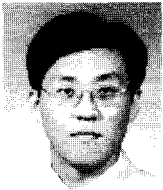


# Radar Network Analysis System의 개발 (II)

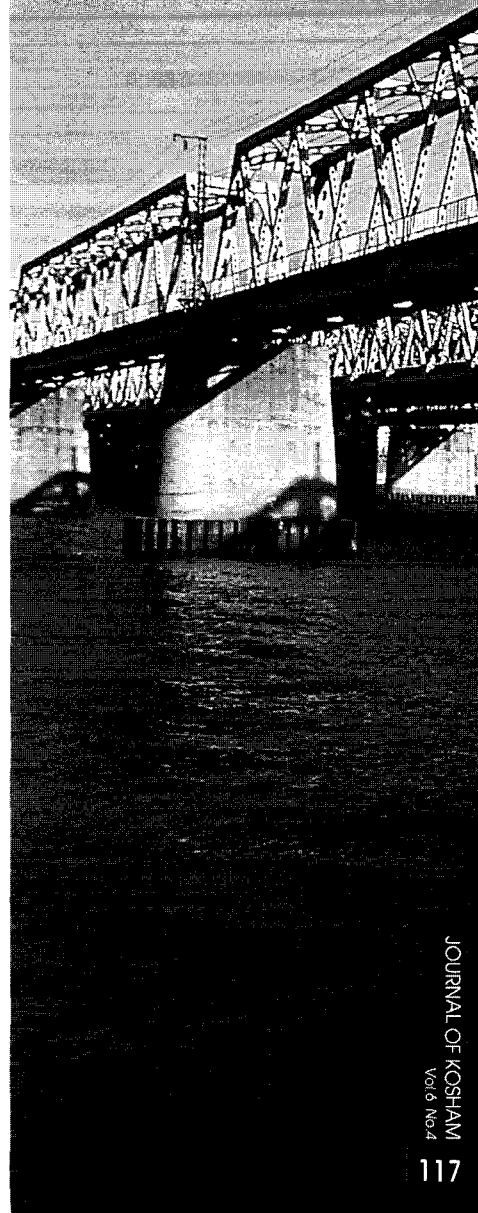


윤강훈 >>  
한국건설기술연구원 수석연구원

## 1. 서론

현대 수문학에서 강우레이더의 중요성은 아무리 강조해도 모자람이 없다. 본고에서는 국가차원에서 강우레이더를 계획, 설치 할때에 최적 방안에 대하여 논하고자 한다. 강우레이더 설치 후보지의 적정성 조사에서 우선적으로 수행되어야 할 요소는 레이더의 수평시계 확보 상태 조사이며, 수평시계의 조사를 위해 컴퓨터 시뮬레이션 기술이 부족하고 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM) 자료가 없었던 과거에는 고축척 지도나 사진 등을 이용한 수작업에 의해 설치 후보지의 적정성을 조사해 왔다. 그러나 과거 방식에 따른 수평시계의 조사에서는 임의 지점을 후보지로 선정한 후 관측 반경 내에 포함되는 산의 높이와 레이더 빔의 높이를 계산하여 비교한 후 차폐 여부를 결정해야 하기 때문에 수많은 자료를 수작업으로 만들어야 하고, 또한 여러 번의 시행착오를 거쳐야 평가 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 수작업의 불편함을 개선하고 후보지 적정성 조사의 효율을 높이기 위하여 컴퓨터에 의한 수치분석 방법이 개발되어 왔다. 수치분석 방법은 고해상도의 수치 고도 자료를 이용하여 여러 가지 가능한 상황들을 모의해 볼 수 있으므로 실제 현장에서 조사하고 고려해야 할 많은 사항들을 사전에 효율적으로 고려할 수 있다는 장점이 있다.

한편, 과거에는 수평시계를 포함한 지형, 기상 인자 또는 전파사용



및 접근성 등의 하드웨어 적인 측면에 의해서만 레이더 관측망 및 후보지가 선정되어 왔다. 이는 해외 선진국의 사례도 마찬가지이며, 과거의 방법은 기상 관측 레이더 설치에는 효율적이거나 유역 홍수 관리 개념의 강우 관측 레이더에는 그 목적에 부합하지 않는 면이 있다.

본고는 지난 9월호에 소개된 RNAS 프로그램의 기본적인 구조와 수치 고도 자료 분석 및 변환에 이어 구체적인 RNAS 프로그램의 세부 모듈구성에 대해서 설명하고자 한다.

