Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 24, No. 10 pp. 247-254, 2023

https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.10.247
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

군용하중급수 크기에 따른 장간조립교의 안전성 검토

정선우, 이준혁, 김동윤, 허장욱*
국립금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합공학전공)

A Study on the Safety of Panel Bridge according to the Military Load Classification

Sun-Woo Jeong, Joon-Hyuk Lee, Dong-Yun Kim, Jang-Wook Hur*
Department of Mechanical Engineering(Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering), Kumoh Natinoal Institute of Technology

요 약 장간조립교는 전시 기동로 확보 및 보급로 개척을 위해 임시로 설치하여 운용되며, 전시뿐만 아니라 평시 폭우 등 자연재해로 교량이 유실되었을 때 국민들의 편의와 안전확보를 위해 사용된다. 만약, 장간조립교가 붕괴된다면 다리 위에서 차량이나 보행자 등이 추락하여 심각한 인명 피해가 발생하고, 물자수송이 차단되어 보급에 차질이 발생하여 전시상황에서 큰 문제를 일으킬 수 있다. 따라서, 궤도차량과 차륜차량 등의 군용 차량이 장간조립교를 통과할 때의 붕괴사고를 예방하기 위해 적절한 설계로 안전성 확보는 필수불가결하다. 전시 우리 군과 연합작전의 주요 대상인 미국의 M1 에이브럼스 계열의 전차인 M1A2의 중량은 63톤에 이르고 있으며, 최근 운용 및 개발되는 고중량의 전차와 자주포에 맞춰 여러 하중 조건에서 장간조립교의 안전성이 어떻게 달라지는지 확인할 필요가 있다. 교량의 폭이 6.5m이고, 총 길이가 58m인 1단 3중식 트러스 구조의 모델에 MLC(Military Load Classification)에 따른 MLC 50, 60, 70 및 80의 정하중과 동하중을 적용하여 해석을 진행하였고, 구조적 안전성을 확인하여 모든 MLC조건에서 궤도차량의 안전율이 차륜차량의 안전율보다 높다는 것과 MLC70 이하에서는 차륜차량과 궤도차량 모두 안전성 확보가 가능함을 확인하였다. 본 연구의 결과를 통해 붕괴로 인한 잠재적인 인명 피해 방지와 재난 상황에서의 효과적인 보급 활동을 지원하여 국가의 재난 대응 역량을 강화할 수 있고, 구조적인 취약점이나 문제점을 파악하여 이를 보완하는 새로운 설계기준과 방법론을 제안할 수 있다. 또한, 군사 작전 중에도 보급 및 이동 활동이 원활하게 수행되어 군사 작전 능력을 강화하고 작전의 성공 가능성을 높일 수 있다.

Abstract Panel bridges are used not only for exhibitions, but also for the convenience and safety of people when bridges are lost during natural disasters such as heavy rains. If a panel bridge collapses, it can cause serious casualties and major problems. Therefore, proper design is essential to prevent collapse when vehicles pass over a panel bridge. The U.S. M1A2 tank weighs up to 63 tons, and it is necessary to see how the safety of a panel bridge varies under various load conditions in line with the recently used high-weight tank and self-propelled gun. A one-stage triple truss structure model with a width of 6.5 m and a total length of 58 m was analyzed by applying a static load and dynamic load of Military Load Classification (MLC) 50 to 80. Through the results of this study, disaster response capabilities could be strengthened, structural weaknesses or problems could be identified, and new design standards and methodologies could be proposed to supplement them. In addition, supply and movement activities could be carried out smoothly during military operations, strengthening military operational capabilities and increasing the likelihood of success in the operation.

Keywords : Panel Bridge, Military Load Classification, Factor of Safety, Tracked Vehicle, Wheeled Vehicle

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2023-2020-0-01612)
*Corresponding Author : Jang-Wook Hur(KIT)
email: hhjw88@kumoh.ac.kr
Received July 27, 2023 Revised August 29, 2023
Accepted October 6, 2023 Published October 31, 2023

1. 서론

장간조립교는 트러스 구조의 교량으로 기동부대의 기동지원, 보급로 유지보수 등 전시 기동로 확보 및 보급로 개척을 위해 임시로 설치하여 운용되며, 전시뿐만 아니라 평시 폭우 등 자연재해로 교량이 유실되었을 때 국민의 편의와 안전확보를 위해 사용된다. 만약, 이러한 장간조립교가 붕괴한다면 다리 위에서 이동중인 차량 등이 추락하여 심각한 인명 피해가 발생하고, 해당 구간의 물자수송이 차단되어 보급에 차질이 발생하여 전시상황에서 큰 문제를 일으킬 수 있다[1].

