

인체기관지 내에서의 입자분산

이진원* · 이동엽*

1. 서 론

많은 폐질환은 기관지의 하부기도에서 발달하며 에어로졸 불러스기술은 하부기도에서의 폐질환을 초기에 진단할 수 있는 가능성을 가지고 있다.^(1, 2)

불러스기술에서는 입자불러스의 분산정도, 최고농도 위치, 그리고 농도분포의 비대칭성을 나타내는 의를을 주요변수로 기관지의 이상여부를 판단하며, 복잡한 기관지형상과 유동 그리고 입자확산에 의한 분산을 기술하기 위해 유효확산계수를 도입한다. 한호흡주기동안 여러 세대를 거친 입자의 총분산은 유효확산계수를 이용하여 구한 각 세대에서의 국부적인 분산을 더한 것이므로, 불러스기술에서 구강에서 측정된 입자분산을 정확하게 해석하기 위해서는 올바른 유효확산계수모델을 수립하는 것이 필수적이다.⁽³⁾

현재까지의 유효확산계수모델은 기관지내에서의 입자분산을 확산현상으로 보고 입자분산은 각 세대에서 독립적으로 일어난다고 가정했으며, 유효확산계수를 각 세대에서의 국부변수만의 함수로 나타내었다.⁽³⁾ 그러나 최근에 Lee et al.은 수치모사를 이용하여 토출의 경우에는 기존의 유효확산계수모델의 형태가 타당하지만 흡입의 경우 입자분산은 상당한 투입거리동안 발달하고 있는 상태이며 입자가 진행함에 따라 유효확산계수가 증가한다는 사실을 밝혔다.^(4, 5) 또한 흡입에서 토출로 바뀌는 시점에서 입자분산의 비정상효과에 의해 입자분산이 감소한다는 사실을 보이고 이러한 입자분산감소를 고려하는 간단한 형태의 모델을 제시했다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 기존의 유효확산계수모델과 새롭게 제시한 유효확산계수모델을 적용하여 각각 총분산을 계산하고 그 결과를 비교 분석했으며, 좀더 정확한 유효확산계수모델을 얻기 위해 필요한 차후 연구방향을 제시하였다.

2. 본 론

한호흡주기동안 여러 세대를 거친 입자의 총분산을

구하는 방법은 크게 network model 과 trumpet model 로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 호흡동안 폐포의 부피 변화를 고려할 수 있는 아래 형태의 trumpet model 을 사용하였다.

$$(A+v) \frac{\partial c}{\partial t} + Q \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (A \cdot D_{eff} \cdot \frac{\partial c}{\partial x}) - L \quad (1)$$

식(1)에서 A는 해당 세대의 총단면적, v는 길이당 폐포의 부피, Q는 단위시간당 호흡유량 그리고 L은 시간당 길이당 입자손실을 말한다.

상부기도에서는 오피스형태의 성문에 의해 입자분산이 직관의 경우보다 클 것이 예상되지만 현재까지 이 부분에서의 유효확산계수모델이 제시되지 않았으므로 본 연구에서는 일단 직관에서의 유효확산계수를 적용하였다.

2.1 기존의 유효확산계수모델의 적용

기존의 모든 유효확산계수모델은 식(2)와 같은 형태를 가지고 있으며, α 는 상수값을 가진다. 일반적으로 많이 쓰이는 두 모델을 적용하여 입자투입 깊이에 따른 총분산을 구해보면 기존모델의 문제점이 명확하게 나타난다. 총분산 값이 전체적으로 실험결과 보다 작은 것은 상부기도에서 성문에 의한 확산계수증가를 무시한 결과로 볼 수 있으나, 인체실험결과에 의하면 총

$$D_{eff}(i) = \alpha \cdot u \cdot l \quad (2)$$

분산과 투입깊이는 선형적인 관계인데 기존모델을 이용했을때는 비선형적인 결과를 보인다. 특히 15세대정도까지를 포함하는 투입깊이 200mm까지의 결과는 기존의 유효확산계수가 실제보다 훨씬 작은 입자분산을 예측하고 있다는 사실을 보여준다.

