

논문 2009-46TC-12-10

항공기용 내장형 온-글래스 안테나 설계

(Design of Aircraft Internal On-glass Antennas)

강 우 준*, 추 호 성**, 김 영 기***, 강 호 원***

(Woojoon Kang, Hosung Choo, Younggi Klim, and Howon Kang)

요 약

본 논문에서는 FM 라디오 송수신을 위한 항공기용 글래스 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 광대역 주파수 특성을 얻기 위해 다중 루프 구조를 채택하였으며 탑승자의 시야확보를 극대화하기 위해 창틀 구조를 모사한 안테나 형상을 선택하였다. 세부적인 설계 변수는 Pareto 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화하였으며 설계된 글래스 안테나를 실제 한국형 기동헬기 조종석 측면 유리에 인쇄한 후 성능을 측정하였다. 측정결과 FM 주파수 대역에서 63.3%의 반전력 대역폭과, 전면방향 (bore-sight direction)에서 평균 -12.98 dBi의 수직편파 복사이득을 보였다.

Abstract

In this paper, we propose an aircraft on-glass antenna for FM radio reception. To obtain broad matching bandwidth, we employed a multiple loop as the basic antenna structure, and the shape of the loops mimics the frame of a window in order to ensure pilots' field of view as large as possible. The detailed design parameters of the multi-loop structure were determined using a Pareto genetic algorithm with a full wave EM simulation tool. The optimized on-glass antenna was built and installed on a Korean utility helicopter (KUH). The measurement results showed a half power matching bandwidth of about 63.3 %, average vertical bore-sight gain of about -12.98 dBi in the FM band.

Keywords : on-glass antenna, multi-loop structure, FM band, Field of view

I. 서 론

현재 모든 군용 항공기에는 지상 관제소와의 음성 통신 및 데이터 전송을 위해 FM 라디오 송수신기를 사용하고 있다. 이러한 FM 라디오 송수신 성능을 향상시키기 위해 대부분의 항공기에는 돌출된 폴 형상의 안테나가 장착되거나, 보다 공력 특성이 향상된 블레이드 형상의 안테나가 사용되고 있다^[1~2]. 그러나 폴 형상의 안테나와 블레이드 형상의 안테나는 항공기 외부에 돌출된 구조를 가져 비행 시 공력을 감소시키고, 또한 내구

성이 약하여 손상 시 전투력에 심각한 문제를 초래할 수 있어, 견고한 구조의 내장형 안테나에 대한 요구가 많아지고 있는 실정이다.

이러한 내구성 및 공기저항 문제를 해결하기 위해 차량의 경우에는 유리에 직접 안테나를 동박 선로로 인쇄하는 글래스 안테나가 개발되어 사용되고 있다^[3~6]. 그러나 지금까지 개발된 차량용 글래스 안테나는 동박 패턴이 인쇄된 유리의 높은 손실 탄젠트 때문에 복사이득이 낮고 대역폭이 좁으며 탑승자의 시야를 가리는 단점을 가진다.

본 논문에서는 차량용 글래스 안테나 기술을 항공기 캐노피(Canopy)나 측면 유리에 적용할 수 있도록 창틀 구조를 모사한 다중 루프 형태의 글래스 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 광대역에서 임피던스 정합에 유리하며 높은 복사이득을 갖는 다중 루프 구조를 가지도록 하였으며, 각 루프의 크기와 루프간 결합 선로는

* 학생회원, ** 정회원, 홍익대학교 전자전기공학부 (School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik Univ.)

*** 정회원, 한국형헬기 (KUH)

접수일자: 2009년11월17일, 수정완료일: 2009년12월14일

안테나의 공진 주파수를 고려하여 결정하였다. 비행 안전 및 전투력 향상을 고려하여 조종사의 시야확보를 극대화하기 위해 루프 안테나는 항공기의 캐노피나 창틀의 외형과 같은 형상을 갖도록 설계하였으며 안테나의 급전부는 무한 접지면과 가장 유사한 동체 지붕과 인접한 곳에 위치하였다. 제안된 안테나의 성능을 검증하기 위해 실제 한국형 기동헬기 측면 유리에 안테나 패턴을 제작한 후 안테나의 복사이득과 반사손실을 측정하였다. 측정 결과 창틀 구조를 모사한 다중 루프 형태의 글래스 안테나는 FM 동작 주파수 대역(30-88 MHz)에서 63.3 %의 반전력 대역폭($|Γ| < 3$ dB)을 가져 광대역 특성을 보이며 안테나가 위치한 전면방향(Bore-sight direction, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 270^\circ$)에서 평균 -12.98 dBi의 복사이득을 얻어 FM 라디오 송수신을 위한 기동헬기 내장형 글래스 안테나로 적합함을 검증하였다.

