

## Chamotte 質 耐火物の 強度에 미치는 遊離 Silica 의 影響

朴 金 喆 · 崔 泳 變

漢陽大學校 窯業工學科

(1976年 1月13日 接受)

## The Effect of Free Silica on the Strength of Chamotte Refractory

Keum-Churl Park and Young-Sup Choi

Department of Ceramic Engineering, Han-Yang University

(Received Jan. 13, 1976)

### ABSTRACT

The effect of quartz which exists in clays, especially in kaolin used for the production of chamotte sagger, on the strength of refractory was examined.

In this study, a mixture of chamotte 50%, kaolin 25%, plastic clay 25% in ternary component system was selected as a batch composition.

To this mixture 1%, 3% and 5% of feldspar and sericite were added respectively.

The plastic clay used here was separated under 170 mesh by wet process.

Feldspar and sericite were separated under 325 mesh by dry process.

In order to change the particle size and the content of quartz, the kaolin was separated under 60, 115, 170 and 325 mesh by wet process, substituted quartz for coarse parts of it.

Chamotte was classified into three grades, coarse (5-10 mesh): medium (10-20mesh): fine (20-115 mesh) and the ratio was 1:1:1.

Samples were formed in 0.8x1x10cm size with 12.5% water at 160kg/cm<sup>2</sup> pressure, and fired at 1300°C for 1 hr.

The fired samples were investigated by means of x-ray diffraction analysis and microscopic observation, and the physical properties of them were also examined, such as firing shrinkage, apparent specific gravity and bulk specific gravity, apparent porosity, water absorption and modulus of rupture.

The obtained results are as follows:

1. When screened kaolin with low content of quartz was added to fixed chamotte-plastic clay system, the sample lowered modulus of rupture and increased apparent porosity as the size of kaolin became finer.
2. When kaolin under 325 mesh with 7.2-15.81% quartz between 60-325 mesh was added to fixed chamotte-plastic clay system, the sample had higher apparent porosity and lower modulus of rupture as the size and the amount of quartz became larger.
3. The addition of feldspar and sericite to chamotte-plastic clay system improved apparent porosity and modulus of rupture. The effect of feldspar was better when quartz content was low, although that of sericite was better when quartz content was high.

### I 緒 言

耐火匣으로 많이 사용되는材質에는 chamotte, mullite, cordierite, silicon carbide 등이 있으며, 小規模工場에서는 아직도 chamotte 質이 많이 사용되고 있다. chamotte의 構成相은 mullite, cristobalite 및 유리相이며, 이 相들은 原料粘土의 化學組成과 成形, 燒成等 處理條件에 따라 그 量과 組成이 變한다<sup>1)</sup>. 그런데 chamotte 質 耐火匣은 SK 15 附近에서 燒成하므로 配合劑 加해진 骨材 chamotte 中에는 cristobalite가 存在 하겠고, 結合 粘土에 混在한 遊離 石英은 573°C에서  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  型 轉移는 일어나나 1250°C에서  $\beta$ -cristobalite에의 轉移는 遲鈍型이므로 거의 일어나지 않을 것이다.<sup>2)</sup> 따라서 chamotte 質 耐火匣의 構成相中 石英은 573°C에서, cristobalite는 180~275°C에서 各各  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  轉移로 膨脹 收縮이 甚하므로<sup>3,4)</sup> 加熱 冷却이 反復될때 材質의 弱화가 일어날 것으로 생각된다. 또한 半珪石質 耐火物은 高溫에서 膨脹하는 珪石에, 高溫에서 收縮하는 粘土를 加하여 加熱 冷却의 反復에 따른 膨脹收縮을 적게 하고 있다.<sup>5)</sup>

本 研究는 半珪石質 耐火物과는 달리 多量의 chamotte에 少量의 珪石이 加해질 可能性이 있는 chamotte 質 耐火匣의 製造에 있어서, 原料 粘土鑛物中에 含有된 珪石이 材質의 強度에 미치는 影響을 究明한 것이다. 實際 耐火匣 製造에서 chamotte와 粘土를 fret mill에서 混合 粉碎하고 있으므로 珪石이 含有된 粘土를 使用할 경우 상당量의 珪石이 混在될 可能性이 있다.

本 實驗은 篩分하여 段階의으로 粗粒을 除去한 kaolin과 그들의 粗粒一部를 珪石으로 置換한 것을, 粒度調整한 chamotte-可塑性 粘土系에 25%씩 加하여 主로 그 強度 特性을 構成과 相關시켜 考察하였다.

### II 實驗 方法

#### 1. 使用 原料

本 實驗에서 使用된 主 原料는 靑州産 chamotte, 河東 kaolin, 威平 粘土이며, 添加 原料는 金泉 珪石, 安養 長石, 月城 絹雲母이다.

