

MgO-SiO₂系 磁器에 관한 研究(Ⅱ)

이승상 · 이종근 · 최성철 · 안기성

한양대학교

(1983년 7월 4일 접수)

A Study on the Porcelain Body of MgO-SiO₂ System (Ⅱ)

Eung-Sang Lee, Chong-Keun Lee, Sung-Churl Choi and Ki-Sung Ann

College of Engineering, Han Yang University

(Received July 4, 1983)

ABSTRACT

This study has examined on the effect for the fitting in porcelain body of MgO-SiO system. The mixture was made of corresponding in the theoretical composition of enstatite with Kyul Sung Talc and sea water magnesia cake. Hyup Jin Kaolin, as clay minerals to give the mixture plasticity, was added 10% by weight of the mixture. Feldspar was added in various kinds of 1%-20% by weight of the above mixture.

The mixture with feldspar was fired at the various temperatures from 1300°C to 1400°C.

After the physical properties and microstructures were carefully examined, the following results were obtained.

1. The addition amount of feldspar should generally be from 5% to 10% by weight of the mixture to be good for the properties of the strength and the range of the firing temperature.
2. The 5% addition amount of feldspar was good for the apparent bulk density.
3. 5% and 10% additions showed up stably excellent character with respect to the various properties.

Therefore, when we considered the apparent bulk density and the thermal shock resistance, 5% addition amount of feldspar showed the most excellent properties between 1350°C and 1400°C.

1. 序 論

MgO-SiO₂系 結晶을 主成分으로 하는 磁器素地는 透光性이 우수하여 高級의 裝飾用, 産業用 및 日用品用으로 生産되고 있을 뿐 아니라, dielectric loss 나 power factor가 적어서 高周波 絶緣物로도 많이 使用되고 있다^{1) 2) 3)}.

MgO-SiO₂系 磁器素地에 관한 研究는 1954年 以來⁴⁾로 海水 magnesia 와 滑石, 또는 石英과 海水 magnesia를 使用⁵⁾하여 各種 添加劑를 加하여 持續적으로 研究, 發展되어 오고 있으며, Teruko Tsuji⁶⁾, Nippon Toki⁷⁾, Raju⁸⁾, 佐野⁹⁾, 長島¹⁰⁾, 飯島¹¹⁾, Banerjee¹²⁾ 등에 의해 日本, 美國 등에서 많은 特許와 研究 發表가 있었다. 또한, 이것은 現在 활발히 研究가 持續되고 있는 透光性 magnesia 燒結體에 대한 関心성이 깊고, 耐熱性 透明 magnesia 磁器와 magnesia系 誘電體 生産의 基本

이 되므로, 아직 이分野에 대한 研究가 거의 進行된 바 없고, 技術의 導入도 없는 우리 나라로서는 풍부한 原料資源을 바탕으로 急速히 研究 開發할 必要가 있다

MgO-SiO₂系에서 많이 使用되는 主結晶相으로는 Steatite, Forsterite가 있다. 본 研究에서는 第1報에 이어 國內에서 産出되는 滑石과 海水 magnesia cake를 主原料로 하여 Steatite 理論組成에 맞도록 調合하고 이에 可塑性 添加原料로서 Kaolin을 10%¹³⁾로 固定, 添加한 後, 여기에 G. Goodman¹⁴⁾, Schramm¹⁵⁾, 그리고, Geller와 Creamer¹⁶⁾ 등에 의해 研究된 바 있는 磁器에 유리質 結合을 주고, 좋은 透光性 效果를 나타내는 長石을 變化, 添加하여 燒成溫度에 따른 最適 添加量과 條件을 研究하였다.

2. 實驗方法

2-1 原料 및 試片

본 實驗에서 使用한 原料는 결성 滑石, 삼산화철의 海水 magnesia cake를 主原料로 하고 可塑性 粘土質 原料로서 협잡물이 적은 협진 kaolin, 용제 添加原料로서 金泉長石을 使用하였는데, 이들의 化學 分析値는 Table 1 과 같다.

各 原料는 20mesh 以下로 粗粉碎한 後, 滑石은 48時間 微粉碎하고서, 煨燒해서 인은 magnesia 가 凝結時에 粒子의 結晶成長이 빠르다는 說¹⁰⁾에 의해 wet 상태로 되어있던 magnesia cake와 함께 各各 미리 煨燒시켜서 各 原料를 다시 微粉碎하여 250mesh 以下로 粒度 調節하였다.

