

논문 2010-5-2

등가회로 모델을 이용한 Jerusalem AMC의 이동통신 대역폭 해석

Bandwidth Analysis of a Jerusalem AMC Based on Equivalent Circuit Model

우대웅*, 신동률*, 김정표**, 김기호**, 지정근**, 성원모**, 박위상***

Dae Woong Woo*, Dong Ryul Shin*, Jeong Pyo Kim**, Gi Ho Kim**,
Jeong Keun Ji**, Won Mo Seong**, Wee Sang Park***

요약 등가회로 모델을 바탕으로 Jerusalem AMC의 대역폭에 대하여 살펴보았다. 등가회로 모델과 어드미턴스 기울기 (Y')를 이용하여 다양한 파라미터의 변화에 따른 대역폭을 분석하였다. 기판의 두께 및 투자율은 대역폭을 향상시키는 반면, FSS grid의 부하(loading)에 의해 대역폭은 감소한다. FSS의 두 부하 중에서, 커패시터 부하가 인덕터 부하에 비해 대역폭 특성이 더 우수한 특성을 가진다. 인덕터 부하에 따른 대역폭 감소를 완화하기 위해 단일편파 특성을 가지는 AMC를 제안하였다.

Abstract The bandwidth of a Jerusalem AMC was investigated based on the equivalent circuit model. Using the circuit model and the derivative of the admittance(Y'), the relation between the bandwidth and various circuit parameters was analyzed. It was shown that the substrate thickness and permeability enhance the bandwidth whereas the loadings on FSS grid degrade the bandwidth. Among the two loadings, the capacitive loading had better bandwidth characteristics than the inductive loading. AMC with single polarization was suggested to relax the bandwidth degradation by the inductive loading.

Key Words : Artificial magnetic conductor, Bandwidth analysis, 이동통신

1. 서론

최근 Artificial Magnetic Conductor(AMC)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다^[1-3]. AMC는 표면 반사계수의 위상이 특정 주파수에서 0° 가 되는 물질이며, 반사계수의 위상이 180° 가 되는 도체(perfect electric conductor)와 상반된 특성을 가진다. 이러한 특성을 잘 이용하면 안테나의 표면 직접화(low profile)가 가능하며,

이득을 향상시킬 수 있다. 안테나 이외에도 TEM 도파관^[4], radar cross section(RCS) 감소 코팅^[5] 등 다양한 분야에 응용될 수 있다.

AMC는 자연 상에 존재하지 않으며, 주파수 의존적인 특성을 갖는다. Sievenpiper Mushroom 구조[1]는 대역폭이 좁고 크기가 큰 단점을 가진다. 이런 단점을 보완하기 위해 Jerusalem 등 다양한 AMC 구조들이 제안되었다. Mushroom 구조에서는 등가회로 구조와 파라미터에 따른 대역폭이 분석되었다^[1]. Jerusalem 구조에 대해서는 등가회로 구조는 제안되었으나^[6], 파라미터에 따른 대역폭의 수식적인 접근은 아직 보고되지 않았다. 본 논문에서는 Jerusalem AMC의 등가회로를 통해 파라미터와 대

*준회원, 포항공과대학교 전자전기공학과

**준회원, (주)이엠파블유

***정회원, 포항공과대학교 전자전기공학과(교신저자)

접수일자 2010.7.20 수정일자 2010.9.6

게재확정일자 2010.10.15

역폭 관계를 수식적으로 접근하였으며, 대역폭을 향상시키기 위한 방안을 제시하고자 한다.

II. Jerusalem AMC의 등가회로 모델

Jerusalem AMC는 그라운드, 기판, 그리고 Jerusalem 모양의 FSS grid로 구성된다. 그라운드와 기판만으로 AMC를 구현하는 방법은 기판의 두께가 관내 파장의 1/4가 되어야 하므로 소형화에 불리하다. 따라서 소형화를 위해 FSS grid가 기판 위에 추가된다. Jerusalem AMC의 구조 및 등가회로를 각각 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 두께 h 인 기판에 평면파가 입사할 때, 표면에서 보이는 임피던스(Z_d)는 다음과 같다.

$$Z_d = jZ_F \tan \beta l \quad (1)$$

여기서 기판 두께(h)가 관내 파장에 비해 매우 작을 경우($\beta h \ll 1$) 다음과 같이 근사화가 가능하다.

$$\begin{aligned} Z_d &\approx jZ_F \beta l = j \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \times \omega \sqrt{\mu \epsilon} \times h \\ &= j\omega \mu h = j\omega L_d \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 $L_d = \mu h$ 를 얻는다.

