



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

다수의 유한 재생산률을 고려한
동적 폐기물 회수계획 및 다종제품
재생산계획문제에 관한 연구



2015년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 술 경 영 협 동 과 정

김 종 수

공 학 석 사 학 위 논 문

다수의 유한 재생산물을 고려한
동적 폐기물 회수계획 및 다종제품
재생산계획문제에 관한 연구

지도교수 이 운 식

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2015년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 술 경 영 협 동 과 정

김 종 수

A Study on a Dynamic Waste Withdrawing and Multi-Product Remanufacturing Planning Problem with Multiple Finite Remanufacturing Rates

Advisor :Prof. Woon-Seek Lee

by
Jong-Su Kim

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of
Master of Engineering

Interdisciplinary Program of Management of Technology, The
Graduate School,

Pukyong National University

August 2015

김종수의 공학석사 학위논문을 인준함.

2015년 8월 21일



주 심 공학박사 김 민 수 (인)

위 원 공학박사 서 원 철 (인)

위 원 공학박사 이 운 식 (인)

목 차

그림 목차	ii
표 목차	iii
요약	iv
Abstract	v
I. 서 론	1
1. 연구의 목적과 필요성	1
가. 국내 · 외 연구동향	5
2. 연구 목표 및 내용	9
가. 연구 대상문제의 정의 및 연구 목표	9
나. 연구 대상문제의 내용 및 범위	4
3. 연구의 추진전략 및 방법	11
II. 수리모형	13
1. 회수비용함수	13
2. 재생산비용함수	13
3. 재고유지비용함수	14
III. 최적해의 성질	17
IV. 동적계획법 알고리즘	23
V. 수치예제	28
VI. 결 론	33
참고문헌	36
[부록]	39

그림 목 차

<그림 I.1> 폐윤활유 회수 및 재활용 체계도	4
<그림 III.1> 문제 P 의 네트워크 표현	16
<그림 III.2> 최적 재생산계획의 예	20
<그림 III.3> $d_{0_4}(0,2)$ 계산을 위한 비순환네트워크	30
<그림 III.4> 최단경로 계산을 위한 비순환네트워크	32



표 목 차

<표 I.1> 연도별 폐윤활유 회수 및 재활용 현황	2
<표 I.2> 관련 연구 정리	8
<표 V.1> 관련 자료의 요약	29
<표 V.2> $d_{uv}(k,l)$ 와 $f_v(l)$ 의 계산 요약	31



다수의 유한 재생산률을 고려한 동적 폐기물 회수계획 및
다종제품 재생산계획문제에 관한 연구

A Study on a Dynamic Waste Withdrawing and Multi-Product
Remanufacturing Planning Problem with Multiple Finite
Remanufacturing Rates

요 약

본 연구는 한 종류의 컨테이너 용기를 사용하여 폐기물을 회수하고 매기간 다수의 유한 재생산률 $\{0, P, \dots, mP\}$ 내에서 폐기물을 재생산하는 회수 및 재생산 계획 문제를 연구한다. 여기서 재생산률 P 는 재생산설비의 재생용량이고 m 은 양의 정수이다. 회수비용은 각 컨테이너 용기의 사용대수에 비례한다. 계획기간 동안 매기간 동적으로 발생하는 다종 제품의 수요를 만족시키기 위해 폐기물 투입량의 일정비율 ($0 < \alpha_i < 1$)로 재생산되어진다. 또한, 설비시동비용은 연속되는 재생산 기간들의 첫 번째 재생산 시점에서만 발생된다. 관련비용(폐기물 회수와 재고비용, 재생산품의 재생산과 재고비용) 함수는 오목함수를 가지며 추후조달은 허용되지 않는다. 본 연구의 목적은 다종 제품의 동적 수요를 만족하는 총비용을 최소화하기 위한 최적의 회수 및 재생산 계획을 동시에 결정하는 것이다. 본 연구에서는 최적해 특성을 규명하고, 이를 기초로, 최적 계획을 수립하기 위한 동적계획법 알고리즘을 제안한다. 또한, 네트워크 모형이 (u, v) -문제에 대한 최적해를 효율적으로 찾기 위해서 제안된다. 최종적으로 알고리즘 적용을 위한 절차를 수치 예제를 통해 설명한다.

Keywords : 회수계획, 재생산계획, 다수의 유한 재생산률, 동적 수요, 동적계획법

다수의 유한 재생산률을 고려한 동적 폐기물 회수계획 및
다종제품 재생산계획문제에 관한 연구

A Study on a Dynamic Waste Withdrawing and Multi-Product
Remanufacturing Planning Problem with Multiple Finite
Remanufacturing Rates

Abstract

This paper considers a withdrawing and remanufacturing planning problem, in which wastes are withdrew by a container and can be remanufactured at each period by any value in the set $\{0, P, \dots, mP\}$ where the rate P is the increment of a remanufacturing capacity and m is a nonnegative integer. The freight cost is proportional to the number of containers used. The multiple products are remanufactured by each taking a fixed portion $(0 < \alpha_i < 1)$ of the input wastes to satisfy dynamic demands of each product over a discrete and finite time horizon. Also, a start-up cost is only incurred at the first period of a remanufacturing block which is consecutively remanufactured. It is assumed that the related cost (withdrawing and inventory holding costs of the wastes, and the remanufacturing and inventory holding costs of the remanufactured products) functions are concave and backlogging is not allowed. The objective of this paper is to simultaneously determine the optimal withdrawing and remanufacturing plans that minimize the total cost to satisfy dynamic demands of the multiple products. In this

paper, the optimal solution properties are characterized and then, based on these properties, a dynamic programming algorithm is presented to find the optimal plan. Also, a network model is proposed to efficiently find the optimal solution to (u,v) -subproblems. Finally, the procedure for applying the algorithm is illustrated by a numerical example.

Keywords : withdrawal planning, remanufacturing planning, multiple finite remanufacturing rate, dynamic demands, dynamic programming



I. 서론

1. 연구의 목적과 필요성

산업혁명 이래로 생산자들은 보다 많은 이익을 위해, 그리고 소비자들은 제품의 다양한 욕구를 만족시키기 위해, 보다 많은 종류의 제품들을 생산해 오고 있다. 그러나, 급격한 소비제품의 증가와 함께 제품이 수명을 다하게 될 때 폐기처분되어야 하는 폐제품의 양 또한 기하급수적으로 증가되고 있다. 따라서 소각 또는 매립 등을 통한 폐기처분의 결과로 지구는 환경적으로 엄청난 피해를 입고 있으며, 제품 수명기간의 단축으로 인한 신제품의 생산은 제한적으로 매장되어 있는 지구의 천연자원 및 에너지자원을 급속도로 고갈시키고 있다. 이러한 이유로 선진국을 중심으로 환경친화적인 제품의 생산과 유통 그리고 재활용을 위하여 국제표준을 제정하고 세계적으로 이 규격을 엄격히 준수토록 요구하고 있다. 자원이 부족한 우리나라의 경우, 폐기물의 발생을 최소화하고 재활용을 활성화하여 환경적으로 바람직한 사회 기반을 확립하기 위한 여러 방안들을 제시하고 있는 현실을 감안할 때 제품의 재생산(remanufacturing) 및 재사용(reuse) 개념은 매우 중요하다. 우리나라의 2004년도 폐기물 발생량은 227만톤을 넘어섰고 2005년도 재활용품 수출량은 24,313톤으로 2002년 대비 8배에 달하는 성장세를 보이고 있어 매년 관련 재활용산업은 증가하고 있는 실정이다. 특히 중동지역의 정치불안과 함께 중국 및 인도 등을 포함한 신흥개발국들의 에너지 사용량의 급격한 확대는 에너지자원의 고갈과 더불어 원유가격을 폭등시키는 요인으로 작용하고 있어 신재생에너지 기술의 필요성과 경제성을 한층 부각시키고 있다.

본 연구에서 다루는 재생산계획문제는 고장 또는 폐기된 제품을 대상으로 필요한 수리를 실시하여 제품을 다시 새롭게 사용하는 재생산계획문제가 아니라, 폐유, 폐플라스틱, 폐유기용제, 폐식용유, 폐페인트, 폐타이어

등과 같이 재생산 장치설비를 통해 재생에너지로 새롭게 생산되는 재생산 계획문제를 다룬다. 특히 폐유는 카드뮴, 납, 크롬, 비소 등의 중금속 성분 및 클로린계통의 할로겐 등의 불순물을 포함하고 있어서 소각시설이 아닌 곳에서 태워서는 안되며(악취방지법), 점도가 높아 분사력이 약하여 연소 시키기 어렵고, 회분의 포함량이 많아 불완전연소가 되므로 반드시 정제하여 연료유로 사용하여야 한다고 법령으로 명시하고 있다. <표 1>은 2008 년도까지의 연도별 폐유회수 및 재활용 현황을 보여준다 (한국석유재활용협회). 더구나 유회수에서 발생하는 폐유회수가 폐유의 약77%를 차지하고 있다.

<표 1> 연도별 폐유회수 및 재활용 현황 (단위: 드럼)

구분 (년)	유회수 출고량	폐유회수					경제연료유		
		발생량	회수량	회수율	처리량	재고량	생산량	판매량	재고량
2000	1,503,547	1,052,483	727,139	69.10%	723,477	16,816	633,939	626,278	22,411
2001	1,577,580	1,104,312	589,241	53.40%	573,062	32,995	491,052	489,054	24,409
2002	1,615,648	1,130,954	764,454	67.60%	773,118	26,272	683,874	682,199	22,218
2003	1,671,685	1,170,179	809,136	69.10%	803,560	31,831	714,751	712,260	23,834
2004	1,713,893	1,199,725	805,913	62.70%	811,293	23,734	729,341	728,179	25,107
2005	1,681,122	1,176,785	789,810	67.10%	794,385	17,037	705,338	694,151	36,293
2006	1,601,389	1,120,972	789,985	70.47%	729,118	77,904	704,166	697,749	38,307
2007	1,728,444	1,209,911	853,502	70.54%	819,606	111,799	773,724	771,710	40,321
2008	1,653,933	1,157,753	837,021	72.30%	779,209	169,611	748,312	740,903	47,730

폐유를 정제하여 얻어지는 정제연료유는 발열량이 등유 및 경유에 비해 약7%정도 높고 가격은 약15~20%이상 저렴하여 에너지 절감효과를 가져올 수 있음을 물론 모든 산업용 연료의 대체에너지로 활용될 수 있는 경제성을 가진다 (한국환경자원공사).

또한, 생산자책임재활용제도(EPR : Extended Producer Responsibility)를 통해 재활용 의무 대상 유회수를 수입·제조하는 자는 사용 후 발생한 그 폐기물을 스스로 회수하여 재활용하거나, 재활용사업공제조합에 분담금을 납부하거나, 회수·처리업체에게 위탁 처리하도록 법령

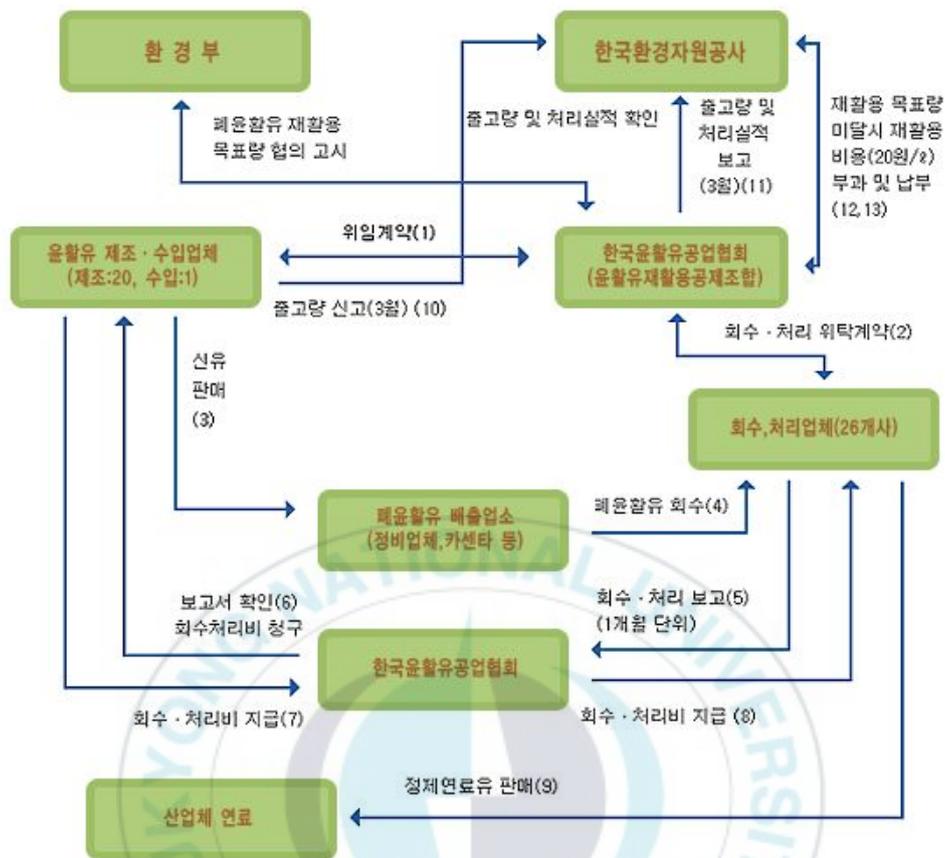
으로 정하고 있다. <그림 1>은 폐윤활유에 대한 회수 및 재활용 체계도를 보여준다 (한국윤활유공업협회).

