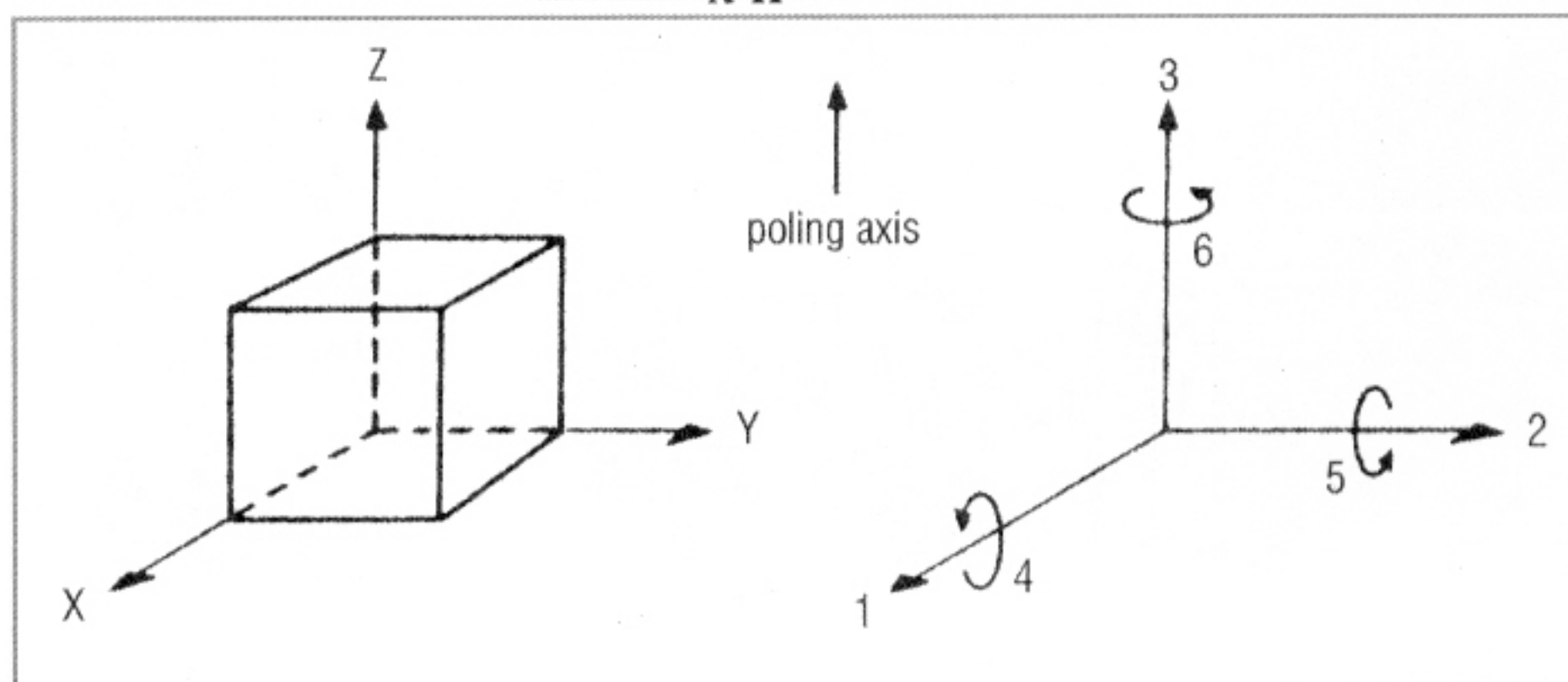


■ 7.2 Χαρακτηριστικά των Πιεζοηλεκτρικών Κεραμικών

Είναι απαραίτητο πριν παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά, να δοθούν οι πληροφορίες που απαιτούνται, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η κατανόησή τους. Στο σχ. 7.4 δίνεται η σχεδίαση των αξόνων των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Συμβολικά οι άξονες X, Y, Z αντικαθιστώνται από τους αριθμούς 1, 2, 3 και η περιστροφή γύρω από αυτούς τους άξονες από τα 4, 5, 6, αντίστοιχα. Οι αριθμοί αυτοί χρησιμοποιούνται ως δείκτες σε μερικά χαρακτηριστικά, όπως π.χ. το ϵ_{11}^T δηλώνει τη διηλεκτρική διαπερατότητα για μετατόπιση και ηλεκτρικό πεδίο στη διεύθυνση 1 με σταθερή μηχανική τάση. Ομοίως το k_{15} δηλώνει το συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης στη διεύθυνση 1 με περιστροφή (παραμόρφωση) στην 5 (shear mode).