#### 2. 原料의 調整

Chamotte는 粒度配合를 爲하여 ball mill에서 乾式粉碎하여 5~10 mesh인 粗粒, 10~20 mesh인 中粒, 20~115 mesh인 微粒의 3 群으로 調整하였다. kaolin은 粗粒部에 多少나마 珪石이 混在될 것으로 보고 60, 115, 170, 325 mesh 篩下로 各各 濕式篩分하였다. 珪石은 fret mill에서 粉碎하고, 各 濕式篩分한 kaolin의 325

mesh 篩上分の 粒度分布과 같이 3 粒子群으로 粒度分離하였다. 그리고 長石과 絹雲母는 各各 325 mesh 篩下로 調整하였고, 各 調整原料는 化學分析, X線回折分析, DTA, TGA 및 粒度分析을 하였다.

#### 3. 試片 製造

##### 3-1. 原料의 調査

試片의 構成原料는 Table 1 과 같다.

##### 3-2. 試片의 成形 및 燒成

試片은 12.5%의 水分과 160kg/cm<sup>2</sup>의 壓力下에서 金屬型으로 0.8×1×10cm가 되게 成形하였다. 成形匣은 實際的인 面을 勘案하여 擇한 것이다. 燒成은 電氣抵抗爐에서 1300°C로 1時間 維持시켰으며 heating schedule은 Fig. 1 과 같다.

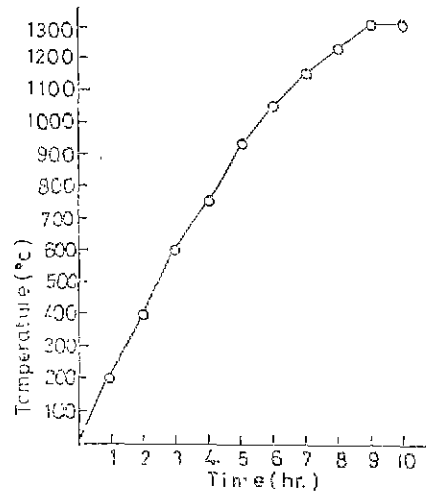


Fig. 1 Heating schedule

##### 3-3. 試片의 物性測定

燒成收縮은 KSL 1004, 比重, 氣孔率, 吸水率은 KSL 3114에 依하여 測定하였고, 격임強度는 2個의 垂直 knife edge上에 試片의 0.8×10cm 面이 위로오게 하고 中央部에서 折斷荷重을 測定하였으며, 計算式은 다음과 같다.

$$R = 3WL / 2ED^2$$

W = 試片이 破損되었을 때의 總荷重(kg)

L = 支持臂의 거리(cm)

B = 試片의 나비(cm)

D = 試片의 두께(cm)

試片의 鑛物種과 相對量은 X線回折로 解釋하였으며, 組織面은 偏光顯微鏡으로 觀察하였다.

##### i) X線回折分析

Table 1. Batch composition of the samples.

Sample No.	Chamotte			Clay	Kaolin				Quartz			Feldspar	Sericite
	-5+10 mesh	-10+20 mesh	-20+115 mesh	-170 mesh	-60 mesh	-115 mesh	-170 mesh	-325 mesh	-60+115 mesh	-115+170 mesh	-170+325 mesh	-325 mesh	-325 mesh
1	50/3	50/3	50/3	25	25								
2	"	"	"	"		25							
3	"	"	"	"			25						
4	"	"	"	"				25					
1-1	"	"	"	"				21.05	1.14	1.01	1.80		
2-2	"	"	"	"				22.19		"	"		
3-3	"	"	"	"				23.20			"		
2-a	"	"	"	"			25					1	
b	"	"	"	"			"					3	
c	"	"	"	"			"					5	
d	"	"	"	"			"						1
e	"	"	"	"			"						3
f	"	"	"	"			"						5
2-2-a	"	"	"	"				22.19		1.01	11.80	1	
b	"	"	"	"				"		"	"	3	
c	"	"	"	"				"		"	"	5	
d	"	"	"	"				"		"	"		1
e	"	"	"	"				"		"	"		3
f	"	"	"	"				"		"	"		5

Table 2. Chemical composition of raw materials.

Samples	Chemical Comp. (%)	Ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Sp. G.
Screened Kaolin	(-60 mesh)	13.75	43.44	39.25	3.06	Tr.	Tr.	2.52
"	(-115 mesh)	13.80	43.38	39.53	2.79	Tr.	Tr.	—
"	(-170 mesh)	13.85	43.16	39.54	3.19	Tr.	Tr.	—
"	(-325 mesh)	13.94	43.36	39.76	3.25	Tr.	Tr.	—
"	(-4-60 mesh)	12.82	44.96	37.40	5.32	Tr.	Tr.	—
"	(-60+115 mesh)	13.32	43.94	37.74	4.26	Tr.	Tr.	—
"	(-115+170 mesh)	13.65	43.95	37.28	3.72	Tr.	Tr.	—
"	(-170+325 mesh)	13.72	43.93	37.18	2.92	Tr.	Tr.	—
Plastic Clay	(-170 mesh)	3.92	67.88	20.48	2.26	1.50	0.47	2.56
Chamotte		0.98	46.32	41.93	3.75	—	—	2.70
Feldspar		1.29	72.32	22.42	2.00	0.10	0.06	—
Sericite		3.81	46.76	37.25	3.09	Tr.	1.32	—
Quartz		0.71	98.10	0.26	0.19	—	—	2.57

