<論文>

마커를 이용한 시계비행 항공기의 비행 위험지역 회피용 경보장치

서범석*, 김연명†, 강자영‡, 윤태원*, 황병원*

A Warning System Using Marker Beacon to Avoid Hazardous Area in VFR Mode

B. S. Seo*, Y. M. Kim†, J. Y. Kang‡, T. W. Yun*, B. W. Hwang*

목 차

Ⅰ. 서 론
Ⅱ. 경보장치의 구성 및 조건
Ⅲ. 최적 안테나의 설계 및 설치방안
Ⅳ. 경보이후 비행경로
Ⅴ. 결 론

ABSTRACT

When a straight-in landing from an instrument approach using ILS or VOR/DME is not possible or desirable because of topographical reason or bad weather, a circling approach maneuver is initiated by the pilot to align the aircraft with a runway for landing. Visual contact with the runway is necessary while conducting a circle to land maneuver. This research is to develop a new warning system based on a conventional marker system which alerts pilots to watch out for exceeding the circling approach area. The airborne system also uses the same receiver unit without any new installations. The objective of this research is to design and develop a Yagi antenna in a special form. The research includes computer simulations to determine the size of antenna radiation pattern and to compute an expected flight path in case of alarm to validate effectiveness of the system.

Keywords : Radio beacon(무선전파막), Yagi antenna, ILS, warning system(경보장치)

* 한국항공대학교 항공전자공학과
연락저자, E-mail : bwhwang@hau.ac.kr
† 교통개발연구원 항공교통연구실
‡ 한국항공대학교 항공운항학과

Ⅰ. 서 론

지역여건상 ILS(Instrument Landing System)나 VOR(VHF Omnidirectional Range)/DME (Distance Measuring Equipment)등 항행안전시설을 이용한 착륙이 곤란한 활주로에서는 조종사가 눈으로 직접 확인하여 착륙하는 선회착륙방식, 즉 시계비행방식(Visual Flight Rule, VFR)이 이용되고 있는 실정이다.

그러나, 선회착륙방식은 결항률이 높아질 뿐만 아니라. 일반적으로 항행안전시설을 이용하는 계기착륙방식보다 안전도가 낮은 것이 사실이다. 따라서, 본 논문에서는 김해공항 북측 활주로와 같이 항행안전시설을 설치하지 못하는 공항에 대하여 선회착륙하는 항공기가 악천후 등으로 최종적으로 선회해야하는 지점을 발견하지 못하고 통과하여 사고가 발생하는 것을 막기 위하여 선회지점을 벗어난 지점에 무선전파의 전파막, 즉 마커신호로 조종사에게 위험신호를 알려주는 역할을 하는 장비를 개발하기로 한다. 이 경우 항공기에는 새로운 장비를 갖추지 않고 조종사가 새로운 조작을 하지 않아도 경보가 울리도록 하여 조종사의 부담을 최대한으로 줄여야한다.

이를 만족하기 위해서 ILS의 구성장비로 사용중인 마커를 기반으로 하고, 현재 마커에 사용중인 송신기의 주파수 및 변조방식 등을 그대로 이용하고, 변조주파수 및 신호만을 바꾸고, 안테나를 특수한 형태로 개발하기로 한다.

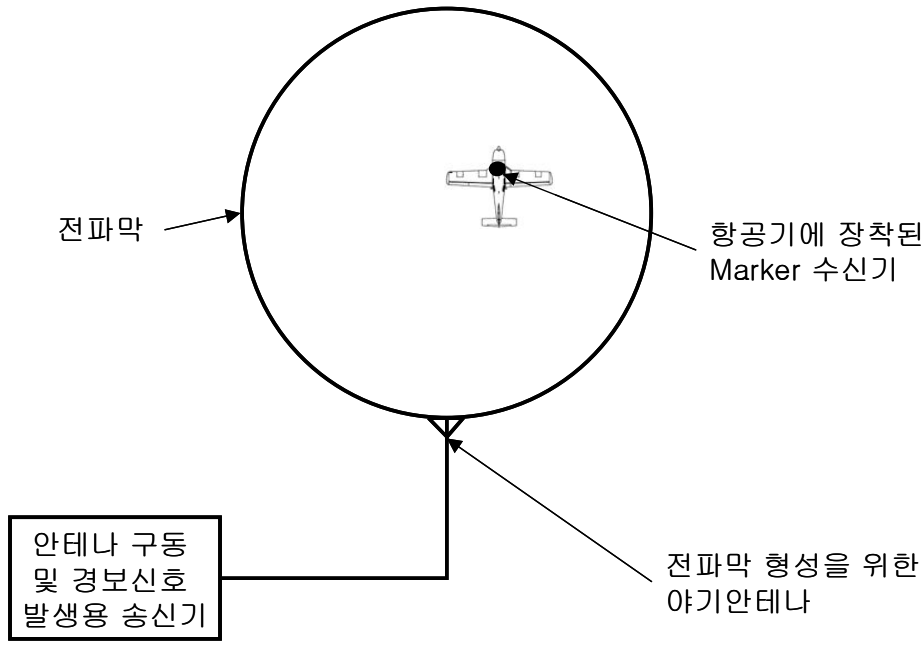
본 논문에서는 김해공항을 전제로 하여 먼저 경보장치의 조건 및 적정한 전파막의 크기를 결정하고, 이에 알맞은 최적 야기안테나를 설계한다. 그리고 안테나의 방사패턴, 즉 전파막의 크기를 시뮬레이션 한 다음, 장치를 설치하는 위치를 결정한다. 또한, 경보 후 가상 비행경로를 계산하여 이 시스템의 유효성을 검증하기로 한다.

