

고속도로 시설물의 풍하중 위험도 해석

Wind Induced Risk Analysis of Highway Facilities

김 동 현¹⁾ · 이 일 근²⁾ · 조 병 완³⁾

Kim, Dong Hyawn · Lee, Il Keun · Jo, Byung Wan

요 약 : 고속도로표지판과 방음벽 등의 도로시설물에 대한 풍하중 위험도해석을 수행하였다. 풍하중의 확률모델은 풍속관측으로부터 추정된 극치분포를 사용하였으며 도로시설물의 구조변수에도 확률적 변동성을 부여하였다. 도로시설물의 안정성에 대한 한계상태함수를 정의하여 신뢰성해석을 수행하였으며 풍속재해도를 고려하여 도로시설물의 위험도 해석을 수행하였다. 고속도로 시설물의 위험도 평가결과 방음벽의 위험도가 도로표지판 보다 매우 높게 평가되었다. 이는 두 시설의 내풍설계 기준이 불일치하기 때문이며 위험도의 균일한 분산을 위해 설계풍압식의 통일 및 개선이 필요함을 보였다.

ABSTRACT : Risk analysis of highway sign supporting structures and sound barriers was done. Stochastic wind load was modeled by using extreme value distribution from site measurement and the variability of structural parameters was considered. Limit state functions were defined to assess structural stability by wind and risk of highway facilities was analyzed by combining wind hazard. According to the numerical analysis results, sound barrier post shows significantly higher risk than highway sign supporting structures. This is caused by the fact that the design codes of the structures are different. To distribute wind induced risk in highway structures, unification and improvement of design codes are required based on risk assessment.

핵심용어 : 위험도, 풍하중, 고속도로표지판, 방음벽, 신뢰성, 확률

KEYWORDS : Risk, Wind load, Highway sign supporting structure, Sound barrier, Reliability, Probability

1. 서론

도로표지구조물, 방음벽, 제연시설 등의 고속도로 시설물은 태풍에 의한 안전성을 확보하기 위하여 내풍설계를 수행하도록 되어 있다. 이는 고속도로 상에 설치된 시설물이 태풍에 의해 파손될 경우 구조물 자체의 손상피해는 물론이고 손상된 시설물에 의한 주행 중인 차량에 가해지는 2차 피해가 치명적일 수 있기 때문이다.

고속도로 시설물의 내풍설계는 설계풍속에 의해 수행된다. 기존 도로표지설계기준에서는 100년 빈도의 풍속을 설계풍속으로 규정하고 있다(건설교통부, 1997, 2003, 2005, 2006). 기존의 도로표지판에 관한 연구는 주로 설계풍속에 의한 동적 및 정적 구조적 안정성을 해석하고 있다(공민식 등, 2006; 손용춘 등, 2007). 그러나, 실제로 고속도로 시

설물의 사용되는 기간 중에 태풍에 의한 풍속이 설계풍속을 초과할 수 있는 가능성은 항상 존재한다. 태풍 매미에 의한 여러 시설물의 피해가 이를 뒷받침 하고 있다(김동현 등, 2005). 따라서, 고속도로시설물의 사용기간 동안 태풍에 의한 위험도를 정량적으로 평가하기 위해서는 풍속의 확률특성을 고려해야 한다(김동현 등, 2007). 또한, 구조적 설계변수는 재료의 생산, 가공, 시공 중에 다양한 불확실성이 내포될 수 있기 때문에 이들의 불확실성을 동시에 고려해야 위험도를 합리적으로 평가할 수 있다.

본 연구에서는 태풍에 의한 풍속의 변동성과 구조변수의 확률적 변동성을 고려하여 고속도로 시설물의 내풍 위험도 해석을 수행하였다. 풍속의 확률모델은 고속도로 인근의 기상청 관측자료를 활용하여 추정하였으며 이를 통해 풍하중 재해도를 산정하였다. 구조설계변수의 확률모델은 기존 문헌의 자료를 이용하였다. 신뢰성해석에 의한 위험도 평가를 위해 시설물의 안정성 판

1) 교신저자. 군산대학교 해양건설공학과 교수, 공학박사

(Tel. 063-469-1862, Fax. 063-469-1861, Email: welcomed@naver.com)

2) 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, 한양대학교 박사과정(lik@ex.co.kr)

3) 한양대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사(joycon@hanmail.net)

본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

정식을 이용하여 한계상태함수를 정의하였으며 다양한 조건하에서 구조물의 취약도곡선을 얻을 수 있었다. 또한, 도로표지구조물과 방음벽의 설계풍압식이 서로 다른 바, 풍하중위험도의 상호비교를 통해 설계풍압식의 개선점을 제안하였다.

