

## 고분자 결합제를 함유한 입상체의 압축특성 II. 입상체층 내의 Intragranular Stress 와 압축밀도간의 상관관계

김현수·박방삼·이준웅

국방과학연구소  
(1989년 5월 22일 접수, 1989년 12월 29일 채택)

### Compression Characteristics of the Flocculated Granule with Polymeric Binders

#### Part II. Correlation between Intragranular Stress and Compacted Density in the Granular Bed

Hyoun-Soo Kim, Bang-Sam Park and Jun-Wung Lee

Agency for Defense Development  
(Received 22 May 1989; accepted 29 December 1989)

## 요 약

고분자 물질을 결합제로 사용하여 고형충전물을 피복-응집시킨 입상체를 압축할 때, 입상체층 내의 intragranular stress, 입자-벽면간의 마찰, 압축밀도간의 상관관계를 규명하였다.

입상체층 상단에 가해진 압력과 하단에 전달된 압력간에는 선형관계가 성립되었고, 압축밀도에 대한 입상체크기와 입도분포의 영향은 결합제의 특성에 의해 결정되었다.

**Abstract**—When the flocculated granule with polymeric binders were compressed, correlations for intragranular stress, particle-wall friction, and %TMD in the granular bed has been investigated.

The relation between the applied pressure and the transmitted pressure was linear over the entire applied pressure range for all of the samples. The effect of the granule size and distribution on the compacted density was dominated largely due to the binder characteristics.

## 1. 서 론

압축성형 공정의 궁극적 목적은 분체상 물질의 공극률을 감소시켜 원하는 압축밀도와 기계적 강도를 갖도록 하는데 있다. 분체의 압축특성에 관한 연구는 분말 금속, 촉매제조, 요업 및 의약품 제조분야 등에서 많은 연구가 이루어지고 있으나 입상체(granule)의 압축특성연구는 특수약품 제조, 고폭약의 압축성형 등 극히 제한된 분야에서 연구가 이루어지고 있다.

분체의 압축행태(compression behavior)는 여러 독립기구(mechanism)들이 서로 중복되어 일어남은 물론, 압축이 진행되는 동안 계속해서 변화하기 때문에 동특성 규명이 극히 어렵다고 하겠는데, 주로 분체에 가해주는 압력과 분체부피(또는 밀도)와의 상관관계로부터 분체의 압축과정을 분류하고자 하는 연구가 수행되었다.

Heckel[1, 2]은 금속분말을 시료로 사용하여 압력과 밀도간의 상관관계를 규명함은 물론 금속분말의 압축과

정을 압축초기에 입자들의 재배열에 의한 밀도증대 단계를 거쳐서 소성 및 탄성변형 (plastic and elastic deformation)에 의한 밀도증대 단계로 분류한 바 있다. Nyström, York 등[3-6]은 유기화합물을 시료로 사용하여 Heckel 실험식을 이용, 분체의 압축과정을 압축 초기입자의 파괴에 의한 밀도 증대, 둘째 소성 및 탄성변형, 마지막 단계를 탄성복원 단계로 구분하였고, 또한 Heckel 도표를 사용하여 서로 유사한 압축행태를 갖는 물질들의 분류를 시도하였다.

그러나, 서로 다른 크기를 갖는 분체의 압축특성을 서로 비교하는데 있어서 문제점은 실험조건이나 실험방법, 또는 금형의 제원에 따라 Heckel 도표 자체가 크게 달라진다는 점이다. Hersey와 Rees[7]는 서로 다른 크기의 NaCl을 시료로 지름이 12mm 인 압축금형을 사용하여 최대압 50MPa 까지 압축실험하여 Heckel 방정식으로 도식한 결과 입자크기에 따라 서로 다른 형태의 비선형곡선을 나타낸다고 보고하였으며, Hersey, Bayraktar, Shotton[8]는 동일시료로 33mm 압축금형을 사용하여 60MPa 까지 압축한 결과, 입자크기에 관계없이 형태가 같은 선형으로 나타난다고 보고한 바 있다. 또한 York[9]는 Microfine cellulose를 시료로 직경이 10mm 인 압축금형을 사용할 경우 입자가 클수록 압축밀도는 증가되고, 직경이 45mm 인 압축금형을 사용할 경우 입자크기에 관계없이 압축밀도는 일정하며, 해압 후 압축밀도를 측정할 경우 입자가 작을수록 압축밀도는 보다 커진다고 보고하였다.

이와 같이, 비록 가해주는 압력이 같을지라도 시료에 따라 또는 입자의 크기에 따라 압축정도가 서로 달라지는 것은 분체의 공극률, 분체의 입체적 구조, 입자크기에 대 압축금형크기 비, 분체자체의 기계적 특성치 등에 따라 intragranular stress, 또는 시료와 금형벽면과의 마찰정도가 달라지기 때문이다. 따라서, 입자크기에 따른 압축정도를 비교 분석하기 위해서는 상기 영향들을 모두 고려한 intragranular stress 개념[10-13]을 도입할 필요가 있다.