Kaolin 은 48時間 濕式 微粉碎하였고, 長石도 24時間 微粉碎해서 各各 250mesh 以下로 均一하게 粒度 調節하였다.

Table 1 Composition of Raw Materials

| | | (Wt %) | | | |
|--------------------------------|--|--------|----------|--------|----------|
| Minerals | | Talc | MgO Cake | Kaolin | Feldspar |
| Comp. | | | | | |
| SiO ₂ | | 65.0 | 1.0 | 42.6 | 63.6 |
| Al ₂ O ₃ | | 2.5 | 0.9 | 40.2 | 21.2 |
| Fe ₂ O ₃ | | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.3 |
| CaO | | 0.8 | 1.4 | 1.6 | 0.6 |
| MgO | | 27.2 | 61.6 | 0.1 | Tr |
| Na ₂ O | | 0.06 | 0.46 | 0.2 | 3.24 |
| K ₂ O | | 0.04 | 0.41 | 0.63 | 9.75 |
| SO ₃ | | . | 0.5 | . | . |
| TiO ₂ | | Tr | Tr | Tr | . |
| Mn ₂ O ₃ | | 0.03 | 0.03 | 0.02 | . |
| Ig. loss | | 4.4 | 33.5 | 13.9 | 0.8 |

MgO-SiO₂ 系 磁器의 主結晶 組成이 되도록 調査하기 위해서 煨燒한 後의 滑石原料의 MgO-SiO₂의 mol 比가 1:1.6인 것을 MgO-SiO₂의 mol 比를 1:1 이 되도록 調節하기 위해서 모자라는 0.6mol 의 MgO 를 magnesia cake 로서 添加하였다. 滑石과 magnesia cake 로서 調整된 組成에 대해 可塑性 粘土質原料인 kaolin 을 重量分率로 10%¹³⁾ 添加하였다. 이 3가지 組成에 대해서 融劑原料인 長石을 Table 2 에서와 같이 重量分率로 1%~20% 範圍로 變化, 添加하고 이들을 F₁~F₆ 로 略稱하였다.

各 調合物은 고무製球를 使用하여 Ball mill 에서 3時間 동안 濕式 混合하였다. 試驗片은 配合索地原料 約 12g 을 秤量하여 金型에 넣고, 800kg/cm² 의 壓力으로 油壓 press 를 使用하여 10×1×0.7(cm) 크기로 成形한 後, 110°C 恒溫 dry oven 에서 充分히 乾燥하였다. 乾

Table 2 Batch Compositions

(Wt %)

| Material | Talc | MgO Cake | Kaolin | Feldspar |
|----------------|------------------------|----------|--------|----------|
| Comp. | | | | |
| F ₁ | MgO1.6SiO ₂ | 0.6MgO | 10% | 1% |
| F ₂ | MgO1.6SiO ₂ | 0.6MgO | 10% | 2.5% |
| F ₃ | MgO1.6SiO ₂ | 0.6MgO | 10% | 5% |
| F ₄ | MgO1.6SiO ₂ | 0.6MgO | 10% | 10% |
| F ₅ | MgO1.6SiO ₂ | 0.6MgO | 10% | 15% |
| F ₆ | MgO1.6SiO ₂ | 0.6MgO | 10% | 20% |

燥된 試驗片은 Siliconit 發熱體 電氣爐中에서 승온속도 150°C/hr 로 상승시켜 1300°C~1400°C 의 所定溫度에서 各各 2時間 維持한 後, 자연 냉각하여 그 溫度에서 의 試驗片으로 하였다.

2-2 物性測定

겉보기 부피 比重과 吸水率은 K.S.L 3114 에 의해 測定하였고, 燒成線收縮率은 K.S.L 4004 에 의해 測定하였다. 靱힘 強度는 K.S.L 3503 에 따라 荷重度 測定器로서 荷重荷重을 測定하여 계산치로 求하였다. K.S.L 에 따른 모든 測定値는 K.S.A 0021 에 따라서 수치의 끝맺음을 하였다. 熱衝擊試驗은 試驗片을 미리 120°C 로 예열된 Siliconit 發熱體 電氣爐中에 신속히 넣이 25分間 保持한 다음 18°C 의 물에 投入하여 급냉 시킨 後에 各 試驗片을 赤色 잉크로 表面을 painting test 하여 均열 유무를 확대鏡을 使用하여 관찰하고 均열이 없는 試驗片은 充分히 乾燥시킨 後에 前의 溫度보다 30°C 높은 溫度段階로 均열이 확인될 때까지 溫度를 變化시키면서 조작을 반복 시행하여 均열이 일어났던 溫度를 熱衝擊抵抗 값으로 하는 약속의 方法으로 行하였다.