Στον πίνακα 7.1 δίνονται οι τυπικοί τρόποι δόνησης των πιεζοηλεκτρικών υλικών, οι συχνότητες συντονισμού και τα σύμβολα σταθεράς των υλικών. Σ' όλες τις περιπτώσεις οι διευθύνσεις των E και P είναι παράλληλες, εκτός της τελευταίας. Στον ακτινικό τρόπο η πόλωση P είναι προσανατολισμένη κατά το πάχος του δίσκου. Στον κατά μήκος τρόπο η δόνηση είναι κάθετη στην πόλωση και υπάρχει ένα σημείο συντονισμού. Στο διαμήκη τρόπο η δόνηση είναι προσανατολισμένη κατά μήκος της πόλωσης με ένα σημείο συντονισμού. Στον κατά πάχος τρόπο η δόνηση είναι παράλληλη με την πόλωση και υπάρχουν πολλά σημεία συντονισμού και τέλος ο γωνιακός τρόπος (γωνιακή παραμόρφωση χωρίς αλλαγή στον όγκο) είναι αποτέλεσμα της καθετότητας των E και P .

Σχήμα 7.4



Ας δούμε τώρα τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτών των υλικών.

- 1) Σταθερά συχνότητας N : η ταχύτητα διάδοσης του ήχου διαμέσου ενός πιεζοηλεκτρικού κεραμικού έχει μια ειδική τιμή για κάθε τρόπο δόνησης, όταν η συχνότητα συντονισμού ενός άλλου τρόπου δόνησης δεν είναι γειτονική. Ισχύει δε:

$$\frac{\lambda}{2} = \ell \text{ (m)} \quad 7.1$$

όπου λ =μήκος κύματος δόνησης και ℓ =μήκος διάδοσης στη συχνότητα συντονισμού. Επειδή δε η ταχύτητα του ήχου είναι σταθερή έχουμε:

$$u = f_r \cdot \lambda \text{ (m/sec)} \quad 7.2$$

$$\text{και} \quad f_r \cdot \ell = \frac{u}{2} = N \text{ (m/sec ή Hz} \cdot \text{m)} \quad 7.3$$

όπου $N=n$ σταθερά συχνότητας εξαρτώμενη από το τρόπο δόνησης.

Από τη σχέση 7.3 έχουμε $f_r = \frac{N}{\ell}$ (Hz) και βρίσκουμε τη συχνότητα συντονισμού.

- 2) Μηχανικό Q_m : εκφράζει την κλίση της καμπύλης γύρω από τη συχνότητα συντονισμού των μηχανικών δονήσεων και είναι:

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi f_r R_1 C_1 \left[1 - \left(\frac{f_r}{f_a} \right)^2 \right]} \quad 7.4$$

όπου R_1 =αντίσταση συντονισμού και C_1 =ελεύθερη χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων (δες ισοδύναμο κύκλωμα πιεζοηλεκτρικών κεραμικών).

- 3) Λόγος του Poisson σ^E : όταν σ' ένα ελαστικό σώμα εφαρμόζεται μια σταθερή μηχανική τάση μέσα στα όρια της ελαστικής περιοχής, τότε ο λόγος αυτός είναι:

$$\sigma^E = \frac{\text{ρυθμός παραμόρφωσης κάθετης στη μηχανική τάση}}{\text{ρυθμό παραμόρφωσης κατά μήκος της τάσης αυτής}} \leq 0,5$$

- 4) Μέτρο του Young Y^E : για ένα ελαστικό σώμα και μέσα στα όρια της ελαστικής του περιοχής ορίζεται ως:

$$Y^E = \frac{\text{εφελκυστική τάση ανά μονάδα επιφάνειας}}{\text{αύξηση του μήκους ανά μονάδα μήκους}} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

και το αντίστροφο $S^E = \frac{1}{Y^E}$ καλείται σταθερά ελαστικότητας ή ενδοτικότητα (compliance). Είναι γνωστό από το νόμο του Hooke (ελαστικότητας) ότι:

$$S = S^E \cdot T \quad 7.5$$

όπου S =παραμόρφωση στον όγκο ή στο σχήμα ενός σώματος ή μέρους αυτού που οφείλεται στη μηχανική τάση και T =μηχανική τάση (stress).

Για τον κατά μήκος τρόπο π.χ. έχουμε:

$$Y_{11}^E = u^2 \cdot \rho = (2\ell f_r)^2 \cdot \rho \text{ (N/m}^2\text{)}$$

όπου ρ =πυκνότητα υλικού και u =ταχύτητα ήχου.

Γενικά η απόκριση ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού υπό μηχανική τάση θα είναι η σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρικών και μηχανικών παραμέτρων. Κατά προσέγγιση είναι:

$$S = S^E \cdot T + d \cdot E \quad 7.6$$

αφού δε: $d = g \cdot \epsilon^T$ και $\epsilon^T \cdot E = D$ τότε:

$$S = S^D T + gD \quad 7.7$$

όπου S^E , S^D οι ειδικές ενδοτικότητες για σταθερό E και D αντίστοιχα.

