Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 22, Sayı 1, 346-352, 2018

Süleyman Demirel University
Journal of Natural and Applied Sciences
Volume 22, Issue 1, 346-352, 2018

DOI: 10.19113/sdufbed.52728

Pediyatrik Hastalarda Konjenital Kalp Rahatsızlıklarının MRG Altında Tedavisinde Kullanılmak Üzere İnce Film Tabanlı ve 5 Fr Yarı Aktif Kateter Tasarımı

Engin BAYSOY*[1,3], Dursun Korel YILDIRIM[1], Çağla ÖZSOY[1], Zahid SAĞIROĞLU[2], Şenol MUTLU[2], Özgür KOCATÜRK[1]

[1]Boğaziçi Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsü, 34684, İstanbul
[2]Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34342, İstanbul
[3]Acıbadem Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Bölümü, 34752, İstanbul

(Alınış / Received: 29.12.2016, Kabul / Accepted: 05.07.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 11.08.2017)

Anahtar Kelimeler
Girişimsel manyetik rezonans görüntüleme, RF rezonans işaretleyici, Sonlu eleman modellemesi yazılım benzetimi, Yarı-Aktif kateter

Özet: Günümüzde konjenital kalp hastalıklarının tedavisi sırasında kullanılan floroskopi gibi görüntüleme teknikleri, ileride oluşabilecek kanser riski sebebiyle özellikle pediatri için uygun değildir. Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) iyonize radyasyon içermeyen çalışma prensibi, yumuşak dokuları daha iyi görüntüleme özelliği ve gerçek zamanlı fonksiyonel ölçüm avantajı sayesinde X ışını kullanılan görüntüleme tekniklerine etkili bir alternatif oluşturmaktadır. Bu çalışmada MRG uyumlu, MRG sistemi altında takip edilebilen ve özellikle doğuştan kalp hastalığı olan pediatrik hastalar için girişimsel prosedürlerde kullanılan düşük profilli RF (Radyo frekans) rezonans işaretleyicilere sahip yarı aktif kılavuz kateter tasarlanmıştır. RF rezonans işaretleyici bileşenlerinin geleneksel yöntemlerden farklı olarak ince film tabanlı düşük profillerde oluşturulması yeni bir üretim yaklaşımı olarak sunulmuştur. 5 Fr (1,67 mm) biyouyumlu kılavuz kateter şaftına entegre edilen RF rezonans işaretleyicilerin 1,5 T MRG sistemi altında görünürlükleri doğrulanmıştır. RF rezonans işaretleyici içeren kılavuz kateterin MRG altındaki RF ısınma testleri ASTM F2182 – 11a standardına uygun olarak yapılmıştır. En kötü koşulda dahi 0,25 ^{0}C ısınma gözlemlenmiştir. Ayrıca RF rezonans işaretleyicilerin tasarımı ve üretimi aşamalarını hızlandırabilmek için sonlu eleman analiz yazılım programı (Comsol) kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Uygulanan yöntem MRG uyumlu ve güvenli girişimsel kateter, alet ve cihazların üretimini mümkün hale getirmektedir.

Thin Film Based 5 Fr Semi Active Catheter Design for Treatment of Congenital Heart Diseases in Pediatric Patients under MRI

Keywords
Interventional magnetic resonance imaging, RF-resonance marker, Finite element modeling software simulation, Semi-Active catheter

Abstract: At present, imaging techniques such as fluoroscopy used for treatment of congenital heart diseases are not applicable for pediatric patients because of late cancer risk of ionizing radiation. Magnetic Resonance Imaging (MRI) presents an effective alternative to other x ray based imaging modalities with its superior soft tissue imaging feature, real-time functional measurement advantages and non-ionized imaging nature. In this study, a semi active guiding catheter was designed, that comprises low profile, MRI-compatible RF-resonant markers and is especially applicable in interventional procedures for pediatric patients with congenital heart diseases. In contrast to traditional fabrication techniques, components of the RF-resonant marker were manufactured using a novel approach. Visualization of the RF-resonant marker, that is integrated over biocompatible 5 Fr (1.67 mm) guiding catheter shaft, was shown under 1.5 T MRI. RF heating tests of the guiding catheter that contains the RF-resonant marker was realized according to ASTM F2182 – 11a standards. 0.25 ^{0}C heating was observed even under the worst conditions. Moreoever, in order to optimize the design and manufacturing of the RF-resonant markers, a finite element analysis simulation program (Comsol) was used. Presented method makes possible to manufacture interventional catheters, tools and devices that are safe and compatible with MRI.

