

增進重力沉降室效率之方法研究

Study for Increasing the Efficiency of Gravity Settlers

國立台灣大學農業機械工程學系教授

國立台灣大學農業機械工程學系研究助理

吳中興

李志萍

Chung-Hsing Wu

Chih-Ping Lee

摘要

重力沉降室是製造業及農產加工業常見的前級處理集塵設備之一，其工作原理為利用截面突張的效果，使含塵氣流的速度減慢，粉塵受到重力的影響而沉降，達成收集塵粒之目的。重力沉降室的構造簡單、價格便宜、容易維修，對於較大粒徑的粉塵能有效的捕集，因此適合做為空氣污染防治的前處理設備。

為了增進重力沉降室的集塵效率，可在沉降室的底部加掛集塵棚架，以幫助塵粒的沉降。本文以計算流體力學軟體 FIDAP 有限元素分析法，模擬集塵棚架安置於三種不同位置時，對重力沉降室內流場的影響，依據數值模擬的結果進行比較分析。三種不同的位置分別為：安置集塵棚架於重力沉降室的左邊；安置集塵棚架於重力沉降室的中間；安置集塵棚架於重力沉降室的右邊。

依據分析的結果得知，集塵棚架於不同的位置時，皆能提高重力沉降室的集塵效率，然而以安置於中間時效率最高，安置於右邊或左邊時，集塵效率較低。因此，安置集塵棚架於重力沉降室中間，為最適當的位置。

關鍵詞：重力沉降室，集塵棚架，計算流體力學，有限元素分析法。

ABSTRACT

Gravity settler is one kind of dust collectors which can be applied in the industry as well as in agriculture as a selected equipment in the air pollution control system, since it is characterized by simple shape, low price and easy maintenance. The working principle is when the gas stream passes through the expansion chamber, the flow velocity will be reduced owing to the expansion effect and gravity force. Therefore, the particles carried by the gas stream will be settled down on the bottom of the gravity settler. Since the collecting efficiency is more significant for larger particles, gravity settlers are suitable for the pre-processing purpose for the dust-laden air stream.

For increasing the collecting efficiency of gravity settlers, the collecting-shelf should be assembled beneath the bottom of the gravity settler. This research adopted Computational Fluid Dynamics(CFD) software FIDAP, which is based on the Finite Element Method(FEM), to simulate the flow field for three types of gravity settlers whose collecting-shelf is located at the left position, in the middle position, and at the right position, respectively.

The results reveal that a collecting-shelf will improve the performance of the gravity settler. When it is mounted in the middle of the settler attaining the highest efficiency on removing particles. Other arrangements, in which the collecting-shelf is located in the right or in the left, are not so significant for the efficiency improvement.

Keywords: Gravity settlers, Collecting-shelf, CFD, FEM.

一、前言

空氣污染的防治，已經成為世界各國共同的問題。製造業及農產加工業所排放的廢氣，若是沒有經過妥善的處理，將對環境造成污染，對於人類身體健康，產生莫大的負面影響，例如造成了慢性氣管炎、肺氣腫、肺炎……等疾病。因此，受污染空氣處理技術之研究，是環境保護工作中，不能忽視的課題。

在農產品收穫後加工處理過程，亦有不可忽視的空氣污染問題的存在。稻穀收穫後乾燥處理，以及稻穀的碾米加工過程，都會產生大量的穀殼、細糠及泥土等粉塵，若是任其逸散，將會污染到周遭的空氣，並且危害現場工作人員的健康，所以，必須設置風管接至集塵設備，予以捕集(陳等人，1992)，(陳，1996)。常見的集塵設備有重力沉降室、旋風分離機、過濾除塵裝置、洗滌除塵裝置、電氣除塵裝置等等。其中重力沉降室，如圖 1 所示，構造簡單、價格便宜、容易維修，對於粉塵粒徑在 $50\mu\text{m}$ 以上的塵粒，能有效率地捕集。因此，適合做為穀類加工過程空氣污染防治的前級處理設備(詹等人，1994)。

重力沉降室的工作原理為利用重力使塵粒於沉降中沉澱。使含塵的氣體進入重力沉降室後，由於幾何外形突然擴大，使得氣流速度減小。粉塵粒子轉動時所需向心加速度，與其速度平方及物體質量成正比。當含塵氣流速度減少

