

입상체 압축이론식의 응용

김현수 · 박방삼 · 이준웅

국방과학연구소
(1991년 9월 6일 접수, 1992년 2월 10일 채택)

Application of the Theoretical Compression Equation in the Flocculated Granules

Hyoun-soo Kim, Bang-sam Park and Jun-wung Lee

Agency for Defense Development
(Received 6 September 1991; accepted 10 February 1992)

요 약

고분자 결합제를 사용하여 분체상 물질을 피복-응집된 입상체를 압축하는 경우, 실질적인 압축의 시작점을 granule volume으로 간주하여 유도한 입상체 압축이론식의 응용에 관한 연구를 수행하였다. 압축이론식과 실제의 실험결과는 결합제의 종류, 입상체 크기, 입도분포, 시편직경에 대한 초기 입상체층의 높이비, 압축속도 등의 변화에 관계없이 서로 잘 일치하였고, 압축이론식의 상수 C_m 과 granule porosity는 같은 값으로 나타났다.

Abstract—In situations where granules flocculated with polymeric binders were compressed, the applicability of the theoretical compression equation, which was previously derived considering the granule volume as the real starting point of the bed compression, was tested. The experimental results and the theoretical compression equation showed good agreement over the whole range of experimental conditions; variation of the type of binder, granule size, size distribution, L_0/D ratio and compression rate and the compression constant C_m was shown to be the same value as granule porosity.

1. 서 론

분체의 압축행태(compression behavior)는 여러 독립 기구(mechanism)-입자의 재배열, 입자간 가교구조 형성, 소성변형, 탄성변형, 정진기에 의한 인력, van der Waals force에 의한 인력, 기계적 상호결합(mechanical interlocking), 입자의 파괴 등-들이 서로 중복되어 일어남은 물론, 압축이 진행되는 동안 계속해서 변화하기 때문에 동특성 규명이 극히 어렵다고 하겠는데, 주로 분체에 가해주는 압력과 분체부피(또는 밀도)간의 상관관계로부터 분체의 압축과정을 분류하고자 하는 연

구가 수행되었고, 이를 수학적으로 표현한 많은 압축 실험식들이 제시되었다.

그러나, 고분자 결합제로 분체상 물질을 피복-응집시킨 입상체의 경우, 입상체의 점탄성(visco-elastic)특성으로 인해 일반적인 분체의 압축의 경우와는 상이하나, 이에 대한 연구는 특수 의약품 제조, 복합화약의 압축 성형[1] 등 극히 제한된 분야에서 연구가 수행되고 있다.

분체의 압축특성을 규명하기 위해 압력에 대한 밀도의 상관관계를 표시한 많은 압축실험식(또는 경험식)들 중에서, 넓은 범위의 압력 조건에서 가장 유용하게 사

용되는 실험식은 Heckel 식[2,3]과 Kawakita 식[4,5]이라 할 수 있다. Heckel은 금속 분말의 압축과정이 1차 화학반응과 유사하다고 보고 분체에 가해지는 압력에 대한 상대밀도를 1차식으로 표현하였다. 그러나, 압축 과정의 초기단계(낮은 압력 범위)에서는 입자의 파괴 및 그에 따른 입자의 재배열에 의한 압축이 지배적이므로 Heckel 식에서 제시한 선형성이 성립되지 않는다[6]. 또한, Kawakita식은 결정성 분말의 압축해석에는 유용하나, 점탄성을 갖는 입상체의 압축해석에는 적용이 어려운 것으로 보고된 바 있다[7].

따라서, 고분자를 결합제로 사용하여 분체상의 고풍약을 피복-응집시킨 입상체의 압축특성을 규명하기 위해, 김 등[7]은 Mohr의 응력원을 이용하여, 실제의 압축개시점을 granule volume으로 간주한 압축이론식을 유도한 바 있으며, Viton-A를 결합제로 사용하여 분체상의 고풍약을 피복-응집시킨 입상체를 시료로 사용하여 압축이론식의 타당성을 입증한 바 있다.

본 연구에서는 결합제의 종류, 입상체의 크기 및 입도분포, 시편 직경에 대한 초기 입상체층의 높이 변화, 압축속도 등의 실험결과를 비교분석하여 압축이론식의 타당성 및 응용가능성을 검토하고자 하였다.

2. 이론적 배경

고분자 물질을 결합제로 사용하여 분체상 물질을 피복-응집시켜 제조한 입상체를 압축하는 경우, 입상체의 점탄성으로 인해 금속, 무기재료, 유기화합물 등 일반적인 분체의 압축과는 상이한 결과를 나타낸다. 즉, 결정성 또는 미세입자 형태의 화합물로서 분체자체의 공극(micro pore)이 존재하지 않는 물질을 압축하는 경우에는 압축초기부터 상당한 힘이 필요하며 따라서 압축 과정은 압축의 시작점을 bulk volume으로 간주한 압축식으로 해석이 가능하다. 그러나, 점탄성을 갖는 입상체의 경우에는 bulk volume에서 granule volume까지 압축되는 동안에는 힘이 거의 소모되지 않으므로, 일반적인 압축식으로는 압축과정의 해석이 불가능하다. 따라서, 김 등[7]은 고분자 결합제를 함유한 입상체의 압축특성 해석에 적합한 압축이론식을 유도하였는데, Mohr의 응력원(Mohr's stress circle)을 이용하여 압축시 입상체 내에 작용하는 응력의 상태를 기하학적인 방법으로 표현하였으며, 입상체층의 상단에 가해지는 힘, 즉 주응력의 변화에 따른 내부 마찰각의 변화의 상관관계를 (1)식과 같이 유도하였다.