FSS grid의 등가 캐패시턴스(C_{ga} , C_{gd} , C_f)는 마이크로 스트립 선로의 odd mode 해석으로부터 근사적으로 구할 수 있다^[6]. C_{ga} 는 인접 셀과 공기층의 electric flux에 의해 발생하는 커패시턴스, C_{gd} 는 인접 셀과 기판 층의 electric flux에 의해 발생하는 커패시턴스, 그리고 C_f 는 셀 자체의 strip edge에서 발생하는 fringing field에 의한 커패시턴스를 의미한다. FSS의 등가 인덕턴스(L_g)는 전송선로이론에 의해 근사화가 가능하며, full wave 시뮬레이션과 비교하여 10% 이내의 오차를 보인다^[6]. 그림 2의 등가회로 구조에서 reflection phase가 0°가 되는 주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(C_{ga} + C_{gd} + C_f)(L_g + L_d)}} \quad (3)$$

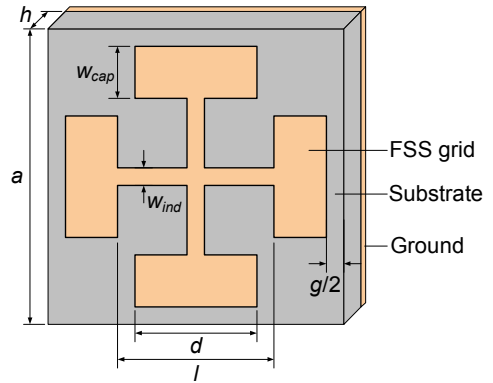


그림 1. Jerusalem AMC의 unit cell 구조
Fig. 1. Unit cell structure of a Jerusalem AMC

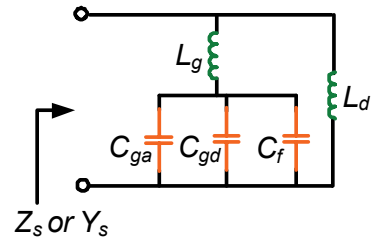


그림 2. Jerusalem AMC의 등가회로 구조
Fig. 2. Equivalent circuit of a Jerusalem AMC

식 (3)에서 각 파라미터 값들을 증가시키면 AMC 주파수가 감소할 것을 예상할 수 있지만, 파라미터 변화에 따른 대역폭의 관계를 살펴보는 것이 필요하다.

III. Jerusalem AMC의 대역폭 해석

AMC 공진주파수 근처에서 임피던스(Z_s)는 무한대에 가까워진다. 따라서 공진주파수 부근에서 어드미턴스(Y_s)는 0근처이며, 넓은 AMC 대역폭을 얻기 위해서는 어드미턴스의 변화가 적어야 한다. 등가회로 구조 (그림 2)에서 어드미턴스는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Y_s &= \left(j\omega C_t \parallel \frac{1}{j\omega L_g} \right) + \frac{1}{j\omega L_d} \\ &= \frac{j\omega C_t}{1 - \omega^2 C_t L_g} + \frac{1}{j\omega L_d} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $C_t = C_{ga} + C_{gd} + C_f$ 이다. 공진주파수 부근에서

어드미턴스의 기울기는 다음과 같이 근사된다.

$$\frac{dY_s}{d\omega} \Big|_{\omega \approx \omega_0} = j2C_t \left\{ 1 + 2 \left(\frac{L_g}{L_d} \right) + \left(\frac{L_g}{L_d} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

위 수식에서 기판의 높이(h) 또는 투자율(μ)을 증가시키면 L_d 값이 커져서 어드미턴스의 변화폭이 줄어든다. 따라서 대역폭이 늘어날 것을 예측할 수 있다. 하지만 기판의 높이를 증가시키면 구조가 전체적으로 bulky해지는 단점이 있으며, 투자율이 높은 물질이 소형화와 광대역에 적합하나, 1 GHz 이상의 높은 주파수에서는 구현이 어려운 단점이 있다.

FSS의 커패시터 부하(C_t) 또는 인덕터 부하(L_g)은 식 (5)의 분자에 해당하므로 부하 증가에 따른 대역폭 감소를 예측할 수 있다. 하지만 식 (5)를 통해서는 커패시터 부하와 인덕터 부하 중 어느 부분을 증가시키는 것이 더 유리한지 알기 어렵다. 식 (5)를 변형하면 다음과 같다.

