

뉴 세라믹스 工程技術의 要素(I)

鄭 淳 吉
韓國뉴세라믹스研究所 所長



●1946년생
●기계공학(재료파괴)을 전공, 방탄세라믹스, Engineering Ceramics의 파괴인성강화에 관심을 집중하고 현재 뉴세라믹스 종합연구개발 참여중에 있다.

1. 머리말

古代 石器時代의 재연출로 묘사되는 뉴세라믹스 時代의 到來는 現代 新石器時代로 命名될 법도 하여 人類文明 歷史를 原狀復歸하는 느낌을 준다. 그러나 古典 세라믹스와는 달리 재료의 微視組織 및 物性を 應用 目的에 따라 制御할 수 있는 데에 그 尖端技術性을 갖고 있다고 할 수 있다. 이러한 微視組織 및 物性の 制御에 必要條件으로 되는 것은 적절한 基礎製造工程을 確立하는 일이다.

세라믹스의 製造工程은 金屬, polymer와 類似點을 갖고 있으나 두 가지 性質 즉, 高溫 耐熱性(refractoriness)과 脆性(brittleness) 때문에 크게 다른 점을 가지고 있다. 高溫 耐熱性은 세라믹스의 高溫耐熱的 環境에 사용할 수 있음과 동시에 이 性質은 高溫工程을 내포하고 있다. 세라믹스의 脆性 또한 冷間壓延과 같은 變形工程(working process)을 허용할 수 없음을 알 수 있다. 필요는 創造를 낳기 때문에 세라믹 제품을 위한 唯一無二한 工程法들이 많이 개발되어 왔으며 이들 대부분은 粉末工程으로 대표된다. 결국 세라믹스 製造工程技術은 高溫工程과 粉末工程의 最適聯關工程法을 찾는 것으로 定義될 수 있다. 따라서 뉴 세라믹스 製造工程技術은 高純度 微細原料로 粉末工程 및 高溫工程을 目標性質(target property)에 부합하도록 最適制御하는 工程技術이라 하겠다.

粉末工程은 原料處理 및 成形工程, 高溫工程은 곧 燒結工程이 되는 것이다. 일반적으로 金屬과 폴리머인 경우 加工工程이라 함은 成形工程과 機械加工工程을 총칭하는 경우가 많으나, 세라믹스인 경우는 그 脆性 때문에 成形工程和 塑性 以後의 加工工程은 분리된다. 한편 세라믹스는 독립적인 사용보다는 타 재료와 특성연계적으로 사용되는 경우가 많으므로 타 재료와의 접합을 위한 工程이 必須的이다. 특히 세라믹스 薄膜的인 입장에서 피복 즉, 蒸着技術과 纖維化, 多孔質化, 單結晶化를 포함하는 形狀化 技術은 세라믹스의 應用 多변화를 위한 必須工程이라 하겠다.

뉴 세라믹스 工程은 基本(一般)工程和 應用(特別)工程으로 대별되며 다음과 같이 정리할 수 있다.

- | | | |
|------|---|--------------------------|
| 基本工程 | } | · 原料工程 |
| | | · 成形工程 |
| | | · 燒結工程 |
| 應用工程 | } | · 加工工程 |
| | | · 接合工程 |
| | | · 蒸着工程 |
| | | · 形狀化
(纖維化, 多孔質, 單結晶) |

다음에 이들 工程技術에 대한 主要 要素를 간단히 各論으로 說明하고자 한다.

2. 原料 技術

2.1 基礎原料의 生成

뉴 세라믹스는 다른 재료에 비해 製品形狀 및 品質微細組織에 대하여 原料가 直接的인 영향을 주기 때문에 原料의 調製와 配合는 매우 重要하다. 동일 화학조성의 제품에도 形狀, 微細組織, 性能 및 使用 目的에 따라 각각 製造 工程이 다르고, 또 제조공정에 따라 다른 原料 調製技術이 뒤 따른다. 즉, 최초 粉末의 성질은 結果的 生産品의 성질에 直接 관계된다.