II. 안테나 설계 및 최적화

그림 1은 본 논문에서 제안한 창틀 구조를 모사한 한국형 기동헬기 내장형 측면 글래스 안테나 구조이다. 제안된 글래스 안테나는 다중 루프 구조를 적용하여 각각의 루프가 서로 다른 주파수에서 공진하도록 설계하여 넓은 반전력 대역폭을 가지도록 하였으며 루프의 형상이 글래스가 장착된 창틀 구조와 유사하도록 설계하여 조종사의 시야확보를 극대화하였다. 제안된 안테나의 설계 변수는 루프의 개수 (N), 각 루프선로 사이의 간격 (d_i), 최 외곽 루프선로와 창틀 사이의 거리(W_1 , W_2)이며 조종사의 시야확보를 위해 루프의 개수는 최대 3개로 제한하였다. 루프선로는 각각 서로 다른 주파수에서 공진하도록 길이가 결정되었으며, 각 루프는 연결선로로 결합되어 있는 구조를 가진다. 안테나의 최외곽 루프는 최저 목표 주파수인 40 MHz에서 공진하도록 약 1.8 m (0.25λ , 40 MHz)의 둘레길이를 가지며, 최내곽 루프는 둘레길이가 약 0.9 m (0.25λ , 80 MHz)로 하여 최고 목표 주파수인 80 MHz에서 공진하도록 하였다. 중간 루프선로는 약 1.3 m (0.25λ , 60 MHz)의 선로길이를 가지도록 하여 FM 대역 중심 주파수인 60 MHz에서 공진하도록 설계하였다. 각 루프는 네 모서리에서 서로 다른 루프와 연결선로를 사용하여 전기적으로 연결하였다.

설계 과정에서 글래스 안테나의 정확한 성능 예측을

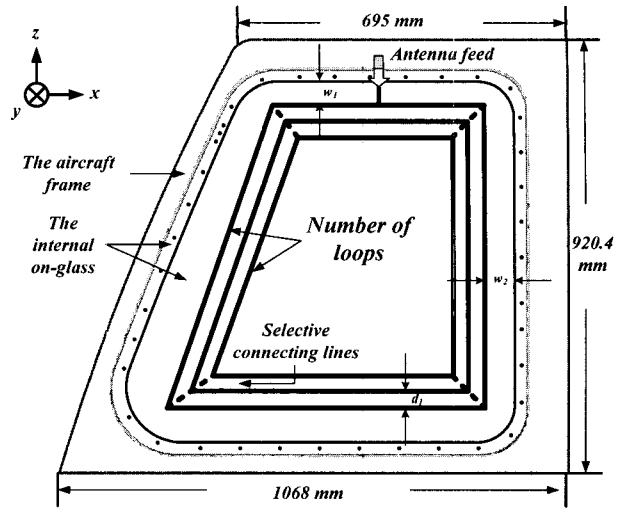


그림 1. 내장형 글래스 안테나 구조
Fig. 1. Geometry of the internal on-glass antenna.

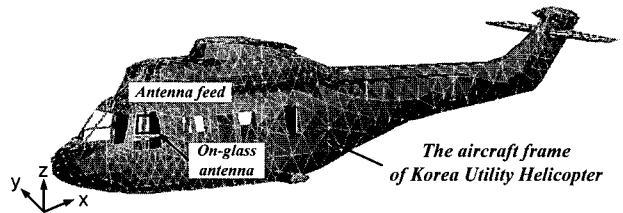


그림 2. 글래스 안테나가 적용될 헬기 모델
Fig. 2. The KUH model for the on-glass antenna.