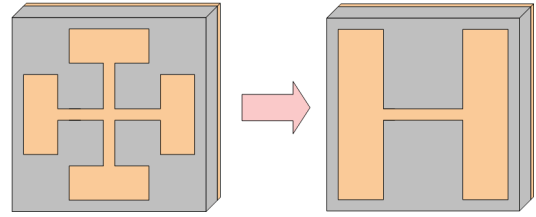
$$\frac{dY_s}{d\omega} \Big|_{\omega \approx \omega_0} = j2 \sqrt{C_t(L_d + L_g)} \frac{\sqrt{C_t}}{L_d^2} (L_d + L_g)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

부하에 따른 비교를 위해 공진주파수는 같으며($\omega_0 =$ 고정) 기판정보가 변하지 않는다고 가정한다($L_d =$ 고정). 이 때 식 (6)을 각각의 부하에 따라 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dY_s}{d\omega} \Big|_{\omega \approx \omega_0} &= j2 \frac{1}{\omega_0^2 L_d^2} (L_d + L_g) \quad (7) \\ &= j2 \frac{1}{\omega_0^4 L_d^2} \frac{1}{C_t} \end{aligned}$$

식 (7)에서 공진주파수와 기판 정보가 일정한 경우 인덕터 부하(L_g)를 늘리면 Y_s 의 기울기가 증가하며 반대로 커패시터 부하(C_t)을 늘리면 기울기가 감소하므로, 커패시터 부하가 인덕터 부하에 비해 대역폭 향상에 유리한 것을 알 수 있다. 일반적인 설계에서는 인덕터 부하가 소형화에 크게 기여하므로, 요구되는 셀의 크기 및 대역폭에 따라 부하 정도를 다르게 선택할 수 있다. 만약 다이폴과 같은 선형편파 안테나가 AMC 위에 장착된다면 한쪽 편파만 고려하면 되므로, 그림 1에서 인덕턴스를 줄이

고 커패시턴스를 강화한 구조를 제안할 수 있다(그림 3).



(a) Dual polarization (b) Single polarization

그림 3. 커패시턴스를 강화한 구조

Fig. 3. Structure for increased capacitance

IV. 시뮬레이션을 통한 검증

앞에서 살펴본 파라미터와 대역폭의 관계를 검증하기 위한 numerical simulation 및 circuit simulation tool은 각각 CST MWS와 MATLAB을 이용하였다. CST 시뮬레이션 환경은 주기구조 내에서 평면파가 입사하도록 설정하였다(그림 4). Jerusalem AMC 단위 셀의 크기는 15 mm x 15 mm x 1.6 mm, 유전율은 4.4로 두었다. 기본 FSS 파라미터는 $l = 7$ mm, $g = 0.3$ mm, $w_{cap} = 3.9$ mm, $w_{ind} = 0.5$ mm로 설정하였다. 이 구조의 CST 시뮬레이션과 등가회로의 reflection phase가 잘 일치하는 것을 확인하였다(그림 5). Reflection phase가 0°가 되는 주파수는 2.58 GHz, 대역폭은 2.27 %이며 전기적으로 $0.129 \lambda_0 \times 0.129 \lambda_0 \times 0.014 \lambda_0$ 에 해당한다. 동일한 셀 크기와 gap을 가진 mushroom AMC인 경우 주파수가 3.31 GHz, 대역폭은 10.6 %이므로 FSS 부하에 의해 cell 크기가 22% 줄어들지만 대역폭 또한 감소하게 된다.

몇 가지 파라미터에 대한 효과를 살펴보았다. 먼저 substrate 투자율과 높이에 따른 주파수 및 대역폭을 각각 표 1과 표 2에 정리하였다. 여기서 대역폭은 reflection phase가 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 사이인 주파수 범위로 정하였다. 투자율과 높이가 증가하게 되면 주파수가 감소하고 대역폭이 늘어나는 것을 확인할 수 있다.