본 연구에서는 결정성 고분자 물질인 폴리에틸렌과 고무성질을 띤 폴리우레탄계열의 고분자 물질인 Estane, Viton-A를 결합제(binder)로 사용하여, 고형충전물(solid filler)을 피복-응집시켜 생성된 입상체의 압축실험을 수행하여, 결합제의 성질 및 입상체의 크기, 입도분포 등에 따른 intragranular stress와 압축밀도(또는 %TMD: theoretical maximum density)간의 상관관계를 규명코자 하였다.

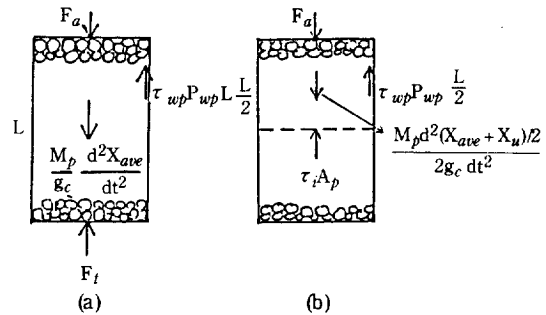


Fig. 1. Free-body diagram showing the force balance in the compression process.

## 2. Intragranular stress

입상체 형태로 된 1차 및 2차화약(primary and secondary explosive), 추진제, 연소제 등의 압축특성에 관한 연구는 폭발현상 및 탄도주기(ballistic cycle)의 해석과 설계를 위해 매우 중요하다. 특히 입상체 추진제 내의 intragranular stress와 입자-벽면간의 마찰력은 추진제 연소과정 연구를 위한 이론적 modeling에 있어서 중요한 변수로 작용한다[11, 12].

Intragranular stress는 입상체층(granular bed) 내에서 고체입자간의 단위 단면적당 가해지는 압축력(compression force)으로 정의된다.

입상체층 내에서 입상체간의 단면적,  $A_p$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$A_p = A(1-n) \quad (1)$$

또한, 임의의 압력(또는 시간)에서 입상체층의 평균공극률,  $n_{ave}$ 는

$$\begin{aligned} n_{ave} &= 1 - \frac{V_t}{V} \\ &= 1 - \frac{L_o(1-n_o)A}{LA} \\ &= 1 - \frac{L_o(1-n_o)}{L} \end{aligned} \quad (2)$$

로 표현된다.

Fig. 1(a)에서 압축속도(또는 strain rate)가 일정하면 가속도는 무시할 수 있으므로, 전체 입상체층에 대해 힘 수지식을 취하면

$$\tau_{wp}P_{wp} = \frac{F_a - F_t}{L} \quad (3)$$

한편, Fig. 1(b)와 같이 전체 입상체층의 중간지점에서 힘 수지식을 취하면

$$F_a - \tau_i A_p - \tau_{wp} P_{wp} \frac{L}{2} = 0 \quad (4)$$

(1), (3)식을 (4)식에 대입한 후 정리하면, 전체 입상체층의 중간지점에서의 intragranular stress는

$$\tau_i = \frac{F_a - \tau_{wp} P_{wp} L/2}{A(1 - n_{ave})} = \frac{F_a + F_t}{2A(1 - n_{ave})} \quad (5)$$

와 같이 유도된다. 따라서 입상체층 상단에 가해진 힘 ( $F_a$ )과 하단에 전달된 힘 ( $F_t$ )을 연속적으로 측정하고, 입상체층의 높이변화로부터 (2)식을 사용 입상체층의 공극률( $n_{ave}$ )이 환산되면 (5)식에 의해 일정 압축밀도를 갖는데 필요한 intragranular stress가 계산된다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3-1. 시료 준비

압축성형용 고복약 입상체는 Filler-R과 Estane, Filler-R과 Viton-A를 각각 중량비 95:5 비율로 water slurry 방법[14]에 의해 제조하였고, 원료 Filler-R의 크기는 Class-A(평균입경 200마이크론)와 Class-E(평균입경 30마이크론)를 중량비 3:1로 고정하였다. 그리고  $\text{CaCO}_3$ 와 PE를 중량비 90:10 비율로 에멀전공정[15, 16]에 의해 제조하였다.

결합제로 사용된 PE(polyethylene)는 분자량 8000 정도의 저밀도 PE으로서 유화가 용이한 산소함유 단 중합체인데, 결정성 고분자이다.

또한, Estane은 폴리에스테르가 주성분인 연질블록과 MDI(P, P'-diphenyl methane diisocyanate)가 주성분인 경질블록의 결합제로 구성된 폴리우레탄계열의 고분자 물질이다. Estane은 선상 고분자로 유연성 및 탄력성이 좋아 PBX(Plastic Bonded Explosive)의 결합제로 많이 이용되고 있다[17].

