

# 다중 플랫폼 영상정보용 공용 데이터링크의 링크 가용도 성능 분석

류 영 재\*, 유 정 훈\*, 박 의 영\*

## Aeronautical Link Availability Analysis for the Multi-Platform Image & Intelligence Common Data Link

Young-jae Ryu\*, Jung-hun Ryu\*, Ui-young Pak\*

### 요 약

본 논문은 공지(Aeronautical to Ground) 통신 환경에서 장거리용 공용 데이터링크로 개발되는 다중플랫폼 영상 정보용 공용 데이터링크(MPI-CDL : Multi-Platform Image & Intelligence Common Data Link)의 링크 가용도 분석 방법을 제안하고 링크 가용도를 만족하기 위해 필요한 링크마진을 분석한다. 제안된 링크 가용도 분석 방법은 강우감쇄와 다중경로 페이딩 분석모델을 하나의 조건부 확률로 변환함으로써 강우감쇄와 다중경로 페이딩을 함께 고려하여 링크 가용도를 분석할 수 있다. 영상정보용 공용 데이터링크의 주파수, 운용 고도, 통달거리에 따른 링크 가용도를 만족하기 위한 링크마진을 분석하고 실제 영상정보용 데이터링크가 적용되는 무인항공기의 운용환경을 고려한 링크마진 분석결과를 제시한다.

**Key Words** : Multi-Platform Image and Intelligence Common Data Link, Aeronautical Communication, Link Availability, Link Margin

### ABSTRACT

Multi-Platform Image and Intelligence Common data link(MPI-CDL) systems are designed to transmit the imaginary and signal intelligence data at an aeronautical to ground line of sight(LOS) link. This paper proposes a method to predict a link availability and analyzes the required link margin to satisfy a given link availability for MPI-CDL systems. To estimate a link availability the proposed method applies the conditional probability so that both a rain attenuation and a multipath fading are considered simultaneously. Link margins to meet the link availability for MPI-CDL systems are calculated according to an operating environment including frequencies, flight altitudes and transmission ranges. The required link margins for actual unmanned air vehicle systems are also given by simulation results.

### I. 서 론

전장의 상황을 신속, 정확하게 감시, 정찰하기 위해 유, 무인 항공기로부터 수집된 고속, 대용량의 영상정보를 신뢰성 있게 지상의 장비로 전송하기 위한 다중

플랫폼 영상정보용 공용 데이터링크(MPI-CDL : Multi-Platform Image and Intelligence Common Data Link. 이하 : 공용 데이터링크) 기술의 요구가 점차로 증가하고 있다<sup>1)</sup>.

공용 데이터링크는 고속, 대용량 영상정보를 전

◆ 주저자 : 국방과학연구소 2기술연구본부, yjryu@add.re.kr, 정회원

\* 국방과학연구소 2기술연구본부, argos@add.re.kr, puy@add.re.kr

논문번호 : KICS2012-08-365, 접수일자 : 2012년 8월 20일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 X일

송하기 위한 넓은 주파수 대역이 필요하고 항공기와 지상장비 간에 수십 km~수백 km의 긴 통달거리가 필요하다. 또한 항공기 통신은 인명 안전에 영향을 미치는 경우가 많기 때문에 다른 통신에 비해 높은 수준의 링크 가용도가 필요하여 최소한 95% 이상의 링크 가용도를 가져야 한다<sup>2,3)</sup>.

공용 데이터링크는 강우감쇄에 큰 영향을 받는 위성통신과 다중경로 페이딩에 큰 영향을 받는 지상 마이크로웨이브 통신의 특성을 모두 가져 강우감쇄와 다중경로 페이딩 모두 무시할 수 없는 영향을 받기 때문에 이 둘의 영향을 함께 고려하여 링크 가용도를 분석해야 하며 강우감쇄와 다중경로 페이딩에 의한 자유공간 손실과 비교하여 추가적인 수신 전력의 감소를 극복하기 위해 충분한 링크의 마진을 확보해야 한다<sup>4,7)</sup>.

본 논문에서는 공용 데이터링크의 링크 가용도를 분석하기 위해 강우감쇄 모델과 다중경로 페이딩 모델로부터 개별적으로 도출한 두 확률분포를 단일의 조건부 확률로 통합하여 강우감쇄와 다중경로 페이딩이 함께 고려된 공용 데이터링크의 링크 가용도를 분석방법을 제시하고 공용 데이터링크의 운용 환경에서 링크 가용도를 만족하기 위한 링크마진을 분석하였다.

본 논문은 II장에서 공용 데이터링크의 운용환경, 링크 가용도, 링크마진에 대해 설명하고 III장에서 공중통신 환경의 강우감쇄 모델, 다중경로 페이딩 모델의 설명과 강우감쇄와 다중경로 페이딩이 함께 고려된 가용도 분석 방법을 설명한다. VI장에서 공용 데이터링크의 운용 주파수, 항공기 고도, 통달거리 및 링크 가용도에 따른 링크마진을 모의시험의 결과를 분석한 후 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 공용 데이터링크 링크 모델

### 2.1. 공용 데이터링크 운용 환경기법

공용 데이터링크는 수 km 이상의 고도의 항공기와 지상 통신장비 간에 대용량의 영상 및 신호정보를 송, 수신하는 구조를 가진다. 대용량 정보의 넓은 주파수 대역을 확보하기 용이한 높은 주파수 대역을 사용하며 항공기의 규모 및 운용 개념에 따라 다르지만 보통 100km~200km 이상의 통달거리를 요구한다.

공용 데이터링크의 항공기와 지상 통신장비 간에는 가시선(LOS: Line of Sight)가 확보되는 점에서는 위성통신이나 지상 마이크로웨이브 통신과 운용 환경이 유사하나 다음과 같은 측면에서 다른 두 통신과 차이

가 발생한다.

지상 안테나의 고각이 높은 위성통신은 다중경로 페이딩 측면에서는 매우 안정된 수신전력 특성을 보인다. 반면 운용 주파수대역이 높아 기상상태에 매우 민감하게 영향을 받기 때문에 위성통신의 링크 가용도는 강우감쇄 특성에 의해 결정되며 이로 인해 일반적으로 위성통신의 링크 가용도는 강우 가용도의 의미로도 사용된다.

지상 마이크로웨이브 통신은 송신기와 수신기가 지상에 설치되고 통신 경로 상에 불규칙한 지형이 인접해 있다. 송신기와 수신기의 위치는 고정적이지만 경로 상의 대기상태에 따라 다중경로 신호의 위상이 변하기 때문에 시간에 따라 다중경로 페이딩에 의해 수신 전력이 변하게 된다. 반면 지상 마이크로웨이브 통신은 강우감쇄의 영향이 적은 X 대역 이하의 낮은 주파수 대역에서 운용되기 때문에 지상 마이크로웨이브 통신의 링크 가용도는 주로 다중경로 페이딩 특성에 의해 결정된다.

공용 데이터링크는 위성통신과 유사한 높은 운용 주파수 대역과 긴 통달거리에 의한 강우감쇄 특성을 가지며 지상 마이크로웨이브 통신의 낮은 안테나 고각에 의한 다중경로 페이딩 특성도 함께 가지고 있다.

강우감쇄에 의해 링크 가용도가 결정되는 위성통신이나 다중경로 페이딩을 극복하기 위해 20~30dB 이상의 링크마진을 필요로 하는 지상 마이크로웨이브 통신과는 달리 공용 데이터링크는 동일한 운용조건에서 개별적으로 강우감쇄나 다중경로 페이딩에 의한 신호 감쇄를 분석하면 두 신호감쇄 요인이 비슷한 수준으로 영향을 미친다.

III장에서 주파수 15GHz, 운용고도 8km, 통달거리 200km에서 링크 가용도 99%를 만족하기 위해 개별적으로 강우감쇄 모델과 다중경로 모델을 분석한 결과를 보면 12dB의 강우감쇄, 10dB의 다중경로 페이딩 감쇄를 보였으며 이는 공용 데이터링크가 강우감쇄와 다중경로 페이딩 모두에 영향을 받는다는 것을 의미한다.