2-3 微細構造

各 試驗片은 主結晶, 生成 여부를 檢討하기 위해 X線 回折分析과, 組織의 成長 및 상태를 觀察하기 위해 偏光顯微鏡을 使用하였다. X線 回折分析은 Cu target Ni filter, Scanning speed 4°C/min, Chart Speed 40mm/min 의 條件으로 行하였으며, 偏光顯微鏡은 1000 배의 倍율下에서 觀察하였다.

3. 結果 및 考察

3-1 吸水率

長石을 添加한 Kaolin 을 포함한 MgO-SiO₂ 系 磁器 素地의 吸水率은 Fig. 1 과 같이 燒成溫度 全般에 걸쳐서 長石의 添加量이 增加할수록 燒結이 촉진되어 지는 것을 볼 수 있다. F₁~F₃ 範圍의 組成은 1,325°C 까지

는 높은 吸水率을 보이나 10% 以上の 添加組成인 F₄ ~F₆는 1,300°C로 부터 吸收率이 3% 以下로 적게 나타남을 볼 수 있다. 그러나 모든 組成範圍에 걸쳐서 1,350°C 以上에서는 5% 미만의 좋은 吸水率을 나타내고 있다. 이것은 長石의 용해와 Kaolin 분해 등으로 인한 素地의 open pore의 감소 과정을 거쳐서 全原料가 相關된 glass가 增加하여 open pore를 完全히 채워주기 때문이다. 1,350°C 以上에서는 F₅, F₆가 다소 適量됨을 볼 수 있었으므로 적절한 溫度範圍와 組成은 吸水率로 미루어 보아서는 1,350°C 以上の 燒成溫度範圍에서 F₃, F₄가 적절한 것으로 볼 수 있다. Fig. 1에서 S로 表示된 것은 長石을 添加하지 않았을 때의 상태를 인용¹³⁾한 것인데 長石을 添加한 것과 비교해 볼 때 長石을 添加한 것이 훨씬 낮은 溫度에서 燒結이 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

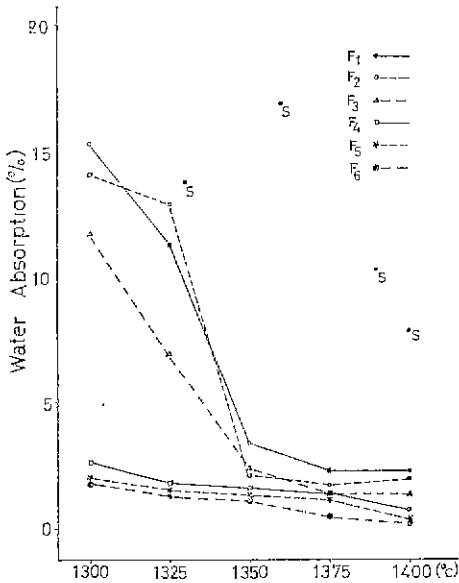


Fig. 1 Water Absorption of Steatite body added Kaolin and Feldspar

3-2 線收縮率

收縮은 素地의 대부분의 기공이 glassy matrix에서 밀폐될 때 완만해 진다¹⁷⁾¹⁸⁾. 즉, 이것은 長石에서 形成되는 matrix와 원組成物 사이의 반응에 따라서 收縮 과정이 달라질 수 있는 것이다. Fig. 2에서 살펴보면, 長石의 添加量이 增加할 수록 收縮率이 적은 變化를 나타내고 있다. 이로서 添加量이 增加할수록 燒結이 촉진되는 것을 알 수 있다. 添加量이 10% 以上인 F₄ ~F₆에 있어서는 全燒成溫度에서 收縮率이 완만하게