Ⅱ. 경보장치의 구성 및 조건

구현하고자하는 경보장치의 구성 및 조건을 <그림 1>에 표시한다. 안테나 구동 및 경보신호 발생용 송신기에서 어떠한 경보신호를 사용할 것인가에 대하여 설명하고, 필요로하는 전파막을 형성하기 위한 안테나를 설계한 다음 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 검증하기로 한다.

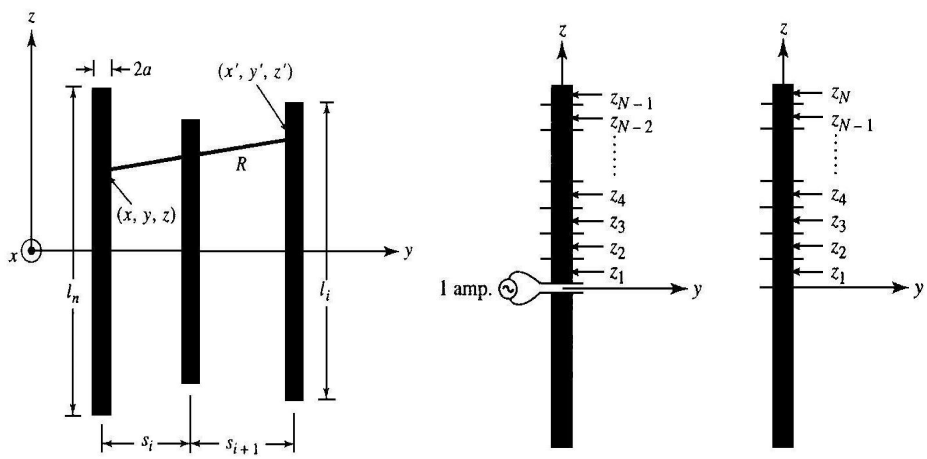
무선전파의 전파막의 적절한 규모를 알기위해서는 해당 공항의 상황을 알지 않으면 안된다. 김해공항의 예를 들면, 김해공항의 장해물도 및 김해공항의 활주로 유도등의 배치도를 참조하면 된다. 김해공항의 장해물도에 의하면, 활주로 끝에서 최초의 산까지의 거리는 약 3.8km이고, 김해공항 유도등 배치계획도에 의하면 활주로 끝에서 4km인 점에서 순회비행이 시작되는 것으로 되어 있기 때문에, 전파막의 폭은 3.6km이상이고, 가장 높은 산의 높이는 650m이므로, 전파막의 규모는 폭이 3.6km이상이고, 높이는 700m이상이면 된다는 결론이 얻어진다.

한편, 전파막 장비의 조건은 항공기에는 새로운 장비를 추가로 장착하지 않아야하고, 조종사가 별도의 조작을 하지 않아도 악천후등으로 시계가 확보되지 않아 선회지점을 통과하는 경우에 경보와 불빛으로 조종사에게 경보를 알려주어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 전파막 장비로는 ILS의 구성 장비인 마커(Marker)[1]를 응용하면 된다는 결론이 얻어진다. 마커는



<그림 1> 경보장치의 구성도

ILS의 부속시설로, 착륙하는 항공기가 마커가 설치된 상공을 지날 경우에 항공기 내에 설치된 수신기가 이 신호를 수신하여 경보(음성 및 불빛)를 울림으로써 조종사가 용이하게 통과지점을 알 수 있도록 운영되고 있는 장비이다. 마커는 외방마커(Outer Marker), 중간마커(Middle Marker)및 내방마커(Inner Marker)등 3가지의 종류가 설치되어 운영되며, 마커용 안



(a) 소자간 간격 (b) 기생소자들 (c) 급전소자

<그림 2> 모멘트법 공식을 위한 Yagi-Uda 배열 안테나의 구조

테나로는 야기(Yagi)안테나가 사용되고, 마커 표지는 95%변조된 75MHz의 주파수를 사용하고 있다. 항공기가 외방, 중간 및 내방마커 상공을 통과할 때 서로 다른 변조 주파수의 가청음과 서로 다른 색의 불빛을 조종사에게 주고, 이 정보는 조종사에게 활주로로부터의 거리를 제공하게 된다. 통달범위 안에서의 최소전계강도는 1.5 mV/m 이상이어야 하고, 방위각과 활공각상에서 측정된 운용폭은, 내방마커인 경우 150m ± 50m, 중간마커인 경우 300m ± 100m, 외방마커인 경우 600m ± 200m의 범위안에 있어야 한다.