## 2. RNAS 구성 모듈의 분석 기능

본 절에서는 RNAS 프로그램의 지형 분석 모듈과 홍수 분석 모듈이 수행할 수 있는 분석 기능에 대하여 상세하게 소개하고자 한다. 지형 분석 모듈에서는 레이더 수평시계 확보를 위한 차폐율, 홍수 관리적 측면의 유역 지배율, 관측 효율성 측면의 레이더 중복율 분석 등을 수행할 수 있으며, 이는 강우레이더의 관측망을 고려하기 이전에 레이더 관측망 구성에 필요한 기초적인 분석을 수행하기 위하여 각 레이더의 영향 범위 내에 포함되는 지역에 대한 지형적 특성을 분석하기 위한 단계이다. 또한, 홍수 분석 모듈에서는 홍수 영향 지수별 레이더 지배 효율을 분석하고 각 지수별 효율을 통합하여 전국 및 5대강 수계별 홍수 관리 적합도 분석 등이 수행 가능하며, 각각의 레이더에 대한 효율성 뿐만 아니라 전국 관측망의 홍수 관리 효율성을 분석하기 위한 단계이다. 이는 홍수 관리적 측면에서는 각 수계들을 지배하는 각각의 레이더 역할도 중요하지만, 전체 관측망의 유기적인 구성 여부가 가장 중요한 요소이기 때문이다.

### 2.1 지형 분석 모듈

#### 2.1.1 차폐율

강우레이더가 어떠한 지역에 설치 되었을 때 무엇

보다도 중요한 것이 차폐의 여부이다. 아무리 설치가 편리하고 그 주변지역이 홍수 관리면에서 중요한 지역이라 할지라도 레이더 빔 위치의 고도가 너무 낮아 차폐가 된다면 레이더의 기능이 없어지므로 기본적으로 차폐 여부의 조사는 매우 중요하다 할 수 있다. 차폐율의 계산은 레이더 수평 시계를 조사를 통해 얻을 수 있으며 임의의 지점을 후보지로 선정된 후 그 주변 관측 반경 지역에 대한 산의 높이와 레이더 빔의 높이를 계산하여 비교한 후 차폐여부를 조사한다. 이러한 방식으로 레이더 빔이 진행되는 모든 방향 및 거리에 대한 지점의 지형높이와 빔의 높이를 일일히 계산하여 빔의 차폐여부를 결정하고 차폐되는 모든 지역을 묶어 표시하면 레이더 빔의 차폐영역이 된다. 그림 1은 차폐상황의 일례를 도시화 한 것이며, 어두운 음영 부분이 차폐가 일어난 곳으로 차폐가 시작되는 곳의 고도가 레이더 빔이 전파되는 곳의 고도보다 높음을 짐작할 수 있을 것이다. 그림 2는 레이더 관측 반경 내의 지형 수직단면에 레이더 빔이 전파되는 상황을 나타내고 있다. 이때, 레이더 빔의 전파가 주변의 높

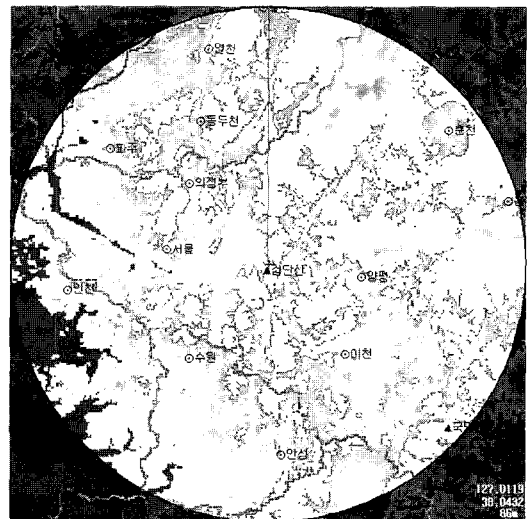


그림 1. 레이더 빔의 차폐 상황

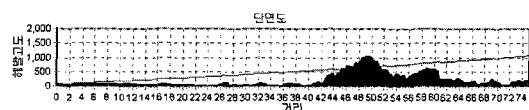


그림 2. 레이더 빔의 전파 상황

은 산에 의해 차단되어 차폐가 일어남을 알 수 있으며, 차폐율은 다음 식 (1)과 같이 계산 될 수 있다.

$$B = P / A \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $B$ 는 차폐율,  $P$ 는 그림에서 음영으로 표시된 차폐지역 면적, 그리고  $A$ 는 레이더 관측반경의 지배 면적으로 그림 1에서는 원의 면적이 된다.

### 2.1.2 유역 지배율

유역 지배율은 관측 반경에 의한 단순 커버리지 (coverage) 개념으로 하나의 레이더가 유역 홍수관리에 미치는 효과를 고려하기 위한 것이다. 이는 임의의 레이더가 지형학적으로 우리나라의 대표적인 수계를 얼마나 지배할 수 있는가를 나타내는 것이며, 그림 3은 레이더 후보지의 유역 지배 상황을 나타내고 있다.

