

第四章 結果與討論

4-1 不同的吸附條件下對氣懸膠初始吸附效率的影響

本論文在模擬中使用許多不同的模擬條件，藉以探討在這些條件下氣懸膠膠體粒子的初始吸附效率將如何變化？幫助我們瞭解膠體粒子在收集器中吸附效率改變的趨勢，即可預測出在現實情況中的吸附效率。改變的主要條件為針對改變流體流速、氣懸膠膠體粒子密度、收集器的直徑大小三方面作討論，首先先討論有關流體流速的改變：

4-1-1 改變流體流速

在固定膠體粒子密度及固定收集器直徑的情況下，改變流速 $0.5\sim 20\text{cm/s}$ 來模擬膠體粒子之初始吸附效率，以固定膠體粒子密度 ($r_p = 1\text{g/cm}^3$) 收集器粒徑 ($d_g = 525\text{mm}$) 為例，其模擬結果如下圖 (Fig.4-1)：

由圖中可知在同一流速下，膠體粒子直徑越大收集效率也越高，而當流速越大，收集效率的值也越大，同時模擬結果也顯示，粒徑小於 $1(\text{mm})$ 時收集效率會呈現一下凹之曲線，隨著粒子越來越小，布朗運動的效應隨之增加，因而提高了膠體粒子的收集效率，流速越小此影響也就越明顯。但布朗運動只會對小粒徑的膠體粒子發揮影響力，一旦膠體粒子的粒徑漸漸增加時，布朗運動的影響也會漸漸減少。

直至無法影響，接下來當膠體粒子的粒徑越大時，主要就以流體流速所產生的慣性力來影響膠體粒子的吸附效率，因此才會有一下凹曲線類似 V 字型的結果出現。

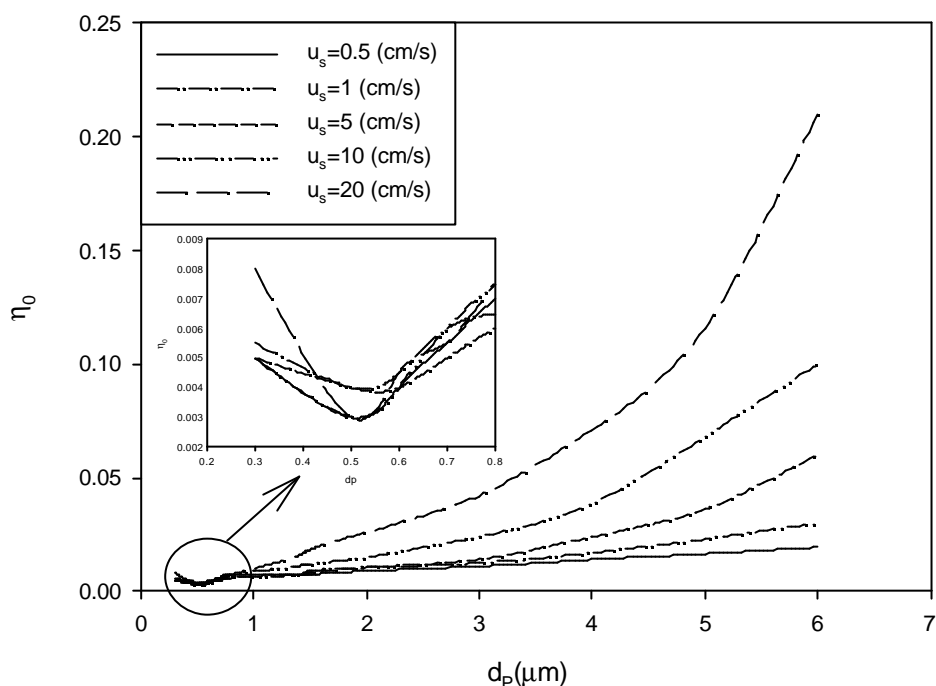


Fig.4-1 當 $d_g = 525 \text{ mm}$ 及 $r_p = 1 \text{ g/cm}^3$ 時，不同流速下膠體粒子的初始吸附效率

4-1-2 改變膠體粒子密度

在固定流速、收集粒徑的條件下，改變膠體粒子密度為 $1 \sim 2 \text{ g/cm}^3$ ，觀察其結果為何？以固定流速 ($u_s = 0.5 \text{ cm/s}$) 收集器粒徑 ($d_g = 525 \text{ mm}$) 為例，模擬結果如下圖 (Fig.4-2)：

由圖中可觀察到，當膠體粒子的密度越大時，收集效率也越高，這是因為密度大的膠體粒子受到重力的影響會較容易沉降，因此也較易吸附在收集器上，而提高膠體粒子的吸附效率。同時也可看到在粒

徑小於 1 (mm) 時，收集效率呈一 V 字型，由於流速小膠體的布朗運動行為因而更加明顯。

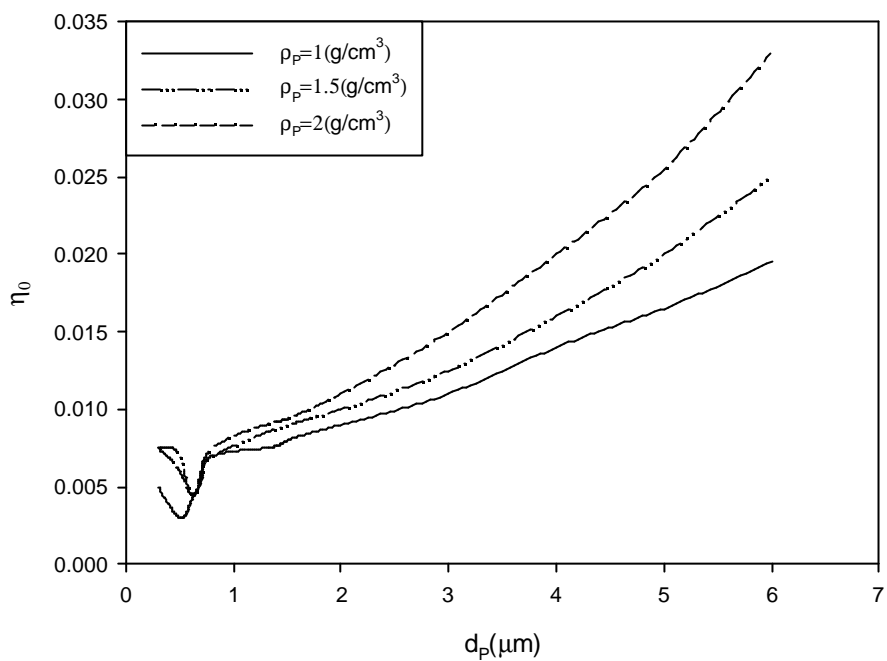


Fig.4-2 當 $u_s = 0.5cm/s$ 及 $d_g = 525mm$ 時，不同膠體粒子密度的吸附效率

4-1-3 改變收集器粒徑

在固定流速、膠體粒子密度下，改變收集器粒徑為 100~525(mm)，觀察膠體粒子的吸附效率變化，以固定流速 ($u_s = 0.5cm/s$)、膠體粒子密度 ($r_p = 1g/cm^3$) 為例，模擬結果如下圖 (Fig.4-3) 所示：

