

## 봉수대는 어디에 설치되었어야 하는가? Where Should Beacon Houses Have Been Built?

윤원영

부산시 금정구 장전동 산 30 부산대학교 산업공학과  
전화번호: 051-510-2421  
Fax: 051-512-7603  
E-mail: wonyun@pusan.ac.kr

### Abstract

근대 통신시스템이 개발되기 전에 두 지역간에 정보를 전달하는 방식인 봉화(봉수)시스템에 대해 다루고자 한다. 이 시스템을 설계하고자 할 때 가장 중요한 설계문제는 “어느 곳에 봉수대를 설치하는가?” 이다. 본 논문에서는 이 설계문제에 대한 수학적 모형을 개발하고자 한다. 두 지역간에 봉수대를 설치할 수 있는 후보지(높이가 다른 산들의 정상)가 주어지고 각 산들의 간격이 알려져 있다고 가정한다. 그리고 각 후보지에 봉수대를 설치하는 비용과 후보지들에 봉수대를 설치하였을 때 두 지역간의 정보전달 성공확률에 대한 모형을 제시하고 이들을 기초로 하여 봉수대 설계문제의 최적화 모형을 제시한다. 이 최적화 문제를 해결하는 방법론을 제시하고 예제를 통해 방법론의 효율을 검토하고자 한다.

### 1. 서론

근대이전에 군사적 목적으로 봉수는 낮에는 봉(햇불) 밤에는 수(연기)로 급보를 전하는 통신방법으로 우리나라에서는 삼국시대초기부터 이용되고 있었던 것으로 보이며 고려 의종 3년(1149)부터 정식제도로서 정해져 적의 활동상황을 신속히 서울에 전하였다. 조선시대에 들어오면 세종 때 제도적으로 완비되게 되었다.

봉수대(그림 1 참조)를 어디에 설치하는

것이 가장 좋은가? 를 결정하는 문제를 분석하고자 한다.

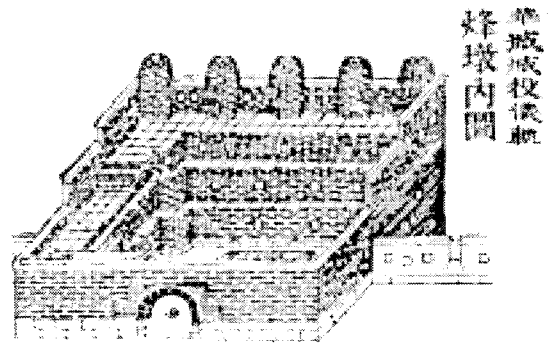


그림 1. 봉수대의 예

조선시대에 군사적 목적으로 설치 운영된 봉수체계(그림 2 참조)는 직봉과 간봉으로 이루어 졌으며 직봉로는 5개로 전국의 주요정보를 취합한 것으로 여겨진다. 이처럼 전국을 망라하는 봉수대는 상호연락이 가능한 10킬로미터내외로 설치된 것으로 보인다.(Shon(1995))

본 논문에서는 봉수대설치문제를 산업공학기법을 이용하여 모형화하고 그의 최적화문제를 분석하고자 한다.

### 2. 봉수대설치 위치결정

먼저 가 지역에서 나 지역사이에 봉수대를 설치 할 수 있는 후보위치들이 주어지고 있다고 하자. 이 때 시작시점에는 봉수대가 있고

한국과학기술원(KAIST) 2002년 5월 3일~4일  
 끝 지점에는 관측하는 인원이 배치되어 있다고 하자. 위치를 표시하기 위하여 시작지점을 원점(0)으로 하고 각 후보지의 위치를 원점에서 거리로 표시하는데 번째 후보지의 위치를  $X(i)$ 로 표시하고자 한다. 그리고 끝 점의 위치는  $N$  이라고 하자.  $i$  번째 후보지의 높이를  $Y(i)$  라고 한다. 그러므로 여기서 봉수대는 일직선상에 존재한다고 가정하면 봉수체제를 구축한다는 것은  $N$ 개의 후보지의 일부에 실제 봉수대를 설치하는 것이다.

