

대규모 도시화재에 의한 광역 부력유동의 수치해석에 대한 연구

김 상 진 (전주대학교 공학부 건축공학과 조교수)

1. 연구목적

본 연구는 대지진에 수반되는 도시화재 및 그에 따르는 2차 화재를 물리 모델을 이용하여 리얼타임으로 예측하고, 피난, 소화활동을 원활하게 행하는 방법 확립을 최종 목표로 한다. 물리 모델에 관하여는 도시 화재연소에 가장 영향을 끼치면서도 비선형 현상이기 때문에 이전에는 그 해석이 거의 없었던 도시상공 화재기류형상에 주목하여 CFD에 의하여 상세히 해석한다.

2. 연구개요

대형 지진화재시에는 주택 등의 파괴와 함께 지역 소화능력을 넘어서 도시화재가 발생하는 경우가 있다. 판신(阪神)대진재는 그 일례이다. 이러한 화재를 최소화하는 계획적인 수법의 개발과 그 평가법 개발은 사회적 중요성이 극히 높다고 할 수 있다. 또한 실제 화재시 리얼타임으로 그 현상을 예측하고 피난, 소화를 원활하게 행하기 위한 수단을 제공하는 것은 재해를 최소화하기 위하여 대단히 중요하다.

지진시에 도시화재의 확대는 주로 가옥의 파괴에 의한 각 건물의 방화피복이 기능을 다하지 못하는 상태에서 불꽃에 의한 방사와 불뿔에 의하여 발생한다. 현재 그러한 상황을 예측하기 위하여 도시화재 전파 시뮬레이션이 행하여지고 있지만 지금의 예측모델^{1), 2)}은 과거의 피해기록의 통계해석이나 단순한 연소모델

을 기초로 한 것이어서 진재시의 기상조건, 특히 화재 그 자체에 영향을 받는 도시 상공풍 형태 등의 화재확대에 큰 영향을 끼치는 물리현상을 미리 조건으로 주고 있기 때문에 예측과정에 이것을 충분히 고려한 모델로 되어있지 않다. 대규모화재에서 풍형태는 기상 관측소에서 관찰된 것과는 달리 지표 근방에서는 화재상승류의 영향을 받아서 풍향, 풍속 모두 크게 변화하기 때문에 풍형태를 정확히 예측하는 것은 도시화재 연소시뮬레이션에서 극히 중요하다. 이러한 해석에는 도시의 미세한 바람의 흐름을 실제로 해석하는 CFD가 강력한 수단이 된다. CFD에 의해 도시지역의 흐름장을 해석한 후 그 유동에 불씨를 이동시키고, 풍하측 기류의 온도분포로부터 방사형태를 평가함으로써 보다 상세한 연소속도 예측이 가능하게 된다. 또한 도시에는 많은 시설이 집적되어 있어 경우에 따라서는 화재에 의해 극히 독성이 높은 화학물질이 방산되는 것도 생각할 수 있다. 그 때문에 피난에는 화재연소에 의한 위험성만이 아니라 화재에 따르는 독성화학물질의 확산에 의한 위험성도 종합적으로 고려할 필요가 있다. 이러한 오염물질의 비산, 확산에 관하여도 CFD에 의한 구체적인 예측이 가능하다.

본 연구에서는 도시화재 연소시뮬레이션에서 가장 중요한 연소영역의 풍형태를 화재에 의한 상승기류를 고려하여 예측하고, 풍하측의 열기류 형태를 물리 시뮬레이션에 의해 해석하여 연소속도, 위험영역의 평가를 행한다. 구체적인 검토는 도시영역으로 확대하여 행하기로 한다. 즉, 고온화염에 의한 연소를 직접 평가하는 것이 아니라 도시전체의 화재기류형태를 먼

저 개략적으로 예측하여 화재의 세력범위를 검토한다. 여기서는 진재발생 당시의 판신지방 특유의 기상 조건을 재현하고 고베(神戸)시 전지역 혹은 그 대부분이 큰 화염으로 둘러싸였다고 생각할 경우의 넓은 지역에 걸친 열기류 형태의 평가를 시험한다. 이것에 의하여 도시 대화재의 연소형태를 예측하는 해석 모델의 일례를 제시하고 도시대화재의 피해를 최소한으로 줄이기 위한 도시계획 지침이 되는 자료를 제공한다.