본 연구는 탈수, 열교환, 증발, 응축과 같은 재생설비를 통해 폐유 등을 정제할 때, 등유, 벙커C유 및 코우크스 등의 부산물들이 일정비율로 산출되는 재생산업으로부터 동기화된다. 이러한 재생산업에서는 폐유 등을 다양한 컨테이너 용기를 갖춘 특수차량을 이용하여 회수한 후, 한 번에 정제할 수 있는 제한된 용량(유한 재생산물 P)의 정제장치를 이용하여 등유, 벙커C유 및 코우크스 등의 다종제품을 일정비율($0 < \alpha_i < 1$, $\sum_{i=1}^M \alpha_i = 1$)로 산출되고 이를 수요자가 요구하는 수요량과 시점에 맞추어 수요를 충족시키게 된다. 따라서 이러한 재생산업에서 발생하는 의사결정문제는 일정비율로 재생되는 다종제품에 대한 수요량을 최소비용으로 만족시키기 위해,

- 1) 각 기간별로 사용될 폐기물을 얼마만큼 회수할 지?
- 2) 각 기간별로 어떤 컨테이너 용기를 사용할 지?
- 3) 각 기간별로 얼마만큼의 폐기물을 재생 처리할 지?

를 동시에 결정하는 문제가 된다.

이러한 회수 및 운송 계획 그리고 재생산계획에 따라 폐기물 및 재생품에 대한 재고문제가 더불어 파생되어 2단계 의사결정 구조의 회수(운송)-재고 및 생산-재고 문제가 동시에 발생됨을 알 수 있다. 본 연구에서 의사결정 상 제약조건으로는 폐기물 회수를 위해 사용되는 컨테이너 용기의 크기 W_n (혹은 차량의 적재용량)과 각 기간내 재생산설비의 일회 재생용량 P 인 유한 재생산물과 기간별 최대 재생산률 mP 가 된다.



<그림 1> 폐운할유 회수 및 재활용 체계도

본 연구에서는 폐유 등을 정제하는 재생산업에서의 폐기물 회수 및 운송 계획과 다종제품에 대한 재생산계획을 동시에 수립할 수 있는 최적 운영전략을 개발하고 실시간에 최적 운영전략을 찾을 수 있는 탐색 알고리즘을 제안하고자 한다. 결과적으로, 재생산시스템의 최적 운영을 위한 이론적 토대를 제공함으로써 에너지 절감을 위한 신재생에너지 분야의 생산 운영기술을 창출하여 재생산업을 선도하고 고도화시키는 데 일조하고자 한다.

가. 국내·외 연구동향

본 연구와 기존 연구들과의 관련성과 차별성을 정리하고 분류하기 위해 다음과 같이 국내·외 연구 동향을 소개한다.

(1) 전통적인 동적 생산계획문제

동적생산계획문제(DLSP : dynamic lot-sizing problem)는 일반적으로 생산-재고 시스템에서 알려져 있는 동적 수요를 최소의 비용으로 만족시킬 수 있도록 생산량과 생산시기를 결정하는 문제로 Wagner와 Whitin(1958)에 의해 처음으로 연구되었다. 그 이후 Wagner-Whitin모형을 확장시킨 많은 연구들이 이루어졌으며 이를 간단히 소개하면 다음과 같다. Zangwill (1966, 1969)은 추후조달(backlogging)이 허용되는 동적 생산계획문제를 분석하였으며 Sobel (1970)은 설비시동비용(Start-Up Cost)을 고려한 문제를 다루었다. Florian과 Klein (1971), Love (1973), Swoveland (1975), Baker et al. (1978), 그리고 Lambert와 Luss (1978) 등은 Wagner-Whitin모형을 생산용량이 제한된 여러 가지 동적 생산계획문제들로 확장시켜 분석하였다. Sethi와 Chand (1981)는 다수의 유한 생산물을 갖는 동적 생산계획모형을 분석하였다. 이운식과 성창섭 (1994, 1995)은 설비시동비용(start-up)을 갖는 동적생산계획문제에서 연동적 계획기간에 관한 연구와 유한 생산물을 갖는 동적생산계획문제에서 생산준비비용의 절감 효과에 관한 연구를 수행하였다.

(2) 재생산계획문제

DLSP의 활발한 연구가 진행되고 있는 동안 많은 국가에서 폐자원을 재활용할 수 있는 제품의 생산단계 이전인 설계단계부터 환경문제를 고려하고자하는 환경친화적 제조시스템(ECMS : environmentally conscious manufacturing system)이 1990년대 초부터 제조시스템 분야의 새로운 연구과제로 등장하게 되었다. 특히 ECMS 분야 중에서 제품 및 부품의 수

명을 연장시켜서 폐기물화 되는 중요 자원의 양을 줄이고자 하는 재생산 (remanufacturing)시스템이 미국을 비롯한 몇몇 국가에서 중점적으로 연구되고 있다. 본격적으로 재생산 환경에서의 일정계획에 관한 연구를 시작한 것은 Guide와 Spencer (1995)에 의해서 이다. Guide와 Spencer (1995)는 재생산 환경에서의 시스템의 가용성, 기준시간, 자재 복구율, 자재사용 등을 rough-cut capacity planning(RCCP) 방법으로 분석하였다. Guide (1996)는 그 후 drum-buffer-rope이론을 바탕으로 재생산 환경에서의 일정계획에 대한 연구를 수행하였다. Richter와 Sombrutzki (2000)는 중고품 및 폐기물의 절감과 재활용을 위한 재생산계획 수립문제를 연구하였으며, 최소 비용으로 유한계획기간내 주어진 재생산품의 동적 수요를 만족시키기 위해 매 기간마다 새 제품의 생산과 사용가능한 폐기물 중 얼마만큼의 양을 재생산할 지를 결정하는 문제를 다루었다. 그리고 첫 기간에 저가의 폐기물이 충분히 많은 경우의 재생산계획문제도 함께 다루었다. 또한 주운기 (2000)는 폐기물 중 일정비율만 완제품으로 다시 생산되는 문제와 매기간 폐기물의 수거량도 함께 결정하는 문제를 다루었다. Boaz et al. (2001)은 알고리즘의 계산복잡도(complexity)가 $O(T^3(\log T)^2)$ 인 생산-재생산계획문제(PRP: production and remanufacturing planning)에서 관련비용이 선형인 경우에 네트워크 흐름을 바탕으로 수송-재생산계획문제(TRP : transportation and remanufacturing planning)로 전환하여 계산복잡도를 $O(T^2(\log T)^2)$ 로 줄이는 알고리즘을 제시하였다. Richter와 Sombrutzki (2001)는 Richter와 Sombrutzki (2000)의 연구를 확장하여 생산 및 재생산 계획을 함께 고려한 문제를 다루었고 시간에 따라 일정한 수요와 비용함수를 갖는 경우에 대한 최적해의 구조적 특성을 규명하였다. Inderfurth (2004)는 생산 및 재생산이 혼합된 시스템에서 생산설비를 통해 생산된 고품질의 완제품으로 재생산설비에서 재생된 저품질의 재생품을 대체할 수 있는 혼합 생산-재생산 시스템에 대한 최적 정책을 수립하는 방안을 제시하였다. 이 논문에서는 확률적 수요와 비용함수를 고려하여 최적해를 도출하였다. Yang 등(2005)은

생산-재생산계획문제에서 모든 비용함수들이 오목함수인 경우에 이 문제가 NP-hard임을 보였고 네트워크 흐름 분석을 이용하여 최적해의 구조적 특성을 규명하고 이를 기반으로 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 이동은 등(2007)은 용량제약을 갖는 단일설비에서의 동적 재생산계획문제를 다루었고 이 문제에 대한 최적해의 구조적 특성을 규명하였으며 이를 기반으로 최적해를 찾기 위한 동적계획법 알고리즘을 제시하였다. 또한, 동일한 용량제약을 갖는 경우에 최적해를 효율적으로 찾을 수 있는 네트워크 기반의 알고리즘도 제안하였다. 이운식과 윤상흠(2009)은 중고품의 구매 시 할인정책을 고려하여 동적 수요를 만족시키기 위한 구매계획과 재생산계획을 동시에 수립하는 문제를 연구하였으며 최적해를 효율적으로 찾기 위한 동적계획법 알고리즘을 제시하였다. 또한 이운식 (2009)은 중고품에 대한 재생산계획과 할인가매정책을 고려한 아웃소싱계획을 함께 수립할 수 있는 동적 재생산계획문제를 연구하였다. 최근 서원철과 이운식 (2014)은 동적 폐기물 회수계획과 유한 재생산물을 고려한 다종제품에 대한 재생산계획문제를 연구하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 기존 연구들에서, 폐기물에 대한 수송수단을 고려한 회수계획과 일정비율로 다종제품을 재생하는 재생산계획을 동시에 고려하는 문제는 서원철과 이운식 (2014)를 제외하고 문헌에 아직 나타나지 않고 있다. 본 연구는 서원철과 이운식 (2014)의 연구를 다수의 재생산물을 고려한 문제로 확장하고자 한다. 또한 폐유 등의 정제산업환경을 반영하여 운송수단을 고려한 폐기물 회수계획과 다수의 유한 재생산물을 갖는 재생설비 하에서 일정한 재생비율을 갖는 다종제품에 대한 재생산계획의 최적 운영전략 수립을 위한 본 연구의 수행은 매우 중요하다 하겠다. 이를 통해, 보다 실질적인 폐유 등의 폐기물 회수 및 재생산 시스템의 운영문제에 대한 이론적 토대를 마련함과 아울러 이 분야의 확장연구를 촉발시키는 촉매가 될 것으로 기대된다.

앞서 소개된 문헌상의 기존 연구들을 정리하면 [표 2]과 같다.

[표 2] 관련 연구 정리

		동적 생산계획	동적 재생산계획			
용량 제약	미고려	<ul style="list-style-type: none"> • Wagner &Whitin (1958) • Zangwill(1966, 1969) 	<ul style="list-style-type: none"> •Richter & Sombrutzki (2000) • Richter&Weber (2001) • Yang et al. (2005) 		(폐기물) 회수 정책	
	고려	<ul style="list-style-type: none"> • Florian &Klein (1971) • Swoveland (1975) 	<ul style="list-style-type: none"> • 이운식 (2009) 	미고려		
	유한 (재)생산률		<ul style="list-style-type: none"> • Sethi & Chand (1981) • 성장섭과 이운식 (1995) 	<ul style="list-style-type: none"> • 이운식과 김병수 (2011) 		미고려
				<ul style="list-style-type: none"> • 서원철과 이운식 (2014) • 본 연구 		고려

2. 연구 목표 및 내용

가. 연구 대상문제의 정의 및 연구 목표

본 연구는 다양한 컨테이너 용기를 사용한 폐기물의 회수 및 운송 계획과 함께 다수의 유한 재생산물을 고려하여 최소비용으로 일정비율로 재생되는 다종제품에 대한 최적 회수 및 운송 그리고 재생산 계획을 동시에 수립할 수 있는 동적 모형들을 연구한다. 다종제품 각각에 대한 수요 (D_{ti})는 계획기간 동안 매기간 동적(dynamic)으로 발생하며 각 재생품에 대한 재생량은 폐기물 투입량에 대해 일정비율 ($0 < \alpha_i < 1$, $\sum_{i=1}^M \alpha_i = 1$)로 산출된다. 각 기간에서의 폐기물 회수량은 컨테이너 용기의 크기(W_n)에 따라 다르며 회수비용은 각 컨테이너 용기의 사용대수에 비례한다. 각 기간에서의 재생산량은 다수의 유한 재생산물 $P, 2P, \dots, mP$ 중 하나가 된다. 여기서 재생산물 P 는 재생산설비의 일회 재생용량이고 m 은 양의 정수로 기간별 최대 재생 횟수를 나타내며 mP 는 기간별 최대 재생산량을 의미한다. 또한, 장치설비의 특성에 따라 설비의 예열 및 준비를 위한 설비시동비용(start-up cost)이 발생되며 이 비용은 연속되는 재생산 기간들의 첫 번째 재생산 시점에서만 발생된다. 관련비용함수는 오목함수(concave function)를 가지며 추후조달(backlogging)은 허용되지 않는다. 본 연구에서 발생하는 총비용은 폐기물에 대한 회수비용 및 재고유지비용, 다종의 재생품에 대한 재생산비용 및 재고유지비용을 포함한다.