식별부호를 위하여 반송파의 변조신호는 내방마커인 경우 매초 6단점(·····), 중간마커인 경우 단점과 장점을 반복신호로 하되, 단점은 매초 6개이고, 장점은 매초 2개의 속도(·–·–), 외방마커인 경우 매초 2개의 장점(––)으로 하고 있다. 그런데, 전파막의 폭은 3.6km 이상이어야 하므로, 마커용 안테나는 빔폭이 좁으므로 이용 불가능하다는 것을 알 수 있다. 또한, 변조신호도 조종사로 하여금 마커신호와 혼돈을 피하기 위하여 마커신호와 다른 신호를 고안하지 않으면 안된다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 야기안테나를 설계하기 위해서는 먼저, 야기안테나의 방사패턴을 포클링톤(Pocklington) 적분방정식을 기초로하여 구하고, 이를 토대로 모멘트법에 의한 컴퓨터 프로그램을 개발한 다음, 시뮬레이션을 거쳐서 최적의 야기안테나를 설계하지 않으면 안된다.

야기-우다(Yagi-Uda) 배열 안테나에 대한 많은 실험적인 연구와 해석적인 공식이 만들어져 있을 뿐만 아니라 배열 안테나에서 방사된 전계에 대해서는 적분방정식에 기초를 둔 상세한 방법이 제시되었고, 이 방법이 소자들에서의 복소 전류분포, 위상속도 및 해당 방사패턴등을 나타내는데 사용된다[2-15]. 대표적인 방법은 실레(Thiele)의 논문과 같이 Pocklington 적분방정식으로부터 출발하고, 이 논문에 제시된 것은 Balanis에 의해 수식화된 것을 이용하였다[3].

모멘트법을 이용하여 방사패턴의 식을 구하기 위한 야기-우다 배열안테나의 구조를 <그림 2>에 표시하고, 이를 토대로 Pockington 적분방정식을 모멘트법으로 구한 원거리 전계패턴의 식을 다음과 같이 표시한다[3].

$$E_\theta = \sum_{n=1}^{N} E_{\theta n} = -j\omega A_\theta \tag{1}$$

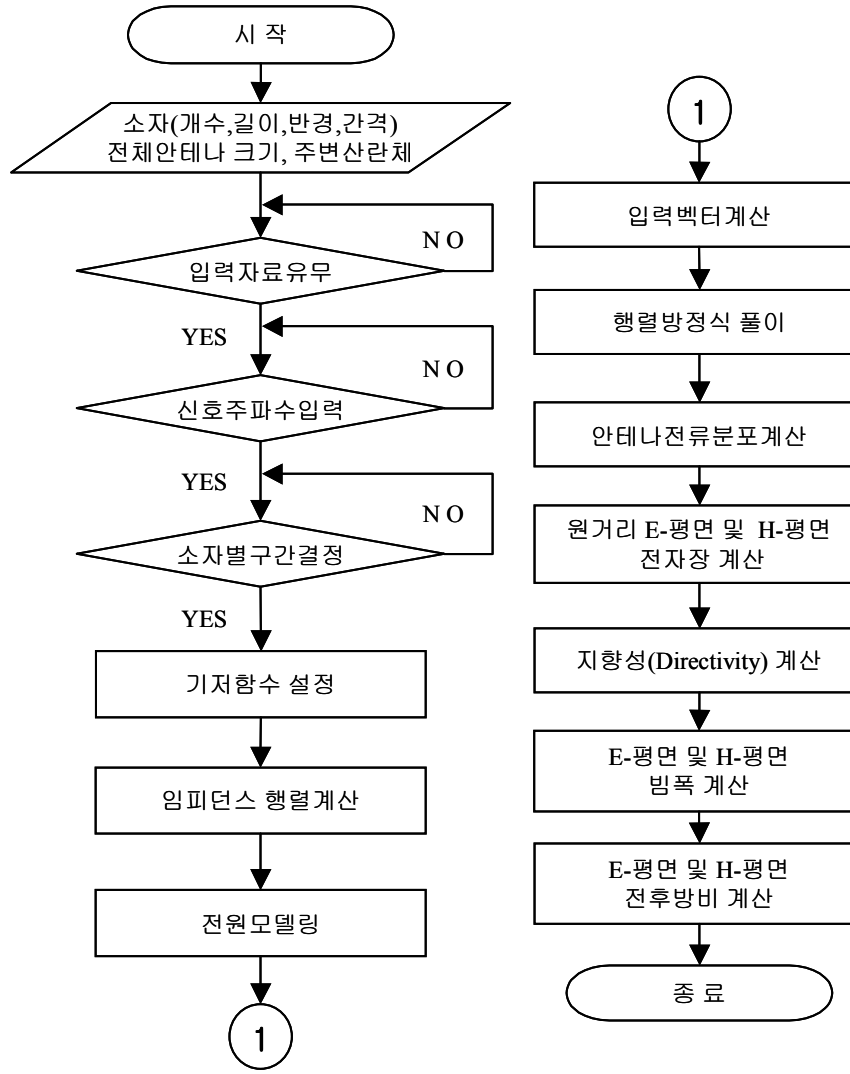
$$A_\theta = \sum_{n=1}^{N} A_{\theta n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r}\sin\theta \sum_{n=1}^{N}\left\{ e^{-jk(x_n \sin\theta\cos\phi + y_n \sin\theta\sin\phi)} \cdot \sum_{m=1}^{N} I_{nm}\left[\frac{\sin(Z^+)}{Z^+} + \frac{\sin(Z^-)}{Z^-}\right]\right\}\frac{l_n}{2} \tag{2}$$

