

스프링클러 분무 해석에 영향을 미치는 통계적 액적군집의 영향

김성찬 · 이상우 · 박원주
경일대학교 소방방재학부

Effect of the Statistical Droplet Parcel on Numerical Simulation of Sprinkler Spray

Kim, Sung Chan · Lee, Sang Woo · Park, Won Ju
School of Fire and Disaster Prevention, Kyungil University

요 약

The present study has been performed to investigate the effect of statistical number of droplets on the simulation of the sprinkler spray using fire field model. In order to simulate the sprinkler spray characteristics, the present study uses NIST Fire Dynamics Simulator version 5.2. A group of Lagrangian particle with similar droplet characteristics, such as diameter, velocity, temperature and so on, is represented by parcel concept to decrease the total number of droplets tracked in the simulation. The present study introduces a new parameter to represent the ratio between real number of droplets and computational parcels. The dependency of the number of parcels on the fire suppression characteristics and spray patterns is quantitatively examined for different ratio between the real number of droplets and computational parcels.

1. 서 론

복잡한 화재현상을 이해하고 공학적으로 접근하기 위한 전산화재해석(Computational Fire Analysis) 분야는 1990년대 이후 많은 연구가 진행되어 왔으며 그중에서도 Field model을 이용한 화재공간의 상세해석은 컴퓨터의-특히 개인용 컴퓨터-발전과 함께 비약적인 발전이 이루어졌다¹⁻³⁾. 초기의 Field model은 기하학적으로 단순한 공간에 대하여 난류모델링을 포함한 대류 열유동해석을 위주로 개발되기 시작하여 최근에는 연소, 복사열 전달, 열해리(pyrolysis), 다상 유동(multiphase flow), 병렬계산(Parallel processing), 비정렬 다중격자 기법등을 적용하여 복잡 다양한 화재현상을 규명하기 위한 노력이 진행되고 있다. 많은 Field model들 중에서 NIST의 BFRL (National Institute of Standards and

Technology, Building and Fire Research Lab.)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator)⁴⁾ 프로그램은 화재현상을 해석하는 다양한 모델과 편리한 인터페이스를 제공함으로써 많은 화재공학자들에게 널리 이용되고 있다. 그러나 많은 field model에서 제한적으로 검증된 모델을 물리적으로 매우 복잡한 화재현상에 보편적으로 적용함으로써 때때로 많은 오류를 야기시키기도 한다. 이러한 오류는 일반적으로 연소모델이나 난류모델등과 같이 물리적 현상을 모사하는 과정에서 모델자체의 제약에서 발생하는 경우와 수치적 오류나 격자민감도와 같이 실제현상을 수치적으로 구현하는 과정에서 발생하는 경우가 대부분이다. 특히 스프링클러나 물분무와 같이 화재 현상과 함께 분무거동을 해석해야하는 경우에 있어서는 액적의 거동에 관한 물리적 모델, 열전달 모델등과 같이 물리적 모델에서 발생하는 오류 이외에 실제 분무현상을 모사하기 위한 다양한 수치적 제약조건에 따라 해석결과가 달라질 수 있다. 따라서 물리적으로 정확한 모델을 제공하는 것과 동시에 지속적이고 합리적인 결과를 제공하기 위하여 수치해석 조건의 민감성을 평가하고 결과에 독립적인 수치적 조건을 설정하는것 또한 매우 중요한 문제이다.

본 연구에서는 스프링클러 액적의 통계적 군집수에 따른 FDS 해석결과를 정량적으로 분석하고 스프링클러 화재진압 시뮬레이션에서 독립성을 가지는 액적수에 대하여 논의하고자 한다.

