

# A Study on the Pelletization of Powdered Radioactive Waste by Roll Compaction

## 롤 컴팩션을 이용한 분말 방사성폐기물의 펠렛화 연구

Jong-Soon Song<sup>1</sup>, Sang-Hyun Lim<sup>1</sup>, Min-Young Jung<sup>1,\*</sup>, and Ki-Hong Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, Republic of Korea*

<sup>2</sup>*Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

송중순<sup>1</sup>, 임상현<sup>1</sup>, 정민영<sup>1,\*</sup>, 김기홍<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309*

<sup>2</sup>*한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111*

(Received January 28, 2019 / Revised February 26, 2019 / Approved June 4, 2019)

Disposal nonconformity of radioactive wastes refers to radioactive wastes that need to be treated, solidified and packaged during operation or decommissioning of NPPs, and are typically exemplified by particulate radioactive wastes with dispersion characteristics. These wastes include the dried powders of concentrated wastes generated in the process of operating NPPs, slurry and sludge, various powdered wastes generated in the decommissioning process (crushed concrete, decontamination sludge, etc.), and fine radioactive soil, which is not easy to decontaminate. As these particulate wastes must be packaged so that they become non-dispersive, they are solidified with solidification agents such as cement and polymer. If they are treated using existing solidification methods, however, the volume of the final wastes will increase. This drawback may increase the disposal cost and reduce the acceptability of disposal sites. Accordingly, to solve these problems, this study investigates the pelletization of particulate radioactive wastes in order to reduce final waste volume.

**Keywords:** Disposal nonconformity radioactive waste, Powdered waste, Pelletization, Volume reduction, Solidification, Disposal

\* Corresponding Author.

Min-Young Jung, Chosun University, E-mail: [anstjdrh12@nate.com](mailto:anstjdrh12@nate.com), Tel: +82-62-230-7744

### ORCID

Jong-Soon Song <http://orcid.org/0000-0001-9162-7631>

Min-Young Jung <http://orcid.org/0000-0003-1229-8708>

Sang-Hyun Lim <http://orcid.org/0000-0002-8950-4752>

Ki-Hong Kim <http://orcid.org/0000-0001-5836-9378>

처분 부적합 폐기물이란 원전운영이나 해체 시 처리, 고화 및 포장이 요구되는 방사성폐기물 등을 일컬으며, 대표적으로 분산 특성을 갖는 입자성 방사성폐기물을 예로 들 수가 있다. 이들 폐기물에는 원전 운영과정에서 발생하는 농축폐액의 건조분말, 슬러리 및 슬러지, 향후 원전 해체과정에서 발생하는 온갖 분말 상태의 폐기물(콘크리트 파쇄물, 제염 슬러지 등), 그리고 제염이 용이치 못한 미세 크기의 방사능오염 토양 등이 있다. 입자성 폐기물을 기존의 고화방식으로 처리할 경우에는 최종 폐기물의 부피가 증가하는 단점을 갖게 되어 처분 비용의 증가 및 처분장의 수용성을 감소하는 결과를 야기할 수가 있다. 따라서 이들 문제를 해결하고자 본 연구에서는 최종 폐기물 부피의 감용화를 위해 롤 압축 기술을 이용하여 분말의 펠렛화 연구를 수행하였다.

중심단어: 처분 부적합 폐기물, 입자성 폐기물, 펠렛화, 감용화, 고화, 처분

## 1. 서론

원자력발전소, 원자력 산업체 및 RI 이용 기관에 의해 다양한 종류의 방사성폐기물이 발생되는데, 원자력발전소의 경우에는 중성자와 핵연료의 붕괴로 인하여 핵분열 물질 및 부식 생성물들이 폐수지 및 폐필터, 농축 폐액, 그리고 슬러지 등의 형태로 발생된다. 이들 폐기물들은 적절한 기술에 의해 처리되어 중앙 집중방식으로 관리되도록 영구 처분된다.

이들 방사성폐기물의 영구 처분을 위해서는 원자력안전위원회 고시 제2017-60호 ‘중·저준위 방사성폐기물 인도 규정’ [1] 및 산업통상자원부의 고시 제 2016-230호 ‘방사성폐기물 인수방법 등에 관한 규정’ [2]과 한국원자력환경공단(경주 처분장)의 인수 기준[3]들을 충족시킬 수 있도록 방사성폐기물 고화체(또는 방사성폐기물 포장물)의 처분적합성을 입증하여야 한다.

처분부적합성 방사성폐기물로 평가되는 대표적인 입자성 물질(건조된 농축폐액의 분말, 건조된 슬러지의 분말 등)들은 반드시 비분산성이 되도록 처리하여 포장 되어야 하므로, 이들 입자성 물질들은 시멘트, 폴리머 등의 고화 매질로 고화처리하게 된다. 농축폐액 자체나 습윤 슬러지를 시멘트 고화하거나, 이들을 건조하여 입자(분말)상태로 폴리머로 고화처리하는 경우에는 방사성 분말 입자 하나 하나씩을 고화 매질로 둘러싸야 하기 때문에 고화처리 이후 처분되는 방사성고화체의 부피는 적어도 3배 이상으로 증가하게 되며[4], 이로 인하여 방사성폐기물 처분 비용의 급격한 상승과 처분장의 처분 수용량을 빠르게 포화시키는 결과가 발생하게 되어 제2, 3의 영구처분장이 더 필요하게 될 수가 있다.

