

## 산불에 의한 열적상승유동 해석에 관한 연구

지영무\*, 박준상\*\*

### A Study on the model of Thermal Plume Flow in the Forest Fire

Young Moo Ji\*, Jung Sang Park\*\*

**Key Words** : Forest Fire(산불), Simulator(시뮬레이터), Thermal Plume Flow(열적상승유동)

#### Abstract

A study is made of thermal plume flow model for the development of helicopter simulator over the forest fire. For numerical analysis, the Boussinesq fluid approximation and line fire model, which is assumed by the shape of forest fire spreading, are adopted. Comparing 3-D full numerical solutions with 2-D similarity solution, it has been built a new model that is capable of temperature prediction along the symmetric vertical axis in both cases of laminar and turbulent flows.

#### 1. 서론

아래 그림과 같이 산불환경에서 비행하는 회전익기는 로터가 발생시키는 순환유동에 뜨거워진 밀도가 작은 공기의 유입이 발생하여 차가운 공기분위기에서 비행하는 거에 비해 양력 감소, 열에 의한 전자장비작동 장애 등의 문제를 안고 있다. 따라서 산불유동에 대한 이론 모형 개발을 시뮬레이터 개발에서 중요한 위치를 차지한다.

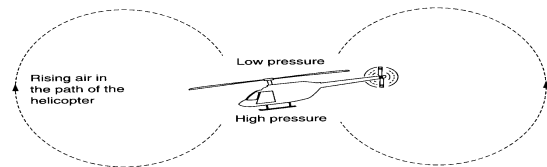


Fig. 1 Schematics of flow pattern near the Helicopter

열적상승류에 대한 조사 및 연구는 다음의 순서와 이상화 과정을 통해 이루어졌다.

- 지면에서 발생한 산불효과를 선형열원(line heat source)으로 가정하고, 이때 발생하는 지면위의 유동 및 온도장에 대한 이론모형을 조사한다.
- 선형열원은 두 종류를 고려한다. : (1)등온열원(constant temperature), (2) 일정 열유속을 갖는 발열원(constant heat flux)
- 선형열원에 의한 열적상승류는 Boussinesq 유동으로 가정한다.
- Boussinesq 열적상승류에 대한 근사해를 도출하는 접근은 두 종류의 유동 (층류유동, 난류유동)으로 나누어 생각하고, 각각의 경우에 대한, (1) 상

사해(similarity solution); (2) 스케일해석(scaling analysis); (3) 실험자료 (experimental data)에 대한 이전 연구조사를 통해 필요한 정보를 얻는다.

- 이상의 결과를 바탕으로 시뮬레이션 S/W를 위한 이론 모델식을 개발 한다.

본 연구에서는 산불에 의한 유동을 “Boussinesq 유체에서 수평 선형열원에 의해 발생하는 열적상승류(thermal plume flow)”로 정의하고 이때 발생하는 유동특성으로부터 얻을 수 있는 상사해에 대한 이론모형을 산불모형에 대한 대안으로 가정하고 그 적합성 조사를 수치해석 결과와 비교하여 행한다.

#### 2. 본론

##### 2.1 문제의 정의

Fig. 2에서와 같이 유한한 길이(L)과 지름(D)를 갖는 원통형 선형열원(cylindrical line heat source)이 수평 z-방향으로 놓여있다. 중력은 (-y)-방향으로 작용한다. 대기의 온도가  $T_\infty$ 인 초기상태에서 갑자기 선형열원 표면의 온도가  $T_h(>T_\infty)$ 로 높아지는 것으로 산불의 효과를 모델링했다. 그리고 지면 효과를 고려하기 위해 선형열원이 아래 지면으로부터 높이  $H/D=1.5$ 에 위치하는 것으로 정의했다. 이후의 논의를 위해 직교좌표계 (x,y,z)와 각 좌표에 해당하는 속도성분 (u,v,w)를 채택했다.