$$Z^+ = \left[\frac{(2m-1)\pi}{l_m} + k\cos\theta\right]\frac{l_n}{2} \tag{3}$$

$$Z^- = \left[\frac{(2m-1)\pi}{l_m} - k\cos\theta\right]\frac{l_n}{2} \tag{4}$$

Ⅲ. 최적 안테나의 설계 및 설치방안

Pocklington 적분방정식(모멘트법)에 따라서 야기-우다 배열안테나의 E-면 및 H-면 전계패턴, 해당 전계패턴의 폭 및 지향성등을 계산하는 컴퓨터 프로그램의 순서도(Flow Chart)를 <그림 3>에 표시한다.

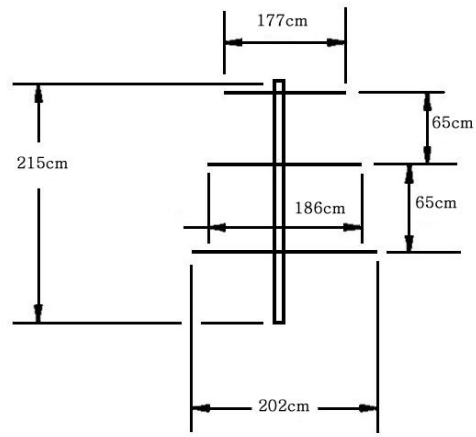


<그림 3> 방사패턴을 구하는 순서도

<그림 3>과 같은 순서도에 따라서 김해공항의 전파막 설치를 위한 최적 야기안테나를 설계하고, 그 설계된 야기안테나를 이용하여 전파막 설치 장비의 조건 및 규모에 맞는 전파막 설치장비의 설치방안, 그리고 설치위치를 결정하기로 한다.

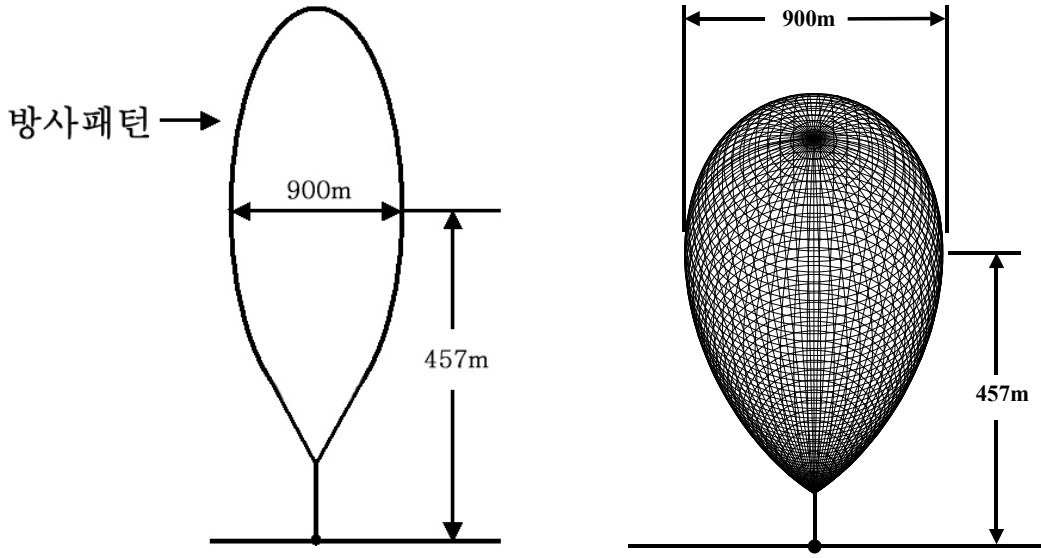
(1) 1기의 야기안테나를 활주로 유도등에 일치하는 지점에 설치하는 방안