### 2.2. 링크 가용도

가용도는 긴 운용주기 동안 시스템이 의도한 기능을 만족할 수준으로 운용할 수 있는 평균시간로 의미한다. 이 때 시스템이 가용하다는 것을 판단하기 위한 여러 기준이 제시되었으나 대부분의 통신 시스템에서는 비트오류율(BER: Bit Error Rate), 데이터 패킷손실률을 기준으로 판단한다<sup>5)</sup>.

보다 구체적으로는 ITU-T G.826에서 제시한 블록

오류율과 오류 유지시간을 기반으로 가용도를 판단하는 방법을 보편적으로 사용한다. 전체 데이터 중 비트 오류가 하나 이상 포함된 블록을 EB(Errorred Block), 1초의 시간동안 하나 이상의 블록 오류가 발생하는 해당 1초를 ES(Errorred Second), 1초의 시간동안 30% 이상의 블록 오류가 발생하거나 신호를 수신할 수 없는 해당 1초를 SES(Severely Errorred Second)라고 정의한다.

그림 1은 통신 시스템에서 가용 및 비가용을 판단하는 방법을 나타낸 것이다. 통신 시스템은 10초 이상 SES 구간이 발생하면 SES가 발생한 최초 시간부터 비가용하다고 판정한다. 통신 시스템의 비가용 상태는 10초 이상의 ES 또는 오류가 없는 구간 이후에 해제되며 그전까지는 비가용 상태를 유지한다<sup>18,9)</sup>.

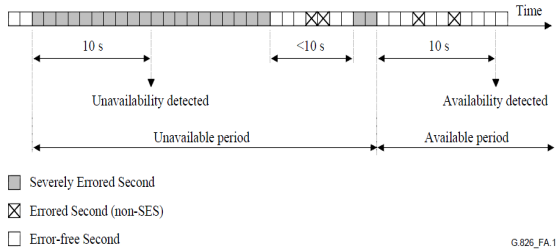


그림 1. 통신 시스템의 가용도 판정 기준  
Fig. 1. Criterion for a communication link availability

### 2.3. 링크 마진

통신 시스템의 고장, 운용자의 실수, 의도적 또는 비의도적인 간섭신호에 의한 오류와 같이 통신링크의 성능과 무관한 항목을 제외하면 통신 시스템은 신호를 수신할 수 있는 수신감도보다 높은 전력을 수신할 때 링크가 가용해진다.

통신 가시선이 확보된 공용 데이터링크는 대부분의 시간에는 자유공간 손실이 반영된 정상(Nominal) 전력으로 수신된다. 그러나 정상 상태만을 고려하여 링크를 설계하면 강우감쇄나 다중경로 페이딩으로 인해 수신 전력이 줄어들면 링크를 유지할 수 없다.

위성통신의 링크 설계 시에는 해당 지역에서 일정 수준의 강우환경에서도 링크를 유지할 수 있도록 강우감쇄를 보상할 수 있는 마진을 보유하며 지상 마이크로웨이브 통신에서도 약 20dB~30dB 수준의 마진을 보유한다<sup>10)</sup>.

공용 데이터링크에서 링크마진은 수신 전력이 정상 상태보다 더 크게 감쇄되어 수신될 때에도 연속적인 링크 운용을 위해 반드시 확보해야 하나 높은 수준의 링크마진을 확보하기 위해서는 공용 데이터링크 장비

의 크기, 무게, 소비 전력이 함께 증가하며 특히 항공기 통신장비는 크기, 무게, 소비전력에 많은 제약이 따른다.

극히 높은 수준의 가용도가 요구되는 특수용도의 무인기 경우에는 99% 이상을 요구하기도 하지만 통상적인 항공통신이나 무인기의 경우에는 95% 이상의 링크 가용도를 요구하므로 공용 데이터링크에서는 이를 고려하여 링크 버짓 및 통신 시스템을 설계해야 한다<sup>2,3)</sup>.

## III. 감쇄 모델 분석

### 3.1. 강우감쇄 모델 분석

ITU-R은 지상파(Terrestrial) 통신, 지상-위성(Earth-Space) 통신에 대한 전파 감쇄모델을 ITU-R P.530(지상파)와 P.618(지상-위성)에서 세부적으로 제시한다. 두 전파 감쇄모델에서 강우감쇄를 분석하는 방법 및 과정은 매우 유사하나 지상파 모델은 강우감쇄 분석에 유효한 최대 통달거리가 60km로 짧으며 통신장비가 모두 비구름의 아래에 위치한 반면 지상-위성 모델은 위성이 비구름 위에 있으므로 지상장비 안테나의 고각(Elevation angle)에 따라 강우감쇄의 영향을 받는 경로길이가 달라지는 점에서 차이가 있다<sup>11)</sup>.

공용 데이터링크는 통달거리가 100km~200km 이상으로 길고 항공기 고도가 비구름보다 높은 고도에서 운용되는 지상-위성 모델과 운용환경이 유사하다. 공용 데이터링크의 통달거리가 먼 경우에는 지상 안테나의 고각이 지상-위성 경로에 비해 낮은 차이점이 있으나 ITU 지상-위성 모델은 5도의 안테나 고각을 기준으로 5도보다 낮은 운용환경에서도 별도 수식을 사용하여 강우감쇄를 분석할 수 있다<sup>12)</sup>.

그림 2는 ITU-R P.618모델을 이용하여 공용 데이터링크 운용 환경의 강우감쇄를 분석하는 과정을 나타낸 것이다. ITU-R P.618 모델은 순차적인 방법으로 강우감쇄를 계산하며 강우감쇄를 계산할 지역의 강우 통계, 운용 주파수 별 단위 거리(km)당 강우감쇄를 다른 ITU 권고안으로부터 찾고 P.618 권고안에서는 전체 통달거리에서 비구름보다 낮은 유효 강우감쇄 거리를 구하여 강우감쇄를 분석한다. ITU-R P.618 권고안에서 강우감쇄를 계산하기 위해 필요한 정보는 ITU-R P.837(해당 지역의 비구름 높이), ITU-R P.838(상위 0.01% 강우량 통계), ITU-R P.839(주파수 별 km 당 강우감쇄 상수) 권고안을 이용하여 도출할 수 있다.

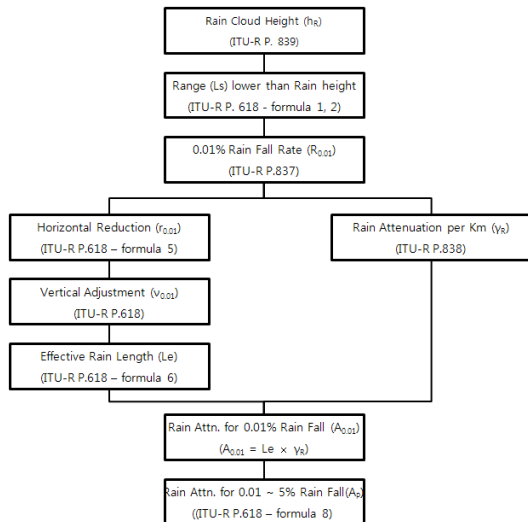


그림 2. 강우감쇄 분석 Flow Diagram  
Fig. 2. Flow Diagram of rain attenuation analysis

공용 데이터링크가 운용되는 지역의 비구름의 높이는 ITU-R P.839 권고안에서 제공한다. ITU-R P.839 권고안은 위도와 경도를 각각 1.5° 단위로 나누어 해당 지역의 평균 비구름 높이를 제공하며 위, 경도에 정확하게 해당되지 않는 지역을 위해 보간 (Interpolation) 방법을 제시한다.