- 5) Σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ^T/ϵ_0 : είναι ο λόγος της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ^T προς τη διηλεκτρική σταθερά του κενού $\epsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12}\text{F/m}$. Για τον κατά μήκος τρόπο δόνησης – πίνακας 7.1 – ισχύει:

$$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = \frac{C_f \cdot t}{\ell \cdot a \cdot \epsilon_0} \quad 7.8$$

ενώ για τον κατά πάχος τρόπο, ομοίως:

$$\frac{\epsilon_{11}^T}{\epsilon_0} = \frac{C_f \cdot t}{\ell \cdot a \cdot \epsilon_0} \quad 7.9$$

εφόσον η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων στο 1KHz αποτελείται από τη $C_f = C_1 + C_0$ (δες ισοδύναμο κύκλωμα).

6) Πιεζοηλεκτρικές σταθερές d και g:

α. Σταθερά πιεζοηλεκτρικής παραμόρφωσης d: είναι η παραμόρφωση που προκύπτει από την εφαρμογή ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου χωρίς μηχανική τάση σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό και ισούται με:

$$d = k \sqrt{\frac{\epsilon^T}{Y^E}} \left(\frac{m}{V} \right) \quad 7.10$$

$$\text{ειδικά δε: } d_{31} = k_{31} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{Y_{11}^E}}, d_{33} = k_{33} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{Y_{33}^E}}, d_{15} = k_{15} \sqrt{\frac{\epsilon_{11}^T}{Y_{44}^E}}.$$

β. Συντελεστής τάσης εξόδου g: αναφέρεται στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που προκύπτει από μια ομοιόμορφη κρούση, η οποία εφαρμόζεται χωρίς ηλεκτρική μετατόπιση και είναι:

$$g = \frac{d}{\epsilon^T} \left(\frac{V \cdot m}{N} \right) \quad 7.11$$

$$\text{ειδικά δε: } g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33}^T}, g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T}, g_{15} = \frac{d_{15}}{\epsilon_{11}^T}.$$

Οι σταθερές d και g εξαρτώνται από τον τρόπο δόνησης και δίνονται στον πίνακα 7.1. Στον κατά μήκος τρόπο, για παράδειγμα, η παραμόρφωση $\Delta \ell$ που οφείλεται στην εφαρμοζόμενη τάση U μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι:

$$\Delta \ell = d_{31} \cdot \frac{\ell}{t} \cdot U \text{ (m)} \quad 7.12$$

ενώ, αντιστρόφως, η τάση που αναπτύσσεται από την εφαρμοζόμενη δύναμη F κατά μήκος της διεύθυνσης δόνησης είναι:

$$U = g_{31} \cdot \frac{1}{a} \cdot f(V) \quad 7.13$$

- 7) Ηλεκτρομηχανικός συντελεστής σύζευξης k : δείχνει την ικανότητα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και ισούται με:

$$k = \sqrt{\frac{\text{ωφέλιμη μηχανική ενέργεια}}{\text{παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια}}}$$

Αυτή εξαρτάται από τον τρόπο δόνησης και βρίσκεται από τη σχέση $\Delta f = f_a - f_r$, όπου f_a =συχνότητα αντισυντονισμού και f_r =συχνότητα συντονισμού. Από τις σχέσεις 7.6 και 7.7 έχουμε

$$k^2 = \frac{d^2}{S^E \cdot \epsilon^T} \quad \text{ή} \quad \frac{k^2}{1 - k^2} = \frac{g^2 \cdot \epsilon^T}{S^D}$$

Έτσι έχουμε:

- α) Για τον ακτινικό ή επιπεδικό τρόπο δόνησης $k_p = k_r$ και για σχετικά μικρές τιμές του k_r :

$$k_r^2 = 2.529 \frac{\Delta f}{f_r} \quad 7.14$$

- β) Για τον κατά μήκος τρόπο δόνησης:

$$\frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r}\right) \quad 7.15$$

- γ) Για τους υπόλοιπους τρεις τύπους δόνησης:

$$k_{33}^2 \text{ ή } k_t^2 \text{ ή } k_{15}^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right) \quad 7.16$$

όπου k_{33}^2 για τον διαμήκη, k_t^2 για τον κατά πάχος και k_{15}^2 για το γωνιακό τρόπο δόνησης.

Ο ηλεκτρομηχανικός συντελεστής σύζευξης δίνεται ως $k\%$.

Από τους κατασκευαστές δίνονται επίσης και άλλα χαρακτηριστικά, όπως ο συντελεστής απωλειών $\tan\delta\%$, οι θερμοκρασιακοί συντελεστές T.C (f_r) και T.C (C_f) ppm/ $^{\circ}\text{C}$ για radial mode, η θερμοκρασία Curie, η ειδική αντίσταση ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) κ.λπ.