나. 연구 대상문제의 내용 및 범위

본 연구에서는 Wagner와 Whitin(1958)의 전통적인 동적 생산계획(Dynamic Lot-Sizing) 문제를 역물류(Reverse Logistics) 관점에서 재해석한 재생산계획 연구분야의 Richter와 Sombrutzki(2000)를 중심으로

로 본 연구가 분석하고자 하는 대상문제와의 차이점과 연구범위를 논하고자 한다.

(1) 전통적인 동적 생산계획문제

이 분야의 연구는 계획기간 동안 발생하는 동적 수요를 만족시키기 위해 생산비용과 재고비용의 상충관계를 분석하여 로트크기를 결정하며, 대부분의 연구들이 공장과 보관창고 간의 관계를 규명한다.

(2) 동적 재생산계획 문제

이 분야의 연구는 고전적인 동적 로트크기결정 문제를 역물류 관점에서 재해석하여, 폐기물 혹은 중고품의 기간별 보관량과 재고유지비용, 계획기간 동안 발생하는 동적 수요를 만족시키기 위한 재생산비용과 재생품 재고비용 간의 상충관계를 분석하여 재생산량을 결정한다. 그러나 폐기물 회수에 대한 수송수단의 사용에 따른 회수비용과 장치설비의 특성을 고려한 유한 재생산률 및 설비시동비용은 고려되지 않고 있다.

(3) 유한 재생산률을 고려한 폐기물 회수-운송계획과 다종제품 동적 재생산계획 문제

이 연구는 서원철과 이운식 (2014)에 의해 시발이 되어, 폐기물 회수 및 운송 계획과 유한 재생산률을 고려한 다종제품에 대한 재생산계획 문제를 고려한다. 이 연구에서 다종제품에 대한 수요는 동적으로 발생하고 수송수단은 한 종류의 컨테이너 용기를 사용하며 운송비용은 컨테이너 용기의 사용대수에 비례한다. 이 연구문제는, 앞서 소개된 연구분야 (2)에서, 폐기물 회수를 위한 수송수단과 유한 재생산률을 갖는 재생시스템을 고려한 확장문제이다.

(4) 다수의 유한 재생산률을 고려한 폐기물 회수-운송계획과 다종제품 동적 재생산계획 문제

이 연구는 서원철과 이운식 (2014)의 연구를 확장한 형태로 폐기물 회수 및 운송 계획과 다수의 유한 재생산물을 고려한 다종제품에 대한 재생산계획 문제를 고려한다. 이 연구에서 다종제품에 대한 수요는 동적으로 발생하고 수송수단은 한 종류의 컨테이너 용기를 사용하며 운송비용은 컨테이너 용기의 사용대수에 비례한다. 따라서 이 연구문제는 서원철과 이운식 (2014)의 연구에서 다수의 유한 재생산물을 고려한 확장문제가 된다.

본 연구에서 추구하는 최종 연구의 목표는 연구분야 (4)에 대한 최적 운영전략의 개발과 이를 실시간에 찾을 수 있는 탐색 알고리즘을 제안하는 데 있다. 이를 위해, 연구분야 (1)로부터 순차적인 연구를 통해 얻어진 연구 결과물들을 차년도 확장문제에 적용함으로써 완성도 높은 연구결과를 제시하고자 한다.

3. 연구의 추진전략 및 방법

본 연구는 한 종류의 컨테이너 용기를 사용한 폐기물의 회수 및 운송 계획과 함께 다수의 유한 재생산물을 고려하여 최소비용으로 일정비율로 재생되는 다종제품에 대한 최적 회수 및 운송 그리고 재생산 계획을 동시에 수립할 수 있는 동적 모형을 연구한다.

본 연구에서는 다음과 같은 세부연구방법을 바탕으로 연구를 수행하고자 한다.

- 1) 첫째, 제안된 수리모형의 타당성 여부를 검토하고 최적화 모형을 확정한다.
- 2) 둘째, 원문제를 소규모의 하부문제들로 분해할 수 있는 분해원리 (Decomposition Principle)를 개발한다.
- 3) 셋째, 하부문제에 대한 최적 회수 및 운송 계획, 그리고 재생산계획을 제공해 주는 최적해 (기간별 회수량, 컨테이너 용기의 사용대수

및 재생산량)의 구조적 특성을 규명한다.

(ㄱ) 기존 관련 연구들에서 사용되었던 최적해의 구조적 특성을 규명하기 위한 접근방법을 분석하고 본 연구에 적용될 수 있는지 검토한다.

4) 넷째, 최적해의 구조적 특성을 이용하여 최적해를 찾을 수 있는 탐색 알고리즘을 개발한다.

(ㄴ) 비용구조(오목함수)의 특수성에 따른 효율적인 탐색 알고리즘을 개발한다.

5) 다섯째, 2)와 3)의 접근방법이 실패할 경우에 최적해에 근접한 우수해를 찾을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 개발한다.

6) 마지막으로, 필요시 다양한 문제를 대상으로 비용 및 시간 측면에서 개발된 탐색 알고리즘의 효율성을 시뮬레이션 테스트를 통해 검증한다.



II. 수리모형

본 연구에서 발생하는 총비용은 폐기물에 대한 회수비용 및 재고유지비용, 다종의 재생품에 대한 재생산비용 및 재고유지비용을 포함하며 이를 정리해 보면 다음과 같다.

1. 회수비용함수

본 연구에서 회수비용은 컨테이너 용기(W)의 사용대수에 비례하는 다수의 고정비용함수를 고려한다. z_t 를 기간 t 에서 컨테이너 용기 크기 W 에 의한 폐기물 회수량으로 정의하면 관련 비용함수는 다음과 같다:

$$P_t(z_t) = A \lceil z_t/W \rceil .$$

여기서 A , W , $\lceil a \rceil$ 는 각각 기간 t 에서의 컨테이너 용기의 사용대수당 고정비용과 적재용량, a 를 초과하는 정수 중 가장 작은 정수를 나타낸다. 상기의 회수비용함수는 다수의 고정비용을 갖는 오목함수가 된다.

이러한 컨테이너 용기의 적재용량은 폐기물의 운반시 “적재용량을 완전히 채우느냐?” 아니면 “적재용량을 덜 채우느냐?”에 따라 운반비용에 차이가 나타나게 된다. 따라서 다양한 컨테이너 용기형태의 조합과 회수량을 결정하는 것이 중요한 의사결정의 요소가 된다.

2. 재생산비용함수

정제설비를 이용한 재생산업에서는 정제설비의 예열 및 준비를 위한 설비시동비용이 발생하게 된다. 따라서 X_t 를 기간 t 에서의 재생산을 위한 폐기물 투입량이라 하고 $x_{ti}(=\alpha_i \cdot X_t)$ 를 기간 t 에서의 재생품 i 에 대한 재생산량이라 할 때, 기간 t 에서의 관련 비용함수는 다음과 같다:

$$R_t \cdot (\delta(X_t) - \delta(X_{t-1}))^+ + \sum_{i=1}^M r_i \cdot x_{ti}.$$

여기서, R_t 와 r_i 는 각각 기간 t 에서 설비시동비용과 재생품 i 에 대한 단위당 재생산비용을 나타내며 M 은 다종제품의 최대 개수를 의미한다. 또한 $(x)^+$ 와 $\delta(x)$ 는 $x > 0$ 이면 1 아니면 0을 의미하는 이진변수이다. 즉 기간 t 에서의 재생품 i 에 대한 재생산량 x_{ti} 는 기간 t 에서의 재생산을 위한 폐기물 투입량 X_t 에 대해 일정비율 α_i ($0 < \alpha_i < 1$, $\sum_{i=1}^M \alpha_i = 1$) 만큼 재생됨을 의미한다.

3. 재고유지비용함수

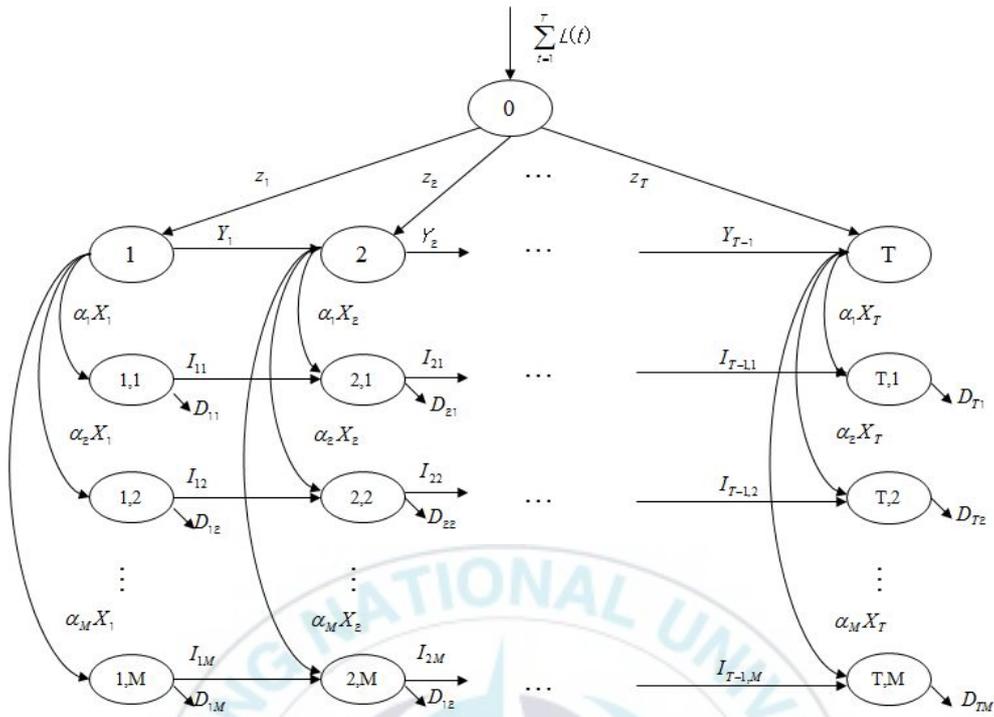
재생산업에서는 회수되는 폐기물의 보관과 더불어 정제된 재생품의 보관이 요구되며 이 때 폐기물 및 재생품에 대한 단위당 재고유지비용이 발생된다. Y_t 를 기간 t 말의 폐기물 재고량, I_{ti} 를 기간 t 말에서의 재생품 i 에 대한 재생품 재고량이라 정의할 때, $h_t(Y_t)$ 를 기간 t 에서의 폐기물 재고유지비용, $H_{ti}(I_{ti})$ 를 기간 t 에서의 재생품 i 에 대한 재고유지비용으로 정의한다. 여기서 폐기물 및 재생품에 대한 재고유지비용함수는 오목함수이다. 이러한 폐기물 및 재생품에 대한 재고유지비용들은 폐기물의 회수량 및 재생산량에 의해 발생하는 회수비용 및 재생산비용과 상충관계에 놓이게 된다.

본 연구에서의 수리모형은 상기에서 정의된 기호들을 사용하여 다음과 같은 혼합정수계획모형으로 정형화할 수 있다. 또한 이 최적화 모형은 서원철과 이운식 (2014)의 연구에서 다수의 재생산률을 고려한 문제로 확장한 것이다.

$$\begin{aligned}
(P) \quad & \text{Min} \sum_{t=1}^T [P_t(z_t) + R_t \cdot (\delta(X_t) - \delta(X_{t-1}))^+ \\
& \quad + \sum_{i=1}^M r_i \cdot x_{ti} + h_t(Y_t) + \sum_{i=1}^M H_{ti}(I_{ti})] \\
s.t. \quad & Y_t = Y_{t-1} + z_t - X_t, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (1) \\
& x_{ti} = \alpha_i \cdot X_t, i = 1, 2, \dots, M, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (2) \\
& I_{ti} = I_{t-1,i} + x_{ti} - D_{ti}, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (3) \\
& X_t \in \{0, P, 2P, \dots, mP\}, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (4) \\
& Y_0 = I_{0i} = Y_T = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (5) \\
& z_t, Y_t, I_{ti} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (6)
\end{aligned}$$

여기서, D_{ti} 는 기간 t 에서의 재생품 i 에 대한 수요량을 나타낸다.

문제 P 를 네트워크 형태로 표현하면 [그림 1]과 같다. [그림 1]에서 $L(t)$ 는 기간 1부터 기간 t 까지의 다종제품에 대한 수요를 만족시키기 위한 누적 재생산량의 최소요구량을 의미하며 $L(t) = \max \left\{ \sum_{k=1}^t D_{ki} / \alpha_i, \forall i \right\}$ 으로 정의된다. 문제 P 에서 제약식은 선형 방정식 및 부등식으로 이루어져 있으므로 closed and bounded set을 형성한다. 또한, 목적함수내의 비용함수들은 오목함수로 정의되어 있어 규모의 경제(economy of scale) 원리를 정확히 반영하고 있다. 이때, closed and bounded set을 형성하는 제약식 하에서 오목함수를 갖는 목적함수의 최소화는 항상 정점(extreme point)에서 최적해를 제공한다. 따라서 최적해의 후보가 될 수 있는 정점들의 특수한 구조를 규명함으로써 이 결과를 이용하여 효율적인 해법을 제시할 수 있다.