공용 데이터링크의 전체 통달거리에서 비구름보다 낮은 유효 강우거리는 ITU-R P.618 권고안을 이용하여 계산할 수 있다. 지상 안테나의 고각이 5도 이상인 경우에는 삼각함수로 근사화하나 고각이 5도 미만인 경우에는 지구 곡률을 반영하여 유효 강우거리를 계산한다.

공용 데이터링크가 운용되는 지역의 강우량은 ITU-R P.837 권고안에서 찾을 수 있다. ITU-R P.837 권고안은 위, 경도를 1.5° 단위로 나누어 연간 평균 강우량, 6시간 주기 강우확률을 제공하며 이를 이용하여 상위 p%의 강우량(Rp)와 연 평균 강우확률(P0)을 구할 수 있다. 참조로 북위 37.3도, 동경 127도인 서울 지역에서는 상위 0.01% 강우량인 R0.01이 약 50mm/hr이며 강우확률은 6.75%로 연중 93.25%의 시간 동안에는 비가 오지 않는다.

운용 주파수와 강우량에 따른 km 당 강우감쇄는 ITU-R P.838 권고안을 따르는데 안테나 편파 특성과 주파수의 함수인 k 상수와 a 상수를 구하고  $\gamma R = k R^a$  [dB/km] 수식에 따라 단위 거리(km)당 강우감쇄 상수를 구할 수 있다. 강우감쇄 상수는 X 대역이하에서 작은 값을 가지나 Ku 대역 이상에서는 급격하게 증가하며 수직 안테나 편파에 비해 수평 안테나 편파 시에 높은 강우감쇄 상수 값을 가진다.

ITU-R P.618 권고안의 마지막 과정으로 강우량에 따른 강우거리의 조정 과정을 거친다. 약한 강도의 비구름인 난층운은 고도 2~4km에서 발달하며 넓은 강우범위를 가지며 폭우를 동반하는 적란운은 1~10km 이상으로 수직방향으로 발달하나 평균 24km로 좁은 반경에만 영향을 미친다. ITU-R P.618은 강우량에 따른 실제 비구름의 특성을 반영하여 강우량에 따라 수평 축소계수( $r_{0.01}$ )와 수직 조정계수를 반영하여 유효 강우거리를 조정한다.

공용 데이터링크의 주파수, 통달거리, 항공기 고도에 따라 상위 p%의 강우량 상황에서 강우감쇄를 분석한 결과 강우감쇄는 운용 주파수에 가장 큰 영향을 받았다. 상위 1% 강우량 환경에서 강우에 의한 링크 가용도를 만족하기 위해서 X 대역인 10GHz 주파수에서는 200km 통달거리에서 지상 안테나의 고각에 따라 3~5dB의 강우감쇄가 발생한 반면 Ku 대역인 15GHz 주파수에서는 고각에 따라 최소 8dB에서 최대 14dB의 강우감쇄가 발생하였다.

항공기의 고도가 일정한 경우에는 통달거리가 짧아짐에 따라 강우감쇄 값이 크게 감소하였으나 Ku 대역에 비해서 X 대역이 월등히 낮은 강우감쇄가 발생하였다. 동일한 주파수에서는 통달거리에 따라 큰 강우감쇄의 차이가 있었으며 이는 동일한 고도에서 통달거리가 증가함에 따라 지상 안테나 고각이 낮아져 유효 강우거리가 증가하기 때문이다.

그림 3, 4는 각각 ITU-R P.618 모델을 이용한 공용 데이터링크의 강우감쇄를 10GHz와 15GHz 대역에 대해 분석한 결과를 나타낸다. 강우감쇄의 경우 주파수에 큰 영향을 받으며 동일한 주파수에서는 고도가 낮을수록, 운용거리가 증가할수록 강우거리가 증가하기 때문에 강우감쇄가 증가한다.

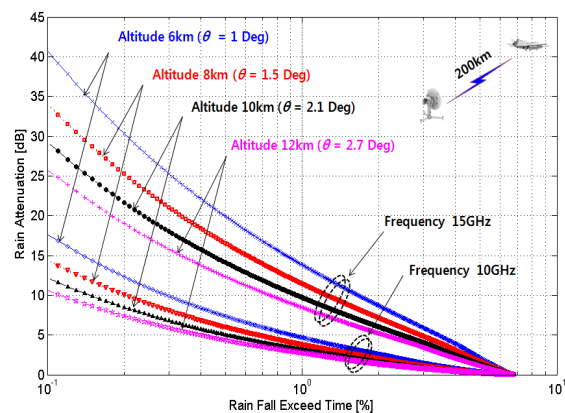


그림 3. 운용 고도에 따른 주파수 별 강우감쇄 분석 결과  
Fig. 3. Rain Attenuation for frequency and flight altitude

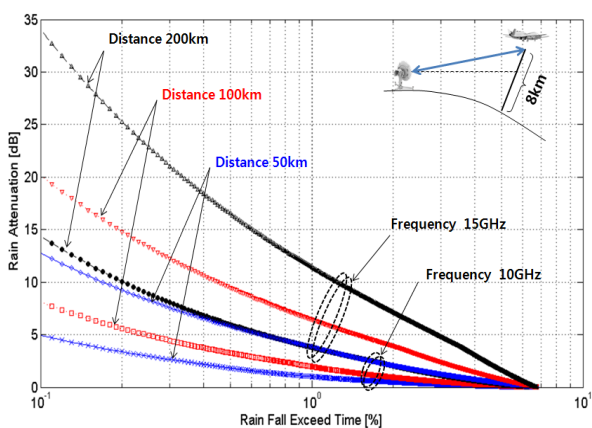


그림 4. 운용 거리에 따른 주파수 별 강우감쇄 분석 결과  
Fig. 4. Rain Attenuation for frequency and transmission range

### 3.2. 다중경로 페이딩 모델 분석

다중경로 페이딩은 지상 안테나의 고각이 높을수록 그 영향이 감소하며 4 ~ 5도 이상의 안테나 고각에서는 그 영향을 무시할 수 있다<sup>11)</sup>. 통신장비가 모두 지상에 설치되어 불규칙 지형에 의해 다중경로의 영향이 심한 지상 마이크로웨이브 통신은 다중경로 페이딩의 영향을 분석하기 위해 주로 Varnett-Vigants 모델<sup>13,14)</sup> 또는 ITU-R P.530 권고안<sup>15)</sup>을 사용하나 항공기의 고도가 수 km 이상으로 높은 공용 데이터링크의 다중경로 페이딩을 분석하기에는 적합하지 않다.

ITU는 P.528 권고안에서 VHF, UHF, SHF 대역의 지상-항공 구간의 다중경로 페이딩에 의한 신호 감쇄 값을 제시하였다. ITU-R P.528 권고안은 현재까지 지상-항공 구간의 다중경로 페이딩을 분석할 수 있는 유일한 공식 문서로 강우감쇄를 제외한 대기에 의한 손실과 다중경로 페이딩에 의한 손실을 함께 나타낸다<sup>2)</sup>.

ITU-R P.528 권고안은 5%, 50%, 95%의 링크 가용도에 대해 통달거리에 따른 신호 감쇄를 그래프의 형태로 제시한다. ITU-R P.528 권고안은 VHF, UHF 및 SHF 대역의 특정 주파수, 특정 장비 고도에 대해서 5%, 50%, 95%의 링크 가용도를 만족하기 위한 다중경로 페이딩 마진을 제시하나 권고안에 제시되지 않은 주파수, 장비 고도,  $p\%$ 의 링크 가용도에 대해서는 정확한 다중경로 페이딩 마진을 제시하지 않는다. 또한 제시된 다중경로 페이딩 마진도 그래프 형태로 제시되어 정확한 값을 알 수 없으며 등방성(Isotropic) 안테나의 다중경로 페이딩 마진을 제시하는 등 공용 데이터링크의 다중경로 페이딩 마진 분석에 많은 제약이 따른다.

