.

표 4. 제품생산 및 재활용 작업시간

단위:min

New Product	Recall(Disassembly+Repair)	Recycle/Dispose
10	25	15

역공급사슬의 구성요소들간의 이동거리는 다음 표 5와 같다.

표 5. Network Condition

	Factory	Customer
DC	20min	TRIA(30,45,60)
RC	40min	TRIA(30,60,120)

실험을 위하여 사용되는 Product당 관련비용에 대한 데이터는 다음 표 6과 같다.

표 6. Relevant cost

	Factory	DC	RC
Production	1 \$		
Disassembly	0.5 \$		
Recall	1 \$		
Inventory	0.03 \$	0.2 \$	0.02 \$
Transportation	0.02 \$	0.0005 \$	0.001 \$
Collection	0.02 \$	0.01 \$	0.01 \$

역공급사슬내의 각 구성요소에서의 초기재고량, 주문량, 재주문점 데이터는 다음 표 7과 같다.

표 7. Initial Data

	Inventory	Order	Reorder Point
DC	1,000	3,000	500
RC	-	1,000	-
Recall	-	150	-

4.2 실험 결과 및 분석

실험을 통한 결과는 각 공장으로 생산하여 고객에 분배되고 수명이 다한 폐기물을 회수하여 DC와 Recycling Center로 입고되고 재활용처리되어 재사용되거나 창고에 저장 그리고 폐기되는 양을 산출할 수있다. 이러한 생산량과 재고량에 따른 생산비용, 재고비용, 재활용비용 그리고 운송비용을 포함하는 총비용을 시뮬레이션을 통해서 도출하였다.

본 연구에서 개발한 모델은 공장, DC, Recycling Center 그리고 고객은 각각 1개로 구성되었다. 시뮬레이션 Runtime은 안정상태의에서 2,400분을 실험하였다.

실험데이터를 이용하여 개발된 시뮬레이션모델에 적용한 실험한 결과는 다음과 같다.

시뮬레이션 결과 고객주문량과 폐가전 회수요구량은 다음 표 8과 같다.

표 8. 고객주문량과 폐가진 회수요구량

단위:개

구분	주문량	폐가진 회수량
수량	33,292.00	1,331.00

시뮬레이션 결과 DC, Recall, Recycle에서의 In, Out 양은 다음과 표 9와 같다. 시뮬레이션 모델시 각 요청 작업에서의 초기재고부여에 따른 수량이 증가로 In/Out 시 수량이 높게 나타나 있음을 알 수 있다.

표 9. 각 요청 작업에서의 In/Out량

단위:개

구분	수량	
DC	In	34,757
	Out	34,661
Recall	In	3,606
	Out	1,387
Recycle	In	8,426
	Out	6,732

시뮬레이션 결과 DC, Recall, Recycle에 따른 Factory로의 운송량은 다음 표 10과 같다.

표 10. 각 요청 작업에서의 운송량

단위:개

구분	수량
DC에서 Factory로의 운송량	35,503
Recall에서 Factory로의 운송량	3,604
Recycle에서 Factory로의 운송량	8,372

역공급사슬의 각 구성요소에서의 공정중 재고현황(WIP)은 다음과 표 11과 같다.

표 11. 각 작업에서의 WIP 현황

단위:개

구분	Factory	Recycle	Recall
수량	44,5239	0	27,231

실험결과 얻어진 제품생산비와 재활용을 위한 처리비용은 다음 표 12와 같다.

표 12. 작업에 따른 처리비용

단위:\$

구분	수량
주문에 따른 생산비	35,503.000
Recall 처리비용	5,406.000
합계	40,909.00

실험결과 얻어진 각 작업중에 발생한 재고를 위한 재고비용은 다음 표 13과 같다.

표 13. 관련재고비용

단위:\$

구분	수량
공장 및 DC에서 재고비용	3,018.500
Recall과정에서 재고비용	8.000
Recycle과정에서 재고비용	216.000
합계	3,242.50

실험결과 얻어진 각 구성요소간 제품 및 작업 요청된 폐기물의 운송작업중에 발생한 운송비용은 다음 표 14와 같다.