Viton-A는 vinylidene fluoride와 hexafluoropropylene의 공중합체로서, 높은 온도와 용매에 대한 저항성이 뛰어나고 유연성이 좋아 PBX 결합제로 널리 이용되고 있다[18].

제조된  $\text{CaCO}_3$ /PE(이하 IP로 표시함), Filler-R/Estane(이하 RE로 표시함), Filler-R/Viton-A(이하 RV로 표시함) 입상체의 입도분석은 습식체분석장치(Gilson Wet-Vacuum System)로 수행하였는데, 각각의 평균입경은 620, 1059, 1062마이크론이다.

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

Table 1. Physical properties of granules

Sample	$d_b$	$n_0$	TMD	%TMD <sub>0</sub>
IP original	0.953	0.588	2.314	41.2
IP #16/20	0.917	0.603	2.314	39.7
IP #25/30	0.928	0.599	2.314	40.1
IP #40/50	0.952	0.588	2.314	41.2
RV original	0.856	0.527	1.810	47.3
RV #8/12	0.801	0.557	1.810	44.3
RV #16/20	0.840	0.536	1.810	46.4
RV #30/40	0.856	0.527	1.810	47.3
RE original	0.844	0.520	1.760	48.0
RE #8/12	0.745	0.576	1.760	42.4
RE #16/20	0.821	0.534	1.760	46.6
RE #30/40	0.853	0.513	1.760	48.7

note:  $d_b$  = bulk density

$n_0$  = initial porosity

TMD = theoretical maximum density

%TMD<sub>0</sub> = %TMD at  $\tau_i = 0$

1015, 505마이크론이 되도록 체분급하였다.

분급한 입상체들의 겉보기 밀도는 bulk densitometer[19]를 사용하여 측정하였고, TMD는 (6)식에 의해 계산하였다. 이들의 측정결과를 Table 1에 수록하였다.

$$\text{TMD} = \frac{\sum m_i}{\sum (m_i/d_i)} \quad (6)$$

압축실험에 사용할 입상체는 제조 직후 건조로에서 60°C로 2-3일간 수분함량이 0.05% 이하로 될 때까지 건조시킨 후, 1.5±0.001g씩 정량하여 실험을 수행하였으며, 윤활제로는  $\text{CCl}_4$ 에 magnesium stearate를 1wt% 분산시킨 용액[20]을 사용하였다.

#### 3-2. 압축실험장치

실험장치는 압축장치 및 제어장치(control part) 그리고 실시간 자료 수집장치(real-time data acquisition system) 등으로 구성되어 있다[21].

압축장치계의 상세도는 Fig. 2와 같다. Load cell 위에 내경이 10mm인 mold와 ram이 놓여지며 top press platen과 top ram 사이에는 level adjuster가 놓여진다. 다공층의 변위는 extensometer에 의하여 감지되고 extensometer의 좌우 움직임을 방지하기 위하여 guide pin을 설치하였다.

Fig. 2의 압축금형 설치상태는 다공층의 벽면에 의한 마찰손실을 제외하고 다공층 하단에 전달된 힘( $F_t$ )을 측정하기 위한 구조(attachment[9])이며, 전체에 가해지는 힘( $F_a$ )을 측정할 경우에는 attachment 없이

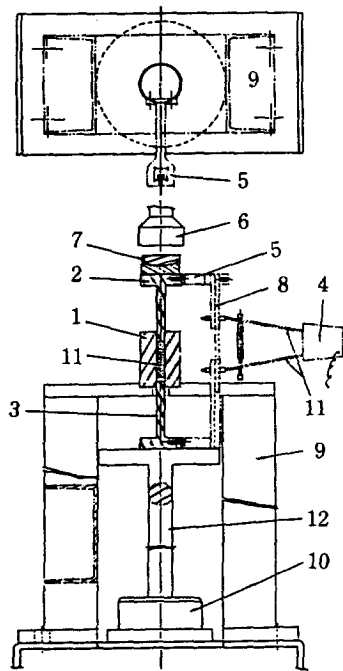


Fig. 2. Compression mold and ram configuration.

- |                                     |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| 1. Mold                             | 2. Top ram      |
| 3. Bottom ram                       | 4. Extensometer |
| 5. Extensometer holder              |                 |
| 6. Top press platen                 |                 |
| 7. Level adjuster                   | 8. Guide pin    |
| 9. Attachment for $P_t$ measurement |                 |
| 10. Load cell                       | 11. Powder bed  |
| 12. Adaptor fixture                 |                 |

짧은 길이의 bottom ram 위에 mold 가 놓여지며 압축금형 전체가 직접 load cell에 놓여지게 된다.

PCLAB real-time software를 이용하여 BASIC 언어로 작성한 실시간 자료 수집 장치의 흐름도는 Fig. 3과 같다. 장치는 Instron, A/D board, external trigger, external clock, IBM PC로 구성되는데 Instron(model 1193)은 constant strain mode로 사용하였고, A/D board는 Data Translation사의 DT-2801 board로서 IBM PC와 호환성이 있는 12 bit converter인데 0-10 volt의 unipolar 구간에서 0.024% resolution을 갖는다.

