

북한 콘크리트 교량의 군용하중급수 평가

박효범* · 곽효경**

Park, Hyo Bum*, Kwak, Hyo Gyoung**

Military Load Classification (MLC) on Concrete Bridges in North Korea

ABSTRACT

For the last 60 years, North Korea has constructed a lot of roadway bridges with different standard from that used in South Korea, and since North Korea prefer to take advantage of train more than truck for long distance transport, the construction and maintenance of roadway bridges have not been constructed effectively. Upon these situations, an exact evaluation of the resisting capacity for bridges in North Korea has been required to check of any bridge can be used in time of war. This paper introduces an evaluation of bridges in North Korea on the basis of Military Load Classification (MLC). Three different types of concrete bridges are considered, and the numerical analysis and design calculation give the military loadings which can pass through the bridges in North Korea.

Key words : Military Load Classification (MLC), North Korea bridges, Design vehicle load, Finite element method

초 록

지난 60년이 넘는 시간동안 대한민국은 남과 북이 대치한 휴전상태로 각자 다른 기준을 가진 채 기반시설을 발전시켜 왔다. 특히 북한에서는 운송의 주요수단으로 철도를 사용하기 때문에 도로는 잘 발달하지 않았고 그 중에서 도로교량은 세계 기준보다 많이 낮은 수준이다. 이 논문에서는 전시라는 특별한 상황에서 북한교량을 어느 수준으로 판단하고 이용할 수 있는냐에 초점을 두고 북한의 3가지 콘크리트 교량의 표준 도면을 분석하여 군용하중급수 분류법에 따른 군용차량의 북한 콘크리트 교량의 이용 가능수준을 추정하였다. 그리고 상용프로그램을 활용한 유한요소 해석을 병행하여 계산 값과 비교하였다.

검색어 : 군용하중급수분류법, 북한교량, 설계트럭하중, 유한요소 해석

1. 서론

60년이 넘는 기간 남과 북은 전쟁을 준비하면서 군을 발전시켜왔다. 특히 한국은 전시 신속한 작전 진행을 위해 보병사단을 기계화 보병사단으로 개편하는 등 부대를 장갑화 시켜왔고, 전차 및 중차량도 점점 무거워져 한국전쟁 때에는 45톤 무게가 보통이었던 전차가 지금은 60톤에 육박하고 있다. 한국에 있는 교량이라면 각 교량에 대한 설계 제원도 알고 강도를 직접 측정할 수 있지만, 만약 전쟁 중에 아무런 기초정보가 없는 북한의 교량을 건너야 하는 상황에서는 심각한 문제가 될 수밖에 없다. 따라서 전시에 많은 수의 무거운 군용차량이 이용할 수 있는 북한의 교량은 무엇인지 판단할 수 있는 자료가 필요하다. 북한 교량에 대한 연구는 Han, et al.(2013)에 의해 북한의 철근콘크리트 슬래브 교에 관한 설계기준 분석이 이루어진 바 있으나 폐쇄적인 북한으로부터 정보를 구하기가 쉽지

* 정회원 · 합동군사대학교 학생장교 (Joint Forces Military University · hyobami@naver.com)

** 중신회원 · 교신저자 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

(Corresponding Author · Korea Advanced Institute for Science and Technology · khg@kaist.ac.kr)

Received July 7, 2016/ revised September 27, 2016/ accepted April 18, 2017

않기 때문에 이후의 연구는 없는 실정이다. 특히 한국 및 연합군이 사용하고 있는 균용하중급수분류법을 이용한 교량연구는 한국에 위치한 교량들 및 기타 가상교량들에 대해 분석한 연구가 존재하지 만(Ha, 2003; Kim et al., 2011) 북한의 표준트럭하중 및 교량을 분석한 연구는 없는 상태이다.

따라서 본 논문에서는 남북과학 기술교류협력사업 수행당시 확보한 ‘운수건설총서-다리건설(Kim et al., 1999)’의 자료를 바탕으로 군 입장에서 북한지역에 있는 여러 교량들의 능력을 가늠할 수 있도록 하고자 한다. 이를 위해 북한의 표준트럭하중과 균용 표준가상차량하중을 비교하여 북한교량의 등급별 수준을 균용하중으로 추정해 보았다. 그리고 북한 표준트럭과 균용 표준가상차량하중을 북한 표준교량에 재하한 후의 응답을 통해 북한의 표준교량을 균용하중급수로 판단할 수 있도록 하였다. 또한, 상용 구조해석 프로그램(ABAQUS)을 이용한 유한요소법 해석을 통해 먼저 계산한 북한교량의 능력을 검증 및 비교하였다. 해석을 수행함에 있어 표준도면은 있으나 철근량이 없는 교량의 경우에는 북한식 설계방법을 통해 그 능력을 추정하여 교량의 저항력을 산정하였다.