$$\delta\phi = \frac{\sqrt{K}}{1+K} \frac{d\sigma_A}{\sigma_A} \quad (1)$$

그리고, 내부마찰각의 변화량 $\delta\phi$ 는 $-dn/(n^2 P)$ 에 비례한다고 가정하고, 실질적인 압축의 시작점을 granule volume으로 간주하여 (2)식과 같은 압축식을 유도하였다.

$$C_g = 1 - \frac{V}{V_g} = \frac{C_m b P}{1 + b P} \quad (2)$$

여기서, 압력이 무한대로 커지면, 분체층의 부피(V)는 진부피(V_i)가 되므로

$$C_g|_{P \rightarrow \infty} = 1 - \frac{V_i}{V_g} = n_g \quad (3)$$

$$\frac{C_m b P}{1 + b P} \Big|_{P \rightarrow \infty} = C_m \quad (4)$$

즉, 압축이론식의 상수 C_m 은 granule porosity, n_g 와 같은 값이 된다.

그리고, (2)식은 다음과 같이 P/C_g 와 P 간에 직선관계를 갖는 식으로 표현할 수 있는데, 이 식은 P/C_g 와 P 간의 선형회귀분석에 의해 상수 C_m 과 b 를 구하는데 사용된다.

$$\frac{P}{C_g} = \frac{1}{C_m b} + \frac{1}{C_m} P \quad (5)$$

3. 실험장치 및 방법

압축성형용 고풍약 입상체는 Filler-R과 Estane, Filler-R과 Viton-A를 각각 중량비 95:5 비율로 water slurry방법[8]에 의해 제조하였고, 압축성형용 inert simulant는 CaCO_3 와 PE를 중량비 90:10 비율로 emulsion 공정[9]에 의해 제조하였다.

결합제로 사용된 PE(polyethylene)는 분자량 8000 정도의 저밀도 PE으로서 유화가 용이한 oxidized homopolymer이다.

또한, Estane은 polyester가 주성분인 soft block과 MDI(P,P'-diphenyl methane diisocyanate)가 주성분인 hard block의 결합체로 구성된 polyurethane계열의 고분자 물질[10]이다. Estane은 선상 고분자로 유연성 및 탄력성이 좋아 PBX(Plastic Bonded Explosive)의 결합체로 많이 이용되고 있다[11].

Viton-A는 vinylidene fluoride와 hexafluoropropylene의 공중합체로서, 높은 온도와 용매에 대한 저항성이 뛰어나고 유연성이 좋아 PBX결합체로 널리 이용되고 있다[12].

제조된 CaCO_3/PE (이하 IP로 표시함), Filler-R/Es-

Table 1. Physical properties of granules

Sample	d_o	d_{tap}	d_g	n_g	d_t
IP original	0.953	1.063	1.033	0.553	2.314
IP # 16/20	0.917	0.985	1.142	0.507	2.313
IP # 25/30	0.928	1.025	1.263	0.454	2.314
IP # 40/50	0.952	1.024	1.440	0.378	2.314
RV original	0.856	0.885	1.341	0.258	1.810
RV # 8/12	0.801	0.859	1.282	0.292	1.810
RV # 16/20	0.840	0.866	1.371	0.243	1.810
RV # 30/40	0.856	0.936	1.378	0.239	1.811
RE original	0.844	0.885	1.176	0.332	1.760
RE # 8/12	0.745	0.756	1.208	0.313	1.760
RE # 16/20	0.821	0.845	1.243	0.294	1.761
RE # 30/40	0.853	0.889	1.329	0.245	1.760

d_o =bulk density, d_{tap} =tap density, d_g =granule density, n_g =granule porosity, d_t =true density

tane(이하 RE로 표시함), Filler-R/Viton-A(이하 RV로 표시함) 입상체의 입도분석은 습식체분석장치(Gilson Wet-Vacuum System)로 수행하였는데, 평균입경은 각각 620, 1059, 1062마이크론이다.

이들을 입상체 크기에 따른 압축특성을 실험하기 위해 IP의 경우 평균입경이 1015, 650, 358 마이크론이 되도록 체분급하였고, RE와 RV는 평균입경이 2030, 1015, 505 마이크론이 되도록 체분급하였다.

분급한 입상체들의 bulk density와 tap density는 bulk densitometer[13]를 사용하여 측정하였고, granule density와 porosity는 pore sizer(Micromeritics, model 93 05)로 측정하였으며, true density는 air pycnometer(Beckman, model 930)를 사용하여 측정하였다. 이들의 측정 결과를 Table 1에 수록하였다.