측정하고자 하는 신호는 압력(CHNL #0), 변위(CHNL #1) 및 압축개시 기준점을 지시하여 주는 position detector의 신호(CHNL #2)로 구분할 수 있다. Load cell에 의해 감지된 압력신호는 load cell amplifier와 buffer amplifier를 거쳐 A/D board로 입력되고, extensometer에 의해 감지된 변위신호는 strain data amplifier와 buffer amplifier를 거쳐 A/D board로 입력된다. Photo electric switch를 이용한 position detector의 신호는 CHNL #2 회로를 통해 A/D board로 입력된다.

입력된 신호는 internal 또는 external triggering 신호에 의하여 A/D 변환을 CHNL 별로 순차적으로 개시하게 되며 이 때 데이터 입력시간 간격은 internal 또는 external clock에 의하여 지정한 값에 따라 결

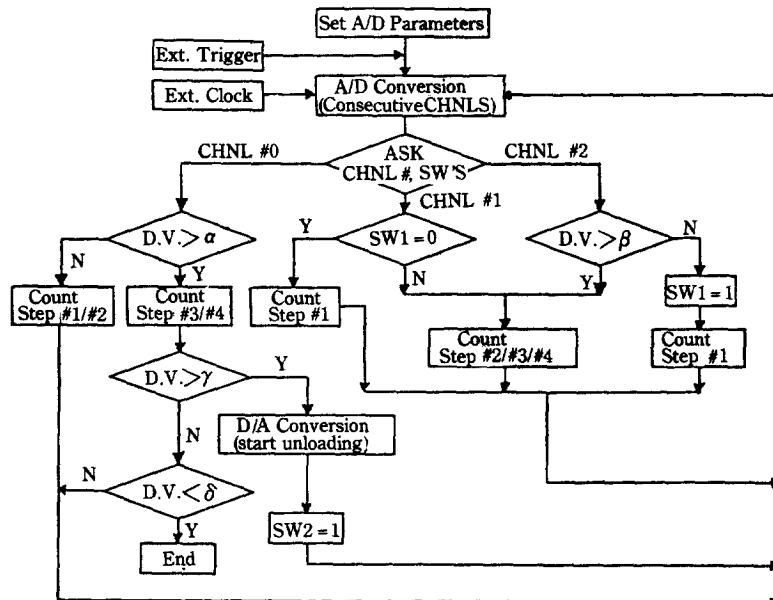


Fig. 3. General flow diagram of INCOM.

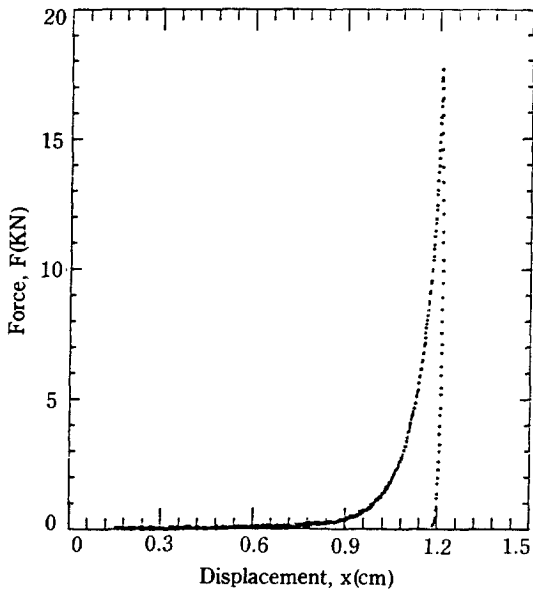


Fig. 4. Typical F-x trace of compression of the flocculated granule with polymeric binder.

정된다. 이 때 컴퓨터는 프로그램 "INCOM"[21]에 의하여 A/D 변환치를 압력단계별로 구분하며, 미리 설정하여 놓은 최대압력치에 도달하게 되면 D/A 신호를 relay driver로 보내어 압축방향을 반전시키게 되며 압력치가 특정치 이하에 도달하면 A/D 변환을 멈춤으로서 실험이 종결된다. 전체 압축과정을 통해서 입상체 상단에 가해진 힘에 대한 입상체층의 높이 변화과정의 대표적인 예를 Fig. 4에 도시하였는데, 이와 같이 입력된 신호( $F_a$ ,  $x$ )는 "RDATA" 프로그램[21]에 의해 압력(MPa)과 압축밀도(g/cc) 단위로 환산된다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

