

## Zinc stearate의 첨가가 $UO_2$ 분말의 겉보기밀도, 혼합 및 성형에 미치는 효과

나상호 · 김시형 · 이영우 · 양명승 · 손동성

한국원자력연구소

Effect of Zinc Stearate Addition on Apparent Density, Blending and Compaction of  $UO_2$

S. H. Na, S. H. Kim, Y. W. Lee, M. S. Yang and D. S. Sohn

Korea Atomic Energy Research Institute

초 록 윤활제인 zinc stearate의 첨가량(0~4wt.%)을 변화시켜  $UO_2$ 분말의 겉보기밀도, 성형시의 분말입자간 마찰과 입자/다이벽 마찰간의 상관관계를 조사하였다. 소량의 윤활제 첨가시에는  $UO_2$ 분말입자간 박막의 윤활제 도포층이 형성되어 겉보기밀도가 증가한 반면 다량의 윤활제를 첨가한 경우에는  $UO_2$  분말입자에 두꺼운 윤활제 도포층이 형성되고 미혼합된 윤활제가 존재하여 겉보기밀도는 감소하는 경향을 보였다. 윤활제를 첨가혼합한 상태에서 다이벽 윤활도포 유무에 따라 구한  $UO_2$  성형체의 성형압력/성형밀도 자료로부터 분말입자간 마찰, 입자/다이벽 마찰 그리고 성형시 lubrication/inhibition등의 상대적 중요성을 조사하였다. 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실은 입자간마찰에 의한 압력손실보다 크게 나타났다. 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실은 다이벽 윤활제 도포에 의해 최소화될 수 있지만 상대적으로 바람직하지 않은 성형시의 inhibition이 야기되는 것으로 나타났다.

**Abstract** The effect of zinc stearate addition (0~4wt.%) during blending with  $UO_2$  powder has been studied by observation of apparent density variation. Apparent density increased by the development of thin surface films on the  $UO_2$  particles at the low contents of zinc stearate but decreased by the formation of thick layer and free zinc stearate at the high contents. Pressure/density data were obtained from double acting compaction of cylindrical  $UO_2$  green pellets containing admixed zinc stearate with and without die-wall lubrication to determine the relative significance of interparticle friction, particle/die-wall friction and compaction lubrication/inhibition. Compaction pressure loss associated with interparticle friction was lower than that caused by die-wall friction. The latter was minimized only by die-wall lubrication which also caused undesirable compaction inhibition.

### 1. 서 론

핵연료로 사용되는 이산화 우라늄( $UO_2$ )은 금속핵연료에 비해 높은 용융점(약 2973K), 낮은 열팽창 그리고 방사선 조사하에서도 양호한 거동(치수 안정성 및 핵분열생성물 보유)을 보이므로<sup>1)</sup> 현재 원자력발전용의 핵연료로 가장 많이 사용되고 있다.  $UO_2$ 펠렛 제조 공정은 금속 또는 세라믹 분말의 펠렛 제조공정과 유사하여<sup>2)</sup>  $UO_2$ 펠렛의 성형시 윤활제 사용은 거의 필수적이다. 윤활제 첨가방법으로는 분말의 특성에 따라 다이벽에 직접 윤활제를 도포하는 방법도 있지만 거의 보편적이고

편리하게 사용되는 방법으로는 분말에 윤활제를 첨가혼합(admix)시키는 것이다. 윤활제 첨가혼합량에 따른 분말의 특성 및 성형성 등에 미치는 영향에 대해서는 금속분말인 경우에 많이 보고되고 있으나<sup>3~5)</sup>, 세라믹 분말의 경우에는 이와 같은 영향이 구체적으로 밝혀지지 않아 금속분말의 경우와 이산화우라늄 분말을 사용하여 윤활제를 그대로 사용하고 있다. 본 연구에서는 세라믹 분말의 하나인 이산화우라늄 분말을 사용하여 윤활제의 첨가량 및 혼합에 따른 분말의 겉보기 밀도의 변화, 그리고 윤활제의 첨가방법-다이벽 윤활도포(die-wall friction)와 첨가혼합(admixing with

$UO_2$ )에 따른 성형압력/성형밀도 관계를 구하여 분말입자간 마찰 및 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실 등을 조사하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시 료

본실험에 사용된  $UO_2$ 분말은 한국원자력연구소에서 AUC(Ammonium Uranyl Carbonate) 공정으로 제조한 것으로, 분말입자의 형태는 둥근 형태이며, 그 주요 특성은 Table 1에 수록하였다. 윤활제는 zinc stearate(미국 Fisher사 제품)를 사용하였으며, 윤활제 첨가량의 무게 백분율은  $UO_2$ 분말의 잉여 첨가로, 예를 들면, 2wt.% zinc stearate 첨가량은  $UO_2$ 분말 100g에 윤활제 2g을 첨가한 것을 의미한다. 그리고 다이벽 도포윤활은 윤활제를 벤젠으로 용해한 후, 그 용해된 용액을 다이벽 내부에 도포하였다.

