

생활폐기물 수거 방법의 비교 연구

정영훈*[†] · 서상호** · 김형호*

A Comparative Study of Waste Collection Technologies

Young Hoon Jung*[†], Sang-Ho Suh**, Hyoung-Ho Kim*

Key Words : Waste Collection System(WCS, 생활폐기물 집하시설), Pneumatic Capsule Pipeline(PCP, 캡슐 수송 장치), Waste Collection Techniques(쓰레기 수거 기술),

ABSTRACT

Due to the urbanization, lots of people are living in cities. It is very convenient to live in the cities for the people but at the same time, the highly populated city has several environmental problems. During delivery process of large amount of municipal waste generated from the cities, the automobile emission and traffic jam have been occurred. The waste collection in the cities has been mainly done by using labour force and delivery truck. This is the conventional waste collection up to now. Recently, new technologies like automated waste collection system and capsule transportation have been introduced. Conventional waste collection mainly relied on the labour force and truck delivery does not need to invest a lot of money for the start-up. However, it requires to pay the operational cost both for the labour force and the truck delivery. On the contrary to this conventional waste collection, the automated waste collection and capsule transportation require high initial investment cost. However, the automated waste collection and capsule transportation can reduce significantly the pollutants emission, traffic jam by the waste trucks and actual waste collection cost per ton. In dealing with the waste collection in the cities, new waste collection technologies could be properly combined with the conventional waste collection for the effective municipal waste treatment.

1. 서 론

산업 혁명 이후 두드러지게 나타난 사회 현상 중에 하나는 “도시화” 현상이라 할 수 있다. 도시화를 이야기 할 때 도시화율을 사용하게 되는데 도시화에 대한 사전적 의미는 『전국 인구에 대한 도시계획 구역 내 거주인구에 대한 비율을 말한다.』

도시화 정도는 국가별로 다양하지만 초기 단계→가속화 단계→중착 단계→퇴행 단계를 거친다. 초기 단계에서는 도시화율이 낮고 인구가 분산된 농업 중심의 사회로 도시 인구 비율이 25퍼센트 미만이다. 가속화 단계는 산업화에 의한 이촌 향도 현상으로 도시 인구가 급증하며 도시 인구 비

율이 25~70퍼센트이며 중착 단계는 70퍼센트 이상 비율을 말한다.

선진국은 산업 혁명 이후 도시화·산업화가 진행되어 중착 단계에 있으며 우리나라는 1960년대 이전 농업에 기반을 둔 초기 단계에서 1960년대 이후 경제 성장과 함께 도시화가 급속도로 진행되어 현재 중착 단계에 이르고 있다.

사회적으로 보면 도시화의 진행은 사람들이 서로 유기적으로 협동하고 도와주면서 살아갈 수 있는 기반을 제공하지만 환경 측면에서는 꼭 바람직하지는 않다. 왜냐하면 사람들이 도시에 집중적으로 거주하면서 배출하는 것이 자연 정화 능력을 초과하게 되었고 결과적으로 환경오염을 유발하게 되었기 때문이다. 도시화로 인하여 비례적으로 증가하게 되

* 송실대학교 기계공학과 (Mechanical Engineering of Soongsil University)

** 송실대학교 기계공학과 교수 (Mechanical Engineering Professor of Soongsil University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : yhjung362001@hanmail.net

는 환경오염으로서는 차량 증가에 의한 대기오염, 교통 체증, 폐기물 발생과 처리, 하수와 오수의 발생 등을 들 수 있다.

여러 가지 환경오염 요인 중 생활폐기물의 경우 매일 발생되고 있고 발생된 폐기물의 수집과 운반을 위하여 많은 인력과 장비가 동원되고 있다. 발생되는 폐기물의 양도 하나의 물류 개념으로 볼 수 있을 정도로 하루 수만 톤 규모에 달하고 있다.