*İlgili yazar: enginbaysoy@gmail.com

1. Giriş

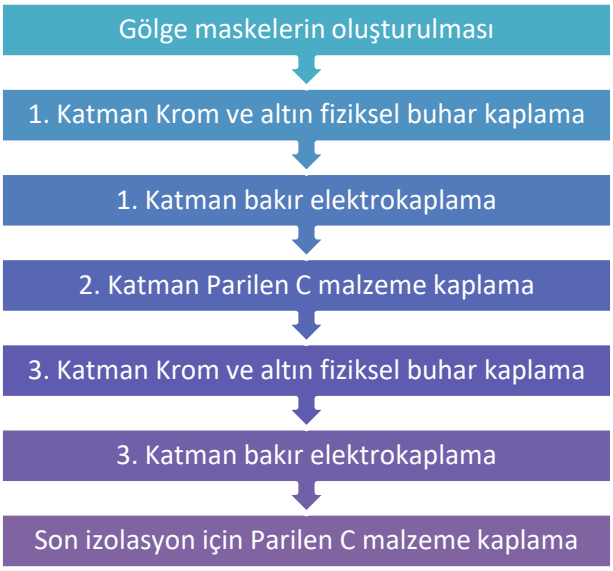
Kalp rahatsızlıklarının tedavisinde öncelikli olarak kullanılan cerrahi yöntemlerin yüksek ölüm ve enfeksiyon riskleri taşıması nedeniyle, operasyon süreci daha az risk taşıyan ve tedavi sürecini kısaltan girişimsel uygulamalar günümüzde daha çok tercih edilir olmuştur. Ancak ne yazık ki beraberinde birçok avantaj sağlayan girişimsel tedavi yöntemleri yetişkin hastalarda uygulanabildiği sıklıkta pediyatrik hastalarda uygulanamamaktadır. Bu durumun başlıca nedeni X ışını kullanan radyoloji görüntüleme yöntemlerinin pediyatrik hastalarda ihtiyaç duyulan yüksek kontrastlı yumuşak doku görüntüsü sunamaması ve pediyatrik hastaların iyonize radyasyona maruz kalmalarındaki büyük sakıncadır. Pediyatrik hastalarda hücre çoğalma hızı çok daha yüksek olduğundan, X ışınına maruz kalan çocuklardan alınan kan örneklerinde kromozomal hasar oluştuğu görülmüş [1] ve uzun dönemde vücut içerisinde tümör oluşma riskinin arttığı gözlemlenmiştir [2]. Hastaları X ışını radyasyonuna maruz bırakmamasının yanı sıra, fonksiyonel ölçümleri gerçek zamanlı yapabilmesi, yumuşak dokuları yüksek çözünürlükte görüntüleyebilmesi gibi sunduğu avantajlar nedeniyle MRG sistemi, X ışını tabanlı görüntüleme tekniklerinin yerini alabilecek en güçlü aday olmuştur [3].

MRG'nin yapısı gereği çalışma ortamında herhangi bir metal ve benzeri malzemenin kullanılamıyor olması, X ışını tabanlı sistemlerde kullanılan mevcut girişimsel cihaz ve aletlerin MRG'ye uyumlu olacak şekilde özel olarak üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla birçok araştırma laboratuvarlarında büyük profilli kateter örnekleri hazırlanmış ve MRG altında girişimsel kardiyoloji işlemleri yapılabileceği hayvan deneyleri üzerinde gösterilmiştir [4-6]. Damar içi kateterlerin MRG altında etkin şekilde görünebilir ve takip edilebilir kılmak için ise selenoid koil, kapasitör gibi analog devre elemanlarının kullanılmaları ile oluşturulan radyo frekans (RF) işaretleyicileri (alıcı antenler) kullanmak oldukça yaygın bir yöntemdir [7-9]. Ancak kateter şaftı üzerine entegre edilen bu yapıların toplam kateter profilini önemli ölçüde arttırması, biyouyumlu olmayan malzemeler içermeleri ve kateterin sertliğini operasyon güvenliğini tehdit edici şekilde arttırması, geliştirilen bu teknolojilerin halen klinik uygulamalarda kullanılamamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla MRG altında pediyatrik konjenital kalp rahatsızlıklarının tedavisini sağlayabilmek için daha düşük profilli ve iyi görünebilir, MRG uyumlu kateterlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu amaçla, pediyatrik hastalara uygun 5 Fr (1,67 mm) büyüklüğünde silindirik (damar içi uygulamalara uygun) ve biyouyumlu polimer tüp (PEBAX) yüzeyine çok katmanlı ince film kaplamalar oluşturularak, 1,5 Tesla MRG sistemlerinde görüntülenebilecek RF rezonans işaretleyiciler (alıcı antenler) üretilmiş ve kılavuz kateter protipleri elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada sunulan RF rezonans işaretleyici üretim tekniği kısaca, krom ve altın gibi iletken materyallerin gölge maskeleme yardımıyla ve fiziksel buharlaştırma yöntemiyle mikro ölçekli indüktör, kapasitör ve iletken hatların silindirik yüzey üzerine birden fazla katmanda entegre edilmesi temeline dayanmaktadır. Hedeflenen elektriksel özellik (iletkenlik, direnç vb. gibi...) ve yüzey izolasyonuna ulaşılabilmesi için elektrokaplama ve Parilen C kaplama işlemleri iletken yüzeyler üzerine kontrollü olarak uygulanmıştır (Şekil 1). Son olarak RF rezonans işaretleyicinin MRG altında görünebilir olması için 1,5 Tesla MRG'nin Larmor (rezonans) frekansı olan 63,8 MHz değerinde indüktör ve kapasitör değerleri optimize edilmiştir.



