

■ 論 文 ■

해상교량의 풍하중을 고려한 제한 속도 도출 방안

A Study on Variable Speed Limit Considering Wind Resistance on Off-Shore Bridge

이 선 하

(공주대학교 건설환경공학부 조교수)

강 희 찬

(공주대학교 건설환경공학부 석사과정)

목 차

- I. 서론
- II. 구동력과 주행저항의 이론적 고찰
 - 1. 차량의 구동력
 - 2. 주행저항
- III. 풍하중 고려 적정 운행속도 도출
 - 1. 해상교량 입지지역의 기상상황
- 2. 풍속에 따른 구동력과 주행저항 산출
- 3. 적정운행속도 산출
- IV. 구축방안
- V. 결론
- 참고문헌

Key Words : 풍하중, 구동력, 주행저항, 주행성능선도, 구동력/주행속도선도, 공기저항(Air Resistance), WIS, VMS

요 약

우리나라 해안지역은 강풍의 빈도가 높고 세기도 크지만 아직까지 바람을 고려한 적정속도를 안내하는 시스템은 전무한 상태이다. 강풍이 부는 곳에서의 무리한 주행은 핸들 조작의 어려움으로 인한 사고 위험과 풍속을 고려하지 않은 과속으로 인한 전복사고 등의 위험이 크다. 이러한 측면에서 바람 잦은 곳 중 주요지점에 기상정보센서(WIS: Weather Information Sensor)를 설치하고 이로부터 실시간으로 측정된 기상정보를 바탕으로 차량의 구동력과 주행저항의 크기를 극대화하는 적정속도를 VMS를 통하여 제공하는 방안이 필요하다.

목포시에 건설예정인 목포대교를 대상으로 풍속별 적정 속도를 산출한 결과, 연중 평균 풍향인 남풍일 경우 교량의 입지(정남-북)에 따라 남측으로 주행하는 차량에 대하여 풍속이 8m/h이상일 경우에는 평상시와 달리 돌풍을 대비한 여유구동력이 큰 60km/h의 속도를 안내해 주는 것이 바람직 한 것으로 나타났다. 또한 2003년도에 발생한 태풍 매미 시 목포시의 풍속인 18m/s 일 경우 시속 40km/h에서의 주행저항은 1131N으로써, 이미 변속 4단에서의 구동력(약 1054N)으로는 극복할 수 없으므로 3단 이하에서 변속을 하여야 하며, 이때의 적정속도는 주행저항과 구동력간의 차이가 가장 크게 발생하는 40km/h인 것으로 분석되었다.

I. 서론

半島 국가로서 우리나라는 육지와 도서를 연결하는 해상교량 또는 연육교의 건설이 활발히 진행되고 있다. 해상교량은 입지적 여건 상 풍하중의 영향을 강하게 받게 되며, 이는 교각과 상판 등의 구조물 설계 시 역학계산에 반영되고 있다. 그러나 풍하중은 풍속의 방향에 따라 교량을 운행하는 차량, 특히 풍하중에 노출되는 면적이 넓은 대형차량에 대해서는 차량의 구동력에 대한 저항력의 큰 부분을 차지하게 된다. 차량이 움직이는 힘은 엔진의 출력이 차륜에 전달되는 구동력과 도로조건에 의하여 결정되는 다양한 저항력과의 대응관계에 의하여 결정된다. 차량에 대한 저항력은 풍속에 따른 공기저항, 노면과의 마찰에 의한 구름저항, 도로면의 종단경사에 따른 기울기저항 및 가속저항과 견인저항으로 구성된다. 따라서 일정 규모 이상의 강풍이 불 경우 차량의 구동력과 저항력을 산출하여 이들의 차이를 극대화하는 적정속도를 도출하여 차량의 운행능력을 높일 수 있다.

본 논문은 바람의 영향이 큰 교량에 기상정보센서(WIS: Weather Information Sensor)를 설치하여 실시간으로 측정된 풍속을 바탕으로 산출한 차량의 적정속도를 가변전광판(VMS: Variable Message Signboard)에 제공하여 운행의 효율성을 높이는 방안을 제시한다.

II. 구동력과 주행저항의 이론적 고찰

자동차는 공기저항, 구름저항, 기울기저항 등의 힘이 엔진출력에 의한 구동력에 의하여 극복되어 주행하게 된다. 구동력은 엔진으로부터 차륜에 전달되어 차량을 전진시키기 위한 힘을 의미하며 엔진 회전력, 동력전달계의 효율성과 관계가 있다. 구동력은 특히 차량의 주행성능인 최고속도, 등판능력과 가속능력 등을 결정한다.

주행저항(Running resistance or tractive resistance)은 차량이 주행 시 자동차 전체에 작용하는 저항으로 구름저항, 기울기저항(등판저항), 공기저항, 가속저항, 견인저항 등으로 구성된다. 1)

1. 차량의 구동력

1) 구동력(tractive force) F_A

차량의 구동력은 차종에 따른 엔진의 출력능력이 결정한다. 도로 설계 시 적용하는 설계기준 차량은 소형자동차, 대형자동차와 세미트레일러로 구분되며, 본 논문에서는 이 중 가장 일반적인 소형자동차 즉 승용차의 구동력을 중심으로 내용을 전개하였다.

차량의 구동력은 기관회전속도에 따른 제동출력과 회전력에 의해 발생하게 되며, 구동력과 주행속도는 각각 엔진의 회전토크, 타이어의 동하중 반지름의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{구동력 } (F_A) = \frac{M_{wh}}{r_{dyn}} \tag{1}$$

여기서, M_{wh} : 차량의 구동토크
 r_{dyn} : 타이어의 동하중 반지름

구동륜의 미끄럼 손실을 무시하면 차륜에서의 출력(P_A)은 다음과 같다.

$$P_A = F_A v \tag{2}$$

가 되며 차륜에 전달되는 구동력(F_A)과 엔진에서 발생된 회전토크(M_M)와의 관계는 다음과 같다.

$$F_A = \frac{M_M \cdot \eta_T \cdot i_D \cdot i_G}{r_{dyn}} [N] \tag{3}$$

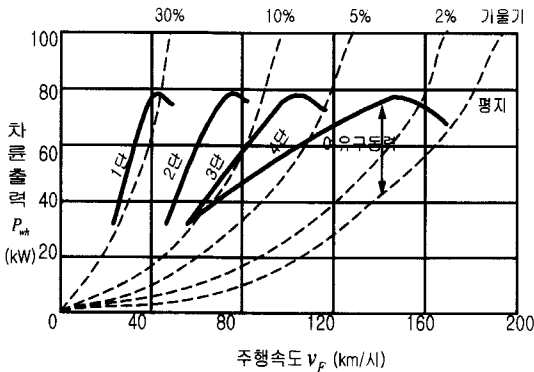
여기서, M_M : 회전토크
 η_T : 동력전달계의 효율 (약 0.85 0.95)
 i_D : 종감속비
 i_G : 변속비

2) 주행성능선도

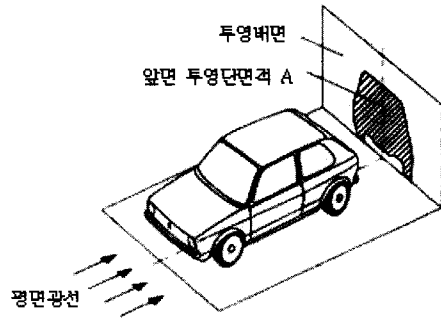
엔진으로부터 차륜에 전달된 구동력은 대부분 자동차 주행속도와 관련시켜 도식화되며 이를 주행성능선도라 한다.