본 논문은 ITU-R P.528 권고안의 근간이 되는 IF-77 전파모델을 사용하여 공용 데이터링크의 운용

조건에 맞는 다중경로 페이딩을 분석한다. IF-77 모델은 1960년에서 1973년 미국의 ITS(Institute for Telecommunication Sciences)에서 불규칙한 지표면을 포함한 지상-항공 간 전파모델을 위해 개발되었으며, 이후 1977년에 지상-항공, 항공-항공, 지상-위성, 항공-위성 경로를 포함한 모델로 발전하였다<sup>16)</sup>.

IF-77 모델은 0.1 ~ 20GHz 주파수를 사용하는 통신 시스템에 적용 가능하며 대기 굴절률 변화, 대기에 의한 전파 흡수, 송수신기 간의 지표에 의한 다중경로 등을 분석하여 항공통신에서 수신 전력의 확실적인 분포를 분석한다. IF-77 모델은 개념적으로 불규칙적인 지형의 Longley-Rice 모델과 매우 유사하며 가시선 영역의 전파 특성과 더불어 회절 및 산란에 의한 영향도 함께 고려한다. IF-77 모델은 지형의 영향과 함께 송신기와 수신기에서 사용하는 안테나의 종류, 안테나 추적 방법, 안테나 빔폭 등 통신 시스템의 특성도 함께 반영하여 수신 전력의 확실적 분포를 계산한다.

1978년 이후 Johnson과 Gierhart에 의해 방대한 측정결과들과 비교하여 그 유효성이 입증되었으며 IF-77 모델에서 분석된 대표적인 결과가 ITU-R P.528 권고안에 채택되어 사용되고 있다. IF-77 모델은 포트란 프로그램으로 작성되고 DOS에서 실행 가능한 형태로 배포되었다. IF-77 모델의 실행 프로그램은 다음과 같은 운용조건에 맞게 각 파라미터를 입력하고 출력 옵션 중 'Transmission Loss'를 선택하면 거리 별로 자유공간 손실 시의 전송손실과 다중경로 페이딩의 상위  $p\%$ 에서의 전송손실을 출력해준다<sup>17)</sup>.

$$FD(p) = \begin{cases} FD_{0.1} - (FD_{0.1} - FD_{50.0}) \times \frac{\log_{10}(p \times 10)}{\log_{10}(500)} & , 0.1\% \leq p < 50\% \\ FD_{50.0} - \left( \frac{FD_{50.0} - FD_{90.0}}{40} \right) \times (p - 50) & , 50\% \leq p < 90\% \\ FD_{90.0} - \left( \frac{FD_{90.0} - FD_{99.9}}{10} \right) \times (p - 90) & , p > 90\% \end{cases} \quad (1)$$

IF-77 모델은 ITU-R P.528 권고안에 비해 운용 주파수, 항공기 고도, 안테나 종류 등 공용 데이터링크 운용조건을 폭 넓게 입력할 수 있다. 반면 다중경로 페이딩에 의한 상위  $p\%$ 의 페이딩 손실은  $p = \{0.01\%, 0.1\%, 1\%, 5\%, 10\%, 50\%, 90\%, 95\%, 99\%, 99.9\%, 99.99\%\}$  등 총 11가지의 경우만을 제시한다.

본 논문에서는 IF-77 모델에서 제시하지 않는 나머지 상위  $p\%$  다중경로 페이딩의 손실을 근사화 방법으로 제시한다. IF-77 모델의 11가지  $p\%$  다중경로 페이

딩 손실은 log 스케일로 봤을 때 0.1 %에서 50%까지, 50%에서 90%까지, 90% 이상의 세 부분으로 기울기가 다르다. 이를 이용하여 각 영역 별로 IF-77 모델에서 제시하지 않는 나머지 상위  $p$  %의 다중경로 페이딩 손실을 수식 (1)과 같이 근사화할 수 있다.

수식 (1)에서  $FD_{0.1}$ ,  $FD_{50.0}$ ,  $FD_{90.0}$ ,  $FD_{99.9}$ 는 공용 데이터링크의 운용 조건을 IF-77 모델을 이용하여 분석했을 때 상위 0.1%~99.9% 확률의 다중경로 페이딩 손실을 의미하며  $p$ 는 상위  $p$ %를 나타내고  $FD(p)$ 는 상위  $p$ %에서의 다중경로 페이딩 손실을 계산된 값을 나타낸다.

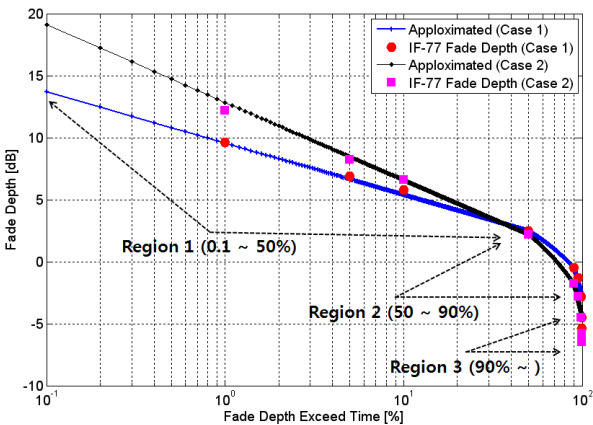


그림 5. IF-77 공지환경의 다중경로 페이딩 손실 근사화  
Fig. 5. Fade depth approximation using IF-77 model

그림 5는 IF-77 모델을 이용하여 실제 계산된 다중경로 페이딩의 손실 값과 수식 (1)을 이용하여 근사화한 다중경로 페이딩 손실 값을 두 가지의 공용 데이터링크 운용조건에서 비교한 것이다. 첫 번째 경우는 통달거리가 200km, 항공기 고도가 8km, 운용 주파수가 15GHz인 경우로 최대 오차가 0.4dB이고, 두 번째 경우는 통달거리가 200km, 항공기 고도가 6km, 운용 주파수가 10GHz인 경우에서 비교한 결과로 최대 오차가 0.7dB로 근사화 값이 실제 IF-77 모델의 값과 유사함을 알 수 있다.

IF-77 모델과 근사화 수식을 이용하여 공용 데이터링크 운용조건에서의 다중경로 페이딩 손실을 주파수, 통달거리 및 항공기 고도에 따라 비교 분석하였다. 운용 주파수에 가장 큰 영향을 받는 강우감쇄와는 달리 다중경로 페이딩에 의한 손실은 지상 안테나의 고각에 가장 큰 영향을 받았으며 고각이 높은 경우에는 운용 주파수나 통달거리에 관계없이 다중경로 페이딩 손실이 거의 없음을 알 수 있다.

그림 6에서 지상 안테나의 고각( $\theta$ )이 낮은 경우에

는 운용 주파수가 증가함에 따라 다중경로 페이딩 손실이 증가했으나 그림 7에서 통달거리는 다중경로 페이딩에 영향이 크지 않았다. 이는 지상 안테나 고각이 높은 위성통신에서 통달거리가 멀어 자유공간 손실은 크지만 다중경로 페이딩 손실을 무시할 수 있는 것과 같은 현상으로 판단된다.

그림 6, 7에서 다중경로 페이딩 손실이 큰 운용조건에서는 낮은 확률로 다중경로 페이딩 손실이 음의 값을 가지는 경우도 있는데 이는 다중경로의 위상이 주경로의 위상이 더해져 수신 전력이 일시적으로 상승하는 경우가 있기 때문이다.

