

## Establishment of Phosphorus Flow Model in Urban Area using Material Flow Analysis

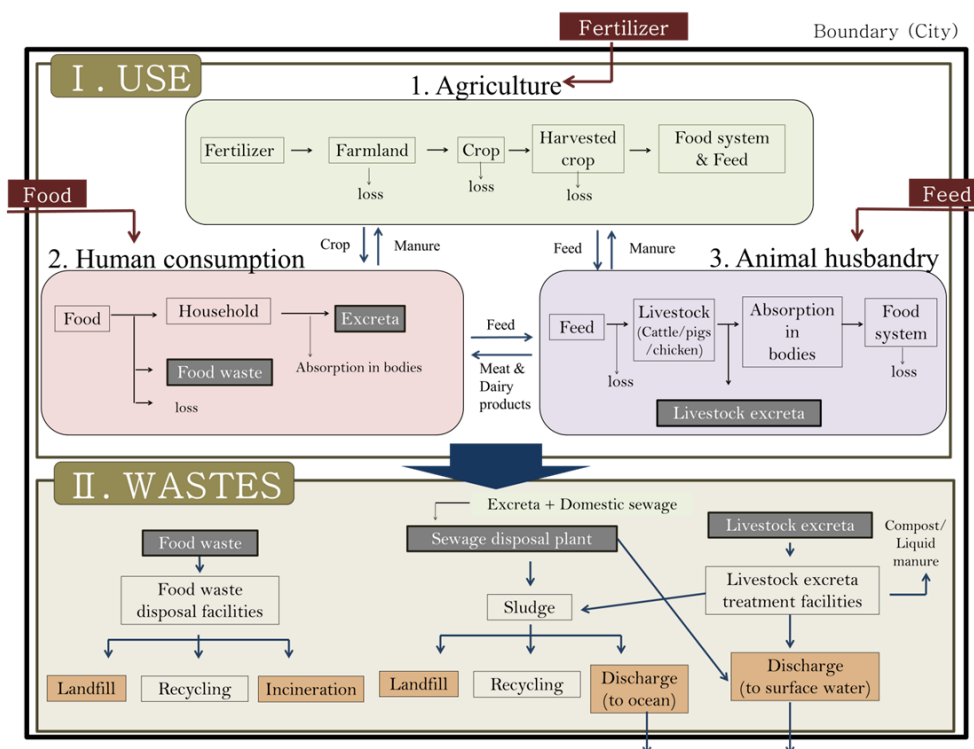
Mina Lee, and Kye-Hoon Kim\*

University of Seoul 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemoon-gu, Seoul, Korea

(Received: February 11 2014, Accepted: March 3 2014)

Phosphorus (P) is an essential nutrient for all living organisms. P is mostly obtained from mined rock phosphate. However, existing rock phosphate reserves could be exhausted in the next 50-100 years. As Korea is totally dependent on imported rock phosphate, we should seek for solution to overcome the P depletion by efficient use and recycling. For this, this study suggested a P flow model to identify the location and flow route of P in urban area based on traditional material flow analysis. The type of P entering the urban areas are fertilizer, food and feed. Each type of P is used in agriculture, human consumption and animal husbandry. After going through each process, P is moved to waste management facilities within food waste, excreta and sewage. Some portion of P in waste are buried, incinerated and discharged, which can be reservoir of P in the future.

**Key words:** Phosphorus, Material flow analysis, P depletion, Rock phosphate



Phosphorus flow model in urban area.

\*Corresponding author : Phone: +82264902689, Fax: +82222144030, E-mail: johnkim@uos.ac.kr

§Acknowledgement: This work was supported by the 2012 Research Fund of the University of Seoul.