따라서 도시지역에서 발생하는 생활폐기물을 수집과 운반 과정에서 하나의 물류 개념으로 바라보고 기존의 인력과 차량에 의한 수거 개념과 새로운 기술로 쓰레기를 수거하는 기술의 주요 특성을 비교하고자 한다.

2. 쓰레기 수거기술 현황

2.1. 생활폐기물 발생

2.1.1. 발생현황

2011년도에 환경부에서 발표한 『2010년 전국 폐기물 발생 및 처리현황』을 보면 “Table 1”과 같이 전국에서 발생하는 생활폐기물 양은 하루 49,159톤이다. 이중 서울에서 발생된 양은 10,020 톤으로 20.3%에 해당된다. 인구로 보면 국내 전체 행정 구역 인구는 51,003,160명으로 이중 서울시 인구는

Table 1 Waste Generation

구 분	전국 현황		서울시	
발생량 (톤/일)	49,159	100%	10,020	20.3%
인구 (천명)	51,003	100%	10,383	20.3%
관리에산 (백만원)	4,225,600	100%	1,101,591	26.1%

* 환경부, 2011, 전국 폐기물 발생 및 처리현황



Fig. 1 Waste Collection vehicle (5 Ton)

는 10,383,074 명인 20.3%에 해당되어 인구와 생활폐기물 발생량은 비례적인 상관관계가 있는 점을 알 수 있다.

그러나 폐기물 처리에 소요되는 관리 예산을 보면 전국 폐기물 관리 예산 4.2 조 원 중 서울시의 경우 1.1 조 원으로 26.1%에 해당되며 동일한 인구비율과 폐기물 발생량 20.3%에 비하여 약 6% 정도 높은 26.1%임을 알 수 있다.

서울시 생활폐기물 발생량은 연간 약 3,657,000 톤이며 관리예산은 약 1.1 조 원으로 톤당 비용으로 환산하면 톤당 301천원이 되며 여기에는 소각이나 매립비용이 포함되어 있다.

2.2. 수거기술 현황

2.2.1. 차량을 이용한 수거

발생되는 생활폐기물은 『폐기물관리법 제4조』에 따라 지방정부에게 수거와 처리의 책무가 있다. 생활폐기물의 수거는 지방정부의 고유 사무로 관련 법령에 따라 지방정부에서는 필요한 인력과 장비를 이용하여 폐기물을 수거 및 운송 후 최종 처리까지 하고 있다.

차량에 의한 폐기물의 수거는 우리나라에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 기술로 “Fig. 1”과 같이 폐기물 수거와 운반에 적합한 특장 차량을 사용하고 있다. 특장 차량의 경우 골목길 등의 진입이 용이하고 압축기능이 있어 수거업무에 적합한 5톤의 압축진개 차량이 주로 이용된다. 서울시내의 경우 폐기물의 수거를 위해 매일 940 여대 차량을 사용하고 있고 나머지 320대 차량은 주로 대형 암물 차량으로 김포의 광역매립장까지 폐기물을 운송하는데 사용 중에 있다.

2.2.2. 생활폐기물 운반과정

서울 시내에서 매일 발생하는 생활폐기물의 양은 10,020 톤이며 발생된 폐기물을 수거하거나 운송하기 위하여 수집 단계에서 약 950여대의 차량과 수집 후 운송과정에서 약 320대 이상의 차량이 운행되고 있다.

이들 차량들이 운행하는 과정에서 발생하는 환경오염의 요소는 크게 두 가지인데 하나는 화석연료 사용으로 인한 배기가스 배출과 차량운행으로 인한 교통체증을 들 수 있다. 배기가스로 인한 오염 양은 어느 정도 추론이 가능하지만 폐기물 수거차량 운행으로 인하여 발생시키는 교통체증에 대한 문제는 많은 연구가 진행되어 있지 않다. 다만 폐기물 수거차량으로 인하여 발생하는 문제점은 다음과 같은 점을 들 수 있다.