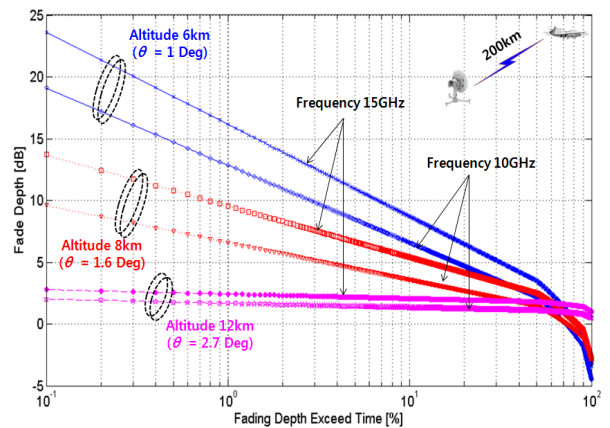


그림 6. 운용 고도에 따른 주파수 별 다중경로 손실 분석 결과  
Fig. 6. Fade depth for frequency and flight altitude

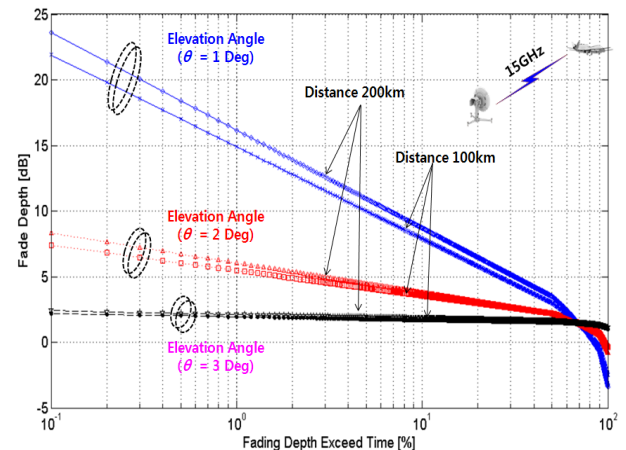


그림 7. 안테나 고각에 따른 주파수 별 다중경로 손실 분석 결과  
Fig. 7. Fade depth for frequency and elevation angle

### 3.3. Joint 링크가용도 분석 모델

ITU-R P.618 권고안과 IF-77 전파모델을 이용하여 공용 데이터링크의 운용 조건에서의 강우감쇄와 다중경로 페이딩 손실을 분석한 결과 강우감쇄와 다중경로 페이딩이 링크 가용도에 영향을 미치는 것을 알 수

있었다.

다중경로 페이딩이 없는 위성통신이나 강우감쇄에 비해 월등히 큰 다중경로 페이딩 마진을 가진 지상 마이크로웨이브 통신과는 달리 공용 데이터링크 통신은 비등한 수준의 강우감쇄와 다중경로 페이딩 손실이 발생하므로 공용 데이터링크의 링크 가용도는 두 가지 요소를 함께 고려하여 분석되어야 한다<sup>4,7)</sup>.

본 논문에서는 공용 데이터링크 운용 조건에서 강우감쇄의 확률분포와 다중경로 페이딩의 확률분포를 별도로 분석한 후 전체 링크마진에서 강우감쇄에 의한 손실을 제외하고 남은 마진이 다중경로 페이딩 손실보다 클 확률을 구하여 링크 가용도를 계산한다.

ITU-R P.618 강우감쇄 모델로부터 분석한 상위  $n$  % 강우 시의 강우감쇄 연속 분포함수를 0.01% 단위의 이산(Discrete) 분포함수로 단순화하면 0.01~100%의 범위에서 0.01% 단위의 총 10,000개의 강우감쇄 값을 구할 수 있다.

링크마진에서  $n$  % 강우확률 시의 강우감쇄 값을 제외하면 총 10,000개의 'Link Margin - Rain' 값을 구할 수 있으며 이 값이 IF-77 모델의 다중경로 페이딩 손실보다 큰 경우에 링크가 가용하다고 판단할 수 있다.

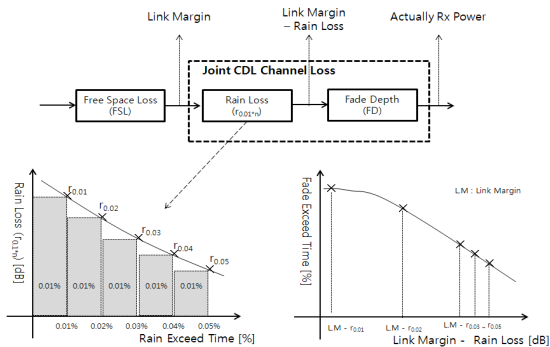


그림 8. 공용 데이터링크 Joint 링크가용도 분석 모델  
Fig. 8. Proposed Joint link availability model

그림 8은 본 논문에서 제안하는 공용 데이터링크의 joint 링크 가용도 분석 모델을 나타내는 그림이다. 자유공간손실(FSL)만을 고려한 링크마진에서 0.01% 단위 확률의 강우감쇄를 거치고 남은 수신마진이 IF-77 모델의 다중경로 페이딩 손실보다 클 경우에 링크가 가용한 것으로 분석한다.

이전 장의 IF-77 모델은 상위  $p$  % 시의 다중경로 페이딩 손실을 분석했다면 본 논문은 그 역함수인 입력이 최대 허용 가능한 다중경로 페이딩 손실이 'Link Margin - Rain Loss' 일 때 그 보다 큰 다중경로 페이

딩이 일어날 확률을 구한다. 해당 수식은 이전 장에서 영역 별로 IF-77 모델을 근사화한 수식 (1)을 역함수 형태로 변환하여 구할 수 있다.

수식 (2)에서  $FD_{0.1}$ ,  $FD_{50.0}$ ,  $FD_{90.0}$ ,  $FD_{99.9}$ 는 공용 데이터링크의 운용 조건을 IF-77 모델을 이용하여 분석했을 때 상위 0.1%, 50%, 90%, 99.9% 확률의 다중경로 페이딩에 의한 손실을 의미한다.  $LM$ ,  $r_n$ 은 각각 링크마진과 상위  $n$  %의 강우 시의 강우감쇄를 나타낸다.  $p(n)$ 은 링크마진에서 상위  $n$  %의 강우감쇄를 제외한 마진보다 IF-77 다중경로 페이딩 손실이 더 큰 확률을 의미하며 이 경우 링크는 비 가용상태가 된다.

$$p(n) = \begin{cases} 0.001 \times 10^{\frac{FD_{0.1} - (LM - r_n)}{FD_{0.1} - FD_{20.0}} \times \log_{10}(500)} & , LM - r_n \geq FD_{50.0} \\ 0.4 \times \frac{FD_{50.0} - (LM - r_n)}{FD_{30.0} - FD_{90.0}} + 0.5 & , FD_{90.0} \leq LM - r_n < FD_{50.0} \\ 0.1 \times \frac{FD_{90.0} - (LM - r_n)}{FD_{90.0} - FD_{99.9}} + 0.9 & , FD_{99.9} \leq LM - r_n < FD_{90.0} \\ 1 & , LM - r_n < FD_{99.9} \end{cases} \quad (2)$$

그림 9는 통달거리가 200km, 링크마진이 20dB 확보된 운용 조건에서 주파수 및 항공기 고도에 따른 0.01% 단위의 강우감쇄 시에 링크가 가용할 확률을 나타낸 것이다.

그림 10에서 강우확률 0.01%에서 약 0.4%까지 0의 확률을 가지는 것은 20dB 이상의 높은 강우감쇄로 인해 다중경로 페이딩 손실과는 관계없이 링크가 열리지 않음을 의미한다. 또한 약 5% 이상에서는 강우가 없어 다중경로 페이딩 손실에 의한 링크 가용도를 의미한다.