<그림 3>과 같은 순서도에 따라서, 사용주파수가 75MHz이고, 3소자(1개의 도파기, 1개의 반사기, 1개의 급전기) 야기안테나를 <그림 4>와 같은 구조로 설계하고, 시뮬레이션한 결과의 2차원 전계 방사패턴을 <그림 5>의 (a)에 표시하고, 3차원 전계 방사패턴을 <그림 5>의 (b)에 표시한다. 이 경우 송신기의 전력을 1.5W로 하였다.
야기안테나의 기본단위는 3소자 즉, 급전소자와 기생소자들로 구성되고, 급전소자는 여진기(driver)로 사용되는데, 여진기로는 공진 반파장 다이폴이 이용되고 있다. 기생소자가 여진기에 매우 가깝게 위치하면 여진기는 기생소자를 거의 같은 진폭으로 여기한다. 이때, 기생소자에서 여기된 전류와 그것에 의해 발생된 도선에 접하는 방사전계는 입사파에 대해 똑같은 크기와 반대 위상을 가지게 되는데, 이것은 여진기로부터 기생소자에 도달한 전계가 기생소자에 접선방향이고, 두 도체의 접선방향인 전체 전계는 0으로 되기 때문이다. 기생소자를 반파장 다이폴보다 길게하면, 단일 주 빔(main beam)은 배열축을 따라 기생소자로부터 여진기로의 엔드 파이어(endfire) 방향으로 발생하고, 이러한 기생소자는 여진기로부터의 방사를 반사하는 것처럼 보이므로 반사기(reflector)라고 한다.



<그림 4> 설계된 야기안테나의 소자의 길이 및 소자간 간격

만일 기생소자가 여진기보다 더 짧고 반사기와는 달리 여진기의 다른 한쪽에 위치할 때, 패턴에 미치는 영향은 주 빔과 동일방향으로 형성되므로, 이 기생소자를 도파기(director)라고 하는데, 그 이유는 여진기에서 도파기 방향으로 방사를 유도하는 것처럼 보이기 때문이다. 일반적으로 야기안테나는 전후방비가 발생하므로, 안테나를 공중을 향하게 하고 여진하면 후엽(back lobe)의 간섭으로 단일 지향성 향상에 문제를 일으키지만, 본 논문에서 설계한 안테나의 후엽은 거의 존재하지 않는다. 왜냐하면, 프로그램에 의해 계산한 전후방비는 38.7dB로 매우커서, 이 안테나를 1.5m이상에서 공중을 향해 설치하면 지면반사등의 영향을 받지 않기 때문이다.



(a) 2차원 전계패턴 (b) 3차원 전계패턴

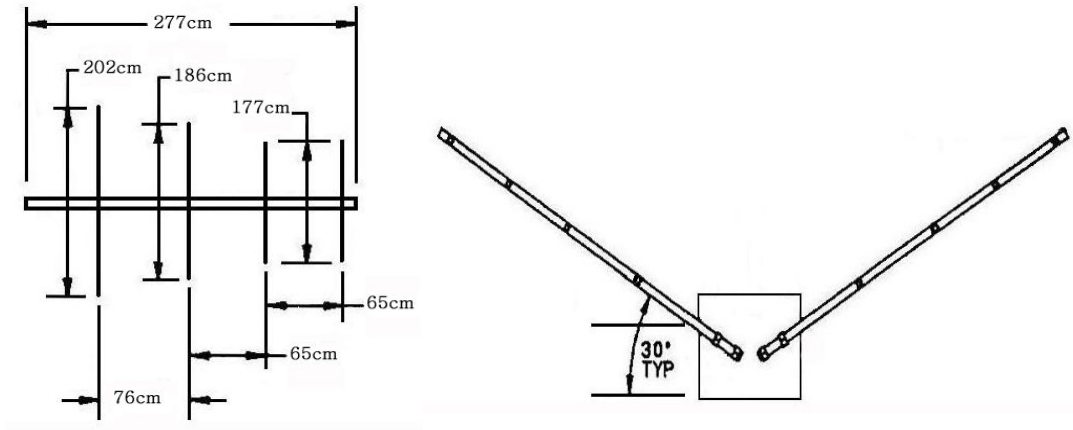
<그림 5> 설계된 안테나의 패턴 및 폭의 길이

<그림 4>와 같은 단일 야기안테나를 <그림 10>의 ①의 위치나 유도등을 따라 항공기가 순회를 시작하는 지점에 설치하면 되는데, 이 경우 ①의 위치에 설치하는 경우에는 위험지역에 돌입할 경우에만 경보음이 발생된다. 그러나 순회하는 지점에 안테나를 설치하면 순회지점은 알려주지만 모든 항공기에서 경보음이 발생하게 된다. 이 경우, 전파막의 폭은 3.6km이상은 되어야 하는데, 설계된 안테나의 전계방사패턴(전파막)의 폭은 900여m에 지나지 않으므로 항공기 유도등이 설치되지 않은 공항에 설치하는 경우에 문제가 발생할 경우가 있다.

(2) 1기의 야기안테나를 활주로와 산 사이에 설치하는 방안

<그림 3>과 같은 순서도에 따라서, 사용주파수가 75MHz이고, 4소자(2개의 도파기, 1개의 반사기, 1개의 급전기) 야기안테나를 이중구조로 배치하고, 소자들의 길이 및 소자 사이의 간격을 <그림 6>과 같이 하여 시뮬레이션한 결과의 방사패턴을 <그림 7>에 표시한다. 이 경우 송신기의 전력은 1.5W로 하였다. <그림 6>과 같은 안테나를 사용하고, 야기안테나의 송신출력이 0.5W, 1W, 1.5W 및 3W인 경우의 시뮬레이션 결과를 <표 1>에 표시한다.

