

# 제주-이천간 전리층 사입사 데이터의 등가 직입사 변환

유문희\*, 이환상\*\*, 정철오\*, 조진호\*, 이용민\* 정회원

## Conversion of Oblique Ionogram between Jeju and Icheon to Vertical Equivalent at Mid-point

Moon-Hee You\*, Hwan-Sang Lee\*\*, Cheol-Oh Jeong\*, Jin-Ho Jo\*, Yong-Min Lee\* Regular Members

### 요 약

본 논문에서는 전리층에서의 직입사 측정 및 사입사 측정 간 등가 이론을 정리하여, 이를 바탕으로 실제 운용중인 전리층 관측기를 이용한 사입사 Ionogram을 중간 지점의 등가 직입사 Ionogram으로 변환할 수 있는 변환 알고리즘을 제시하였다. 또한 관측 중간 지점에 전리층 직입사 관측기가 없는 상황에서 변환 알고리즘 결과를 검증하기 위해, 관측 송수신 지점에서 시차를 두고 측정하는 직입사 Ionogram 데이터를 이용하여 변환 데이터와 비교하였다. 비교 결과 대체적으로 변환된 등가 직입사 Ionogram이 두 지역의 Ionogram의 형태를 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다. 이에 따라 본 변환 알고리즘은 단거리 사입사 측정 Ionogram을 등가 직입사 Ionogram으로 변환하여 중간 지점 전리층 전자밀도 프로파일을 얻는 데 충분히 활용가능하다고 판단된다.

**Key Words** : ionosphere; vertical sounding; oblique sounding; conversion algorithm; Digisonde.

### ABSTRACT

In this paper, we present a conversion algorithm of the oblique ionogram obtained from Jeju and Icheon to the equivalent vertical ionogram of the path mid-point, based on some equivalence theorems between the vertical sounding and the oblique sounding for the ionosphere. And in order to verify the conversion algorithm under the condition of no vertical ionosonde at the mid-point on the test path, the equivalent vertical ionograms are compared to the real vertical ionograms measured adjacently in space-time. The comparison results show that the conversion algorithm performs well for the short-path oblique ionogram and the equivalent vertical ionograms could be applied to get the electron density profiles at the mid-point.

## I. 서 론

전리층이란 지상 고도 50km에서 500km까지의 범위에서 대기의 입자들이 태양복사에 의해 이온화되어 플라즈마 형태로 존재하는 지역을 지칭한다. 태양으로부터 발생하는 우주전파로 지구 전리층이 변동하는데, 스마트 사회의 정보통신 환경이 고도화 되면서 그로 인한 영향이 점차 증가하고 있다. 특히 전리층 반사를 이용하는 무선통신에서의 신호 왜곡은 물론 GPS 시스템에서의 신호 손실 또는 위치오차가 발생할 수 있고 심한 경우 전자 장비의 고장 및 위성 손실까지도 발생할 수 있어서 전리층 관측 연구의 중요성이 크게 부각되고 있다.[1]

전리층 관측은 전파를 전리층 방향으로 입사하여 전리층

내의 여러 이온층에서 반사되어 오는 전파를 측정함으로써 전리층내의 전자들의 분포를 측정하는 것으로, 관측 방법에 따라 직입사 관측(Vertical radio sounding) 방식과 사입사 관측(Oblique radio sounding) 방식으로 분류되고 있다. 직입사 방식은 송수신기가 동일한 위치에 있어서 전파를 수직으로 입사하고 반사파도 거의 수직방향으로 수신하는 형태로, 관측자의 연직방향의 전리층만 측정하고, 사입사 방식은 송수신기가 서로 일정 거리 이상 떨어져 있어서 임의의 경사각을 주어 송수신함으로써 전리층의 높이뿐만 아니라 전리층의 표류속도까지 측정할 수 있다.

