

폐기물 저감 인센티브를 고려한 고립지역의 효율적 폐기물 관리 스케줄

황석준* · 황 욱** · 김현철***

요약 : 본 연구는 Keller(1974)의 최적 점검 모형을 이용하여 도서지역과 같은 고립지역에서의 폐기물 누적 발생량 추이를 추적하면서 발생량이 기준치를 초과하는 경우 이를 수거하는 효율적인 관리 스케줄 선택에 관한 문제를 살펴본다. 고립지역에서는 폐기물 발생량이 기준치를 초과하는지 여부를 파악하기 위하여 관리당국의 점검이 일정 기간 동안 적극적으로 자주 시행될 수도 있지만 이에 따른 모니터링 비용이 증가한다는 점과 아울러 기준치를 초과하여 누적되는 폐기물이 바로 수거되지 않는 상태가 지속되면 폐기물 관리기술의 혁신에 대한 사회적 요구도 높아질 수 있다는 점을 동시에 고려하여 최적 점검 스케줄에 대한 함의를 파악한다. 본 연구는 모니터링 비용이 증가하거나 폐기물 관리 시스템의 실패율이 작아지면 관리 당국의 점검은 느슨하게 시행되었지만 폐기물 누적 발생량이 기준치 이상으로 증대함으로써 고립지역 사회가 겪게 되는 후생 손실이 커지면 점검은 자주 시행될 것을 제시한다. 또한 폐기물 누적 발생량이 기준을 초과함으로써 촉진되는 혁신노력에 따른 사회적 한계편익이 상대적으로 작은 경우에도 적극적인 점검이 최적의 선택임을 제시한다.

주제어 : 고립지역 폐기물 관리, 최적 점검 스케줄

JEL 분류 : Q53, Q58

접수일(2017년 7월 13일), 수정일(2017년 7월 27일), 게재확정일(2017년 7월 27일)

* 경북대학교 경제통상학부, 교수, 주저자(e-mail: sxh219@knu.ac.kr)

** 경북대학교 경제통상학부, 교수, 교신저자(e-mail: uh202@knu.ac.kr)

*** 제주연구원, 연구위원, 공저자(e-mail: hyuncho@jri.re.kr)

Optimal Scheduling for Efficient Waste Management in Isolated Regions from the Perspective of Waste Reduction Incentives

Seok-Joon Hwang* · Uk Hwang** · Hyun-Cheol Kim***

ABSTRACT : This study examines the problem of efficient scheduling of waste collection in isolated regions like islands when the waste accumulated amount surpasses the standard ceiling by effectively tracking the accumulating trends based on the optimum checking model of Keller (1974). To grasp whether the waste accumulated amount in isolated regions exceeds the standard ceiling, the relevant authorities can tightly check during a set period, but this entails higher monitoring costs. On the other hand, if the accumulated waste over the ceiling is not immediately checked and collected, and continues for a set period of time, innovative efforts for waste management may be highly demanded. As such, the tradeoffs are considered to draw the optimal checking schedule. This study shows that the authorities get to check less frequently the waste accumulation trends if the monitoring costs increase or when the failure rate of waste management systems drops. On the other hand, they get to check more frequently if the accumulated waste amount in isolated regions exceeds the standard ceiling and welfare loss grows as a result. It also shows that frequent checking is the optimal choice if the social marginal benefits enjoyed from innovative efforts made to keep accumulated waste below the standard ceiling, are not significant.

Keywords : Waste management in an isolated region, Optimal checking schedule

Received: July 13, 2017. Revised: July 27, 2017. Accepted: July 27, 2017.

* Associate Professor, School of Economics and Trade, Main author(e-mail: sxh219@knu.ac.kr)

** Associate Professor, School of Economics and Trade, Corresponding author(e-mail: uh202@knu.ac.kr)

*** Senior Researcher, Jeju research Institute, Coauthor(e-mail: hyuncheo@jri.re.kr)

I. 서론

최근 제주도에서는 갑작스러운 폐기물 증가에 따른 폐기물매립장 부족현상이 심각한 지역사회 문제로 대두되고 있다. 이러한 도서지역의 매립장 부족현상은 도서지역이라는 특수성으로 인하여 매립지를 쉽게 마련하기가 용이하지 않다는 점에서 환경적으로 우려할 만한 사건이 될 수 있다. 더구나 폐기물 해양투기가 금지되어 있는 현실과 폐기물의 내륙으로의 반입이 비용적 측면에서 불가능한 상황에서는 지역 내에서 폐기물발생을 억제하지는 자발적인 의견이 이번 상황과 더불어 큰 설득력을 가지게 될 것이다. 예를 들어 Jared Diamond의 저서 “문명의 붕괴(Collapse, 2005)”에서는 고립된 지역에서 환경을 고려하지 않는 인간의 문명과 경제활동이 어떻게 고립된 지역을 서서히 붕괴시키는가에 대한 흥미로운 사례들이 소개되고 있다. 이러한 사례들은 환경재화에 대한 면밀한 인식과 적절한 관리가 선행되지 않는다면 고립지역에서의 생존은 결국 재앙에 가까운 어려움에 직면하게 될 것임을 경고하고 있다. 이러한 측면에서 제주도에서의 폐기물증가와 폐기물매립지 부족현상은 고립지역 사회의 지속적 발전을 추진하는데 있어서 경종을 울리는 사건으로서 적절한 시스템하에서 관리되어야 하는 중요한 화두로 인식되어야 하는 시기가 도래하였음을 알려주고 있다.

