

3rd International Symposium on Feedstock Recycling of Plastics & Other Innovative Plastics Recycling Techniques

3년마다 플라스틱, 바이오매스 등의 재생 기술에 관해 전세계 관련 연구자들이 모여 발표 및 토론하는 심포지움으로 올해 3차 심포지움이 독일 칼스루헤에서 열렸다. 특히 본 심포지움은 일본에서 스폰서를 하여서인지 일본 연구자들이 반 수 이상을 차지하였다. 한국에서도 6명의 연구자가 참여하였다. 일요일 첫 날 등록 후, 월요일부터 수요일까지 학회 발표가 진행되었다. 총 발표된 논문은 plenary lecture 7편, 구두 발표 32편, 포스터 발표 53편이었다.

SESSION: Feedstock Recycling, mainly by Techniques such as Pyrolysis or Solvolysis

- Plenary Lecture

제목: Promotion of monomer recycling in Japan for bridging over reality and vision

연구자 : A. Oku, Research Institute for Production Development, Japan

석유자원의 수명을 연장하고 화학산업에서 장기간 고갈되지 않고 지속가능한 유기 자원의 수요를 충족시키기 위하여 “자원”이라는 개념의 재정의의 시도를 하였다. 본 강연에서 제시된 새로운 자원의 개념은 플라스틱 폐기물과 플라스틱 폐기물, 화석연료자원, 바이오매스에서 생산되는 단량체의 재생에 집중된다. 따라서 단량체를 재생하는 기술을 강조하는 사회적 네트워크를 이루는 것이 필요하다. 이러한 사회적 네트워크의 장점은 다음과 같다.

- 재생된 단량체를 위한 화학시장은 원료 플라스틱 만큼 넓다.
- 재생을 방해하는 불순물 문제가 해결가능하다.
- 고분자를 단량체로 전환하는 화학기술의 prototype 이 알려져 있다.
- 폐기물로부터 원료와 같은 플라스틱으로 재생시킨다는 관념은 우리의 생활 스타일을 변화시킨다.
- Carbon neutral 회로에 기반을 둔 바이오매스-플라스틱 산업들의 단순한 정책은 포기되어질 것이고 더 나은 정책들이 개발될 것이다.

아래 표는 본 강연에서 제시되는 새로운 개념을 사용하여 기존의 유기 자원을 재정의한 것이다.

Table 1: Definition of Organic Resources: A New Version.

Category	Definition	Territory
1. Petroleum	Organic resources obtained from earth crust or deep-sea, shielded from atmospheric carbon circuit.	Crude oil, coal, peat, natural gas, methane hydrate, etc.
2. Biomass	Organic resources produced continuously from atmospheric or oceanic carbon circuit. Agricultural and fishery wastes produced from primary consumption.	Wood, vegetable, animal, fish, unutilized plant wastes, biological wastes, etc.
3. Plastic wastes and equivalents	Used plastics possessing the properties of parent materials and reproducibility. Materials designed to be recycled in the beginning.	Post-manufacturers- & post-consumers plastic wastes (both petroleum- & biomass- based); Used fabric; Used paper; Scrap wood, etc.
4. Intellectual lifestyle of controlling our egoistic satisfaction	Intellectual and mental training on the spirit of [ware tada taritari wo siru] ; Life style based on [Mottainai] mind; Happiness with minimum resource and energy consumption; Frugality; Thoughtfulness of posterity.	Industrial activity style; Consumers life style; Educational workshop; Economic and diplomatic policy, etc.

제목: Current status on recycling of plastics in Japan-Feedstock recycling under C&P recycling law

연구자: H. Katsumata, Plastic Waste Management Institute, Japan

Plastic Waste Management Institute 는 액화, blast furnace reducing agent, coke oven chemical feedstock 등이 포함된 폐플라스틱 재활용을 위한 다양한 기술들을 개발하였다. 이들 기술들은 C&P 재활용 법을 준수하기 위하여 개발된 것이다. 원료 재활용은 현재 법 아래에서 PET 병을 제외한 모든 폐플라스틱을 재활용하는데 기여하고 있다. 재활용 기술을 더욱더 다양화 시킴으로써 재활용 용량을 증가시키는 것이 현재 필요하다. 이를 위해서 열적 회수와 연료 사용을 위한 재활용이 가장 중요한 위치를 차지한다.

