

## ART 에어로졸 재부유실험 데이터를 이용한 재부유모델의 평가

박재우

제주대학교

제주도 제주시 아라동 1번지

### 요 약

에어로졸 재부유현상은 중대사고 방사선원항 평가에서 그 중요성이 인식되고 있으나 거의 모든 사고해석 코드에서 다루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 지금까지 제시된 몇 가지 유형의 에어로졸 재부유모델을 ORNL에서 실시된 에어로졸 재부유실험 데이터를 이용하여 정확도와 중대사고 해석코드에 적용가능성을 분석하였다. 본 연구에서 고려한 모델은 시간의 멱승함수와 지수함수형으로 표시된 모델들이다. 본 연구에서 분석한 바에 의하면 두 유형에 속하는 대부분의 모델이 재부유량 뿐만 아니라 재부유율을 계산하는 데서 실험데이터와 상당한 편차를 보여 현재의 형태로 중대사고 해석 코드에 접목하는 데는 문제가 있는 것으로 분석되었다. 그러나 보다 광범위한 실험데이터를 통한 보완이 이루어진다면 모델식 자체의 간편함으로 접목이 용이할 것이다.

### 1. 서론

원자로심이 용융되는 중대사고가 발생하는 경우 노심으로부터 유출되는 핵분열생성물 에어로졸은 격납용기로 방출되는 과정에서 상당한 양이 일차계통의 배관 및 구조물의 표면에 부착된다. 부착된 입자는 기체의 흐름에 편승하여 재부유하게 되며 궁극적으로 격납용기로 방출되는 방사성물질의 양을 증가시키는 역할을 한다. 그럼에도 불구하고 거의 모든 중대사고 해석코드는 에어로졸 재부유현상을 고려하지 않고 있기 때문에 방사선원항 평가에 미치는 불확실성도 상당할 것으로 예상된다. 이에 따라 에어로졸 재부유현상을 규명하려는 국제적인 공동연구과제가 International Standard Problem-40 (ISP-40)으로 제안되어 있으며, 궁극적으로는 적절한 재부유모델이 기존의 코드에 도입될 것으로 예상된다.

그동안 몇 가지 유형의 재부유모델이 제시되었다. 이들 모델은 대개 제한적이고 개별적인 실험을 통한 평가는 이루어 졌으나 동일한 실험데이터를 통한 평가는 이루어지지 않았

다. 본 연구는 지금까지 이들 모델을 사용하여 중대사고 에어로졸 재부유 실험인 ORNL의 ART실험[1]을 계산하여 각 모델의 정확성 및 중대사고 해석 코드에 적용 가능성을 분석하였다.

## 2. 에어로졸 재부유현상 모델

에어로졸의 재부유는 중력, 확산, 기체와 벽면과의 온도차이 등에 의하여 배관벽에 부착된 입자가 기체의 공기역학적 힘에 의해서 벽면에서 이탈하여 기체의 중심부로 이동함으로써 발생한다. 부착된 입자에 미치는 공기역학적 힘( $F_{aero}$ )은 배관벽에 평행하게 작용하는 견인력(drag forces)과 수직방향으로 작용하는 인양력(lift forces)이 있다. 한편, 벽면과 부착된 입자사이에는 끌어당기는 접착력(adhesive forces)( $F_{adh}$ )이 존재하는데 van der Waals력, 정전기력 등이 이 힘을 이룬다. 재부유가 일어나기 위해서는 공기역학적 힘이 접착력을 능가하여야 하는데 일반적으로 기체의 유동이 난류일 때만 가능하다. 난류는 벽면에 인접한 벽면층(wall sublayer)과 중심영역으로 구분되며, 두 영역사이에는 경계면이 존재한다. 현재 받아들여지고 있는 학설은 이 경계면에 국부적으로 주기적인 파열(turbulent burst)이 일어난 단의 중심영역 기체가 벽면층으로 침투하고 그에 수반하여 재부유가 발생한다는 것이다.

재부유 모델은 크게 3 가지 유형으로 분류할 수 있는데, 재부유율(1/s)이 시간의 멱승함수( $t^{-b}$ ) 형태로 표시되는 부류와 지수함수( $e^{-Bt}$ ) 형태로 표시되는 부류, 그외 부류이다.