Şekil 1. RF rezonans işaretleyici üretimi akış şeması

2.1. Teorik hesaplamalar

Farklı geometrik tasarımlar için, farklı teorik tanımlamalar ile RF rezonans devre elemanlarının değerlerini hesaplamak mümkündür. Basitçe bir RF rezonans işaretleyiciyi oluşturan LC tankı devresi rezonans frekansını (Hz), indüktans değerini belirten L (H) ve kapasitans değerini belirten C (F)'yi kullanarak aşağıdaki formül ile hesaplamak mümkündür.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

İndüktans değeri olan L (H), aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$L = \frac{\mu\pi r^2 N^2}{h} \quad (2)$$

r değeri indüktörün yarıçapını, μ ortamın manyetik geçirgenliğini, N indüktörün sarım sayısını, h ise indüktörün uzunluğunu ifade etmektedir. Kapasitans değeri olan C ise, silindirik yüzey etrafında koaksiyel olarak oluşturulmuş kapasitör değerini ifade eder ve aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$C = \frac{2\pi\varepsilon l}{ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (3)$$

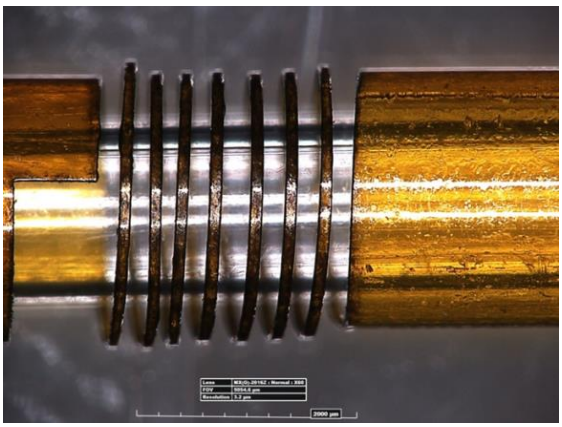
Yukarıdaki formülde ε kapasitörü oluşturan 2 iletken katman arasındaki dielektrik sabitini, R_2 koaksiyel kapasitörün dış katman çapını, R_1 koaksiyel kapasitörün iç katman çapını ifade etmektedir. İnce film şeklinde oluşturulan iletken yüzeylerin elektriksel direncini düşürmek ve yüzeylerin kalınlığını istenilen şekilde optimize etmek amacıyla aşağıda belirtilen deri etkisi (skin depth) formülünü dikkate almak gerekmektedir.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{w\mu}} \quad (4)$$

Yukarıdaki formülde ρ iletken yüzeyin direncini, w ($2\pi f$) açısal frekansı, μ ise iletken yüzeyin manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.

2.2. İnce film kaplama için gölge maskelerin hazırlanması

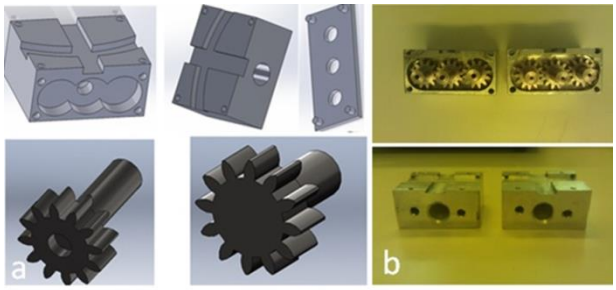
Küçük çaplı silindirik yüzeyler üzerine krom ve altın gibi iletken materyallerin fiziksel buharlaştırma yöntemi ile istenilen geometri ve ölçülerde kaplanabilmesi için, kaplama esnasında çeşitli maskelerin kullanılması gerekmektedir. Bilgisayar destekli yazılım programı (Pro-Engineer Creo 2.0) kullanılarak tasarlanan gölgeleme maskeleri, poliamid tüplerin 4 eksenli Nd:YAG lazer kesim cihazında şekillendirilmesi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan poliamid tüp gölgeleme maskeleri ile RF rezonans işaretleyiciyi oluşturan selonoid ve diğer iletken geometrilerin silindirik yüzey üzerine istenildiği gibi oluşturulabilmesi mümkün kılınmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. 4 eksenli Nd:YAG lazer kesim cihazında selonoid geometride şekillendirilen poliamid tüp gölgeleme maskenin mikroskop (Hilux) görüntüsü.

