

FIRE DYNAMICS SIMULATOR -OHJELMAN UUSIA OMINAISUUKSIA JA SOVELLUKSIA

Simo Hostikka
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
PL 1803, 02044 VTT
simo.hostikka@vtt.fi

JOHDANTO

Kaksi vuotta sitten NIST:ssä kehitettyä Fire Dynamics Simulator -ohjelmaa (FDS) esiteltiin tällä foorumilla varteenotettavana vaihtoehtona tulipalon simulointiin, niin insinööri- kuin tutkimussovelluksiinkin [1]. Kahdessa vuodessa tilanne on muuttunut paljon; nyt FDS on maailman yleisin tulipalon simulointiin käytettävä kenttämalli ("mutu"-arvio), ja simuloinnin rooli niin suunnittelussa kuin tutkimuksessakin on voimistunut, paljolti juuri FDS:n ansiosta. Yllättävää kyllä, tässä tapauksessa maailma tietokoneohjelman ympärillä on tainnut muuttua enemmän kuin tietokoneohjelma. FDS:n käyttö on yleistynyt, koska se on ilmainen ja helppokäyttöinen, koska tietokoneet ovat tulleet entistä tehokkaammiksi, ja koska onnistunut visualisointi on helpottanut simulointitulosten soveltamista ja hyväksymistä.

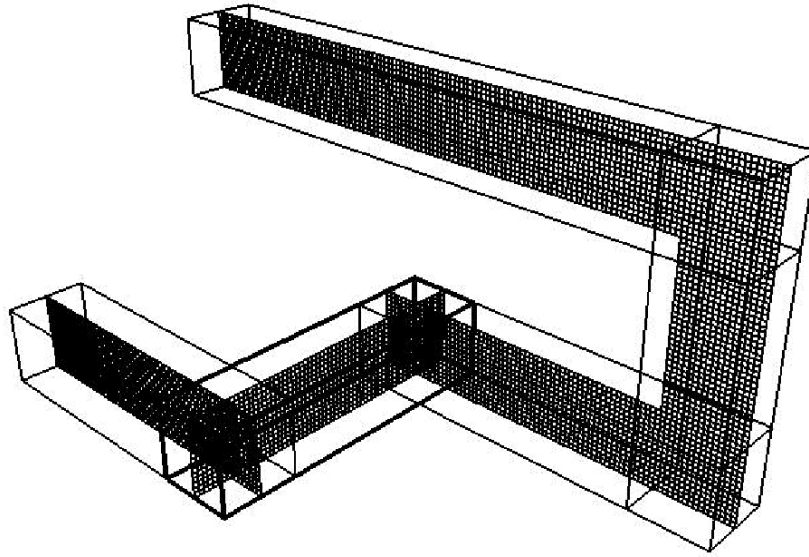
Tässä esitelmässä luodaan katsaus FDS-ohjelman uusiin ominaisuuksiin, jotka julkistettiin versiossa 3.0 [2]. Lisäksi esitellään joitakin työn alla olevia ominaisuuksia, jotka tullaan todennäköisesti julkaisemaan seuraavassa, 4.0 versiossa. Lopuksi esitellään joitakin tärkeimmistä sovelluksista.

UUDET OMINAISUUDET VERSIOSSA 3.0

Monilohkoratkaisija

Tärkein FDS:n laskentatehoa parantavista uudistuksista on mahdollisuus jakaa laskenta-alue lohkoihin, joilla on omat erilliset hilansa. Tämä mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden kuvaamisen tehokkaasti, ilman monia turhia laskentakoppeja. Vinojen muotojen mallintaminen on tosin edelleenkin hieman tehotonta, koska lohkot ovat edelleen suorakulmaisia. Esimerkki monilohkomallin avulla toteutetusta, mutkikkaan tunnelin geometriasta on esitetty Kuvassa 1.