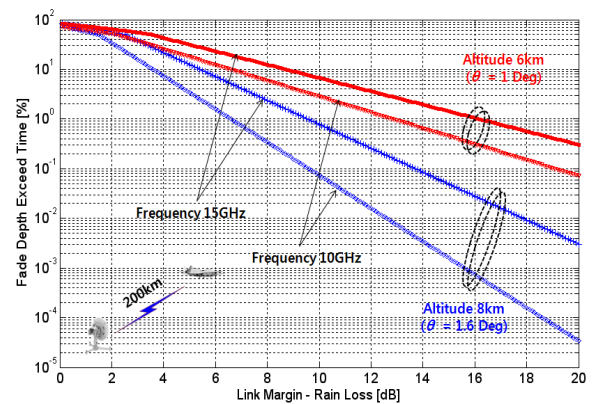


그림 9. 잔존 링크마진 이상의 다중경로 페이딩 발생 확률  
Fig. 9. Probability of fade depth exceeding link margin

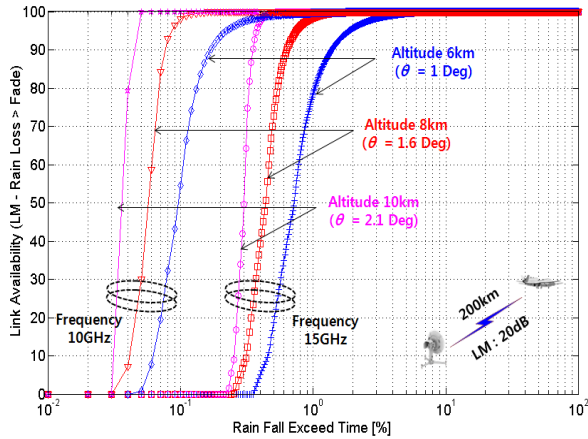


그림 10. 운용 고도에 따른 강우 확률 별 링크 가용도  
Fig. 10. Link availability for rain and flight altitude

$$\begin{aligned}
 \text{avail} &= \frac{1}{10000} \times \sum_{n=1}^{10000} 1 - p(LM - r_{0.01 \times n}) \\
 &= \frac{1}{10000} \times \left[ \sum_{n=1}^{100 \times P_0} 1 - p(LM - r_{0.01 \times n}) + \sum_{n=100 \times P_0 + 1}^{10000} 1 - p(LM) \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

수식 (2)에서 각  $0.01 \times n$  %의 강우 시에 링크가 가용하지 확률은 전체 링크마진  $LM$ 에서  $0.01 \times n$  % 강우 시의 강우감쇄인  $r_{0.01 \times n}$ 을 뺀 값보다 더 큰 다중경로 페이딩이 발생할 확률과 같고 이를 전체  $0.01 \times n$  % ( $n=1 \sim 10000$ )에 대해 누적하면 강우감쇄와 다중경로 페이딩을 함께 고려한 링크 가용도를 구할 수 있다.

수식 (3)에서  $p(LM - r_{0.01 \times n})$ 은 상위  $n$  % 강우 시에 ‘링크마진 - 강우감쇄’보다 더 큰 다중경로 페이딩이 발생할 확률을 의미한다. 수식 (3)에서  $P_0$ 는 해당 지역의 강우통계인 ITU-R P.837 권고안에서 구할 수 있는 값으로 해당 지역에서 연간 비가 올 확률을 나타내며 참고적으로 서울(북위 37.3도, 동경 127도) 지역의  $P_0$ 는 6.75%다.

그림 11과 12는 공용 데이터링크의 대표적 운용조건인 X 및 Ku 대역, 통달거리 200km에서 강우감쇄와 다중경로 페이딩 손실을 고려한 링크 가용도를 분석한 결과를 나타낸다. 운용 주파수에 따라 요구 링크가용도를 만족하기 위한 링크마진에 일부 차이가 있지만 항공기의 고도에 따른 지상 안테나의 고각에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

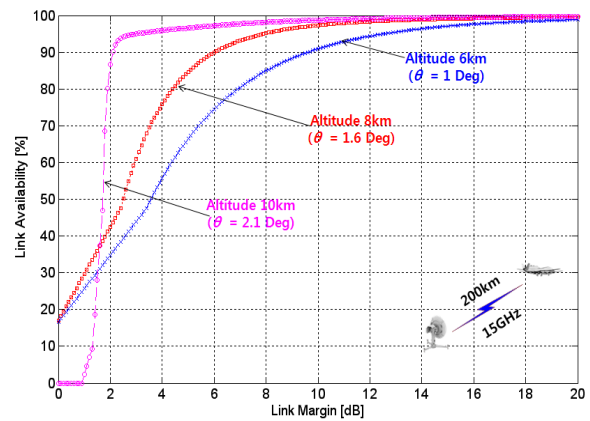


그림 11. Ku 대역, 200km 조건의 링크가용도 분석 결과  
Fig. 11. Link availability analysis result (Ku band & 200km transmission range)

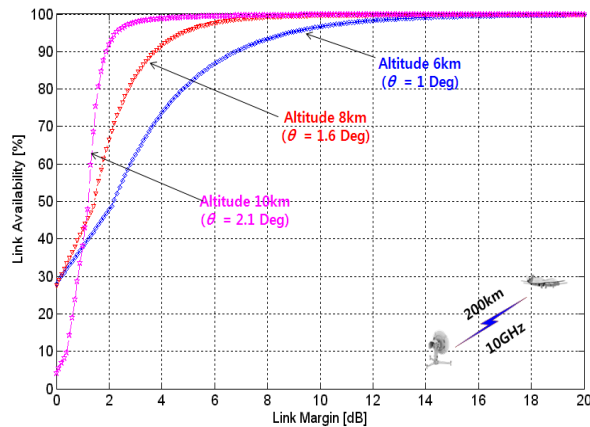


그림 12. X 대역, 200km 조건의 링크가용도 분석 결과  
Fig. 12. Link availability analysis result (X band & 200km transmission range)

#### IV. 성능 분석

##### 4.1. 운용 조건 별 필요 링크마진 분석

유, 무인 항공기 통신은 인명 안전에 영향을 미칠 수 있기 때문에 다른 운용환경의 통신보다 높은 수준의 링크 가용도가 필요하며 최소한 95% 이상의 링크 가용도를 가져야 한다. 공용 데이터링크의 운용조건은 공용 데이터링크를 탑재하는 항공기의 능력에 따라 주로 결정되며 대형 항공기에 탑재될수록 긴 통달거리 및 높은 고도에서 운용될 수 있다.

이전 장에서 분석한 강우감쇄, 다중경로 페이딩 손실을 주파수, 통달거리 및 항공기 고도에 의해 결정되며 강우감쇄와 다중경로 페이딩을 결합한 링크 가용도 분석에서는 주로 항공기 고도에 따른 지상 안테나 고각에 가장 큰 영향을 받았다.

이번 장에서는 공용 데이터링크의 운용 조건에서



공용 데이터링크의 요구 링크 가용도를 만족하기 위해 필요한 링크마진을 시나리오 별로 분석한다. 표 1은 공용 데이터링크의 링크마진을 분석하기 위해 필요한 운용 조건을 나타내며 대표적인 조건으로는 15GHz 주파수, 200km의 통달거리 및 8km의 항공기 고도를 기본으로 한다.

표 1. 공용 데이터링크 성능분석 조건  
Table 1. Link availability analysis parameters

Parameter	Value
Frequency	10GHz, 15GHz
Range (D)	50 ~ 300km
Elevation angle ( $\theta$ )	0.5 ~ 5°
Availability ( $A_v$ )	95%, 98%, 99%
Latitude (Lat)	N 37.3° (Seoul)
Longitude (Lon)	E 127.0° (Seoul)
Antenna Polarization	Vertical Pol.
Antenna beam width/gain	5°(3dB) / 21dBi

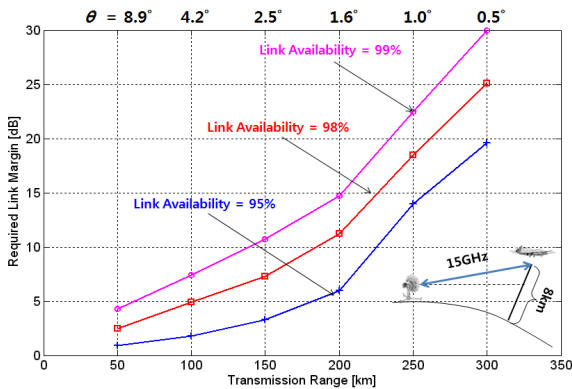


그림 13. Ku 대역의 통달거리에 따른 필요 링크마진  
Fig. 13. Required link margin for range at Ku band

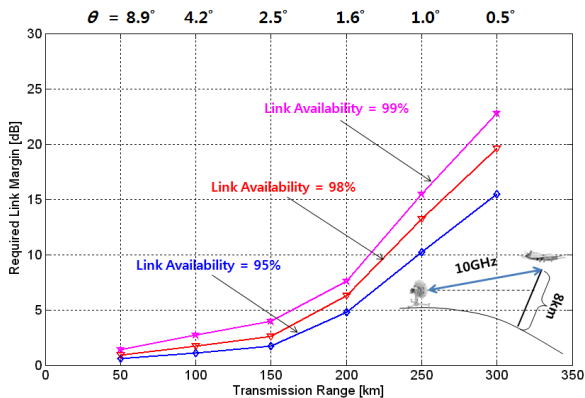


그림 14. X 대역의 통달거리에 따른 필요 링크마진  
Fig. 14. Required link margin for range at X band

그림 13과 14는 Ku 및 X 대역에서 통달거리가 증가함에 따라 요구 링크가용도를 만족하기 위해 자유 공간손실에 비해 추가적으로 필요한 링크마진을 분석한 결과다.

