

(19)



SUOMI - FINLAND

(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS

PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN

FINNISH PATENT AND REGISTRATION OFFICE

(10) **FI 982302 A7**

(12) **JULKISEKSI TULLUT PATENTTIHAKEMUS
PATENTANSÖKAN SOM BLIVIT OFFENTLIG
PATENT APPLICATION MADE AVAILABLE TO THE
PUBLIC**

(21) Patentihakemus - Patentansökan - Patent application 982302

(51) Kansainvälinen patenttiluokitus - Internationell patentklassifikation -
International patent classification
B63B 1/34

(22) Tekemispäivä - Ingivningsdag - Filing date 23.10.1998

(23) Saapumispäivä - Ankomstdag - Reception date 23.10.1998

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig - Available to the public 25.04.1999

(43) Julkaisupäivä - Publiceringsdag - Publication date 13.06.2019

(32) (33) (31) Etuoikeus - Prioritet - Priority

24.10.1997 JP 9-292999

(71) Hakija - Sökande - Applicant

1 •Ishikawajima-Harima Heavy Industries, 2-1, Otemachi 2-chome Chiyoda-ku, Tokyo, Japan, JAPANI, (JP)

2 •Kato, Hiroharu, 5-31-9, Koganehara, Matsudo, Chiba, Japan, JAPANI, (JP)

(72) Keksijä - Uppfinnare - Inventor

1 •Takahashi, Yoshiaki, Japan, JAPANI, (JP)

2 •Yoshida, Yuki, Kanagawa-ken, JAPANI, (JP)

3 •Kato, Hiroharu, Japan, JAPANI, (JP)

(74) Asiamies - Ombud - Agent

Kolster Oy Ab, Salmisaarenaukio 1, 00180 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning - Title of the invention

**Laivan ilmakuplapäällistysten simulaatiomenetelmä ja -laite sekä simulaatio-ohjelman sisältävä tietokonemuistiväline
Simuleringsförfarande och -anordning för dubbelbetäckning av ett fartyg och datamaskinminnemedel innehållande
simuleringsprogram**

Laivan ilmakuplapäällälystyksen simulaatiomenetelmä ja -laite sekä simulaatio-ohjelman sisältävä tietokonemuistiväline

Keksinnön tausta

Keksinnön ala

- 5 Esillä oleva keksintö liittyy menetelmään ja laitteeseen, joilla simuloitaan numeerisesti ilmakuplapäällälystyksellä saavutettavaa laivan pintakitkavastuksen vähennystä, sekä tietokonemuistivälineeseen, johon on tallennettu simulaatio-ohjelma, ja erityisesti kitkavastuksen vähentämiseen, joka tapahtuu suihkuttamalla mikroilmakuplia rajakerrokseen laivan vedenalaisten pintojen
10 päällälysteeksi.

Keksinnön alan kuvaus

- Pintakitkan vähentämiseen liittyviä tekniikoita kuvaillaan JP-patenttijulkaisuissa S50-83992, S53-136289, S60-139586, S61-71290 sekä S61-39691 ja S61-128185. Näissä julkaisuissa kuvatut kitkavastukseltaan pienet laivat perustuvat ilman tai vastaavan kaasun suihkuttamiseen liikkuvasta laivasta veteen mikroilmakuplien (jäljempänä kuplien) muodostamiseksi laivan ja veden väliseen rajakerrokseen ja pintakitkavastuksen pienentämiseksi päällälystämällä vedenalaiset pinnat tällä tavoin kuplilla.

- Eräs hyvin tunnettu simulaatiotekniikka on laskennallinen nestedynamiikka (CFD). Menetelmän perustana ovat kolmiulotteiset Navier-Stokes-yhtälöt, jotka kuvaavat viskoosisia virtauskenttiä suoraan tai likiarvoisesti numeerisen analyysin keinoin. Laivan pinnan yli kulkevia pyörrevirtoja mallinnetaan numeerisesti (pyörremallinnus) jakamalla virtauskentät pyörrevirtarajakerros mukaan lukien useaksi kohtisuoraksi kolmiulotteiseksi koordinaatistoksi
25 (soluksi) siten, että Navier-Stokes-yhtälöt voidaan ratkaista yksittäisille soluille pyörrevirtausenergian ja energiahävikkitekijän (kitkalämmöstä johtuvan energiahäviön osuus) laskemiseksi kullekin solulle. Tällaiset laivan runkoa ympäröivän pyörrevirtauskentän numeeriset simulaatiotarkastelut mahdollistavat kitkavastukseltaan pienen laivan suunnittelun vähimmällä mahdollisella määrällä
30 kokeiluja.

- Olemassa olevat simulaatiomenetelmät on kuitenkin suunniteltu käsittelemään laivan runkoa ympäröiviä kvalitatiivisia virtauskuvioita, eivätkä ne siten kykene käsittelemään kvantitatiivisia tietoja laivan ja veden välisessä rajakerroksessa olevien kuplien jakautumisesta eli siitä, kuinka kuplat todellisuudessa peittävät laivan runkoa. Tästä syystä on ollut vaikeaa arvioida teoreetti-

sesti erilaisten tekniikoiden pintakitkavastuksen vähentämistehoa, jolloin käytännön kokeet ovat jääneet ainoaksi vaihtoehdoksi. Tällaiset kitkavastuksen kokeelliset tutkimukset vaativat valtavasti aikaa ja vaivaa. Erityisesti mahdollonta on ollut laskea teoreettisesti kuplien vaikutus kitkavastuksen vähenemiseen ja esittää teoreettinen arvio kitkavastukseltaan pienen laivan liikuttamiseen tarvittavasta hevosvoimamäärästä.

Keksinnön yhteenveto

Esillä oleva keksintö on ratkaisumalli moniin edellä mainittuihin ongelmiin seuraavassa kuvailtujen tavoitteiden mukaisesti:

10 a. Menetelmä ja laite laivan päällystävien kuplien simuloimiseksi laskemalla sovellusohjelman avulla jakautumistietoja kuplille, jotka tuotetaan suihkuttamalla kaasua liikkuvasta laivasta, sekä simulaatio-ohjelman sisältävä tietokonemuistiväline.

15 b. Menetelmä ja laite laivan päällystävien kuplien simuloimiseksi siten, että voidaan arvioida pintakitkavastuksen vähentämistekniikoita teoreettisesti sovellusohjelman avulla, sekä simulaatio-ohjelman sisältävä tietokonemuistiväline.

20 c. Menetelmä ja laite laivan päällystävien kuplien simuloimiseksi siten, että pintakitkavastuksen vähentämistekniikoita voidaan arvioida teoreettisesti pienin kustannuksin sovellusohjelman avulla, sekä simulaatio-ohjelman sisältävä tietokonemuistiväline.

d. Menetelmä ja laite laivan päällystävien kuplien simuloimiseksi minkämuotoisille laivanrungoille tahansa sovellusohjelman avulla, sekä simulaatio-ohjelman sisältävä tietokonemuistiväline.

25 Simulaatiomenetelmä koostuu näin ollen seuraavista vaiheista:

a. virtauskentän, mukaan lukien laivan vedenalaisen rungonosan ympärille muodostuva pyörrevirtarajakkerros, jakaminen kolmiulotteisiin kohtisuoriin koordinaatistoihin solujen muodostamiseksi ja kunkin solun pyörrevirtaenergian, energiahäviötekijän ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden laskeminen;

30 b. kuplan suihkuttaminen pyörrevirtausrajakerrokseen tietyllä lähtönopeudella tietyistä suihkusuuttimista tietyinä ajanhetkenä;

c. kuplien vektorinopeuksien laskeminen kullekin solulle pyörrevirtaenergian, energiahäviötekijän, nesteen keskimääräisen virtausnopeuden ja satunnaislukujen avulla;

35

d. kuplan sijainnin laskeminen seuraavassa aikayksikössä ratkaisemalla liikeyhtälöt kuplien vektorinopeuksien ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden mukaan;

5 e. tyhjän ilman osuuden laskeminen kullekin solulle kuplan seuraavan aikayksikön sijainnin mukaan;

f. vaiheiden c - e toistaminen tietyn monta kertaa kasvattaen aikaparametria aikayksiköllä, kunnes tietty kokonaisaika on täynnä;

10 g. kaikkien solujen tyhjän ilman osuuden laskeminen kuplien kokonaisjakauman esittämiseksi kokonaisajassa ja laskennan lopettaminen, kun kuplien jakauma näyttää konvergoituvan.

Simulaatiomenetelmän laite käsittää laitteet seuraavien analyysivaiheiden toteutukseen:

15 a. virtauskentän, mukaan lukien laivan vedenalaisen rungonosan ympärille muodostuva pyörrevirtarajakerros, jakaminen kolmiulotteisiin kohtisuoriin koordinaatistoihin solujen muodostamiseksi ja kunkin solun pyörrevirta-energian, energiahäviötekijän ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden laskeminen;

20 b. kuplan suihkuttaminen pyörrevirtausrajakerrokseen tietyllä lähtönopeudella tietyistä suihkusuuttimista tietyssä ajanhetkenä;

c. kuplien vektorinopeuksien laskeminen kullekin solulle pyörrevirta-energian, energiahäviötekijän, nesteen keskimääräisen virtausnopeuden ja satunnaislukujen avulla;

25 d. kuplan sijainnin laskeminen seuraavassa aikayksikössä ratkaisemalla liikeyhtälöt kuplien vektorinopeuksien ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden mukaan;

e. tyhjän ilman osuuden laskeminen kullekin solulle kuplan seuraavan aikayksikön sijainnin mukaan;

30 f. vaiheiden c - e toistaminen tietyn monta kertaa kasvattaen aikaparametria aikayksiköllä, kunnes tietty kokonaisaika on täynnä;

g. kaikkien solujen tyhjän ilman osuuden laskeminen kuplien kokonaisjakauman esittämiseksi kokonaisajassa ja laskennan lopettaminen, kun kuplien jakauma näyttää konvergoituvan.

Muistiväline sisältää sovellusohjelman seuraavien vaiheiden toteuttamiseksi:

35 a. virtauskentän, mukaan lukien laivan vedenalaisen rungonosan ympärille muodostuva pyörrevirtarajakerros, jakaminen kolmiulotteisiin kohti-

suoriin koordinaatistoihin solujen muodostamiseksi ja kunkin solun pyörrevirtaenergian, energiahäviötekijän ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden laskeminen;

5 b. kuplan suihkuttaminen pyörrevirtausraja-kerrokseen tietyllä lähtönopeudella tietyistä suihkusuuttimista tietyinä ajanhetkenä;

c. kuplien vektorinopeuksien laskeminen kullekin solulle pyörrevirtaenergian, energiahäviötekijän, nesteen keskimääräisen virtausnopeuden ja satunnaislukujen avulla;

10 d. kuplan sijainnin laskeminen seuraavassa aikayksikössä ratkaisemalla liikeyhtälöt kuplien vektorinopeuksien ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden mukaan;

e. tyhjän ilman osuuden laskeminen kullekin solulle kuplan seuraavan aikayksikön sijainnin mukaan;

15 f. vaiheiden c - e toistaminen tietyn monta kertaa kasvattaen aika-parametria aikayksiköllä, kunnes tietty kokonaisaika on täynnä;

g. kaikkien solujen tyhjän ilman osuuden laskeminen kuplien kokonaisjakauman esittämiseksi kokonaisajassa ja laskennan lopettaminen, kun kuplien jakauma näyttää konvergoituvan.

20 Edellä tiivistetysti kuvaillut lähestymistavat mahdollistavat laivaa päällystävien kuplien simuloinnin kvantitatiivisilla tiedoilla, mikä on ollut mahdotonta aikaisemmillä menetelmillä. Nyt on siis mahdollista arvioida teoreettisesti erilaisia pintakitkavastuksen vähentämistekniikoita, minkä ansiosta kitkavastukseltaan pieniä aluksia voidaan suunnitella tehokkaasti ja pienin kustannuksin. κ - ε -mallin käyttöönotto (κ = pyörrevirtaenergia, ε = energiahäviötekijä)

25 mahdollistaa rungon vedenalaisten pintojen virtauksien simuloimisen CFD-tietojen avulla.

