

Kayıplı Dielektrik Cisimlerin Mikrodalga ile Isıtılması ve Uç Etkileri

Orhan Orhan*

Sedef Kent**

E. Fuad Kent***

*University of Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Fürstenallee 11, 33102 Paderborn, Almanya

orhan@hni.upb.de

**Istanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik- Elektronik Fakültesi, 80626, Maslak, İstanbul

kent@ehb.itu.edu.tr

***Istanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, 80191, Gümüşsuyu, İstanbul

kente@itu.edu.tr

Özet: Bu çalışmada kayıplı dielektrik cisimlerin mikrodalga ile ısıtılmaları ve malzemenin uç etkisinin ısınma üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Düzlem dalga ile aydınlatılan ve farklı geometrik yapıya sahip cisimlerin ısınma paterni çıkarılmıştır. Bu amaçla kayıplı dielektrik cisim metal bir levha ile sonlandırılarak kaskad transmisyon hat modeli ile modellenmiş ve cisim içindeki elektrik alan hesaplanmıştır.

1. Giriş

Endüstride ticari, bilimsel ve tıbbi alanlarda yaygın olarak kullanılan mikrodalgalar pişirme, kurutma, eritme, sterilizasyon, pastörizasyon ve polimerleştirme gibi işlemlerde yer almaktadır [1]-[2]. Cismin içindeki sıcaklık artışı iç elektrik alan dağılımının bilinmesi surumunda hesaplanabilir. Bu amaçla seçilen geometrinin düzlem dalga aydınlatması altında modellenmesi yararlı olacaktır. [3]-[6] bu türden modellere yer vermiştir. Bilindiği gibi kayıplı dielektrik cisimler belli miktarda iletkenliğe sahiptirler. Mikrodalga frekanslarında, bu dağıtıcı özellik malzemenin dielektrik kayıp tanjantı ile belirlenir. Kompleks dielektrik sabiti açısıl frekans ω 'nın bir fonksiyonudur ve

$$\epsilon = \epsilon_0 (\epsilon' - j \epsilon'') = |\epsilon| \exp(-j\delta) = \epsilon_0 (\epsilon' - j \sigma / \omega \epsilon_0) \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\epsilon_0 = 8.85418 \cdot 10^{-12}$ F/m serbest uzayın geçirgenliğini, ϵ' ve ϵ'' ise bağlı dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımlarını ifade etmektedir. Malzemenin içindeki alan dağılımı biliniyorsa, aydınlatmadan dolayı cisim içinde ortaya çıkacak ısı dağılımı [7]:

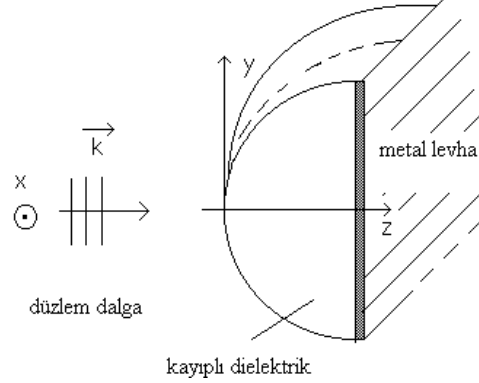
$$P = \sigma |E_i|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E_i|^2 \quad (2)$$

şeklinde tanımlanır. Zamanda harmonik elektromagnetik alan için, P zamanda sabittir. Cismin içinde oluşan elektrik alan E_i dış ortamdaki elektrik alan E_{oi} 'den farklıdır. Dolayısıyla içerideki elektrik alanın hesaplanması için şu yöntemlerden biri kullanılabilir: ışın-optik, geometrik optik, zaman domeni fiziksel optik (TDPO), zaman domeni integral denklemi (TDIE), iteratif veya varyasyonel teknik, moment metodu, sonlu fark zaman domeni (FDTD) tekniği. Konu ile ilgili kaynak taraması [8] de incelenebilir.

