

경량전철시스템의 화재 시뮬레이션

A Fire Simulation of Light Railway Transit

*원찬식¹⁾, 이기춘¹⁾, 허남건²⁾, 목재균³⁾

Chan-Shik Won, Ki-Choon Lee, Nahmkeon Hur and Jae-Kyun Mok

Fire inside light railway transit(LRT) was simulated for various fire scenarios using CFD analysis in order to assess the safety of passengers. Considered in the present paper are the effects of locations of fire, a fire size, an operation of ventilation system and an opening time of door on evolution of temperature and smoke concentration inside the LRT. For fire simulation, fire cells releasing heat and smoke corresponding to fire size were positioned at the location of fire. From the results, it is seen that the ventilation system and the opening time of door were the most important factors on temperature and smoke concentration inside the LRT.

1. 서론

요즈음 도로교통량의 빠른 증가로 교통혼잡, 대기오염, 소음 등의 환경문제, 에너지 수급문제 등이 크게 제기되고 있다. 이러한 문제 해결의 일환으로써 현재 계획중인 경량전철 건설은 사회적으로 앞서 제시한 문제들을 완화할 수 있으며, 경제적으로도 사회에 많은 이익을 줄 수 있을 것이다. 따라서 경량전철의 효율적이고 안전한 운영을 위해서는 실제 경량전철을 제작, 건설에 필요한 기술적 연구와 함께 만약에 일어날 수 있는 사고에 대한 여러 방재대책이 필요함은 자명하다.

경량전철에서 일어날 수 있는 안전사고 중 화재는 막대한 경제적 손실과 함께 승객의 안전을 크게 위협하는 원인이 된다. 화재의 가능성은 어느 곳이나 항상 존재하며, 경량전철은 브레이크 관계, 난방관계, 전기기기 혹은 외부 화원 등의 영향을 받을 수 있다. 따라서 화재발생상황에서 승객의 안전성을 확보하기 위해서는 화재시 발생하는 경량전철 내 온도 및 화재연기 분포 환경에 대한 정확한 이해가 필요하다. 특히 한국형 경량전철은 완전무인자동 운전되기 때문에 더욱더 화재에 대한 안전성 확보가 매우 중요하다. 그러나 실제 실험을 통한 연구는 여러 가지 제약이 따르게 되므로 본 연구에서는 많은 산업현장에서 검증

된 CFD기법을 이용하여 화재 발생 상황을 모사해 보고자 한다.

지금까지 화재에 관하여 국내외적으로 많은 연구가 수행되어왔으며 그 중, 권오승 등[1]은 현재 건설중인 국내 최장 터널 내에서 화재가 발생하였을 때, 제어 방식을 단위구간의 제어방식과 구간 제어방식으로 나누어 제어유속을 계산하여, 설계 화재 하중에 대한 적절한 제어속도를 제시하였다. Mendoca[2]는 런던 지하철 역사내에서 화재가 발생하였을 경우, 뜨거운 기체와 연소 물질을 제거하기 위한 시스템의 효율을 알아보기 위한 화재 시뮬레이션을 수행하여 화재의 경향성 및 시스템의 제어성능에 대한 결과를 제시하였다. Yau와 Tang[3], Biolley와 Chasse[4], Rhodes[5] 등도 CFD 기법을 이용하여 터널내 화재에 대한 화재 해석을 수행하여 화재 양상에 대한 온도 및 농도 분포등을 제시하였다. 그러나 대부분의 경우 터널과 같은 제한된 공간 속에서 제연을 위한 환기장치와 연관된 시뮬레이션 결과들을 보여 주고 있으며 화재시 차량 내부의 환경모사에 관한 연구는 부족한 편이다.

본 연구는 화재 발생시 화재위치, 화재강도, 환기시스템의 가동유무, 출입문의 개폐여부 등에 따른 경량전철내의 온도, 연기 분포 등 화재의 경향성을 유동, 열 해석을 통해 알아보고, 이를

1) 서강대학교 기계공학과 대학원 (121-742 서울시 마포구 신수동 1-1 Tel : 02-705-8637)

2) 서강대학교 기계공학과 (121-742 서울시 마포구 신수동 1-1 Tel : 02-705-8637)

3) 철도기술연구원 (437-050 경기도 의왕시 월암동 374-1 Tel : 031-461-8531)

통해 경량전철 시스템 안전프로그램 계획을 위한 화재 방재 대책수립에 필요한 자료를 제공하고자 하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 경량전철 설계자료를 이용한 경량전철의 3차원 모델을 통해 다양한 화재상황에 대한 수치해석을 수행하였다.