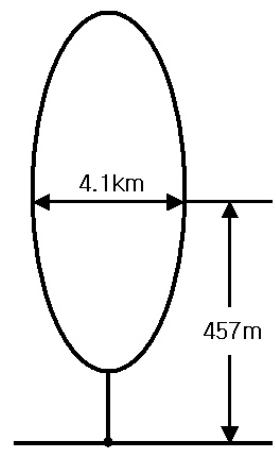
<그림 6>과 같은 이중구조 야기안테나에 3W의 송신출력이 있는 경우의 전계 방사패턴은 <표 1>로 부터 알 수 있는 것처럼 폭이 4100m로 되어 전파막의 조건인 3.6km를 만족시킬 수 있다. 따라서 이러한 안테나를 <그림 10>의 ②의 위치에 설치하면 만족한 결과를 얻을 수 있다. 이 경우 출력이 약간크므로 다른 통신에 혼신을 줄 우려가 고려될 수 있지만 실제로는 문제가 없는 것으로 판단된다.



<그림 6> 설계된 야기안테나의 소자의 길이 및 소자간 간격

<표 1> 설계된 안테나의 전계 방사패턴의 폭

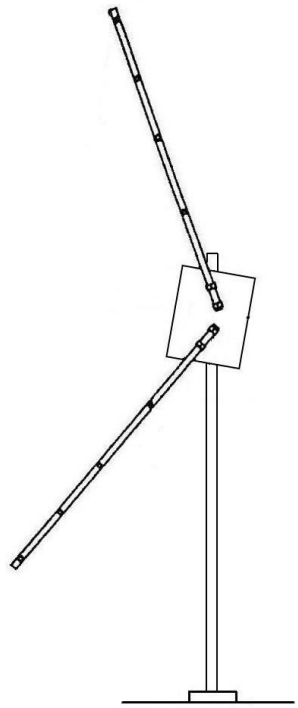
안테나 송신 출력	전계 방사패턴의 폭
0.5W	1025m
1.0W	1367m
1.5W	2050m
3.0W	4100m



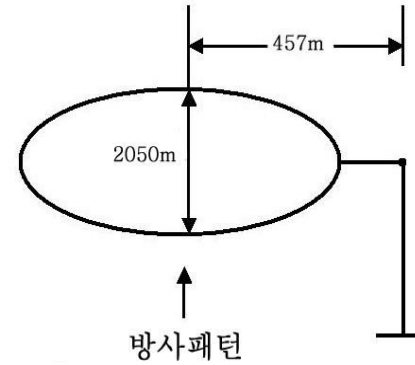
<그림 7> 설계 안테나의 방사패턴

(3) 1기의 야기안테나를 지면과 각도를 이루며 설치하는 방안

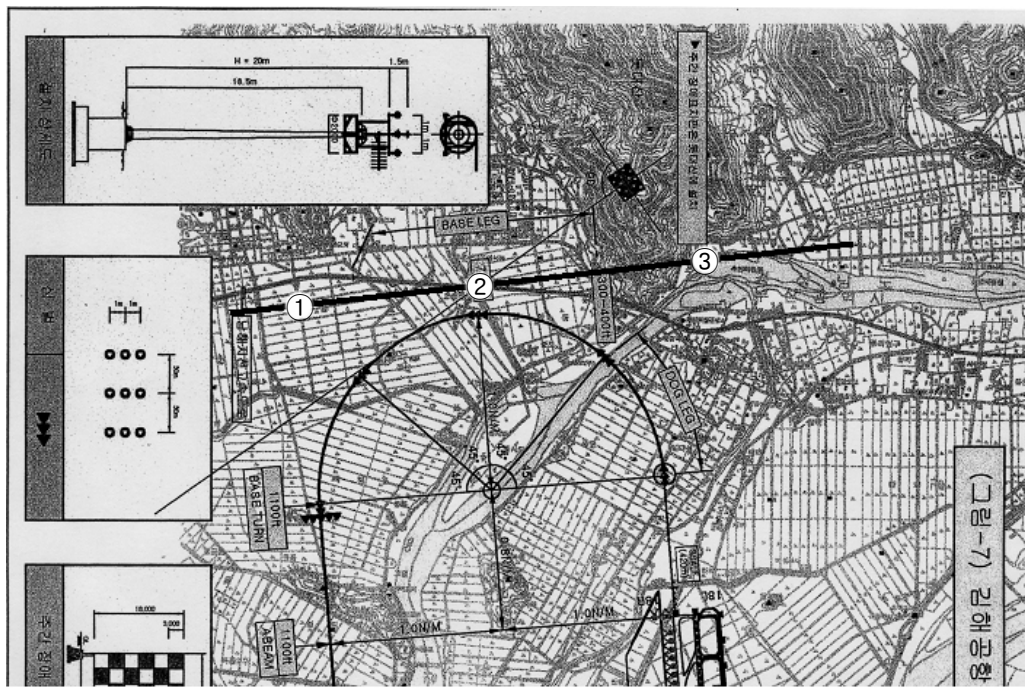
활주로 중앙에서 활주로 유도등의 반대방향으로 0.5N/M인 지점과 활주로 끝에서 산을 향한 2km인 위치에 <그림 6>과 같은 1기의 이중구조 야기안테나를 <그림 8>과 같이 지면과 30° 정도의 각을 이루며 활주로 유도등을 향하여 설치한다. 이 경우 송신기의 출력은 2W로 한다. <그림 8>과 같은 구조로 <그림 6>과 같은 1기의 야기안테나를 설치하면 <그림 9>와 같은 전파막이 형성되므로 이와같은 안테나를 <그림 10>의 ③의 위치에 설치하면 된다. 이와같이 하면 산의 높이가 650m 정도인데, 방사패턴의 폭은 2km이상 이므로 조건에 맞는 전파막을 설치하게 된다. 이 경우에는 지상으로부터 반사되는 파가 없도록 각도를 잘 조정하지 않으면 안된다.