따라서 건조된 입자성 방사성폐기물의 입자들 사이 공간을 최대한도로 줄여 고강도의 펠렛으로 성형 시켜 고화 처리할 경우에는 부피 증가가 발생하지 않을 것이며 오히려 처분되는 방사성고화체의 부피를 감용시킴에 따라 처분비용의 감소 및 처분장의 방사성폐기물 수용량을 증가시키는 효과를 얻을 수가 있을 것으로 판단된다.

분말의 펠렛화에는 많은 기술들이 있지만 방사성폐기물의 고 감용화 목적을 달성할 수 있도록 단위시간당 처리량과 펠렛의 형태에 의한 드럼내 최적 충전율을 고려하여 본 연구에서는 롤 컴팩션(Roll compaction)에 의한 펠렛 성형화 기술을 적용하였다[5].

롤 컴팩션은 1960년대 금속관을 만드는데 이용되어 왔으나 분말의 펠렛(브리켓, Briquette) 성형이 널리 요구되자 롤의 설계와 운전 을 위하여 Johanson 이론[6]이 제시되었고, 이어서 펠렛 성형의 분야가 다양하게 변하면서 분말 물질의 특성, 롤 크기 및 운전변수들에 대한 많은 수학적 모델이 다양하게 제시하기에 이르렀다. Johanson은 롤 컴팩션 과정에서 물질의 거동 영역을 물질의 미끄러짐 영역(Slip region), 물질이 두 개의 롤 사이에서 압축되는 잘림 영역(Nip region), 그리고 두 개의 롤에서 물질이 나가는 배출 영역(Release region)으로 나누어 각 영역에서의 수학적 모델을 제시하였다. 이들 모델로부터 롤의 두께와 지름을 계산할 수가 있고, 잘림 각도(Nip angle), 롤에 가하는 압력들도 계산하여 롤 컴팩션 시스템을 설계할 수 있게 된다. 이때 물질의 특성(Isotropic, Cohesive, Compressible)도 함께 고려하여야 한다.

본 연구에서는 롤의 지름과 두께 및 잘림 각도를 일정하게 하여 운전 변수(롤 회전수, 물질 공급속도 및 성형압력)를

Table 1. Process parameters and conditions in roll compaction

Process parameters		Process conditions	
Effective angle of friction	42°	Roll gap	3 mm
Radius of the rolls	21 cm	Hydraulic pressure	300 kg <sub>f</sub> ·cm <sup>2</sup>
Compact surface area	360 cm <sup>2</sup>	Roll speed	20 rpm
Roll width	6 cm	Feed speed	35 rpm
Roll pockets;			
- Length	0.95 cm		
- Height	0.8 cm		

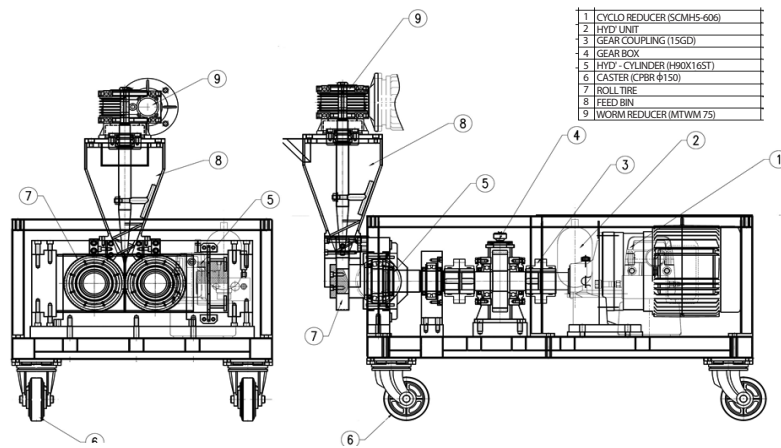


Fig. 1. Design drawing of roll compactor.

변화시키면서 두 개의 롤 간격(Gap), 성형된 펠렛의 밀도를 평가하였다. 이어서 분말로부터 성형된 펠렛을 폴리머로 고화처리하여 폴리머 고화체의 압축강도를 평가하였으며, 그리고 분말상 입자들 자체를 동일한 폴리머로 고화하여 상호 감용화 정도를 살펴보았다.

## 2.2 펠렛 성형을 위한 분말상 물질의 선정

펠렛화(Pelletizing)란 분말의 특성을 잃어버리지 않으면서 보다 커다란 점착성의 덩어리를 형성하도록 미세한

## 2. 실험

### 2.1 실험용 롤 컴팩터 제작

분말 입자의 펠렛 성형 장치는 Table 1의 공정 변수와 조건들을 고려하여 Fig. 1과 같이 설계하고, 이어서 Fig. 2와 같은 롤 컴팩터를 제작하여 입자성 분말의 펠렛 성형에 대한 연구를 수행하였다.



Fig. 2. Manufactured roll compactor.