2. 해석방법

본 연구에서는 통계적 액적수가 스프링클러 분무 수치해석에 미치는 영향을 파악하기 위하여 NIST에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator, version 5.2)⁴⁾를 이용하여 공간 내부에서의 분무특성분포 및 열전달 특성을 정량적으로 분석한다. FDS 모델에서는 기상(gas phase)의 거동은 Eulerian 방법으로 해석하고 개별 액적의 거동은 Lagrangian법에 의해 해석하는 Eulerian-Lagrangian법을 적용한다. 초기 스프링클러에서 방출되는 액적의 크기분포는 평균액적직경(mean droplet diameter)보다 작은 액적에 대해서는 log-normal 분포를 사용하고 평균액적직경보다 큰 액적에 대해서는 Rosin-Rammler 분포를 적용한다. 스프링클러 헤드에서 평균액적크기에 기초한 δt 시간동안 방출되는 평균 액적의 수는 다음과 같다.

$$N_T = \frac{Q \cdot \delta t}{\left(\frac{\pi d_m^3}{6} \right)} \quad (1)$$

여기서 Q 는 체적유량, d_m 은 평균액적직경을 나타낸다. 일반적으로 밀집된 분무패턴을 가지는 인젝터의 경우 실제 단위시간당 방출되는 액적수는 10^7 개 수준이며 비교적 분무패턴이 성긴 스프링클러 액적의 경우에도 수 백만개의 단위시간당 방출 액적수를 가지게 된다. 따라서 공간 내에는 수 억개 이상의 액적이 존재하게 되고 수치적으로 많은 액적들을 모두 추적하고 해석하는 데에는 한계가 있다. 따라서 대부분의 수치해석 모델에서는 모든 개별 분무액적을 직접 추적하지 않고 액적의 크기나 속도, 온도등이 유사한 액적군에 대하여 통계적으로 대표성을 가지는 parcel의 개념을 적용하여 계산액적수를 대폭 축소한다

후 parcel들에 대해 운동, 열 및 물질전달 방정식을 해석하고 가중계수를 적용하는 방식을 이용한다. FDS 모델에서의 분무액적의 거동은 다음과 같이 계산된다.

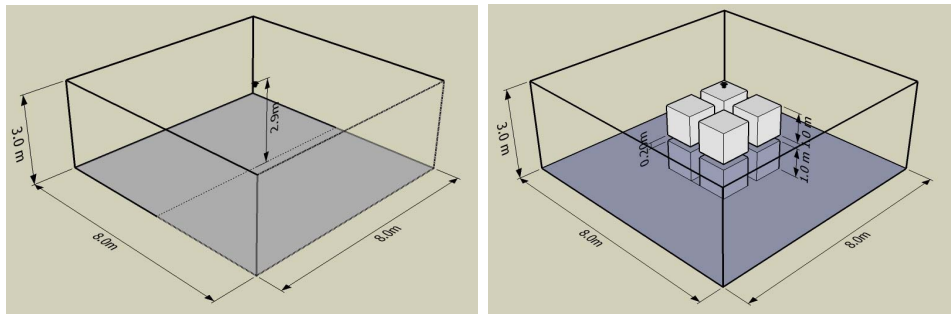
$$\frac{d}{dt}(m_d \mathbf{u}_d) = m_d \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho C_d \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| \quad (2)$$

여기서, m_d 는 액적의 질량, \mathbf{u}_d 는 액적의 속도벡터, \mathbf{u} 는 기상의 속도벡터를 나타낸다. C_d 와 Re_d 는 액적의 항력계수와 액적의 레이놀즈수를 나타내고 다음과 같이 계산된다.

$$C_d \begin{cases} 25/Re_d & Re_d < 1 \\ 24(1 + 0.15Re_d^{0.678})/Re_d & 1 < Re_d < 1000 \\ 0.44 & 1000 < Re_d \end{cases} \quad (3)$$

$$Re_d = \frac{2\rho|\mathbf{u}_d - \mathbf{u}|r_d}{\mu(T)} \quad (4)$$

해석대상 공간은 그림 1에서 보는바와 같이 8 m × 8 m × 3 m 이며 천정과 바닥면을 제외한 측면은 대기중에 개방된 것으로 가정하고 스프링클러 헤드는 높이 2.9 m의 중앙에 위치한다. 본 연구에서는 parcel수에 따른 분무액적의 패턴을 분석하기 위하여 우선적으로 화재가 없는 경우에 대하여 바닥면에서의 액적분포를 비교분석하였다. 분무해석결과를 바탕으로 공간내부에 고체가연물이 존재하는 경우에 대하여 parcel수에 따른 화재 진압 특성 및 공간 내 열 및 물질전달 특성을 상호 비교하였다.