전리층 관측은 1925년 Breit와 Tuve에 의해 최초의 직입사 Ionosonde가 개발되었으며[2] 지금까지 주로 직입사 방식을 이용하여 수행되어 왔고, 사입사 방식에 있어서는 이 방

\* 본 논문은 국립전파연구원의 2013년 우주전파교란 상시감시체계 구축사업의 일환으로 수행된 연구 결과임.

\*한국전자통신연구원 방송통신미디어연구부분 위성무선융합연구부 (moon@etri.re.kr, cojeong@etri.re.kr, jhjo@etri.re.kr, ymlee01@etri.re.kr)

\*\*국립전파연구원 우주전파센터 연구개발과 (hslee21@msip.go.kr)

접수일자 : 2013년 6월 24일, 수정완료일자 : 2013년 7월 18일, 최종 게재확정일자 : 2013년 7월 19일

식의 장점인 직입사 측정 불가 지역 (바다, 사막 등)의 전리층 감시 및 송수신기 네트워크를 이용한 다수 지역의 측정 가능 등을 고려하여 최근까지 영국, 호주, 일본 및 중국 등 몇몇 국가에서 사입사 관측을 연구해 오고 있다. 그러나 아직까지 국내외적으로 사입사 관측뿐만 아니라 전리층 반사면의 사입사 관측 정보를 이용한 전리층 반사면의 직입사 전리층 정보를 분석하는 기술은 완전하지 못하다.

본 논문에서는 국립전파연구원 우주전파센터에서 제주와 이천에 설치하여 운용하고 있는 전리층 관측기를 이용한 사입사 관측 데이터를 사용하여 등가 직입사 데이터로 변환하는 알고리즘을 제시하고자 한다. 2장에서는 전리층에서의 사입사 전파 특성 및 관련 이론을 기술하고, 3장에서는 관측된 사입사 데이터에서 등가 직입사 데이터로 변환하는 알고리즘을 제시한다. 그리고 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

## II. 전리층에서의 사입사 전파

무선통신의 관점에서 사입사 전파는 매우 중요하다. 실제적으로 특정 시스템에서 사용될 주파수 채널을 할당하기 위해 사용가능한 주파수 스펙트럼을 결정하는 것은 반드시 필요하다. 전리층을 경유하여 전파되는 무선 신호의 상한 주파수는 종종 최대 사용가능 주파수 (maximum usable frequency)라고 불리는데, 보통 전리층의 최대 전자밀도에 의해 결정된다. 반면 하한 주파수는 전리층 D layer의 흡수와 잡음 레벨, 방송국으로부터의 간섭 등이 결합되어 결정된다. 예를 들어 D layer의 매질 주파수 (500 kc/sec ~ 1500 kc/sec)의 경우는 전파 흡수가 심하기 때문에 실제적으로 낮에 아무런 공중파가 수신되지 않는다.

사입사 데이터에서 직입사 전파 특성을 결정하는 것은, 전리층을 평면으로 계층화하고 지구 자기장이 없다고 고려할 경우, 상대적으로 단순하다. 전리층 굴곡, 전자 충돌 및 자기장을 포함하면 상당히 복잡해진다. 본 논문에서는 단순한 경우(즉, 평면 전리층, 충돌 없음, 자기장 없음)를 고려하여 전리층 전파 특성을 다룬다.

### 1. 전리층에서의 등가이론[3]

사선으로 전파되는 사입사 파의 특성과 동일한 실제 높이에서 반사되는 대응 직입사 파의 특성과 관련된 몇 가지 이론이 있다. 후자를 등가 직입사파(equivalent vertical wave)라고 지칭한다.

평면층에 비스듬히 들어오는 사입사 파의 주파수  $f_{ob}$ 와 등가 직입사 주파수  $f_v$ 와의 관계식은 다음과 같다.

$$f_v = f_{ob} \cos \phi_0 \quad (1)$$

여기서  $\phi_0$ 는 전리층 바닥에서 수직과 입사파간의 각도를 말한다. 식(1)은 secant law (정할법칙, 正割法則)라고 불린다. 이는 주어진 전리층에서 입사파 경로의 경사도가 증가하면 더 높은 주파수가 반사된다는 것을 보여준다.