[그림 1] 문제 P의 네트워크 표현

Ⅲ. 최적해의 성질

완제품의 재고유지비용이 폐기물의 재고유지비용보다 큰 것이 보다 현실적이므로, 문제 P 에서 모든 t 에 대해, $\min\{H_{ti}, \forall i\} \geq h_t$ 가 성립된다고 가정한다. $L(t)$ 를 기간 1부터 기간 t 까지의 다종제품에 대한 수요를 만족시키기 위한 누적 재생산량의 최소요구량으로 정의하자. 즉, $L(t) = \max\left\{\sum_{k=1}^t D_{ki}/\alpha_i, \forall i\right\}$ 이다. 또한 문제 P 가 실행가능해를 갖기 위한 조건으로 다음이 만족된다고 가정한다:

$$k \cdot m \cdot P \geq \max\{L(k)\}, \quad k = 1, 2, \dots, T. \quad (7)$$

문제 P 에서의 총재생산량은 일정하므로 목적함수식에서 $\sum_{i=1}^M r_i \cdot x_{ti}$ 는 제거될 수 있다. 문제의 가정에서 추후조달이 허용되지 않으므로 다음과 같은 성질을 얻을 수 있다.

[정리 1] 문제 P 는 다음을 만족하는 문제로 변환하여 풀 수 있다.

$$mP \geq L(t) - L(t-1), \quad t = 1, 2, \dots, T.$$

[증명] $mP < L(t) - L(t-1)$ 를 만족하는 기간 t 가 있다고 가정하자. $L(t) - L(t-1) - mP$ 만큼의 수요를 앞 선 기간들 중에 $mP > L(s) - L(s-1)$ 를 만족하는 가장 늦은 기간 s 의 수요에 합친다. 즉, $D_{si} = D_{si} + \alpha_i \cdot (L(t) - L(t-1) - mP)$. 만일 기간 s 에서 $mP < L(s) - L(s-1)$ 를 만족한다면 앞의 절차를 반복한다. 따라서 문제 P 는 실행가능해의 조건 (7)에 의해 모든 기간 t 에서 $mP \geq L(t) - L(t-1)$ 를 만족하는 문제로 변환될 수 있다.

최적해의 성질을 효과적으로 표현하기 위해 다음과 같이 재생품-재고

점, 폐기물-재고점, 재생점, 재생산블록, 재생산점, 회수점, 부분운송점 그리고 회수-재생산순서를 정의한다. $E(t) = \left\{ i \mid \max\left(\sum_{k=1}^t D_{ki}/\alpha_i, \forall i\right) \right\}$ 라 하자.

[정의 1]

- 1) $\hat{I}_i = \alpha_i \cdot \lfloor L(t)/P \rfloor \cdot P - D_i(t)$ 이다. 여기서 $\lfloor y \rfloor$ 는 y 보다 크거나 같은 가장 작은 정수를 나타내고 $D_i(t) = \sum_{j=1}^t D_{ji}$ 이다.
- 2) 다음을 만족하면 기간 t 는 재생품-재고점이다.
 - (i) $X_t = 0$,
 - (ii) $I_{ti} < \min(\alpha_i \cdot P, D_{t+1,i})$ for $i \in E(t)$,
 - (iii) $L(t) - L(t-1) < P$.
- 3) $Y_t < W$ 이면 기간 t 는 폐기물-재고점이다.
- 4) 기간 t 가 재생품-재고점이면서 폐기물-재고점이면 기간 t 는 재생점이다.
- 5) 다음을 만족하는 기간 r 부터 기간 t 까지의 구간은 재생산블록이다.
 - (i) $X_{r-1} = 0$
 - (ii) $X_k > 0, k = r, r+1, \dots, s$ ($r \leq s < t$)
 - (iii) $X_k = 0, k = s+1, s+2, \dots, t$
- 6) 기간 t 가 재생산블록의 첫 번째 기간이면 기간 t 는 재생산점이다.
- 7) $z_t > 0$ 이면 기간 t 는 회수점이다.
- 8) $nW < z_t < (n+1)W$ 이면 기간 t 는 부분운송점이다. 여기서 n 은 비음정수이다.
- 9) $z_t = (n+1)W$ 이면 기간 t 는 완전운송점이다. 여기서 n 은 비음정수이다.
- 10) 다음을 만족하는 회수-재생산계획은 회수-재생산순서이다:

$$S_{uv}(k, l) = \left\{ z_t, X_t, u < t \leq v \mid \begin{array}{l} Y_u = k, I_{ui} = \hat{I}_{ui}, \text{ and } Y_v = l, I_{vi} = \hat{I}_{vi}; \\ X_{u+1} > 0 \text{ and } X_v = 0 \end{array} \right\}.$$

실행가능한 회수-재생산계획은 하나 이상의 회수-재생산순서들로 분할될 수 있다. 문제의 가정에 의해 $Y_0 = Y_T = 0$ 이고 모든 i 에 대해 $I_{0i} = 0$ 이므로 마지막 기간 T 에서의 재고수준은 목적함수의 특성에 의해 $I_{Ti} = \hat{I}_{Ti}$ 이 되어야 한다. 따라서 기간 T 는 재생품-재고점임과 동시에 폐기물-재고점이므로 최소한 하나의 회수-재생산순서 $S_{0T}(0,0)$ 가 존재한다. 일반적으로 만약 하나의 실행가능한 회수-재생산계획이 k 개의 재생점들을 포함한다면 그 회수-재생산계획은 $(k-1)$ 개의 회수-재생산순서들로 나누어 질 수 있다. 만일 실행가능한 회수-재생산계획 R 이 회수-재생산순서 $S_{mn}(k,l)$ 을 포함하고, $S_{mn}(k,l) = \frac{1}{2}(S_{mn}^1(k,l) + S_{mn}^2(k,l))$ 이 되는 두 개의 서로 다른 회수-재생산순서 $S_{mn}^1(k,l)$ 과 $S_{mn}^2(k,l)$ 이 존재한다면, 이 회수-재생산순서들을 포함한다는 것을 제외하면 R 과 동일한 두개의 실행가능한 회수-재생산계획 $R^1 = (z_1^1, \dots, z_T^1, X_1^1, \dots, X_T^1)$ 과 $R^2 = (z_1^2, \dots, z_T^2, X_1^2, \dots, X_T^2)$ 를 만들 수 있기 때문에 R 은 정점이 아니다. 이러한 성질을 이용하여 최적해의 성질을 효과적으로 규명한다.

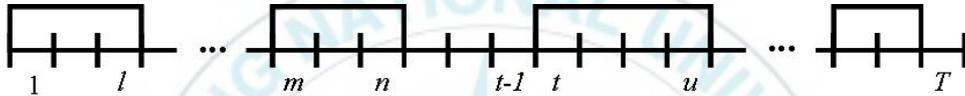
E 를 정점(Extreme Point)들의 집합이라 정의할 때, 다음과 같은 최적해의 성질들을 규명할 수 있다.

[정리 2] E 내에 있는 실행가능한 회수-재생산계획 R 에서 기간 t 가 재생산점이면 기간 $t-1$ 은 재생품-재고점이어야 한다.

[증명] [그림 2]에서와 같은 재생산계획을 갖는 최적해가 존재한다고 가정한다. 최소한 하나의 재생품 i 에 대해 $D_{1i} > 0$ 이라 가정할 수 있으므로 기간 1은 재생산점이고 문제의 가정에 의해 기간 0은 재생품-재고점이 된다. [그림 2]에서 기간 $l \geq 1$ 은 첫 번째 재생산블록의 마지막 기간을 나타낸다. 기간 m 과 t 는 각각 두 번째와 세 번째 재생산블록의 첫 번째 기간을, 기간 n 과 u 는 각각 두 번째와 세 번째 재생산블록의 마지막 기간을 나타낸다. 기간 $t-1$ 이 재생품-재고점이 아니라고 가정하자. 즉, $I_{t-1,i} \geq \alpha_i \cdot P$, $I_{t-1,i} \geq D_{ti}$ 그리고 $L(t-1) - L(t-2) \geq P$ 인 경우를 의미한

다.

$i \in E(t)$ 에 대해 $I_{t-1,i} \geq \alpha_i \cdot P$ 일 때, 기간 n 에서의 재생산량을 P 만큼 감소시키고 기간 $t-1$ 에서의 재생산량을 P 만큼 증가시키는 새로운 회수-재생산계획을 만들 수 있다. 이 경우에 회수계획에는 변화가 없고 재생산 비용에도 변동이 없으며 기간 n 에서 기간 $t-1$ 로 재생산량을 이동하는 데 따라 기간 $n+1$ 부터 $t-1$ 까지 폐기물의 재고수준이 P 만큼 증가하고 재생품의 총재고수준은 P 만큼 감소하게 된다. 문제의 정의에 의해 모든 t 에 대해 $\min\{H(I_{ti}), \forall i\} \geq h(Y_t)$ 이므로 총재고비용이 절감되는 더 좋은 회수-재생산계획을 얻을 수 있다.



[그림 2] 최적 재생산계획의 예

$i \in E(t)$ 에 대해 $I_{t-1,i} \geq D_{ti}$ 일 때, $X_t = X_{t-1} - P$ 을 갖는 비용이 절감되는 더 좋은 회수-재생산계획을 얻을 수 있다. 다음의 두가지 경우를 고려하자: (1) $X_j = mP, \forall j > t$, (2) $X_j < mP, \text{ for some } j > t$. (1)의 경우는 $X_{u+1} = X_u + P$ 으로 놓는다. (2)의 경우, $X_s < mP$ 를 만족하는 첫 번째 기간을 s 라 하자. 기간 t 로부터 기간 s 로 재생산량 P 를 이동한다. 이 절차를 $I_{t-1,i} < D_{ti}$ 를 만족할 때까지 반복하면 비용이 절감되는 더 좋은 회수-재생산계획을 얻을 수 있다.

$L(t-1) - L(t-2) \geq P$ 일 때, 기간 n 에서의 재생산량을 $X_n = X_{n-1} - P$ 로 하고 기간 $t-1$ 에서의 재생산량을 $X_{t-1} = X_{t-2} + P$ 로 하는 새로운 회수-재생산계획을 만들 수 있다. 이 경우에 회수계획에는 변화가 없고 재생산 비용에도 변동이 없으며 기간 n 에서 기간 $t-1$ 로 재생산량을 이동하는 데 따라 기간 n 부터 $t-1$ 까지 폐기물의 재고수준이 P 만큼 증가하고 재생품의 총재고수준은 P 만큼 감소하게 된다. 문제의 정의에 의해 모든 t 에 대

해 $\min\{H(I_i), \forall i\} \geq h(Y_t)$ 이므로 새로운 회수-재생산계획의 총재고비용이 감소하게 된다. 따라서 증명은 완료된다.

[정리 2]의 결과로부터 기간 t 가 재생산점이면 기간 $t-1$ 에서의 재생품 $i \in E(t)$ 에 대한 재생품의 재고수준은 다음을 만족하게 된다.

$$\hat{I}_{ti} = \alpha_i \cdot \lfloor L(t)/P \rfloor \cdot P - D_i(t) \quad (8)$$

따라서 이러한 성질은 재생점의 수를 줄이는 역할을 하게 된다.

[정리 3] E 내에 있는 실행가능한 회수-재생산계획 R 에서 연속되는 2개의 폐기물-재고점 $s (s < t)$ 와 t 사이에서의 최적 회수계획은 다음의 성질을 만족한다.

(i) $Y_s = 0$ 이면 부분운송점은 최대한 하나를 가진다.

(ii) $Y_s > 0$ 이면 부분운송점을 갖지 않는다.

[증명] (i) 2개의 부분운송점 s_1 과 $t_1 (s < s_1 < t_1 \leq t)$ 이 존재하고 $Y_s = 0$ 을 만족하는 회수-재생산계획이 존재한다고 가정한다.

$R_{\min} = \min\{z_{s_1}, Y_{s_1}, Y_{s_1+1}, \dots, Y_{t_1}, \lfloor z_{t_1}/W \rfloor \cdot W - z_{t_1}\}$ 이라 정의하자. 기간 s_1 에서의 회수량을 $z_{s_1} = z_{s_1} - R_{\min}$ 로, 기간 $s_1 + 1 \leq k \leq t_1 - 1$ 에 대한 폐기물 재고수준을 $Y_k = Y_k - R_{\min}$ 으로, 기간 t_1 에서의 회수량을 $z_{t_1} = z_{t_1} + R_{\min}$ 으로 하는 새로운 회수-재생산계획을 만들 수 있다. 이 경우에 회수비용에는 변화가 없고 폐기물 재고비용이 감소되는 더 좋은 회수-재생산계획을 얻을 수 있다.

(ii) 1개의 부분운송점 $t_1 (s < t_1 \leq t)$ 과 기간 s 이전에 마지막 회수점 $s_1 (s_1 \leq s)$ 이 존재하고 $Y_s > 0$ 를 만족하는 회수-재생산계획이 존재한다고 가정한다.