- a. 폐기물 수거 운반을 위한 차량운행은 교통흐름과 사람들 출·퇴근, 물류 흐름을 방해한다.
- b. 폐기물 수거 운반으로 인한 교통 정체시 화석연료의 낭비를 초래한다.

c. 폐기물 매립지 운반을 위한 전용도로 건설 등 사회비용 증대를 가져온다.

2.2.3. 차량으로 인한 환경오염

서울시내 생활폐기물 수집을 위하여 운행되는 트럭에서 발생하는 배기가스 환경오염 인자는 다음과 같다. 생활폐기물 특장 차량은 5톤과 11톤 트럭이 사용 중에 있으며 운행하고 있는 총 특장 차량 트럭 수는 5톤 차량 940대와 11차량 320대로 총 1,260대가 운행하고 있다. 단순 계산을 위하여 특장 차량을 5톤 트럭 기준으로 계산한 연간 유류사용량은 대당 18,233.6 리터이나 생활폐기물과 음식물폐기물을 따로 수거하고 있으므로 2배인 연간 36,467 리터이다.

시설 투자비용은 총 1,260대를 대당 차량가격 50 천만 원으로 하고 5년간 사용하면 대당 연간 시설 투자비용은 12,600 천원이 된다.

생활폐기물을 수거하기 위한 차량운행으로 발생하는 배기가스는 “Table 2”와 같이 질산화물(NOx), 이산화탄소(CO)순이며 년 간 서울시내에서 생활폐기물 수거를 위하여 특장 차량 운행으로 발생하는 대기오염 물질은 “Table 3”과 같이 약 2,300 톤이며 이를 편익으로 환산하면 수백억 원에 달할 것으로 추정된다.

2.3. 집하시설을 이용한 수거

2.3.1. 국내 최초 도입

국내 신도시 지역의 자동집하시설은 1995년 한국토지공사에서 용인수지2지구 국내 최초로 시범도입 하였다. 당시에는 택지개발 기술의 선진화를 위하여 도입되었고 약 15년이 지난 2012년 현재 전국에서 약 600,000호의 주택이 집하시설을 설치하거나 사용하고 있다.

Table 2 One Waste Truck's Emission(5 ton)

대기오염물질	TSP	SOx	CO	HC	NOx
배출계수	2.23	0.51	12.6	2.99	31.65
연간 유류사용 (liter/년)	36,467				
오염물질 배출량(kg)	81.3	18.5	459.5	109.0	1,154.2

Table 3 Total Emission from One Waste Truck in Seoul

대기오염물질	TSP	SOx	CO	HC	NOx
대당 배출량(kg)	81.3	18.5	459.5	109.0	1,154.2
운행 차량수	1,260				
연간 오염물질 배출량(ton)	102	23	579	137	1,454

Table 4 ARCS of Paju Project

시 설 명	파주운정지구 자동집하시설
세 대 수	46,054세대
가동시기	2011년부터 단계적 준공
수 거 량	일 85.8톤/일
파이프 길이	직경 500mm 70.5km(사업자 분)
최장배관 길이	1,900m
년간 유리관리	15 억원
공 사 비	약 1,120 억원

* ARCS means Automatic Refuse Collection System

2.3.2. 파주운정지구

“Table 4”의 파주운정지구 생활폐기물 자동집하시설은 세계 최대 규모 시설 중의 하나로 총 4개의 구역으로 나누어져 집하장이 설치되었다. 2006.12월 현 한국토지주택공사의 전신인 대한주택공사에서 발주하여 2007년 실시설계를 거쳐 시공이 진행되었다.

시설의 수명은 약 30년이며 평균 연간 비용은 공사비 총액 1,120 억 원을 30년으로 나누고 여기에 연간 관리비를 더하면 52.3억원이 된다. 폐기물 운반량은 하루 85.8 톤으로 연간으로 환산하면 31,317 톤이 되며 톤당 운반비는 167,001 원이 된다.

