

AVARUUSLUOTAIN

Rymdsonden Spaceprobe
2/2012, vol. 47



Rakettitieteen jalanjäljillä

Osa 3: Vastusta ilmassa

Sampo Niskanen

Pienoraketeissa on kaksi harrastajaa erityisesti kiinnostavaa aerodynaamista osa-alueita, raketin vakaus ja sen ilmanvastus. Raketin vakaus vaikuttaa siihen, miten raketti lentää — vakaa raketti lentää turvallisesti ylöspäin, epävakaa raketti puolestaan pyörii sykkyyrää ilmassa. Ilmanvastus puolestaan vaikuttaa suuressa määrin siihen, miten korkealle raketti lentää, ja on kiinnostava etenkin suurta lento- korkeutta tai -nopeutta tavoiteltaessa.

Artikkelisarjan edellisessä osassa (AL 3/2011) kävin läpi Barrowmanin menetelmän raketin painekeskiön sijainnin selvittämiseksi. Tämä menetelmä on ollut raketiharrastajien käytössä sen julkaisusta lähtien vuonna 1966 [1]. Ilmanvastuksen laskentaa varten puolestaan ei ole ollut mitään selkeää keinoa, sillä siihen vaikuttavat niin monet seikat raketista.

Kirjoittaessani OpenRocket-ohjelmistoa jouduin tämän vuoksi kehittämään menetelmät raketin ilmanvastuksen laskemiseksi. Tähän on toki ollut olemassa valmiita menetelmiä vuosikymmeniä, mutta useimmat pohjautuivat kokeellisiin mittauksiin, joita on vaikea laajentaa ohjelmiston salliman yleisen raketin muodon laskentaan. En ollut ennen diplomityöni tekemistä myöskään opiskellut juurikaan aerodynamiikkaa, joten useat menetelmät olivat liian monimutkaisia opiskeltavaksi työn puitteissa. Tämän vuoksi yhdistelin eri menetelmiä useista eri lähteistä kokonaisvastuksen arvioimiseksi.

Ilmanvastuksen osat

Raketin liikettä vastustava voima muodostuu painevastuksesta sekä kitkavastuksesta. Painevastus aiheutuu siitä, että liikkuva raketti joutuu työntämään ilmamolekyyliä edestään aiheuttaen vaihtelevan painejakauman raketin

osien ympärillä. Kitkavastus puolestaan johtuu raketin vieressä virtaavan ilman kitkasta, kun molekyylit ”hankaavat” raketia vasten.

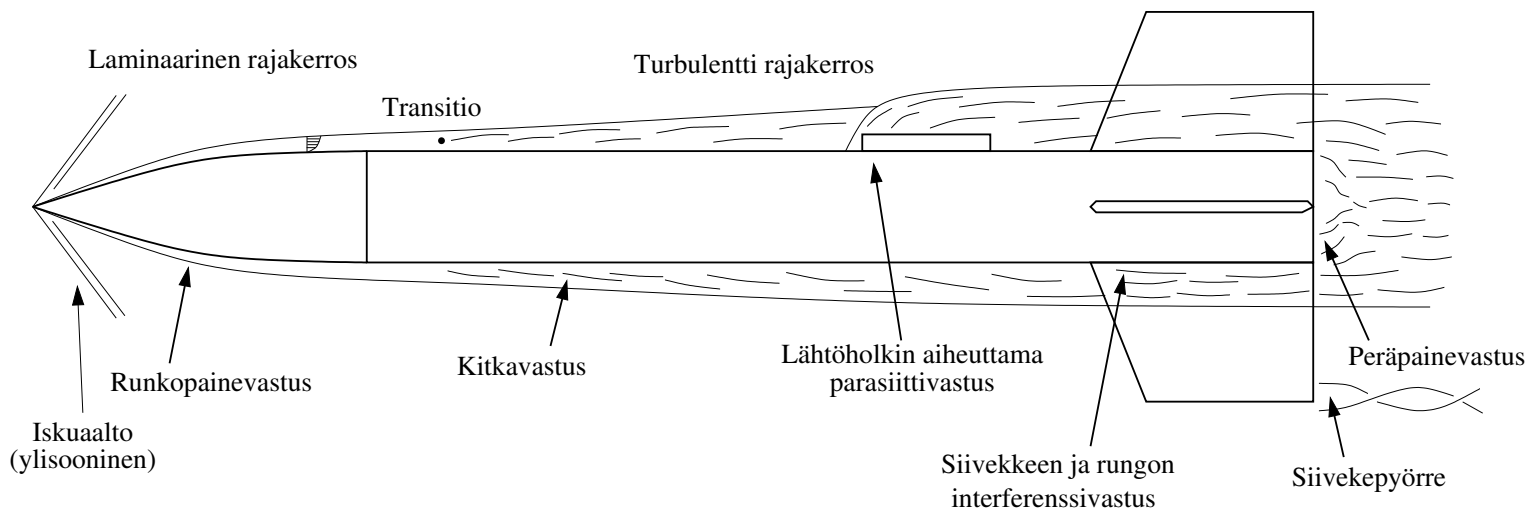
Painevastus voidaan jakaa edelleen runkopainevastukseen, parasiittivastukseen (raketin ulkonemista aiheutuva vastus) sekä peräpainevastukseen. Lisävastusta aiheutuu myös siivekkeiden ja rungon interferenssivai- kutuksesta sekä siivekkeiden tuottamista ilmapyörteistä. Ylisoonisilla nopeuksilla muodostuu lisäksi iskuaaltoja, jotka ovat osa runkopainevastusta.