즉, 이러한 가상의 레이더를 설치하였을 경우 이 레이더는 한강유역, 낙동강 유역, 그리고 금강 유역의 일부 등을 지배하게 되는 것이며, 이를 식 (2)를 통해 수치화 할 수 있다.

$$CB = COB / AOB \times 100 \quad (2)$$

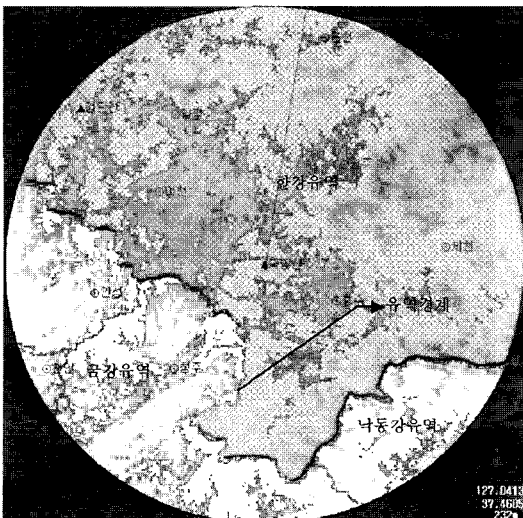


그림 3 레이더 후보지의 유역 지배 상황

여기서,  $CB$ 는 유역지배율(%),  $AOB$ 는 임의 유역의 전체면적, 그리고  $COB$ 는 레이더가 지배하고 있는 임의 유역의 면적이 된다.

### 2.1.3 레이더 중복율

레이더 관측망이 여러 대의 레이더로 구성되어 있을 경우 각 레이더의 관측 범위는 서로 중복이 되는데 이러한 중복도는 레이더간의 거리에 비례하여 감소한다. 중복도가 너무 높아도 레이더 설치 대수가 증가하기 때문에 비용이 많이 들며 중복도가 낮으면 레이더 설치 대수는 감소하지만 관측효율이 떨어지므로 레이더 관측망을 설치할 경우 적절한 레이더의 중복을 고려하는 것이 좋다. 그림 4는 레이더간의 중복 상황을 나타내고 있으며 다음 식 (3)에 의해 레이더 중복율을 계산할 수 있다.

$$O = ORA / RA \times 100 \quad (3)$$

여기서,  $O$ 는 임의의 레이더의 지배 중복율,  $RA$ 는 레이더 지배면적,  $ORA$ 는 둘 또는 그 이상의 중복되는 레이더 지배면적을 나타낸다.

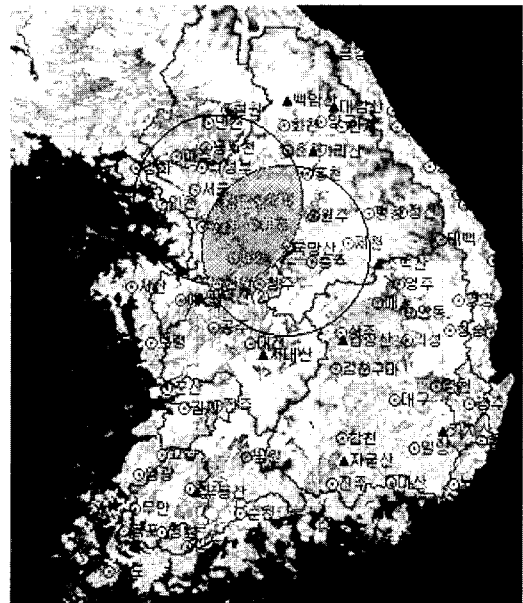


그림 4 레이더간 지배면적 중복 상황

## 2.2 홍수 분석 모듈

레이더 관측망 선정 시 홍수 관리 적합도는 전 절에서 산정되어 등급화된 홍수 영향 지수를 각 네 가지 지수별, 등급별로 레이더 지배면적을 산정한 후, 각 지수별 레이더 지배효율을 계산하고 각 지수별 지배효율을 일정한 가중치로 통합하여 산정할 수 있으며, 그림 (5)은 이러한 홍수 관리 적합도의 산정절차를 나타내고 있다.

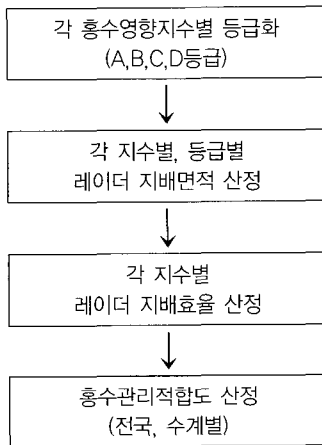


그림 5. 홍수 관리 적합도 산정 절차

### 2.2.1 홍수 영향 지수의 등급화

인구 지수, 자산 지수, 홍수피해액 지수, 확률강우량 지수 등의 네 가지 홍수 영향 지수는 전절에서 등급화된 각 A, B, C, D 등급에 따라 각각  $P_i$ ,  $M_i$ ,  $D_i$ ,  $R_i$  로 표현할 수 있으며 다음과 같이 지수로 나타낼 수 있다.