## Introduction

인은 질소에 이어 인체에 두 번째로 많은 무기질 영양소이며 이 중 80%가 뼈에 존재하는 중요한 영양소이다. 인간은 주로 곡류, 콩류, 육류 등을 통해 인을 섭취하므로 충분한 식량을 생산하는 것은 중요한 일이다. 인은 대체할 수 없는 물질이 없고, 합성할 수 없는 기본 물질이다. 인간은 인광석을 채굴한 후 이를 무기질 인산비료로 가공하여 작물생산에 이용하고 있다. 하지만 현재까지 알려진 인광석의 매장량은 대략 50~100년 동안의 수요만을 감당할 수 있을 양으로 알려져 있어 (Smil, 2000) 만약 매장된 인광석이 추가로 발견되지 않으면 머지않은 장래에 인광석이 고갈될 수 있다. 인광석 고갈이 다가올수록 비료의 가격이 상승할 것이며 (Cordell et al., 2009), 비료 가격이 상승하면 인간이 섭취해야 할 모든 식품의 가격이 상승한다. 또한, 인광석 고갈로 경작지에 투입되는 무기질 인산비료 양이 감소하면 전체 작물 수확량이 줄어들고 결국 세계 인구의 식량요구량을 충족시키지 못하게 된다.

우리나라에는 인광석이 매장되어 있지 않고 무기질 인산비료 제조에 필요한 인을 전적으로 수입에 의존하고 있다. 그러므로 인광석 고갈 시기가 다가올수록 우리나라 식량생산은 큰 타격을 입을 것이다. Günther (1997)의 연구결과에 따르면, 인간은 실제 소비하는 음식 양의 5배를 생산하는데 필요한 정도의 인광석을 채굴하고 있다. 이렇게 채굴된 인은 농경지에 투입되고 작물이 미처 흡수하지 못한 인은 수계로 유실된 후 부영양화를 일으킨다 (Smil, 2000). 그러므로 인을 필요한 만큼만 시비하고, 인이 유실되지 않고 효율적으로 이용될 수 있도록 인의 흐름을 파악하는 것은 효율적인 인의 이용과 환경관리에 매우 중요한 일이다.

오늘날 도시지역에는 전 세계 인구의 절반 이상이 생활하고 있으며 많은 양의 인이 소비된다. 그러므로 본 연구에서는 도시지역에서 인의 존재 위치, 형태, 양 및 흐름을 파악할 수 있는 모델을 제시하여 미래의 인 고갈에 대비할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

## Materials and Methods

**물질 흐름 모델** 물질의 흐름을 분석할 때는 기본적으로 Fig. 1과 같은 4단계의 이동 경로를 거친다 (Spatari et al., 2002; Li et al., 2010; Yuan et al., 2011a; Yuan et al., 2011b; Ma et al., 2012). Fig. 1에서 1단계와 2단계인 인광석 채굴 (extraction)과 인을 이용한 산업 (fabrication & manufacturing)은 주로 도시 외부에서 일어나기 때문에 본 연구에서는 도시 내 인의 이동 경로 3단계인 이용 (use)과 4단계인 폐기물 관리 (waste management)만을 다룬다.

도시 내 인은 농업과 축산업에서 이용되거나 인간에 의

해 소비된 후 폐기물로 배출된다. 본 연구에서는 인의 흐름을 정확하게 파악하기 위해 'Use'에 포함되는 농업, 인간소비, 축산업 부문과 'Waste management' 부문에서 인의 흐름을 우리나라 실정에 맞게 세분화하였다.

Fig. 2는 도시 내 인 흐름의 개요를 나타낸 것이다. 도시로 유입되는 인은 크게 비료, 사료, 식품으로 나눌 수 있다. 여기서 인은 농업에 투입되는 비료, 축산업에서 이용하는 동물사료, 인간 소비 시스템 내에서의 식품에 국한하였다. 도시 내 농업, 축산업, 인간 소비 시스템 사이에도 인의 흐름이 존재할 수 있다. 농업, 축산업, 인간 소비 과정의 결과로 폐기물과 하수가 발생하며 이는 매립지와 하수처리장에 모이게 된다. 본 연구에서는 도시 내에서 흐르지 않고 한 곳에 고정되어 있는 토양, 수목, 건물 등에 존재하는 인은 모델에서 제외하였다.