입사각  $\phi_0$ 은 다음의 두 가지 이론에 의해 경로 길이와 가상 반사 높이의 항목으로 결정될 수 있다.

Breit와 Tuve 이론[2]에 따르면, 실제 굽은 경로 TBR (그림 1)을 가로지르는 데 걸리는 시간과 자유공간에서 등가 삼각 경로 TAR을 가로지르는 데 소요되는 시간은 동일하다. 그림 1에서  $ds = dx/\sin(i)$ 라고 하면, 경로 TBR를 가로지르는 데 소요되는 시간  $t$ 는 다음과 같다.

$$t = \frac{1}{c} \int_{TBR} \frac{ds}{\mu_{ob}} = \frac{1}{c \sin(\phi_0)} \int_{TAR} dx = \frac{TA + AR}{c} \quad (2)$$

여기서  $\mu_{ob}$ 는 전리층의 사입사 굴절율이고,  $c$ 는 자유공간 빛의 속도이다.

가상 반사 높이에 대한 이론으로는 Martyn 등가 경로 이론이 있다[4]. 사입사 파 반사의 가상 높이와 등가 직입사 파의 반사 가상 높이가 같다는 것이 Martyn 등가 경로 이론이다. 사입사 경로의 가상 높이  $h'_{ob}$ 는  $hP' \cos(\phi_0)$ 이다. 여기서  $P'_{ob}$ 는 가상 경로 TAR이다. 그러므로,

$$h'_{ob} = \frac{1}{2} \cos(\phi_0) P'_{ob} = h'_v \quad (3)$$

여기서,  $h'_v$ 는 사입사 파 반사의 가상 높이이고,  $h'_v$ 는 등가 직입사 파 반사의 가상 높이이다.

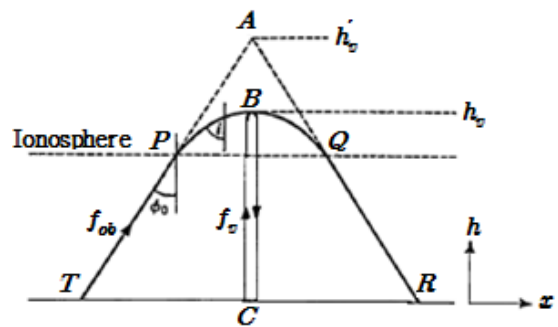


그림 1. 전리층 사입사 경로 및 등가 직입사 경로

### 2. 제주-이천간 사입사 Ionogram 데이터

현재 국립전파연구원 우주전파센터에서 제주(33.4°N, 126.3°E)와 이천(37.1°N, 127.5°E)에 설치하여 운용중인 전리층 관측기는 미국 LDI사에서 제작된 Digisonde 로서, 이를 이용하여 정해진 스케줄에 따라 직입사 Ionogram과 사입사 Ionogram을 약 8분 간격으로 번갈아가며 제공하고 있다. Ionogram의 데이터는 다음 그림 2와 같이 주파수, 길이(높

이), 편파, 잡음 레벨, 신호세기, 도플러, 신호 방위각, 신호 양각 등으로 표현된다[5].