(가) 인구 지수 ( $P_i, i = A, B, C, D$ )

A 등급 : $P_A = 1.00$	B 등급 : $P_B = 0.50$
C 등급 : $P_C = 0.75$	D 등급 : $P_D = 0.25$

(나) 자산 지수 ( $M_i, i = A, B, C, D$ )

A 등급 : $M_A = 1.00$	B 등급 : $M_B = 0.50$
C 등급 : $M_C = 0.75$	D 등급 : $M_D = 0.25$

(다) 홍수피해액 지수 ( $D_i, i = A, B, C, D$ )

A 등급 : $D_A = 1.00$	B 등급 : $D_B = 0.50$
C 등급 : $D_C = 0.75$	D 등급 : $D_D = 0.25$

(라) 확률강우량 지수 ( $R_i, i = A, B, C, D$ )

A 등급 : $R_A = 1.00$	B 등급 : $R_B = 0.50$
C 등급 : $R_C = 0.75$	D 등급 : $R_D = 0.25$

### 2.2.2 지수별 등급별 레이더 지배면적비(Radar Areal Coverage Rate)

지수별 등급별 레이더 지배면적비는 해당 지수 및 등급의 총면적에 대한 레이더 관측 반경 내에 포함되는 지수 및 등급의 면적비로 정의할 수 있으며, 식 (4)의  $RAC_{ij}$ 로 나타낼 수 있다. 이 값은 홍수 관리 적합도를 계산하기 위한 과정으로 RNAS 프로그램의 내부에서 계산되며 결과 값으로 출력되지는 않는다.

$$RAC_{ij} = \frac{RA_{ij}}{A_{ij}} \quad (4)$$

여기서,  $RAC_{ij}$ 는 지수별 등급별 지배면적비,  $RA_{ij}$ 는 레이더 관측 반경 내 지수별 등급별 지배면적,  $A_{ij}$ 는 전국 또는 해당 수계 내의 지수별 등급별 총 지배면적을 나타내고 있으며,  $i$ 는 홍수 영향 지수의 등급 A, B, C, D를,  $j$ 는 각 홍수 영향 지수, 즉 인구 지수, 자산 지수, 홍수피해액 지수, 확률강우량 지수를 나타내고 있다.

예를 들어, 인구 지수 A등급의 레이더 지배면적비,  $RAC_{AP}$ 는 레이더 관측망 내 A등급을 갖는 인구 지수의 총 면적,  $RA_{AP}$ 와 전국의 인구지수 A등급의 총면적,  $A_{AP}$ 의 비로 계산된다. 이 때 특정 수계에 대하여 산정할 경우,  $A_{AP}$ 는 해당 수계 내 인구지수 A등급의 총면적으로 산정된다.

### 2.2.3 지수별 레이더 지배효율

(Radar Coverage Efficiency)

지수별 레이더 지배효율은 전국 또는 해당 수계에 대한 레이더 관측망의 각 홍수 영향 지수별 효율성으

로 정의할 수 있으며, 그 산정식은 식 (5)의  $RE_j$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이 값은 구성된 레이더 관측망이 각 홍수 영향 지수별로 중요도가 높은 지역을 어느 정도 지배할 수 있는지를 의미하고 있다.

$$RE_j = \frac{\sum_i (P_i, M_i, D_i, R_i \times RAC_{ij})}{T_j}, \quad (i=A, B, C, D) \quad (5)$$

여기서,  $RE_j$ 는 지수별 레이더 지배효율,  $T_j$ 는 등급화된 값들의 합(1.00+0.75+0.50+0.25)인 2.5를 나타내고 있다.

예를 들어, 인구 지수 및 자산 지수의 레이더 지배효율,  $RE_P$  및  $RE_M$ 은 식 (6)과 같이 등급화된 지수값과 지수별 등급별 지배면적비를 이용하여 계산될 수 있다.

$$RE_P = \frac{P_A \times RAC_{AP} + P_B \times RAC_{BP} + P_C \times RAC_{CP} + P_D \times RAC_{DP}}{T_P} \quad (6)$$

$$RE_M = \frac{M_A \times RAC_{AM} + M_B \times RAC_{BM} + M_C \times RAC_{CM} + M_D \times RAC_{DM}}{T_M}$$