Kuvioiden lyhyt kuvaus

30 Kuviossa 1 näytetään perusteoriassa käytettävä koordinaatisto.
 Kuviossa 2 näytetään laskennassa käytettävä kuplajakauman kuva.
 Kuviossa 3 näytetään menetelmän vuokaavio.
 Kuviossa 4 näytetään kaavio tyhjän tilan osuuksien jakaumien konvergenssitilasta pienen toistomäärän jälkeen.
 Kuviossa 5 näytetään kaavio konvergoituneesta tyhjän tilan osuuden jakaumasta.

Kuviossa 6 näytetään $500\text{ }\mu\text{m}$:n läpimittaisten kuplien ensimmäinen jakaumakaavio, jossa näkyvät laskennalliset tulokset tyhjän tilan osuuden jakautumisesta laivan ympäröivässä pituussuunnan eri kohdissa.

Kuviossa 7 näytetään $500\text{ }\mu\text{m}$:n läpimittaisten kuplien toinen jakaumakaavio, jossa näkyvät laskennalliset tulokset tyhjän tilan osuuden jakautumisesta laivan ympäröivässä pituussuunnan eri kohdissa.

Kuviossa 8 näytetään $500\text{ }\mu\text{m}$:n läpimittaisten kuplien kolmas jakaumakaavio, jossa näkyvät laskennalliset tulokset tyhjän tilan osuuden jakautumisesta laivan ympäröivässä pituussuunnan eri kohdissa.

Kuviossa 9 näytetään $500\text{ }\mu\text{m}$:n läpimittaisten kuplien neljäs jakaumakaavio, jossa näkyvät laskennalliset tulokset tyhjän tilan osuuden jakautumisesta laivan ympäröivässä pituussuunnan eri kohdissa.

Kuviossa 10 näytetään laivan kuplilla päällystämisen laskennalliset tulokset.

Kuviossa 11 näytetään $1\,000\text{ }\mu\text{m}$:n läpimittaisten kuplien ensimmäinen jakaumakaavio, jossa näkyvät laskennalliset tulokset tyhjän tilan osuuden jakautumisesta laivan ympäröivässä pituussuunnan eri kohdissa.

Kuviossa 12 näytetään $1\,000\text{ }\mu\text{m}$:n läpimittaisten kuplien toinen jakaumakaavio, jossa näkyvät laskennalliset tulokset tyhjän tilan osuuden jakautumisesta laivan ympäröivässä pituussuunnan eri kohdissa.

Kuviossa 13 näytetään $1\,000\text{ }\mu\text{m}$:n läpimittaisten kuplien kolmas jakaumakaavio, jossa näkyvät laskennalliset tulokset tyhjän tilan osuuden jakautumisesta laivan ympäröivässä pituussuunnan eri kohdissa.

Kuviossa 14 näytetään $1\,000\text{ }\mu\text{m}$:n läpimittaisten kuplien neljäs jakaumakaavio, jossa näkyvät laskennalliset tulokset tyhjän tilan osuuden jakautumisesta laivan ympäröivässä pituussuunnan eri kohdissa.

Edullisten suoritusmuotojen kuvaus

Ensiksi käsitellään esillä olevan keksinnön simulaatiomenetelmän perusteoria.

Menetelmä perustuu virtaustietojen κ - ε -malliin pohjautuvaan CFD-analyysiin tietyssä laivan runkopintaan synnyttävässä solussa; κ on tässä pyörrevirtaenergia ja ε energiahäviötekijä. Johdettuja κ :n ja ε :n arvoja sovelletaan jäljempänä annettaviin kuplien kineettisiin liikeyhtälöihin vedenalaisia pintoja ympäröivien yksittäisten solujen kuplamäärien laskemiseksi, jolloin saadaan runkopintojen kokonaiskuplajakaumat.

1. Monte Carlo -menetelmien soveltamisen syyt

Esillä olevassa keksinnössä käytetään Monte Carlo -tyyppistä menetelmää, joka pohjautuu satunnaislukuja hyödyntävään suoraan simulaatiomenetelmään, ratkaisuna kineettisten kuplien hajontayhtälöön virtauskentissä pyörrerajakerros mukaan lukien. Ensiksi selitetään, miksi Monte Carlo -menetelmiä käytetään dispersioyhtälöiden ratkaisemisessa.

Oletetaan, että kuplat liikkuvat solusta toiseen satunnaisesti aikayksikössä. Kupla pisteessä (i, j, k) tietyllä ajanhetkellä liikkuu johonkin seuraavista kuudesta pisteestä aikayksikön kuluttua.

- 10 piste 1 $(i-1, j, k)$
- piste 2 $(i+1, j, k)$
- piste 3 $(i, j-1, k)$
- piste 4 $(i, j+1, k)$
- piste 5 $(i, j, k-1)$
- 15 piste 6 $(i, j, k+1)$

Jos oletetaan, että kupla siirtyy toiseen soluun aikayksikössä riippumatta aiemmasta kulkureitistä, voidaan todennäköisyys sille, että origosta $(i=0, j=0, k=0)$ lähtevä kupla saapuu pisteeseen (i, j, k) n :nnen aikayksikön kuluttua, määrittää pitoisuusarvoksi tietyllä ajanhetkellä n . Tämän pitoisuuden merkintätapa on $P^n_{i,j,k}$. Jotta kupla saavuttaisi pisteen (i, j, k) ajassa $n+1$ aikayksikköä, sen on oltava jossakin mainituista kuudesta pisteestä ajanhetkellä n aikayksikköä.

Kuplan jostakin edellisestä pisteestä pisteeseen (i, j, k) siirtymisen todennäköisyys on $1/6$, mistä voidaan johtaa seuraava toistokaava:

$$25 \quad P^{n+1}_{i,j,k} = (P^n_{i,j,k+1} + P^n_{i,j,k-1} + P^n_{i,j+1,k} + P^n_{i,j-1,k} + P^n_{i+1,j,k} + P^n_{i-1,j,k})/6 \quad (1)$$

Yhtälön (1) ja pitoisuuden $P^n_{i,j,k}$ yhtä aikayksikköä aikaisemmin välinen ero muodostaa yhtälön (2):

$$30 \quad \begin{aligned} &P^{n+1}_{i,j,k} - P^n_{i,j,k} \\ &= \{ (P^n_{i,j,k+1} - P^n_{i,j,k}) + (P^n_{i,j,k-1} - P^n_{i,j,k}) \} / 6 \\ &+ \{ (P^n_{i,j+1,k} - P^n_{i,j,k}) + (P^n_{i,j-1,k} - P^n_{i,j,k}) \} / 6 \\ 35 \quad &+ \{ (P^n_{i+1,j,k} - P^n_{i,j,k}) + (P^n_{i-1,j,k} - P^n_{i,j,k}) \} / 6 \end{aligned} \quad (2)$$

Jos kuplan nopeus on nolla, dispersioyhtälöä isotrooppisessa pyörrevirtauksessa voidaan käsitellä yhtälönä (3) kuplapitoisuusmuuttujan P ja dispersiokertoimen D suhteen:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Kun yhtälö (3) kirjoitetaan uudelleen pitoisuuden $P_{i,j,k}^n$ ajanhetkellä n ja pitoisuuden $P_{i,j,k}^{n+1}$ ajanhetkellä $n+1$ differenssiyhtälönä, saadaan yhtälö (4):

$$\begin{aligned} & \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} \\ &= \frac{D}{\Delta x} \left\{ \left(\frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x} \right) - \left(\frac{P_{i,j,k}^n - P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x} \right) \right\} \\ &+ \frac{D}{\Delta y} \left\{ \left(\frac{P_{i,j+1,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta y} \right) - \left(\frac{P_{i,j,k}^n - P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y} \right) \right\} \\ &+ \frac{D}{\Delta z} \left\{ \left(\frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{i,j,k}^n - P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

Jos pyörrevirtaus on tässä isotrooppinen, saadaan dispersiokertoimen määritelmästä yhtälö (5):

$$\begin{aligned} D &\equiv \langle u \cdot l \rangle \\ &= \Delta x \cdot \Delta x / 6 \Delta t \\ &= \Delta y \cdot \Delta y / 6 \Delta t \\ &= \Delta z \cdot \Delta z / 6 \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

missä kulmasulkeet $\langle \rangle$ ja $\cdot$ merkitsevät kaikkien dispersioprosessiin osallistuvien kuplien kokonaiskeskiarvoa, " u " on hajonta kuplien keskimääräisestä nopeudesta ja " l " on siirtymien hajonta.

Kun yhtälö (5) sijoitetaan yhtälöön (4), saadaan yhtälö (6). Yhtälö (6) vastaa kuplien satunnaisliikkeitä kuvaavaa yhtälöä (2). Näin ollen on mahdollista ratkaista dispersioyhtälöt isotrooppisessa pyörrevirtauksessa käyttäen Monte Carlo -menetelmiä, jotka simuloivat suoraan kuplien liikkeitä satunnaislukujen avulla.

$$\begin{aligned}
& P^{n+1}_{i,j,k} - P^n_{i,j,k} \\
&= \frac{1}{6} \{ (P^n_{i+1,j,k} - P^n_{i,j,k}) - (P^n_{i,j,k} - P^n_{i-1,j,k}) \} \\
&+ \frac{1}{6} \{ (P^n_{i,j+1,k} - P^n_{i,j,k}) - (P^n_{i,j,k} - P^n_{i,j-1,k}) \} \\
&+ \frac{1}{6} \{ (P^n_{i,j,k+1} - P^n_{i,j,k}) - (P^n_{i,j,k} - P^n_{i,j,k-1}) \} \quad (6)
\end{aligned}$$

2. Kuplien liike solun sisällä ja tyhjän tilan osuus

Tässä osiossa käsitellään CFD-tietojen käyttöä virtauskenttien laskennassa ilmaisemalla pyörrevirtauksia κ - ϵ -llä. Pyörrevirtatietojen oletetaan olevan solun sisällä yhdenmukaisia ja isotrooppisia, ja laivaa ympäröivän raja-kerroksen kokonaisvirtausta voidaan kuvata yksittäisten solujen virtojen kokonaisjakaumalla. Esillä olevassa tutkimuksessa kuplien liikettä ilmaistaan seuraavilla liikeyhtälöillä, kun pyörrevirrat ovat solun sisällä yhdenmukaisia ja isotrooppisia.

Kuviossa 1 näytetään peruskoordinaatisto kuplien liikeyhtälöiden kuvaajille. XYZ-O-järjestelmä on kiinteä koordinaattiavaruus ja Z-akseli on kohtisuora pystysuunta. Nopeusparametrit u_x , u_y ja u_z ovat keskimääräisiä nesteen (tässä tapauksessa laivaa ympäröivän veden) virtausnopeuksia X-, Y- ja Z-suunnissa. Tätä koordinaatistoa käytetään seuraavassa selventämään: (1) liikeyhtälöitä kuplien ollessa etäällä laivan rungosta; (2) liikeyhtälöitä kuplien ollessa laivan rungon pinnassa; (3) pyörredispersion vaikutuksia; ja (4) tyhjän tilan osuuden määritelmää.

(1) Liikeyhtälöt kuplien ollessa etäällä laivan rungosta

Kuplien virtaustietojen oletetaan olevan solun sisällä yhdenmukaisia ja isotrooppisia, mutta naapurisoluissa otetaan huomioon nopeusgradientin ja painegradientin vaikutus kuplan liikkeeseen. Menetelmää näiden seikkojen huomioon ottamiseksi kuvaillaan lähdejulkaisussa "Micro-bubble formulation and splitting in a turbulent boundary layer for Turbulence Reduction. A Symposium in Honor of Maurice Holt on His 70th Birthday, Williamsburg, Va.", 1989, s. 168 - 217, Meng, J. C. S ja Uhlman, J. S. Jr.

