

교량 피로설계의 동시재하계수에 관한 연구

A Study on the Simultaneous Loading Factors for the Fatigue Design of Bridges

이 동 욱¹⁾ · 서 원 찬²⁾ · 최 재 원³⁾
Lee, Dong Uk Seo, Won Chan Choi, Jae Won

요 약 : 교량에 통행하는 차량의 대형화와 통행교통량의 급격한 증가로 인하여 교량부재에서 피로손상이 많이 보고되고 있다. 교량부재의 피로손상을 방지하고, 안전을 유지하기 위해서 합리적인 피로조사를 실시하여야 한다. 교량의 피로설계에서는 차량 1대만 재하시키는 방법을 채택하고 있으나, 실제 교량의 상부에 차량이 1대만 통과하는 일은 거의 없다. 통상 교량의 상부에는 복수의 차량이 동시에 재하되므로 합리적인 피로설계를 위해서는 동시재하의 영향을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 도로교를 통행하는 차량하중에 대해 선형중첩법과 교통류의 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 변동응력해석을 실시하고, 피로손상도를 구함으로써 통행차량의 차축하중에 대한 동시재하의 영향에 대해 연구하였다.

ABSTRACT: Since vehicles become large and heavy and traffic volume is increased rapidly, many fatigue damages have been reported in bridge members. In order to prevent fatigue damages of bridge members and maintain safety it is essential to perform rational fatigue check. Only one vehicle is loaded on a bridge deck for the fatigue design. But in reality it is seldom that only one vehicle passes on a bridge deck. Usually more than two vehicles are passing on a bridge deck simultaneously. Therefore, it is necessary to consider the influence of simultaneous loading for a rational fatigue design. In this study, the influence of simultaneous loading is investigated by performing stress variation analysis due to vehicle load on the basis of linear superposition method and Monte-Carlo simulation of traffic flow, and then calculating the measure of fatigue damages.

핵심용어 : 피로설계, 동시재하, 몬테카를로 시뮬레이션, 선형중첩법

KEYWORDS : Fatigue Design, Simultaneous Loading, Monte-Carlo Simulation, Linear Superposition Method

1) 정희원, 부경대학교 토목공학과 교수, 공학박사
2) 정희원, 부경대학교 생산가공공학과 조교수, 공학박사
3) 부경대학교 건설공학과, 공학석사

본 논문에 대한 토의를 2000년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

산업의 발달과 유통기구의 변화에 따라 차량이 대형화되고 있으며, 통행교통량도 급격히 증가하여 차륜하중의 재하회수도 증가하는 추세에 있다. 강교에서도 자중의 경감을 위해 고강도 강재의 사용이 증가하고 있으며, 이에 따라 설계하중에서 활하중이 차지하는 비율이 커져 활하중에 의한 부재의 피로손상사례가 국내외에서 보고되고 있다^{1), 2)}.

강교의 경우 내하력 감소 및 수명을 단축하는 요인으로 유지관리 부족, 설계착오에 의한 국부좌굴 등을 제외하면, 교량의 수명감소는 교량을 통과하는 크고 작은 차량중량에 따른 부재의 피로현상으로부터 기인한다고 볼 수 있다. 실제로 미국이나 일본 등 선진국에서는 장기간에 걸쳐 막대한 연구비를 투입하여 도로교를 주행하는 차량들의 중량과 차종구성 및 차두간격 등 필요한 데이터를 축적함과 동시에 많은 피로시험을 병행함으로써 자국의 실정에 적절한 피로설계기준을 제정하고 있다^{3), 4)}. 우리나라에 있어서도 도로교의 피로설계에 대한 차종구성 및 차두간격 등에 필요한 데이터를 조사하고 있으나, 아직까지 만족할만한 데이터는 부족한 실정이다.

일반적으로 교량의 피로설계시 차량 1대만 재하시키는 방법을 채택하고 있다. 그러나 도로교에 차량이 주행할 때 교량상부를 1대만 통과하는 일은 거의 없고 통상 복수의 차량이 동시에 재하한다. 또한 복수차선의 다주형교에 대해서는 하중의 횡분배작용도 고려하지 않으면 안되므로 합리적인 피로설계하중을 산정하기 위해서는 동시재하의 영향을 고려하여야 한다^{5)~9)}.

본 논문은 도로교를 통행하는 차륜하중에 의한 응력범위빈도분포에 대해 선형중첩법과 교통류의 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 변동응력해석을 실시하여 통행차량의 차륜하중에 대한 동시재하의 영향에 대해 연구하였다.

2. 시뮬레이션에 의한 변동응력해석

교통류를 교통량과 그의 차종구성으로 대표시켜 자동차의 배열, 중량 및 차간거리를 확률변화량으로써 자동차 하중열에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하고, 하중열이 도로교상을 통과할 때 발생하는 응력변동을 해석한다. 해석된 응력변동은 레인플로우법에 의해 응력범위의 빈도분포로 변환한다. 그림 1에 자동차 하중열의 시뮬레이션 흐름도를 나타낸다.

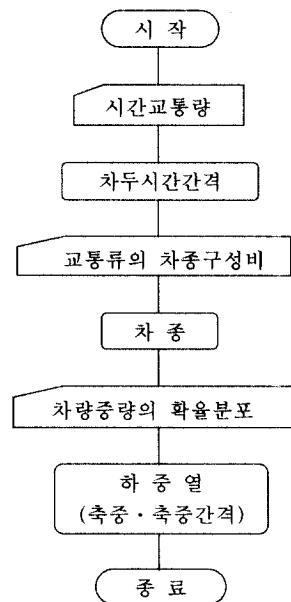


그림 1. 하중열의 시뮬레이션

2.1 차두시간간격

차량의 차두시간간격은 차종구성을, 시간당 통과대수와 관련되며, 그 분포모델은 차종구성을, 자유차와 추종차의 구성, 상대속도의 분포, 교통류의 지체여부에 따라 달라진다. 현재까지의 연구결과에 따라 본 논문에서는 교량에 진입하는 차량의 차두시간간격을 자유도 $n=3$ 인 어랭분포(Erlang distribution)로 하였다^{10)~13)}. 자유도 $n=3$ 인 어랭분포의 밀도함수는 식 (1)과 같다.

$$f(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t} (\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} \quad (1)$$

평균값 : $E(t) = n/\lambda$

분산 : n/λ^2

평균차두간격은 시간교통량을 사용하여 식 (2)에서 구할 수 있다.

$$E(t) = 3600/Q \quad (2)$$

여기서, $E(t)$: 평균차두시간간격(sec)

Q : 시간교통량(대/hr)

시뮬레이션에 기초한 응력변동해석을 실시할 때 시뮬레이션을 실시하는 차량의 대수가 문제이다. 따라서 시간교통량을 1000대, 속도를 70km/h, 차선폭을 3.5m로 하고, 지간이 50m인 단순형교의 지간중앙에서 휨모멘트 영향선에 시뮬레이션의 대수를 100대~50만대로 변화시켜 응력변동해석을 실시하였다. 그 결과 그림 2에 나타낸 바와 같이 시뮬레이션 대수가 2만대 이상에서는 최대응력범위가 시뮬레이션 대수와 거의 일정하게 나타나 이후의 해석을 실시할 때에는 시뮬레이션 대수를 1차선당 2만대로 하였다⁽¹⁴⁾.