주행성능선도는 주행저항과 구동력을 하나의 그래프에 도시하여 임의의 점에서 주행상태를 쉽게 판독할 수 있으며 주행선도상에서 구동력과 주행저항의 차이는 여유 구동력으로서 가속 또는 등판에 사용한다.

1) 박보영 · 하승진 (2001) '차량동역학' pp.117~144, 중원사자동차연구회 '자동차공학' pp.15-13~15-33 참고.



〈그림 1〉 주행성능선도



〈그림 2〉 차량의 앞면투영면적(A)

2. 주행저항

주행저항이란 자동차가 주행할 때 받는 저항으로서 자동차를 전진시키기 위해 엔진으로부터 차륜에 전달되는 구동력을 결정하게 된다. 주행저항과 엔진 회전력, 동력전달계의 상호관계는 최고속도와 등판능력, 가속능력 등의 주행성능을 결정하게 된다.

주행저항은 차륜과 자동차 전체에 작용하며 자동차 설계 시에는 전진운동에 대하여 차륜에 작용하는 차륜저항과 자동차 전체에 작용하는 공기저항, 기울기저항(등판저항), 가속저항이 적용되고 있다.

1) 공기저항 (Air Resistance)

해안에서 빈번히 발생하는 강풍은 주행하는 차량에게 큰 저항력으로 작용하며, 특히 교량일 경우 주변에 방풍작용을 하는 자연조건이 갖추어져 있지 않은 경우가 대부분이다. 풍속에 따른 차량의 풍하중은 공기저항으로서 해석이 필요하다. 공기유동 중에 노출된 물체가 운동할 때는 공기저항 F_L 을 받게 되며, 이는 앞면투영면적, 풍향과 자동차 주행방향에 따른 주행풍의 합성속도, 공기밀도와 공기저항계수에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$F_L = c_w A \frac{\rho}{2} v_{res}^2 [N] \quad (4)$$

여기서, c_w : 공기저항계수

A : 앞면투영면적 [m^2]

ρ : 공기밀도 [kg/m^3]

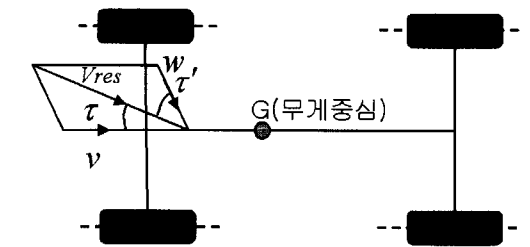
V_{res} : 바람과 자동차의 합성속도

공기저항출력 P_L 은 공기저항과 차량의 속도에 따라 식(5)와 같이 산출된다.

$$P_L = F_L v = c_w A \frac{\rho}{2} v_{res}^2 v [watt] \quad (5)$$

풍하중이 적용되는 앞면투영면적(Frontal Projected Area) A 는 자동차 전면의 연면적에 자동차를 투영했을 때의 단면적(m^2)으로 차량 제작도면으로부터 구할 수 있으며 근사식은 $A \approx 0.8bh$ 로서 자동차의 폭(b)와 높이(h)에 의하여 결정된다.

주행풍의 유입각에 따른 자동차에 유입되는 주행풍의 합성속도는 바람과 차축의 각 정의에 따라 〈그림 3〉와 같이 산출한다. 바람이 측면에서 불 때, 주행속도와 풍속에 따른 주행풍의 합성속도는 유입각과 상관관계에 있으며 식(6)으로 나타난다. 그러나 실제 주행 중에는 도로의 진행경로와 바람의 방향이 일정하지 않으므로 유입각은 계속적으로 변화하게 된다.

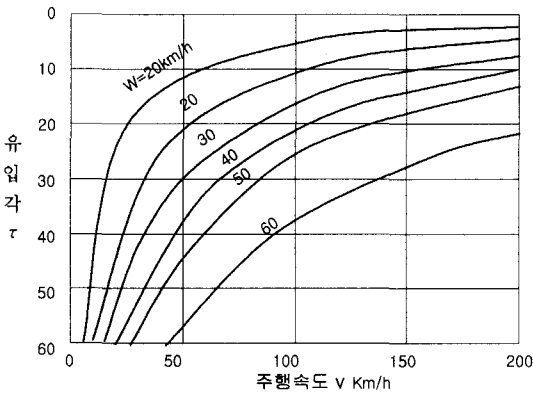
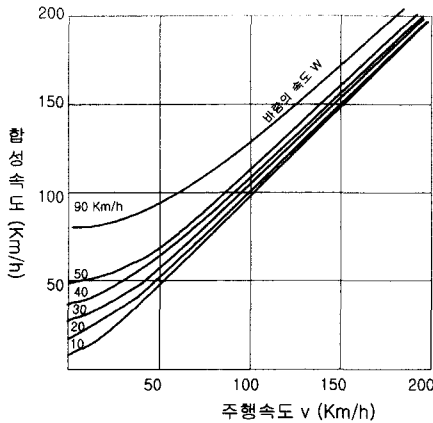


코사인법칙

$$V_{res}^2 = v^2 + w^2 - 2 \cdot v \cdot w \cdot \cos(180^\circ - \tau')$$



〈그림 3〉 자동차에 유입되는 주행풍의 합성속도



〈그림 4〉 합성속도

〈표 1〉 차량형태에 따른 공기저항 계수

차종	공기저항계수
무게차	0.5~0.7
스테이션 웨곤	0.5~0.6
폰트형	0.4~0.35
쇠기형 쿠퍼 전조등 범퍼일체 차차체부속 휠 자체하부 피복된냉각풍 유입 최적화	0.3~0.4
전조등과 모든차륜은 차체 내에 차체하부피복	0.2~0.25
K-형	0.23
최적유선형	0.15~0.20
화물자동차·피견인차	0.8~1.5
2륜차	0.6~0.7
버스	0.6~0.7
유선형버스	0.3~0.4

$$V_{res} = \sqrt{v^2 + w^2 + 2vw \cos \tau} \quad (6)$$

여기서,

v : 직진 주행하는 자동차의 속도

w : 바람의 속도

V_{res} : 자동차에 유입되는 주행풍의 합성속도

τ : 자체의 길이 방향축에 대한 주행풍의 유입각

τ' : 자동차 종방향 축선과 풍향이 이루는각

이때 주행풍의 유입각은 식(7)로 나타난다.