고체입자층에 압력을 가할 때, 고체입자와 금형벽면 간의 마찰에 의한 압력손실이 발생하므로 고체입자층에 가한 압력( $P_a$ , applied pressure)과 고체입자층의 하단에 전달된 압력( $P_t$ , transmitted pressure)간에는 큰 차이가 있다. IP, RE, RV 입상체의 가압과 전달 압력의 상관관계를 Fig. 5-7에 도시하였다. 가압과 전달압간에는 시료의 성질, 입상체의 크기, 입도분포에 관계없이 선형관계가 성립함을 알 수 있는데, 이들의 선형회귀 분석결과를 Table 2에 수록하였다. 여기서 IP와 RE 입상체는 상단에 가해진 압력의 약 80% 정도가 하단에 전달되는데 반해, RV 입상체의 경우 약

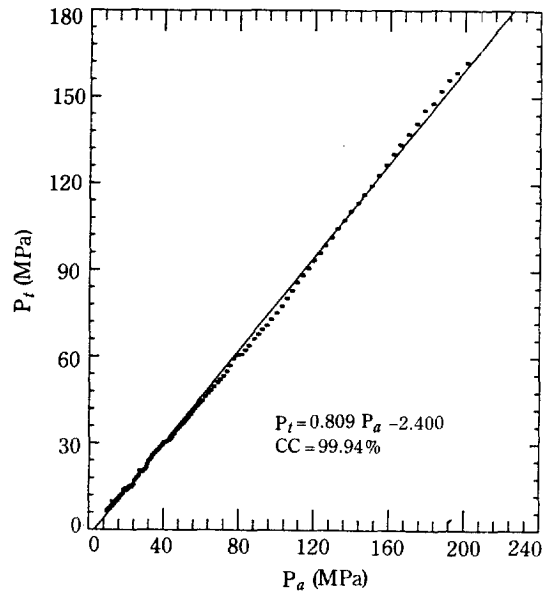


Fig. 5. Transmitted pressure vs. applied pressure for compacted calcium carbonate/PE granules (raw size).

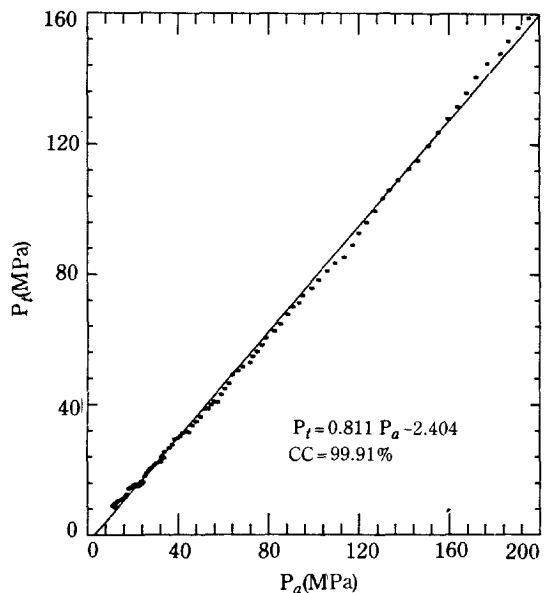


Fig. 6. Transmitted pressure vs. applied pressure for compacted Filler-R/Estane granules (raw size).

60% 정도만 전달되어 입상체와 금형벽면과의 마찰에 의한 압력손실이 훨씬 큼을 알 수 있는데, 이는 Viton-A로 피복-응집된 입상체의 연성 및 점착성에 기인하는 것으로 판단된다.

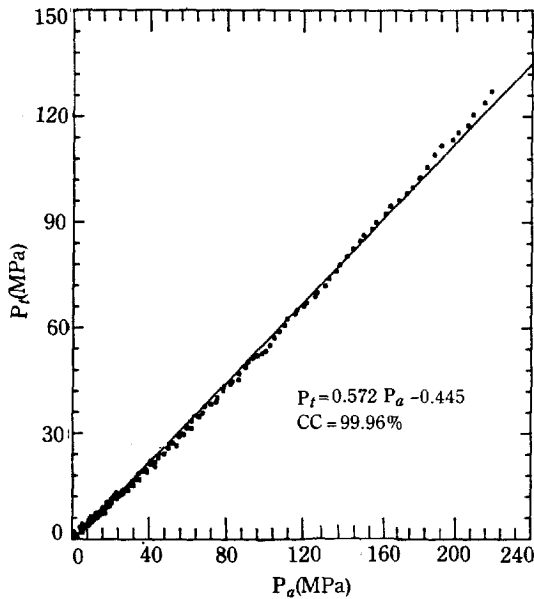


Fig. 7. Transmitted pressure vs. applied pressure for compacted Filler-R/Viton-A granules (raw size).