Cu-target, Ni-filter. 30kv-15mA, counter:GM., full scale:100CPS, scan speed:2°C/min, chart speed: 200 mm/min.

ii) 示差熱分析  
heating rate: 10°C/min, Pt-PtRh 複熱傳對  
Standard sample: α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. range.250

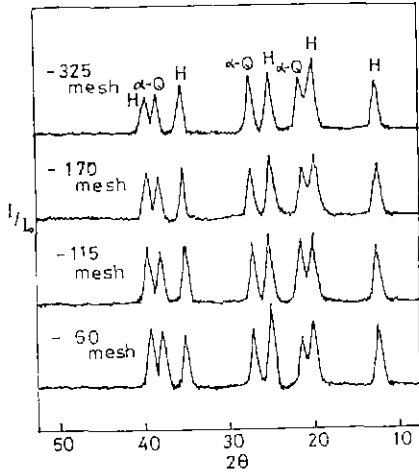


Fig 2-a. X-ray diffraction patterns of screened kaolins.

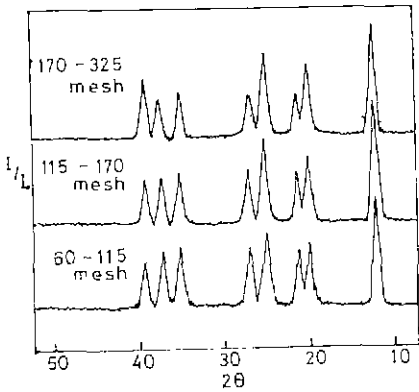


Fig. 2-b. X-ray diffraction patterns of screened kaolins.

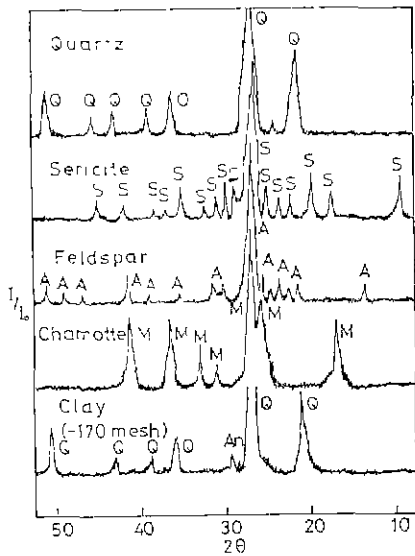


Fig. 2-c. X-ray diffraction patterns of raw materials.

iii) 加熱減量分析

heating rate:10°C/min. range:200

III 結果 및 考察

1. 使用 原料의 特性

使用 原料의 化學組成은 Table 2 와 같고, 그 X線回折圖는 Fig. 2-a, 2-b, 2-c 와 같다. 또한 DTA 및 TGA 曲線은 各各 Fig. 3, 4 와 같으며, kaolin 과 粘土의 粒度分布는 Fig. 5 와 같다.

化學分析表나 X線回折, DTA, TGA 曲線으로 보아서 kaolin 은 主 鑛物이 halloysite 와 α-quartz 이며 節分에 따른 鑛物 組織의 變化는 큰 差異를 보여주고 있지 않다. 그리고 kaolin 의 粒度分布는 다같이 微粒側의 分布가 많으며, 20μ 以下의 粒子가 70~90%를 차지하고 있다.

Chomotte 는 mullite 가 主 鑛物이며, cristobalite 는 矽의 유리相에 溶解된 것으로 보아지며, 長石은 soda 長石에 屬한다. 絹雪母와 珩石은 各各 絹雪母와 α-石英의 特性 peak 만을 나타내고 있다. 그리고 可塑性 粘

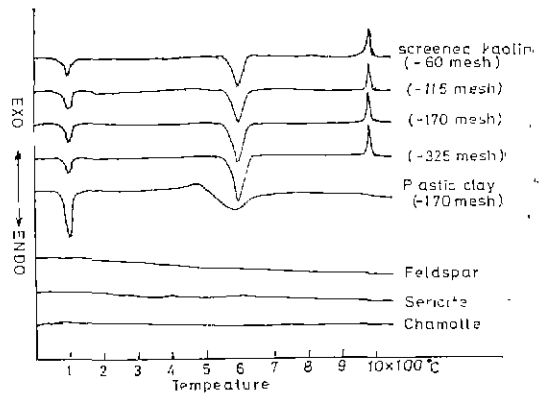


Fig. 3. D. T. A. curves of raw materials.

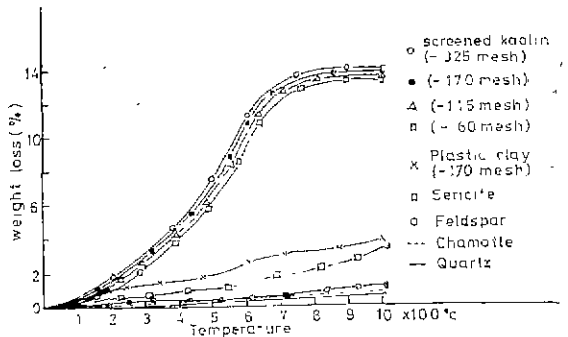


Fig. 4. T. G. A. curves of raw materials.

