

FASTLite를 이용한 backdraft 사고의 해석

An analysis of a backdraft using FASTLite

김진국 / 방재연구실 선임연구원, 공학박사

- Abstract -

This paper has two objectives. One is to introduce a software package, "FASTLite", for fire safety engineering calculation, the other to show the modelling result of a backdraft incident on the 62 WATTS street. A classic backdraft usually persists only seconds before exhausting their fuel supply but in this case the flame had persisted for at least 6 and a half minutes. It is truly necessary to find out where the fuel came from to feed this flame for so long. The backdraft is successfully modelled by using FASTLite. To help understanding of this backdraft, the calculation with the door open is also carried out and compared to the backdraft.

1. FASTLite의 소개

FASTLite는 Fire growth And Smoke Transport를 의미하며, 내부적인 구성은 FIREFORM 과 CFAST를 결합한 형태로 건축가, 방화공학자, 규정 제작자, 화재안전과 관련된 실무자를 위해서 제작된 소프트웨어 프로그램이다. 이 소프트웨어는 GUI(Graphical User Interface)로 되어있어 사용기가 편리하게 되어있으며 화재 현상에 관한 공학적인 계산을 할 수 있다. 이러한 소프트웨어를 사용할 경우에는 적용 가능 범위가 존재하게 되는데 FASTLite의 경우에는 입력조건(input condition)을 입력할 때 가능한 조건을 명시하여 주는 장점이 있어 계산의 한계를 조사해야 하는 번거로움이 적다.

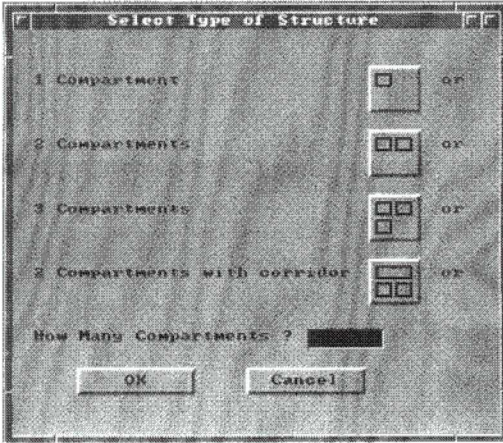
FASTLite는 화재안전분야에 익숙한 사람이 사용한다는 전제 조건하에 화재 현상에 대하여 판단하는 데 필요한 자료를 제공하고자 하는 목적으로

만들어 졌다. 다른 컴퓨터 계산과 마찬가지로 계산 결과의 신뢰성은 사용자에 의해 주어진 입력조건과 직접적으로 연관이 있다. 실제 현상(factual circumstance)에 대하여 이 소프트웨어를 적용할 경우 올바른 결과를 주지 않을 수도 있다는 것에 주의하여야 한다. 즉 적절하지 못한 사용은 잘못된 결과를 줄 수 있기 때문에 모든 결과는 사용자에게 의하여 평가되어야 한다.

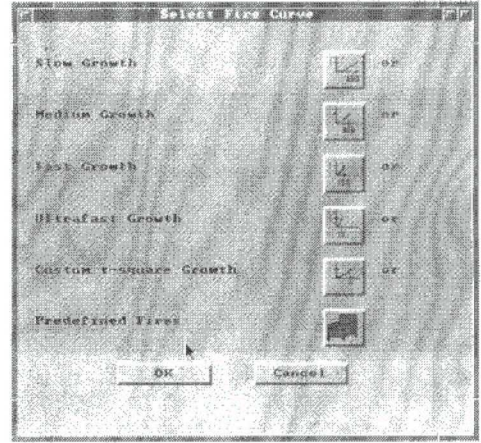
2. FASTLite 의 구성

FASTLite을 이용하여 화재 현상을 조사하고자 할 경우에 아래와 같이 크게 세가지를 설정하여야 한다.

