

지하철 터널내 화재시 연기의 확산과 제연에 관한 수치해석적 연구

조민태, 서상호, 손봉세*, 성순경*
 숭실대학교, 경원전문대*

A Numerical Study on Smoke Propagation and Control
 for Subway Tunnel Fire

Mintae Cho, Sangho Suh, Bongsei Son*, Sunkyung Sung*
 SoongSil Univ., Kyungwon College*

1. 서론

쾌적한 지하철 실내공간의 확보를 위하여 적당한 온도와 습도를 유지시켜 주고, 오염되지 않은 신선한 공기를 실내공간에 공급해야 한다^(1,2). 또한, 잠재위험 중에서도 차량 운행 중 발생할 수 있는 화재로 인한 안전을 확보하는 것은 가장 중요한 문제이다. 특히, 지하철화재는 연소조건이 지상 화재와는 다르기 때문에 불완전연소에 의한 다량의 화재생성물의 발생으로 승객 및 직원의 안전한 피난로의 확보와 원활한 소화활동을 위한 제연대책이 필요하다^(3,4).

지하철 본선은 단선 또는 복선의 긴 터널로 구성되어 있으며 환기 설비는 단선구간의 경우 열차진행 방향에 따라 급기 및 배기팬을 작동시켜 발생된 연기를 대기 중으로 방출하고, 복선구간은 역사 중간에 급기팬, 역사의 양쪽 끝 부분에 배기팬을 설치하여 터널내의 공기를 환기시키는 방법을 채택하고 있다. 지하철내에 화재가 발생하면 인명대피를 위하여 환기용 송풍기에 의한 제연을 하게 되는데, 이때 터널내의 팬은 화재발생 위치에 따라 급·배기 방향을 바꾸어 가면서 운전하게 된다. 송풍기를 역회전시키면 송풍효율의 감소로 인해 송풍량이 감소된다. 이때 제연풍속을 최저 설계속도인 2.5 m/s 이상으로 유지시키기 위하여 송풍기의 풍량은 환기풍량 또는 제연풍량중 큰 용량에 맞도록 설계하고 있다.

본 연구에서는 지하철 터널내에서 화재가 발생하였을 때 송풍기의 설계 풍량에 따른 제연특성을 파악하고자 하였다. 따라서 본 연구는 지하철 터널내 환기부를 통한 제연유동현상을 컴퓨터 시뮬레이션으로 평가하여 제연설계의 적정성을 확보하고, 최적의 제연대책을 제시함을 목적으로 한다.

2. 선정 지하철 터널의 특징

본 연구의 평가 대상인 지하철 터널은 크게 단선터널과 복선터널 구간으로 구성되어 있다. 터널의 단면형상은 상자형(box type)과 마제형(horse-shoe type)이며, 지하철 터널의 최대 구배는 3/100이 넘지 않도록 설계되어 있다. 지하철 터널에 대한 제연설비의 특징은 터널의 중간부분에서 화재가 발생하면 제연을 위한 급·배기팬을 터널 양쪽에서 동시에 작동하도록 되어 있다. 단선구간의 경우 역사와 역사 사이에 급기구와 배기구가 각각 1개소씩 설치되어 있고, 승강장에서는 환기용으로 전환하여 사용할 수 있는 공조급기와 유막급기 장치가 있다. 복선구간의 경우는 역사와 역사사이에 2개소의 배기구와 1개소의 급기구가 설치되어 있다. 복선구간에서는 양쪽 역사의 바깥쪽 환기구를 급·배기용으로 전

환하여 사용할 수 있게 되어 있다. Fig. 1은 복선구간의 모델로 선택된 A역-B역 구간의 환기구의 위치를 나타낸 그림이다. Table 1에는 복선터널내에 화재가 발생하였을 때 각 환기구를 통한 제연설계 풍량 및 풍향을 나타내고 있다. Fig. 2는 복선구간의 단면형상과 치수를 나타내고 Fig. 3은 수평 터널내에서 화재가 발생할 경우에 대하여 설계된 제연방향을 나타내며, Fig. 4는 경사 터널내 화재발생위치에 따른 제연풍향을 나타내고 있다. 그림에서 ●는 화재위치를 나타내고, 화재위치는 좌측선로로 한정하였다. Fig. 4의 (a), (b)는 B역사가 아래쪽에 위치한 경우에 대한 제연방향이며, Fig. 4의 (c), (d)는 A역사가 아래쪽에 위치하였을 때의 제연 방향이다.

