

Elektromanyetik Uyumluluk Standartları ve Bilgisayar Simülasyonları

Levent Gürel

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Bilkent Üniversitesi

06533 Bilkent, Ankara

Tel: (312) 290-2096

Fax: (312) 266-4307

e-mail: lgurel@ee.bilkent.edu.tr

Özet

Bu bildiri, elektromanyetik uyumluluk problemi genel olarak tanıtılacak ve bu problemin çözümü için dünyada yaygın olarak izlenen yöntemler açıklanacaktır. Problemin çözümünde çok önemli bir yer tutan standartlar üstünde özellikle durulacaktır. Hem insan sağlığı, hem de elektronik aletlerin güvenli çalışması açısından elektromanyetik kirliliğin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Gelişmiş ülkelerde kullanılan standartların elektromanyetik kirlilik kontrolünü nasıl sağladıkları açıklanacaktır.

Ek olarak, sayısal elektromanyetik biliminin elektromanyetik uyumluluk problemlerinin çözümünde nasıl kullanılabileceği anlatılacaktır. Ayrıca, tipik elektromanyetik uyumluluk problemlerinin analizinde karşılaşılan sayısal problemlerin geleneksel metodlarla çözülemeyecek kadar büyük oldukları ve bu çeşit problemlerin çözülebilmeleri için yeni geliştirilen hızlı çözüm tekniklerinin kullanılmasının gerektiği açıklanacaktır. Hızlı ve düşük karmaşıklığa sahip çözüm teknikleri geliştirerek hem sayısal elektromanyetik bilimimize katkıda bulunmayı; hem de endüstrimizin gereksinmesi olan ve gerçek yaşamda önem taşıyan, ancak büyüklükleri nedeniyle bugüne dek sayısal olarak çözümü gerçekleştirilememiş elektromanyetik uyumluluk (EMU, EMC) problemlerinin çözümünü hedefliyoruz.

Elektromanyetik Uyumluluk Hakkında Genel Bilgiler

Elektromanyetik uyumluluk (*electromagnetic compatibility*: EMC), elektronik ve elektrikli aygıt, gereç ve sistemlerin içinde buldukları

elektromanyetik (EM) ortamlarında, kendileri çok yüksek EM ışımları yaratmamak koşuluyla, normal ve tatminkar çalışmalarını yerine getirebilmeleri, birbirleriyle uyum içinde yaşayabilmeleridir. Örneğin, aynı EM ortamında bulunan bir araba, bir elektrik süpürgesi, bir televizyon, bir bilgisayar, bir telsiz telefon ve bir insanın kalbine bağlı *PaceMaker*'dan çıkan EM dalgaların yüksekliklerinin ve sıklıklarının, bu aygıtların birbirlerine zarar vermeden, uyum içinde çalışabilecekleri şekilde düzenlenmesi gerekiyor. Benzer şekilde, aynı ortamı paylaşan bir radar, bir alıcı/verici telsiz ve bir uçağın savaş sistemlerini denetleyen mikroişlemci kartının da birbirlerine zarar vermeden, uyum içinde çalışmaları gerekiyor. Elektronik aletlerin ve özellikle sayısal (digital) sistemlerin hem sivil, hem de askeri ortamlarda günden güne çoğalması ve çeşitlenmesi, ve çalışma sıklıklarının yükselmesi, bu uyumu bozuyor, elektromanyetik karışmayı (*electromagnetic interference*: EMI) git gide daha sık karşımıza çıkarıyor ve EMC konusunu daha önemli kılıyor.