Tässä menetelmässä nopeusgradientin vaikutusta approksimoidaan nostovoimalla L , joka vaikuttaa kiinteään palloon (Saffmanin noste); tässä tutkimuksessa kiinteän pallon tilalla on kupla. Yhtälö (7) antaa nostovoiman L nesteen tiheyden ρ (kg/m^3), nesteen virtausnopeuden U (m/s), kuplan sä-

teen R (m) ja kineettisen viskoosiuskertoimen ν (m^2/s) suhteen. Saffmanin nosteesta on lisätietoja Saffmanin julkaisussa "The lift on a small sphere in a slow shear flow, JFM, vol. 22".

5

$$L = 6.46 \rho \cdot U \cdot R^2 \left(\nu \frac{\partial U}{\partial n} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Painegradientin vaikutusta approksimoidaan yhtälöllä (8), jossa F_i on painegradientin i -suuntaan kohdistama voima; V on yksittäisen kuplan tilavuus (m^3); Pr on paineen ajallinen keskiarvo; ja x_i on siirtymä i -suunnassa.

10

$$F_i = -V \frac{\partial Pr}{\partial x_i} \quad (8)$$

15

Näin ollen kuplien solunsisäiset liikeyhtälöt koordinaatistossa ilmaistaan X -, Y - ja Z -suunnissa yhtälöillä (9) - (11), joissa u_x , u_y ja u_z ovat veden keskinopeuksia (m/s) X -, Y - ja Z -suunnissa, u'_x , u'_y ja u'_z ovat kuplien vektori-
virtauksien keskimääräisiä nopeuksia, m on kuplan massa (kg), m_A on lisä-
massa (kg), μ on staattinen viskoosiuskerroin (m^2/s) ja g on maan vetovoiman
kiihtyvyys (m/s^2).

20

$$\begin{aligned} (m + m_A) \ddot{X} = & 6\pi \mu (u_x + u'_x - \dot{X})R \\ & + 6.46 \rho R^2 \nu^{1/2} \left\{ (u_y + u'_y - \dot{Y}) \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^{1/2} + (u_z + u'_z - \dot{Z}) \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^{1/2} \right\} - V \frac{\partial Pr}{\partial x} \end{aligned} \quad (9)$$

25

$$\begin{aligned} (m + m_A) \ddot{Y} = & 6\pi \mu (u_y + u'_y - \dot{Y})R \\ & + 6.46 \rho R^2 \nu^{1/2} \left\{ (u_z + u'_z - \dot{Z}) \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^{1/2} + (u_x + u'_x - \dot{X}) \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^{1/2} \right\} - V \frac{\partial Pr}{\partial y} \end{aligned} \quad (10)$$

30

$$\begin{aligned} (m + m_A) \ddot{Z} = & 6\pi \mu (u_z + u'_z - \dot{Z})R - \rho g V + mg \\ & + 6.46 \rho R^2 \nu^{1/2} \left\{ (u_x + u'_x - \dot{X}) \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^{1/2} + (u_y + u'_y - \dot{Y}) \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^{1/2} \right\} - V \frac{\partial Pr}{\partial z} \end{aligned} \quad (11)$$

Toisin sanoen kuplien liikeyhtälöt kolmessa koordinaatistosuunnassa laaditaan ilmaisemalla pyörrevirtojen vektorinopeudet nesteen keskinopeuden ja kuplan virtausvektorinopeuden summan funktiona. Yhtälöissä (9) - (11) oikean puolen ensimmäinen termi valitaan käyttämällä Stokes-approksimointia kiinteälle pallolle.

(2) Liikeyhtälöt kuplien ollessa laivan rungon pinnassa

Kun kuplat ovat laivan rungon pinnassa, kuplaan vaikuttavat tehollinen pystysuora voima ja kitkavoima. Liikeyhtälöt (12) - (14) voidaan näin ollen johtaa yhtälöistä (9) - (11).

Yhtälöissä (12) - (14) N_x , N_y ja N_z ovat tehollisia pystysuoria voimia (newtoneina) ja F_x , F_y ja F_z kitkavoimia (newtoneina).

$$(m + m_A)\ddot{X} = 6\pi \mu (u_x + u'_x - \dot{X})R + 6.46 \rho R^2 v^{1/2} \left\{ (u_y + u'_y - \dot{Y}) \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^{1/2} + (u_z + u'_z - \dot{Z}) \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^{1/2} \right\} - V \frac{\partial Pr}{\partial x} + N_x + F_x \quad (12)$$

$$(m + m_A)\ddot{Y} = 6\pi \mu (u_y + u'_y - \dot{Y})R + 6.46 \rho R^2 v^{1/2} \left\{ (u_z + u'_z - \dot{Z}) \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^{1/2} + (u_x + u'_x - \dot{X}) \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^{1/2} \right\} - V \frac{\partial Pr}{\partial y} + N_y + F_y \quad (13)$$

$$(m + m_A)\ddot{Z} = 6\pi \mu (u_z + u'_z - \dot{Z})R - \rho gV + mg + 6.46 \rho R^2 v^{1/2} \left\{ (u_x + u'_x - \dot{X}) \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^{1/2} + (u_y + u'_y - \dot{Y}) \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^{1/2} \right\} - V \frac{\partial Pr}{\partial z} + N_z + F_z \quad (14)$$

Tässä tutkimuksessa akselien suuntaisten kitkavoimien F_x , F_y ja F_z oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi olevan nolla. Rajaehdot tehollisten pystysuorien voimien N_x , N_y ja N_z laskemiseen saadaan laivan pintakoordinaateista X_s , Y_s ja Z_s seuraavien yhtälöiden (15 ja (16) mukaan.

$$\frac{dY_s}{dX_s} = \frac{\dot{Y}}{\dot{X}} \quad (15)$$

$$\frac{dZ_s}{dY_s} = \frac{\dot{Z}}{\dot{Y}} \quad (16)$$

(3) Pyörredispersion vaikutukset

Pyörredispersion vaikutukset kuplan liikkeeseen isotrooppisessa virtauksessa sisältyvät edellä kuvailtuihin Monte Carlo -menetelmiin siten, että kuplien ratoihin aiheutetaan satunnaishäiriöitä muuttamalla kuplien nopeusvektoreita u'_x , u'_y , u'_z satunnaisluvuilla. Esimerkiksi kuplien nopeusvektorit u'_x , u'_y , u'_z voidaan ilmaista häiriön suuruutena u' (itseisarvo) ja liikekulmina ϕ , θ yhtälöiden (17) - (19) mukaan:

$$u'_x = u' \sin \theta \quad (17)$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18)$$

$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19)$$

Tässä oletetaan, että häiriö u' mukailee ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessia ja liikekulma ϕ , joka on asteluvultaan $-180^\circ - 180^\circ$, on yhdenmuotoinen satunnaisluku väliltä $[-180^\circ - 180^\circ]$, ja liikekulma θ , joka on asteluvultaan $-90^\circ - 90^\circ$, on satunnaisluku väliltä $[-90^\circ - 90^\circ]$. Markov-prosessi on prosessi, jossa tietyn tapahtuman todennäköisyyteen tietyllä hetkellä vaikuttaa edellinen todennäköisyys edeltävässä aikayksikössä, ja ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessi kuvailee satunnaisilmiötä tietyllä ajanhetkellä satunnaisilmiöiden ensimmäisen kertaluvun yhtälöllä edellisessä aikayksikössä.

Toisin sanoen häiriön u'_{n+1} suuruus ajanhetkellä $(n+1)$ aikayksikköä saadaan seuraavasta häiriön suuruuden ensimmäisen kertaluvun yhtälöstä (20) ajanhetkellä n aikayksikköä.

$$u'_{n+1} = \chi \cdot u'_n + \gamma_n \quad (20)$$

missä χ on vakio arvoltaan $0 < \chi < 1$, γ_n ovat tavallisia satunnaislukuja, joiden keskiarvo on nolla ja keskihajonta σ_0 . Yhtälöstä (20) saadun häiriön suuruuden u'_n itsekorrelaatiofunktio $R(m, \Delta t)$ saadaan yhtälöstä (21).

$$\begin{aligned} R(m, \Delta t) &= \frac{\overline{u'_n \cdot u'_{n+m}}}{(u'_n)^2} \\ &= \frac{\chi^m (u'_n)^2 + \chi^{m+1} (\overline{u'_n \cdot \gamma_n}) + \dots + \chi (\overline{u'_n \cdot \gamma_{n+m-1}})}{(u'_n)^2} \\ &= \chi^m \end{aligned} \quad (21)$$

Seuraavaksi arvioidaan, käyttäkö integraalista aikaskaalaa T^* , joka määritellään vaimenemisaikavakioksi tai häiriön kestoajaksi pyörrerajakerroksessa. Integraalinen aikaskaala T^* määritellään yhtälöllä (22), jossa Δt on ajan lisäys ja τ differentiaaliaika.

5

$$T^* = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} \chi^{\frac{\tau}{\Delta t}} d\tau = -\frac{\Delta t}{\log \chi} \quad (22)$$

niin, että vakio χ voidaan ilmaista aikaintegraalilla T^* seuraavasti:

10

$$\chi = \exp(-\Delta t / T^*) \quad (23)$$

Jos $m = 1$ ja $\Delta t = T$ (jatkuva väli), vakiosta χ tulee itsekorrelaatiofunktio jatkuvassa systeemissä ja se vastaa Taylorin dispersioteoriassa käytettävää Lagrangen itsekorrelaatiofunktioita. Tiedetään, että Lagrangen itsekorrelaatiofunktio sopii hyvin yhteen koetulosten kanssa. Nämä seikat huomioon ottaen tuntuu perustellulta käsitellä häiriöitä kuplaisessa virtauskentässä Markov-prosesseina.

Yhtälöstä (20) saatavan voimakkuudeltaan u'_n :n suuruisen häiriön dispersio saadaan yhtälöstä (24).

20

$$\sigma_u^2 = \chi^2 \cdot \sigma_u^2 + \sigma_0^2 \quad (24)$$

missä σ_u^2 on kuplien vektorinopeuksien neliöiden keskiarvo, joka voidaan ilmaista pyörrvirtaenergian κ suhteen, kuten yhtälössä (25).

25

$$\sigma_u^2 = 2\kappa \quad (25)$$

Yhtälöistä (24) ja (25) saadaan keskihajonta seuraavasti:

30

$$\sigma_0 = (1 - \chi^2)^{1/2} \cdot \sigma_u \quad (26)$$

Integraalinen aikaskaala T^* yritetään seuraavaksi ilmaista energiahäviötekijän ε (m^2/s^3) ja pyörrvirtaenergian κ suhteen. Työn tässä vaiheessa viitataan julkaisuun "Science of Turbulent Flow", toim. Tomomasa Tatsumi, Tokyo University Press, s. 372, jossa näytetään, että energiahäviötekijä ε voi-

35

daan ilmaista virtaussuunnan x ja kuplan virtausnopeuden u häiriökomponentin u' (m/s) suhteen yhtälön (27) mukaisesti.

$$\varepsilon = 15 \nu \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial x}\right)^2} \quad (27)$$

5

Taylorin asteikko λ (metreissä) on virtausnopeuden u poikkeamakomponentin kaarevuussäde ja se saadaan yhtälöstä 28.

$$\lambda^2 = \frac{\overline{u'^2}}{\overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial x}\right)^2}} \quad (28)$$

10

ja pyörrevirtaenergia κ saadaan yhtälöstä (29).

$$\kappa = \frac{1}{2} \overline{u'^2} \quad (29)$$

15

Yhtälöistä (28) ja (29) päästään yhtälöön (30).

$$\lambda^2 = 30 \nu \cdot \kappa / \varepsilon \quad (30)$$

20

Toisaalta Taylorin asteikon λ ja integraalisen aikaskaalan yhteys voidaan edellä mainitun viitejulkaisun "Science of Turbulent Flow" mukaan muodostaa myös yhtälön (31) avulla.

