

해외기술자료

Cooper-Eaton 식에 의한 각종 생형사의 압축기구의 해석¹⁾

陳秀萍 · 野村宏之* · 前田安郭**²⁾

Analysis of Green Sand Composition Process applying Cooper-Eaton Model

Xiu-Ping Chen, Hiroyuki Nomura* and Yasuhiro Maeda**

번역: 최양진 · 조덕호 · 임윤수³⁾

1. 서 언

생형사를 사용하는 주형에서 발생될 수 있는 주조결함은 생형사의 강도부족, 성상불균일(性狀不均一)등에 의한 원인으로 많이 발생된다. 그러므로 주형은 균일하고도 높은 충전밀도가 요구된다. 한편 조형법에 있어서는 옛날부터 졸트스퀴즈 조형법과 류기(流氣)가압 조형법 등 압축공기를 이용한 여러 가지 충전기구를 갖는 조형방법이 많이 사용되고 있다. 주물사를 사용해서 생사형(green sand mold)을 제작하는 경우에 있어서도 사립자 군(羣)을 균일하게 충전시켜 높은 충전 밀도에서 정밀도를 확보하는 것이 가장 중요한 과제이므로 충전기구의 상세한 설명이 필요하다.

앞서 발표한 논문에서 분체공학분야에 널리 이용되고 있는 Cooper-Eaton식을 적용하는 새로운 접근법으로 생형사의 squeeze(스퀴즈)압축 기구의 설명을 시도하였다.

그 결과 압축과정에 일어나는 생형사의 압축거동은 Fig. 1에 나타내듯이 모델에 따라 진행된다고 생각된다. 즉, 저압력 영역에서는 주로 사립자의 이동·재배열에 의해 입자간 공간이 메워지는 현상이 생기고, 고압력 영역에서는 벤토나이트 점착층의 소성변형이나,

경우에 따라서는 입자의 파쇄에 의해 입자간 접촉점 부근의 비교적 협소한 공간이 메워지는 현상이 지배적으로 된다. 이런 압축 충전거동을 표현하는 Cooper-Eaton식은 다음과 같다.

F_v = (V_0 - V_p) / (V_0 - V_infinity) = a_1 * exp(-K_1/P) + (1 - a_1) * exp(-K_2/P) (1)

여기서, F_v = 체적압축율
V_0 = 자연 충전상태에서의 체적
V_p = 가압력 P에서의 체적
V_infinity = 가압력 무한대 상태에서의 체적(공극율이 0에서의 체적)이고, a_1 과 K_1은 계수이다.

식 (1)의 우변 제 1항은 입자재배열, 제 2항은 변형 및 파쇄에 관한 충전을 표현한 항이다. 또한, 걸보기 용적에서 생형사의 공극율 epsilon_p의 시간에 따른 변화를 다음 식에서 산출한다.

epsilon_p = 1 - V_infinity/V_p = 1 - (1/m) * (rho/V_p) (2)

m: 생형사의 질량
rho: 생형사의 진밀도

식 (1)에서 입자의 재배열에 관계되는 우변 제 1항

1) 日本 鑄造工學會誌 Vol. 75 No. 1 pp. 35~41에 게재된 자료임.
2) 名古屋大學大學院(Graduate Student, Nagoya University)
*名古屋大學工學研究科(Graduate School of Engineering, Nagoya University)
**海上保安大學校(Japan Coast Guard Academy)
3) 한밭대학교 신소재공학부(Division of Advanced Materials Engineering, Hanbat National University)

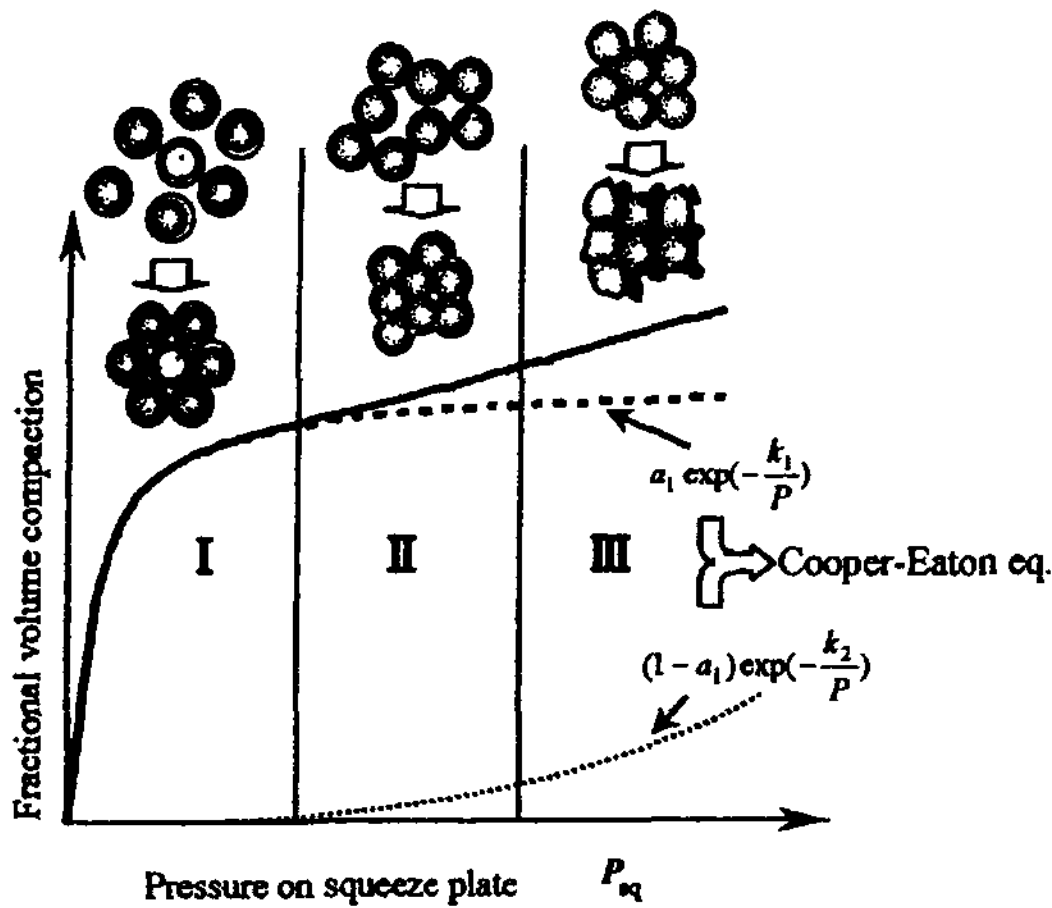


Fig. 1. Qualitative description of compaction process showing fractional volume change of sand with applied pressure: Region (I) particle rearrangement, region(II) deformation, region(III) fragmentation.