해석은 Fig. 1과 같은 격자를 이용하였다. 경량전철의 크기는 폭 2.4m, 높이 2.3m, 길이 9.14m이며, 외기는 경량전철이 역사내에 정차한 경우를 가정하여 폭 16m, 높이 6m, 길이 27m로 설정하였다. 경량전철 내부는 Fig. 2와 같으며 그림에서 볼 수 있듯이 Fire Cell을 설정하여 화재를 모사하였다. 그리고 환기시스템 가동 유무에 따른 화재 시뮬레이션을 수행하기 위해 해석격자에서 환기시스템을 Fig. 3와 같이 설정하였다. 환기 장치의 모델은 실제로 운행되는 지하철의 환기 장치를 이용하여 중심부분에 일정간격의 급기구와 경량전철 앞부분, 뒷부분, 중앙부분에 배기구를 설치하였다.

계산에 사용된 셀은 경량전철만을 고려한 경우 약 140,000개, 환기시스템 가동 유무 계산을 위해서 230,000개, 그리고 문 개폐의 영향을 알아보기 위한 계산을 위해서는 경량전철 주변의 외기와 플랫폼을 합하여 약 275,000개를 이용하였다.

우선적으로 경량전철 내부유동 계산을 위해 해석격자가 적절히 생성되었는지 확인하기 위하여 격자시험을 수행하였다. 경량전철 해석 격자 약 350,000개와 140,000개 2가지를 계산하였으며, 경량전철 중앙의자에서 화재가 발생한 경우, 차량 바닥으로부터 높이 1.5m에서의 온도 분포를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수

있듯이 온도는 두 계산격자의 해석값이 거의 일치함을 확인 할 수 있었으며 연기의 경우에도 같은 결과를 얻었다. 또한 이러한 경향성은 Fig. 4 처럼 고정된 한 위치에서 값뿐만 아니라 경량전철의 모든 위치에서 두 해석격자를 이용한 계산 결과는 서로 동일하였다. 따라서 환기시스템 가동여부 해석을 제외한 모든 계산 경우에 대하여 140,000개의 셀을 이용하여 계산을 수행하였다.

