

# 신뢰성에 기초한 송전철탑의 내풍설계기준

## Reliability-Based Wind-Resistant Design Criteria of Transmission Towers

조효남\* · 신재철\*\* · 이승재\*\*\*

Cho, Hyo Nam · Shin, Jae Chul · Lee, Seung Jae

### Abstract

This study suggests a practical but rational approach for the development of reliability-based LRFD criteria for transmission towers under wind and ice loadings in Korea. Based on available statistical data on wind speed and icing on transmission lines in Korea, the design wind and ice loads are obtained by Monte Carlo Simulations. In the study, the AFOSM reliability method and an Importance Sampling Technique are used for the element and system reliability evaluation of actual transmission towers. Based on the selected target reliabilities, a set of load and resistance factors for the LRFD criteria are calibrated using the AFOSM and the code optimization technique.

### 요 지

본 논문에서는 태풍이나 착빙설 등 기상관련 하중을 받는 송전철탑의 실용적이고 합리적인 설계를 위하여 신뢰성에 기초한 하중저항계수설계기준(Load and Resistance Factor Design ; LRFD)을 개발하였다. 이때, 설계풍하중 및 착빙하중은 송전철탑에 가해지는 풍속과 착빙설에 대한 우리나라의 가용한 통계자료를 바탕으로 MCS(Monte Carlo Simulation)기법을 사용하여 추정하였다. 기설 송전철탑의 요소 및 체계신뢰성해석에는 AFOSM(Advanced First Order Second Moment)신뢰성방법과 IST(Importance Sampling Technique)를 사용하였다. LRFD설계기준의 하중 및 저항계수는 합리적으로 선정된 목표 신뢰도를 기초로 AFOSM과 code 최적화기법을 사용하여 도출하였다.

### 1. 서 론

우리나라에는 태풍이나 착빙설 등 기상관련 하중에 의한 송전철탑의 도괴사고가 빈번히 보고되고 있는 바, 이에 영향받는 지역에서는 심각한 사회,

경제적 문제를 야기시키고 있다. 철탑 도괴사고의 근본적인 원인은 송전철탑의 설계를 위한 현재의 기상관련 설계하중 및 안전규정 속에 다소의 불합리한 점이 내포되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 다시 말해서, 송전철탑 설계를 위한 우리나라의 기상관련 설계하중 및 안전규정은 재래적 허용응력설계법에 바탕을 두고 있으므로, 최근의 한계상태설계법(Limit State Design ; LSD)이나 하중저항계수

\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 부교수  
\*\*\* 정회원 · 한양대학교 생산공학연구소 선임연구원

설계법에서와 같은 합리적이고 균형적인 설계를 제공하지 못하고 있다.

본 연구와 관련된 최근의 연구동향을 살펴보면, 우선 설계풍하중을 위한 기초적 연구로서 우리나라 98개 지역의 장, 단기 풍속자료를 바탕으로 한 설계풍속 및 풍속지도가 개발된 바 있다.<sup>(1,2)</sup> 한편 지난 10여년 간에는 신뢰성에 기초한 설계기준 개발 및 각종 구조물의 신뢰성해석에 관련된 이론적 연구가 활발히 진행된 바 있다.<sup>(3-5)</sup> 또한 ASCE에서는 1991년에 송전철탄의 설계를 위한 LRFD 설계지침으로서 “Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading”을 발간하였다. 여기서는 송전선로의 지역적 중요도에 따라 철탄종류 및 부재의 목표신뢰도를 세분하여 송전선로 전체에 대하여 신뢰성 균형설계를 도모하고 있다. 그러나, 이와같은 접근방법은 우리나라와 같이 송전선로망이 비교적 소규모이고 신뢰성설계 개념이 설계실무에 충분히 인식되지 못하고 있는 나라에서는 적당하지 않다고 본다.

이에 본 연구에서는 우리나라의 기상자료에 근거하고 우리의 현실에 맞는 송전철탄의 내풍설계기준을 개발하기 위하여 확률론적 설계풍하중과 착빙하중의 추정을 위한 합리적 접근방법을 연구하였으며, 철탄의 실용적 신뢰성해석과 이에 기초한 LRFD설계기준을 연구하게 되었다.<sup>(7-9)</sup>

## 2. 확률론적 설계모형

### 2.1 LRFD 설계식

송전철탄에 관련된 국내외의 현행 설계기준들을 살펴보면 우리나라와 미국, 일본에서는 허용응력설계법이나 하중계수법에 기초하고 있으며,<sup>(10-12)</sup> ASCE에서는 LRFD설계지침<sup>(6)</sup>을 제시하고 있다.

본 연구에서는 송전철탄의 내풍설계를 위해서 하중조합에 대한 Turkstra 규칙<sup>(20)</sup>에 근거하여 다음과 같은 두개의 대표적인 기상관련 하중조합에 대한 LRFD설계식을 제안하였다.

$$\phi R_n \geq \gamma_M (\gamma_D D_n + \gamma_S \gamma_W W_n) \quad (1)$$

$$\phi R_n \geq \gamma_M [\gamma_D D_n + \gamma_S (\gamma_{W1} W_{1n} + \gamma_{I1} I_n)] \quad (2)$$

여기서,

$\phi$  : 강도감소계수

$\gamma_D, \gamma_W, \gamma_{W1}, \gamma_I : D_n, W_n, W_{1n}, I_n$ 에 곱해지는 하중계수

$\gamma_M, \gamma_S$  : 부재나 구조물, 송전선의 중요도계수

$R_n$  : 공칭저항

$D_n, W_n, W_{1n}, I_n$  : 공칭사하중, 풍하중, 착빙위의 풍하중, 착빙하중 효과

### 2.2 한계상태 모형

본 연구에서는 송전철탄의 LRFD설계기준을 개발하기 위한 신뢰성해석에 있어서 저항과 하중효과 의 변수로 이루어진 다음과 같은 선형강도한계상태 함수  $g(\cdot)$ 를 사용하였다.