$$\cos \tau = \frac{v^2 + v'^2 - w^2}{2v_{res}v}$$

$$\rightarrow v_{res} \cos \tau = v + w \cos \tau' \quad (7)$$

바람이 정면에서 불 때; $\tau' = 0^\circ \rightarrow v_{res} = v + w$

바람이 후방에서 불 때; $\tau' = 180^\circ \rightarrow v_{res} = v - w$

바람이 측면에서 불 때; $\tau' = 90^\circ$

$$\rightarrow v_{res} = \sqrt{v^2 + w^2}, \quad \tan \tau = \frac{w}{v}$$

아래그림은 바람이 측면에서 불 때, 주행속도(v)와 바람의 속도(w)에 따른 주행풍의 합성속도(v_{res})와 유입각(τ)의 상관관계를 나타낸 것이다.

공기밀도 ρ 는 공기압력 p (bar)과 공기온도 t ($^\circ\text{C}$)에 따라 식(8)에 의하여 산출한다.

$$\frac{348.7p(\text{bar})}{273.2 + t(\text{C})} [\text{kg/m}^3] \quad (8)$$

공기저항계수는 자동차 형상, 표면 거칠기, 라디에이터 그릴의 크기, 전면유리의 경사각도와 자동차 후면 유리에서의 와류(turbulence) 등의 공기역학적 형상에 의하여 결정된다. 〈표 1〉은 차량의 형태에 따른 공기저항 계수를 나타내고 있다.

2) 구름저항 (Rolling Resistance)

구름저항이란 자동차가 수평 노면 상을 굴러 이동할 때 받는 저항을 총괄한 것으로서 평지를 직진 주행하는 자동차의 차륜저항의 대부분은 구름저항이 차지하며 타

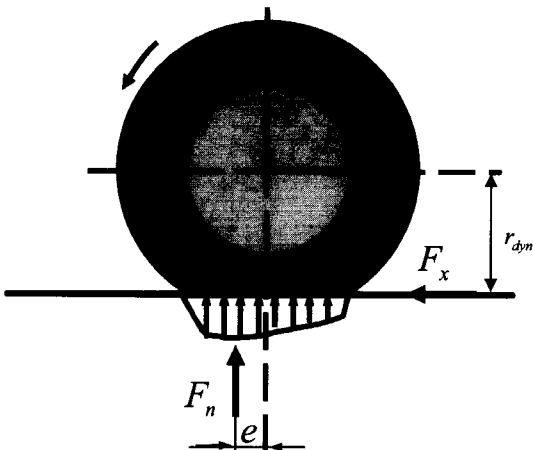
이어를 변형시키는 저항, 자동차 각부의 마찰(내부저항), 노면을 변형시키는 저항 등으로 구성된다.

구름저항의 대부분은 평지주행 시 회전하는 타이어의 형태를 변화시키는데 소요되는 일(타이어의 변형 일)에 의해서 발생하며 특히 노면이 연약할 경우 혹은 수막현상 하에서는 지표면(혹은 수막)의 변형에 소요되는 일도 고려해야 한다.

자동차 각부의 마찰(내부마찰)은 동력전달계의 효율로서 고려되고 구름저항에서는 내부저항을 제외한 외부저항만을 취급하게 된다.

구름저항에서 취급하는 외부저항은 타이어의 변형저항, 노면의 변형저항이며 포장도로의 표면은 변형되지 않은 것으로 가정하고 타이어의 변형만을 고려한다.

타이어의 변형과 구름저항과의 상관관계를 그림으로 나타내면 <그림 5>와 같다.



<그림 5> 전동하는 차륜에 작용하는 힘

F_z : 차륜의 허브 중심에 수직으로 작용하는 힘

F_n : F_z 에 대한 반력

e : 구름마찰의 레버 암

r_{dyn} : 타이어의 동하중 반지름(dynamic radius-주행 중인 타이어의 반경)

F_z (차륜의 허브 중심에 수직으로 작용하는 힘)와 F_n (반력)은 타이어가 노면에 압착되어 접지면에 생기게 된다.

가속되지 않고 자유로이 굴러가는 차륜에서의 모멘트 균형은 $r_{dyn}F_x = eF_n$ 으로 나타낼 수 있으며 총반

력(F_n)은 접지면의 중심거리로부터의 거리 e 에 적용된다.

$$\text{구름저항 } F_R (= -F_x) \text{는 } F_R = \frac{e}{r_{dyn}} F_n$$

구름저항은 수직력 혹은 반력에 비례하며, 구름저항계수는 타이어의 변형(e)이 클수록, 타이어의 반지름(r_{dyn})이 작을수록 크다.

(1) 구름저항계수(f_R)

$$F_R = f_R F_n \tag{9}$$

F_R : 구름저항

f_R : 구름저항계수

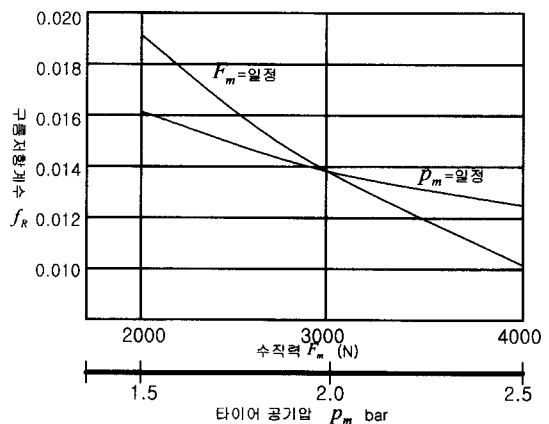
F_n : 총반력

타이어의 변형은 공기압과 수직력의 영향을 크게 받으며 일반적으로 공기압이 낮을 경우 구름저항계수는 증가하게 된다. 구름저항은 이외에도 타이어 형식(구조, 고무재료 배합, 직경)과 주행속도의 영향을 받는다.

<그림 6>은 수직력과 타이어 공기압이 각각 일정할 경우, 구름저항계수의 변화를 나타낸 것이다.

노면이 연약할 경우에는 노면의 변형정도가 구름저항계수에 큰 영향을 미치게 되며 Off-road 차량의 경우는 속도와 관계없이 구름저항계수를 정의 할 수 있다.