25

$$T^* = \lambda^2 / 10 \nu \quad (31)$$

Näin ollen integraalinen aikaskaala T^* saadaan yhtälöistä (30) ja (31) seuraavasti:

30

$$T^* = 3 \kappa / \varepsilon \quad (32)$$

(4) Tyhjän tilan osuus

Seuraavaksi selitetään tyhjän tilan osuuden määritelmä. Kun kuplien liikeyhtälöt on ratkaistu edellä mainittujen yhtälöiden mukaan, tyhjän tilan osuus saadaan jakamalla tietyllä ajanhetkellä solussa olevien kuplien tilavuus

35

v_i solun tilavuudella ΔV . Esimerkiksi kuviossa 2 näytetyssä tapauksessa solussa on kymmenen kuplaa, jolloin tyhjän tilan osuus saadaan yhtälöstä (33).

$$\text{TYHJÄN TILAN OSUUS} = \sum_{i=1}^{10} v_i / \Delta V \quad (33)$$

5

(5) Simulaatiomenetelmän selitys

Seuraavaksi annetaan simulaatiomenetelmän esimerkki kuvion 3 vuokaavioon viitaten. Vuokaavioon on merkitty useita vaiheita, jotka sisältyvät tietokoneelle asennettuun simulaatio-ohjelmaan.

- 10 Simulaatiossa käytetään tunnettua pyörrevirran κ - ϵ -mallia runkopintojen virtaustietojen simuloimiseksi CFD-tietojen avulla. Erityisesti mallia käytetään perusvirtausparametrien laskemiseen ennalta laivan muodon ja koon sekä liikenopeuden ja vastaavien perusteella. Perusvirtausparametrejä ovat: virtauskenttien, pyörreajakerros mukaan lukien, jakaminen sopivan moneksi
- 15 soluksi; nesteen virtausvektorinopeuksien u_x , u_y , u_z keskiarvot; aikakeskiarvoistettu paine P_r ; pyörrevirtaenergia κ ja energiahäviötekijä ϵ . Seuraavassa simulaatiomenetelmän esimerkissä laivan koko on $L \times B \times d = 7 \times 0,6 \times 0,1$ m ja liikenopeus on 3 m/s. Kuplasuihkusuuttimet ovat suorakaiteen muotoisia ja 0,3 m leveitä, ja ympäryssuuntaisesti 0,12 m:n etäisyydelle laivan keulasta si-
- 20 joitetaan riviin kaksikymmentäviisi tällaista suutinta.

- Sijoitettaessa simulaatiomallista saadut energiahäviötekijä ϵ ja pyörrevirtaenergia κ yhtälöön (32) integraalisen aikaskaalan T^* arvoksi tulee 0,1 - 2,9 s. Aikayksikkö (laskennallinen lisäys Δt) valitaan siten, että se on sopivasti pienempi kuin pienin integraalinen aikaskaala (0,1 s). Tässä tapauk-
- 25 sessa valitaan 1/10, jolloin aikayksiköksi tulee 0,01 s.

- Laskenta aloitetaan asettamalla kuplien sijaintien ja nopeuden alkuarvot (vaihe S1). Esimerkiksi useita suihkusuuttimia laivan ympäryssuunnassa (tässä tapauksessa 25) edustavat laivan koordinaatiston poikkileikkaukset. Yksi näistä poikkileikkauksista (esimerkiksi päädyn) valitaan suihkutettavan kuplan lähtöpaikaksi. Kuplan sijaintiparametri "pr" ja aikaparametri "n" asetetaan nolaksi (0), alkunopeus voidaan asettaa nolkaan tai johonkin muuhun arvoon.
- 30

- Seuraavaksi oletetaan, että 500 μm :n läpimittainen ensimmäinen kupla suihkutetaan veteen (rajakerrokseen), ja ensimmäisen kuplan häiriölaskenta suoritetaan luodun satunnaisluvun mukaan (vaihe S2). Tarkemmin sanottuna kukin satunnaislukugeneraattori luo liikekulmalle ϕ yhdenmuotoisen
- 35

satunnaisluvun väliltä $[-180^\circ - 180^\circ]$ ja liikekulmalle θ yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $[-90^\circ - 90^\circ]$, ja saadut tulokset sijoitetaan muuttujiin ϕ , θ yhtälöihin (17) - (19).

Toinen satunnaislukugeneraattori tuottaa tavallisia satunnaislukuja, joiden keskiarvo on nolla ja keskihajonta γ_0 ja jotka sijoitetaan yhtälön (20) muuttujaan γ_n . Integraalinen aikaskaala T^* ja sen pohjalta laskettu aikayksikkö Δt sijoitetaan yhtälöön (23) vakion χ laskemiseksi. Vakio χ sijoitetaan yhtälöön (20) samalla kuin yhtälöstä (29) saatu häiriön u'_n suuruus edellisessä aikayksikössä, jotta saadaan häiriön suuruus nykyisellä ajanhetkellä u'_{n+1} . Kuplien vektorinopeudet u'_x , u'_y , u'_z saadaan tällöin erilaisten algoritmien tuottamien satunnaislukujen pohjalta.

Seuraavaksi tutkitaan, onko vaiheessa S1 veteen suihkutettu kupla irtautunut laivan pinnasta (vaihe S3). Kuplien vektorinopeuksien u'_x , u'_y , u'_z laskentatulokset näyttävät kuplan senhetkisen sijainnin eli sen, missä solussa kupla sillä hetkellä on.

Jos kupla näyttää vaiheessa S3 irtautuneen laivan pinnasta, kuplan sijainti (solu) seuraavalla ajanhetkellä lasketaan (vaihe S4) liikeyhtälöillä (9) - (11).

Toisaalta jos kupla näyttää vaiheessa S3 pysyneen laivan pinnassa, teholliset pystysuorat voimat koordinaattisuunnissa N_x , N_y , N_z aktivoidaan (vaihe S5). Seuraavaksi lasketaan kuplan sijainti (solu) seuraavalla ajanhetkellä (vaihe S6) liikeyhtälöiden (12) - (14) mukaan ja tutkitaan (vaihe S7), täyttävätkö yhtälöiden (12) - (14) antamat laskentatulokset ehtoyhtälöt (15), (16).

Jos näyttää siltä, että ehtoyhtälöt eivät täyty, vaiheen S5 tehollisten pystysuorien voimien N_x , N_y , N_z alkuarvoja korjataan (vaihe S8) ja vaiheiden S6, S7 iterointiprosesseja jatketaan, kunnes tulokset täyttävät ehtoyhtälöt (15), (16).

Kun vaiheiden S6 - S8 iterointisarjat saavat ehtoyhtälöt (15), (16) täytettyä, vaiheen S7 tulokseksi tulee [kyllä] ja prosessi etenee kohtaan, jossa tarkistetaan, ovatko teholliset pystysuorat voimat N_x , N_y , N_z pienempiä kuin nolla (vaihe S9). Jos tulos vaiheessa S9 on [kyllä], tietovuo ohjataan vaiheeseen S4, ja jos tulos on [ei], siirrytään vaiheeseen S10.

Tietovuo vaiheen S9 tuloksesta [ei] ja vaiheen S4 laskentatulokset yhdistetään vaiheessa S10, jotta voidaan tutkia, onko kupla muuttumattoman vedenpinnan alapuolella. Jos tulos vaiheessa S10 on [kyllä], kunkin solun

tyhjän tilan osuus lasketaan (vaihe S11) yhtälöstä (33). Jos tulos vaiheessa S10 on [ei], tyhjän tilan osuutta ei lasketa.

- 5 Kun (ensimmäisen) suihkutetun kuplan liikettä on laskettu niin monta kertaa, että aikakokonaisluku on saanut arvon $n = 1$ (aikayksikön Δt niin monta toistoa, että n :nneksi tulee 1), aikaskaalaa voidaan kasvattaa yhdellä integraaliajalla. Aikakokonaislukua n kasvatetaan arvosta "0" arvoon "1" (vaihe S12), niin että vaihe S2 voidaan toteuttaa toiselle kuplalle.

- Vaiheessa S2 suihkutetaan veteen uusi kupla (toinen kupla), jolloin pyörrerajakerroksessa on yhteensä kaksi kuplaa (ensimmäinen ja toinen).
10 Tätä seuraavassa prosessoinnissa häiriöt kuplien vektorinopeuksille lasketaan satunnaislukugeneraattoreiden avulla. Edellä kuvattujen vaiheiden kautta määriteltä ensimmäisen kuplan vanha sijainti vaihtuu uudeksi seuraavassa aikayksikössä Δt . Toisen kuplan sijainti aikayksikössä Δt lasketaan ensimmäisen kuplan alkusijainnin pohjalta.

- 15 Kun näitä vaiheita toistetaan ennalta määritellyn kokonaisluvun verran, kunkin solun kokonaiskuplamäärä saadaan ja tyhjän tilan osuus tietyllä ajanhetkellä voidaan laskea (vaihe S11). Kuvioissa 4 ja 5 näytetään laskentatulokset tyhjän tilan osuuksista yksittäisissä soluissa laivan ympäryssuunnassa. Pyörrerajakerrokseen suihkutetut kuplat liikkuvat laivan liikesuuntaa vastaan, mikä synnyttää pituussuuntaisia kuplavirtoja laivan pohjapinnalle. Niinpä
20 kuvioissa 4 ja 5 näytetään lasketut tiedot tyhjän tilan osuudesta x-akselilla ja eri solujen sijainnit ympäryssuunnassa (poikkisuunnassa) y-akselilla pituussuunnassa erilaisilla etäisyyksillä laivasta. Kuviossa 4 näytetään tulokset 1 - 5 toiston jälkeen ja kuviossa 5 96 - 100 toiston jälkeen.

- 25 Kuten kuvioista 4 nähdään, 1 - 5 toiston jälkeen tulokset ovat hyvin hajallaan, mutta ne alkavat konvergoitua kuvion 5 mukaisesti, kun toistoja on tehty riittävästi. Kuvioista 5 nähdään, että solujen tyhjän tilan osuus konvergoituu vakioarvoon 96 - 100 iteraation jälkeen.

- Kuplien sijainnit määritetään näin usealla (esimerkiksi 100:lla) tois-
30 tolla riittävän konvergenssin saavuttamiseksi (vaihe S3 tai S6), ja vastaavat tyhjän tilan osuudet lasketaan (vaihe S11). Tässä kuplan alkusijainti (suihkusuutin) vaihtuu (vaihe S13). Tämä merkitsee, että kuplan lähtösuihkusuutin valittiin ympäryssuuntaan riviin asetetuista suuttimista (koordinaatiston poikkileikkauksista) vaiheessa S1, mutta tämä vaihdetaan viereiseen poikkileikkaukseen. Vaiheet S2 - S11 toistetaan toiselle poikkileikkaukselle. Kun tämä pro-
35 sessi toistetaan 100 kuplalle kaikille kahdellekymmenelle viidelle suihkusuutti-

melle, saadaan laskettua tyhjän tilan osuudet kaikille pituussuuntaa vastaan oleville suuttimille.

Kun laskutoimitukset saadaan tehtyä kaikille suihkusuuttimille, tyhjän tilan osuudet laivan kaikille vedenalaisille pinnoille lasketaan vaiheessa S14 ja tuloksien konvergenssi tutkitaan. Laivasta suihkutettavat kuplat liikkuvat laivan menosuuntaa vastaan aluksen pituussuunnassa, jolloin on tutkittava, konvergoituvatko tyhjän tilan osuudet pituuden eri kohdissa vaiheessa S14. Jos tulos on [kyllä], simulaatioprosessin katsotaan päättyneen, ja jos tulos on [ei], simulointiprosessia jatketaan, kunnes tyhjän tilan osuudet konvergoituvat kaikissa pituussuunnan soluissa.

Kuvioissa 6 - 9 näytetään tyhjän tilan osuuden laskentatulokset eri simulaatio-osioille, joita merkitään S.S-arvolla. Mitä suurempi S.S-arvo kuviossa näkyy, sitä lähempänä tyhjän tilan osuuksien jakauma on suihkusuuttimia. Toisin sanoen jos S.S-arvo on pieni, tyhjän tilan osuuksien jakauma siirtyy perää kohti. Pintakäyrien pienin aikalisäys on 1×10^{-5} , mutta suuremmat arvot ovat luokkaa 0,002 - 0,02 (aikayksikön ollessa 0,002). Millä tahansa S.S-arvolla tyhjän tilan osuuden huippuarvot sijoittuvat pohjapintaan ja siitä perää kohti ja huomataan, että kuplat pyrkivät dispergoitumaan rungon sivupinnoille, ja huippuarvot ovat korkeampia. Tämän katsotaan johtuvan solujen välistä laivan pinnan normaalin suunnassa ja nesteen virtausnopeudesta.