時，重力所構成的向心力，為使氣流旋轉的主要原因。尤其是較大質量的塵粒，將有較明顯的曲折效應(Miskin et al.,1995)。這效應將使得塵粒與氣流分離而沉降於室內，較乾淨的氣體則由出口處排出，由此達成了集塵的目的。

為提高的效率，可在底部加掛集塵棚架，如圖 2 所示。加掛了集塵棚架以後，一般認為可以增加收集效率(Louis & Anthony,1976)，這是由於幾何形狀的改變，造成了流場特性的不同，而使得除塵效果有所差異。在不同的位置加掛集塵棚架，對流場會造成不同的影響，因此，本文以數值分析的方法，模擬不同位置的集塵棚架，對於重力沉降室流場的影響。分別安置集塵棚架於重力沉降室的左邊、中間、右邊等三個不同位置，如圖 2、圖 3、圖 4 所示。

良好的重力沉降室設計，可以改善其功能，提高集塵效率。本文以數值模擬的方式，來模擬重力沉降室內的流場，比較分析不同集塵棚架的位置對流場所造成的影響，並且討論加掛集塵棚架最為適當的位置，作為設計、改良上的參考。

二、重力沉降室內流場的理論模式

(一) 統御方程式

本文的研究，是以 CFD 分析軟體 FIDAP，有限元素分析法做重力沉降室內流場的二維單相(single-phase)流場模擬分析。假設流場為紊流



圖 1 重力沉降室的幾何圖形

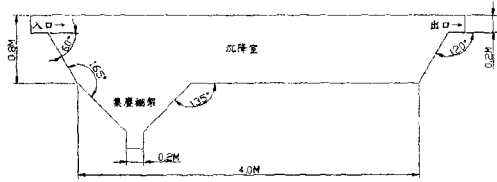


圖 2 集塵棚架於左側位置的幾何圖形

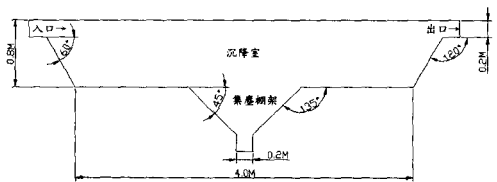


圖 3 集塵棚架於中間位置的幾何圖形

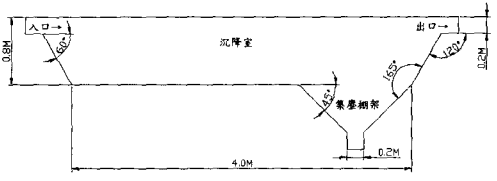


圖 4 集塵棚架於右側位置的幾何圖形

(turbulent flow) 流場，且已達到穩定的狀態 (stationary state)。本文擬採用標準 $k-\varepsilon$ 模式 (Hjertager, 1982)，來模擬重力沉降室內的流場。為了簡化複雜性以便獲得較確切的方程組，所以做了下列的假設：

- (1) 流體的密度為一常數。
- (2) 流場為等溫流場。
- (3) 忽略了浮力對流場的影響。

基於上述的假設，可得到下列能描述重力沉降室內流場的統御方程式，其張量表示為：
連續方程式：

$$u_{j,j} = 0$$

動量方程式：

$$\rho u_j u_{i,j} = -p_{,i} + \mu_{\text{eff}} (u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} + \rho g_i$$

其中，

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_0 + \mu_t$$

$$\mu_t = c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}$$

(二) 紊流模式

本文討論的是紊流流場，在工程上常用 $k-\varepsilon$ 模式，此模式在等溫及等密度的流場，有很好的表現。因此，本文採用標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式做為本研究的紊流模式。

紊流動能方程式：

$$\rho u_j k_{,j} = (\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{,j}) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon$$

紊流動能消耗率方程式：

$$\rho u_j \varepsilon_{,j} = (\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_{,j}) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \Phi - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