### (1) 시간의 멱승함수형 모델

이 부류에 속하는 모델의 일반식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\gamma(t) = A \cdot t^{-b} \tag{1}$$

여기서  $\gamma(t)$ 는 시간 t에서의 재부유율(1/s)이다. A와 b는 기체의 속도, 입자의 크기, 부착면의 상태 등에 의해서 결정되는 실험계수이며,  $t_0$ 는 모델식이 적용되는 시작시간이다. Reek, Reed & Hall[2], Wen, Kasper & Udischas[3], Fromentin[4] 등이 제시한 모델이 이 범주에 속한다. Reek 등이 제시한 이론에 의하면 표면에 부착된 입자는 접착력에 의해서 탄성변형이 일어나게 되고 여기에 기체의 공기역학적 힘이 작용하면 입자는 탄성진동을 하게 되고, 진동이 커져서 위치에너지의 장벽을 넘게 되면 재부유가 발생한다. 따라서 입자의 탄성 진동방정식으로부터 재부유확률을 계산하여 그것으로부터 (1)식과 같은 형태의 재부유모델을

유도하였다. 계수 A, b를 결정하기 위하여 그들은 직경이 25, 50  $\mu\text{m}$ 인 유리분말을 강철표면에서 부착시켜 기체속도를 5, 10, 60 m/s로 한 상태에서 재부유 실험을 실시하였다. 그들은 재부유가 시작된 직후 아주 짧은 시간동안과 말미의 시간을 제외하면( $1 < t < 10^5$  s) 재부유율을 (1)식 형태로 나타낼 수 있음을 발견하였다. 그들이 조사한 바에 의하면 계수 b는  $1.01 < b < 1.1$ 사이의 값을 갖는다. 본 연구에서는 비례계수 A의 영향은 고려하지 않기로 한다.

Wen 등은 입자직경이 0.2  $\mu\text{m}$ 이상인 실내의 에어로졸을 스텐레스강관에 부착시켜 공기속도를 5.3 m/s와 65.6 m/s로 유지한 가운데서 재부유실험을 실시하였다. 그들은 재부유 초기단계에는 (1)식이 적용될 수 있음을 발견하였다. 그들이 결정한 b값은 기체속도가 5.3 m/s인 경우  $b = -1.28$  ( $t < 180$  s), 65.6 m/s인 경우  $b = -1.76$  ( $t < 360$  s)이다.

Fromentin은 그의 PARESS실험[5]을 해석하기 위하여 (1)식과 같은 형태의 재부유모델을 가정하였다. 입자의 크기가 0.4 - 4  $\mu\text{m}$ 사이에 분포하고 기체속도가 5 - 25 m/s인 경우 그가 제시한 모델은  $b = 1.2\sqrt{u_*}$ 이다. 여기서  $u_*$ 는 걸마찰속도(skin friction velocity)로서 기체속도( $U_\infty$ )와  $u_* = 0.053U_\infty^{0.9}$  (m/s)의 관계가 성립한다. 모델이 적용되는 시간범위는  $2 \text{ s} < t < 10^4 \text{ s}$ 이다.

## (2) 지수함수형 모델

지수함수형 모델의 일반형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma(t) = A \cdot e^{-Bt} \quad (2)$$

앞에서와 같이 A와 B는 실험에 의해서 결정되는 값이다. 이 부류에 속하는 모델은 Matsusaka & Masuda[6], Benson & Bowsher[7], Braaten, Paw & Shaw[8] 등이 제시하였다. Matsusaka 등은 재부유가 일어나는 과정을 2단계로 나누어 각 단계에 대해서 서로 다른 계수를 가지는 (1)식과 같은 재부유 모델을 이론적으로 유도하였다. 입자직경의 중앙값이 3.0  $\mu\text{m}$ 인 에어로졸에 대해서 기체의 속도를 30 m/s, 40 m/s로 유지한 재부유실험을 통하여 그들이 결정한 B값은 초기단계는 0.01-0.02 (1/s), 그 이후 단계는 0.0033-0.005 (1/s) 범위이다. 그러나 각 단계를 구분하는 시간값에 대해서는 구체적인 수치를 제시하지 않았다.