$R_{\min} = \min\{Y_s, Y_{s+1}, \dots, Y_{t_1}, \lfloor z_{t_1}/W \rfloor \cdot W - z_{t_1}\}$ 이라 정의하자. 기간 s_1 에서의 회수량을 $z_{s_1} = z_{s_1} - R_{\min}$ 로, 기간 $s_1 + 1 \leq k \leq t_1 - 1$ 에 대한 폐기물의 재고수준

을 $Y_k = Y_k - R_{\min}$ 으로, 기간 t_1 에서의 회수량을 $z_{t_1} = z_{t_1} + R_{\min}$ 으로 하는 새로운 회수-재생산계획을 만들 수 있다. 이 경우에 회수비용에는 변화가 없고 폐기물 재고비용이 감소되는 더 좋은 회수-재생산계획을 얻을 수 있다. 이 경우, 기간 s 와 t_1 사이에 폐기물의 재고수준이 0이 되는 새로운 폐기물 재생점이 발생되거나 기간 t_1 이 완전운송점이 된다. 따라서 증명은 완료된다.

[정리 4] E 내에 있는 실행가능한 회수-재생산계획 R 에서 $X_t = 0$ 이면 $z_t = 0$ 이어야 한다.

[증명] 기간 t 에서의 재생산량은 $X_t = 0$ 이고 회수량은 $z_t > 0$ 이며 기간 t 이후의 첫 번째 재생산점이 t' 인 회수-재생산계획이 존재한다고 가정한다. 즉, $X_{t'} > 0$. 기간 t 에서의 회수량을 $z_t = 0$ 으로 하고 기간 t' 에서의 재생산량을 $z_{t'} = z_{t'} + z_t$ 로 하는 새로운 회수-재생산계획을 만들 수 있다. 이 경우에 회수비용에는 변화가 없고 폐기물에 대한 재고비용이 감소되는 더 좋은 회수-재생산계획을 얻을 수 있다. 따라서 증명은 완료된다.

IV. 동적계획법 알고리즘

이상과 같이 규명한 최적해의 성질을 통해, 수리모형 P 가 분할되어 풀릴 수 있음을 보여주는 중요한 성질을 다음과 같이 얻을 수 있다.

[정리 5] (재고분할성질)

다음과 같은 제약식이 (1)~(6)에 추가된다고 하자.

$$Y_k = l (< W) \text{ and } I_{ki} = \hat{I}_{ki} \text{ for some } k \in \{1, 2, \dots, T-1\}. \quad (9)$$

문제 P 에 대한 최적해는 처음 k 기간과 나머지 $T-k$ 기간에 대한 문제를 독립적으로 풀이함으로써 얻을 수 있다.

[증명] 회수비용과 재생산비용은 각각 특정기간에 회수된 양과 재생산된 양에 의해 발생되고 식(8)에 의해 마지막 $T-k$ 기간과 연관된 폐기물 및 재생품의 재고비용은 단지 이 기간들 동안의 회수 및 재생산에 대한 의사 결정들에 의해서만 발생됨을 알 수 있다. 식(7)은 나머지 $T-k$ 기간의 문제에 대한 실행가능해의 존재를 보증해 준다. 따라서 증명은 완료된다.

앞서 규명된 최적해의 성질을 이용하여 수리모형 P 에 대한 최적해를 효율적으로 찾을 수 있는 동적계획법 알고리즘을 다음과 같이 제안할 수 있다:

$$\begin{aligned} f_0(0) &= 0, \\ f_v(l) &= \min_{0 \leq u < v} \{d_{uv}(k, l) + f_u(k)\}, \\ &\text{for } v = 1, 2, \dots, T, k = 0, 1, \dots, W-1, l = 0, 1, \dots, W-1. \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

$f_v(l)$ = 기간 $1, 2, \dots, v$ 에서 $Y_v = l, I_{vi} = \hat{I}_{vi} (\forall i)$ 일 때 최적해와 관련된 비용,

$d_{uv}(k, l) = Y_u = k, I_{ui} = \hat{I}_{ui}$ 그리고 $Y_v = l, I_{vi} = \hat{I}_{vi}$ 일 때, 기간 $u+1, \dots, v$ 에서의 최적해와 관련된 비용.

동적계획법 알고리즘 (10)을 적용하기 위해 필요한 비용값 $d_{uv}(k, l)$ 은 [정리 2], [정리 3] 그리고 [정리 4]를 만족하는 $S_{uv}(k, l)$ 들 중 최소비용을 주는 회수-재생산순서와 대응됨을 알 수 있다. 또한 $d_{uv}(k, l)$ 을 계산하기 위한 계산복잡도(Computational Complexity)는 $O(W^2T^2)$ 으로 WT 의 제곱에 비례한다.

동적계획법 알고리즘 (10)을 적용하기 위해 필요한 비용값 $d_{uv}(k, l)$ 의 계산은, 연속된 재생점 u 와 v 에 의해 분할된 (u, v) -문제에 대해, 다종제품의 수요를 만족하는 폐기물의 회수량과 재생산량의 조합을 결정하는 문제가 된다. 비용값 $d_{uv}(k, l)$ 의 계산을 위해 필요한 최적 회수량 및 재생산량의 특성을 다음과 같이 규명할 수 있다.

[따름정리 1] (u, v) -문제에 대해, 최적 회수-재생산순서는 기간 $u+1$ 을 재생산점으로 하는 하나의 재생산블록을 포함한다. 재생점 u 와 v 에서의 폐기물 및 재생품의 재고수준이 각각 $Y_u = k, I_{ui} = \hat{I}_{ui}$ 및 $Y_v = l, I_{vi} = \hat{I}_{vi}$ 라 할 때, 누적 회수량은 다음을 만족한다:

$$Z_{u+1, v} = nP - k + l.$$

여기서 $n = u + \max\left\{\left(\sum_{j=u+1}^v D_{ji} - \hat{I}_{ui} + \hat{I}_{vi}\right)/\alpha_i\right\}/P$ 이고 \hat{I}_{ti} 의 정의에 의해

$\max\left\{\left(\sum_{j=u+1}^v D_{ji} - \hat{I}_{ui} + \hat{I}_{vi}\right)/\alpha_i\right\}/P$ 은 정수이다. 또한, Z_{st} 는 누적회수량으로

$$Z_{st} = \sum_{j=s}^t z_j \text{로 정의한다.}$$

[따름정리 1]은 [정리 1], [정리 2], [정리 3] 그리고 [정리 4]에 의해 자동적으로 만족됨을 알 수 있다.

[따름정리 2] (u, v) -문제에 대해, 최적 회수-재생산순서에서 최적 회수계획은 모든 기간 $t(u \leq t \leq v)$ 에 대해 다음의 성질을 가진다.

- (i) $Y_u = 0$ 이면 $n_1 W \leq z_{t+1} < (n_1 + 1)W$ 이다. 여기서 n_1 은 비음정수이다.
- (ii) $Y_u > 0$ 이면 $z_{t+1} = n_1 W$ 이다. 여기서 n_1 은 비음정수이다.

[따름정리 2]는 [정리 3]에 의해 자동적으로 만족됨을 알 수 있다.

[따름정리 3] (u, v) -문제에 대해, 최적 재생산계획은 다음과 같이 수립될 수 있다.

단계 1: $t = u$ 에 대해, $I_t = \widehat{I}_{ti}$,

$\widehat{X}_{t+1,v} = (\widehat{I}_{vi} - \widehat{I}_{ti})/\alpha_i + L(v) - L(t)$ 로 놓는다. $S = 0$, $t = t + 1$ 로 한다.

단계 2: $k_t = \min\{r \in \{1, 2, \dots, m\} | rP \geq L(t) - L(t-1) - I_{t-1,i}/\alpha_i \text{ for } i \in E(t)\}$ 를 계산하고 $X_t = k_t \cdot P$ 로 놓는다. $S = S + X_t$ 로 한다.

단계 3: 만일 $S < \widehat{X}_{tv}$ 라면 $t = t + 1$ 로 하고 [단계 2]로 간다.

단계 4: $X_j = 0, j = t + 1, t + 2, \dots, v$ 로 정한다. 절차를 완료한다.

[따름정리 3]은 재고수준을 최소화하여 비용을 최소화하는 최적 재생산계획을 제공한다. 앞서 규명된 최적해의 성질로부터, 비용값 $d_{uv}(k, l)$ 의 계산방법은 비순환네트워크에서의 최소비용경로를 찾는 것과 같다. [따름정리 3]으로부터 누적재생산량 기간 $u + 1$ 부터 기간 v 사이의 $\widehat{X}_t = \sum_{j=u+1}^t X_j$

$(u + 1 \leq t \leq v)$ 는 $\{P, 2P, \dots, nP\}$ 의 값들 중 하나를 갖는다. 여기서

$n = u + \max\left\{\left(\sum_{j=u+1}^v D_{ji} - \widehat{I}_{ui} + \widehat{I}_{vi}\right)/\alpha_i\right\}/P$ 이다. 또한, [따름정리 2]로부터 기간

$u + 1$ 부터 기간 v 사이의 누적회수량 $\widehat{Z}_t = \sum_{j=u+1}^t z_j$ ($u + 1 \leq t \leq v$)는, $k > 0$ 이

면 $\{0, W, 2W, \dots, \hat{n}W\}$ 의 값들 중 하나를, $k=0$ 이면 $\{\epsilon, \epsilon+W, \epsilon+2W, \dots, \epsilon+\hat{n}W\}$ 의 값들 중 하나를 갖는다. 여기서 $\epsilon = \text{mod}((nP-k+l), W)$ ($0 \leq \epsilon < W$)이고 $\text{mod}(a,b)$ 는 a 를 b 로 나눈 나머지를 나타내며 $\hat{n} = \lfloor (nP-k+l)/W \rfloor$ 이다.

그러므로, 각 $t(t=u+1, \dots, v)$ 에 대해, (\hat{X}_t, \hat{Z}_t) 의 가능한 값들을 마디로 하고 호를 $((\hat{X}_t, \hat{Z}_t), (\hat{X}_{t+1}, \hat{Z}_{t+1}))$ 로 하는 비순환네트워크를 구성할 수 있다. 이러한 비순환네트워크에서 다음과 같은 경우는 비실행가능해를 제공하게 되어 마디의 생성과 호의 비용계산에서 배제할 수 있다:

- 1) $u < t \leq v$ 에 대해 $\hat{X}_{t+1} < \hat{X}_t$ 이면 비실행가능해가 된다. 이 경우에 호는 제거된다.
- 2) $u < t \leq v$ 에 대해 $\hat{X}_t < L(t) - L(u)$ 이면 \hat{X}_t 를 포함하는 모든 마디의 생성이 배제된다.
- 3) $u < t \leq v$ 에 대해 $\hat{Z}_{t+1} < \hat{Z}_t$ 이면 비실행가능해가 된다. 이 경우에 호는 제거된다.
- 4) $u < t \leq v$ 에 대해 $\hat{Z}_t < \hat{X}_t$ 이면 최소한 하나 이상의 재생품 i 에 대해 $I_{ti} < 0$ 이 발생되어 비실행 가능해가 된다. 이 경우에 마디 (\hat{X}_t, \hat{Z}_t) 는 제거된다.

또한, 재생산블록의 정의에 의해, $k_v > 0$ 인 경우는 기간 u 부터 v 까지 모든 기간에 재생산점이 발생하므로 비실행가능해가 되어 $d_{uv}(k,l) = \infty$ 가 된다.

여기서, $k_t = \min\{r \in \{1, 2, \dots, m\} | rP \geq L(t) - L(t-1) - I_{t-1,i}/\alpha_i \text{ for } i \in E(t)\}$ 이다.