실험장치는 압축장치 및 제어장치 그리고 실시간 자료수집장치(real-time data acquisition system) 등으로 구성되어 있으며, 장치계의 개략도는 참고문헌[6]에 수록되어 있다.

압축실험에 사용할 입상체는 제조직후 건조로에서 60℃로 2-3일간 수분함량이 0.05% 이하로 될 때까지 건조시키고 완전밀봉하여 보관한 다음, 압축실험전 수분 영향을 배제하기 위하여 진공oven에서 60℃로 2시간 정도 다시 건조시킨 후 항습조에서 방치하여 상온으로 유지시킨 다음 시료로 사용하였다.

압축금형은 내경이 10 mm인 mold를 제작하여 사용하였으며, 표준조건에서의 시료의 양은 chemical balance(Mettler, H31AR)를 사용하여 $1.5 \pm 0.001g$ 씩 정량하여 실험을 수행하였고, 압축속도는 1 mm/min으로 하였다.

그리고, 시편 직경에 대한 초기 입상체층의 높이(L_0

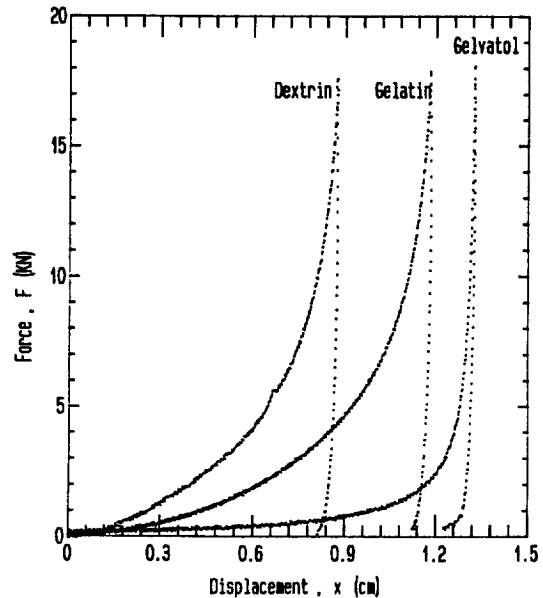


Fig. 1. Actual F-x traces of compression for Gelatin, Gelvatol, Dextrin powders.

/D) 비의 영향 실험에서는 시료의 양을 1g, 1.5g, 1.7g, 2g으로 변화시켰으며, 압축속도의 영향 실험에서는 0.5 mm/min, 1 mm/min, 2 mm/min으로 압축속도를 변화시켜 실험을 수행하였다.

시료와 금형벽면과의 마찰에 의한 압력손실을 최소로 줄여서 압축시편 내부의 밀도분포 변화를 최소화하기 위해 top ram과 금형벽면에 윤활제로서 CCl_4 에 magnesium stearate를 1 wt% 분산시킨 용액[14]을 도포하여 실험을 수행하였다.

AD converter에 의해 digital 신호로 변환되어 전압단 위(V)로 computer에 입력된 data는 "Rdata" program [15]에 의해 압력 및 높이단위로 환산시켰으며, 결과의 통계처리 및 그래프 작성은 STSC사의 "STATGRAPHICS" software[16]를 이용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 결합제 및 입상체 크기의 영향

미세입자형태의 유기화합물인 Gelatin, Gelvatol, Dextrin분말의 경우, 시료에 가해진 힘(F)에 대한 압축물 높이변화(x)의 상관관계는 Fig. 1과 같다. 이들은 collagen, starch 등에서 추출한 물질로 의약품 제조시 원료 또는 계면활성제로 사용된다. 그림으로부터 알 수 있듯이 이들은 압축초기부터 밀도증대를 위해서는 상당한 힘이 소요됨을 알 수 있다. 이들 시료의 압력변화에 따른

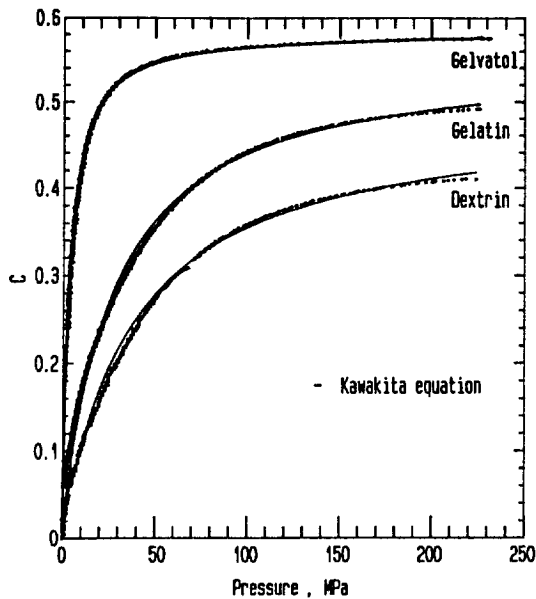


Fig. 2. Compression diagram for Gelatin, Gelvatol, Dextrin, and Kawakita equation.

축용도의 관계를 도식하면 Fig. 2와 같은데, 실험 data들과 Kawakita식은 서로 잘 일치됨을 알 수 있다.