2012.06.01 (153) 09:23:00.000								
Station name: I-Cheon								
URSI code: IC437								
Ionosonde model: DPS-4D								
Freq	Range	Pol	MPA	Amp	Doppler Az	Zn	PGH	
1.000	860.0	90	54	63	1.563 90.0	30.0	863	
1.000	85.0	-90	54	63	4.688 90.0	30.0	80	
1.025	90.0	-90	54	63	1.563 90.0	30.0	96	
1.100	672.5	90	60	69	1.563 90.0	30.0	685	
1.100	1160.0	90	60	69	-4.688 90.0	30.0	1154	
1.100	1175.0	90	60	69	1.563 90.0	30.0	1178	
1.175	1215.0	-90	54	63	-1.563 90.0	30.0	1207	
1.225	430.0	-90	48	57	4.688 90.0	30.0	441	
1.225	1237.5	-90	48	57	-4.688 150.0	30.0	1249	
1.225	1272.5	-90	48	57	-1.563 90.0	30.0	1280	
1.275	962.5	-90	48	57	-1.563 150.0	30.0	963	
1.300	322.5	-90	45	54	-1.563 150.0	30.0	334	
1.325	767.5	90	48	57	1.563 270.0	30.0	767	
1.325	230.0	-90	45	54	-1.563 150.0	30.0	229	
.....								

그림 2. Digisonde 측정 사입사 Ionogram 데이터 예

제공되는 데이터 중 주파수와 길이(높이)에 해당하는 데이터로 Ionogram의 x축과 y축의 좌표값을 삼는데, 주파수의 단위는 MHz 이고, 길이(높이)의 단위는 km 이다. 직입사 Ionogram의 경우의 주파수는 직입사 주파수( $f_v$ )를, 길이(높이)는 신호가 전리층에서 반사되는 가상 높이 ( $h'_{\nu}$ )를 의미하고, 사입사 Ionogram의 경우의 주파수는 사입사 주파수 ( $f_{ob}$ )를, 길이(높이)는 사입사 신호의 가상 경로 ( $P'_{ob}$ )의 절반을 나타낸다.

제주에서 전송된 Digisonde 신호를 이천에서 수신한 경우 해당 사입사 신호는 방위각 150도, 양각 30도이고, 반대로 이천의 Digisonde 신호를 제주가 수신한 경우의 사입사 신호는 방위각 330도, 양각 30도이다. 제주와 이천의 실제 측정 사입사 Ionogram을 그림 3과 그림 4에 보였다.



그림 3. 이천 수신 사입사 Ionogram (2013.05.27 00:52:30, SSW)

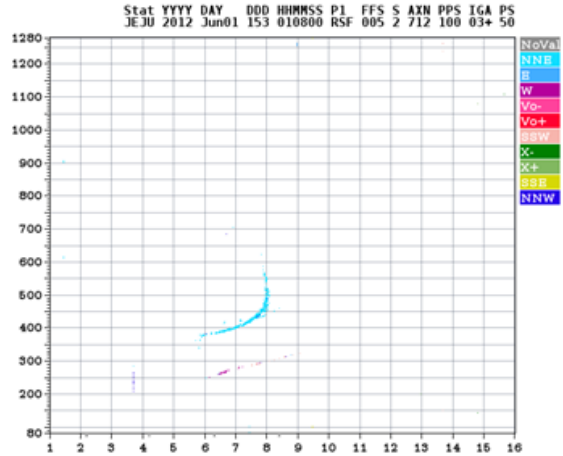


그림 4. 제주 수신 사입사 Ionogram (2012.06.01 01:08:00, NNE)

### Ⅲ. 변환 알고리즘

#### 1. 등가 직입사 변환 알고리즘

본 절에서는 제주와 이천간 사입사 Ionogram을 측정 위치 사이의 전파 경로 중간 지점의 등가 직입사 Ionogram 으로 변환하는 알고리즘을 기술한다.

제주와 이천간의 거리(D)는 약 430 km 로 500 km가 안 되는 단거리 구간이다. 따라서 단순한 평면 전리층으로 가정 해도 별 무리가 없다. 또한 전자 충돌이나 지구 자기장의 영향이 없다고 가정한다.

이러한 경우 변환 알고리즘은 2장에서 설명된 정할법칙, Breit와 Tuve 이론, Martyn 등가 경로 이론 등을 이용하여 사입사 Ionogram의 사입사 주파수 ( $f_{ob}$ )와 가상 경로 ( $P'_{ob}$ )에서 등가 직입사 주파수( $f_v$ )와 가상 높이 ( $h'_{\nu}$ )를 구한다. 변환 알고리즘을 각 단계별로 설명하면 다음과 같다.