공용 데이터링크의 링크 가용도는 통달거리가 증가함에 따라 증가하는데 특히 200km 이전에 비해 200km 이상에서 필요 링크마진이 급격하게 증가했으며 이는 동일한 항공기 고도에서 통달거리가 증가할수록 지상 안테나의 고각이 증가하기 때문이다.

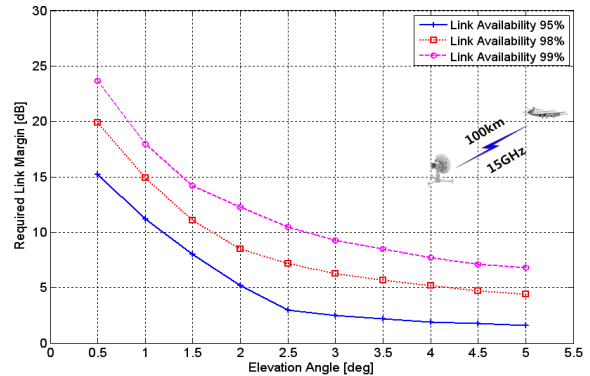


그림 15. Ku 대역, 100km에서 안테나 고각에 따른 필요 링크마진  
Fig. 15. Required link margin for elevation angle at Ku band & 100km range

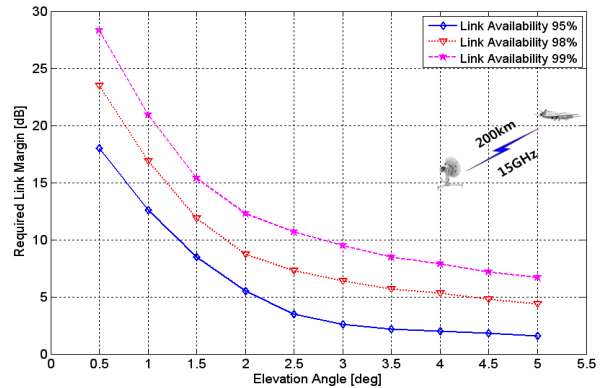


그림 16. Ku 대역, 200km에서 안테나 고각에 따른 필요 링크마진  
Fig. 16. Required link margin for elevation angle at Ku band & 200km range

그림 15와 16은 Ku 대역에서 지상 안테나의 고각이 증가함에 따라 요구 링크가용도를 만족하기 위한 링크마진을 분석한 결과다. 필요 링크마진은 고각이 감소할수록 증가하며 특히 1.5도 이하의 고각에서는 고각이 감소할수록 필요 링크마진의 기울기가 크게 증가하였다.

그림 17과 18은 지상 안테나의 고각에 따라 운용

주파수가 증가함에 따른 필요 링크마진을 분석한 결과다. 필요 링크마진은 지상 안테나의 고각에 가장 큰 영향을 받았으며 동일한 지상 안테나 고각에서는 운용 주파수가 증가함에 따라 필요 링크마진이 증가하였다.

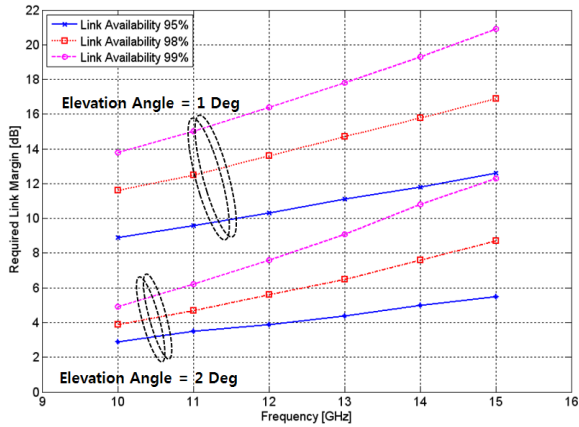


그림 17. 고각 별 운용 주파수에 따른 필요 링크마진 분석  
Fig. 17. Required link margin for elevation angle and frequency

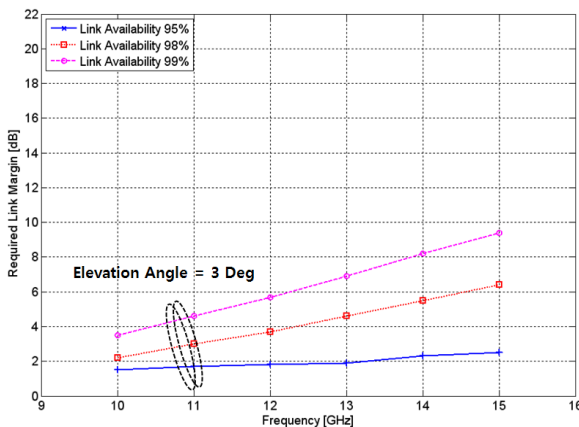


그림 18. 고각 별 운용 주파수에 따른 필요 링크마진 분석  
Fig. 18. Required link margin for elevation angle and frequency

모의시험 결과 공용 데이터링크의 링크 가용도를 만족하기 위한 추가적인 링크마진은 지상 안테나의 고각에 가장 큰 영향을 받았으며 두 번째 큰 영향은 운용 주파수에 많은 영향을 받았다.

지상 안테나의 고각이 3도 이상에서는 통달거리와는 관계없이 주파수가 증가함에 따라 필요 링크마진이 증가하였는데 이는 지상 안테나 고각이 3도 이상에서는 링크 가용도가 강우감쇄에 의해 결정됨을 의미한다.

지상 안테나의 고각이 1.5도 이상에서는 통달거리

가 증가하더라도 필요 링크마진은 거의 증가하지 않았으나 1.0도 이하의 지상 안테나 고각에서는 통달거리가 증가함에 따라 필요한 링크마진도 증가하였다. 실제 환경에서 통달거리가 증가함에 따라 필요 링크마진이 증가하는 것은 동일한 항공기 고도에서 통달거리가 증가하면 지상 안테나 고각이 낮아지기 때문이다.

#### 4.2. 실 환경을 고려한 필요 링크마진 분석

실제 공용 데이터링크 운용 환경에서 지상 안테나의 고각은 공용 데이터링크의 통달거리와 항공기의 고도에 의해 결정된다. 실 환경을 고려한 링크 가용도를 분석하기 위해 현재 미군이 운용 중에 있는 여러 급의 무인기 규격을 가시선 통신의 최대 통달거리 대비 항공기 최대 고도를 비교하면 최대 통달거리 지점에서 지상 안테나 고각이 약 1.5도에서 운용된다.

전술부대를 위한 정찰용 무인기인 RQ-5A Hunter, RQ-7 Shadow 급 무인기는 기종에 따라 세부 규격이 조금씩 다르지만 최대 통달거리가 125km이고 최대 고도는 기종에 따라 4.5km(15,000ft)~5.4km(18,000ft)에서 운용된다<sup>[18]</sup>. 정찰 및 공격이 가능한 다목적 무인기인 RQ-1 Predator는 7.62km(25,000ft)에서 운용되며 통달거리는 약 185 km (100nautical mile)에서 운용 가능하다<sup>[19]</sup>.