Table 1. Main characteristics of KAERI-made  $UO_2$  powder

O/U ratio	2.14
Apparent density	2.21Mg/m <sup>3</sup>
Specific surface area	4.7m <sup>2</sup> /g
Average particle size	23 $\mu$ m
Moisture conten	0.25%

### 2.2 실험조건

혼합은  $UO_2$ 분말에 윤활제를 첨가한 후, 36rpm으로 회전하는 barrel형태의 혼합기에서 수행하였으며, 윤활제 첨가량은 0~4wt.%로 하였고, 혼합시간은 5~60분으로 하였다. 겉보기밀도 측정은 ASTM B213-48에 기술된 기구를 이용하여 수행하였으며 시료량은 각 조건당 600g을 취하였다.

성형은 복동식 유압프레스(프랑스 HB Billaud사 제품으로 다이 내부직경은 14.75mm)에서 수행하였으며 일정한 양(20 $\pm$ 0.1g)이 장입되도록 하였다. 성형압력은 200~500MPa의 구간에서 50MPa씩 증가시켰으며, 성형밀도는 각 조건당 5개의 시료를 취하여 기하학적 방법으로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 윤활제 첨가량과 혼합시간에 따른 참겉보기

### 밀도 변화

분말의 겉보기밀도는 원료분말의 특성 즉, 밀도, 입자형태, 입자크기 및 그 분포, 입자의 비표면적 그리고 외적 조건인 윤활제의 첨가 유무에 의한 분말의 충전 및 배열 방법에 의해 좌우된다<sup>6)</sup>. 그러나 겉보기밀도는 윤활제 첨가량에 관계없이 true packing정도를 알 수 없으므로 보통 참겉보기 밀도(true apparent density)로 나타낸다.  $UO_2$ 분말의 참겉보기밀도에 윤활제가 미치는 효과를  $\Delta D$ 로 표기하였다. 여기서  $\Delta D$ 는 윤활제를 첨가혼합시킨  $UO_2$ 분말의 참겉보기밀도,  $D_0$ 와 윤활제를 첨가하지 않은 즉, 원료분말(virgin powder)의 참겉보기밀도,  $D_1$ 간의 차이로 정의된다.

Fig. 1에 윤활제 첨가량과 혼합시간에 따른  $\Delta D$ 의 결과를 도시하였다. Fig. 1에 도시한 바와 같이, 윤활제 첨가량이 적은 경우에는(약 0.2wt.% 이하), 혼합시간과 윤활제의 첨가량에 증가할수록 positive  $\Delta D$ 의 값은 증가하는 경향을 보여준다. 반면에, 윤활제 첨가량이 많은 경우에는(0.3wt.% 이상), 혼합시간이 짧아질수록 positive  $\Delta D$ 에서 negative  $\Delta D$ 로 급격하게 변하는 경향을 보여주며, 윤활제 첨가량이 2wt.% 이상인 경우에는, 혼합시간을 증가시켜도 negative  $\Delta D$ 의 값을 갖는 경향을 보여준다. 이것은 윤활제 첨가량의 과다 및 혼합시간이 참겉보기밀도에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 즉, 윤활제 첨가량이 적은 경우에는(약 0.2wt.% 이하), 혼합시간 및 윤활제 첨가량이 증가할수록 윤활제가 분말입자에 균일하

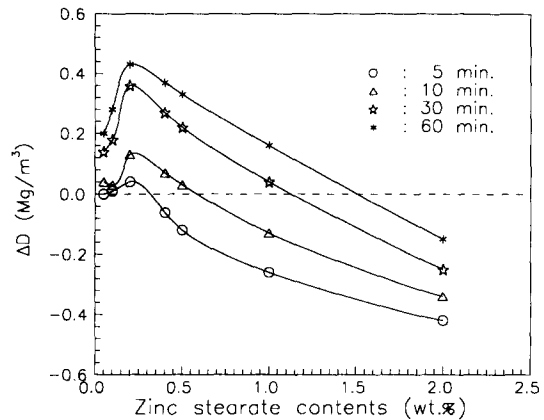


Fig. 1.  $\Delta D$  as a function of zinc stearate contents for  $UO_2$  powder containing admixed zinc stearate.