Kuvio 10 on pohjakuvio kuplien lasketuista liikeurista. Tulokset osoittavat useimpien kuplien liikkuvan pohjapinnan kupeessa. Tämän katsotaan johtuvan pohjapinnalla virtaavan veden pienestä suhteellisesta nopeudesta, jolloin Saffmanin noste ei juurikaan vaikuta kuplien käyttäytymiseen, ja pohjan alueilla, joilla pyörrerajakerros on ohut, hydrostaattinen painegradientti on pieni eikä vaikuta paljonkaan kuplien dispersioon, jolloin nostovoimat vallitsevat. Tuloksissa ei näkynyt niin suuria dispersioita, että ne olisivat saaneet useimmat pohjan kuplista karkaamaan aluksen keskivaiheilta sivupinnoille.

Taulukossa 1 näytetään virtauskenttien laskentatulokset eri S.S-arvoilla ja ilman kuplia lähellä laivan peräköliä. Taulukossa 1 näytetään vertailun vuoksi solujen keskimääräiset normaalin suuntaiset välit köliin (veteen) saakka yhden solun välein ja alavirran kuplien nopeudet samoin yhden solun välein. Kuvioista 10 nähdään, että paikalliset tyhjän tilan osuudet ovat joillakin pohjapinnan alueilla suuria, koska kuplat painautuvat pohjapintaa vasten. Laskentatuloksissa tyhjän tilan osuuksista muodostetaan keskiarvot solun tilavuuden mukaan niin, että pohjan keskialueilla, missä solujen välit ovat normaalin

suunnassa suuret, tyhjän tilan osuuksien huippuarvot jäävät pienemmiksi. Tuloksien parantamiseksi on välttämätöntä asettaa solujen välit (vedessä) kuplien läpimitan mukaan.

Taulukko 1

S.S.	Keskimääräiset koordinaatiston välit normaalin suunnassa yhden koordinaatiston välein köliin (veteen) saakka	Alavirran virtausnopeus normaalin suunnassa yhden koordinaatiston välein köliin (veteen) saakka
5	0,0058 m	2,258 m/s
1	0,0042 m	2,114 m/s
1/2	0,0032 m	2,057 m/s
1/4	0,0023 m	1,979 m/s

5

Kuvioissa 11 - 14 näytetään läpimitaltaan 1 000 μm :n suuruisten kuplien tyhjän tilan osuuksien jakauman pitkittäissuuntaiset poikkileikkausnäkökymät, jotta niitä voidaan verrata kuvioissa 6 - 9 näytettyihin vastaaviin tietoihin läpimitaltaan 500 μm :n suuruksille kuplille. Laivan pohjapinnassa läpimitaltaan 1 000 μm :n suuruisten kuplien tyhjän tilan osuuden jakauma näyttää dispergoituvan vähemmän rungon ympäryssuunnassa kuin 500 μm :n kuplien, ja 1 000 μm :n kuplien huippuarvo on suurempi kuin 500 μm :n kuplien. Tämän katsotaan johtuvan suihkusuuttimien lukumäärästä. Kuplien pyrkimys pysyä pohjapinnan kupeessa tuntuu olevan suunnilleen sama molemmilla läpimitoil-

15 la.



Patenttivaatimukset

1. Liikkuvasta laivasta kaasua veteen suihkuttamalla muodostettujen kuplien jakaumatietoja laskemalla laivaa päällystäviä kuplia simuloiva simulaatiomenetelmä, joka käsittää seuraavat vaiheet:

- 5 a. virtauskentän, mukaan lukien laivan vedenalaisen rungonosan ympärille muodostuva pyörrevirtarajakerros, jakaminen kolmiulotteisiin kohtisuoriin koordinaatistoihin solujen muodostamiseksi ja kunkin solun pyörrevirta-energian, energiahäviötekijän ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden laskeminen;
- 10 b. kuplan suihkuttaminen pyörrevirtausrajakerrokseen tietyllä lähtönopeudella tietyistä suihkusuuttimista tietyynä ajanhetkenä;
- c. kuplien vektorinopeuksien laskeminen kullekin solulle pyörrevirta-energian, energiahäviötekijän, nesteen keskimääräisen virtausnopeuden ja satunnaislukujen avulla;
- 15 d. kuplan sijainnin laskeminen seuraavassa aikayksikössä ratkaisemalla liikeyhtälöt kuplien vektorinopeuksien ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden mukaan;
- e. tyhjän ilman osuuden laskeminen kullekin solulle kuplan seuraavan aikayksikön sijainnin mukaan;
- 20 f. vaiheiden c - e toistaminen tietyn monta kertaa kasvattaen aikaparametria aikayksiköllä, kunnes tietty kokonaisaika on täynnä;
- g. kaikkien solujen tyhjän ilman osuuden laskeminen kuplien kokonaisjakauman esittämiseksi kokonaisajassa ja laskennan lopettaminen, kun kuplien jakauma näyttää konvergoituvan.
- 25 2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, jossa ennen vaiheen d toteuttamista tutkitaan, onko kupla irtautunut laivan pinnasta, ja jos havaitaan, että kupla on laivan pinnassa, kuplan sijainti seuraavassa aikayksikössä lasketaan pystysuoran resultanttivoiman antavista liikeyhtälöistä.
3. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen menetelmä, jossa vaiheen
- 30 f valmiiksi saattamisen jälkeen otetaan käyttöön useita suihkusuuttimia ja vaiheet c:stä f:ään toistetaan.
4. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, jossa kuplien vektorinopeudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-180^\circ - 180^\circ)$ määrittämän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun
- 35 väliltä $(-90^\circ - 90^\circ)$ määrittämän kulman θ suhteen:

$$u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$

5

5. Patenttivaatimuksen 2 mukainen menetelmä, jossa kuplien vektorinopeudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-180^\circ - 180^\circ)$ määrittämän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-90^\circ - 90^\circ)$ määrittämän kulman θ suhteen:

10

$$u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

15

$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$

6. Patenttivaatimuksen 3 mukainen menetelmä, jossa kuplien vektorinopeudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-180^\circ - 180^\circ)$ määrittämän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-90^\circ - 90^\circ)$ määrittämän kulman θ suhteen:

20

$$u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

25

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$

7. Liikkuvasta laivasta kaasua veteen suihkuttamalla muodostettujen kuplien jakaumatietoja laskemalla laivaa päällystäviä kuplia simuloiva laite, joka käsittää seuraavien vaiheiden toteuttamiseen tarvittavat laitteet:

30

a. virtauskentän, mukaan lukien laivan vedenalaisen rungonosan ympärille muodostuva pyörrevirtarajakerros, jakaminen kolmiulotteisiin kohtisuoriin koordinaatistoihin solujen muodostamiseksi ja kunkin solun pyörrevirtaenergian, energiahäviötekijän ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden laskeminen;

35

b. kuplan suihkuttaminen pyörrevirtausraja-alueeseen tietyllä lähtönopeudella tietyistä suihkusuuttimista tietyssä ajanhetkenä;

c. kuplien vektorinopeuksien laskeminen kullekin solulle pyörrevirtaenergian, energiahäviötekijän, nesteen keskimääräisen virtausnopeuden ja satunnaislukujen avulla;

d. kuplan sijainnin laskeminen seuraavassa aikayksikössä ratkaisemalla liikeyhtälöt kuplien vektorinopeuksien ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden mukaan;

e. tyhjän ilman osuuden laskeminen kullekin solulle kuplan seuraavan aikayksikön sijainnin mukaan;

f. vaiheiden c - e toistaminen tietyn monta kertaa kasvattaen aikaparametria aikayksiköllä, kunnes tietty kokonaisaika on täynnä;

g. kaikkien solujen tyhjän ilman osuuden laskeminen kuplien kokonaisjakauman esittämiseksi kokonaisajassa ja laskennan lopettaminen, kun kuplien jakauma näyttää konvergoituvan.

8. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, jossa ennen vaiheen d toteuttamista tutkitaan, onko kupla irtautunut laivan pinnasta, ja jos havaitaan, että kupla on laivan pinnassa, kuplan sijainti seuraavassa aikayksikössä lasketaan pystysuoran resultanttivoiman antavista liikeyhtälöistä.

9. Patenttivaatimuksen 7 tai 8 mukainen laite, jossa vaiheen f valmiiksi saattamisen jälkeen otetaan käyttöön useita suihkusuuttimia ja vaiheet c:stä f:ään toistetaan.

10. Patenttivaatimuksen 7 mukainen laite, jossa kuplien vektorinopeudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-180^\circ - 180^\circ)$ määrittävän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-90^\circ - 90^\circ)$ määrittävän kulman θ suhteen:

$$u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$

11. Patenttivaatimuksen 8 mukainen laite, jossa kuplien vektorinopeudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä

(-180° - 180°) määräämän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä (-90° - 90°) määräämän kulman θ suhteen:

$$5 \quad u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$

12. Patenttivaatimuksen 7 mukainen laite, jossa kuplien vektorino-
10 peudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-
prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä
(-180° - 180°) määräämän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä
(-90° - 90°) määräämän kulman θ suhteen:

$$15 \quad u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$

13. Liikkuvasta laivasta kaasua veteen suihkuttamalla muodostet-
20 tujen kuplien jakaumatietoja laskemalla laivaa päällystäviä kuplia simuloivan
ohjelman sisältävä tietokonemuistiväline, joka käsittää seuraavien vaiheiden
toteuttamiseen tarvittavat laitteet:

a. virtauskentän, mukaan lukien laivan vedenalaisen rungonosan
ympäri muostuva pyörrevirtarajakkerros, jakaminen kolmiulotteisiin kohti-
25 suoriin koordinaatistoihin solujen muodostamiseksi ja kunkin solun pyörrevir-
taenergian, energiahäviötekijän ja nesteen keskimääräisen virtausnopeuden
laskeminen;

b. kuplan suihkuttaminen pyörrevirtausraja-
nopeudella tietyistä suihkusuuttimista tietyssä ajanhetkenä;

30 c. kuplien vektorinopeuksien laskeminen kullekin solulle pyörrevir-
taenergian, energiahäviötekijän, nesteen keskimääräisen virtausnopeuden ja
satunnaislukujen avulla;

d. kuplan sijainnin laskeminen seuraavassa aikayksikössä ratkai-
semalla liikeyhtälöt kuplien vektorinopeuksien ja nesteen keskimääräisen vir-
35 tausnopeuden mukaan;

e. tyhjän ilman osuuden laskeminen kullekin solulle kuplan seuraavan aikayksikön sijainnin mukaan;

f. vaiheiden c - e toistaminen tietyn monta kertaa kasvattaen aikaparametria aikayksiköllä, kunnes tietty kokonaisaika on täynnä;

- 5 g. kaikkien solujen tyhjän ilman osuuden laskeminen kuplien kokonaisjakauman esittämiseksi kokonaisajassa ja laskennan lopettaminen, kun kuplien jakauma näyttää konvergoituvan.

14. Patenttivaatimuksen 13 mukainen menetelmä, jossa ennen vaiheen d toteuttamista tutkitaan, onko kupla irtautunut laivan pinnasta, ja jos havaitaan, että kupla on laivan pinnassa, kuplan sijainti seuraavassa aikayksikössä lasketaan pystysuoran resultanttivoiman antavista liikeyhtälöistä.

15. Patenttivaatimuksen 13 tai 14 mukainen laite, jossa vaiheen f valmiiksi saattamisen jälkeen otetaan käyttöön useita suihkusuuttimia ja vaiheet c:stä f:ään toistetaan.