Table 1. Air volume through the ventilation system in the twin tunnel in case of fire (↓ : infiltration, ↑ : exfiltration, unit : CMM)

Ventilation	①	A sta.	②	③	④	B sta.	⑤
Fire occurred in the A station	3420 ↓	2050 ↓	2160 ↓	4320 ↑	3600 ↑	2050 ↑	5400 ↑
Fire occurred in the B station	5700 ↑	2050 ↑	3600 ↑	4320 ↑	2160 ↓	2050 ↓	3240 ↓

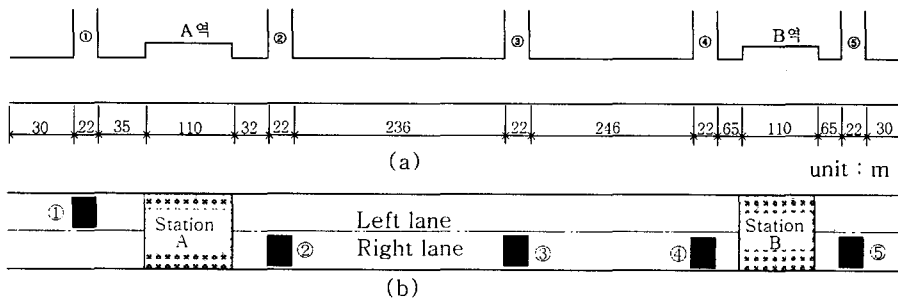


Fig. 1. The location of ventilation boxes and dimensions of the twin tunnel between stations A and B

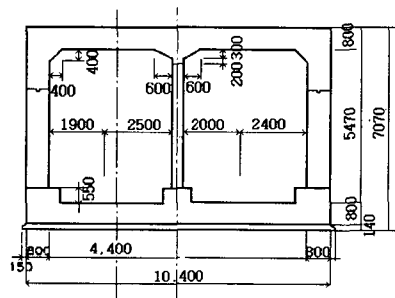


Fig. 2 The section shape and dimension of twin tunnel (unit : mm)



Fig. 3. Direction of the smoke ventilation in the horizontal twin tunnel

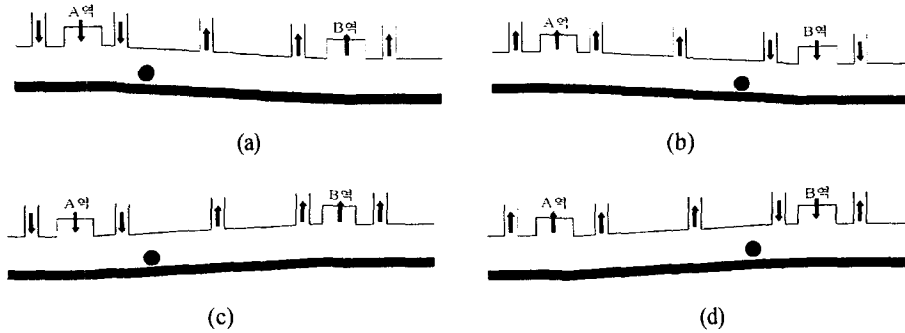


Fig. 4. Direction of the smoke ventilation in the inclined twin tunnel

3. 지하철 터널의 이상화 모델

실제 지하철 터널은 기하학적 형상이 상당히 복잡하나 본 연구에서의 복선구간인 A-B역 구간은 실제 설계도면에서는 곡선구간이지만 곡률반경이 크기 때문에 직선으로 이상화하여 기류상태와 공간온도분포를 계산하였다. 또한, 실제터널의 일부가 경사지게 설계되어 있으므로 구간내의 경사에 따른 영향을 고찰하기 위하여 역사를 제외한 역사 사이의 터널내 구간이 수평인 경우와 경사진 경우로 구분하여 유동현상을 파악하였다. 이때, 터널의 바닥 기울기는 실제 설계 상에서 나타나는 최대기울기인 3/100을 적용하였다. 복선터널의 두 선로 사이의 기둥은 유동에 미치는 영향이 적을 것으로 판단하여 본 연구에서는 고려하지 않았다.