Lohkojen avulla voidaan myös toteuttaa laskentahilan paikallinen tihentäminen, sillä lohkot voivat olla joko osittain tai kokonaan päällekkäin. Tyypillisesti paikallista tihentämistä tarvitaan simuloitavan alueen kokoon nähden pienen palolähteen kuvaamiseen, tai esim. aukkovirtausten tarkkuuden parantamiseen.



Kuva 1. Esimerkki monilohkogeometriasta [2].

Säteilyn ja vesipisaroiden vuorovaikutus

Lämpösäteilyllä on merkittävä rooli tulipalojen kehittymisessä, koska säteily lämmittää palamiskelpoiset materiaalit lähelle syttymislämpötilaa, kiihdyttäen siten liekinleviämistä ja mahdollistaen jopa ilman suoraa liekkikontaktia tapahtuvan syttymisen. Veteen perustuvat sammutusjärjestelmät, kuten sprinklerit ja vesisumut, pienentävät leviämisenopeutta vaimentamalla säteilyä. Lisäksi vesipisaroilla on tärkeä rooli palomiesten säteilysuojana. Vesipisarot vaimentavat säteilyä sekä absorboimalla että sirottamalla sitä. Näiden eri mekanismien suhteellinen merkitys riippuu pisarakoosta ja säteilyn aallonpituudesta.

Näiden ilmiöiden simuloimista varten FDS-ohjelmaan kehitettiin vesipisaroiden ja säteilyn vuorovaikutusta kuvaava malli, joka toimii aiemmin kehitetty säteilyratkaisijaan ja pisaroiden kuljettumismallin yhdistävänä laajenuksena [3]. Alla on esitetty lyhyesti mallin oleelliset osat.

Jos kaasufaasiin liittyvät termit jätetään pois, voidaan vesi-ilmaseoksen säteily-yhtälö kirjoittaa muodossa

$$\mathbf{s} \cdot I_{\lambda}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = -[\kappa_d(\mathbf{x}, \lambda) + \sigma_d(\mathbf{x}, \lambda)]I_{\lambda} + \kappa_d I_b(\mathbf{x}, \lambda) + \frac{\sigma_d}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') I_{\lambda}(\mathbf{x}, \mathbf{s}') d\Omega \quad (1)$$

missä I_{λ} on intensiteetti, κ_d on absorptiokerroin, σ_d on sirontakerroin ja Φ on sironnan suuntafunktio, joka antaa sironnan voimakkuuden suunnasta \mathbf{s}' suuntaan \mathbf{s} .

Paikalliset absorptio- ja sirontakertoimet riippuvat paikallisesta pisarakojakaumasta $N(r, \mathbf{x})$, jota tässä mallissa approksimoidaan lukumäärätiheyden $N'(\mathbf{x})$ ja pisarasysteemille ominaisen kokeijakauman tiheysfunktion $f(r, d_m)$ tulona. Tällöin paikalliset kertoimet saadaan kaavoilla

$$\begin{aligned}\kappa_d(\mathbf{x}, \lambda) &= N'(\mathbf{x}) \int_0^\infty f(r, d_m(\mathbf{x})) C_a(r, \lambda) dr \\ \sigma_d(\mathbf{x}, \lambda) &= N'(\mathbf{x}) \int_0^\infty f(r, d_m(\mathbf{x})) C_s(r, \lambda) dr\end{aligned}\quad (2)$$

missä C_a ja C_s ovat pisaran absorptio- ja sirontapinta-alat. Yllä oleva muoto on laskennan kannalta edullinen, koska integraalit voidaan laskea etukäteen, ja taulukoida pisarakokojakauman keskihalkaisijan d_m funktiona.