- ◆구조물의 형태(type of structure)
- ◆화재 곡선(fire curve)
- ◆화재 시나리오(fire scenario)



[그림 1] 구조물의 선택 창



[그림 2] 화재성장곡선 선택 창

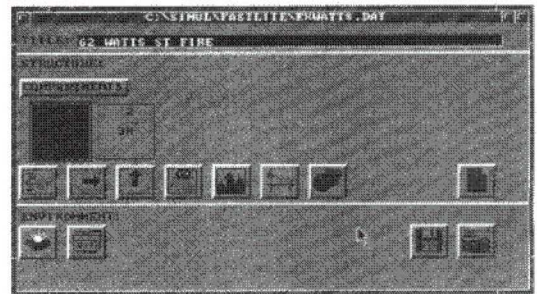
그림1은 FASTLite를 실행시킨 후 새로운 파일을 만들고자 할 때 처음 나타나는 화면이다. 이 창(window)에서 구획실(compartment)의 개수와 배열을 정의할 수 있다. 세부적인 구획실의 크기 및 연결부는 화재시나리오 부분에서 입력할 수 있다. 구조물은 최대 3개의 구획실까지 설정이 가능하며, 구획실은 가로, 세로, 깊이에서 500m 까지의 길이를 가질 수 있다.

구조물을 선택하고 나면 화재를 정의해야 한다. 넓은 범위의 화재에 대하여 화재의 성장은 다음과 같은 power law relation 으로 표현할 수 있다.

$$\dot{Q} \propto t^2$$

여기서 \dot{Q} 는 화재의 열발생율이고 a 는 화재강도 계수(fire intensity coefficient), t 는 시간을 나타낸다[1]. 그림2는 화재성장곡선을 선택하기 위한 창으로 slow, medium, fast는 1055kW에 도달하는데 소요되는 시간이 각각 600, 300, 150초인 화재를 의미한다[2]. Ultra fast는 1055kW에 도달하는데 75초가 소요되는 화재를 나타낸다[3].

그림3은 화재시나리오 창을 나타내는 것으로 크게 3부분으로 나누어진다. 제일 윗 부분은 입력파일의 주제(title)를 나타내고, 중간부분은 구획실의 정의, 구획실 사이의 연결, 스프링클러/감지기의 위치, 화재곡선의 정의 등을 나타낸다. 마지막 부



[그림 3] 화재시나리오 작성 창

분은 주위조건(ambient condition), 파일 이름, 출력 시간 등 계산에 필요한 배경 조건을 나타내는 것이다. 상세한 부분의 사용방법은 사용설명서[4] 참조 및 직접 수행하여 보면 쉽게 알 수 있다.

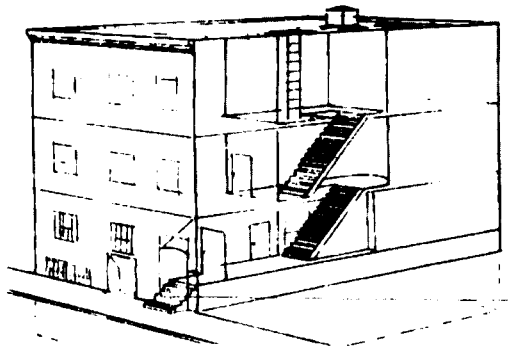
3. backdraft 사고

1994년 3월 28일 미국 맨하탄의 3층건물의 굴뚝에서 검은 연기가 발생한다는 신고가 뉴욕 소방대에 들어왔다. 담당자는 3명으로 구성된 소방호스 2팀에게 1, 2층 입구로 각각 진입할 것을 명령하였다. 이 때 계단의 지붕을 통하여 환기를 시키고 있었다. 1층의 문을 강제로 열었을 때 거대한 화염이 분출되었고 계단위쪽으로 전파하여 2층에 있던 3명의 소방관이 불길에 휩싸였다. 이 화염은 6분 30초 동안 지속되었고 2층의 소방관들은 사망하였다.