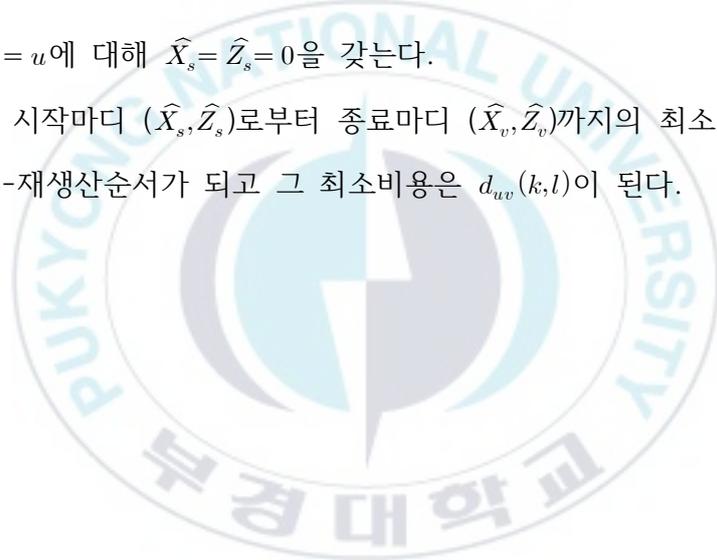
이러한 비순환네트워크는 인위적인 시작마디 (\hat{X}_s, \hat{Z}_s) 를 가지며 이때 $\hat{X}_s = 0$ 이고 $\hat{Z}_s = 0$ 이다. 또한, 하나의 종결마디 (\hat{X}_v, \hat{Z}_v) 를 가지며 $\hat{X}_v = \max\left\{\left(\sum_{j=u+1}^v D_{ji} - \hat{I}_{ui} + \hat{I}_{vi}\right)/\alpha_i, \forall i\right\}$, $\hat{Z}_v = nP - k + l$ 을 만족해야 한다. 여기

서 $n = u + \max\left\{\left(\sum_{j=u+1}^v D_{ji} - \widehat{I}_{ui} + \widehat{I}_{vi}\right)/\alpha_i\right\}/P$ 이다. 시작마디 $(\widehat{X}_s, \widehat{Z}_s)$ 로부터 종
료마디 $(\widehat{X}_v, \widehat{Z}_v)$ 까지의 모든 경로는 실행가능한 회수-재생산순서를 나타낸
다. 이때 각 호와 관련된 비용은 다음과 같이 계산된다:

$$\begin{aligned}
 g((\widehat{X}_t, \widehat{Z}_t), (\widehat{X}_{t+1}, \widehat{Z}_{t+1})) &= P_{t+1}(\widehat{Z}_{t+1} - \widehat{Z}_t) + R_{t+1} \cdot (\delta(\widehat{X}_{t+1}) - \delta(\widehat{X}_t))^+ \\
 &+ h_{t+1}(\widehat{Z}_{t+1} - \widehat{X}_{t+1} + k) \\
 &+ \sum_{i=1}^M H_{t+1,i}(\alpha_i \cdot \widehat{X}_{t+1} - \sum_{j=u+1}^{t+1} D_{ji} + \widehat{I}_{ui}), \quad t = s, u+1, \dots, v-1. \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서, $s = u$ 에 대해 $\widehat{X}_s = \widehat{Z}_s = 0$ 을 갖는다.

따라서, 시작마디 $(\widehat{X}_s, \widehat{Z}_s)$ 로부터 종료마디 $(\widehat{X}_v, \widehat{Z}_v)$ 까지의 최소비용경로는
최적 회수-재생산순서가 되고 그 최소비용은 $d_{uv}(k, l)$ 이 된다.



V. 수치예제

2가지 제품과 6 기간을 갖는 최적화문제를 대상으로 동적계획법 알고리즘의 적용절차를 소개한다. 재생산물 $m=3$, $P=2$, 컨테이너 용기크기 $W=4$ 그리고 재생산비율은 $\alpha_1:\alpha_2 = \frac{2}{5}:\frac{3}{5}$ 이다. 또한 관련비용으로 컨테이너당 운송비용 $A=10$, 설비시동비용 $R_t(t=1,2,\dots,6)=20$, 단위당 재생산비용 $r_i=0(i=1,2)$, 폐기물 단위당 재고비용 $h_t(\cdot)=1(t=1,2,\dots,6)$ 그리고 $H_{ti}(\cdot)=2(i=1,2;t=1,2,\dots,6)$ 이다. [표 1]는 대상문제의 수요량, $D_{\max}(t)$ 그리고 \hat{I}_{ti} 를 계산한 결과를 보여준다. \hat{I}_{ti} 의 계산과정을 구체적으로 소개하면 다음과 같다:

1) $i=1$ 일 때

$$\begin{aligned}\hat{I}_{11} &= \frac{2}{5} \times \left\lfloor \frac{10}{3}/2 \right\rfloor \times 2 - 1 = \frac{2}{5} \times 4 - 1 = \frac{8}{5} - 1 = \frac{3}{5}, \\ \hat{I}_{12} &= \frac{2}{5} \times \left\lfloor \frac{25}{3}/2 \right\rfloor \times 2 - 2 = \frac{2}{5} \times 10 - 2 = 4 - 2 = 2, \\ \hat{I}_{13} &= \frac{2}{5} \times \lfloor 10/2 \rfloor \times 2 - 3 = \frac{2}{5} \times 10 - 3 = 4 - 3 = 1, \\ \hat{I}_{14} &= \frac{2}{5} \times \lfloor 10/2 \rfloor \times 2 - 4 = \frac{2}{5} \times 10 - 4 = 4 - 4 = 0, \\ \hat{I}_{15} &= \frac{2}{5} \times \lfloor 15/2 \rfloor \times 2 - 6 = \frac{2}{5} \times 16 - 6 = \frac{32-30}{5} = \frac{2}{5}, \\ \hat{I}_{16} &= \frac{2}{5} \times \lfloor 20/2 \rfloor \times 2 - 8 = \frac{2}{5} \times 20 - 8 = 8 - 8 = 0.\end{aligned}$$

(2) $i=2$ 일 때

$$\begin{aligned}\hat{I}_{21} &= \frac{3}{5} \times \left\lfloor \frac{10}{3}/2 \right\rfloor \times 2 - 2 = \frac{3}{5} \times 4 - 2 = \frac{12}{5} - 2 = \frac{2}{5}, \\ \hat{I}_{22} &= \frac{3}{5} \times \left\lfloor \frac{25}{3}/2 \right\rfloor \times 2 - 5 = \frac{3}{5} \times 10 - 5 = 6 - 5 = 1, \\ \hat{I}_{23} &= \frac{3}{5} \times \lfloor 10/2 \rfloor \times 2 - 6 = \frac{3}{5} \times 10 - 6 = 6 - 6 = 0, \\ \hat{I}_{24} &= \frac{3}{5} \times \lfloor 10/2 \rfloor \times 2 - 6 = \frac{3}{5} \times 10 - 6 = 6 - 6 = 0, \\ \hat{I}_{25} &= \frac{3}{5} \times \lfloor 15/2 \rfloor \times 2 - 9 = \frac{3}{5} \times 16 - 9 = \frac{48-45}{5} = \frac{3}{5},\end{aligned}$$

$$\widehat{I}_{26} = \frac{3}{5} \times \lfloor 20/2 \rfloor \times 2 - 12 = \frac{3}{5} \times 20 - 12 = 12 - 12 = 0.$$

[표 1] 관련 자료의 요약

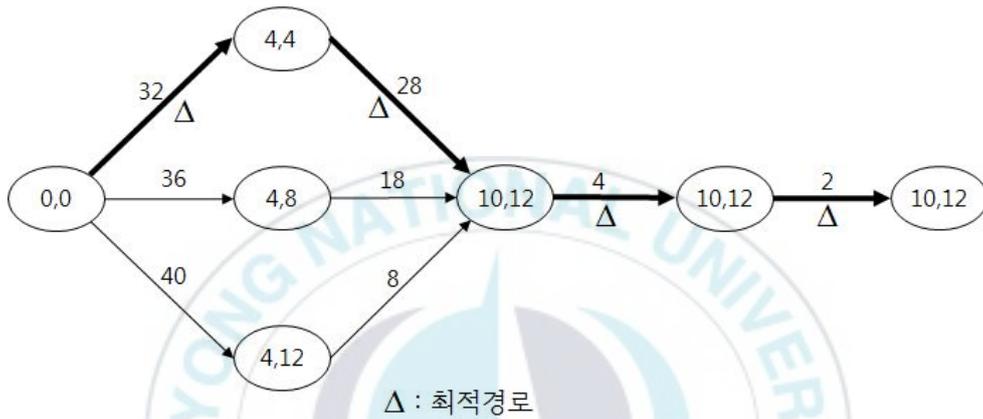
	t					
	1	2	3	4	5	6
D_{t1}	1	1	1	1	2	2
D_{t2}	2	3	1	0	3	3
$D_t(1)$	1	2	3	4	6	8
$D_t(2)$	2	5	6	6	9	12
$D_t(1)/\alpha_1$	5/2	5	15/2	10	15	20
$D_t(2)/\alpha_2$	10/3	25/3	10	10	15	20
$D_{\max}(t)$	10/3	25/3	10	10	15	20
\widehat{I}_{t1}	3/5	2	1	0	2/5	0
\widehat{I}_{t2}	2/5	1	0	0	3/5	0

재생품-재고점의 정의와 [정리 2]에 의해 가능한 재생품-재고점의 집합 $j(T) = \{0, 3, 4, 6\}$ 이다. $t = 5$ 의 경우는 $D_{\max}(5) - D_{\max}(4) = 15 - 10 = 5 > P = 2$ 이므로 생품-재고점의 집합에서 제외된다. 또한 $t \in j(T)$ 에 대해 $\{D_{\max}(t)\} = \{0, 10, 10, 20\}$ 이고 $W = 4$ 이므로 폐기물 재고수준을 나타내는 k 와 l 은 0 혹은 2의 값을 가진다.

먼저, $d_{04}(0, 2)$ 를 산출하기 위한 계산과정을 소개한다. 즉 $u = 0$, $v = 4$ 이고 $k = 0$, $l = 2$ 일 때이다. $D_{\max}(4) = 10$ 이므로 누적재생산량 \widehat{X}_4 는 $\{4, 10\}$ 중 하나의 값을 가진다. 즉 $X_1 = 4$, $X_2 = 6$, $X_3 = X_4 = 0$ 이고 누적회수량 $Z_{14} = X_{14} - k + l = 10 - 0 + 2 = 12$ 이다. 또한 $\epsilon = \text{mod}(Z_{14}, W) = \text{mod}(12, 4) = 0$ 이므로 누적회수량 $\widehat{Z}_4 = Z_{14}$ 는 $\{0, 4, 8, 12\}$ 중 하나의 값을 가진다. 따라서 누적재생산량 \widehat{X}_t 및 누적회수량 \widehat{Z}_t 을 이용하여 $(\widehat{X}_t, \widehat{Z}_t)$ 의 가능한 값을 마디로 하고 $((\widehat{X}_t, \widehat{Z}_t), (\widehat{X}_{t+1}, \widehat{Z}_{t+1}))$ 을 호로하는 비순환네트워크를 이용하여 최

적 회수량 z_t 를 산출할 수 있다. [그림 3]은 이 과정을 비순환네트워크로 나타낸 것이다. 이 때, 최적 회수량은 $z_1 = 4$, $z_2 = 8$, $z_3 = z_4 = 0$ 이고 $d_{04}(0,2) = 66$ 이다. [그림 3]에서 마디 (0,0)에서 마디 (4,4)까지의 호 ((0,0),(4,4))의 비용은 다음과 같이 계산된다:

$$g((0,0),(4,4)) = 10 \times 1 + 1 \times (4 - 4) + 20 + 2 \times (4 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (4 \times \frac{3}{5} - 2) = 32.$$



[그림 3] $d_{04}(0,2)$ 계산을 위한 비순환네트워크

또한 [그림 3]에서 마디 (0,0)에서 마디 (4,4)까지의 호 ((0,0),(4,4))의 비용을 제외한 나머지 호에 대한 비용은 다음과 같이 계산된다:

$$g((0,0),(4,8)) = 10 \times 1 + 1 \times (8 - 4) + 20 + 2 \times (4 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (4 \times \frac{3}{5} - 2) = 36$$

$$g((0,0),(4,12)) = 10 \times 1 + 1 \times (12 - 4) + 20 + 2 \times (4 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (4 \times \frac{3}{5} - 2) = 40$$

$$g((4,4),(10,12)) = 10 \times 2 + 1 \times (12 - 10) + 0 + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 5) = 28$$

$$g((4,8),(10,12)) = 10 \times 1 + 1 \times (12 - 10) + 0 + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 5) = 18$$

$$g((4,12),(10,12)) = 10 \times 0 + 1 \times (12 - 10) + 0 + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 5) = 8$$

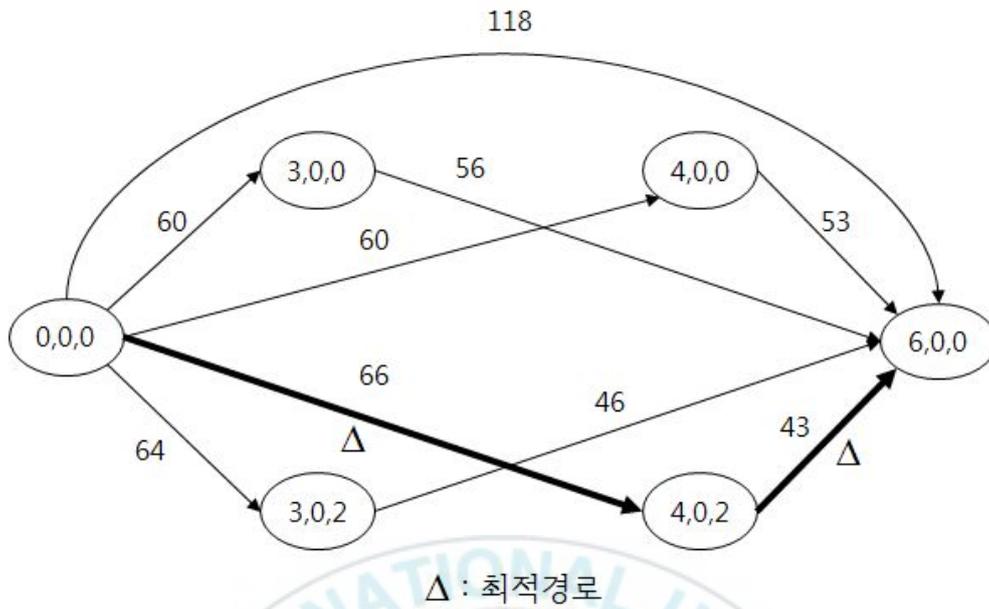
$$g((10,12),(10,12)) = 10 \times 0 + 1 \times (12 - 10) + 0 + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 3) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) = 4$$

$$g((10,12),(10,12)) = 10 \times 0 + 1 \times (12 - 10) + 0 + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 4) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) = 2$$