2. 북한의 표준트럭하중

북한의 운수건설총서 다리건설(Lim et al., 1999)에 따르면 교량설계에 사용되는 표준트럭하중은 자동차짐 이라는 명칭으로

Table 1. Table of Coefficients γ , β and I

	γ	β_D	β_L	I
North Korea	1.0	1.15	1.4	≤ 0.3
NATO	1.3	1.0	1.0	0.15

Table 2. Truck Array of Design Vehicle Loads in North Korea

Load Class.	Truck Array	Bridge Class.
Truck Luggage Load-30		I
Truck Luggage Load-22		II
Truck Luggage Load-15		II and below
Special Luggage Load-80		Heavy tow truck, I
Special Luggage Load-60		Caterpillar tractor, I

1953년에 도입하였고 자동차짐-13, 10, 8과 무한궤도짐-60, 30으로 교량 등급을 구분하여 사용하였으나 1986년 설계법을 허용응력 설계법에서 극한상태설계법으로 개정하면서 1, 2, 3등급을 자동차 짐-30, 22, 15와 특수짐-80, 60으로 구분 사용하고 있다. 이때, 자동차짐 뒤의 숫자는 표준트럭의 무게(kN)에 해당한다. 또한 북한의 자동차짐 하중은 Table 2에서 보이는 바와 같이 대열하중으로서 중량차를 중심으로 앞뒤로 12 m 간격을 두고 표준차를 배치하여 사용하고 있다.

교량을 설계할 때 사용하는 하중조합은 Eq. (1)에, 해당하는 하중계수의 값은 Table 1에 나타내었다. NATO (North Atlantic Treaty Organization, 북대서양 조약기구)의 경우 AASHTO LFD (Load Factor Design, 하중계수설계법)의 과다하중한계(Overload Criteria) 값을 사용하고 있다. 이 값은 한국군이 준용하고 있는 방법이기도 하다.

$$Q = \gamma[\beta_D D + \beta_L(L + I)] \tag{1}$$

$$I = \frac{16}{15 + l} \leq 0.3 \tag{2}$$

여기서, Q : 설계 단면력, γ : 하중계수, β_D : 사하중계수, β_L : 활하중 계수, l : 경간길이, I : 충격계수를 나타내며, 충격계수로서 북한은 Eq. (2)의 값을, NATO는 0.15를 일반적으로 사용한다.

3. 균용하중급수분류법

균용하중급수분류법(Military Load Classification, MLC)은 최초 미 공병단에서 개발하여 현재는 NATO 회원국 및 우리 군의 표준으로 사용하고 있는 교량해석방법으로써 실제로 사용되고 있는 균용차량의 제원과 특성을 바탕으로 Table 3에서와 같이 급수 4톤에서 150톤의 범위에 걸쳐 표준가상차량을 분류하고 있다. 이를 바탕으로 임의의 균용차량이 교량에 미칠 영향과 동일한 영향력을 가질 것으로 예상되는 표준가상차량의 무게를 해당 균용 차량의 급수로 지정함으로써 여러 종류의 균용차량과 교량의 수준을 상호 비교할 수 있도록 하고 있다. 여기에서 사용하는 1톤(Short ton)은 약 8.9 kN에 해당하며 차륜차량은 W (Wheeled Vehicle)를, 궤도차량은 T (Track Vehicle)를 무게 뒤에 붙여서 8 W, 40 T처럼 단위 없이 사용하고 있다.

3.1 차량급수 분류법

미군교범 ‘Military Nonstandard Fixed Bridging (HQ, DOA, 2002)’에 따르면 균용하중급수분류법에서는 임의차량의 급수를

Table 3. Hypothetical Vehicles for MLC

Class	Tracked Vehicles	Wheeled Vehicles	
		Axle Loads and Spacing	Maximum Single-Axle Load (in Short Tons)
4			2-5
8			5-5
12			8
16			10
20			11
24			12
30			13-5
40			17

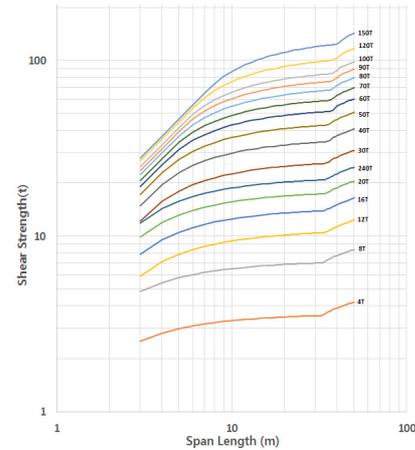


Fig. 2. Track Vehicle Shear Strength

이 로그 그래프 중 차륜차량의 휨 모멘트와 궤도차량의 전단력의 예이다. 2단계는 1단계에서 찾은 표준가상차량의 타이어(혹은 궤도)의 외폭과 임의 차량의 그것을 비교하여 그 차이(W_{HR})만큼 협폭일 경우와 광폭일 경우 Eq. (3)에 따라 표준가상차량을 조정하는 단계이다. 마지막 3단계는 급수를 알고자 하는 차량의 최대 축하중이 2단계에서 분류한 급수의 표준가상차량의 축하중 보다 클 경우 이와 동일한 축하중을 가지는 표준가상차량으로 등급을 조정하는 단계로서 이 과정을 통해 최종급수를 산정한다.