위해 FEKO EM 시뮬레이션 툴(FEKO of EM Software and Systems)을 사용하였으며, 유리에 평면 스트립라인으로 인쇄되는 안테나패턴을 와이어 코팅된 형태로 등가화하여 EM 시뮬레이터의 해석 속도와 정확도를 높였다^[7-9]. 도출된 글래스 안테나 등가 해석 조건은 FM 주파수대역(30-88 MHz)에서 4 mm 두께의 글래스에 폭 1 mm의 스트립라인으로 인쇄된 선로를 반경 0.1 mm 전도성 와이어에 반경 15 mm의 글래스가 코팅된 형상을 사용하였다.

그림 2는 제안된 안테나가 적용될 한국형 기동헬기 모델로 EM 해석 시 사용될 mesh 형태를 보여주고 있다. 동일한 형상의 안테나도 동체에 장착되는 위치에 따라 안테나의 입력 임피던스와 복사패턴이 급격히 변화하므로 동체를 제외하고는 안테나의 정확한 성능을 예측할 수 없다. 동체를 조밀한 mesh 구조로 EM 해석에 포함시키면 성능예측의 정확도는 향상되나 해석시간이 늘어 최적화 시간이 크게 증가하는 단점이 있다. 따라서 전류가 많이 유기되는 측면 글래스와 인접한 구조체(측면 동체, 지붕, 급전부 부근)는 조밀한 mesh 구조로 나누었으며(약 $N/100-N/20$), 랜딩기어, 프로펠러, 조

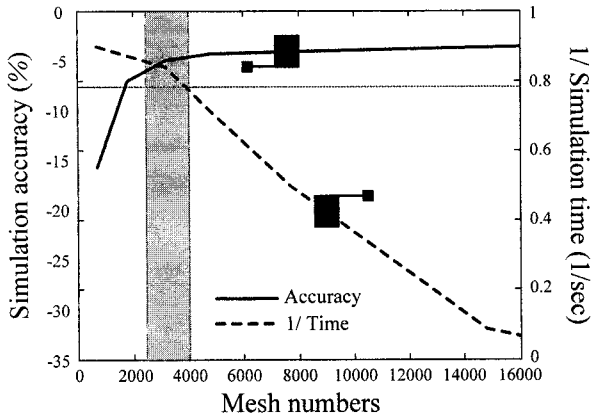


그림 3. 동체 mesh수에 따른 EM 시뮬레이션 정확도 및 해석 시간

Fig. 3. Accuracy and simulation time vs. aircraft mesh numbers.

중석 등 안테나의 임피던스 및 복사패턴에 영향을 적게 미치는 부분은 해석 시간 단축을 위해 삭제하였다^[6].

그림 3은 동체 mesh 개수에 따른 EM 시뮬레이션 정확도와 해석 시간의 상관관계를 보여준다. 동체 mesh 크기를 작게 하여 조밀한 구조를 사용할 경우 EM 시뮬레이션 정확도는 증가하지만 해석시간이 증가하여 단시간 내에 최적화가 불가능하므로 80%의 해석정확도를 유지하면서 한 개 주파수 당 2 분 이내로 해석 시간을 유지하기 위해 3,300 개의 동체 mesh 구조를 선택하였다.

제안된 안테나의 기본 설계변수를 바탕으로 안테나의 최적 성능을 도출하기 위해 자동 최적화 기법 중 하나인 Pareto 유전자 알고리즘을 사용하여 설계변수(N, d_i, W_1, W_2)들을 최적화하였으며 최적화 과정에서 유전자 알고리즘은 FEKO EM 시뮬레이션 툴과 접목되어 안테나의 성능을 평가하면서 세대 반복을 통해 최적 설계변수를 도출할 수 있었다^[10-11]. 본 Pareto 유전자 알고리즘에서 안테나 성능평가를 위해 사용된 세 개의 비용평가함수는 식 (1), (2), (3)과 같이 정의하였다.

