

신뢰성에 기초한 철탑구조물의 최적화에 관한 연구 Reliability - Based Structural Optimization of Transmission Tower

김성호*
Kim, Sung-Ho

김상호**
Kim, Sang-Hyo

황학주***
Hwang, Hak-Joo

ABSTRACT

The optimum weight design of structure is to determine the combination of structural members which minimize the weight of structures and satisfy design conditions as well. Since most of loads and design variables considered in structural design have uncertain natures, the reliability-based optimization techniques need to be developed. The aim of this study is to establish the general algorithm for the minimum weight design of transmission tower structure system with reliability constraints.

The sequential linear programming method is used to solve non-linear minimization problems, which converts original non-linear programming problems to sequential linear programming problems. The optimal solutions are produced for various reliability levels, such as reliability levels inherent in current standard transmission tower cross-section and optimal transmission tower cross-section obtained with constraints of current design criteria as well as selected target reliability index.

The optimal transmission towers satisfying reliability constraints sustain consistent reliability levels on all members. Consequently, more balanced optimum designs are accomplished with less structural weight than traditional designs dealing with deterministic design criteria.

1 서론

구조물의 최적 설계는 구조물에 재하되는 각종 하중조건하에서 주어진 설계조건을 만족하면서 구조물의 건설경비 또는 중량을 최소로 하는 설계변수들의 조합을 구하는 것으로서, 경제 적이며 안전한 구조물을 설계하는데 그 목적이 있다. 구조물의 안전성을 해석하는데 있어서 과거부터 사용되고 있는 확정론적인 방법의 안전을 개념은 장기간 동안의 경험과 기술자들의 판단에 의하여 결정된 것으로서 구조물의 안전성에 대한 좋은 기준치의 역할을 하고 있지만, 구조부재의 강도 및 구조물에 작용하는 하중들이 갖는 특유의 불확실성을 고려할 때, 기존의 안전을 개념을 확률이론을 이용하는 정량적인 신뢰도 개념으로 전환시키고, 하중과 강도를 확률적 특성을 가진 설계변수로 고려함으로써 보다 합리적인 최적설계를 할 수 있을 것이다.

따라서 구조물의 최적설계는 설계시의 하중조건이나 재료의 성질 등을 확률변수로 취급하여 확률론적인 최적화문제로 정식화할 수 있다. 과거 십수년동안 구조물 설계에 대한 신뢰성 접근은 점차적으로 증가하여 왔으며, 이에 본 연구는 구조해석, 신뢰성해석 및 구조최적화 이론을 종합하여 신뢰성 제약조건을 가지는 철탑구조물의 최적단면을 결정하기 위한 체계적인 알고리즘을 개발하고 자 한다.

2 하중의 모형화

2.1 개요

송전선 지지물의 구조설계를 할 때에 가해지는 주요 하중에는 지지물, 가설선, 애자 등의 하중이 영구적으로 작용하는 고정하중과 자연적 외력에 따라 이들에 가해지는 풍하중, 착설하중 및 착방하중이 있으며, 그 외에 요즈음 대두되는 지진하중이 있다.

본 논문에서는 지지물 사고에 가장 큰 영향을 미치는 고정하중과 풍하중의 영향만을 고려하기로 한다.

2.2 고정하중

일반적으로 철탑구조물에 가해지는 고정하중에는 철탑자중, 가설선 및 애자장치등의 중량, 승강용 사다리 및 난간 등의 부대시설에 의한 중량 등이 있다. 본 논문에서는 이러한 고정하중의 확률특성을 직접 분석하지 않고, 일반적으로 널리 사용되는 확률모형을 이용하였다. 즉 공칭고정하중은 실제고정하중보다 일반적으로 작게 산정된다고 보기때문에 고정하중의 평균값은 $1.05D_n$ 으로 하며, 변이계수는 0.10을 취하였다. 그리고 고정하중의 확률분포는 정규분포로 선정하여 이용하기로 한다[1, 2].