중고도 무인기인 MQ-9 Reaper나 고고도 무인기인 RQ-4A/B Global Hawk 무인기는 고도 15km(50,000ft) 이상에서 운용되며 장거리 통신은 주로 위성 통신링크를 사용하고 가시선 공용 데이터링크 통신은 근거리나 이, 착륙 시에 사용한다. 여기서 R은 Reconnaissance, M은 Multi-Purpose를 뜻하며 Q는 무인기를 나타낸다.

표 2. 공용 데이터링크 실 운용환경 성능분석 조건  
Table 2. Link availability analysis parameters for actual operating environment

Parameter	Value
Frequency	10GHz, 15GHz
Range (D)	125km, 185km
Elevation angle ( $\theta$ )	4.5km(D=100), 7.6km(D=200)
Latitude (Lat)	N 37.3° (Seoul)
Longitude (Lon)	E 127.0° (Seoul)
Antenna Polarization	Vertical Pol.

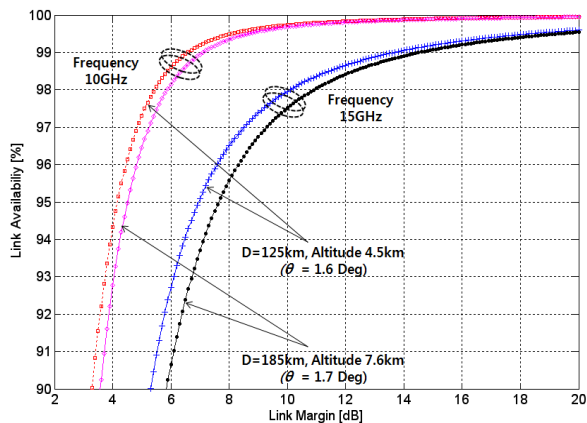


그림 19. 실제 환경을 고려한 공용 데이터링크의 필요 링크마진  
Fig. 19. Required link margin for common datalink considering the actual operating environment

그림 19는 미국에서 실제 운용하는 무인기의 운용 조건을 반영했을 때 요구되는 링크 가용도를 만족하기 위해 필요 링크마진을 분석한 결과로써 95%의 링크 가용도 기준으로 운용 주파수에 따라 최소 5 ~ 8dB의 링크마진이 필요하였으며 99%의 높은 수준의 링크 가용도를 만족하기 위해서는 최소 7 ~ 15dB 수준의 링크마진이 필요하였다.

### V. 결 론

본 논문은 공지(Aeronautical to Ground)환경의 가시선 조건에서 장거리에 전송되는 공용 데이터링크로 개발되는 다중플랫폼 영상정보용 공용 데이터링크의 링크 가용도 분석 방법을 제안하고 링크 가용도를 만족하기 위해 필요한 링크마진을 분석한다. 제안된 링크 가용도 분석 방법은 강우감쇄와 다중경로 페이딩 분석모델을 하나의 조건부 확률로 변환함으로써 강우 감쇄와 다중경로 페이딩이 함께 고려하여 링크 가용도를 분석할 수 있다.

모의시험 결과 공용 데이터링크의 링크 가용도를 만족하기 위한 추가적인 링크마진은 지상 안테나의 고각에 가장 큰 영향을 받았으며 동일한 수준의 고각에서는 통달거리보다는 운용되는 주파수에 주된 영향을 받았다. 또한 실제 가시선 공용 데이터링크를 운용하는 유사 무인기 체계의 통달거리, 운용 고도를 바탕으로 예측한 결과 실제 운용환경에서는 주파수 및 요구 링크 가용도에 따라 약 5 ~ 15dB의 추가적인 링크마진이 필요하였다.

### References

- [1] Jong-Moon Chung, Kyu-Chul Park, Tae-Yeon Won, Ui-Hwan Oh, Dong-Chul Ko, Seok-Jun Hong, Chang-Bae Yoon, Ho Kim, Ui-Young Pak, "Standardization Strategy for the Image and Intelligence Common Datalink", *The Journal of the Korean Information and Communication Magazine*, vol. 28, no. 4, pp.41-50, Apr. 2011.
- [2] "Propagation curves for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands," *ITU Recommendation P. 528-3*, Feb. 2012.
- [3] S. Baiotti, G. L. Scazzola, G. Battaini, and E. Crovari, "Advances in UAV data links: analysis of requirement evolution and implications on future equipment," *Defence Technology I Center*, Apr. 2000.
- [4] M. Cheffena, L. E. Braten, T. Ekman, and T. Tjelta, "Combined dynamic channel simulator for high capacity broadband fixed wireless access systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58 no. 10, pp. 3421-3426, Oct. 2010.
- [5] A. Delrieu, "Comparison of typical air/ground aeronautical communication system propagation losses in the L band and the C band," *World Radio communication Conference*, Thailand, Feb. 2005.
- [6] T.C. Tozer and D. Grace, "High-altitude platforms for wireless communications," *IEE Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 127-137, June 2001.
- [7] A. W. Graham, N. C. Kirkman and P. M. Paul, "Mobile radio network design in the VHF and UHF bands," *John Wiley & Sons*, 2007.
- [8] T. H. Shake, "Defining availability for high-rate data links with fading," *IEEE MILCOM 2007*, Orlando, FL, Oct. 2007.
- [9] "End-to end error performance parameters and objectives for international, constant

bit-rate digital paths and connections,” *ITU Recommendation T.826*, Dec. 2002.

[10] D. Wojtkowiak, “Handling high winds in critical microwave antenna-based communication networks.” *Radio Frequency System*, Oct. 2009.

[11] L. W. Barclay, “Propagation of radiowaves 2nd edition”, Institution of Electrical Engineers, 2003.

[12] “Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems”, *ITU Recommendation P.618-9*, Aug. 2007.

[13] W.T Barnett, “Multipath Propagation at 4, 6 and 11GHz,” *Bell system tech. J.*, vol. 51, pp. 321-361, Feb. 1972.

[14] A. Vigants, “Space diversity engineering,” *Bell System Tech. J.* vol. 54, pp. 103 - 142, Jan. 1975

[15] “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems,” *ITU Recommendation P. 530-13*, Oct. 2009.

[16] G. D. Gierhart and M. E. Johnson, “The IF-77 electromagnetic wave propagation model final report,” *Institute for Telecommunication Sciences*, Report DOT/FAA/ES-83/3, Sep. 1983.

[17] M. E. Johnson and G. D. Gierhart, “Propagation and interference analysis computer programs (0.1 to 20GHz) applications guide,” *Institute for Telecommunication Sciences*, Report FAA-RD-77-60, Mar. 1978.

[18] “Army unmanned aircraft system operations,” *Headquarters, Department of the Army*, FMI 3-04.155, Apr. 2006.

[19] “Concept of operations for endurance unmanned aerial vehicles-version 2,” *Air Combat Command*, U.S. Air Force, Dec. 1996.

류 영 재 (Young-Jae Ryu)



디지털 신호처리

2000년 2월 경북대학교 전자전기 공학부 졸업  
 2002년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 석사  
 2002년~현재 국방과학연구소 <관심분야> 대전자전통신,

유 정 훈 (Jung-Hun Ryu)



2004년 2월 경북대학교 전자전기 공학부 졸업  
 2006년 2월 항공과대학교 전자공학과 석사  
 2007년~현재 국방과학연구소 <관심분야> 통신시스템, 신호처리, 데이터링크

박 의 영 (Ui-Young Pak)



<관심분야> 이동통신, 데이터링크

1982년 8월 연세대학교 전기공학과 졸업  
 1988년 2월 연세대학교 전기공학과 석사  
 2003년 2월 연세대학교 전기전자 공학과 공학박사  
 1984년~현재 국방과학연구소