2. 고속도로시설물의 내풍설계

2.1 도로표지구조물

도로표지구조물의 설계기준은 과거 10년 동안 3차례 개정 작업이 이루어져왔다. 1997년 기준(건설교통부, 1997)에서는 단주식과 복주식은 풍속 40m/sec, 편지, 현수, 문형식에서는 50m/sec를 기본풍속으로 정한 후 항력계수 등을 고려하여 설계풍압력을 설정하였다. 이에 따라 문형식 지주에 대한 풍압력은 109kgf/m²로 정의 되었다. 2003년 기준(건설교통부, 2003)에서는 풍하중에 대한 개정은 이루어지지 않고 다만 표지판 의장이 새롭게 도입되었다. 그 후 2006년 기준(건설교통부, 2006)에서는 풍하중 계산방법에 대한 대폭적인 개선이 이루어졌다. 풍속의 변동성을 고려하기 위한 거스트계수, 시설물의 중요성을 구분하는 중요도계수 등이 도입되었고 기본풍속도 재현빈도 100년에 대한 풍속을 근거로 지역별로 차등화하여 30m/sec~45m/sec까지 설정하였다. 결과적으로 풍속 40m/sec에서 풍압이 327kgf/m²가 되어 과거보다 풍압이 높게 산정되도록 하였다. 이 외에도 고도에 따른 풍속증가와 지표조도의 영향을 보정하도록 하였다. 2006년 기준에서 가장 중요한 개선점은 설계풍속 결정시 지역적 차별성을 인정하였고 여기에 재현빈도 개념을 도입함으로써 확률기반 설계의 기초를 마련하였다는 것이다.

2006년 도로표지관련규정에 의하면 내풍설계를 위한 설계 풍압력은 다음 식에 의하여 산정하도록 하고 있다.

$$p = \frac{1}{2} \rho V_d^2 G C_d I \quad (1)$$

여기서, ρ 는 공기밀도($kg \cdot s^2/m^4$), V_d 는 설계풍속(m/s), G 는 거스트 영향계수, C_d 는 항력계수, I 는 중요도 계수이다. 도로표지관련규정에서 거스트계수는 변동풍속에 의한 동적응답을 보정하기 위해 1.9를 사용하도록 한다. 항력계수는 표지판의 경우 1.2 지주의 경우는 세장비에 따라 1.3~2.0을 적용한다. 또한 중요도계수는 단주식 지주는 0.66, 문형식 지주는 0.90을 적용한다. 설계풍속은 기본 풍속에 고도 및 노출환경의 영향을 보정하여 산정하며 이 때

기본풍속은 Type I 극치분포를 이용한 재현기간 100년에 해당하는 풍속으로 지역별로 30m/sec~45m/sec을 적용한다.

2.2 방음벽

방음벽 설계기준은 환경처 설치지침에 의하면 지주의 풍압력이 교량부에서 300kgf/m², 토공부에서 150kgf/m²로 제시되어 있고 환경부고시 제1998-150호에 의하면 “도로교 표준시방서에서 정하는 지역별 설계풍속을 적용할 수 있다”고 규정되어 있다(한국도로공사, 2002). 그 후 한국도로공사 설계처에서 제시한 “방음벽 설치기준 개선검토”에서는 다음과 같은 풍압 산정식을 제시하였다(한국도로공사, 2002).

$$p = \frac{1}{2} \rho C_d V_d^2 \quad (2)$$

방음벽 설계기준에서는 도로표지관련규정과 달리 중요도계수와 거스트계수가 고려되지 않았다. 위 식에서 C_d 는 항력계수로 교량부에서는 1.6, 토공부에서는 1.2를 적용하도록 하였다. 설계풍속 V_d 는 재현기간 100년에 해당하는 기본풍속에 고도 및 노출환경에 따른 영향을 보정한 풍속이다.

3. 풍하중 위험도 해석

3.1 위험도해석

3.1.1 풍속 확률분포

풍하중의 발생은 시간, 장소, 및 크기에 대한 확률적 변동성을 가진다. 세 가지 변동성에 대한 확률분포는 과거의 풍속기록을 통계 분석하여 구할 수 있다. 장소에 대한 확률적 변동은 광범위한 영역에 대하여 통계 분석하므로써 태풍이 발생하지 않은 지역에 대한 정보를 추정할 수 있고 시간적 변동성은 1년 단위로 풍속을 분석하여 해결한다. 크기에 대한 변동성은 내풍설계에 주로 사용되는 10분 평균의 최대풍속(maximum wind velocity)을 대표적 확률변수로 취급한다. 이러한 풍속의 확률을 체계화하기 위하여 매번 발생하는 최대풍속을 V_1 , 이들 중 년최대 값의 확률변수를 V 라 하자. 두 확률변수는 각각 Poisson process와 극치분포를 따른다고 가정하였다. 풍속의 누적확률분포함수를 F_{V_1} 이라 하면 매회 발생하는 최대풍속이 v 를 초과하지 않는 확률을 $F_{V_1}(v)$ 가 되며 큰 풍속의 년평균 발생회수를 λ_w 라 정의하면 v 를 초과하는 풍속의 년평균 발생회수는 $\lambda_w [1 - F_{V_1}(v)]$ 된다. 따라서, 최대풍

속 년 극값의 누적확률분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{V_1}(v) = \exp[-\lambda_w \{1 - F_{V_1}(v)\}] \quad (3)$$

한편, 발생하는 풍속 중에서 구조물에 손상을 주는 의미 있는 크기의 풍속이 관심의 대상이므로 그 최소 크기를 v_0 로 설정하면 V_1 이 v_0 를 초과하지 않을 확률은

$$F_{V_1}(v_0) = 0 \quad (4)$$

로 설정할 수 있다. 식 (3)과 (4)를 이용하면 최대풍속 년 평균 발생회수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_w = -\ln[F_{V_1}(v_0)] \quad (5)$$

최종적으로 년최대풍속(V)의 확률분포를 Type I 극치분포로 가정하면 년평균 발생회수(λ_w)와 풍속 V_1 의 확률밀도함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_w = \exp[-\alpha_n(v_0 - u_n)] \quad (6)$$

$$f_{V_1}(v) = \alpha_n \exp[-\alpha_n(v - v_0)] \quad (7)$$

여기서, α_n, u_n 은 Type I 극치분포의 모수이다.