**농업 부문** 농업에서 인의 세부 이동 경로는 Cordell et al. (2009)을 참고하여 Fig. 3과 같이 나타냈다. 비료로 유입된 인은 경작지에 투입되며 그 중 일부는 작물이 흡수하고 나머지는 토양입자에 흡착되거나, 물과 바람에 의해 유실된다. 또한 경작지에서 작물이 자라면서 해충이나 야생동물, 병, 화전 등에 의해서 인이 지속해서 유실되며 작물을

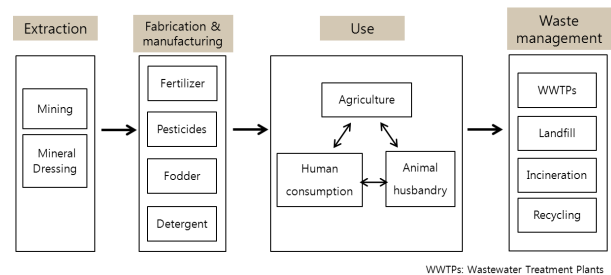


Fig. 1. Simplified diagram of anthropogenic phosphorus cycle.

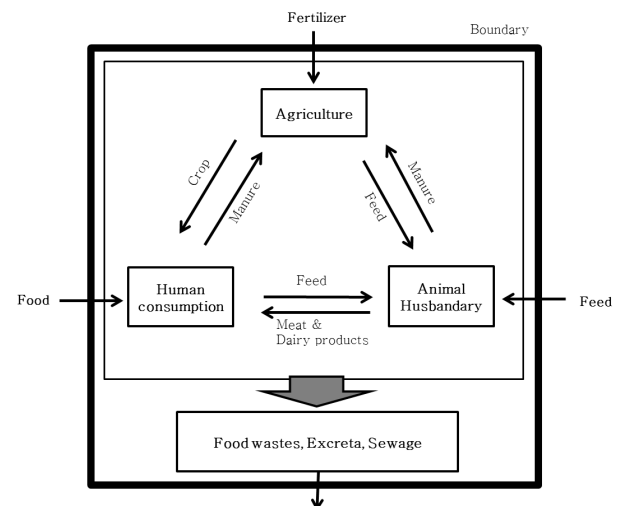


Fig. 2. A broad outline of phosphorus flow in urban area.

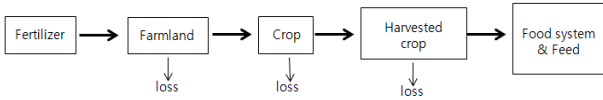


Fig. 3. Phosphorus flow in agriculture.

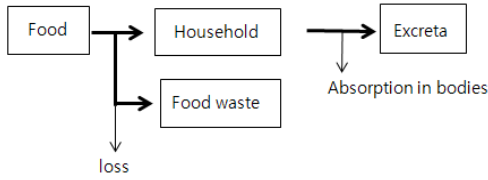


Fig. 4. Phosphorus flow in human consumption.

수확하는 과정에서 일부 인은 식물 잔사 (plant residue)로 다시 자연으로 되돌아간다. 수확한 작물 중 섭취가 가능한 부분은 인간이 소비하고, 나머지는 가축의 사료로 이용되며 수확된 작물은 모두 도시 외부로 유출되지 않는 것으로 가정하였다.

인간은 인 섭취는 식품 섭취를 통해 이루어지므로 인구가 많은 대도시지역에서 인의 주된 이동 경로는 식품 형태의 유입과 인간의 섭취, 인간 분뇨와 음식물쓰레기로의 배출로 연결된다. 도시로 유입된 식품은 도·소매를 거쳐 가구 소비자에게 전달되고 (MFAFF, 2010) 가공 후 인간이 섭취한다. 인간이 섭취한 인의 일부는 체내에 흡수되고 나머지는 인간 분뇨로 배출된다. 인간이 섭취하기 전 식품은 유통, 가공, 조리 과정을 거치는데 이 과정에서 음식물쓰레기가 발생하게 된다. 이 중 일부는 음식물쓰레기로 분류되지 못하고 하수 또는 일반 생활쓰레기로 분류되거나 동물의 먹이, 도시텃밭의 퇴비 등으로 이용되는데 이 인은 재활용이 불가능하고 그 양을 정확히 가늠할 수 없으므로 유실된 것으로 간주한다 (Fig. 4).