김 등[7]은 입자가 결정형태인 유기화합물인 NaCl, Na_2CO_3 , Na_2SO_3 분말의 압축실험결과에서도 압축초기부터 분체층의 높이 변화 즉, 밀도증대를 위해서는 상당한 힘이 필요한 것으로 발표한 바 있다.

결국, 결정성 또는 미세입자형태의 유기화합물로서, 분체자체의 기공(micro pore)이 존재하지 않는 물질을 압축하는 경우에는 압축초기부터 상당한 힘이 필요하며, 따라서 압축과정은 압축의 시작점을 bulk volume으로 간주한 Kawakita식으로 해석이 가능함을 알 수 있다.

그러나 압축초기부터 상당한 힘이 소요되는 결정성 분말의 경우와는 대조적으로, 결합제를 사용하여 분말을 피복-응집시킨 입상체를 압축하는 경우 특이한 현상은 입상체층의 높이가 특정높이만큼 압축되는 동안에는 거의 힘이 소요되지 않는다는 것이다.

Estane을 결합제로 사용하여 Filler-R을 피복-응집시킨 RE입상체를 체번호 8/12로 분급시켜 시료로 사용하여 실험한 결과, 가해진 힘에 대한 입상체층의 높이 변화의 상관관계는 Fig. 3과 같다. 압축초기에는 힘이 거의 소요되지 않다가 1 cm 정도 높이가 변한 다음 힘이 증가되는데, 이 때의 입상체층의 높이를 밀도단위로 환산하면 1.21g/cc로서 해당입상체의 granule density와 같은 값이다. 따라서 RE입상체 역시 실질적인 압축의 시작점은 granule density부터인 것으로 간주할 수 있다.

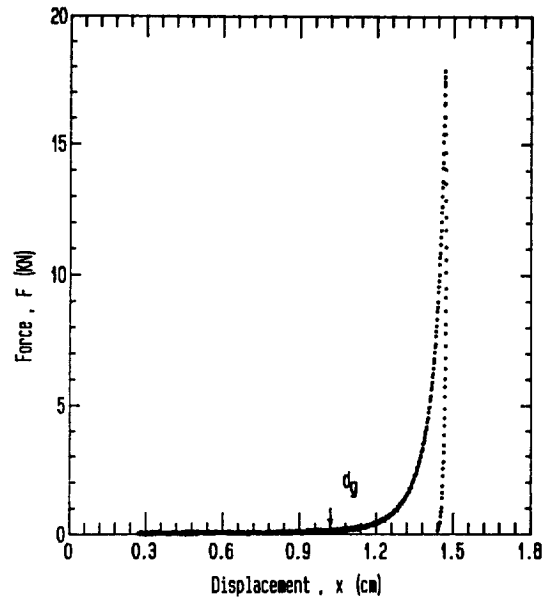


Fig. 3. Actual F-x traces of compression for Filler-R/Estane granules(# 8/12 sieve cut).

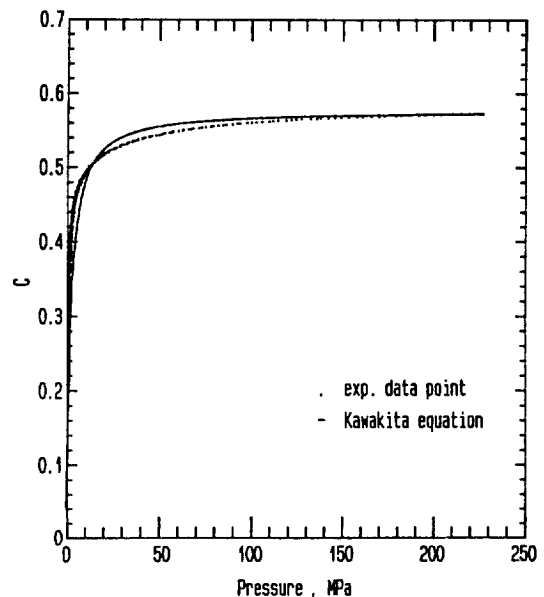


Fig. 4. Compression diagram for Filler-R/Estane granules and Kawakita equation(# 8/12 sieve cut).

상기 실험결과를 압력 대 축용도(C, degree of volume reduction)의 관계로 도식하면 Fig. 4와 같은데 이를 압축의 시작점을 bulk volume으로 간주한 Kawakita식의 도식 결과(그림의 실선)와 비교하면 큰 차이를 나

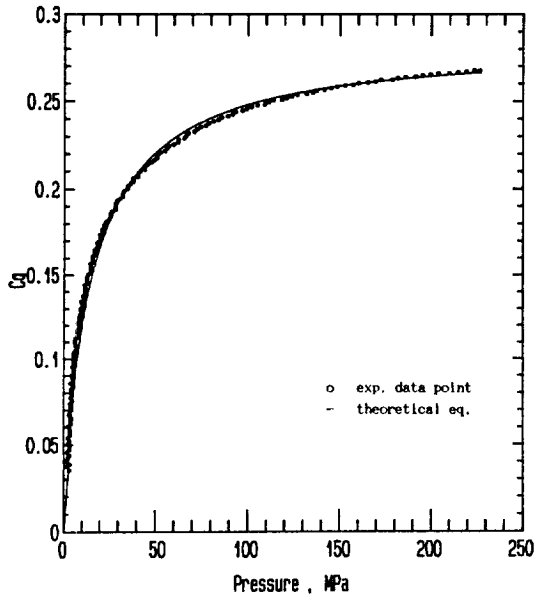


Fig. 5. Compression diagram for Filler-R/Estane granules and theoretical compression equation(# 8/12 sieve cut).