$$g(\cdot) = R - \sum S_i \quad (3)$$

여기서,

$R$  : 실구조저항

$S_i$  :  $i$ 번째 하중효과

철탄부재의 파괴모드별 실 구조저항  $R$ 은 다음과 같이 표현가능하다.

$$R = R_n \cdot N_R \quad (4)$$

여기서,

$N_R$  :  $R_n$ 의 추정에 관련된 모든 편기와 불확실량을 내포하는 변량(=MFP)

이때,

$M$  : 재료강도관련 불확실량 변수

$F$  : 제작시공관련 불확실량 변수

$P$  : 해석, 모델링 관련 불확실량 변수

한편 최대풍하중 및 최대착빙하중의 조합에 대한 하중효과  $\sum S_i$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum S_i = c_D D_n N_D + c_W W_n N_W \quad (5)$$

$$\sum S_i = c_D D_n N_D + c_{W1} W_{1n} N_{W1} + c_{I1} I_n N_{I1} \quad (6)$$

여기서,

$c_D, c_W, c_{W1}, c_{I1}$  : 단위사하중, 풍하중, 착빙위의 풍하중, 착빙하중의 하중효과에 대한 영향계수(확정량)

$N_D, N_W, N_{W1}, N_{I1} : D_n, W_n, W_{1n}, I_n$ 의 추정에 관련된 모든 불확실량을 내포하는

변량(=AQ)

이때,

A : 하중효과 관련 불확실량 변수

Q : 공칭하중 관련 불확실량 변수

### 2.3 하중 및 저항의 통계치

실 구조저항을 추정하기 위한 철탑부재의 파괴모드는 항복과 탄성/비탄성 좌굴모드에 근거하였다. 각각의 통계치는 외국의 가용문헌<sup>(13,14)</sup>을 참고하여 추정하였으며, 그 결과를 표 1에 정리하였다. 한편 기상관련 주요하중의 통계치는 다음 장에서 자세히 논술허지만 국내의 기상자료를 바탕으로 MCS기법<sup>(14)</sup>에 의하여 추정하였으며 이들의 결과를 정리하여 표 2에 나타내었다.

## 3. 확률적 설계하중

### 3.1 개설

송전철탑의 설계에 고려하여야 할 하중으로는 사하중, 풍하중, 착빙하중, 온도하중, 사고에 의한 하중, 시공시 하중, 유지관리하중 등이 있는데 이 중에서 설계의 주하중은 풍하중과 착빙하중 등의 주요 기상관련하중이다. 이들은 속성상 불확실성이 매우 큰 추계적 성질을 가지기 때문에 연최대풍속의 발생빈도, 착빙의 생성 및 풍하중과의 동시발생빈도 등 통계적 특성을 고려한 확률적 설계하중으로 모델링하여야 할 것이다. 따라서 본 논문에서는 기상관련 하중으로서 풍하중, 착빙하중, 착빙위의 풍하중에 대하여 확률적 설계하중을 추정하였다.

### 3.2 풍하중

설계풍하중의 확률적 표현을 위한 풍하중모델은 우리나라의 현행 송전철탑 설계기준<sup>(10)</sup>에 기초하였다. 여기서, 구조물에 작용하는 기준속도압  $q_0(\text{kg/m}^2)$ 와 설계풍압  $w(\text{kg/m}^2)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho (GV_n)^2 \quad (7)$$

$$w = Cq_0 \alpha \beta K_1 K_2 \quad (8)$$

여기서,

표 1. 저항통계치

한계상태	평균공칭비 ( $\bar{R}/R_n$ )	변동계수 ( $V_R$ )	분포형
인장(항복)	1.10	0.11	Normal
압축(탄성/비탄성좌굴)	1.33	0.15	Normal

표 2. 하중통계치

하중효과	평균공칭비 ( $\bar{X}/X_n$ )	변동계수 ( $V_X$ )	분포형
사하중	1.05	0.10	Normal
최대풍하중	0.89	0.42	Type I
착빙위의 풍하중	0.77	0.34	Type I
최대착빙하중	0.94	0.25	Type I

$\rho$  : 공기밀도( $\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ )

G : 돌풍율(순간풍속/평균풍속)

$V_n$  : 지상 10 m의 높이에서 관측된 10분 평균풍속, 기본풍속(재현기간 : 50년)

C : 항력계수

$\alpha$  : 상공체증계수

$\beta$  : 구조규모에 의한 저감계수

$K_1$  : 구조물의 종류에 의한 계수

$K_2$  : 차폐계수

설계풍하중의 추정에 있어서 가장 중요한 요소는 구조물의 공용수명간 최대풍속에 관한 통계특성인데, 우리나라의 기본풍속에 관한 기 발표된 연구결과<sup>(2)</sup>에서는 98개 지역의 장, 단기 풍속자료를 바탕으로 연최대풍속의 분포형태가 Type I 분포에 잘 적합된다는 것을 밝힌 바 있다. 뿐만 아니라 각 지역의 재현기간별 최대풍속을 추정하고 풍속지도의 형태로 기본풍속을 제안하였다. 본 연구에서는 설계풍하중을 추정하기 위하여 20년 이상의 장기풍속 자료를 보유하고 있는 18개 지역만을 대상으로 하였으며, 그림 3에는 풍속지도와 함께 그 위치를 표시하였다.