\* 한국과학기술원 기계공학과, ymji@kaist.ac.kr

\*\* 한라대학교 기계공학과, jspark@hit.halla.ac.kr

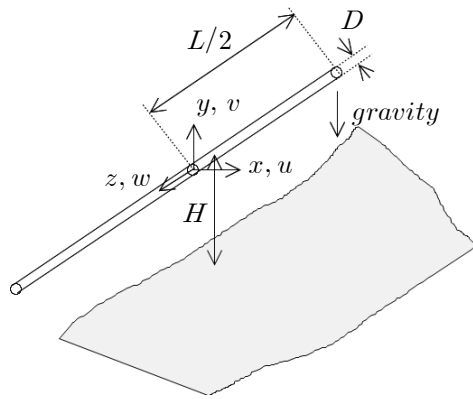


Fig. 2 Schematics of the problem

## 2.2 수치기법

앞서 정의한 지배 방정식의 수치해를 구하기 위해 상용S/W인 FLUENT를 사용했으며 층류와 난류 각 4 경우 총 8 경우(Table 2 참조)에 대한 해석을 수행하였다. 수치 계산을 위한 입력은 1기압 상온에서 공기의 물성치를 그대로 사용하고, 열원의 지름을 0.1m 로 가정했다. 그리고 외기의 온도는 1000K 열원표면의 온도는 2000K로 고정시켜서 계산을 수행했다. 난류계산을 위해서는 1-equation model인 Spalart-Allmaras model을 사용하였다.

Table 2. Computational cases

	파라미터	(L/D)	case
층류	$P_r = 0.7,$ $R_a = 10^5$	$\infty$	1
		2	2
		10	3
		20	4
난류	$P_r = 0.7,$ $R_a = 10^8$	$\infty$	5
		2	6
		10	7
		20	8

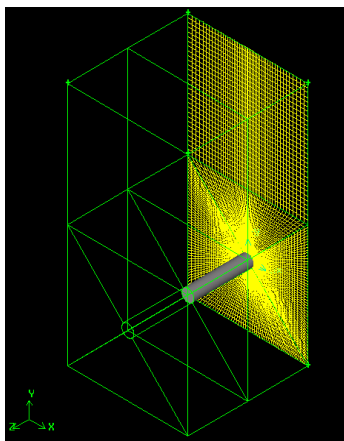


Fig. 3 Computational grid system

수치해석에 사용한 grid system은 Fig. 3에 보이는 것과 같은 non-orthogonal structured grid system 을 사용했으며 한 단면 당 약 10만 개의 grid 가 사용되었다. 이차원 해석을 위해서는 Fig. 3에 보이는 한 단면에서의 grid를 사용했다.

## 3. 해석결과

### 3.1 온도장

Fig. 4(CASE 1)은 수평방향(z-방향)으로 무한 길이로 배치된 이차원 선형열원의 온도가 높아지면 열원근처 영역 유체의 온도가 높아지고, 이로 인해 유체의 밀도는 낮아지고 동일한 높이의 유체사이에 발생하는 밀도차가 수직방향의 부력을 발생시켜 열원으로부터 수직방향으로 대류가 발생하는 모습을 잘 보여주고 있다. 이때 열원근처에서 발생한 수직방향(y-방향)의 유동에 의한 유출질량을 보존하기 위해 수평방향의 유체유입이 일어난다.

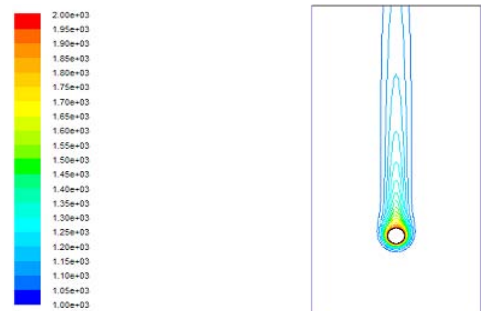


Fig. 4 Contour of isothermal lines.  $P_r = 0.7, R_a = 10^5$

Labels are denoted by the magnitude of physical temperature,  $T^*$ .