Plastic Waste Management Institute 는 이러한 기술을 계속 개량하고 있으며 거기에 맞는 LCA 연구도 계속 진행중이다.

- Oral Presentation

제목: Pyrolysis oil of plastic wastes

연구자: M.. Blazso, Hungarian academy of sciences, Hungary

다양한 플라스틱 폐기물은 열분해에 의하여 저분자량의 열분해 오일로 분해된다. 이들 열분해 오일은 탄소와 수소의 함유량이 높기 때문에 열량이 매우 높다. 그러나 산소와 질소를

함유한 플라스틱의 열분해는 품질이 낮은 오일을 생산하게 된다. 또한 열분해 오일의 안정성과 청정성 같은 여러 다른 특성들도 진지하게 고려해야 한다.

포장, 자동차, 가전제품 등 다양한 분야에서 얻어지는 열분해 오일의 품질을 파악하기 위하여 이들의 화학적, 물리적 특성간의 상관관계가 잘 분석되어야 한다. 특히 플라스틱의 화학적 조성도와 열분해 오일간의 관계는 직접적이지 않은 것으로 여겨진다. 대신 대부분의 열분해 오일은 원료와 열분해 경로에 크게 의존하였다.

열분해 오일의 정성적 분석 결과, 상당량의 오염 물질과 오염물질 전구체를 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한 반응성 물질이 다수 포함되어 오일의 불안정성을 야기하는 것으로 판명되었다. 그러나 제올라이트 등을 이용한 개질 반응을 통하여 오일의 안정성을 증가시킬 수가 있다. 또한 오일의 불안정성을 야기하는 성분을 제거하여 안정성을 증가시킬 수도 있다. 예를 들어 PET 열분해 오일의 decarboxylation 을 통하여 오일의 휘발성과 에너지 함유량을 증가시켰다.

제목: Development of waste plastics liquefaction technology, feedstock recycle in Japan

연구자: M. Shioya et al., Sapporo Plastics Recycling Co., Japan

Sapporo Plastics Recycling(SPR)사는 PVC 와 PET 를 포함한 도시 생활 폐기물을 액화하는 공정을 개발하였다. SPR 사의 시스템은 연간 도시생활폐기물 14,800 톤을 처리하도록 설계되었으며 2000 년부터 운전에 들어갔다. Rekisekiouyu 사의 시스템은 처리용량이 6,000 톤이고 1999 년부터 운전되고 있다.

SPR 사의 시스템은 기존에 문제 되었던 PVC, PET 의 분해가스에 의한 부식문제를 해결하였으며 2000 년 이후로 연간 15,000 톤의 오일을 생산하고 있다. 도입된 플라스틱의 70% 가량이 열분해유로 전환된다. 열분해유는 다시 경질유, 중간유, 중질유로 다시 정제된다. 중간유와 중질유는 공장 근처의 민가에 연료로 공급되고 경질유는 정유산업의 원료로 공급된다.

SESSION: Synthesis gas production by means of gasification or of partial oxidation

- Plenary Lecture

제목: Feedstock recycling of polyethylene-wood mixtures by gasification

연구자: J.M.N. van Kasteren et al., Eindhoven University of Technology, Netherlands

본 논문은 폴리에틸렌과 나무 혼합물을 가스화 반응을 이용하여 합성가스를 생산하는 것이다. 생산된 합성가스는 직접 발효를 통하여 에탄올로 전환된다. 따라서 가스화 반응을 이용하면 모든 종류의 생물학적 원료로부터 에탄올을 생산할 수 있게 된다. 또한 얻어진 에탄올은 연료로 이용될 수 있다. 가스화 실험은 유동층을 이용하였고 반응온도는 800-950°C 였다. 이러한 다양한 반응조건 하에서 발효에 적당한 합성가스 최적 조성을 찾고자 하였다. 나무만 사용한 경우 혹은 소량의 폴리에틸렌이 첨가된 나무의 경우, 탄소 전환율은 온도에 따라