式中，

$$\Phi = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial u_j}$$

標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式的紊流經驗常數設定如下 (Jones and Launder, 1972)：

$$c_\mu = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.00$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.30$$

$$c_1 = 1.44$$

$$c_2 = 1.92$$

以上統御方程式及紊流模式中，諸變數所代表之意義為：

u_i : 流體速度分量

x_i : 直角座標系之軸方向

- ρ : 密度
- p : 壓力
- g_i : 重力的分量
- μ_{eff} : 有效黏滯係數
- μ_0 : 流體分子黏滯係數
- μ_t : 紊流黏滯係數
- k : 紊流動能
- ε : 紊流動能消耗率
- c_μ : 紊流模式經驗常數
- σ_k : 紊流模式經驗常數
- σ_ε : 紊流模式經驗常數
- c_1 : 紊流模式經驗常數
- c_2 : 紊流模式經驗常數
- $\mu_t \Phi$: 紊流動能產生率

(三) 邊界條件

假設流體是由入口處垂直進入重力沉降室，因此只有 x 方向的速度分量， y 方向的速度分量設為零。入口處的邊界條件定義如下：

$$u_x = 2 \text{ m/s}$$

$$u_y = 0$$

牆壁的邊界條件定義為：

$$u_x = 0$$

$$u_y = 0$$

假設在出口處為完全發展流 (fully developed flow)。

(四) 牆函數 (wall function)

流體具黏滯性，使得重力沉降室內壁上的 u_x ， u_y ， k ， ε 皆為零，並且在固體邊界層附近形成一層流次邊界層 (laminar sublayer)，因此紊流方程式需加以修正。一般採用牆函數 (wall function) 來跨越此區域。本文採用之牆函數為 (Launder & Spalding, 1974)：

$$u^+ = y^+, \text{ 當 } y^+ \leq 11.63$$

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln E y^+, \text{ 當 } y^+ > 11.63$$

式中，

$$u^+ = \frac{u}{u^*}$$

$$y^+ = y \frac{u^*}{\mu}$$

$$u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$K = 0.4$$

$$E = 0.9$$

式中，

- y : 網格點與壁面的垂直距離
- τ_w : 壁面之剪應力
- u : 平行於壁面之速度

(五) 流體性質參數的設定：

為了簡化運算的處理，我們設定流體的密度為一常數。由於是等溫流場的假設，並不計算能量方程式。因此，相關流體的設定，僅定義密度、流體的黏滯係數及重力場的重力加速度。

$$\rho = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{\text{eff}} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

$$g_y = -9.8 \text{ m/s}^2$$

三、數值方法

計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, 簡稱 CFD) 為利用數值方法將流場離散化，並求得各變數的近似解。近年來由於電腦快速的發展，提供了大量的計憶空間與增加了計算速度，使得許多的複雜的計算問題得以解決。亦由於數值方法的改良，提高了準確度，使的 CFD 在工程各個應用領域，都有很不錯的表現。常見的 CFD 數值方法為：(1) 有限差分法 (2) 有限體積法 (3) 有限元素法等。有限元素法來源於結構分析的剛度法，早期應用於固體力學的結構分析。有限元素法中，Galerkin 加權殘差法的應

用，增加了物理精確性，也擴大了有限元素法的應用範圍，從固體力學擴展到流體力學的領域(王等人，1990)。本文便是以 CFD 有限元素法套裝軟體 FIDAP，做重力沉降室內流場的模擬分析。

本文所使用之套裝程式 FIDAP 乃是應用有限元素法求得上述統御方程組之解。模擬的過程，可分為三個步驟：(1)前處理過程。(2)計算分析過程。(3)後處理過程。茲將此三個模擬過程分述如下：

1. 前處理過程：

前處理過程包括格點的建立及流體性質、邊界條件的定義。有限元素法具有易於建構複雜幾何形狀的格點分佈之優點，因此更便於應用於此重力集塵室之幾何外形，格點配置如圖 5 至圖 7 所示，爲了節省記憶空間及計算時間，在集塵棚架處的格點，採用非結構性格點分佈。