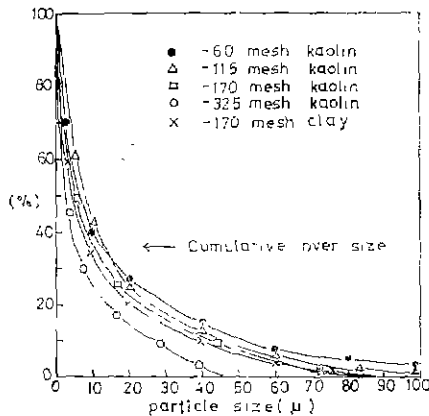


Fig. 5. Size distribution curves of the materials.

土는  $\alpha$ -quartz의 特性 peak 밑이 뚜렷하고 d 값 3.26, 3.20, 3.17Å에서 灰長石의 特性 peak가 微弱하게 보이며, 560°C 近方에서 kaolin 鑛物의 特性인 吸熱 peak가 나타나고 있으나 980°C에서의 發熱 peak는 보이지 않는 異質的인 것이다.

2. 試片의 物性

試片의 物性測定 結果는 Table 3과 같다. 燒成收縮은 1.28~2.98%이며, 大體로 chamotte 可塑性 粘土系에 珪石 含量이 적은 kaolin을 加한것이 第一 작고, 珪石이 含有된 kaolin을 加한것은 이보다 若干 큰 係向이 있으며, 添加劑를 加한것은 가장 크게 나타났다.

그리고 燒成試片의 X線回折 結晶相은 다같이 mullite,  $\alpha$ -cristobalite 및  $\alpha$ -quartz이며, (Fig. 6, Fig. 7) 原料中에 含有된 珪石은 1300°C의 燒成條件下에서는 cristobalite에의 轉移가 完結되지 않았음을 말해 주고 있다.

Table 3. Properties of the samples.

Properties Sample No.	firing Shrinkage (%)	App. Sp. G.	Bulk Sp. G.	App. porosity (%)	Water absorption (%)	Modulus of rupture (kg/cm <sup>2</sup> )
1	1.36	2.62	2.11	19.88	9.31	107.6
2	1.28	2.77	2.20	20.45	9.24	106.2
3	1.31	2.68	2.12	20.56	9.68	105.3
4	1.32	2.67	2.12	20.73	9.77	92.6
1-1	1.41	2.47	1.98	21.46	10.29	73.6
2-2	1.52	2.49	2.02	20.69	9.44	76.5
3-3	1.48	2.59	2.07	21.22	9.30	79.8
2-a	2.44	2.54	2.02	20.25	10.03	110.1
b	2.35	2.54	2.06	19.40	9.29	147.1
c	2.80	2.59	2.12	19.32	8.65	151.0
d	1.92	2.60	2.07	20.41	9.48	105.9
e	2.20	2.62	2.05	20.11	9.99	110.2
f	2.98	2.60	2.08	19.72	9.48	120.3
2-2-a	2.44	2.63	2.07	20.52	10.26	98.9
b	2.25	2.64	2.10	20.20	9.60	107.6
c	2.68	2.62	2.11	19.73	9.30	119.4
d	2.06	2.60	2.07	20.48	9.95	97.7
e	2.38	2.61	2.08	20.12	9.82	113.8
f	2.63	2.56	2.08	18.96	9.13	137.3

2-1 使用 kaolin의 影響

一定한 chamotte-可塑性 粘土系에 加해진 kaolin의 篩分 効果가 燒成試片의 겉보기 氣孔率 및 적임強度에 미치는 影響을 圖示하면 Fig. 8과 같다. 여기서 보면 kaolin을 篩分하여 微粒部를 擇할수록 적임強度는 大體로 減少하고 있으며 겉보기 氣孔率은 增加하고 있다. 이와같은 事實은 다음과 같이 解釋된다. Westman<sup>6,7)</sup>이

報告한 chamotte 3成分粒子系의 充填度 分布圖에서 粗, 中, 微粒이 各各  $\frac{1}{3}$ 인것은 그 氣孔率이 約 27%인 데 이 關係는 다음과 같은 式으로 表示된다.

$$\frac{V_p}{V_p + V_t} \times 100 = 27(\%)$$

여기서  $V_p$ 는 氣孔容積,  $V_t$ 는 固體 卽 chamotte의 容積이다. 萬若 粘土와 kaolin이 chamotte의 間隙 卽  $V_p$

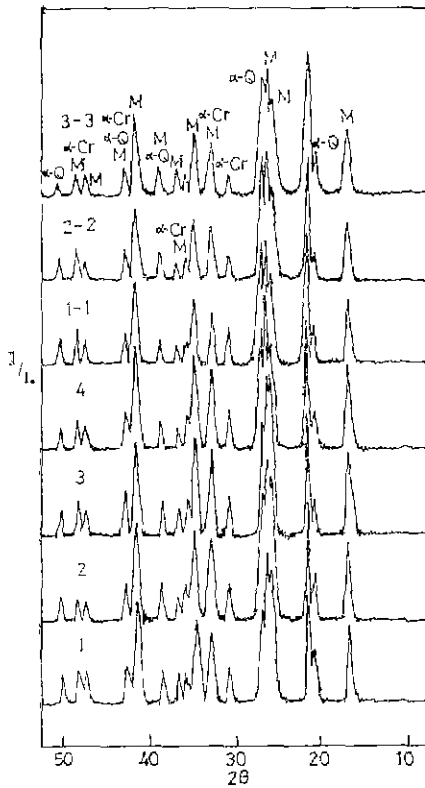


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of the samples.