Säteily-yhtälön sisäänsirontaintegraalia approksimoidaan jakamalla 4π avaruuskulma kahteen osaan: "eteenpäin suunta" $\delta\Omega^l$ ja muita suuntia vastaavaan kulmaan $\delta\Omega^l = 4\pi - \delta\Omega^*$. Määrittelemällä efektiivinen sirontakerroin

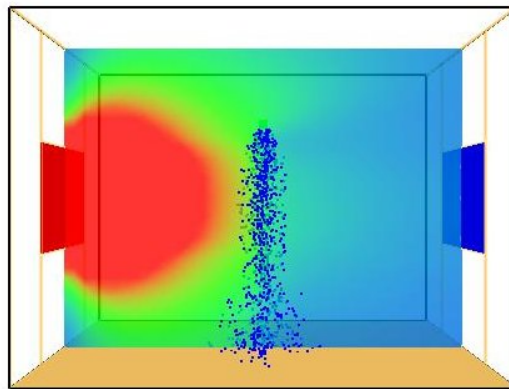
$$\bar{\sigma}_d(\mathbf{x}, \lambda) = \frac{4\pi N'(\mathbf{x})}{4\pi - \delta\Omega^l} \int_0^\infty f(r, d_m(\mathbf{x})) [1 - \chi_f(r, \lambda)] C_s(r, \lambda) dr \quad (3)$$

missä $\chi_f(r, \lambda)$ on "eteenpäin" tapahtuvan sironta osuus, voidaan säteily-yhtälö kirjoittaa muodossa

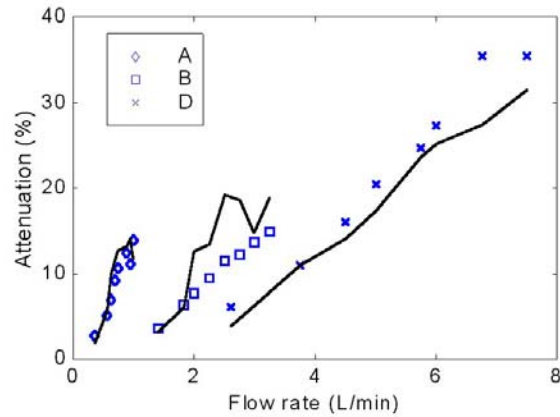
$$\mathbf{s} \cdot I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = -[\kappa_d(\mathbf{x}, \lambda) + \bar{\sigma}_d(\mathbf{x}, \lambda)] I_\lambda + \kappa_d I_b(\mathbf{x}, \lambda) + \frac{\bar{\sigma}_d}{4\pi} U(\mathbf{x}, \lambda) \quad (4)$$

missä U on kokonaisintensiteetti (I_λ :n integraali 4π -avaruuskulman yli). Yllä oleva yhtälö on yhtä yksinkertainen kuin normaali kaasujen säteily-yhtälökin, koska kokonaisintensiteetti $U(\mathbf{x}, \lambda)$ tunnetaan joka tapauksessa. Koko sirontan suuntainformaatio on siis sisällytetty tekijään $\chi_f(r, \lambda)$, joka voidaan laskea melko kimurantin integroimiskaavan avulla [4]. Absorptio- ja sironta pinta-alat, C_a ja C_s , sekä χ_f :n laskennassa tarvittava yksittäisen pisaran suuntafunktio lasketaan Mien sirontateorian avulla.

Mallia tarkkuuden tutkimiseksi sillä laskettiin lämpösäteilyn vaimenemista täyden mittakaavan vesisumusuuttimilla tehdyissä kokeissa [5], joiden havainnekuva on esitetty Kuvassa 2. Vasemmalla on $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ säteilypaneeli, keskellä vesisuutin ja oikealla säteilyvirrantiheyden mittausta (etäisyys 4 m säteilypaneelistä). Kuvassa 3 verrataan mitattua ja simuloitua vaimenemista kolmella eri suuttimella ja eri virtaamilla, paineen vaihdelta välillä 1...8 bar. Nähdään, että useimmissa tapauksissa tulokset ovat hyvin lähellä mitattuja. Lisäksi mallin antamia tuloksia on verrattu pienen skaalan laboratoriomittauksiin.



Kuva 2. Simuloitu säteilyn vaimeneminen vesisumussa täyden mittakaavan kokeessa.



Kuva 3. Mitattu (symbolit) ja simuloitu (viivat) säteilyn vaimeneminen vesisumussa [3].