Table 2. Types of powered radioactive waste

Waste from NPP operation	Concentrated waste powder, slurry, and sludge
Waste from NPP decommissioning	Powered waste (Concrete crusher, Decontamination sludge etc.)
Other Wastes	Contaminated soil of microscopic size which is not easy to decontaminate etc.

Table 3. Soil particle size classification

Clay	Silt	Sand	
		Fine sand	Coarse sand
0.002 less	0.002~0.02	0.02~0.2	0.2~2.0

(unit : mm)

분말(입자)들이 서로 함께 뭉치게 하는 공정이라 할 수 있기 때문에 분말의 물리적 특성 중 물질의 압축성(Compressibility)과 입자 크기(Size distribution)는 매우 중요하다.

원전 운영 과정에서 발생하는 방사성 슬러지(봉산 농축 폐액, 스팀 발생기 등)의 화학적 조성 등에 대한 연구결과들은 일부 있으나 이들의 성상이나 입자 크기 등의 물리적 특성에 대하여 수행된 연구결과들은 전혀 없는 실정이다. 그러나 펠렛화 대상(Table 2)은 원전 운영 슬러지 외에도 오염토양 중 제염이 곤란하여 자체처분을 할 수 없는 크기의 입자들로 구성된 토양도 해당되므로 토양의 입도 크기(Table 3)도 고려할 필요가 있다.

한편, 경주 처분장의 인수 조건 중 포장물 고형화 조건에서 입자성 물질을 포함하는 폐기물, 즉 직경 0.01 mm 이하의 입자가 폐기물 무게의 1% 이상 구성되어 있거나 직경 0.02 mm 이하의 입자가 15% 이상 구성되어 있는 폐기물은 비분산성이 되도록 처리하여야 한다고 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고준위 폐기물 처분장의 갭 채움 물질로 이용되고, 액상의 방사성 물질을 흡착하는데 널리 이용되고 있는 벤토나이트를 일차적으로 펠렛 성형 대상 물질로 선정하였다.

본 연구에서는 Fig. 3의 입도 분포를 갖는 85~100 μm의 벤토나이트를 이용하여 실험을 진행하였다.

### 2.3 방사성폐기물 분말의 펠렛화 영향 인자

분말의 펠렛화 장치는 Table 1의 공정 변수와 조건들을 고려하여 Fig. 1과 같이 설계하고, 이어서 Fig. 2과 같은 롤

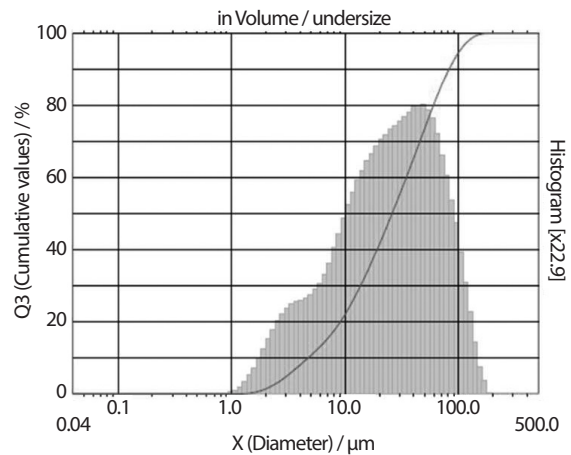


Fig. 3. Particle size distribution of bentonite.

컴팩터를 제작하여 입자성 분말 물질에 대한 연구를 수행하였다.

분말의 펠렛화를 위한 롤 컴팩터의 이론적 토대를 제시한 Johanson은 Fig. 4와 같이 분말의 공급에 따른 분말이 롤 사이로 들어가는 미끄러짐 영역(Slip region), 롤 회전에 의해 분말 압축이 시작되어 롤에서 배출되기 전까지를 잘림 영역(Nip region), 그리고 압축된 분말이 롤에서부터 빠져 나오는 배출 영역(Release region)으로 구분하였다(6, 7).

Johanson의 롤 컴팩션 이론에서 Fig. 4의 (b)처럼 θ각도에 따라 미끄러짐과 잘림 영역이 구분되며, 잘림 각에서 미끄러짐과 잘림 영역에서의 압력구배가 동일하다고 제안함에 따라 Bindhumadhavan 등(8)은 미끄러짐 영역에서의

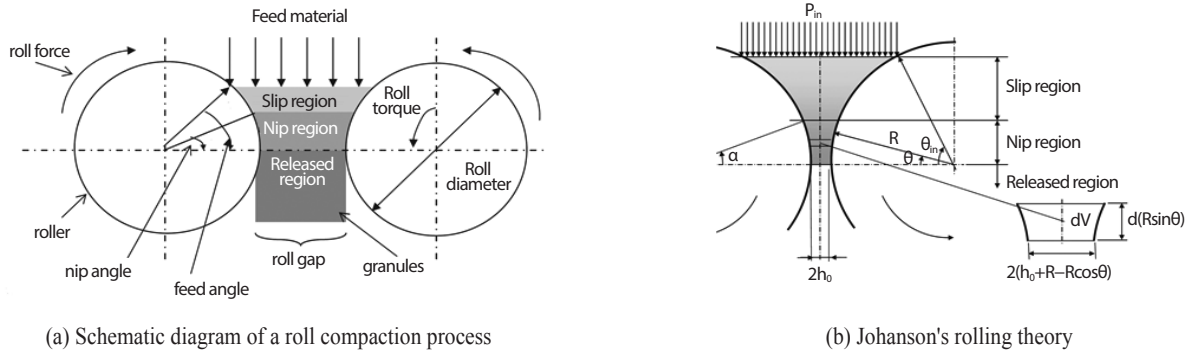


Fig. 4. Schematic diagram of a roll compaction process [6].