본 논문에서 우리는 이러한 고립지역에서의 폐기물관리를 위한 적정 점점 스케줄을 이론적인 면에서 접근하였다. 폐기물에 대한 적정 처리 스케줄 도출을 위하여 “폐기물의 존재” 자체가 고립지역의 주민들에게 비효율을 유발하여 이를 처리하고자 하는 혁신을 유도하는 압력으로 작용한다는 점에도 착안하였다. 다시 말해서, 폐기물이 발생되면 이를 처리하여야 하는데 발생 즉시 수거하여 처리함으로써 폐기물로 인한 사회적인 비효율을 바로 줄이기보다는 이를 어느 정도 적정기간 동안 수거하지 않음으로써 자연스럽게 폐기물을 치우고자 하는 사회적 인센티브를 증대시켜 폐기물 관리기술의 혁신을 유도하려는 동기도 극대화시키는 측면을 동시에 고려하는 폐기물 적정 수거기간을 이론적으로 제시하고자 한다.

이러한 관점이 본 연구의 이론적 설계에서 고려된 이유는, 예를 들어, 2015년부터 시작된 레바논 폐기물 사태와 같이 치워지지 않고 쌓여가는 폐기물들이 이를 관리하는 데 필요한 혁신 등의 사회적 노력을 유도하지 못하고 정부의 정책적 대응도 제때 시행되지

않아서 지속적으로 환경을 파괴하게 되는, 즉 본 연구에서 제시되는 이론의 함의와는 사뭇 다른 모습의 현상들이 나타나기 때문이다.¹⁾ 그러나 이러한 현상들은 레바논이 고립된 지역이 아니기 때문에 발생할 수 있는 사례로 이해할 수 있을 것이다. 그러나 특별히 도서지역과 같은 고립된 지역에서의 이와 같은 환경 문제의 대두는 주민 생존과 지역 생태계에 심각한 도전과 위협을 불러일으킬 수 있어서 폐기물 처리 및 억제에 대한 강한 사회적 요구로 이어질 수 있음을 생각하면 고립지역의 자발적 폐기물 저감 동기의 고려는 폐기물 적정관리 스케줄 도출에 매우 중요한 고려 사항이 될 수 있다.²⁾

이러한 측면에서 폐기물의 적정관리란 폐기물의 발생상황을 지속적으로 모니터링하면서 폐기물을 줄이고자 하는 혁신의 동기를 시간에 따라 고려하여 폐기물의 발생과 처리에 따른 사회적인 비용을 최소화시키는 폐기물의 적정 수거기간을 제시하여 운영하는 것으로 이해될 수 있다. 이를 위해 기존의 생산관리 등의 분야에서 응용되는 Keller (1974)의 최적 점검 방식을 근간으로 혁신을 발생시키는 과정에 대한 함수적 고려를 통해 폐기물의 적정 수거기간의 설정이 폐기물관리의 중요한 요소가 됨을 제시하였다. 비록 좀 더 넓은 의미에서, 즉 고립지역에서의 생존기간 극대화를 논의하는 과정에서 모형이 제시되지는 않았지만 적어도 협의의 측면, 즉 비용 측면에서 환경을 지속시키려는 사회적인 노력이 지속가능성장을 어떻게 유도할 수 있는가를 이론적으로 설명하고자 하였다.

II. 최적 점검을 위한 스케줄링 모형

1. 시나리오

고립지역에서 폐기물 누적 발생량이 불특정 시점에서 고립지역이 감내할 수 있는 기준치를 초과하는 과정에서 이를 점검하려는 관리당국의 노력이 이루어지는 경우에는

-
- 1) 자세한 내용은 2016년 8월 30일 로이터 기사 “Lebanon's Trash Crisis Threatens Return in Summer Heat”를 참조할 것.
 - 2) 우리나라에서도 이러한 폐기물 저감 인센티브를 고려한 관리 당국의 대응사례를 다양한 언론기사에서 발견할 수 있다. 예를 들어 2015년 부산의 중심가 서면지역 거리에서의 쓰레기 무단투기가 증가하자 부산진구가 청소중단으로 맞선 사례를 발견할 수 있는데 이는 불법 쓰레기 투기가 지속되면 거리가 어떻게 되는지 시민들이 직접 느끼고 경각심을 갖게 하자는 취지의 대응으로 해석될 수 있어서 효율적 폐기물 관리 및 수거를 위한 최적 관리 스케줄을 도출하는데 있어서 폐기물 저감을 위한 사회적 노력 또한 고려되어야 함을 인식하는 중요한 사례로 볼 수 있다.

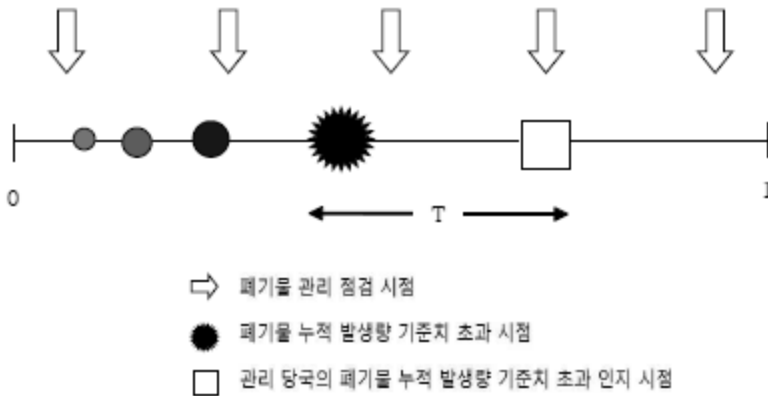
모니터링 비용이 발생하게 된다. 이때 폐기물 누적 발생량 기준치 초과 시점과 이 사실이 점검을 통하여 밝혀지는 시점까지의 기간을 T 라고 하면 임의의 기준초과 시점과 당국의 점검에 따른 사실 인지까지의 기간 T 의 길이가 길어질수록 기준이 초과된 폐기물 방치에 따른 사회적 외부불경제로 인하여 고립지역의 후생적 손실은 증가하게 될 것이다. 그러나 만일 관리당국이 점검 횟수를 늘려서 폐기물 누적 발생량 기준 초과 사실을 자주 확인하고 재빨리 수거에 나서는 등 사회적 피해를 최소화 하려는 적극적인 노력을 기울일 경우에는 이러한 사회적 후생손실을 줄일 수 있으나 관리당국의 적극적인 모니터링 활동에 따른 총비용은 증가하게 되는 상충적(trade-off) 결과에 직면하게 될 것이다. 따라서 본 논의에서는 폐기물 누적 발생량 기준치 초과를 인지하려는 관리당국의 점검 스케줄 시행에 따른 사회적 총 비용의 기댓값을 최소화하는 적정 폐기물 관리 점검 스케줄의 선택에 관한 문제를 살펴보고자 한다.