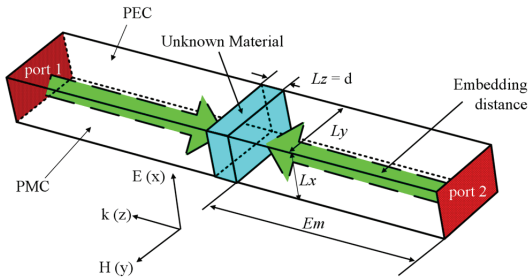


그림 4. CST 시뮬레이션 환경
Fig. 4. Simulation environment of CST

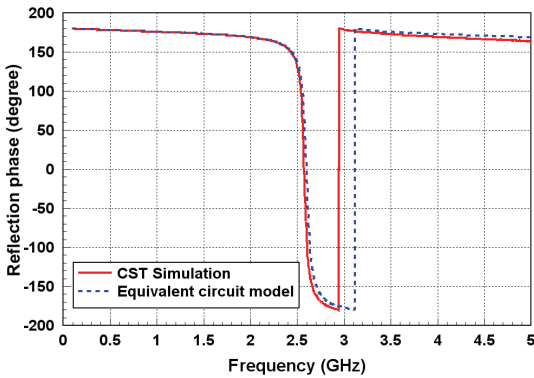


그림 5. CST와 등가회로 모델의 reflection phase 비교
Fig. 5. Reflection phase comparison between the CST and the equivalent circuit model

FSS 부하에 따른 특성을 살펴보았다. 표 3에서 d 값을 늘리게 되면(커패시터 부하) 공진주파수가 감소하며 대역폭이 좁아진다. 표 4에서 w_{ind} 를 줄이게 되면(인덕터 부하) 정도의 차이는 있지만 표 3과 유사한 경향을 보인다. 따라서 표 1 ~ 표 3의 결과는 식 (5)의 경향과 잘 일치한다.

부하 조합에 따른 대역폭을 살펴보았다(표 5). $d = 2.0$ mm, $w_{ind} = 0.1$ mm일 때보다 $d = 4.0$ mm, $w_{ind} = 1.3$ mm 두 경우 모두 reflection phase가 0° 가 되는 주파수는 3.4 GHz이지만 대역폭은 $d = 4.0$ mm인 경우가 더 넓다. 이를 통해 커패시터 부하가 인덕터 부하에 비해 대역폭 측면에서 유리함을 확인하였다.

마지막으로 dual polarization 구조에서 single polarization 구조(그림3)로 변경하여 커패시턴스를 늘려 보았다(표 5의 $d = 10$ mm, 14 mm인 경우). 이 때 주파수는 2.4 GHz가 되도록 설정하였다. 두 경우 모두 dual polarization($d = 6$ mm)인 경우보다 대역폭이 넓은 것을

알 수 있다. Single polarization인 경우에도 capacitance loading이 큰 경우($d = 14$ mm)가 작은 경우($d = 10$ mm)보다 대역폭이 넓으며, 이는 등가회로를 이용한 식 (7)의 경향과 잘 일치한다.

표 1. 투자율(μ_r)에 따른 AMC 특성

Table 1. AMC characteristics with permeability (μ_r)

μ_r	f_0 (GHz)	BW (%)
1	2.58	2.27
4	1.69	10.68
7	1.41	19.23
10	1.24	26.79

표 2. 높이(h)에 따른 AMC 특성

Table 2. AMC characteristics with thickness (h)

h (mm)	f_0 (GHz)	BW (%)
0.8	2.60	0.60
1.6	2.58	2.27
3.2	2.35	6.61
6.4	1.96	16.44

표 3. 커패시터 부하(d)에 따른 AMC 특성

Table 3. AMC characteristics with capacitive loading (d)

d (mm)	f_0 (GHz)	BW (%)
1.5	4.03	3.34
3.0	3.31	2.87
4.5	2.88	2.56
6.0	2.58	2.27

표 4. 인덕터 부하(w_{ind})에 따른 AMC 특성

Table 4. AMC characteristics with inductive loading (d)

w_{ind} (mm)	f_0 (GHz)	BW (%)
2.0	3.20	4.51
1.0	2.82	3.02
0.5	2.58	2.27
0.25	2.42	1.88

표 5. 부하 조합에 따른 AMC 특성

Table 5. AMC characteristics with various combination of loading

d (mm)	w_{cap} (mm)	l (mm)	w_{ind} (mm)	f_0 (GHz)	BW (%)
2.0	3.9	7.0	0.1	3.41	2.36
4.0	3.9	7.0	1.3	3.42	3.96
6.0	3.9	7.0	0.25	2.42	1.88
10.0	5.9	3.0	0.5	2.39	2.78
14.0	5.9	3.0	2.0	2.39	3.69

V. 결론

본 논문에서는 Jerusalem AMC의 등가회로를 살펴보고, 수식을 통해 각 파라미터와 대역폭과의 관계를 분석하였다. 그라운드와 기관에 의한 인덕턴스(L_d)를 늘리면 대역폭이 증가하며, 이를 위해서 기관의 두께를 증가시키거나 투자율을 증가시키는 방법이 있다. FSS grid의 부하로 AMC의 소형화가 가능하지만 대역폭이 좁아지게 된다. Jerusalem AMC에서 동일한 기관을 사용하고 같은 주파수에서 동작하는 경우, 커패시터 로딩이 인덕터 로딩에 비해 대역폭 측면에서 장점을 가진다. Dual polarization 대신 single polarization을 선택하고 커패시턴스를 늘리는 방법은, 소형화에 따른 협소한 대역폭 문제를 완화하는 방법 중 하나가 될 수 있다.