2.3.3. 집하시설의 수거 운반 특성

생활폐기물 자동집하시설은 각 가정에서 배출된 폐기물을 최장 약 3km 거리까지 자동으로 수거하는데 집하장(Collection Terminal)까지 수거하거나 소각장(Incineration Plant)이 있는 경우 소각장 병커까지 생활폐기물을 수거하여 투입하고 있다.

집하시설 설치시 장점은 다음과 같다.⁽³⁾

- a. 파이프라인으로 수거하여 무 공해형 수단인 동시에 눈, 비 영향을 받지 않는 전천후형 방식이다.
- b. 파이프라인을 수송 경로로 할 경우에 컴퓨터에 의한 자동 운전이 가능하다.
- c. 다수의 배출 점에서 한 지점으로의 집중 수송에 적합하기 때문에 폐기물 수집, 수송에 적합하다.
- d. 교통 정체 등 도로 사정의 악화에 대한 수집 수송 효율의 저하에 대한 대책이다.

2.4. 캡슐 수송 장치(Pneumatic Capsule Transport)를 이용한 수거

2.4.1. 공압캡슐 수송원리

공압캡슐 수송에 대한 명확한 정의는 없다. 그러나 캡슐 수송은 지하철도나 대부분의 자동화된 지하시스템과 비교하여 다른 점은 “Fig. 2”와 같이 캡슐을 움직이는 동력장치가 탑재되어 있지 않다는 점이다.

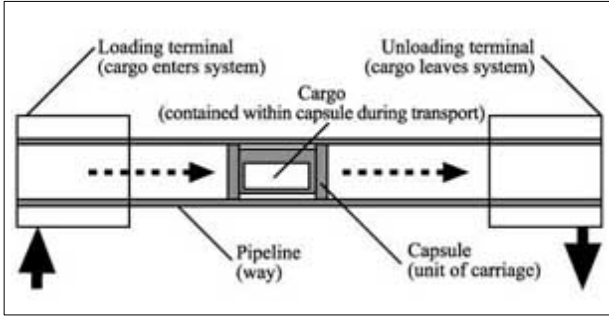
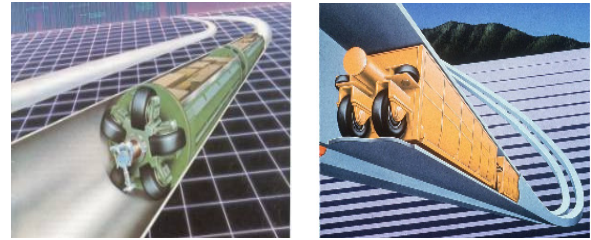


Fig. 2 Principle of PCP



(a) Pipe type PCP (b) Rectangular type PCP

Fig. 3 Basic Concept of Pneumatic Capsule Pipeline⁽⁶⁾

캡슐 수송은 육상의 다른 운송 시스템과 비슷하게 파이프라인이 터미널끼리 연결되어 있다. 그리고 캡슐은 라인을 따라 움직인다.

캡슐 수송은 재래식 파이프 운송과 다른 점이 있는데 운송 대상이 캡슐 내부에 있다는 점이다. 그리고 캡슐은 파이프라인에 따라 내부에서 움직이게 된다.

대부분의 캡슐 수송에서 캡슐은 캡슐에 흐르는 유체의 힘에 의해서 운반된다. 공기와 같은 유체를 이용하는 수송이 캡슐 수송(PCP) 이며 물을 사용하는 것을 수압캡슐 수송(HCP)라 한다.

2.4.2. 캡슐수송의 역사와 발전

조지아 공과대학에 근무하는 M. Carstens 박사는 PCP 시스템에 사용하는 부스터 펌프나 제트펌프 인젝터 발명에 크게 공헌을 하였다.