Table 4. Roll compaction parameters

Process Parameters	Geometric Parameters	Material Properties
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Roll Force</li> <li>- Roll Torque</li> <li>- Roll Speed</li> <li>- Feed Rate</li> <li>- Gravity</li> <li>- Inertia</li> <li>- Roll Surface</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Roll Diameter</li> <li>- Roll Width</li> <li>- Roll Gap Size</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Particle Size</li> <li>- Mixture Composition</li> <li>- Internal (Angle Of) Friction</li> <li>- Wall Friction</li> <li>- Compressibility</li> <li>- Permeability</li> <li>- Bulk Density</li> </ul>

압력구배와 잘림 영역에서의 압력구배가 교차하는 점이 그 잘림 각이라 하여 잘림 각을 계산하는 식을 유도하였다. 그 결과 잘림 각은 물질의 압축성 계수, 물질의 흐름 특성, 롤 직경, 그리고 롤 간격에 의존함을 밝혔다. 이와 같이 롤 컴팩션의 설계와 운전에 대한 영향인자들은 크게 장치 운전변수, 장치의 기하학적 변수 및 물질 특성들로 대별할 수가 있는데 이를 종합하여 Table 4에 나타냈다.

본 연구에서는 상기 변수들 이외에 방사성 물질의 감용화(물질의 감용화를 위한 펠렛 성형, 성형된 펠렛의 드럼 충전)에 목적을 두고 있기 때문에 부피감용 및 성형체의 건전성 확보 및 원자력시설 내에서의 활용을 위하여 다음 사항들을 충족시키는 롤 컴팩션 시스템을 구축하고자 하였다.

- 성형응집 제재를 사용하지 않으면서 건조분말의 성형 가능성
- 성형된 펠렛의 크기 균일성 유지 여부
- 고밀도의 펠렛 성형 가능성(고감용화)
- 설치 및 유지보수가 용이한 크기 및 구조에 대한 제작

가능성

- 펠렛화 전·후 처리용 부대 장치가 필요하지 않는 조건 등

## 2.4 롤 컴팩터의 성능 및 성형 펠렛의 평가

Table 1의 설계조건으로 기학적 변수들을 고정시켜 제작된 롤 컴팩터를 이용하여 운전 변수들을 다양하게 변화시키면서 건조 상태의 분말을 펠렛으로 성형하는 실험을 수행하였다. 사용된 분말 형태는 85~100 μm의 입도분포를 갖는 벤토나이트였다.

운전변수는 롤의 회전속도, 성형 압축력, 분말의 공급속도 등이었다.

운전변수들을 다양하게 변화시키면서 롤 간격을 연속적으로 측정하였고, 장치 설계에서 설정된 롤 간격을 유지하면서 고강도 및 고감용화된 펠렛이 성형되도록 운전조건들을 최적화하였다.

최적화된 운전조건하에서 성형된 펠렛과 벤토나이트

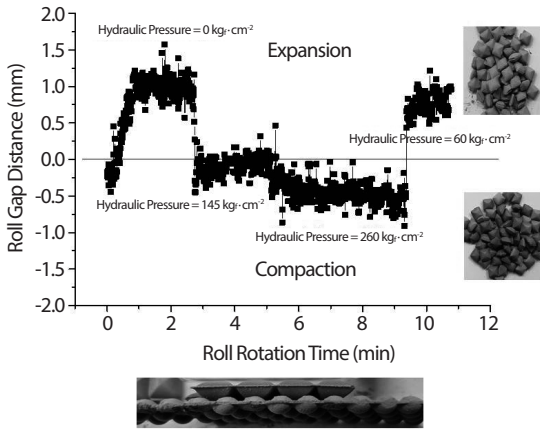


Fig. 5. Evaluation of gab distance.

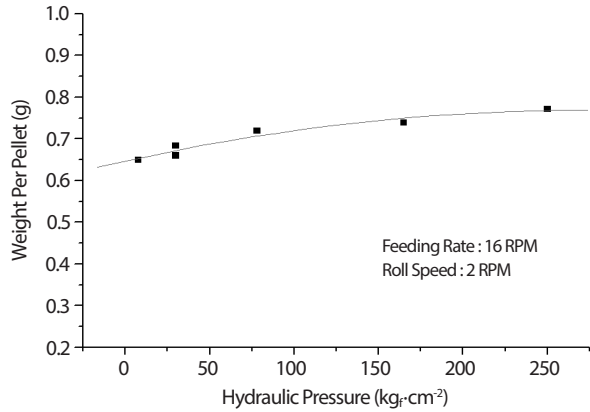


Fig. 6. Change of weight of pellet according to the change of compression force (hydraulic pressure).

