

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΦΥΣΑΛΙΔΑΣ ΣΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

Ευθυμίου Κωνσταντίνος^{1,α}, Τσιγκλιφής Κωνσταντίνος^{2,α}, Πελεκάσης Νικόλαος^{3,α}

¹Υποψήφιος Διδάκτορας, ²Διδάκτορας, ³Καθηγητής

^αΕργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,
Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος

E-mails: konefthim@mie.uth.gr, kostastsigklifis@gmail.com, pel@mie.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Γίνονται προσομοιώσεις, με χρήση συνοριακών στοιχείων, της απόκρισης της μικροφυσαλίδας με ελαστικό περίβλημα (Contrast Agent ή CA) σε ακουστικές διαταραχές, προκειμένου να διαπιστωθεί το εύρος των ευσταθών ταλαντώσεων και το σημείο κατάρρευσής της, ανάλογα με τον καταστατικό νόμο του ελαστικού περιβλήματος το οποίο θεωρείται πολύ μικρού πάχους (τάξεως ~1nm). Το ιξώδες του κελύφους παρέχει τον κύριο μηχανισμό απόσβεσης, ενώ γίνεται θεώρηση δυναμικής ροής για το περιβάλλον ρευστό. Το κάθετο και εφαπτομενικό ισοζύγιο δυνάμεων στη διεπιφάνεια περιλαμβάνει τη σύζευξη της δυναμικής υπερπίεσης με τις εφελκυστικές και καμπτικές ελαστικές τάσεις μαζί με την ιξώδη απόσβεση στο κέλυφος. Επίσης, μελετάται η αλληλεπίδραση μικροφυσαλίδας με στερεό ή ελαστικό τοίχωμα, διατηρώντας την υπόθεση της αξονικής συμμετρίας και θεωρώντας ελαστικό λεπτότοιχο κέλυφος για τη φυσαλίδα.

Λέξεις Κλειδιά: Contrast Agent, Μέθοδος συνοριακών στοιχείων, καταστατικοί νόμοι μεμβράνης

1. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΜΙΚΡΟΦΥΣΑΛΙΔΑΣ CA ΜΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

Η παραμετρική μελέτη της μη γραμμικής ταλάντωσης και παραμόρφωσης μικροφυσαλίδας CA πραγματοποιείται με τον υπολογισμό του πεδίου ροής μέσω της συνάρτησης δυναμικού, θεωρώντας αστρόβιλη ροή στο περιβάλλον ρευστό. Λόγω της γραμμικότητας της Λαπλασιανής, που προκύπτει, αυτή αντικαθίσταται από μία ολοκληρωτική εξίσωση πάνω στη διεπιφάνεια που συνδέει το δυναμικό με την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας [Tsiglifis & Pelekasis (2010)]:

$$\Phi(r_0, z_0, t) = \int_{S_b} \frac{\partial \Phi}{\partial n}(r, z, t) G(r_0, z_0, r, z, t) dS_b - \int_{S_b} [\Phi(r, z, t) - \Phi(r_0, z_0, t)] \frac{\partial G}{\partial n}(r_0, z_0, r, z, t) dS_b + \int_{S_w} \frac{\partial \Phi}{\partial n}(r, z, t) G(r_0, z_0, r, z, t) dS_w - \int_{S_w} \Phi(r, z, t) \frac{\partial G}{\partial n}(r_0, z_0, r, z, t) dS_w \quad (1)$$

Η σχέση (1) γράφεται σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων και ενεργοποιούνται τα ολοκληρώματα (S_w) όταν μελετάται η αλληλεπίδραση μικροφυσαλίδας με γειτονικό τοίχωμα. Στη διεπιφάνεια μεταξύ του κελύφους και του περιβάλλοντος ρευστού (S_b) ισχύει η συνέχεια των κάθετων και εφαπτομενικών τάσεων, καθώς και η κινηματική συνθήκη για τη μετατόπιση των σωματιδίων που την απαρτίζουν. Μόνο η ακτινική συνιστώσα της μετατόπισης υπολογίζεται μέσω της κινηματικής συνθήκης, μιας και αγνοούνται οι ιξώδεις τάσεις στο περιβάλλον ρευστό. Η μεταβατική μορφή της εξίσωσης Bernoulli δίνει την πίεση σε κάθε σημείο του ρευστού και σε συνδυασμό με το ισοζύγιο κάθετων τάσεων, παρέχει τη δυναμική συνοριακή συνθήκη. Τέλος, η παραμόρφωση της μικροφυσαλίδας καθίσταται δυνατή επιτρέποντας τη ροπή λόγω διάτμησης μέσα στο κέλυφος, εισάγοντας την αντίσταση σε λυγισμό (bending elasticity) ως επί πλέον παράμετρο λόγω της ανισοτροπίας του κελύφους.

Λόγω της χρήσης του ιδιόμορφου πυρήνα της Λαπλασιανής και της αξονικής συμμετρίας, διακριτοποιείται μόνο μία καμπύλη, η γενέτειρα του σχήματος της μικροφυσαλίδας, με τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων και χρήση των πολωνύμων 3^{ου} βαθμού B-splines. Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, διότι καταγράφουν φαινόμενα που έχουν παρατηρηθεί και πειραματικά, όπως η εμφάνιση ταλαντώσεων σχήματος λόγω υπαρμονικού συντονισμού και η δημιουργία περιοχών υψηλής καμπυλότητας και ταχύτητας, ενώ διατηρείται η συνοχή και η αξονική συμμετρία της μικροφουσαλίδας CA.