표 14. 관련운송비용

단위:\$

구분	수량
DC에서 고객으로 운송비용	17.330
Recycle요청에 의한 DC에서 고객으로의 운송비	1.387
Recycle요청에 의한 공장으로서의 운송비	2.093
Recycle요청에 의한 DC에서 공장으로서의 운송비	3.604
DC에서 공장으로서 운송비	17.751
합계	42.165

실험결과 얻어진 각 Factory와 DC와 같은 구성요소에서 제품 및 Recall과 Recycle작업을 수행하기 위한 생산비용, 재고비용, 운송비용을 합한 총비용은 다음 표 15와 같다.

표 15. 관련비용

단위:\$

구분	수량
생산비용	40,909.00
재고비용	3,242.50
비용	42.165
합계	44,193.67

5. 결 론

기업이 경쟁력 확보를 위한 수단으로 생산-분배네트워크의 설계와 구축 그리고 이를 효율적으로 운영하기 위한 다양하고 많은 방법이 연구되어 왔다. 그러나 환경에 대한 인식제고와 규제 등으로 인한 사회적요구로 제품의 전 수명주기에 대한 관리와 폐기물의 처리하기 위한 역공급사슬에 대한 연구의 필요성이 대두되었다.

본 연구는 다품종의 제품이 factory에서 customer로의 운송을 위한 생산량, 재고량을 고려한 최적생산-분배결정과 customer에게서 회수한 폐기물의 효율적 처리를 고려한 역공급사슬에 관한 연구이다. 가전제품을 대상으로 최적생산-분배방법 결정을 위해 customer의 주문량에 따른 factory의 선정과 factory에서의 제품 생산량을 할당하고 수명이 다한 폐가전을 회수하여 재활용 또는 폐기처분하기 위한 회수경로 및 창고의 선정 및 재고보유량 등을 결정하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

본 연구에서는 상업용 시뮬레이션 개발 소프트웨어인 Arena를 이용하여 역공급사슬을 모델링하였고 이에 대한 유효성을 평가하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험한 결과 본 연구에서 시뮬레이션 모델이 고객의 수요를 바탕으로 한 역공급사슬의 생산-분배-회수업무를 수행하는데 있어 유효한 결과를 도출함을 알 수 있었다.

본 연구를 바탕으로 기업의 불확실성이 존재하는 역공급사슬에 있어 최적 공급-분배-회수모형의 개발을 손쉽게 수행 평가함으로써 비용과 시간면에서 경쟁력을 확보할 수 있으며 동시에 고객서비스의 향상을 도모할 수 있을 것이다.

향후 연구과제로는 본 연구의 결과를 실제현장에 적용하여 실제 상황을 반영한 multi-stage상황에서의 최적 생산-분배-회수결정방법에 대한 연구의 확장과 외주생산 등을 고려한 연구도 수행하여야 할 것이다.

6. 참 고 문 헌

[1] Cohen, M and Lee, H, "Strategic analysis of integrated production-distribution systems: models and methods", *Operations Research*, 36, 216-228, 1988.
 [2] Erenguc, S, S., Simpson, N and Vakharia, A, J., "Integrated

production/distribution planning in supply chains: An invited review", *European Journal Of Operational Research*, 115, 219-236, 1999.

[3] Evans, G N M M Naim and D R Towill, "Application of a simulation methodology to the redesign of a logistical control system", *International Journal of Production Economics*, 56-57, 157-168, 1998
 [4] Ingalls, R. G., "The value of simulation in modelling supply chain", *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1371-1375, 1998.
 [5] Thomas, Griffin, "Coordinated Supply Chain Management", *European Journal of Operational Research*, 94, 1-15, 1996.
 [6] 김현수, 한대희, 이인철, "환경을 고려한 역물류시스템의 사례 연구", *산업경영시스템학회지* 제 24권 제 66집, 2001
 [7] 한국전자산업환경협회, "폐가전제품 회수 및 재활용 실태조사", 2001.

저 자 소 개

임 석 진



연세대학교 산업시스템공학과 공학박사, 한국과학기술연구원(KIST) Post-Doc., 인덕대학 테크노경영과 재직중.

주소 : 서울특별시 노원구 초안산길 14

박 병 태



고려대학교 산업시스템정보공학과 공학박사, 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원, 명지전문대학 산업시스템경영과 재직중.

주소 : 서울특별시 서대문구 홍은2동 356-1