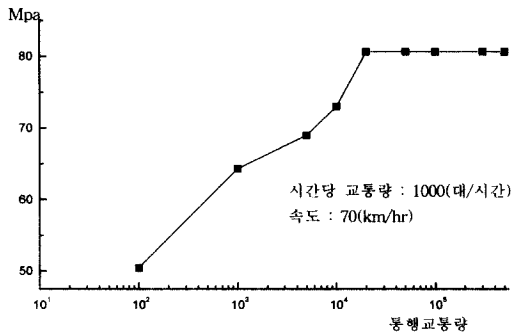


그림 2. 시뮬레이션에 의한 통행차량 수

2.2 차량형식 및 중량분포

도로교를 주행하는 차량의 크기와 중량은 다양

하다. 이와 같이 다양한 차량의 주행에 의해 발생하는 응력변동을 구하기 위해서는 형식 및 중량에 의해 차량을 어느 정도 분류하는 것이 유효하다. 그러나 국내에서는 건설교통부에서 제정한 차종분류가 있으나 축간거리의 규정은 없다. 따라서 본 연구에서는 한국도로공사의 교통량 분석 자료, 국내에 주행중인 각 차량의 제원 및 우리나라와 교통실정이 유사한 일본의 자료를 참고하여 8개의 형식으로 차량을 분류하였다^(5), 11)~18). 그림 3에 8개 형식의 차량모델을 나타내며, 그림 3의 차량모델에 대한 각 차량의 차종별 전장, 차폭, 최대중량, 최소중량, 평균중량, 표준편차를 표 1에 나타낸다^(5), 12), 15). 그리고 그림 3에서 차종별 차량의 중량과 확률밀도와의 관계는 대수정규분포형을 나타내고 있다^(12), 15).

표 1. 차량의 종류 및 중량특성

차종	전장 (m)	차폭 (m)	중량 (ton)			표준편차	
			평균	최대	최소		
소형차	자동차 (2축)	4.48	1.48	1.66	3.10	0.80	0.53
	소형트럭 (2축)	6.67	1.66	7.05	9.99	1.32	3.44
대형차	대형트럭 (2축)	9.80	2.05	15.20	64.00	12.00	3.01
	대형트럭 (3축)	10.12	2.05	27.58	72.90	22.00	4.32
	대형덤프 (4축)	10.78	2.05	39.00	80.50	30.00	5.86
	트레일러 (4축)	14.55	2.05	35.15	59.80	30.00	4.87
	트레일러 (5축)	15.40	2.05	41.50	80.50	34.00	5.09
	버스 (2축)	10.95	2.04	14.10	40.90	12.00	1.96

2.3 차종구성비

현재까지의 연구결과에 의하면 도로교의 피로누적에 가장 영향을 많이 미치는 인자는 차종구성비에서 대형차의 혼입율이다. 따라서 교량의 상부를 주행하는 차종의 구성비에 대해서는 국내의 차종구성에 관한 조사데이터가 없으므로 우리나라

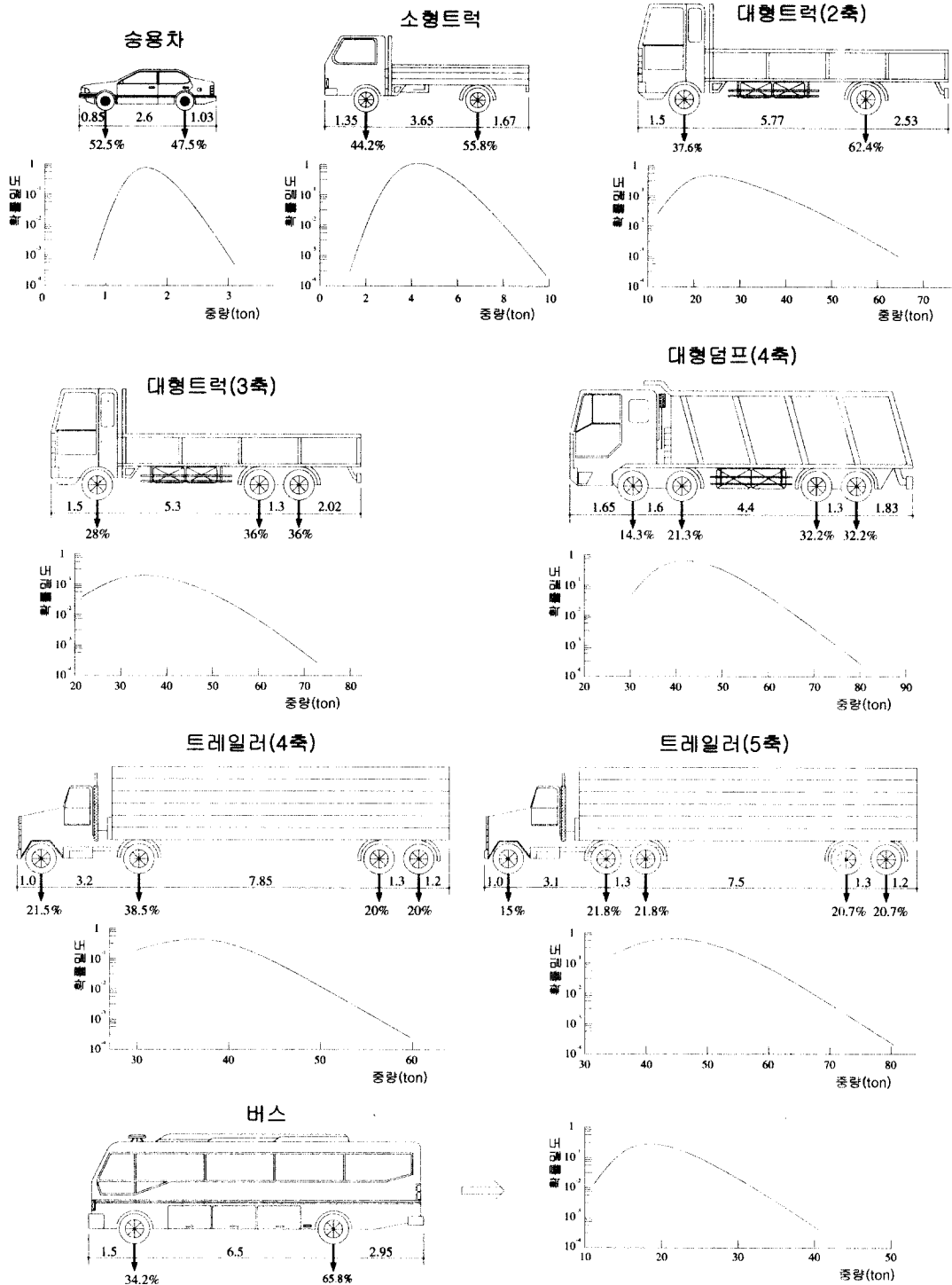


그림 3. 차량의 모델

라와 교통실정이 유사한 일본의 실측 결과를 참고하였다^{11)~15)}. 표 2에 차종구성비에서 대형차 혼입율을 5%, 20%, 32.5%, 40%, 60%로 설정하고 이후의 해석에 사용하였다.