Benson 등은 AEEW[7]에서의 재부유실험을 바탕으로 표면에 부착된 입자는 두 종류의 물질-강하게 부착된 물질과 약하게 부착된 물질-로 구분할 수 있다고 추론하였다. 이들은 강하게 부착된 물질의 재부유 모델로 Langmuir식과 같은 형태를 제시하였으며, 약하게 부

착된 물질의 재부유모델로 (2)식 형태를 제시하였다. 이들이 사용한 에어로졸은 제어봉 물질인 Ag-In-Cd을 가열하여 생성되었으며 입자의 평균직경은  $0.32 \mu\text{m}$ 이었다. 기체속도를 Re 수가 600-7000이 되도록 유지한 상태에서 실험한 결과를 토대로 이들이 제시한 B값은 0.0004 (1/s)이다.

Braaten 등은 석송의 포자 에어로졸을 이용한 재부유실험을 통하여 재부유 초기의 짧은 시간을 제외하면 재부유율이 기본적으로 (2)식의 형태로 나타낼 수 있음을 발견하였다. 이들이 사용한 석송의 포자 크기는 직경의 중앙값이  $27.8 \mu\text{m}$ , 기하학적 표준편차(GSD)가 1.01이었으며, 측정한 시간은 처음 35분동안이다. 이들이 구한 B값은 기체의 속도가  $6\text{m/s}$ 인 경우 0.00387 1/s,  $7.5 \text{m/s}$ 인 경우 0.00835 1/s,  $9 \text{m/s}$ 인 경우 0.0104 1/s이다.

### (3) 기타 모델

앞서 제시된 모델외에도 몇 가지 형태의 모델이 대표적인 예가 Fromentin[4]이 개발한 RESUS모델을 들 수 있다. 이 모델은 Monte Carlo법과 유사한 전산 알고리즘을 통하여 재부유율을 계산하는 방식이다. 입자가 부착된 형태를 다수의 입방체가 쌓인 것으로 가정하여, 각 입방체에 대한 접착력( $F_{adh}$ )과 공기역학적 힘( $F_{acro}$ )을, 각 힘의 확률분포함수인 대수정규분포(lognormal distribution)와 Gaussian분포에 의거 추출하여  $F_{acro} > F_{adh}$ 이면 그 입방체는 재부유되는 것으로 계산하는 방법이다. 따라서 모든 입방체 대해서 이 과정을 거치면 재부유된 입방체의 비율을 구할 수 있고 이로부터 재부유율이 계산된다. 이 모델의 핵심 요소인 각 힘의 확률분포함수에 사용되는 중앙값과 표준편차는 이 모델의 계산결과를 실험데이터에 근접하도록 함으로써 결정한다.

## 3. 결과 및 분석

앞서 제시한 모델들의 정확도와 중대사고 해석코드에의 적용 가능성을 평가하기 위하여, ORNL의 에어로졸 재부유실험인 ART 실험[1] 데이터를 이용하였다. ART실험은 중대사고시의 에어로졸 재부유현상을 조사하기 위하여 실시된 실험으로 ART-02에서 -09까지 실시되었다. 사용된 에어로졸 물질은 철, 아연, 주석, 망간 등의 산화물이며, 실험마다 입자크기 분포가 다른 에어로졸을 사용하였다. 본 연구는 이들 실험 가운데, 가능한 앞서 제시된 모델들에서 고려한 에어로졸과 크기 분포가 유사한 ART-2와 ART-08의 자료를 이용하였다. ART-02실험의 입자직경 중앙값(대수정규분포로 가정한 경우)은  $2.5 \mu\text{m}$ , ART-09는  $28.0 \mu\text{m}$ 이다. 각 실험에서 고려한 기체의 속도는 4.0, 11.9, 23.5, 35.8, 47.7, 59.6 m/s이다. 재부유 모델 (1)과 (2)의 계수 b와 B는 기체속도에 의존하므로 모델에서 고려한 기체속도에 가장

가까운 실험데이터를 이용하였다. 실험에서 주어진 데이터는 일정시간 동안 재부유된 누적 분률이므로 동일한 계산결과를 얻기 위하여 위의 모델식을 적분하여 사용하였다. 모델식의 A계수는 상대적인 비례계수이므로 초기에 실험데이터와 값이 비슷하도록 결정하였다. b값은 각 모델에서 준 값을 기준으로 기체속도가 실험에서의 기체속도에 가까운 값을 선택하여 사용하였다. 그림 1은 Reek 등이 제시한 모델식과 기체속도 60 m/s일 때의 계수( $b=1.1$ )를 이용하여 계산한 결과를 ART-08실험데이터와 비교한 것이다. 모델식의 계산결과와 ART-08실험의 비슷한 기체속도인 59.6 m/s에 비하여 약 절반정도의 낮은 값을 보이고 있으며 오히려 기체속도 47.7 m/s의 실험데이터와 비슷한 값을 보이고 있다.