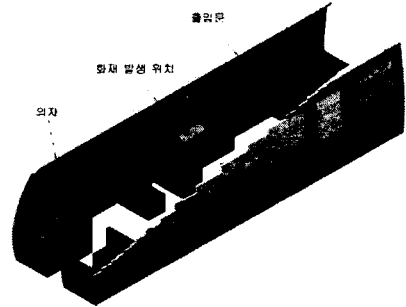


Fig. 2 The interior structure of LRT and location of fire cell

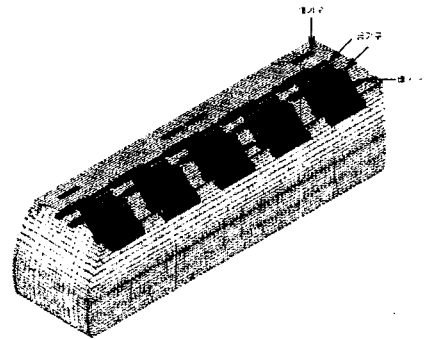


Fig. 3 Ventilation system of LRT

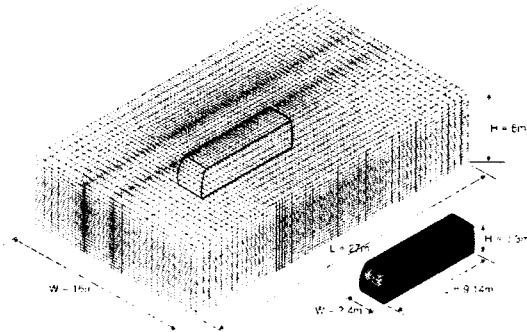


Fig. 1 Computational mesh for fire simulation

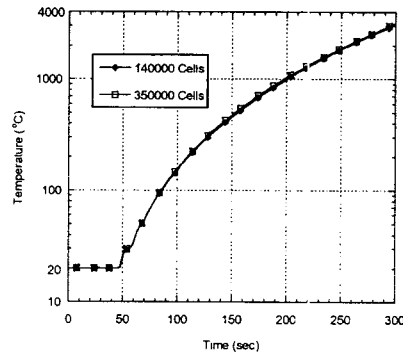


Fig. 4 History of temperature at center of LRT : mesh density sensitivity test

각각의 해석대상은 경량전철 중간 의자 위, 뒷부분 좌측 구석, 앞쪽 좌측 문 등의 화재위치에 따른 화재상황과 발열량 1 MW, 200 KW 등 화재강도에 대한 화재상황이다. 아울러 환기 시스템이 가동되지 않은 경우와 가동되고 있는 경우 그리고 출입문이 닫혀 있는 경우, 열려 있는 경우, 닫혀 있다가 일정 시간이 경과한 후 열리는 경우의 계산을 수행하였다. 화재위치에 따른 해석을 제외한 나머지 대상들은 경량전철 중간 의자 위에서 1MW의 발열량을 가지는 화재가 발생하는 경우로 한정하였다. 각각의 해석대상을 정리하면 아래 Table 1.과 같다.

화재 시뮬레이션을 재현하기 위해 경량전철 내부에 Heat Source가 되는 Fire Cell을 설정하였으며, 화재 발생에 의한 경량전철내의 화재 연기 농도를 나타내기 위하여 일산화탄소의 농도를 계산하였다. Fire Cell에서 발생하는 열은 시간 제곱에 비례하며[6] 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$q_{heat} = \alpha \times t^2 / V \quad (1)$$

여기서 각각의 변수는 다음과 같다.

- q_{heat} : 발열량
- α : 단위 시간당 화재 강도
- t : 경과 시간
- V : Fire 셀의 부피

일반적인 경우 화재 발생시 약 1MW 정도의

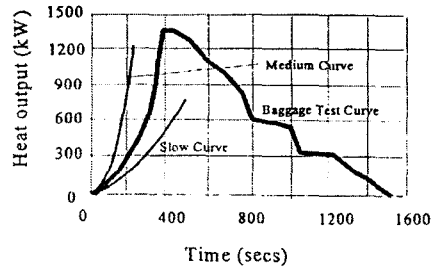


Fig. 5 Baggage Fire Test Curves [7]

발열량이 생성되는 것으로 알려져 있다[7]. 그 예로 Fig. 5는 승객이 가지고 다니는 가방에서 불이 난 경우 시간에 따른 발열량 실험 결과를 나타낸 것이다. 가방은 총 10Kg으로 8Kg의 섬유와 2Kg의 플라스틱으로 구성되어있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 약 5분 정도의 시간이 지나면 1MW 정도까지 발달된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 경향성을 고려하여 모든 경우에 있어 5분까지 1MW로 발달하는 화재에 대하여 계산을 수행하였다.

환기시스템의 가동유무에 따른 화재 상황을 계산하기 위해서 구체적인 환기량이 필요하며 이 값은 기존 보고서[8]에 제시된 1일 환기량을 토대로 설정하였고, 이를 지붕면 환기장치에서 유입되는 공기는 입구 경계조건으로, 배출되는 공기는 출구 경계조건으로 나타내었다.

출입문 개폐에 따른 화재 시뮬레이션 중 일정 시간이 흐른 후 문이 열렸을 경우의 상황을 알아보기 위하여 다음과 같은 방법으로 계산을 수행하였다. 먼저 문이 열리기 직전 시간까지 문이

Table 1. Cases considered for fire simulation in the present study

Case	Numbers of Cells	Fire Size (MW)	Location of Fire	Ventilation System Operation	Doors
1	350000	1	On the center seat	No	Closed
2	140000	1	On the center seat	No	Closed
3	140000	0.2	On the center seat	No	Closed
4	140000	1	On the front left door	No	Closed
5	140000	1	On the rear left conner	No	Closed
6	230000	1	On the center seat	Yes	Closed
7	275000	1	On the center seat	No	Open
8	275000	1	On the center seat	No	Opening at a specific time