계 분포되어 분말입자에 박막의 도포층을 형성하여 분말입자간의 마찰을 감소시켜 분말의 충전거동을 양호하게 하기 때문에 참겉보기밀도가 증가되는 것으로 사료된다. 반면에, 윤활제 첨가량이 많을 경우에는(2wt.% 이상), 윤활제 첨가량이 많아질수록 분말입자에 윤활제의 두꺼운 도포층이 형성될 뿐만 아니라 미혼합된 윤활제(free lubricant)가 존재하므로 동일한 부피내에서  $UO_2$  분말의 양이 감소되기 때문에 참겉보기밀도가 감소되는 것으로 사료된다.

### 3.2 윤활방법에 따른 입자간 마찰과 입자/다이벽 마찰

일반적으로 성형체 제조시 실제 가한 압력은 분말입자간 마찰이나 입자/다이벽 마찰에 의해 감소되므로 유효성형압력,  $P_e$ 은 낮은 것으로 알려져 있으며<sup>7,8)</sup>, 동일한 조건하에서 성형하였을 때 윤활제를 첨가혼합한 분말이 윤활제를 첨가하지 않은 분말에 비해 분말의 조밀화(densification)가 증가되거나 감소되는 것은 윤활제의 영향에 의한 것으로 보고되고 있다<sup>3-5)</sup>.  $UO_2$  분말의 성형시, 분말의 조밀화에 윤활제 첨가량이 미치는 효과를 알아보기 위해 분말입자간 마찰과 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실을 조사하고, 이 두 마찰에 의한 손실압력의 크기 관계를 조사하였다. 분말입자간 마찰이나 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실은 윤활방법의 차이를

두고 실험하므로써 구할 수 있다. 즉, 분말입자간 마찰은 다이벽에 윤활제를 도포한 상태에서 윤활제를 첨가혼합하지 않은 조건(die-wall lubricated only)과 윤활제를 첨가혼합한 조건(admixed & die-wall lubricated)에서 각각 성형한 성형체의 진성형밀도 간 차이로부터 구할 수 있으며, 분말입자/다이벽 마찰은 윤활제를 첨가혼합한 상태에서 다이벽 도포를 하지 않은 조건(admixed)과 다이벽 도포를 한 조건(admixed & die-wall lubricated)에서의 진성형밀도의 차이로부터 구할 수 있다. 여기서 진성형밀도로 나타낸 이유는 윤활제 첨가량에 관계없이 true densification을 구하기 위함이며, 진성형밀도는 {성형밀도  $\times$  wt.%  $UO_2$ }/100으로 나타낸다.

#### 3.2.1 입자간 마찰(interparticle friction)

조밀화동안에 분말입자간의 마찰은 윤활제를 첨가한 분말과 첨가하지 않은 분말을 성형한 성형체의 진성형밀도를 상호비교하여 구할 수 있다. 즉, 첨가혼합 및 다이벽 윤활방법을 동시에 사용한 성형방법(조건 ①)과 다이벽 윤활방법에 의한 성형방법(조건 ②)으로 성형한 성형체의 진성형밀도를 성형압력에 따라 상호비교하여 윤활제가 분말입자간 마찰에 대한 미치는 효과를 구하였다. 윤활제 첨가량과 성형압력에 따른 성형체의 진성형밀도를 Table 2에 수록하였다. Table 2에서 보는 바와

Table 2. True Green Density(Mg/m<sup>3</sup>) with Varying Zinc Stearate Contents and Compaction Pressures.