딱딱한 노면, 즉 포장도로에서의 구름저항 계수는 속도와 관계없이 일정한 부분과 속도의 영향을 받는 부



<그림 6> 타이어 공기압에 따른 공기저항계수

분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$f_R = f_{R_0} + f_{R_1}(v) + f_{R_n}(v^n) \quad (10)$$

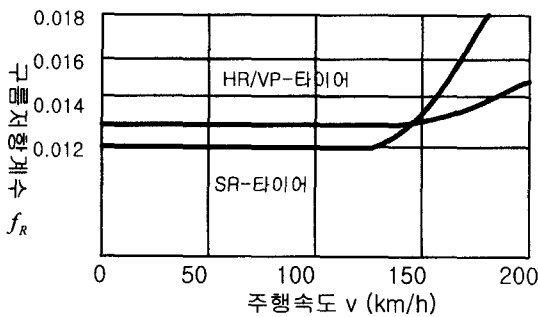
일반적으로 구름저항 계수는 주행속도 150km/h 까지는 속도와 관계없이 거의 직선적으로 나타난다. 즉 $f_{Rn}(v^n) \approx 0$ 이나, 150km/h 이상의 속도에서는 고차항을 고려하여야 한다.

최근의 실험결과, 승용자동차용 타이어에는 다음 근사식을 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

$$f_R = f_{R_0} + f_{R_1} \frac{v}{100} + f_{R_2} \frac{v^4}{100} \quad (11)$$

아래 그림은 주행속도가 구름저항계수에 미치는 영향을 조사한 것이다.

젖은 도로상에서는 추가로 물의 비산저항을 고려해야 한다. 타이어의 접지면에 존재하는 물은 강제적으로 접지면 외부로 배출되며 이때의 추가저항은 수막의 두께, 타이어의 폭, 주행속도의 영향을 받는다. 수막이 두껍고, 주행속도가 높을 경우 수막현상이 발생한다.



〈그림 7〉 주행속도에 대한 구름저항계수의 변화($f_{R1} = 0$)

〈표 2〉 도로상태에 따른 구름저항계수(f_R)

노면의 상태	구름저항계수 f_R
양호한 아스팔트 포장도로	약 0.010
양호한 콘크리트 포장도로	약 0.011
양호한 블록 포장도로	약 0.020
잘 보수된 평탄한 미포장도로	약 0.040
보수가 잘 안된 돌이 많은 도로	약 0.080
자갈을 새로 간 도로	약 0.012
모래 또는 돌이 섞인 도로	약 0.016
완만한 모래땅 점토질 도로	약 0.20.3

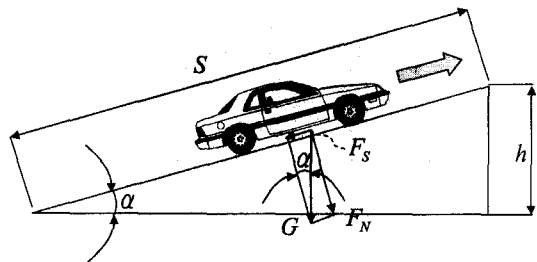
주 : 자동차 공학 (중원사 1994)

도로조건에 따른 저항계수는 도로표면의 상태에 절대적인 영향을 받으며 실험으로 구한 구름저항 계수는 〈표 2〉와 같다.

차륜저항으로는 이외에도 배어링저항, 토우 저항 (toe resistance) 등을 고려한다. 그러나 이들 저항은 〈구름저항에 비하면 아주 작으며 직진 시에는 대부분 무시해도 지장이 없다. 또한 커브주행 시에는 추가로 커브저항을 고려해야 한다.

3) 기울기 저항(Hill climbing resistance) F_s

기울기저항은 자동차가 비탈진 길을 오를 때, 중력의 진행 반대방향 분력에 의해 자동차의 중심에서 후방으로 작용하는 저항이다. 언덕길을 내려갈 때는 자동차 중량이 구동력을 지원하는 힘으로 작용하며 이는 차량의 무게와 노면기울기에 따라 식(12)로 표현된다.



$$\sin \alpha = \frac{h}{s} \quad \sin \alpha = \frac{F_s}{G} \quad G = m \cdot g$$

〈그림 8〉 기울기저항

$$F_s = mgsin\alpha[N] \quad (12)$$

4) 기타저항

이외에도 차량의 주행저항에는 가속저항과 견인저항이 있다.

(1) 가속저항(accelerating resistance), F_I

가속저항(F_I)은 주행 중인 자동차의 속도를 증가시키는데 필요한 힘을 말한다. 일반적으로 물체의 운동속도를 증가시키려면, 그 물체의 관성력을 극복해야 하기 때문에 가속저항을 관성저항(inertia resistance)이라고도 한다. 자동차를 1개의 강체로 보면 자동차가 가속될 때, 자동차 전체는 주행방향으로 가속, 병진가속 운동을 하게 된다. 내부의 엔진과 동력전달계의 회전부

폼들은 주행방향으로는 물론이고, 회전방향으로도 가속, 병진가속운동과 회전가속운동을 한다. 가속저항에서는 이들 회전부의 관성을 극복하는데 소요되는 회전력을 별도로 고려하여야 하므로 결과적으로 자동차의 질량이 증가된 것과 같다.

$$F_I = (m + \Delta m)a \text{ (N)} \tag{13}$$

여기서, m : 자동차의 총 질량 (kg)
 Δm : 회전부분 상당질량 (kg)
 a : 가속도 (m/s^2)

회전부분 상당질량(equivalent mass of rotation)은 자동차에 따라서 정해지는 고유 값으로써 회전부분의 형상, 질량, 회전속도에 따라 크게 달라진다.

회전부분 상당질량은 부품 도면이나 실물의 진동주기를 측정하여 구할 수 있으며 계산이 상당히 복잡하기 때문에 실제로는 자동차 총질량과 회전부분 상당질량의 비($\epsilon = \frac{\Delta m}{m}$)을 이용하며 ϵ 값은 총기어비(변속비·종감속비)의 제곱에 비례한다.

$$F_I = m(1 + \epsilon)a \tag{14}$$

상용자동차는 승용자동차에 비해 변속비가 크기 때문에, 가속저항도 증대된다. 즉 상용자동차는 승용자동차에 비해 가속에 많은 힘을 필요로 한다.

ϵ 의 경험 값은 다음과 같다.

승용자동차 5단 기어에서 $\epsilon = 0.05 \sim 0.07$
 1단 기어에서 $\epsilon = 0.25 \sim 0.45$

(2) 견인저항 (towing resistance), F_T

견인저항은 피견인차의 모든 저항의 합을 의미한다. 피견인차 개개의 저항은 앞에서와 동일한 방법으로 구하며 다만 피견인차의 공기저항과 선회저항은 견인차와는 크게 다르다. 이는 피견인차의 공기저항은 견인차와 피견인차 주위의 공기유동 때문에 크게 달라지기 때문이다. 견인차와 피견인차의 전면투영면적(A)이 같을 경우 피견인차의 공기저항은 일반적으로 견인차의 공기저항에 10~15%를 추가한다.