3. 난류모델

본 연구에서는 기상분야에서 이용되고 있는 Mellor-Yamada 모델 레벨 2.5³⁾를 이용하여 Boussinesq 근사에 의한 밀도변화를 고려하여⁴⁾ 고베시 및 판신지방의 도시기후 구조를 해석한다. Mellor-Yamada 모델 레벨 2.5는 풀어야 할 편미분 방정식 수를 생각하면 공학분야의 2방정식 모델에 대응되지만, 수직방향의 난류 플럭스를 평가하고 있기 때문에 대수방정식 모델화의 치밀함을 생각하면 간이형 대수용력모델(ASM)이라고 생각해야 한다.

일사수열, 도시폐열 등의 발생열량이 일반적인 경우에 대하여는 Mellor-Yamada 모델 레벨 2.5를 이용한 도시기후 해석으로 관측데이터와의 비교를 행하여 그 예측정도를 확인하고 있다^{5), 6)}.

4. 해석개요

4.1. 계산 case

대규모 화재를 생각한 case1 및 일반적으로 화재가 없는 경우의 case2에 대하여 해석하였다. 두 case

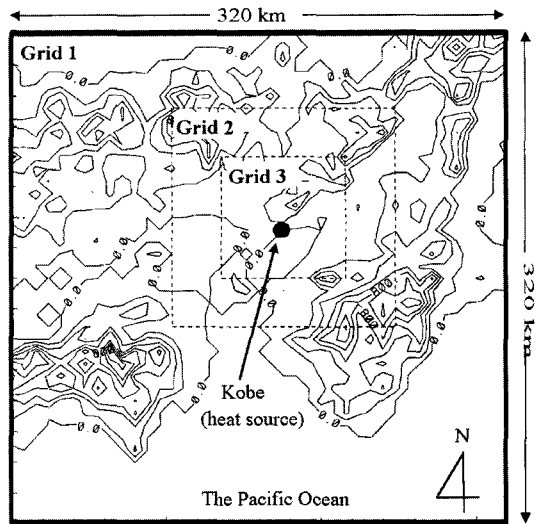


그림 1. 해석영역

에서 화재에 의한 발열 유무 이외의 조건은 모두 동일한 조건으로 하였다.

4.2 계산영역 및 격자분할

판신지방의 해륙풍은 주변 산악지형의 영향을 강하게 받고 있기 때문에 해륙풍을 정확히 재형하기 위해서는 주변산악지역을 포함하는 수백km의 범위를 계산영역으로 할 필요가 있다. 이러한 점을 고려하여 본 해석에서는 320km×320km×5km의 해석영역을 설정하였다(그림 1).

넓은 영역의 수치해석을 행할 때에는 계산기 용량의 제약이 있기 때문에 격자간격을 넓게 하게 되는데 이로 인하여 상세한 국지기상 해석이 이루어지지 않을 염려가 있다. 따라서 특히 상세한 해석을 필요로 하는 영역에서는 다른 격자계를 이용하여 격자를 세분화하는 nesting수법⁷⁾(그림 1의 Grid1, Grid2)을 채용하였다. 이 경우 큰 격자계와 작은 격자계의 데

표 1. 계산영역, 격자분할, 격자폭

	계산영역X×Y×Z	격자분할	수평방향 격자폭
Grid1	320km×320km×5km	40×40×20	8km
Grid2	144km×144km×5km	36×36×20	4km
Grid3	80km×80km×5km	40×40×20	2km

이터는 양방향으로 이용되는 수법으로 하였다. 격자 분할에 관하여는 수평방향은 등간격으로, 수직방향으로는 부등간격 격자를 이용하였다. nesting이용에 대한 계산영역과 격자분할수, 수평방향 격자간격을 표 1에 나타낸다.