pressure (MPa)	contents (wt.%)	contents (wt.%)										
		0*	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
200	a*	—	4.84	4.89	4.93	4.94	4.98	4.96	4.99	4.89	4.78	4.65
	b***	4.80	5.00	4.99	5.01	5.01	5.03	5.04	5.03	4.93	4.79	4.61
250	a	—	5.14	5.15	5.19	5.18	5.18	5.20	5.18	5.06	4.91	4.75
	b	5.16	5.25	5.25	5.24	5.23	5.24	5.24	5.22	5.08	4.93	4.77
300	a	—	5.39	5.40	5.44	5.43	5.43	5.42	5.41	5.24	5.07	4.91
	b	5.45	5.52	5.52	5.48	5.50	5.50	5.49	5.44	5.27	5.09	4.91
350	a	—	5.63	5.60	5.64	5.63	5.64	5.65	5.59	5.40	5.22	5.03
	b	5.73	5.74	5.75	5.72	5.70	5.71	5.69	5.61	5.40	5.21	5.20
400	a	—	5.80	5.79	5.83	5.80	5.82	5.80	5.74	5.53	5.33	5.11
	b	5.90	5.90	5.90	5.89	5.87	5.87	5.86	5.77	5.53	5.33	5.11
450	a	—	5.90	5.91	5.93	5.92	5.92	5.91	5.83	5.61	5.40	5.16
	b	6.01	6.01	6.01	6.00	5.57	5.96	5.94	5.85	5.61	5.38	5.15
500	a	—	6.06	6.09	6.09	6.09	6.08	6.08	5.99	5.74	5.52	5.42
	b	6.17	6.17	6.15	6.15	6.14	6.13	6.11	6.01	5.75	5.52	5.29

\* ; 0 means the die-wall lubricated only(zero wt.%(condition ②)),

\*\* ; a means the admixed(condition ③),

\*\*\* ; b means the admixed and the die-wall lubricated(condition ①)

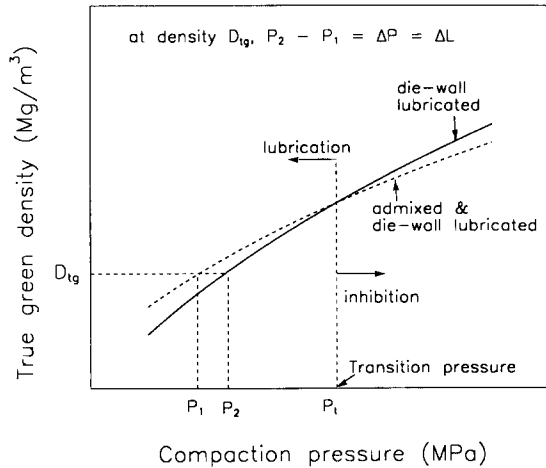


Fig. 2. Schematic representation of lubricant effect,  $\Delta L$  and transition pressure,  $P_t$ .

같이, 성형압력이 증가할수록 윤활제의 첨가 방법에 관계없이 진성형밀도는 증가한다. 그러나 동일한 압력으로 성형할 경우, 적은 윤활제 첨가량과 낮은 성형압력하에서는 조건 ②보다는 조건 ①에서 진성형밀도가 더 증가하는 경향을 보여준다. 반면 윤활제 첨가량이 많아지고 성형압력이 증가하면 조건 ①보다는 조건 ②에서 얻어진 진성형밀도가 더 커지는 경향을 보여준다. Table 2의 실험결과를 근거로 하여 성형압력에 따른 진성형밀도 관계를 Fig. 2에 개략적으로 도시하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 조건 ①과 조건 ②의 방법으로 성형할 경우 동일한 진성형밀도,  $D_{1g}$ 를 얻기 위해 필요한 성형압력을 각각  $P_1$ ,  $P_2$ 라 하면, 입자간 마찰에 의한 압력손실(frictional loss)은  $P_2 - P_1 (= \Delta P)$ 이 된다. 또한, 이것은 분말입자간의 윤활제 효과(lubricant effect),  $\Delta L$ ,로 나타낼 수 있다. 그리고 윤활제 첨가량에 따른 조건 ①의 진성형밀도와 조건 ②의 진성형밀도의 교차점을 천이압력(transition pressure),  $P_t$ 로 나타냈으며, 천이압력 이하에서는 lubrication, 그 압력이상에서는 inhibition으로 정의하였다. Lubrication 및 inhibition은 조밀화의 척도를 나타내는 것으로, 전자는 조밀화 촉진, 후자는 조밀화 방해로 나타낸다. 또한 조밀화를 방해하는 inhibition, 즉, 윤활제가 분말입자간의 공간(void) 속으로 분말대신에 밀려 들어간 양(AOI; amount of influx)을 구하였다.