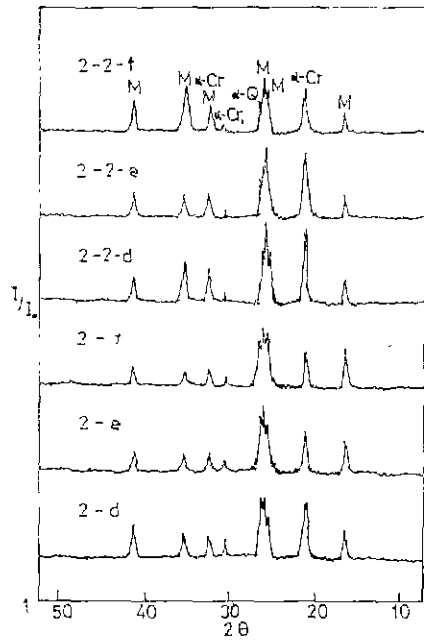


Fig. 7-b X-ray diffraction patterns of the samples. (sencite added)

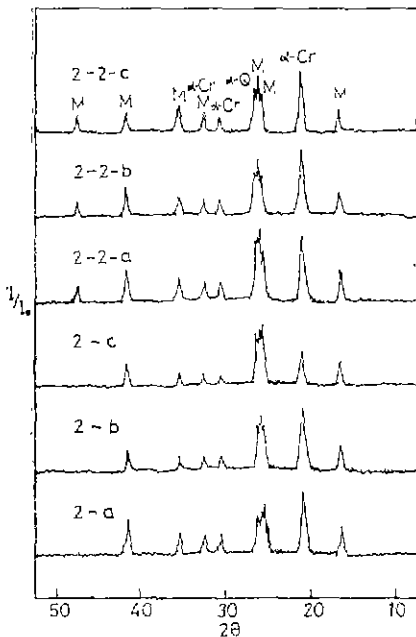


Fig. 7-a X-ray diffraction patterns of the samples (Feldspar added)

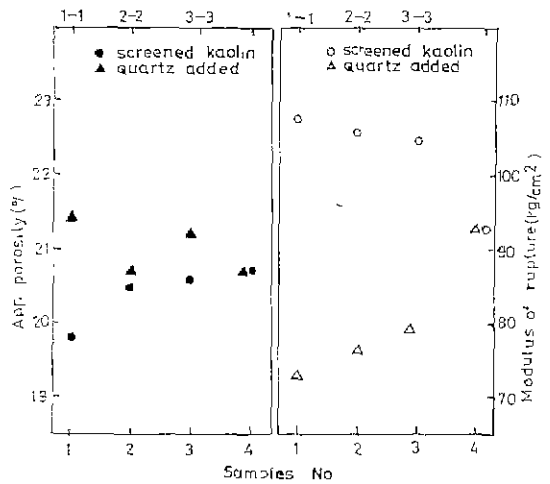


Fig. 8. Relation between modulus of rupture and apparent porosity.

만을 데꾸어 最密充填 組織을 갖기로 한다면 다음과 같은 關係가 成立되며,

$$100 \left( \frac{Wc_1}{\rho c_1} + \frac{Wc_2}{\rho c_2} \right) / \left[ \left( \frac{Wc_1}{\rho c_1} + \frac{Wc_2}{\rho c_2} \right) + \frac{Wt}{\rho t} \right] = 27(\%)$$

이거저  $\rho c_1$ ,  $\rho c_2$  및  $\rho t$ 는 粘土, kaolin 및 chamotte의

比重이고  $Wt$  는 chamotte 의 使用 무게 (g),  $Wc_1$  과  $Wc_2$  는 氣孔을 채우는 데 必要로 하는 粘土와 kaolin 의 使用量 (g) 이 된다. 그런데  $\rho_s = 2.70$ ,  $\rho_{c1} = 2.56$ ,  $\rho_{c2} = 2.52$  이니,  $Wt = 50$  (g),  $Wc_1 = 25$  (g) 이므로  $Wc_2 = -7.36$  (g) 이다. 이는 25%의 粘土量은 chamotte 의 間隙을 채꾸고도 남았음을 意味한다. 따라서 微粒의 粘土와 kaolin 은 chamotte 粒子의 間隙만을 채운 것이 아니고 오히려 粗 中, 微粒의 chamotte 를 Fig. 9 와 같이 粘土, kaolin 이 分散, 點在시키는 組織을 이룬다.