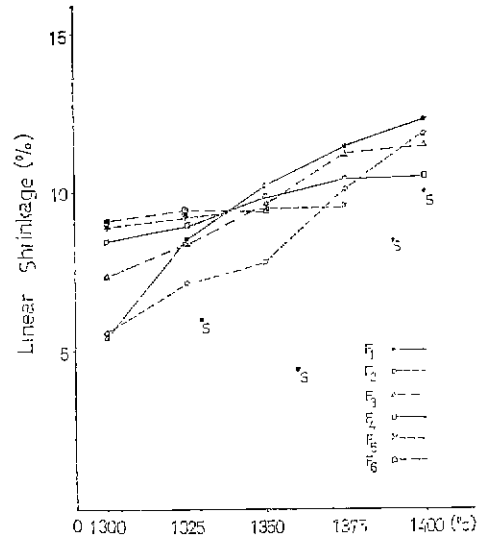


Fig. 2 Linear Shrinkage of Steatite body added Kaolin and Feldspar

브이고 F₃는 1,375°C 以上에서 收縮率이 완만해 지는 것을 볼 수 있다. 全般的으로 S와 비교해 볼 때 收縮率의 變化가 적게 나타나고 있어서 燒成 線收縮率을 吸水率과 같이 燒結進行의 과포로 삼는다면 長石을 添加한 組成들이 S보다 훨씬 낮은 溫度에서 燒結되고 있음을 볼 수 있다.

3-3 취임 強度

높은 品質의 産業用 材料로서 MgO-SiO₂系 磁器를 使用하는 것이 점차 많아지고 있으므로, 素地의 機械的 強度는 더욱 重要한 性質로 되었고, 이것은 微細構造와 밀접한 관련이 있다¹⁹⁾. 또한 一般的으로 취임 強度도 다른 強度와 마찬가지로 素地의 組織에 따라서 變化한다. 특히 物性測定에서 높은 強度를 나타낸 경우 거의 緻密化되고 均一한 微細組織을 나타내고 있음을 偏光顯微鏡觀察로 부터 확인할 수 있다. 여기에서 最高의 強度는 반드시 緻密하게 되었을 때에만 얻어진다고 말할 수는 없다. 예로써 F. Singer의 研究²⁰⁾에 의하면 完全히 緻密한 Vitreous china에서 보라도 기공율이 0.1%~1%일 때 強度는 最高로 된다고 하였다 또한 Waye²¹⁾ 등의 磁器에서 素地의 實驗에서도 기공율이 最少로 되는 溫度보다도 約 10°C 낮은 溫度에서 燒成하였을 때 最高의 強度를 나타내고 있다.

Fig. 4에서 보면 다른 組成보다 F₃, F₄가 溫度의 상승과 더불어 비교적 安定되게 높은 強度를 나타내고 있다. 全般的으로 長石을 添加하지 않을 때 보다 훨씬 좋은 強度를 보이고 있다. 이는 長石을 添加한 素地에

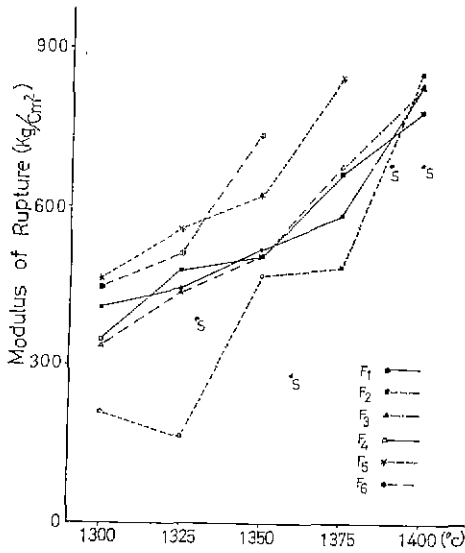


Fig. 3 Modulus of Rupture of Steatite body added Kaolin and Feldspar

서 1,400°C 이하의 온도範圍에서 強度는 最大로 된다는 一般磁器素地에 관한 學說²²⁾과 비교해 볼 때 상당히 잘 부합된다고 본다.

3-4 겉보기 부피比重

겉보기 부피 比重은 一般的으로 吸水率이 적은 경우에 높은 값을 나타내며, 燒成溫度가 상승되더라도 吸水率이 增加하면 比重 값이 적어지는 데 이는 Pore에 의한 영향으로 生覺할 수 있다. 또한 素地가 磁器化할 수록 부피 比重도 增加됨을 볼 수 있다. Table. 3에서 보면 燒結이 어느 정도 이루어진 試驗片의 부피 比重은 2.4~2.7 정도로 나타나고 있는데, 長石을 添加하지 않았을 때¹³⁾의 부피 比重값이 1,330°C에서 燒結된 것이 2.16, 1,390°C에서 燒結된 것은 2.39로 나타난 것