### 3.2 이차원 상사해 모델의 유용성 해석

본 절에서는 2.2에서 언급한 2차원 상사해를 이용한 산물모델의 유용성을 수치해석을 통해 구한 수치해와 비교 검토를 통해 밝히고자 한다. 비교대상이 되는 주된 온도장은 열원에서 수직방향으로 온도분포(line heat source 위쪽)에 대한 데이터이다.

#### 3.2.1 층류모델 비교 검토

(A) 거둬제공온도분포에 대한 검토

$$(T(x, y = 0) - T_{\infty} = Nx^n)$$

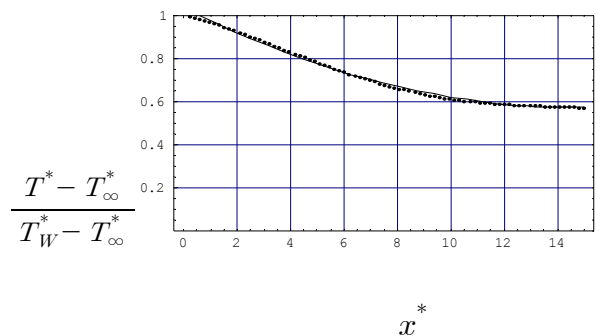


Fig. 5 Least square polynomial curve fitting on 2-D laminar solution. ----- the numerical solution ; \_\_\_\_\_ eq.(00)  
 $P_r = 0.7, R_a = 10^5$

Fig. 5는  $x=0$ 에서  $y$ -축을 따른 온도분포를 나타낸다. 이 그림은 2차원 층류유동에 대한 수치해를 curve fitting을 한 것을 보여준다. 제공근사법을 이용하여 구한 다항 근사식이 식(1)에 나와 있다.

$$\frac{T(x, y=0) - T_\infty}{T_W - T_\infty} = 1.0 - 0.0628x + 0.00212x^2 \quad (1)$$

식(1)은 상사해로부터 유추할 수 있는 거듭제곱온도분포가 열원으로부터 높이 x의 n승에 비례한다는 사실에 잘 부합하는 결과이다.

(B) 지수온도분포에 대한 검토

$$(T(x, y=0) - T_\infty = Me^{mx})$$

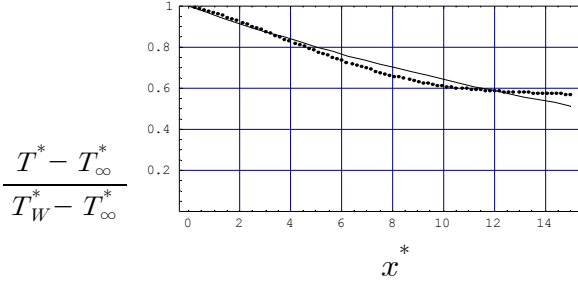


Fig. 6 Least square polynomial curve fitting on 2-D laminar solution. ----- the numerical solution ; \_\_\_\_\_ eq.(01)  $P_r = 0.7, R_a = 10^5$

Fig. 6은 x=0에서 y-축을 따른 온도분포를 나타낸다. 이 그림은 2차원 층류유동에 대한 수치해를 curve fitting을 한 것을 보여준다. 제곱근사법을 이용하여 구한 지수함수 근사식이 식(2)에 나와 있다.

$$\frac{T(x, y=0) - T_\infty}{T_W - T_\infty} = e^{-0.04x} \quad (2)$$

다항식 근사에 비해 다소 정확도가 떨어지나 여전히 경향성을 잘 추정할 수 있음을 보여 주고 있다.