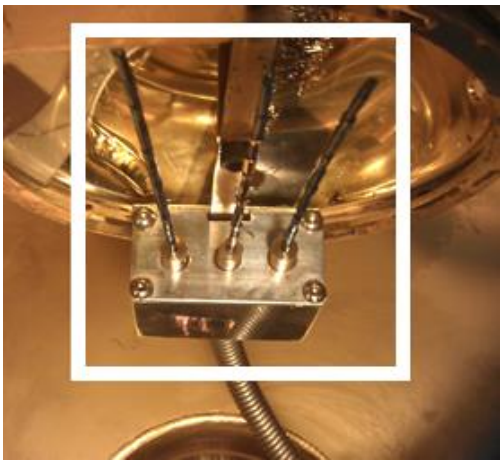
2.3. Fiziksel buharlaştırma ile krom-altın kaplama ve sistemde yapılan modifikasyonlar

İndüktör, kapasitör ve diğer iletken hatlar gibi RF rezonans işaretleyici bileşenleri olan mikro ölçekli ince iletken film katmanları oluşturabilmek için fiziksel buharlaştırma ile kaplama sistemi (Nanovak, Türkiye) kullanılmıştır. Ancak silisyum (Si), titanyum (Ti), alüminyum (Al), krom (Cr), gümüş (Ag), altın (Au) gibi elementleri düz yüzeyler üzerine film kaplayabilmek amacıyla üretilmiş olan termal buharlaştırma sistemini, kateter yüzeyi gibi silindirik yüzeyleri kaplayabilir hale getirilebilmesi için cihaz içerisinde bir takım değişiklikler yapılması gerekmiştir. Bu amaçla cihazın kazanı içerisine yatay döndürme eksenli yeni bir motor yerleştirilmiştir. Mevcut düzenek ile her bir kaplama sürecinde sadece bir adet numune kaplanabilmesi ve kaplama işleminin görece uzun sürmesi (6 saat vakum + 2 saat kaplama) nedeniyle, her bir kaplama işleminde kaplanan kateter örnek sayısını arttırmak amacıyla yeni bir düzenek bilgisayar destekli tasarım (Solidworks) programı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. (a) "Solidworks" programı kullanılarak tasarımı yapılan 3'lü tutucu aparat çizimleri. (b) Torna makinesi ile üretilen 3'lü kaplama aparatının görünümü.

Üretilen bu yeni düzenek sayesinde her bir kaplama sürecinde 1 adet yerine, 3 adet yeni silindirik kateter tüpün kaplanması mümkün hale getirilmiştir (Şekil 4). Bu yöntem ile 5 Fr (1,67 mm) çapında PEBAX kateter tüp yüzeylerine önce 10 nm kalınlığında krom (tüp yüzeyine altının tutunumu arttırmak amacıyla) sonrasında ise 100 nm altın kaplama uygulanmıştır.



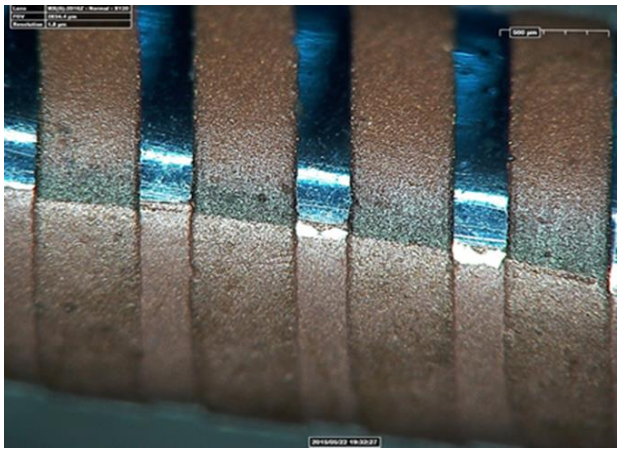
Şekil 4. PEBAX kateter tüp örneklerinin 3'lü tutucu düzeneğe yerleştirildikten sonraki görünümü.

2.4. Krom-altın kaplamaların üzerine bakır elektrokaplama işlemi

RF rezonans işaretleyici üzerinde ince film şeklinde oluşturulan iletken yüzeylerin elektriksel direncini düşürmek ve "deri etkisi" nedeniyle yüzeylerin kalınlığını optimize etmek amacıyla elektrokaplama işlemi uygulanmıştır.

Elektrokaplama işlemi metal veya diğer iletken yüzeyler üzerine homojen, yoğun ve tutunumu kuvvetli iletken katmanlar oluşturmak amacıyla kullanılan elektrokimyasal bir kaplama yöntemidir. Buhar kaplama yöntemi ile 100 nm kalınlıklarında gerçekleştirilen krom-altın iletken kaplamaları, bakır elektrokaplama uygulayarak 30 µm seviyelerine çıkartmak ve istenilen elektriksel iletkenlik ve direnç değerlerine ulaşmak mümkün olmaktadır. Uygulanan bakır elektrokaplama solüsyonu bakır sülfat, sülfürik asit, hidroklorik asit ve saf su içermektedir.

Kaplama sırasında elektrokaplama solüsyonunun dışarıdan ısıtılması ve solüsyon kabının alt kısmında manyetik bir karıştırıcı kullanılması sayesinde 30 µm kalınlığında homojen bir kaplama elde edilmiştir (Şekil 5).