또한 커브 선회시에는 피견인차의 커브 저항이 크게 증가하기 때문에 정확한 견인저항을 계산하기 위해서는 이들 요소들을 고려해야 한다.

5) 총 주행저항 (Total Tractive Resistance)

총 주행저항(F_w)은 자동차가 주행 중 상황별 운전점에서 자동차의 운동에 대하여 발생하는 개별 저항의 총 합(구름저항+공기저항+기울기저항+가속저항+견인저항)을 의미한다.

$$F_w = F_R + F_L + F_S + F_I + F_T \tag{15}$$

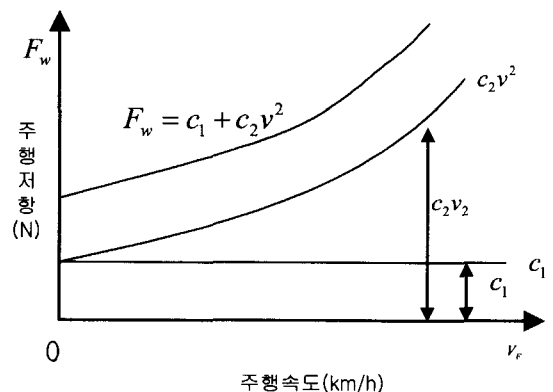
만약 자동차가 피견인차를 연결하지 않은 상태로 평지를 일정속도로 주행할 경우, 기울기저항 $F_S = 0$, 가속저항 $F_I = 0$, 견인저항 $F_T = 0$ 이 되므로, $F_w = F_R + F_L$ 가 된다.

주행저항은 속도의 함수 $F_w = f(v)$ 로 v 를 자동차의 주행속도라고 할 때 주행속도와 관계없이 일정한 저항(c_1)과 주행속도의 제곱에 비례하는 저항($C_2 v^2$)의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_w &= F_R + F_L + F_S + F_I \tag{16} \\ &= f_R mg + c_w A \frac{\rho}{2} V_{res}^2 + mg \sin \alpha + m(1 + \epsilon)a \\ &= [f_R + \sin \alpha + \frac{m(1 + \epsilon)a}{g}] mg + c_w A \frac{\rho}{2} v_{res}^2 \\ &= c_1 + c_2 v^2 \end{aligned}$$

여기서,

- c_1 : 상수로 취급할 수 있는 부분(자동차 질량, 차륜저항 등)
- $c_2 v^2$: 공기저항 요소와 같이 속도의 제곱에 비례하는 저항요소



<그림 9> 주행속도와 주행저항

III. 풍하중 고려 적정 운행속도 도출

앞에서 살펴본 바와 같이 강풍이 빈번한 경우 풍속을 함수로 한 차량의 주행저항을 산출하여 차량의 구동력과 관계에 의하여 운행의 쾌적성과 연료소모를 최적화 할 수 있는 방안이 필요하다. 이를 위하여 먼저 우리나라 해상교량이 입지한 지역의 기상개황 및 교량의 제원 등을 살펴본다.

1. 해상교량 입지지역의 기상상황

반도국가로서의 특성으로 인하여 최근 우리나라는 육지와 도서 또는 육지와 육지를 연결하는 장대교량의 건설이 활발히 진행되고 있다. 이 중 대표적인 대형교량으로서 이미 완공된 것으로 서해대교, 영종대교, 광안대교, 남해대교 등이 있으며 현재 계획 중인 교량으로는 목포의 목포대교가 있으며 이들 교량의 개요는 <표 3>과 같다.

이 들 해상교량이 입지한 지역의 바람과 관련한 주요 기상자료는 <표 4>와 같다.

본 연구에서는 이들 교량 중 목포에 건설예정인 목포대교의 도로설계 기준과 풍하중 자료를 바탕으로 풍

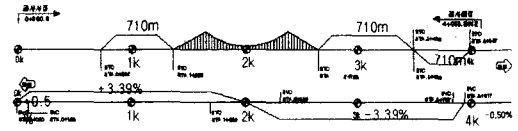
<표 3> 국내 주요 해상 연육교의 제원

제원\교량	영종대교	광안대교
가설위치	인천 서구 경서	부산 수영 광안
준공년도	2000	2002
교장	4420.0	4750.0
최대 경간장	300	500
상부구조	현수교	현수교
남해대교	서해대교	목포대교
경남남해	경기 평택	전남 목포시
1973	2000	-
440	7310.0	1440
404	470	840
현수교	사장교	현수교

주 : 대림산업주식회사, 유신코퍼레이션(2002) '한국의 교량'

<표 4> 주요 해상연육교 설치 지역의 바람 관련 지표

	부산	인천	남해	목포
최대풍속 [m/s]	35.0	35.0	18.5	42.4
풍향	NE	S	N	SE
최대순간풍속 [m/s]	43.0	40.0	37.2	39.2
풍향	NE	SW	NNW	NNW



교량형태	교장	최대 경간장	중단경사
현수교	1440	840	3.39%

<그림 10> 목포대교 기하구조

<표 5> 목포시 최근년도 기상현황

연도	최대풍속	폭풍횟수	안개빈도	서리빈도	최심적설 (cm)
1997	19	31	40	29	3.2
1998	18.7	19	31	19	8.2
1999	20.5	11	21	25	19.1
2000	21.4	30	18	44	4.1

<표 6> 과거 최대풍속 순위

연도	풍속/풍향
1904.8.18	42.4/SE
1905.9.2	42.3/SE
1940.7.23	39.5/S
1914.9.11	-8537.9/SSE

속별 적정운행 속도를 제공하는 방안을 제시한다. 목포대교는 총 연장 1440m의 (현수교)로 교량의 방향은 정남-북이며 3.4%의 중단경사로 설계되었다. 설계기준 자동차는 도로설계 지침에 따라 소형자동차이다.

다음은 본 교량이 입지한 목포시의 기상현황을 살펴 보면 연간 폭풍횟수가 최소 10회 이상 최대 31일까지 발생하며, 안개도 최대 40일까지 발생하여 연안도시로서의 기후적 특성이 교통흐름에 큰 영향을 미치게 될 것으로 추정할 수 있다.

2. 풍속에 따른 구동력과 주행저항 산출

1) 구동력 산출

앞에서 예시한 자동차의 구동력과 주행저항을 산출하기 위하여 필요한 차량의 제원과 각종 계수들을 설정하고 이에 따른 자동차의 구동력을 산출하였다.