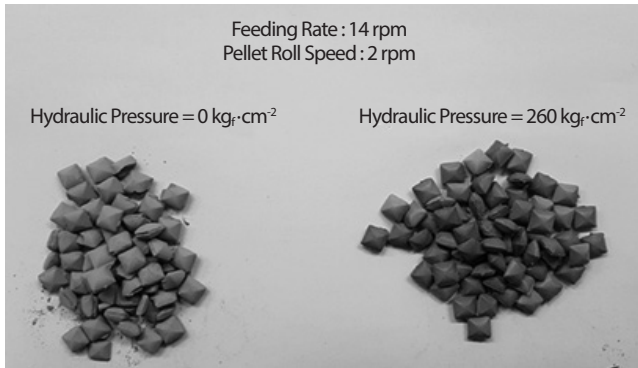


Fig. 7. Status of compacted pellets according to the change of compression force (hydraulic pressure).

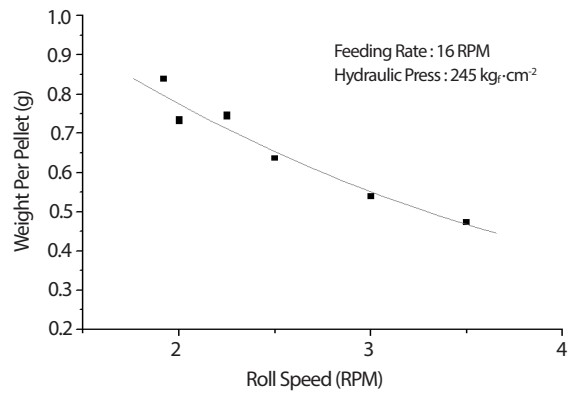


Fig. 8. Weight of pellets according to the change of roll speed.

분말을 분말기준으로 감용비를 도출 하였으며, 성형된 펠렛과 분말을 폴리머로 고화처리하여 고화체간의 감용비도 계산 하였다.

장치의 시간당 처리량은 최적 조건중에서 롤의 회전속도를 변화시키면서 성형된 펠렛의 무게를 측정하여 평가하였다.

### 3. 결과

#### 3.1 펠렛 성형화 장치의 평가

##### 3.1.1 롤 간격(Gap distance) 평가

두 개의 롤 간의 거리(간격)는 롤에 가해지는 압력이

클수록, 분말의 공급 속도(물질의 공급량)가 느릴수록 좁아지게 되며, 반면에 롤 회전속도가 빠르게 되면 두 개의 롤 사이(간격)의 거리는 벌어지게 되어 성형 펠렛의 강도는 기대 하기가 어렵게 되는 것으로 알려져 있다[9]. 따라서 본 연구의 목적은 두 개의 롤 간의 거리를 좁게 유지시켜 펠렛의 강도(또는 밀도)를 증가시키는 것에 있기 때문에 사전 평가에서 분말의 공급 속도와 롤 회전속도를 결정하였다. 이 조건 하에서 롤에 가하는 압력을 0, 60, 145 및 260 kg·cm<sup>-2</sup>로 변화시키면서 롤 간격(Gap distance)과 성형된 펠렛의 압축 상태를 살펴보았다.

펠렛 성형과정에서 롤 간격을 측정하기 위하여 움직임이 가능한 롤의 중심 회전축으로부터 일정거리를 두어 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer, Z4-V25R)를

Table 5. Predicted weight of pellets per hour by using a roll compactor

Roll speed (rpm)	Weights of fabricated pellets (kg·hr <sup>-1</sup> )
2.0	27.1
2.5	33.9
3.0	40.7
3.5	47.5
4.0	54.3

설치하였다. 성형과정에서 롤에 가하는 압력을 변화시키면서 롤 간격을 측정된 결과를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에서 보듯이 압력을 가하지 않은 상태에서는 분말이 2개의 롤 사이에 공급되면서 분말이 펠렛으로 성형 될 때 포켓 내로 주입된 분말을 압축하는 힘이 적게 되어 두 개의 롤 사이의 거리(간격)는 벌어졌으며 성형된 펠렛의 압축 상태는 매우 불량하게 되었고, 그 결과 펠렛의 강도는 전혀 기대되지 못하였다. 이와는 반대로 압력을 서서히 변화시키면서 가하게 되면 두 개의 롤 간의 거리는 점차적으로 좁아지면서 펠렛의 압축 상태는 매우 양호하게 되는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.1.2 펠렛의 성형화 압력(Hydraulic pressure) 평가

롤 컴팩션은 일정한 면적을 갖고 압축하는 방식과는 달리 두 개의 롤 간의 접촉면에서 분말을 압축하여 성형하는 방식이다. Fig. 6에 분말 공급 속도와 롤 회전속도를 일정하게 하면서 성형 압축력을 변화시키면서 성형된 펠렛의 무게 변화를 나타냈다. 그리고 Fig. 7에는 성형된 펠렛의 상태를 나타냈다. Fig. 6에서 보듯이 성형 압축력이 증가할수록 펠렛의 무게도 증가함을 알 수 있었는데, 이 성형 조건하에서 펠렛당 무게는 0.64 g에서 0.78 g으로 증가하였다. 그리고 이 조건에서 분말의 공급속도만을 16 rpm에서 19 rpm으로 증가시켰을 경우, 얻어진 펠렛의 무게는 0.86 g이었다. 결국 포켓 내에 분말의 공급량을 극대화 시킨 상태에서는 롤 간격이 증가되므로 이를 방지하면서 주입된 분말을 압축할 수 있는 성형 압축력이 가해진다면 펠렛 단위당 분말 무게는 최대가 될 것이며 강도 또한 최대가 될 것으로 예측할 수가 있다.