을 ΔV_1 , 변형에 관계되는 제 2항을 ΔV_2 로 하고 압축 압력의 증가에 따르는 생형사의 체적감소량 ΔV_1 , ΔV_2 의 영향을 조사했다.

$$\Delta V_1 = (V_0 - V) \times a_1 \exp\left(-\frac{K_1}{P}\right) \quad (3)$$

$$\Delta V_2 = (V_0 - V) \times (1 - a_1) \exp\left(-\frac{K_2}{P}\right) \quad (4)$$

또, 체적감소량을 일반화하기 위해, ΔV_1 , ΔV_2 에서 식 (2)를 이용해서 입자의 재배열기구에 따른 공극율감소량 $\Delta \epsilon_1$, 변형기구에 따른 공극율감소량 $\Delta \epsilon_2$ 의 압력상승에 따른 변화를 조사했다. 생형사의 모래 자체는 변형을 하지 않기 때문에 본 연구에서 일어나는 변형기구는 벤토나이트 점착층의 변형을 나타낸다. 또, 재배열과 변형에 의한 공극율감소량의 합을 전체 공극율감소량 $\Delta \epsilon (= \Delta \epsilon_1 + \Delta \epsilon_2)$ 라 한다.

앞서 발표한 논문에서 구형의 인공 세라믹사를 사용해 해석한 결과 재배열 기구에 의한 충전비율은 모래 층 전체의 압축변형에 있어 약 80%의 공극율 변화량을 차지하고 있어 지배적인 기구임을 명백히 밝혔다. 이것을 기초로 해서 다양하고 넓은 범위의 생형사에 대해 Cooper-Eaton식의 적용성을 검토하고, 주형사의 조형성에 대한 데이터 베이스를 구축하는 것이 가능하며, 각종 조형프로세스에서 충전 과정의 예측과 조형 프로세스를 합리적으로 제어 할 수 있는 정보를 얻을

수 있다고 생각된다. 이런 관점에서 본 논문에서는 Cooper-Eaton식의 유용성(有用性)을 검토하기 위해 벤토나이트를 변화시키는 경우와 서로 다른 종류의 주형사 모래를 사용하는 경우에 대해 스퀴즈(squeeze) 압축을 하고 모래 층이 다져지는 과정에 관한 고찰을 Cooper-Eaton식을 적용해서 실시했다.

2. 실험 방법

Fig. 2에 나타난 squeeze 조형시험장치의 개요, 측정 방법 및 해석방법 등은 모두 앞서 발표한 논문과 동일하다.

내경 50 mm의 원통형을 사용해서 생형사에 1축 압축을 가하고 압축압력과 체적의 관계를 조사했다. 시험에 사용된 모래(供試砂)에서 벤토나이트 함유량의 영향을 조사하기 위해 구형 인공 세라믹사 605호에 Na계 벤토나이트를 각각 8%, 10%, 12%와 적량의 수분을 첨가 배합해서 혼련한 생형사를 사용했다. 또, 입자 형태의 영향을 조사하기 위해 지르콘사, 크로마이트사, 올리빈사 및 3종 규사의 각종모래에 동일량의 벤토나이트를 배합한 주물사를 사용하여 충전 및 압축시험을 실시했다. 각종 모래의 형상을 Table 1에 나타냈다. 형상계수는 통기법[3,4]에 의해 구한다. 또 형상계수는 입자군의 성질이나 현상을 나타내는 계수로 정의한 것이다. 생형사는 compactability(충전밀도) (CB)값 35%, 40%, 45%로 조정하고 스퀴즈 조형압력은 1.2 Mpa까지 했다. 모래 량은 각각 조형압력이 0.98 MPa에서 높이 50 mm의 표준시험편을 제작하기 위한 필요량으로 결정했다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 시험용 모래입

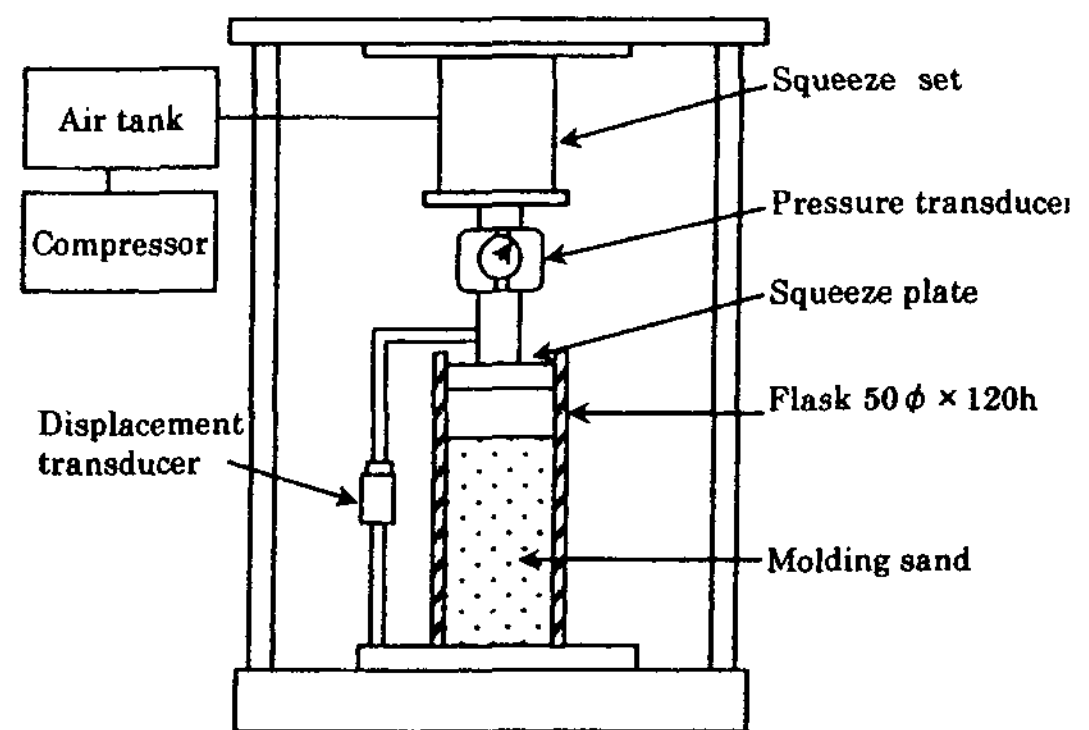


Fig. 2. Experimental apparatus.