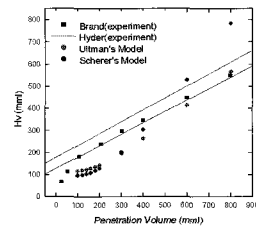


그림 1. 입자투입깊이에 따른 총분산변화 : 기존의 유효확산계수모델 적용

* 포항공과대학교 기계공학과

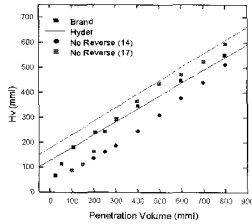


그림 2. 입자투입깊이에 따른 총분산변화 : 비정상분산을 고려하지 않은 경우

2.2 새로운 모델의 적용

Lee et al. 이 새롭게 제시한 흡입시의 확산계수 모델은 식(3)과 같은 형태를 가지며, 분산의 비정상효과를 고려한 수정된 총분산모델은 식(4)와 같다.

$$D_{eff}(i) = \beta(i) \cdot u \cdot l \tag{3}$$

$$H_{cycle}(n) = H_{steady-in}(n-1) + H_{steady-ex}(n) \tag{4}$$

그림 2는 일정세대까지는 식(3)과 같은 형태의 유효 확산계수를 따르고 그 이후의 세대에서는 평형상태의 유효확산계수 즉 기존의 모델을 따른다고 가정하고 분산의 비정상효과를 고려하지 않았을 때 총분산 결과이다. 투입깊이가 깊어짐에 따라 실험 치에 비해 기울기가 커지는 경향이 있으나, 특히14세대까지만 식(3)의 모델을 사용했을 경우에 투입깊이 400mm 정도까지는 실험결과와 매우 비슷한 경향을 보인다. 현재로서는 몇 세대를 지나야 입자분산이 평형상태에 이르는지 알 수 없으므로 이에 대한 연구를 통해서 유효확산계수 모델의 수정이 필요하다.

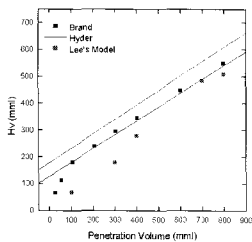


그림 3. 입자투입깊이에 따른 총분산변화 : 비정상분산을 고려한 경우

그림 3은 20세대까지 식(3)을 따른다고 가정하고 분산의 비정상효과를 고려하여(식4) 총분산을 구한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적인 경향은 실험결과와 비슷하나 좀더 정확한 결과를 얻기 위해서는 비정상분산을 고려하는 모델에 좀더 수정이 필요하다.

비정상효과에 의해 상당량의 분산감소가 있음에도 불구하고 총분산이 실험결과와 비슷하다는 사실은 흡입시에 기존의 예상보다 훨씬 깊은 곳까지 입자가 투입된다는 사실을 암시한다.

2.3 차후 연구방향

입자분산은 기관지의 상당한 깊이까지 발달하고 있는 상태이다. 그러므로 상부기도, 전달기도, 미세기관지에서의 분산이 독립적이지 않으며 서로 영향을 받는다. 그러므로 상부기도에서의 분산 그리고 폐포의 운동이 있는 미세기관지에서의 분산을 고려할 수 있는 유효확산계수를 얻는 작업이 필요하며, 많은 세대수를 거친 입자분산의 상태에 대한 연구 또한 필수적이다.

3. 결 론

- 1) 입자분산의 가속을 고려한 새로운 유효확산계수를 적용하여 총분산을 구했으며 기존의 결과와 비교하였다.
- 2) 총분산의 예측에 있어 새로운 유효확산계수모델이 기존의 모델 보다 개선된 결과를 보였으며, 입자분산이 평형상태에 이르는데 필요한 기관지세대수에 대한 연구가 요구된다.
- 3) 입자분산의 가속이 기관지 매우 깊은 곳 까지 계속 된다는 가정 하에서, 입자분산의 비정상 효과를 고려한 모델이 적절하다는 사실을 확인했다.

참고 문헌

- (1) Anderson, P. J., et. al., 1994, "Aerosols as diagnostic tools", J. Aerosol Sci., pp.77~88.
- (2) Blanchard, J. D., 1996, "Aerosol bolus dispersion and aerosol-derived airway morphometry assessment of lung pathology and response to therapy", J. Aerosol Med., pp.183~205.
- (3) Engel, L.A. et. al., 1985, Gas mixing and distribution in the lung, New York, Marcel Dekker
- (4) Lee, J.W. et. al., 2000, "Dispersion of an aerosol bolus in a double bifurcation", J. Aerosol Sci., pp.491~505.
- (5) Lee, D.Y. & Lee, J.W., 2001, "Dispersion during exhalation of aerosol bolus in a double bifurcation", J. Aerosol Sci., pp.805~815
- (6) Lee, D.Y. & Lee, J.W., 2001, "Dispersion of aerosol bolus during one respiration cycle in a model lung airways", submitted to J. Aerosol Sci.