Table 3 Apparent bulk density of Steatite body added Kaolin and Feldspa

(g/cm)

| Temp.(°C) | 1300 | 1325 | 1350 | 1375 | 1400 |
|----------------|------|------|------|------|------|
| Comp. | | | | | |
| F ₁ | 2.07 | 2.23 | 2.49 | 2.64 | 2.70 |
| F ₂ | 2.10 | 2.17 | 2.52 | 5.55 | 2.70 |
| F ₃ | 2.18 | 2.39 | 2.52 | 2.60 | 2.62 |
| F ₄ | 2.39 | 2.45 | 2.50 | 2.52 | 2.55 |
| F ₅ | 2.41 | 2.46 | — | — | — |
| F ₆ | 2.42 | 2.46 | — | — | — |

과 비교해 볼 때 長石의 glassy matrix에 의해 훨씬 낮은 溫度에서 잘 緻密化되고 있음을 볼 수 있다. 대체로 F₃와 F₄가 燒結이 어느 정도 進行된 溫度 以上에서 均一하게 높은 값을 나타내고 있다. 특히 Fig. 4는 破損 強度와 부피 比重의 相關 관계를 나타낸 것인데, 부피 比重에 따른 破損 強度를 各各의 成分別, 溫度別로 plot해 본 結果, 잘 比擬하고 있음을 보여준다. 또한 이는 豫期한 것처럼 명확히 比重이 크고, 素地가 잘 燒結될수록 破損 強度는 커지고 있음을 나타낸다^{22,23)}.

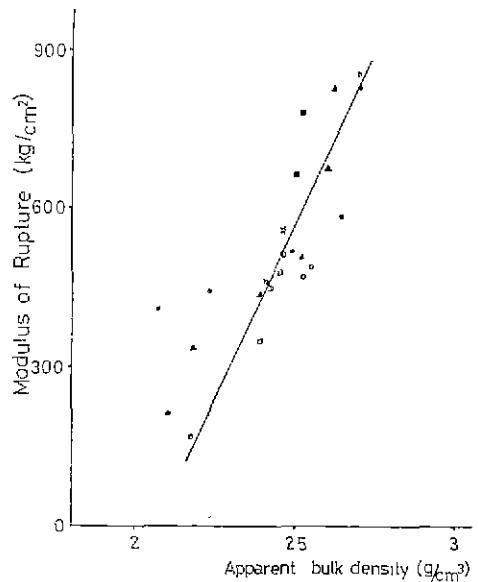


Fig. 4 Relation between modulus of rupture and Apparent bulk density.

3-5 熱衝擊抵抗

熱衝擊에 의한 파괴는 급열 또는 급냉에 따라서 素地 内部에 Strain이 發生하는 것이 직접적인 원인으로 보고²³⁾ 있고, 또한 보편적으로 磁器素地는 多結晶相으로 되어 있으며, 더우기 상당량의 成分이 다른 glass相을 함유하고 있으므로 加熱 또는 냉각하면 溫度 구배에 관계없이 여러 원인에 의해서 内部 Strain이 發生하므로 熱衝擊抵抗이 작은 것으로 나타난다. 材料의 熱衝擊抵抗에 영향을 미치는 요소로는 材料의 表面熱移動계수, 즉 材料를 둘러싸고 있는 매체가 熱을 흡수하는 능력에 의한다고 본다²⁰⁾. Table 4에서 보면, 全體的으로 磁器化가 된 것이 磁器化가 덜 된 것보다 낮은 값을 보여주고 있으나 全體的으로 300 以上の 좋은

Table 4 Thermal Shock Resistance of Steatite body added Kaolin and Feldspar

| Temp. (°C) | (°C) | | | | |
|----------------|------|------|------|------|------|
| | 1300 | 1325 | 1350 | 1375 | 1400 |
| F ₁ | 480 | 390 | 390 | 360 | 360 |
| F ₂ | 480 | 390 | 390 | 360 | 360 |
| F ₃ | 390 | 390 | 360 | 360 | 330 |
| F ₄ | 360 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| F ₅ | 360 | 300 | — | — | — |
| F ₆ | 360 | 300 | — | — | — |

값을 나타내고 있다. 특히 1,350°C 이상에서 F₃가 360~330의 높은 熱衝擊抵抗値를 나타내고 있어서 X線 回折分析上에서 主結晶相으로 나타난 Forsterite가 熱衝擊抵抗性이 좋지 않은 特性을 가짐에도 불구하고 상당히 좋은 값을 나타내고 있다.