2. Kayıplı cismin modellenmesi

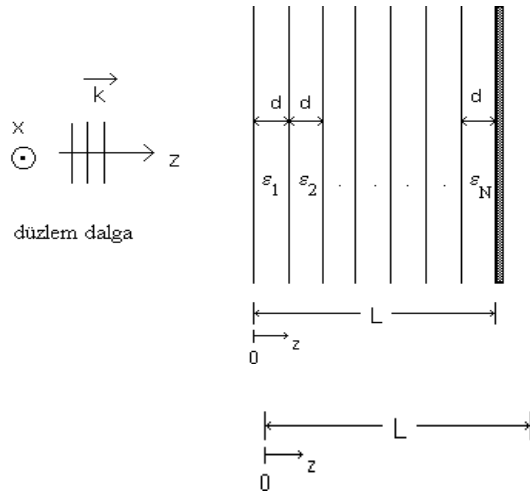
Kayıplı dielektrik cisimi aydınlatan üniform harmonik düzlem dalga Şekil 1'de gösterilmektedir. Cismin magnetik geçirgenliği serbest uzayinkine eşit alınmıştır, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Cisim metal bir levha ile sonlandırılmıştır. Zamana bağımlılık ise $\exp(+j \omega t)$ alınmış ve bastırılmıştır. Sınırlandırılmamış ortamda x-polarizasyonlu ve +z yönünde ilerleyen bir dalga için gelen elektrik alan E_{oi} sadece x bileşenine sahiptir. $E_{oi} = e_x E_0 \exp(-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$.

Burada E_0 bir sabit, \mathbf{k} serbest uzay propagasyon vektörüdür. k_0 dalga sayısı, λ serbest uzay dalgabouyu, \mathbf{r} koordinat vektörüdür. Elektrik alan $\mathbf{E}_{oi} = \mathbf{e}_x E_0 \exp(-j k_0 z)$ şeklinde ifade edilir ve $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ bağıntısını sağladığı kolaylıkla gösterilebilir.



Şekil 1. Problem Geometrisi

Kayıplı dielektrik cisim sonsuz sayıda kaskat bağlı transmisyon hattı ile modellenmiştir. Modelde hat sayısının N olduğu ve son hattın mükemmel iletken metal levha ile sonlandırıldığı varsayılmıştır. Hattın toplam uzunluğu L kadardır. Her hat farklı dielektrik sabiti ve karakteristik empedansa sahiptir. η_i i.-hattın karakteristik empedansını göstermektedir ve $\eta_i = |E_i| / |H_i| = \eta_0 / (\epsilon_i)^{1/2}$, propagasyon sabiti γ_i ise $\gamma_i = j \omega (\mu_0 \epsilon_i)^{1/2}$. Şekil 2'deki durumda serbest uzaydaki (ϵ_0, μ_0) düzlem dalga $z=0$ noktasında tabaka-1'e (ϵ_1, μ_0) dik olarak gelir. Tabaka-1 sabit kalınlıktadır ve tabaka-2 (ϵ_2, μ_0) ile $z=d$ 'de bitişiktir. $z=0, z=d, z=2d, \dots$ de yansımalar meydana gelir. $E_0 = 1$ varsayarsak, serbest uzaydaki toplam alan gelen alan bileşeni $\mathbf{e}_x \exp(-j k_0 z)$ ile yansıyan alan bileşeni $\mathbf{e}_x A_1 \exp(j k_0 z)$ toplamına eşittir.



Şekil 2. Kayıplı Malzemenin Transmisyon Hat Modeli

Magnetik alan vektörü \mathbf{H}_0 ise

$$\mathbf{H}_o = \mathbf{e}_y \frac{1}{\eta_o} (e^{-jk_o z} - A_1 e^{jk_o z}) \quad (3)$$

Tabaka-1'deki elektrik ve magnetik alanlar aynı zamanda ileri ve geri yöndeki dalgaların toplamı olarak da ifade edilebilir:

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{e}_x (A_2 e^{-\gamma_1 z} + A_3 e^{\gamma_1 z}) \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{e}_y \frac{1}{\eta_1} (A_2 e^{-\gamma_1 z} - A_3 e^{\gamma_1 z}) \quad (5)$$