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 토목공학과 부교수

*** 연세대학교 토목공학과 교수

2.3 풍하중

철탑과 같은 형태의 구조물 설계에 사용되는 단위면적에 대한 풍하중 산정식^[3]은

$$P = C \cdot q_0 \quad (1)$$

여기에서 C는 풍력계수로 단면형상에 의해 결정되며, q_0 는 기준풍속압으로

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho V_G^2 \quad (2)$$

여기에서 ρ 는 대기밀도이며, V_G 는 최대순간풍속으로 10분간 평균풍속에 돌풍률을 곱한 값이다.

따라서 본 연구에서는 풍력계수 C의 평균값으로 단면형상에 따라 철탑본체는 1.98, 가섭선은 1.00, 애자장치는 1.40를^[4], 대기밀도 ρ 는 전국 각 기상대의 대기밀도를 산정, 분석하여 0.125를, 돌풍률은 평균풍속 산정시 계산된 값을 평균값으로 이용하였다. 변이계수는 풍력계수, 대기밀도 및 돌풍률 각각에 대해 0.12, 0.04 및 0.11^[2]을 취하였다. 풍속의 확률특성은 참고문헌^[5]에서 분석한 사용기간 최대풍속의 결과를 이용하였다.

풍하중의 확률특성은 식 (1)과 식 (2)에 있는 각종 계수들의 확률특성으로부터 모의분석기법을 통하여 분석되었다. 풍하중의 확률특성을 분석하는데 가장 기본이 되는 것은 적합한 확률분포를 선정하는 것이다. 본 논문에서는 확률분포의 적합도 검정을 실시하지 않고, 일반적으로 적합하다고 알려져 있는 Gumbel의 Type-I 극한값 분포를 선정하였다. 또한 하중에서는 특히 상부 극한값 부분의 확률특성이 구조물의 안전도와 밀접한 관계를 가지므로 모의분석기법의 결과에서 상부 10%에 해당하는 부분만을 Type-I 확률분포 용지에 선형회귀식을 통해 모형화하였다. 이러한 과정을 주어진 각종조건(지역, 노풍도, 높이 등)에 대하여 반복 실시(20회씩)한 후 이들의 대표값을 찾았다.

각 지역별로 정리된 결과는 한국전력 설계기준풍속(W_n)에 대하여 지역 I(서울, 수원, 서산, 대전, 춘천, 청주, 추풍령, 전주, 광주, 진주, 대구)에서는 평균값 0.35 W_n , 변이계수 0.42이며, 지역 II(인천, 군산, 충무, 부산, 울산)에서는 평균값 0.58 W_n , 변이계수 0.47 및 지역 III(속초, 강릉, 포항, 목포, 여수, 제주, 서귀포)에서는 평균값 0.59 W_n , 변이계수 0.51로 나타났다.

3 신리성 제약조건을 가진 최적설계의 문제형성

3.1 개요

구조물의 최적설계란 설계변수에 부가된 모든 제약조건식을 동시에 만족하면서 목적함수를 최소로 하는 설계변수의 조합을 수학적 기법에 의하여 구하는 설계방법을 말한다.

구조물의 목적함수로는 일반적으로 건설경비, 중량, 체적, 변형에너지 등이 될 수 있으며, 제약조건식으로는 응력, 변위, 부재간격, 부재치수, 진동수, 좌굴 등이 될 수 있다. 한편 설계변수로는 응력, 처짐 등과 같은 해석변수, 사용재료의 크기 및 성질, 부재의 간격, 구조형상, 지점의 위치, 부재수와 같은 상태변수 등이 있다. 최적화 문제형성은 설계변수를 정의하여 설계에 적용할 제약조건식을 설정하여 목적함수, 즉 최적화 기준을 수식화 하므로써 이루어진다. 일단 문제가 형성되면 문제에 적합한 최적화 기법을 적용하여 최적해를 구하게 된다.

3.2 최적화 문제형성

일반적인 최적화 문제형성은 다음과 같다.

$$\text{Minimize} : F(X) \quad (3)$$

$$\text{Subject to} : g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, m \quad (4a)$$

$$h_k(X) = 0 \quad k = 1, l \quad (4b)$$

$$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \quad i = 1, n \quad (4c)$$

여기에서 식 (4c)와 같은 한계제약조건식은 부등제약조건식으로 분리하여 표현할 수도 있다.