러시아 첫 번째 “Transprogress” 시스템은 깨어진 암석을 운반하기 위해서 설계 되었는데 몇 개의 컨테이너 캡슐을 연결한 공압철도로 운전되었다. 1971년 11월 Georgia의 Tibilisi 근처에 직경 1,020mm로 건설되었는데 캡슐은 적재시 30km/h 또는 비적재시 50km/h 속도로 2.1km을 운행을 하였다. 한 개의 공압철도는 6개의 캡슐이 연결되었고 15톤을 적재하였다. 이 시스템은 SKB Transnefteavto-matika에 의해서 설계되었고 Giprovodkhoz에 의해서 건설되었다.

1975년 1,220mm 직경의 PCP시스템이 Sichevska Concentrating 분쇄기에서 피트에 있는 자갈과 모래를 잘게 부수고 선광을 하는 분쇄기로 옮기기 위해 운영 되었다. 배관길이는 8km 이지만 110개의 캡슐철도를 이용하여 년 간 8백만 톤을 효과적으로 운송하였다.

1983년도에는 성피츠버그 레닌그라드에 도시에서 근처 처리장까지 폐기물을 옮기기 위하여 시스템이 건설되었다.

1972년에서 1985년 사이에 미국, 구소련 그리고 영국에서 상용화 하려는 노력이 있었는데 1985년 이후 불명확한 이유로 설치가 중단된 구소련이 가장 성공적 이었다.

1970년대까지 PCP 사업은 활발하지 못하였지만 1980년대 이후에도 꾸준히 새로운 돌파구를 찾고 있고 아울러 초대형 사업이 지속적으로 검토 되고 있는데 성공 사례는 다음과 같다.⁽⁷⁾ 일본의 스미모토 메탈사는 1m 직경에 3.2km 길이의 시스템을 1980년대에 석회석을 시멘트 공장으로 수거하기 위하여 설치하였다. 시스템은 연간 2백만 톤을 수송하고 있으며 가동율은 95%를 상회하고 있다. 이 시스템은 현재까지도 가동되고 있다.

현재 캡슐의 상용화는 제안 단계로 상업화 직전단계라 할 수 있고 조만간 상용화 기술 출현이 예상된다.

2.4.3. PCP 수거 운반 특성⁽⁸⁾

최근에 연구되고 있는 PCP를 보면 “Fig. 3”과 같이 원형의 파이프 형식과 4각 형식이 있으며 적용사례를 보면 초기 우편물, 소화물 등에서 암석 운반, 컨테이너 운반 등 원거리 적용사례가 시도되고 있다.

매립장까지 생활 폐기물을 운송하기 위해 미국 뉴욕 주에서는 지하에 설치된 PCP를 검토하였고 이때의 장점은 다음과 같다.

- a. 트럭의 필요성을 크게 줄이고 교통 혼잡을 유발하는 트럭의 수를 감소시킨다.
- b. 화석연료로 인한 대기오염, 소음과 트럭에 의한 교통사고를 크게 줄인다.
- c. 눈비 등 기후에 영향, 교통 혼잡과 도로보수 등에 영향이 없어 배송 신뢰성이 매우 높다.

2.4.4. 뉴욕의 연구 사례⁽⁹⁾

2003년 뉴욕주정부에너지연구개발원(New York State Energy Research and Development)에서는 뉴욕시 지하에 PCP를 이용 화물을 운송하는 타당성조사를 의뢰 받았다. 여기에는 터널 건설과 폐기물 운송 우편물이나 소화물 운송 박스 등과 같은 화물 운송 등 세부적인 적용방법이 구체적으로 검토되었는데 폐기물의 경우 매일 발생되는 폐기물을 하루 16,400톤씩 55 mile 떨어진 매립장까지 보내는 방법을 대상으로 하였다.