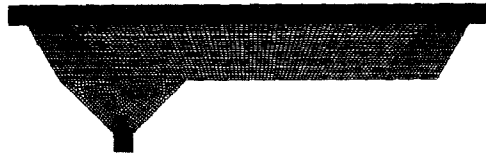


圖 5 集塵棚架於左側位置的格點配置

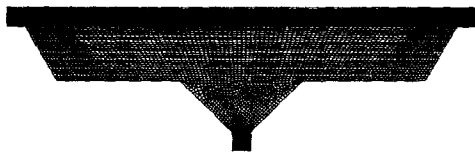


圖 6 集塵棚架於中間位置的格點配置

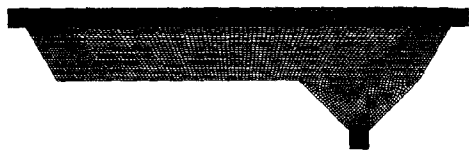


圖 7 集塵棚架於右側位置的格點配置

流體爲空氣，故定義爲牛頓、可壓縮流體。流場的邊界條件定義牆壁上流體的速度皆爲零，入口處的速度爲一常數，出口處爲完全發展流。

2. 計算分析過程：

FIDAP 程式裡提供了兩種計算方法：Segregated Algorithm 和 Fully Coupled Scheme。Segregated Algorithm 是將統御方程式中的各個變數分離疊代，並且於各方程式間遞迴運算，此種方法比較容易收斂，但是需要較多的疊代次數且準確度較低；Fully Coupled Scheme 是將統御方程組化爲矩陣形式，並求其反矩陣。對於方程組中的非線性項，用固定點(fixed point)疊代法求得。此種方法計算較費時，需要的計憶空間比較大，但是疊代的次數較少，數值解也較準確。

Fully Coupled Scheme 的收斂準則，是以相對誤差及最大比較殘差小於容忍度 10^{-2} ，相對誤差及最大比較殘差分別定義如下：

$$\frac{\|u_i - u_{i-1}\|}{\|u_i\|} : \text{最大相對誤差}$$

$$\frac{\|R(u_i)\|}{\|R(u_0)\|} : \text{最大比較殘差}$$

其中，

$$\|\cdot\| \dots : \text{norm, 取每次疊代之中之最大值}$$

$$R(u_i) : \text{第 } i \text{ 次疊代之殘差}$$

$$R(u_0) : \text{參考殘差}$$

3. 後處理過程：

根據程式計算的結果，求得重力沉降室內流場的速度、壓力、紊流動能、紊流動能消耗率等各變數的數值近似解。本文爲了討論重力沉降室內速度場的分佈情形，利用 FIDAP 程式所提供的後處理模組，繪製了向量圖及流線分佈圖，進行分析比較。

表 1 不同組別格點數與所需 CPU 時間、疊代次數之比較

組別	型式	安置集塵棚架於 沉降室之左側	安置集塵棚架於 沉降室之中間	安置集塵棚架於 沉降室之右側
第一組		格點數 1303 CPU 時間 (秒) 739.20 疊代次數 83	格點數 1303 CPU 時間 (秒) 359.66 疊代次數 47	格點數 1308 CPU 時間 (秒) 329.81 疊代次數 46
第二組		格點數 3430 CPU 時間 (秒) 1331.79 疊代次數 35	格點數 3430 CPU 時間 (秒) 1545.27 疊代次數 37	格點數 3430 CPU 時間 (秒) 1494.27 疊代次數 36
第三組		格點數 6296 CPU 時間 (秒) 4797.84 疊代次數 30	格點數 6296 CPU 時間 (秒) 4395.86 疊代次數 31	格點數 6296 CPU 時間 (秒) 4510.62 疊代次數 30

四、結果與討論

在模擬的過程中，使用太多的格點，則將佔用較多的記憶體空間及較久的 CPU 計算時間。若是格點數不夠，則將會影響到數值解的正確性。因此，本文分別以三組不同的格點數做格點獨立測試，三組不同格點數所需要的記憶體空間及使用的 CPU 時間列於表 1，比較重力沉降室出口處的速度分佈，如圖 8 至圖 10 所示。由圖 8 至圖 10 及表 1 得知，第二組的格點數為較經濟的格點數，且能表達流場的特性，故本文採用第二組的格點做模擬。