(a) 분무만 고려한 경우 해석 공간 (b) 화재소화를 고려한 경우 해석공간

그림 1. 해석 대상 공간의 형상과 주요 치수

본 연구에 적용된 스프링클러 분무의 초기특성은 액적의 평균직경이 1000 μ m, 액적의 초기속도는 10 m/s, 분사유량은 190 lpm, 분사각이 60~160°이며 스프링클러는 분무 단독 해석의 경우 계산시작과 함께 분사되도록 설정하였고 공간내부에 화재가 존재하는 경우에는 화재 시작 60초 후에 작동하도록 설정하였다. 본 연구에서는 parcel수에 따른 분무 특성 및 화재진압 특성을 분석하기 위하여 이론적으로 방출되는 평균액적수 (N_T)에 대한 계산에서 적용되는 parcel의 수(N_p)를 다음과 같이 정의한다.

$$k = \frac{N_p}{N_T} \quad (5)$$

여기서 k 는 실제 액적수에 대한 계산에 적용된 parcel의 통계적 대표값을 의미하고 적용된 k 값은 표 1과 같다.

표 1. 계산에 적용된 parcel수와 통계적 대표값 (k)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
N_p	300	600	1,000	6,000	60,000
k	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.7×10^{-4}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}

공간내부에 가연물이 존재하는 경우 가연물의 물성은 표 2와 같고 가연물은 바닥에 위치한 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 크기의 가열판에 의해 약 10초 후 자연점화가 유도되고 약 50초간의 화재발달단계를 거쳐 60초에 스프링클러가 작동하는 것으로 설정하였으며 스프링클러 작동직전의 최대발열량은 약 3.0 MW로 계산되었다.

표 2. 계산에 적용된 가연물의 물성값

conductivity [W/mK]	specific heat [kJ/kgK]	density [kg/m ³]	heat of reaction [kJ/kg]	heat of combustion [kJ/kg]
0.25	1.0	500	1,578	25,200

FDS 모델은 경우에 따라 계산격자에 매우 민감하기 때문에 격자에 대한 독립성 평가가 매우 중요하다. FDS 모델에서의 계산격자는 화원의 무차원특성길이를 기초로 하여 설정하는 방식이 널리 이용되고 있는데 무차원 특성길이는 다음과 같이 정의된다⁵⁾.

$$D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho C_p T_\infty \sqrt{g}} \quad (6)$$

일반적으로 환기조건이 원활한 화재에 대하여 격자수는 $4 < D^*/\delta_x < 16$ 정도에서 해의 독립성을 가지는 최소격자를 제공하는 조건으로 알려져 있다⁶⁾. 본 연구에서는 약 D^*/δ_x 를 18정도로 설정하였으며 격자의 독립성에 대한 추가적인 계산을 배제하고 액적수의 통계적 대표값이 분무특성 및 화재진압특성에 미치는 영향을 파악한다.

3. 해석결과

3.1 분무거동 특성에 미치는 영향

그림 2는 k 값에 따른 분무패턴을 분석하기 위하여 바닥면의 중심에서 반경방향으로의 60초 동안 누적된 스프링클러 분무의 단위면적당 누적질량을 나타낸다. 분무 패턴은 노즐 하단에서 가장 작고 반경방향으로 갈수록 누적분무량은 증가하여 약 1.5 m 위치에서 최대값을 가진다. 이후 분무량은 중심으로부터 거리가 증가함에 따라 꾸준히 감소하게 된다. 그러나 k 값이 상대적으로 작은 경우 하나의 parcel이 대표하는 액적들의 수가 많기 때문에 바닥 면에서의 누적 분무질량은 개별 parcel의 거동에 매우 민감하게 된다. 이런 이유로 k 값이 작아짐에 따라 분무패턴의 불규칙성이 발생하고 k 값이 증가함에 따라 이러한 불규칙성은 감소하게 된다. 이러한 분무 패턴의 불규칙함은 실제 화재소화에서 가연물의