4. 수치해석 방법

지하철 터널내 기류상태 및 공간온도분포를 구하기 위하여 적용된 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes방정식, 에너지 방정식을 시간평균화된 텐서형으로 나타내면 각각 (1)~(3)식과 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + B_i \quad (2)$$

$$\rho u_j \frac{\partial H}{\partial x_j} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

여기서, u_i 는 속도벡터이고, ρ 는 밀도, μ_e 는 유효점성계수(effective viscosity)이며, p 는 정압, B , H 와 λ 는 각각 체적력, 전엔탈피(total enthalpy) 및 열전도계수(thermal conductivity)를 나타낸다. 전엔탈피는 식 (4)와 같이 엔탈피, h 의 항으로 표현할 수 있다^(5,6).

$$H = h + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (4)$$

지하철 터널내 환기구를 통한 기류상태 및 공간온도분포에 관한 지배방정식을 해석하기 위하여 유한체적법을 이용하여 이산화방정식을 구하였다. 이때 사용된 격자계는 비

엇물림격자계(non-staggered grid system)이다. 지하철 터널내 기류상태 및 공간온도분포를 평가하기 위해 지하철 터널모델내 3차원 유동장의 격자를 $223 \times 12 \times 19$ 로 하였다. 운동량 방정식의 유효점성계수를 계산하기 위해서 본 연구에서는 RNG $k-\epsilon$ 모델을 적용하였고, 지배방정식의 대류항은 QUICK방법을 이용하였다. 또한, 운동량방정식의 압력항처리하는 압력수정방법을 이용하는 SIMPLE방법을 적용하여 압력수정에 관한 근사 이산화방정식을 압력과 속도의 상관관계를 고려한 연속방정식의 이산화방정식으로부터 구하였다. 본 연구는 CFX 4.1 code을 이용하였다⁽⁷⁾.

5. 결과 및 검토

5.1 기류상태

지하철 터널내에서 화재발생시를 대비하여 설계된 제연대책을 검토하기 위하여 수치해석적인 방법으로 기류상태를 검토하였다. 공기가 유·출입되는 부분에서의 속도를 경계조건으로 주기 위하여 Table 1에 나타나 있는 각 환기구와 역사에서의 제연 설계풍량으로부터 입구에서의 평균속도를 구하였다. 역사 사이의 거리가 터널의 높이나 폭에 비하여 대단히 길기 때문에 길이방향에 대하여 1/10으로 그림을 축소하여 나타내었다. Fig. 5는 Fig. 3 (a)와 같은 복선의 수평 지하철 터널구간일 때 A역과 B역 사이 구간 중 A역 부근에서 화재가 발생하였을 경우 제연에 따른 속도분포를 계산한 결과이다. Fig. 5 (a)는 A역 주위의 속도분포 중 B역의 왼쪽으로 향하는 터널의 중앙면에서의 속도분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 급기구를 통하여 들어온 공기는 A역 왼쪽으로 들어오는 공기와 함께 B역으로 향하고 있다. 급기구를 통하여 유입된 공기가 A역사를 지나면서 유량이 증가함에 따라 속도가 최저설계온도 2.5 m/s이상으로 증가하여 터널내로 들어간다. 이는 Table 1에 나타난 바와 같이 복선터널구간에서 설계된 흡기풍량에 비하여 배기풍량이 많으므로 왼쪽터널로부터 공기가 유입된다고 사료된다.

Fig. 5 (b)는 A역에서 B역쪽 터널의 중앙단면에서의 속도분포를 나타낸 그림이다. A역사의 왼쪽환기구에서 유입되는 공기는 역사에서 유입되는 공기에 의하여 유동속도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 역사를 통과한 공기 역시 A역에 설치되어 있는 환기구를 통해 유입되는 공기에 의해 평균속도가 증가되어 터널내로 들어가고 있다. 이때 터널내에서는 평균풍속이 2.5 m/s이상을 유지하고 있음을 알 수 있다.