UUDET OMINAISUUDET VERSIOSSA 4.0

Rinnakkaisratkaisin

Versiossa 3.0 esitellyn monilohkoratkaisijan jälkeen luontevin tapa laskentatehon kasvattamiseen oli lohkojakoa hyödyntävä rinnakkaistaminen. Tämä ns. "domain decomposition" -tekniikka on yleisin virtauslaskentaohjelmien rinnakkaistamiseen käytetty tekniikka. Siinä useita verkon kautta toisiinsa yhteydessä olevia prosessoreita käytetään saman ongelman ratkaisemiseen lähettämällä kukin lohko omalle prosessorilleen. Tämä mahdollistaa paitsi entistä nopeamman laskennan, myös entistä isompien ongelmien simuloimisen, koska yksittäisen tietokoneen keskusmuisti ei toimi rajoittavana tekijänä. Lohkojen välinen tiedonsiirto, johon käytetään MPI-protokollaa, voi muodostua nopeuden kannalta ratkaisevaksi pullonkaulaksi, joten koneiden välisten verkon tulee olla riittävän nopea. FDS:n tapauksessa huomattava nopeuden lisäys saadaan jo tavallisessa kahden prosessorin PC:ssä, jonka molemmat prosessorit voidaan käyttää nyt entistä tehokkaammin.

Monilohkoratkaisijan tehokkuus perustuu järkevästi tehtyyn lohkojakoon. Tämä on edelleen ohjelman käyttäjän vastuulla, joten kokemusta ja harjoittelua tarvitaan jatkossakin. Rinnakkaistus ei automaattisesti takaa lisää nopeutta.

Yksinkertaistettu hiiltymismalli

Jos FDS-ohjelman 2.0-versiossa oli mukana Arrhenius-tyyppinen hiiltymismalli [6]. Mallia oli kuitenkin melko vaikea käyttää, koska tarvittavien syöteparametrien määrä oli suuri, ja tulokset olivat erittäin herkkiä pienille virheille lämpötilaratkaisussa. Mallista onkin kehitetty hieman yksinkertaisempi versio, jossa kiinteän aineen sisällä tapahtuva jatkuva pyrolyysi-reaktio on korvattu ohuella pyrolyysirintamalla. Yksittäisen seinäelementin pyrolyysinopeus \dot{m}'' lasketaan edelleen Arrhenius-kaavalla

$$\dot{m}'' = A e^{-E_A/RT} \quad (5)$$

missä A on etutekijä, E_A on aktivointienergia, R on kaasuvakio ja T on lämpötila. Pyrolyysirintama etenee aineen pinnalta sisäosia kohden nopeudella

$$v = \frac{\dot{m}''}{\rho_{s0} - \rho_{hiili}} \quad (6)$$

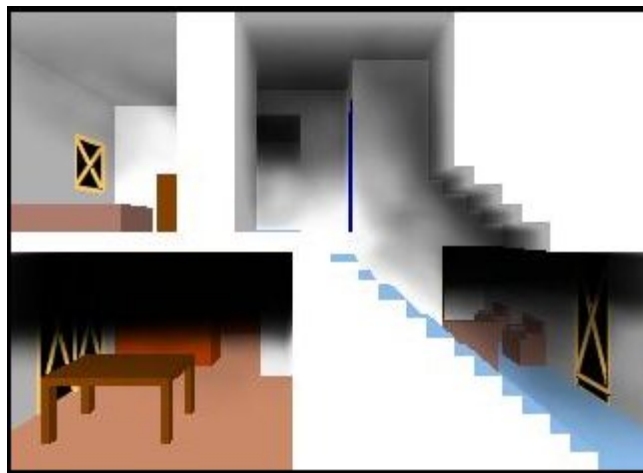
missä ρ_{s0} ja ρ_{hiili} ovat puun tiheys alussa ja lopussa.

Malli on tehty helppokäyttöisemmäksi, ja yksinkertaisuuden ansiosta herkkyys on hieman pienentynyt, minkä toivotaan helpottavan mallin soveltamista. Tätä kirjoitettaessa malli on kuitenkin vasta testausvaiheessa, joten varsinaisia sovelluksia ei ole esiteltävänä.