3.1.2 풍하중 취약도

취약도 곡선은 태풍 발생시 구조물이 얼마나 취약한 지를 나타내는 곡선이 취약도 곡선으로 손상수준 k 에 대하여 다음과 같은 로그정규분포함수로 표현될 수 있다.

$$F_k(v) = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{v}{c_k}\right)}{\zeta_k} \right] \quad (8)$$

여기서, Φ 는 표준정규분포의 누적확률분포함수이며 v 는 최대풍속 그리고 c_k, ζ_k 는 각각 중간값과 로그표준편차이다. 식 (8)의 취약도 곡선은 사전에 정의한 손상수준을 초과한 경우와 그렇지 않은 경우의 피해사례를 풍속과 연관시키므로써 구한다. 최우도법(Maximum likelihood method)을 이용하여 취약도 곡선을 구하며, 다음의 식 (9)와 같은 우도함수를 이용한다.

$$L = \prod_{i=1}^n [F_k(v_i)]^{x_i} [1 - F_k(v_i)]^{1-x_i} \quad (9)$$

여기서, n 은 발생한 총 최대풍속의 개수, x_i 는 구조물의 손상여부에 따라 손상이 없으면 0 손상이 있으면 1을 입력하여 각각 무손상과 손상의 확률을 누적시킨다. 대수함수는 단조증가함수이므로 우도를 최대화하는 상태는 로그를 취해 동일한 위치에서 최대가 되므로 $\ln L$ 을 최대화하는 다음의 조건을 이용하여 중간값과 로그표준편차를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c_k} = \frac{\partial \ln L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad (k=1, 2, \dots, n_k) \quad (10)$$

이상의 취약도 계산방법은 태풍에 의해 손상을 입은 구조물이 있을 때 피해 현황자료를 이용하여 구할 수 있지만 실제 피해사례를 얻기 어려운 경우에는 수치해석을 이용하여 취약도 곡선을 추정해야 한다. 특히, 본 연구에서는 도로시설물에 가해지는 풍속을 결정한 후 풍하중계수(거스트와 항력계수)와 구조설계변수의 확률적 변동성을 고려하여 직접 손상확률을 구하기 때문에 최우도법을 적용할 필요가 없다. 그 대신 총 n 개의 서로 다른 풍속에 대하여 신뢰성해석을 통해 구한 손상확률 $P_k(v)$ 를 이용하여 식 (8)의 취약도 곡선을 추정할 수 있다. 이 때 중앙값과 로그표준편차는 다음과 같은 최적화 문제를 풀어서 구할 수 있다.

$$\min \sum_i^n \left[\Phi \left| \frac{\ln\left(\frac{v_i}{c_k}\right)}{\zeta_k} \right| - P_k(v_i) \right]^2 \quad (11)$$

3.1.3 풍하중 위험도

1회 발생태풍에 의한 위험도는 태풍이 발생할 확률과 그 태풍에 의한 구조물의 취약도를 동시에 고려하여 다음과 같이 구한다.

$$P_f = \int_{v_0}^{v_{\max}} F_k(v) f_{V_1}(v) dv \quad (12)$$

여기서, v_{\max} 는 물리적으로 발생가능한 최대풍속이다. 구조물을 N 년 동안 사용할 때 이 기간동안의 풍하중 위험도는 총 확률에서 풍하중에 의해 한번도 파손되지 않을 확률을 제외하여 구할 수 있으므로 지수함수의 무한급수를 적용하면 T 년 동안의 총 풍하중 위험도는 다음과 같이 간단히 표현될

수 있다.

$$P_f^T = 1 - \exp[-\lambda_w TP_f] \tag{13}$$

3.2 신뢰성해석

한계상태함수가 확률변수의 함수로 표현될 수 있다면 신뢰성해석방법을 이용하여 파괴확률을 쉽게 구할 수 있다. 그러나, 응력이나 변위와 같이 확률변수에 의해 영향을 받기는 하지만 직접적인 함수관계가 드러나지 않을 때는 응답면기법을 이용하여 파괴확률을 해석해야 한다. 최대응력(σ_{max})이 허용응력(σ_{all})을 초과할 때를 파괴로 정의하면 한계상태함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$g(X) = 1 - \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{all}} \tag{14}$$

위에서 최대응력은 설계확률변수 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 의 함수이므로 설계확률변수의 함수형태로 다음과 같이 한계상태함수를 가정할 수 있다.

$$g(X) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i x_i' + \sum_{i=1}^n c_{ii} (x_i')^2 + \sum_{i=1}^n c_{ij} x_i' x_j' \tag{15}$$

여기서, c_0, c_1, \dots, c_n 과 $c_{11}, c_{22}, \dots, c_{nn}$ 및 $c_{12}, c_{13}, \dots, c_{n,n-1}$ 등은 구조해석결과를 이용하여 추정할 수 있으며 구조해석은 일정간격을 가진 서로 다른 위치에서 수행한다(허정원, 2003). 식 (15)의 응답면을 추정한 후에는 FORM(First Order Reliability Method) 기법을 이용하여 신뢰도지수를 구하며 응답면이 설계확률변수의 구간에 대하여 변동성이 큰 경우는 식 (15)의 응답면을 반복적으로 갱신하면서 신뢰도지수를 추정할 수 있다.