- 1단계 : 두 측정 위치간 거리(D)로 지구중심 사이각( $\theta$ )을 구한다.
- 2단계 : 사입사 가상 경로 ( $P'_{ob}$ )에서 소요시간 ( $t_{ob}$ )를 구한다.
- 3단계 : 두 위치간 지구중심 사이각( $\theta$ )과 사입사 경로 소요시간 ( $t_{ob}$ )에서 사입사 입사각( $\phi_0$ )를 구한다.
- 4단계 : 두 위치간 지구중심 사이각( $\theta$ )과 사입사 입사각 ( $\phi_0$ )에서 등가 직입사 가상 높이 ( $h'_{\nu}$ )를 구한다.
- 5단계 : 사입사 주파수 ( $f_{ob}$ )와 사입사 입사각( $\phi_0$ )에서 등가 직입사 주파수( $f_v$ )를 구한다.

이와 같은 변환 단계를 이용하여, 제주-이천간 사입사 Ionogram의 주파수 ( $f_{ob}$ )와 가상 경로 ( $P'_{ob}$ )에서 등가 직입사 주파수( $f_v$ )와 가상 높이 ( $h'_{\nu}$ )를 구하는 식은 다음과 같다.

$$f_v = \frac{f_{ob}}{1.002} \cos \left( \sin^{-1} \left( \frac{428.8748}{P'_{ob}} \right) \right) \quad (4)$$

$$h'_{ob} = -3.6097 + \frac{214.4374}{\tan \left( \sin^{-1} \left( \frac{428.8748}{P'_{ob}} \right) \right)} \quad (5)$$

## 2. 변환 알고리즘 검증

앞 절에서 기술한 변환 알고리즘을 이용하여 제주와 이천 간 사입사 Ionogram을 중간지점의 등가 직입사 Ionogram으로 변환하였을 때, 이 변환 결과의 적합성을 검증해야 할 것이다. 가장 좋은 방법은 제주와 이천 사이의 중간지점에 직입사 전리층 관측기를 설치하여 그 측정 결과와 비교하는 것일 것이다. 그러나 이러한 방법은 현재 해당 지점에 설치된 관측기가 있는 것이 아니라면 시간과 비용이 많이 소요되므로, 정확도는 떨어지지만 시공간 인접 직입사 ionogram을 기준으로 한 검증방안을 고려하도록 한다. 제주와 이천간의 거리가 단거리이고 직입사 측정과 사입사 측정간의 시간 차가 약 8분 간격이므로, 전리층 상태가 평온하고 특별한 외부 영향이 없을 경우, 제주와 이천의 직입사 측정 결과가 충분히 사입사 측정 결과의 등가 변환 직입사 ionogram에 대한 검증 기준이 된다고 판단된다.

표 1. 제주와 이천의 전리층 관측 스케줄

시간	매시00분	매시08분	매시15분	매시23분
위치	매시30분	매시38분	매시45분	매시53분
제주	직입사	(수신)	직입사	(송신)
중간지점		사입사		사입사
이천	직입사	(송신)	직입사	(수신)

예를 들어 2012년 1월 1일 0시 38분 제주에서 측정한 사입사의 기준을 삼고자 하는 시공간 인접 직입사 ionogram (0시 30분 및 0시 45분의 제주, 이천 측정 직입사 ionogram)을 중첩해 보면 그림 5와 같이 거의 일치함을 볼 수 있다.