증가하였다. 그러나 폴리에틸렌의 농도가 높아지면 반대 경향을 나타내었다. 15wt% 정도의 소량의 폴리에틸렌을 첨가한 원료의 경우 가장 높은 전환율을 나타내었으며 시너지 효과도 상당하였다. 이것은 폴리에틸렌의 가스화 반응보다 많은 수소를 생산하고 결국 이러한 수소가 바이오매스로부터 유래되는 촉를 가스화하는 것으로 여겨진다. 폴리에틸렌의 농도가 높아지면 탄소 전환율은 감소하였다. 이는 폴리에틸렌이 많은 양의 촉와 타르를 생산하기 때문인 것으로 여겨진다. 수소의 조성은 온도와 폴리에틸렌의 양에 따라 증가한다. 반면 CO의 조성은 그 반대이다. CO와 수소를 결합한 합성가스 수율은 폴리에틸렌이 소량 첨가된 나무의 가스화 반응 시 얻어졌다. 나무는 산소를 함유하고 있고 따라서 최대 합성가스 수율은 1000°C 이상의 고온에서 얻어진다. 이때 타르의 생산도 가장 적다. 결론적으로 발효 공정을 위한 합성가스 생산의 최대 온도는 1000°C 이상의 고온으로 판명되었다.

- Oral Presentation

제목: Gasification of waste plastics by steam reforming

연구자: T. Tsuji et al., Hokkaido University, Japan

본 연구는 수증기 개질을 이용하여 폐플라스틱으로부터 합성가스를 생산하는 공정에 관한 것이다. 이 공정은 2 단계로 구성되어 있다. 첫 단계는 폐플라스틱의 액화이고 다음 단계는 첫 단계로부터 얻어진 경질유를 수증기 개질하는 것이다. 수증기 개질은 흡열반응이므로, 반응열은 첫 단계에서 발생하는 중질유의 일부분을 연소함으로써 얻을 수 있다. 이러한 공정은 가스화 온도를 기존의 부분 산화 방법에 의한 것보다 낮게 감소시킬 수 있다. 비록 탄화수소의 수증기 개질에 대한 많은 연구결과가 보고되고 있지만, 플라스틱에서 생성된 오일의 개질에 대해서는 보고된 바가 별로 없다. 본 연구에서는 LDPE와 PS에서 얻어진 오일의 수증기 개질에 대해 조사하였다. 수증기 개질은 작은 고정층 반응기와 작은 유동층 반응기를 이용하여 수행하였다. 사용된 촉매는 Ni/Al₂O₃이다. 고정층 반응기에서는 코킹문제가 고정층 입구에서 심각하였다. 반면 유동층에서는 촉매가 균일하게 퍼져 있기 때문에 코킹 문제가 거의 없었다. 얻어진 가스는 수소가 주성분이었으며 그 양은 LDPE의 경우 72%, PS의 경우 66%였다.

제목: A study on the characterization of vacuum residue gasification in an entrained-flow gasifier

연구자: Y.C. Choi et al., Korea Institute of Energy Research, Korea

현재 한국의 정유사들은 약 200,000 bpd의 진공잔사유(vacuum residu oil)를 생산하고 있다. 이들 잔사유는 아스팔트나 고황연료유에 공급된다. 고황연료유는 오일 잔사와 경질 디스틸레이트를 혼합하여 상업적 규격에 맞는 오일 특성을 갖게 하여 제조된다. 진공잔사유는 높은 에너지 양을 가지고 있으나 높은 점도, 높은 황함량, 높은 중금속 함유량의 단점으로 인해 연료의 품질이 낮다. 따라서 이를 가스화 시키는 것은 훌륭한 대안이 될 수 있다.

현재 20개 이상의 상업용 IGCC 공장이 진공잔사유를 원료로 하여 가스화를 한다. 본 연구에서는 1 ton/day의 entrained-flow 가스화기를 이용하여 온도, 점도, 압력, 산소/잔사유 비,

고형 폐기물 관리는 인간 생활의 한 부분이고 생산과 소비 패턴에 강한 영향을 끼친다. 또한 환경에도 영향을 미치고 이는 인간 생활에 장기간으로 영향을 미친다. 이러한 시스템에 대한 나쁜 영향을 감소시키기 위하여, 폐기물 관리를 국제적으로 할 필요가 있고 이는 지속 가능한 사회를 달성하기 위해서도 중요하다.