표 2. 차종구성비

차종		대형차혼입율(%)				
		5	20	32.5	40	60
소형차	자동차 (2축)	0.776	0.653	0.551	0.490	0.327
	소형트럭 (2축)	0.174	0.147	0.124	0.110	0.073
	합계	0.950	0.800	0.675	0.600	0.400
대형차	대형트럭 (2축)	0.020	0.081	0.131	0.161	0.242
	대형트럭 (3축)	0.016	0.063	0.103	0.127	0.190
	대형덤프 (4축)	0.005	0.018	0.030	0.037	0.056
	트레일러 (4축)	0.003	0.011	0.017	0.021	0.032
	트레일러 (5축)	0.005	0.021	0.034	0.042	0.063
	버스 (2축)	0.001	0.006	0.010	0.012	0.017
	합계	0.050	0.200	0.325	0.400	0.600

2.4 피로손상도

Miner 피로누적법칙을 이용한 등가응력범위의 산정은 다음과 같다. 실제의 교량부재에는 변동응력(Variable Amplitude Loading)이 작용한다. 변동응력이 작용하는 부재의 피로피해는 (3)식과 같이 Miner의 피로누적법칙에 의해 하나의 응력범위로 변환된다^{19), 20)}. 부재에 작용하는 응력범위 S_n 에 대해 응력 반복횟수 N_i 에서 부재가 피로파괴 상태에 이르렀을 때, 응력변동범위 S_n 의 1회 반복에 따른 피로손상의 정도를 $1/N_i$ 로 생각하여, 그 합이 1로 되었을 때 파괴에 달한다고 생각하는 것이다.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3)$$

여기서, n_i : 응력변동범위 S_n 의 반복횟수

N_i : 응력변동범위 S_n 에 대한 부재의 피로수명

부재의 피로강도 S_r 과 파괴에 이르기까지의 반복횟수 N 과의 관계는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log N = b - m \log S_r \quad (b, m : \text{정수}) \quad (4)$$

식 (4)를 다시쓰면,

$$D = S_r^m N \quad (D, m : \text{계수에 대응한 정수}) \quad (5)$$

식 (5)와 같다. 식 (3), 식 (5)로부터,

$$D = \sum_{i=1}^k (S_n^m n_i) \quad (6)$$

식 (6)은 공용기간 중에 받는 변동응력범위 S_n 와 그 반복횟수에 관한 $S_n \cdot n_i$ 의 합이 D 로 되었을 때 파괴하는 것을 의미한다.

식 (6)의 변동응력범위와 반복횟수의 관계에서 $S-N$ 전도의 기울기 m 은 $-1/3$ 을 사용한다^{21), 22)}.

2.5 레인플로우법

자동차 등의 하중이 교량의 상부를 통과할 때, 교량의 각 부재에 발생하는 응력은 그림 4 a)에 나타낸 바와 같은 변동파형을 나타낸다. 이 변동파형에 대응하는 공칭응력과 시간과의 관계를 그림 4 b)에 나타낸다. 그림에서 산과 계곡의 차의 절대값을 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_{i-1}, r_i, r_{i+1}, \dots$ 로 나타내고 $r_{i-1} \geq r_i < r_{i+1}$ 의 조건이 성립할 때 마

다 r_i 를 추출한다. 이러한 작업을 반복하면 그림 4 c)에 나타난 바와 같이 점증·점감하는 응력변동과형이 얻어진다. 이때 최대극값과 최소극값의 차, 2번째 극소값과 극소값의 차,를 응력범위로 계산한다. 이 방법은 응력변동의 극값수열을 단축시켜 계산기의 기억용량과 계산시간을 절약시키는 효과가 있다. 본 연구에서는 응력범위빈도분포의 계산시에 일본의 JSSC지침 등에서 적용하고 있는 레인플로우법을 사용하였다^{16),17)}.

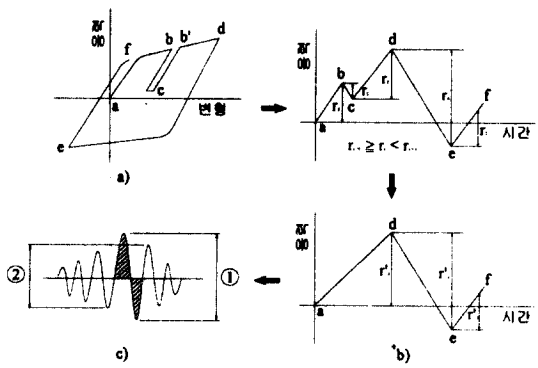
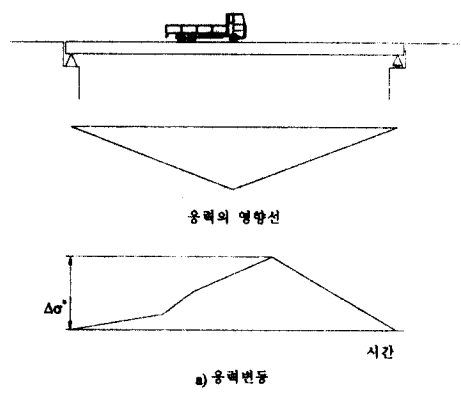


그림 4. 레인플로우법

3. 1차선 동시재하계수

3.1 해석방법

교량상을 주행하는 동행차량의 축하중에 대한



동시재하의 영향을 고려할 때에는 교량의 상부에 2대 이상의 차량이 동시에 재하되지 않고 차량 1대가 단독으로 통과할 때에 발생하는 응력범위의 빈도분포를 구하여야 한다. 먼저 그림 3에 나타난 8개 종류의 각 차종에서 평균중량의 차량 1대를 교량상부로 통과시킨다. 응력의 시간변동과형은 부재 단면력의 영향선으로 부터 그림 5 (a)에 나타난 바와 같이 구할 수 있다. 이 응력변동과형에 레인플로우(rain flow)법을 적용한 응력범위의 크기와 수를 구하면 그림 5 (b)에 나타난 응력범위빈도분포가 얻어진다. 다음에 차량의 중량과 응력은 선형관계에 있다는 것에 착안하여 그림 5 (c)에 나타난 바와 같이 차량의 중량분포를 그림 5 (d)에 나타난 응력범위의 분포로 변환할 수 있다. 이와 같이 각 형식에 대한 차량 1대의 주행으로 발생하는 응력범위의 빈도분포를 각각 구하여 차량구성 및 교통량을 고려하여 전체를 중첩시킴으로서 만족할 만한 응력범위의 빈도분포를 구할 수 있으며^{7),13)~15)}, 이것을 선형중첩법에 의한 피로피해라 부른다.