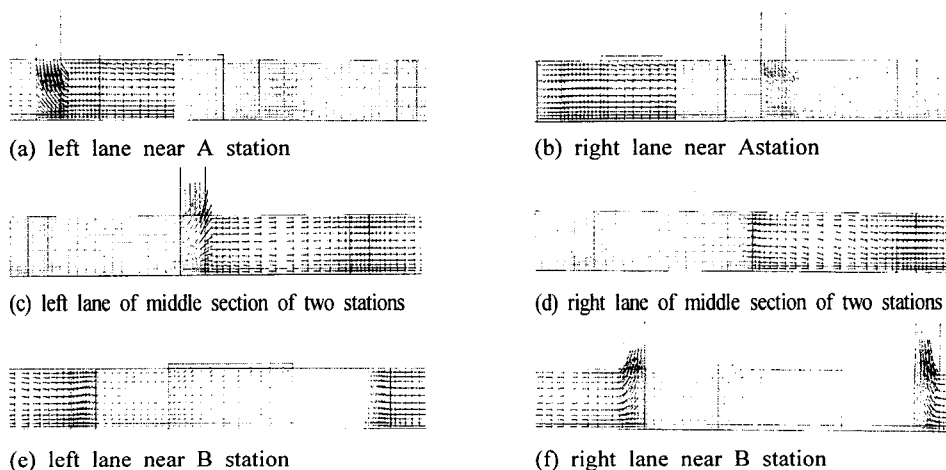


Fig. 5. Velocity profiles in the horizontal twin tunnel during smoke ventilation (Fire area : near A station)

Fig. 5 (c)와 (d)는 A역과 B역 사이에 대한 복선터널 구간의 중간위치에서 양 터널의 중앙면에서의 속도분포를 나타낸 그림이다. (c)는 A역을 향하는 터널의 중앙단면에서의 속도분포이고, (d)는 B역을 향하는 터널내의 중앙단면에서의 속도분포이다. Fig. 1에서 이미 설명한 바와 같이 복선터널구간에는 역사사이에 있는 터널의 중앙부분에 환기구가 하나 더 설치되어 있다. 따라서 터널내를 흐르던 공기는 Fig. 5 (d)에서와 같이 B역에 도달하기 전에 터널의 중간에 설치되어 있는 환기구를 통하여 일부의 공기가 배기되고 평균속도가 감소한 후 B역으로 향하여 흐른다.

Fig. 5 (e)와 (f)는 B역 주위에서의 유동상황을 나타낸 그림이다. B역사에서도 공기가 배기되고 있으며, 역사의 전·후에 설치되어 있는 환기구를 통하여도 공기가 배기되고 있다. A역으로부터 들어온 공기의 대부분은 A역사 앞쪽의 배기구를 통하여 배기되고, 역사쪽으로는 비교적 적은 양의 공기가 흘러가고 있다. 지하철 터널구간내의 풍량의 균형을 위하여 배기되는 풍량중 부족한 양은 B역의 오른쪽 터널로부터 유입되고 있으며, 이중 대부분이 B역의 오른쪽에 설치된 환기구를 통하여 배기되고 있다.

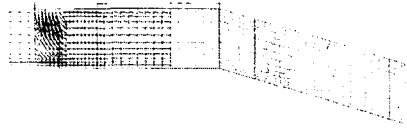
Fig. 6은 A역과 B역 구간의 터널이 경사져서 B 역이 A역보다 아래쪽에 위치한 경우에 대한 속도분포를 나타낸 그림이다. 특히, Fig. 6의 경우는 화재가 A역의 가까운 곳에서 발생한 경우이므로 가열된 공기를 A역보다 아래쪽에 위치한 B역으로 유동시키도록 해야 한다. 이러한 경우에도 그림에서 보는 바와 같이 터널부분에서의 평균속도가 2.5 m/s 이상을 유지하고 있음을 알 수 있다. 경사 복선터널구간으로 되어 있는 경우에 대해서도 두 역사가 수평하게 놓여 있는 경우와 유사한 흐름을 나타낸다.