本文模擬三種不同位置的集塵棚架，對重力沉降室內流場的影響，如圖 2 至圖 4 所示。根據 FIDAP 程式計算的結果，繪製流場的向量圖及流線圖，分別討論如下：

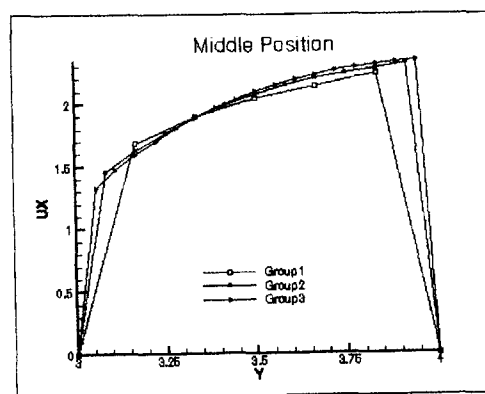


圖 9 出口處之流速比較(集塵棚架於中間位置)

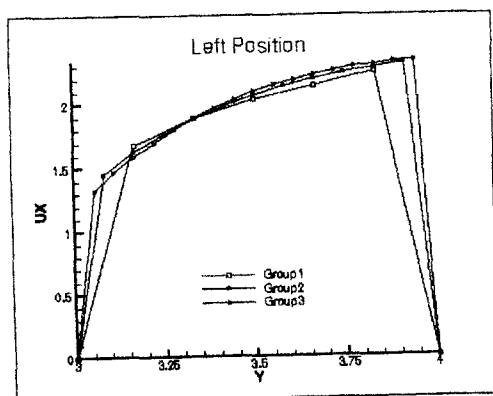


圖 8 出口處之流速比較(集塵棚架於左側位置)

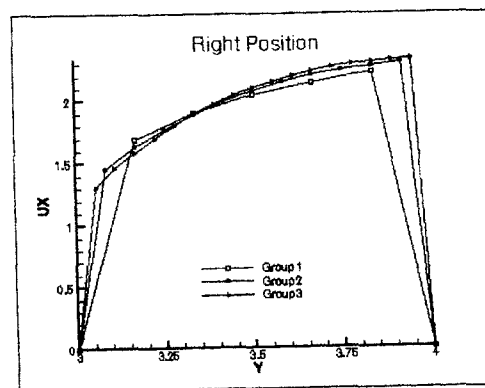


圖 10 出口處之流速比較(集塵棚架於右側位置)



圖 11 重力沉降室之速度流線圖（集塵棚架於左側位置）

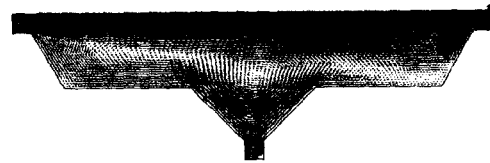


圖 14 重力沉降室之速度向量圖（集塵棚架於中間位置）

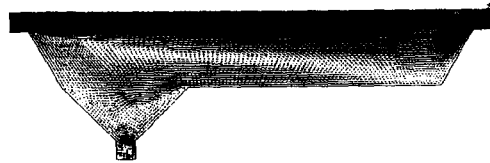


圖 12 重力沉降室之速度向量圖（集塵棚架於左側位置）

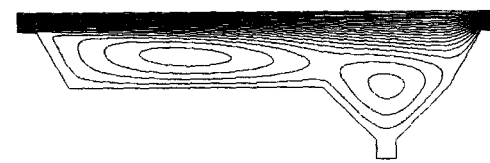


圖 15 重力沉降室之速度流線圖（集塵棚架於右側位置）

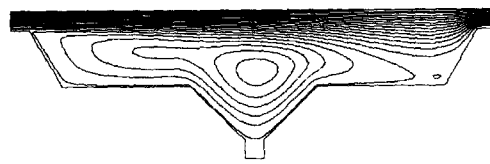


圖 13 重力沉降室之速度流線圖（集塵棚架於中間位置）

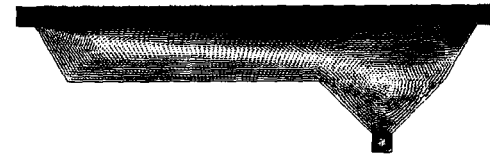


圖 16 重力沉降室之速度向量圖（集塵棚架於右側位置）

1. 集塵棚架安置於重力集塵室的左邊：

由圖 11 流線圖顯示，流線的間距愈來愈疏，並且有向下偏曲的現象，表示流體受到了沉降室截面的突張，速度減弱並且向下沉落，尤其在近出口處更為明顯。受到幾何外形的影響，沉降室裏產生了一個明顯的渦流，在集塵棚架裏也有一個渦流產生。由圖 12 速度向量圖可看出，集塵棚架裏渦流的速度並不強，故塵粒落入集塵棚架後，不會再度被揚起。然而塵粒不易直接落入集塵棚架裏，而是先落到沉降室的底部，再被渦流掃入集塵棚架中。