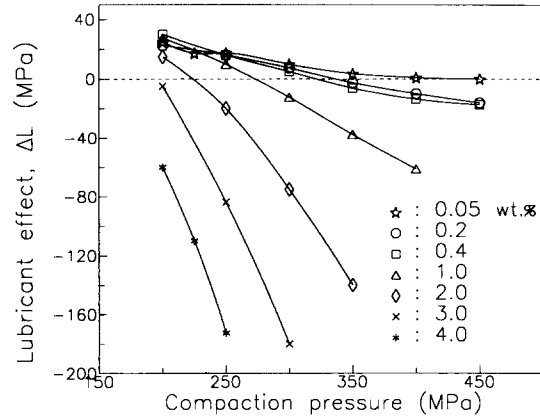


Fig. 3. Lubricant effect( $\Delta L$ ) vs. compaction pressure for compacts containing various amount of zinc stearate contents.

(1) 윤활제 효과(Lubricant effect)

윤활제 효과,  $\Delta L$ 은 분말성형시에 윤활제가 분말입자간의 마찰을 감소시킬 수 있는 정도로 나타내는 것으로 동일한 진성형밀도  $D_{1g}$ 를 얻기 위하여 조건 ②에서 요구되는 성형압력,  $P_2$ 와 조건 ①에서 요구되는 성형압력,  $P_1$ 간의 압력차이,  $\Delta P$ 로 정의하며, 조건 ①과 조건 ②의 성형압력-성형밀도 곡선을 상호비교하므로써 구할 수 있다(Table 2와 Fig. 2참조). Fig. 3은 윤활제 첨가량에 따른  $\Delta L$ 을 성형압력의 함수로 도시한 것으로, 여기서 positive  $\Delta L$ ( $\Delta L > 0$ )과 negative  $\Delta L$ ( $\Delta L < 0$ )은 각각 lubrication과 inhibition을 나타낸다. Fig. 3에 도시한 바와 같이 윤활제 첨가량이 많은 경우에는(1.0wt.% 이상), 성형압력이 증가하여도 윤활제 효과는 양(+의 값에서 음(-)의 값으로 급격하게 저하하며 윤활제 첨가량이 더욱 더 많은 경우에는 양(+의 값에서 음(-)의 값으로 급격하게 저하하며 윤활제 첨가량이 더욱 더 많은 경우에는 성형압력에 관계없이 음의 값을 보여준다. 반면에 윤활제 첨가량이 소량인 경우에는(0.4wt.% 이하), 성형압력 증가에 따라 윤활제 효과는 서서히 음의 값으로 변하는 경향을 보여준다. 바꿔말하면, 윤활제 첨가량이 많을 경우에는 성형압력에 관계없이 분말의 조밀화를 방해하는 inhibition경향이 현저하게 나타나는 반면에, 윤활제 첨가량이 적은 경우에는 낮은 성형압력에서는 lubrication효과가 나타나나 성형압력이 증가하면 inhibition효과가 나타나는 경향을 보여준다. 이

것은 윤활제 효과,  $\Delta L$ (또는  $\Delta P$ )이 성형압력 및 윤활제 첨가량과 밀접한 관계가 있음을 의미한다. 즉, lubrication이 나타나는 구간에서는 낮은 성형압력과 많은 윤활제 첨가량 조건보다는 높은 성형압력과 적은 윤활제 첨가량 조건에서 분말입자간의 마찰로 인한 압력손실이 작음을 알 수 있다.

(2) 천이압력(Transition pressure)

천이압력,  $P_t$ 는 윤활제를 첨가혼합한 분말을 성형할 때 분말입자의 거동이 lubrication에서 inhibition으로 변화하는 점( $\Delta P=0$ )에서의 성형압력이다(Fig. 2참조). 바꿔 말하면, 천이압력은 조건 ①과 조건 ②가 교차하는 점, 즉, 윤활제 효과가 0이 되는 점으로, Table 2와 Fig. 3의 결과로부터 구할 수 있다. Fig. 4에 천이압력을 윤활제 첨가량의 함수로

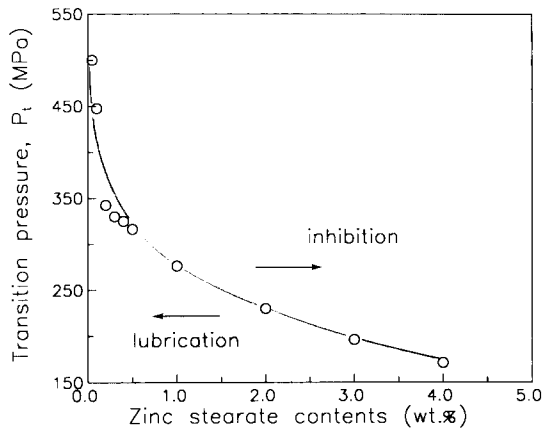


Fig. 4. Transition pressure( $P_t$ ) vs. zinc stearate contents.