4.3 대규모화재의 예

판신 대진재시에 가장 화재가 집중된 고베시 내의 3구(須磨區, 長田區, 兵庫區) 전역에 걸쳐서 화재가 발생한 것으로 한다. 본래 화재는 국소적으로 발생하여 그 국소에 있어서 수MW/m²의 발생이지만, 본 해석에서는 화재시 발열량에 대응하는 경계조건으로 도시화재의 거시적 거동을 조사하기 위하여 3구에 대응하는 셀(총면적 약54km²)에 4000W/m²의 발열속도를 주었다(주1). 해석은 1월 16일 오전 6시부터 17일 오후 3시까지 행하고 출화시간은 판신 대진재와 거의 같은 1월 17일 오전 6시로 하였으며 그 후 화재가 계속하고 있다고 예측하여 행하였다.

4.4 초기조건, 경계조건

풍향 및 풍속의 초기치는 당일 기상조건을 고려하여 거의 무풍상태라고 가정하였다. 상당온위의 초기치는 수평면에서는 같고, 연직분포는 고도에 따라 선형적으로 증가하도록 주었다⁹. 상공면 풍속 경계조건

도 초기조건과 같이 거의 무풍으로 하였다. 상공면, 지표면 이외의 계산영역 바깥쪽의 수평방향 속도, 난류량, 온도, 습도 등의 경계조건은 각각의 수송방정식에 대하여 경계상의 각 물리량의 수평방향 구배를 0으로 하는 조건을 주고, 이에 의하여 얻어지는 수직방향의 1차원 방정식을 수치 적분하여 얻었다. 또한 깊이 0.5m의 지중의 온도는10℃, 수면온도는 15℃로 하였다. 지표면온도는 1차원 열수지 모델로부터 산출하였다⁹. 지표면에 관한 각 파라미터는 일본 국토청 국토수치정보의 토지이용 데이터(100m mesh)를 이용하여 현재의 토지이용분류에 대응해서 설정하였다(표2).

5. 해석결과 및 고찰

5.1 수평 풍속벡터(그림 2, 그림 3)

그림 2에 전체 계산영역에 대한 case1의 풍속벡터를 나타낸다. 이하의 계산결과고 포함하여 계산결과는 모두 1월 17일 오후 3시의 결과이다. 지진이 발생한 1월 17일은 전형적인 서고동저의 겨울철 기압배치였기 때문에 넓은 범위에서 북풍 또는 북동풍이 불고 있었으며, 풍속은 1월로서는 약한 평균 2.6m/s였다⁸. 관측결과와 비교하여도 예측결과인 풍속분포, 풍향 모두 거의 대응하는 것으로 나타났다.

Grid3에서의 상세한 풍속 예측결과를 그림 3

표 2. 토지이용분류에 따른 파라미터의 설정

토지이용 구분	지표면 증발효율 β	albedo α	조도장 $z_0(m)$	인공폐열량 (W/m ²)
논	0.6	0.2	0.05	0
밭	0.3	0.1	0.01	0
과수원	0.4	0.2	1	0
수목밭	0.3	0.2	0.5	0
산림	0.3	0.15	2	0
황폐지	0.4	0.2	0.01	0
건물용지	0	0.15	1	50
도로용지	0	0.1	0.01	4
그외용지	0.3	0.2	0.01	0
강, 호수	1.0	0.03	0.001	0
해안	0.6	0.3	0.005	0
바다	1.0	0.03	0.001	0

(case1, case2)에 나타난다. 본 계산에서는 동계이기 때문에 거의 종일 해수면 온도가 지표면 보다 높고, 고베시 주변에서는 오사카 방면으로부터 불어오는 육지풍의 영향이 크다. 그림 3(2) case2에서는 룩고(六甲)산 남서측을 서쪽 또는 서북서로 돌아 들어오는 듯한 바람이 불고 있지만, 그림 3(1)의 case1에서는 화재로 인한 화재원의 발열 때문에 룩고산 남서부에서 열 상승류에 의한 시계방향으로 소용돌이가 발생하고, 화재원으로부터 발열이 없는 경우와 비교해서 풍속도 간해지고 있다. 화재원의 근방에서는 지표부근에서 전체방향으로부터 바람이 불어오고 있지만 육지풍의 영향을 받아서 남풍이 가장 강하게 불고 있다. 또한 해수면과 육지의 온도차가 큰 경우에는 동풍이 더욱 강하게 불어올 것으로 예상되어 연소영역이 서쪽으로 확대될 우려가 있다고 생각된다.