$$Cost1 = 1 - \frac{BW_{ANT}}{BW_{FM}} \quad (1)$$

$$Cost2 = |\min [Gain(f, \theta = 90^\circ, \phi = 270^\circ)]| \quad (2)$$

$$Cost3 = 1 - \frac{S_{Field\ of\ view}}{S_{Window}} \quad (3)$$

$$30\ MHz \leq f \leq 88\ MHz$$

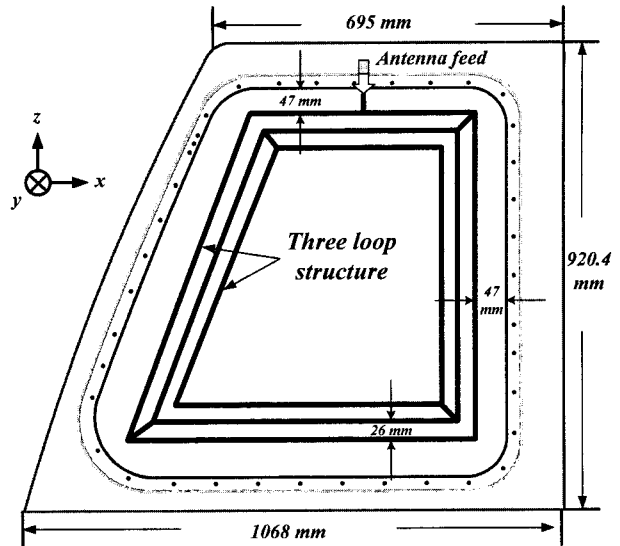


그림 4. 최적화된 안테나 형상

Fig. 4. The optimized on-glass antenna structure.

식 (1)은 FM 라디오 주파수대역에서 반전력 대역폭을 개선시키기 위해 사용된 함수이며, BW_{FM} 은 전체 FM 라디오 주파수 대역폭인 60 MHz($30\ MHz \leq f \leq 90\ MHz$)를 의미하고 BW_{ANT} 은 설계된 안테나의 반전력 대역폭($\Gamma < 3\ dB$)을 의미한다. 식 (2)는 안테나가 설치된 동체 좌측 글래스의 전면방향에서 최저 수직편파 복사이득을 향상시키기 위해 사용되었으며, 주파수 대역 내에서 최저 이득을 두 번째 비용평가함수로 사용하였다. 식 (3)은 조종사의 시야확보를 최대한 보장하기 위해 사용된 함수이며, S_{Window} 는 안테나가 설계될 측면 글래스 면적($0.126\ m^2$)을 의미하고, $S_{Field\ of\ view}$ 는 최 내곽 루프선로에 의해 결정되는 글래스 면적으로 안테나가 설계되지 않는 글래스 중앙 면적을 의미한다.

그림 4는 세 비용평가함수를 사용하여 최적화된 글래스 안테나의 형상을 보여준다. 최적화된 글래스 안테나는 약 43%의 반전력 대역폭을 가지며 FM 주파수대역에서 전면방향 평균 $-14.02\ dBi$ 의 복사이득을 갖는다. 또한 전체 글래스 면적($0.126\ m^2$) 중 안테나가 차지하는 면적($0.040\ m^2$)이 32.3%로 67.7%의 시야를 확보할 수 있으며 글래스 중앙부분에 안테나 선로가 설계되지 않아 다른 형상의 글래스 안테나에 비해 체감 시야확보는 더 좋은 것을 확인할 수 있다.

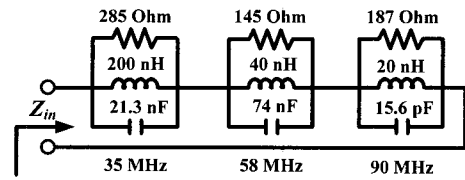
III. 성능 측정 및 분석

최적화된 설계 변수를 바탕으로 한국형 기동헬기 추

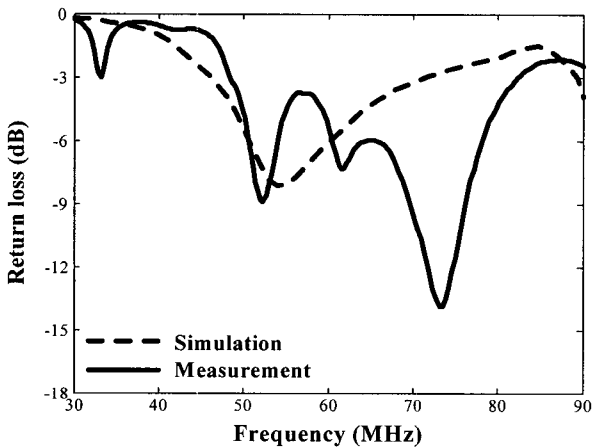
면 유리에 안테나를 제작하였으며 실제 기동헬기의 좌측(조종석 옆 유리)에 장착한 후 반사손실, 전면방향(Bore-sight direction, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 270^\circ$) 수직편파 복사이득을 측정하였다^[12]. 그림 5(a)는 창틀 구조를 모사한 다중 루프 형태 글래스 안테나의 반사손실 예측 값과 측정값을 비교한 것이다. 시뮬레이션 대역폭과 측정 대역폭은 각각 26 MHz($S_{11} < -3$ dB, 46-72 MHz)와 38 MHz($S_{11} < -3$ dB, 45-83 MHz)로 광대역 임피던스 정합 특성을 확인하였다. 그림 5(b)은 제안된 안테나의 전면방향 수직편파 복사이득의 예측 값과 측정값을 비교한 것으로 각각 점선과 실선으로 나타내었으며 두 결과 모두 FM 동작 주파수대역에서 평균 -14 dBi 이상의 수직편파 수신성능을 확인하였다.

