

방사성폐기물 처리를 위한 메카노케미스트리 기술 고찰

박지은*, 김학수

한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

*jepark12@khnp.co.kr

1. 서론

$$E = k(S-S_0) \quad (1)$$

원자력발전소 운영 중에 발생하는 폐수지는 방사능 농도가 현행 중준위폐기물에 해당되나 기존의 방법으로 처리가 곤란한 경우가 많다. 이에 폐수지 처분량 저감, 방사성핵종 분리 및 처분 안정성을 확보하기 위한 신기술을 검토하여 기존 방법과는 다른 각도에서 접근할 필요가 있다.

본 논문에서는 분쇄 등의 기계적 응력에 의한 활성화 현상을 이용하는 메카노케미스트리 기술에 대하여 논의하고자 한다. 원자력 산업계에서 분쇄에 대한 연구는 수행된 바 있지만 메카노케미스트리 현상을 이용한 사례는 전무하다.

2. 본론

2.1 메카노케미스트리의 원리

메카노케미스트리는 물질에 외력이 반복적으로 전달됨으로써 에너지가 축적되어 새로운 특성이 발현되는 현상이며, 초음파 및 마이크로파 조사 뿐 아니라 간단하게는 분쇄에 의해 달성된다.

천연에 존재하는 대부분의 고형 무기/유기물질은 그 내부에 수많은 균열을 포함하고 있으며 기계적 외력이 균열들에 전달되면 분체를 생성하는 1차 파쇄가 발생한다. 이러한 1차 파쇄의 힘이 내부의 세세한 크랙에 전달되어 2차 파쇄가 발생되면서 에너지 변환축적 과정이 일어난다.

에너지의 변환축적 과정은, 우선 공급된 원료가 외력에 의해 변형되어 역학 에너지(응력)가 입자 내에 축적되는 것으로 시작한다. 이 때 소요되는 일은 마치 스프링 코일 내에 에너지가 저장되듯이 일시적으로 발생하는데, 입자에 힘이 더욱 부가되어 변형 한계를 넘게 되면 새로운 표면이 생성된다. 고체의 단위 면적은 일정량의 표면에너지를 갖게 되므로 증가한 표면적에 표면에너지나 격자결합의 비틀림 에너지 등으로 변환되어 축적된다.

Rittinger(1867)의 법칙에 의하면, 분쇄로 인하여 새로운 표면이 생성되어 표면 에너지가 증가하고, 단위질량 당 일(W)은 비표면적 증가에 비례한다.

- E : 분쇄 소비에너지
- S : 비표면적(단위질량 당 표면적, cm^2/g)

또한, 파괴의 임계응력(σ)은 식(2)와 같다.

$$\sigma \approx \sqrt{2Y\lambda/\pi c} \quad (2)$$

- λ : 표면 에너지
- c : 임계점 균열 길이의 반
- Y : Young 윌

2.2 현상 및 응용

미립산물 제조 시, 분쇄 과정에서는 물리적 변화와 화학적 변화가 모두 나타난다. 건식 분쇄 할 경우 비표면적의 증대와 분체의 형상변화, 새로운 균열 생성, 격자 부정 및 결함(잠재응력의 축적, 비중 변화 등의 기계적 성질) 등의 물리적인 변화가 나타난다. 이때 산물의 질은 에너지 효율, 설계, 운전 조건에 따라 결정된다. 한편, 분쇄 직후의 활성화된 표면은 보다 강고한 화학결합을 형성할 수 있으므로 젖음, 분산성, 용해성 등의 개량을 목적으로 고체 표면의 개질제, 미립자의 복합화, 마이크로 캡셀화 등에 응용 할 수 있다.

- 외부 열에너지 필요 없이 광물입자의 표면개질, 광물자원으로부터 신물질의 합성 등의 연구에 접목할 수 있다.
- 분쇄 시 구조적으로 무정형화 되고 높은 에너지 활성을 가진 새로운 표면이 발현된다. 또한 격자 내 축적 에너지가 결정 변화에 필요한 에너지에 달하여 분체입자 자체의 표면이나 내부까지 영향을 미쳐 구조가 전이 된다.
- 분체의 흡착성 및 반응성 증대로 비표면적이 증가하여 세라믹스 원료의 고상반응 속도를 촉진한다.

2.3 장점 및 단점

메카노케미스트리는 기계적 현상이 일률적이지 않아 기구의 종류에 따라, 강도 및 기계적 응력(충격, 마찰, 압축, 전단 응력 등)의 작용요소가 결정되며, 많은 매개변수를 변화시켜 최적의 조건을 찾아내는 이른바 경험적 방법이 주류를 이루고 있다는 단점이 있다. 그러나 고열 또는 용융과 같은 열 에너지의 공급이 필요 없으므로 공정을 간소화 할 수 있고, 에너지를 절약할 수 있으며, 환경 친화적이라는 장점이 있다. 또한 기존의 방법으로 획득하기 어려운 흡착성, 유전특성, 촉매특성, 소결성 및 용해성 등으로 인해 물성개질이 가능하다.