由圖中可觀察到，當收集器的粒徑越小時，膠體粒子的收集效率會越大，這是因為收集器粒徑越小，膠體粒子越難通過收集器，所以呈現較易吸附的關係。

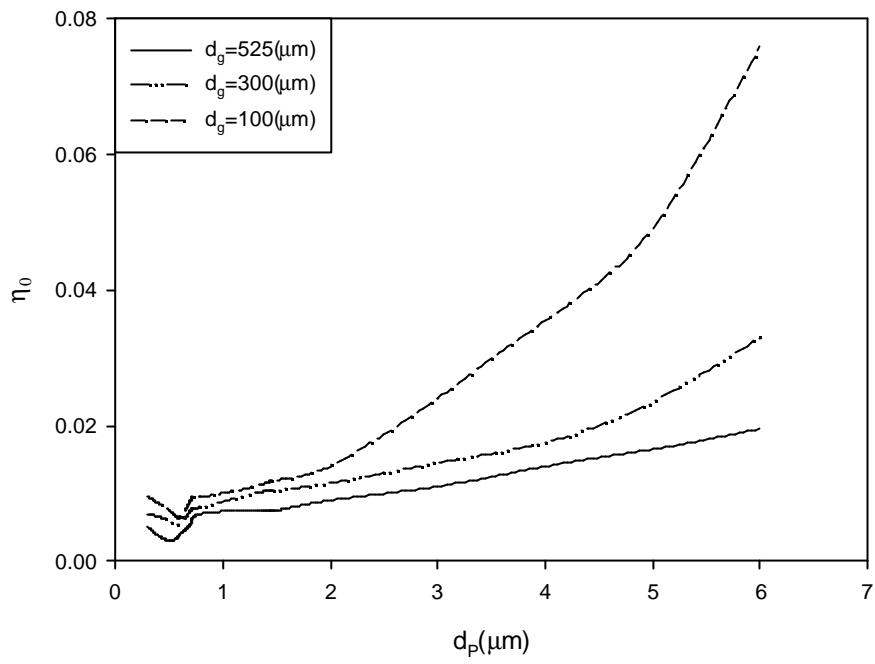


Fig.4-3 當 $u_s = 0.5 \text{ cm/s}$ 及 $r_p = 1 \text{ g/cm}^3$ 時，不同收集器粒徑下的膠體吸附效率

4-2 經驗式

4-2-1 模擬值與 Yongwon Jung & Chi Tien^[1]經驗式相較

以上模擬的結果雖然符合物理意義，但仍不確定是否在合理範圍內，因此我們將上述的模擬值與 Yongwon Jung & Chi Tien^[1]在 1993 年所發表的吸附效率經驗式來做比較，將本論文所設定的變數帶入 Yongwon Jung & Chi Tien^[1]經驗式中所得的吸附效率與本論文的模擬值相較，其圖（Fig.4-4、Fig.4-5、Fig4-6）如下所示：

由 Fig.4-4 可看出當流速為 $0.5 (cm/s)$ 時，本論文的模擬值與經驗式相差頗大，但是當流速增加為 $5 (cm/s)$ 時模擬值與實驗值則相去不遠，當流速大到 $20 (cm/s)$ 時，模擬值則幾乎與經驗式相同。由此結論可推斷，如圖（Fig.4-4）所示，由於 Yongwon Jung & Chi Tien^[1]所提出的經驗式無法描述膠體粒子粒徑小、流體流速小時的布朗運動對其吸附效率的影響，而本論文的模擬則有考慮氣懸膠體的布朗運動行為的影響力，因此我們吸附效率的模擬值會大於經驗式的吸附率，而當流速大時，如圖（Fig.4-5、Fig.4-6）所示，由於膠體布朗運動作用力的降低，所以我們吸附效率的模擬值會較符合 Yongwon Jung & Chi Tien^[1]經驗式的吸附效率。

由於布朗運動在自然界中的存在事實，氣懸膠膠體粒子粒徑一般也極小，所以在討論氣懸膠膠體粒子的過濾上，其布朗運動行為更為

不可忽視，而因為本論文所模擬的吸附效率則有考慮布朗運動及重力影響的效應，所以由上述模擬值所推導出的經驗式也將更貼近真實情況，我們接下來就由本論文在各種不同模擬條件下所獲得的模擬值來推導出初始吸附效率經驗式。

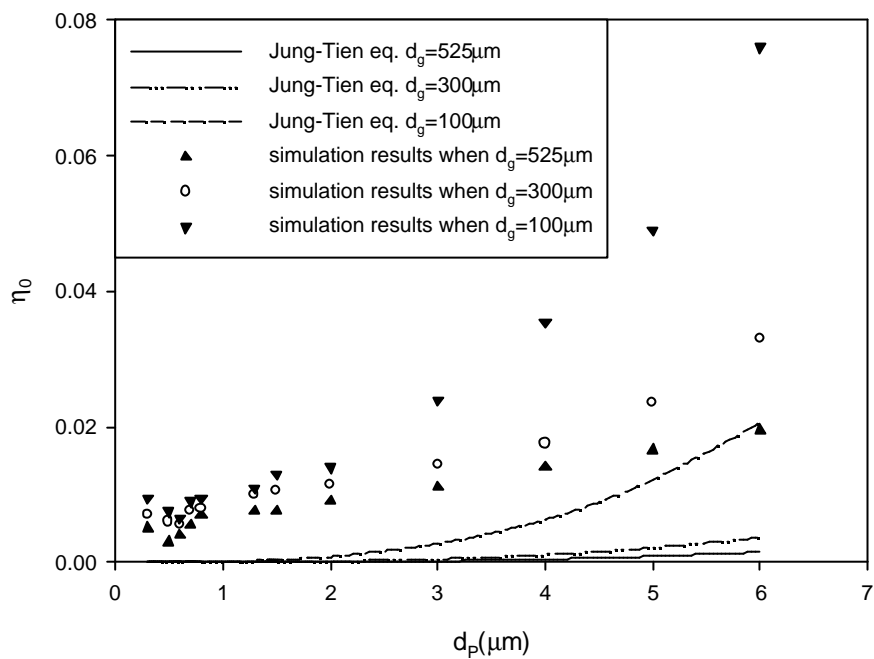


Fig.4-4 固定 $u_s = 0.5\text{cm/s}$ 及 $r_p = 1\text{g/cm}^3$ 時，不同收集粒徑下的模擬值與 Jung-Tien^[1]經驗式比較的結果

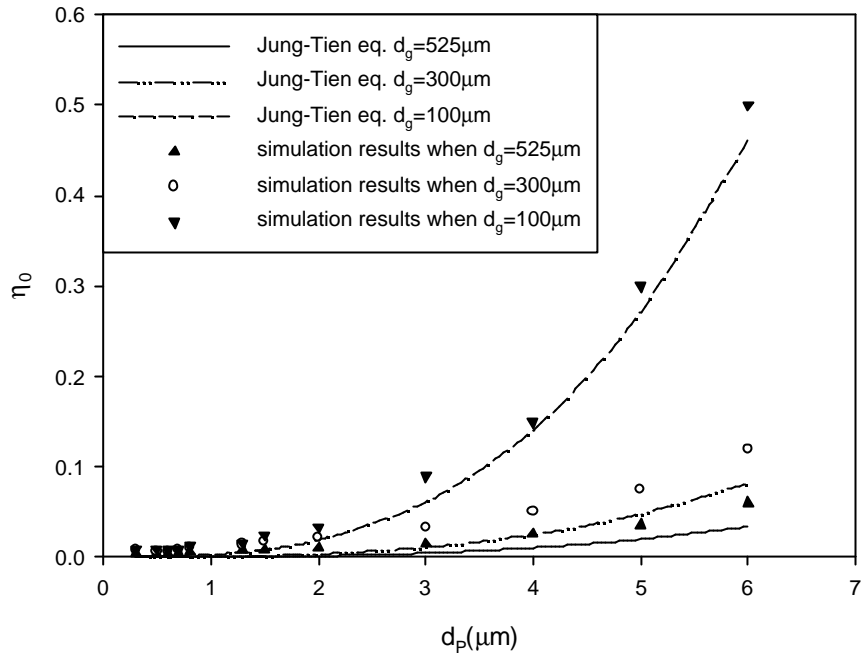


Fig.4-5 固定 $u_s = 5\text{cm/s}$ 及 $r_p = 1\text{g/cm}^3$ 時，不同收集粒徑下的模擬值與 Jung-Tien^[1]經驗式比較的結果