Table 5 Feasibility Study of PCP System in New York

시 설 명	생활폐기물 운송을 위한 PCP 시스템
연구대상	뉴욕시, 약 8,200 천명
수 거 량	일 18,000 톤
파이프 길이	직경 40 inch(1,000mm)
최장배관 길이	1,900m
년간 관리비용	21.76 M USD
공사비	파이프 라인 설치비 548.68 M USD 기타 장비 설치비 208.62 M USD

Table 6 Collection Technologies Comparison

시 설 명	차량수거	ARCS	PCP
동력원	화석연료	전기	전기
대중화	보편화 기술	도입 후 확산 단계	상용직진 단계
기술난이도	낮다	높다	높다
국내 상용화	○	○	x
기술검토 대상	서울시(SE)	파주운정(PJ)	뉴욕(NY)

시설 수명은 “Table 5”와 같이 30년이며, 평균 연간 비용은 공사비 총액 757.3 M USD를 수명으로 나누고 연간 관리비 21.76 M USD를 더하면 47.0 M USD가 된다. 연간 관리비 47.0 M USD를 연간 운반량 6.57 백만 톤으로 나누면 톤당 7.15 달러가 된다.

보고서에 따르면 뉴욕에서 발생하는 폐기물을 55마일 떨어진 매립장으로 PCP를 이용하여 보내는 경우 매립비용 등을 제외하고 톤당 7.15 달러로 기존의 트럭을 이용한 운송에 비하여 연간 130백만 달러를 절감할 수 있을 것으로 평가하였다.

3. 생활폐기물 수거방법 비교

3.1. 수거기술 비교

생활폐기물 수거방법은 일반적으로 차량을 이용한 수거, 집하시설 또는 캡슐 장치를 이용한 수거로 나눌 수 있다. 차량을 이용한 수거는 가장 보편화된 방법이며, 집하시설은 1970년대 이후에, 캡슐 장치를 이용한 수거기술은 현재 파이롯트(Pilot)나 연구단계로 제한적으로 사용되고 있는 기술이다. 각 수거 방법의 기술적인 비교는 “Table 6”와 같다.

3.2. 수거기술에 따른 주요인자 비교

3.2.1. 인구나 폐기물 발생

“Table 7”의 인구나 폐기물 발생량의 상관관계를 보면 배출원단위에서는 차이가 있으나 폐기물의 발생량은 인구 비례하여 발생량이 증가함을 알 수 있다.

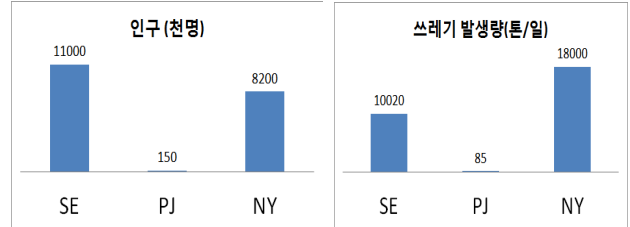


Table 7 Comparison between Population and Waste Amount

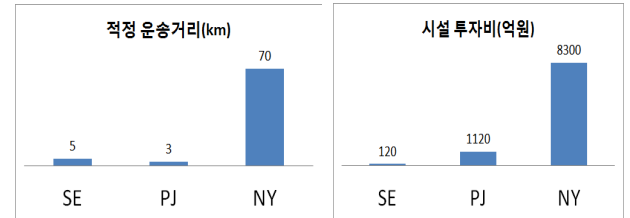


Table 8 Waste Transportation Distance and Investment Cost

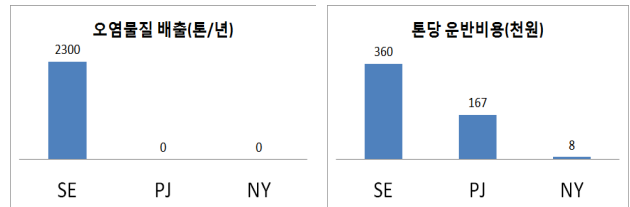


Table 9 Waste Vehicle's Emission and Waste transportation cost per ton

3.2.2. 운송거리와 시설 투자비

폐기물 운송을 위한 거리를 보면 “Table 8”과 같이 최장 70Km까지 운송이 가능한 PCP가 가장 유리하고 다음은 차량을 이용한 수거방법(서울시의 경우 구청 크기), ARCS 순으로 평가되었다.