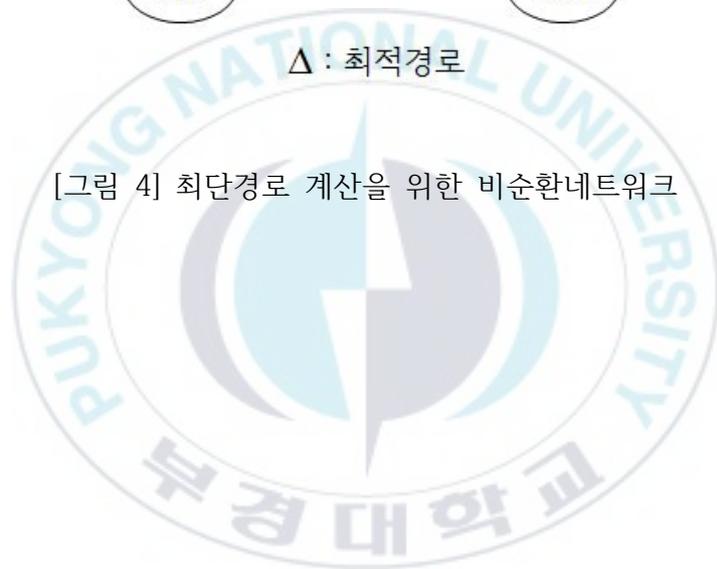
이와 같은 방법으로 실행가능한 재생품-재고점 $j(T) = \{0, 3, 4, 6\}$ 와 $k=l = \{0, 2\}$ 에 대해, 모든 $d_{uv}(k, l)$ 와 $f_v(l)$ 를 계산하여 정리하면 [표 2]와 같다. 모든 $d_{uv}(k, l)$ 와 $f_v(l)$ 를 계산하는 과정에 대한 상세내용은 [부록]에 정리한다. [표 3]으로부터 최적해는 회수-재생산순서 $S_{04}(0, 2)$ 와 $S_{46}(2, 0)$ 의 조합에 의해 결정됨을 알 수 있다. 또한 이와 같은 내용을 네트워크로 표현하면 [그림 4]와 같은 비순환네트워크가 되며 이 비순환네트워크를 대상으로 최단경로를 구하면 최적해를 구할 수 있다. [그림 4]에서 마디 내의 (t, k, l) 값은 각각 기간과 폐기물 및 재생품의 재고수준을 나타낸다. 따라서 최적 회수-재생산계획 $(z_1^*, z_2^*, z_3^*, z_4^*, z_5^*, z_6^*; x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*, x_6^*) = (4, 8, 0, 0, 4, 4; 4, 6, 0, 0, 6, 4)$ 이고 최소비용은 109이다.

[표 2] $d_{uv}(k, l)$ 와 $f_v(l)$ 의 계산 요약

v	u	k	l	$d_{uv}(k, l)$	$f_v(l) = \min\{d_{uv}(k, l) + f_u(k), 0 \leq u < v\}$
3	0	0	0	60	60
		0	2	64	64
4	0	0	0	60	60
		0	2	66	66
6	0	0	0	118	118
		3	0	56	60+56=116
	3	2	0	46	64+46=110
		4	0	53	60+53=113
	4	2	0	43	66+43=109



[그림 4] 최단경로 계산을 위한 비순환네트워크



VI. 결론

본 논문에서는 기존 연구에서 다루지 않아 왔던, 최소비용으로 다종의 재생품에 대한 동적 수요를 만족하기 위해 한 종류의 컨테이너 용기(W)를 사용한 폐기물에 대한 회수계획을 고려하고, 다수의 유한 재생산물 $\{0, P, \dots, mP\}$ 중 하나로 재생산되는 재생산시스템에서 다종제품이 일정비율로 재생되는 재생산계획을 동시에 결정하는 동적 회수-재생산계획문제를 다루었다. 이를 위해, 회수-재생산계획 수립을 위한 수리모형을 제시하고 최적해의 정점(extreme point)의 특성을 규명하여 최적해의 성질을 찾아내었다. 또한, 재고분할성질을 이용하여 최적 회수-재생산계획을 수립할 수 있는 동적계획법 알고리즘을 제안하였으며 이 때 $d_{uv}(k, l)$ 을 계산하기 위한 계산복잡도(Computational Complexity)는 $O(W^2 T^2)$ 이다. 동적계획법 알고리즘을 적용하기 위해 필요한 비용값 $d_{uv}(k, l)$ 을 효율적으로 찾을 수 있는 비순환 네트워크 기반의 알고리즘도 제시하였다. 이와 같은 연구 결과물은 재활용(recycling) 및 재사용(reuse) 산업분야에서의 효율적 재생산계획 수립을 위한 이론적 고찰과 기초연구를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

추후 연구과제로는 서로 다른 다양한 크기의 컨테이너 용기 형태를 고려한 폐기물 회수계획과 일정비율의 부산물이 재생산되는 다종제품의 재생산계획문제를 동시에 고려하는 문제를 연구하고자 한다.

본 연구를 통해 다음과 같이 학문·사회발전에의 기여 및 연구결과의 활용방안이 기대된다.

■ 학문적 기여

- (1) 이 연구의 결과는 폐기물 및 재생품 저장용량의 제약하에서 다종제품에 대한 최적 회수 및 재생산계획을 수립하는 문제에 새로운 접근방법 및 효율적인 알고리즘의 개발에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

- (2) 이 연구의 결과는 좀 더 현실적인 복잡한 재생시스템 분석을 위한 이론적 근거를 제공함과 아울러 좀 더 확장된 다양한 재생시스템 문제의 연구를 촉발시킬 수 있으리라 기대된다.
- (3) 이 연구를 통해 개발된 알고리즘은 유사한 구조를 갖는 재생에너지 산업환경의 온라인 폐기물회수.재활용관리시스템의 구축시 하나의 의사결정지원시스템으로써 제공될 수 있으며 현장의 특성에 따라 확장을 위한 기본모형으로 제시될 수 있다.
- (4) 이 연구의 결과는 국가적인 재생에너지 관리시스템 개발 시 모듈로써 사용될 수 있다.
- (5) 이 연구의 결과는 복잡한 다단계 구조를 갖는 유사 재생에너지 및 재생 시스템의 분석을 위한 이론적인 토대를 제공할 수 있을 것이다.

■ 사회, 경제적 기여

- (1) 이 연구의 결과는 재생에너지시스템 운영을 위한 최적 운영전략을 제공함으로써 에너지 절감효과와 더불어 저탄소 녹색기술정책을 선도함으로써 재활용산업을 선진화시키는 데 일조할 수 있다.
- (2) 지식기반의 최적 운영기술을 지원하여 IT 기반의 폐기물재활용관리시스템의 개발을 위한 핵심기술을 제공함으로써 지역내 저탄소 녹색기술 고도화에도 일조할 수 있을 것이다.
- (3) 본 연구의 결과는 아래와 같은 분야에 적용될 수 있다.
 - 다양한 폐기물 재생시스템의 설계 최적화
 - 신재생에너지시스템의 운영 효율화
 - 부산물이 생성되는 재생시스템의 운영 최적화
- (4) 수행과정에서 얻어지는 연구의 성과물인 최적화 운영전략과 알고리즘 개발기술을 폐기물 정제기업으로 전파하여 재활용 혁신을 선도할 수 있다.

■ 교육현장 활용 방안

- (1) 본 연구자가 소속된 학과의 대학원이 추구하는 두 연구분야 중 하나인 로지스틱스 부문에서 역물류(Reverse Logistics) 분야를 연구 중인 학생들에게 실제적인 연구대상을 선정하는 데 기여할 수 있다.
- (2) 지금까지 주로 제조 로지스틱스에 연구의 중점을 두어왔으나, 신재생 에너지시스템 분야로 연구 범위를 확대하는 기회로 활용할 수 있다.
- (3) 물류관리, 시뮬레이션, 최적화이론, 휴리스틱 방법론, 네트워크 및 정수계획법 등의 대학원 및 학부 교과목에서 적용사례로 활용함으로써 현장 중심의 맞춤형 교육의 수월성을 제고할 수 있다.
- (4) 본 연구에 참여한 연구인력들은 연구과제의 수행에서 획득된 노하우를 바탕으로 재활용산업의 혁신을 선도할 수 있는 특화된 전문인력으로 양성할 수 있다.
- (5) 본 연구의 수행을 통해 특화된 연구실의 운영과 연구인력의 확보를 통해 작게는 지방대학 대학원의 활성화에 일조하고 산업밀착형 전문인력의 양성을 통해 동남광역경제권 발전에 이바지할 수 있다.

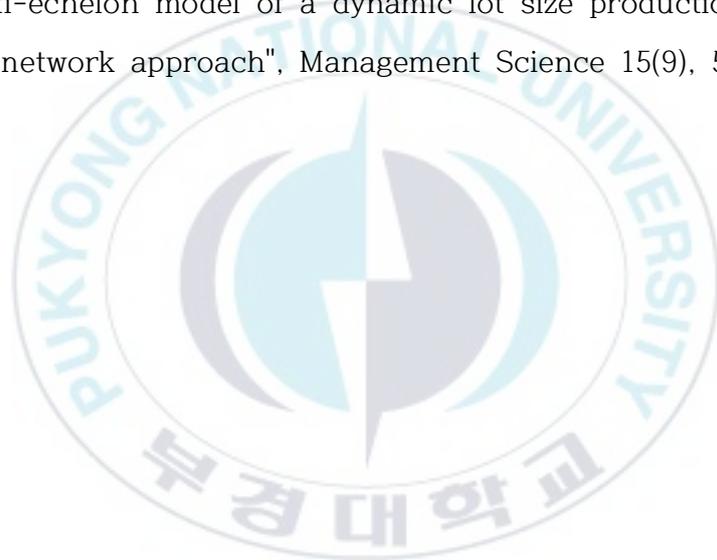
참고문헌

- [1] 서원철, 이운식 (2014), 유한 재생산률을 고려한 폐기물 동적 회수계획과 다종제품 재생산계획 문제, 한국경영공학회지 19(2), 1-13.
- [2] 이동은, 이운식, 구평희, 이강배 (2007), 용량제약을 갖는 단일설비에서의 동적 재생산계획문제, 한국경영공학회지 12(1), 11-24.
- [3] 이운식, 윤상흠 (2009), 중고품 할인구매정책을 고려한 동적 재생산계획문제, 한국경영공학회지 14(1), 123-136.
- [4] 이운식 (2009), 할인구매옵션을 고려한 동적 재생산계획문제, 한국경영과학회지 34(3), 71-84.
- [5] 주운기 (2000), 단일 재생 처리 설비를 이용한 재생계획, 한국경영과학회지 25, 111-122.
- [6] Boaz Golany, Jian Yag, and Gang Yu (2001), Economic lot-sizing with remanufacturing options, IIE Transactions 33, 995-1003.
- [7] Florian, M. and M. Klein (1971), Deterministic production planning with concave cost and capacity constraints, Management Science 18, 12-20.
- [8] Guide, Jr. V. D. (1996), Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment, International Journal of Production Research 34, 1081-1091.
- [9] Guide, Jr. V. D. and Spencer, M. S. (1995), Rough-cut capacity planning for remanufacturing firms, Production Planning & Control, 1995.
- [10] Inderfurth, K. (2004), Optimal policies in hybrid manufacturing/remanufacturing systems with product substitution, Int. J. of Production Economics 90, 325-343.

- [11] Lambert, A. M., and H. Luss (1982), Production planning with time-dependent capacity bounds, *European Journal of Operations Research* 9(4), 275-280.
- [12] Love, S. F.(1973), Bounded production and inventory models with piecewise concave costs, *Management Science* 20(3), 313-318.
- [13] Richter, K, and M., Sombrutzki (2000), Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models, *European Journal of Operational Research* 121, 304-315.
- [14] Richter, K, and J., Weber (2001), The reverse Wagner/Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost, *Int. J. of Production Economics* 71, 447-456.
- [15] Sethi, S. and S. Chand (1981), Multiple finite production rate dynamic lot size inventory models, *Operations Research* 29(5), 931-944.
- [16] Sobel, M. J. (1970), Smoothing start-up and shut-down costs: concave case, *Management Science* 17(1), 78-91.
- [17] Sung, C. S., and W. S. Lee (1994), Rolling schedules for a dynamic lot-sizing problem with start-up costs, *Engineering Optimization* 22(2), 137-152.
- [18] Sung, C. S., and W. S. Lee (1995), Setup cost reduction in a dynamic lot size model with multiple finite production rates, *Engineering Optimization* 24, 19-37.
- [19] Swoveland, C. (1975), A deterministic multi-period production planning model with piecewise concave production and holding-backorder costs", *Management Science* 21(9), 1007-1013.
- [20] Wagner, H. M. and T. M. Whitin (1958), Dynamic version of

the economic lot size model, *Management Science* 5(1), 89-96.