Fig. 7은 A역과 B역 구간의 터널이 경사져 A역이 B역보다 아래쪽에 위치한 경우에 대하여 계산된 속도분포이다. 화재발생위치는 수평인 경우와 같이 A역쪽에서 발생하게 되고 터널내의 유동이 A역으로부터 B역으로 흐르도록 설계되어 있다. 따라서 화재발생에 따른 온도상승의 영향으로 A역에서 B역으로 불어 올라가는 유동에 도움을 주게 되어 다른 경우에 비하여 비교적 속도가 빠르게 나타난다.

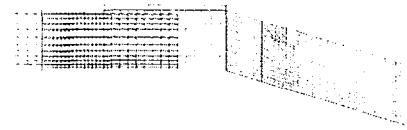
5.2 공간온도분포

지하철 터널내에서 화재가 발생할 경우에 대비하여 설계된 제연대책을 평가하기 위하여 화재하중을 70 kW/m^2 가 발생하는 것으로 가정하였다. 부력의 영향을 고려하였고, 정상상태로서 계산하였다.

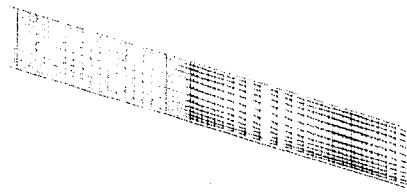
Fig. 8은 수평 복선터널구간에서 화재발생시 공간온도분포를 나타낸 그림이다. 화재가 지하철 터널내 A역사 부근에서 발생하였을 때에 대한 결과이다. 수평터널에서 화재가 발생하였을 때의 온도분포는 복잡하다. 화재영역에서 발생된 고온 공기는 유동의 하류 방향으로 흘러가면서 점차 천정쪽으로 상승하고 있다. 두 역사의 중간부분에 설치된 환기구를 통하여 고온공기(약 100°C)중 일부가 배출되므로 전체적으로 터널내에서 고온의 공기량이 감소된다. 상승된 공기중 터널중간부분의 환기구를 통하여 배기되지 않은 공기는 하류방향으로 흘러가면서 점차 온도가 감소하고 있다. 터널을 따라 흐르던 고온의 공기(약 50°C)는 B역사의 앞쪽에 있는 환기구를 통해 대부분이 배출된다. 그리고 B 역사에서는 고온의 공기가 거의 남아 있지 않음을 알 수 있다. B역사에서 A역방면의 끝부분에서는 평균적으로 거의 50°C 정도의 온도분포를 갖는다. 그러나 대부분 역사의 환기구를 통해 배출되므로 역사내에서는 고열로 인한 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. 경사 복선터널구간에서의 공간온도분포를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 전체적인 공간온도분포는 수평인 경우와 유사하게 나타나고 있다. A역사가 B역사보다 위쪽에 위치한 경우(Fig. 9)에는 열전달에 의하여 가열된 공기가 수평인 경우보다 역사로 비교적 많이 유입되고 있지만, 역사의 끝부분까지는 미치지 못하고 대부분 역사의 환기구를 통해 배출되고 있다.



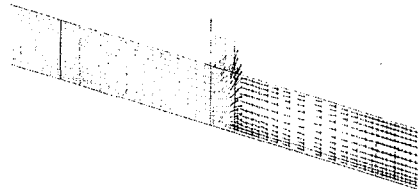
(a) left lane near A station



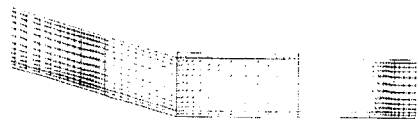
(b) right lane near A station



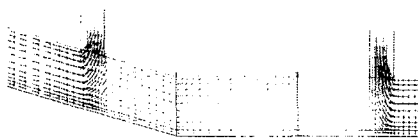
(c) left lane of middle section of two stations