5.2 수평면 온도분포(그림 4)

그림 4에 높이 10m 지점의 수평면 온도분포를 나타낸다. case1(화재발생시)의 결과는 화재발생 격자에 있어서 최대 25 정도이고, case2(통상의 경우)에 비하여 약 15 정도 높게 나타나고 있다. 화재시의 온도분포로는 낮은 듯한 인상을 주지만 이들은 하나의

격자에서 면적평균(격자 하나의 크기는 2km×2km)한 발열속도를 경계조건으로 해서 얻어지기 때문이다. 그림 4(1)의 case1에서 수평방향에 관하여는 화재원으로 불어오는 바람에 의하여 전체적인 열, 오염물질의 확산성은 적다고 생각된다. 특히 화재원 근방에서는 남풍의 영향을 받아서 고온지역이 북측으로 확대되어지고 있어, 여기서는 북측으로의 연소위험성이 높다는 결과가 되었다.

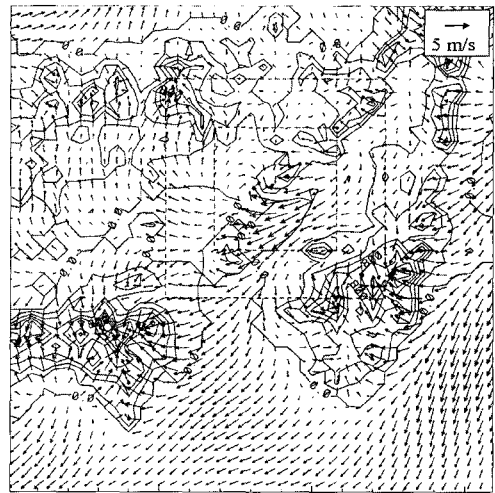
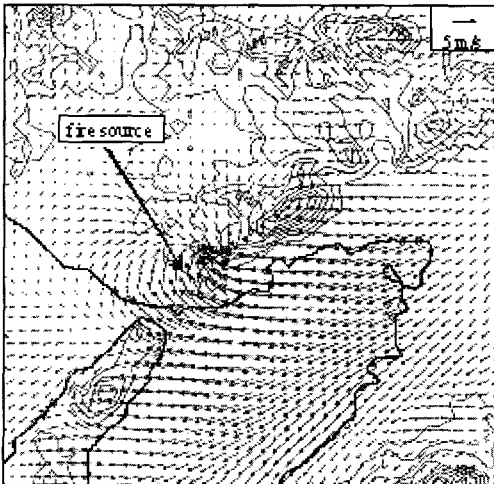
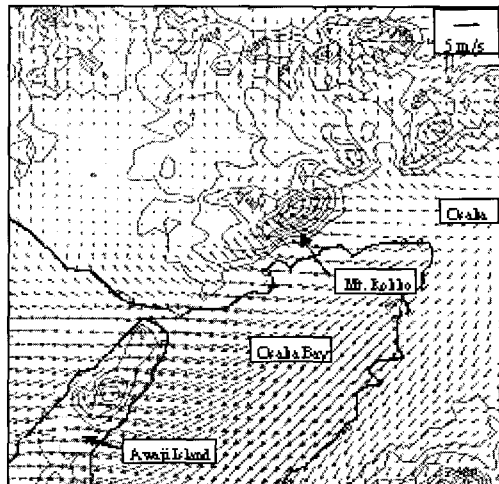


그림 2. 수평면 풍속벡터(화재발생시)
(Grid1, 높이10m, 1월17일 오후 3시)



(1) case1(화재발생시)



(2) case2(통상의 경우)

그림 3. 수평면 속도벡터(Grid3, 높이 10m, 1월 17일 오후 3시)