표면에 도달하는 분무의 양을 예측하는데 오류를 범할 수 있으며 이러한 오류는 가연물의 소화에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 그림 3은 바닥에서 0.3 m 높이에서 k 값에 따른 단위체적당 스프링클러 분무의 질량 분포를 나타낸다. 앞서 언급한바와 같이 k 값이 작은 경우 분무의 유효반경 내에서도 분무가 도달하지 못하는 부분이 존재하고 일부분은 지나치게 과도하게 예측하는 경향이 있다. 그러나 k 값이 증가함에 따라 분무가 전혀 도달하지 못하는 부분은 거의 없고 분무의 질량유량이 집중되는 경향도 크게 완화되어 분무패턴의 불규칙성이 크게 감소함을 보여준다.

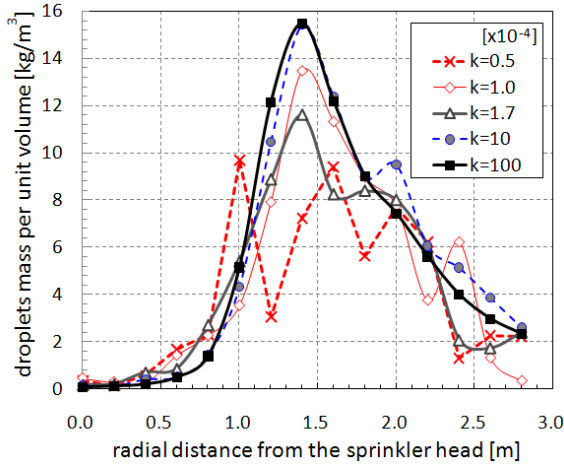


그림 2. 바닥면에서 반경 방향으로의 k 값에 따른 단위면적당 누적분무질량 분포.

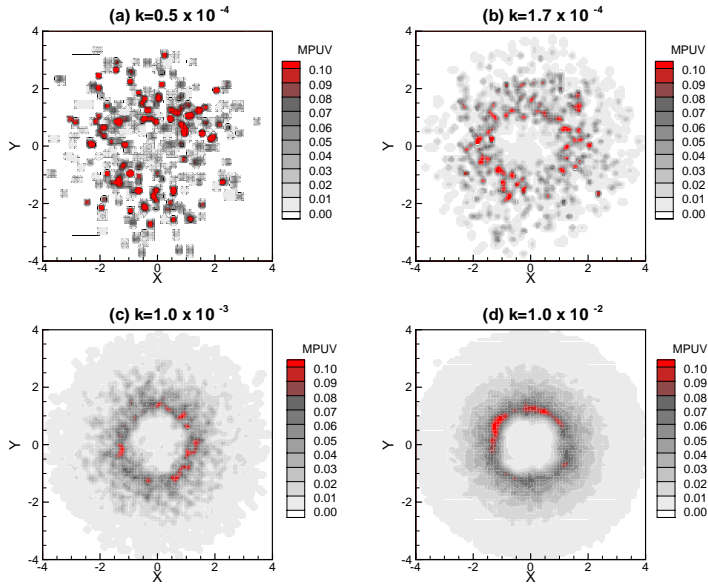


그림 3. $z=0.3$ 높이에서 k 값에 따른 단위체적당 분무질량 분포.

3.2 화재진압 특성에 미치는 영향

그림 4는 공간내부에 가연물이 존재하는 경우 k 값의 변화가 화재진압 특성의 영향을 파악하기 위하여 시간에 따른 발열량 변화를 나타낸 것이다. 계산 시작 약 10초 이후 가열원에 의해 고체가연물에 점화가 이루어져 발열량이 급격히 증가하고 스프링클러가 작동하기 직전의 최대 발열량은 약 3 MW 정도로 나타났다. parcel수에 상관없이 모든 경우에 있어서 스프링클러 작동으로 급격한 발열량 감소가 이루어지지만 parcel의 수가 가장 적은 경우($k=0.5 \times 10^{-4}$, $k=1.0 \times 10^{-4}$) 계산종료시간까지 화재는 소화되지 않고 약 1.0 MW 이상의 발열량을 유지하는 것으로 나타났다. k 값이 증가함에 따라 스프링클러 작동이후 시간에 따른 발열량 감소율은 크게 나타났으며 $k=0.001$ 이상에서는 k 값의 증가에 따라 발열량 감소율은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