그림 2는 PARESS모델을 이용하여 계산한 결과를 ART-02실험의 23.8 m/s데이터와 비교한 것이다. PARESS모델은 기체속도가 5-25 m/s에만 적용되며 계수 b가 기체속도로부터 계산되므로 실험 기체속도인 23.8 m/s를 그대로 사용하였다. 모델계산 결과는 실험치보다 약 1/10정도 낮은 값을 보이고 있으며 시간에 따른 증가율도 실험데이터보다 느리게 나타나 있다.

그림 3은 Matsusaka 등이 제시한 모델 계산결과와 ART-02실험데이터를 비교한 것이다. 모델계산에 사용된 계수 B의 값은 그들이 제시한 최대값인 0.005(이 값은 그들의 최대 실험 속도인 40m/s에 해당한다고 가정하였음.)를 사용하였다. 모델계산 결과는 초기에는 비교적 실험데이터에 근접하고 있으나 재부유량의 증가속도에 있어서는 실험치보다 훨씬 빨라 시간이 경과할수록 편차가 커짐을 볼 수 있다.

그림 4는 Benson 등이 제안한 모델을 이용하여 기체속도가 59.6 m/s, 47.7 m/s에서 ART-02실험데이터와 비교한 것이다. 모델계산에 사용된 B값은 그들이 제시한 유일한 값인 0.0004를 이용하였다. 모델계산 결과는 실험데이터와 상당히 큰 차이가 있으며 기체의 속도가 빠를수록 편차가 커짐을 알 수 있다. 이러한 편차의 원인은 모델로 계산한 재부유 증가율이 실험치보다 너무 낮는데 있는 것으로 보인다. 그림에 나타난 바에 따르면 모델은 재부유 증가율을 제대로 계산하지 못하고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 문헌에 보고된 여러 가지 에어로졸 재부유 모델을 이용하여 ART 에어로졸 재부유 실험을 계산하고 결과를 비교·분석하였다. 거의 모든 모델이 제한된 기체속도와 입자크기분포를 근거로 개발되었다. 유사한 조건의 재부유실험을 계산한 결과 계산결과는 실험치와 상당한 편차를 보였다. 전체 재부유량은 입력으로 준 초기치에 크게 의존한다 하더라도 시간에 따른 재부유량의 변화를 예측하는 데도 상당한 오차가 있음을 발견하였다.

더구나 초기치를 가급적 실험데이터에 일치하도록 주었음에도 상당한 편차가 발생한 것은 모델에 사용된 실험계수  $b$ 와  $B$ 에 상당한 불확실성이 포함되어 있음을 의미한다. 따라서 앞서 제시된 재부유 모델을 현재 형태로 중대사고 해석 코드에 접목하는 것은 부적절하며 보다 광범위한 실험데이터에 근거한 모델 보완이 있는 후에 가능하리라 여겨진다. 그러나 대부분의 모델이 간단한 식으로 주어지기 때문에 용이하게 접목할 수 있을 것이다. 문헌[9]에 보고된 자료에 따르면 RESUS모델은 정확성은 상당히 높게 나타났으나 중대사고 해석코드에 적용하는 데는 상당한 어려움이 있을 것으로 예상된다. 이 모델 자체가 확률분포를 이용한 샘플링 프로그램을 필요로 하기 때문이다.