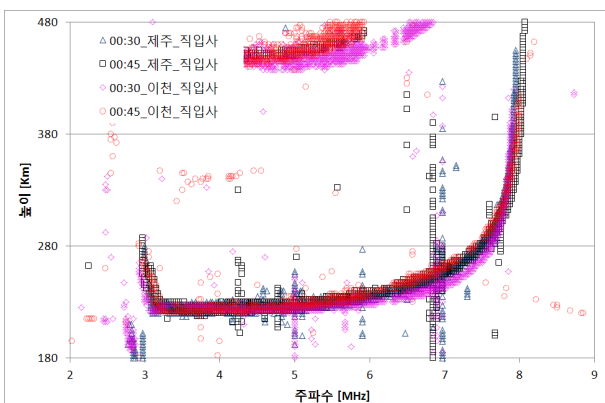
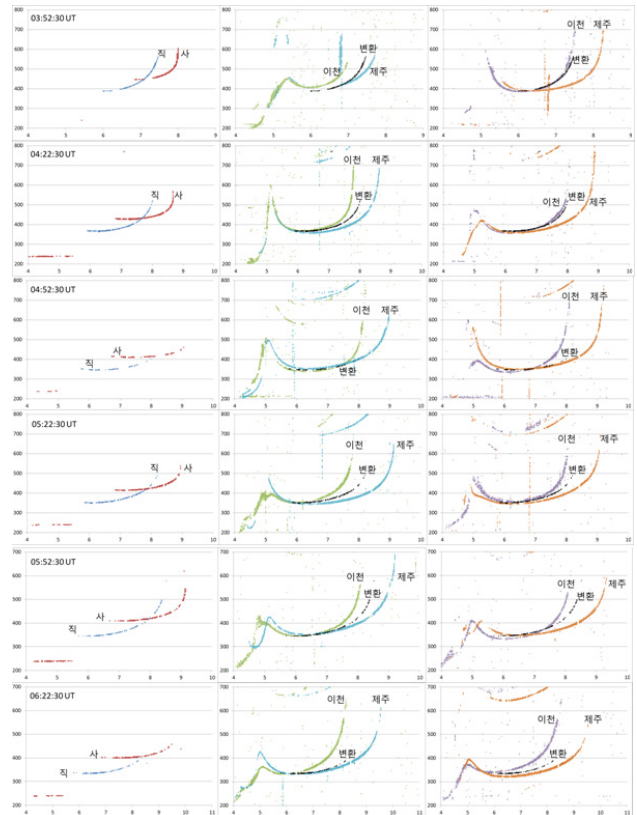


그림 5. 시공간 인접 직입사 ionogram 기준 예

그림 6에서는 2013년 5월 27일 이천 측정 사입사 ionogram의 변환된 등가 직입사 ionogram에 대해 인접 직입사와 비교 검증을 해 본다.



(a) 사입사-등가직입사 (b) 등가직입사-이천직입사 (c) 등가직입사-이후직입사  
그림 6. 이천 측정 사입사, 변환된 등가 직입사 및 인접 직입사 ionogram들간의 비교

그림 6의 (a)는 측정된 사입사(사)와 변환된 등가 직입사(직)를 비교한 것이다. (b)에서는 등가 직입사(변환)와 사입사 측정 8분전의 이천 직입사(이천)와 제주 직입사(제주)를 비교하였고, (c)에서는 등가 직입사와 사입사 측정 8분후의 이천 직입사와 제주 직입사를 비교하였다.

그림 6을 살펴보면, 전리층이 외부의 영향을 받아 Ionogram이 깨끗하게 그려지지 않는 경우에는 변환된 등가 직입사와 측정 직입사간에 약간의 어긋남이 보이지만, 대체적으로 변환된 등가 직입사 Ionogram이 이천 지역과 제주 지역의 Ionogram의 중간 지점에 걸쳐져 있음을 볼 수 있다. 이에 따라 본 변환 알고리즘은 제주-이천간 사입사 측정 Ionogram을 등가 직입사 Ionogram으로 변환하는 데 충분히 활용가능하다고 판단된다.