Table 1. Characteristics of base sand

Mesh	Base sand mass%	Ceramic sand	Chromite sand	Olivine sand	Zircon sand	Silica sand(A)	Silica sand(B)	Silica sand(C)
30	-	-	13.3	0.2	-	-	-	12.3
36	-	-	20.0	1.4	-	0.8	2.4	32.2
50	2.9	7.1	24.1	0.4	14.7	15.8	35.6	
70	40.3	4.9	34.2	38.2	41	37.4	14.4	
100	43.0	2.7	24.6	56.5	27.7	14.1	3.9	
140	12.2	1.5	10.1	4.7	14.1	19.9	1.4	
200	1.7	0.4	3.3	0.1	1.5	7.5	0.1	
280	-	0.1	1.4	0.1	0.1	0.2	0.1	
pan	-	-	0.8	-	-	-	-	
Ave.dia(μ m)	208	490	245	208	232	206	429	
Shape factor	0.97	0.72	0.53	0.88	0.63	0.66	0.64	

Table 2. Property of sand

sand type	Ceramic sand	Chromite sand	Olivine sand	Zircon sand	Silica sand(A)	Silica sand(B)	Silica sand(C)
Bentonite(wt%)	Na type 8%, 10%, 12%						
Compactability(%)	35%, 40%, 45%						
Density of particle(kg/m ³)	2700	4200	3100	4500	2600	2600	2650
Density of Bentonite(kg/m ³)	780						
Moisture content of green sand (Na type 10%&CB35%)	2.6	2.7	3.1	2.5	2.6	2.3	2.6

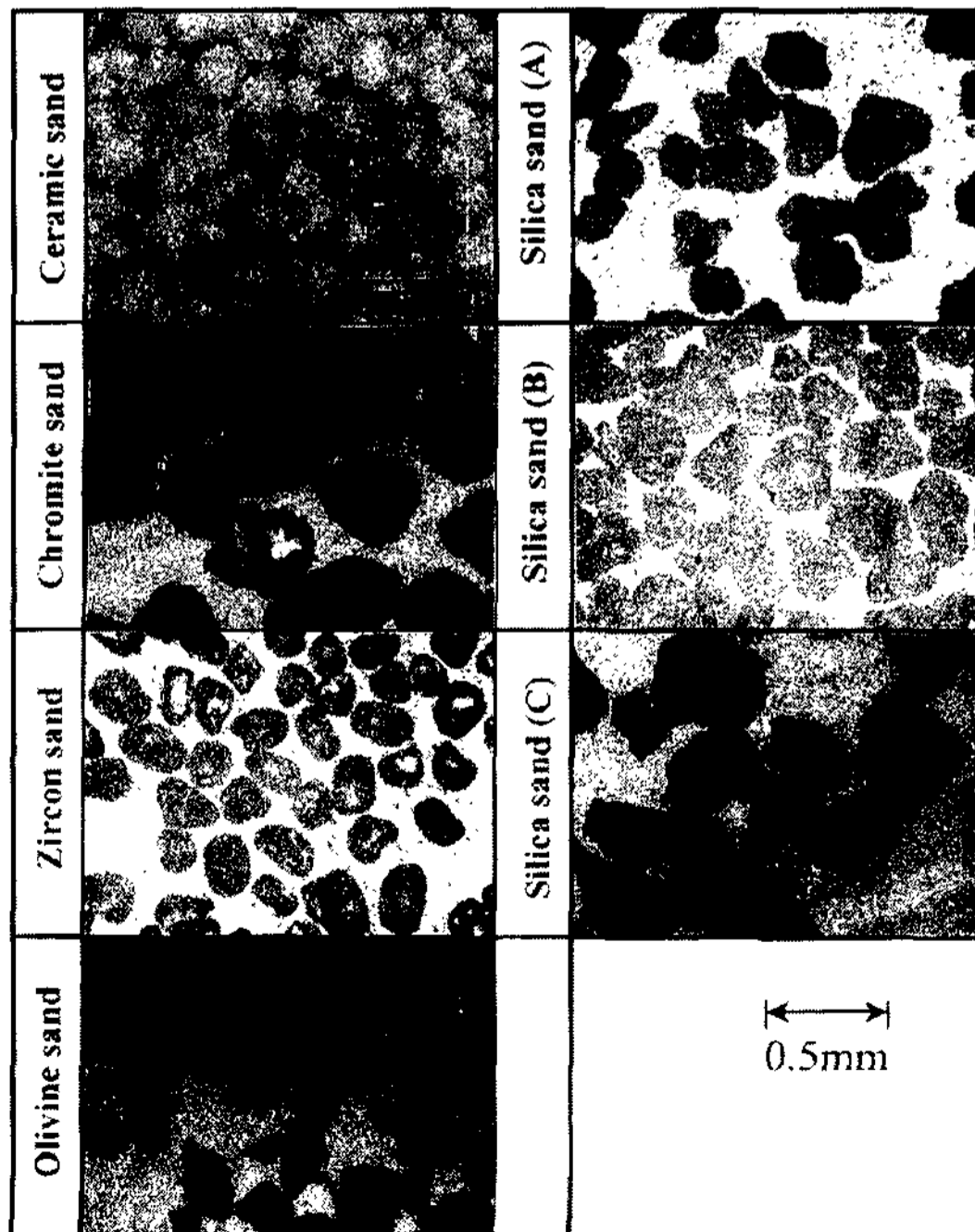


Fig. 3. Photograph of sand

자의 사진이다. 시험에 사용된 주물사의 특성을 Table 2에 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

각 벤토나이트 배합율에 있어서 세라믹사 No. 650에 대한 압축압력 P 와 체적 V_p 의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4는 CB값 35%에 대한 결과이다. 이 실험 데이터를 기초로 비선형회귀분석을 실시해 Cooper-Eaton 식 (1)의 계수를 결정했다. 얻어진 결과에서 계수 a_1 에 대한 검토를 했다. 계수 a_1 는 식 (1)에서 알 수 있듯 극한 압력 부가상태($P \rightarrow \infty$)까지의 가압에 의해 전체적 압축율에 차지하는 각 압축기구에 의한 체적압축의 비율을 나타내는 것이다. 구체적으로 본 연구에 있어 계수 a_1 는 재배열의 기여도를 $(1 - a_1)$ 는 점착층의 변형기여도를 나타낸다.

본 연구의 실험 정밀도를 고려해 Fig. 4에서 본 실험의 벤토나이트 함유량 범위 내에서 CB값이 동일하다면 a_1 은 거의 동일한 값을 나타내는 것을 알았다.