N-tabaka için

$$\mathbf{E}_N = \mathbf{e}_x (A_{2N} e^{-\gamma_N z} + A_{2N+1} e^{\gamma_N z}) \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_N = \mathbf{e}_y \frac{1}{\eta_N} (A_{2N} e^{-\gamma_N z} - A_{2N+1} e^{\gamma_N z}) \quad (7)$$

Denklem (3)-(7)'nin sağ tarafları toplam $2N+1$ bilinmeyen genlik ($A_1, A_2, \dots, A_{2N+1}$) içermektedir. Bu denklemler elektrik ve magnetik alanların teğetsel bileşenlerinin sürekliliğinden kaynaklanan sınır koşulları ile çözülebilir.

$$\begin{aligned} z=0, \quad \mathbf{E}_o(0) = \mathbf{E}_1(0), \quad & \rightarrow \quad 1+A_1 = A_2 + A_3 \\ \mathbf{H}_o(0) = \mathbf{H}_1(0), \quad & \rightarrow \quad (1/\eta_o) (1 - A_1) = (1/\eta_1) (A_2 - A_3) \\ z=d, \quad \mathbf{E}_1(d) = \mathbf{E}_2(d), \quad & \rightarrow \quad \dots\dots\dots \\ \mathbf{H}_1(d) = \mathbf{H}_2(d), \quad & \rightarrow \quad \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ z=L, \quad \mathbf{E}_N(L) = \mathbf{e}_x (A_{2N} e^{-\gamma_N L} + A_{2N+1} e^{\gamma_N L}) = 0 \\ \mathbf{H}_N(L) = \mathbf{e}_y \frac{1}{\eta_N} (A_{2N} e^{-\gamma_N L} - A_{2N+1} e^{\gamma_N L}) \end{aligned}$$

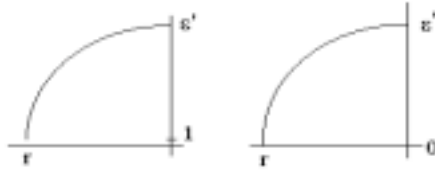
Denklemler matrisel halde düzenlenirse $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ yazılabilir. Burada \mathbf{x} bilinmeyen genlikleri gösteren vektördür.

$$\mathbf{x} = [A_1, A_2, \dots, A_{2N+1}]^T \quad \mathbf{b} = [-1, -1/\eta_o, 0, 0, \dots, 0]^T$$

T üst indisi sütun vektörün transpozisini göstermektedir. \mathbf{A} $2N+1 \times 2N+1$ boyutlu tersi alınabilir bir band matristir. Buna göre $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}$ ile bulunur ve içindeki elektrik alan her tabakadaki genlikleri kullanarak hesaplanır. Yüzeyde yansıma küçükse malzemenin dışında kalan dış bölgede duran dalgalar kolaylıkla gözlenemeyecektir. Cisim içindeki elektrik alan da metal levhaya doğru hızla azalacaktır. İçteki duran dalga tepeleri sıcaklık artışlarına neden olur. i- tabakada sıcaklık artışı ise $\Delta T = \epsilon_i'' |E_i|^2$.