#### 참고문헌

1. A. Alonso, R. Bolado, E. Honanon, "Aerosol Resuspension in the Reactor Cooling System of LWR's under Severe Accident conditions", EUR-13789, 1991
2. Reeks, M.W., Reed, J. and Hall, D., "On the Resuspension of Small Particles by a Turbulent Flow", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, 5740589, 1988
3. Wen, H.Y., Kasper, G., and Udischeas, R., "Short and Long Term Particle Release from Surfaces under the Influence of Gas Flow", J. Aerosol Sci., Vol. 20, No. 8; 923-926, 1989
4. Fromentin, A., *Particle Resuspension from Multi-Layer Deposit by Turbulent Flow*, PSI-Bericht Nr. 38, 1989
5. Fromentin, A. "PARESS: Particle REsuspension Study. In Aerosols, their Generation, Behavior and Applications", Proc. of the 2nd Conf. of the Aerosol Society, 1988.
6. Matsusaka, S. and Masuda, H., "Particle Reentrainment from a Fine Power Layer in a Turbulent Air Flow", Aerosol Sci. and Tech. 24:69-84, 1996.
7. Benson, C.G. and Bowsher, B.R.: Atomic Energy Establishment (AEEW), AEEW-R-24 27, 1988.
8. Braaten, D.A., Paw, K.T., and Shaw, R.H., "Particle Resuspension in A Turbulent Boundary Layer- Observed and Modeled, J. Aerosol Sci. Vol. 21, No. 5:613-628, 1990.
9. A. Alonso, R. Bolado, E. Honanon, "Validation of RESUS Model against ORNL Series -2 Test Experiments on Aerosol Resuspension", EUR-13788, 1991.