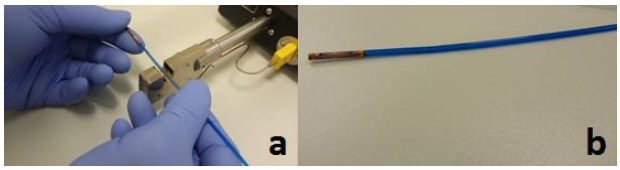
Şekil 5. Fiziksel buharlaştırma ve elektrokaplama işlemleri sonrası 5 Fr PEBAX kateter tüp yüzeyi üzerine oluşturulan çok katmanlı iletken yolların yakınlaştırılmış (x50) mikroskop (Hilux) görünümü.

2.5. Parilen C kaplama işlemi

RF rezonans işaretleyicinin en önemli bileşenlerinden kapasitörü oluşturmak için 2 iletken katman arasında bulunması gereken yalıtkan (dielektrik) malzeme olarak, Parilen C (DIMER DPX-C, SCS Equipment) kullanılmıştır. Ayrıca RF rezoans işaretleyicinin tüm iletken katmanlarının üzerine son katman yalıtım olarak da yine biyouyumlu Parilen C kaplaması gerçekleştirilmiştir. Parilen kaplama cihazı (Labcoter® 2-PDS 2010, SCS Equipment) içerisine 5 gr. Parilen C malzemesi kullanılarak tüm kateter yüzeyine homojen olarak 2,5 µm kalınlığında parilen kaplama uygulanmıştır. Parilen C kaplamanın kalınlık ölçümleri yüzey profil ölçüm cihazı (Dektak XTL, Burker) ile doğrulanmıştır.

2.6. RF rezonans işaretleyicinin 5 Fr kılavuz katetere entegrasyonu

5 Fr PEBAX polimer tüp üzerinde oluşturulan ince film RF rezonans işaretleyiciler, aynı çaptaki PEBAX polimer tüp ile birleştirilerek 150 cm uzunluğunda 5 Fr çapında kılavuz kateter prototipi elde edilmiştir. RF rezonans işaretleyiciler uzak (distal) kısımda kalacak şekilde, 150 cm boyunda PEBAX polimer tüpler ile kateter şekillendirme cihazı kullanılarak ısıl işlem ile birbirleriyle birleştirilmiştir (Şekil 6). Kılavuz kateterin yakın (proksimal) ucuna ise klinik kullanıma uygun standart hub, ultraviyole ışın kürleme yöntemi kullanılarak sabitlenmiştir. İşlem sırasında medikal kullanıma uygun UV ışını ile aktive olan yapıştırıcı (Dymax Corporation Cath 200A) kullanılmıştır.



Şekil 6. (a) Kateter şekillendirme cihazı ile hazırlanan RF rezonans işaretleyicinin 5 Fr PEBAX tüp ile entegre edilmesi. (b) Birleştirilen kılavuz kateter görünümü

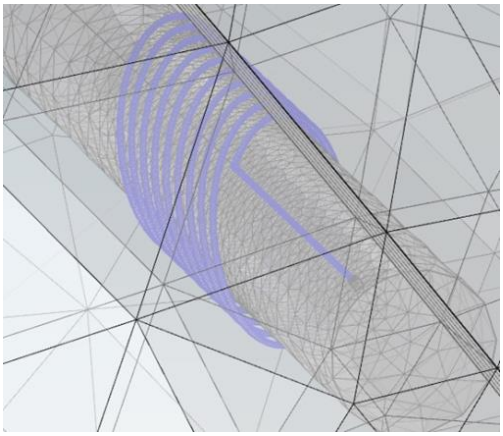
2.7. Düz ve eğik selonoid indüktör tasarım benzetimleri

MRG uyumlu kateter tasarım ve üretim aşamaları sırasında ortaya çıkan hataları, bu sırada kaybedilen zaman ve kaynakları göz önüne aldığımızda, farklı denemelere gerek olmaksızın, bilgisayar ortamında benzetimler ile bu üretim süreçlerini öngörmek günümüzde kabul edilen bir yaklaşımdır. Sonlu elaman analizi yazılımları kullanılarak üretilmesi planlanan farklı tasarımdaki prototiplerin performansının benzetim üzerinde incelenmesi, ileride yapılacak üretim çalışmalarında çok büyük fayda sağlamaktadır. MRG altında kateterin takip edilebilmesi için kullanılan indüktörün düz ve eğik selonoid şekillerde üretilmesinin performansta ne gibi değişiklikler yaratacağını gözlemlemek amacıyla, Comsol benzetim yazılım programı kullanılmıştır. Bu amaçla 5 mm ve 10 mm çapa sahip olacak şekilde farklı sarım sayılarında düz ve eğik selonoid yapıları Comsol CAD programı aracılığıyla 3 boyutlu olarak modellenmiştir (Şekil 7). Sonrasında fiziksel parametre girişleri yapılarak kararlı durum ve frekans bölgesi için elektrik ve manyetik fizik modülleri tanımlanmış ve birim örgüleri oluşturulmuştur. Yüksek hesaplama gücü gerektiren benzetimler sonucunda, farklı selonoid yapıların indüktans değerleri elde edilmiştir.