3.2.3. 오염물질 배출과 톤당 운송비용

주로 차량을 이용하여 폐기물을 수거하는 서울시의 경우 차량 운행으로 인한 오염물질이 연간 2,300톤이 발생되며 ARCS와 PCP의 경우 2차 에너지인 전기를 사용하므로 도시 지역에는 오염물질을 배출하지 않는다. 톤당 운송비용에 있어서는 “Table 9”과 같이 뉴욕의 PCP 시스템이 8천원으로 가장 저렴하였으며 차량을 이용한 수거방법이 톤당 360,000원으로 가장 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 폐기물 발생량을 기준으로 2010년을 기준으로 서울시는 하루 10,020톤/일, 파주운정지구의 경우 하루 85.8톤/일, 뉴욕시는 18,000톤으로 파악되어 배출원단위는

다소 차이가 있을 수 있으나 기본적으로 인구에 비례하여 발생량이 증가함을 알 수 있다.

- 2) 폐기물 수거와 운송에 있어서 차량을 이용한 수거방법은 초기 투자비가 저렴하나 적정 운송거리가 짧고, PCP의 경우 적정 운송거리가 상대적으로 먼 곳까지 운송이 용이하나 많은 투자비용이 선행되어야 한다.
- 3) 서울시 내에서 생활폐기물을 수거하기 위해서 운행하는 차량은 하루 1,260대 이상으로 차량이 운행하는 동안 배출되는 배기가스는 TSP, CO 가스 등 연간 2,300톤에 달하고 교통 정체나 사고를 제외한 환경편익은 연간 수백억 원의 사회적인 손실을 주는 것으로 추정되었다.
- 4) 폐기물을 수거함에 있어 차량을 이용하는 수거방법과 ARCS와 PCP의 경우 각각의 운송거리와 투자비용, 환경비용, 톤당 운송비용은 차이가 있다. 오염물질 배출과 톤당 운송비용을 보면 PCP의 경우가 오염물질 배출과 톤당 운송비용에서 가장 경제성이 있는 것으로 평가 되었다.

도시폐기물은 매일 많은 양이 발생되어 물류개념으로 볼 수 있으므로 단순하게 차량을 이용하여 수거하는 것 보다는 수거에서부터 적환 단계까지는 차량을 이용하는 수거 방법과 자동집하시설 중 유리한 방법을 적용하고 PCP의 경우 적환에서 최종 처리단계에 적용 하는 등 새로운 기술을 적극적으로 적용할 경우 환경개선은 물론, 관련 기술개발, 폐기물 처

리를 위한 사회적인 비용을 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

- (1) 환경부, 2011, 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
- (2) 경기개발연구원, 2004, 쓰레기 자동집하시설 도입 타당성 검토 pp. 76~77.
- (3) 정영훈, 1997, 주택단지 쓰레기 관로수송방식 적용에 관한 기초연구 p6, 송실대.
- (4) capsu.org//Capsule Pipeline//What//Definition, 인터넷 자료.
- (5) capsu.org//Capsule Pipeline//What//PCP development, 인터넷 자료.
- (6) Henrey Liu, 2006, "Transporting Freight Containers by Pneumatic Capsule Pipeline(PCP)," U.S Transportation Research Board(TRB) Meeting Lajolla, California, July 9-11.
- (7) Jonathan Carter, Kevin Troyano-Cuture, 2010, "Capsule Pipelines for Aggregate Transport, Department of Earth Science and engineering," Imperial Colleague, London.
- (8) Henry Liu, 2004, "USE OF PNEUMATIC CAPSULE PIPELINE FOR UNDERGROUND TUNNELING," 12th International Symposium on Freight Pipelines, Prague, Czech Republic.
- (9) Henry Liu, 2004, "Feasibility of Underground Pneumatic Freight Transport in New York City," pp. 48~49.