3-6 X線 回折分析

Fig. 5에서 F₃ 組成을 溫度變化에 따라서 살펴보면 Clino-enstatite와 Forsterite가 主結晶相 peak를 이루고 있고, Orthoclase와 結晶構造란 다른 microcline의 몇몇 主 peak를 찾아볼 수 있다. 뚜렷한 현상은 아니지만 結晶의 成長發達을 다소 억제한다는 研究發表²⁾가 있는 Excess MgO나 素地強度를 저하시키고^{2b)} 比

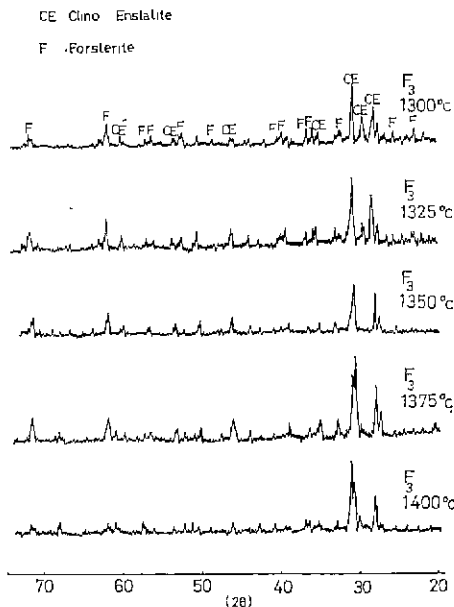


Fig. 5 X-Ray Diffraction Patterns of F₃ body VS. temperatures.

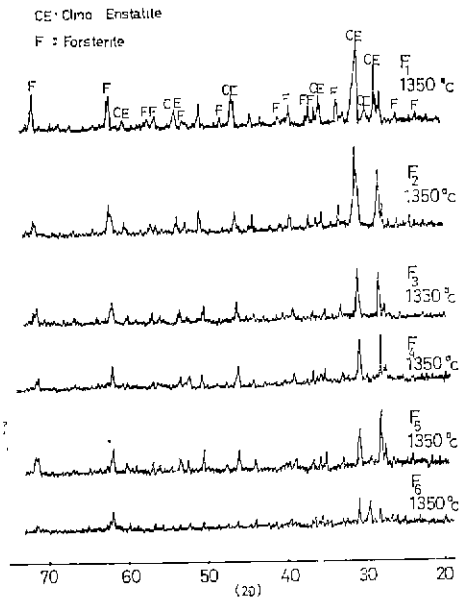


Fig. 6 X-Ray Diffraction Patterns of F-Series bodies at 1350°C

重과 체적 변화를 일으키기 쉬운 Excess SiO₂의 peak가 나타나지 않음은 素地の 좋은 物性과 잘 일치한다.

또한 Fig. 6은 1,350°C에서 組成別로 X線 回折分析을 해 본 것인데, 별 차이없이 같은 主結晶相 peak가 나타나고 있다.

3-7 微細構造

Fig. 7과 Fig. 8은 溫度에 따른 F₃ 組成의 偏光顯微鏡투사 寫眞이다. 이것은 試片을 박편상으로 만들어 1,000배의 배율下에서 觀察한 것인데, 1,300°C로부터 長石의 添加에 의한 glassy matrix의 속에서 結晶이 서서히 析出되고 있음을 볼 수 있다. 이때 結晶成長機構는 過飽和狀態의 溶液相으로부터 徐冷操作에 의해 溶質이 結晶으로 析出된 것으로 보인다. 溫度가 더욱 상승됨에 따라서 結晶들이 glassy matrix 界面을 따라서 채워지고 있고, 거의 燒結된 것으로 보이는 1,400°C에서는 glassy matrix와 結晶이 거의 均一하고 緻密하게 이루어져 있음을 볼 수 있다.

또한 溫度와 더불어 偏光顯微鏡觀察下의 構造를 強度와 부피 比重의 값과 비교해 볼 때, 잘 일치됨을 볼 수 있다.