Η επίλυση της αλληλεπίδρασης μικροφουσαλίδας με στερεό ή ελαστικό τοίχωμα, διατηρώντας την υπόθεση της αξονικής συμμετρίας και θεωρώντας ελαστικό λεπτότοιχο κέλυφος για τη φουσαλίδα, πραγματοποιείται με επέκταση του κώδικα για την ελεύθερη φουσαλίδα CA. Για το σκοπό αυτό χρειάζεται επιπλέον η διακριτοποίηση του τοιχώματος πέραν του κελύφους της μικροφουσαλίδας. Στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι το γειτονικό τοίχωμα έχει άπειρο μήκος σε σχέση με την ακτίνα της φουσαλίδας και γίνεται εξέταση του βέλτιστου αριθμού στοιχείων, ώστε να ανακτηθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του δυναμικού της ταχύτητας για μεγάλες αποστάσεις [Boulton-Stone & Blake (1993)].

2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια των ακουστικών διαταραχών και σε συμφωνία με τη γραμμική θεωρία, μετά από ένα συγκεκριμένο πλάτος ακουστικών διαταραχών εμφανίζονται μεταβολές στο σχήμα του κελύφους της μικροφουσαλίδας ως αποτέλεσμα συντονισμού. Όταν η μικροφουσαλίδα βρίσκεται σε αρμονικό συντονισμό με την εξωτερική διαταραχή, ιδίως για ψευδοπλαστικά (strain softening) κελύφη, η ανταλλαγή ελαστικής ενέργειας μεταξύ κάμψης και εφελκυσμού του κελύφους σταθεροποιεί τη μικροφουσαλίδα σε ευσταθείς αξονοσυμμετρικές ταλαντώσεις επιδεικνύοντας, σ' ένα μικρό βαθμό, μεγαλύτερη φάση συμπίεσης σε σχέση με τις ταλαντώσεις μικροφουσαλίδας χωρίς παραμορφώσεις σχήματος. Οι πιο ασταθείς σχηματισμοί της μικροφουσαλίδας συμβαίνουν κατά τη φάση της συμπίεσης με τρόπο παρόμοιο των διαθέσιμων πειραματικών παρατηρήσεων [Overvelde (2009)]. Όταν λαμβάνει χώρα υποαρμονικός συντονισμός, τότε η ανταλλαγή ενέργειας δε μπορεί να σταθεροποιήσει το πλάτος των ταλαντώσεων της μικροφουσαλίδας οδηγώντας τελικά σε κατάρρευσή της. Αυτό ισχύει και για ψευδοπλαστικά (strain softening) και για διασταλτικά (strain hardening) κελύφη. Καθώς το πλάτος των ακουστικών διαταραχών αυξάνεται περαιτέρω, παρατηρείται δυναμική παραμόρφωση της μικροφουσαλίδας, σε συμφωνία με τη γραμμική θεωρία και κατόπιν ακολουθεί η κατάρρευσή της. Ωστόσο, όταν αρχικά υπάρχουν παραμένουσες τάσεις στο κέλυφος, η έναρξη της δυναμικής παραμόρφωσης συμβαίνει νωρίτερα. Στην περίπτωση αυτή, η εναλλαγή της συμπεριφοράς του κελύφους από ψευδοπλαστικό (strain softening) σε διασταλτικό (strain hardening) σταθεροποιεί τη μικροφουσαλίδα, λόγω μείωσης της ακτίνας της και οδηγεί σε ισχυρή ιξώδη απόσβεση. Αυτή η διαδικασία μπορεί να εξηγήσει την έναρξη της «compression-only» συμπεριφοράς της μικροφουσαλίδας, σε σχετικά μικρού πλάτους ακουστικές διαταραχές [Overvelde (2009)], ως αποτέλεσμα της τοπικής αναδίπλωσης του κελύφους δημιουργώντας δομές λιπιδίου διπλής στοιβάδας [Lee (2008)].

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Boulton-Stone & Blake, *J. Fluid Mechanics* **254**, 437-466, (1993)
 Lee, *Ann. Rev. Phys. Chem.* **59**: 771-791, (2008)
 Overvelde *Ph.D. Thesis*, University of Twente, (2009)
 Tsiglifis & Pelekasis, *Phys. Fluids*, **23** 012102 (2011)
 Tsiglifis & Pelekasis, *Physics of Fluids*, **17**(10), 1-18, (2005)

ABSTRACT

Boundary element simulations of pulsating microbubbles with elastic integument (Contrast Agents or CA) in response to an acoustic disturbance are performed in order to ascertain the range of stable pulsations vs. transient break-up depending on the constitutive law of the coating considered as a shell of very small thickness (order ~1nm). Shell viscosity provides the main dissipation mechanism while potential flow is assumed in the surrounding fluid. The normal and tangential force balance on the interface involves coupling of the dynamic overpressure with the stretching and bending elastic stresses along with viscous dissipation on the shell. Interaction between a microbubble and a rigid or elastic wall are also studied, assuming axisymmetry and elastic thin shell for the microbubble.