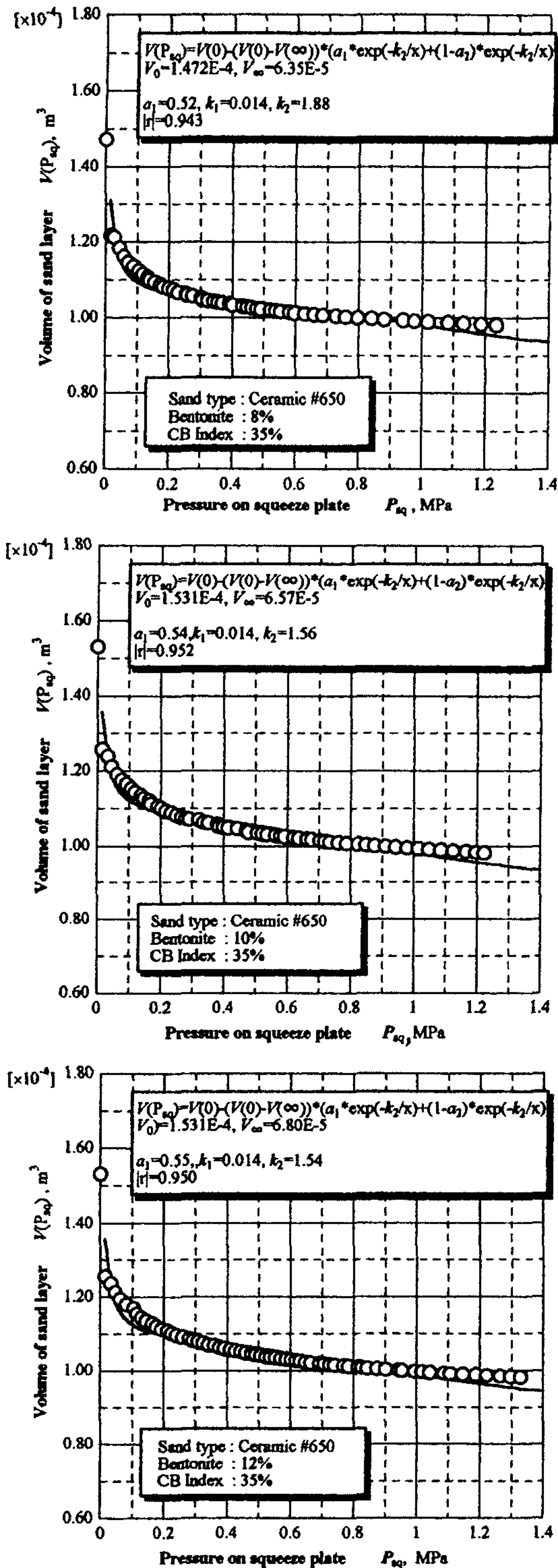


Fig. 4. Volume versus pressure for compaction. (solid line) fitting results, (symbol) experimental results.

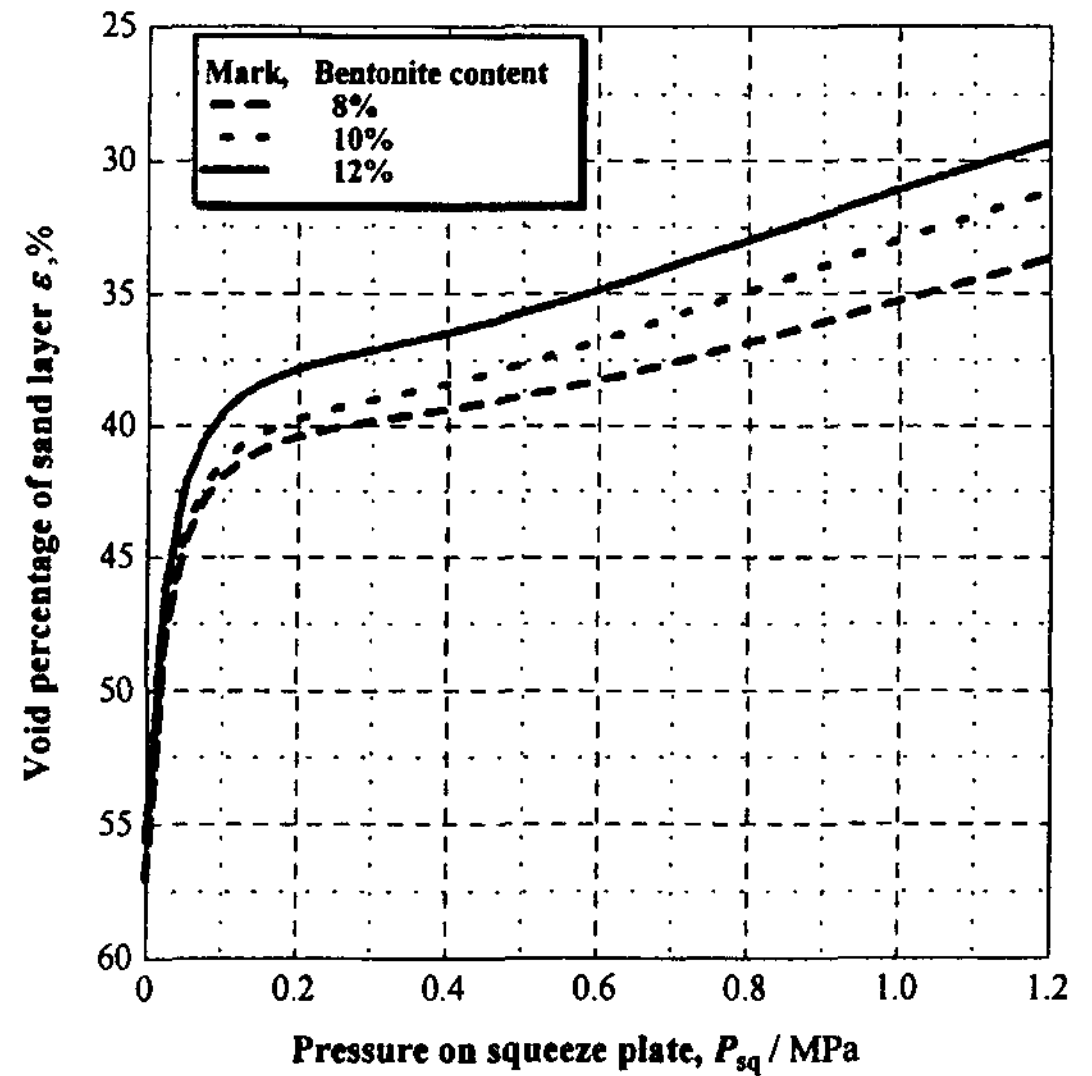


Fig. 5. Change of void percentage ϵ_s with compaction pressure for ceramic sand at CB index 35%

즉, 입자 재배열에 의한 체적 압축율은 거의 변화되지 않는 것을 알았다. 다음에 적용한 결과에 의해 얻어지는 계수를 이용하여 각 벤토나이트 함유량에 있어 조형압력에 의한 공극율을 구하여 Fig. 5에 나타냈다. 조형초기에서는 곡선의 기울기가 거의 동일한 것을 알 수 있다. 또, 식(2), (3), (4)에 의해 공극율의 변화를 재배열과 벤토나이트층의 변형기구로 분리해서 입자 재배열에 의한 정상상태의 공극율 ϵ_s 를 산출했다.