동시재하의 영향은 시뮬레이션에 의한 변동응력의 해석결과에 기초한 피로손상도와 이와 같은 조건으로 선형중첩법에 의해 구한 피로손상도의 비로 나타낸다. 이것을 1차선 동시재하계수 γ_1 이라 부르고, 다음 식으로 정의한다.

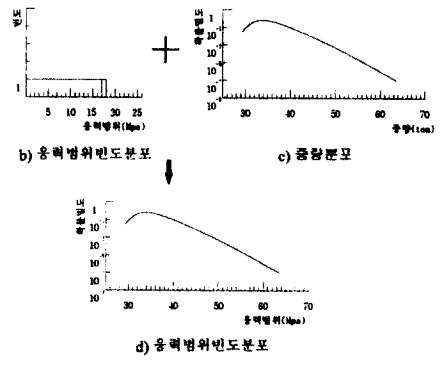


그림 5. 선형중첩법

$$\gamma_1 = \sqrt[3]{\frac{\text{시뮬레이션에 의한 피로손상도}}{\text{선형중첩법에 의한 피로손상도}}} \quad (7)$$

여기서 3승근으로 해석한 동시재하계수의 영향은 피로설계하중에 곱한 계수로 표현할 수 있다. γ_1 의 추정식을 유도하기 위해 단순교의 지간중앙에서의 휨모멘트 영향선에 지간을 20~100m, 교통량을 500~2500대/hr, 차량속도를 40~80km/hr, 대형차혼입율을 5~60%로 각각 변화시켜 시뮬레이션을 실시하고 그에 대응하는 선형중첩법을 기초로 응력범위빈도분포의 해석을 실시하였다.

3.2 동시재하대수

영향선의 형상을 단순형교의 지간중앙에서 휨모멘트 영향선, 대형차혼입율을 40%로 하였을 때 지간, 교통량 및 차량속도를 변화시켜 구한 1차선 동시재하계수 γ_1 과의 관계를 그림 6, 그림 7 및 그림 8에 각각 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이 지간이 길어짐에 따라 또 교통량이 증가함에 따라 γ_1 의 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 지간 및 교통량이 증가함에 따라 교량상부에 재하되는 차량의 대수가 증가되는 효과가 있기 때문이다. 이 결과 발생하는 응력이 커져 γ_1 의 값도 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 차량속도가 빨라짐에 따라 γ_1 의 값은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 차량의 속도가 빨라져 차두간격이 길어지고 교량상부에 재하되는 차량의 대수가 감소하기 때문에 발생하는 응력이 작아져 γ_1 의 값도 감소한다고 여겨진다.

이상과 같이 1차선 동시재하계수 (γ_1)은 교량상부에 재하되는 차량의 대수에 의해 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 교량상부에 동시에 재하되는 차량의 평균대수를 1차선 평균동시재하대수 (NS_1)라 부르고, 1차선 동시재하계수 γ_1 의 추정식을 유도하는데 이용한다. 또한 NS_1 은 지간, 교통량 및 차량속도를 사용하여 표시할 수 있다.

$$NS_1 = (\text{지간} \times \text{교통량}) / (\text{차량속도}) \quad (8)$$

NS_1 이 1이하에서는 평균적으로 교량상부에 복수의 차량이 동시에 재하되지 않는다. 한편 NS_1 이 1이상이면 차량이 교량상부에 동시에 재하될 가능성이 높다. 이 때문에 NS_1 이 커지게 되면 발생하는 응력이 증가하여 γ_1 의 값도 증가될 것으로 예상된다.

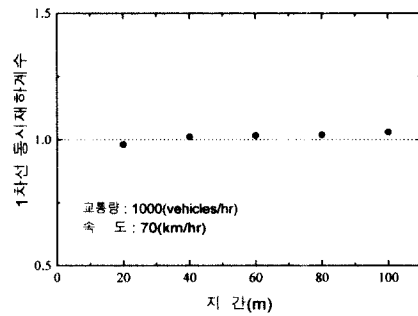


그림 6. 지간과 동시재하계수 (γ_1)의 관계

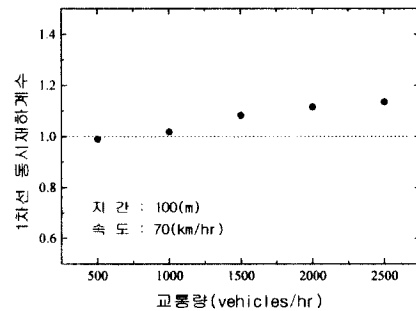


그림 7. 교통량과 동시재하계수 (γ_1)의 관계

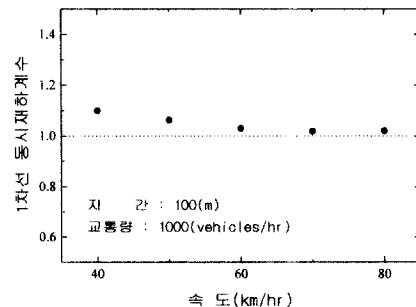


그림 8. 차량속도와 동시재하계수 (γ_1)의 관계

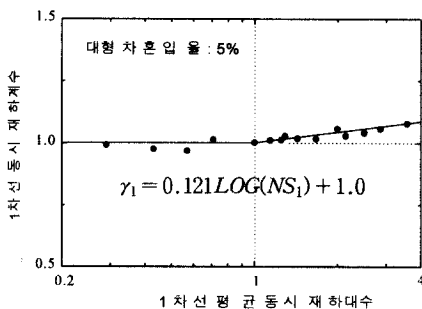
3.3 대형차혼입율의 영향

대형차혼입율을 5%~60%로 각각 변화시켜 구한 γ_1 과 NS_1 과의 관계를 그림 9 (a) ~ 그림 9 (e)에 각각 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이 NS_1 이 1이하의 영역에서는 γ_1 의 값이 거의 1이 되는 것을 알 수 있다. 반면 NS_1 이 1이상의 영역에서는 γ_1 의 값이 $LOG(NS_1)$ 에 비례하여 증가하는 경향이 있다. 따라서 γ_1 - NS_1 의 관계는 γ_1 - $LOG(NS_1)$ 의 기울기를 a라 하면, 식 (9)와 같다.