그러므로 관리당국이 시행하는 점검의 적정 스케줄(단위 시간 당 최적 점검 횟수)을 연구하기 위해서는 관련 변수들이 어떤 목적 하에서 도입되고 조정되는 가를 살펴볼 필요가 있다. 기본적으로 적절한 폐기물 누적 발생량 점검 회수는 발생량 기준치 초과로 인해 발생하는 사회적 후생 손실과 이를 추적하기 위해 지불해야 하는 모니터링 비용간의 비교를 통해 비용을 최소화하는 방식으로 결정될 것이다. 그러나 문제는 어떤 임의의 시점에서 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과하게 되는지를 정확히 알 수 없기 때문에 정태적인 모형을 통해 이를 파악하기보다는 동태적인 관점에서 관리당국이 적절한 점검 전략을 시행함으로써 이를 인지하는 모형을 고려하는 것이 더욱 유효한 접근방법이 될 수 있다. 이를 위해 먼저, 다음과 같은 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과하게 되는 시나리오를 가정해 보았는데 이는 <그림 1>을 통하여 간략히 그 핵심을 파악해 볼 수 있다. 즉, 임의의 단위시간 동안 관리당국은 폐기물 누적 발생량의 기준치 초과 여부 파악을 위한 점검을 수차례 실시하여 발생량의 누적 움직임을 모니터링한다.³⁾ 이때 점검은 단위 시간 동안 일정한 분포를 두고 시행된다고 가정해 보자. 본 연구에서는 점검의 시행이 단일분포(uniform distribution)의 모습으로 일어나는 경우에 초점을 두고 논의를 진행한다. 아래 <그림 1>에서는 관리 당국의 점검이 단위 시간 동안 다섯 차례 시행되는 경우를

3) 여기서 단위시간은 '1'로 정규화(normalization)하였는데, 1년, 1달, 1주일 등 어떠한 기간도 고려가능하다.

가정하여 화살 표시로 나타내었다. 그림에서 표기 ●는 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과하게 되는 임의의 시점을 나타내고 있다. 그리고 표기 □는 다섯 차례의 점검이 시행되는 가운데 관리당국이 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과한 사실을 인지하고 절차에 따라 수거가 시행되는 시점을 나타내고 있다. 그림에서 이 두 시점의 길이는 T 기간으로 표기하고 있으며 이 기간 동안 고립 지역에서는 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과한 사실이 감지되지 않으므로 기준치를 초과한 폐기물의 누적량은 더욱 증가하여 고립지역에서 심각한 외부불경제를 초래하게 된다. 이러한 시나리오를 통해서 고립지역의 폐기물 관리당국은 1) 폐기물 누적 발생량 기준치 초과 여부를 점검하는 데 소요되는 비용, 2) 폐기물 누적 발생량 기준치 초과 사실을 인지하지 못해서 초래되는 외부불경제에 따른 고립지역 내의 후생적 손실 및 3) 서론에서도 언급되었듯이 기간 T 의 길이에 따라서 폐기물을 감소시키고자 하는 사회적 혁신 노력을 모두 고려하여 고립지역사회의 순비용을 최소화하려는 비용최소화 관점에서 적정 점검 스케줄을 도출하게 된다.

〈그림 1〉 폐기물 누적 발생량 기준치 초과와 관리당국의 인지 및 수거 시점



2. 모형

이제 폐기물 누적 발생량 기준치 초과사실이 관리당국에 의해서 인지되지 못하여 발생하는 사회적 순손실은 기간 T 의 함수로 나타낼 수 있으므로 이를 $D(T)$ 라 표기하자.

또한 폐기물 누적 발생량이 기준치를 실제로 초과하는 시점을 $z(t)$ 라고 나타낸다. 앞에서 관리당국에 의한 점검은 단위 시간 동안 단일분포를 가진다고 가정하였으므로 이 분포함수를 고려하여 기간 T 에 대한 평균시간을 구해 볼 수 있을 것이다.⁴⁾ 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과하였는지 여부를 판단하기 위하여 점검이 단위 시간 동안 임의의 n 번 시행된다고 생각해 보면 폐기물 관리 당국의 점검 스케줄에 대한 확률밀도함수는 $\frac{1}{n}$ 이 된다. 따라서 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과하는 임의의 시점으로부터 수거를 위하여 관리당국이 기준치 초과 여부를 파악하려는 점검을 통하여 기준치 초과가 인지되는 시점까지의 기간 T 의 평균적 시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(z) = \int_0^1 z \frac{1}{n} dz = \frac{1}{n} \int_0^1 z dz = \frac{1}{2n} \quad (1)$$