원리기술은 出發原料로부터 熔融, 假燒와 氣相反應 등의 熱處理工程의 과정을 거쳐 酸化物, 炭化物, 窒化物의 기초원료를 얻고 粉碎·調製하여 成形원료로 만드는 일련의 技術을 총칭한다. 출발원료 純度(purity)가 그 要素이

다. 그것은 불필요한 粒成長(grain growth) 및 性質 감퇴에 연관되기 때문이다. 뉴 세라믹스의 기초원료를 얻는 生成反應을 요약하면 표 1과 같다.

酸化物原料로는 熱分解가 基本反應이다. 固體反應은 2種 以上の 陽이온을 함유하는 複酸化物의 合成에 이용되며 強磁性 페라이트 등의 spinnel 化合物 및 強誘電體, 壓電體用 perovskite構造의 化合物이 合成된다.

複鹽의 熱分解 및 共沈法, Alkoxide法, 噴霧法을 이용한 열분해는 異種의 陽이온의 混合이 보다 均一하게 되고 또 分解生成 時의 酸化物이 反應活性되는 등의 利點이 많고, 一定 化學組成比의 原料調整에 널리 應用된다.

특히 Alkoxide는 Alcohol의 水酸基의 水素를 金屬으로 置換한 化合物로서 물을 接觸하여 急速히 加水分解하여 水酸化物로 되므로 成分

표 1 뉴 세라믹스 基礎原料 生成方法

名 稱	反 應 例	備 考
熱 分 解	$Al_2(SO_4)_3 \longrightarrow Al_2O_3$ $PbTiO(C_2O_4)_2 \cdot 4H_2O \longrightarrow PbTiO_3$	固 相
固體反應	$MgO + Al_2O_3 \longrightarrow MgAl_2O_4$ $BaCO_3 + TiO_2 \longrightarrow BaTiO_3$	(固·固)相
炭 化	$SiO_2 + C \longrightarrow SiC$	
電 弧 法	$Al + H_2O \longrightarrow Al(OH)_3 \longrightarrow Al_2O_3$ (球狀微粒子)	(固·液)相
窒 化	$Si + N_2 \longrightarrow Si_3N_4$ (α · β 型 混在)	
還元窒化	$SiO_2 + C + NH_3 \longrightarrow Si_3N_4$ (α 型)	(固·氣)相
共 沈 法	$(TiCl_4 + BaCl_2) + (4NH_4OH + (NH_4)_2CO_3) \longrightarrow (TiO_2 \cdot 2H_2O + BaCO_3) \downarrow$	
Alkoxide法	$Ba(OCH_3)_2 + Ti(OC_4H_9)_4 \longrightarrow BaTiO_3$	
加水分解	$ZrOCl_2 + H_2O \longrightarrow ZrO_2$	液 相
噴 霧 法	$Mg(NO_3)_2 + Mn(NO_3)_2 + Fl(NO_3)_2 \longrightarrow (Mg_{0.5} \cdot Mn_{0.5})Fl_2O_4$	
氣相酸化	$Zn(g) + O_2 \longrightarrow ZnO$	
氣相熱分解	$CH_3SiCl_3(g) \longrightarrow SiC(\beta型 微粒子)$ $TiCl_4(g) + O_2 \longrightarrow TiO_2$	氣 相
氣相反應	$TiCl_4 + C_xH_y + H_2 \longrightarrow TiC$ $SiCl_4 + NH_3 + H_2 \longrightarrow Si_3N_4$	



그림 1 뉴 세라믹스 基礎原料 粉末의 例

金屬이온의 分離가 일어나기 어려운 우수한 混合金屬水酸化物을 낸다.

또한 加熱處理에 의한 水溶液의 加水分解法은 Zirconium, Hafnium, 주석 등 高原子價의 金屬酸化物에 적합한 合成法으로서, 水溶液 中에 Sol狀(顯微鏡으로는 보이지 않는 分子보다 큰 粒子가 液體 中에 分散되어 流動性을 나타내는 狀態) 酸化物의 超微粒子를 형성시킨다.