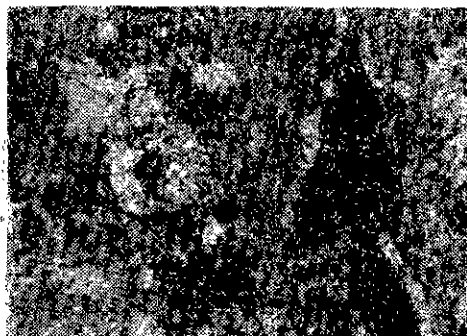


Fig. 9 Microscopic observation of the sample 1. ( $\times 60$ )

그런데 元素 kaolin 粒子는  $0.01 \sim 1 \mu^3$  정도로 微細하므로 kaolin 粒子의 界面은 작 것이며, kaolin 은 熱分解로 脫水가 되어 燒結過程에서 界面間에 內包된 氣體나 脫水로 發生한 氣體가 一部는 組織中에 密閉되기도 하겠지만 開放 氣孔을 形成한 可能性이 크다. 따라서 微細한 kaolin 을 使用할수록 氣孔率은 增加하고 反對로 粗粒이 存在한 kaolin 일수록 微粒 kaolin 量은 줄어들어 氣孔率이 減少된다고 解釋된다. 荷重強度는 構造敏感性이므로 粗粒이나 氣孔等 弱한 部分에 左右되며, 또한 氣孔이 많을수록 骨材部가 적을 수록 減少될 可能性이 많다.

2-2. kaolin 에 含有된 珪石의 影響

kaolin 中에 珪石을 混在시킨 試片의 荷重強度와 氣孔率關係는 Fig. 8 같은데, 含有 珪石이 많을수록 試片의 氣孔率은 大體적으로 增加되는 傾向에 있고 荷重強度는 減少하고 있으며 이 事實은 다음과 같이 解釋된다.

kaolin 의 粗粒部分은 그와같은 粒度分佈를 갖인 珪石으로 代置하였을 때 代置하지 않은 kaolin 을 使用할 때보다 試片의 氣孔率은 크고, 荷重強度는 작아졌다. 이 理由는 粒度分佈가 같아질지라도 粒子의 種類, 形狀, 界面 特性等에 따라서 充填狀態와 燒結過程이 다르므로 明白하지 않다. 그리나 代置物인 珪石의 量이 적고 粒子의 크기가 작을수록 氣孔率은 減少하고, 荷重

強度는 增加하는 結果로 보아 珪石이 氣孔率과 荷重強度變化를 가져오는 因子의 하나라고 볼 수 있다. 卽代置 珪石量이 적을수록 荷重強度가 增加하는 것은 試片中의 遊離 silica 가 冷却過程에서  $\beta$ -quartz  $\rightarrow$   $\alpha$ -quartz,  $\beta$ -cristobalite  $\rightarrow$   $\alpha$ -cristobalite의 轉移를 일으켜 silica 粒子 周邊 結合의 弱화를 가지오며, 이때 또한 強度弱化的 變因에 屬한 開放 氣孔도 形成시킨 것으로 생각된다.

2-3 添加劑 影響

2 調合物과 2-2 調合物에 長石과 絹雲母를 各各 1.3. 5%씩을 添加한 것의 特性中 氣孔率과 荷重強度의 關係는 Fig. 10, Fig. 11 과 같다.

여기서 보면 長石과 絹雲母의 添加量이 增加할수록

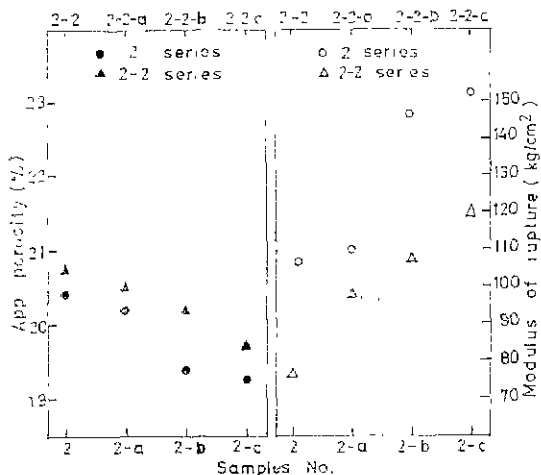


Fig. 10. Relation between modulus of rupture and apparent porosity.

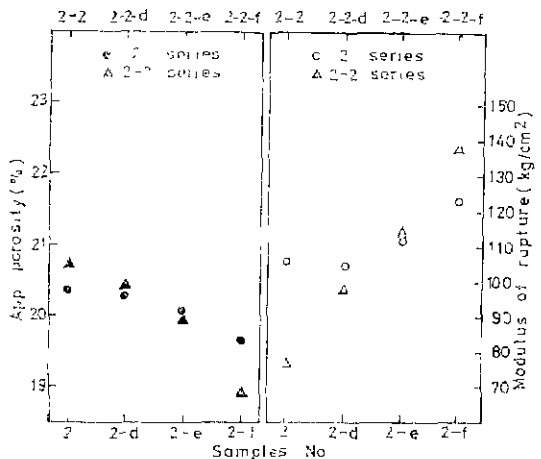


Fig. 11. Relation between modulus of rupture and apparent porosity.