$$\text{협폭급수} : 1\text{단계 급수} \times (1 + 0.0024 W_{HR}) \quad (3a)$$

$$\text{광폭급수} : 1\text{단계 급수} \times (1 - 0.0012 W_{HR}) \quad (3b)$$

3.2 교량급수 분류법

균용하중급수분류법의 교량급수 산정법에서는 목표를 제외하고는 휨강도가 교량설계에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 휨강도만을 이용해 정하도록 하고 있다. 그 과정을 살펴보면, 교량의 도면 및 각종 제원을 이용, Eq. (4)를 통해 계산된 단위 폭 혹은 보 1개당 설계휨강도(m)를 구한 후 자중에 의해 발생하는 휨 모멘트(m_{DL})와 Table 1에 주어진 하중계수를 이용해 Eq. (5)과 같이 활하중 휨강도(m_{LL})을 계산한다. 여기서 ‘활하중 휨강도(m_{LL})’는 균용하중 급수분류 간에 활하중을 통해 교량에 발생하게 되는 최대 휨 모멘트 값으로써 교량이 얼마만큼의 활하중을 버틸 수 있는지에 대한 능력을 말한다. 그리고 유효 슬래브 폭 b_e 와 유효 보 수 N_1, N_2 를 슬래브 교와 T형 교 각각의 활하중 휨강도에 곱한 값을 ‘차로당 활하중 휨강도(M_{LL})’라 명명하며 이 차로당 활하중 휨강도와 교량의 경간길이에 해당하는 값을 Fig. 2에서 찾아 교량급수를 산정한다. 여기서 b_e 와 N_1, N_2 계산식은 각각 Eqs. (6) and (7)과 같다(AASHTO LFD).

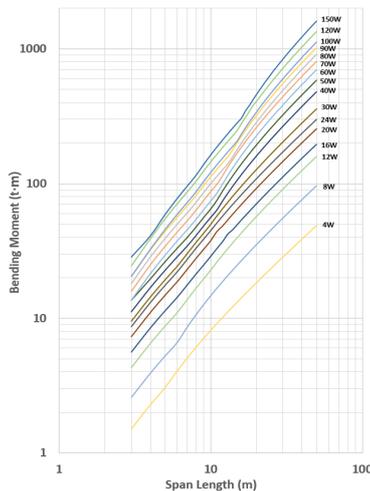


Fig. 1. Wheeled Vehicle Bending Moment

분류하기 위해서 3가지의 단계를 거친다. 1단계는 임의 지간의 교량에서 급수를 알고자 하는 차량으로 인해 발생하는 절대최대 휨 모멘트 및 전단력과 같은 값을 발생시키는 표준가상차량을 찾는 단계이다. 이를 손쉽게 찾도록 Table 3에서 정의된 표준가상차량의 하중을 임의 지간의 단순보에 적용하여 산정된 최대 부재력(휨 모멘트, 전단력)을 계산, 차륜차량과 궤도차량 각각에 대해 그래프 간격을 벌려 읽기 쉽도록 로그그래프로 나타낸다. Figs. 1 and 2는

$$m = \phi A_{st} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

$$m_{LL} = \frac{m - 1.3m_{DL}}{1.5} \text{ (NATO의 경우)} \quad (5)$$

Eq. (4)에서 ϕ : 강도감소계수, A_{st} : 인장철근면적(mm²), f_y : 인장철근 강도(MPa), d : 인장철근까지 깊이, a : 등가응력사각형 높이이다.

$$b_e = 2.4384 + 0.12L \leq 4.2672 \text{ (m)} \quad (6)$$

$$\text{1방향 통행(차로): } N_1 = \frac{L}{0.75 + \frac{L}{S_s}} \quad (7a)$$

$$\text{2방향 통행(차로): } N_2 = \frac{L}{0.25 + \frac{2L}{S_s}} \quad (7b)$$

Eqs. (6) and (7)에서, L : 경간길이(m), N_1 : 1차로 유효 보 수, N_2 : 2차로 유효 보 수, S_s : 보 간격(m)이다.

4. 북한의 콘크리트 교량 설계

북한의 ‘운수건설총서 다리건설(Lim et al., 1999)’에 나타난 슬래브 교와 조립식 T형교 도면의 경우는 콘크리트와 철근의 등급을 각각 C15, 강3을 사용하고 있으며, PSC 교량의 경우 콘크리트는 C35을, 긴장재는 $\phi 5 \times 9$ EA 강선목음(항복강도 1,700 MPa)을 사용하였다. 해당 재료의 강도는 Table 4와 같다. 북한의 교량설계에 사용되는 재료의 특이점이려면 1986년부터 극한상태법으로 설계하면서, 재료의 공칭강도를 사용하지 않고 안전율을 부여한 설계강도를 사용한다는 점이다.