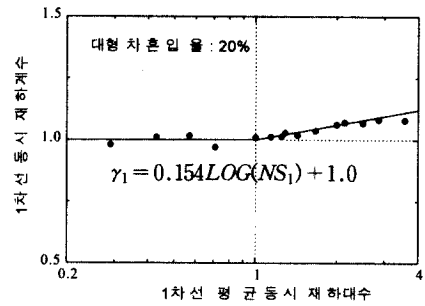
$$\gamma_1 = a \times LOG(NS_1) + 1.0 \quad (9)$$

그림에서 직선은 NS_1 이 1이상의 영역에 대해 데이터를 대형차혼입율별로 편대수지상에 회귀처리시킨 것이다. NS_1 이 1이상의 구간에 있어서 $\gamma_1 - LOG(NS_1)$ 의 직선은 대형차혼입율의 증가에 따라 그 기울기도 증가한다. 이것은 대형차혼입율이 증가하여 교량상부에 있어서 대형차를 동시에 재하하는 기회가 증가하고 그 결과 발생하는 응력도 커지기 때문이라 생각된다.

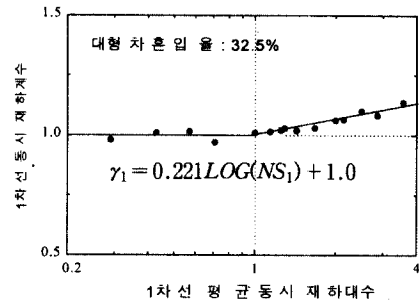
그림 10에 $\gamma_1 - LOG(NS_1)$ 직선의 기울기(a)와 대형차혼입율(α)와의 관계를 나타낸다. 양자의 관계는 거의 직선관계에 있고, 이 관계를 회귀처리시킨 결과 $\gamma_1 - LOG(NS_1)$ 직선의 기울기 a는 식 (10)과 같다.



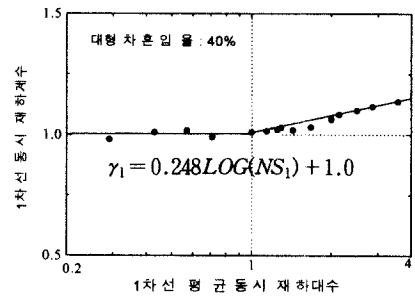
a) 대형차혼입율 : 5%



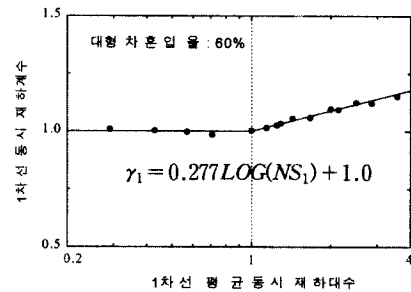
(b) 대형차혼입율 : 20%



(c) 대형차혼입율 : 32.5%



(d) 대형차혼입율 : 40%



(e) 대형차혼입율 : 60%

그림 9. 평균동시재하대수(NS_1)와 동시재하계수(γ_1)의 관계

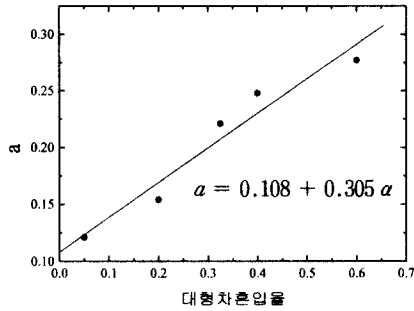


그림 10. 대형차혼입율(α)과 계수 a의 관계

$$a = 0.108 + 0.305 \alpha \quad (10)$$

여기서, α : 대형차혼입율

3.4 동시재하계수의 추정식

이상에서 알 수 있는 바와 같이 1차선 동시재하계수에 영향을 미치는 인자로는 1차선 평균동시재하대수(NS₁) 및 대형차혼입율(α)이다. 이 인자들을 고려하여 1차선 동시재하계수의 식을 유도한 결과, 식 (11)과 같다.

$$\gamma_1 = a \times \text{LOG}(NS_1) + 1.0 \quad (11)$$

여기서, a = 0.108 + 0.305 α

4. 2차선 동시재하계수

4.1 해석방법

2차선 도로교에서는 1차선 도로교에서 발생하는 교측방향의 차량의 동시재하에 부가하여 교폭방향의 동시재하도 고려하여야 한다. 또 조사부재에 발생하는 응력은 동일 차량이 주행하여도 그것이 1차선 또는 2차선을 주행하는냐에 따라 상이하므로 본 연구에서는 1차선과 2차선을 주행할때

발생하는 응력비를 차선응력비라 하고, 2차선 동시재하계수를 설정하기 위해 차선응력비도 고려한다. 2차선 도로교에서 동시재하의 영향은 3.절에 나타내었던 방법과 동일하게 실시하고, 2차선 동시재하계수 γ₂를 다음 식으로 정의한다.

$$\gamma_2 = \sqrt[3]{\frac{\text{시물레이션에 의한 피로손상도}}{\text{선형중첩법에 의한 피로손상도}}} \quad (12)$$

γ₂의 추정식을 유도하기 위해 1차선 동시재하계수의 유도시에 적용했던 영향선 형상에 시간(20~100m), 교통량(1000~5000대/hr), 차량속도(40~80km/hr), 각 차선의 교통방향(동일방향, 반대방향)과 교통량비, 대형차혼입율(5%~60%), 차선응력비(0.2~1.0)를 변화시켜 시물레이션을 실시하고, 이와 같은 조건으로 선형중첩법에 기초한 응력범위빈도분포 해석을 실시하였다.

4.2 동시재하대수

2차선 동시재하계수에서도 동시재하의 영향은 1차선 동시재하계수와 마찬가지로 도로교상에 몇 대의 차량이 동시에 재하되는가에 따라 달라지며 시간, 교통량 및 차량속도 3개의 매개변수에 의존한다. 이 경우 교통량은 총교통량으로 한다.

1차선 동시재하계수에서 적용한 영향선과 대형차혼입율을 이용하여 각각의 시간, 총교통량 및 차량속도를 변화시켰을 때 2차선 동시재하계수(γ₂)와의 관계를 구하였다. 그림 11에 시간을 20m~100m로 변화시켰을때의 시간과 2차선 동시재하계수와의 관계를, 그림 12에 교통량을 1000대/hr~5000대/hr로 변화시켰을 때의 교통량과 2차선 동시재하계수와의 관계를, 그림 13에 속도를 40km/hr~80km/hr로 변화시켰을때의 속도와 2차선 동시재하계수와의 관계를 각각 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 시간이 길어짐에 따라 또 총교통량이 증가함에 따라 γ₂의 값도