### 2.2.4 홍수 관리 적합도(Flood Management Feasibility, FMF)

레이더 홍수 관리 적합도는 RNAS 홍수 분석 모듈의 목적값으로써 구성된 관측망의 효율성을 나타내는 지수로 정의되며, 이전 과정에서 산정된 지수별 레이더 지배효율을 일정한 가중치에 의해 통합하여 산정하였으므로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$FMF = \sum_j (W_j \times RE_j), \quad (j=P, M, D, R) \quad (7)$$

여기서,  $FMF$ 는 홍수 관리 적합도,  $W_j$ ( $\sum_j W_j = 1.0$ )는 각 영향지수에 대한 가중치를 나타내고 있으며, 본 연구에서는 인구 지수, 자산 지수, 홍수피해액 지수, 확률강우량 지수에 대한 가중치를 각각 0.25로 사용하여 각 지수의 홍수 관리 적합도에 대한 가중치를 균등하게 적용하였다.

## 3 RNAS 구성 모듈의 결과 보고 기능

본 절에서는 RNAS 프로그램의 지형 분석 모듈과 홍수 분석 모듈에 의한 분석 결과의 보고 기능에 대하여 상세하게 소개하였다. 지형 분석 모듈에서는 수치 고도 자료상에서 관측소 위치, 해발고도, 레이더 빔 폭 등을 입력하여 레이더 빔별로 전파특성을 모의하고 레이더 관측소 주변 전 방위각에 대한 모의 결과를 텍스트 및 그래픽으로 보고하는 기능을 개발하였으며, 이러한 기능을 통합하여 연속 시뮬레이션을 통해 레이더 빔과 지형에 의한 상호작용을 이해할 수 있도록 하였다. 또한, 홍수 분석 모듈에서는 인구 밀도, 자산밀도, 홍수피해, 확률강우 등급도 등의 홍수 영향 지수에 대한 도시가 가능하여 전국에 대한 홍수 영향 지수들의 지역적인 특성을 파악할 수 있도록 하였으며, 각 지수별 지배효율 및 홍수 관리 적합도 산정은 전국 및 5대강 수계 각각에 대하여 결과 그림 및 도표의 도시로 관측망에 대한 수계별 홍수 관리 효율성의 평가를 쉽게 수행할 수 있도록 하였다.

### 3.1 지형 분석 모듈

#### 3.1.1 시뮬레이션 매개변수 입력

지형 분석을 위한 레이더 시뮬레이션의 매개변수는 관측소 위치, 해발고도, 레이더 빔 폭 등이 있으며

레이더 사이트 위치 지정

위도	경도	반경
37.3036	127.42	75
37.2624	129.5024	75

해발고도	안테나 높이	안테나 해발고도	안테나 고도각
390	20	310	0.5
0			

그림 6. RNAS 입력화면

☉ 60분법    ○ 100분법

경도 | 127.1443    위도 | 37.3056    Range | 75 km

사이트 해발고도 | 634 m    안테나높이(AGL) | 20 m

안테나 해발고도 | 654 m    안테나 방위각 | 360.0 °

안테나 고도각

현재 | 0.5 °    시작 | 0.5 °    종료 | 0.5 °    증감 | 0.1 °

레이더 시뮬레이션 시작    사이트 위치 변경

그림 7. RNAS 상세 입력화면

RNAS에서는 이러한 매개변수 값들을 사용자가 직접 입력하여 모의할 수 있도록 프로그램을 개발하였고, 이는 연속적인 시뮬레이션 시 입력변수를 고정시키지 않고 여러 가지의 경우로 다양하게 변화시켜 모의하기 위함이다. 그림 6은 입력변수를 입력할 수 있는 RNAS 입력 화면을 보여주고 있으며, 후보지의 경도 및 위도, 관측반경, 해발고도, 안테나 높이, 안테나 해발고도, 안테나 고도각 등을 사용자가 직접 입력하여 다양하게 모의할 수 있다.

그림 7은 그림 6에서의 입력변수와 항목이 거의 비슷하지만, 그림 7은 후보지 선정 시 관측소의 상세한 위치를 결정하기 위한 RNAS의 상세 입력화면이며, 관측소 좌표의 입력시는 60분법 및 100분법이 모두 가능하다. 또한, 그림 6의 입력화면과 다른점은 안테나 고도각 범위를 사용자가 설정하여 그 범위 내에서 고도각을 연속적으로 증감시켜 모의할 수 있다.

### 3.1.2 차폐율

차폐율에 대한 결과 보고 기능은 그림 8과 같이 레이더 관측망을 구성하는 후보지순에 의해 차례대로 백분율로 차폐율이 표시되며, 레이더 차폐율은 큰 값

차폐율

1번	2번	3번	4번
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

그림 8. 차폐율 결과 보고 기능

을 나타낼수록 레이더의 수평시계가 좋지 않음을 나타낸다.