Table 2. Regression analysis for  $P_a$  vs  $P_t$

Sample	Result	$r^*$
IP original	$P_t = 0.809 P_a - 2.400$	99.94%
IP #16/20	$P_t = 0.792 P_a - 1.168$	99.97%
IP #25/30	$P_t = 0.790 P_a - 0.929$	99.96%
IP #40/50	$P_t = 0.806 P_a - 0.073$	99.99%
RV original	$P_t = 0.572 P_a - 0.445$	99.96%
RV # 8/12	$P_t = 0.570 P_a - 0.792$	99.94%
RV #16/20	$P_t = 0.565 P_a - 0.590$	99.91%
RV #30/40	$P_t = 0.606 P_a - 0.453$	99.93%
RE original	$P_t = 0.811 P_a - 2.404$	99.91%
RE # 8/12	$P_t = 0.768 P_a - 1.121$	99.93%
RE #16/20	$P_t = 0.820 P_a - 1.345$	99.95%
RE #30/40	$P_t = 0.817 P_a - 0.279$	99.96%

\* $r$ : correlation coefficient

한편, Heckel 식을 사용한 압축과정 해석방법은 고체입자층에 가해지는 압력( $P_a$ )에 대한 압축밀도간의 상관관계를 표현한 것인데 비해,  $P_a$  대신 고체입자층 내에서 고체입자에만 전달된 압력, 즉 intragranular stress와 %TMD(또는, relative density)간의 상관관계를 도식하면 IP 입상체의 경우 Fig. 8과 같다.

본체의 공극률, 입체적 구조, 입도분포, 입자크기 대 금형크기 비, 분체자체의 기계적 특성치 등에 따라 비록 동일한 압력을 가할지라도 intragranular stress는

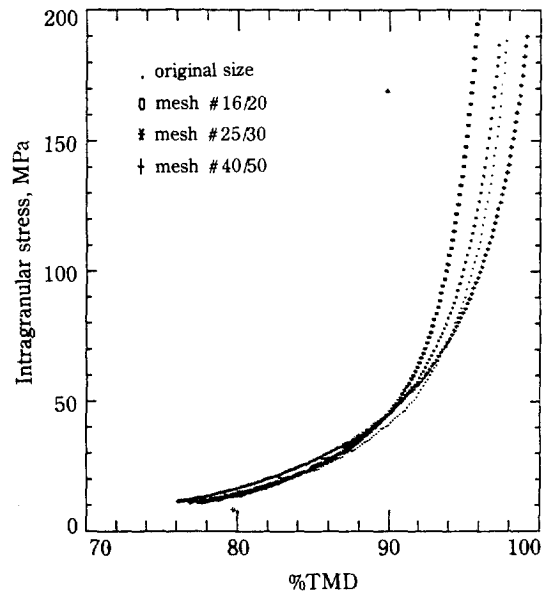


Fig. 8. Intragranular stress vs. %TMD for compacted  $\text{CaCO}_3/\text{PE}$  granules.

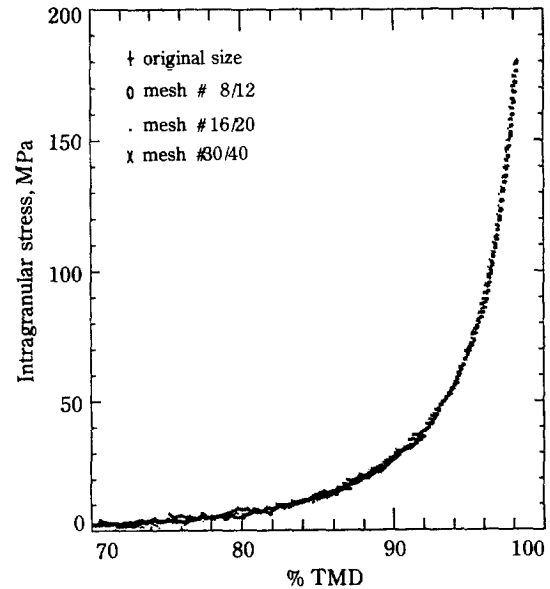


Fig. 9. Intragranular stress vs. %TMD for compacted Filler-R/Estane granules.

서로 달라지는데, IP의 경우 입상체 크기가 작을수록 원하는 %TMD에 도달하는데 필요한 intragranular stress는 작아짐을 알 수 있다. 그리고 평균입경은 같으나 입도분포가 서로 다른 두 시료의 경우(분급하지 않은 시료와 체번호 25/30으로 분급한 시료), 원하

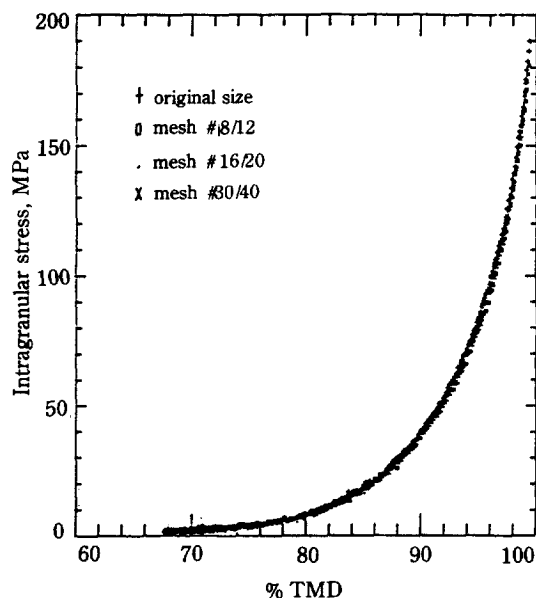


Fig. 10. Intragranular stress vs. %TMD for compacted Filler-R/Viton-A granules.