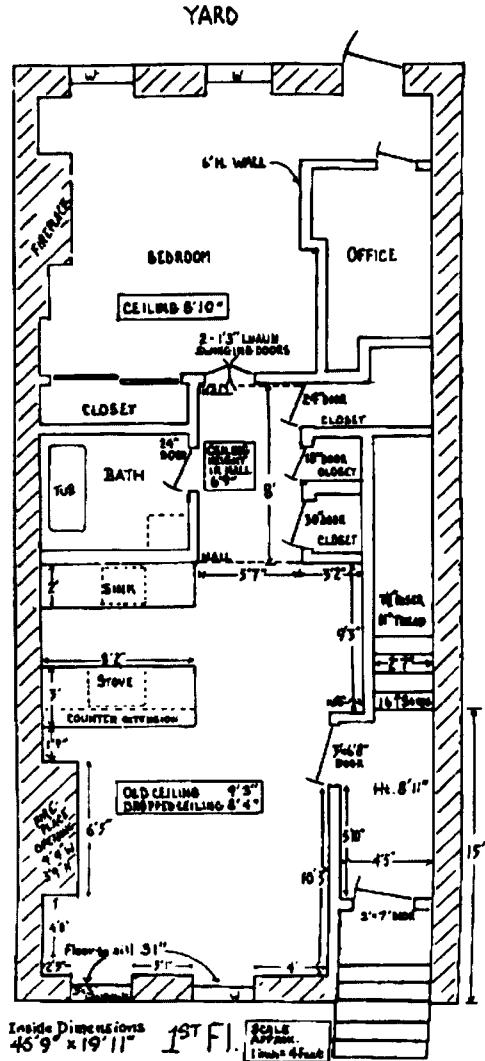
뉴욕소방대는 어떻게 장시간동안 backdraft가 가능했는지 알기 위해서 NIST에 화재모델링을 요청하였다. NIST는 CFAST를 이용하여 관찰된 조건을 재생하였고, 장시간 동안 backdraft가 가능하게 했던 막대한 양의 연료가 공급이 가능했던 이유를 밝혔다. NIST의 연구결과 보고서[5]는 충분한 내용이 기록되지 않았기 때문에 보고서에 주어진 조건을 토대로 직접 FASTLite를 이용하여 아파트문의 개방 유무에 따른 화재 현상을 비교하여 이 사고의 backdraft에 대한 이해를 돕고자 하는 것이 본 연구의 주요 목적이다.

3.1 건물구조

그림4는 화재가 일어난 건물을 나타내며, 근사적으로 6.1m×14m의 면적에 3과 1/2층으로 구성되어 있다. 이 건물은 4개의 아파트로 각 층에 1개씩 그리고 반지하 형태의 아파트로 구성되었다. 지하 아파트는 독립된 입구가 있었으며 나머지는 건물 옆면의 폐쇄된 계단층을 통하여 출입하였다. 지붕에는 접근할 수 있는 통로가 있었고 통로의 창은 채광을 위한 유리로 되어 있었다. 각 아파트는 유사한 평면도를 가지고 있었으며 단지 계단 때문에 약간의 차이가 있었다. 최근에 많은 수리를 하여 건물은 외부공기의 차단과 단열이 잘 되어 있었다. 그림5는 화재가 발생한 1층의 평면도를 보여준다.



[그림 4] 화재 발생 건물



[그림 5] 화재 발생층의 평면도

3.2 화재 발생

사고 후 1층의 거주자의 진술을 바탕으로 다음과 같은 사실이 추정되었다. 주방에 있는 가스렌지 위에 플라스틱의 쓰레기 통을 두었지만 가스렌지는 꺼져있었다고 한다. 따라서 파이롯트 화염(pilot light)에 의하여 알콜 성분이 있는 술병을 담고 있는 쓰레기 통이 점화된 후 나무로 된 마루와 다른 곳으로 화재가 전파했을 가능성이 추정된다. 거주

자는 문과 창문은 닫혀있었다고 확신했기 때문에 화재에 관계한 공기는 거실 내부의 공기와 거실에 있는 굴뚝을 통해서 들어오는 공기뿐이었을 것으로 추정된다.

3.3 화재 모델링

화재는 거의 한시간동안 아주 열악한 환경에서 지속되었을 것이다. 굴뚝은 최초에는 팽창을 억제하는 역할을 하고 나중에는 연기를 배출하는 역할을 하였다. 이와 같이 열악한 화재 환경은 필연적으로 불완전연소에 의하여 미연성분을 생성하였고 CO/CO₂의 비를 증가시켰을 것이다. 따라서 이러한 상황에서 아파트 문을 열게되면 외부의 신선한 공기가 내부로 유입되어 연소되기 좋은 혼합기(combustible mixture)를 형성하게 된다. 이 혼합기가 점화하게 되면 큰 화염이 방문을 통하여 외부로 분출된다. 아파트내부에 어떻게 많은 양의 연료가 축적될 수 있었는지를 FASTLite를 이용하여 재현하여 화재의 특성을 조사하기 위하여 다음과 같은 조건을 설정하였다.