자동차질량(m)	: 1380kg
구름저항계수(f_R)	: 0.01
공기저항계수(C_W)	: 0.42
앞면투영단면적(A)	: 2.3 m ²

공기밀도(ρ) : 1.23 kg/m^3
 타이어의 동하중 원주 $2\pi r_{dyn}$: 1760mm
 동력전달계효율(η_T) : 0.9

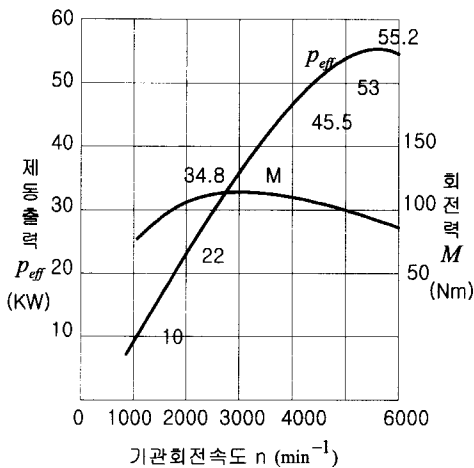
동력전달계의 총변속비는 각 단에서 다음과 같다.

총변속비(i_T) = 변속비(i_G) · 종감속비(i_p)
 $i_{r1} = 15.4, i_{r2} = 9.34, i_{r3} = 6.12, i_{r4} = 4.1$

자동차의 엔진성능곡선에서 판독한 회전속도, 회전토크와 제동출력은 <표 7>과 같다.

<표 7> 기관의 제동출력

회전속도 (n_M, min^{-1})	12000	2000	3000	4000	5000	6000
회전토크 (M_M, Nm)	80	105	111	109	101	88
제동출력 (P_{eff}, kW)	10	22	34.8	45.5	53	55.2



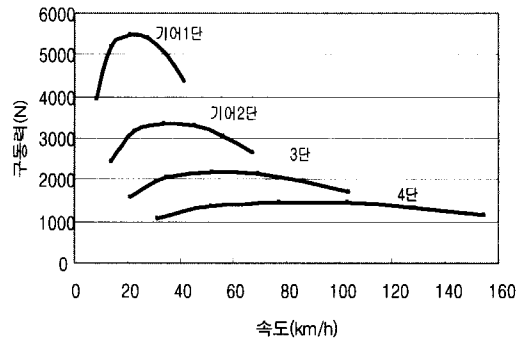
<그림 11> 기관의 제동출력

<표 8> 주행 속도에 따른 구동력 계산

기관 성능	기관의 회전속도 $n_x [\text{min}^{-1}]$	1200	2000	3000	4000	5000	6000
	기관의 회전토크 $M_M Nm$	80	105	111	109	101	88
	기관의 제동출력 $P_{eff} = [KW]$	10	22	34.8	45.5	53	55.2
구동력 (F_A) $F_A = \frac{M_M \cdot \eta_T \cdot i_T}{r_{ds}} [N]$	1단	3960(1)	5198(2)	5495(3)	5396(4)	5000(5)	4356(6)
	2단	2425	3183	3364	3304	3061	2667
	3단	1574	2066	2184	2144	1987	1731
	4단	1054	1384	1463	1436	1331	1160
주행속도(v) $v = \frac{3.6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{dyn} \cdot n_x}{60 \cdot 1000 \cdot i_T} [km/h]$	1단	8.2(1)	13.7(2)	20.6(3)	27.4(4)	34.3(5)	41.1(6)
	2단	13.4	22.4	33.6	44.8	56	67
	3단	20.7	34.5	51.7	69	86.2	103.5
	4단	30.8	51.5	77.2	103	128.7	154.5

<표 9> 기어에 따른 구동력과 속도

기관 성능	회전속도	1200	2000	3000	4000	5000	6000
	회전토크	80	105	111	109	101	88
	제동출력	10	22	34.8	45.5	53	55.2
구동력	1단	3960	5198	5495	5396	5000	4356
	2단	2425	3183	3364	3304	3061	2667
	3단	1574	2066	2184	2144	1987	1731
	4단	1054	1384	1463	1436	1331	1160
주행 속도	1단	8.2	13.7	20.6	27.4	34.3	41.1
	2단	13.4	22.4	33.6	44.8	56.0	67.0
	3단	20.7	34.5	51.7	69.0	86.2	103.5
	4단	30.8	51.5	77.2	103	128.7	154.5



<그림 12> 기어에 따른 구동력과 속도

엔진 성능곡선에서 주어진 값(n_M, M_m)으로부터 엔진의 제동출력을 구하고, 이를 이용하여 각 단에서의 구동력을 산출하고 이를 바탕으로 각 단에서 도달 가능한 속도를 구하여 <그림 12>에 표시하였다.

2) 주행저항 산출

(1) 공기저항 (F_L)

본 연구에서는 일정한 구간에서 바람의 세기에 따른

적정속도산출을 목표로 하고 있기 때문에 구름저항과 기울기 저항은 일정하며 바람 세기의 변화에 따른 공기 저항이 전체 주행저항을 좌우하게 된다.

본 예에서 설명하는 경우는 목포시의 연중 평균 풍향인 남풍일 경우 교량의 입지(정남-북)에 따라 남측으로 주행하는 차량의 공기저항을 정면에서 바람이 불 때 인 주행풍 유입각 0° 로 놓고 계산하였다.

속도가 40km/h, 풍속이 8m/s일 경우의 공기저항은 다음과 같이 산출된다.

$$\textcircled{1} v_{res} = \sqrt{v^2 + w^2 + 2vw \cos \tau} = v + w = 19.11$$

$$\textcircled{2} \text{앞투영면적 } A = 1.89 \text{ m}^2, \text{ 공기저항계수 } C_n = 0.329,$$

공기밀도 $\rho = 1.202 \text{ kg/m}^3$

$$\begin{aligned} \text{공기저항 } F_L &= C_n A \frac{\rho}{2} v_{res}^2 \\ &= 0.329 \times 1.89 \text{ m}^2 \times \frac{1.202 \text{ kg/m}^3}{2} \times (19.11 \text{ m/s})^2 \\ &= 136.48 [N] \end{aligned}$$

(2) 구름저항(F_R)

본 교량구간의 포장은 동일 재질의 건조한 상태의 아스팔트 포장으로 구름저항 계수는 $f_R = 0.01$ 로 일정하다. 이 경우 구름저항 계수는 다음과 같이 산출된다.

$$\begin{aligned} F_R &= f_R mg = 0.01 \times 1380 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \\ &= 153.24 [N] \end{aligned}$$