### 3.1.3 Roll의 회전속도(Roll speed) 평가

롤의 회전속도는 방사성폐기물의 단위시간당 처리량과

매우 밀접하다. 롤의 회전속도가 증가하면 증가할수록 두 개의 롤 사이의 거리는 벌어지게 되게 되어 성형된 펠렛의 강도는 기대되지 못한다. 두 개의 롤 사이의 거리를 일정하게 하면서 롤 회전속도를 증가시키게 되면 성형 되는 펠렛의 무게와 강도는 분말의 특성에 크게 의존하게 된다. 즉 점착성의 분말은 강도가 기대되지만 비압축성 분말인 경우에는 강도가 기대되지 못한다. Fig. 8에 분말 공급 속도와 성형 압축력을 일정하게 하면서 롤의 회전속도를 변화시키면서 얻어진 성형 펠렛의 무게를 나타내고 있다. 이 성형조건에서 롤 회전속도에 의해 단위 펠렛당 무게 변화가 크다는 것을 알 수가 있다. 이는 분말 공급 속도를 일정하게 하면서 일정한 속도로 회전하고 있는 롤 포켓에 주입되는 분말의 양도 일정하지만 회전속도가 빠르게 되면 롤 포켓 내로 주입되는 분말의 양은 적어지기 때문에 성형 펠렛의 무게는 감소할 수밖에 없기 때문이다. 따라서 분말의 단위 시간당 처리량을 증가시키고자 한다면 롤 회전속도를 증가시키게 되는데 이때에는 분말의 감용화, 처분장 인수조건을 충족하기 위한 펠렛 고화체의 강도를 유지시키기 위해서는 반드시 분말 공급 속도도 증가시켜야 함을 알 수가 있다.

상기 조건 중에서 롤 회전속도가 1.92 rpm, 245 kg·cm<sup>-2</sup>의 성형 압축력에서 펠렛의 무게는 0.86 g이었기 때문에, 이 펠렛 무게를 유지할 수 있는 운전 조건(성형 압축력과 분말 공급 속도 증가 등)으로 롤 컴팩터를 가동시킨다면, 롤 회전속도에 따른 단위 시간당 처리되는 펠렛 성형량은 아래 Table 5과 같이 예견할 수가 있다.

### 3.1.4 분말의 주입속도(Feeding rate) 평가

분말의 주입 속도 또는 롤 포켓 내로 주입량이 과잉 공급될 경우에는 서로 반대 방향으로 회전하는 롤의 기어 맞물림에 영향을 주게 된다. 궁극적으로 일종의 간극(Backlash)으로 인하여 펠렛의 위상차이(Phase different)가 발생하게 되면 양호한 모양의 펠렛이 성형되지 못하게 된다. 따라서 간극(backlash)에 의한 두 롤의 원점 수정을 위한 장치의 유지보수 배제와 롤 포켓내로의 주입량이 최적화한 상태에서의 분말의 고 감용화, 즉 펠렛의 밀도와 강도 증가를 위해서는 분말의 공급속도 조절에 유의할 필요가 있다.

일정한 롤 회전속도와 성형 압축력을 고정시킨 상태에서 분말의 공급 속도를 변화시키면서 성형된 펠렛의 무게 변화를 Fig. 9에 나타냈다. 일정한 롤 회전속도에서 롤 포켓에

Table 6. Apparent density of a pellet powder of bentonite

Sample Type	Weight (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Apparent density (g·cm <sup>-3</sup> )
Powder (bentonite)	47.9112	50	0.9582
Pellet	0.6692* (0.8644)**	0.292	2.2918 (2.9603)

\*: Acceptable pellet, \*\*: Best pellet

주입되는 양은 분말 공급 속도에 따라 달라지는데 분말의 공급 속도가 증가할수록 펠렛의 무게는 증가하였다. 그러나 분말의 공급량이 일정량 이상으로 공급하게 될 때에는 롤을 회전시키는 모터의 힘이 부족하여 롤의 회전이 정지하거나 펠렛 형태에 위상 차이가 발생하기도 하였다.

### 3.2 분말의 감용비 평가

#### 3.2.1 분말의 의한 감용비 평가

성형장치를 통하여 제조된 한 개의 펠렛 무게는 0.4739 ~ 0.8644 g이었다. 그러나 펠렛의 형태를 유지하면서 일정한 강도를 갖는 보수적 관점에서 펠렛 1개의 무게는 0.6692 g으로 선정하여 분말 기준의 감용비 평가에 이용하였다. 감용비 평가에 이용된 펠렛을 제조하기 위한 성형 조건은 롤 속도 2 rpm, 분말 공급 속도 14 rpm, 그리고 롤 압력은 245 kg·cm<sup>-2</sup>으로 설정하였다.