Ilmanvastuksen eri osat on esitetty kuvassa. Jokaisen osan vaikutus kokonaisvastukseen arvioidaan erikseen ja lasketaan lopuksi yhteen. Käyn tässä artikkelissa läpi lyhyesti osa-alueiden laskennan perustan, yksityiskohdat voi lukea diplomityöstäni.

Kitkavastus

Rungon aiheuttama kitkavastus on yksi merkittävimmistä ilmanvastuksen lähteistä. Aivan raketin kärjessä ilmavirta kulkee kerroksittain rungon myötäisesti. Tätä kutsutaan laminaariseksi virtaukseksi. Jossakin kohtaa tasainen ilmavirta kuitenkin irtoaa pinnasta ja muuttuu turbulenteiksi. Tämä kohta riippuu muun muassa raketin nopeudesta ja pinnan tasaisuudesta.

Laminaarisen virtauksen kitkavastus on selvästi pienempi kuin turbulentin virtauksen. Käytännössä pienoraketeissa voidaan kuitenkin olettaa virtaus täysin turbulenteiksi. Pienikin epätasaisuus pinnassa, kuten irronnut pensselin karva tai kärkikartion ja rungon sauma, irrottaa virtauksen pinnasta. Ainoastaan äärimmäisen tarkkaan viimeistellyssä raketissa voi olla osin laminaarista virtaus ta, ja silloinkin vaikutus lentokorkeuteen on suhteellisen pieni.



Ilmanvastuksen osat. Kuva: Sampo Niskanen.

Hitailla nopeuksilla turbulenttinen rajakerros on sen verran paksu, että raketin pinnan karheus peittyy kerrokseen, eikä täten vaikuta ilmanvastukseen. Nopeuden kasvaessa rajakerros käy kuitenkin ohuemmaksi ja sen myötä kitkavastus pienenee. Raketin pinnan karheus kuitenkin rajoittaa, miten ohueksi rajakerros voi mennä. Suurilla nopeuksilla pinnan karheus asettaa siis rajan sille, miten pieneksi kitkavastus voi mennä, ja alkaa näin hidastaa raketin nopeutta.

Nämä seikat huomioiden pystytään laskemaan kitkavastuserroin yksikköpinta-alaa kohti. Tähän lisätään korjaustermi ilman kokoonpuristuvuuden vuoksi. Kun lopputulos kerrotaan raketin ulkopinta-alalla, saadaan raketin kitkavastus. Tyypillisissä raketeissa tämä muodostaa noin puolet raketin kokonaisvastuksesta.