화재가 발생한 아파트는 6.1m×14m의 면적과 2.5m의 높이를 가진다. 계단실은 1.2m×3m의 면적과 9.1m의 높이를 가지며 아파트문에 의하여 연결되고 천장은 0.84m²의 면적을 갖는 수직 환기구를 가지고 있다.

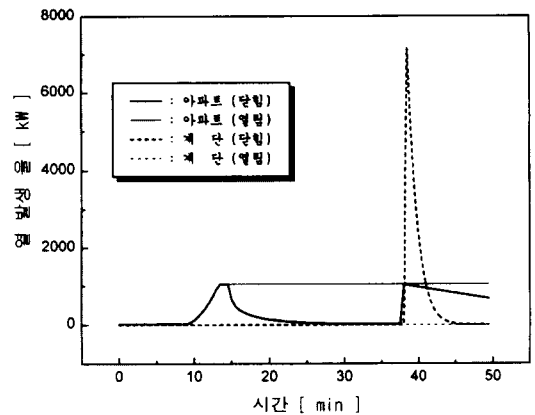
화재초기는 쓰레기통의 실험 데이터를 이용하여 25kW의 일정한 열발생율을 갖는다고 가정하였다. 이 화재는 나중에 보편적인 주거지의 화재특성을 나타내는 최고값 1MW를 갖는 보통성장을 화재(Medium t²)로 가정하였다.

backdraft를 이해하는 데 도움을 주기위하여 아파트 문이 열린 상태와 닫힌 상태 두가지의 계산을 수행하였으며, backdraft의 발생은 화재발생후 2250초(소방관이 문을 연 시간)로하여 계산을 수행하였다. 화재 시나리오와 관련된 데이터는 Appendix에 수록되어 있다.

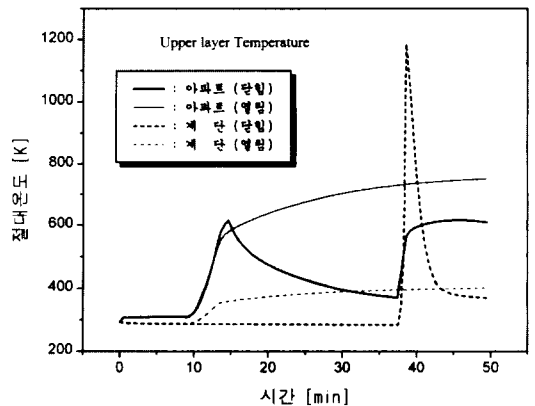
3.4 계산 결과

3.4.1 backdraft의 재현

그림6과 그림7은 각각 아파트 문의 개폐에 따른 열발생율과 상부층(upper layer) 온도를 나타낸다. 아파트문이 닫혔을 때의 경우를 보면 최초에 방안의 공기에 의하여 화재가 성장하지만 산소의 부족에 의하여 점점 온도 및 열발생율이 감소함을 알 수 있다. 그리고 소방관에 의하여 문이 열린 순간인 37분 경에는 그림6에서 알 수 있듯이 아파트 내부의 열발생율이 급격히 증가하였고 계단실의 경우는 약 7MW 까지 순간적으로 열발생율이 증가하였다. 문이 개방된 상태에서 화재가 발생한 경우는 계단실에서 열발생율은 없다. 따라서 계단실에서 열발생율이 존재한다는 것은 backdraft가 발생하였음을 증명하는 것이고 그 지속 시간도 수분



[그림 6] 시간에 따른 열발생율



[그림 7] 시간에 따른 상부층의 온도

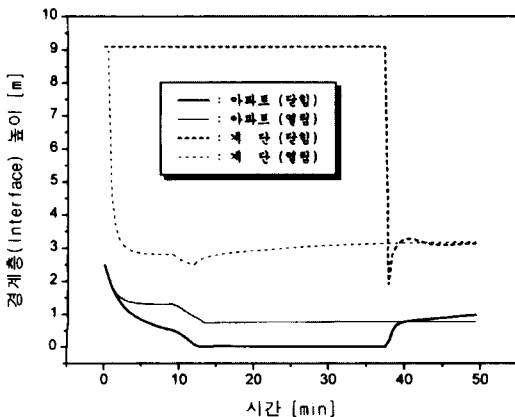
에 이른다는 것으로부터 이 번 사고의 특징인 긴 시간의 backdraft가 잘 재현되었다는 것이 증명되었다.