4. 수치해석

4.1 풍속재해도

고속도로 시설물에 대한 풍하중 위험도 해석을 위해 남해고속도로 인근의 7개 관측소 풍속기록을 이용하였다. 표 1은 풍속의 년극값을 이용하여 Type I 극치분포의 모수를 추정

한 결과이다. 누적확률분포함수를 이용한 재현주기별 풍속은 식 (16)과 같으며 각 관측소별 재현주기 풍속을 산정한 결과는 표 2와 같다.

$$V_T = u_n - \frac{1}{\alpha_n} \log \left[\log \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \tag{16}$$

표 1. 남해고속도로 주변 풍속의 Type I분포 변수

구분	부산	진주	마산	거제	통영	여수	순천
α_n	0.402	0.544	0.280	0.481	0.312	0.269	0.759
u_n	18.815	11.694	12.858	10.782	18.529	19.746	9.095

표 2. 재현기간별 설계풍속(m/s)

년	부산	진주	마산	거제	통영	여수	순천
50	28.5	18.9	26.8	18.9	31.0	34.3	14.2
70	29.4	19.5	28.0	19.6	32.1	35.5	14.7
100	30.2	20.2	29.3	20.3	33.3	36.9	15.2
150	31.3	20.9	30.7	21.2	34.6	38.4	15.7
200	32.0	21.4	31.8	21.9	35.5	39.5	16.1

표 2에서 보는 바와 같이 100년 빈도 풍속이 가장 큰 지역은 여수지역이므로 도로시설물 위험도해석에는 여수의 풍속분포를 이용하였다. 물론, 여수관측소와 남해고속도로의 위치 차이에 기인한 오차가 발생할 수 있으나 고속도로상의 풍속 관측자료를 구할 수 없는 현실적 여건상 여수관측소자료를 이용하였다. 현장의 단기 관측자료가 있다면 기상대 자료와의 상관성 분석을 통해 현장의 풍속분포를 추정할 수 있다(권순덕 등, 2009). 최소풍속을 0.1m/s로 적용한 경우 여수관측소 자료에 의한 태풍시 발생하는 최대풍속(V_1)과 최대풍속 년극값(V)의 초과확률은 그림 1과 같다.

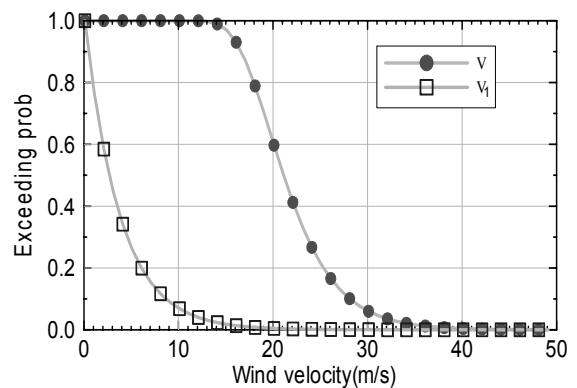


그림 1. 여수지역 최대풍속과 최대풍속 년극값의 재해도

4.2 도로표지구조물 위험도

4.2.1 개요

2006년 개정된 도로표지구조물 설계기준은 내풍설계기준을 대폭 강화하였다. 지역별 기준풍속, 거스트계수, 고도보정 등 다양한 내풍설계 기준이 도입되었다. 이에 근거하여 설계 시 공되기 시작한 문형식 도로표지구조물은 그림과 같이 직사각형 단면을 갖는 지주를 사용하였다. 그림 2는 구조해석을 위해 ANSYS를 이용하여 모델링한 3차선 편도 문형식 도로표지구조물이다. 표지판은 구조적 역할을 하지 못하므로 표지판의 자중과 표지판에 작용하는 풍압력을 환산하여 구조해석 시 정적하중으로 고려하였다.

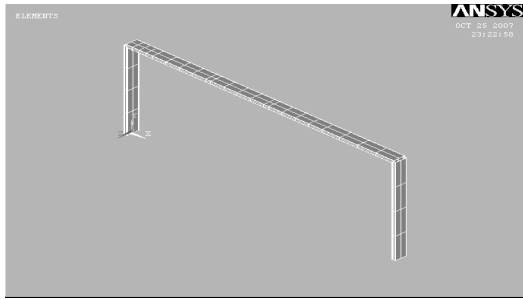


그림 2. 문형식 사각지주 도로표지구조물

신뢰성해석시 고려한 확률변수는 모두 정규분포를 따르는 것으로 가정하였으며 그 변동특성은 표 3과 같다.

표 3. 설계확률변수의 확률특성

확률변수	평균치(μ)	변동계수(COV)	확률분포
E (탄성계수)*	200.0 GPa	0.10	normal
ρ (단위중량)*	7850 kg/m ³	0.05	normal
t (부재두께)*	1.5cm	0.05	normal
G (거스트계수)	1.9	0.05	normal
C_d (항력계수)	1.2(표지판), 2.0(지주)	0.05	normal

(* Cheng et al, 2005)

표 3에서 부재두께 평균치는 도로표지구조물에서는 지주의 두께를 적용하였고 방음벽에서는 지주의 web와 flange 두께를 적용하였다. 그 외의 나머지 부재 즉, 가로재의 두께 등은 최대응력이 발생하지 않는 부위에 해당하므로 신뢰성 해석에 미치는 영향이 미미하다. 따라서, 이들은 부재 두께는 상수값으로 가정하였고 단지 지주부의 두께만을 확률변수로 정의하였다. 거스트계수와 항력계수는 설계기준서의 값을 평균치로

하고 변동계수를 0.05로 가정하였다.