### 3.1.3 유역 지배도

유역 지배도에 대한 결과 보고 기능은 그림 9와 같이 가로축은 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 순이며 세로는 후보지 순서대로 각 해당 수계에 대한 유역 지배율을 백분율로 나타낸다. 유역 지배도는 레이더의 단순 커버리지로 각각의 레이더가 5대강 유역을 어느 정도 지배하고 있는지를 수치적으로 나타내고 있으며, 그 값이 클수록 해당 유역에 대한 관측 면적이 넓어 관측 효율성이 높다고 할 수 있다.

☉ 유역지배도    ○ 지배면적 중복도

	한강	낙동강	금강	영산강	섬진강
1	60.16%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	45.75%	0.0%	6.58%	0.0%	0.0%
3	9.77%	0.0%	72.66%	0.0%	0.0%
4	53.08%	8.64%	34.79%	0.0%	0.0%
5	6.61%	19.12%	92.28%	0.0%	20.96%
6	39.5%	35.47%	5.11%	0.0%	0.0%
7	12.58%	51.03%	42.9%	0.0%	0.0%
8	0.0%	46.53%	12.42%	0.0%	18.37%

그림 9. 유역지배도 결과 보고 기능

### 3.1.4 지배면적 중복도

지배면적 중복도에 대한 보고 기능은 관측망을 구성하는 각 레이더 별로 중복도를 조사하여 그림 10과 같이 백분율로 나타내었다. 그림 10에서 대각선 방향으로 중복도 값이 표시 되어 있지 않은 부분은 중복율이 모두 100%이므로 그 값을 표시하지 않았고, 각

☉ 유역지배도    ☉ 지배면적 중복도

	1	2	3	4	5	6
1	-	31.45%	0.0%	29.14%	0.0%	13.68%
2	31.23%	-	26.49%	41.68%	1.15%	0.45%
3	0.0%	26.68%	-	30.2%	39.45%	0.0%
4	28.93%	41.68%	29.99%	-	25.11%	34.15%
5	0.0%	1.15%	39.17%	25.11%	-	6.02%
6	13.58%	0.45%	0.0%	34.15%	6.02%	-
7	0.0%	0.0%	5.5%	26.73%	41.7%	40.44%

그림 10. 지배면적 중복도 결과 보고 기능

각의 중복도 값이 증가할수록 관측 효율성 및 레이더 기기 고장으로 인한 대체성 등 여러 가지 장점이 있다.

### 3.2 홍수 분석 모듈

#### 3.2.1 수계별 결과 분석 기능

홍수 분석 모듈에서의 최종결과는 홍수 관리 적합도를 의미하는 것이므로 구성된 관측망에 대한 홍수 관리 적합도 결과를 그림 11과 같이 전국, 5대강 수계 및 기타 수계로 분류하여 그 결과를 도시할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 여기서, 기타 수계라 함

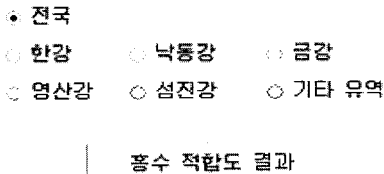


그림 11. 수계별 결과 분석 기능

은 7대 중소하천 및 임진강유역으로 7대 중소하천은 안성천, 형산강, 태화강, 삼교천, 만경강, 동진강, 탐진강을 의미한다.

#### 3.2.2 홍수 영향 지수 등급도

홍수 영향 지수 등급도는 구성된 관측망에 대하여 각 지수들의 지역적인 특성을 파악할 수 있도록 하기 위하여 전 절에서 분류된 A, B, C, D의 네 가지 등급에 따라 각 지수를 그림 12와 같은 색등급에 따라 도시할 수 있도록 하였다. 그림 13에는 임의의 레이더 관측망에 대하여 인구밀도, 자산밀도, 홍수피해, 확률강우 등급도를 도시하였다.