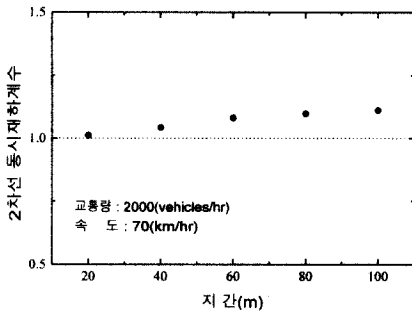


그림 11. 지간과 2차선 동시재하계수(γ_2)의 관계

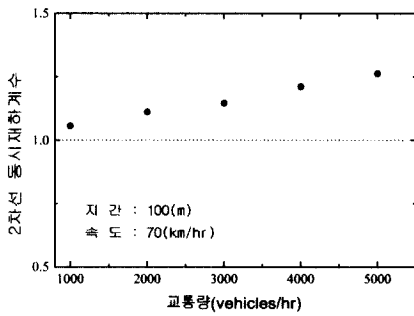


그림 12. 교통량과 2차선 동시재하계수(γ_2)의 관계

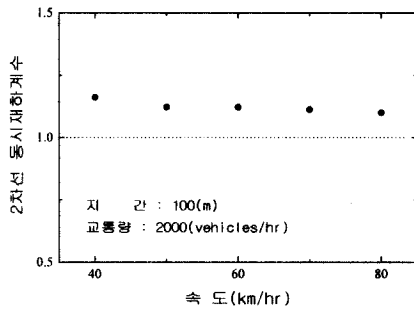


그림 13. 차량속도와 2차선 동시재하계수(γ_2)의 관계

증가한다. 지간 및 총교통량의 증가는 교량상부에 재하되는 차량의 대수를 증가시키는 효과가 있다. 이 결과 발생하는 응력이 크고 γ_2 의 값도 커지는 것을 알 수 있다. 또 차량속도가 높아짐에 따라 γ_1 의 값은 감소한다. 차량속도가 높아지면 차두 간격이 길어지고 교량상부에 재하되는 차량의 대수가 감소한다. 이 결과 발생하는 응력이 작아지

고 γ_2 의 값도 작아지는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 2차선 동시재하계수(γ_2)도 교량상부에 재하되는 차량의 대수에 의해 변화하는 것을 알 수 있다. 여기서도 교량상부에 동시에 재하되는 차량의 평균대수를 나타낸 매개변수를 이용한다. 이것을 2차선 평균동시재하대수(NS_2)라 부르고, NS_2 는 지간, 총교통량, 차량속도를 사용하여 표시할 수 있다.

$$NS_2 = (\text{지간} \times \text{총교통량}) / (\text{차량속도}) \quad (13)$$

2차선 도로교에서는 동일차선뿐만 아니라 인접차선에서도 차량이 통과하기 때문에 차량이 동시에 재하될 가능성이 1차선 도로교보다 높다. NS_2 가 증가함에 따라 γ_2 가 증가하는 경향은 동일하고, γ_2 의 값은 γ_1 의 값보다 클것으로 예상된다.

4.3 주행방향과 교통량비의 영향

그림 14에 각 차선의 주행방향이 동일한 경우와 반대인 경우의 γ_2 와 NS_2 와의 관계를 나타낸다. 또 그림 15에 각 차선의 총교통량을 10으로 했을 때 차선의 교통량비를 5:5, 6:4, 7:3, 8:2로 변화시켜 구한 2차선 평균동시재하대수(NS_2)와 2차선 동시재하계수(γ_2)와의 관계를 나타내며, 영향선의 형상 및 대형차혼입율은 전절과 동

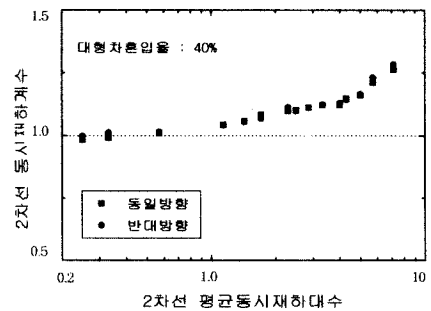


그림 14. 주행방향에 따른 NS_2 와 γ_2 의 관계

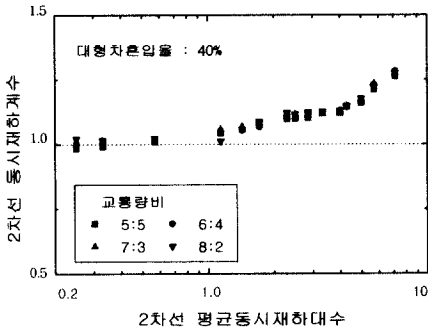


그림 15. 교통량비에 따른 NS_2 와 γ_2 의 관계

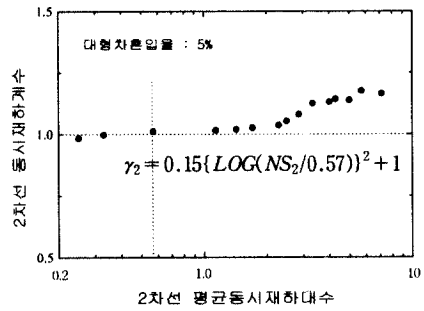
일하게 하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주행방향이 동일한 경우와 반대인 경우의 차이 및 각 차선의 교통량비에 대한 차이는 거의 없으므로 2차선 동시재하계수의 추정식 유도시 이들의 영향은 무시한다.

4.4 대형차혼입율의 영향

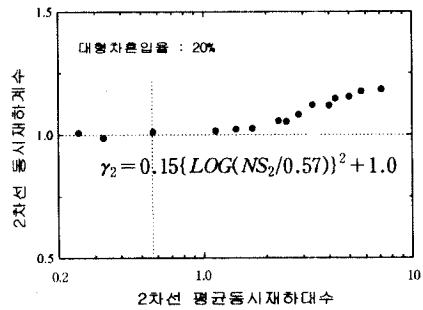
대형차혼입율을 5%~60%로 각각 변화시켜 구한 γ_2 와 NS_2 와의 관계를 그림 16 (a) ~ 그림 16 (e)에 각각 나타낸다. 대부분의 대형차혼입율에 있어서도 $NS_2 \leq 0.57$ 에서는 $\gamma_2 = 1$, $NS_2 > 0.57$ 때는 γ_2 와 $LOG(NS_2)$ 는 곡선관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 γ_2 와 $LOG(NS_2)$ 와의 관계를 2차곡선으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= a \times (LOG(NS_2) - LOG(0.57))^2 + 1.0 \\ &= a \times (LOG(NS_2/0.57))^2 + 1.0 \end{aligned} \quad (14)$$

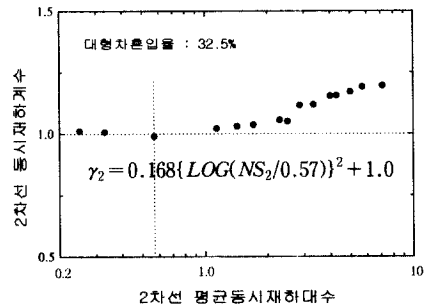
그림 중의 곡선은 NS_2 가 0.57이상의 영역의 데이터를 대형차혼입율별로 편대수저상에 회귀처리시킨 것이다. NS_2 가 0.57이상인 구간에 γ_2 와 $LOG(NS_2)$ 와의 관계는 대형차혼입율의 증가에 따라 그 계수도 증가한다. 이것은 대형차혼입율이 증가하여 교량상부에 대형차를 동시에 재하하는 기회가 증가하고, 그 결과 발생하는 응력도 커지