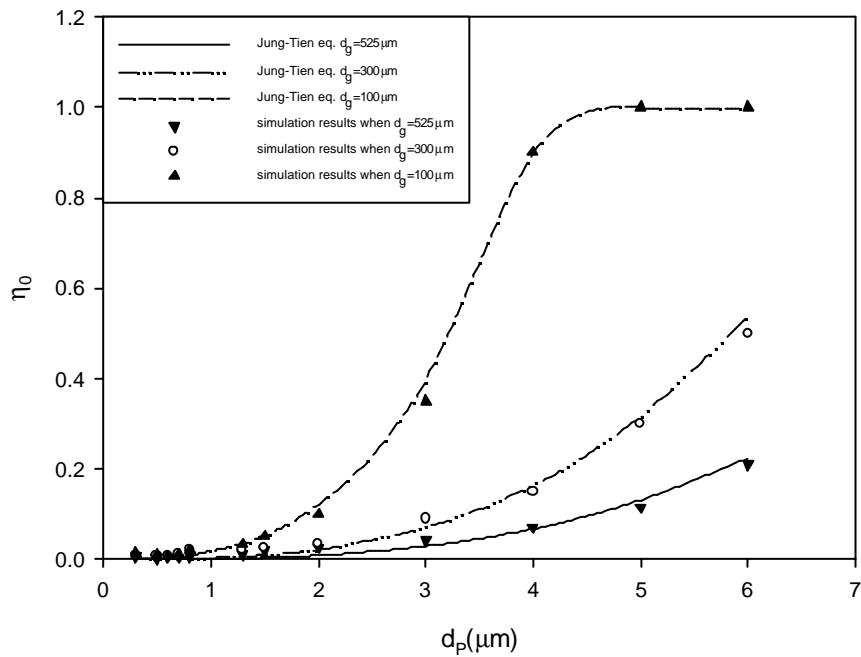


Fig.4-6 固定 $u_s = 20\text{cm/s}$ 及 $r_p = 1\text{g/cm}^3$ 時，不同收集粒徑下的模擬值與 Jung-Tien^[1]經驗式比較的結果

4-2-2 本論文所獲得的初始吸附效率經驗式

將本論文所獲得的模擬值帶入 SSPS 軟體所推導出的氣懸膠體粒子的初始吸附效率經驗式如下：

$$h_0 = 1.29 \times 10^{-6} N_R^{-0.45} N_{St_{eff}}^{-0.661} + 0.473 N_R^{0.24} N_{St_{eff}}^{0.627} N_G^{-0.002} \quad (4-1)$$

其中

$$N_R = \frac{d_p}{d_g}$$

$$N_{St_{eff}} = \left[A(\mathbf{a}_1) + 1.14 N_{Re}^{\frac{1}{2}} (1 - \mathbf{a}_1)^{-\frac{3}{2}} \right] \left[\frac{N_{St}}{2} \right]$$

$$N_G = \frac{d_p^2 (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_f) g c_s}{18 \mathbf{m} u_s}$$

$$N_{Re} = \frac{d_p \mathbf{r}_f u_s}{\mathbf{m}}$$

$$N_{St} = \frac{\mathbf{r}_p d_p^2 u_s c_s}{9 \mathbf{m} d_g}$$

$$A(\mathbf{a}_1) = \frac{\left(6 - 6\mathbf{a}_1^{\frac{5}{3}} \right)}{\left(6 - 9\mathbf{a}_1^{\frac{1}{3}} + 9\mathbf{a}_1^{\frac{5}{3}} - 6\mathbf{a}_1^2 \right)}$$

$$\mathbf{a}_1 = 1 - \mathbf{e}$$

而經驗式與各種模擬值的比較圖(Fig.4-7 Fig.4-8 Fig.4-9 Fig.4-10、Fig.4-11、 Fig.4-12) 如下所示：

由比較圖可知，我們所推導出的經驗式與本論文的模擬值符合，因此本初始吸附效率經驗式除了在流速大時可預測氣懸膠體粒子的吸附效率，在流速小時也能預測因布朗運動效應所影響的吸附效率值。

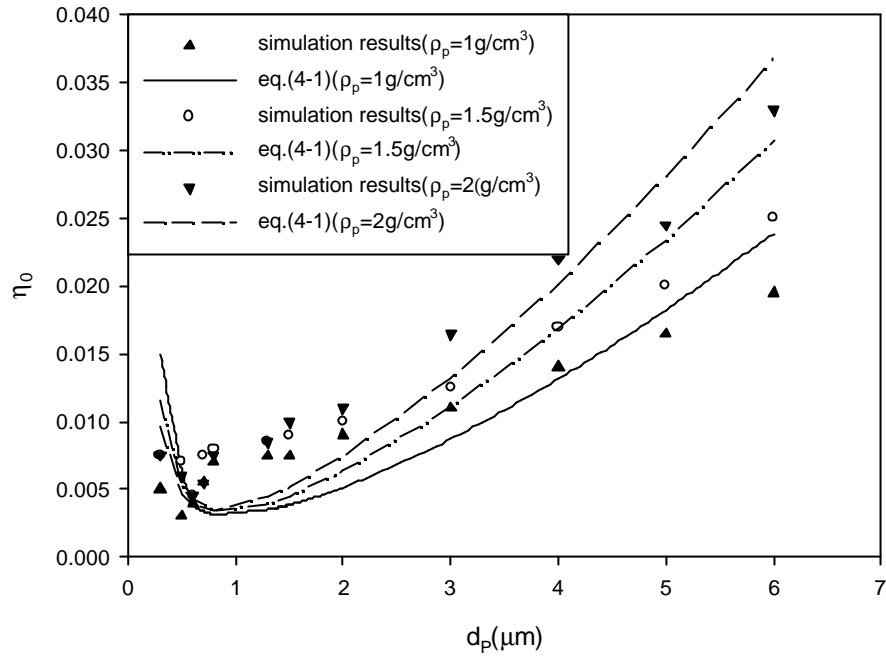


Fig.4-7 當 $u_s = 0.5\text{cm/s}$ 、 $d_g = 525\text{mm}$ 時，本論文初始吸附效率的模擬值與初始吸附效率經驗式的比較