따라서 폐기물 누적 발생량이 실제로 기준치를 초과하였으나 관리당국의 점검 스케줄이 이 사실을 인식하지 못함으로써 고립지역에 초래될 수 있는 평균적인 사회적 손실을 암묵적 함수로 나타내면 $D\left(\frac{1}{2n}\right)$ 라 표기할 수 있다. 또한 본 연구에서는 이러한 사회적 손실이 가중되면 고립지역에서는 폐기물 관리와 관련된 새로운 관리기술에 대한 혁신을 추진하고자 하는 유인이 존재할 수 있는 시나리오를 고려하였다. 따라서 평균적인 사회적 손실은 $D\left(\frac{1}{2n}\right) - \beta I\left\{D\left(\frac{1}{2n}\right)\right\}$ 이 된다. 여기서 파라미터 $\beta(> 0)$ 는 폐기물 관리기술 혁신에 대한 고립지역 사회의 주관적 가중치를 의미하고 아울러 폐기물 관리기술에 대한 혁신은 폐기물 누적 발생량 기준치 초과되는 기간이 지속되면서 고려되는 사회적 손실의 함수라고 가정한다. 즉, $I(D)$ 이므로 폐기물 누적이 고립지역 사회에 가져오는 외부불경제가 오히려 사회의 폐기물 관리에 대한 혁신 노력을 증대시키는 관계를 설명하고 있다.⁵⁾ 여기서 모형에서 고려하는 정규화된 단위시간은 임의의 길이이므로 단

4) 여기서 평균시간은 고립지역의 폐기물 관리당국이 일정 시간 내에 폐기물 불법투기 점검을 일정한 간격으로 시행하는 경우, 즉, 점검이 단일확률분포(uniform distribution)를 따른다고 할 때, 임의의 특정 시점에서 폐기물 불법투기가 이루어지고 이를 관리당국이 점검해서 투기사실을 포착하기까지의 평균적인 시간을 구하는 것이다.

위시간당 점검 횟수는 임의의 길이로 주어진 기간 t 의 함수가 되어 점검 횟수 역시 $n(t)$ 라 표기할 수 있다. 그렇다면 좀더 정확한 평균적인 사회순손실은 $D\left(\frac{1}{2n(t)}\right) - \beta I\left\{D\left(\frac{1}{2n(t)}\right)\right\}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 사회적인 순손실은 점검 횟수의 감소함수임을 알 수 있다.

한편 고립지역의 폐기물 관리당국이 누적 발생량을 추이를 적극적으로 파악하기 위하여 점검 횟수를 증가시키면 폐기물 누적 발생량 기준치 초과에 따른 사회후생적 측면에서의 손실을 억제시킬 수도 있지만 이러한 당국이 점검 스케줄을 조밀하게 계획한다면 이 또한 모니터링 비용을 발생시킬 수 있음을 이미 언급한 바 있다. 따라서 관리당국의 적극적인 점검에 따른 모니터링 비용의 추이는 단위기간 당 발생하는 점검 횟수에 의존하게 될 것이다. 수식표현을 단순화시키기 위해 관리당국의 1회 점검에 항상 ω 원의 추가적 비용이 발생한다고 가정해 보자. 그렇다면 t 시점까지 발생하는 총 모니터링 비용은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega \int_0^t n(u) du \tag{2}$$

따라서 폐기물 관리당국의 점검 스케줄과 관련하여 기대되는 사회적 총비용은 누적 발생량 기준치 초과 사실을 감지하지 못하여 발생하는 고립지역의 사회적 후생손실과 이를 감소시키려는 폐기물의 효과적 관리를 위한 사회적 혁신 노력 및 폐기물 투기를 적발하기 위해 발생하는 모니터링 비용으로 구성된다고 정의해 볼 수 있으며 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\text{기대 총비용} = D\left(\frac{1}{2n(t)}\right) - \beta I\left\{D\left(\frac{1}{2n(t)}\right)\right\} + \omega \int_0^t n(u) du \tag{3}$$

다음으로 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과한 사실을 관리당국의 주기적 점검에서도 파악되지 못하는 등 점검 시스템이 제대로 작동하지 못하고 실패하였을 때를 고려

5) 본 연구에서는 혁신함수 $I = I(D)$ 는 $I_D > 0, I_{DD} < 0$ 조건을 만족한다고 가정한다.

하여 이러한 시스템의 실패를 확률분포로 나타내 볼 수 있다. 즉, 단위기간 동안 관리 점검 시스템이 실패할 확률은 누적분포함수 $H(t)$ 로 표현될 수 있다고 가정하면 이 밀도함수는 $h(t)(\equiv H'(t))$ 로 표기되어질 수 있다. 만약 이러한 실패가 모형이 고려하는 단위시간 상에서 특정한 시간 t_1 까지 지속된다고 한다면 누적분포함수의 정의에 따라 $H(0) = 0$, $H(t_1) = 1$ 으로 나타낼 수 있을 것이다.⁶⁾ 따라서 식 (3)에서 고려된 특정 시점에서의 기대 총비용과 함께 관리당국의 점검 시스템 실패 확률까지 고려된 폐기물 누적 발생량 기준치 초과 사건발생에 따른 사회적 총비용 함수는 아래와 같이 표현된다.

$$\int_0^{t_1} \left[D\left(\frac{1}{2n(t)}\right) - \beta I\left\{D\left(\frac{1}{2n(t)}\right)\right\} + \omega \int_0^t n(u)du \right] h(t)dt \quad (4)$$

위 식 (4)는 폐기물 관리당국의 주기적 점검이 실패할 경우를 고려한 총비용 함수라고 해석될 수 있으며 식은 이러한 총비용이 시간의 함수로 표현된 것이다. 따라서 이 문제는 폐기물 누적 발생량 기준치 초과에 따른 사회적 총비용을 최소화시키는 최적 점검 스케줄을 찾아야하는 관리당국이 직면한 문제의 목적함수이다. 이 문제의 본질을 그대로 유지하면서 관리당국이 해결해야 할 전형적인 동태적 최적화 문제(dynamic optimization problem)로 나타내기 위하여 다음과 같은 변수를 정의해 보자.

$$\sigma(t) = \int_0^t n(u)du, \quad \sigma'(t) = n(t) \quad (5)$$

따라서 식 (5)에 정의된 변수를 식 (4)로 표현된 총비용 함수식에 대입해 보면 폐기물 관리당국의 동태적 최적화 문제는 다음과 같은 일반적인 모습으로 표현될 수 있다.