3. Sayısal Yöntem

Çok katmanlı modelleme kullanılarak cisim içindeki elektrik alanın bulunması için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. $\epsilon_r=4.4-j0.51$ ve $\epsilon_r=2.5-j0.125$ alınarak elde edilen ısı dağılımı incelendiğinde sıcaklığın yüzeye yakın bölgede maksimum değerine ulaştığı gözlenmiştir. Keskin ve yumuşak geçişli uç etkilerinin yol açtığı sıcaklık değişimleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Kayıplı dielektrik madde Şekil 3'teki gibi azalan kompleks dielektrik sabitine sahiptir. Uygulanan frekans 2.45 GHz, transmisyon hat sayısı $N=250$ 'dir . Simülasyonda ilk olarak silindirik cismin yarıçapı elektromagnetik dalga boyundan büyük ($r \sim 2\lambda$), 25 cm, ardından dalga boyundan küçük ($r \sim \lambda/3$), 6 cm seçilmiştir ($T=-20$ °C de dondurulmuş biftek $\epsilon=4.4-j0.51$ [1]). Toplam yansımaya katsayıları sırasıyla $\Gamma_1=0.20$ ve $\Gamma_2=0.43$ bulunmuştur. Γ_1 Γ_2 'den küçük olduğu için ilk durumda oluşan duran dalgalar ikinci durumdakinden daha küçüktür. Sıcaklık dağılımları Şekil 4-(a) ve (b)'de verilmiştir. Şekil 4-(a) sıcaklık dağılımının yüzeye yakın bölümde maksimuma çıktığını (malzeme yüzüne yaklaşık $\lambda/2$ kadar uzaklıkta) ve ardından hızla düştüğünü göstermektedir. Sekiz sıcak nokta gözlenmektedir. Şekil 4-(b) de ise iki sıcak nokta tespit edilmiştir. Metale yakın olan tepe daha yüksek genliktedir. Şekil 4-(b)'deki sıcaklık artışı da Şekil 6-(a)'dan daha yüksektir. Aynı sıcaklık dağılımı $\epsilon=2.5-j0.125$ (tütülenmiş jambon, $T=25$ °C [1]) Şekil 5-(a) ve (b)'de verilmiştir. Toplam yansımaya katsayıları $\Gamma_1=0.40$ ($r=25$ cm) ve $\Gamma_2=0.79$ ($r=10$ cm) olarak bulunmuştur. Şekil 5-(a)'da sıcaklık dağılımı neredeyse düzgündür. Bu durumda cisim içindeki ısıtma işlemi üniform olacaktır. Şekil 5-(b)'de üç sıcak tepe gözlenmektedir. En büyüğü metal levhaya yakındır. Cisimlerin sivri uç yerine küt uçlu olmaları durumunda yansımaya katsayısı daha yüksek olmaktadır. Benzer şekilde belli bir açı altındaki uçlar (35 dereceden büyük) da sivri uçlara göre daha yüksek duran dalga oranı ve sıcak tepe oluşturmaktadır.



Şekil 3. Kayıplı Dielektrik Cisim Modeli

Sonuçlar

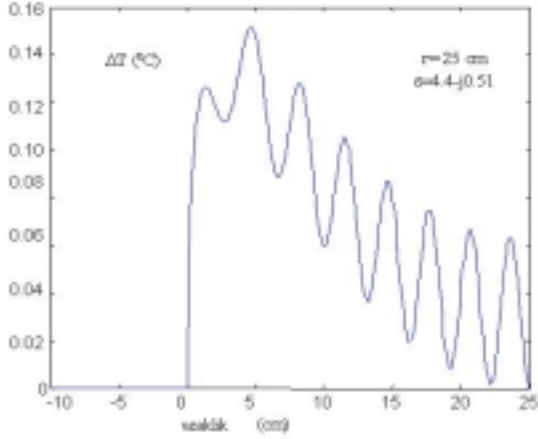
Bu çalışmada transmisyon hatları ile dik gelişli düzlem dalga propagasyonu arasında bir benzeşim kurulmuştur. Böylece alan problemi dağılmış parametrelili devre problemine indirgenmiştir. Ortam sonsuz sayıda kaskat bağlı transmisyon hatları ile modellenmiş ve metal bir levha ile sonlandırılmıştır. kayıplı ortamlardaki yansımaya ve transmisyon sayısal olarak çözülmüş ve içindeki elektrik alan dağılımı belirlenmiştir. Seçilen cisimler içinde sıcaklık artışları belirlenmiştir. Modelleme cisim içindeki sıcaklık dağılımının büyüklük, şekil ve kayıp tanjantı ile bağlantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Önerilen modelin farklı şekillerdeki cisimlere kolaylıkla uygulanması mümkündür.