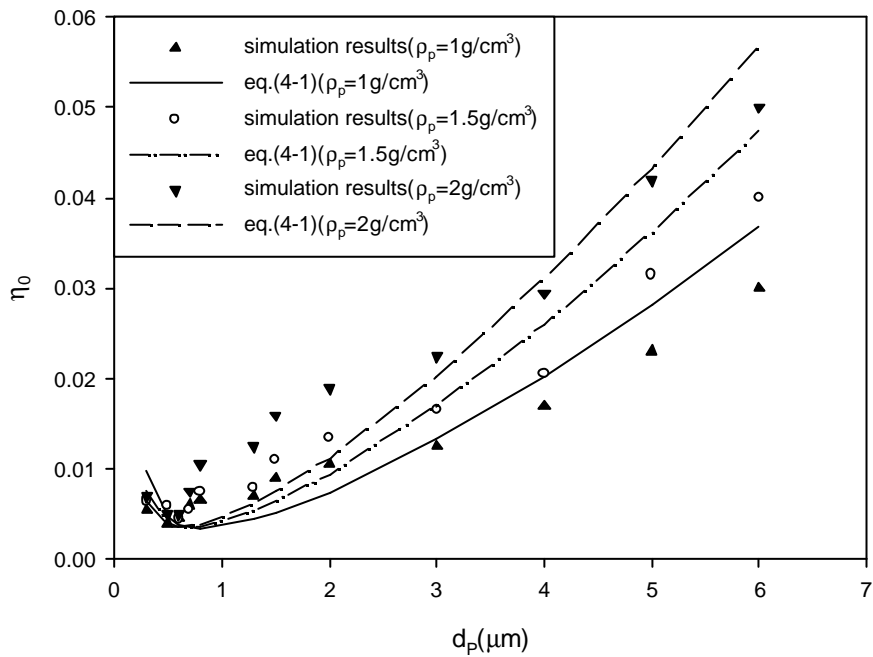


Fig.4-8 當 $u_s = 1\text{cm/s}$ 、 $d_g = 525\text{mm}$ 時，本論文初始吸附效率的模擬值與初始吸附效率經驗式的比較

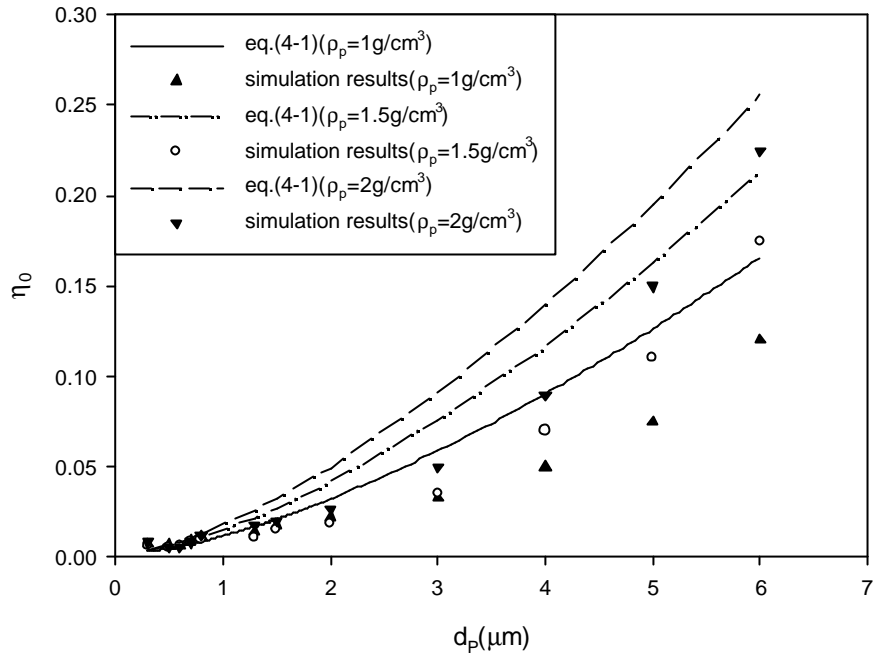


Fig.4-9 當 $u_s = 5\text{cm/s}$ 、 $d_g = 300\text{mm}$ 時，本論文初始吸附效率的模擬值與初始吸附效率經驗式的比較

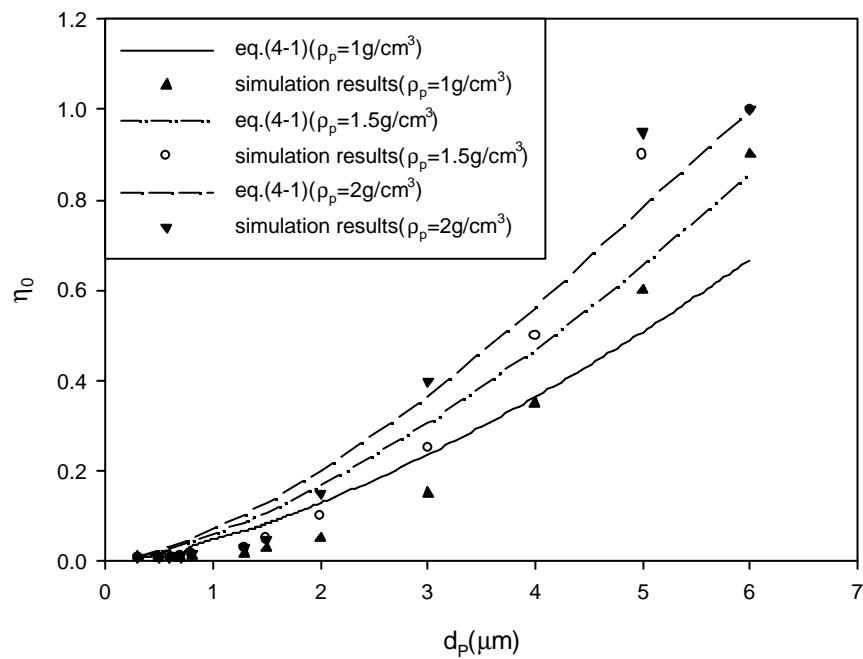


Fig.4-10 當 $u_s = 10\text{cm/s}$ 、 $d_g = 100\text{mm}$ 時，本論文初始吸附效率的模擬值與初始吸附效率經驗式的比較

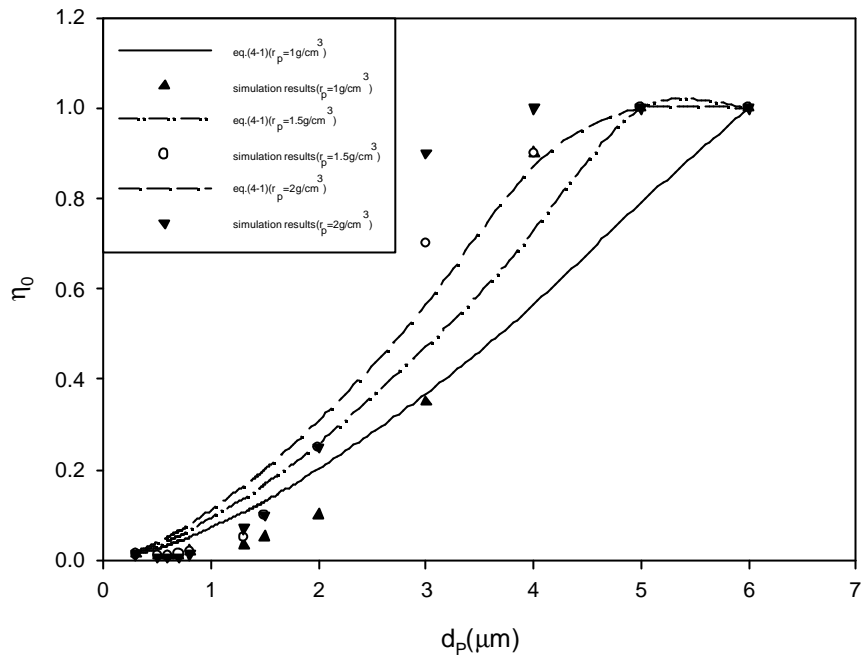


Fig.4-11 當 $u_s = 20\text{cm/s}$ 、 $d_g = 100\text{mm}$ 時，本論文初始吸附效率的模擬值與初始吸附效率經驗式的比較