창틀 구조를 모사한 다중 루프 형태 글래스 안테나의 동작 원리를 분석하기 위해서 등가회로 모델을 이용하

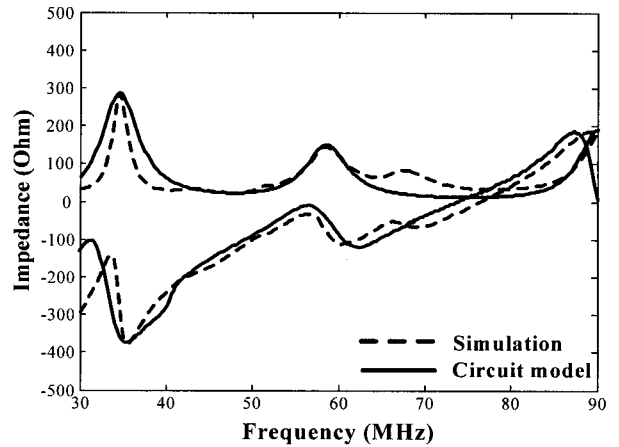
여 안테나의 임피던스 특성을 도출하였으며, 등가회로의 각 소자 값을 EM 시뮬레이션으로 계산한 입력 임피던스와 등가회로의 임피던스를 비교하면서 data fitting 방법을 사용하여 도출하였다. 등가회로 모델은 그림 6(a)에서와 같이 RLC 값을 통해 입력 저항과 입력 리액턴스를 만족하는 개별 소자로 표현될 수 있으며 각 RLC 소자 값을 그림에 표기하였다. 그림 6(b)에서는 제



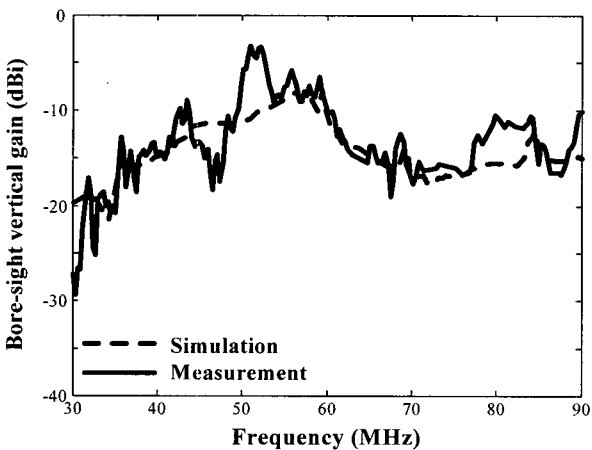
(a) Equivalent circuit model of the antenna



(a) Return loss of the antenna



(b) Input impedance comparisons



(b) Bore-sight vertical gain of the antenna

그림 6. 안테나 등가회로 및 입력 임피던스

Fig. 6. Equivalent circuit model and input impedance of the antenna.

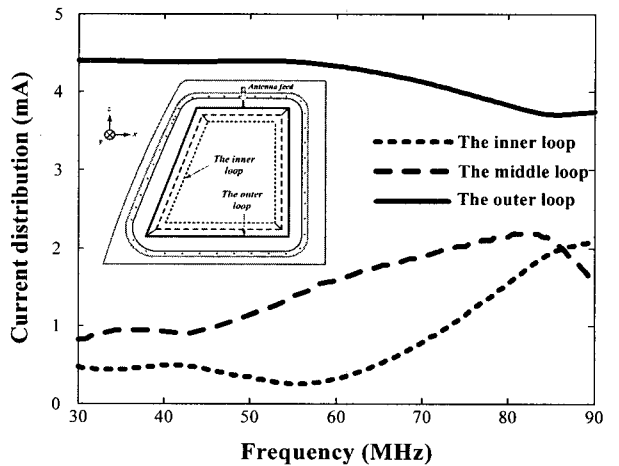


그림 7. 주파수에 따른 전류 분포

Fig. 7. Current distribution vs. frequency.