Kaynaklar

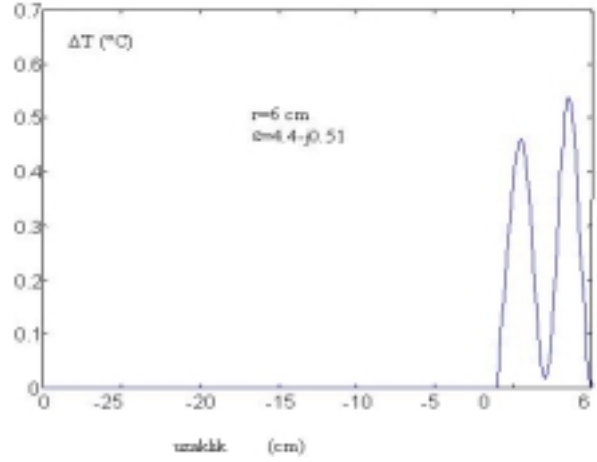
- [1] Thuéry, J. 1992. Microwaves: Industrial, Scientific and Medical Applications. Artech House.
- [2] Stuchly, M.A. and Stuchly, S.S. 1983. Industrial, scientific, medical and domestic applications of microwaves. Proc. IEE-A 128:467-503.
- [3] Jansen, W.J.L. 1993. Energy efficient transfer of microwave power to thin lossy dielectrics. J. Microwave Power 28:45-53.
- [4] Soriano V., Devece, C. and de los Reyes, E. 1998. A finite element and finite difference formulation for microwave heating laminar material. J. Microwave Power 33:67-76.
- [5] Pelesko, J.A. and Kriegsmann, G.A. 1997. Microwave heating of ceramics. J. Engineering Mathematics. 32:1-18.
- [6] Stern, C.H. 1998. A transient heat transfer model for selective microwave heating of multilayer material systems. J. Microwave Power 33:207-215.

[7] Osepchuk, J.M. 1984. A history of microwave heating applications. IEEE Trans. Microwave, Theory and Tech. 32:1200-1224.

[8] Kent S. Kent, E.F. Kent, Microwave Heating of Dielectric Objects, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2002'de basılacak.

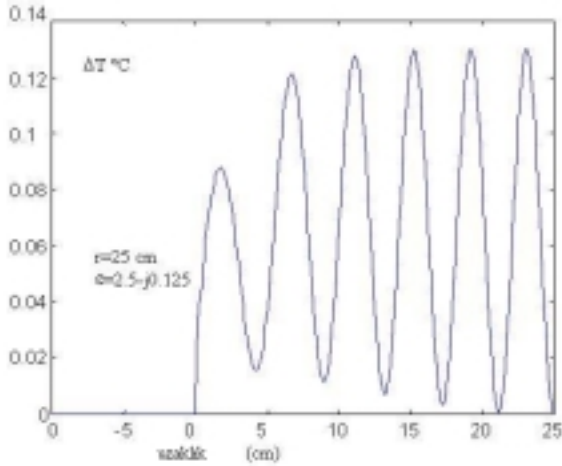


(a)

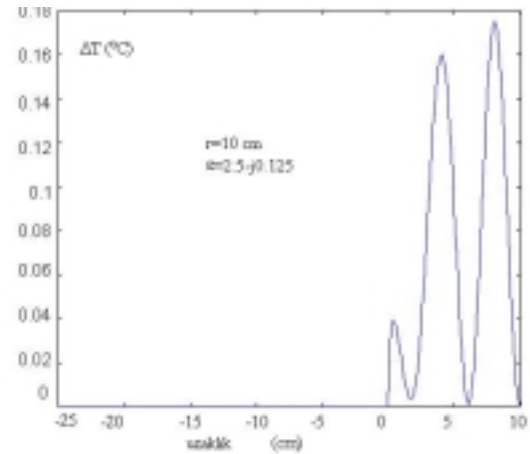


(b)

Şekil 4-(a) $r = 25$ cm, $\epsilon = 4.4-j0.51$ için Sıcaklık Dağılımı -(b) $r = 6$ cm, $\epsilon = 4.4-j0.51$ için Sıcaklık Dağılımı



(a)



(b)

Şekil 5-(a) $r = 25$ cm, $\epsilon = 2.5-j0.125$ için Sıcaklık Dağılımı -(b) $r = 10$ cm, $\epsilon = 2.5-j0.125$ için Sıcaklık Dağılımı