4. 結 論

MgO-SiO₂系 磁器素地に Kaolin을 10% 固定 添加

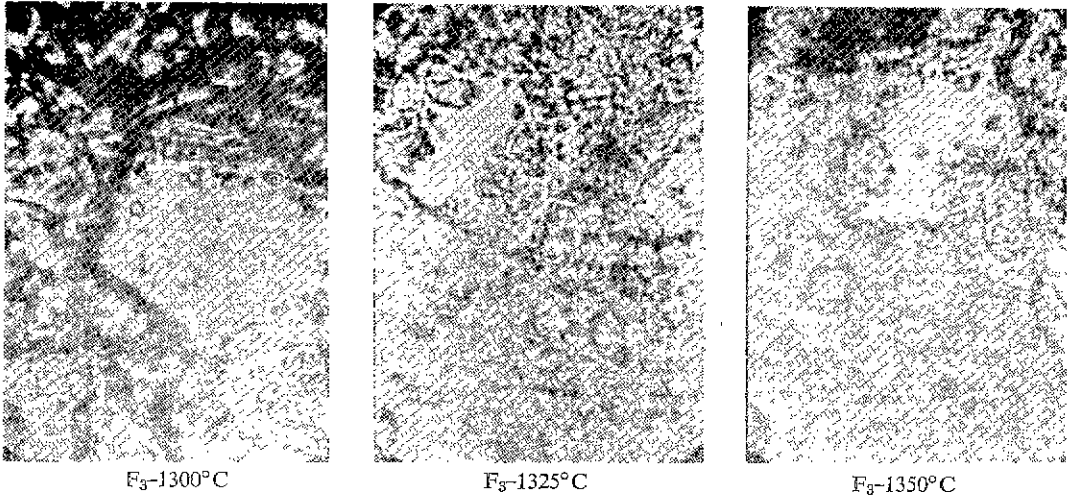


Fig. 7 Polarization Microphotographs of F_3 bodies vs. Temperatures.

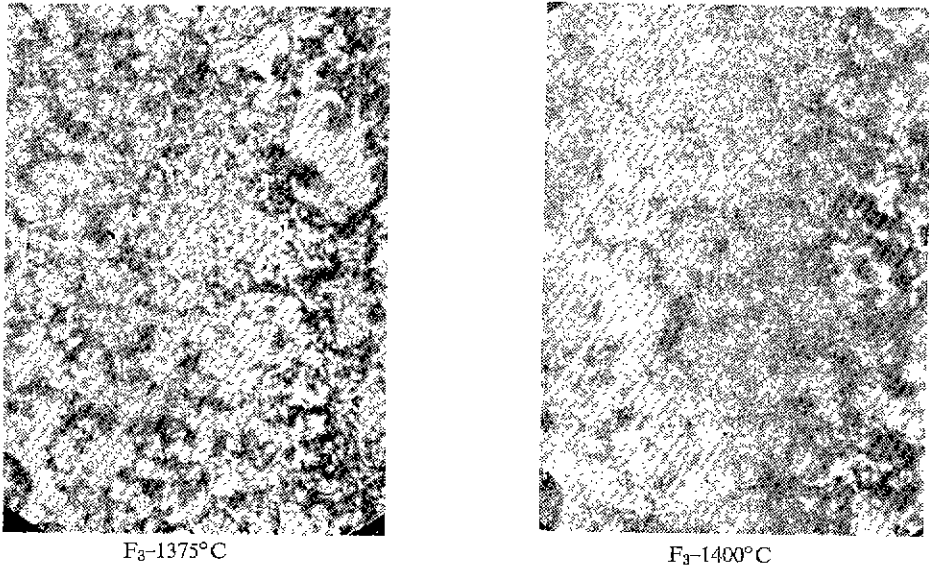


Fig. 8 Polarization Microphotographs of F_3 bodies vs. Temperatures.

하고, 이 調合物에 대하여 長石을 重量分率로 變化, 添加하였을 때, 實驗結果 및 考察로 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

1. 燒成溫度를 저하시키기 위해서는 長石의 添加量이 많을수록 좋으나 強度面을 生贖할 때 $F_3 \sim F_5$ 범위가 적절한 長石의 添加範圍로 나타났다. 이에 燒成溫度範圍를 考慮해 본다면 $F_3 \sim F_5$ 중에서 특히 F_3 와 F_4 가 우수한 것으로 보인다.

2. 겔보기 부피 比重面에서 觀察해 보면, $1,350^\circ\text{C}$ 以上에서 F_3 가 F_4 보다 훨씬 緻密한 좋은 特性을 나타내고 있다.

3. 偏光顯微鏡觀察로 부터 結晶成長 과정은 長石의 유리質 matrix 속에서 結晶이 析出하여 溫度가 상승함에 따라서 matrix 界面으로 부터 結晶이 堆積되면서 素地가 緻密해져 간다.