문이 열린 상태에서 화재가 발생한 경우에는 공기가 항상 공급될 수 있기 때문에 그림.6에서 보는 것처럼 화재가 아파트 내부에서만 지속적으로 존재하여 아파트 내부의 온도(그림.7)는 계속 증가하지만 계단실에서 열발생율은 없기 때문에 화재가 계단실까지 전파되지 않음을 알 수 있다. 건축의 발달에 의하여 단열의 정도가 점점 높아지고 있는 경향이므로, 이러한 건물에 화재가 발생하였을 경우에 화재 진압을 위해서 소방관이 접근할 경우 상당한 주의가 필요하며 혹시 이러한 경우를 당하더라도 안전하기 위해서는 소방관의 착용 장비도 성능이 향상되어야 할 것으로 사료된다.

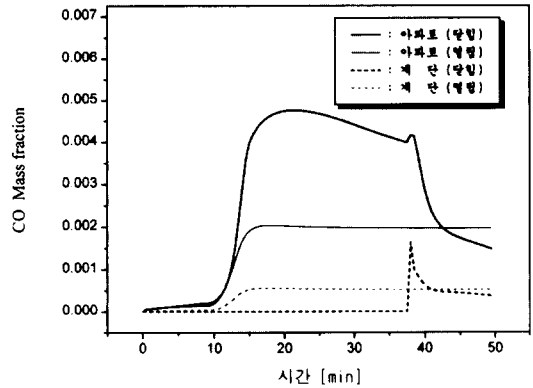
3.4.2 backdraft 원인 분석

일반적인 backdraft에 비하여 이 사고의 경우는 상당히 긴 시간인 약 6분 30초 동안 지속되었다. 따라서 이렇게 장시간 동안 발생할 수 있었던 원인의 분석이 필요하다. 본 연구에서는 문이 개방된 경우와 비교하여 이 현상을 설명하고자 한다.

그림8과 그림9는 시간에 따른 연기층의 경계면 높이와 CO의 농도에 대한 계산 결과를 나타낸다. 화재초기에는 문의 개방과 관계없이 연기층이 천장에 쌓이게 되므로 하강속도가 유사하다. 그러나 문이 개방된 상태에서는 문을 통하여 계단실로 연



[그림 8] 시간에 따른 경계층 높이



[그림 9] 시간에 따른 CO mass fraction

기가 배출되지만 문이 닫혀있는 경우에는 계속 강하여 약 13분 후는 바닥면까지 도달한다. 연기의 농도를 살펴보면 연기가 하강할수록 연소상태가 열악하여 불완전연소에 의하여 CO의 배출이 증가하게 된다. 따라서 CO의 농도도 문이 개방된 상태의 화재에 비하여 약 2.5배 정도가 되고, 체적도 문이 개방된 경우에 비하여 약 1.5배가 된다. 따라서 많은 양의 가스 상태의 연료가 축적되어 있는 상태로 볼 수 있다. 더욱 중요한 것은 아파트 내부에는 화제를 증가시킬 정도의 산소는 없어 문의 개방과 즉시 외부 공기의 유입에 의하여 축적된 연료가 연소가능한 가스상태의 혼합기로 지속적으로 형성되면서 문밖으로 분출되어 장 시간의 backdraft가 발생하였을 것으로 사료된다.

4. 결 론

FASTLite는 DOS에서만 실행되는 단점이 있지만 대공간에서도 적용이 가능하다는 잇점이 있다. FASTLite를 이용하여 backdraft를 재현한 결과는 다음과 같다.

backdraft가 일어난 후 계단실은 약 7MW 까지 순간적으로 열발생율이 증가하였다. 아파트 문이 개방된 상태인 경우는 계단실로 화재가 전파되지 못하고 아파트 내부의 열발생율과 온도가 천천히 증가하였다.

높은 열발생율이 수 분동안 지속되어 이 사고의

특징인 긴 시간의 backdraft가 잘 재현되었다는 것이 증명되었으며, CO의 농도와 차지하고 있는 체적을 고려할 때 아파트 내부에 상당히 많은 양의 연료가 축적되어 장 시간 backdraft가 가능했던 것으로 추정된다.