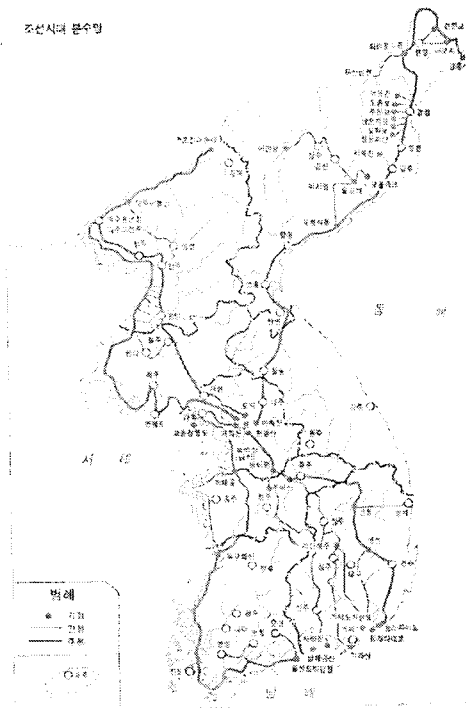


그림 2. 조선시대 주요봉수대경로

우리가 고려하는 기준은 가능한 총 설치 비용을 최소화 하고자 하는 것인데 이 경우 최소한의 신호전달의 성공확률을 보장해야 한다는 조건이 주어진다. 그러므로 봉수대 설치 문제는

최소화: 총 설치비용

제약조건: 신호전달확률  $\geq$  최소확률

로 요약될 수 있으며 설계변수로서  $Z(j)$  변수를 시작시점에서부터  $j$  번째 설치된 후보지의

번호로서  $Z(1)=3$  이면 첫번째 봉수대는 후보지 3번에 설치된다는 의미이다. 결국  $Z(j)$  를 결정하면 봉수대가 설계가 된 것이다. 이때  $Z(j)$  들은 다음과 같은 형태가 될 것이다.

$$Z(0) = 0 \leq Z(1) \leq Z(2) \leq \dots \leq Z(M) < N,$$

여기서  $M$  은 봉수대 총설치 수이다.

총 설치비용함수

설치비용을 구하기 위해 본 연구에서는 설치 비용은 설치 후보지의 높이에 비례한다는 함수,  $h(y)$ 로 가정할 수 있을 것이다.

그러면 총설치 비용은

$$TEC = \sum_{j=1}^M h(Y(Z(j))) \quad (1)$$

이다.

신호전달성공확률(시스템신뢰도)

신호전달성공확률을 구하기 위해 다음과 같은 가정이 필요하다. 봉수대의 신호전달은 시작시점에 일정신호를 봉수를 통해 보내면 이것을 다음 봉수대에서 눈으로 연기나 불의 수를 확인하고 동일한 신호를 다음 봉수대에 보내는 것이다. 이 때 한 봉수대에서 직전 봉수대에서 보내진 신호를 정확히 확인하기 위해서는 당시의 바람, 날씨 등의 환경요소가 영향을 주며 봉수체제는 눈으로 식별하는 체제이므로 봉수대간의 거리와 높이 차이가 매우 중요하다. 그러므로 여기서는 두 인접 봉수대간의 신호전달 성공확률은 간격과 높이차이의 함수로 가정할 수 있을 것이다. 즉

$$P(i, k) = f(X(k) - X(i), |Y(k) - Y(i)|)$$

그러므로 신호전달성공확률은

$$TP(0, N) = P(Z(M), N) \prod_{j=0}^{M-1} P(Z(j), Z(j+1)) \quad (2)$$

이며 봉수대 설치 최적화문제는

$$\begin{aligned} \text{Min: } TEC &= \sum_{j=1}^M h(Y(Z(j))) \\ TP(0, N) &= \\ P(Z(M), N) &\sum_{j=0}^{M-1} P(Z(j), Z(j+1)) \leq TP_0 \end{aligned} \quad (3)$$

요약될 수 있다. 이 문제는 기존의 신뢰도 최적화문제의 형태와 유사하므로 기존의 발견적 기법을 이용하여 근사 해를 구할 수 있다. (Chang et al(2000) Kuo et al(2001), Zhu and Kuo(1990))

### 3. 간단한 발견적 해법의 적용

본 논문에서는 신뢰성최적화문제에서 개발된 가장 간단한 발견적 기법을 이 문제에 응용하여 보고자 한다. (Chang et al.(2000)) 좋은 해를 구하는 방법으로 가장 좋은 후보지를 하나씩 선택해가는 방식으로 신호전달 확률의 요구조건을 처음으로 만족시킬 때까지 하나씩 후보지를 선택하는 것이다.