<그림 8> 이중구조 야기안테나의 설치구조



<그림 9> 전계 방사패턴

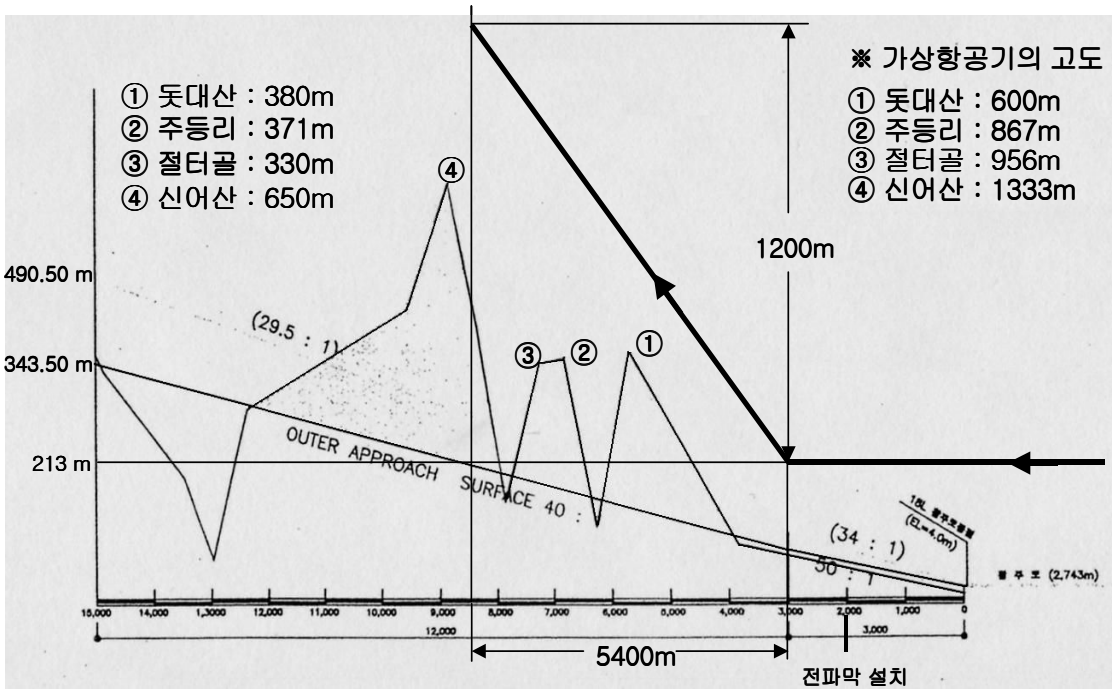


<그림 10> 야기안테나 설치장소

Ⅳ. 경보이후 비행경로

김해공항 북측활주로와 같이 항행안전시설을 이용하지 못하는 공항에 대하여 선회착륙하는 항공기가 최종적으로 선회해야하는 지점을 통과하여 항공기 사고가 발생하는 것을 막기 위하여 최종선회지점을 벗어난 지점에, (1) <그림 4>와 같은 야기안테나 1기를 활주로 유도등과 일치하는 지점에, 즉 <그림 10>의 ①의 위치에, (2) <그림 6>과 같은 야기안테나 1기를 활주로와 산 사이인 <그림 10>의 ②의 위치에, (3) <그림 8>과 같은 구조의 야기안테나를 지면과 각도를 이루며 <그림 10>의 ③의 위치에 설치하는 것에 의해서 무선전파, 즉 마커신호로 조종사에게 경보를 알려주는 경우, 전파막에 의한 경보 이후의 항공기의 비행경로를 검토하기로 한다.

일반적으로 여객기를 조종하는 조종사의 경우 경보음을 듣고 조작할 때까지 걸리는 시간은 대략 1.36초(청각 = 0.12~0.16초, 시각 = 0.15~0.20초, 인지 = 0.3초, 판단 0.3초, 조작 = 0.4초)가 소요되는 것으로 알려지고 있고, 한편, 항공기에 따라 다소차이는 있으나 일반적인 여객기의 경우, 최대 상승고도는 순항 중 1분당 4000피트 정도 상승할 수 있는 것으로 알려지고 있으므로, 예를들면 항공기의 속도가 180놋트인 경우에 약 3NM당 4000피트 상승하므로 이것을 미터로 환산하면 거리 5400m당 고도는 1200m이고 상승각은 약 12.53°로 된다.