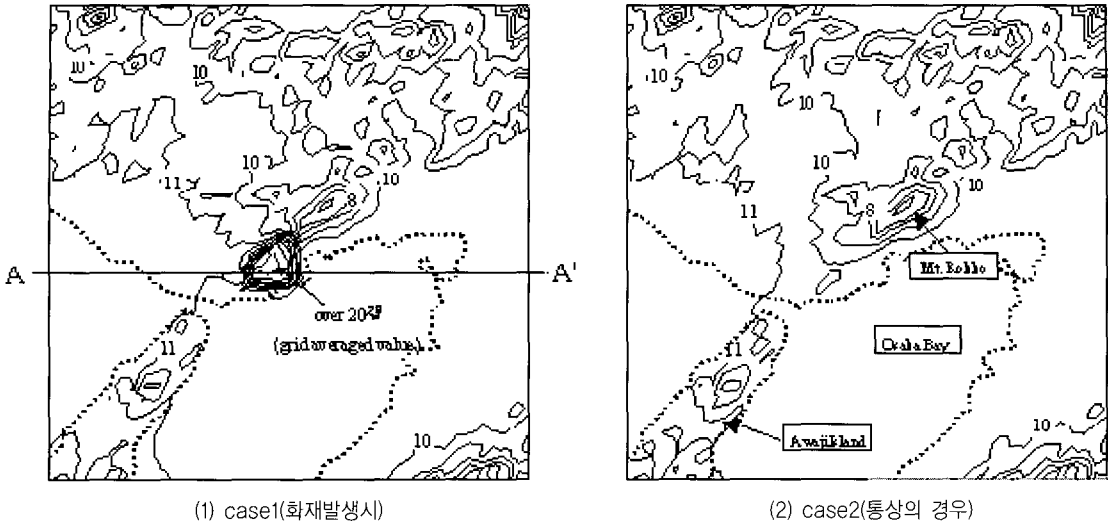


그림 4. 수평면 온도분포(Grid3, 높이 10m, 1월 17일 오후 3시)

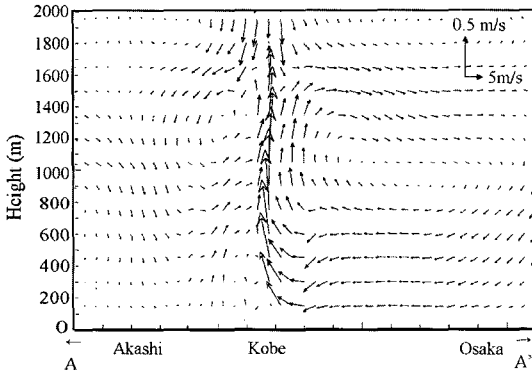


그림 5. 연직면 풍속벡터(case1)
(그림 4(1)의 A-A'단면)

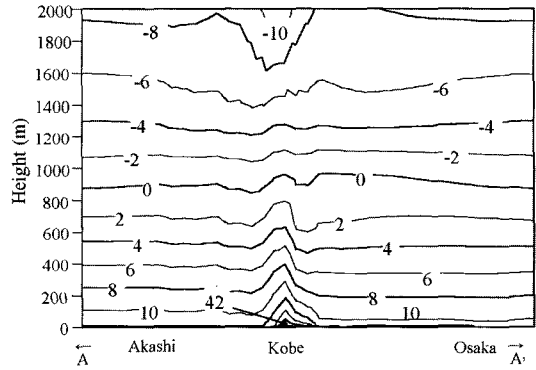


그림 6. 연직면 온도분포(case1)
(그림 4(1)의 A-A'단면)

5.3 연직 풍속벡터, 온도분포(그림 5, 그림 6)

그림 5, 그림 6에 A-A'단면의 풍속벡터 및 온도분포를 나타낸다. 화재원으로부터 발열에 의한 열 상승기류가 형성되어 그 영향은 상공 1,600m까지 미치고 있다(그림 7의 사진 참조). 1,600m 근처까지 거의 수직으로 상승한 열기류는 상공에서 냉각되어 수평방향으로 방사형상으로 확대되면서 하강하고 화재원을 중심으로 대순환류를 형성하고 있음을 알 수 있다. 이것은 화재발생 당시 바람이 약했기 때문에 연소속도가 극히 늦었다는 조사보고⁹⁾와 아주 잘 대응하고 있