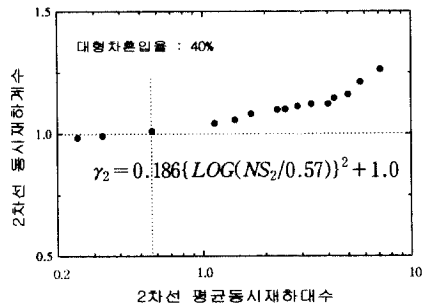
(a) 대형차혼입율 : 5%



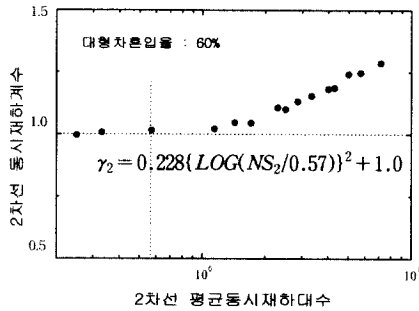
(b) 대형차혼입율 : 20%



(c) 대형차혼입율 : 32.5%



(d) 대형차혼입율 : 40%



(e) 대형차혼입율 : 60%

그림 16. 평균동시재해대수(NS2)와 동시재해계수 (γ_2)의 관계

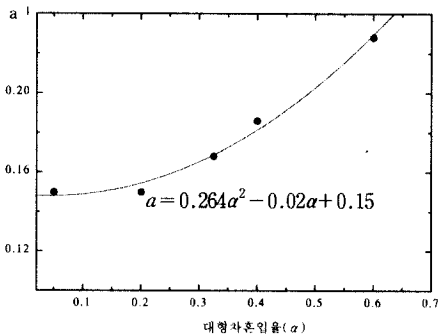


그림 17. 대형차혼입율 (α)과 계수 a의 관계

기 때문이다.

그림 17에 γ_2 와 $LOG(NS_2)$ 의 계수 a와 대형차혼입율 (α)의 관계를 나타낸다. 2차곡선계수 (a)와 대형차혼입율 (α)와의 관계를 회귀분석한 결과 1차식에서는 신뢰성 89.39%, 표준편차 0.012이고 2차식에서는 신뢰성 98.88%, 표준편차 0.0049로 그림 18에 나타낸 바와 같이 2차식이 각각의 데이터에 가장 근접하였다. 따라서 본 논문에서는 계수 a를 2차식으로 나타내며, 식 (15)와 같다.

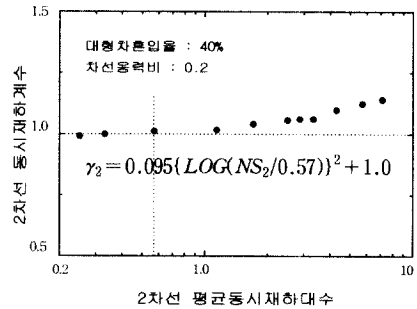
$$a = 0.264\alpha^2 - 0.02\alpha + 0.15 \quad (15)$$

여기서, α : 대형차혼입율

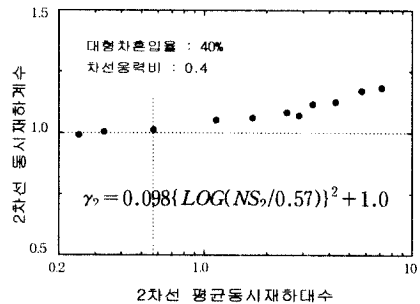
4.5 차선용력비의 영향

차선용력비를 0.2~1.0으로 각각 변화시켜 구한 γ_2 와 NS_2 와의 관계를 그림 18 (a)~그림 18 (e)에 각각 나타낸다. 그림 중의 곡선은 3.4절과 같이 NS_2 가 0.57이상인 구간의 데이터를 차선용력비별로 편대수지상에 회귀처리시킨 결과 곡선의 형태를 나타내었다. 차선용력비 (β)의 증가에 따라 2차곡선계수도 증가한다. 이것은 차선용력비가 크게 되면 이웃한 차선으로부터 받는 용력이 커지기 때문이다.

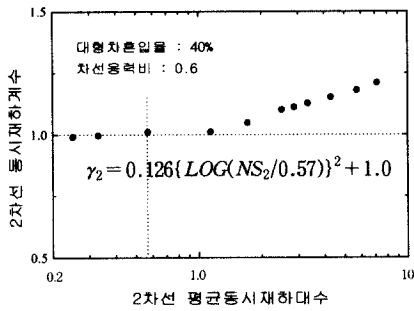
2차곡선계수는 4.4절에서 명확히 한 바와 같이 대형차혼입율에도 영향을 받는다. 따라서 대형차혼입율의 영향과 구별할 필요가 있다. 여기서는 차선용력비에서 구한 γ_2 와 NS_2 의 2차곡선계수 식 (14)의 대형차혼입율의 영향에 의한 γ_2 와 NS_2 의 2차곡선계수 a에서 제외시키고 이를 계수



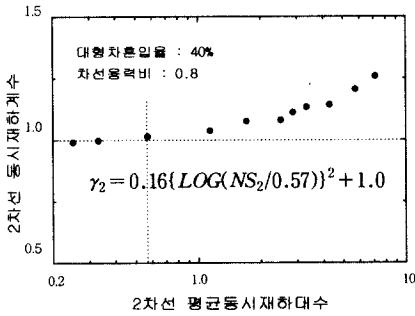
(a) 대형차혼입율 : 40%, 차선용력비 : 0.2



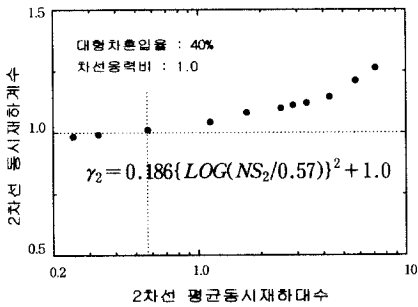
(b) 대형차혼입율 : 40%, 차선용력비 : 0.4



(c) 대형차혼입율 : 40%, 차선용력비 : 0.6



(d) 대형차혼입율 : 40%, 차선용력비 : 0.8



(e) 대형차혼입율 : 40%, 차선용력비 : 1.0

그림 18. 평균동시재하대수(NS2)와 동시재하계수 (γ_2)의 관계

b 라고 두면 γ_2 와 NS_2 의 관계는 식 (16)과 같이 표시할 수 있다.

$$\gamma_2 = a \times b \times (LOG(NS_2/0.57))^2 + 1.0 \quad (16)$$

그림 19에 계수 b 와 차선용력비 β 와의 관계를 나타낸다. 2차곡선계수(b)와 차선용력비(β)와의 관계를 회귀분석한 결과 1차식에서는 신뢰성 95.17%, 표준편차 0.01이고 2차선에서는 신뢰성 98.25%, 표준편차 0.007로 그림 19에 나타난 바와 같이 2차식이 각각의 데이터에 가장 근접하였다. 따라서 본 논문에서는 계수 b 를 2차식으로 나타내며, 식 (17)과 같다.