### 3.2.2 난류모델 비교검토 ( $T(x, y=0) - T_\infty \propto \frac{B}{(x+A)^3}$ )

Fig. 7은 x=0에서 y-축을 따른 온도분포를 나타낸다. 이 그림은 2차원 난류유동에 대한 다항식 수치해를 curve fitting을 한 것을 보여준다. 제곱근사법을 이용하여 구한 지수함수 근사식이 식(3)에 나와 있다.

$$\frac{T(x, y=0) - T_\infty}{T_W - T_\infty} = 1.0 - 0.15453x + 0.0136937x^2 - 0.0004x^3 \quad (3)$$

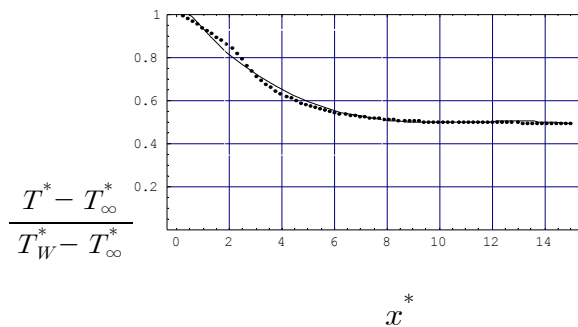


Fig. 7 Least square polynomial curve fitting on 2-D turbulent solution. ----- the numerical solution ; \_\_\_\_\_ eq.(01)  $P_r = 0.7, R_a = 10^8$

Fig. 7로부터 수치해가 다항식 근사를 통해 매우 잘 일치하는 결과를 주는 것을 알 수 있다. 식(3)의 결과는 이론 상사해로부터 유추할 수 있는 식(4)

$$T(x, y=0) - T_\infty \propto \frac{B}{(x+A)^3} \quad (4)$$

의 결과를 잘 추정하고 있다고 판단된다. 식(4)를 Taylor 전개한 후 각 차수를 비교하여 계수를 정하면 이것을 알 수 있다. 특이한 사항은 식(1)[층류]과 식(3) [난류]을 비교하면 식(3)에 나타나는 계수의 크기가 식(1)에서 보이는 계수보다 모든 항에서 크다는 것이다. 이것은 난류일 때 y-축을 따른 온도감소가 빠르다는 앞서의 이론해석 결과와 일치하는 결과이다.

이제 식(4)를 이용하여 온도를 예측하는 방법 및 이를 시뮬레이터에 사용하는 방법을 설명한다. 식(4)는 층류와 난류 양쪽으로 유용한 것으로 보인다. 식(4)를 변형한 후 Taylor 전개하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T(x, y=0) - T_\infty \propto \frac{B}{(x+A)^3} \approx \frac{B}{A^3} - \frac{3B}{A^4}x \quad (5)$$

따라서, 식(11)를 일차항까지 식(7) 혹은 (9)와 일치하도록 미지수 A, B 를 정하면 된다.

(층류)

$$\frac{B}{A^3} = T_W - T_\infty \quad (6a)$$

$$\frac{3B}{A^4} = 0.0628(T_W - T_\infty) \quad (6b)$$

$$A = 47.77, B = (47.77)^3(T_W - T_\infty)$$

$$\frac{T(x, y=0) - T_\infty}{T_W - T_\infty} = \frac{(47.44)^3}{(x+47.77)^3} \quad (7)$$

(난류)

$$\frac{B}{A^3} = T_W - T_\infty \quad (8a)$$

$$\frac{3B}{A^4} = 0.15453(T_W - T_\infty) \quad (8b)$$

$$A = 19.41, B = (19.41)^3(T_W - T_\infty)$$

$$\frac{T(x, y=0) - T_\infty}{T_W - T_\infty} = \frac{(19.41)^3}{(x+19.41)^3} \quad (9)$$

결론적으로 온도 예측모델을

$$\frac{T(x, y=0) - T_{\infty}}{T_w - T_{\infty}} = \frac{(C)^3}{(x + C)^3} \quad (9)$$

와 같이 만들고 여기에 나타나는 미지수 C의 값을 O(10)의 범위에서 조절하면 된다. C값이 작아지면 보다 난류해에 가깝고, C값이 커지면 층류해에 가깝게 된다.