PSC 설계의 경우는 한국과 마찬가지로 허용응력설계법을 준용하며 긴장재의 단계별 응력도 운영단계($0.6 f_{pu}$), 프리스트레싱

Table 4. Strength of Materials (MPa)

	Concrete		Steel 3
	C15	C35	
Nominal Strength	18	-	240
Design Strength	9.7	20.5	190
Modulus of Elasticity ($\times 10^4$)	2.65	3.50	21.0

직후 및 시공단계($0.7 f_{pu}$), 프리스트레싱 도입 직후($0.8 f_{pu}$)로써 한국과 비슷한 값(각각 $0.7 f_{pu}$, $0.74 f_{pu}$, $0.80 f_{pu}$)을 사용하고 있다. 여기서 f_{pu} 는 긴장재의 설계기준인장강도를 의미한다.

북한에서는 극한상태설계법을 적용하면서 압축콘크리트의 상대적 높이($\xi = a/d$, 등가응력 사각형 높이와 인장철근까지 깊이의 비)와 극한 상대적 높이($\xi_u = 0.66$)를 고려하여 부재를 계산하고 있었다. 또한 재료에서 이미 안전율을 고려하였기 때문에 Eq. (8)에서와 같이 설계강도를 계산할 때 강도감소계수를 추가적으로 사용하지 않고 있다.

$$M_u \leq f_{cb} b a (d - 0.5a) \quad (8)$$

여기서, M_u : 부재가 저항할 수 있는 휨강도, a : 등가응력 사각형 높이, b : 보 폭, d : 인장철근까지 깊이, f_{cb} : 콘크리트 압축강도이다.

하중의 횡방향 분배를 산정함에 있어 슬래브 교의 경우는 설계식이 제안되어 있으나 T형 교 등 다른 교량구조에 대해서는 지렛대법, 편심누름법, 격자보 이론, 유효요소법 등 이론에 대한 설명만 주어지지 실제 이용식에 대한 설명이 없기 때문에 이 논문에서는 Eqs. (6) and (7)의 AASHTO LFD의 기준을 준용하였다.

5. 북한 표준트럭 하중의 MLC

북한 표준트럭하중의 최대 휨 모멘트 및 전단강도 값과 균용표준가상차량의 최대 휨 모멘트 및 전단강도 값을 비교 한 결과 북한 1, 2, 3등교의 설계하중은 각각 34-45 W, 22~31 W, 14~22 W의 값을 나타냈다(Figs. 3 and 4). 이때 각 지간별 MLC값은 최대 휨 모멘트와 전단강도 중 큰 값을 취하면 되는데, 표준트럭하중의 분석결과만으로는 북한의 1등교는 45 W가 넘는 중차량은 이용할 수 없음을 알 수 있다.

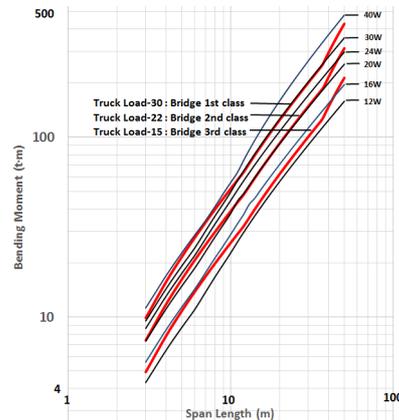


Fig. 3. Bending Moment of North Korea Truck Load and Hypothetical Vehicles Load



Fig. 4. Shear Strength of North Korea Truck Load and Hypothetical Vehicles Load

6. 북한의 교량별 MLC 분석 비교

6.1 슬래브 교

슬래브 교의 경우 1986년 이후 경간이 4~8 m이고 너비가 3.5, 5.5, 6.5, 7.5, 9, 12, 16 m이며 주근이 150 mm간격으로 배치된 표준도면이 작성되었고 그 이전에는 경간 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 m이고 주근이 $\phi 22 \times 22$ EA인 표준도면이 사용되었다. 1986년 이후 표준도면에 대한 철근종류가 명시되어 있지 않아 북한에서 주로 사용하는 $\phi 22, 25, 29, 32$ 를 각각 적용하여 활하중 휨 강도를 계산하였고 $\phi 25, 29, 32$ 를 적용하였을 때 각각 3등교, 2등교, 1등교의 수준이 나왔다. 이에 이 논문에서는 안전을 고려하여 철근 $\phi 25$ 의 3등교로 보고 교량의 능력을 분석하였다. 그 결과 북한식 해석으로는 23.23 t·m, NATO식 해석으로는 36.80 t·m의 차로당 활하중 휨강도 값이 나왔으며, 교량MLC로는 북한식 해석으로 17 W / 15 T의 급수가, NATO식 해석으로 30 W / 24 T의 급수가 계산되었다. 그리고 표준트럭하중의 차량MLC값과 비교했을 때, 슬래브 교가 북한식 해석으로는 3등교 수준이지만 NATO식으로

해석하였을 때는 2등교 수준을 보였다. 즉 NATO식 해석이 북한식 해석보다 안전율을 작게 보고 있음을 알 수 있었다.