식 (7), (8)의 풍하중 모델에 대한 실질적인 확률적 접근을 위하여 본 연구에서는  $V_n$  이외에 C,  $\alpha$ ,  $K_2$ , G를 확률변수로 취급하였다. 그러나 풍하중 자체는

표 3. 풍하중 자료

지역	풍 속					풍하중		
	연간			50년 최대		V <sub>n</sub> (m/sec)	W/W <sub>n</sub>	
	관측년수	평균풍속	변동계수	평균풍속	변동계수		u*	α*
	m (Year)	$\bar{V}$ (m/sec)	V <sub>v</sub>	$\bar{V}_{50}$ (m/sec)	V <sub>v50</sub>			
목 포	81	26.764	0.259	47.874	0.158	45.0	0.938	2.39
인 천	35	19.674	0.237	33.882	0.165	35.0	0.777	2.81
포 향	35	21.094	0.277	38.919	0.180	35.0	1.014	2.01
울릉도	48	27.817	0.250	50.810	0.163	50.0	0.856	2.58
강릉	75	19.633	0.280	36.394	0.166	40.0	0.686	3.17

\*Type I 분포의 모수

V<sub>n</sub>에 가장 큰 영향을 받기 때문에 C, α, K<sub>z</sub>, G의 확률특성이 풍하중의 확률특성을 추정하는데 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 본 연구에서는 관련 문헌 및 국내자료에 기초하여 근사적으로 이들 변수의 확률특성을 가정하였다. 우선 항력계수 C의 변동계수 V<sub>c</sub>는 Ravindra<sup>(15)</sup>와 Ellingwood<sup>(14)</sup>가 각각 V<sub>c</sub>=0.10, 0.12로 가정한 바 있는데 본 연구에서는 Ravindra와 같이 V<sub>c</sub>=0.10을 채택하였다. 한편 풍속의 높이와 조도에 대한 보정계수인 속도압계수 K<sub>z</sub>에 대해서는 Ravindra와 Ellingwood가 변동계수를 각각 V<sub>Kz</sub>=0.10, 0.16으로 가정한 바 있는데 본 연구에서는 속도압계수 K<sub>z</sub>와 등가개념인 αK<sub>z</sub>를 한 변수로 취급하여 V<sub>αKz</sub>=0.10으로 가정하였다. 돌풍을 G는 평균풍속에 대한 변동풍속의 비를 나타내는 것으로서 국내자료<sup>(16)</sup>에 기초하여 V<sub>G</sub>=0.14로 가정하였다. 한편 C, α, K<sub>z</sub>, G의 분포형은 Ravindra, Ellingwood와 같이 공히 정규분포로 가정하였다.

풍하중의 분포는 Ellingwood 등<sup>(14)</sup>이 사용한 바와 같은 MCS기법에 의하여 추정하였다. 각 지역의 풍하중 분포형태는 발생확률 상위 90% 이상에 대하여 Type I 분포에 잘 적합됨을 알 수 있었다. 표 3 및 그림 1에는 대표적으로 5개 지역에 대한 풍하중 자료와 MCS 추정결과를 나타내었다.

### 3.3 착빙하중

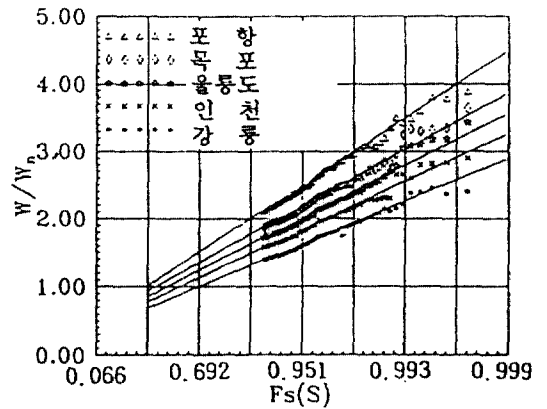


그림 1. 풍하중의 확률분포(Type I)

송전선의 착빙현상은 무작위한 자연현상으로서 송전선에 달라붙는 빙설의 본질, 모양 그리고 양은 지역의 기상에 따라 달라지게 된다. 즉, 착빙의 크기, 밀도, 모양 등 현상자체가 커다란 변동성을 가지기 때문에 착빙하중의 불확실량도 매우 커지게 된다. 따라서 송전선의 착빙하중은 가용자료의 부족 및 자료해석의 난해함으로 인하여 정확하게 추정한다는 것은 매우 어려운 일이며 때로는 불가능하기도 하다. 본 연구에서는 착빙이 전선과 동심원을 이룬다고 가정했을 때의 등가착빙두께를 사용하여 송전선의 착빙하중을 다음과 같이 산정하였다.

표 4. 착빙하중 자료

지역	착빙두께					착빙하중*		
	연간			50년 최대		T <sub>n</sub> (m/sec)	I/I <sub>n</sub>	
	관측년수	평균두께	변동계수	평균풍속	변동계수		u	α
	m (Year)	T̄ (m/sec)	V <sub>T</sub>	T̄ <sub>50</sub> (m/sec)	V <sub>T50</sub>			
함백산	5	8.77	0.38	18.94	0.18	20.0	0.833	5.18

\*전선직경 d=30 mm

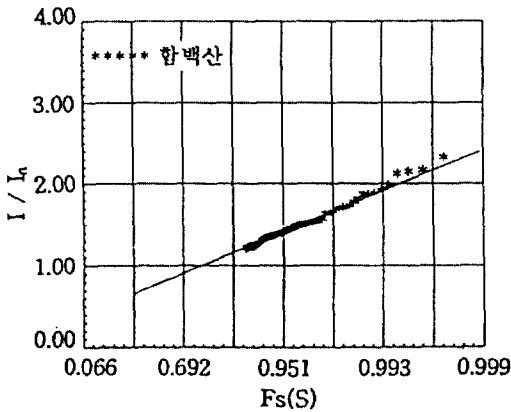


그림 2. 착빙하중의 확률분포(Type I)

$$I_n = \pi \rho_i (d + T_{50}) T_{50} \quad (9)$$

여기서,

I<sub>n</sub> : 재현기간 50년의 연직 착빙하중(kg/m)