炭化硅素(SiC), 炭化티탄(TiC), 炭化지르코늄(ZrC) 등 炭化物 原料는 주로 酸化物 粉末의 炭素에 의한 直接炭化反應으로 合成한다. 또한 氣化性의 鹵素化合物 및 水素化合物을 利用한 氣相熱分解, 氣相反應 등 氣相에 의한 製造도 活發히 行해지고 있다.

窒化物 기초원료를 위하여는 金屬의 窒化, 酸化物의 還元窒化 및 氣化性 鹽化合物과 암모니아의 反應 등이 있다. 그림 1은 시판 알루미늄 粉末과 加水分解에 의한 알루미늄 粉末 및 磁性粉末 Fe_2O_3 를 보인다.

이렇게 生成된 기초원료는 成形原料로 조제되기 전에 최종 燒結體의 目標物性에 적합한 微粒子의 球狀粉體形態 粒子徑과 均一한 組成을 가져야 하며, 粒子徑分布를 調節하여야 한다. 이러한 基礎原料의 粉末特性要素를 要約하면 표 2와 같다.

소요 분말특성을 얻기 위하여 밀링 공정을 통하여 基礎原料를 分碎한다. 分碎方法은 壓縮, 衝擊, 剪斷 및 摩擦로 분류되며 그 方法에 따라 粒子의 形狀이 달라진다. 壓縮法은 약한 타원 粒子를, 그리고 衝擊法과 摩擦法은 강한 球狀粒子를 形成시킨다. 微細粒子는 주로 後者의 方法으로 얻는다. 分碎時에 粉末에 가해진 變형에너지는 또한 燒結時의 driving force로 기여하게 된다. 이면에서는 dry ball-milling이 効率의이다. 보울 밀링인 경우는 回轉速度와 時間 및 충전밀도가 공정要素이며 高速回轉 때에는 media가 한쪽에 쏠려 줄을 짓고 空間에 떨어지지 않으며, 低速回轉이면 media가 미끄러지지 않는다. 이 점에서는 振動밀은 効率의 方法이다.

표 2 基礎原料의 粉末特性要素

化學組成	純度, 非化學量論性, 微量成分
粒子性質	結晶性, 欠陷의 種類와 量, 粒徑分布, 粒徑, 粒子形狀(球, 板, 針, 纖維)
凝集狀態	Aggregate 와 Agglomerate, 強度, Size, 形狀, 密度
表面性質	比表面積, 吸着, 偏析
粉末特性	流動性, 體積密度(bulk density)

分碎 後에는 粉末의 特性分析(characterization)을 工程間에 실시하여 표 2에 주어진 各種 要素가 目標을 달성하였는지 確認하여야 한다. 粒度分析에는 Sedimentation法, 현미경법, Layer法 그리고 X선廻折法 등이 있다. 比表面積測定은 BET法이 일반적이며 Sedimentation法에 의한 粒度(d_{SED})와 BET法에 의한 粒度(d_{BET})의 比 d_{BET}/d_{SED} 는 Aggregation指數를 나타낸다. 粉末의 形狀 및 조도는 顯微鏡 또는 SEM, 또한 相(phase) 및 原子分布은 TEM, EDAX 및 XRD 등으로 分析한다. 특히, 粉末表面의 化學的 特性은 主要하며, 이온化, 이온吸着·分離에 의한 charging機構, 그리고 현탁액 속의 전기복합층(electrical double layer) 등은 粉末의 流動性을 지배하는 主要 特性要素이다. 以外的 粒子群의 체적밀도(bulk density), 振動을 가한 後의 Tap密度 및 분말적재 時의 斜角度(angle of res) 등은 主要 性質分析의 要素이다.

2.2 成形原料의 製造

세라믹의 形狀을 成形하기 전에 成形用 原料를 준비하여야 한다. 이를 위한 成形原料工程은 原料調合工程(미량 첨가제 혼합, 점도조정, pH조정, Z전위차조정, 밀링) 및 顆粒化工程으로 대별할 수 있다.