16. Patenttivaatimuksen 13 mukainen tietokonemuistiväline, jossa kuplien vektorinopeudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-180^\circ - 180^\circ)$ määrittävän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-90^\circ - 90^\circ)$ määrittävän kulman θ suhteen:

20

$$u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$

25

17. Patenttivaatimuksen 14 mukainen tietokonemuistiväline, jossa kuplien vektorinopeudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-180^\circ - 180^\circ)$ määrittävän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-90^\circ - 90^\circ)$ määrittävän kulman θ suhteen:

30

$$u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

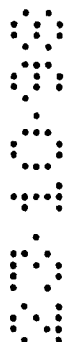
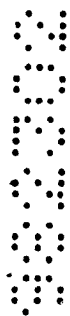
$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$

18. Patenttivaatimuksen 15 mukainen tietokonemuistiväline, jossa kuplien vektorinopeudet saadaan yhtälöistä (17), (18) ja (19) ensimmäisen kertaluvun Markov-prosessin määrittämän häiriön u' , yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-180^\circ - 180^\circ)$ määräämän kulman ϕ ja yhdenmuotoisen satunnaisluvun väliltä $(-90^\circ - 90^\circ)$ määräämän kulman θ suhteen:

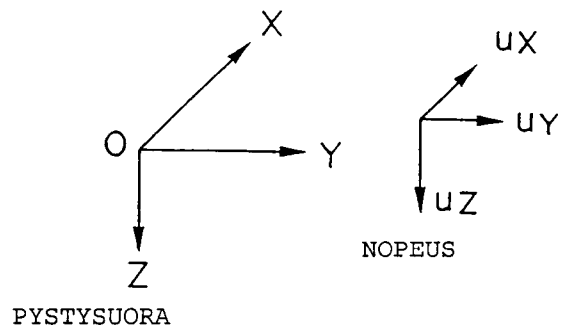
$$u'_x = u' \sin \theta \quad (17);$$

$$u'_y = u' \cos \theta \cos \phi \quad (18) \text{ ja}$$

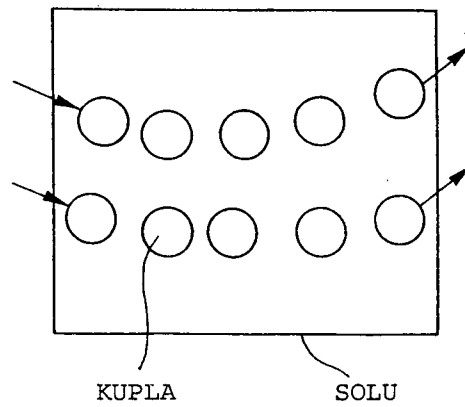
$$u'_z = u' \cos \theta \sin \phi \quad (19).$$