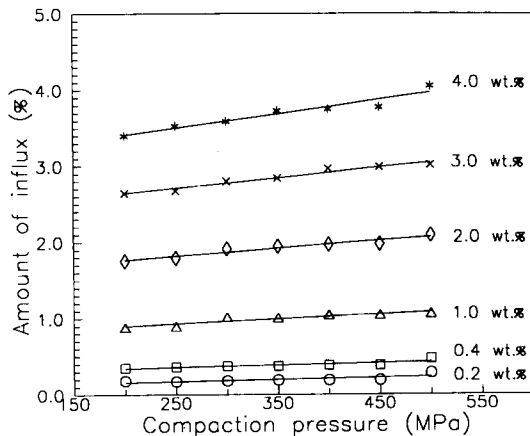


Fig. 5. Amount of lubricant influx to pore with the variation of compaction pressures.

도시하였다. Fig. 4에 도시한 바와 같이 윤활제 첨가량이 증가할수록 천이압력은 감소함을 보여준다. 즉, inhibition은 윤활제 첨가량이 증가할수록 작은 성형압력에서 시작됨을 보여준다. Fig. 4에서 윤활제 첨가량 4wt.%에서의 천이압력은 Fig. 3에서 보듯이 본 실험구간에서 구할 수 없었으므로 Table 2의 실험결과를 근거로 하여 외삽법으로 구하여 나타내었다.

(3) 윤활제의 기공침입량(AOI)

성형체에서의 윤활제의 기공침입량, AOI (amount of influx)는 성형체의 porosity와 true porosity의 차이로 나타낼 수 있다. Porosity는 분말입자간의 공간을 의미하는 것으로 진성형밀도와 이론밀도의 관계로 나타내어진다( $UO_2$ 의 이론밀도는  $10.96Mg/m^3$ ). 즉,

$$porosity(\%) = \frac{\text{이론밀도} - \text{진성형밀도}}{\text{이론밀도}} \times 100$$

그리고 true porosity는 분말입자간의 공간에서 윤활제에 의해 채워진 공간을 뺀 순수한 분말입자간의 공간으로 성형밀도와 혼합물( $UO_2 + \text{zinc stearate}$ )밀도의 관계로 나타낼 수 있다. 혼합물의 밀도는  $UO_2$ 분말에 zinc stearate(이론밀도;  $1.09Mg/m^3$ )의 첨가량에 따른 백분율의 함으로 나타내었다. 따라서 true porosity는

$$True\ porosity(\%) = \frac{[(M/100) \times 10.96 + (N/100) \times 1.09] - \text{성형밀도}}{(M/100) \times 10.96 + (N/100) \times 1.96} \times 100$$

로 정의되며, 여기서 M과 N은 각각  $UO_2$ 와 zinc stearate의 중량백분율이다.

Fig. 5에 윤활제 첨가량에 따른 AOI를 성형압력의 함수로 도시하였다. Fig. 5에 도시한 바와 같이, 윤활제 첨가량이 증가함에 따라 윤활제가  $UO_2$ 분말입자간의 기공속으로의 밀려들어가는 influx양은 증가한다. 또한 윤활제 첨가량이 적은 경우에는 AOI양은 성형압력에 관계없이 거의 일정하나 윤활제 첨가량이 많은 경우에는 AOI양이 성형압력이 따라 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 윤활 첨가량과 성형압력이 증가하면 성형시에 윤활제가 기공속에 우선적으로 밀려 들어가 분말입자들 상호간의 배열이나 접촉을 방해하여 조밀화를 저해하는 것으로 사료된다.

3.2.2 입자/다이벽 마찰 (particle/die-dwall friction)

입자와 다이벽 마찰에 의한 영향은 윤활제

를 첨가 혼합한  $UO_2$ 분말을 다이벽을 도포한 것(조건 ②; admixed & die-wall lubricated) 과 다이벽을 도포하지 않은(조건 ③; admixed) 조건에서 동일한 압력으로 성형하여 이때 나타나는 진성형밀도의 차이로부터 구하였으며, 각각의 조건에서 구한 진성형밀도는 Table 2에 수록하였다.  $UO_2$ 분말에 윤활제를 첨가 혼합한 이유는 성형시에 분말입자간 마찰이나 다른 내부조건 등에 의한 영향을 배제하기 위한 것이다. Table 2에 수록된 바와 같이 조건 ② 및 조건 ③ 모두 성형압력 증가에 따라 진성형밀도는 증가하는 경향을 보여준다. 그러나 동일한 진성형밀도를 얻으려면, 조건 ②보다는 조건 ③에서 좀 더 높은 성형압력이 요구된다. 바꿔 말하면, 이는 다이벽 윤활도포를 하지 않은 경우에 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실이 발생하는 것으로 사료된다.