T<sub>50</sub> : 재현기간 50년의 착빙두께(cm)

d : 송전선 지름(cm)

ρ<sub>i</sub> : 밀도(g/cm<sup>3</sup>)

본 연구에서는 비록 불충분하지만 다설지구 내에 위치한 함백산의 시험선로에서 획득한 5년 단기 기록<sup>(17)</sup>을 사용하여 착빙하중의 통계특성을 추정하였다. 그림 4에는 우리나라의 송전철탑 설계기준<sup>(10)</sup>에서 제시하고 있는 다설지구도와 함께 함백산의 위치를 표시하였으며 그림 4와 더불어 우리나라의 풍속지도 및 다설지구도로 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 착빙하중의 확률분포에 대한 MCS 추정 결과 Type I 분포에 잘 적합됨을 알 수 있었으며 표 4 및 그림 2에 착빙하중자료와 MCS 추정결과를

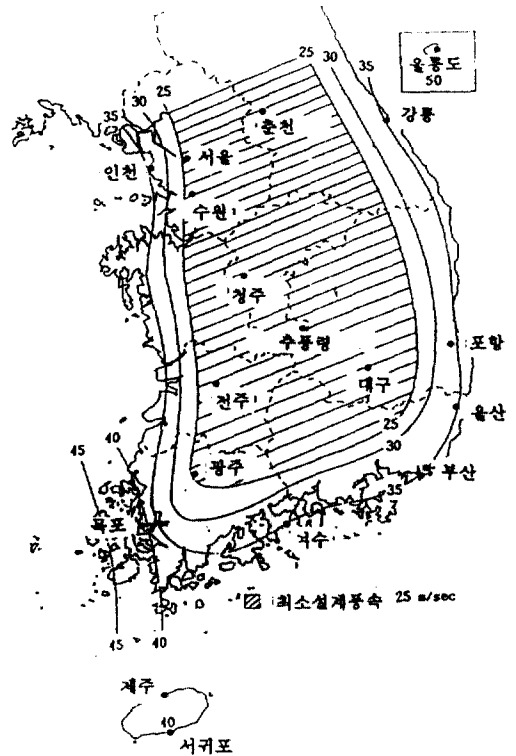


그림 3. 설계풍속지도 및 장기기록 보유지역

나타내었다.

### 3.4 착빙위의 풍하중

착빙위의 풍하중이란 겨울동안에 발생하는 하중으로서, 전선에 얼음이 달라붙은 상태에서 강한 계절풍의 영향으로 인하여 유발되는 수평하중을 일컫는다. 이것은 착빙하중에 의한 수직하중과 동시에 발생되기 때문에 송전철탑의 설계를 지배하는 주하

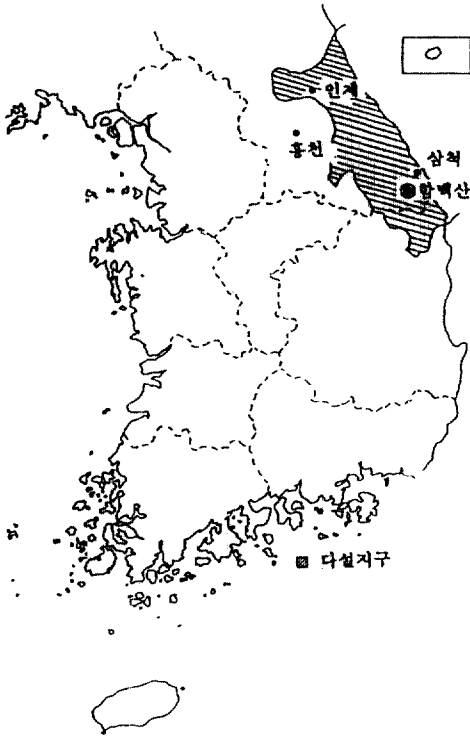


그림 4. 다설지구도 및 단기기록 보유지역

중이 된다.

착빙위의 풍하중 산정을 위한 기본풍속은 현재로서 이에 대한 통계적 연구가 수행된 바 없기 때문에 본 연구에서는 우리나라의 철탑설계에서 행하여지고 있는 관례대로 재현기간 50년 기본풍속의 50%를 취하여 사용하였다. 또한 전선에 얼음이 달라붙어 있는 기간은 일반적으로 3~7일<sup>(22)</sup> 정도인데 본 연구에서는 ASCE-LRFD설계지침에서도 적용한 바와 같이 이를 근사적으로 7일로 가정하여, 다설지구내에 위치하고 있는 3개 지역의 겨울(저온계, 12~3월) 동안의 일최대 풍속자료에 기초하여 7일 최대풍속을 추정하였다. 한편, 기본풍속 이외의 변수에 대한 확률특성은 최대풍하중을 추정할 때와 같은 값을 사용하여 MCS를 수행하였다. 확률분포형은 Type I 분포에 잘 적합됨을 알 수 있었으며, 표 2에는 최대풍하중, 최대착빙하중과 함께 MCS를 통하여 추정된 착빙위의 풍하중에 대한 평균공칭비, 변동계수, 분포형을 정리하였다.