그림 7. 고베시에서의 대규모화재 사진

다. 또한 오염물질 확산에 관하여도 온도, 풍속분포로부터 판단하면 본 계산결과에서는 기후풍의 영향이 약하고, 열 상승류 및 그에 따라 불어오는 바람의 영향이 강하기 때문에 오염물질은 상공에서 충분히 희석되어 발생원으로부터 어느 정도 떨어진 영역에서는 위험성이 적다고 생각된다.

6. 결론

도시화재의 CFD 해석수법 개발의 제 2단계⁴⁾로서 고베시의 기상조건을 고려한 수치 기후모델을 이용하

여 고베시의 대규모 화재발생을 해석하였다.

도시지역이나 국지기상의 풍계는 화재연소에 대하여 큰 영향을 미치고 더욱이 그 바람의 형태는 화재 자신에 의해 변화하기 때문에 화재상승류를 고려한 고배시를 포함한 판신지방의 풍형태에 대한 예측을 행하여 판신 대진제시에 있어서 macro-scale에서의 풍형태의 재현을 시험하였다.

본 해석수법에 의하여 얻어진 풍형태를 파라미터로서 기존의 도시화재 연소모델에 입력하면 보다 정확한 연소범위, 속도예측에 공헌할 수 있다. 이것에 의해 위험지역 판정이 합리적으로 행해지고 안전한 피난계획이 가능하게 된다.

주 1) 화재소실면적의 67.9%가 須磨區, 長田區, 兵庫區에 집중되어 있기 때문에 이들 3개두에서의 단위면적당 발열속도를 다음과 같이 산출하였다.

- | | |
|--|--|
| ① 건물의 단위면적당 발열속도 약 1.4[MW/m ²] ¹⁰⁾ | ② 須磨區, 長田區, 兵庫區의 총 소실면적 511,900[m ²] ⁸⁾ |
| ③ 소실면적 중 건물만이 점유하는 비율이 70[%] (추정치) | ④ 지진발생후 1시간이내의 화재발생률 43[%] ⁸⁾ |
| ⑤ 須磨區, 長田區, 兵庫區의 총 면적 54.35[km ²], 발열속도 = ①×②×③×④×⑤=4,000[W/m ²] | |

참고문헌

- (1) 保野健治郎ら, 1997, 平常時および地震時火災の延焼速度式に関する基礎的研究, 日本火災學會論文集, Vol.46, No.1, No.2.
- (2) 佐賀武司, 1997, 強風下の市街地火災における火災氣流に関する基礎的研究, 日本火災學會論文集, Vol.46, No.1, No.2.
- (3) Mellor,G.L, and Yamada.T, 1974, A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary layer, J of Applied Meteorology, Vol.13, No.7.
- (4) 加藤信介ら, 1996, 震災ビル火災時の周熱氣流性狀のCDF解析, 第1回 都市直下地震災害總合シンポジウム論文集.
- (5) 김상진, 서승직, 2002, Mellor-Yamada 모델을 이용한 도시기후의 수치해석, 대한건축학회 논문집, 18권, 10호, 251-258.
- (6) 村上周三, 持田, 金相璣, 大岡龍三, 吉田伸治, 1997, 數値モデルによる關東地方の都市氣候の研究, 建築學會梗概集.
- (7) Tetsuji Yamada. and Susan Bunker., 1988, Development of a Nested Grid, Second Moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation, J of Applied Meteorology, Vol.27, No.5.
- (8) 自治省消防廳消防研究所, 1995, 兵庫縣南部地震における神戸市内の市街地火災調査報告.
- (9) 日本火災學會, 1996, 1995年兵庫縣南部地震における火災に関する調査報告書.
- (10) 横井鎮男(建築研究所), 1960, 建築研究報告, No.34