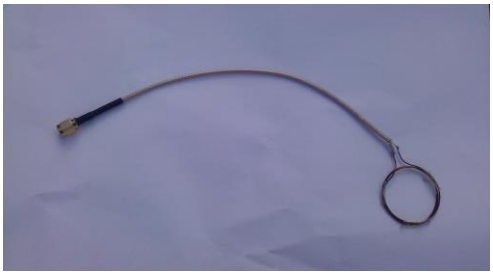
2.8. Network analizör ile rezonans frekans ölçümü

Kılavuz kateterin uzak (distal) ucunun 1,5 T MRG sisteminde istenilen şekilde görüntülenebilmesi için RF işaretleyicilerin rezonans frekansının, 1,5 T MRG

sisteminin Larmor frekansı olan 63,8 Mhz'e ayarlanması gerekmektedir. Üretilen RF rezonans işaretleyicilerin rezonans frekansının ne olduğunu MRG altında denemeksizin, network analizör cihazı ile önceden gözlemlemek mümkündür. Bunun için kontaksız inceleme probu üretilerek RF işaretleyicilerin rezonans frekansları network analizör cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 8).



Şekil 7. 9.5 tur sarımlı eğik selonoid CAD modellemesi.



Şekil 8. RF rezonans işaretleyicinin rezonans frekansını network analizör cihazında ölçmek için üretilen kontaksız incelme probu

2.9. RF rezonans işaretleyicinin 1,5 Tesla MRG altında görüntülenmesi için gerekenler

Parilen C kaplama ile tamamen yalıtılan 5 Fr çaplı RF rezonans işaretleyicinin MRG altında görünürlük testleri Acıbadem Sağlık Grubu'na ait Kozyatağı Hastanesinde bulunan 1,5 T MRG cihazı (Siemens Espree) altında yapılmıştır. Bunun için 42 cm x 65 cm x 13 cm ölçülerine sahip, içi % 0,9 tuzlu su çözeltisi ile doldurulmuş fiberglas bir fantom kullanılmıştır.

2.10. 5 Fr kılavuz kateterin MRG altında ısınma testi

Uzak ucunda RF rezonans işaretleyici içeren 5 Fr çaplı yarı aktif kılavuz kateterin ısınma testi, ASTM F 2182 – 11a standardına (ASTM F 2182 – 11a standardı Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu olarak bilinen ASTM'in, radyo frekans ile indüklenen malzeme ve implantların MRG altında ısınma kontrollerinin nasıl yapılması gerektiğini belirten bir test prosedürüdür.) uygun olarak 42 cm x 65 cm x 13 cm ölçülerine sahip fiberglas bir fantom kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 150 cm uzunluğundaki kılavuz kateterin tamamı % 0,9 tuzlu su çözeltisine batırılarak 2 W/kg SAR (Specific Absorption Rate) için 15 dakika True Fisp sekansı (TE/TR =1.3/30 ms, flip açısı = 66^0) uygulanmıştır.

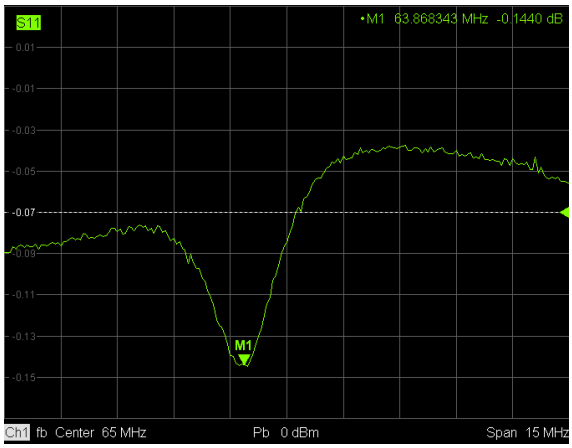
2.11. RF rezonans işaretleyici profil ölçümü

Fiziksel buharlaştırma, elektrokaplama ve parilen kaplama yöntemleri kullanılarak üretilen çok katmanlı ince film RF rezonans işaretleyicinin 5 Fr kateter yüzeyinde oluşturduğu toplam ek kalınlık 130 µm olarak ölçülmüştür.

3. Bulgular

3.1. Network analizör ile rezonans frekans tespiti

Bir network analizör cihazında S_{11} kanalı kullanarak belli frekans aralığındaki bir sinyali, bir anten üzerine göndererek tekrar geri almak mümkündür. Ürettiğimiz kontaksız prob bu anten görevini yapmaktadır. Kontaksız prob üzerine gönderilen sinyal, geri dönerken ürettiğimiz RF işaretleyici ile belli bir frekansta etkileşim yaşamış ve sinyalde kayıp gözlemlenmiştir. Bu kaybın yaşandığı frekans değeri (63,86 MHz) RF işaretleyicinin rezonans frekansı olarak tespit edilmiştir (Şekil 9).