이 입자의 재배열 정상 값 ϵ_s 는 시간경과에 따른 조형력의 증가에 대응해 변화하는 공극율의 시간 및 압력에 있어 정상상태의 값을 나타내는 것이다. 본 연구에서 인공 세라믹사를 사용한 예비실험결과 1.2 MPa 이상에서 정상상태에 달하는 것을 알았기 때문에 이 압력치 1.2 MPa에서 공극율을 입자의 재배열 정상값 ϵ_s '로 했다.

Fig. 6에 CB값 35%, 40%, 45%에서 입자재배열에 의한 정상값 ϵ_s 의 해석결과를 나타낸다. 그림에 의하면 각 CB값에서 ϵ_s 는 거의 일정하게 나타나고 벤토나이트의 증가에 의한 입자 재배열의 영향은 거의 나타나지 않았다. 이 일정한 값이 그 사립자에 있어(점착력의 영향 분을 제외 한)가장 높은 충전상태에서의 공극율이라 생각된다. 본 실험 조건하에서 가장 밀도가 높은 충전상태에 영향을 미친다고 생각되는 사립자의 특성은 입도분포와 형상계수다. 재배열 안정 값 ϵ_s 가 벤

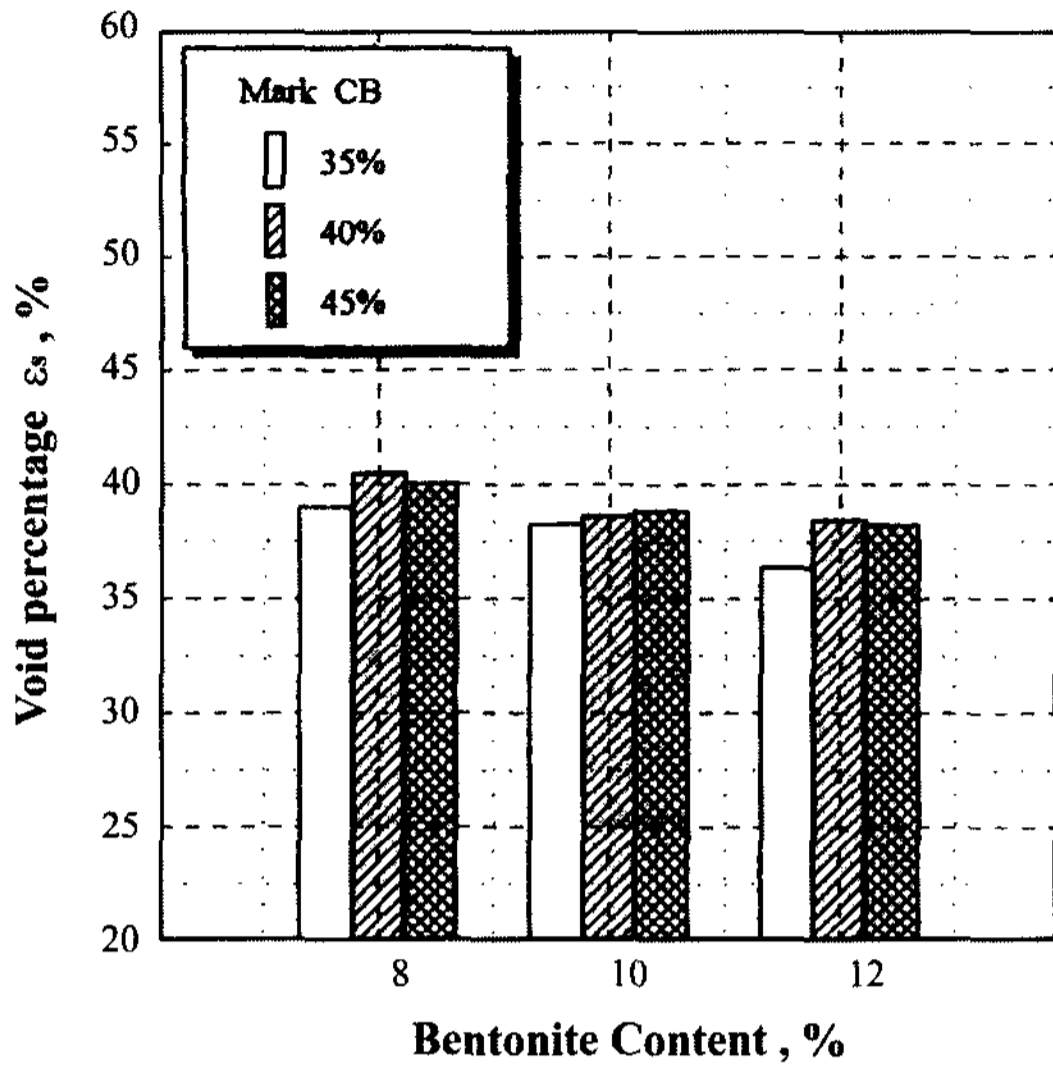


Fig. 6. Void percentage at steady state of rearrangement for ceramic sand with varied bentonite content.