그림 5. 최적화된 안테나 성능

Fig. 5. Optimized antenna performances.

안된 안테나의 등가회로 모델을 검증하기 위해 시뮬레이터와 등가회로 모델을 이용하여 계산된 임피던스를 보여준다.

등가회로 모델과 시뮬레이션이 유사한 결과를 보이며, 30-90 MHz 대역에서 입력 저항이 거의 100 Ω 이하의 일정한 값을 가지고 입력 리액턴스 또한 0 Ω에 근접한 값을 갖고 35, 58, 90 MHz에서 삼중 공진을 보여 광대역 임피던스 정합에 유리함을 확인하였다.

다중 루프 구조에 의한 광대역 정합 특성 및 높은 복사이득 효과를 확인하기 위해 제안된 안테나의 전류분포를 그림 7에 나타내었다. 제안된 안테나의 각 루프선로에 흐르는 전류분포를 확인한 결과 저주파에서는 최외곽 루프선로를 따라 전류가 주로 유기되며 주파수가 올라감에 따라 중간 루프선로와 내 루프선로에 전류가 유기되어 마지막 공진 주파수(90 MHz)를 결정하는 것을 확인할 수 있다.

루프 형상 변화가 안테나 수신 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해, 각 루프선로 모서리 12 개의 위치 변화에 따른 안테나의 수직편파 복사이득 변화율을 계산하였다. 최적화된 모델을 바탕으로 각 모서리는 인접한 상하좌우 방향으로 각각 1 cm씩 이동시켰을 때 안테나의 복사이득 변화를 식 (4)에 대입하여 안테나의 구조 변화에 따른 성능 민감도를 구하였다.

$$Ant. \text{ sens.}(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Gain_{original} - Gain_{shifted}}{Gain_{original}} \right| \times 100 \quad (4)$$

그림 8은 각 선로의 민감도 결과이며 기동헬기 구조

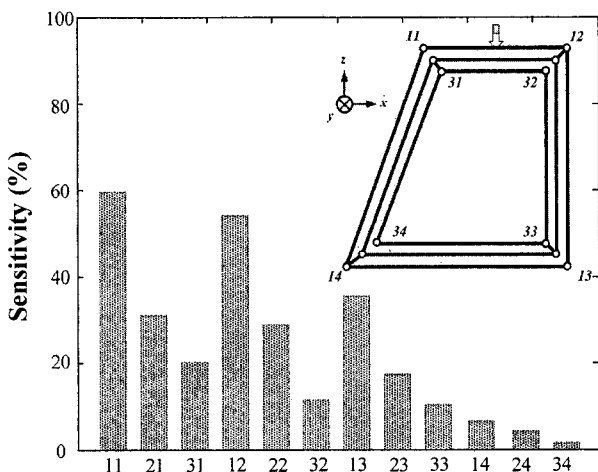
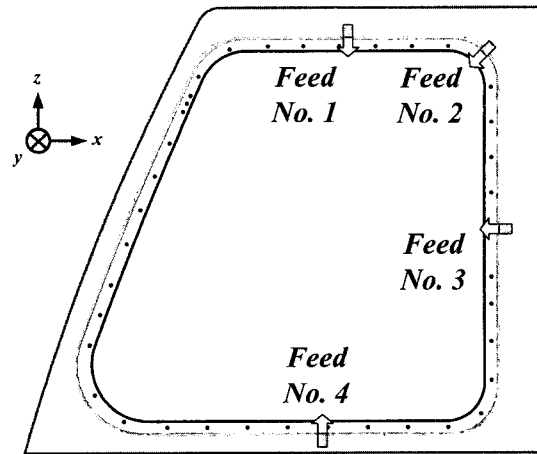
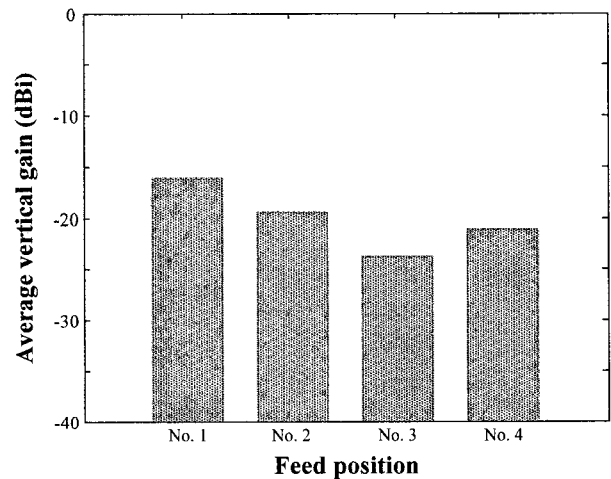