이처럼 NATO식으로 해석한 1986년 이전과 이후의 슬래브 두께에 따른 차로당 활하중 휨강도를 Table 5에 나타내었다.

6.2 조립식 T형 교

조립식 T형 교의 경우 1986년 이후 다리 너비 3.5, 5.5, 6.5, 7.5, 9.0, 12 m이고 각각 경간 8, 10, 11, 12, 14, 16, 20 m인 표준도면을 사용하고 있다. 이 중 너비 7.5 m, 경간 16 m인 1등교의 상세도면을 분석한 결과 차로당 활하중 휨강도와 교량MLC가 북한식 해석으로 119.89 t·m와 41 W / 37 T를, NATO식 해석으로 167.32 t·m와 61 W / 52 T의 값을 가졌다. 또한 북한식 해석값은 자동차중-30의 활하중을 버틸 수 있도록 요구되는 총 모멘트값보다 약 1.2배 정도의 안전율을 갖고 있었다.

기타 표준도면의 경우에는 정확한 철근량이 주어지지 않아서 북한의 운수건설총서에 나와있는 철근량 A_s 를 구하는 Eq. (5)를 사용하여 그 값을 유추하였다. 여기서, M : 교량 등급별 자동차 짐에 따른 소요 휨강도(t·m), b : 복부 폭(m), d : 인장철근까지 깊이(m), f_{cb} : 콘크리트 압축강도(MPa), f_s : 인장철근의 강도(MPa)이다. 또한, 1.2배의 안전율은 적용하지 않은, 철근량 계산 값 그대로를 이용하여 계산된 교량등급별 차로당 활하중 휨강도 값을 Table 6에 나타내었다.

$$A_s = \xi b d \frac{f_{cb}}{f_s}, \quad \alpha_0 = \frac{M}{f_{cb} b d^2} \tag{5}$$

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_0}$$

Table 5. A Lane Flexural Strength from Live Load of North Korea Slab Bridge (t·m)

Period	Span (m)	Slab Height (m)							
		0.2	0.28	0.3	0.33	0.36	0.4	0.45	0.48
Before 1986	3.0	10.26	15.49	16.80	18.76	20.72	-	26.60	28.56
	3.5	9.97	15.11	16.39	18.31	20.24	-	26.02	27.94
	4.0	9.58	14.58	15.83	17.70	19.58	-	25.20	27.08
	4.5	9.07	13.90	15.10	16.91	18.72	-	24.15	25.96
	5.0	8.46	13.06	14.21	15.94	17.66	-	22.84	24.57
After 1986	4.0	17.47	28.02	30.66	34.61	38.57	43.84	50.44	54.39
	5.0	16.68	27.06	29.65	33.54	37.44	42.63	49.11	53.00
	6.0	15.42	25.44	27.94	31.70	35.46	40.47	46.73	50.49
	7.0	13.65	23.11	25.48	29.02	32.57	37.30	43.21	46.76
	8.0	11.33	20.01	22.18	25.44	28.69	33.03	36.80	41.71

Table 6. A Lane Flexural Strength from Live Load of North Korea T-Beam Bridge (t · m)

Width (m)	Span (m)					Class
	10	12	14	16	20	
7.5	72.2	89.1	110.3	168.4	174.7	1 st
5.5	54.2	67.0	82.4	144.7	129.9	2 nd
3.5	44.8	55.3	68.5	108.4	108.5	3 rd

6.3 프리스트레스트 콘크리트 T형 교

프리스트레스트 콘크리트 T형 교의 경우, 표준도면 설계 예로서 제시된 경간 39.1 m에 너비 24.5 m (4차선), 보 깊이 1.9 m인 표준도면을 분석하였다. 북한식으로 긴장재의 손실을 계산하고 콘크리트 균열을 고려한 허용 활하중 휨강도는 488.6 t·m로써 55 W / 58 T의 교량 MLC값을 나타냈으며, AASHTO LFD 기준을 따르는 NATO 방식으로 검토한 결과 588.53 t·m로 67 W / 70 T의 교량MLC값을 나타내어 1등급의 수준임을 알 수 있었다.

6.4 MLC 분석결과

Table 7에 나타난 표준 콘크리트 교량의 기간에 해당하는 북한 표준트럭하중의 급수를 바탕으로 도출한 북한 콘크리트 표준교량의 MLC값을 정리하면 Table 8과 같다. 이를 통해 교량의 능력을 해석함에 있어서 NATO의 방법이 북한보다 더 높은 능력으로 판단한다는 점을 알 수 있다. 이것은 전시에 교량의 능력을 최대한 활용하기 위함으로 판단된다. 더불어 1등 T형교의 경우에는 52 T이 넘는 K2, M1A1전차가 이용하기에 제한사항이 있다는 것을 알 수 있다.

