



# 유동해석을 위한 FDS의 구조

이주희\* · 김동은\*\* · 김봉찬\*\* · 권영진\*\*\*

호서대학교 메카트로닉스학과 교수\*, 호서대학교 소방방재학과 대학원\*\*

호서대학교 소방방재학과 교수\*\*\*

## Structure of FDS for Flow Analysis

Ju Hee Lee\* · Dong Eun Kim\*\* · Bong Chan Kim\*\* · Young Jin Kwon\*\*\*

Hoseo University

### 요 약

오픈 소스인 FDS(fire dynamic simulator)는 건물, 터널내의 화재나 연기, 열기류의 거동을 연구하기 위하여 국내외적으로 광범위하게 이용되고 있다. 체계적인 연구와 확장이 가능하도록 소스코드와 프로그램구조, 각종 메뉴얼을 갖추고 있으며 향후 개발 방향을 온라인을 통해서 소스코드와 함께 공개하고 있다. 비압축성 비정상해석을 근간으로 하고 있으며 난류 유동을 해석할 수 있도록 DNS와 LES모형을 가지고 있다. 화재, 연소, 스프링클러, 화재 확산 등의 모델링을 제공하고 있다. 이러한 모델을 바탕으로 다양한 시나리오의 재난, 피난에 적용할 수 있다. 향후 이러한 기본 모델을 바탕으로 새로운 재난 시나리오에 따라 새로운 알고리즘의 적용하기 위해서는 FDS 기본적인 구조와 모델, 그리고 한계점을 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 FDS모형을 더욱 확장하기 위한 일환으로 FDS(V5.5.3)의 기본적인 구조를 파악하고 몇 가지 검증모델(verification)에 적용하였다. 또한 이를 향후 FDS의 소스코드를 확장할 수 있는 근간으로 삼고자 한다.

#### 1. 서 론

오픈소스기반의 진산유체역학코드는 소스코드를 공유하여 진산유체역학 코드 개발에 경험이 있는 연구자들이 참여하게 함으로써 코드가 빠른 시간 내에 진보할 수 있도록 하는 장점을 가지고 있으면서 비용이 들지 않는 공개 프로그램을 지향함으로써 라이선스 비용이 필요한 상용소프트웨어의 단점을 보완할 수 있다. FDS는 오픈소스기반의 화재해석 (fire dynamics)을 위한 전문프로그램으로 다양한 시나리오에 적용하여 그 실효성을 인정 받고 있다<sup>(1, 2)</sup>. FDS는 현재는 인터넷기반으로 개발이 되고 있으며 모든 실행파일과 소스코드를 공개하고 있으며 사용자는 인터넷을 통하여 실시간으로 최신의 코드와 개발 방향, 진도를 확인할 수 있도록 하고 있다<sup>(3, 4)</sup>. 이 연구에서는 FDS ver5를 사용하여 벽면유동에 대한 특성을 파악하고 향후 이를 바탕으로 코드 분석 및 코드 확장을 위한 기초적인 연구를 수행하고자 한다.

#### 2. 지배방정식과 FDS의 구조

유동방정식의 특성치의 전파 속도는 마하수(Mach number)의 역수에 비례하는 항과 유체속도에 비례하는 항으로 구성이 된다. 그러므로 속도가 낮은 비압축성의 공기유동에서는 거의 “∞”에 가까운 해의 전파 속도를 가진 항이 존재하게 됨으로 해의 안정성(CFL condition)을 유지하기 위해서는  $dt$ 의 값이 “0”에 가까워져야함으로 적절히 수렴된 해를 얻기 위해서는 많은 수의 반복계산을 수행하여야 한다. 그러므로 이를 없애기 위해서는 압력과 연속방정식(밀도)에 대한 적절한 조치를 필요로 하게 된다.