2.4 연구사례 및 적용 가능성

2.4.1 연구사례

대부분의 폐기물은 분말 상태일 때 연소가 쉬울 뿐 아니라 고형화 시, 매질에 균일하게 분산시킬 수 있다. 따라서 원자력 산업계에서 수행하는 분쇄는 폐 이온교환 수지를 소각처리하거나, 고형화 처리를 위한 전처리 공정으로 이용되었다. 또한 사용 후핵연료 저장조 정화를 위하여 입자형 이온교환 수지를 분쇄하여 분말화하기도 한다. 이러한 전처리 공정으로써 분쇄에 대하여 연구하거나 분쇄효율을 높이기 위한 연구를 수행한 사례(그 예로, “급속 동결 전처리에 의한 유기이온 교환수지의 분쇄 효과” 및 “초임계수 산화공정에 의한 원전 폐수지 처리기술” 연구)은 있으나 메카노케미스트리 기술을 이용하여 물성개질 등을 위한 분쇄를 수행한 사례는 전무하다.

2.4.2 적용 가능성

기계적 분쇄로 고분자 사슬이 절단되면, 분자량 및 분자량 분포의 변화와 이에 따른 유리전이 온도의 변화를 야기 시키고, 또한 자유라디칼이 형성되어 사슬 사이의 화학반응으로 인해 가교결합을 촉진시킨다. 그 예로 대상 폐기물을 상온 및 저온에서 고 에너지 볼-밀링(Milling) 처리하면 네마틱 중간상(Nematic Mesophase)의 비정질을 형성하여 후열 처리 과정을 거쳐 쉽게 결정화된다는 연구가 있다.

기계적 처리가 고분자 재료의 구조와 분자 배열 등에 커다란 변화를 일으킬 수 있기 때문에, 이러한 현상을 원자력 발전소에서 발생하는 분쇄가능 폐기물에 적용하면 환경 친화적으로 적절하게 처리할 수 있을 것으로 판단된다.

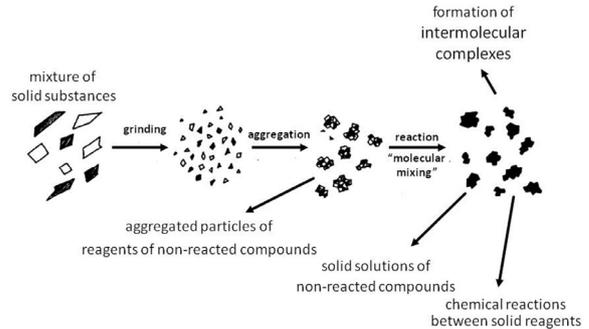


Fig. 1. Mechanochemical transformations in mixture.

3. 결론

원자력 발전소에서 발생하는 폐기물을 처리하기 위한 신기술로써 메카노케미스트리 기술에 대하여 논의하였다. 물체의 특성을 개질 할 수 있다는 측면에서 메카노케미스트리 기술의 적용 가능성은 매우 크다고 할 수 있으나, 효율적으로 분쇄할 수 있는 방법에 대한 연구에 집중되었기 때문에 분쇄물 자체의 물리·화학적 성질이 변하는 현상에 대해서는 오랫동안 연구가 이루어지지 못하였다.

본 논문이 원자력 산업계 뿐 아니라 다양한 처리 분야에서 메카노케미스트리 연구에 대한 관심을 높일 수 있는 계기가 될 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

- [1] 김경숙 외 6명, “초임계수 산화공정에 의한 원전 폐수지 처리기술”, 방사성폐기물학회지, 7(3), 175~182 (2009).
- [2] 이토히토시, 「첨단 분쇄기술과 응용」, 성안당 (2007).
- [3] 신희덕 외, “폐기물처리 최신 동향”, KISTI (2005).
- [4] 박재구, “석영입자의 미분쇄에 따른 메카노케미컬 효과”, 한국자원공학회지, 186~191 (1994).
- [5] 임성팔 외, “급속동결 전처리에 의한 유기이온 교환수지의 분쇄효과”, 한국공업화학회지 제1권 제1호, 23~29 (1990).
- [6] A. V. Dushkin, et al., “The Complex World of Polysaccharides”, Complexes of Polysaccharides and Glycyrrhizic Acid with Drug Molecules (2012).
- [7] Xiuying Guo, et al., “A review of mechano-chemistry applications in waste management,” Waste Management (2010).
- [8] Fumio Saito, et al., “Novel Waste Processing by Means of Mechanochemical Treatment”, Materials Science Forum (2007).