(3) 기울기 저항

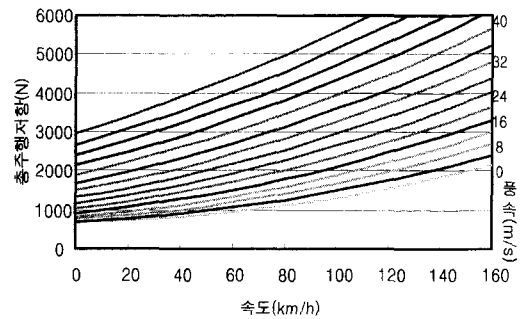
일반적으로 노면의 기울기는 백분율(%)로 표시되며, 본 교량구간의 기울기는 3.4%로서 길이 100m 일 때 높이 3.4m일 경우의 값이다. 기울기 백분율 $q = \sin \alpha$ 에서 각 α 가 작을 때 $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ 로 나타낼 수 있으며 기울기 저항 계산 시 5% 오차를 허용한다면, 기울기(q) 30%까지는 다음 식을 사용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin \alpha &\approx \tan \alpha = q \\ F_s &= mg \sin \alpha \text{ 에서 } F_s = mgq \\ &= 1380 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 0.034 = 459.82 \text{ N} \\ F_w &= F_R + F_L + F_s \\ &= 153.24 + 136.48 + 459.82 = 749.54 \text{ N} \end{aligned}$$

앞의 값들을 종합해 보면 노면이 건조한 아스팔트이 고 종단경사가 3.4%인 도로(교량)에서 40km/h로 달

<표 10> 속도와 바람에 따른 저항 값

속도 (km/h)	남풍(m/s)							
	0	8	16	24	32	40	48	56
0	663	703	826	1030	1316	1683	2132	2662
20	682	780	959	1220	1562	1986	2491	3078
40	741	896	1131	1449	1848	2328	2890	3534
60	840	1051	1343	1717	2173	2710	3329	4029
80	978	1245	1594	2025	2537	3131	3807	4564
100	1155	1479	1885	2372	2941	3592	4324	5138
120	1371	1752	2214	2758	3384	4091	4880	5751
140	1627	2064	2584	3184	3867	4631	5476	6403
160	1922	2416	2992	3649	4388	5209	6111	7095



<그림 13> 속도와 바람에 따른 저항 값

리는 승용차에 정면으로 8m/s의 바람이 불게 된다면 저항 값은 749.54N이 된다.

앞에서 구름저항과 기울기 저항이 일정할 때에 바람의 세기 변화와 속도에 따른 저항값 들을 정리하면 <표 10>과 같다.

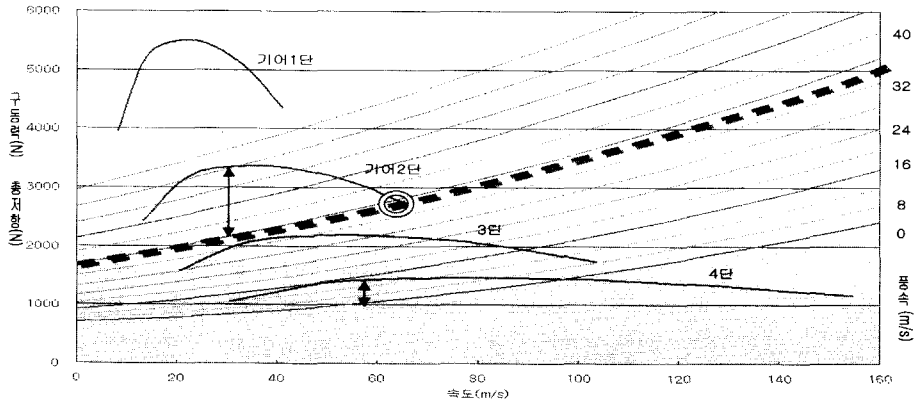
3. 적정운행속도 산출

구동력과 주행저항의 차이를 여유 구동력이라 한다. 여유 구동력은 차량이 가속이나 등판할 경우 사용될 수 있다. 바람은 세기와 방향의 변화가 크기 때문에 여유 구동력이 가장 클 때의 속도를 안내해 줌으로써 여유 구동력을 통해 급작스런 바람의 변화에 대비할 수 있다.

구동력 곡선은 정규분포와 비슷한 형태로 중심 부분(여유구동력이 가장 큰 부분)을 안내해줄 경우 안내속도 보다 빠르거나 느리게 가는 많은 차량들을 안전수준에서 포용할 수 있게 된다.

또한 여유 구동력이 없는 경우에는 가속이나 등판에 제약을 받아 운전의 쾌적성에도 좋지 않으므로 적정 운행속도는 여유구동력이 큰 지점에서 해주는 것이 좋다.

경사를 3.4%로 가정한 본 구간에서는 바람이 불지



〈그림 14〉 구동력과 저항값의 합성(구동력/주행속도 선도)

〈표 11〉 풍속에 따른 적정 속도의 예

풍속 (m/s)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
적정속도 (km/h)	60	50	50	50	40	40	40	40	30	30

않아도 다른 저항에 의한 적정속도가 변속 4단에서 시속 60km/h로 주행하는 것이 적절하지만 〈그림 14〉에서 알 수 있듯이 기어가 4단일 경우에는 구동력의 범위가 넓기 때문에 바람이 불지 않고 돌풍의 염려가 없는 평상시에는 여유구동력이 적어도 큰 문제가 없으므로 100km/h 이상을 안내해도 무방하다.

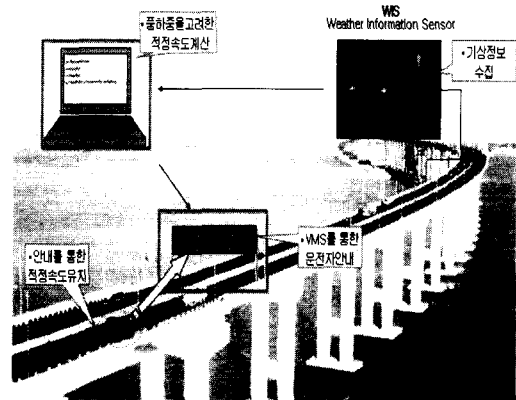
단 바람이 강해질 경우에는 관측된 값보다 큰 바람이 급작스럽게 불 경우가 있기 때문에 여유구동력을 최대한으로 하는 지점의 속도를 안내해 주는 것이 바람직하다

예를 들어 풍속이 8m/s 이상일 경우에는 평상시와 달리 돌풍을 대비한 여유구동력이 큰 60km/h의 속도를 안내해 주는 것이 좋고 또 지난 2003년도에 발생한 태풍 매미 시 목포시의 풍속인 18m/s 일 경우 시속 40km/h에서 주행저항은 1131N으로써, 이미 변속 3단과 4단에서의 구동력으로는 극복할 수 없으므로 적정속도는 주행저항과 구동력간의 차이가 가장 크게 발생하는 약 40km/h가 된다.

결론적으로 풍속이 4m/s 이상일 경우에는 돌풍의 가능성을 감안하여 여유구동력을 최대한으로 하는 지점의 속도로 〈표 11〉과 같은 값들을 얻을 수 있다.