#### 4. 신뢰성 해석

##### 4.1 신뢰성 해석 방법

철탑의 요소신뢰성해석에는 제 1계 2차모멘트 AFOSM신뢰성방법을 이용하였다.<sup>(18)</sup> 체계신뢰성해석에는 IST기법<sup>(19)</sup>과 제 2계 구간해법(2nd Order Bound Solution)<sup>(6)</sup>을 사용하였다. 특히 제 2계 구간해법의 적용시에는 본 문제의 경우 해석된 구간의 폭이 적기 때문에 근사적으로 구간의 평균치를 취하여 해석하였다. 체계신뢰성모델은 FMA(Failure Mode Approach)에 기초하여 정정계를 이루는 하부의 주주재 부분은 직렬체계로, 부정정계를 이루는 암주재 부분은 조합체계로 모델링하였는데 주주재 부분의 요소신뢰성이 상대적으로 낮아 전체적으로 체계신뢰성을 좌우하기 때문에 각 철탑형식의 시스템 모델링을 직렬체계로 실용적으로 근사화시켰다.

##### 4.2 기설 철탑의 신뢰성수준 검토

우리나라의 송전철탑은 소수의 특수철탑을 제외하고는 대부분 표준철탑으로 설계된다. 표준철탑에는 직선철탑(A), 각도철탑(B), 내장철탑(C), 인류철탑(D) 등 네가지가 있으며, 각 철탑은 주재(MP), 암주재(AM), 사재(DM) 등의 부재로 이루어진다.

기설 철탑의 구조신뢰성을 검토하기 위하여 표준철탑 각 형식의 요소신뢰성지수  $\beta_e$ 를 해석하고 이를 표 5에 정리하였으며, 직선철탑 및 인류철탑의 경우에는 그림 5에 나타내었다. 표 5로부터 철탑형식에 따른 신뢰성지수의 등급은  $A < B < C$ , D로 나타나고 부재에 대하여서는  $DM < MP < AM$ 으로 나타남을 알 수 있었다.

따라서, 현행 송전철탑설계기준에 의하여 설계된 직선철탑의 신뢰성은 다른 형식에 비하여 상대적으로 매우 낮음을 알 수 있었는데, 이때 가장 낮은 요소신뢰성지수는 사재에 대하여  $\beta_e = 1.63$ , 암주재에 대하여  $\beta_e = 9$ 로 해석되었다. 이는 암주재가 송전철탑의 거의 모든 설계하중을 직접 지지하는 중요부재인 것을 감안하더라도 너무 높은 값이며, 직선철탑에서  $\beta_e$ 가 이렇게 큰 폭으로 변하는 이유는 암주재는 과다설계되어 있는 반면 주주재, 사재 등은 과소설계되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 이로부터 우리나라 철탑설계의 안전규정은 신뢰성 균형설계라는 측면에서 다소 비합리적이라고 생각된다.

한편 체계신뢰성 해석결과를 요소신뢰성의 해석결과와 함께 표 5에 수록하였다. 표 5로부터 직선

표 5. 송전철탐의 요소 및 체계신뢰성지수

철탐 형식	요소신뢰성지수, $\beta_e$			체계신뢰성지수, $\beta_s$		
	부재	$D_n + W_n$	$D_n + W_{In} + I_n$	해석방법	$D_n + W_n$	$D_n + W_{In} + W_n$
직선 철탐 (A)	MP	1.85~2.45	3.53~4.06	2nd O. Bound IST	0.62 0.78	3.01 3.37
	DM	1.63~3.29	3.97~5.47			
	AM	5.76~8.53	5.35~8.93			
각도 철탐 (B)	MP	2.99~4.21	4.04~5.21	2nd O. Bound IST	2.24 2.50	3.74 3.90
	DM	2.63~3.04	4.05~5.81			
	AM	5.52~6.41	4.91~8.90			
내장 철탐 (C)	MP	4.41~5.11	4.96~6.53	2nd O. Bound IST	3.60 3.65	4.73 4.88
	DM	3.71~4.52	5.32~7.01			
	AM	5.90~8.61	5.56~8.91			
인류 철탐 (D)	MP	4.27~5.18	4.53~5.29	2nd O. Bound IST	3.35 3.40	3.87 3.88
	DM	3.49~4.73	3.29~5.09			
	AM	5.92~8.57	5.64~9.07			