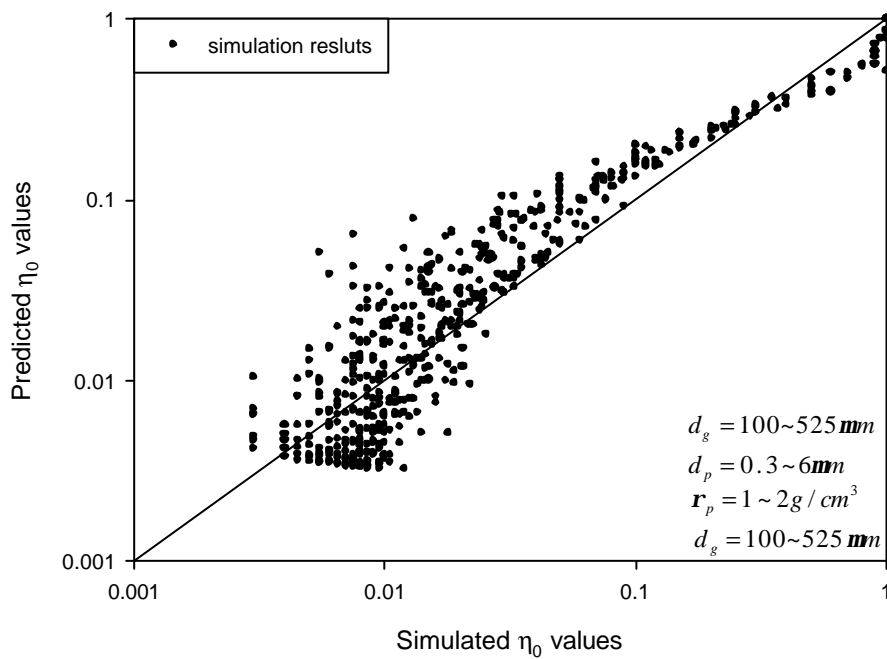


Fig.4-12 本論文初始吸附效率的所有模擬值與初始吸附效率經驗式的比較結果 (averaged variance= 1.47×10^{-3})

4-3 吸附效率經驗式與實驗值比較

本論文的吸附效率經驗式雖然在理論上較趨近於電腦計算的模擬值，但並未真正與各項氣懸膠過濾實驗值做一比較，所以在此我們要將本論文的初始吸附效率經驗式以及 Jung-Tien^[1]經驗式與各項實驗值[Knettig and Beeckmans (1974)、 Doganoglu (1975)、 Melcher et. al. (1978)]^[11]相比較，比較圖 (Fig.4-13、 Fig.4-14) 如下所示：

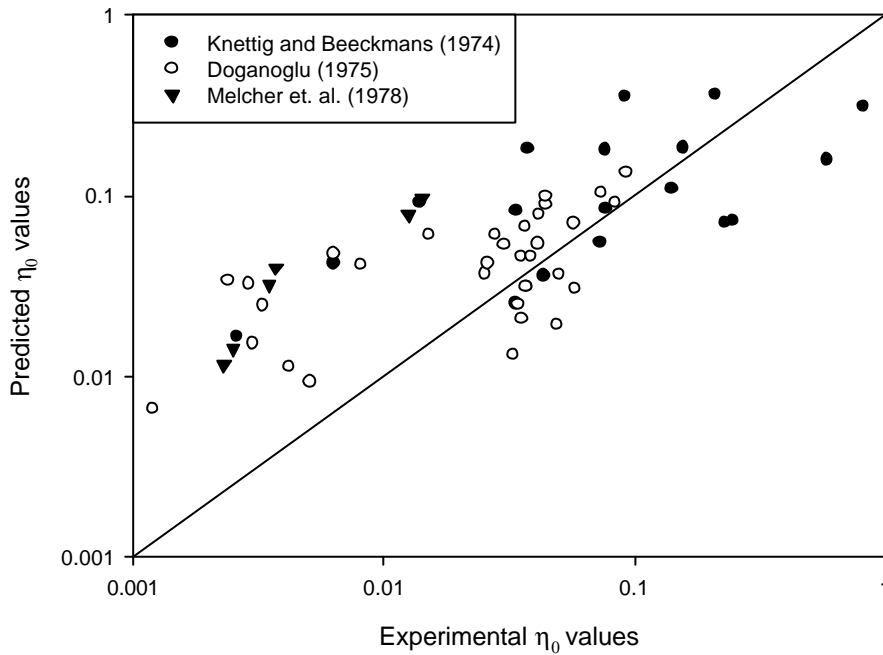


Fig.4-13 本論文的初始吸附效率經驗式與各項實驗值的比較圖

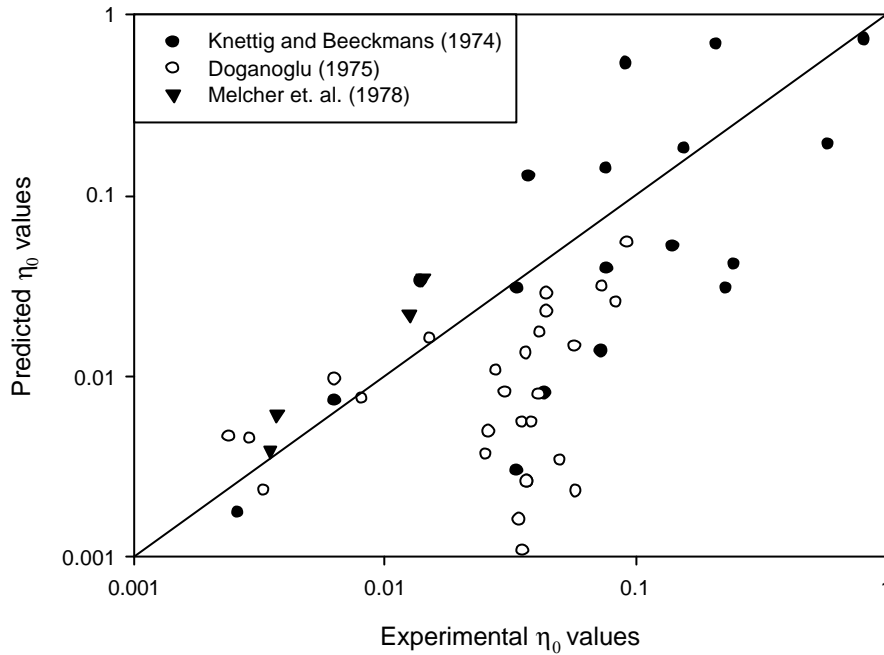


Fig.4-14 Jung-Tien 的經驗式與各項實驗值的比較圖

其中本論文的初始吸附效率經驗式以及 Jung-Tien^[1]經驗式與各項實驗值比較圖的平均變異差 (averaged variance) 如下表 (Table4-1)