EMC problemlerinin çözümü için pek çok yol olmasına karşın, en iyi yol, problemin daha ortaya çıkmadan önlenmesidir. Bunun için de, elektronik ve elektrikli aygıt, gereç ve sistemlerin tasarımlarının EM ışımlarını azaltacak şekilde yapılması gerekiyor. EM ve özellikle sayısal EM alanlarında yapılan araştırmaların bu konuya önemli katkıları olmaktadır. Sayısal EM bilimi kullanılarak, tasarım aşamasındaki bir fiziksel sistem hakkında, henüz sistem üretilmeden, elektromanyetik çözümleme (*analysis*) ve benzetim (*simulation*) yoluyla önemli bilgiler elde edilebilir. Bu da zaman ve para tasarrufu anlamına gelir. Örneğin, bilgisayarların çalışma sıklıkları (*operating frequency*) günden güne yükseldiği için, bir bilgisayar

kartının tasarımını artık sadece bir devre tasarımı programıyla yapmak olanaksızdır. Günümüzde, elemanların baskı devre kartı üzerinde yerleşimini yapmak devre tasarımını bitirmiyor. Sıklığın yüksekliği nedeniyle, bu kartın doğru çalıştığına ve elektromanyetik uyumluluk koşullarını sağladığına emin olmak için, artık devre tasarımının içine elektromanyetik çözümleme ve benzetimi de katmak şart hale gelmiştir.

Dünyada EMC

Hemen hemen bütün gelişmiş ülkelerde elektromanyetik uyumluluk konusunda uyulması zorunlu yasal düzenlemeler bulunuyor. Örneğin, ABD'de FCC, Almanya'da PDE, İngiltere'de BSI ve Hollanda'da NNI tarafından hazırlanmış yönergeler yürürlüktedir. Avrupa Topluluğu'nun (AT) ürün güvenliği ve EM konusundaki düzenlemelerini ise CEN'in bir alt komitesi olan CENELEC yapıyor [1,2]. Günden güne şekillenen AT'de hemen her konuda konulan yasa, kural ve yönetmelikler, gelişmiş ülkelerden alındığı gibi, öncekilerin hatalarını yinelenememek ve deneyimlerinden yararlanabilmek için titizlikle gözden geçirilip yeniden ve daha sıkı olarak yazılıyor. Bu ülkelerde ticaret yapmak isteyen firmalar EMC konusundaki yasal düzenlemelere uymak zorunda kalıyorlar. Bu da, bu ülkelerin sivil endüstrilerinde EMC konusunda büyük bir bilgi birikimi oluşmasına yol açıyor. Doğal olarak, bu bilgi birikiminin savunma endüstrisinde de kullanılması kendiliğinden gerçekleşiyor.

Gelişmiş ülkelerin (sivil ve askeri) elektronik şirketlerinde EMC bölümleri önemli bir yer tutuyor. Pek çok üniversitede EMC konusunda araştırma yapılıyor. EMC konusunda konferanslar düzenleniyor ve bilimsel dergiler basılıyor.

Türkiye'de EMC

Ülkemizde sivil EMC uygulamaları konusunda bir bilgi eksikliği bulunmaktadır. Bunun nedeni, Türkiye'de EMC konusunda gerekli yasal düzenlemelerin yapılmamış olmasıdır. Bütün gelişmiş ülkelerde EMC konusunda uyulması zorunlu yasal düzenlemeler bulunuyor [1,2]. Bu durum, bu ülkelerde EMC konusunda sivil kurumlardan başlayarak bir bilgi birikimi oluşmasına yol açmaktadır. Türkiye'de ise, sivil EMC uygulamaları

konusundaki bilgi eksikliği askeri uygulamalara da ters bir şekilde yansımaktadır. Bu sorunun çözümü hükümetlerin gerekli yasal düzenlemeleri yapmasından geçmektedir. Bu nedenle, sivil uygulamalardaki EMC problemleri bir süre daha devam edecektir.