6) $t=0$ 초기부터 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과하는 임의의 시점이 τ 라면 바로 이 시점 직전까지는 관리당국의 점검 시스템은 발생량이 기준을 초과하지 않았다고 인지하고 있을 것이므로 $H(0)=0$, $H(\tau)=0$ 이다. 그리고 이에 따른 사회적 후생순손실도 없을 것이며 관리당국의 모니터링 비용만 발생하게 될 것이다. 그러나 발생량이 기준치를 초과하는 시점 τ 이후와 관리당국의 점검이 들어가서 이를 인지하고 수거하는 시점 t_1 까지는 관리당국의 주기적 점검이 이를 파악하지 못하는 기간 T 이므로 이 기간을 관리당국의 점검 시스템이 실패한 상황이라고 볼 수 있다. 이 기간을 걸쳐서는 사회적 후생순실과 관리당국의 모니터링 비용이 동시에 발생하게 된다.

$$\min_{n(t)} \int_0^{t_1} \left[D\left(\frac{1}{2\sigma'(t)}\right) - \beta I \left\{ D\left(\frac{1}{2\sigma'(t)}\right) \right\} + \omega \sigma(t) \right] h(t) dt$$

s.t. $\sigma(0) = 0$, $\sigma(t_1)$ 은 제약없음 (6)

식 (6)에서 표현된 제약조건들의 살펴보면 초기조건은 시점 $t = 0$ 에서는 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과하지 않고 있으며 관리당국의 점검 시스템이 실패하는 임의의 시점, 즉 마지막 발생시점($t = t_1$)에 대해서는 특정한 제약이 주어지지 않았음을 나타내고 있다.

이제 식 (6)에서 정의된 동태적 최적화 문제를 해결하기 위하여 피적분체의 가치함수 (value function)를 다음과 같이 정의해 보자.⁷⁾

$$\nu(\sigma', \sigma) = \left[D\left(\frac{1}{2\sigma'}\right) - \beta I \left\{ D\left(\frac{1}{2\sigma'}\right) \right\} + \omega \sigma \right] h$$
(7)

식 (6)에서 파악되는 가치함수 식 (7)을 σ' 과 σ 로 각각 편미분하여 얻는 결과는 다음과 같다.

$$\nu_\sigma = \omega h, \quad \nu_{\sigma'} = -\frac{D'}{(2\sigma')^2} h + \beta \frac{I_D D'}{(2\sigma')^2} h^8$$
(8)

식 (8)의 왼쪽 식은 관리당국이 단위 시간상에서 임의의 시점까지 총점검 횟수 σ 를 증가시키게 되면 임의의 시점에서 발생하는 폐기물 누적 발생량 기준치 초과 사건과 이것이 인지되지 못해서 추가로 발생하는 한계적 총비용의 증가분은 관리당국의 한계적 모니터링 비용의 증가분과 일치함을 설명하고 있다. 또한 오른쪽 식은 단위 시간 상의 특정 시간 안에서 점검 횟수 1단위 증가시키면 특정시점에서 발생한 기준치 초과 사건을 감

7) 가치함수 ν 는 각 변수에 대하여 미분가능하다는 가정이 수반된다.

8) 여기서 $I_D \equiv \frac{dI}{dD}$ 로 정의하며 사회적 총손실 한 단위 증가에 따른 고립지역 당국의 폐기물 관리기술 혁신노력의 한계적 변화분을 의미한다.

지하지 못하여 추가로 발생하는 한계적 총비용의 증가분과 그로 인하여 사회적 혁신 노력이 고려된 한계적 사회 후생의 순수실의 증가분 또한 일치함을 의미한다. 식 (8)에서 도출된 두 가지 편미분식을 이용하여 동태적 최적화 문제의 필요조건인 오일러 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁹⁾

$$\int \nu_{\sigma} dt = \nu_{\sigma}$$

위의 오일러 방정식은 기본적으로 폐기물 누적 발생량 기준치 초과 사건이 단위 시간상의 임의의 시점 간에 나타남에 따라 사회가 치러야 하는 총비용을 최소화시키기 위하여 임의의 시점에서의 총비용의 한계적 변화분(ν_{σ})이 시간변수의 단위변화에 따라 움직이는 관리당국의 점검 횟수의 추가적 변화에 따른 임의의 시점에서의 총비용의 한계적 변화분($d\nu_{\sigma}/dt$)과 동일하게 되도록 만드는 점검 횟수의 선택이 최적일 수 있음을 의미한다. 다시 말해서 사회적 총비용을 최소화 시키는 점검 횟수의 최적 시간궤적(time path)은 각 시점에서 발생할 수 있는 기대 총비용을 단위시간에 걸쳐 균등하게 분포되도록 만들어서 시점 0으로부터 t_1 까지 발생될 수 있는 총 기대비용을 각 시점마다 최소화시키는 것으로 해석할 수 있다.