- [21] Yang, J., B. Goany, and G. Yu (2005), A concave-Cost Production Planning Problem with Remanufacturing Options, *Naval Research Logistics* 52, 443-458.
- [22] Zangwill, W. I. (1966), A deterministic multi-period production scheduling model with backlogging, *Management Science* 13(1), 105-119.
- [23] Zangwill, W. I. (1969), A backlogging model and a multi-echelon model of a dynamic lot size production system - a network approach", *Management Science* 15(9), 506-527.



[부 록]

1. $v=3$ 일 때

1) $u=0$ 일 때

① $k=0$ & $l=0$ 일 때

$D_{\max}(3) = 10$ 이고 $l=0$ 이므로 $x_1 = 4, x_2 = 6, x_3 = 0$ 이다. 따라서,
 $z_1 = 4, z_2 = 4, z_3 = 6, z_4 = 0$ 이다.

$$\begin{aligned}d_{03}(0,0) &= 10 \times 3 + 1 \times (4-4) + 1 \times (10-10) + 1 \times (10-10) \\ &\quad + 20 + 2 \times (4 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 3) \\ &\quad + 2 \times (4 \times \frac{3}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 5) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) \\ &= 30 + 20 + \frac{6}{5} + 4 + 2 + \frac{4}{5} + 2 = 60\end{aligned}$$

② $k=0$ & $l=2$ 일 때

$D_{\max}(3) = 10$ 이고 $l=2$ 이므로 $x_1 = 4, x_2 = 6, x_3 = 0$ 이고,
 $z_1 = 4, z_2 = 8, z_3 = 0$ 이다.

$$\begin{aligned}d_{03}(0,2) &= 10 \times 3 + 1 \times (4-4) + 1 \times (12-10) + 1 \times (12-10) \\ &\quad + 20 + 2 \times (4 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 3) \\ &\quad + 2 \times (4 \times \frac{3}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 5) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) \\ &= 30 + 0 + 2 + 2 + 20 + \frac{6}{5} + 4 + 2 + \frac{4}{5} + 2 = 64\end{aligned}$$

2. $v = 4$ 일 때

1) $u = 0$ 일 때

① $k = 0$ & $l = 0$ 일 때

$D_{\max}(4) = 10$ 이고 $l = 0$ 이므로 $x_1 = 4, x_2 = 6, x_3 = 0, x_4 = 0$ 이고
 $z_1 = 4, z_2 = 6, z_3 = 0, z_4 = 0$ 이다.

$$\begin{aligned}d_{04}(0,0) &= 10 \times 3 + 1 \times (4 - 4) + 1 \times (10 - 10) + 1 \times (10 - 10) + 1 \times (10 - 10) \\ &\quad + 20 + 2 \times (4 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 3) \\ &\quad + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 4) + 2 \times (4 \times \frac{3}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 5) \\ &\quad + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) \\ &= 30 + 20 + \frac{6}{5} + 4 + 2 + \frac{4}{5} + 2 = 60\end{aligned}$$

② $k = 0$ & $l = 2$ 일 때

$D_{\max}(4) = 10$ 이고 $l = 2$ 이므로 $x_1 = 4, x_2 = 6, x_3 = 0, x_4 = 0$ 이고,
 $z_1 = 4, z_2 = 8, z_3 = 0, z_4 = 0$ 이다.

$$\begin{aligned}d_{04}(0,2) &= 10 \times 3 + 1 \times (4 - 4) + 1 \times (12 - 10) + 1 \times (12 - 10) \\ &\quad + 1 \times (12 - 10) + 20 + 2 \times (4 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 2) \\ &\quad + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 3) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 4) + 2 \times (4 \times \frac{3}{5} - 2) \\ &\quad + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 5) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) \\ &= 30 + 0 + 2 + 2 + 2 + 20 + \frac{6}{5} + 4 + 2 + \frac{4}{5} + 2 = 66\end{aligned}$$

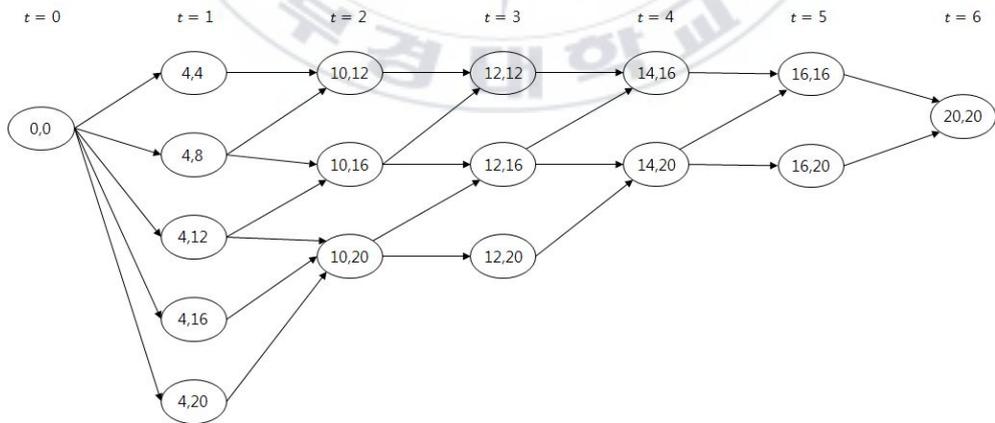
3. $v=6$ 일 때

1) $u=0$ 일 때

① $k=0$ & $l=0$ 일 때

$D_{\max}(6) = 20$ 이고 $l=0$ 이므로 $x_1=4, x_2=6, x_3=2, x_4=2, x_5=2, x_6=4$
 이고 $z_1=4, z_2=8, z_3=0, z_4=4, z_5=0, z_6=4$ 이다.

$$\begin{aligned}
 d_{06}(0,0) &= 10 \times 1 + 1 \times (4-4) + 10 \times 2 + 1 \times (12-10) \\
 &\quad + 10 \times 1 + 1 \times (12-12) + 10 \times 1 + 1 \times (16-14) \\
 &\quad + 10 \times 1 + 1 \times (16-16) + 10 \times 1 + 1 \times (20-20) \\
 &\quad + 20 + 2 \times (4 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (12 \times \frac{2}{5} - 3) \\
 &\quad + 2 \times (14 \times \frac{2}{5} - 4) + 2 \times (16 \times \frac{2}{5} - 6) + 2 \times (20 \times \frac{2}{5} - 8) \\
 &\quad + 2 \times (4 \times \frac{3}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 5) + 2 \times (12 \times \frac{3}{5} - 6) \\
 &\quad + 2 \times (14 \times \frac{3}{5} - 6) + 2 \times (16 \times \frac{3}{5} - 9) + 2 \times (20 \times \frac{3}{5} - 12) \\
 &= 10 + 20 + 2 + 10 + 10 + 2 + 10 + 10 + 20 + \frac{6}{5} + 4 + \frac{18}{5} + \frac{16}{5} \\
 &\quad + \frac{4}{5} + \frac{4}{5} + 2 + \frac{12}{5} + \frac{24}{5} + \frac{6}{5} = 118
 \end{aligned}$$



[그림 A-1] $d_{06}(0,0)$ 계산을 위한 비순환네트워크 구조

2) $u = 3$

① $k = 0$ & $l = 0$

$D_{\max}(6) - D_{\max}(3) = 20 - 10 = 10$ 이고 $\widehat{I}_{13} = 1, l = 0$ 이므로

$x_4 = 2, x_5 = 4, x_6 = 4$ 이고 $z_4 = 2, z_5 = 4, z_6 = 4$ 이다.

$$\begin{aligned}d_{36}(0,0) &= 10 \times 3 + 1 \times (2 - 2) + 1 \times (6 - 6) + 1 \times (10 - 10) + 20 \\ &\quad + 2 \times (1 + 2 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (1 + 6 \times \frac{2}{5} - 3) + 2 \times (1 + 10 \times \frac{2}{5} - 5) \\ &\quad + 2 \times (2 \times \frac{3}{5} - 0) + 2 \times (6 \times \frac{3}{5} - 3) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) \\ &= 30 + 20 + \frac{8}{5} + \frac{4}{5} + \frac{12}{5} + \frac{6}{5} = 56\end{aligned}$$

② $k = 2$ & $l = 0$

$D_{\max}(6) - D_{\max}(3) - k = 20 - 10 - 2 = 8$ 이고 $\widehat{I}_{13} = 1, l = 0$ 이므로

$x_4 = 2, x_5 = 4, x_6 = 4$ 이고 $z_4 = 0, z_5 = 4, z_6 = 4$ 이다.

$$\begin{aligned}d_{36}(2,0) &= 10 \times 2 + 1 \times (2 - 2) + 1 \times (6 - 6) + 1 \times (10 - 10) + 20 \\ &\quad + 2 \times (1 + 2 \times \frac{2}{5} - 1) + 2 \times (1 + 6 \times \frac{2}{5} - 3) + 2 \times (1 + 10 \times \frac{2}{5} - 5) \\ &\quad + 2 \times (2 \times \frac{3}{5} - 0) + 2 \times (6 \times \frac{3}{5} - 3) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) \\ &= 20 + 20 + 6 = 46\end{aligned}$$

3) $u = 4$

① $k = 0$ & $l = 0$

$D_{\max}(6) - D_{\max}(4) = 20 - 10 = 10$ 이고 $l = 0$ 이므로 $x_5 = 6, x_6 = 4$ 이고 $z_5 = 6, z_6 = 4$ 이다.

$$\begin{aligned}d_{46}(0,0) &= 10 \times 3 + 1 \times (6 - 5) + 1 \times (10 - 10) + 20 \\ &\quad + 2 \times (6 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 4) + 2 \times (6 \times \frac{3}{5} - 3) + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) \\ &= 30 + 1 + \frac{4}{5} + \frac{6}{5} + 20 = 53\end{aligned}$$

② $k = 2$ & $l = 0$

$D_{\max}(6) - D_{\max}(4) - k = 20 - 10 - 2 = 8$ 이고 $l = 0$ 이므로

$x_5 = 6, x_6 = 4$ 이고 $z_5 = 4, z_6 = 4$ 이다.

$$\begin{aligned}
d_{46}(2,0) &= 10 \times 2 + 1 \times (2+4-5) + 1 \times (2+8-10) + 20 \\
&\quad + 2 \times (6 \times \frac{2}{5} - 2) + 2 \times (10 \times \frac{2}{5} - 4) + 2 \times (6 \times \frac{3}{5} - 3) \\
&\quad + 2 \times (10 \times \frac{3}{5} - 6) \\
&= 20 + 1 + 20 + \frac{4}{5} + \frac{6}{5} = 43
\end{aligned}$$



감 사 의 글

만학도로서 부푼 기대와 꿈을 안고 기술경영과정을 시작하게 되었는데 이렇게 마무리 하게 되어서 정말 기쁘며, 새로운 도전을 할 수 있는 기회를 준 기술경영과정 교수님, 조교님 및 원우들께 감사의 말을 전합니다.

특히 본 논문이 완성되기까지 많은 지도와 격려를 해주신 이운식 지도 교수님 및 기술경영과정 1기 원우들에게 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 바쁘신 가운데에도 제 학위논문의 심사위원을 맡아주시고 좋은 조언을 해 주신 김민수 교수님, 서원철 교수님께도 감사드립니다.

석사과정을 하면서 같은 것을 고민하고 새로운 과제에 도전할 수 있었던 것과 원우들과 함께하는 인생설계 등 정말 보람된 시간이었습니다. 기술경영 1기 원우이면서 많은 조언과 고민을 함께 해주신 강인철, 정병철, 최우형님 및 김상운,배준희,김판석,변희준,임동주,전이현님과 함께한 금주회 회원님들에게도 감사의 말씀드립니다.

이외에도 서창배 교수님, 김경조 교수님 등의 기술경영과정 지도교수님과 여기 언급하지 않은 많은 분들께도 감사드립니다. 여러분의 도움이 있었기에 제가 있었고, 여러분께 힘이 될 수 있는 존재가 될 수 있도록 하겠습니다. 모두 감사하고 사랑합니다.

마지막으로 저에게 지혜와 감사를 주시고 항상 고마움을 주신 부모님 및 새로운 도전을 할 수 있도록 묵묵히 지원해준 아내와 나의 사랑하는 민솔, 보빈에게도 감사의 말과 사랑한다는 말을 드립니다.

2015년 8월

김 종 수