Sayısal Elektromanyetik Bilimi ve EMC

Sayısal EM bilimi kullanılarak, tasarım aşamasındaki bir fiziksel sistem hakkında, henüz sistem üretilmeden, önemli bilgiler elde edilebilir. Bu da zaman ve para tasarrufu anlamına gelir. Örneğin, sistem ve altsistem kutularının tasarımı sırasında geometriye bağlı rezonanslar sayısal olarak incelenebilir. Kutu üretildikten sonra elektromanyetik uyumluluk problemleri doğurabilecek rezonansların önlenmesi için, sistem kutusunun şekli, altsistem kutularının sistem kutusu içindeki yerleri, havalandırma deliklerinin şekilleri, sayıları ve yerleri ve bunlara benzer daha pek çok değişken henüz tasarım aşamasında değiştirilebilir. Böylece, elektromanyetik uyumluluk problemleri daha oluşmadan önlenir ve üretimden sonra pahalı değişiklikler yapmaya gerek kalmaz. Ancak, gerçek yaşamdaki elektromanyetik uyumluluk problemlerinin sayısal formülasyonları yapıldığında karşımıza çok büyük problemler çıkıyor. Problemdeki bilinmeyen sayısı N ise, geleneksel yöntemler, çözüm için $O(N^3)$ işlem ve $O(N^2)$ bellek kullanımı gerektiriyor ve büyük N durumlarında çözümü olanaksız kılıyor.

Elektromanyetik problemler integral veya diferansiyel denklemleri kullanılarak formüle edilebilir. Integral denklemlerinin sayısal çözümlerinde, moment metodunda (*method of moments*: MOM) olduğu gibi, problemi bir matris denkleme dönüştürüp, doğrusal sistem çözümü yapmak alışlagelmiş ve iyi bilinen bir tekniktir. Sayısal problemde bilinmeyenlerin sayısı N ise, $N \times N$ matris denkleminin doğrudan çözümü bilgisayarda $O(N^3)$ FLOPs (*FLOating-Point operations*) ve $O(N^2)$ bellek kullanımı gerektirir. $N \times N$ matris denkleminin iteratif çözümü ise, her iterasyonda bir ya da birkaç matris-vektör çarpımı gerektirdiğinden, her iterasyon için $O(N^2)$ FLOPs gerektirir. Toplam iterasyon sayısı da bilinmeyenlerin sayısı N 'e doğru orantılı olarak bağlıysa, iteratif çözümün de karmaşıklığı (*complexity*) $O(N^3)$ olur. İteratif çözümlerde de, doğrudan çözümlerde olduğu gibi, $O(N^2)$ bellek kullanımı gerekir.

Hızlı Çözüm Teknikleri

Geleneksel metodların $O(N^3)$ işlem ve $O(N^2)$ bellek karmaşıklığı, büyük problemlerin çözülmesini engelleyen nedendir. Çünkü, problemin büyüklüğü N yükseldikçe, gereken işlem sayısı N 'in kübüne, gereken bellek kapasitesi de N 'in karesine bağlı olarak artar. Örneğin, problemin büyüklüğü iki katına çıkarıldığında, çözüm zamanı 8, gereken bellek kapasitesi de 4 katına çıkar. Böylece eldeki bilgisayar olanakları kısa sürede tükenir ve istenilen problem büyüklüğüne hiçbir zaman ulaşamaz. Gerçek yaşamda önemi olan büyük elektromanyetik problemlerin çözümü için, işlem karmaşıklığı $O(N^3)$ 'den ve bellek karmaşıklığı $O(N^2)$ 'den düşük hızlı algoritmalar geliştirilmesi tek çıkar yol olarak görülmektedir.