는 %TMD에 도달하는데 필요한 intragranular stress는 거의 비슷한 것으로 나타났다.

한편, RE 및 RV 입상체의 경우를 Fig. 9, 10에 도시하였는데 입상체 크기 및 입도분포에 관계없이 원하는 %TMD까지 압축시키기 위해 필요한 intragranular stress는 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 동일한 압력을 가한다면 입상체 크기에 관계없이 압축밀도는 같아짐을 의미한다.

이와 같이 입상체 제조시 사용한 결합제에 따라 압축 행태가 달라지는 현상은 결합제의 특성에 기인하는 것으로, 이는 일반 분체의 압축행태와는 크게 상이한 점이다. 일반적인 분체 압축의 경우 압축밀도에 대한 입자 크기의 영향은 시료가 주로 어떤 압축기구(compression mechanism)에 의해 압밀이 진행되는가에 따라 결정되는데[7], 소성변형에 의해 압밀이 진행되는 물질(예: NaCl)은 입자 크기가 작을수록 초기 충전밀도가 크며 시료에 가해지는 압력이 증가하여도 압축밀도는 초기의 차이만큼을 유지한 상태로 계속 증가되는 반면, 입자의 파괴에 의해 압밀이 진행되는 물질(예: sucrose, lactose)은 입자의 크기가 작을수록 초기 충전밀도는 크지만 시료에 가해지는 압력이 증가되면 큰 입자들이 파괴되어 크기가 같아지므로 일정 압력 이상에서는 시료의 최초 크기에 관계없이 압축밀도는 동일하게 된다. 그러나 Fig. 8-10으로부터 알 수 있듯이 고

Table 3. Compression parameters for RV, RE granules [21]

Sample	K (MPa <sup>-2</sup> )	D <sub>A</sub>
RV original	1.280E-2	0.815
RV # 8/12	1.411E-2	0.808
RV #16/20	1.311E-2	0.817
RV #30/40	1.335E-2	0.811
RE original	8.029E-3	0.915
RE # 8/12	7.807E-3	0.917
RE #16/20	7.952E-3	0.915
RE #30/40	8.012E-3	0.912

분자 결합제를 사용하여 고형 충전물을 피복-응집시킨 입상체의 경우에는 압축밀도에 대한 입자 크기의 영향은 시료의 압축기구에 따라 결정되는 것이 아니라(실제 IP, RE, RV 입상체들은 주로 소성변형에 의해 압밀이 진행됨[21]) 결합제의 특성에 따라 결정된다. 즉, IP 제조시 결합제로 사용한 PE는 결정성 고분자이므로 입상체들은 압축이 진행되는 동안 서로 응집하기보다는 각각의 단위입상체 상태로 존재하려는 성질이 강하기 때문에 압축밀도는 입상체 크기의 영향을 받게 되어 크기가 작을수록 압축밀도는 증가하지만, RE와 RV 입상체의 경우에는 결합제로 사용된 Estane과 Viton-A의 고무성질 때문에 일정 압력 이상이 되면 입상체는 각각의 단위입상체 상태로 존재하는 것이 아니라 하나의 덩어리로 합쳐지게 되어 입상체 크기의 영향은 없어지는 것으로 판단된다.

한편, RE와 RV 입상체의 압축과정을 비교하면 TMD의 96%까지 압축되는 동안에는 RE 입상체가 RV 입상체보다 낮은  $\tau_c$ 로 압축이 진행되지만, 그 이상 압축시키는데는 오히려 RV 입상체의 경우가 훨씬 낮은  $\tau_c$ 값을 나타냈음은 물론, 특히 RE 입상체는 TMD의 98.5% 이상은 압밀이 진행되지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Heckel의 압축 파라미터[1, 2]로 설명할 수 있는데, RE와 RV 입상체의 압축 파라미터들을 실험에 의해 구한 값[21]들을 Table 3에 수록하였다. 여기서, D<sub>A</sub>는 입상체의 초기 충전밀도 및 입상체들간에 결합(bonding)이 일어나기 전 입자들의 재배열에 의한 밀도증대를 의미하며, K는 변형능력(total deformation ability)을 의미하는데 K 값의 역수는 물질의 항복강도(yield strength)에 비례한다. Table 3으로부터 D<sub>A</sub>값은 RE 입상체가 더 큰 반면 K값은 RV 입상체가 더 큰 것으로 나타나, 압축초기에는 RE 입상체의 압축이 초기 충전밀도 및 입자의 재배열에 의

한 압밀효과가 뛰어나 낮은 압력에서도 높은 % TMD를 나타내지만, 압축이 진행될수록 K 값이 큰, 즉 변형능력이 뛰어난 RV 입상체의 압축이 보다 쉽게 진행됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