Table 7. MLC of North Korea Design Vehicle

Bridge	Span	Truck Luggage Load		
		30	22	15
Slab	8 m	38 W	23 W	15 W
Modular T-Beam	16 m	35 W	24 W	16 W
PSC	39 m	45 W	33 W	22 W

Table 8. MLC and Class of North Korea Concrete Bridges

Bridge	MLC		Class	
	N.K.	NATO	N.K.	NATO
Slab	17 W / 15 T	30 W / 24 T	3 rd	2 nd
Modular T-Beam	41 W / 37 T	61 W / 52 T	1 st	1 st
PSC	55 W / 58 T	67 W / 70 T	1 st	1 st

7. 유한요소법을 이용한 활하중 영향비교

앞서 계산한 북한의 표준트럭하중과 균용표준가상차량의 결과를 비교, 검증하기 위해 북한 슬래브교와 조립식 T형교를 상용프로 그램인 ABAQUS (Abaqus 6.11-User Documentation, 2007)를 이용하여 유한요소 해석을 하였다. 교량의 설계는 설계조건과 세부 기준에 따라 다양한 결과가 나타날 수 있으나 본 연구에서는 북한 표준트럭과 균용표준하중의 활하중 차이에 따라 발생하는 영향만을 비교하였다. 그리고 앞서 분석한 교량의 능력에 북한의 교량 관리상태를 고려하여 강도감소계수를 0.9 대신 ‘보통손상 / 평가자료(이론) / 현장조사(개략) / 유지보수(불량)’에 해당하는 AASHTO 기준인 콘크리트 교량 0.75, PSC 교량 0.8을 적용한 활하중 휨강도 값도 함께 비교하였다. 이때, 교량에 최대 휨 모멘트를 부여하기 위해 차량하중은 차선을 준수하지 않았으며 단위하중의 좌우 위치에 따른 교량의 응답 영향선을 이용하여 하중의 최대영향위치를 결정하였다. 탄성해석으로 유한요소 모델은 ABQUS에서 제공하고 있는 C3D8R (3D 8절점), 솔리드모델을 사용하였으며 요소 크기는 150 mm 이내에서 값이 수렴도가 좋음을 확인한 후 슬래브 교와 T형교는 50 mm, PSC T형교는 100 mm의 길이를 갖는 정육면체로 모델링 하였다. 외부하중 역시 타이어 접지면적을 부여하기 위해 솔리드로 하였으며 모델 제원은 Table 9와 같다.

7.1 슬래브 교

유한요소 해석결과와 북한 및 NATO식으로 해석한 하중 및 교량의 계산값을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 Load (N.K.)은 하중을 북한식으로 해석한 휨모멘트값을, Load (NATO)은 NATO식으로 해석한 휨모멘트값을, Load (FEM)은 유한요소로 해석한 휨모멘트값을 의미한다. 가로 직선 그래프는 교량의 수준이며, 여기서 Bridge (N.K.)는 북한식으로 해석한 교량의 수준을, Bridge (NATO/ $\varphi = 0.75$)는 안전계수 0.75를 적용한 NATO식으로 해석한 교량의 수준을 의미한다. 안전계수를 적용한 NATO의 해석결과가 북한의 해석결과와 비슷함을 알 수 있다. 하중의 영향을 비교해

Table 9. Specifications of Bridge Model

Bridge	Span	Width	Depth (Beam)	Main Reinforcement
Slab	8 m	12 m	450 mm	$\phi 22 @ 150$ mm
Modular T-Beam	16 m	7.5 m	1.35 m (5 EA)	$\phi 32 @ 8$ EA
PSC T-Beam	39.1 m	24.5 m	1.9 m (16 EA)	$(\phi 5 \times 9) \times 12$ EA

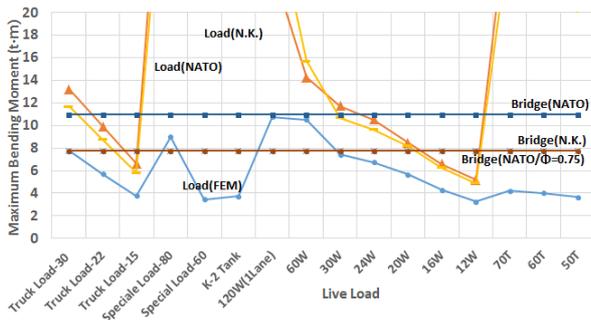


Fig. 5. Bending Moment (Slab Bridge)

보면 차륜차량은 계산 값보다 유한요소 해석결과가 약 0.7배로 작은 값을 나타냈다. 특이한 점으로 궤도차량의 경우 계산 값보다 유한요소 결과 값이 평균 0.15배로 작은 값을 나타냈다.