所示：

平均變異差	Knettig and Beeckmans (1974)	Doganoglu (1975)	Melcher et. al. (1978)	Total averaged variance
本論文的初始吸附效率經驗式	1.73×10^{-2}	3.28×10^{-4}	1.13×10^{-3}	5.49×10^{-3}
Jung-Tien 經驗式	1.93×10^{-2}	3.93×10^{-4}	4.40×10^{-5}	6.04×10^{-3}

Table4-1. 經驗式在各實驗值的平均變異差

由上表可看出本論文的初始吸附效率經驗式的平均變異差在實驗值為 Knettig and Beeckmans (1974)、Doganoglu (1975) 時皆小於 Jung-Tien^[1]經驗式，但當實驗值採用 Melcher et. al. (1978) 的實驗結果

時，本論文初始吸附效率的平均變異差卻大於 Jung-Tien^[1]經驗式。由 (Table4-3) 可知 Knettig and Beeckmans (1974)、 Doganoglu (1975)皆為實驗條件在小粒徑小流速的情況下，而 Melcher et. al. (1978)的實驗條件則是大粒徑大流速，此一結果表示本論文的經驗式在預測小粒徑小流速下氣懸膠體的初始吸附效率較 Jung-Tien^[1]經驗式來的準確，而 Jung-Tien^[1]經驗式則較適用於大粒徑大流速的實驗條件。

再將 Doganoglu (1975)的實驗數據中氣懸膠體粒徑小於 1.35mm 及流速小於 5cm/s 的數據挑出，與上述兩經驗式相比較，結果如下圖 (Fig.4-15) 所示：

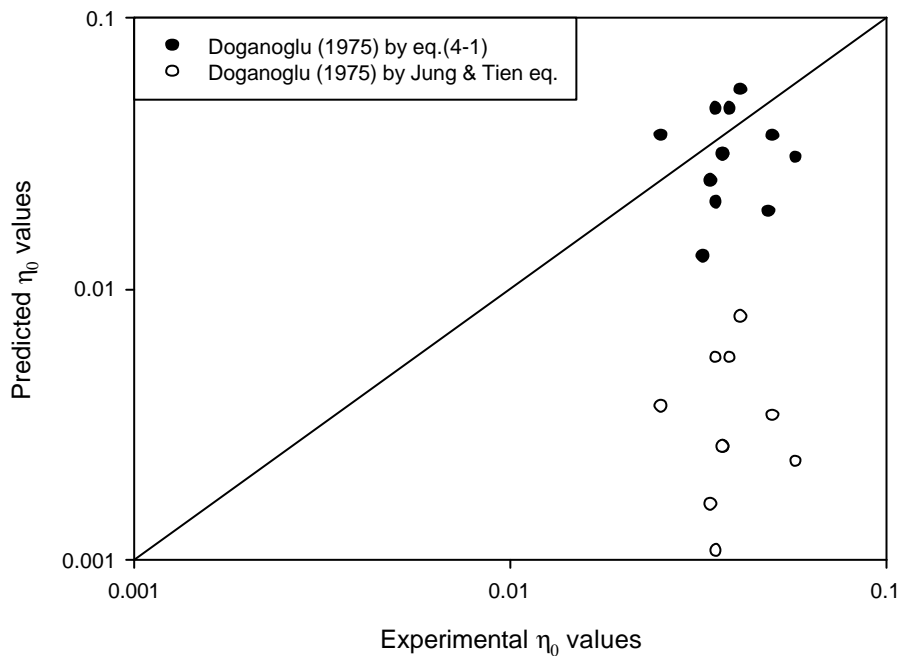


Fig.4-15 本論文的初始吸附效率經驗式、Jung-Tien^[1]經驗式與 Doganoglu(1975) 實驗值($d_p \leq 1.35\text{mm}$ 及 $u_s < 5\text{cm/s}$)的比較圖

其中兩經驗式與 Doganoglu (1975)實驗值比較圖的平均變異差

(averaged variance) 如下表 (Table4-2) 所示 :

平均變異差	Doganoglu (1975)
本論文的初始吸附效率經驗式	1.26×10^{-4}
Jung-Tien 經驗式	6.98×10^{-4}

Table4-2.經驗式在 Doganoglu (1975)實驗值的平均變異差

由上表可看出本論文的初始吸附效率經驗式在小粒徑小流速 ($d_p \leq 1.35mm$ 及 $u_s < 5cm/s$) 的平均變異差小於 Jung-Tien^[1]經驗式且也小於 Doganoglu (1975)所有實驗數據所算出的平均變異差, 代表本論文的經驗式能準確地預測小粒徑小流速氣懸膠體的初始吸附效率。

為了更進一步證實本論文的經驗式確實能準確地預測小粒徑小流速氣懸膠體的初始吸附效率, 我們再與兩組完全在小粒徑小流速操作條件下的實驗值 [Thomas & Yoder (1956)、Paretsky, et al. (1971)^[12]] 相比較, 比較圖 (Fig.4-16、 Fig.4-17、 Fig.4-18、 Fig.4-19) 如下所示 :