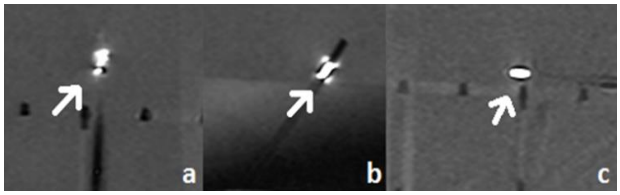


Şekil 9. Network analizör ekran görüntüsü ile RF rezonans işaretleyicinin rezonans frekans tespiti.

3.2. RF rezonans işaretleyicinin 1,5 Tesla MRG altında görüntülenmesi

1,5 T MRG cihazının Larmor frekansıyla aynı frekansta (63,8 MHz) rezonansa girdiğini daha önce tespit edilen RF rezonans işaretleyiciler, gerçek bir MRG altında belli bir sekansta incelenmiştir. Üretilen RF rezonans işaretleyicinin ana manyetik alana dik konumlandığındaki (Şekil 10.a), 45^0 açıyla konumlandığındaki (Şekil 10.b) ve paralel konumladığındaki (Şekil 10.c) görüntüleri MRG altında elde edilmiştir. Her 3 pozisyonda da RF işaretleyicinin MRG ile etkileşime girerek fantom içindeki sıvı olan arka plan görüntüsünden kolaylıkla ayrıldığı ve takibinin yapılabildiği gözlemlenmiştir. Böylece kateter üzerine yerleştirilen RF rezonans işaretleyicilerin gerçek ortamda ve gerçek bir hastanın damar içinde yol alırken oryantasyondan

bağımsız olarak takip edilebilmesinin mümkün olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 10. RF rezonans işaretleyici ana manyetik alana (Bo) (a) paralel, (b) 45^0 ve (c) dik hizalandığında, GRE sekans (TE/TR = 2,3/969 ms, flip açısı = 5°) ile alınan MRG görüntüleri.

3.3. 5 Fr kılavuz kateterin MRG altında ısınma bulguları

MRG altında görüntüleme açısından istenilen RF rezonans işaretleyiciler ana manyetik alan (Bo) ile etkileşime geçmesi, RF rezonans işaretleyicilerde istenmeyen bir ısınmaya neden olabilmektedir. Bu durum ise üretilen RF işaretleyicilerin gerçek ortamda bir hastanın vücudunda kullanılmasının önündeki en büyük engeldir. Ancak yaptığımız testler sonucunda RF rezonans işaretleyiciler ana manyetik alana dik pozisyonda hizalandığı durumda (en çok ısınma beklenilen konum) dahi RF rezonans işaretleyici üzerinde sadece 0,25 ^{0}C sıcaklık artışı olduğu gözlemlenmiştir.

3.4. RF rezonans işaretleyici profil kalınlık değerlendirmesi

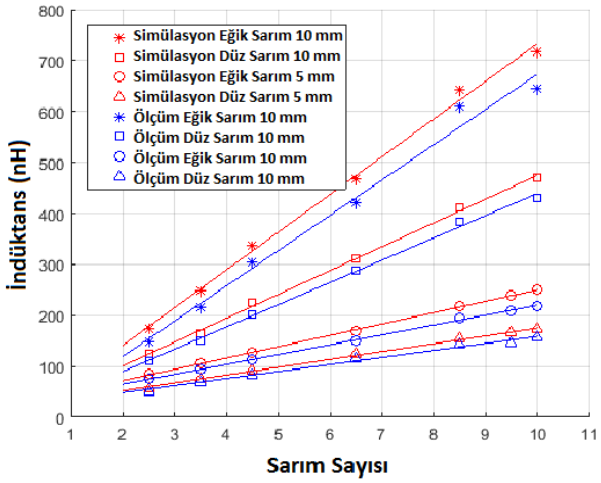
Günümüzde piyasada erişilebilir, manyetik etkileşimi olmayan en küçük ölçekli kapasitör (Kalınlık=600 µm, Surface Mount Multilayer Ceramic Chip Capacitors for Non-Magnetic Applications, VISHAY) ile kıyaslandığında bu kalınlık, %78 gibi büyük kapsamlı bir fiziksel küçülmeyi sağlamaktadır. Piyasada bulunabilir en küçük ölçekli manyetik kapasitör (Kalınlık= 200 µm) ve gerekli olan lehimleme (Kalınlık=30 µm) işleminin de hesaba katılarak kıyaslama yapıldığında dahi, toplam profil kalınlığında %43 iyileşme söz konusudur.