7.2 조립식 T형 교

Fig. 6에서 보듯이, 가로 직선 그래프인 교량의 수준을 보면 슬래브교와 마찬가지로 안전계수를 적용한 NATO의 해석결과가 북한식의 해석결과와 비슷함을 확인할 수 있다. 하중의 영향을 살펴보면 2차로로 사용할 때에는(왕복 2대의 차량하중을 가했을 때) 계산 결과보다 유한요소 결과가 0.9배 정도의 작은 값을 나타내었지만, 1차로로 이용할 경우에는 약 0.6배로 작은 값을 나타내었다. 그리고

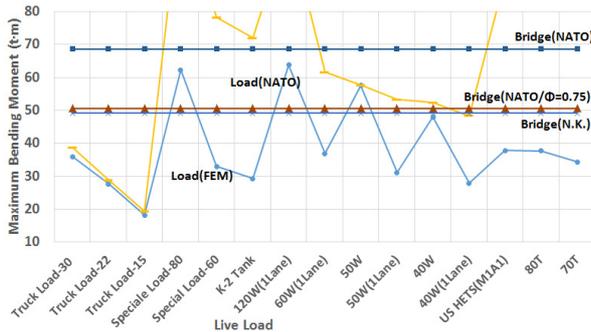


Fig. 6. Bending Moment (Modular T-beam Bridge)

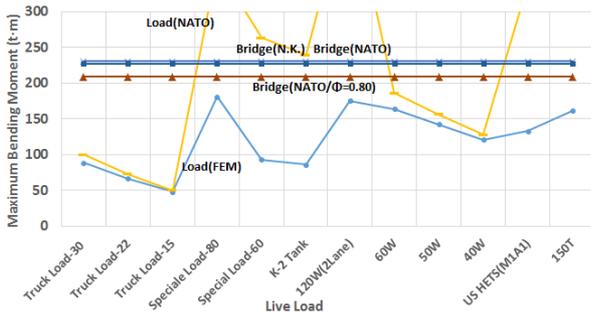


Fig. 7. Bending Moment (PSC Bridge)

조립식 T형교 역시 궤도차량의 경우에는 약 0.4배로 작은 값을 나타냄을 확인할 수 있었다.

7.3 프리스트레스트 콘크리트 T형 교

프리스트레스트 콘크리트 T형교의 경우, Fig. 7에서 보듯이 북한식과 강도감소계수를 적용하지 않은 NATO식 교량해석이 비슷한 값을 가짐을 확인할 수 있다. 궤도차량의 경우 조립식 T형교와 비슷하게 약 0.4배로 유한요소 해석결과가 작은 값을 나타내었다.

7.4 해석결과 분석

슬래브 교에서 활하중에 의한 최대 휨 모멘트 값이 북한식과 NATO식에 따라 다른 이유는 Table 1에 나타난 바와 같이 하중분배 계수 값의 차이로 인한 것으로 볼 수 있다. 전반적으로 북한식 하중분배계수가 NATO식의 그것보다 하중이 교량에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단했지만, 유한요소 해석결과와 비교했을 때 NATO식 해석이 충분히 더 잘 묘사함을 알 수 있었다.

교량 능력을 평가함에 있어서도 슬래브 교와 조립식 T형교에서는 북한식 해석이 NATO식 해석보다 0.7배 정도 작게 판단하여 북한식 해석이 더 보수적임을 알 수 있었는데, 이는 앞서 설명하였던 사용재료값 차이와 휨강도 계산방법의 차이, 그리고 사용하는 하중계수 차이 때문이었다. 특히 NATO에서는 AASHTO LFD에서 지정한 특별한 경우(Overload Criteria)에 사용하는 방법으로 하중계수를 통한 안전율을 그만큼 줄였기 때문에 교량이 더 큰 능력을 가진 것으로 계산된 것이다.

한 가지 특이한 점은 궤도차량의 경우 휨 모멘트를 계산한 결과가 유한요소 해석결과보다 2배에서 크게는 7배까지 큰 값을 나타낸다는 점을 볼 수 있다. 큰 차이를 일으킨 원인은 궤도차량 해석 시 궤도하중을 등분포 하중으로 가정하여 발생한 것으로 보인다. 특히 차이가 많이 나는 슬래브교의 경우 경간의 길이가 8 m 정도로 짧기 때문에 전차의 접지길이인 약 5 m를 고려해 봤을 때 휨 모멘트보다는 전단력으로 많이 분배된 것으로 판단된다. 하지만 T형교와 PSC교의 경우 1.5~2배 정도 차이가 나는 바 K-2 전차를 궤도 형태에 따라 6개의 축하중으로 바꾸어 모델링 하여 등분포 하중을 적용한 값과 비교해 보았다. 그 결과 휨 모멘트 값이 슬래브 교에서는 2.02배, 조립식 T형교에는 1.40배, PSC T형교에서는 1.15배 증가하여 등분포 하중으로의 가정이 문제가 있음을 확인할 수 있었다.