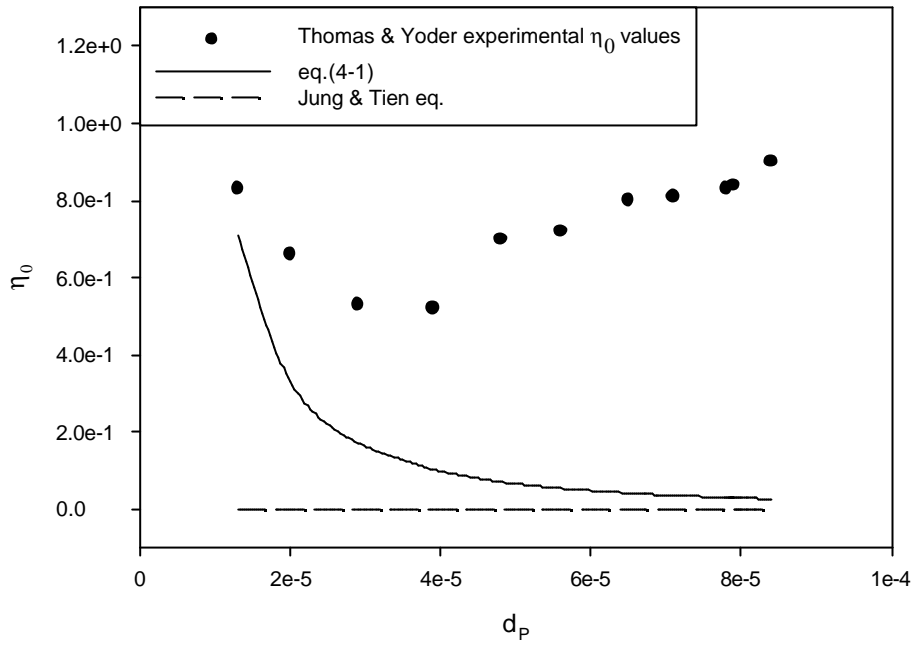


Fig.4-16 本論文的初始吸附效率經驗式、Jung-Tien^[1]經驗式與 Thomas & Yoder (1956)^[12]實驗值的比較圖

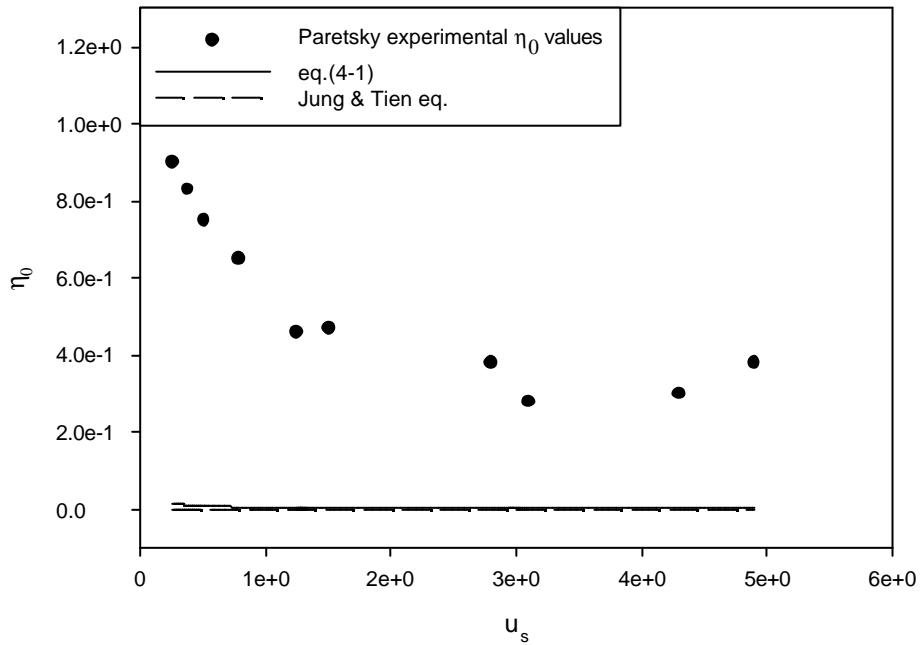


Fig.4-17 本論文的初始吸附效率經驗式、Jung-Tien^[1]經驗式與 Paretsky, et al. (1971)^[12]實驗值的比較圖

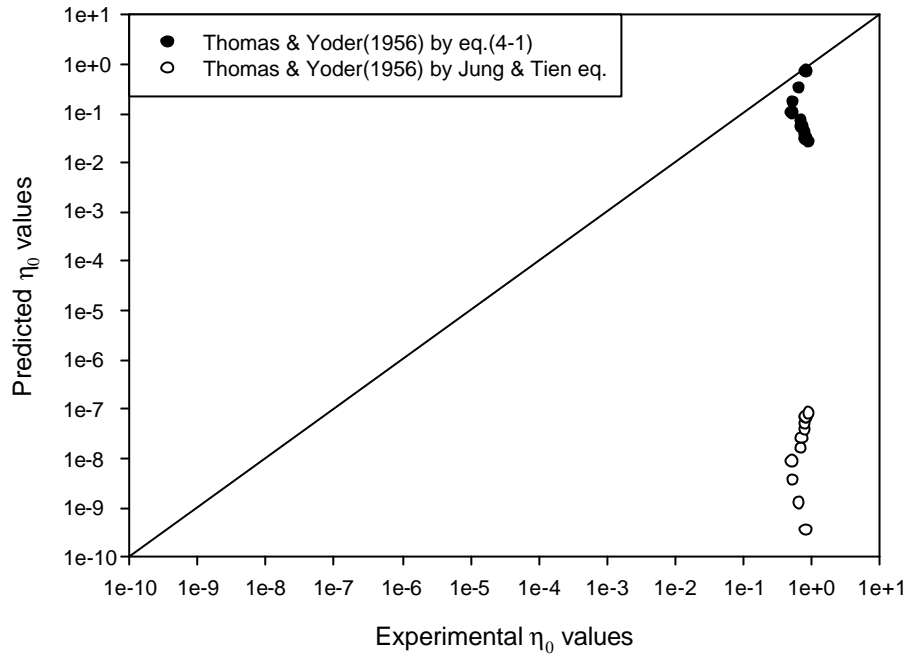


Fig.4-18 本論文的初始吸附效率經驗式、Jung-Tien^[1]經驗式與 Thomas & Yoder (1956)^[12]實驗值的比較圖

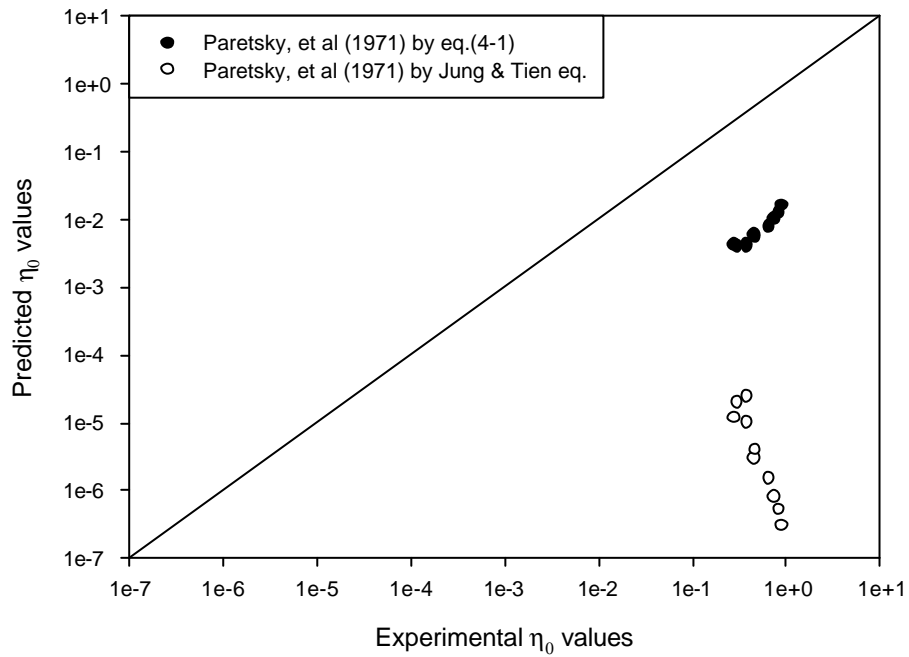


Fig.4-19 本論文的初始吸附效率經驗式、Jung-Tien^[1]經驗式與 Paretsky, et al. (1971)^[12]實驗值的比較圖

其中本論文的初始吸附效率經驗式以及 Jung-Tien^[1]經驗式與 [Thomas & Yoder (1956)、 Paretsky, et al. (1971)]^[12]實驗值比較圖的平均變異差 (averaged variance) 如下表 (Table4-4) 所示：

平均變異差	Thomas & Yoder (1956)	Paretsky, et al. (1971)	Total averaged variance
本論文的初始吸附效率經驗式	2.05×10^{-1}	1.64×10^{-1}	1.85×10^{-1}
Jung-Tien 經驗式	2.81×10^{-1}	1.69×10^{-1}	2.25×10^{-1}

Table4-4.經驗式在 Thomas & Yoder (1956)、 Paretsky, et al. (1971)^[12]實驗值的平均變異差

由上表可看出本論文的初始吸附效率經驗式在小粒徑小流速的平均變異差皆小於 Jung-Tien^[1]經驗式，代表本論文的經驗式確實能準確地預測小粒徑小流速氣懸膠體的初始吸附效率。