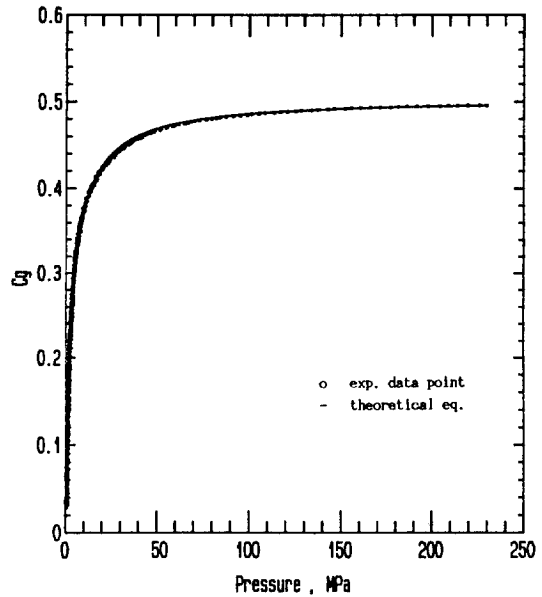


Fig. 7. Compression diagram for CaCO_3/PE granules and theoretical compression equation(# 16/20 sieve cut).

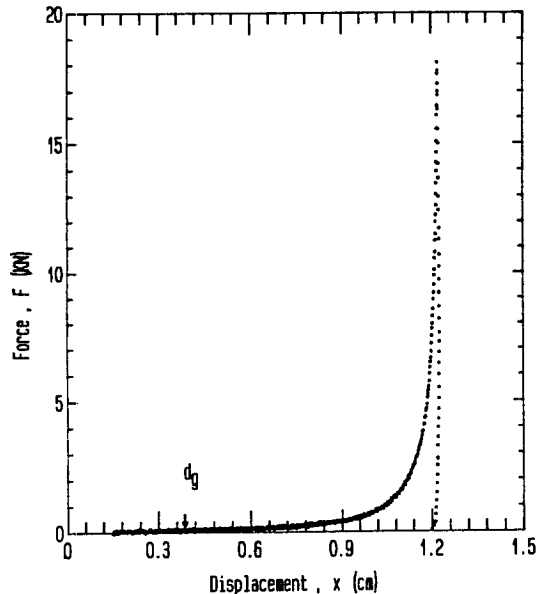


Fig. 6. Actual F-x traces of compression for CaCO_3/PE granules(# 16/20 sieve cut).

타냄을 알 수 있다. 그러나, 상기 결과를 압력변화에 대한 입상체 축용도(C_v , degree of volume reduction from granule volume)의 상관관계로 나타내어 실제의

Table 2. Compression constants C_m and b

Sample	n_g^*	C_m	b
IP original	0.553	0.551	0.283
IP # 16/20	0.507	0.504	0.272
IP # 25/30	0.454	0.452	0.173
IP # 40/50	0.378	0.376	0.075
RV original	0.258	0.265	0.030
RV # 8/12	0.292	0.293	0.042
RV # 16/20	0.243	0.248	0.022
RV # 30/40	0.239	0.241	0.019
RE original	0.332	0.340	0.104
RE # 8/12	0.313	0.324	0.094
RE # 16/20	0.294	0.298	0.077
RE # 30/40	0.245	0.248	0.038

*granule porosity measured with pore sizer

압축시작점을 granule volume으로 간주하고 유도한 압축이론식과 함께 도시하면 Fig. 5에 나타난 것처럼 서로 잘 일치됨을 알 수 있다.

그리고, RE입상체를 체번호 16/20, 30/40으로 분급한 시료의 경우에도 입자크기에 관계없이 상기 결과와 동일한 결론을 얻을 수 있다.

결합제로 polyethylene을 사용하여 CaCO_3 를 피복-응집시킨 IP입상체의 경우 역시, 실질적인 압축의 시작점은 granule density임이 확인되었고(Fig. 6), 입상체