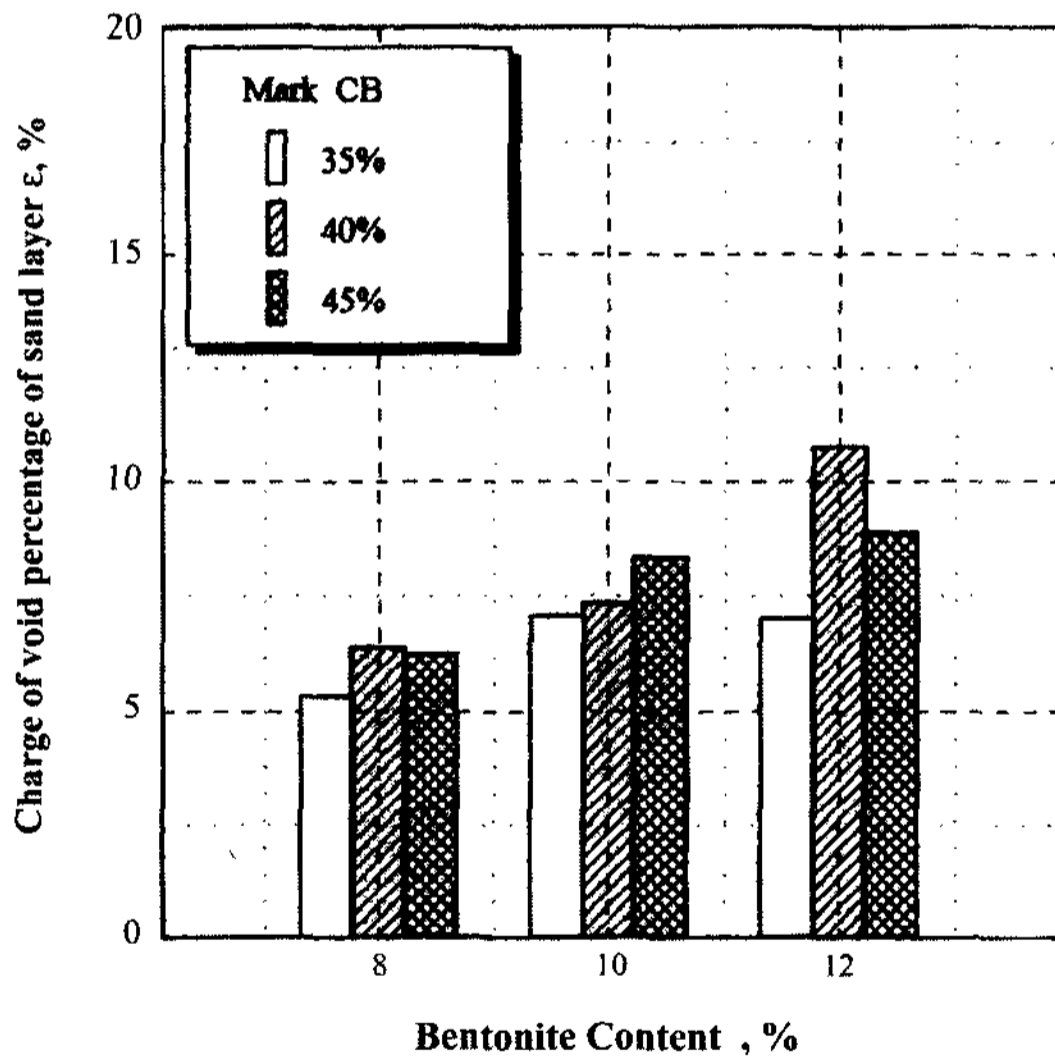


Fig. 7. Void percentage by deformation for ceramic sand with varied bentonite content.

토나이트 함유량과 CB값에 따르지 않고 거의 동일한 값을 갖는 것은 보는 방법에 따라 벤토나이트 점착층이 피복되지 않은 상태와 모래에 벤토나이트 점착층이 피복상태라 해도 동일한 사립자 특성을 갖는다[5,7]고 생각하는 것과 같다. 한편, 벤토나이트 층의 소성변형에 의한 공극율 감소량 $\Delta\epsilon_2$ 에 따른 정상상태 값

Table 3. Coefficients in Cooper-Eaton equation obtained by non-linear least square method.

Sand type	Coefficient				
	a_1	k_1	k_1	r	$\frac{\Delta\epsilon_s}{\Delta\epsilon}$
Ceramic sand	0.54	0.014	1.56	0.95	0.73
Chromite sand	0.56	0.015	1.47	0.96	0.73
Olivine sand	0.52	0.014	1.48	0.96	0.69
Zircon sand	0.50	0.017	1.16	0.97	0.62
Silica sand(A)	0.51	0.008	1.90	0.92	0.76
Silica sand(B)	0.53	0.016	1.58	0.95	0.72
Silica sand(C)	0.57	0.011	1.88	0.94	0.76

*r: correlation coefficient

$\Delta\epsilon_d$ 에 대한 벤토나이트 함유량의 증감 영향을 Fig. 7에 나타낸다.

Fig. 7에 의하면 점결제의 함유량이 증가함에 따라 소성변형기구에 의한 공극율 감소량 정상상태 값 $\Delta\epsilon_d$ 가 커지는 것을 알았다. 바꿔 말하자면 Squeeze조형 중 동일압력 상태에서는 벤토나이트 함유량이 많은 쪽이 입자간에 보다 많은 벤토나이트가 밀려들어가며 그 결과로 공극율이 감소된다고 생각된다.

다음에 서로 다른 모래에 대해 검토한다. Table 3에 각 모래에 대하여 CB값이 35%인 경우에 있어 Cooper-Eaton식을 이용한 해석결과를 나타낸다.

재배열 기구에 의한 공극율 감소량이 전체 공극율 감소량에 차지하는 비율 $\Delta\epsilon_2/\Delta\epsilon$ 값으로부터 어느 경우에 있어서도 재배열에 의한 공극율 변화가 지배적이라는 것을 알았다. 정상상태에서 공극율 ϵ_s 에 미치는 모래의 영향을 Fig. 8에 나타낸다. 일찍이 다수의 연구자[8,14]가 입도분포 및 형상 등 사립자 성상이 압축거동에 미치는 영향을 조사하고 있다. 예를 들어 Briggs[13]는 초기와 조형 후 충전상태는 입도분포에 의해 좌우된다고 했다. 또 Srinagesh[6]는 균일사에 있어, 형상계수는 가장 중요한 영향요소이고, 생형사 및 점착제가 함유되지 않는 주물사에 있어 압축거동은 입자의 angularity(각상)에 따라 결정되며 그것이 큰 만큼 충전공극율이 크게 된다고 보고하였다.

Fig. 8에 각종 모래에서 얻어진 공극율을 플롯해서 비교해 보았다. Cooper-Eaton식에 의해 얻어진 재배열 정상값 및 벤토나이트가 함유되지 않은 건조사를 충분히 진동시킨 후의 공극율, 생형사의 자연충전 후 공극율, 조형 종료후의 공극율 어느 쪽도 형상계수가 큰 쪽이 공극율이 작게 되는 경향이다. 그림에 따르면 본