## 2.1 지배방정식<sup>(5)</sup>

유동은 보존형 방정식(conservation equation in conservative form)으로 나타내며 비압축성 유동에 적용하기에는 많은 문제를 가지고 있다. FDS에서 비압축성 유동에 적용하기 위하여 압력을 시간과 높이에 의하여 변하는 배경압력(background pressure)와 미소의 변동압력(fluctuation pressure) ( $p(\mathbf{x}, t) = \bar{p}_m(z, t) + \tilde{p}(\mathbf{x}, t)$ )으로 가정하여 상태방정식과 에너지방정식에  $p(\mathbf{x}, t)$ 대신  $\bar{p}_m(z, t)$ 을 적용하고 이를 연속방정식에 적용하여 속도의 구배(gradient)를 구한다. 결과적으로 에너지 방정식이 속도 구배의 형식으로 방정식에 포함되어 있는 새로운 형태의 방정식을 수치적으로 해석하게 된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla H = \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_0) \mathbf{g} - \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}) \quad (8)$$

$$\nabla^2 H = -\frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{F}; \quad \mathbf{F} = \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} - \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_m) \mathbf{g} - \mathbf{f}_b - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}) \quad (9)$$

$$\bar{p}_m(z, t) = \rho TR \sum_a Y_a / W_a \quad (10)$$

경계조건으로는 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial n} = -F_n - \frac{\partial u_n}{\partial t} \quad (\text{solid}); \quad H = |\mathbf{u}|^2/2 \quad (\text{outgoing}); \quad H = 0 \quad (\text{incoming}) \quad (11)$$

$$U(z) = U_0(z/d)^{1/7} \quad \text{at } z < d \quad \text{or } U = U_0 \quad \text{at } z > d \quad (12)$$

속도경계는 경계층두께(nominal thickness,  $d$ )보다 두꺼우면 1/7승법칙을 사용하고 이보다 작은 경우에는 고체 경계면의 속도를 주변 셀의 속도로 설정하게 된다. 이것은 미끄럼 경계(free-slip)과 같은 조건이 된다.

## 2.2 FDS의 구조

비압축성 방정식인 식(8)~(11)을 해석하기 위하여 다음의 prediction-correction방법을 이용하여 적절한 해를 얻을 수 있다(Fig. 1). 이전 시간( $t$ )의 해로부터 예측항(prediction)들을 구하고 이를 바탕으로 실제 시간( $t + \delta t$ )의 값(correction)을 구하게 된다. 먼저 1차 시간전진법(Euler method)을 이용하여 예측된 밀도항을 구하고 이로부터 새로운 속도의 divergence항을 구한다. 또 예측속도로부터 안정성을 판별한다. correction step에서는 이전에 구하여진 값들과 새로운 값들을 이용하여  $t + \delta t$ 에서의 값을 얻게 된다.

### 3. 결과 및 토론

FDS의 해의 정확도를 분석하기 위하여 후향계단(backward facing step)과 평판사이의 유동에 적용하였다.

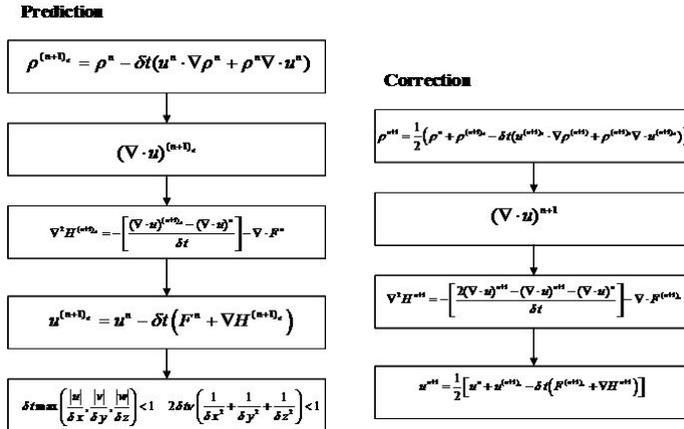


Fig. 1 flow chart of prediction and correction method (FDS)

#### 3.1 Backward facing step

Backward facing step은 난류모델의 정확성을 검토하는데 많이 사용되는 모델이다. 2차원 난류로 가정하였다. 계단의 높이(h)와 입구속도를 기준으로 Reynolds수는 37500으로 하였으며 입구의 속도는 균일한 속도를 주었다. 또 형상은 Fig. 2에 보는 것과 같다. 유동은 난류로 생각하여 LES을 사용하였으며 총 계산 시간은 250초로 하였으며 마지막 30초에