原料調合工程은 뉴 세라믹스의 核心의인 技術로서 主基礎原料에 各種 添加劑를 適定量으로 投入하여 mill로서 混合하는 工程이다. 燒結 전의 취급을 위한 強度부여, 粒子群의 塑性부여, 粒子間 및 成形物 金型間의 潤滑 등을 위하여 많은 種類의 添加劑가 투입된다. 표 3은 이러한 添加劑들의 技能을 整理한 것이다.

效果的인 結合劑로서는 dextrine과 같은 starches, MC(methyl cellulose), PVA(polyvinyl alcohol), 천연고무 등과 같은 cellulose derivative를 사용한다. 水溶性 可塑劑(plasticizer)는 高分子量의 methyl cellulose, starch 등이다. 低密度의 polyethylene과 같은 thermoplastic polymer는 射出成形工程

表 3 뉴 세라믹스 成形助劑의 機能

添加劑	機能
結合劑	成形性, 成形體의 強度
潤滑劑	型離脫, 粒子間의 미끄러짐
可塑劑	結合劑膜의 可撓性 改善, 全體의 可塑變形을 위한 調劑
解膠劑	pH制御, 粒子表面電荷制御, 分散
表面活性劑	液體의 表面張力 低下
保水劑	加壓할 때 水分의 스며들 防止
帶電防止劑	電荷制御
消泡劑 또는 泡安定劑	發泡防止 또는 良好한 泡의 強化
不活性化劑	바람직하지 않은 이온의 不活性化
殺黴劑 및 殺菌劑	老化에 따른 品質低下에 대한 安定化

에 쓰여진다. Paraffine wax, PEG(polyethylene glycol)은 內部潤滑劑 및 可塑劑이고, 기름, 비누성분은 金型表面의 潤滑劑로 緻密化에 기여한다.

基礎原料와 各種 添加劑가 調合되어 混合工程을 거친 後에 顆粒化工程(granulation process)을 거침으로써 成形原料가 된다. 顆粒化는 成形體(green body)의 體積密度의 증가, 金型에 분말을 적재할 때의 偏差最小化, 적재부피의 最小化 그리고 粉末 적재 時의 自由流動性부여(流動時間短縮)을 위한 必須工程이다. 이렇게 된 顆粒은 移送取扱을 위한 최소한의 強度를 유지하여야 하나 成形 時에 쉽게 부서져야 하므로 그 調節이 主要하다. 顆粒化工程에는 일반적으로는 spray drying(分散乾燥法)을, 특별한 경우에 freeze drying(凝固乾燥法)을 적용하고 있다. 噴霧乾燥法은 調合된 原料용액을 건조실 속에서 노즐분사 또는 원판회전에 의하여 약 10~20 μ m의 작은 방울로 微分하여 건조시키는 顆粒化工程으로서 성분간의 편석이 급속기화에 따라 작은 顆粒 속에 制限된다. 그

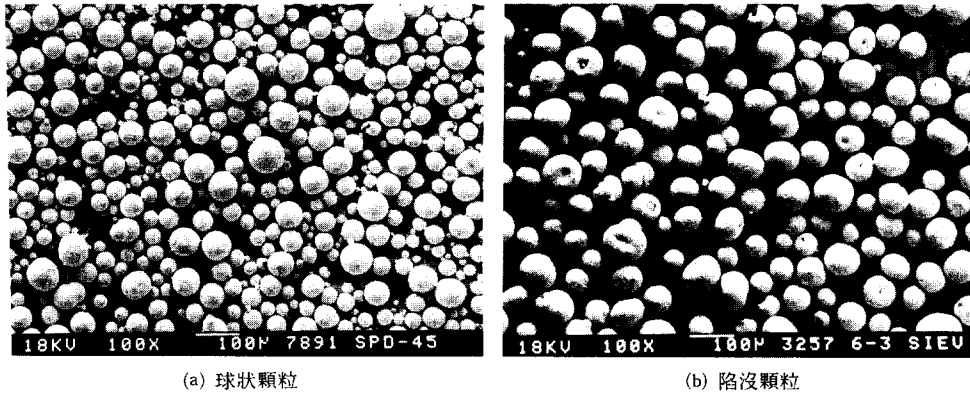


그림 2 알루미늄나 顆粒

림 2는 알루미늄나 과립을 보이며 球狀顆粒이 되어지도록 工程을 制御하여야 한다. 凝固乾燥法은 hexane 또는 액체질소의 용기 속에 원료용액을 분무하여 급속 냉각응고가 이루어지게 하여 편석을 최소화하는 低溫工程으로 昇華에 의하여 乾燥된다. 이렇게 형성된 顆粒은 成形工程用 원료로 準備된 것이다.