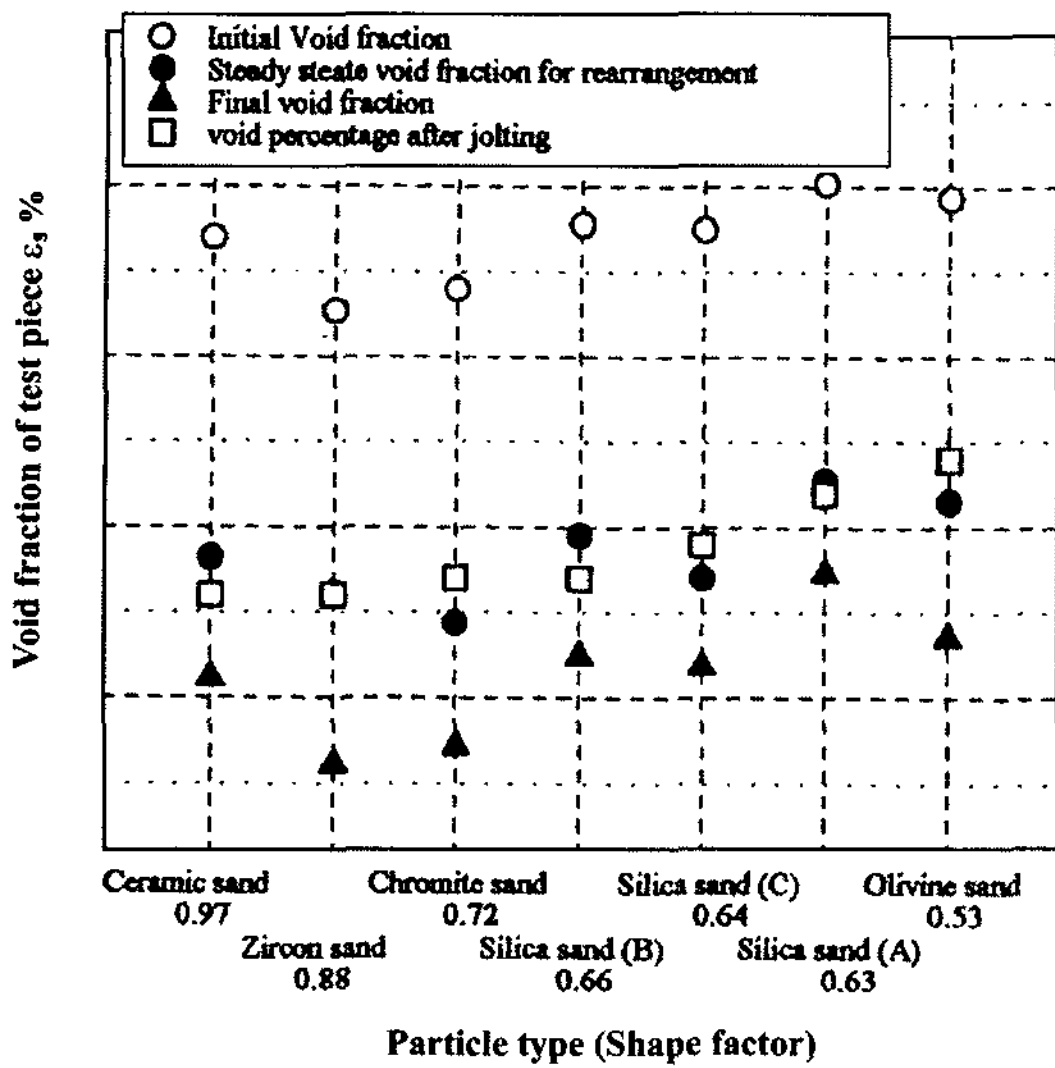


Fig. 8. Comparison of void percentage for various sands at CB index 35%

연구에 사용한 모래는 형상계수가 크다. 바꿔 말하면, 비표면적이 작은 조형모래 쪽이 상호마찰이 작고 유동성이 양호하여 보다 조밀한 충전상태가 얻어진다고 생각된다. 또 재배열에 의한 공극율정상값 ϵ_s 는 조형모래 초기 충전상태(자연충전)와 압축 후 충전상태가 거의 동일한 경향을 나타낸다. 재배열 정상값 ϵ_s 는 입자성상의 영향을 크게 받게 되어 조형 후 최종 충전상태도 동일하게 입자상에 크게 영향을 받는 것을 알았다. 생형사의 압축과정은 사립자의 형상, 입도 분포와 size 등에 영향을 받는다는 것은 본 연구 결과로도 알 수 있다.

생형사에 있어 이들의 영향을 정확하게 정량적으로 평가하는 것은 생형사가 점결제를 함유하는 습윤분립체이기 때문에 어렵다. 그러나 본 연구의 Cooper-Eaton식을 이용한 해석에서는, 압축과정에서 정량해석을 실시하고 재배열기구와 점착층의 변형기구를 정량적으로 분리하는 것이 가능하다. 또한, 압축과정을 나타내는 Cooper-Eaton식의 계수 a_1 , K_1 과 K_2 는 각각 독립되어 있다. a_1 과 K_1 는 전체변형의 80% 이상을 차지하는 입자재배열기구에 관한 것이므로, 아래에 이들과 사립자 형태인자와의 관계에 대해 조사했다.

입자형태의 분립체를 대상으로 하는 경우, 입자의 형상이나 크기 분포를 수치로 표시하는 방법으로 여러 가지 제안이 있다. 본 연구와 같이 충전특성을 종합적

으로 고려하는 경우에는 입도 분포와 형상분포를 동시에 파악해서 고찰하는 것이 중요하다. 여기에서는 wanibe가[15,20] 제안하고 있는 정량적 평가방법을 이용하여 Cooper-Eaton식의 파라미터 a_1 , k_1 에 대한 분립체 특성의 영향력을 조사했다. Wanibe의 방법에 따르며 사립자의 특성으로 아래 4개의 Parameter를 선택했다.

$$\begin{aligned}
 M_D &\equiv \ln(D_{50}) \\
 M_\psi &\equiv \ln\left(\frac{\Psi_{50}}{1-\Psi_{50}}\right) \\
 W_D &\equiv \ln(D_{97.7}) - \ln(D_{2.3}) \\
 W_\psi &\equiv \ln\left(\frac{\Psi_{97.7}}{1-\Psi_{97.7}}\right) - \ln\left(\frac{\Psi_{2.3}}{1-\Psi_{2.3}}\right)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서, 좌변의 M_D , M_ψ , W_D , W_ψ 는 각각 입자의 평균입경, 평균입자의 형상, 입경의 범위, 입자형상 범위를 나타낸 파라미터다. 입자의 형상에는 각각의 입자를 나타내기 위해 원형도를 사용, 현미경관찰에 의한 투영상으로부터 구했다. (사립자군에 대한 형상계수와는 다르다.) 이 파라미터의 첨자 D 및 Ψ , 또한 우변의 변수에 있는 D 및 Ψ 는 각각 모래입자의 지름 및 원형도를 의미한다. 그리고 D 및 Ψ 의 하부 첨자 숫자는 누적분포곡선에서 체를 통과한 누적 %이다.

다시 말해 D_{50} 은 입자 통과량 50%에 해당하는 모래 입자의 지름(체 눈금의 크기), Ψ_{50} 은 동일한 50%에 대응하는 원형도이다. 마찬가지로 $D_{97.7}$, $D_{2.3}$, $\Psi_{97.7}$, $\Psi_{2.3}$ 은 각각 97.7%와 2.3%에 대응하는 모래입자의 지름 및 원형도이다. 여기서 숫자 2.3 및 97.7은 통계해석학에 있어서 사립자의 대수 정규분포를 구성하고 있는 그 분포 범위 2σ (σ 는 표준편차)내에 있다. 따라서 이들의 입도분포의 중앙(50%) 및 양단(2.3%와 97.7%)에서 입자의 지름 및 원형도에서 식 (5)에서 자연대수로 계산되는 M_D , M_ψ , W_D , W_ψ 를 정량화 시킨 입자특성 Parameter(15,20)로 한다. CB값 35%에서 각 입자에 있어 파라미터 값, 식(5)에서 계산된 결과를 표 4에 나타낸다. 사립자 파라미터 M_D 는 평균입경이 크게 됨에 따라 증가하고 M_ψ 는 구형에 가깝게 증가하며 W_D , W_ψ 는 입경 및 입자형상의 넓이가 크게 되는 만큼 증가하는 경향을 갖는다.