더불어 2차로 이상의 교량에서 교량의 능력이 부족하여 이용이 제한된다면 1차선으로 교량을 이용함으로써 극복이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

차륜차량의 경우 3가지 교량의 해석결과 모두 계산값보다 유한요소 해석결과값이 0.7~0.9배정도 작게 나왔는데 이는 유한요소

해석간 솔리드 요소를 이용한 경우 회전자유도가 고려되지 않아 단면력이 보 요소에 비해 작게 발생된 것으로 판단된다.

8. 결론

이 논문에서는 전시 군용차량의 북한교량 이용성을 판단하기 위해 1999년에 발간되어 북한의 교량 설계에 대해 새로운 설계방법(극한상태설계법)을 다루고 일부 교량의 표준설계도면을 담고 있는 ‘운수건설 총서’를 기본으로 하여 가장 많이 건설되는 교량 3가지(슬래브 교, 조립식 T형교, PSC T형교)와 북한 표준트럭하중을 휨 모멘트 값과 군용하중급수분류법을 이용해서 비교분석 하였다.

먼저 북한 표준트럭하중의 경간별 최대 휨 모멘트와 전단력을 군용표준가상차량과 비교함으로써 북한 1, 2, 3등교의 설계하중은 각각 30~40 W, 20~24 W, 12~16 W의 값을 나타냄을 알 수 있었다. 즉 북한 1등교라 할지라도 40 W 이상의 군용차량은 이용이 불가능해 보였다.

교량의 표준도면을 분석한 결과 슬래브 교는 1등교(76 W / 50 T), 2등교(57 W / 37 T), 3등교(30 W / 24 T)의 수준을, 조립식 T형 교는 1등교로써 60 W / 52 T의 수준을, PSC T형 교 역시 1등교로써 67 W / 70 T의 수준을 보였다. 그리고 1986년 이전 설계기준에 따른 슬래브 교의 휨 강도와 조립식 T형 교의 1, 2, 3등교 표준도면의 능력을 북한 철근량 계산식을 이용해 추정해 보았다.

마지막으로 위 결과를 유한요소법을 사용하여 계산한 결과와 비교해 보았으며 교량능력평가에 있어서 안전율을 고려한 NATO 식 해석이 북한식 해석의 값과 비슷했으며, 궤도차량의 해석에 있어서 등분포하중으로 가정하기 보다는 궤도 안에 있는 바퀴를 이용해 각각의 축하중으로 계산하는 것이 더 현실적임을 알 수 있었다.

본 논문은 여러가지 제한된 자료로 인해 상당한 불확실성을 포함하고 있다. 특히 북한에서 교량을 설계함에 있어 어느 정도의 안전율을 부여하는지, 북한 교량의 관리상태가 어떠한 지에 따라 교량의 능력은 큰 차이가 생길 수 있기 때문이다. 때문에 예상되는 강도감소계수를 적용시킬 수밖에 없었다. 현재 군에는 북한 교량의

여러 사진들이 비밀문서로 보관 및 관리되고 있는데, 이러한 사진들을 바탕으로 노후정도를 판단하는 방법에 대한 추가 연구가 필요할 것이다. 또한 비파괴 시험과 같은 현장에서 어느정도 교량의 노후정도를 판단할 수 있는 방법에 대한 연구도 함께 된다면 전시 북한교량 능력판단에 보다 정확성을 가질 수 있을 것이다.

References

- Dassault Systems (2007). *Abaqus 6.11 - user documentation*.
- Ha, J. W. (2003). *A study of evaluation of bridge by specialized vehicle load*, Master's Thesis, University of Changwon, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea (in Korean).
- Han, E. S., Lee, I. K. and Park, S. K. (2013). "Study on design vehicle loads of South and North Korean highway bridges." *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 37-45 (in Korean).
- Han, E. S., Lee, I. K. and Park, S. K. (2013). "Study on the reinforced concrete slab bridges of North Korea." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 2, pp. 455-464 (in Korean).
- Headquarters, Department of the Army (2002). *FM 3.34.343, military nonstandard fixed bridging*, Washington, DC.
- Jeon, B. H. et al. (2005). *Protection engineering*, Chungmungak (in Korean).
- Kang, Y. C. and Lee, P. J. (2009). "Feasibility study on the road bridge passed by heavy equipment transporter" *Journal of the Korea Institute of Military science and Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 236-247 (in Korean).
- Kim, H. S. and Youn, B. J. (2011). "The analysis of the capability for MBT to pass the bridge using MLC." *Proc. of 7th National Conf. on Military Technology*, Seoul, Republic of Korea, pp. 241-248 (in Korean).
- Lim, K. B. et al. (1999). *A series of transportation construction (bridge construction)*, Design Specification, Industrial Publishing Company, North Korea (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation (2010). *Bridge design specification*, Design Specification, Ministry of Construction and Transportation, Korea (in Korean).
- Park, B. H., Song, J. H. and Jang, I. Y. (2006). "Feasibility study on the road bridge passed by military heavy vehicle." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 6, No. 2, pp. 37-44 (in Korean).