2. 集塵棚架安置於重力集塵室的中間：

由圖 13 流線圖顯示，流線的間距也是愈來愈疏，並且有向下偏曲的現象，表示速度減弱及向下沉落，尤其在近出口處更為明顯。受到幾何形狀的影響，在集塵棚架裏有一個明顯的渦流

區。由圖 14 速度向量圖可看出，集塵棚架裏渦流的速度並不強，塵粒沉落後不會再揚起。塵粒受到重力的影響後，將沉落於集塵棚架裏，落在集塵棚架右側的塵粒，亦會被渦流掃到集塵棚架中。

3. 集塵棚架安置於重力集塵室的右邊：

由圖 15 流線圖顯示，流線的間距亦是愈來愈疏及向下偏曲，表示速度減弱及向下沉落，在集塵棚架裏及沉降室，皆有渦流區的產生，受到集塵棚架裏渦流的影響，使得在近出口處的流線不易沉落。由圖 16 速度向量圖可看出，集塵棚架與沉降室裏渦流的速度皆不強，塵粒沉落後不會再揚起。由於集塵棚架裏的渦流太接近出口處，使得渦流上方氣體的沉降不夠明顯。如果塵粒落到集塵棚架左側時，則會被左側的渦流帶到左邊的角落，並不會落入集塵棚架裏。

五、結論

根據數值模擬分析的結果，比較集塵棚架在不同位置時，對重力沉降室內流場的影響，可以歸納出以下的結論：

- (1)三種型式的重力沉降室，皆能使氣流的速度減慢，使得塵粒受到重力的影響而沉落，達成空氣污染防治之目的。
- (2)三種型式的重力沉降室的流線，皆有向下偏曲的現象。偏曲所造成的離心效果使得塵粒前近的動力減小，加上受到重力的影響，能夠幫助粒子的沉降。
- (3)集塵棚架內均有渦流區的產生，而且渦流的速度都很弱。當塵粒落入渦流區時，會被渦流帶到集塵棚架裏，由於渦流的速度不強，粒子沉落後不易再度被揚起。
- (4)三種不同重力沉降室的比較，集塵棚架安置於沉降室左邊時，塵粒不易直接落入集塵棚架裏；安置於沉降室右邊時，將影響到氣流往下沉降；安置於沉降室中間時，集塵效果最為顯著。因此，集塵棚架安置於沉降室中間時最能夠收集到沉降的粒子，為最適當的位置。

六、參考文獻

1. 王昺成、邵敏。1990。有限元素基本原理與數值方法。初版。新竹：凡異。
2. 陳貽倫。1995。現階段國內穀物乾燥中心集塵系統之研究。農業機械學刊 4(3)：63-81。
3. 陳貽倫、賈精石、何萬中。1992。循環型稻

穀乾燥機集塵裝置之設計與試驗。農業機械學刊 2(2)：62-86。

4. 詹武忠、楊肇政、鄭阿全。1994。污染防治。十一版。305-342。台北：高立。
5. 賴耿陽譯。1993。粉塵體輸送裝置。再版。台南：復漢。(狩野武著)
6. Hjertager, B.H. 1992. Simulation of transient compressible turbulent reactive flow. *Combustion Science and Technology* 27 : 159-170.
7. Jones, W.P. and B.E. Launder. 1972. The prediction of laminarization with a two equation model of turbulence. *International Journal Heat and Mass Transfer* 15 : 301-304.
8. Launder, B.E. and D. B. Spalding. 1974. The numerical computational of turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 3 : 269-189.
9. Louis Theodore & Anthony J. Buonicore. 1976. *Industrial air pollution control equipment for particulates*. 63-89. New York : CRC Press, Inc.
10. Miskin, L. Elliott, D.B. Ingham & P.S. Hammond. 1996. The viscous resuspension of particles in an inclined rectangular fracture. *Int. J. Mutiphase flow* 22(2) : 403-415.

收稿日期：民國 86 年 3 月 26 日

接受日期：民國 87 年 9 月 3 日