이 사립자 특성을 나타내는 4개의 파라미터가 생형사의 충전성에 미치는 영향을 조사하기 위해 Cooper-Eaton식의 계수 a_1 , k_1 에 대해 (6), (7)식을 검토해

Table 4. Morphological properties of base sand.

Sand type	M_D [-]	M_ψ [-]	W_D [-]	W_ψ [-]
Ceramic sand	4.96	2.75	1.09	2.33
Chromite sand	5.9	1.10	1.96	1.74
Olivine sand	5.12	0.90	1.70	1.31
Zircon sand	4.95	1.39	1.43	1.54
Silica sand(A)	5.01	0.85	1.23	0.86
Silica sand(B)	5.28	0.94	1.98	1.52
Silica sand(C)	5.66	0.80	1.78	1.24

본다.

$$a_1 = C_1 \cdot M_D + C_2 \cdot M_\psi + C_3 \cdot W_D + C_4 \cdot W_\psi \quad (6)$$

$$k_1 = D_1 \cdot M_D + D_2 \cdot M_\psi + D_3 \cdot W_D + D_4 \cdot W_\psi \quad (7)$$

이 식은 Cooper-Eaton식의 입자재배열에 관한 a_1 , k_1 이 4개 입자특성 파라미터에 선형결합 한 것이다. 선형결합 되는 4개의 파라미터 영향을 균등하게 평가할 수 있다. Table 3에 나타낸 a_1 , k_1 , Table 4에 나타내는 M_D , M_ψ , W_D , W_ψ 을 (6), (7)식에 대입하고 최소 2승법(가우스법)에 따라 중회귀분석에서 계수를 구했다. 얻어진 (6), (7)식의 계수는 다음의 값이다. 또, 상관계수는 각각 0.97과 0.79였다.

$$\begin{cases} C_1 = 0.072 \\ C_2 = 0.153 \\ C_3 = 0.131 \\ C_4 = -0.165 \end{cases} \quad \begin{cases} D_1 = -0.0023 \\ D_2 = 0.0067 \\ D_3 = 0.1323 \\ D_4 = -0.0025 \end{cases}$$

앞에서 알 수 있듯이 a_1 , k_1 과 함께 평균입자 지름의 영향은 적지만 평균입자 형상, 입자지름 범위, 입자 형상범위는 커다랗게 영향을 미치는 것을 알았다. 여기서 a_1 은 식 (1)에서 알 수 있듯이 지수계수의 형상에 큰 영향을 미치고 a_1 이 크게되면 Fig. 5의 기울기가 급격하게 되고 또 재배열 정상값 ϵ_s 가 적게 된다.

이 a_1 에 대해 C_2 , C_3 가 정(正)의 영향을 미치는 것으로부터 입자형상이 구형에 가까울 만큼 또 입도 분포가 큰 만큼 용이하게 충전이 진행되어 충전밀도가 높다(공극율은 적다). 주형이 조형 할 수 있는 것을 알았다. 한편, C_4 는 부(負)를 나타내는 것으로부터 형상 계수분포의 넓이가 역(逆)의 영향을 타나내는 것으로 된다. 이 같은 파라미터의 종합적 작용에 따라 사층

변형 전체에 있어 입자재배열의 비율이 변하는 등 조형거동이 변화한다.

위에 설명한 해석을 이용하여 사립자 같은 집합체 성질이나 압축거동을 비교하거나 압축거동을 입자의 형태로부터 예측하는 것이 가능하다.

4. 결 론

조형에 있어 벤토나이트 함유량 및 각각의 모래에 Cooper-Eaton식의 적용성을 검토하고, 압축거동과 사립자 특성과의 관계를 정량적으로 해석하였다.

(1) 벤토나이트 함유량 증가에 의한 물리적재배열의 정도는 거의 변화하지 않지만 벤토나이트 층의 소성변형에 의한 공극율 변화는 크게된다.

(2) 생형사 충전에 있어 재배열에 의한 공극율(ϵ_s)은 사립자의 특성에 영향을 받고, 입자형상계수가 큰 만큼 ϵ_s 도 크게 된다.

(3) 사립자 특성의 a_1 , k_1 에 미치는 사형특성의 영향은 선형방정식에 따라 정량적으로 나타낼 수 있고, 생형사 각종 파라미터의 충전에 대한 영향력을 평가할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] X. P. Chen, H. Nomura and Y. Meada : J. JFS 74 (2002) 436.
- [2] A. R. Jr. Cooper, L. E. Eaton : Am. Ceram. Soc. 45 (1962) 97.
- [3] C. Hisatsune, R. Kono : Molding sand processing, The nikkon Kogyo Shimbu (1965) 280.
- [4] R. Kono, M. Suzuki : IMONO 28 (1956) 162.
- [5] H. Ichimura : IMONO 61(1989) 679.
- [6] K. Srinagesh, M.Seshradri and A. Ramachandran : AFS Trans. 66 (1974) 27.
- [7] K. Akira : Research on Modability of Green Sand (Casting subcommittee of No. 24 Committee) (1996).
- [8] L. J. Pedicini : AFS Trans 66(1958) 421.
- [9] N. Saileswaran, VPanchanathan, M. R. Seshadri and A. Ramachandran : AFS Trans. 80 (1972) 273.
- [10] G. Ushiyama, N. Kita and T. Okakura : J. JFS 26 (1954) 420.
- [11] J. B. Caine and C. E. McQuision : AFS Trans 66(1958) 36.
- [12] B. H. Booth and C. A. Sanders : AFS Trans. 62 (1954).
- [13] C. W. Briggs : AFS Trans. 74 (1966) 553.
- [14] I. Holubec, E. d'Atpolnia and R. W. Bell : AFS Trans. 79 (1971) 313.
- [15] T. Itoh and Y. Wanibe : Powder Metall. 34 (1991) 126.

- [16] T. Itoh and Y. Wanibe : J. Jpn. Soc. Powder Metall. 41 (1994) 1111.
- [17] T. Itoh and Y. Wanibe : J. Jpn. Soc. Powder Metall. 46 (1999) 16.
- [18] T. Itoh and Y. Wanibe : J. Jpn. Soc. Powder Metall. 47 (2000) 1291.
- [19] Y. Wanibe and T. Itoh : New Quantitative approach to Powder Technology (John Wiley & Sons) (1998) 99.
- [20] Y. Wanibe and T. Itoh : New Development of Powder Technology (shoukabou) (1995) 93.