입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실,  $P_{pd}$ 는 동일한 진성형밀도를 얻기 위하여 조건 ②와 조건 ③에 필요한 성형압력의 차이로부터 구할 수 있다.  $P_{pd}$ 는 분말입자간 마찰 등 내부조건이 동일한 경우 Amonton과 Coulomb의 마찰법칙<sup>9)</sup>으로부터 다음과 같은 관계식으로 유도될 수 있다. 즉,

$$\mu = P_{pd}/P$$

여기서  $P$ 는 성형압력 그리고  $\mu$ 는 마찰의 정도(degree of friction)를 나타낸다. 성형압력과 윤활제 첨가량에 따른  $P_{pd}$ 의 변화를 Fig. 6에 도시하였다(Table 2참조). Fig. 6에 도시한 바와 같이, 윤활제 첨가량이 증가할수록  $P_{pd}$ 는 감소하는 경향을 보여준다. 또한 윤활제 첨가량이 적은 경우 성형압력 증가에 따라  $P_{pd}$ 는 선형적으로 증가하지만 윤활제 첨가량이 많아지게 되면 성형압력에 관계없이  $P_{pd}$ 는 거의 일정함을 보여준다. Fig. 7은 성형압력,  $P$ 와 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실,  $P_{pd}$ 의 선형적인 관계로부터  $dP_{pd}/dP$  즉, 마찰의 정도,  $\mu$ 를 구하여 도시한 것이다. Fig. 7에 도시한 바와 같이, 윤활제 첨가량의 증가에 따라  $dP_{pd}/dP$ 의 값은 감소하는 경향을 보여주며 약 4wt.%의 윤활제 첨가량에서는 거의 0이 된다.  $dP_{pd}/dP \approx 0$ 이라는 의미는 윤활제 첨가량이 많을 경우, 따로 다이벽 윤활도포를 하지

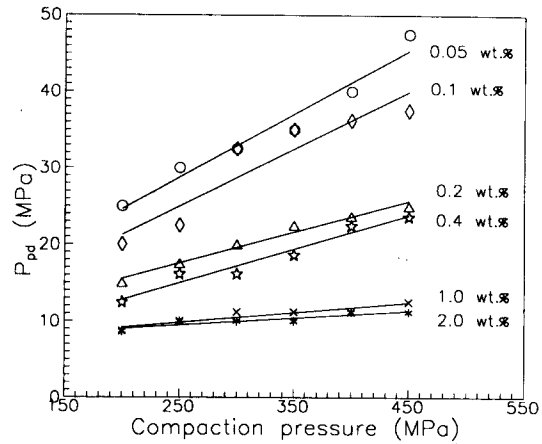


Fig. 6. Effect of compaction pressure on the  $P_{pd}$  for various admixed zinc stearate contents.

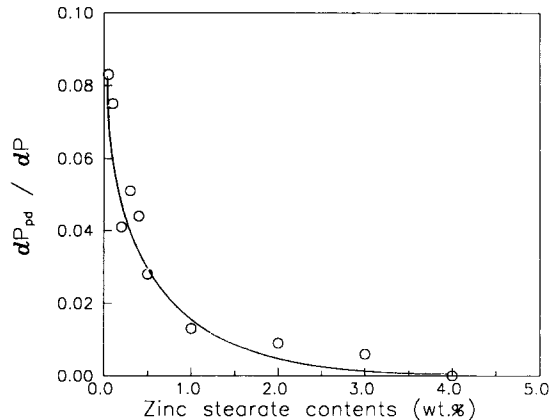


Fig. 7.  $dP_{pd}/dP$  vs. lubricant contents illustrating effect of admixed lubricant on particle/die-wall friction during compaction.

않아도 윤활제가 성형시에 다이벽으로 밀려 나와 다이벽 마찰에 따른 압력손실이 거의 없다는 것을 의미한다. 그러나 성형체 내에서 3wt.% 이상의 윤활제를 첨가하면 다이벽 마찰에 의한 영향은 거의 제거할 수 있으나 입자간 마찰실험결과에서 알 수 있듯이 성형동안에 inhibition을 현저하게 야기시킨다.