한편, 위의 논의에서 고립지역 사회에서 외부불경제를 창출하는 폐기물 누적 발생량 기준치 초과 사건에 대하여 관리당국의 점검이 실패하는 경우가 누적 분포함수 $H(t)$ 로 표현된다고 가정하였다. 여기서 관리당국이 점검을 시행하는 바로 그 임의의 시점 t_1 바로 직전까지 누적 발생량 기준치 초과 사건을 인지하지 못한다면 바로 시점 t_1 에서 누적 발생량 기준치 초과여부를 모니터링하기 위한 점검 스케줄의 변화는 기대할 수 없을 것이므로 가치함수에는 어떤 영향도 미치지 않게 될 것이다. 불법투기 점검 횟수의 변화는 의미가 없게 된다. 이러한 조건은 동태적 최적화 문제에서 최종조건(transversality condition)으로 반영되는데 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

9) 오일러 방정식 도출에 관한 자세한 내용은 Chiang (1992) 및 Kamien et al. (2012)를 참조할 것.

10) Transversality condition은 번역자에 따라서 횡단 조건 또는 가로 조건 등으로 번역되고 있다.

$$V_{\sigma'}|_{t=t_1} = -\frac{D'h}{(2\sigma')^2} + \beta \frac{I_D D'h}{(2\sigma')^2} \Big|_{t=t_1} = 0 \quad (9)$$

이제 식 (8) 및 (9), 그리고 오일러 방정식 등을 함께 고려하면 동태적으로 사회적 총비용을 최소화시키는 최적의 폐기물 관리 점검스케줄을 도출할 수 있다. 우선 먼저 식 (8)의 편미분 결과들을 식 (9)의 최종조건에 대입하고 이 결과의 양변에 시간에 대한 적분을 해 보면 다음과 같은 식으로 간략히 표현된다.

$$\omega H = -\frac{D'h}{4\sigma'^2} + \beta \frac{I_D D'h}{4\sigma'^2} + k$$

여기서 k 는 적분상수를 나타낸다. 이제 $\frac{k}{\omega} = \lambda$ 라고 놓으면 위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{D'h}{4\sigma'^2} - \beta \frac{I_D D'h}{4\sigma'^2} = \omega(\lambda - H) \quad (10)$$

위 식 (10)은 앞서 논의한 최종 조건을 만족하여야 하는데 이는 곧 $t = t_1$ 일 때 $\lambda = H$ 를 의미하게 된다. 이 경우 $H(t_1) = 1$ 이므로 이는 곧 $\lambda = 1$ 을 의미한다. 아울러 $\sigma' = n$ 이므로 이 모든 조건들을 고려하고 함수식들을 시간의 함수로 표기하여 정리해 보면 아래 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{D'(T) - \beta I_D D'(T)}{[n(t)]^2} = 2\omega \left[\frac{1 - H(t)}{h(t)} \right] \quad (11)$$

이제 식 (11)을 바탕으로 본 연구의 목적인 관리당국의 최적 점검 스케줄을 도출해 보자. 본 논의에서는 다음과 같이 후생손실함수 및 폐기물 관리에 대한 사회적 혁신함수가

특정한 함수형태로 나타낼 수 있을 때, 두 가지 특별한 경우에 대해서 최적 점검 스케줄을 도출하고 그에 대한 주요 함의를 제시하고자 한다.

㉠ 경우 1: $D(T) = \theta T$, $I(D) = 0$

㉡ 경우 2: $D(T) = \theta T$, $I(D) = \sqrt{\theta T}$

우선 경우 1에서는 논의를 단순화시키기 위해 사회후생손실함수는 T 의 비례적인 함수로 표시된다고 하고 다음과 같이 표기하자: $D(T) = \theta T$. 논의의 단순화를 위하여 여기서는 고려된 폐기물 관리기술 혁신에 대한 사회적 노력이 추진되지 않는 것으로 가정한다. 즉, $I(D) = 0$. 이런 간단한 조건하에서는 폐기물 관리 점검을 위한 최적 스케줄이 다음과 같이 폐쇄형(the closed form)으로 간략히 도출될 수 있다.

$$n^*(t) = \left[\frac{\theta}{2\omega} \left(\frac{h(t)}{1-H(t)} \right) \right]^{1/2} \quad (12)$$

식 (12)를 살펴보면 관리 당국의 최적 점검 횟수는 관리당국의 점검 모니터링 비용에 대해 감소함수이며 사회후생손실함수의 한계적 변화에 대한 증가함수로 나타나 있다. 또한 최적 점검 횟수는 위험률(hazard rate), 즉 $h(t)/(1-H(t))$ 에 대해서도 증가함수임을 알 수 있다¹¹⁾. 따라서 식 (12)는 일정한 점검 스케줄을 가지고 폐기물 누적 발생량의 추이를 지속적으로 파악함으로써 사회적 총비용을 낮추려는 관리 당국은 1) 모니터링 비용이 상대적으로 낮아지거나, 2) 불특정 시점에서 발생하는 누적 발생량의 기준치 초과에 따른 사회후생손실에 주는 한계적인 영향이 커지거나, 그리고 3) 관리점검 시스템이 안정적이지 못할 경우에는 단위기간의 최적 점검 횟수는 증가하게 될 것이라는 제시하고 있다.

다음으로 ㉡에서는 폐기물 관리기술의 혁신과 폐기물 누적 발생량 기준치 초과에 따라 고립지역 사회가 지불하여야 하는 후생손실간의 관계를 $I(D) = \sqrt{\theta T}$ 으로 정의되는

11) 이 위험률은 관리 시스템이 실패할 확률로 해석할 수 있다. 이러한 위험률에 관한 자세한 논의는 Kleiber and Kotz (2003)를 참조할 것.