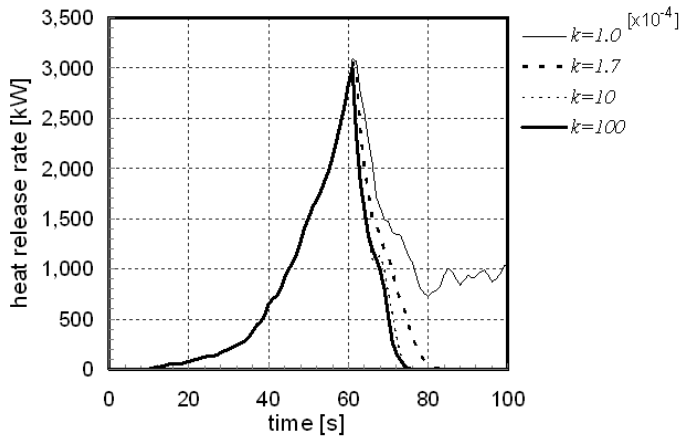


그림 4. k 값에 따른 발열량 변화.

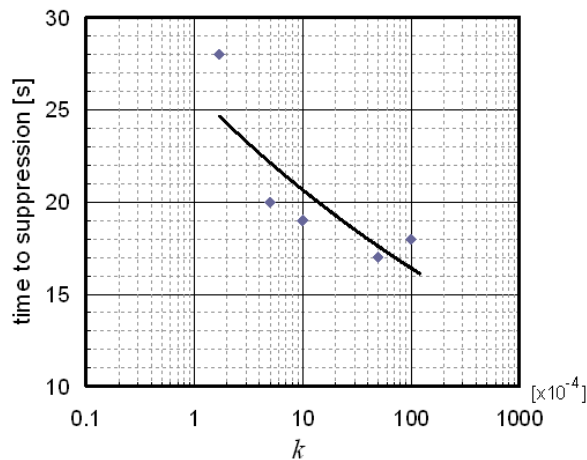


그림 5 k 값에 따른 화재소화시간 비교

그림 5는 액적수의 통계적 대표값이 화재소화시간에 미치는 영향을 분석하기 위하여 k 값에 따른 화재소화 시간을 비교하였다. 소화시간은 스프링클러 작동이후 발열량이 1 kW 이하가 되는데 걸리는 최소시간으로 정의하였다. k 값이 0.5×10^{-4} 과 1.0×10^{-4} 인 경우는 화재소화가 이루어지지 않았기 때문에 도식적으로 나타나지 않는다. k 값이 증가함에 따라 소화시간은 급격히 감소하고 k 값이 0.001과 0.01의 경우 소화시간은 약 1초 정도로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 그림 6은 스프링클러 작동이후 시간에 따른 천정부에서의 기상의 온도변화를 나타낸다. k 값이 가장 작은 1.0×10^{-4} 인 경우를 제외하고는 화재소화 후 천장부 온도가 초기온도 상태로 돌아감을 알 수 있다. 또한 k 값이 증가할수록 시간에 따른 온도감소율이 크고 초기온도 상태로 돌아가는 시간도 빨라짐을 알 수 있다. 전체적으로 $k=0.001$ 과 $k=0.01$ 의 경우는 매우 유사한 결과를 보여주고 있다.