### 3.2.3 입자간 마찰과 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실 크기비교

입자간 마찰에 의한 압력손실,  $\Delta P$ (또는  $\Delta L$ )와 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실,  $P_{pd}$ 의 크기 비교는 Table 2, Fig. 3 그리고 Fig. 6으로부터 구할 수 있다. 그 일 예로 성형압력 300MPa하에서 윤활제 첨가량 변화에 따른 lubrication구간에서의 분말입자간 마찰,  $\Delta P$ 와

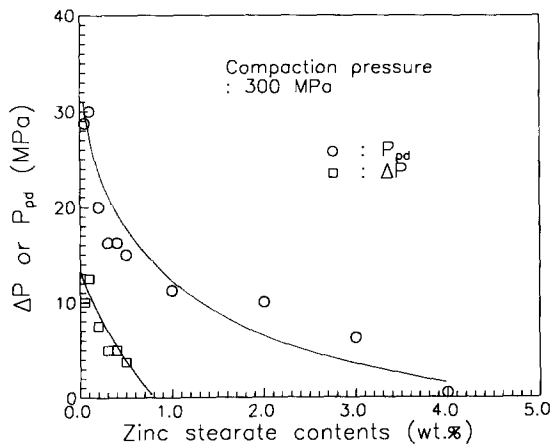


Fig. 8.  $\Delta P$  or  $P_{pd}$  as a function of zinc stearate contents under a compaction pressure of 300MPa.

입자/다이벽간의 마찰,  $P_{pd}$ 를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에 도시한 바와 같이, 동일한 성형압력하에서 윤활제 첨가량에 따라 마찰에 의한 압력손실은 모두 감소하는 경향을 보여준다. 또한, 입자/다이벽 마찰에 의한 압력손실은 분말입자간 마찰에 의한 압력손실 보다 크게 나타났다. 따라서 분말성형시 압력손실을 가능한 한 작게 하기 위해서는 분말입자간 마찰보다는 입자/다이벽 마찰에 의한 영향을 배제하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

- 1) 윤활제를 첨가혼합한  $UO_2$ 분말의 충전거동은 윤활제의  $UO_2$ 분말입자에의 도포층 형성과 미혼합 윤활제의 존재유무에 존재한다.
- 2) 최대 절보기밀도는 최적의 윤활제 첨가량으로 얻어질 수 있으며, 그 크기는 혼합시 간에도 의존한다.
- 3) 최적의 윤활제 첨가량 이상과 높은 성형압력하에서는 윤활제가  $UO_2$ 분말 대신에 기공속으로 우선적으로 밀려 들어가 성형시 inhibition을 야기한다.
- 4) 입자/다이벽 마찰이 성형동안에 유효성형압력을 줄이는 가장 큰 요소로 나타났다.

이것은 윤활제 첨가량을 많이 첨가하면(3~4wt.%) 최소화할 수 있지만 동시에 성형시 바람직하지 않은 inhibition을 야기시킨다.

#### 참 고 문 헌

1. M. J. F. Notley, "General Aspects of CANDU Fuel Element Performance during Normal Operation", CRNL-2494-1(1983)
2. A. J. Flipot and A. Smolders, "Lubrication Method for Rotary-Press Tools", Powder Metallurgy, 12(24), 305-315(1969)
3. M. Ward and J. C. Billington, "Effect of Zinc Stearate on Apparent density, Mixing and Compaction/ejection of Iron Powder Compacts", Powder Metallurgy, (4) 201-208(1979)
4. J. C. Billington, L. W. Crane, H. C. Child and J. T. Barnby, Powder Metallurgy, "PM Research in Academic Institutions; University of Aston in Birmingham", 26(1), 45-54 (1983)
5. D. Yarnton and T. J. Davies, "The Effect of Lubrication on the Pressing of Metal Powder Compacts", (11), 1-22(1963)
6. Joel S. Hirschhorn, Introduction to Powder Metallurgy,
7. D. Yarnton and T. J. Davies, "The Effect of Lubrication on the Compaction and Sintering of Iron Powder Compacts", International Journal of Powder Metallurgy, 8(2), 51-67(1972)
8. A. J. Flipot and A. Smolders, "Die Wall Lubrication with Zinc Behenate Coated Polystyrene Balls", Powder Metallurgy International, 2(4), 124-126(1970)
9. G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 2nd Edition, p.561, McGraw-Hill Book Company, 1976