3. 成形 技術

成形工程은 密度의 극대화 및 均一化를 목표로 한 예비形狀의 製造工程이다. 成形工程은 流體成形, 可塑成形 및 粉末成形으로 대별하여 工程方法에 따라 분류하면 표 4와 같다.

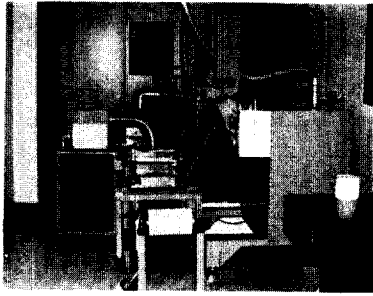
표 4 뉴 세라믹스 成形工程의 分類

流體成形	鑄入成形 (slip casting)
	테이프成形 (tape casting)
可塑成形	押出成形 (extruding)
	射出成形 (injection molding)
粉末成形	一軸加壓成形 → press成形 (die/dry pressing)
	靜水壓成形 (isostatic pressing)
	振動成形 (vibro-compaction)
	爆發成形 (dynamic/shock/explosive compaction)

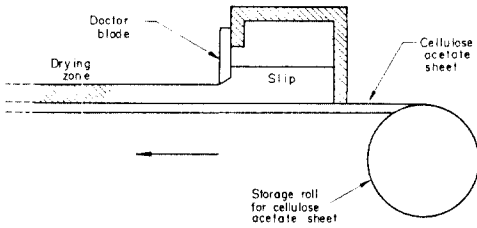
各 工程에 대하여 간단히 各論으로 說明하고자 한다.

3.1 鑄入成形 (Slip Casting)

鑄入成形은 일반 生活陶磁器 및 특수 耐熱세라믹의 복잡 形狀 製造工程에 흔히 사용되는 工法이다. 懸濁液 (slip, fluid suspension)을 여과기능을 하는 多孔性 石膏型에 부우면 溶媒는 吸收되고 입자만 石膏型에 층상으로 흡착성장한다. 排水鑄入成形에서는 적절한 시간에 벽 두께를 制御하여 슬립을 쏟아 버리면 中空形狀이 成形된다. 固體形鑄入成形에서는 슬립을 계속적으로 添加하여 中實形狀을 만든다. 이 때에 固體-流體비가 높을수록 흡착율이 높아 바람직하다. 때로는 振動을 주어 流動性을 높이기도 하나, 갑작스러운 流動性의 斷切이 생길 가능성이 높다. 따라서 懸濁液 속의 높은 고체 비율을 얻기 위하여는 解膠劑 및 帶電防止劑 등을 添加하여 粒子表面의 電荷를 制御해야 한다. 알루미늄의 경우 pH 4 정도에 염산을 添加하면 流動性이 좋으며 粘土를 포함한 懸濁液에는 sodium silicate, sodium carbonate 또는 sodium polyphosphate의 解膠劑가 유용하다. 石膏재료는 燒石膏로서 석고·물의 配合이 100 : 75 정도로 製作된 2 μ m 정도 크기의 높은 氣孔率을 갖는 것으로 表面이 매끄럽고 치수 安全性이 높아야 한다.