<그림 11> 전파막에 의한 경보이후의 비행경로

공항근처에서 순회 비행하는 경우의 속도는 일반적으로 140~180놋트이고, 180놋트인 경우 1초당 거리는 100m정도이다.

장애물 회피조건은 (5)식을 만족하면 된다.

$$\frac{D_m - t_{prt}V_T}{V_T} \geq (H_{mt} - H_{ac}) \tag{5}$$

여기에서 D_m은 장애물까지의 수평거리, t_{prt}는 조종사의 반응시간(≅1.36초), V_T는 항공기 속도, H_{mt}는 장애물 높이, H_{ac}는 항공기의 고도를 표시한다.

(5)식을 기초로하여 조종사가 경보음을 듣고 조작할 때까지의 시간을 약 10초(일반적인 경우의 6배이상)로 하고, 항공기의 고도를 700피트(213m : 일반적인 경우의 절반)로 한 경우의 항공기의 비행경로를 계산한 것을 <그림 11>에 표시한다.

<그림 11>로 부터 알 수 있는 것처럼, 위험지역에서 전파막을 이용하여 경보를 제공하는 경우, 조종사는 장애물을 회피할 수 있는 충분한 시간과 기회를 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

V. 결 론

지역여건상 ILS나 VOR/DME등 항행안전시설을 이용하여 착륙이 곤란한 활주로는 부득이 조종사가 눈으로 활주로를 직접 확인하여 착륙하는 선회착륙 방식이 이용되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 김해공항 북측활주로와 같이 항행안전 무선시설을 설치하지 못하는 공항에 대하여 선회착륙하는 항공기가 최종적으로 선회해야 하는 지점을 통과하여 항공사고가 발생하는 것을 막기 위하여 최종 선회지점을 벗어난 지점에서 조종사에게 무선전파, 즉 마커신호로 경보를 알려주는 장비를 개발하였다. 여기에서는 현재 마커에서 사용중인 주파수 및 변조방식등은 동일한 방식을 사용하도록 하여, 항공기에 탑재된 장비도 개조하지 않고, 그대로 사용할 수 있도록 하였다. 다만, 안테나를 특수한 형태로 개발하고, 변조주파수 및 변조신호만을 변형하여 기존 마커신호와 다르게 한다. 결론적으로 조종사가 전파막에 의한 경보음을 듣고 항공기를 조작한 후에 계산한 비행경로를 보면 알 수 있는 것처럼 위험지역에서 전파막을 이용하여 정보를 제공하는 경우, 조종사는 장애물을 회피할 수 있는 충분한 시간과 기회를 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1) AIRSYS. ATM, "Instruction Manual Mark 10 System", June 1992.
2) H. Yagi, "Beam Transmission of Ultra Short Waves," Proc. IRE, Vol. 26, pp.715-741, June 1928. Also Proc. IEEE, Vol. 72, No. 5, pp. 634-645, May 1984.
3) Constrantiner A. Balanis, "Antenna Theory : Analysis and Design", Third edition, John wiley&sons, Inc. 1998.
4) C. C. Lee and L.-C. Shen, "Coupled Yagi Arrays," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-25, No. 6, pp. 889-891, November 1977.

5) H. W. Ehrenspeck and H. Poehler, "A New Method for Obtaining Maximum Gain from Yagi Antennas," IRE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-7, pp. 379-386, October 1959.
6) H. E. Green, "Design Data for Short and Medium Length Yagi-Uda Arrays," Elec. Engrg. Trans. Inst. Engrgs. (Australia), pp. 1-8, March 1966.
7) R. J. Mailloux, "The Long Yagi-Uda Array," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-14, pp. 128-137, March 1966.
8) D. Kajfez, "Nonlinear Optimization Reduces the Sidelobes of Yagi Antennas," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-21, No. 5, pp. 714-715, September 1973.
9) D. Kajfez, "Nonlinear Optimization Extends the Bandwidth of Yagi Antennas," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-23, pp. 287-289, September 1975.
10) G. A. Thiele, " Analysis of Yagi-Uda Type Antennas," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-17, No 1, pp. 24-31, January 1969.
11) G. A. Thile, " Calculation of the Current Distribution on a Thin Antenna," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-14, No. 5, pp. 648-649, September 1966.
12) D. K. Cheng and C. A. Chen, "OPtimum Spacings for Yagi-Uda Arrays,: IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-21 No. 5, pp. 615-623, September 1973.
13) C. A. Chen and D. K. Cheng, "Optimum Element Lengths for Yagi-Uda Arrays," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-23, No. 1, pp. 8-15, January 1975.
14) N. K. Takla and L.-C. Shen, "Bandwidth of a Yagi Array with Optimum Directivity," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-25, No. 6, pp. 913-914, November 1977.
15) P. P. Viezbicke, "Yagi Antenna Design," NBS Technical Note 688, U.S. Department of Commerce/National Bureau of Standards, December 1968.