IV. 구축방안

WIS에 의하여 실시간으로 측정된 풍하중에 따른 적



〈그림 15〉 풍하중을 고려한 적정속도 안내 방안 개념도

정속도를 VMS를 통하여 제시하기 위한 개념도는 〈그림 15〉와 같다. 현시 교량에 직접 설치한 WIS에서 수집되는 지역의 풍속과 기압을 통해 적정운행속도를 계산하여 VMS를 통해 운전자들에게 안내해 주는 것을 기본 틀로 한다.

1. WIS(Weather Information Sensor) 활용방안

풍하중, 노면상태, 안개, 폭설, 폭우등 기상 여건 변화를 실시간으로 원격 감시할 수 있는 노면 및 대기상태 관측계(종합적 도로기상정보 수집기)를 본 교량에 설치하여 대상 도로내의 실시간 기상변화를 관측할 수 있으며, 관측된 풍속, 풍향 및 노면상태나 온도, 습도, 기압 등의 정보를 데이터 분석 서버로 자료를 송신하여, 데이터베이스를 구축하게 된다.

WIS에서 수집된 기상 데이터들은 off line에서 데이터베이스로 구축되어 해당 구간의 기상예측 자료로

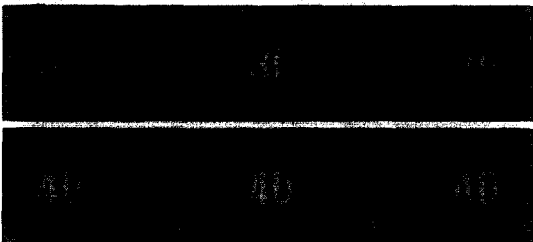
〈표 12〉 WIS(Weather Information Sensor)의 관측 범위

노면상태 관측계	<ul style="list-style-type: none"> 노면상태센서(노면상태), 지중온도센서(지중온도)
대기상태 관측계	<ul style="list-style-type: none"> 기압계(기압), 우량계(강우량), 시정계(시정) 온/습도계(온도, 습도), 순복사계(순복사량), 강우감지기(강우/강설유무), 풍속계(풍속), 풍향계(풍향)

사용되고 실시간으로 수집되는 자료를 VMS 메시지로 가공하여 운전자들에게 실시간으로 운행정보를 제공하게 된다.

2. 도로전광표지(VMS) 구축방안

앞에서 도출된 풍하중에 따른 적정운행 속도는 본 교량의 양측 진입부에 설치된 가변전광판(VMS: Variable Message Signboard)에 의하여 제공되며, 다음과 같은 메시지를 통해 이용자들에게 돌풍 상황과 적정 속도를 안내할 수 있다.



〈그림 16〉 VMS Message set

V. 결론

우리나라의 해상과 산간지역은 강풍의 빈도가 높고 세기도 크지만 아직까지 바람을 고려한 적정속도를 안내하는 시스템은 전무한 상태이다.

강풍이 부는 곳에서의 무리한 주행은 핸들 조작의 어려움으로 인한 사고 위험과 풍속을 고려하지 않은 과속으로 인한 전복사고 등의 위험이 크다.

특히 바람의 영향이 큰 산간지역과 도시지역은 대부분 관광지이고 버스 등의 대형 차량의 비중이 크기 때문에 자칫 대형사고가 일어날 수도 있다.

때문에 바람 잦은 곳 중 주요지점에 WIS를 설치하고 이로부터 실시간으로 측정된 기상정보를 바탕으로

차량의 구동력과 주행저항의 크기를 극대화하는 적정속도를 VMS를 통하여 제공하는 방안이 필요하다.

목포시에 건설예정인 목포대교를 대상으로 풍속별 적정 속도를 산출한 결과, 연중 평균 풍향인 남풍일 경우 교량의 입지(정남-북)에 따라 남측으로 주행하는 차량에 대하여 풍속이 8m/h이상일 경우에는 평상시와 달리 돌풍을 대비한 여유구동력이 큰 60km/h의 속도를 안내해주는 것이 바람직 한 것으로 나타났다. 또한 2003년도에 발생한 태풍 매미 시 목포시의 풍속인 18m/s 일 경우 시속 40km/h에서 주행저항은 1131N으로써, 이미 4단에서의 구동력(약 1054N)으로는 극복할 수 없으므로 적정속도는 주행저항과 구동력간의 차이가 가장 크게 발생하는 약 40km/h가 된다.

참고문헌

1. 중원사 자동차 연구회(1994) "자동차공학" pp.15_1~15_21.
2. 박보용·허승진(2001) '차량 동역학' pp.117~155.
3. 대림산업주식회사·유신코퍼레이션(2002) '한국의 교량'.
4. Beer, Ferdinand P(1997) "(Vector)동역학".
5. 강성중(2000)"자동차공학개론".
6. 강정규·정철훈(1999) "도시고속도로 교통류 관리를 위한 가변 전광판 정보 제공 방안 평가." 대한교통학회지, Vol.17 No.1, 대한교통학회, pp.91~102.
7. 최정순·손봉수·최재성(1999) "기상조건에 따른 도시고속도로 교통류변화 분석." 대한교통학회지, Vol.17 No.1, 대한교통학회, pp.29~39.
8. 박은미(2002) "VMS 자동제어 알고리즘 설계." 대한교통학회지, Vol.20 No.7, 대한교통학회, pp.177~183.
9. 신치현 (1995) "고속도로 연결로 접속부에서의 속도 추정 모형" 대한교통학회지 Vol.13 No.3, 대한교통학회, pp.99~120.
10. 김종표·장명순(1998) "합류특성에 의한 오르막차로 설계속도기준 연구" 대한교통학회지, Vol.16 No.2, 대한교통학회, pp.67~76.
11. 고종대·장명순(2002) "국도 4차로 곡선부에서 주행속도의 특성 및 모형" 대한교통학회지, Vol.20 No.7, 대한교통학회, pp.95~105.

12. Ahmed A. Sabana. John Wiley & Sons, Inc. (2001) "Computational Dynamics 2nd Edition".
13. Ferdinand P. Beer and E. Russell Johnston Jr. McGraw-Hill Book Co. (1998) "Vector Mechanics for Engineers Dynamics 3rd edition".
14. Riley F. William(1995) "Engineering Mechanics, Dynamics".
15. Mitschke,M.(1982) "Dynamik der Kratfahrzeuge"
16. Haug, k.(1952) Die Drehschwingungen in Kolbenmaschinen.
17. Tes, F.S., Mores, I.E., Hinkle, R.T(1963). "Mechanical Vibrations, Allyn and Bacon"
18. A. D. Deutchman,(1975) "Machine Design", Macmillan.

♣ 주 작 성 자 : 이선하

♣ 논문투고일 : 2004. 2. 19

논문심사일 : 2004. 3. 24 (1차)

2004. 8. 24 (2차)

2004. 9. 13 (3차)

심사판정일 : 2004. 9. 13

♣ 반론접수기한 : 2005. 2. 28