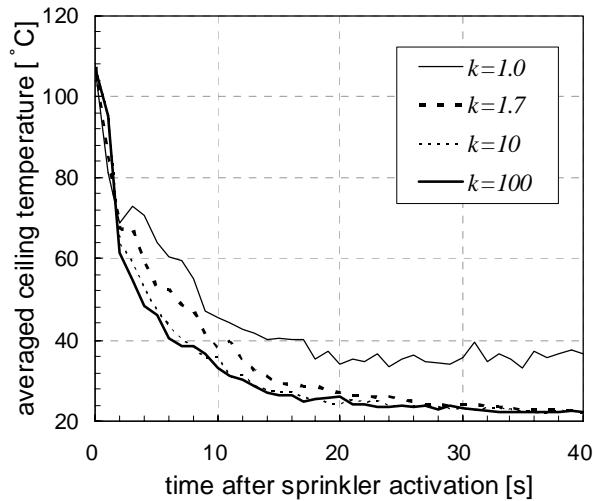


그림 6 k 값에 따른 천정부 평균 온도비교

4. 결 론

수치해석을 통해 복잡한 화재현상을 예측하는 것은 모델의 부정확함이나 물성 데이터 베이스의 제한, 계산용량의 제약 그리고 해석과정의 가정 등으로 인해 여전히 어려운 문제이며 해석결과가 여러 요소에 의해 직간접적인 영향을 받기 때문에 화재 시뮬레이션 과정에 세심한 주의를 필요로 한다. 본 연구는 스프링클러 분무의 화재소화 시뮬레이션에서 액적의 통계적 대표값이 해석결과의 독립성에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 분무 패턴분석에서 k 값이 작은 경우 하나의 parcel이 대표하는 액적들의 수가 많기 때문에 공간에서의 분무패턴은 개별 parcel의 거동에 매우 민감하게 된다. 따라서 k 값이 작은 경우 하류에서 불규칙한 분무패턴이 발생하고 k 값이 증가함에 따라 분무패턴의 불규칙 정도는 감소하게 된다.

2) 분무해석에 독립성을 가지지 못하는 k 값은 때때로 공간내의 분무분포에 직접적인

영향을 미치게 되어 분무가 도달하지 않거나 혹은 지나치게 과대 예측된 분무량을 제공하게 된다.

3) 스프링클러 작동이후 초기 화재진압과정은 k 값에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보이지만 전체 화재 소화 과정은 k 값에 따라 크게 차이를 보인다. 특히 k 값이 상대적으로 작은 경우 소화시간은 비교적 큰 차이를 나타내고 k 값이 상대적으로 큰 경우 소화시간의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 본 연구결과 k 값이 0.001 이상에서는 분무형태나 발열량 변화, 화재소화시간 및 천장부 온도분포등에서 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 이 값은 FDS 모델에서 제공되는 설정 값보다 6배 더 큰 값으로써 해석결과에 대한 통계적 분무액적수의 독립성을 확보하기 위해서는 기본적인 FDS 모델의 설정 값에 대한 고찰과 민감도 해석이 필요하다.

본 연구는 비록 공간화재에서 독립성을 가지는 계산격자에 대해 연구가 수행되었으나 계산격자의 민감도와 분무 액적수의 통계적 대표값이 동시에 고려되지는 않았다. 따라서 추가적인 연구를 통하여 계산격자와 액적수의 통계적 대표값 사이의 상호 관계를 고려한 민감도 조사가 종합적으로 이루어질 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 지정 경일대학교 자동차부품시험지역혁신센터의 지원을 받아 수행하였음.

참고문헌

1. Ewer, J., Galea, E. R., Patel, M. K., Talyer, S., Knight, B., and Petridis, M. (1999). "SMARTFIRE: An Intelligent CFD based Fire Model," J. of Fire Protection Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 13-27.
2. 김성찬, 이성혁 (2006). "수정된 체적 열원 모델을 이용한 실내화재의 연기농도 예측," 대한설비 공학회지, 제 18권 4호, pp. 344-350.
3. Kim, S. C., and Ryou, H. S. (2003). "An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression Characteristics Using a Water Mist in an Enclosure," Building and Environment, Vol. 38, No. 11, pp. 1309-1316.
4. Mcgrattan, K. B., Bryan, K., Hostikka, S. and Floyd, J. (2008). "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide," NIST Special Publication 1019-5, NIST, Gaithersburg, MD.
5. Cox, G. (1995) "Combustion Fundamentals of Fire," Academic Press, New York.
6. US Nuclear Regulatory Commission (2007). "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Application," NUREG-1824, Washington, DC.