#### 4. 결론

- 산불에 의한 유동을 해석하기 위해서 선형열원에 의한 열적상승유동에 대한 기존의 연구를 바탕으로 산불유동을 단순하게 모사할 수 있는 이론식들을 정립했다.

- 단순한 선형열원(line heat source)에 대한 층류 유동의 해와 난류유동의 해를 이용하여 산불강도효과를 나타낼 수 있는 지를 알아보기 위해 Navier-Stokes 방정식에 대한 수치해석을 수행하여 2차원 상사해의 유용성에 대한 분석을 행하였다.

- 수치해석을 통해 열원위의 대칭면에서 높이에 따라 발생하는 온도장 예측을 위한 다음 식을 제시했다.

$$\frac{T(x, y=0) - T_{\infty}}{T_w - T_{\infty}} = \frac{(C)^3}{(x + C)^3}$$

여기서 상수 C는 난류인 경우 약 20, 층류인 경우 약 50 정도의 값으로 추정하면 된다.

- 제시한 이론식들을 시뮬레이터 개발에 사용할 때, 보다 현실적인 상황을 재현하기 위해서 상수 C를 시간에 따라 변화하는 형태로 설정한다면 시뮬레이터 개발 시 외부 유동효과를 보다 시간중속적인 형태로 고려할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 건교부 항공선진화 사업(R&D/04 교통핵심B02-01)의 일환으로 수행되었음

#### 참고문헌

[1] H.Schuh, Boundary layers of temperature, Section B.6 of Tollmien's Boundary Layers(1999).  
 [2] C.S. Yih, Laminar free convection due to a line source of heat, Trans. A., Geophys. Un. 33(5) (1962), pp.669-672.  
 [3] I.G. Sevruk, Laminar convection over a horizontal wire., J.Appl. Math. Mech., 22(1958), pp.807-812.  
 [4] L.J. Crane, Thermal convection from a horizontal wire, Z. Angew. Math. Phys. 10(1959), pp.453-460.  
 [5] D.B. Spalding, R.G. Cruddace, Theory of the steady laminar bouyant flow above a line heat source in a

fluid of large Prandtl number and temperature dependent viscosity, Int. J. Heat Mass Transfer, 3(1961), pp.55-59.  
 [6] S.L. Lee, H.W. Emmons, A study of natural convection above a line wire, J. Fluid Mech., 11(1961), pp.353-368.  
 [7] T.Fujii, Theory of steady laminar natural convection above a horizontal line heat source and a point heat source, Int. J. Heat Mass Transfer, 6(1963), pp.597-606.  
 [8] R.J. Brand, F.J. Lahey, Heated laminar vertical jet, J. Fluid Mech., 29(1967), pp.305-315.  
 [9] T. Fujii, I. Morioka, H. Uehara, Buoyant plume above a horizontal line heat source, Int. J. Heat Mass Transfer, 16(1973), 755-768.  
 [10] E. Moses, G. Zocchi, A. Libchaber, An experimental study of laminar plumes, J. Fluid Mech., 251, pp.581-601.  
 [11] A. Woods, A note on non-Boussinesq plumes in an incompressible stratified environment, J. Fluid Mech. 345(1997), pp.347-356.  
 [12] G.G. Rooney, P.F. Linden, Similarity considerations for non-Boussinesq plumes in an unstratified environment, 318(1996), pp.237-250.  
 [13] J.S. Turner, Buoyancy effects in fluids, Cambridge Univ. Press (1979).  
 [14] B. Gebhart, Y. Jaluria, R.L. Mahanjan, B. Sammakia, Buoyancy induced flows and transport, Hemisphere Press(1988).