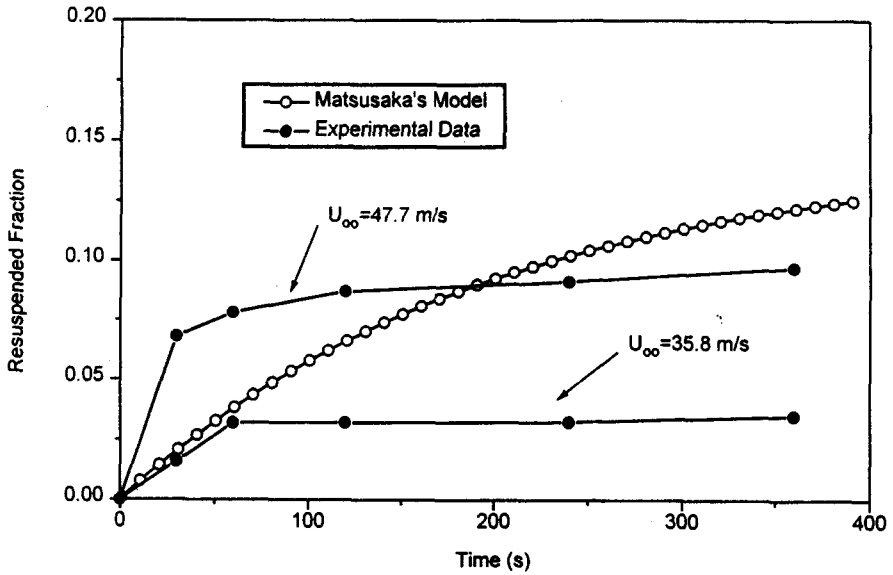


그림 3 기체 속도 40m/s일 때 Matusaka 모델로 계산한 재부유분율과 ART-02실험데이터 비교

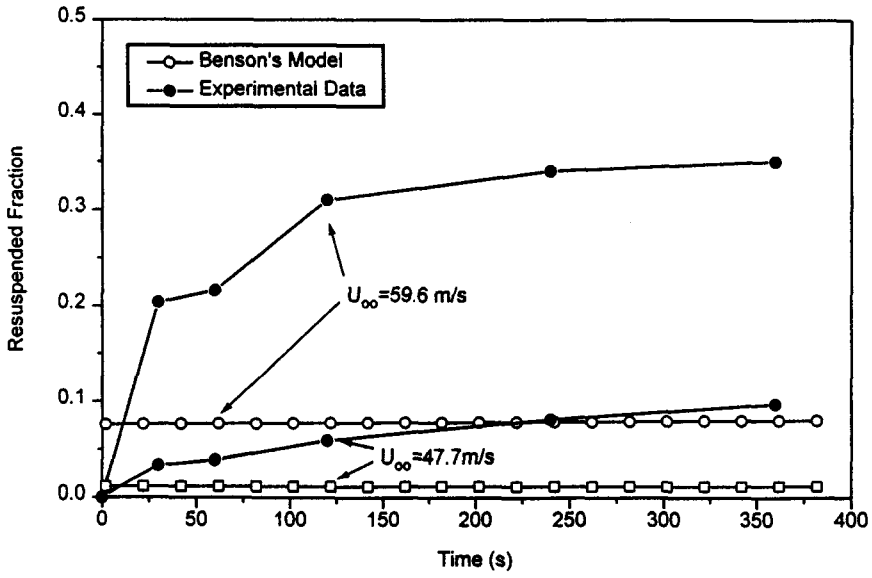


그림 4 기체 속도 59.6 m/s 및 47.7 m/s일 때 Benson모델로 계산한 재부유분율과 ART-2실험데이터 비교

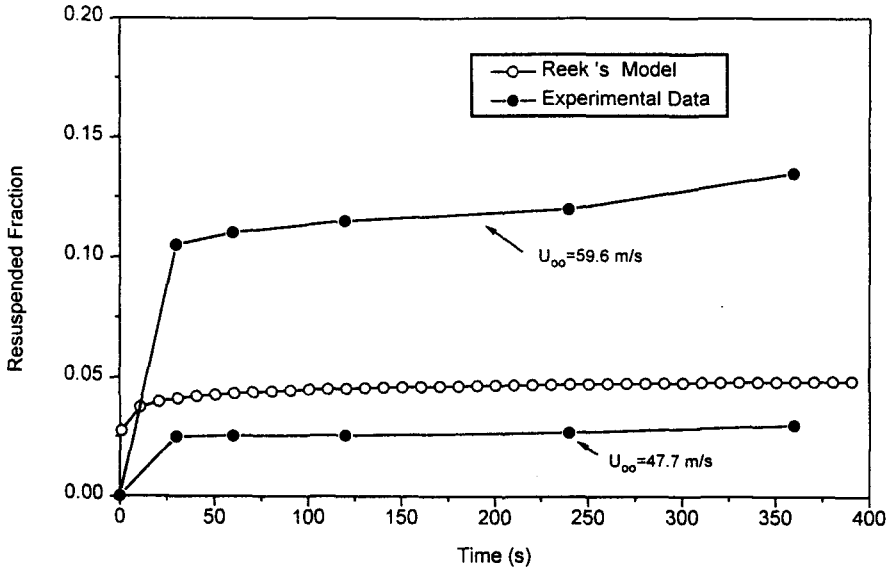


그림 1 기체 속도 60 m/s일 때 Reek 모델로 계산한 재부유분율과 ART-08 실험 데이터 비교

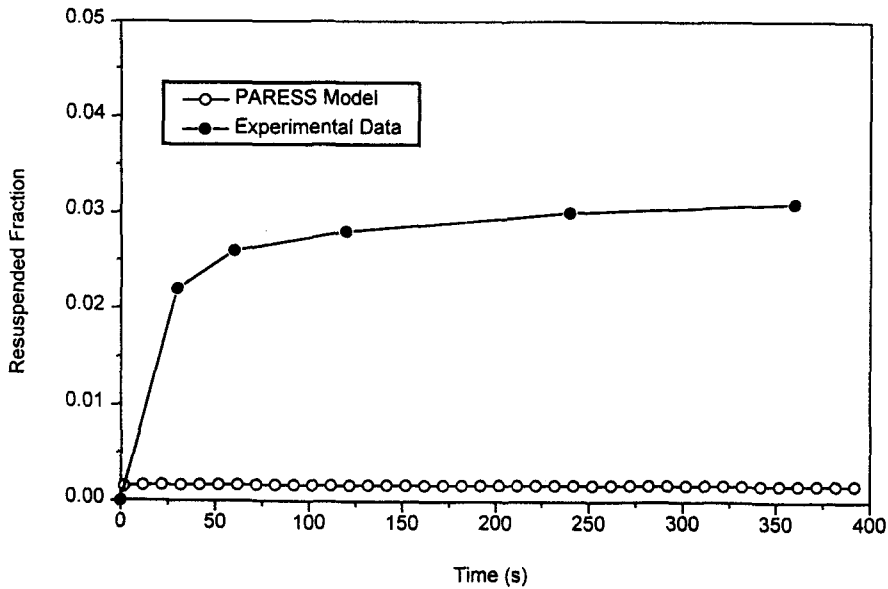


그림 2 기체 속도 23.8 m/s일 때 PARESS 모델로 계산한 재부유분율과 ART-02 실험 데이터 비교