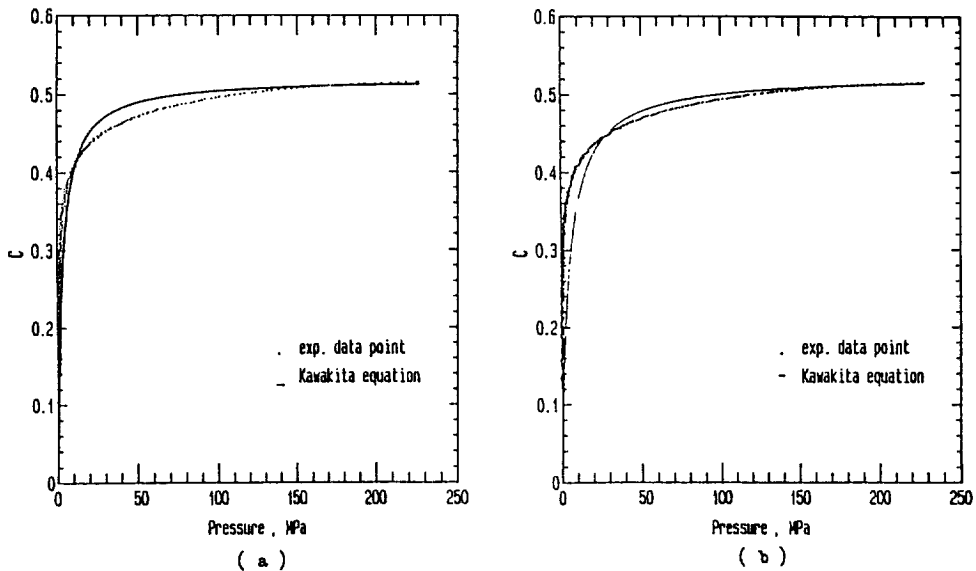


Fig. 8. Compression diagram for Filler-R/Viton-A granules and Kawakita equation (a) $L_0/D=1.5$, (b) $L_0/D=3.0$ (# 16/20 sieve cut).

크기 및 입도분포에 관계없이 실험결과를 압축이론식과 서로 잘 일치하는 것으로 나타났는데, 대표적으로 체 번호 16/20으로 분급한 IP 입상체의 실험결과를 압축이론식과 함께 Fig. 7에 도시하였다.

한편, 상기 시료에 대한 실험결과로부터 선형회귀분석에 의해 구한 압축식의 상수값을 Table 2에 수록하였다. 상수 C_m 은 granule porosity, n_k 와 같은 값이어야 하는데, Table 2의 C_m 값과 n_k 값은 거의 일치하므로 압축이론식의 타당성을 입증한다고 하겠다. 그리고 입상체크기가 감소할수록 b 는 감소하는데, 상수 b 는 입상체의 부착력, 입상체형상 등과 밀접한 관계가 되므로 입상체크기만을 관련지어 해석하는 것은 큰 의미가 없으며, 상수 b 와 관련된 영향인자에 대한 연구가 앞으로의 과제이다.

4-2. L_0/D 비의 영향

Kawakita식과 비교하여 2절에서 유도한 압축이론식의 장점은 시료량의 변화에 따른 영향을 배제할 수 있다는 점이다. Kawakita식을 사용하여 분체의 압축과정을 해석할 경우 압축금형의 직경에 대한 최초시료층의 높이비(L_0/D ratio), 즉 시료의 최초부피(V_0)는 매우 중요한 변수로 작용한다. 왜냐하면 Kawakita식은 압축의 시작점을 분체의 bulk volume으로 간주하여, 압력 변화에 따른 축용도 $[C=(V_0-V)/V_0]$ 의 관계로 압축과정을 해석한 것이기 때문에 V_0 의 변화폭에 따라 축용도

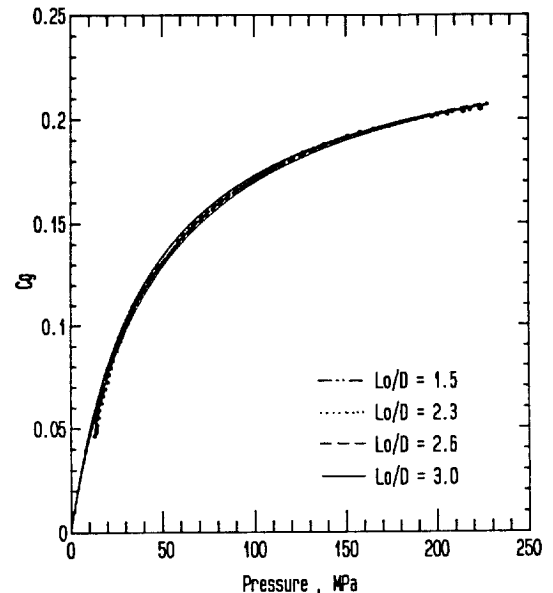


Fig. 9. Compression diagram for Filler-R/Viton-A granules and theoretical compression equation with different L_0/D ratio (# 16/20 sieve cut).

또한 크게 변한다. 따라서 L_0/D 비의 변화는 큰 의미를 갖는다고 할 수 있다.

Fig. 8a와 8b는 RV입상체를 체번호 16/20으로 분급

Table 3. Compression constants C_m and b for different L_0/D ratio

Sample	L_0/D	n_g	C_m	b
RV	1.5	0.243	0.244	0.024
RV	2.3	0.243	0.248	0.022
RV	2.6	0.243	0.248	0.022
RV	3.0	0.243	0.249	0.021
RE	1.5	0.294	0.299	0.078
RE	2.3	0.294	0.298	0.077
RE	3.1	0.294	0.297	0.077

sample size; #16/20 sieve cut, L_0 =initial bed height, D =diameter of die, 10 mm

시킨 시료를 각각 1g($L_0/D=1.5$), 2g($L_0/D=3.0$) 사용하여 압축실험을 수행한 결과를 압력변화에 따른 축용도(C)의 관계로 도시한 것이고 실선으로 표시된 것은 Kawakita식을 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 L_0/D 비에 따라 Kawakita식이 크게 달라짐을 알 수 있고, 압축초기를 비교하면 L_0/D 비가 클수록 실험결과와 Kawakita식간에는 큰 격차가 있음을 알 수 있다.