경우가 고려되고 있다. 이 관계함수들을 식 (11)에 대입하여 보면 해를 구하기 위한 다음과 같은 관계식이 도출된다.

$$n(t) = \left[\frac{\theta - \frac{\beta\theta}{2(\theta T)^{0.5}} \left(\frac{h(t)}{1-H(t)} \right)}{2\omega} \right]^{1/2}$$

위 관계식에서는 기간 T 가 최적 점검 횟수 n 의 함수이기 때문에 최종해의 도출은 폐쇄형으로 구하기 불가능하므로 다음과 같은 엄밀한 논리적 정태분석이 요구된다. 즉, 위 식에서 T 의 평균값인 $\frac{1}{2n}$ 을 T 에 대입하고 식을 정리하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$2\omega \left(\frac{h}{1-H} \right)^{-1} n^2 = \theta - \beta \frac{\sqrt{\theta}}{2} \sqrt{n}$$

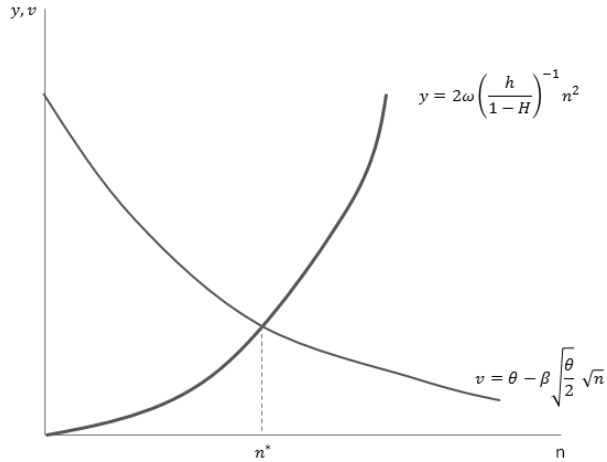
여기서 부등식의 좌변과 우변을 따로 분리하여 다음과 같은 식으로 정의해 보자.

$$\text{좌변} : y = 2\omega \left(\frac{h}{1-H} \right)^{-1} n^2, \text{우변} : v = \theta - \beta \frac{\sqrt{\theta}}{2} \sqrt{n}$$

두 식이 교차하는 점에서 효율적인 폐기물 관리 점검 횟수를 얻을 수 있다.¹²⁾ 따라서 $0 < \frac{\beta\sqrt{\theta}}{2} < 1$ 이 조건이 만족되면 아래의 그래프와 같이 효율적인 폐기물 관리 점검 횟수인 n^* 를 찾을 수 있다.

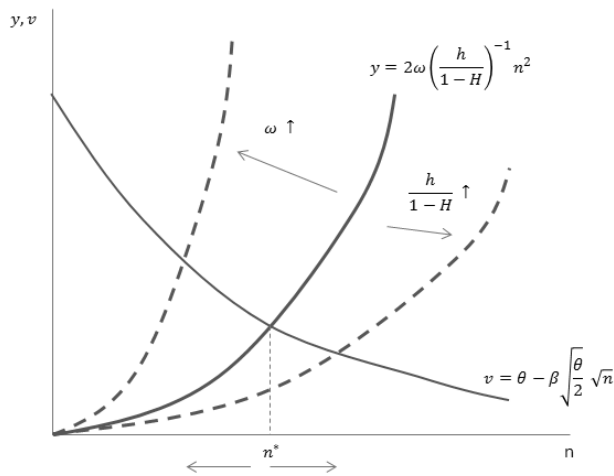
12) 그러나 두 식을 연립으로 풀어서 해가 존재하기 위해서는 $0 < \frac{\beta\sqrt{\theta}}{2} < 1$ 이라는 추가적인 가정이 필요하다.

〈그림 2〉 효율적인 폐기물 관리 점검 횟수



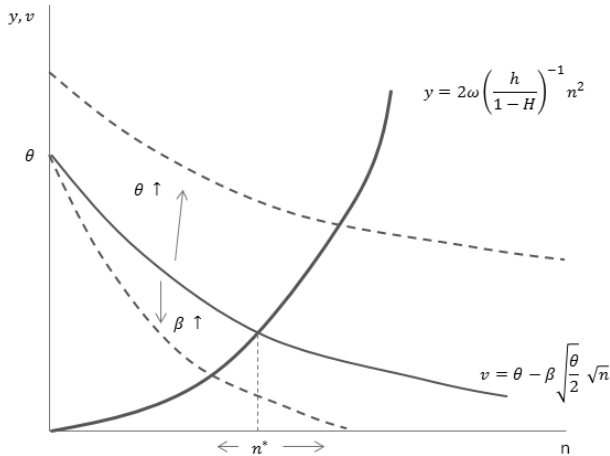
위의 식과 그래프를 이용하면 비교정태분석을 통하여 효율적인 관리 스케줄이 갖는 함의를 파악할 수 있다. 먼저, 좌변을 이동시키는 요인은 크게 모니터링 비용과 수거시스템의 위험률에 따라 변동된다. 아래의 그림에서 먼저 모니터링 비용이 증가하면 점검 횟수는 감소하고 관리 시스템의 신뢰성이 떨어지면 점검 횟수가 늘어나는 것을 확인할 수 있다.

〈그림 3〉 모니터링 비용과 수거시스템의 실패율에 따른 점검 횟수의 변화



다음 <그림 4>는 사회의 폐기물 누적 발생량 기준치 초과 파악 실패로 인한 한계손실(θ)과 혁신에 대한 사회의 한계이익(β)에 대한 변화가 주는 점검 횟수의 변화를 나타낸다. 고립지역 사회가 폐기물 누적 발생량이 기준치를 초과하여 수거되지 않고 증가되므로 지불해야 하는 손실이 증가한다면 폐기물 관리 점검 횟수는 증가하지만 누적되는 폐기물을 보는 것이 폐기물을 줄이기 위한 인센티브를 증대시켜 폐기물을 적극적으로 감소시키는 혁신을 유도하고 이러한 혁신에 대한 한계이익이 높아진다면 폐기물 관리를 위한 적정 점검 횟수는 감소할 것이라는 것을 의미한다.