1. 입상체층 상단에 가해지는 압력과 하단에 전달되는 압력간에는 선형관계가 성립한다.
2. 고분자 결합제를 함유한 입상체를 압축하는 경우 압축밀도에 대한 입상체크기의 영향은 일반분체의 경우와는 달리 시료의 압축기구에 따라 결정되는 것이 아니라 결합제의 특성에 따라 결정된다. 즉, 결정성 고분자 물질을 결합제로 사용한 IP의 경우에는 입상체크기가 작을수록 원하는 %TMD에 도달되는데 필요한 intragranular stress는 작아지는데 반해, 고무성질을 띤 결합제를 사용한 RE, RV의 경우 입상체크기에 관계없이 원하는 %TMD까지 압축시키는데 필요한 intragranular stress는 거의 동일하였다.
3. 평균입경은 같으나 입도분포가 서로 다른 시료의 경우 압축행태는 거의 유사하며, 원하는 %TMD에 도달하는데 필요한 intragranular stress는 비슷한 것으로 나타나, 압축밀도에 대한 입도분포의 영향은 무시할 수 있음을 알 수 있다.

## NOMENCLATURE

- A : crosssectional area of granular bed [cm<sup>2</sup>]  
 $A_p$  : crosssectional area consisting of granular particles [cm<sup>2</sup>]  
 $d_i$  : density of  $i^{th}$  component [g/cc]  
 $F_a$  : applied force [KN]  
 $F_t$  : transmitted force [KN]  
 $g_c$  : conversion factor [-]  
 $L$  : compact length [cm]  
 $L_o$  : initial bed length [cm]  
 $m_i$  : mass fraction of  $i^{th}$  component [-]  
 $M_p$  : mass of solid particles [g]  
 $n$  : porosity under pressure P[-]  
 $n_{ave}$  : average porosity of granular bed [-]  
 $n_o$  : bulk(initial) porosity [-]  
 $P_{up}$  : contact perimeter between particles and mold wall [cm]  
 $X$  : displacement of the top ram [cm]  
 $X_{ave}$  : axial location of mid plane of bed [cm]  
 $V$  : compact volume [g/cc]

- $V_t$  : true volume [g/cc]  
 $\tau_i$  : intragranular stress at mid plane or bed [MPa]  
 $\tau_{wp}$  : particle-wall friction stress [MPa]

## REFERENCES

1. Heckel, R.W.: *Trans. Metal. Soc. of AIME*, **221**, 671 (1961).
2. *ibid.*, **221**, 1001 (1961).
3. Nystrom, C., Mazur, J. and Sjogren, J.: *Int. J. of Pharm.*, **10**, 209 (1982).
4. Nystrom, C. and Glazer, M.: *Int. J. of Pharm.*, **23**, 255 (1985).
5. Duberg, M. and Nystrom, C.: *Powder Technology*, **46**, 67 (1986).
6. York, P.: *J. Pharm. Pharmac.*, **31**, 244 (1979).
7. Hersey, J.A. and Rees, J.E.: *Nature, Phys. Sci.*, **230**, 96 (1971).
8. Hersey, J.A., Bayraktar, G. and Shotton, E.: *J. Pharm. Pharmac.*, **19**, 24S (1967).
9. York, P.: *J. Pharm. Pharmac.*, **24**, 47 (1972).
10. Burchett, O.L., Dietzel, R.W. and Montoya, A.P.: "The Compaction Behavior of Ten Pyrotechnic Materials", SAND (1979).
11. Kuo, K.K., Yang, V. and Moore, B.B.: *J. Ballistics*, **4**, 697 (1980).
12. Elban, W.L., Gross, S.B., Kim, K. and Bernecker, R.R.: "Quasi-Static Compaction Studies for DDT Investigation: Inert Materials", NSWC (1982).
13. Elban, W.L. and Chiarito, M.A.: *Powder Technology*, **46**, 181 (1986).
14. 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).
15. Hildebrandt, F.J.: "Composition A-3 Desensitizer Replacement Program GG-37300 Ctg, 105mm, HEP-T M393A2", Picatinny Arsenal (1975).
16. Reams, C.S.: "Potential Composition A-3 Explosive Replacement", NWS (1981).
17. Johnson, H.D.: "An Investigation of the Effect of Granule Size on the Mechanical Properties of LX-14", MHSMP (1979).
18. MacDougall, C.S.: "Compositional Analysis of Viton Used in Explosive", MHSMP (1975).
19. MIL-STD-650: "Explosive: Sampling, Inspection and Testing, Method No. 201. 2" (1962).
20. Fukumori, Y. and Carsten, J.T.: *Int. J. Pharm. Tech. and Prod. Mfr.*, **4**, 1 (1983).
21. Kim, H.S.: "Compression Characteristics of the Flocculated Granule with Polymeric Binders", Ph.D Thesis, Yonsei Univ. (1988).