직사각형 단면에 작용하는 풍하중은 입사각에 따라 그 크기가 달라진다. 그림 3은 지주의 평면도이며 차량 진행 방향에 대하여 풍하중이 θ 의 각을 가지고 입사될 때 풍하중 투영면적을 나타낸 것이다. 직사각형 지주의 높이가 H 일 때 풍하중의 투영면적은 다음과 같다.

$$A = (W \cos \theta + D \sin \theta) H \quad (17)$$

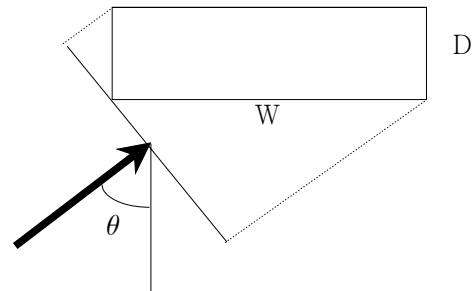


그림 3. 경사각과 풍압면적

최대풍속이 40m/sec일 때 풍하중 입사각에 따른 구조물의 최대유효응력을 그림 4에 나타내었다. 입사각이 39도일 때 지주에서 최대응력이 발생하였다. 풍하중의 입사각에 따른 발생확률을 추정할 수 있다면 방향별 발생확률을 확률변수로 고려하여 신뢰성 해석을 수행할 수 있으나 방향별 관측자료가 존재하지 않으므로 가장 위험한 방향인 39도에 대하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

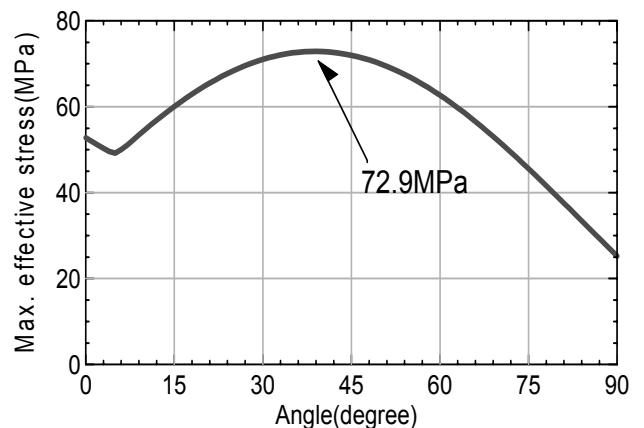


그림 4. 입사각에 따른 지주의 최대 유효응력

4.2.2 신뢰성해석

사각지주식의 도로표지 구조물에 대한 신뢰성 해석을 수행하기 위한 한계상태함수는 다음과 같이 세 가지를 정의하여 사용하였다.

$$G_1(x) = 1 - \frac{\sigma_{eff,max}}{f_{all}} \quad (18)$$

$$G_2(x) = f_{cal} - \left[f_c + \frac{f_{bcy}}{\left(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}}\right)} + \frac{f_{bcz}}{\left(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}}\right)} \right] \quad (19)$$

$$G_3(x) = 1 - \left[\frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}}\right)} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}}\right)} \right] \quad (20)$$

f_{all} 은 부재의 허용응력, f_c 는 압축응력, f_{bcy}, f_{bcz} 는 강축 및 약축 둘레에 작용하는 휨압축응력, f_{caz} 은 약축방향 허용응력,

f_{cal} 은 국부좌굴에 대한 허용응력, f_{cag} 은 국부좌굴을 고려하지 않은 허용휨압축응력, f_{cao} 는 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력, f_{bagy} 는 강축방향 허용휨압축응력, f_{bao} 는 국부좌굴을 고려하지 않은 허용휨압축응력의 상한값, f_{Ey} 는 강축 둘레의 허용 오일러 좌굴응력, f_{Ez} 는 약축 둘레의 허용 오일러 좌굴응력, l 은 유효좌굴 길이, r_y, r_z 는 단면 2차 반경이다. $G_1(x)$ 는 부재의 최대유효응력이 허용응력을 초과하는지를 판별하는 식이며 $G_2(x), G_3(x)$ 는 좌굴허용응력 초과 여부를 판별하는 식이다.

4.2.3 취약도 및 위험도 해석

앞에서 정의한 세 가지 한계상태함수에 대하여 풍속을 변화시켜가면서 신뢰성해석을 수행하였다. 해석결과 최대풍속에 따른 파손확률은 그림 5와 같다. 한계상태함수 $G_1(X)$ 인 경우는 59m/sec부터 파괴확률이 의미 있는 값을 가지지만 $G_2(X), G_3(X)$ 를 사용한 경우는 54m/sec부터 파괴확률이 상승하기 시작했으며 둘 사이에는 거의 차이를 보이지 않았다. 이것은 국부좌굴에 의한 파괴가 단순압축에 의한 파괴보다 더 풍하중에 대해 취약하다는 것을 보여준다. 풍속에 따른 신뢰성해석 결과를 토대로 풍하중 취약도(wind fragility)를 구할 수 있는데 식 (11)을 이용하여 구한 취약도 곡선의 중앙값 및 대수표준편차는 표 4와 같다. 한계상태함수 $G_1(X)$ 를 사용한 경우와 나머지 두 한계상태함수를 사용한 경우는 중앙값은 다르지만 로그표준편차는 거의 같다는 사실이다. 이것은 어떤 한계상태함수를 쓰더라도 사용한 확률 변수의 변동계수가 같기 때문이다.