3.2.1 목적함수

일반적으로 구조기능을 만족하면서 경제적인 요구를 만족하는 구조물을 설계하고자 하는 것이 모든 설계자의 목적이다. 따라서 목적함수는 주로 최소경비나 최소중량 등을 선택하는데 구조물의 중량을 목적함수로 사용하는 경우가 많으며, 이는 중량을 쉽게 양적으로 표시할 수 있으며 구조물 자체의 비용도 간접적으로 표시하고 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 철탑구조물의 중량을 목적함수로 정하였으며, 이것은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$OBJ = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i \quad (5)$$

여기에서 ρ_i 는 i 번째 부재의 단위중량이며, A_i 및 L_i 는 i 번째 부재의 단면적 및 길이를 말한다. n 은 총 부재수이다.

5.2.2 제약조건식

철탑구조물과 같은 트러스 구조물에서 모든 부재는 축력만을 받으므로 파괴형태는 항복과 좌굴을 취할 수 있을 것이다. 인장력을 받는 부재의 공칭저항력은

$$R_n = F_y \cdot A_g \quad (6)$$

여기에서 F_y 는 항복응력, A_g 는 단면적이다. 식 (6)의 공칭값들은 실질적으로 실제값과 차이를 보이고 있으므로 실제저항력을 산정하기 위한 각 계수들의 평균값은 $1.05F_y$, $1.00A_g$ 를 이용하였으며, 변이계수는 0.10, 0.05를 이용하였다[21]. 압축력을 받는 부재의 공칭저항력은

$$R_n = [1 - 1/2 (\lambda_k / C_c)^2] F_y \cdot A_g \quad \lambda_k \leq C_c \quad (7)$$

$$R_n = (2.01 \times 10^7 / \lambda_k^2) \cdot A_g \quad \lambda_k > C_c \quad (8)$$

여기에서 $C_c = \pi \sqrt{2E/F_y}$ 이며, $\lambda_k = KL/r$ 이다. 단면적 A_g 결정시 고려되는 회전반경은 일반적으로 생산되는 L형강의 단면제원으로 부터 분석한 아래의 식을 이용하였다.

$$r = 1.0493 \ln(A_g) + 0.00115 \quad (9)$$

본 논문에서 고려되는 모든 제약조건은 신뢰성이론을 이용하여 표현하였다. 따라서 구조물의 안전과 관련된 제약조건은 앞에서 언급한 한계상태가 초과되는 가능성(파괴확률)이 허용된 파괴확률보다 작게 되어야 한다. 즉 식 (10)을 만족시켜야 한다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \leq P_{fa} \quad (10)$$

여기에서 P_f 는 구조물의 파괴확률(한계상태 초과가능성)로,

$$P_f = \text{Prob}[R < D + W] \quad (11)$$

이고, P_{fa} 는 허용파괴확률이다. 식 (10)을 β 에 관한 함수로 고쳐쓰면

$$\Phi(\beta) \geq 1 - P_{fa} \quad (12)$$

따라서 대상구조물의 신뢰도가 허용된 신뢰도보다 항상 크게 나타나야 하므로 신뢰성지수를 이용하여 이들 제약조건들을 표현하면

$$\beta^*_i \geq \beta_i \quad (13)$$

여기에서 β^*_i 는 i 번째 부재의 신뢰도를 나타내며, β 는 각부재의 허용신뢰도를 가르킨다.

3.3 최적화 알고리즘

철탑구조물의 최적설계문제는 목적함수와 제약조건이 주로 비선형문제로 형성되므로, 이러한 비선형문제의 해를 구하는데는 Sequential Unconstrained Minimization Technique(SUMT)법, Sequential Linear Programming(SLP)법, Lagrange법 등 다양한 기법들이 적용될 수 있다 [6]. 본 연구에서는 SLP법의 하나인 Modified Feasible Direction(MFD)법을 이용하여 신뢰성 제약조건을 가진 철탑구조물의 최적단면설계 알고리즘을 개발하였다.