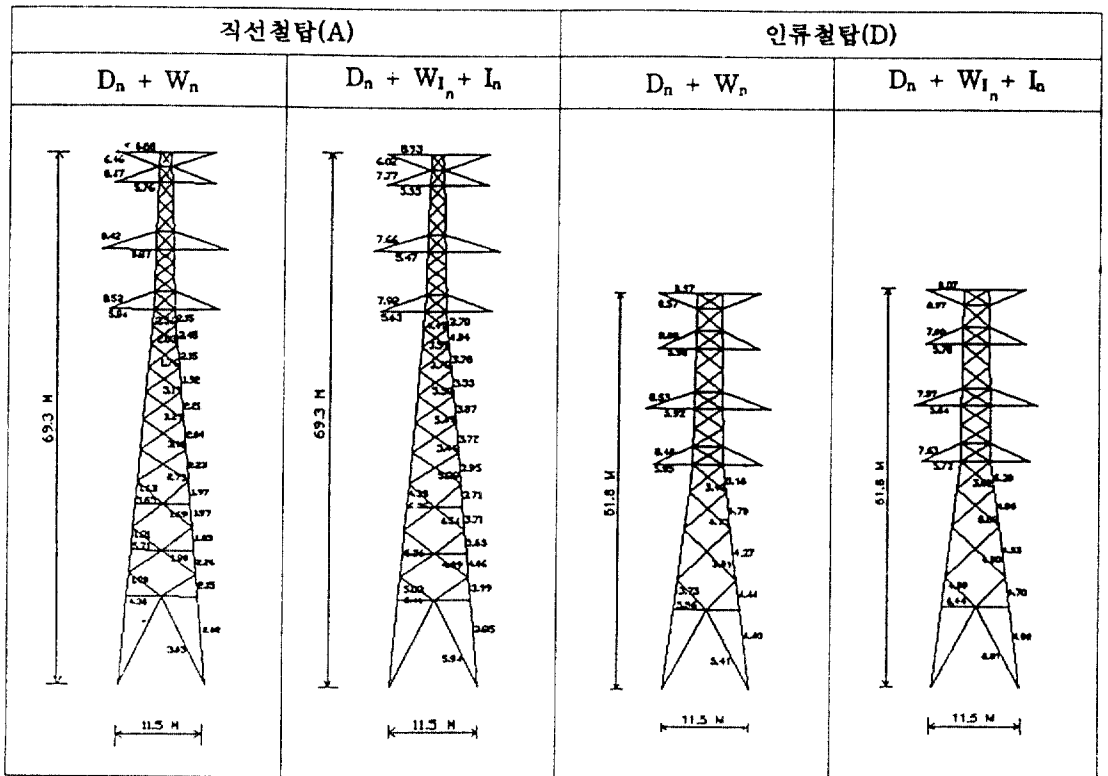


그림 5. 송전철탐의 요소신뢰성지수(직선철탐/인류철탐)

철탐의 체계신뢰성지수는 다른 형식의 철탐보다 상당히 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이는 현행 설계기준에 의해 설계된 직선철탐은 주주재가 과소설계되어 있어 본 연구에서 제안하는 확률적 설계하중하에서의 요소신뢰성이 다른 철탐형식 주주재의 요소신뢰성보다 매우 낮기 때문이다. 따라서 직선철탐의 체계신뢰성이 비합리적으로 낮다는 것을 감안하여 직선철탐의 목표신뢰도는 현행 설계기준에서 부여하고 있는 신뢰도보다 다소 높게 책정되어야 할 것으로 사료된다.

## 5. LRFD 설계기준의 개발

### 5.1 안전계수의 보정절차

본 연구에서 제안하는 LRFD 설계기준은 하중비가 변화하여도 거의 균일한 신뢰성을 가질 수 있도록 실용적인 방법으로 유도하였다. 식 (1), (2)에서 제시한 레벨 I의 LRFD설계식에 대하여 목표신뢰도 근처의 거의 균일한 신뢰도를 확보하기 위하여 저항계수  $\phi$ , 하중계수  $\gamma_i$  등을 FTM(Flexible Tolerance Method)<sup>(21)</sup> 최적화기법을 사용하여 보정하였다.<sup>(14)</sup> 안전계수 보정의 개략적인 흐름도는 그림 6과 같다. 이때,  $q_i$ 는 기설 철탐의 형식별 구성비로서 표 6에 나타난 최근의 송전선로 공사에 기초하여 근사적으로 산출하였다.

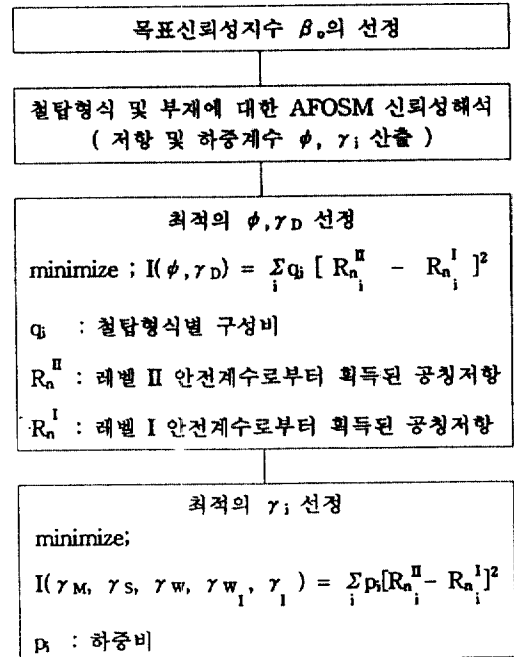


그림 6. 안전계수 보정절차

### 5.2 목표신뢰성

합리적인 목표신뢰도를 설정하는 공인된 방법은 없으나 지금까지 각종 구조물에 대한 LSD, LRFD 설계기준을 개발하기 위하여 여러가지 방법이 소개된 바 있다.<sup>(3,4)</sup>

표 6. 송전철탐의 구성비(345 KV)

송전선	선로길이 (km)	철탐형식					합 계
		직선철탐 (A, SF, F)	각도 철탐 (B)	내장철탐 (C, E)	인류철탐 (D)	특수철탐	
신광주-신강진	78	68 (157)*	10 (23)	19.5 (45)	1.3 (3)	1.3 (3)	100 (231)
의정부-양주	29	69.1 (67)	5.2 (5)	20.7 (20)	5.2 (5)	-	100 (97)
보령-시흥	157	63.9 (287)	14 (63)	18.7 (84)	3.3 (15)	-	100 (449)
평 균		67 (511)	9.7 (91)	19.6 (149)	3.3 (23)	0.4 (3)	100 (777)



표 7. 목표신뢰성지수,  $\beta_0$ .