Bu amaçla, düşük karmaşıklığa sahip hızlı çokkutup yöntemi (*fast multipole method*: FMM) [3-6] ve özyineli T-matris yöntemi (*recursive T matrix method*: RTMA) [7-10] gibi hızlı yöntemler üzerinde çalışmaktayız. İntegral denkleminin FMM ile çözümü, matris denklemini çözümüne eşdeğer olmakla birlikte, FMM çözümünde matris denklemini hiçbir zaman açık olarak kurulmaz. Böylece, matrisin doldurulup saklanması gerektirdiği $O(N^2)$ bellek zorunluluğundan ve matrisin çözümünde gereken $O(N^3)$ işlem yükünden kurtulmak için bir olanak doğmuş olur. Matris denklemini kurmak yerine, geometrik olarak birbirine yakın bilinmeyenler grupları halinde toplanır (*clustering*), bunların elektromanyetik alanları harmonikler cinsinden ifade edilir, tek tek bilinmeyenlerin harmonikleri ile hesaplama yapmak yerine grupların harmonikleri ile çalışılır ve grupların birbirleriyle etkileşimlerini hesaplamak için harmoniklerin bir noktadan diğerine taşınması "toplama kuralları" (*addition theorems for harmonics*) kullanılarak yapılır. Bütün bunlar iteratif bir metodun içinde akıllıca yapıldığında, her iterasyon için $O(N^{1.5})$ bellek kullanımı ve işlem gerektirdiği görülür.

Gerçek yaşamdaki sayısal elektromanyetik problemlerin tipik büyüklüklerini anlayabilmek için yalın bir örnek vermek istiyoruz. 20 cm x 40 cm x 50 cm boyutlardaki küçük sayılabilecek bir metal kutuyu ele alalım. Dikdörtgenler prizması şeklindeki bu metal kutunun, bir elektronik sistem veya altsistem kutusu olduğunu düşünelim. Bu kutunun yüzeyini küçük karelere bölelim ve her küçük karenin üstünde iki tane bilinmeyen tanımlayalım. Bu karelerin

kenar uzunluğu genellikle verilen frekanstaki dalga boyunun onda birinden küçük olacak şekilde seçilir. Örneğin, frekansın 5 GHz, dalga boyunun 6 cm olduğu durumda, karelerin boyutlarını $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ olarak seçelim. Henüz hiçbir detayın katılmadığı bu sade kutu modeli için toplam bilinmeyen sayısı 60,000'i geçer. Frekansın 20 GHz olduğu durumda, bilinmeyen sayısı 16 kat artarak bir milyonu bulur! Bu örneği, gerçek yaşamdaki sayısal elektromanyetik problemlerinin ne kadar büyük olduğunu göstermek ve daha hızlı çözüm tekniklerine gerek olduğunu ve her zaman olacağını vurgulamak için verdik.

Sonuç

Elektromanyetik uyumluluk konusu hem askeri, hem de sivil uygulamalar için önemlidir ve sayısal elektromanyetik biliminin sağladığı çözüm teknikleri, özellikle son zamanlarda geliştirilen hızlı çözüm teknikleri, EMC problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu çeşit elektromanyetik modelleme ve çözüm teknikleri sayesinde, pek çok değişik senaryo simülasyonları kolaylıkla ve insan, zaman ve para kaynaklarından tasarruf ederek yapılabilir. Bu çalışmalardan elde edilen bilgiler, gerçek elektronik sistemlerin elektromanyetik hassasiyetlerinin (EMS) azaltılması ve yönlendirilmiş enerji silahlarına karşı korunması için kullanılabilir.

Kaynakça

1. L. Gürel, "Sayısal Elektromanyetik Bilimi, Elektromanyetik Uyumluluk ve Avrupa Topluluğu," 6. Elektrik Mühendisliği Ulusal Kongresi, Bursa, Eylül 1995.
2. L. Gürel, "Elektromanyetik Uyumluluk ve Sayısal Elektromanyetik Bilimi," Savunma Sanayiindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu, Ankara, Haziran 1997.
3. V. Rokhlin, "Rapid solution of integral equations of scattering theory in two dimensions," J. Comput. Phys., vol. 86, pp. 414-439, Feb. 1990.
4. R. Coifman, V. Rokhlin, and S. Wandzura, "The fast multipole method for the wave equation: a pedestrian prescription," IEEE Antennas Propagat. Mag., vol. 35, no. 3, pp. 7-12, June 1993.

Elektromanyetik Uyumluluk (EMU, EMC) Konusunda Üniversitelerimizde Neler Yapılıyor?