4 수치계산 및 결과분석

4.1 대상 철탑구조물의 선정

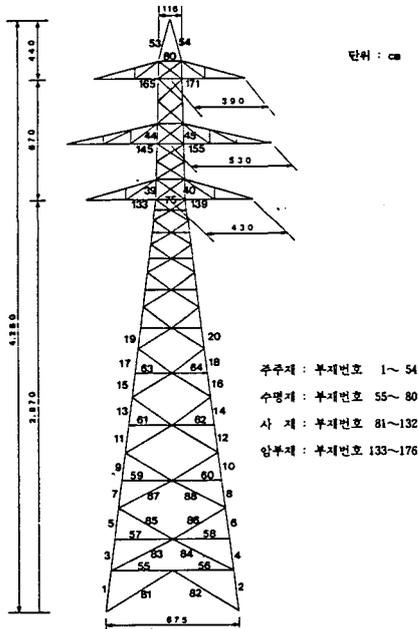


그림 1 대상 구조물

최적설계를 위한 대상구조물은 그림 1에 보인 것과 같은 한국전력 표준철탑 154KV TYPE-A형인 직선 각도철탑으로 설정하였다. 구조물의 제원은 높이 42.80m, 상부 폭 1.16m, 하부 폭 6.75m, 앞 3.90m, 4.30m 및 5.30m의 치수를 가지고 있다. 각각의 부재는 등변 L형강으로 구성되어 있으며, 표준철탑에서의 부재단면적은 지역의 구별없이 주주재가 22.74cm² 및 19.00cm², 수평재가 12.22cm², 사재 및 압주재는 8.727cm² 및 7.527cm²의 혼합된 형태로 구성되어 있다.

철탑구조물의 일반적인 형태는 좌우대칭인 입체 트러스구조물로 이루어져 있다. 이러한 특징을 이용하여 최적화 과정중에 수행되는 구조해석은 유한 요소법에 의하며, 구조물의 형태는 평면트러스 구조물로 선정하여 수행하였다. 본 논문의 대상구조물은 선정된 철탑구조물의 형태는 현재 설치되어 있는 철탑형태의 대부분을 차지하고 있으며, 가장 일반적인 형태이다. 따라서 본 논문에서 수행된 기법으로 타형태의 철탑구조물의 최적화 수행시 구조해석을 위한 간단한 작업만 수정하면 별다른 어려움 없이 가능할 것으로 사료된다.

4.2 대상 철탑구조물의 최적설계 및 비교분석

본 논문에서는 제시한 신뢰성 제약조건을 가진 최적설계 알고리즘의 응용성과 타당성을 검증하기 위하여, 앞에서 분석한 고정하중과 풍하중을 동시에 재하하여 선정된 목표신뢰도를 만족시키는 최적설계를 각 지역별로 실시하였다. 또한 176개의 부재로 구성되어 있는 철탑구조물을 구성부재별로 표준화하여 5개의 설계변수를 선정하였으며, 표 1에 나타내었다.

표 1 설계변수의 표준화

변수명	X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)
부재번호	1~28	29~44	45~52 145~164	53~54, 75~80 119~144, 165~176	55~74 81~118

1단계로 표준철탑단면에 대하여 분석된 최소 부재신뢰도수준인 지역 I의 $\beta=3.26$, 지역 II의 $\beta=2.67$, 지역 III의 $\beta=2.54$ 를 목표신뢰도로 선정하여 최적설계를 수행하였다. 결과를 분석하여 보면 표준철탑단면에 대해서 지역 I에서 24.1%, 지역 II에서 15.2%, 지역 III에서 6.0%의 감소된 단면을 얻을 수가 있었다.

2단계로 동일한 설계조건하에서 기존의 확정론적인 최적설계 방법을 동시에 수행하였다. 기존의 확정론적인 최적설계에는 현행 설계기준(한국전력 설계기준-1111)에 제시되어 있는 응력제약조건식을 이용하였다.