분말 기준으로 감용비 평가는 벤토나이트 분말을 정밀한 눈금이 있는 50 ml 등근 플라스크에 주입하여 무게를 측정하여 밀도를 계산하였고, 반면에 펠렛의 밀도는 1개의 펠렛 무게를 측정하여 롤 내에 각인된 포켓의 부피로 나누어 계산하였다(Table 6). 그 결과, 분말 기준으로서의 감용비 평가는 펠렛의 밀도를 분말의 밀도로 나누어 감용비를 계산하였다. 즉 Table 6의 자료를 근거로 보수적 관점에서 수용 가능한 펠렛(Acceptable pellet)에 대하여 분말기준으로서의 부피 감용비는 2.2918 g / 0.9582 g = 2.392 = 2.4 이었고, 성형된 펠렛 중에서 고 압축된 펠렛(Best pellet)에 대하여서는 감용비가 2.9603 g / 0.9582 g = 3.089 = 3.1 이었다.

#### 3.2.2 고화체에 의한 감용비 비교

고화체 기준으로 최종 고화체의 감용비를 평가하기 위하여 Fig. 10과 같이 분말을 일반 혼합방식으로 제조한

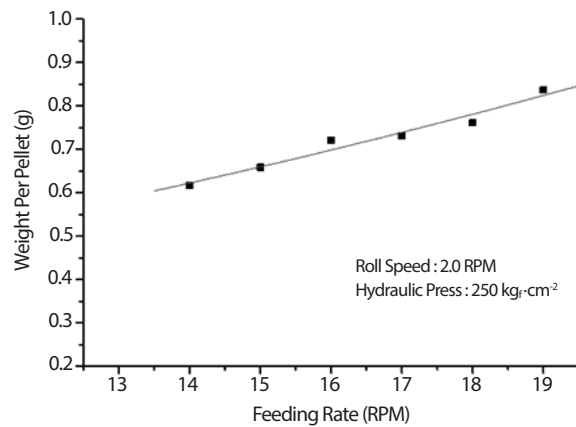


Fig. 9. Weight of pellets according to the change of feeding rate.

분말 폴리머 고화체와 성형된 펠렛간의 공극을 폴리머로 주입하여 고화한 펠렛 폴리머 고화체를 제조하였다. 성형된 펠렛사이의 공극을 폴리머를 주입하여 고화한 이유는 펠렛을 드럼 내에 주입하였을 때 펠렛과 고화매질을 교반하여 혼합할 수 없기 때문에 펠렛의 충전시 펠렛들 사이에서 발생하는 공극을 유동성을 갖는 액상의 고화매질을 채택하였으며, 본 연구에서는 폴리머를 주입하여 고화시키는 방식을 채택하였다. 폴리머 고화의 경우 한국수력원자력에서 신규로 건설된 원전에서 사용되고 있는 고화방식이기도 하다. 분말과 펠렛 고화체간의 감용비를 비교하기 위하여 압축강도 시험을 위한 시편 제조용 플라스틱 몰드(지름 50 mm, 높이 110 mm)를 사용하여 고화체 시편을 제조하였으며 제조된 고화체의 부피와 주입된 펠렛과 분말의 무게를 Table 7에 나타냈다.

여기서, 펠렛을 주입한 고화체의 부피와 분말을 주입한 고화체의 부피가 다소 차이(시편 지름은 에폭시 수지의 수축 정도, 시편 높이는 시편 양단의 가공과정에 기인)를 보임에 따라 펠렛을 주입한 고화체의 부피를 기준으로 분말



Table 7. Polymer (Epoxy) solid state data of pellet and powder

Incorporated material type	Specimen Size (mm)	Weight (g)			Sample volume (cm <sup>3</sup> )
		Powder	Epoxy	Total	
Pellet	H=100.03 D=49.90	228.41	85.74	314.15	195.52
Powder	H=104.59 D=50.23	56.75	161.99	218.74	207.15

(53.75 g)을 주입한 고화체의 부피(207.15 cm<sup>3</sup>)를 펠렛 고화체의 부피(195.52 g)로 환산하여 주입된 분말의 무게를 재계산(53.56 g)하였다

고화된 시편의 부피를 동일하게 하여 그 일정부피에 주입된 분말의 무게를 평가하여 감용비를 계산하였다. 감용비는 펠렛 고화체내에 주입된 분말의 무게를 분말 고화체내에 주입된 분말의 무게의 비로 평가할 수 있으므로, 그 결과 감용비는  $228.41 \text{ g} / 53.56 \text{ g} \approx 4.265 = 4.3$  이 도출되었다.

고화체 기준으로서 감용비 4.3의 의미는 분말로 고화하였을 경우에는 4.3 드럼이 생산되는데 반하여 분말을 펠렛으로 성형 시켜 고화하였을 경우에는 1 드럼이 된다는 의미이다. 이는 분말상의 폐기물만을 처분하는 경우에 있어서 동일한 폐기물 무게를 처분할 때의 처분비용은 1/4.3으로 감소되며, 처분장의 처분 수용량을 4.3 배로 증가시킬 수가 있다는 것이다.

#### 4. 결론

입자상 방사성폐기물은 처분부적합 폐기물로서 비분산성이 되도록 처리되어 포장되어야 처분할 수가 있다. 처분비용의 절감 및 처분장 수용성 증대를 위하여 입자성 물질의 감용화를 극대화할 수 있는 롤 컴팩터를 제작하고, 이 장치를 이용하여 입자성 물질을 펠렛화 하는 연구를 통하여 얻은 결과들은 다음과 같다.