(a) Fire set on the center seat (b) Fire set on the rear corner (c) Fire set on the front door

Fig. 6 Temperature distribution inside LRT depending on the fire occurrence locations (Time after 2 minutes, Fire size 1MW)

닫혀진 상태로 계산을 수행한 다음, 문이 열려진 상태로 계산 격자를 수정하여 닫혀진 상태의 해석값을 초기 조건으로 하여 계산을 진행하였다. 문을 여는 시간은 화재 발생 후 30초, 1분, 1분 30초, 2분 등 4가지 경우를 계산하였으며, 그 이상의 시간에서 문을 여는 것은 경량전철 내부의 온도가 승객의 안전성과 경량전철 시스템의 신뢰성을 확보 할 수 없을 정도로 매우 높기 때문에 고려하지 않았다.

화재 시뮬레이션은 유한체적법, 비조직 격자계를 사용하는 상용 코드인 STAR-CD[9]를 사용하였다. 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식에 대한 비정상 상태, $k-\epsilon$ 난류 모델 수치해석을 수행하였으며, 압력 계산을 위해 PISO방법을 적용하였다. 그리고 일반적인 상온 공기 물성치를 사용하였다. 계산에 사용된 기종은 본 연구실에서 보유하고 있는 Silicon Graphic Inc.의 Parallel Computer인 Origen 2000과 Indigo 2 Solid Impact R10k이다.

3 해석 결과

3.1 화재 위치별 시뮬레이션

중간 의자 위, 경량전철 뒤쪽 좌측 구석, 경량전철 앞쪽 좌측 문의 위치에서 화재가 발생한 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 그 중 화재 발생 후 2분 경과시 경량 전차내의 온도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 각각의 그림에서 온도 분포는 100℃, 200℃, 300℃의 등온면이며, 진한 면일 수록 높은 온도를 나타낸다.

서로 다른 세 위치에서 화재가 발생하는 경우 경량전철 내의 온도 분포는 화재 초기에는 일반적으로도 알 수 있듯이 화재 발생 위치에 지배적인 경향을 보인다. 중앙 의자에서 화재가 발생한 경우는 온도가 좌우 대칭적으로 넓게 퍼지며 화재가 한 쪽으로 치우친 경우 화재 발생 지역에서

국부적으로 높은 분포를 보인다. 그러나 그림에서도 볼 수 있듯이 화재가 발생한지 2분 정도 경과하게 되면 100℃ 이상의 높은 온도가 화재 발생 위치와 상관없이 승객에게 영향을 미치게 되는 분포를 보인다. 그림에 나타나지 않았지만 연기 분포도 온도와 마찬가지로 비슷한 경향성을 보여줌을 확인할 수 있었다.

3.2 화재 강도별 시뮬레이션

경량전철 중앙 의자에서 발생하는 경우를 설정하고 화재 강도가 200KW인 경우에 대하여 계산을 수행하여 발열량 1MW의 경우와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 발열량이 1 MW인 경우는 화재 발생 1분 후부터 온도가 크게 증가하는 반면 상대적으로 200 KW의 경우 천천히 온도가 증가하게 된다. 100℃를 기준으로 했을 때 승객이 위치하는 경량전철 중앙 통로 1.5m 지점에서 발열량 1MW의 경우 약 80초 정도의 시간이 지나야 100℃에 도달하게 되고 200KW 일때는 140초 정도의 시간이 걸린다. 하지만 작은 화재의 경우에도 승객에 대하여 1-2분 사이에 신속한 조치가 취하여지지 않는다면 상당히 위험한 상황