기존의 응력제약조건을 가진 최적설계의 결과로부터 얻은 단면적을 이용하여 각 부재의 신뢰도수준을 평가하여 최적설계를 재수행하였다. 이때 각 지역별 최소 부재신뢰도수준은 지역 I에서 $\beta=2.55$, 지역 II에서 $\beta=2.62$, 지역 III에서 $\beta=2.51$ 로, 이들을 목표신뢰도로 선정하였다. 이들의 최적화과정 및 결과는 그림 2에 정리되어 있으며 현행설계기준에 대한 최적설계단면은 표준철탑단면에 비해 지역별로 지역 I에서 15.1%, 지역 II에서 11.0%, 지역 III에서 10.7%의 단면이 감소되었다. 또한 현행설계기준에 대한 최적설계단면이 가지는 최소부재신뢰도수준에 대한 최적설계단면은, 현행 설계기준의 응력제약조건에 대한 최적철탑단면이 가지는 구조물의 중량에 대해서 지역 I에서 25.2%, 지역 II에서 7.8%, 지역 III에서 5.0%의 감소된 단면을 얻을 수가 있었다.

여러 대상 철탑의 안전수준을 분석한 결과로부터 선정할 수 있는 목표신뢰도 $\beta=2.50$ 을 가지는 최적설계의 결과를 분석하여 보면 표준철탑단면이 가지는 구조물의 중량에 대해서 지역 I에서 38.0%, 지역 II에서 21.5%, 지역 III에서 15.1%의 감소된 단면을 얻을 수가 있었다.

그림 3에는 제안된 목표신뢰도 $\beta=2.50$ 을 가진 경우, 표준철탑단면이 가지는 최소 부재신뢰도수준에 대한 경우 및 현행 설계기준의 응력제약조건에 대한 최적철탑단면이 가지는 최소 부재신뢰도수준을 가진 경우의 수렴과정과 결과를 비교하여 나타내었다.

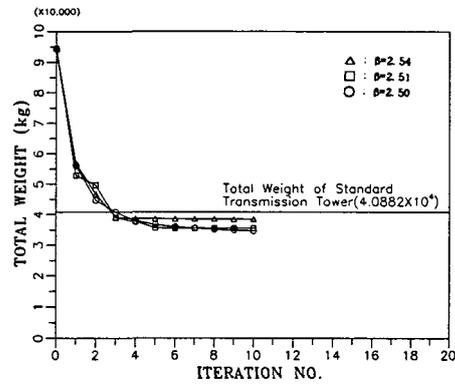
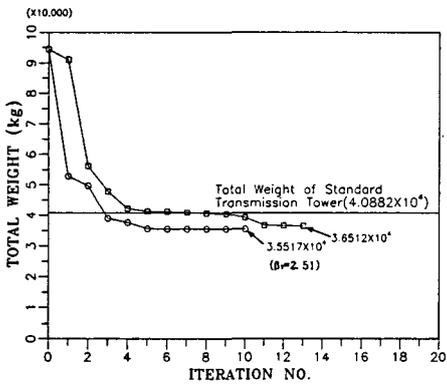
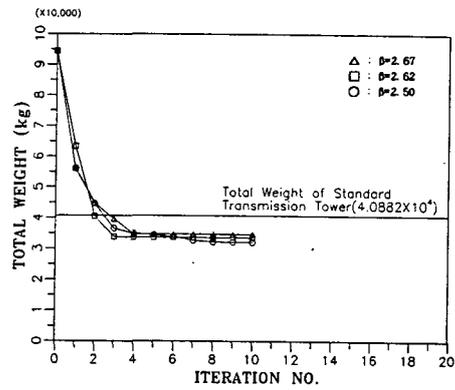
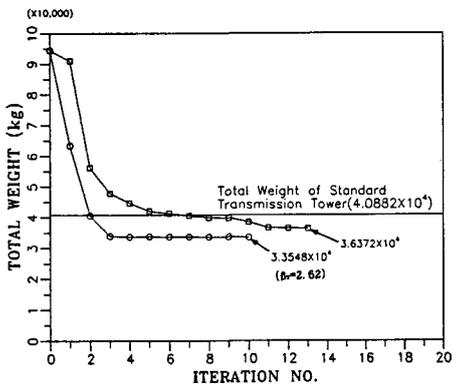
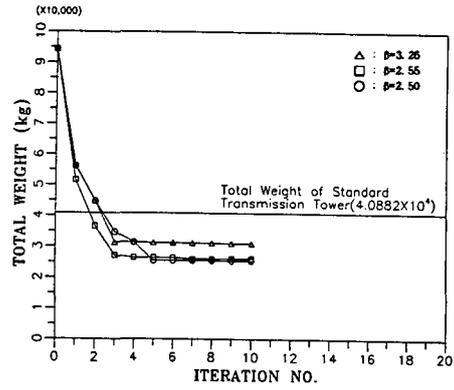
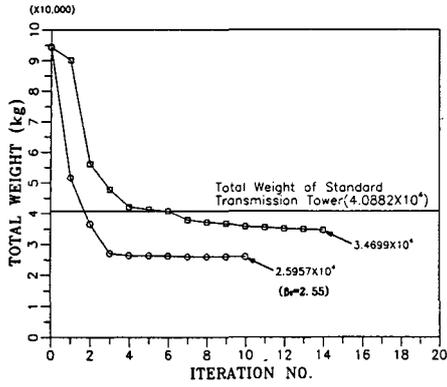
5 결론