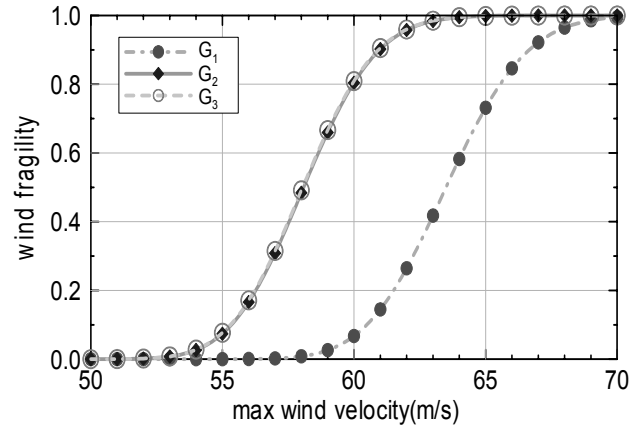


그림 5. 사각지주 도로표지구조물 취약도

표 4. 사각지주식 도로표지구조물의 취약도곡선 특성값

한계상태함수	중앙값	로그표준편차
$G_1(X)$	63.50	3.79×10^{-2}
$G_2(X)$	58.09	3.78×10^{-2}
$G_3(X)$	58.05	3.78×10^{-2}

여수지역의 풍하중 재해도와 풍속 취약도를 이용하여 사각지주식 도로표지구조물의 위험도를 평가하였다. 거스트계수 및 항력계수의 변동계수에 따른 사용기간별 위험도는 표 5와 같다. 한계상태함수를 $G_3(X)$ 로 사용할 때 위험도가 가장 크며 $G_1(X)$ 로 사용할 때의 위험도가 가장 낮다. 이것은 풍하중에 의한 위험은 좌굴파괴의 가능성이 가장 높으며 단순압축 파괴의 가능성은 상대적으로 낮다는 의미를 갖는다.

표 5. 사각지주 도로표지구조물의 위험도

구분	위험도(신뢰도지수)		
	G_1	G_2	G_3
1년	6.61×10^{-8} (5.276)	2.90×10^{-6} (4.533)	2.96×10^{-6} (4.529)
10년	6.61×10^{-7} (4.836)	2.90×10^{-6} (4.021)	2.96×10^{-6} (4.016)
30년	1.98×10^{-6} (4.613)	8.71×10^{-6} (3.754)	8.88×10^{-6} (3.749)

4.3 방음벽위험도

4.3.1 개요

방음벽(그림 6)은 도로표지구조물과 함께 고속도로에서 중요한 시설물 중의 하나이다. 방음벽은 방음판과 방음판을 지지하는 지주로 구성되어 있다. 방음판은 하중 지지기능이 없고 풍하중을 지주에 전달하는 역할을 한다. 따라서, 방음벽의

구조해석은 지주에 대해 한정하였다. 지주에 전달되는 풍하중은 지주의 전길이에 대하여 거의 같은 하중이 전달된다고 가정하고 보요소를 사용하여 모델링한 지주에 등분포하중을 재하하였다. 신뢰성 해석 대상 방음벽은 5m높이의 방음벽에 대해 남해안 지역의 설치기준에 의한 방음벽으로 그 규격은 표 6과 같다. 토공부는 고도 10m를 기준으로 하였으며 교량부는 고도 10m, 20m로 구분하였다. 교량부는 교량 높이의 영향을 고려하기 위해 고도 10m와 20m 두가지를 고려하였다. 편의상 토공부 방음벽을 SB1, 교량부 방음벽을 SB2, SB3로 구분하였다.



그림 6. 방음벽 전경

표 6. 방음벽 지주규격

구분	고도 (m)	지주간격 (m)	항력 계수	설계풍압 (kgf/m ²)	규격 (mm)	표기
토공부	10	4	1.2	150	200×200×8×12	SB1
교량부	10	2	1.6	200	200×150×6×9	SB2
교량부	20	2	1.6	200	200×150×6×9	SB3

4.3.2 신뢰성 해석

신뢰성해석을 위한 평균치는 설계치를 사용하였고 변동계수는 0.05를 사용하였다. 해석은 표 7과 같이 3가지 경우를 고려하였다. case 1은 기존의 방음벽 설계기준에서와 같이 거스트계수와 중요도계수를 사용하지 않았다. case 2는 도로표지구조물과 같이 거스트계수를 1.9로 중요도계수를 0.9로 적용한 것이다. 마지막으로 case 3은 중요도계수를 도로표지구조물보다 한단계 낮은 0.66으로 적용한 것이다.

표 7. 해석 case별 거스트 및 중요도계수

case	거스트계수	중요도계수
1	1.0	1.0
2	1.9	0.9
3	1.9	0.66

한계상태함수는 식 (14)와 같이 정의하였다. 방음벽 지주는 문형식 도로표지구조물과 달리 축 압축응력을 거의 받지 않으므로 좌굴을 고려한 한계상태함수를 사용하지 않고 단순 압축응력만을 이용하여 한계상태함수를 정의하였다.

4.3.3 취약도 및 위험도해석

최대풍속을 변화시켜가며 구한 신뢰성해석 결과가 그림 7~그림 9이다. 풍하중에 가장 취약한 경우는 case 2로서 거스트계수에 의해 변동풍속이 많이 고려되었고 중요도가 높아 풍하중이 높게 산정된 것이 원인이다. 중요도가 보다 낮게 고려된 case 3의 경우는 보다 안전측으로 판정되었다. 방음벽 종류에 따른 영향을 보면 교량부 20m고도에 설치된 방음벽(SB3)의 취약도가 가장 높게 판정되었다. 그림 9에서 알 수 있듯이 풍속 30m/sec에서부터 풍하중 취약도가 급격히 증가하고 있다.