Savun visualisointi

Koko olemassaolonsa ajan FDS-ohjelman tärkein sovellusalue on ollut savun kuljettumisen laskenta. Sen tärkein ominaisuus on ollut kyky ennustaa tarkasti tilojen täyttyminen savulla, ja se onkin muodostunut tärkeäksi työkaluksi rakennusten poistumisturvallisuuden suunnittelussa. Tähän asti savun leviämistä indikoivana simulointituloksena on useimmiten käytetty kaasun lämpötilaa, mikä kyllä kertoo jotain savun leviämisestä mutta ei esim. näkyvyydestä. Näkyvyyden simuloimiseksi onkin käytetty esim. mustia painottomia hiukkasia, jotka suurina määrinä näyttävät melko paljon savulta. Hiukkasten ongelma on kuitenkin suuri muistintarve - tiedostot kasvavat helposti satojen megatavujen kokoisiksi.

FDS:n visualisointiosan - Smokeview-ohjelman - uusi ominaisuus on kyky visualisoida savun aiheuttama näkyvyyden heikkeneminen [7]. Ohjelma lukee FDS:n tallettaman informaation paikallisesta nokikonsentraatiosta, ja laskee sen perusteella näkyvän valon aluetta vastaavan absorptiokertoimen. Tämän jälkeen ohjelma ratkaisee eri pintojen lähettämän valon vaimenemisen käyttäjän silminä toimivaan "kameraan", jolloin lähellä olevat ja vaaleammat pinnat näkyvät aidosti paremmin, ja kauempana olevat huonommin. Menetelmän etuna on lisäksi pienentynyt tiedostokoko (harvinaisuus nykyajan ohjelmistokehityksessä!). Esimerkki 3D-savusta on esitetty Kuvassa 4, jossa alakerran keittiössä syntynyt savu virtaa ylös portaita.



Kuva 4. Savun läpinäkyvyyden simulointi [7]. Animaatioita voi katsella Internet-osoitteessa <http://www.computer.org/cga/>

SOVELLUKSET

Tunnelipalot

Tunnelipalot ovat parin viime vuoden aikana saaneet runsaasti huomiota, ja erilaisia keinoja niiden simulointiin on tutkittu runsaasti. FDS-ohjelmalla on simuloitu mm. Baltimoressa tapahtunutta rautatietunnelin paloa [8], jossa nestemäistä polttoainetta kuljettanut säiliövaunu paloi tunnelissa useita tunteja. Yhdysvaltojen ydinturvallisuutta valvova viranomaisen (NRC) käyttää ko. paloa käytetyn ydinpolttoaineen rautatiekuljetuksien turvallisuusanalyysien yhteydessä. Työssä on esitetty mm. kaksi koetilanteiden simulointia, joiden avulla on arvioitu mallin kelpoisuutta tunnelien simulointiin. Toinen kokeista on VTT:n suuressa koehallissa tehty savullatäytymiskoe, jonka FDS toisti erinomaisesti.

Tunnelipaloissa on käytännössä välttämätöntä hyödyntää monilohkoratkaisijaa, koska perinteisellä yksilohkoisella hilalla on mahdotonta saada riittävän hyvää tarkkuutta paloalueelle ilman, että koko tunneli joudutaan kattamaan tiheällä hilalla.

World Trade Center -simuloinnit

Vuoden 2001 syyskuun 11. päivän terrori-iskujen jälkeen FDS:n kehitystä on ajanut yksi selkeä tavoite: World Trade Centerin palojen simulointi. Simulointiohjelman kehityksen kannalta tällä tapauksella on sekä hyvät että huonot puolensa. Ohjelman laskentatehon kasvattamiseen on luonnollisestikin jouduttu huomattavasti panostamaan, koska WTC on laskentatarpeeltaan aivan toista luokkaa, kuin yksikään aikaisempi skenaario. Juuri tämä on ajanut rinnakkaislaskentaa hyödyntävän version kehitystä. Toisaalta, voimakas panostaminen pelkkään laskentatehon parantamiseen on vienyt resursseja fysikaalisten mallien kehitykseltä.