## IV. 결론

본 논문에서는 전리층에서의 사입사 전파 특성과 단순한 경우(즉, 평면 전리층, 충돌 없음, 자기장 없음)에 적용할 수



있는 전리층에서의 등가 이론 등을 정리하였다. 그리고 이를 바탕으로 국립전파연구원 우주전파센터에서 제주와 이천에 설치하여 운용중인 전리층 관측기 디지털데이터를 이용하여 측정된 제주-이천간 사입사 Ionogram을 중간 지점의 등가 직입사 Ionogram으로 변환할 수 있는 변환 알고리즘을 제시하였다. 또한 관측 중간 지점에 전리층 직입사 관측기가 없는 상황에서 변환 알고리즘 결과를 검증하기 위해 제주와 이천에서 시차를 두고 측정하는 직입사 Ionogram 데이터를 이용하여 변환 데이터와 비교하였다. 비교 결과 대체적으로 변환된 등가 직입사 Ionogram이 이천 지역과 제주 지역의 Ionogram의 중간 지점에 걸쳐져 있으며, 두 지역의 Ionogram의 형태를 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다. 이에 따라 본 변환 알고리즘은 제주-이천간 사입사 측정 Ionogram을 등가 직입사 Ionogram으로 변환하는 데 충분히 활용가능하다고 판단된다.

이후 본 변환 알고리즘을 이용하여 사입사 측정 결과를 이용한 제주-이천 중간 지점의 전리층 전자밀도 특성을 도출할 수 있을 것으로 판단되고, 이러한 결과를 활용함으로써 국내 전리층 전자밀도 모델을 개량하는데 도움이 되리라 본다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. Bamford, The Oblique Ionospheric Sounder (Project Final Report), Rutherford Appleton Laboratory, 2000.
- [2] G. Breit and M. A. Tuve, "A Test of the Existence of the Conducting Layer," Physical Review, vol. 28, no. 3, pp. 554-575, 1926.
- [3] K. Davies, Ionospheric radio Waves- Chapter 12, Blaisdell Publishing Company, 1969.
- [4] D. P. Martyn, "The Propagation of Medium Radio Waves in the Ionosphere," Proceedings of the Physical Society, vol. 47, no. 2, pp. 323-339, 1935.
- [5] B. W. Reinisch, Digisonde 4D Technical Manual (Version 1.0), Lowell Digisonde International, 2009.

### 저자

#### 유 문 희(Moon-Hee You)



- 정회원**
- 1990년 8월 : 한양대학교 전자통신공학석사 졸업
  - 2002년 2월 : 한양대학교 전자통신공학박사 수료
  - 1990년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : 위성통신시스템, 우주전파

#### 이 환 상(Hwan-Sang Lee)



- 정회원**
- 1993년 2월 : 원광대학교 전자공학과 학사 졸업
  - 1996년 6월~현재 : 국립전파연구원

<관심분야> : 전리층 전파전달

#### 정 철 오(Cheol-Oh Jeong)



- 정회원**
- 1988년 2월 : 동국대학교 통계학과 석사졸업
  - 2005년 2월 : 동국대학교 통계학과 박사수료
  - 1988년 4월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : 우주전파영향분석, 통신탐재체 제품보증

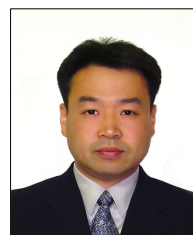
#### 조 진 호(Jin-Ho Jo)



- 정회원**
- 1988년 2월 : 충남대학교 전자공학 석사졸업
  - 1989년 6월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : 통신 위성 중계기 시험, 위성 궤도 내 시험

#### 이 용 민(Yong-Min Lee)



- 정회원**
- 1995년 2월 : 광운대학교 전자공학공학석사 졸업
  - 1999년 2월 : 광운대학교 전자공학공학박사 졸업
  - 2000년 12월 : (주)인오시스템 부설기술연구소 연구소장

· 2001년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : 초고주파통신 및 통신탐재체 RF설계