3.5. Düz ve eğik selonoid indüktör tasarımı benzetim değerlendirmesi

Comsol benzetim programında gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri sonucunda eğik selonoid yapılar ile oluşturulan indüktörlerin, aynı yarıçap ve sarmal sayısına sahip düz selonoid indüktörlere göre daha yüksek indüktans ve Q (kalite) faktörü oluşturdukları saptanmıştır (Şekil 11). Bu doğrultuda ileride eğik sarmallar ile oluşturulan indüktörlerin kullanıldığı RF işaretleyicilerin, sinyal gücünün daha yüksek olacağı ve bu sayede MRG altında izlenebilirliğinin daha iyi olacağı öngörülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada küçük çaplı silindirik yüzeyler üzerine RF rezonans işaretleyiciler entegre edilerek kılavuz kateterlerin üretilmesi ve MRG sistemi altında görüntülenmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Fiziksel buhar kaplama yöntemiyle düzlemsel olmayan silindirik yüzeyler üzerine kaplanan ince iletken filmlerin elektriksel iletkenliklerinin, dirençlerinin ve yüzey tutunumlarının tatmin edici seviyede oldukları gösterilmiştir. İnce film kaplama yöntemi ile üretilen RF rezonans işaretleyicilerin kateter çapına getirdiği ek profil kalınlığının çok küçük ölçülerde olması bu yöntemi, özellikle pediyatrik hastalarda mevcut olan küçük damar çapları için ihtiyaç duyulan MRG altında görünebilir girişimsel kateter, alet ve cihazlar için kullanılabilir hale getirmektedir. Ayrıca nihai olarak elde edilen kılavuz kateterin RF ısınma test sonuçlarının güvenlik standartlarının çok üstünde olması bu yöntemin sunduğu bir diğer olumlu sonuçtur.



Şekil 11. Eğik sarım ve düz sarım tasarımlarındaki 5 mm ve 10 mm çapındaki indüktörlerin benzetim ve ölçüm sonuçları.

Farklı tasarıma sahip RF işaretleyicilerin kıyaslanması amacıyla gerçekleştirilen Comsol benzetim sonuçları, beklendiği gibi tutarlı sonuçlar vermiş ve ileride gerçekleştirilmesi planlanan farklı prototip üretimleri öncesi güvenilir bir öngörü kaynağı olduğunu göstermiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda çeşitli geometrilerde gölgeleme maskeler kullanılarak farklı tasarımlarda RF rezonans işaretleyiciler içeren kılavuz kateterlerin üretilmesi ve MRG altında RF rezonatör sinyal değerinin optimize edilmesi hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 112R024 no'lu Araştırma Projesi kapsamında, TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Kaynakça

[1] Andreassi, MG., Ait-Ali, L., Botto, N., Manfredi, S., Mottola, G., Picano, E. 2006. Cardiac catheterization and long-term chromosomal damage in children with congenital heart disease. European Heart Journal, 27, 2703-2708.

[2] Kleinerman, RA. 2006. Cancer risks following diagnostic and therapeutic radiation exposure in children. Pediatric Radiology, 36(14), 121-125.

[3] Lederman, RJ. 2005. Cardiovascular interventional magnetic resonance imaging. Circulation, 112(19), 3009-3017.

[4] Kocaturk, O., Kim, AH., Saikus, CE., Guttman, MA., Faranesh, AZ., Ozturk, C., Lederman RJ. 2009. Active two-channel 0.035 guidewire for interventional cardiovascular MRI. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 30(2), 461-465.

[5] Nazarian, S., Aravindan, K., Zviman, MM., Meininger, GR., Kato, R., Susil, RC., Roguin, A., Dickfeld, TL., Ashikaga, H., Calkins, H., Berger, RD., Bluemke, DA., Lardo, AC., Halperin, HR. 2008. Feasibility of real-time magnetic resonance imaging for catheter guidance in Electrophysiology studies. Circulation, 118(3) 223-229.

[6] Nordbeck, P., Bauer, WR., Fidler, F., Warmuth, M., Hiller, KH., Nahrendorf, M., Maxfield, M., Wurtz, S., Geistert, W., Broscheit, J., Jakob, PM., Ritter, O. 2009. Feasibility of real-time MRI with a novel carbon catheter for interventional electrophysiology. Arrhythmia and Electrophysiology, Circulation, 2(3) 258-267.

[7] Sonmez, M., Saikus, CE., Bell, JA., Franson, DN., Halabi, M., Faranesh, AZ., Ozturk, C., Lederman, RJ., Kocaturk O. 2012. MRI active guidewire with an embedded temperature probe and providing a distinct tip signal to enhance clinical safety. Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance, 14(1) 38.

[8] HH. Quick, 2012. MR-Compatible Instruments for Interventional MRI. ss 35-51. Kahn, T., Busse, H., ed. 2012. Interventional Magnetic Resonance Imaging, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 496s.

[9] Susil, RC., Yeung, CJ., Halperin, HR., Lardo, AC., Atalar, E. 2002. Multifunctional interventional devices for MRI: a combined electrophysiology / MRI catheter. Magnetic Resonance in Medicine, 47(3) 594-600.