WTC:n simulointien ensimmäiset versiot julkaistiin keväällä 2002 [9]. Tällöin oli tehty karkeat arviot tornien kokonaispalotehoille sekä lentokoneiden polttoaineen liekkipallojen teholle. Myöhemmissä simuloinneissa on pyritty simuloimaan palon kehittymistä kerrosten sisällä. Viimeisimmät versiot on tehty tässä kirjoituksessa mainittua, yksinkertaistettua hiiltymismallia käyttäen. Simulointien varsinaisena tavoitteena on tuottaa rakenneanalyyysien vaatimat lämpötila- ja säteilyreunaehdot.

YHTEENVETO

Viimeisten kahden vuoden aikana FDS-ohjelmasta on julkaistu versio 3.0, joka toi mukanaan esim. vesipisaroiden ja säteilyn vuorovaikutusta kuvaavan mallin. Kehityksen pääpaino on kuitenkin ollut laskentatehon kasvattamisessa. Luonnollinen syy tähän on tarve WTC:n palojen simulointiin. Voimakas panostaminen laskentatehoon on kuitenkin kostautunut siinä, että varsinainen palamisen mallintaminen ei ole kehittynyt yhtä paljon, kuin olisi ollut toivottavaa.

Selkeitä kehitystarpeita on siis vielä jäljellä, sekä palamisreaktioiden että muiden tulipaloihin liittyvien prosessien mallintamisessa. Esimerkkejä muista prosesseista ovat noen muodostuminen ja hapettuminen sekä kiinteän aineen palaminen.

LÄHDELUETTELO

1. Hostikka, S. Tulipalon simulointi FDS-ohjelmalla. Palontorjuntatekniikka. Vol. 31 (2001) No: 3-4, s. 46 - 49.
2. McGrattan, K.B., Baum, H.R., Rehm, R.G., Forney, G.P., Floyd, J.E., Hostikka, S., Prasad, K. Fire Dynamics Simulator (Version 3), Technical Reference Guide. Technical Report NISTIR 6783, 2002 Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2002.
3. Hostikka, S., McGrattan, K.B. Modelling Radiative Transport in Two Phase Flows. Lähetetty julkaistavaksi lehdessä: Journal of Heat Transfer (ASME).
4. Yang, W., Parker, T., Ladouceur, H.D. ja Kee, R.J. The Interaction of Thermal Radiation And Water Mists In Fire Suppression. Teoksessa: Proceedings of the Second NRIFD Symposium. National Research Institute of Fire and Disaster, Japan, 2002.
5. Murrel, J.V., Crowhurst, D., ja Rock. P. Experimental study of the thermal radiation attenuation of sprays from selected hydraulic nozzles. Teoksessa: Proceedings of Halon Options Technical Working Conference, 1995. s. 369–378.
6. Hostikka, S. & McGrattan K.B. Large eddy simulation of wood combustion. INTERFLAM 2001. Proceedings of the 9th International Conference. Edinburgh, GB, 17 - 19 Sept. 2001. Vol. 1. Interscience Communications (2001), s. 755 - 765.
7. Forney, G.P., Madrzykowski, D., McGrattan, K.B. ja Sheppard, L. Understanding Fire and Smoke Flow Through Modeling and Visualization. IEEE Computer Graphics and Applications, July/August 2003. s. 6-13. (<http://www.computer.org/cga/>)
8. McGrattan, K.B., Hamins, A. Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001. Technical Report NISTIR 6902, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2002. 36 s.
9. Rehm, R.G., Pitts, W.M., Baum, H.R., Evans, D.D., Prasad, K., McGrattan, K.B., Forney, G.P. Initial Model for Fires in the World Trade Center Towers. Technical Report NISTIR 6879. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2002. 18 s.