(a) Doctor blade 成形機



(b) Doctor blade 成形機의 構成圖

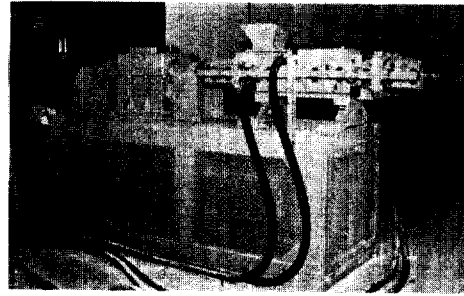
그림 3 Doctor blade 成形

3.2 테이프 成形(Tape Casting)

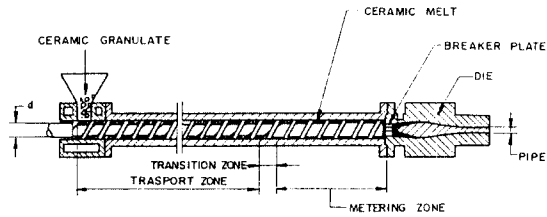
電子機器用 세라믹스基板 및 IC패키지用 세라믹스를 위한 薄板狀의 成形體를 製造하는 경우는 테이프成形法이 利用된다. 테이프成形의 代表的인 方法은 印刷機, 抄紙機 등에 사용되던 doctor blade法으로 그림 3에 方法 및 實物例가 주어져 있다. 슬립(슬러리)을 연속적으로 얇게 運送 필름 위에 입혀 薄膜成形하며 이 때의 薄膜의 두께는 블레이드의 높이, 乾燥 時의 收縮率을 嚴密制御하여 調節하며, 슬립의 粘度, 成形速度 등의 因子는 主要 工程要素이다. 最近에는 doctor blade 대신에 多段壓延方式에 의한 高密度 成形法도 실시되고 있다.

3.3 押出成形(Extruding)

세라믹스 原料粉體에 可塑性을 주기 위하여 成形助劑 및 각종 有機結合劑를 混練하여 原料混合物(杯土)을 調製하고 소정의 形狀을 갖는 金型을 通하여 押出し켜 成形品을 얻는 方法이다. 一定한 斷面形狀을 갖는 長 製品의 제조에 適當하며 爐心管, 保護管 그리고 각종



(a) Extruder 成形機



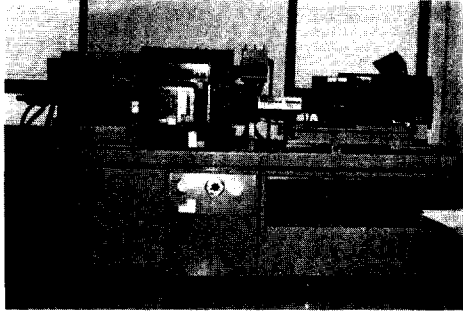
(b) Extruder 成形機의 斷面圖

그림 4 押出成形

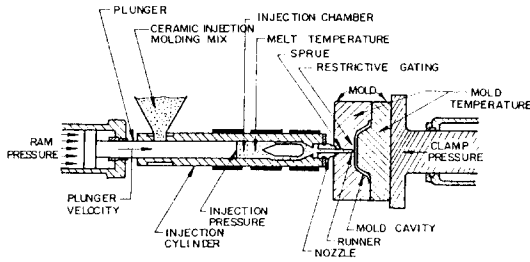
Honeycomb 구조 등의 成形은 이 方法을 적용한다. 또한 두께가 0.6mm 以上 5mm 以下 정도의 얇은 薄膜도 이것을 利用하여 製造 可能하다. 工程의 要素는 각종 缺陷構造를 없애는 方法으로서 有機可塑劑의 均一 分布化, 적정 移送速度의 선택이다.