Runkopainevastus

Runkopainevastuksen laskemiseksi ei löytynyt erityisen yleispäteviä menetelmiä. Päädyin sen sijaan käyttämään erilaisia puoliempiirisiä menetelmiä. Esimerkiksi alisoonisilla nopeuksilla kärkikartion painevastus pienenee hyvin merkittävästi jos reuna kärkikartion ja runkoputken välillä on suhteellisen sileä. Näin ollen alisoonisilla nopeuksilla valitsemani menetelmä ei huomioi kärkikartion muotoa lainkaan, ainoastaan sen ja runkoputken muodostaman kulman suuruuden.

Transsoonisilla ja ylisoonisilla nopeuksilla kärkikartioihin sovelletaan muodosta riippuen eri menetelmiä. Osaan muodoista löytyy kirjallisuudesta valmiit semiempiiriset kaavat, toisiin taas sovelsin kokeellisia mittaustuloksia sopivin laajennuksin. Levennyksiin ei löytynyt tämänkään vertaa kirjallisuustietoa, joten käytin näissä kärkikartion laskentamenetelmiä soveltuvien osin.

Siivekkeiden painevastukseen sovelletaan reunan muodon mukaan joko sylinterin tai tylpän reunan painevastuksen kaavoja, jotka löytyvät kirjallisuudesta. Painevastus korjataan lopuksi siivekkeen kaltevuuden mukaan: jyrkästi taaksepäin kallistuneella siivekkeellä on pienempi painevastus kuin kohtisuoralla siivekkeellä.

Jos siivekkeen reunat on pyöristetty, on painevastus yleensä 10–20 % luokkaa alisoonisilla nopeuksilla, mutta voi kasvaa jopa puoleen kokonaisvastuksesta transsoonisella alueella. Täysin kantikkaat reunat siivekkeissä voi tuottaa huomattavan määrän lisävastusta.

Peräpainevastus

Raketin lentäessä sen perään jää ”tyhjiöalue”, joka aiheuttaa peräpainevastusta. Tämän arvioimiseksi on olemassa yksinkertainen kaava, joka riippuu ainoastaan raketin nopeudesta ja perän pinta-alasta. Silloin kun raketimoottori on käynnissä, moottorin pinta-ala vähennetään perän pinta-alasta, koska tälle osalle ei peräpainevastus vaikuta.

Todellisuudessa peräpainevastusta pystyy pienentämään tekemällä raketin peräosan rungosta kaventuva. Tämä ohjaa ilmaa kohti perän pienemmän paineen aluetta, jolloin peräpainevastus pienenee suhteessa tasapaksuuteen runkoon jolla on sama perän pinta-ala. Tätä vaikutusta ei menetelmissä kuitenkaan ole toistaiseksi otettu huomioon.

Peräpainevastuksen osuus kokonaisvastuksesta on tyypillisesti noin 20–30 %.

Parasiittivastus

Raketeissa olennaisin parasiittivastuksen lähde on lähtöholkit. Jos holkin pituus on suuri halkaisijaan nähden, ei holkin läpi virtaa ilmaa käytännössä lainkaan, ja se on käytännössä umpinainen putki. Toinen ääripää on metallirinkula, jonka pituus on lähes olematon ja sen läpi virtaa ilmaa koko sisäpinta-alastaan. Näiden kahden ääripään väliltä arvioidaan holkille efektiivinen poikkipinta-ala. Tälle pinta-alalle puolestaan lasketaan painevastus kuin se olisi kohtisuorassa ilmavirrassa. Parasiittivastus on yleensä suhteellisen pieni, 5–10 % luokkaa kokonaisvastuksesta.

Kohtauskulman vaikutus

Yllä olevassa tarkastelussa on oletettu, että ilmavirta on samansuuntainen raketin rungossa. Jos raketin lentoon on tullut poikkeama, niin sen lentosuunta ei välttämättä ole suoraan rungossa suuntaan. Tällöin raketin sanotaan lentävän määrättyllä kohtauskulmalla, mikä vaikuttaa raketin ilmanvastukseen.