건축의 발달에 의하여 단열효과가 증가되는 추세이므로 이 사고와 같은 장시간의 backdraft가 발생할 가능성이 높아질 것이다. 따라서 안전을 위해서 소방관의 장비도 이에 대비할 수 있는 향상된 성능의 장비를 갖추어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] "Design of detection systems", Chapter 4-1. in The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed, 1995

[2] Heskestad, G. and Delichatsios, M.A., "Environments of fire detectors-Phase 1: Effect of fire size, ceiling height, and material. Vol.2 Analysys", NBS-GCR-77-95, Natl. Bur. Stand.(U.S.), p.100, 1977

[3] Stroup, D. W. and Evans, D. D., "Use of computer models for analyzing thermal detector spacing", Fire Safety Journal, Vol.14 pp.33-45, 1988

[4] Rebecca, W. P. and etc, " FASTLite : Engineering tools for estimating fire growth and smoke transport", BFRL, NIST, 1996

[5] Bukowski, R. W., "Modeling a backdraft : The fire at 62 Watts street", NFPA Journal, Nov., 1995

Appendix : 화재 시나리오 데이터

CFAST Version 2.2.1 62 WATTS ST FIRE

OVERVIEW			
Compartments	Doors, ...	Ceil. Vents, ...	MV Connects
2	4	1	0
Simulation Time	Print Interval	History Interval	Restart Interval
(s)	(s)	(s)	(s)
3000	10	30	0

Ceiling jet is on for all

COMPARTMENTS , 단위 : m					
Compartment	Width	Depth	Height	Ceiling Height	Floor Height
1	12.80	6.10	2.50	2.50	0.00
2	1.20	3.00	9.10	9.10	0.00

VENT CONNECTIONS

Horizontal Natural Flow Connections (Doors, Windows, ...)

From Compartment	To Compartment	Vent Number	Width (m)	Sill Height (m)	Soffit Height (m)
1	2	1	0.91	0.00	0.00
1	Outside	1	1.32	1.10	1.14
2	Outside	1	3.05	8.87	9.10
2	Outside	2	0.91	0.00	2.13

Vertical Natural Flow Connections (Ceiling, ...)

Top Compartment	Bottom Compartment	Shape	Area (m ²)	Relative Height (m)	Absolute Height (m)
Outside	2	Square	0.84	9.10	9.10

THERMAL PROPERTIES

Compartment	Ceiling	Wall	Floor
1	GYPSUM	GYPSUM	HARDWOOD
2	GYPSUM	GYPSUM	HARDWOOD

Name	Conductivity	Specific heat	Density	Thickness	Emissivity
GYPSUM	0.160	900	790	1.600E-02	0.900
HARDWOOD	0.160	1.255E+03	720	1.900E-02	0.900

FIRES

Compartment	1
Fire Type	Constrained
Position(x,y,z)	2.15 1.65 0.00
Relative Humidity	50.0
Lower O2 Limit	10.00
Pyrolysis Temp.	293.

Time (s)	F _{mass} (kg/s)	H _{comb} (J/kg)	F _{qdot} (W)	C/CO ₂ (m)	CO/CO ₂ (kg/kg)	H/C (kg/kg)
0.	1.28E-03	1.95E+07	2.50E+04	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
500.	1.28E-03	1.95E+07	2.50E+04	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
533.	6.55E-04	1.95E+07	1.28E+04	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
566.	2.62E-03	1.95E+07	5.11E+04	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
599.	5.89E-03	1.95E+07	1.15E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
632.	1.05E-02	1.95E+07	2.04E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
665.	1.64E-02	1.95E+07	3.19E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
698.	2.36E-02	1.95E+07	4.60E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
731.	3.21E-02	1.95E+07	6.26E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
764.	4.19E-02	1.95E+07	8.17E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
800.	5.41E-02	1.95E+07	1.06E+06	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3000.	5.41E-02	1.95E+07	1.06E+06	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3011.	4.29E-02	1.95E+07	8.36E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3022.	3.29E-02	1.95E+07	6.42E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3033.	2.43E-02	1.95E+07	4.74E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3044.	1.70E-02	1.95E+07	3.31E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3055.	1.10E-02	1.95E+07	2.14E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3066.	6.25E-03	1.95E+07	1.22E+05	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3077.	2.86E-03	1.95E+07	5.58E+04	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3088.	7.79E-04	1.95E+07	1.52E+04	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02
3100.	0.00E+00	1.95E+07	0.00E+00	3.00E-02	3.00E-02	8.00E-02