3.4 射出成形(Injection Molding)

射出成形은 原來 플라스틱 등의 成形에 利用된 方法으로서, 세라믹스의 경우는 原料粉末에 相當量의 有機바인다를 가해 150°C 정도로 가열한 混合物을 金型 空間 內에 注射하여 塑性 變形과 배압에 의한 加壓成形을 이루는 方法이다. 本 燒成 전에 有機바인다 및 可塑劑를 除去하는 長時間(400°C 근방에서 5~10일)이 소요되는 脫脂工程이 필요한 때, 이 때에 表面과 內部的 脫脂速度의 差에 의하여 龜裂이 發生되므로 大型의 構造物 部材에는 거의 利用되지 않는다. 各種의 機械部品 등 複雜形狀의 엔지니어링 세라믹스에는 鑄入成形보다 寸수 精度 및 量産性이 우수한 射出成形이 주목되고 있



(a) 射出成形機



(b) 射出成形機(plunger type)의 構成圖

그림 5 射出成形機

다. 最近에는 非酸化物 세라믹스의 터빈 깃, turbocharger rotor 등에서의 應用이 盛行하고 있다. 射出成形工程의 주요 要素는 有機添加劑量, 材料溫度, 流動速度, 金型空間內壓 및 冷却速度이며 이에 관련되는 射出成形機의 變數는 射出壓力, plunger 速度, 金型形狀, 金型溫度 등이다.

3.5 一軸加壓成形(Press 成形)

噴霧乾燥한 顆粒을 金型에 充填하여 上下 兩方向 또는 한 方向에서 壓縮成形하는 方法으로서, 비교적 單純한 形狀의 製品을 自動으로 生産하는 가장 一般的인 것이다. 粉末成形的 成形機構는 粒子摩擦, 彈性變形 및 破碎로서 이루어져 있으므로, 프레스成形은 粉末의 流動性的 限界와 金型壁과 粉末 間的 摩擦 등으로, 成形密度 分布가 不均一하여 取出 時에 層狀의 龜裂이 發生하거나, 燒成 時에 變形 및 균열이 일어나는 경우가 있다. 또한 粉末充填의 差異에 따라 이러한 偏差는 더 擴大된다. 金型的

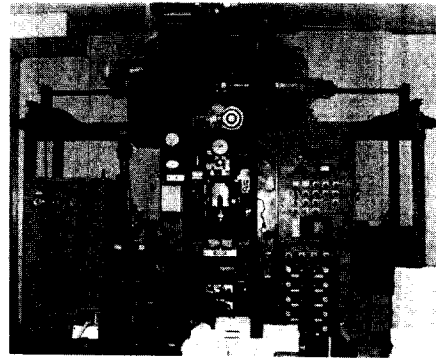


그림 6 一軸加壓成形 프레스

마멸이 심하기 때문에 添加劑 中 潤滑劑, 結合劑 선택에 신중하여야 하며 燒成 時에 燒滅하지 않는 無機鹽과 金屬이온이 섞이지 않아야 한다.

3.6 靜水壓成形(Isostatic Pressing)

프레스成形的 경우에 發生하는 成形體密度 및 組織의 不均一성을 改善하기 위하여 靜水壓加壓을 하는 方法으로, 고무型에 粉末을 充填하여 물 또는 기름을 作動油로 하여 靜水壓成형을 함으로 高溫靜水壓加壓法(HIP: hot isostatic press)과 구분하여 冷間靜水壓加壓法(CIP: cold isostatic press) 또는 rubber press라고도 한다.

CIP法에는 2가지 方法이 있으며 고무型的 容器에 粉末을 密封하여 等方壓을 가하는 混式法과 고무型 속에 粉末을 채우고 고무型을 통하여 주로 變形方向으로 壓力을 가하는 乾式法이 그것이다. 後者は 엄밀히 靜水壓加壓이 아니나 生産성이 높아 自動車用 스파크 플러그 등의 大量生産에 適當하다. 이에 대하여 混式法은 多品種小量 生産에 適合하다. 보통 1~2 ton/cm²의 壓力으로 理論密度 60% 정도까지의 成形體가 可能하며 窒化硅素의 境遇는 20 ton/cm²의 壓力에 약 74%까지도 可能하다. 그림 7은 ASEA製品 6 ton/cm² 용량의 形狀이다.