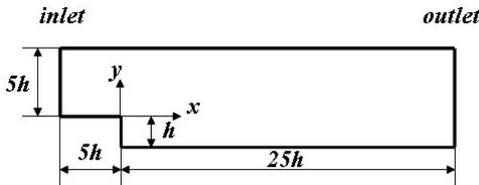


Fig. 2 backward facing step

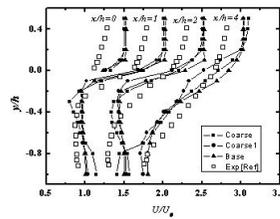


Fig. 3 velocity profile

해당하는 결과를 평균하였다. Fig. 3는 실험결과<sup>(5)</sup>와 비교하였다. 각 위치에 따른 속도분포를 보게 되면 실험값과 다소차이를 보이고 있다. 우선  $y/h > 0$  영역에서의 차이는 일정하게 모든 구간에서 차이를 보이고 있다. 실험의 경우 입구에는 충분히 발달된 유동이 들어오게 되나 FDS의 입구의 경우 입구속도형상에 대한 정확한 데이터가 없는 관계로 계산을 간편하게 하기 위하여 일정한 유속을 주었기 때문이다. 또한  $y/h < 0$ 의 경우에는 입구유속의 차이와 또한 FDS의 경계면을 다루는 방식에 의한 오차가 있는 것으로 생각된다. FDS

는 벽면 근방의 격자의 크기가 큰 경우를 가정하여 벽면에서의 속도를 일정한 값으로 주  
계 됨<sup>(6)</sup>으로 완전한 non-slip 경계가 되지 않기 때문이다.

### 3.2 Infinitive flat plate

벽면과 첫 번째 격자와의 거리에 따른 난류유동의 정확한 모사를 판별하기 위하여 두  
평판사이의 난류유동에 대하여 FDS연산을 수행하고자한다. 이때의 근사적인 해는 다음과  
같다<sup>(7)</sup>.

$$u^+ = \frac{u}{u^*} = \frac{Y u^*}{v} = y^+ ; y^+ < 5 , u^+ = \frac{1}{k} \ln u^+ + B ; y^+ > 30 , Y < h/2 \quad (13)$$

일반적으로 FDS해석은 전영역에 걸쳐 같은 크기의 격자를 사용하게 됨으로 벽면의 조  
건이 적절하지 않은 경우가 많이 있다. 그러므로 여러 가지 격자크기에 대하여 경계조건  
식 (11)의 조건의 정확성을 파악하고자 평면사이의 유동을 식(13)과 FDS의 결과를 비교하  
고자한다.

## 4. 결론

FDS의 구조를 파악하고 수치모델의 특성을 파악하기 위하여 벽면유동에 관한 연구를  
수행하였다. FDS는 LES모델을 사용하며 벽면의 격자가 큰 경우 벽면을 경계층을 적절히  
다루지 않으므로 경계층이 중요한 유동에서는 비교적 해가 잘 일치하지 않았다. 향후 이  
자료를 근거로 FDS의 코드 분석과 확장에 유용한 자료로 사용될 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 2011년 소방방재청 차세대 핵심소방안전기술개발 과제 1665005762 [NEMA-차세대  
-2011-3] 지원에 의하여 수행하였으며, 관계자들에게 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 이동호, 임경범, 유지오, “터널 화재시 수분무 소화설비의 효율성 평가,” 한국화재소방학회논문  
집, 제 22권, 제5호(2008).
2. Hu L.H., Huo, R., Peng, W., Chow, W.K., and Yang, R.X., “On the maximum smoke  
temperature under the ceiling in tunnel fires,” Tunnelling and Underground Space  
Technology, Vol. 21, pp. 650-655 (2006).
3. <http://code.google.com/p/fds-smv>, Oct., 14. (2011).
4. <http://fire.nist.gov/fds>, Oct., 14. (2011).
5. Driver, D.M. And Seegmiller, H.L., 1985, “Features of Reattaching Turbulent Shear  
Layer in Divergent Channel Flow,” AIAA Journal, Vol. 23, No. 2, pp. 163-171  
(1985).
6. K. McGrattan, S. Hostikka, J.Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, and R.  
MCDermott, Fire Dynamic Simulator (Version 5) Technical Reference Guide,  
Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-5 (2009).
7. White F.M., “Fluid Mechanics 2nd Ed,” McGraw-Hill, (1986).