- 1) 롤 직경과 두께를 각각 21 cm, 6 cm로 하고, 각 롤의 포켓 수를 264개로 하는 롤 컴팩터를 제작하였으며, 이 장치의 단위시간당 입자성 물질의 처리량은 27~54 kg·hr<sup>-1</sup> 이었다.



Fig. 10. Powder solidification (left) and pellet solidification (right).

- 2) 롤 컴팩터의 기하학적 운전 변수 및 운전 조건 등이 펠렛 성형 상태에 커다란 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 최적의 운전조건에서 분말의 응집 첨가제를 사용하지 않아도 효과적으로 펠렛이 형성됨을 확인하였다.
- 3) 입자성 물질의 펠렛화 과정에서 롤 회전속도는 2 rpm, 입자성 물질 공급속도는 16 rpm, 성형 압축력을 250 kg·cm<sup>2</sup>으로 하는 운전조건에서 고강도의 펠렛을 얻었으며, 분말 기준으로서의 감용비는 3.1배이었다.
- 4) 입자성 물질을 분말 상태로 폴리머 고화한 경우와 펠렛으로 성형하여 폴리머 고화하였을 경우의 감용비를 평가한 결과, 펠렛으로 성형하여 고화한 경우가 분말을 고화한 경우에 비해 감용비가 4.3배 이었다. 이는 4.3 드럼의 분말 고화체 드럼이 한 드럼의 펠렛 고화체로 부피가 감용된다는 의미이다.

현재 방사성폐기물을 압축성형을 통한 감용화 기술은 국내 또는 국외에도 진행되는 연구가 없으며, 향후 펠렛의 강도 측정, 고화체 특성평가 등에 관한 추가적인 실험과 장치 성능보완 등을 통하여 지속적인 연구를 한다면 폐기물 처분

비용의 부담과 처분부적합 폐기물의 처분에 대한 문제 해결에 적용 가능한 기술이라 판단되며, 고 감용화로 인하여 처분장의 수용성 증대로 협소한 국내의 국토보전을 위한 기술로 평가할 수가 있다.

## 감사의 글

본 논문은 산업자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 20171520101630).

본 논문은 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력연구기반확충사업의 연구결과입니다(No. NRF-2018M2B2B1065636).

## REFERENCE

- [1] Nuclear Safety and Security Commission, Low and Intermediate Level Radioactive Waste Management Regulations, NSSC Notice No. 2017-60 (2017).
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, Radioactive Waste Acceptance Criteria, MOTIE Notice No. 2016-230 (2016).
- [3] Korea Radioactive Waste Agency, Radwaste Acceptance Criteria, LILW-Operation-Radiation-028.
- [4] Korea Electric Power Corporation Research Institute of Technology, Development of radioactive waste solidification process program, KRC-87N-J05 (1989).
- [5] H. Masuda, K. Higashitani, and H. Yoshida, Power Technology Handbook, 3rd ed., 599-613, CRC Press, New York (2006).
- [6] J.R. Johanson, "A Rolling Theory for Granular Solids", *J. Appl. Mech.*, 32(4), 842-848 (1965).
- [7] G. Reynolds, R. Ingale, R. Roberts, S. Kothari, and B. Gururajan, "Practical Application of Roller Compaction Process Modeling", *Comput. Chem. Eng.*, 34(7), 1049-1057 (2010).
- [8] G. Bindhumadhavan, J.P.K. Seville, M.J. Adams, R.W. Greenwood, and S. Fitzpatrick, "Roll Compaction of a Pharmaceutical Excipient: Experimental Validation of Rolling Theory for Granular Solids", *Chem. Eng. Sci.*, 60(14), 3891-3897 (2005).
- [9] A.R. Muliadi, J.D. Litster, and C.R. Wassgren, "Modeling the Powder Roll Compaction Process: Comparison of 2-D Finite Element Method and The Rolling Theory For Granular Solids (Johanson's Model)", *Powder Technol.*, 221, 90-100 (2012).
- [10] Y.A. Yusof, A.C. Smith, and B.J. Briscoe, "Roll Compaction of Maize Powder", *Chem. Eng. Sci.*, 60(14), 3919-3931 (2005).
- [11] H.R. Karimi and S.S. Djokoto, "Instrumentation and Modeling of High-pressure Roller Crusher for Silicon Carbide Production", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 62(9-12), 1107-1113 (2012).
- [12] S.H. Hsu, G.V. Reklaitis, and V. Venkatasubramanian, "Modeling and Control of Roller Compaction for Pharmaceutical Manufacturing. Part I: Process Dynamics and Control Framework", *J. Pharm. Innov.*, 5(1-2), 14-23 (2010).
- [13] C. Jensen, "The Role of Advanced Polymer Solidification in a Comprehensive Plan for Handling, Storing and Disposing of Class B & C Resins and Filters", *Proc. of EPRI International Low-Level Waste Conference*, June 24-26, 2008, Orlando. Accessed Sep. 18 2018. Available from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.8167&rep=rep1&type=pdf>.