Levent Gürel

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi

06533 Bilkent, Ankara

Tel: (312) 290-2096

Fax: (312) 266-4307

e-mail: lgurel@ee.bilkent.edu.tr

Elektromanyetik kirlilik, insan sağlığı için olduğu kadar, elektronik aletlerin güvenilir olarak çalışması açısından da ciddi bir tehlike kaynağıdır. Ülkemizde elektromanyetik kirliliği önleyici yasal düzenlemelerin bulunmaması ve uygulanmaması bu sorunu büyötmektedir. Sorunun çözümü için, gelişmiş ölkelerde olduğu gibi, elektromanyetik uyumluluk (EMU) standartlarına uygun elektronik ürünlerin imal ve kullanımını zorunlu kılmak gerekmektedir. Elektromanyetik uyumluluk (EMU), elektronik ve elektrikli aletlerin birbirlerine zarar vermeden, normal ve tatminkar çalışmalarını yerine getirebilmeleri, birbirleriyle uyum ve harmoni içinde çalışabilmeleridir. Bu amacı gerçekleştirebilmek için gereken EMU standartları, gelişmiş ölkelerde uyulması zorunlu yasal düzenlemeler haline getirilmiştir. Ülkemizde böyle bir zorunluluk bulunmaması, bu alanda genel olarak bilgi eksikliğine yol açmaktadır. Öte yandan, ABD'ye ve Avrupa ölkelerine satış yapmak isteyen elektronik üreticilerimiz, EMU standartlarına uymak zorundadırlar. Bu zorunluluğu yerine getirirken, üreticiler üniversitelerimizden yardım alabilirler. Üniversitelerimizde EMU standartlarının anlaşılması ve öğretilmesi, elektronik ürün tasarımlarından hangilerinin EMU standartlarını sağlayacağı, EMU sertifikasyonu için Avrupa Topluluğu, ABD ve diğer ölkeler nezdinde nasıl girişimler yapılması gerektiği konularında çalışmalar yapılmaktadır ve bilgi birikimi vardır.

5. C. C. Lu and W. C. Chew, "Fast algorithm for solving hybrid integral equations," Proc. IEE, vol.140, Part H, pp. 455-460, Dec.1993.
6. L. Gürel, "Fast RCS computation via the fast multipole method," NATO AGARD SPP Symposium on Radar Signature Analysis and Imaging of Military Targets, Ankara, Turkey, Oct. 1996.
7. L. Gürel and W. C. Chew, "Scattering solution of three-dimensional array of patches using the recursive T-matrix algorithms," IEEE Microwave and Guided Wave Lett, vol. 2, pp.182-184, May 1992.
8. L. Gürel and W. C. Chew, "Recursive T-matrix algorithms with reduced complexities for scattering from three-dimensional patch geometries," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-41, pp. 91-99, Jan. 1993.
9. L. Gürel and W. C. Chew, "A recursive T-matrix algorithm for strips and patches," Radio Sci., vol. 27, pp. 387-401, May-June 1992.
10. L. Gürel, "Recursive algorithms for computational electromagnetics," Ph.D. dissertation, University of Illinois, Champaign-Urbana, IL, 1991.

Özgeçmiş / Levent Gürel

Levent Gürel 1986 yılında ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden B.Sc., 1988 ve 1991 yıllarında University of Illinois at Urbana-Champaign Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden M.S. ve Ph.D. diplomalarını yüksek şeref dereceleriyle aldı. 1991-1994 yıllarında IBM firmasının New York eyaletindeki T.J. Watson Araştırma Merkezi'nde görev aldı. 1993 yılında Doçentlik ünvanını kazandı. 1994 yılından beri Bilkent Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesidir. Doç. Dr. Levent Gürel'in araştırma ve ilgi alanları, sayısal elektromanyetik bilimi, hızlı algoritmalar, radar ara kesit (RCS) ve stealth simülasyonları, elektromanyetik uyumluluk (EMC), antenler ve radarlar, ve mikrodalga ölçümleridir.