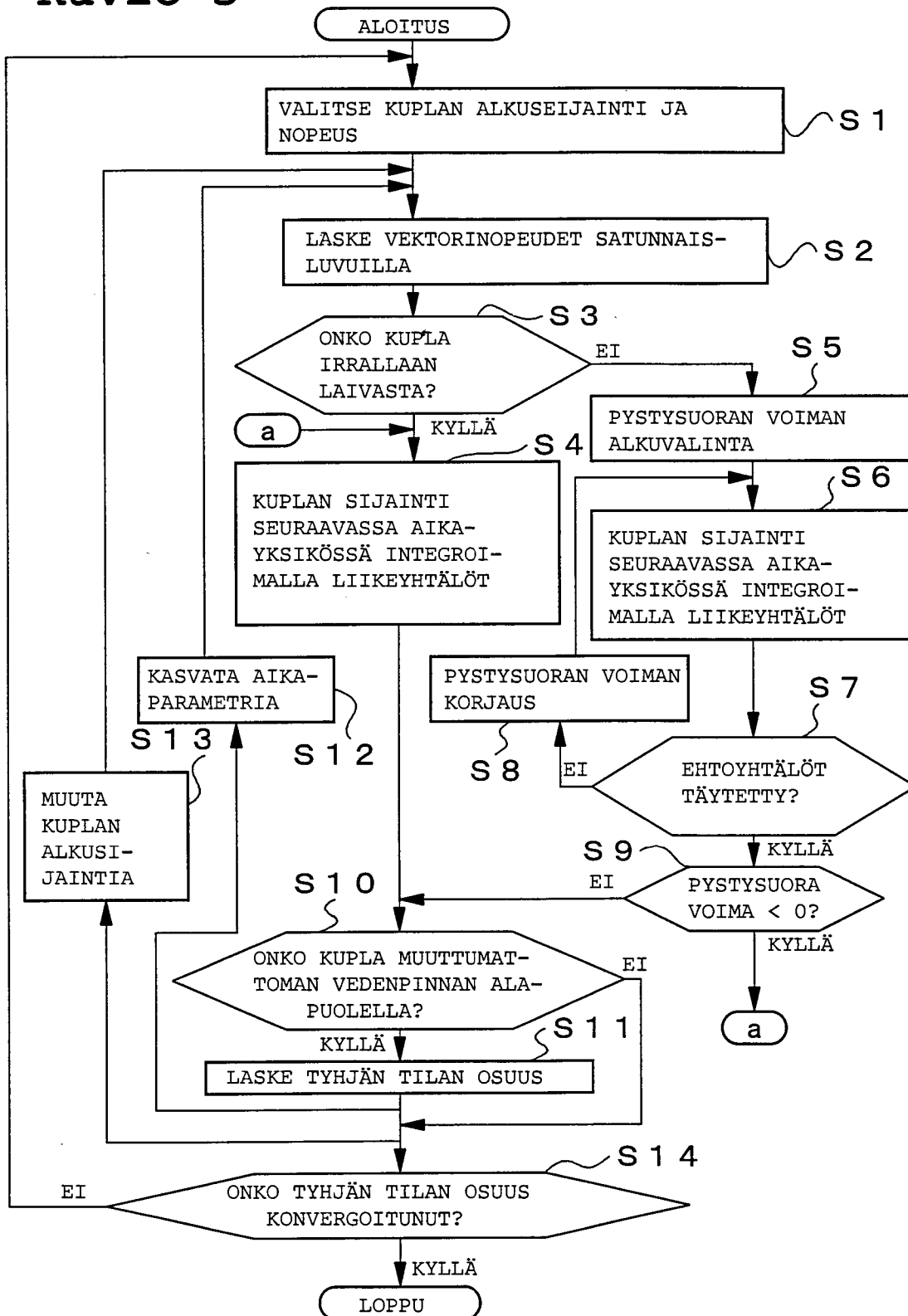
Kuvio 1



Kuvio 2

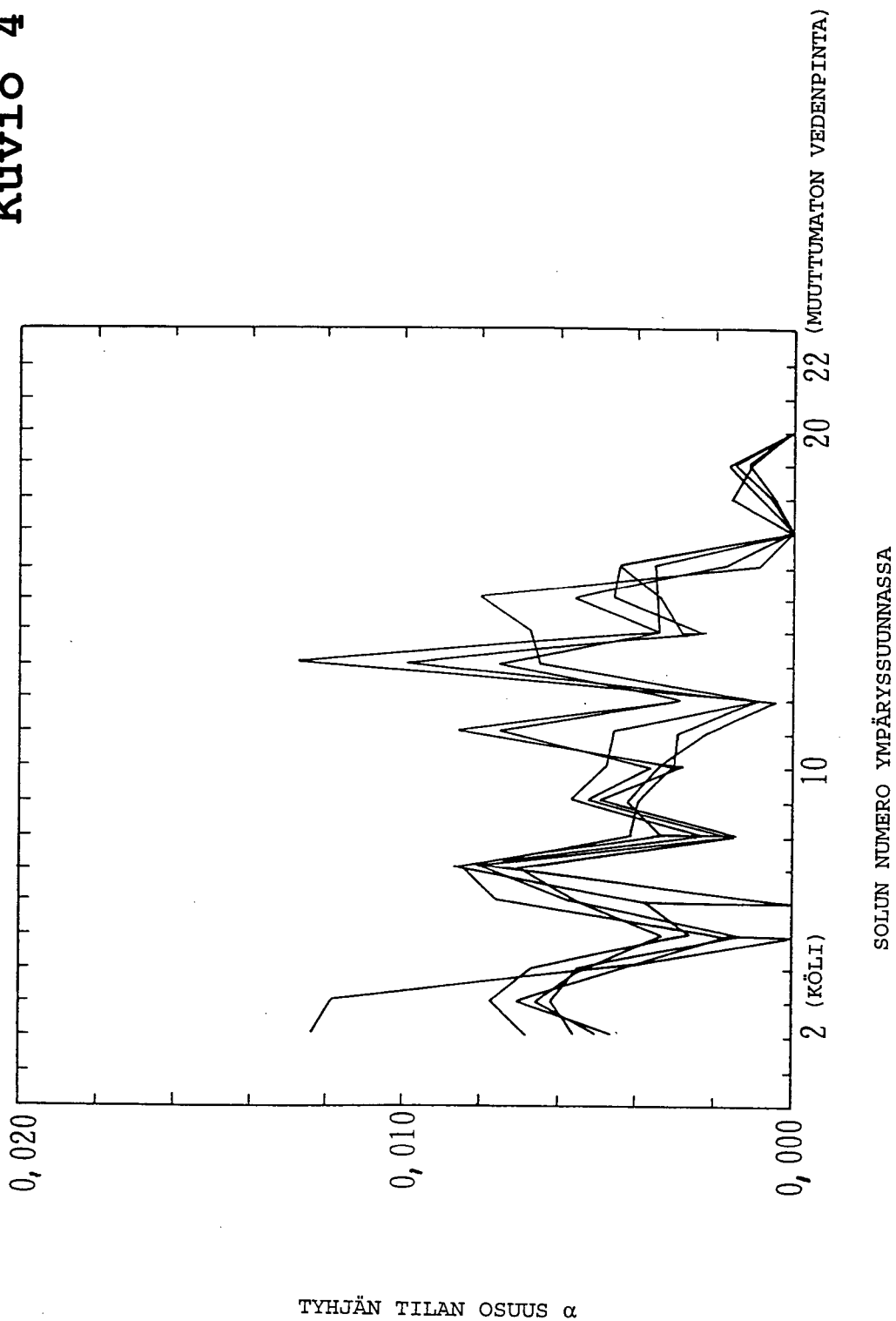


Kuvio 3



TOISTOJEN MÄÄRÄ: 1 ~ 5

Kuvio 4

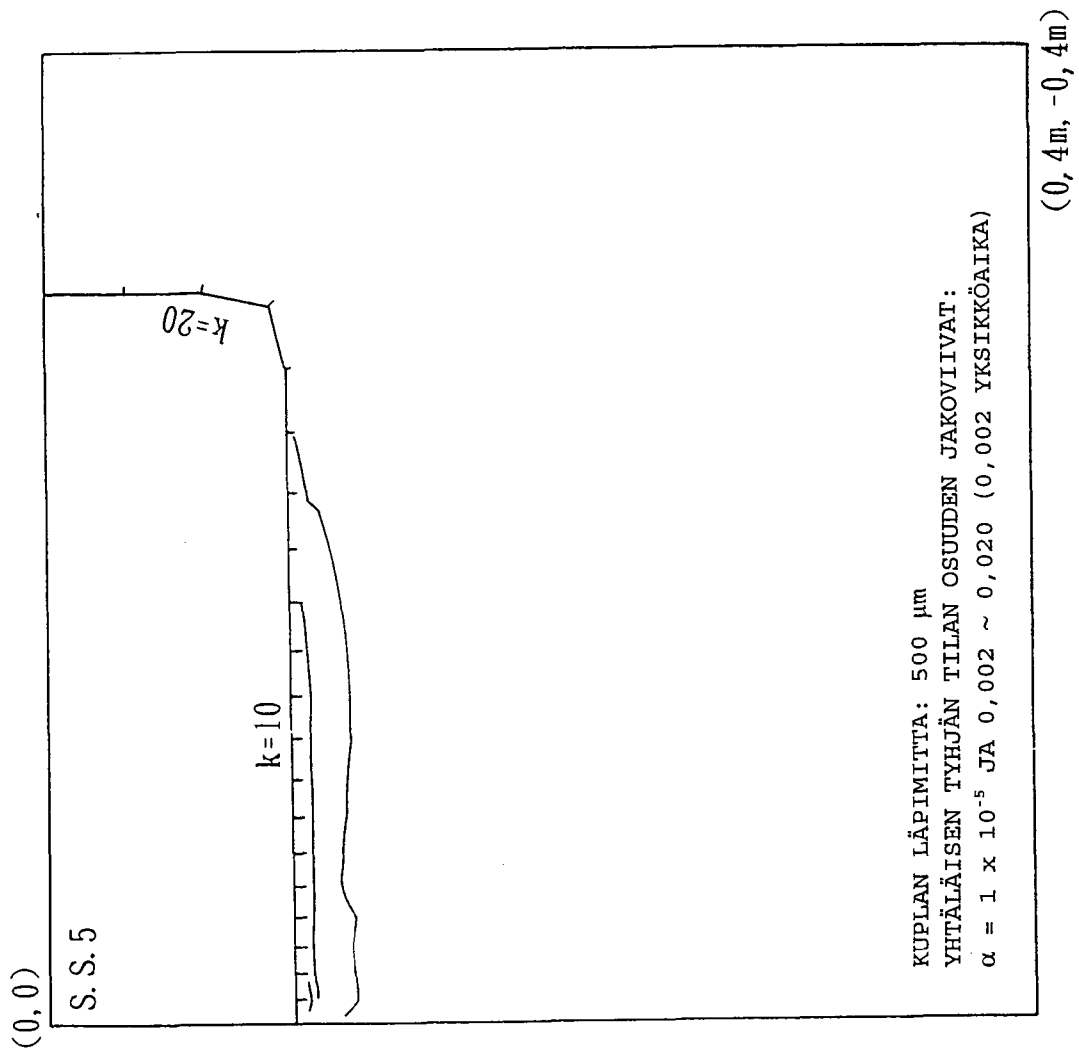


4

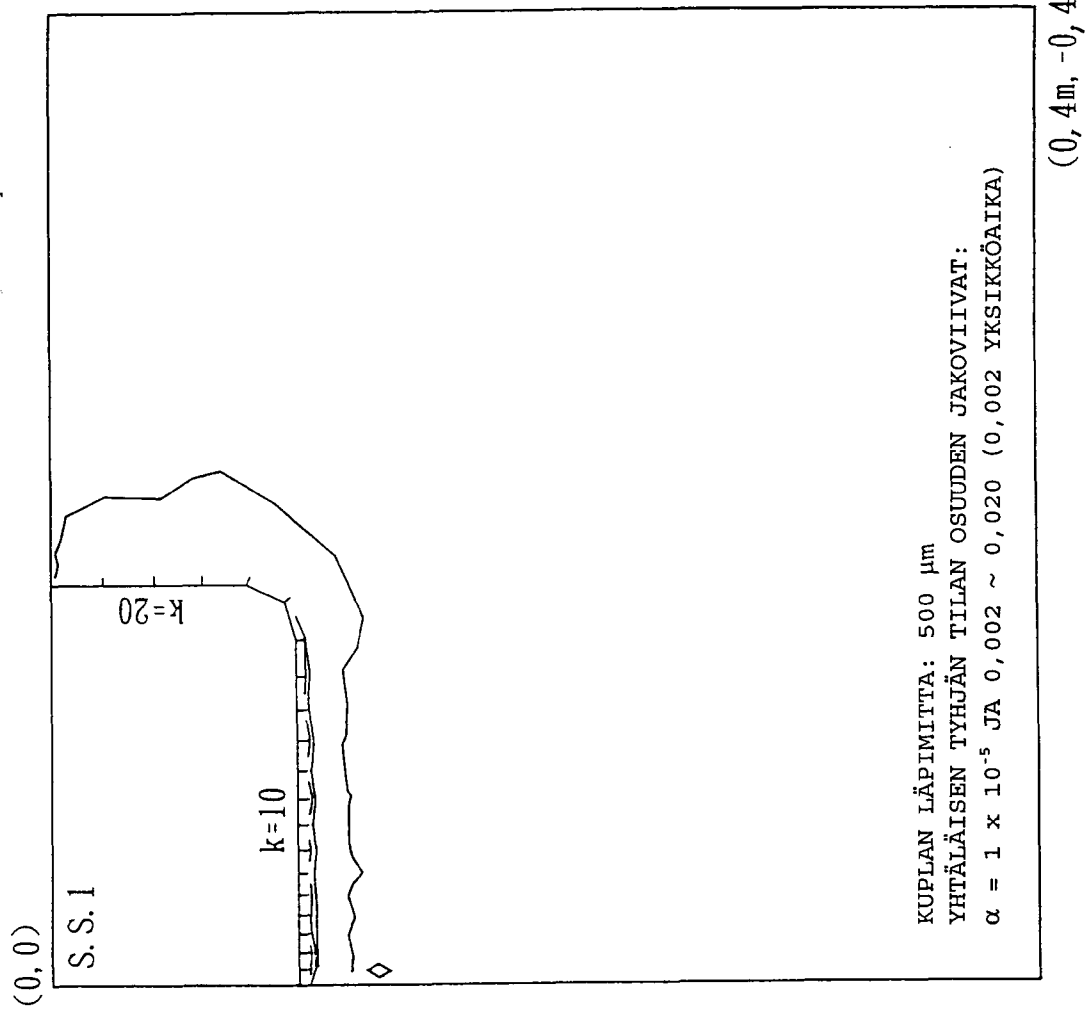
Kuvio 5



Kuvio 6

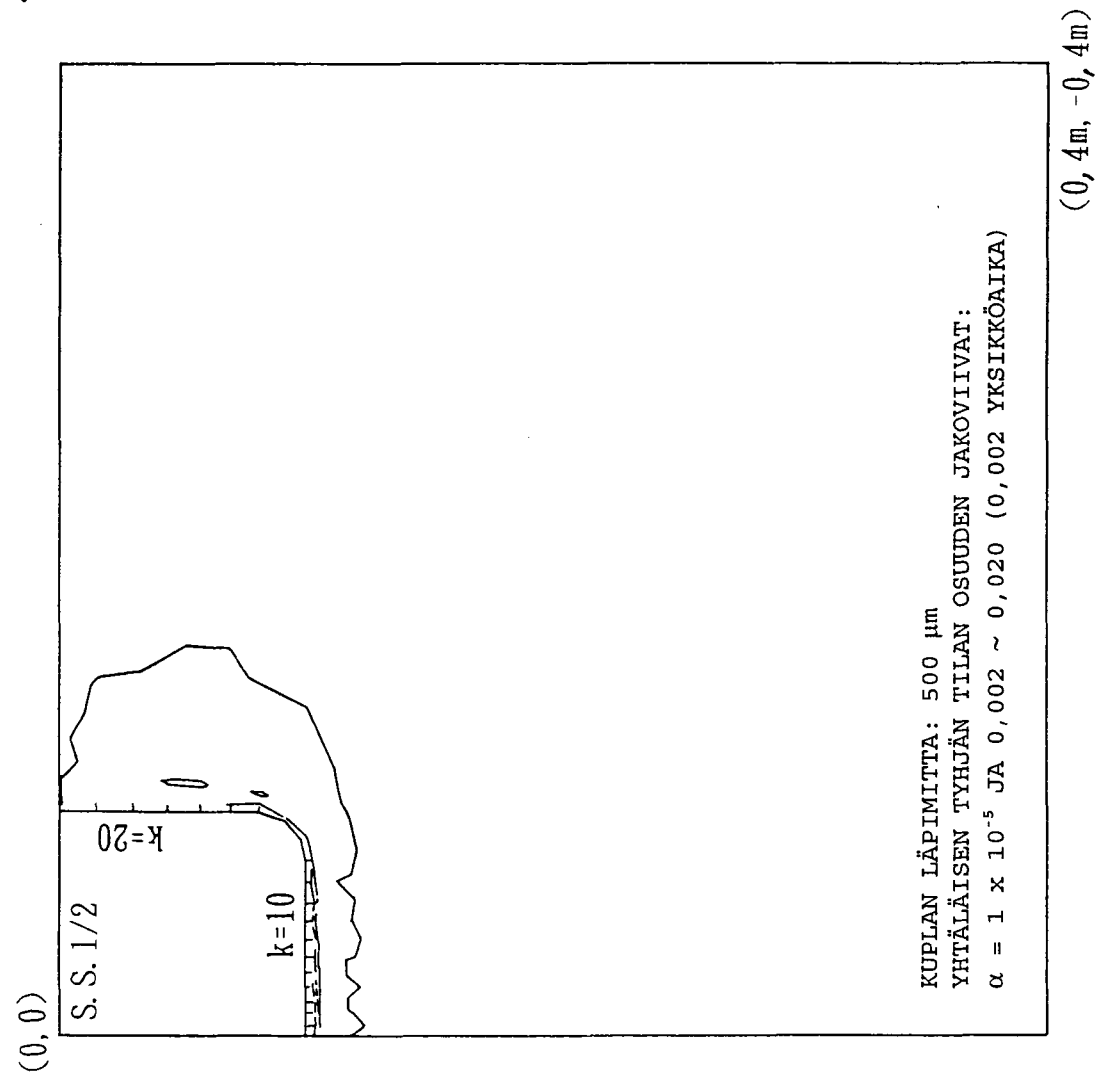


Kuvio 7