그러나, 압축의 시작점을 granule volume으로 간주한 압축이론식을 사용할 경우 시료의 초기부피변화, 즉 L_0/D 비의 영향은 배제할 수 있게 된다. Fig. 9는 RV입상체를 체번호 16/20으로 분급시킨 시료를 각각 1g($L_0/D=1.5$), 1.5g($L_0/D=2.3$), 1.7g($L_0/D=2.6$), 2g($L_0/D=3.0$)씩 사용하여 압축실험을 수행한 결과로부터 압축이론식의 상수를 구하고 이들을 $L_0/D=2.3$ 일 때의 실험 data와 함께 압력변화에 따른 입상체 축용도 [$C_g = (V_g - V)/V_g$]의 관계로 도시한 것이다. 그림에 나타난 것처럼 L_0/D 비 변화에 관계없이 실험결과와 압축이론식은 서로 일치됨을 알 수 있다.

그리고, RE입상체의 경우에도 역시 L_0/D 비의 변화에 관계없이 실험결과와 압축이론식은 잘 일치됨을 알 수 있다.

한편, 상기 실험결과로부터 선형회귀분석에 의해 구한 압축식의 상수값을 Table 3에 수록하였다. RV, RE입상체 공히 L_0/D 비의 변화에 관계없이 C_m 과 n_g 는 거의 일치함을 알 수 있다.

4-3. 압축속도의 영향

분체에 순간적으로 원하는 최대압까지 압력을 가한 후 최대압을 유지한 상태에서 정체시간(dwelling time)을 갖는 단동식 유압 프레스 공정의 경우, 일정시간까지는 정체시간이 길수록 압축밀도는 증가된다[17].

그런데, 압축속도를 조절하여 분체에 가해지는 압력을 서서히 증가시켜 원하는 최대압까지 압력을 가하는 본 실험의 경우, 압축속도는 단동식 유압 프레스 공정에

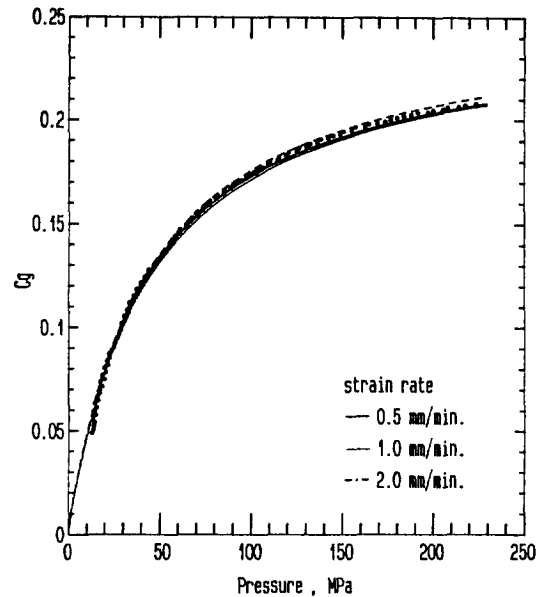


Fig. 10. Compression diagram for Filler-R/Viton-A granules and theoretical compression equation with different strain rate(# 16/20 sieve cut).

서의 정체시간과 같은 효과를 나타낸다고 볼 수 있다. 즉, 압축속도가 느릴수록 최대압에 도달할 때까지의 정체시간은 길어지며, 또한 입자들 사이에 갇혀진 공기가 제거될 수 있는 기회는 더 많아진다. 일반적인 압축실험의 경우, 최종압축시편 높이의 1/10 정도의 거리를 1분간 움직이는 속도를 최적압축속도로 간주하는데, 본 연구에서는 최종압축시편의 높이가 9-11 mm 이므로 압축속도는 0.5, 1.0, 2.0 mm/min으로 변화시켜 압축속도의 영향 실험을 수행하였다. 압축속도가 0.5 mm/min인 경우 압축밀도는 이론최대밀도의 98% 이상이 되므로 그 이하의 압축속도실험은 의미가 없으며, 실험장치상 2 mm/min 이상에서 조절할 수 있는 압축속도는 5 mm/min인데, 이 속도로 제조된 압축시편은 압축강도가 너무 낮아 제품으로서의 가치가 없으므로 본 실험의 범위에서 배제시켰다.