그림 8. 안테나 민감도
Fig. 8. Antenna sensitivity.



(a) Available feeding positions



(b) Performance comparisons

그림 9. 급전 위치에 따른 안테나 성능 비교
Fig. 9. The antenna performance vs. antenna feed positions.

체 중 무한 접지면과 가장 유사한 역할을 하는 동체 지붕에 인접한 두 지점(11, 12)에서 가장 높은 변화율을 보여 수직편파 복사이득 수신에 가장 중요한 설계 요소인 것을 확인할 수 있었다.

일반적으로 안테나가 동체에 장착될 경우 동체 급전되는 위치에 따라 성능이 크게 변할 수 있다. 그림 9(a)는 글래스 안테나가 설계될 한국형 기동헬기 좌측 유리에 급전 가능한 지점을 표시하였으며 그림 9(b)는 각 급전 지점에서 창틀 구조를 모사한 다중 루프 형태 글래스 안테나를 각각 최적화하여 안테나 성능을 비교한 것이다. 동체 지붕과 가장 인접한 1번 위치가 가장 높은 복사이득을 보여 최적 급전위치임을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 창틀 구조를 모사한 다중 루프 형태 글래스 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나 형상에서 다중 루프선로는 대역폭 특성을 향상시키기 위해 사용되었으며 조종사의 시야확보를 극대화하기 위해 창틀구조를 모사하여 안테나 형상을 설계하였다. 각 루프선로의 크기와 루프와 루프간 결합선로는 안테나의 공진주파수를 고려하여 설정하였다.

안테나 구조는 Pareto 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화하였으며 최적화된 안테나 성능을 한국형 기동헬기에 장착한 후 측정하였다. 측정결과 제안된 안테나는 FM 중심주파수를 기준으로 63.3 %(45-83 MHz)의 반전력 대역폭을 가지며, 안테나가 설치된 전면방향에서 평균 -12.98 dBi의 수직편파 복사이득을 보여 FM 송수신용 기동헬기 내장형 글래스 안테나로 사용 가능함을 확인하였다.

제안된 안테나는 저주파에서 최 외곽 루프선로에 고주파에서 중간 및 내 루프선로에 강한 전류가 유기되어 광대역 정합 특성을 보였으며, 최적 급전점은 동체 글래스 중심축에서 차체 지붕과 가장 인접한 위치임을 확인하였다.

제안된 안테나는 저주파에서 최 외곽 루프선로에 고주파에서 중간 및 내 루프선로에 강한 전류가 유기되어 광대역 정합 특성을 보였으며, 최적 급전점은 동체 글래스 중심축에서 차체 지붕과 가장 인접한 위치임을 확인하였다.