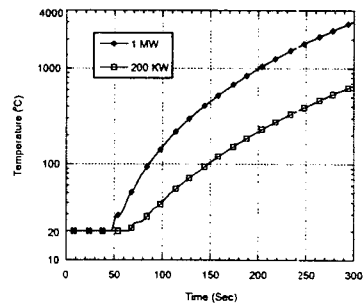


Fig. 7 History of temperature at center of LRT depending on the fire size

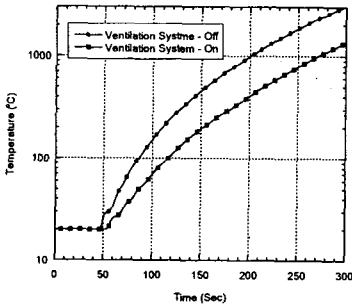


Fig. 8 History of temperature at center of LRT depending on the operation of ventilation system

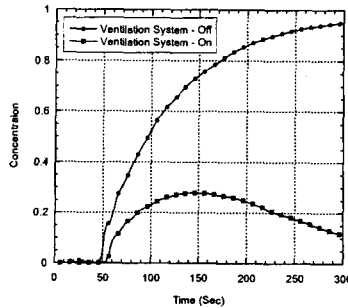


Fig. 9 History of smoke concentration at center of LRT depending on the operation of ventilation system

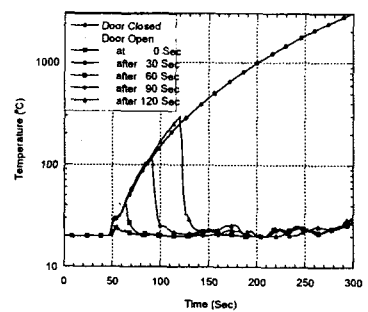
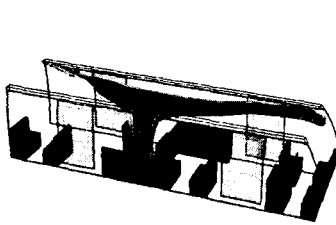
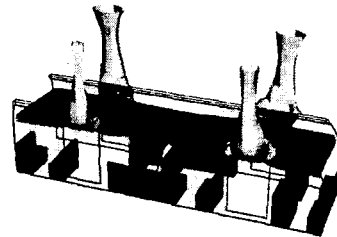


Fig. 10 History of Temperature at the center of LRT depending on the door opening time



(a) Time after 1 minute



(b) Time after 3 minutes

Fig. 11 Temperature distribution inside the LRT depending on the door opening time (Door opens at 1 min 30 sec after the fire set up, Fire size 1MW)

에 처할 수 있다는 것을 간과해서는 안될 것이다.

3.3 환기시스템 가동 유무에 따른 화재 시 물레이션

환기시스템이 가동된 상태에서 화재가 발생하는 경우에 대하여 계산을 수행하고 그 결과를 환기 장치가 가동되지 않은 상태와 비교하여 Fig. 8, 9에 나타내었다. 화재의 발열량은 1MW, 화재 발생 위치는 경량전철 중앙 의자 위이다.

Fig. 8을 보면 전체적으로 환기시스템의 가동으로 인하여 화재 발생시 경량전철 실내에는 환기시스템을 가동하지 않았을 경우에 비해 외기의 유입 및 뜨거운 공기의 배출로 인하여 온도가 증가하는 것을 지연시켜서 낮은 온도 분포를 가지게됨을 볼 수 있다. 그리고 연기의 분포는 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 농도는 화재위치에서 발생하는 농도를 1이라고 가정하였을 때 계산된 값들이며 대체로 연기의 분포는 일산화탄소의 농도 분포와 비슷할 것이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이

1.5m 정도의 높이에서는 환기장치에서 유입된 공기가 내부공기와 섞여 배출되므로 낮은 농도의 연기 분포를 보인다. 특히 온도증가보다 연기의 농도증가가 현저히 적다는 것은 매우 흥미로운 결과이다. 내부 온도는 Heat Source에서 2차원적으로 증가하는 열의 영향을 받지만 연기의 경우 지속적으로 유입되는 새로운 공기와 섞여 배출되므로 이러한 결과를 보여주는 것으로 생각할 수 있다.

3.4 출입문의 개폐에 따른 시물레이션

출입문이 화재 발생 초기부터 완전히 열려진 상태와 화재 발생후 일정한 시간이 경과한 후 문이 열리는 경우에 대하여 계산을 수행하고 그 결과를 출입문이 닫혀진 경우와 비교하여, Fig. 10에 나타내었다. 그 중에서 화재 발생후 1분 30초 후에 문을 여는 경우에 대한 경량전철 내의 온도 분포를 Fig. 11에 나타내었다.