Fig. 10에 RV 입상체를 체번호 16/20으로 분급시킨 시료를 1.5 g씩 사용하여 압축속도를 변화시켜 실험을 수행한 결과로부터 압축식의 상수값을 구한 다음, 이를 표준작업조건(1 mm/min)에서의 실험결과와 함께 도시하였는데, 압축속도의 변화에 관계없이 실험결과와 압축식은 서로 일치되어, 본 실험의 범위 내에서는 압축속도의 영향을 배제할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 압축속도가 가장 빠른 2 mm/min의 경우에도 전체 압축시간은 6-7분이 되므로 밀도증대 및 갇힌 공

Table 4. Compression constants C_m and b for different strain rate

Sample	Strain rate	n_g	C_m	b
IP	0.5 mm/min	0.507	0.507	0.251
IP	1.0 mm/min	0.507	0.504	0.272
IP	2.0 mm/min	0.507	0.504	0.285
RV	0.5 mm/min	0.243	0.251	0.023
RV	1.0 mm/min	0.243	0.248	0.022
RV	2.0 mm/min	0.243	0.247	0.023
RE	0.5 mm/min	0.294	0.300	0.075
RE	1.0 mm/min	0.294	0.298	0.077
RE	2.0 mm/min	0.294	0.295	0.076

sample size; #16/20 sieve cut

기의 제거에 필요한 충분한 정체시간을 부여할 수 있는데 기인하는 것으로 판단된다.

상기 실험결과로부터 선형회귀분석에 의해 구한 압축식의 상수값을 Table 4에 수록하였는데, RV, RE, IP입상체 공히 압축속도의 변화에 관계없이 상수 C_m 과 granule porosity(n_g)는 거의 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

고분자 결합제로 피복-응집된 입상체를 압축하는 경우 입상체의 점탄성 특성에 의해 bulk volume에서 granule volume까지 압축되는 동안에는 힘이 거의 소요되지 않음이 확인되었고, 따라서 실질적인 압축의 시작점을 granule volume으로 간주하여 유도한 입상체 압축이론식과 실제의 실험결과는 결합제 종류(Viton-A, Estane, Polyethylene), 입상체 크기, 입도분포, L_0/D 비, 압축속도 등의 변화에 관계없이 서로 잘 일치하였으며, 압축이론식의 상수 C_m 과 granule porosity는 같은 값으로 나타났다.

NOMENCLATURE

- b : constant of theoretical compression equation
 C : degree of volume reduction, $(V_0 - V)/V_0$
 C_g : degree of volume reduction from granule volume, $(V_g - V)/V_g$
 C_m : constant of theoretical compression equation
 D : diameter of mold die [cm]
 d : density under pressure P [g/cc]
 d_0 : bulk density [g/cc]
 d_g : granule density [g/cc]
 d_t : true density [g/cc]

- K : Rankine coefficient
 k : constant, $\sqrt{K/m(1+K)}$ [MPa⁻¹]
 L_0 : initial height of granular bed [cm]
 n : porosity under pressure P
 n_0 : bulk(initial) porosity
 n_g : granule porosity
 P : pressure [MPa]
 V : powder volume under pressure P [cc]
 V_0 : bulk(initial) volume [cc]
 V_g : granule volume [cc]
 V_t : true volume [cc]
 σ_A : major principal stress [MPa]
 ϕ : angle of internal friction

REFERENCES

- Kim, H. S., Park, B. S. and Lee, J. W.: "Study on the Compaction Characteristics of Molding Powder", AWHD-519-88060, ADD(1988).
- Heckel, R. W.: *Trans. Metal, Soc. of AIME*, **221**, 671 (1961).
- Heckel, R. W.: *Trans. Metal, Soc. of AIME*, **221**, 1001(1961).
- Lüdde, K. H. and Kawakita, K.: *Pharmazie*, **7**, 393 (1966).
- Kawakita, K. and Tsutsumi, Y.: *Japan J. Appl. Phys.*, **35**, 260(1966).
- Kim, H. S., Park, B. S. and Lee, J. W.: *HWAHAK KONGHAK*, **27**(3), 268(1989).
- Kim, H. S., Park, B. S. and Lee, J. W.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**(1), 70(1992).
- Kim, H. S., Lee, K. J. and Kim, H. S.: "Study on the Improving Process of Molding Powder, DXD-51 and DXD-52", AWHD-519-89039C, ADD(1989).
- Reams, C. S.: "Potential Composition A-3 Explosive Replacement", NWS(1981).
- Goodrich, B. F. W.: "Estane Product Data", TSR 64-18, TF-116(1985).
- Johnson, H. D.: "An Investigation of the Effect of Granule Size on the Mechanical Properties of LX-14", MHSMP(1979).
- MacDougall, C. S.: "Compositional Analysis of Viton Used in Explosive", MHSMP(1975).
- MIL-STD-650: "Explosive: Sampling, Inspection and Testing", Method no. 201.2(1962).
- Fukumori, Y. and Carsten, J. T.: *Int. J. Pharm. Tech. and Prod. Mfr.*, **4**, 1(1983).
- Kim, H. S., Kim, S. H. and Park, B. S.: "Develop-

- ment of the Real-time Data Acquisition System for Molding Powder Compressibility Evaluation", AWHD-519-88061, ADD(1988).
16. STSC: "Statgraphics; Statistical Graphics System", A Plus Ware Product(1985).
17. Park, B. S., Kang, H. B. and Lee, J. W.: "Pressing Studies of DXD-51", AWHD-519-87057, ADD(1987).