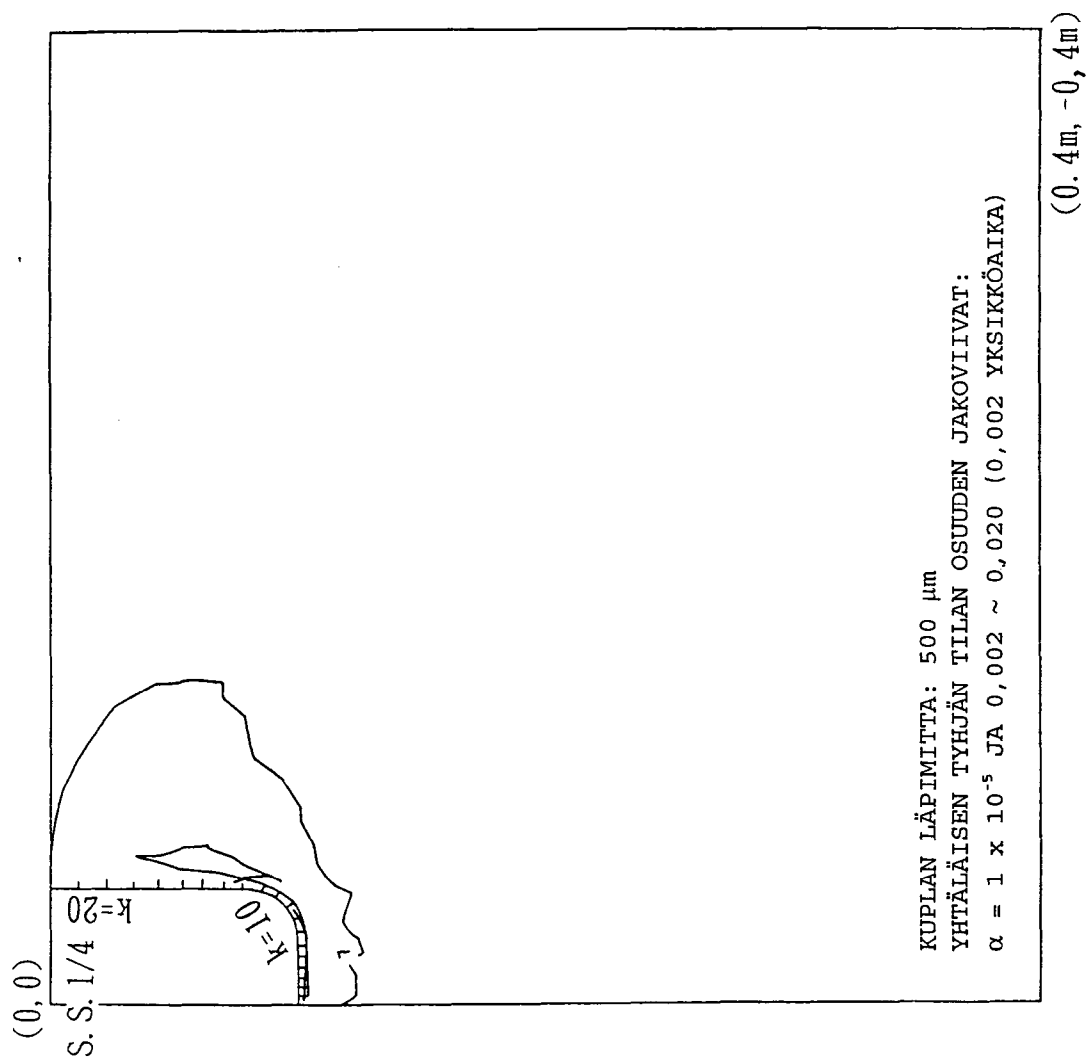


0010-98 880000

Kuvio 8



Kuvio 9



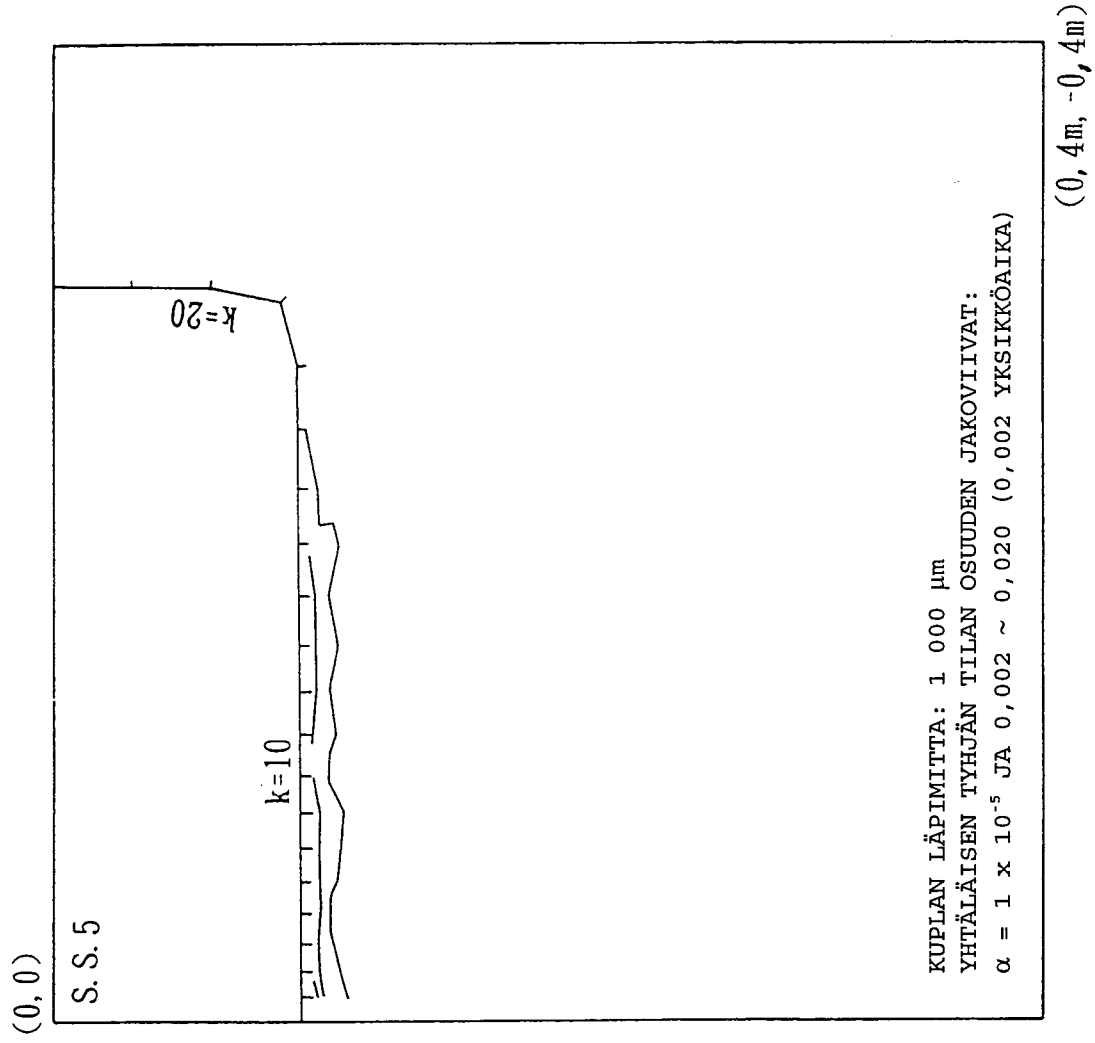
001088 882303

Kuvio 10

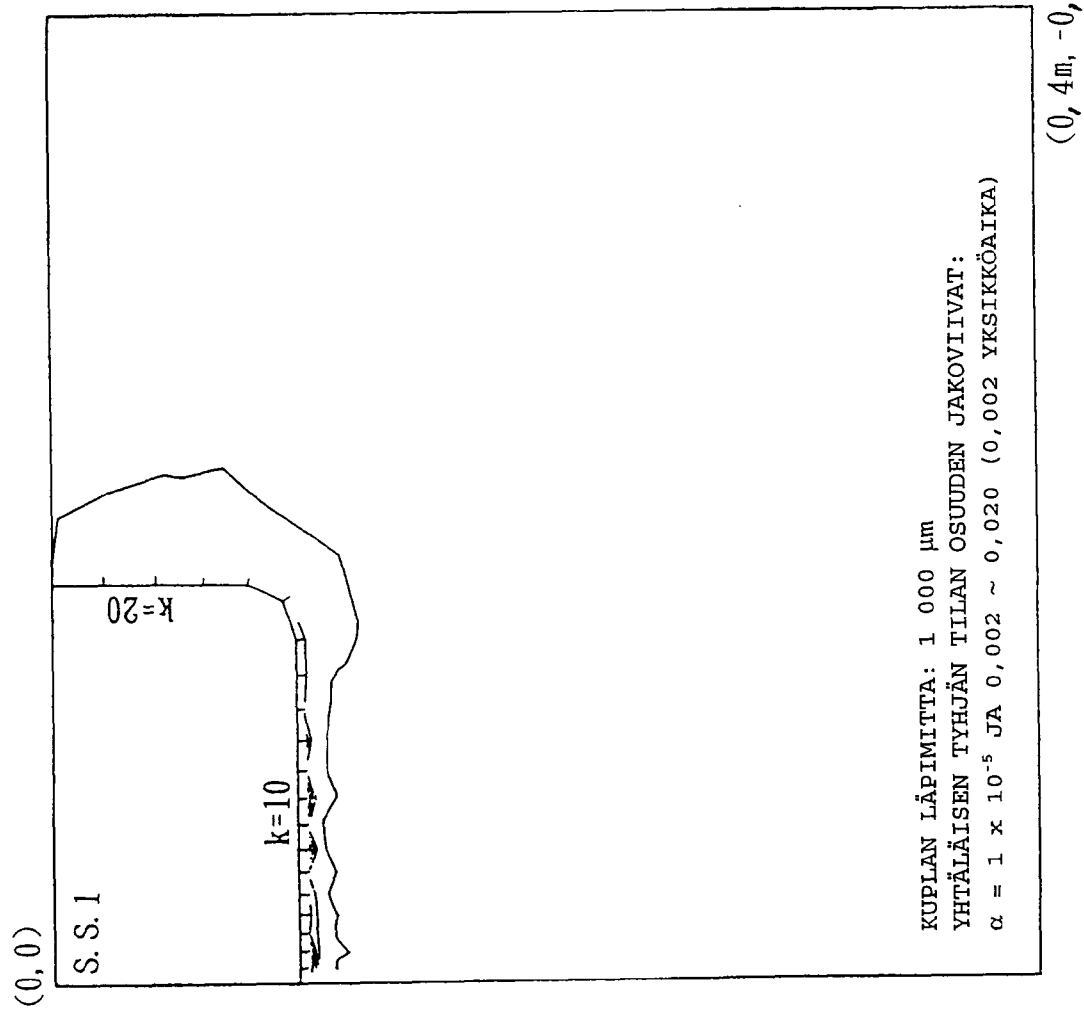
VASEMMAN PUOLEN POHJAN KUPLAJAKAUMA



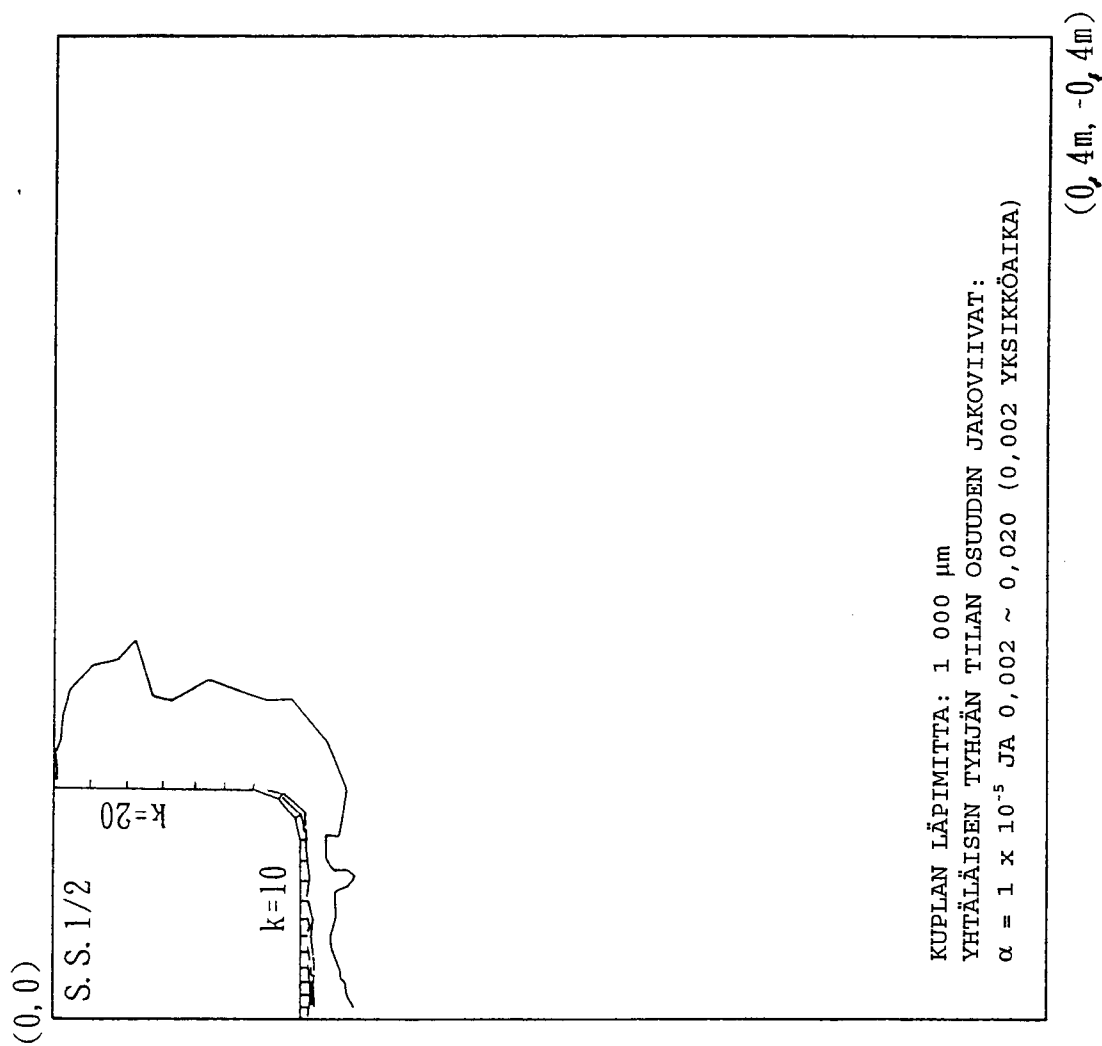
Kuvio 11



Kuvio 12



Kuvio 13



Kuvio 14