而[Thomas & Yoder (1956)、 Paretsky, et al. (1971)]^[12]實驗值的詳細實驗條件列於(Table 4-5)中，至於本論文的初始吸附效率經驗式與 Jung-Tien^[1]經驗式於大流速大粒徑實驗值的比較結果，則見附錄(G)，由於本論文的初始吸附效率經驗式的前項為布朗運動效應項，後項為慣性力項(其前項與後項的力比較圖可見於附錄(F))，所以在附錄(G)中會將 Jung-Tien^[1]經驗式加上本論文的初始吸附效率經驗式的前項來修正，使其在小粒徑小流速的實驗條件下預測得更加準確，將經驗式(4-1)的等號右邊第一項加上 Jung-Tien^[1]經驗式(2-1)後則新經驗式可表示如下：

$$h_0 = 1.29 \times 10^{-6} N_R^{-0.45} N_{St_{eff}}^{-0.661} + 0.2589 N_R^{0.23} N_{St_{eff}}^{1.3437} \quad (4-2)$$

而修正後 Jung-Tien^[1]經驗式的平均變異差在小粒徑小流速的實驗值下與修正前 Jung-Tien^[1]經驗式相比較較小，顯示修正後的 Jung-Tien^[1]經驗式比修正前更能準確預測小粒徑小流速的實驗值，也顯示出布朗運動效應在小粒徑小流速實驗中的重要性。

Table4-3.各實驗的條件及數據^[11]

Summary of Experimental Conditions					
Investigator	Doganoglu(1975)		Knettig and Beeckmans(1974)		Melcher et. al.(1978)
Granular medium Aerosol particles	glass beads DOP(dioctyl-phthalate)		glass beads Uranine and Methylene blue(1:2 wt ratio)		glass beads DOP (dioctyl-phthalate)
Particle diameter	1.35 μ m, 1.75 μ m		0.8 μ m-2.9 μ m		1.5 μ m-4 μ m
Grain diameter	110 μ m, 600 μ m		425 μ m		500 μ m-400 μ m
Flow direction	downflow		upflow		downflow
Serial Numbers of Data List	19 through 54		1 through 18		55 through 60
SR. NO.	d_p (μ m)	d_g (μ m)	u_s (cm/s)	ϕ	$(\phi)_{\text{expt}}$
1	1.50	500	20.00	0.39	0.0063
2	1.50	500	51.00	0.39	0.0337
3	2.53	500	20.00	0.39	0.0139
4	2.53	500	51.00	0.39	0.0763
5	4.00	500	20.00	0.39	0.0375
6	4.00	500	51.00	0.39	0.0914
7	1.50	1000	20.00	0.38	0.0336
8	1.50	1000	100.00	0.38	0.0767
9	2.53	1000	20.00	0.38	0.0730
10	2.53	1000	100.00	0.38	0.1559
11	4.00	1000	20.00	0.38	0.1404
12	4.00	1000	100.00	0.38	0.2097
13	1.50	4000	40.00	0.36	0.0026
14	1.50	4000	240.00	0.36	0.2456
15	2.53	4000	40.00	0.36	0.0433
16	2.53	4000	240.00	0.36	0.5817
17	4.00	4000	40.00	0.36	0.2290
18	4.00	4000	240.00	0.36	0.8125
19	1.35	109	0.98	0.40	0.0328
20	1.35	109	2.02	0.40	0.0355
21	1.35	109	2.69	0.40	0.0343
22	1.35	109	3.83	0.40	0.0371
23	1.35	109	3.83	0.40	0.0369

SR. NO.	d_p (μ m)	d_g (μ m)	u_s (cm/s)	θ	$(\theta)_{\text{expt}}$
24	1.35	109	4.92	0.40	0.0253
25	1.35	109	6.04	0.40	0.0259
26	1.35	109	8.69	0.40	0.0302
27	1.35	109	10.53	0.40	0.0278
28	1.35	109	12.37	0.40	0.0367
29	1.35	109	13.19	0.40	0.0572
30	1.35	109	19.53	0.40	0.0838
31	1.75	109	0.98	0.40	0.0489
32	1.75	109	2.02	0.40	0.0577
33	1.75	109	2.69	0.40	0.0501
34	1.75	109	3.83	0.40	0.0354
35	1.75	109	3.83	0.40	0.0385
36	1.75	109	4.92	0.40	0.0412
37	1.75	109	8.69	0.40	0.0415
38	1.75	109	10.53	0.40	0.0441
39	1.75	109	12.37	0.40	0.0442
40	1.75	109	13.19	0.40	0.0737
41	1.75	109	19.53	0.40	0.0927
42	1.35	596	2.86	0.40	0.0012
43	1.35	596	3.83	0.40	0.0007
44	1.35	596	12.37	0.40	0.0001
45	1.35	596	19.51	0.40	0.0001
46	1.35	596	31.46	0.40	0.0029
47	1.35	596	43.80	0.40	0.0081
48	1.75	596	2.86	0.40	0.0051
49	1.75	596	3.83	0.40	0.0042
50	1.75	596	6.04	0.40	0.0030
51	1.75	596	12.37	0.40	0.0033
52	1.75	596	19.51	0.40	0.0024
53	1.75	596	31.46	0.40	0.0063
54	1.75	596	43.80	0.40	0.0151
55	0.80	425	8.19	0.38	0.0023
56	0.80	425	11.20	0.38	0.0025
57	1.60	425	8.19	0.38	0.0035
58	1.60	425	11.20	0.38	0.0037
59	2.90	425	8.19	0.38	0.0125
60	2.90	425	11.20	0.38	0.0142

Table4-5.各實驗的條件及數據^[12]

Data of Thomas and Yoder (1956) ^[12]					
$u_s(\text{cm/s})$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$d_p(\mu\text{m})$	$d_g(\mu\text{m})$		$(\sigma)_{\text{exp}}$
0.11	1.04	0.13	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.20	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.29	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.39	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.48	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.56	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.65	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.71	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.78	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.79	1600	0.62	0.38
0.11	1.04	0.84	1600	0.62	0.38
Data of Paretsky, et al. (1971) ^[12]					
$u_s(\text{cm/s})$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$d_p(\mu\text{m})$	$d_g(\mu\text{m})$		$(\sigma)_{\text{exp}}$
0.26	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
0.38	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
0.51	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
0.79	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
1.25	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
1.51	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
2.80	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
3.10	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
4.30	1.00	1.10	3300	0.56	0.44
4.90	1.00	1.10	3300	0.56	0.44

第五章 結論

結論 1.

當實驗條件為小粒徑($d_p < 1\text{mm}$)、小流速($u_s < 5\text{cm/s}$)時, eq.(4-1)能準確地預測實驗值。

結論 2.

eq.(4-1)等號右邊第一項(布朗運動效應項)修正 Jung-Tien^[1]經驗式成為新經驗式 eq.(4-2)後, 比修正前更能準確預測小粒徑($d_p < 1\text{mm}$)小流速($u_s < 5\text{cm/s}$)的實驗值, 表示布朗運動效應對於小粒徑($d_p < 1\text{mm}$)小流速($u_s < 5\text{cm/s}$)的實驗非常重要不可忽略。