**인간 소비 부문** 인간이 육류 및 유제품을 생산하기 위해 사육하는 가축은 사료를 통해 인을 섭취한다. 가축의 주요 사료는 옥수수, 보리, 밀, 콩 등이지만 (Go et al., 1997) 식량 작물에서 인간이 섭취하지 않는 부분을 사료로 이용하기도 한다. 가축이 사료를 섭취하면 사료 내 인 중 일부는 체내로 흡수되고 나머지는 분뇨로 배출된다. 가축 체내로 흡수된 인은 육류와 유제품 형태로 유통되며 분뇨로 배출된 인은 가축분뇨 처리시설로 운반된다 (Fig. 5).

**폐기물 부문** 농업, 축산업을 비롯한 도시 내 모든 인간 활동 과정에서 많은 폐기물과 하수가 발생한다. 폐기물은 크게 생활폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물로 나누어지는데 (ME, 2010b), 인은 주로 생활폐기물 중 음식물쓰레기에 존재하므로 (Cordell et al., 2009) 본 연구에서는 음식물쓰레기에 대해서만 고려하였다. 각 가정과 식당, 농산물 도매

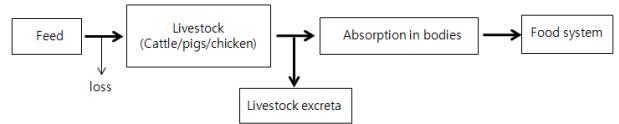


Fig. 5. Phosphorus flow in animal husbandry.

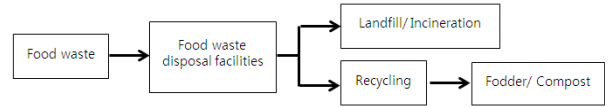


Fig. 6. Phosphorus flow as food waste.



Fig. 7. Phosphorus flow as human and livestock excreta.

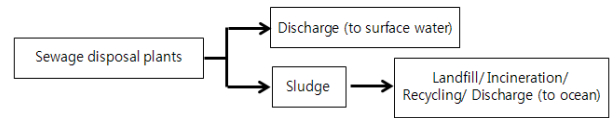


Fig. 8. Phosphorus flow as sewage.

시장 등에서 발생한 음식물쓰레기는 음식물쓰레기 처리시설로 운반된 후 매립, 소각 또는 재활용 처리되고 있다 (ME, 2010b, Fig. 6).

인간분뇨는 분뇨처리시설로 운반되어 정화 과정을 거치며 여기서 발생하는 분뇨슬러지는 주로 물재생센터에서 연계처리된다 (ME, 2010a). 또한, 축산업 부문에서 발생한 가축분뇨는 정부의 자원화시설지원 아래 대부분 퇴비화되어 바로 경작지에 뿌려진다. 전체 가축분뇨 중 4%만 가축분뇨 처리시설로 이동하며 이 과정에서 발생한 슬러지 역시 물재생센터에서 연계처리된다 (Fig. 7).

도시에서 발생한 폐수 및 하수는 물재생센터에서 정화과정을 거친다 (ME, 2010a). 하수정화과정에서 고체인 하수슬러지와 액체인 방류수가 발생하는데, 하수슬러지는 매립, 소각, 재활용 또는 해양배출되며 방류수는 강물로 방류된다 (Fig. 8). 본 연구는 2006년부터 2011년 사이에 작성된 자료를 바탕으로 모델을 제시하였으나 2012년부터 개정된 해양환경관리법 규칙이 시행됨에 따라 폐기물 처리 과정에서 발생한 슬러지의 해양배출이 금지된 상태이다. 그러므로 2012년 혹은 그 이후 발간된 통계자료를 활용할 때는 모델 내 해양배출 부분은 삭제해야 할 것이다.