화재 초기부터 출입문을 여는 경우 고열의 온도는 지붕면으로 상승한 후 열려진 문밖으로 나

가기 때문에 실내에는 어느 정도 안전한 상태가 유지된다. 그리고 화재 발생 후 약 3분 정도 지난 시간까지 계산 위치에서는 온도 변화는 경량전철 외기의 영향으로 실온과 별로 다르지 않은 온도 분포를 가지게 된다. 마찬가지로 연기의 분포도 외기의 영향에 의해 상당수 밖으로 유출되는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 화재 발생시 출입문을 열어주는 것은 경량전철내부의 온도 및 연기 감소에 상당히 효과적임을 알 수 있다.

화재 발생 30초 후에 문이 열리는 경우에는 아직 화재가 크게 발달하지 않아 화재 발생 처음부터 문을 연 경우와 비슷한 경향성을 보인다. 그리고 문을 여는 시간이 늦춰질수록 경량전철내 온도와 연기는 크게 발달하지만 문을 여는 것과 동시에 상당히 감소하는 효과를 볼 수 있었다.

4. 결론

경량전철에서 화재가 발생하는 경우 승객의 안전성을 확보하기 위하여 화재위치와 화재 강도, 환기시스템의 가동 유무, 출입문의 개폐 여부에 따른 화재 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 화재위치가 다를 경우 온도와 연기 분포는 화재 초기에 화재 위치에 지배적이지만, 약 1~2분의 시간이 지난 후에는 화재 위치에 상관 없게 됨을 알 수 있었다. 화재 강도 1MW를 기준으로 이보다 작은 화재가 발생했을 때는 온도 및 연기의 분포는 늦게 발달하지만 여전히 그 위험성이 존재함을 확인 할 수 있었다. 그리고 환기 장치가 가동되는 경우 외기의 지속적인 유입과 뜨거운 공기의 배출로 인해 온도의 증가가 지연되며 또 순환, 배출되는 공기의 영향으로 상대적으로 열은 농도의 연기가 차게 된다. 즉 적절한 환기 시스템의 설치는 화재로 인한 온도, 연기의 발달을 지연시켜줄 수 있음을 확인 할 수 있었다. 출입문의 개폐의 영향은 승객의 안전에 상당히 지배적임을 볼 수 있다. 그러므로 화재가 발생시 출입문은 고온에서 항상 정상적으로 작동되도록 설계되어야 하며 빠른 시간안에 경량전철 정차와 함께 출입문을 열어 승객을 대피시키는 것은 무엇보다도 중요하다.

참고 문헌

- [1] 권오승, 김진국, 김기옥 "장대터널의 화재시 물레이션 및 피난기술개발에 관한 연구," (주)대양설비기술단 (1999)
- [2] Mendonca, F.G., "Investigation into the Interaction of a Carriage Fire and Station Ventilation System in a Bored Tunnel Station," Computational Dynamics Ltd. (1995).
- [3] Yau, R. and Tang, D., "CFD Simulation of Underground Station Fires a Hong Kong Example," Tunnel and Underground Station Fires International Conference (2000), p.45-54.
- [4] Biollay, H. and Chasse, P., "Validating and Optimizing 2D and 3D Computer Simulations for the Ofenegg Tunnel Fire Tests," Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Conference (1994), p.357-382.
- [5] Rhodes, N., "Review of Tunnel Fire and Smoke Simulations," Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Conference (1994), p.471- 486.
- [6] Yau, R. and Cheng, V., "Effect of Local Smoke Extraction on Smoke Control of Road Tunnel Fire," Tunnel and Underground Station Fires International Conference (2000), p.73-83.
- [7] Munro, J. and Scott, P., "Tunnel Design Fire Assessment," Tunnel Fires and Escape from Tunnel (1999), p.73-82.
- [8] 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구 결과 보고서, 건설교통부 (2000).
- [9] STAR-CD Methodology, Computational Dynamics Ltd. (1999), version 3.10.
- [10] Ensign User Manual, Computational Engineering International INC. (1998), version 6.2.