제목: Effect of dissolved organic matter on behavior of toxic organic compound in landfill site pore water

연구자: T. Kose et al., Okayama University, Japan

시멘트 고품재와 shredder dust 는 일본 국내 폐기물의 주요한 성분이 되고 있다. 시멘트 고품재는 다양한 중금속과 PAH, 다이옥신 같은 유독한 물질들을 함유하고 있다. Shredder dust 에 있는 페플라스틱은 비스 페놀, 알킬 페놀, dioxane 같은 유독 유기물질을 함유하거나 생산한다. 이들 화합물들은 물에 대한 용해성이 높아서 침출수에서 자주 검출된다. 반면 PAH 나 다이옥신은 용해도가 낮아서 침출수에서 검출되는 일이 거의 없는 것으로 여겨졌다. 그러나 용해된 유기 물질이 존재할 때 PAH 의 물에 대한 용해도가 크게 증가하는 것으로 보고되었다. 즉 PAH 가 용해된 유기물질에 녹아들게 되고 외관상 물에 대한 용해도도 따라서 증가하게 된다. 특히 침출수에는 용해된 유기물질의 양이 매우 높기 때문에 PAH 가 침출수에 존재할 가능성이 매우 크게 된다. 따라서 본 연구는 매립지 침출수에서 용해성 유기 물질이 PAH 의 거동에 미치는 영향을 알아보는 것이었다. 그 결과 PAH 가 용해된 유기물질에 완전히 흡착하지는 않고 일부가 흡착하여 용해도를 증가시켰다.

SESSION: Energy derived from plastics, rubber and other high calorific waste systems

- Plenary Lecture

제목: Feedstock recycling and energy recovery to benefit from heterogeneous contaminated plastics rich waste

연구자: H. Kraehling, tecpol GmbH, Germany

많은 유럽에서 잘 정리되고 깨끗한 플라스틱으로부터 에너지를 회수하거나 기계적 재활용을 하는 것은 잘 확립되어 있다. 그러나 비균일하고 오염된 플라스틱에서 에너지 회수 등은 잘 이루어지지 않고 있으며 이들 대부분은 매립등에 의해서 처리된다. 그러나 차량과 전자제품에서 발생하는 비균일/오염 플라스틱의 처리에 대한 규제가 최근 강화되고 있어 이들을 매립 이외의 방법으로 처리하는 기술 개발이 필요하다. Tecpol 사는 이러한 차량과 전자제품 폐플라스틱을 처리하기 위해 설립된 회사로 다음과 같은 일을 수행하였다.

- 발생하는 폐기물의 양과 품질에 대한 정보 제공
- 폐기물 회수를 위한 기술 개발 및 지원
- 폐기물 처리를 위한 네트워크 구성

특히 본 강연에서는 다음과 같은 관점을 강조하였다.

- 에너지 회수와 재활용을 위해 투입되는 비균일 플라스틱의 양
- 비균일/오염 플라스틱을 사용하여 재활용과 에너지 회수를 위한 대규모 장치의 운전 경험
- 시장에 재생 품목을 공급할 때의 가능성과 제한점

- Oral Presentation

제목: Production of gaseous and liquid fuels by gasification or pyrolysis of plastics

연구자: C.G. Jung et al., Universite Libre de Bruxelles, Belgium

1980 년 이후 전세계적으로 고분자의 사용은 3 배 이상이 되었다. 또한 LCA 분석은 폐기물로부터 얻어진 폐플라스틱을 재가공함으로써 에너지와 원료물질이 절약되는 것을 보여 주었다. 그러나 혼합된 폐기물에서 PVC, PE, PET 등과 같은 플라스틱을 선별해서 분류하기란 쉽지 않다. 이러한 이유로 상당량의 플라스틱이 매립되고 있다. 매립의 대안중의 하나는 가스화다. 그러나 가스화를 위해 플라스틱을 펠렛으로 제조해야 하는데 이때의 제조단가가 비싸다는 단점이 있다. 다른 대안은 열분해이다. 열분해의 장점은 직접 연소에 비해 생성 가스의 부피를 엄청나게 감소시키는데 있다. 또한 열분해 공정에서는 금속 등을 쉽게 분리할 수 있고 재도 털 생긴다.

혼합 플라스틱의 열분해 결과 2.9%의 좌, 75.1%의 오일, 9.6%의 비응축성 가스를 얻었으며, 이때 오일의 발열량은 약 40 MJ/kg 이었다.