CIP成形的 잇점으로는 高密度의 成形體, 대

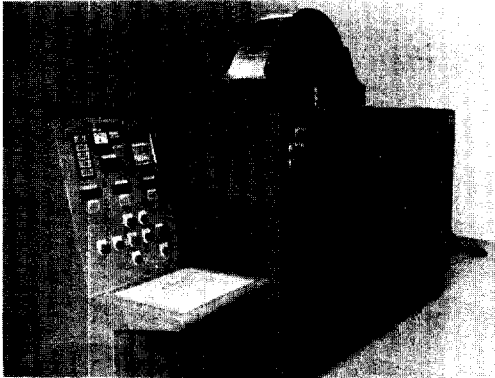


그림 7 冷間靜水壓加壓機(CIP)

칭적 收縮, 큰 L/D比 製品, 얇은 製品, 저렴한 金型費, 潤滑劑 및 結合劑 添加의 排除 등이 可能한 것이며 不利한 點은 얇은 膜을 통한 加壓이기 때문에 寸數制御가 精密하지 못하여 成形體를 다시 加工해야 한다는 것과 生産性이 낮다는 것이다.

主要 工程要素는 金型設計와 맨드렐 및 彈性體 고무의 材質 선정이다. 특히 壓縮해제 時의 스프링 백을 포함한 寸數公差문제, 缺陷없는 製品을 위한 金型의 distortion防止策 등은 核心技術이다.

3.7 振動成形(Vibro-compaction)

大形의 세라믹스製品 製造 時에 密度差가 큰 粉末 混合體를 成形하는 境遇에는 振動成形이 有効하다. 약 50g~2000g(g:重力加速度)의 振動加速度를 내는 電氣動力 및 空氣壓을 利用한 振動機에 의하여 Agglomerate와 粗大한 粒자를 부술 수 있기 때문에 粉末의 최초 粒度 分布가 成形密度에 影響을 주지 않는 것이 長點이다. 또한 振動成形 時間이 대단히 짧고 層狀化 現象과 같은 缺陷이 생기지 않는다. 複雜 形狀의 cermet와 層狀材料의 成形에 有利하다. 振動成形工程의 主要 要素는 振動機의 加

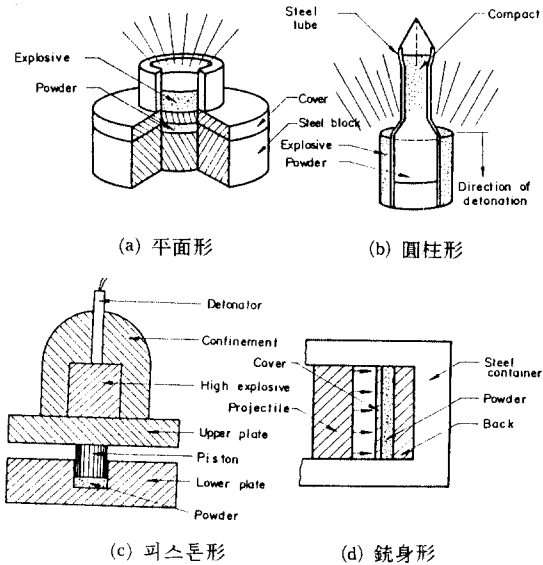


그림 8 爆發加壓成形方法의 種類

速度 크기, 可塑劑의 量과 振動時間이다.

3.8 爆發加壓成形

爆發物의 높은 爆發壓(약 300kbar)을 利用하여 衝擊波를 粉末에 通過시키는 동안 高密度로 壓縮成形하는 方法이다. 이것은 一般燒成工程으로 燒成이 용이하지 않는 특수 세라믹材料에의 應用과, 짧은 時間 燒成하여 不必要한 粒成長 및 第2相의 形成을 抑制하는 데에 도움이 된다. 爆發加壓成形 方法에는 爆發加壓方法에 따라 피스톤形, 平面形, 圓柱形 및 銃身形이 있으며 그림 8은 各各의 方法을 表現하고 있다.

爆發加壓成形法의 工程要素로서 設計爆發壓에 適當한 爆發材의 種類, 폭발재와 粉末의 質量比, 斷熱剪斷에 맞는 粉末의 密度, 분말의 Hugoniot彈性係數 등을 調節하여야 한다.

(다음 호에 基本工程 中の 燒結工程 및 각종 應用工程이 계속된다.)