<그림 4> 사회의 한계비용, 혁신의 한계수익의 변화와 점검 횟수



우리는 이러한 비교정태분석을 통해서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 관리당국의 모니터링 비용의 증가나 폐기물 관리 시스템의 성공률의 증대는 폐기물 누적 발생량 추이파악을 위한 모니터링 비용의 확대 또는 사회의 폐기물 관리 시스템의 안정성에 대한 신뢰 증가로 인해 모두 효율적인 폐기물 관리를 위한 최적의 점검 횟수를 감소시킨다. 하지만 폐기물 관리 시스템의 불안정성이 증대한다든지 또는 모니터링 비용이 감소한다면 점검 횟수는 증대될 것이다.

한편으로는 사회가 폐기물 증가로 인해 지불해야 하는 손실이 커진다면 당연히 폐기물 관리 점검 횟수는 증가하지만 쌓이는 폐기물을 보는 것이 폐기물을 줄이기 위한 인센

티브를 증대시켜 폐기물을 감소시키는 혁신을 유도하고 이러한 혁신에 대한 한계이익이 높아진다면 효율적인 폐기물 관리를 위한 최적의 점검 횟수는 줄어들게 될 것이다.

III. 결론

본 연구는 제주도와 같은 고립지역의 폐기물 관리 문제가 최근 활발히 논의되고 있는 시점에서 이에 대한 관리당국의 효과적인 대응방안 및 전략 정립에 필요한 함의를 제공하기 위하여 시행되었다.¹³⁾ 본 연구는 Keller (1974)의 최적 검증 모형(optimal checking model)을 통해 고립지역의 폐기물 누적 발생량이 고립지역의 관리당국이 설정한 기준치를 초과하는지 여부를 점검하기 위한 효율적인 스케줄의 선택에 관한 문제를 살펴본다. 고립지역에서는 효율적인 관리를 위하여 관리당국의 점검이 일정 기간 동안 자주 시행될 수도 있지만 폐기물 관리 점검이 시행될 경우에는 이에 따른 모니터링 비용이 발생하고 이러한 폐기물의 누적 발생량이 증가하면 지역사회 후생에 외부불경제를 미치게 된다는 점에서 효율적인 점검 스케줄에 대한 연구는 특별히 폐기물 처리가 극도로 제한적일 수밖에 없는 고립지역에서는 매우 중요한 사회적 문제가 될 수 있다. 그러므로 고립된 지역에서 이러한 폐기물에 대한 효율적 관리를 통해 그 지역의 환경과 경제성장이 지속될 수 있는 여건을 마련할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 1) 어떤 단위기간상의 임의의 시점에서 폐기물 누적량이 기준치를 초과하여 발생하는지를 알 수 없다는 점과 2) 기준치를 초과하는 폐기물 누적량의 증대가 사회의 폐기물 관리기술 혁신노력을 자극할 수 있다는 점을 전제로 누적 발생량 추이를 효율적으로 파악하는 최적 관리점검 횟수를 폐기물 누적 발생량이 고립지역 사회에 부가하는 총비용의 기댓값을 최소화하는 최적 관리점검 스케줄의 선택의 문제로 해석하여 변분법(calculus of variation)을 통하여 살펴보았다. 분석 결과 관리당국의 누적 발생량 추이 파악을 위한 모니터링 비용의 증가 또는 폐기물 관리 시스템의 위험률의 감소는 모두 효율적인 폐기물 관리를 위한 최적 점검 횟수를 감소시키는 방향으로 작용하며 고립지역 사회가 폐기물 누적량 기준치 초과 이상으로 증대하는 경우 겪게 되는 후

13) 본 논문의 모티브가 된 연구는 김현철과 황석준(2017)로서 현재 제주도의 건설 폐기물의 효율적 관리에 대한 논의를 담고 있다.

생적 손실이 증가한다면 폐기물 관리 점검 횟수는 증가한다는 것을 알 수 있었다. 또한 기준이 초과하여 커지는 폐기물 누적량이 폐기물을 줄이기 위한 사회적 혁신노력을 유도하여 이로 인한 사회적 한계이익이 높아지면 효율적인 폐기물 관리를 위한 점검 횟수는 감소할 수 있음을 알 수 있었다. 마지막으로 본 연구는 관리당국의 폐기물 관리 스케줄이 단위시간 상에서 확률적으로 단일분포에 따라 시행되는 것으로 가정하고 논의를 진행하였다. 그러나 차후 연구에서는 1) 당국의 관리 스케줄이, 예를 들어 파레토 분포 (Pareto distribution)를 응용하여, 시간의 종점을 향하여 비대칭적으로 몰려있는 경우를 고려하거나, 2) 고립지역임을 감안하여 폐기물 누적 발생량이 단위시간 내에서 기준치를 초과하는 속도를 최대한 낮출 수 있도록 하는 보다 현실적인 경제모형의 설정과 분석이 필요할 것이다.

[References]

- 김현철, 황석준, “사업장 폐기물 감량 및 효율적인 관리방안”, 제주연구원 2017년도 정책 과제, 2017.
- Barrington, L., “Lebanon’s Trash Crisis Threatens Return in Summer Heat,” Reuters, Retrieved from <http://in.reuters.com/article/turkey-fire-idINKBIN19YOBJ>, Aug. 30, 2016.
- Chiang, A. C., *Elements of Dynamic Optimization*, 1992, McGraw-Hill.
- Diamond, J., *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, 2005, Penguin Books.
- Keller, J. B., Optimum Checking Schedules for Systems Subect to Randon Failure, *Management Science*, Vol. 21, No. 3, 1974, pp. 256~260.
- Kamien, M. and N. Schwartz, *Dynamic Optimization : The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management (2nd edition)*, 2012, Dover Publications, INC.
- Kleiber, C., and S. Kotz, *Statistical Size Distributions in Economics and Actuarial Sciences*, 2003, Wiley.