Results and Discussion

각 부문에서의 인 흐름을 취합하면 Fig. 9와 같다. ‘USE’ 부분에는 도시로 농업, 축산업, 인간 소비 시스템에서의 인

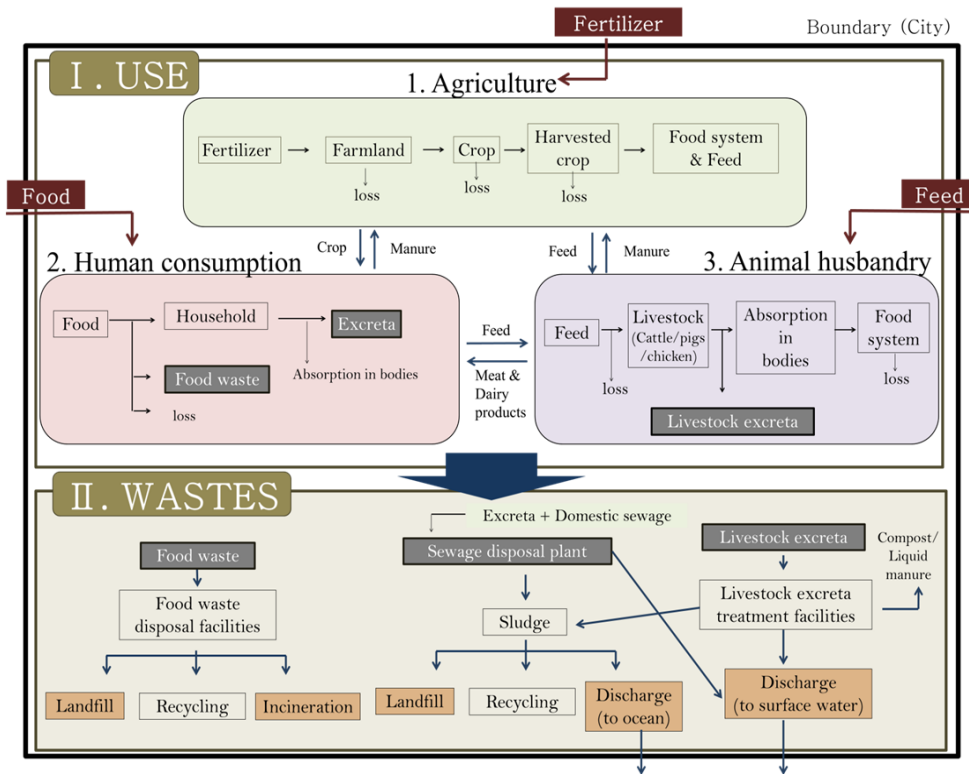


Fig. 9. Phosphorus flow model in urban area.

이 흐름이 나타나 있으며 ‘WASTES’ 부분에는 음식물쓰레기, 하수 및 하수슬러지, 축산폐기물의 처리 흐름이 나타나있다.

Oenema et al. (2003)에 따르면 영양소 양을 계산할 때 불확실성을 다루는 데는 네 가지 방법이 있다. 첫 번째는 불확실한 부분을 무시하는 것이다. 존재하는 데이터나 계산 과정 중 발생하는 불확실한 부분이 너무 커서 문제가 발생할 때 이 부분을 생략한다. 두 번째는 불확실한 부분을 무시 하되 결과에 미치는 그 영향을 고려하는 것이다. 이는 농업과 환경관리 분야에서 주로 이용되는 방법이다. 불확실한 정도에 대한 해석이 어렵거나 단순히 방법에만 의미가 있을 때 이용한다. 세 번째 방법은 불확실성을 평가한 뒤 보수적인 가정과 계수를 적용하는 것이다. 이 방법의 문제점은 가정과 계수의 오차에 관한 통찰이 부족하다는 점이다. 네 번째는 불확실성과 그 영향을 정량적인 방법으로 명백하게 다루는 것이다.

계산과정에서 발생하는 불확실성을 정량화하기는 쉽지 않으며, 계수 자체의 정확성을 보장할 수 없으므로 기존의 모델 연구에서도 계수를 통해 모델의 불확실성을 바로잡는 과정은 생략됐다 (Antikainen et al., 2004; Li, 2010; Yuan et al., 2011a; Yuan et al., 2011b; Ma et al., 2012). 본 연구에서 도출한 모델을 이용하면 통계적 수치와 기존 연구 결과를 바탕으로 인의 양을 계산할 수 있다. 데이터가 존재하지 않는 부분은 가정을 바탕으로 계산해야 한다. 도시 내에서 생산되는 작물들은 외부로 유통되지 않고 모두 도시