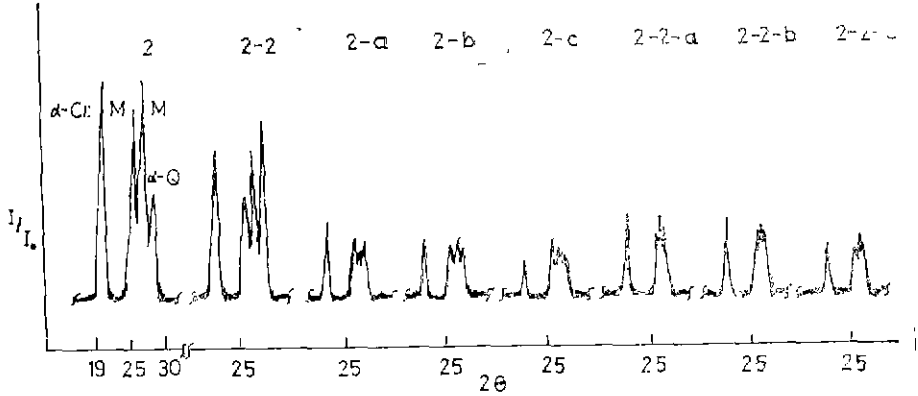
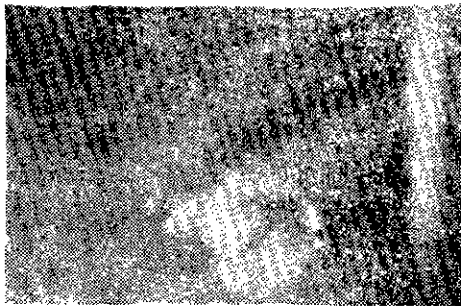


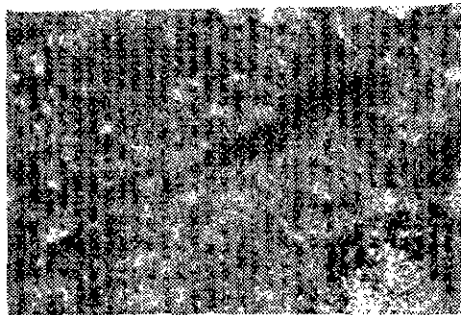
Fig. 12. X-ray diffraction patterns of the samples (Kaolin-Quartz-Feldspar)



(a) Sample 1 (open)



(b) Sample 1 (Close)



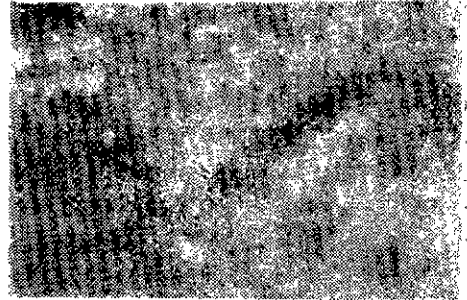
(c) Sample 2-c (Close)

Fig. 13-a Microscopic observation of the sample 1 and the sample 2-c. ( $\times 60$ )

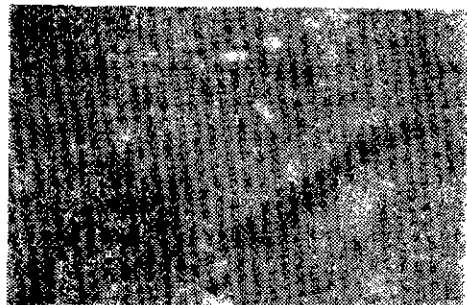
겉보기 기공률은 증가하고 있다 그리고 原 kaolin 調合에 長石을 添加한 것은 粗粒一部를 珪石으로 代置한 調合보다 氣孔率의 減少率과 積層強度의 增加率이 크다. 그러나 絹雲母를 添加한 것은 長石 添加의 影響과 反對로 粗粒一部를 珪石으로 代置한 調合이 氣孔率의 減少率과 積層強度의 增加率이 크다. 이와같은 事實은 다음과 같이 解釋된다.

A. 長石 添加의 影響

長石을 添加하지 않은 2 및 2-2 調合과 이것에 長



(a) Sample 2-f (open)



(b) Sample 2-f (close)

Fig. 13-b Microscopic observation of the sample 2-f. ( $\times 60$ )



石을 添加한 調合의 X線回折 分析을 比較하면 Fig. 12 와 같이  $\alpha$ -cristobalite ( $d=4.05\text{\AA}$ )와 mullite ( $d=3.42, 3.39\text{\AA}$ )의 回折強度는 長石의 添加量이 增加할수록 차차 減少되고 있다. 그리고 顯微鏡 觀察 結果 (Fig. 13-a) 長石이 添加되므로써 유리相과 不透光性 鑛物이 生成되었으며 氣孔이 減少되고 있다. 이 事實들은 長石이 silica 와 mullite 에 對한 融劑로 作用하여 유리相을 이 루었음을 立證한 것이다. 그리고 長石의 添加에 따른 氣孔率의 減少는 長石을 添加하지 않은 試片의 空隙部分을 유리相이 메꾸는 主原因이 있다고 解釋된다. 또한 長石 添加로 인한 強度증가는 強度 低下를 가져오는 氣孔部가 유리相으로 代置된 點과 試片의 冷却過程에서 轉移로 結合의 弱화를 일으키는 遊離 石英이 유리相으로 되어 그 量이 減少된데 主原因이 되는것으

르 思料된다.