철탑형식	부재	
	주주재(MP) 사재(DM)	압주재(AM)
직선철탑(A)	2.0	2.5
각도철탑(B)	2.5	3.0
내장철탑(C)	3.0	3.5
인류철탑(D)		

표 8. 송전철탑의 LRFD설계기준(안)

형식 : 부재	LRFD Eq.:	
	$\gamma_M$	$\gamma_S$
A : MP, DM	1.00	1.00
A : AM	1.05	1.15
B : MP, DM		
B : AM	1.10	1.35
C : MP, DM		
C, D : AM	1.15	1.60

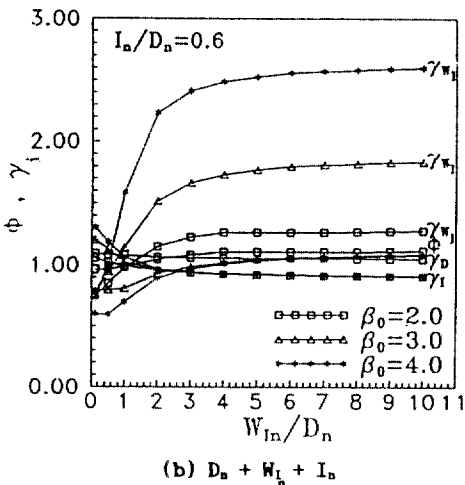
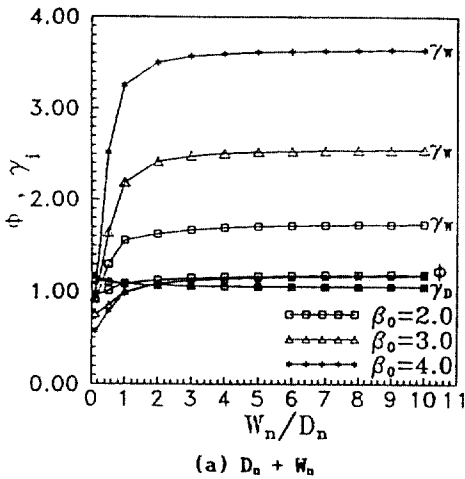


그림 7. 하중비에 따른 안전계수  $\phi$ ,  $\gamma_i$ 의 변화

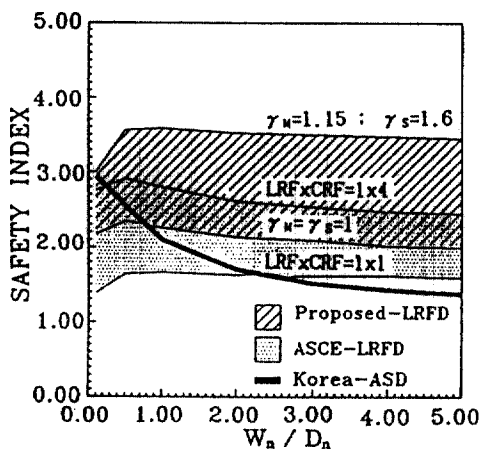
본 연구에서는 공학적 경험과 판단에 따라 요구되는 신뢰도의 수준 및 이론과 실제의 비교, 검토 그리고 외국의 사례 등에 기초하여 목표신뢰성지수

$\beta_0$ 를 설정하였다. 표 7에는 현행 설계기준의 신뢰성수준 및 기설 철탑의 신뢰성해석을 바탕으로 설정된 목표신뢰성지수를 수록하였다. 한편 그림 7에는 목표신뢰성지수  $\beta_0$ 에 대한 하중비에 따른 안전계수  $\phi$ ,  $\gamma_i$ 를 수록하였는데 이는 전 절에서 설명한 레벨 II의 안전계수를 제공하게 된다.

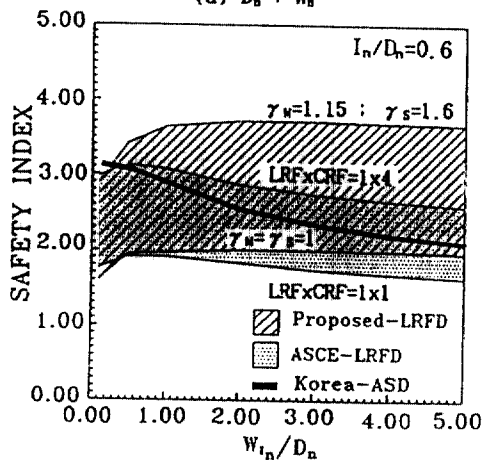
### 5.3 LRFD 설계기준

표 8에는 철탑형식 및 부재에 대한 여러가지 목표신뢰성지수에 대응하는 최적의  $\phi$ ,  $\gamma_i$ 를 정리하여 우리나라 송전철탑의 LRFD설계기준(안)으로 제시하였다. 압축부재에 대한 기본저항계수  $\phi_c (=0.85)$ 는 대표값으로 고정하였는데, 이는 AFOSM 계산결과 및 AISCE-LRFD설계기준<sup>(4)</sup>으로부터 선택하였다. 한편 철탑의 사하중효과는 교량이나 건물 등의 구조물과는 달리 다른 주하중효과에 비하여 항상 작은 속성을 가지고 있고 철탑의 공용중에는 사하중의 변화가 거의 없다는 사실로부터 ASCE-LRFD<sup>(6)</sup>설계지침에서도 채택한 바와  $\gamma_D = 1.0$ 으로 취하였다. 따라서  $\phi$ 와  $\gamma_D$ 가 정해진 상태에서 표 8에 나타낸 바와같이  $\gamma_W = 1.2$ ,  $\gamma_{W1} = 1.0$ ,  $\gamma_I = 1.2$ 에 대한 철탑의 형식 및 부재별 중요도계수  $\gamma_M$ ,  $\gamma_S$ 를 구하였다.

그림 8에는 본 연구에서 제안한 LRFD설계기준과 현행 우리나라의 ASD설계기준,<sup>(10)</sup> ASCE-LRFD설계지침<sup>(6)</sup>의 신뢰성수준을 비교하였다. 그림에서 빗금으로 표시한 부분은  $\beta_0 = 2 \sim 3.5$ 에 대응하는 제안된 LRFD설계기준의 신뢰성지수 범위를 나타내고, 점



(a)  $D_n + W_n$



(b)  $D_n + W_n + I_n$

그림 8. 각종 설계기준의 신뢰성수준 비교

으로 표시된 부분은 부재신뢰성계수(CRF=1, 2, 4)와 선로신뢰성계수(LRF=1)에 대한 ASCE-LRFD설계지침의 신뢰성지수 범위를 나타낸다. 제안된 LRFD설계기준에서는 ASCE-LRFD설계지침보다 신뢰성지수가 0.5~1.0 정도 높게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 전자는 우리나라의 각종 기설 철탑에 대한 요소 및 체계신뢰성해석 결과에 기초한 목표신뢰성을 바탕으로 제안되었기 때문이며, 따라서 후자보다 다소 안전측의 설계를 제공하게 될 것이라고 사료된다.