내에서 소비되는 것으로 간주하고, 음식으로 유입되는 인은 원재료 형태의 농·축·수산물의 유통에 대한 통계를 이용할 수 있다. 농·축·수산물은 통계가 존재하는 품목만 계산에 포함하고 가축은 품종, 성장단계, 몸무게 등을 통일한 뒤 계산에 이용해야 한다. 통계 자체가 가지는 오차와 계산과정에서 적용된 가정 때문에 실제 인 흐름량과 계산 결과의 차이가 존재할 수 있다. 이러한 오차가 인의 큰 흐름을 판단하는데 영향을 미치지 않는지만, 결과의 정확성을 높이기 위해서는 많은 데이터가 필요할 것이다.

본 연구에서는 일반적인 도시의 인 흐름을 다루었기 때문에 제강산업과 같은 특수 분야에서 이용되고 폐기되는 인에 대한 부분이 모델에서 제외되었다. 하지만 제강산업에서 발생하는 폐기물 내에도 상당한 양의 인이 포함되었다는 연구결과가 있으므로 (Matsubae-Yokoyama et al., 2009) 제강산업이 발달한 도시의 인 흐름을 파악하려면 ‘USE’에서 농업, 축산업, 인간 소비 부분뿐만 아니라 산업 부분을 추가시켜야 추후 이 모델을 이용한 인의 양 계산결과의 정확성이 높아질 것이다.

## References

Antikainen, R., R. Haapanen, and S. Rekolainen. 2004. Flows of nitrogen and phosphorus in Finland—the forest industry and use of wood fuels. *J. Clean. Prod.* 12:919-934.

- Cordell, D., J.-O. Drangert, and S. White. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environ. Chang.* 19:292-305.
- Go, Y.D., K.K. Jung, H.S. Kang, D.H. Kim, Y.K. Kim, J.H. Kim, K.H. Nam, Y.U. Rye, K.H. Myong, Y.M. Song, B.H. An, I.S. Jang, and J.K. Ha. 1997. *Animal nutrition*. Yu Han Publishing Company, Seoul.
- Günther, F. 1997. Hampered effluent accumulation process: Phosphorus management and societal structure. *Ecol. Econ.* 21(2):159-174.
- Li, S., Z. Yuan, J. Bi, and H. Wu. 2010. Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hefei City, China. *Sci. Total Environ.* 408(23):5715-5722.
- Ma, D., S. Hu, D. Chen, and Y. Li. 2012. Substance flow analysis as a tool for the elucidation of anthropogenic phosphorus metabolism in China. *J. Clean. Prod.* 29-30:188-198.
- Matsubae-Yokoyama, K., H. Kubo, K. Nakajima, and T. Nagasaka. 2009. A material flow analysis of phosphorus in Japan. *J. Ind. Ecol.* 13(5):687-705.
- ME (Ministry of Environment). 2010a. 2009 Statistics of sewerage. ME (Ministry of Environment).
- ME (Ministry of Environment). 2010b. 2009. 2009 Present status of national waste occurrence and treatment. ME (Ministry of Environment).
- ME (Ministry of Environment). 2011. Environmental Statistics Yearbook. ME (Ministry of Environment).
- MFAFF (The Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2010. 2009 Survey of present condition of each food industry. MFAFF (The Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries).
- Oenema, O., H. Kros, and W. de Vries. 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *Eur. J. Agron.* 20(1):3-16.
- Smil, V. 2000. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annu. Rev. Energ. Env.* 25(1):53-88.
- Spatari, S., M. Bertram, K. Fuse, T.E. Graedel, and H. Rechberger. 2002. The contemporary European copper cycle: 1 year stocks and flows. *Ecol. Econ.* 42:27-42.
- Yuan, Z., X. Liu, H. Wu, L. Zhang, and J. Bi. 2011a. Anthropogenic phosphorus flow analysis of Lujiang County, Anhui Province, Central China. *Ecol. Model.* 222(8):1534-1543.
- Yuan, Z., J. Shi, H. Wu, L. Zhang, and J. Bi. 2011b. Understanding the anthropogenic phosphorus pathway with substance flow analysis at the city level. *J. Environ. Manage.* 92(8):2021-2028.