B. 絹雲母 添加의 影響

絹雲母의 添加量이 增加할때도 mullite, cristobalite 의 X線回折強度는 減少되고 (Fig. 14) 氣孔은 줄며 代身 유리相이 增加되고 있다. (Fig. 13-b) 따라서 겉보기 氣孔率 低下와 壓入強度 增加는 長石의 效果와 같이 生成된 유리相의 氣孔 代置와 遊離 石英의 減少가 그 主原因 이라고 생각된다. 그런데 겉보기 氣孔率 減少와 壓入 強度의 增加率이 kaolin 의 粗粒一部를 珪石으로 代置 한것보다 原 kaolin 을 使用한것이 큰理由는 같은 量의 絹雲母를 添加했을때 cristobalite 와 Mullite 의 回折強度 및 그들의 相對比가 비슷한것으로 보아 長石質로 形成된 유리相의 粘度가 絹雲母에 依한 유리相보다 작아서 均一하게 組織內에 스미들기 때문이 아닌것 생각된다.

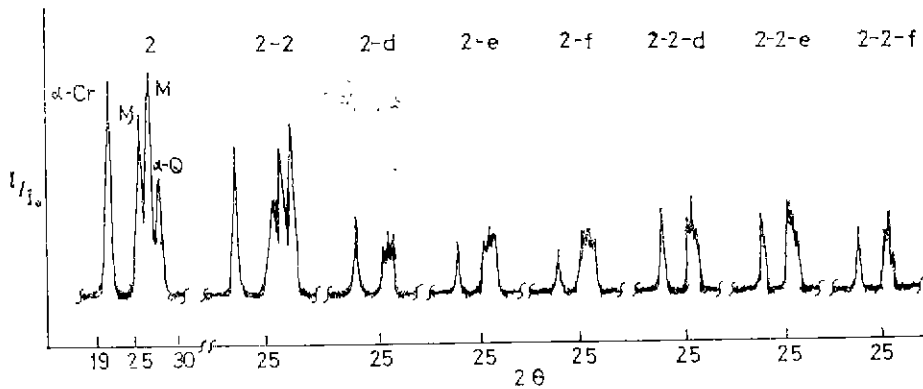


Fig. 14. X-ray diffraction patterns of the samples. (Kaolin-Quartz-Sericite)

IV 結 言

chamotte 質 耐火物의 構成 成分으로서의 遊離石英 이 強度特性에 미치는 影響을 究明하기 爲하여 粒度調整한 chamotte 50%, 粒度와 組成을 變化시킨 kaolin 25%, 可塑性 粘土 25%인 基本 配合에서 얻어진 結果는 다음과 같다.

1. 一定한 chamotte-可塑性 粘土系에 珪石 混在量이 적은 kaolin 을 加한 것은 微細 kaolin 일수록 耐火物의 겉보기 氣孔率과 壓入強度가 나빠지고 있다.
2. 60~325 mesh 篩間의 kaolin 粗粒部를 7.2~15.81%의 珪石으로 置換하여 一定한 chamotte-可塑性 粘土系에 加하면 珪石의 粒子가 크고, 量이 많을수록 겉보기 氣孔率과 壓入強度는 나빠진다.
3. chamotte-kaolin-可塑性 粘土系에서 長石과 絹雲

母는 겉보기 氣孔率과 壓入強度를 改善시키는데 效果的이며, 長石은 珪石 混在量이 적은系에, 絹雲母는 珪石이 많이 混在한系에서 效果가 크다.

參 考 文 獻

- 1) 吉木文平, “耐火物工學” 2nd ed. p75~77, 316~317, 技報堂, 東京, (1963).
- 2) F.H. Norton, “Refractories” 3rd ed. p. 187~192, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, (1959).
- 3) 吉木文平, “耐火物工學” 2nd ed. p. 232~234. 技報堂, 東京, (1963).
- 4) M.D. Beals and S. Zerfoss, “Volume Change Attending Low-to-High Inversion of Cristobalite” *J. Am. Ceram. Soc.*, 27(10), 285~292(1944).

- 5) G. B. Kemmey, "Some Properties of Semisilica Brick" *J. Am. Ceram. Soc.*, **22**(6), 195~199(1939).
- 6) A. E. R. Westman and H. R. Hugill "The Packing of Particles" *J. Am. Ceram. Soc.*, **13**(10), 767~779(1930).
- 7) A. E. R. Westman, "The Packing of Particles: Empirical Equations for Intermediate Diameter Ratios" *J. Am. Ceram. Soc.*, **19**(5), 127~129(1936).
- 8) A. L. Johnson and F. H. Norton, "Fundamental Study of Clay: III, Casting as Base-Exchange Phenomenon" *J. Am. Ceram. Soc.*, **25**(g), 336~344 (1942).
- 9) F. H. Norton, A. L. Johnson and W. G. Lawrence. "Fundamental Properties of Clay: IV, Flow Properties of Kaolinite-Water Suspension." *J. Am. Ceram. Soc.*, **27**(5), 149~164(1944).