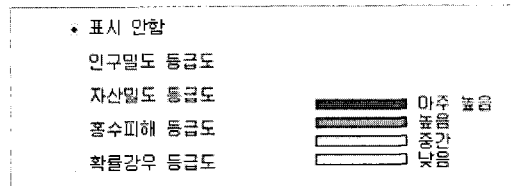
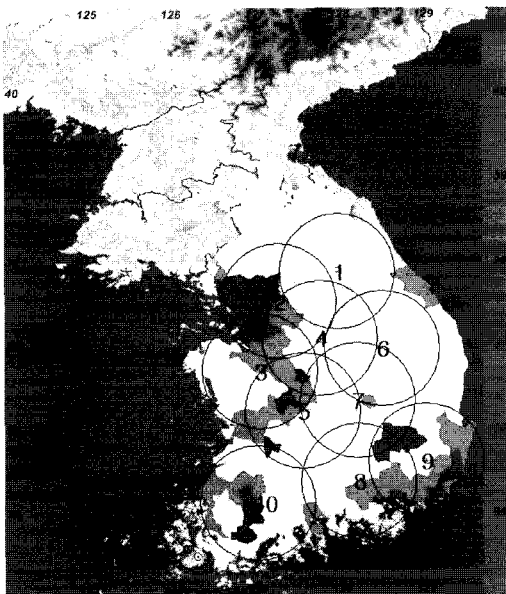
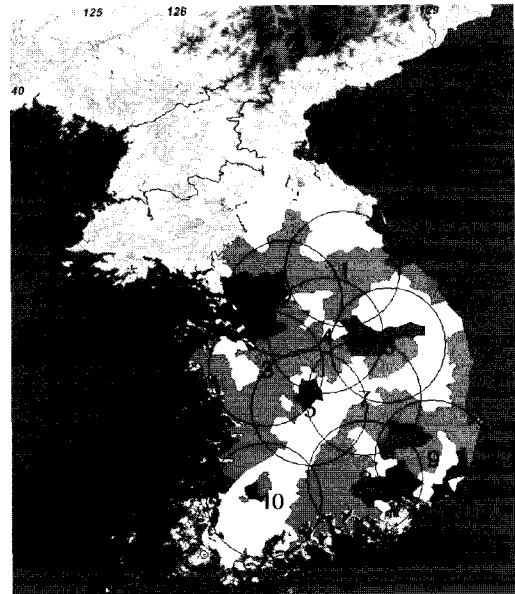


그림 12. 홍수 영향 지수 등급도 표시 기능

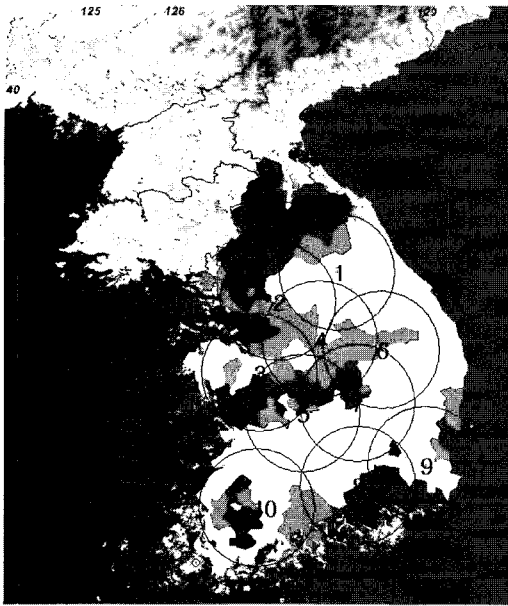


(a) 인구밀도 등급도

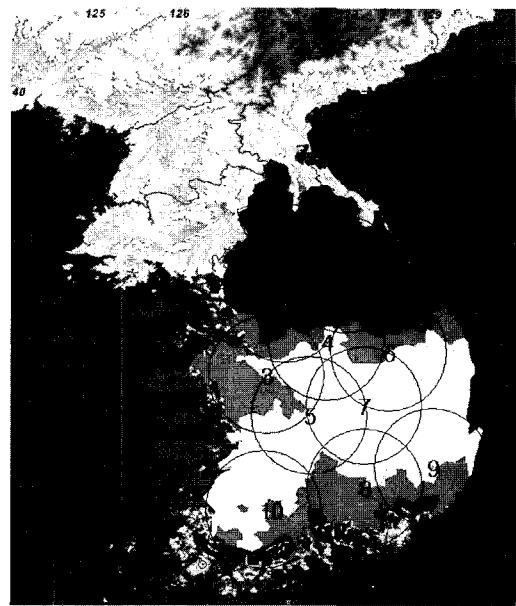


(b) 자산밀도 등급도

그림 13. 홍수 영향 지수 등급도 도시



(c) 홍수피해 등급도



(d) 확률강우 등급도

그림 13(계속). 홍수 영향 지수 등급도 도시

### 3.2.3 각 지수의 지배효율 및 홍수 관리 적합도

홍수 영향 지수의 지배효율 및 홍수 관리 적합도는 가로축에 관측망을 구성하는 레이더 후보지별, 세로축에 각 지수별로 시뮬레이션 분석 결과를 그림 14와 같이 도표로 나타낼 수 있으며, 그림 14에서 각 후보지별 결과 값의 합계 부분을 그림 15의 그래프와 같이 나타낼 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 또한, 각 홍수 영향 지수의 지배효율 및 홍수 관리 적합도 결과를 각 수계별로 그림 16와 같이 하나의 그래프로 요약하고 통합하여 구성된 레이더 관측망의 홍수 관리 효율성 및 적합성을 한 눈에 쉽게 파악할 수 있다.