참 고 문 헌

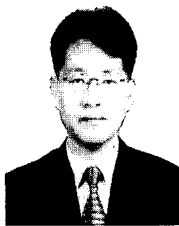
- [1] S. Bhattacharya, S. A. Long and D. R. Wilton, "The input impedance of a monopole antenna mounted on a cubical conducting box," *IEEE Trans. Antenn. Propagat.*, Vol. 35, no. 7, pp. 756-762, July 1987.
- [2] G. Marrocco, L. Mattioni and V. Martorelli, "Naval structural antenna systems for broadband HF communications - Part II: Design methodology for real naval platforms," *IEEE Trans. Antenn. Propagat.*, Vol. 54, no.11, pp. 3330-3337, Nov. 2006.
- [3] 심재륜, 이준호, 이성신, 김효채, "차량용 FM 라디오 수신을 위한 유리창에 프린트된 안테나의 개발," *전자공학회논문지*, 제 35권 D편, 제5호, 18-23쪽, 1998년 5월
- [4] R. Abou-Jaoude and E. K. Walton, "Numerical modeling of on-glass conformal automobile antennas," *IEEE Trans. Antenn. Propagat.*, Vol. 46, no. 6, pp. 845-852, June 1998.
- [5] Y. Noh, Y. Kim and H. Ling, "Broadband on-glass antenna with mesh-grid structure for automobiles," *Electron. Lett.*, Vol. 41, no. 21, pp. 1148-1149, Oct. 2005.
- [6] 강우준, 계영철, 박슬기, 오정훈, 추호성, "다중 선로가 로딩된 T-DMB 수신용 차량 글래스 안테나 설계," *한국전자과학회논문지*, 제 20권, 제7호, 664-672쪽, 2009년 7월
- [7] J. Moore, "Simplified analysis of coated wire antennas and scatterers," *IEE Proc., Microw. Antenn. Propagat.*, Vol. 142, no. 1, pp. 14-18, Feb. 1995.
- [8] Arindam Chatterjee, John L. Volakis and William J. Kent, "Scattering by a perfectly conducting and coated thin wires using a physical basis model," *IEEE Trans. Antenn. Propagat.*, Vol. 40, no. 7, pp. 761-769, Jul. 1992.
- [9] U. Pekel, N. Wang, and L. Peters, "An equivalent model for the analysis of electromagnetic scattering from a long, lossy tether structure," *IEEE Trans. Antenn. Propagat.*, Vol. 40, no.12, pp. 1555-1561, Dec. 1992.
- [10] FEKO of EM software and Systems, <http://www.feko.info>.
- [11] J. Horn, N. Nafpliotis and D. E. Goldberg, "A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization", in *Proc. of IEEE Conf. on Evolutionary Computation*, Vol. 1, pp. 82-87, June 1994.
- [12] Korean Utility Helicopter (SURION), <http://www.koreaaero.com>.

저 자 소 개



강 우 준(학생회원)
 2008년 2월 홍익대학교 전자전기
 공학과 (공학사)
 2008년 3월~현재 홍익대학교
 전자정보통신대학원
 석사과정
 2009년 12월~현재 LG BS사업부
 Car audio 연구실 연구원

<주관심분야 : 최적화 알고리즘을이용한 안테나
 설계, 차량용 클래스 안테나 설계>



김 영 기(정회원)
 1985년 2월 경북대학교
 전자공학과 (공학사)
 1988년 12월 대우중공업
 항공사업본부 입사
 1988년 1월~1995년 12월 기본훈
 련기 (KTX-1)설계개발
 (비행시험계측)

1996년 1월~1997년 12월 기본훈련기 항공전기
 전자계통 및 양산규격화 설계개발
 1998년 1월~2006년 2월 기본훈련기 양산설계
 지원 및 KT-1B(인도네시아수출기)설계
 2006년 3월~현재 한국형헬기(KUH) 항공전자
 계통체계설계 (책임연구원)

<주관심분야 : 항공기(고정익, 회전익) 항공전자
 통합설계, 통신/항법/제어시스템설계, 항공기용
 최적화 안테나 패턴분석/설계개발>



추 호 성(정회원)
 1998년 2월 한양대학교
 전파공학과 (공학사)
 2000년 8월 미국 Univ. of Texas
 at Austin 전자전기
 공학부 (공학석사)
 2003년 5월 미국 Univ. of Texas
 at Austin 전자전기공학
 부 (공학박사)

2003년 6월~2003년 8월 미국 Univ. of Texas at
 Austin 전자전기공학부 (Post Doctor)
 2003년 9월~현재 홍익대학교 전자전기공학부
 조교수

<주관심분야 : 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을
 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테
 나 >



강 호 원(정회원)
 2007년 8월 경희대학교 전파통신
 공학과 (공학사)
 2007년 9월~12월 한국항공우주
 산업(주) 인턴 근무
 2008년 1월 한국 항공우주산업
 (주) KHP 사업부 입사

2008년 1월~현재 한국형 기동헬기(KUH)
 항공전자계통체계설계 (연구원)

<주관심분야 : 항공기 안테나 최적화 배열, 항공
 기 Conformal 안테나 등 >