본 논문에서 분석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 기존의 최적설계보다는 본 논문에서 제시된 한계상태에 대해 신뢰도수준을 평가하여 목표신뢰도를 선정, 최적설계를 수행할 경우에 구조물의 적정한 안전수준을 만족하면서 보다 합리적이고 경제적인 단면을 얻을 수가 있었다.
2. 표준철탑이 가지는 각 부재의 다양한 안전수준에 대하여 최소 부재신뢰도수준을 선정, 최적설계를 실시한 결과, 표준철탑단면에 대하여 지역 I에서 24.1%, 지역 II에서 15.2%, 지역 III에서 6.0%의 감소된 단면을 얻을 수가 있었다. 또한 현행 설계기준의 응력제약조건에 대한 최적철탑이 가지는 최소 부재신뢰도수준에 대한 최적설계 결과는 응력제약조건에 대한 최적철탑단면에 대하여 지역 I, II, III에서 각각 25.2%, 7.8% 및 5.0%가 감소되어 나타났다. 따라서 구조물 설계시 부재간에 일정한 수준의 신뢰도를 가지는 최적설계가 필요하다 고 사료된다.
3. 구조물의 사용기간을 50년으로 가정할 때, 고정하중과 풍하중에 대한 현행 설계기준은 타 구조물에 대한 외국 및 국내의 분석과 비교해 본 결과 적정한 안전수준을 확보하는 것으로 판단된다. 즉 한국전력 표준철탑 Type - A (직선각도철탑)형의 목표신뢰도를 본 논문에서 제시하고 있는 $\beta=2.5$ 로 결정하여도 무리가 없을 것으로 사료된다. 목표신뢰도 $\beta=2.5$ 를 가진 최적설계의 결과는 표준철탑단면에 대하여 지역 I에서 38.0%, 지역 II에서 21.5%, 지역 III에서 15.1%가 감소되어 나타났다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, 구조물의 신뢰성에 관한 연구, 최종보고서, 1989. 12.
2. Ellingwood, B., et al, Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58, NBS Special Publication 577, 1980.
3. 한국전력공사, 가공송전용 철탑설계기준(설계기준-1111), 1987.
4. 한국전력공사기술연구원, 송전철탑 설계품속에 관한 연구, 최종보고서, 1989.
5. 김성호, 신뢰성 제약조건을 가진 철탑구조물의 최적화에 관한 연구, 연세대학교 대학원 토목공학과 석사학위논문, 1993. 2
6. 한국전산구조공학회, 구조물의 최적설계, 제3회 전산구조공학기술강습회 교재 3-4, 1991. 2.



- : 현행 설계기준의 용례계약조건에 대한 최적설계
- : 위의 최적설계단면이 가지는 최소부재신뢰도수준에 대한 최적설계

- △ : 표본설계단면이 가지는 최소 부재신뢰도 수준에 대한 최적화
- : 현행 설계기준의 용례계약조건에 대한 최적설계단면이 가지는 최소 부재신뢰도수준에 대한 최적화
- : 목표신뢰도에 대한 최적화

그림 2 현행 설계기준에 대한 최적 철탑단면

그림 3 다양한 신뢰도수준에 의한 최적설계 결과치의 비교