한편 우리나라의 현행 ASD설계기준은 하중비에 따라서 신뢰성수준이 크게 변화할 뿐 만 아니라 최대풍하중과의 조합인 경우 하중비에 따라서는 LRFD설계기준에 비해서도 비정상적으로 작아질 수

있음을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 송전철탑의 설계를 지배하는 기상 관련 주요 설계하중의 확률특성을 추정하고, 기설 철탑의 신뢰성수준 검토를 바탕으로 우리나라 송전 철탑의 내풍설계를 위한 LRFD설계기준을 제안하였다.

본 연구에서 제안된 신뢰성에 기초한 송전철탑의 LRFD설계기준은 우리나라의 모든 표준철탑의 내풍설계에 도입될 수 있을 것이며, 따라서 신뢰성 측면에서 균형된 설계를 도모할 수 있는 합리적인 설계기준인 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Cho, H.N., "Typhoon Risks and Typhoon Resistant Design of Nuclear Power Plants in Korea", *Proc. of the US-Asia Conf. on Eng. for Mitigating Natural Hazards Damage*, Bangkok, 1987, pp. A9-1~A9-15.
2. Cho, H.N. and Baik, H.S., "Probabilistic Assessment of Basic Design Wind Speed in Korea", *The 3rd East Asia-Pacific Conf. on Structural Eng. & Construction*, Shanghai, 23-26 Apr. 1991, pp. 15 25~1530.
3. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89)", ACI Committee 318, American Concrete Institute, Detroit, Mich, 1989.
4. AISC, "Load and Resistance Factor Design", *Manual of Steel Construction*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 1986.
5. Thoft-Christensen, P. and Murotsu, Y., *Application of Structural Systems Reliability Theory*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1986.
6. ASCE, "Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading", *Task Commit. on Struct. Loadings of the Commit. on Elect. Trans. Struct.*, ASCE Manuals and Reports on Eng. Pra-

- ctice No. 74, 1991.
7. Cho, H.N., Shin, J.C. and Lee, S.J., "Reliability-Based Wind Resistant Design of Transmission Towers", *Proc. of the 2nd US-Asia Conf. on Eng. for Mitigating Natural Hazards Damage*, Yogyakarta, Indonesia, 22-26 June 1992, pp. W02-1~W02-8.
  8. Cho, H.N. and Lee, S.J., "Reliability-Based Design of Transmission Towers under Wind and Ice Loadings", *Proc. of the Structures Congress '93, Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation*, ASCE, Irvine, California, Vol. 2, 19-21 Apr. 1993, pp. 1125-1130.
  9. 조효남, 신재철, 이승재, "신뢰성에 기초한 송전철탄의 내풍설계기준 개발", 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), 1992. 10, pp. 223-226.
  10. 한국전력공사, "가공 송전용 철탄설계기준", 송전편 설계기준-1111, 1987. 6. 16.
  11. IEEE, "National Electrical Safety Code", ANSI Standard C2-1990, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, N.Y., 1990.
  12. 電氣學會 電氣規格調査會, "送電用支持物設計標準", JEC-127-1979, 電氣書院, 1979.
  13. Peyrot, A.H. and Dagher, H.J., "Reliability-Based LRFD for Transmission Structures", *Plastic and Other Limit State Methods for Design Evaluation, Proc. of a Session Sponsored by the ASCE Struct. Div.*, Oct. 1984, pp. 37-53.
  14. Ellingwood, B., Galambos, T.V., MacGregor, J.G. and Cornell, C.A., "Development of Probability-Based Load Criterion for American National Standard A58", *NBS Special Publication 577*, National Bureau of Standards, United States Department of Commerce, June, 1980.
  15. Ravindra, M.K., Cornell, C.A. and Galambos, T.V., "Wind and Snow Load Factors for Use in LRFD", *J. of the Structural Div.*, ASCE, Vol. 104, No. ST9, Sep. 1978, pp. 1443-1457.
  16. 한국전력공사 기술연구원, "송전철탄 설계풍속에 관한 연구", KRC-84S-J19, 1986. 1.
  17. 한국전력공사 기술연구소, "영동지역 송전선의 착빙설 하중상정에 대한 연구", KRC-84S-S08, 1988. 12.
  18. Rackwitz, R. and Fiessler, B., "Structural Reliability under Combined Random Load Sequences", *Computers & Structures*, Vol. 9, 1978, pp. 489-494.
  19. Cho, H.N. and Kim, I.S., "Importance Sampling Technique for Practical System Reliability Analysis of Bridge Structures", *Proc. of the US-Korea-Japan Trilateral Seminar held in Honolulu*, 21-24 Oct. 1991, pp. 87-100.
  20. Turkstra, C.J., "Theory of Structural Decisions", *Solid Mechanics Study No. 2*, Univ. of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1972.
  21. 조효남, 박성국, 박정배, "강구조물의 강접합부에 대한 최적설계", *한국강구조학회 논문집*, 제4권 제3호, 1992. 9, pp. 137-147.
  22. Mozer, J.D., Peyrot, A.H. and DiGioia, A.M., "Probabilistic Design of Transmission Line Structures", *J. of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 10, Oct. 1984, pp. 2513-2528.

(接受 : 1994. 3. 28)