(d) right lane of middle section of two stations



(e) left lane near B station

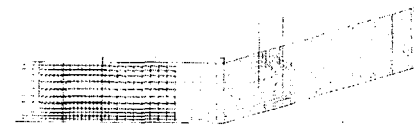


(f) right lane near B station

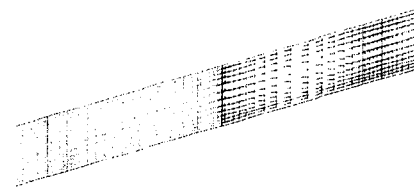
Fig. 6. Velocity profiles in the inclined twin tunnel during smoke ventilation (B station is located at low level)



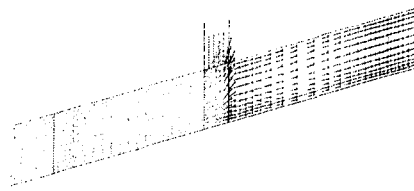
(a) left lane near A station



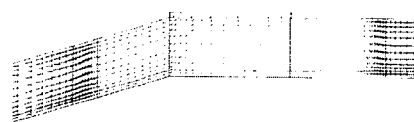
(b) right lane near A station



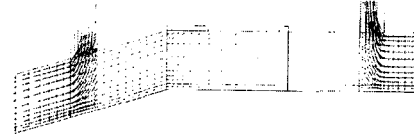
(c) left lane of middle section of two stations



(d) right lane of middle section of two stations



(e) left lane near B station



(f) right lane near B station

Fig. 7. Velocity profiles in the inclined twin tunnel for smoke ventilation (A station is located at low level)



Fig. 8. Temperature contour shades in the horizontal twin tunnel during smoke ventilation (Fire area : near the A station)

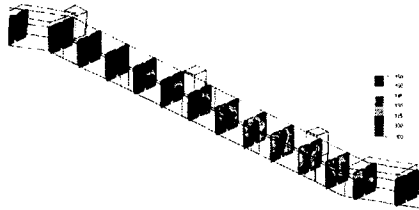


Fig. 9. Temperature contour shades in the inclined twin tunnel during smoke ventilation (B station is located at low level)



Fig. 10. Temperature contour shades in the inclined twin tunnel for during smoke ventilation (A station is located at low level)

6. 결론

지하철 터널내 환기부를 통한 기류상태의 해석과 복선구간에 대한 연유동특성을 고찰하였다. 화재발생시 각 구간에서 환기팬에 의한 설계 풍량을 기준으로 기류상태를 수치 해석한 결과 수평 터널이나 경사 터널 모두 터널내에 발생된 연기가 환기구를 통해 유출됨을 확인할 수 있었다. 설계풍량에 의한 화재발생 터널내의 평균속도는 최저 설계풍속인 2.5 m/s 이상이 됨을 알 수 있다. 화재시 지하철 터널내 환기에 의한 공간온도분포를 평가하기 위하여 자연대류를 고려한 열유동문제는 지하철 터널내에 화재발생시 가열된 연기는 대부분 역사에 도달하기 전에 화재지점에서 가장 가까운 환기구를 통하여 배출되고 있다. 터널내의 온도분포를 살펴보면 차량주위에서는 발열에 의하여 높은 온도를 보이고 있지만 배기되고 있는 방향의 터널내에서는 급기된 공기로 냉각되어 평균 50℃정도를 보이고 있다. 또한 고온의 공기는 역사의 끝부분까지 미치지 못하고 대부분 역사의 환기구를 통해 배출되고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. 福代和, 下田吉, 水野, “地下空間の氣流・溫熱環境의 豫測手法に關する研究”, 空氣調和・衛生工學會論文集, No. 61, 99 (1996).
2. O. Meland and S. Lintorp, “Fire Safety and Escape Strategies for a Rock Cavern Stadium”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, 31 (1993).
3. G. Yamanaka, Y. L. Chow and S. Yagishita, “Model Tests in Subway Tunnel Ventilation by an Impulse Fan”, ASHRAE, Vol. 87, 1369 (1981).
4. D. W. Stroup and D. Madrzykowski, “Modeling Smoke Flow in Corridors”, Second CFDS international User Conference, 169 (1994).
5. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1990).
6. W. M. Kays and M. E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer, 3rd Ed., McGraw-Hill Book Co., New York (1993).
7. CFX 4.1 manual, AEA (1996).