Ilmanvastus yleisesti ottaen määritellään nopeuden kanssa yhdensuuntaiseksi aerodynaamiseksi hidastavaksi voimaksi. Toinen laskettava voima on raketin asentoa säätelevä normaalivoima, joka on kohtisuorassa raketin runkoon nähden. Jos raketin kohtauskulma ilmavirtaan nähden ei kuitenkaan ole nolla, nämä kaksi voimaa eivät ole kohtisuorassa eivätkä ne ole toisistaan riippumattomia. Tämän vuoksi ”tavallisen” ilmanvastuksen sijaan halutaankin laskea aksiaalivastus, joka on ilmanvastuksen rungonsuuntainen komponentti.

Kun raketti lentää kohtauskulmalla, ilmanvastus kasvaa, koska suurempi osa rungosta kohtaa ilmavirran ja siivekkeet eivät ole yhdensuuntaiset ilmavirran kanssa. Osa tästä kasvaneesta vastuksesta on kuitenkin normaali-voimaa, joka korjaa raketin lentosuuntaa, eikä aksiaalivoimaa kasva näin paljoa. Itse asiassa pienet, parin asteen kohtauskulmat eivät vaikuta aksiaalivoimaan juuri lainkaan, vaikka kokonaisvastus saattaakin kasvaa hieman.

Koska valtaosa raketin lennosta tapahtuu hyvin pienellä kohtauskulmalla, on riittävää arvioida karkeasti kohtauskulman vaikutus aksiaalivoimaan. Epävakaata ja heilah-televaa rakettia simuloimassa ilmanvastuksen merkitys on joka tapauksessa pienempi lennon kokonaisuuden kannalta.

Kokeellisten tulosten perusteella muodostin empiirisen kaavan arvoidakseni kohtauskulman vaikutusta aksiaalivastukseen. Kohtauskulmalla nolla aksiaalivoiman kerron on yksi, 17° kulmassa kerroin kasvaa 1,3:een, ja 90° kulmassa kerroin on nolla, koska tällöin ilmanvastus ei vaikuta raketin rungossa suuntaisesti lainkaan. Näiden välistä arvot interpoloidaan kahdella sileällä polynomilla. Käytännössä valtaosa raketeista lentää koko ajan alle 10° kohtauskulmassa.

Entä sitten?

Kun yhdistetään edellisessä artikkelissa kuvattu normaalivoiman laskenta, aerodynaaminen aksiaalivoima, gravitaatio sekä moottoreiden tuottama työntövoima, saadaan kaikki rakettiin lennon aikana vaikuttavat voimat.

Tunnettaessa raketin massa ja hitausmomentit saadaan määritettyä raketin kiihtyvyyden ja kulmakiihtyvyydet. Näitä integroimalla pienin aika-askelin saadaan määritettyä raketin koko lentorata. Tästä lisää sarjan seuraavassa osassa.

Tekemieni koelentojen perusteella simuloitu lentokorkeus on varsin lähellä todellista, usein 5–10 % päässä mitatusta lentokorkeudesta. Tämä on yhtä hyvä tarkkuus kuin kaupallisella RockSim-ohjelmistolla. Diplomityötäni tehdessäni minulla ei ollut vertailutuloksia ylisoonisista raketeista, ja verrattaessa simuloituja arvoja tuulitunnelimittauksiin alkavat useat parametrit erota huomattavasti ylisoonisella alueella. Sittemmin olen kuitenkin kuullut nettifoorumilla raportteja siitä, että OpenRocketin simulaatiot ovat olleet varsin lähellä todellisuutta myös ylisoonisilla raketeilla. Yhdysvaltalainen Portland State Aerospace Society on jopa vertaillut simulaatiotuloksia suotuisasti Astrobee D -luotainraketin lentoihin, joka on lentänyt yli nelinkertaisella äänennopeudella [2].

Yksityiskohdat ilmanvastuksen laskennan kaavoista ovat luettavissa diplomityöstäni, jonka saa ladattua OpenRocketin kotisivulta. Lopuksi on hyvä mainita, että ilmanvastuksen laskemiseen käytetyt menetelmät ovat diplomityöni "käsiäheiluttelevin osa", eivätkä ne ole joka osalta parasta tieteellistä tasoa. Jos jollakulla on

parempaa tietoa ilmanvastuksen laskennasta, otan mielelläni parannusehdotuksia vastaan! □

Artikkelisarjan aiemmissa osissa kerroin OpenRocket-ohjelmiston kehitysvaiheista ja raketin vakauden laskeamiseen käytetyistä menetelmistä. Myöhemmissä osissa on luvassa tietoa kuuden vapausasteen simuloinnista, moniulotteisesta optimoinnista, ohjelmiston käytöstä Haisunäätä-projekteissa sekä tulevaisuuden suunnitelmista.