4. 韜般 物性を 微細構造와 綜合하여서 分析한 結果 F_3 와 F_4 가 強度面에서 安定하게 좋은 性質을 나타내지만 겔보기 부피 比重과 熱衝擊抵抗性を 考慮해 볼 때 F_3 가 $1,350^\circ\text{C} \sim 1,400^\circ\text{C}$ 의 溫度範圍에서 가장 物性が 優秀하게 나타났다.

本 研究은 1982年度 文敎部學術助成研究費에 依하여 遂行된 것임.

參 考 文 獻

- 1) 技報堂, “窯業工學 Hand book” Japan. 技報堂 (1964).
- 2) C. W. Parmelee, G. H. Baldwin, “Talc as a body material” *Trans. Am. Ceram. Soc.*, 15. 532-546 (1913).
- 3) R. L. Stone, J. L. Stone “Physical chemistry of firing steatite ceramics.” *J. Am. Ceram. Soc.*, 26(10) 333-334 (1943).
- 4) Louis, Navies, “Advances in ceramics related to electronic tube developments.” *J. Am. Ceram. Soc.*, 37(8) 329(1954).
- 5) 佐野資郎, 石井英一, 平井道雄, 杉浦正敏, “Forsterite 磁器の性質に及ぼす Kaolin の影響” 日窯協, 71(2) 231 (1963).
- 6) Teruko Tsuji, “Ceramics for decorative purposes.” Japan. PAT 6334 (1956).
- 7) Nippon Toki, “Manufacture of a white porcelain body of high translucency and high strength.” Japan. PAT 233, 440(1972).
- 8) A. P. Raju, I. A. Aksay, J. A. Pask, “Permeation of silicates in magnesia and forsterite compacts.” *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 52(2) 166-169(1973).
- 9) 佐野資郎, “透光性多結晶 magnesia 燒結體の製造法” Japan. PAT 22921(1971).
- 10) 長島秀夫, “透光性多結晶 magnesia 質燒結體の製造法” Japan. PAT 16245(1974)
- 11) 飯島典久, “透光性 magnesia 磁器の製造法”, Japan. PAT 26692(1974).
- 12) Banerjee M, Budworth D. W, “The preparation of transparent magnesia bodies II by sintering.” *Trans. J. Brit. Ceram. Soc.*, 71(2) 51-53 (1972)
- 13) E. S. Lee, C. K. Lee, “A study of the porcelain body of MgO-SiO system.” *J. Kor. Ceram. Soc.*, 19(2) 139-144(1982).
- 14) G. Goodman, “Relation of microstructure to translucency of porcelain bodies.” *J. Am. Ceram. Soc.*, 33(2) 66-72(1950).
- 15) E. Schramm, “The effect of potash and soda feldspars in china body.” *J. Am. Ceram. Soc.*, 10(12) 1005-1006(1927).
- 16) R. F. Geller, A. S. Creamer. “Investigation of feldspar and its effect in pottery bodies.” *J. Am. Ceram. Soc.*, 14(1) 30-71(1931).
- 17) E. S. Lee, K. Hamano, “Studies on the densification process of kaolinfeldspar bodies.” *J. Jap. Ceram. Soc.*, 51(1) 7-16(1973).
- 18) K. Hamano, E. S. Lee, “Studies on the densification process of Kaolin-Quartz-Feldspar triaxial porcelain bodies.” *J. Jap. Ceram. Soc.*, 51(2) 64-76 (1973).
- 19) 窯協講座小委員會, “Ceramics の機械的性質” 日窯協 (1979).
- 20) F. Singer, “Sanitary vitreous china.” *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, 40(4) 119-149(1941).
- 21) B. E. Waye, M. Ashley, B. Gibson, B. Hales, G. James, “On the vitrification and fired properties of an electrical porcelain body.” *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, 62(5) 421-441(1963).
- 22) E. S. Lee, “Studies on the mechanical properties of porcelain bodies.” *J. Kor. Ceram. Soc.*, 11(3) 69-79(1974).
- 23) K. Hamano, E. S. Lee, “Studies on the mechanical properties of porcelain bodies.” *Jap. Tech. Bull.*, 103(3) 95-111(1972).
- 24) 杉浦正敏, 佐野資郎, 石井英一, 平井道雄, “Influence of excess magnesia on the properties of forsterite porcelain.” 日窯協, 70(3) 71(1962).