신뢰성 해석 결과를 이용한 취약도 곡선의 특성값은 표 8과 같다. 중앙값은 거스트계수, 방음벽 종류에 따라 다르지만 변동계수를 0.05로 고정하였기 때문에 로그표준편차가 동일하게 평가되었다.

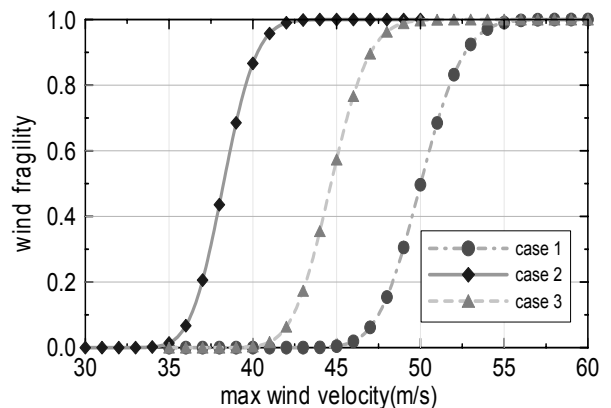


그림 7. 토공부 방음벽지주(SB1) 취약도

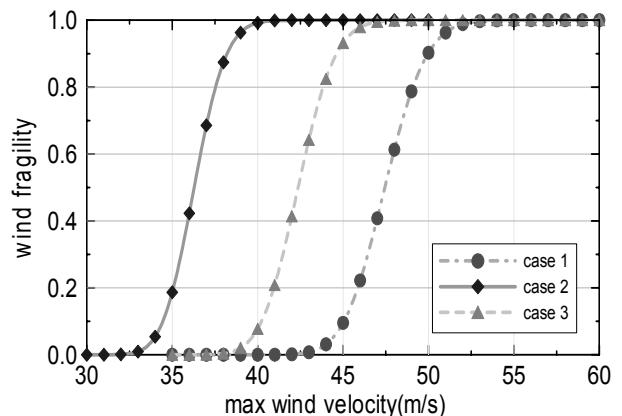


그림 8. 교량부 방음벽지주(SB2) 취약도

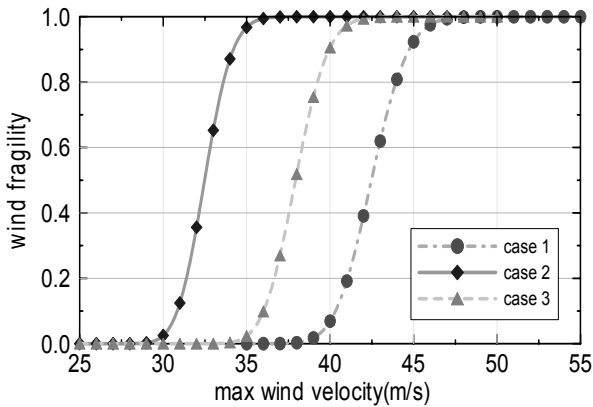


그림 9. 교량부 방음벽지주(SB3) 취약도

표 8. 방음벽 취약도 곡선의 특성값

구조물	case	중앙값	로그표준편차
SB1	1	50.02	4.04×10^{-2}
	2	38.25	4.05×10^{-2}
	3	44.67	4.04×10^{-2}
SB2	1	47.45	4.04×10^{-2}
	2	36.28	4.04×10^{-2}
	3	42.37	4.05×10^{-2}
SB3	1	42.47	4.05×10^{-2}
	2	32.48	4.04×10^{-2}
	3	37.93	4.05×10^{-2}

표 9. 방음벽의 위험도

구분	위험도(신뢰도지수)			
	case 1	case 2	case 3	
SB1	1년	4.51×10^{-6} (3.916)	1.07×10^{-3} (3.071)	1.93×10^{-4} (3.549)
	10년	4.50×10^{-4} (3.320)	1.06×10^{-2} (2.304)	1.93×10^{-3} (2.889)
	30년	1.35×10^{-3} (3.000)	3.15×10^{-2} (1.860)	5.79×10^{-3} (2.525)
SB2	1년	9.15×10^{-6} (3.741)	1.79×10^{-3} (2.913)	3.57×10^{-4} (3.384)
	10년	9.15×10^{-4} (3.117)	1.78×10^{-2} (2.102)	3.56×10^{-3} (2.691)
	30년	2.74×10^{-3} (2.777)	5.24×10^{-2} (1.622)	1.07×10^{-2} (2.303)
SB3	1년	3.47×10^{-4} (3.392)	4.91×10^{-3} (2.582)	1.16×10^{-3} (3.046)
	10년	3.47×10^{-3} (2.700)	4.80×10^{-2} (1.665)	1.15×10^{-2} (2.272)
	30년	1.04×10^{-2} (2.313)	1.37×10^{-1} (1.093)	3.42×10^{-2} (1.822)

취약도 곡선과 여수지역 풍하중 재해도를 고려한 방음벽의 사용기간별 위험도는 표 9와 같다. 1년 사용시 위험도를 기준으로 한 case 3의 신뢰도 지수를 살펴보면 토공부(SB1)에서는 3.549, 10m 고도 교량부(SB2)에서는 3.384, 20m

고도 교량부(SB3)에서는 3.046이다. 이 결과는 도로표지구조물 설계기준과 비교할 때 상당히 낮은 값으로 보이는데 그 이유는 현행 방음벽 설계기준이 거스트계수를 고려하지 않으므로 도로표지구조물에 비해서 과소설계 되었기 때문으로 평가된다.