각 단계에서 하나의 새로운 후보지선택 기준은 아직 선택되지 않은 후보지 중에 다음의 식을 최대화 하는 후보지를 선택한다.

$$\frac{\Delta TP(k|0, N)}{h(Y(k))} \quad (4)$$

위의 식에서 분자는 이전단계에서의 신호전달확률에서 하나의 후보에 봉수대를 설치하므로 증가된 확률 증분이다.

**예제.** 간단한 예제로 다음과 같은 자료가 주어 있다고 하자.

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 후보지 | 1   | 2   | 3   | 4   |
| 높이  | 700 | 600 | 800 | 600 |
| 위치  | 11  | 17  | 26  | 30  |

그리고 시작 점, 끝점의 높이는 0 이며 끝점은 35의 위치에 존재한다.

$$\text{설치비용} = 10000 + \text{높이} * 200$$

이며 식별확률은

$$f(x, y) = \frac{1}{1 + 0.01 \exp(x - y/100)}$$

이라고 가정하자. 이 경우 모든 위치에 봉수대를 설치하는 경우

비용 : 580000

성공확률 :  $2.0188 \times 10^{-2}$

이며 이 경우는 최적화(0-1-2-3-5)와 알고리즘의 결과는 동일하며

비용: 450000

성공확률 :  $2.11842 \times 10^{-2}$

이다.

### 4. 결론 및 토의

본 논문에서는 봉수대 설치문제를 신뢰성공학에서의 설계문제로 모형화하고 간단한 해법과 예제를 다루었다. 위에서 가정한 여러 가정을 수정하므로 우리는 다양한 최적화문제를 모형화할 수 있을 것이다. 이 중에서 몇 가지를 다루어 보면,

첫째, 위의 가정 중 한 봉수대에서의 식별이 바로 직전 봉수대의 신호에만 국한된다는 것을 수정해 보자. 즉 봉수대의 간격이 짧을 경우 직전 봉수대에서의 신호가 없더라도(근무원의 일탈) 그 보다 하나 앞의 신호를 볼 수 있을 가능성도 있다고 하자. 그러면 한 봉수대가 신호를 전달 할 수 있는 한계가 주어지고 이 영역 안에 들어 오는 경우 성공확률이 존재하며 이를 근거로 성공확률을 구하여 한다. 이는 기존의 연속 n 중 k 개 구조의 근사형태로 이들 신뢰성 분석방법들을 활용할 수 있을 것이다. 그리고 다른 확장으로는 전국 의 봉수망을 어떻게 설계할 것인가 하는 문제

대한산업공학회/한국경영과학회 2002 춘계공동학술대회  
한국과학기술원(KAIST) 2002년 5월 3일~4일  
이다. 이는 네트워크설계문제로서 이 경우 성공확률을 어떻게 정의 할 것인가가 매우 중요하다며 이를 바탕으로 성공확률 모형이 필요하여 이 것을 구하는 방법론도 필요하다. 이 분야 역시 이차원 연속  $n$  중  $k$  구조의 연구가 유사하다고 할 수 있을 것이다. (Kuo et al.(2001))

앞으로 한국의 실제자료를 바탕으로 이 문제를 한번 다루어 보고자 하는 것이 계획이다.

#### 참고문헌

- Young Sik Shon, Traditional Scientific Architecture, Daewonsa Publishing Co., 1995
- Chang, G.J., Cui, L. and Hwang, F.K. (2000), *Reliabilities of Consecutive- $k$  systems*, Kluwer Academic Publishers.
- Kuo, W., Prasad, V.R., Tillman, F. A., and Hwang, C.L.(2001), *Optimal reliability design*, Oxford press.
- Zuo, M., and Kuo, W.(1990), Design and Performance Analysis of Consecutive  $k$ -out-of- $n$  Structure. *Naval Research Logistics*, 37, 203-230.