참고 문헌

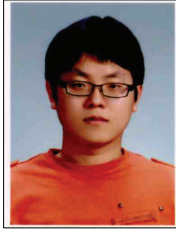
- [1] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolus, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 2059 - 2074, Nov. 1999.
- [2] Constantin R. Simovski, Peter de Maagt, and Irina V. Melchakova, "High-impedance surfaces having stable resonance with respect to polarization and incidence angle," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 3, pp. 908 - 914, Mar. 2005.
- [3] Alexander B. Yakovlev, Mario G. Silveirinha, Olli Luukkonen, Constantin R. Simovski, Igor S.

Nefedov, and Sergei A. Tretyakov, "Characterization of surface-wave and leaky-wave propagation on wire-medium slabs and mushroom structures based on local and nonlocal homogenization models," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 57, no. 11, Nov. 2009.

- [4] F. Yang, K. -P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, "A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic-bandgap (UC-PBG) structure," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2092 - 2098, Nov. 1999.
- [5] M. Paquay, J. Iriarte, I. Ederra, R. Gonzalo, and P. Maagt, "Thin AMC structure for radar cross-section reduction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 12, pp. 3630 - 3638, Dec. 2007.
- [6] Mirshahram Hosseinipناه, Qun WU, "Equivalent circuit model for designing of Jerusalem cross-based artificial magnetic conductors" *Radioengineering*, vol. 18, no. 4, Dec. 2009.

저자 소개

우 대 응(준회원)



- 2007년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)
 - 2007년 3월 ~ 현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 통합과정
- <주관심분야 : Artificial material, Crosstalk of twisted cables, Surface wave propagation>

신 동 루(준회원)



- 2004년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2006년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2006년 1월 ~ 2009년 6월: (주) 이엠파블유 선임연구원
- 2009년 8월 ~ 현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구원

<주관심분야 : 마이크로파 소자 및 시스템, RFID 시스템>

김 정 표(준회원)



- 2000년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공학사)
- 2002년 2월: 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학석사)
- 2007년 2월: 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학박사)
- 2004년 2월 ~ 2007년 7월: (주)이엠파블유안테나 중앙연구소 선임연구원

• 2007년 9월 ~ 2010년 2월: 한양대학교 연구교수
 • 2010년 3월 ~ 현재: (주)이엠파블유 중앙연구소 책임연구원
 <주관심분야 : 마이크로파 소자 및 시스템, 전자파 수치해석, 안테나 설계>

김 기 호(준회원)



- 2000년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
- 2002년 2월: 단국대학교 정보통신공학과 (공학석사)
- 2000년 1월 ~ 2004년 10월: (주)하이게인 안테나
- 2004년 11월 ~ 현재: (주)이엠파블유 중앙연구소 책임연구원

<주관심분야 : 소형 안테나>

지 정 근(준회원)



- 1997년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
- 1999년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학석사)
- 1999년 3월 ~ 2007년 10월: (주)펜텍 & 큐리텔 중앙연구소 선임연구원
- 2007년 11월 ~ 현재: (주)이엠파블유 중앙연구소 책임연구원

<주관심분야 : 소형 안테나, Metamaterial>

성 원 모(준회원)



- 1995년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
- 1997년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2007년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1998년 6월 ~ 현재: (주)이엠파블유 중앙연구소 연구소장

<주관심분야 : 안테나 설계 및 해석>

박 위 상(정회원)



- 1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
- 1982년 6월: University of Wisconsin - Madison 전자공학과 (공학석사)
- 1986년 8월: University of Wisconsin - Madison 전자공학과 (공학박사)
- 1984년 1월 ~ 1986년 8월: University of Wisconsin - Madison, TA 및 RA

• 1986년 8월 ~ 현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
 <주관심분야 : Small metamaterial antennas, antenna optimization, frequency selective surfaces, coupling of guided waves, wireless power transfer>