$$b = 0.093\beta^2 + 0.011\beta + 0.086 \quad (17)$$

여기서 β : 차선용력비

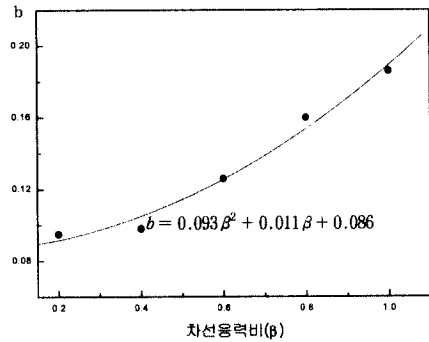


그림 19. 차선용력비(β)와 계수 b 의 관계

4.6 동시재하계수의 추정식

2차선 동시재하계수에 영향을 미치는 인자들은 2차선 평균동시재하대수 (NS_2), 대형차혼입율 (α) 및 차선용력비 (β)로 구성되며, 이들 인자들을 고려하여 2차선 동시재하계수의 식을 유도한 결과, 식 (18)과 같다.

$$\gamma_2 = a \times b \times (LOG(NS_2/0.57))^2 + 1.0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } a &= 0.264\alpha^2 - 0.02\alpha + 0.15 \\ b &= 0.093\beta^2 + 0.011\beta + 0.086 \end{aligned}$$

5. 결 론

교량에서 피로설계하중에 동시재하의 영향을 하중계수로써 고려할 때, 1차선 동시재하계수 및 2차선 동시재하계수에 대해 응력변동 시뮬레이션을 실시하고, 이와 동일한 조건으로 선형중첩법에 의한 응력범위빈도분포 해석을 실시하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 교량의 지간이 길어지고, 교통량이 증가함에 따라 동시재하계수도 증가하는 반면, 차량속도가 증가함에 따라 동시재하계수는 감소한다. 따라서 교량의 지간, 교통량 및 차량속도의 영향을 평균동시재하대수로 설정하여 동시재하계수를 구할 수 있다.
- 2) 평균동시재하대수가 증가하면 편대수지 상에서 1차선 동시재하계수는 선형으로, 2차선 동시재하계수는 2차 곡선으로 증가한다.
- 3) 대형차혼입율이 증가하면 1차선 동시재하계수와 2차선 동시재하계수는 동시에 증가한다.
- 4) 1차선과 2차선의 교통방향 및 교통량비는 2차선 동시재하계수에 영향을 미치지 않음을 알 수 있으며, 1차선과 2차선의 응력비가 증가함에 따라 2차선 동시재하계수는 증가한다.
- 5) 피로설계하중에 대해 국내에서는 차량의 동시재하영향에 관한 데이터가 불충분하므로 앞으로는 많은 데이터를 축적하여 차량의 동시재하영향에 관한 연구를 계속하여야 할 것으로 여겨진다.

감사의 말

본 연구를 수행하는데에 다대한 도움을 준 일 본 法政大學 森猛교수께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 성수대교 정밀 안전진단 보고서, 서울특별시, pp. 80~85, 1995. 5.
- (2) 西川和廣 : 道路橋における疲労問題と補修・補強, 橋梁と基礎, 第17巻, 第8号, pp. 19~23, 1983.
- (3) American Association of State Highway and Transportation Officials : Standard Specification for Highway Bridges, 1977.
- (4) 日本鋼構造協會 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993
- (5) 한국강구조학회 : 강형교의 교통량 분석을 통한 설계피로하중산정과 발생응력의 모형화 연구, 1997. 12.
- (6) 李東郁 : 橋梁鋼床版におけるトラブリブ溶接継手の疲労強度向上法に関する基礎的研究, 日本大阪大學 博士學位論文, 1986. 12.
- (7) 李東郁, 金兌鎬, 高南鎬 : 推定 交通量에 의한 橋梁 鋼床版의 耐用壽命 評價法에 관한 研究, 韓國鋼構造學會論文集, 第5巻, 第1號, pp. 163~176, 1993. 3. 31.
- (8) Mose, F., Shilling, C. G. and Raju, K. S. : Fatigue Evaluation Procedure for Steel Bridges, National Cooperative Highway Research Program Report 299, 1987.
- (9) 日本建設省土木研究所 : 土木研究所資料 第2682号 既設橋梁の耐久性評價・技術向上に関する調査研究, III, 1988. 12.
- (10) 三木千壽, 杉本一朗, 宮崎早苗, 森猛 : 鋼道路橋の疲労調査のための荷重に関する研究, 構造工學論文集, Vol. 36A, pp. 975~984, 1990.
- (11) 坂野昌弘, 三上市, 宮川 也 : 大型3乗平均重量과 同時載荷係數を用いた道路橋疲労設計荷重の設定, 構造工學論文集, Vol. 38A, pp. 1063~1070, 1992.
- (12) 三木千壽, 後藤司, 村越潤, 館石和雄 : シミュレーションによる道路橋の疲労設計荷重の研究, 構造工學論文集, Vol. 32A, pp. 597~608, 1986.
- (13) 坂野昌弘, 三上市, 堀研也 : 都市高速道路橋

の疲労調査に用いる同時載荷係数の提案, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 855~863, 1995.

- (14) 崔宰源 : 道路橋 疲労設計의 同時載荷係數算定에 關한 研究, 釜慶大學校 産業大學院 建設工學科, 工學 碩士學位 論文, 1999. 2.
- (15) 三木千壽, 森 猛, 宇佐見健太郎, 吉田均 : シミュレーションに基づく道路橋の疲労荷重および 疲労設計法の研究, 東京工業大學土木工學科研究報告, No.33, 1984.
- (16) 김윤기, 조재병, 정경섭, 배두병, 황의승 : 강교의 변형을 측정값을 이용한 통과 차량의 축중량 산출방법에 관한 연구, 한국강구조학회 학술발표논문집, pp. 278~281, 1998.
- (17) 심낙훈, 박영석 : 우리나라 도로교의 피로하중 모형에 관한 연구, 한국강구조학회 학술발표논문집, pp. 292~295, 1998.

- (18) 三木千壽, 坂野昌弘, 館石和雄, 福岡良典 : 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析, 日本 土木學會 論文集, No.392, I-9, pp. 403~410, 1988.
- (19) 韓國鋼構造學會 : 鋼構造便覽 第4卷 鋼道路橋의 設計, pp. 631~648, 1995.
- (20) 大倉一郎 : 鋼橋の疲労, 東洋書店, pp. 95~115, 1994. 6.
- (21) 張東一, 三木千壽, 西村俊夫 : 直線被害による鋼部材片の割れ壽命豫測, 日本 土木學會 論文集, No. 270, pp. 15~29, 1978. 2.
- (22) 河本寬 : 金屬の疲れと設計(第 3版), pp. 141~145, 1977.

(접수일자 : 1999년 8월 13일)