홍수적합도 결과 - 전국

	1	2	3	4	5	6
인구밀도 지배효율	6.12%	26.99%	24.06%	17.94%	19.06%	7.63%
자산 지배효율	12.56%	20.52%	13.97%	20.72%	16.85%	20.48%
홍수피해 지배효율	12.94%	22.28%	20.88%	25.22%	20.46%	17.69%
확률강우 지배효율	23.07%	23.87%	17.07%	21.98%	15.66%	17.53%
홍수관리 적합도	0.14	0.23	0.19	0.21	0.18	0.16

그림 14. 지배효율 및 홍수 관리 적합도 결과 보고 기능

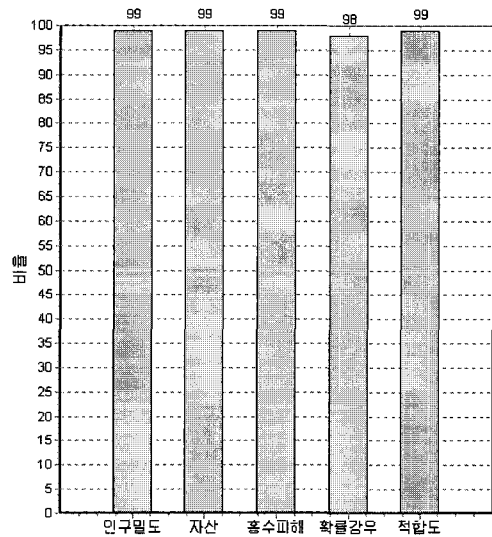


그림 15. 지배효율 및 홍수 관리 적합도 결과 그래프 보고 기능



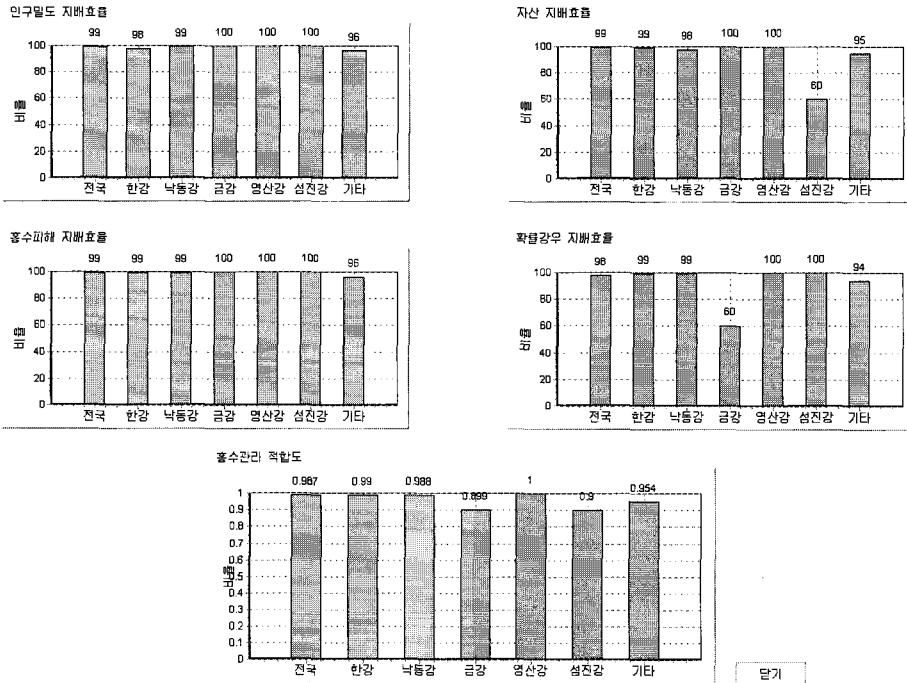


그림 16. 수계별 지배효율 및 홍수 관리 적합도 보고 기능

#### 4. 결론

본고에서 기술한 Radar Network Analysis System 은 기존의 단순한 레이더 파의 차폐만을 고려한 레이더 네트워크 구성에서 벗어나, 세계 최초로 지형학적 요소와 함께 인구지수, 자산지수, 홍수피해액 지수, 확률강우량 지수를 종합적으로 고려하여 레이더 네트워크의 타당성을 정량적으로 나타냄으로서 최적의 레이더 네트워크를 구성할 수 있도록 하고 있다. 따라서 향후 우리나라 강우레이더 망의 구축에 기여 함은 물론 세계 각국의 신규 레이더 망 구축에도 많이 기여할 것으로 기대하고 있다.

#### 감사의 말씀

본 연구는 건설교통부 수자원국의 '전국강우레이더 설치 및 홍수에경보시스템개선 기본계획수립' 학술연구용역으로 수행되었으며, 정부의 지원과 관심에 감사드립니다.

#### 참고문헌

건설교통부(2002), 전국강우레이더 설치 및 홍수에경보시스템개선 기본계획수립, pp155-192