공기를 사용한 가스화에 의해 생성된 합성가스는 발열량이 4-6 MJ/m³ 로 다소 낮았다. 반면 산소를 사용하여 가스화를 한 결과, 발열량은 8-14 MJ/m³ 로 증가하였다. 최적의 가스화는 수증기를 사용했을 때 얻어졌으며, 이때의 값은 18 MJ/m³ 이었다.

SESSION: Innovative techniques in mechanical recycling, including studies and experiences with the logistic and economic factors in collection and sorting, separation, processing, product specifications, as well as developing suitable outlets for the materials and products obtained

-Plenary Lecture

제목: Challenges of PVC recycling in Japan

연구자: T. Sakauchi, Vinyl Environmental Council, Japan

일본에서는 다른 어떤 플라스틱보다도 PVC 의 기계적 재활용이 잘 발달되어 있다. 그러나 대부분의 PVC 폐기물은 다른 물질들과 섞여있어 기계적 재활용에 한계를 가지고 있다. 따라서 이와 같은 다양한 형태의 PVC 폐기물의 처리를 위하여 많은 방법들이 시도되었다. 그

결과 다음과 같은 3 가지 중요한 도전 분야가 존재함을 알 수 있었다.

- 연소의 재활용
- 혼합 폐기물의 유효한 이용
- PVC 내에 있는 중금속 성분의 재활용

- Oral Presentation

제목: A study on DME synthesis from wasted plastics and woody biomass

연구자: M. Yukumoto et al., JFE Holdings, Japan

본 연구에서는 폐플라스틱과 바이오매스를 사용한 혼성 시스템을 이용하여 DME 를 생성하였다. DME 는 현재 청정하고 경제적인 대체에너지로 알려져 있어 많은 연구가 진행되고 있다. DME 는 천연가스, 석탄, 폐플라스틱, 바이오매스 등 다양한 원료로부터 제조될 수 있다. 또한 DME 는 프로판과 특성이 비슷하여 발전, 가정용, 디젤엔진연료 등으로 사용될 수 있다.

본 연구에서는 두가지 시나리오에 의해 바이오매스로부터 DME 를 합성하였다. 첫번째 시나리오는 하루에 40 톤의 bark 폐기물을 공기로 가스화 시켜 DME 를 생산하였다. 이때 하루에 30 톤의 DME 와 3 MW 의 전력이 생산되었다. 두번째 시나리오는 하루 40 톤의 bark 폐기물과 60 톤의 폐플라스틱을 산소로 가스화하는 것이다. 그 결과 하루에 30 톤의 DME 를 합성할 수 있었다.

제목: Dry separation of actual shredded bulky wastes by fluidized bed technology

연구자: Y. Kakuta et al., Hokkaido University, Japan

재활용과 매립을 하기위한 폐기물의 부피를 줄이기 위하여, 가구나 작은 가전기구 같은 폐기물들은 보통 분쇄가 된 후 입자 크기에 따라 가연성과 비가연성으로 분리된다. 가연성은 소각되고 비가연성은 매립된다. 그러나 분리 효율이 낮기 때문에 이러한 분리법은 소각로의 클링커와 매립에서 안정화에 문제를 발생시킨다.

본 연구에서는 밀도차를 이용한 유동층 분리법을 적용하여 분쇄된 폐기물의 분리 성능 향상을 가져왔다.

제목: Recovery options for plastic parts from end-of-life vehicles: An eco-efficiency assessment

연구자: W. Jenseit, Oko Institut, Germany

본 연구는 환경 영향과 가격관점에서 다양한 기술들에 대한 평가 도구를 제공하는 것이다. 이를 위해 현존하는 데이터를 분석하고 전문가 판단을 완료하였다. 그 결과 얻어진 결론들은 아래와 같다.

- 매립은 가장 환경효율이 낮다.

- **Blast furnace**, 합성가스 생산, 시멘트 킬른 등의 환경효율은 연소와 비슷한 수준이다.
- 기계적 재활용은 단량체 플라스틱 물질을 대규모로 쉽게 다룰 수 있을 때 경쟁력이 있다.
- 기계적 재활용에 있어서 분해 비용이 환경효율을 결정짓는 가장 큰 요소다.