4.4 결과고찰

본 연구에서 수행한 위험도 해석은 거스트계수, 항력계수 등의 변동계수를 실험결과에 의하지 않고 기존문헌 자료를 최대한 활용하였다. 이 부분에 대한 검증을 위해서는 보다 정밀한 확률분포의 추정치가 필요하겠지만 변동계수를 0.05로 가정한 결과만을 근거로해서 평가하였다.

위험도 평가결과 사각지주를 갖는 문형식 도로표지구조물의 1년 동안 위험도는 좌굴을 고려한 파괴조건(G_3)에 대하여 2.96×10^{-6} ($\beta=4.529$)으로 나타났다. 방음벽의 경우는 교량부 20m고도의 지주(SB2)의 파괴 위험도는 거스트계수 1.9, 중요도계수 0.9를 적용한 경우 4.91×10^{-3} ($\beta=2.582$)로써 가장 크게 평가되었다. 특히, 현행방음벽 설계에 고려되지 않은 거스트계수와 중요도계수를 달리 적용한 결과 위험도가 4.91×10^{-3} (거스트계수: 1.9, 중요도계수: 0.9) ~ 3.47×10^{-4} (거스트계수: 1.0, 중요도계수: 1.0)까지 최대 약 14배까지 차이를 보였다. 따라서, 도로표지판과 같이 방음벽에서도 거스트계수와 중요도계수를 도입함으로써 풍하중에 의한 위험도가 합리적으로 평가되어 도로시설물의 일관성 있는 위험도 관리가 필요한 것으로 판단된다. 이러한 맥락에서 방음벽의 위험도가 최대 4.91×10^{-3} 로써 신뢰도 지수로 2.582로 나타난 것은 AASHTO LRFD(2007) 설계기준의 신뢰도 지수 3.5보다 매우 작은 값으로 상당한 위험이 내포되어 있다고 볼 수 있다. 물론 AASHTO의 교량 위험도 기준과 방음벽의 위험도를 동일한 중요도로 평가할 수는 없겠으나 그렇다고 해서 방음벽의 붕괴위험을 간과할 수는 없다.

5. 결론

풍하중 위험도 평가방법을 이용하여 고속도로시설물 중 사각지주형 도로표지 구조물과 방음벽에 대한 위험도를 산정하였다. 여수지역 관측소 자료를 이용한 풍하중 위험도 평가결과 방음벽 지주의 위험도가 사각지주형 도로표지구조물 위험도의 최대 14배에 이르는 것으로 평가되었다. 이것은 현재 방음벽의 내풍설계를 위한 풍압식이 도로표지판의 것과 상이

하므로써 발생하는 것이다. 따라서, 방음벽의 내풍설계를 위한 설계풍압식을 도로표지판에 준하여 개정하는 것이 필요하며 궁극적으로는 내풍설계 식을 결정할 때 위험도의 개념을 도입하므로써 도로시설물이 가지는 위험도가 합리적으로 조정될 수 있도록 하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사(도로교통연구원)의 연구비 지원에 의해 수행되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

공민식, 가훈, 손용춘, 임성순 (2006) 스펙트럼 분석에 의한 풍하중을 받는 도로표지구조물의 동적응답해석, 한국강구조학회학술발표회논문집, pp. 367-372.

권순덕, 이성로 (2009) 단기 관측을 통한 설계풍속 추정, 대한토목학회논문집, 제29권, 제3A호, pp. 209~216.

김동현, 오병철, 전인식 (2005) 풍속변화가 컨테이너크레인 타이다운의 안전율에 미치는 영향, 대한토목학회논문집, 제25권, 제6A호, pp. 1127~1131.

김동현, 임종권, 고재필 (2007) 풍하중의 변동성을 고려한 LNG 하역구조물의 신뢰성해석, 한국강구조학회논문집, 제19권, 제2호, pp. 223-231.

손용춘, 유길환, 박수영, 임종국, 김주일 (2007) 횡과 비틀림을 받는 도로 표지판의 내력에 관한 FEM해석 고찰, 한국강구조학회학술발표회논문집, pp. 129~134.

허정원 (2003) 실제 구조물의 유한요소 신뢰성해석을 위한 복합 알고리즘, 대한토목학회논문집, 제23권, 제6A호, pp. 1321-1329.

건설교통부(1997) 도로표지판관련규정집.

건설교통부(2003) 도로표지판관련규정집.

건설교통부(2005) 도로표지의 구조 안전성 확보를 위한 연구.

건설교통부(2006) 도로표지판관련규정집.

한국도로공사(2002) 방음벽 설치기준 개선검토.

한국도로공사(2004) 고속도로시설물 내풍설계연구.

J. Cheng and R. Xiao(2005) Serviceability reliability analysis of cable-stayed bridges, *Structural Engineering & Mechanics*, Vol. 20, No. 6, pp. 609-630.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2007) *AASHTO LRFD CODE Bridge Design Specifications*, 4th ed.
(접수일자 : 2008. 10. 1 / 심사일 2008. 10. 23 / 게재확정일 2009. 12. 2)