OpenRocket-ohjelmiston sekä diplomityön saa ladata osoitteesta <http://openrocket.sourceforge.net/> Artikkelisarjan aiemmat osat ovat luettavissa SATS:n sivuilta osoitteesta <http://www.sats-saff.fi/>

Viitteet:

[1] Barrowman, The theoretical prediction of the center of pressure, NARAM-8, 1996. http://www.apogeerockets.com/Education/downloads/barrowman_report.pdf

[2] Portland State Aerospace Society, Astrobee D, verkkodokumentti, 10.4.2012. http://psas.pdx.edu/RocketScience/astrobee_d/ □

Tulevia tapahtumia

Suomi avaruudessa 10.5.2012

SATS järjestää Suomi avaruudessa -tapahtuman yhteistyössä Aalto-yliopiston kanssa torstaina 10. toukokuuta Otaniemessä, Espoossa. Tapahtumassa pidetään esitelmää, joissa kerrotaan Suomen avaruustoiminnasta ja esitellään SATS:n ja Aalto-yliopiston aktiviteetteja. Samassa yhteydessä järjestetään Aalto-1-satelliittiprojektin kevätseminaari, jossa kuulee viimeisimmät tiedot Suomen ensimmäisestä satelliittiprojektista. Tarkemmat tiedot aikataulusta ja esitelmistä näet osoitteessa www.sats-saff.fi.

Rakettikurssi 14.-15.5.2012

SATS järjestää pienoisorakettikurssin toukokuun 14.–15. päivä. Pienoraketit ovat pieniä, kertakäyttöisillä ruutimoottoreilla lentäviä raketteja. Raketit voi rakentaa joko valmissarjoista tai alusta pitäen itse. Kurssin suoritettuaan osallistujat saavat rakettikortin, joka oikeuttaa ostamaan pienoisorakettimoottoreita ja ampumaan raketteja ympärivuotisesti. SATS järjestää yhteislennätyksiä Ämmässuon lähellä noin kerran kuukaudessa, kesäaikaan tiheämmin.

Kurssin ensimmäisenä päivänä pidetään pakolliset teorialuennot ja pienimuotoinen koe. Toinen päivä on vapaaehtoinen, jolloin rakennellaan yhdessä omia raketteja. Lisäksi kurssin suorittamiseen kuuluu oman raketin laukaiseminen, jonka aikataulusta sovitaan erikseen. Kurssi pidetään ma–ti 14.–15.5. klo 18–21 Espoon Otaniemessä (tarkempi paikka tiedotetaan osallistujille). Kurssin hinta on 20 €. Ilmoittautumiset rakettivastaava Markku Luistolle 10.5. mennessä (mluisto@pp.htv.fi tai 0400-885330). Kurssi on mahdollista suorittaa myös etänä, kysy asiasta lisää rakettivastaavalta.

Odysseus-avaruusprojektikilpailu

Euroopan unionin **Odysseus-avaruusprojektikilpailu** 14–18-vuotiaille. Kilpailuun osallistutaan opettajan ohjaamina 2–5 hengen joukkueina suunnitteleamalla oma avaruustutkimushanke. Joukkueiden rekisteröityminen alkaa 1.5. Lisätietoja: <http://www.odysseus-contest.eu/>

Muita tapahtumia

ModelExpo on 27.-29.4. Helsingin Messukeskuksessa, jossa SATS jälleen esittäytyy.

Rakettilennätyksiä järjestetään kesäaikaan tavallista tiheämmin, jotta mahdollisimman moni pääsee osallistumaan niihin. Lennätyksiä pidetään 27.5., 17.6., 1.7., 15.7. ja 12.8. klo 13 alkaen Kulmakorvessa. Seuraa tiedotuksia raketti-foorumilla.

Rakettitapaamisia pidetään 8.5., 5.6. ja 7.8. klo 19 alkaen SATS:n kerhotilalla.