장간조립교의 붕괴 사고를 예방하기 위해 적절한 설계로 안전성 확보가 필요하다. 현재 시행중인 도로법 제59조를 살펴보면, 적재화물이나 차량의 구조가 특수성을 띠고 있을 때 관리청은 이에 대한 허가를 내줄 수 있다고 명시되어 있으며, 자동차관리법 제2조(정의)에서는 일반적으로 통용되고 있는 자동차의 정의에 관해 설명되어 있는데, 이중 대통령령이 정하는 것은 예외로 한다고 명시되어 있다. 또한, 자동차관리법 제2조(적용이 제외되는 자동차)에서도 마찬가지로 군수품관리법에 따른 차량은 통행제한운행 기준에 일정부분 자유롭다고 명시되어 있다. 즉, 군용 차량이 축하중 100kN, 총중량 400kN 이라는 현행 법규상의 운행제한 기준을 초과하더라도 교량의 안전상 문제가 없음이 입증된다면, 일정 제한 조건 하에서 통과가 가능하다는 것을 알 수 있다[2].

장간조립교의 안전성을 분석한 기존 연구로는 차량하중 34톤의 조건에서 강도 검증과 부식 저항 실험을 하거나 유한요소해석을 통해 주요부재를 분석한 것이 있으며, 선형탄성해석을 통해 부하하중에 따른 각 주요부재의 항복응력에 대한 안전율을 검토하였다[3,4]. 강도 검증의 경우 장간조립교의 주요부재를 인장강도 시험 규격에 맞는 표준시편 크기로 가공하여 인장, 압축 및 굽힘 시험을 하였고, 주요부재에 대해 오일러의 좌굴식에 의해 좌굴강도를 계산하였다. 또한, 해석 결과가 큰 법선응력이 발생하는 주요부재의 파괴에 대한 구조물의 안전성을 검토하여 주요부재의 항복, 결손 및 좌굴 등에 따른 파괴가 전체 구조물의 안전율 변화에 미치는 영향을 제시하였다.

전시 우리 군과 연합작전의 주요 대상인 미국의 M1 에이브럼스 계열의 전차인 M1A2의 중량은 63톤에 이르고 있으며, 최근 운용 및 개발되는 고중량의 전차와 자주포에 맞춰 여러 하중 조건에서 장간조립교의 안전성이 어떻게 달라지는지 확인할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 법 적용 제외 대상으로서의 군용 궤도차량과 차륜차량이 현용 트러스 구조의 장간조립교 통과를 대상으로, 이를 모델링하여 군용하중급수에 따른 여러 가지 조건에서의 해석 결과를 획득함으로써, 군용하중급수 크기에 따른 구조적 안전성을 검토하고 있다.

2. 장간조립교 구성과 군용하중급수

2.1 장간조립교 구성

장간조립교는 크게 교량 조립체와 부수자재로 구분되며, 교량 조립체는 Fig. 1과 같이 경간(Panel), 횡골(Transom), 보강현(Chord reinforcement), 대각 받침대(Swaybracing), 연직 받침대(Vertical braces), 종주(End post), 바닥판(Steel deck unit), 결착판(Bracing frame) 및 기초판(Baseplate)으로 구성되어 있고, 부수자재에는 인양 케이블, 너클 베어링, 슬링 바, 로라, 이음목, 볼트, 너트 및 대형 핀 등이 있다[5-7].

장간조립교의 재질은 Table 1에 나타낸 바와 같이 경간과 바닥판 등의 주요 부재는 HSB 690, 연결핀은 F 10T, 볼트와 너트는 SCM 440으로 구성되어 있다[8].

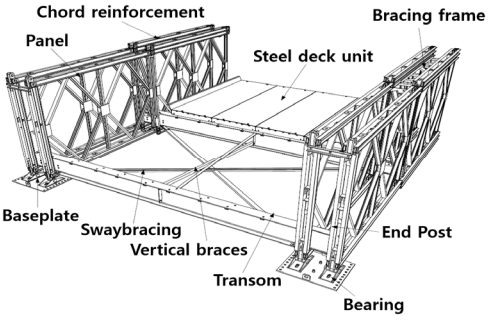


Fig. 1. Configuration of panel bridge

Table 1. Material properties

Type	Panel & Deck (HSB 690)	Pin (F 10T)	Bolt & Nut (SCM 440)
σ_Y[MPa]	690	900	630
σ_u[MPa]	800	1100	980
σ_{allow}[MPa]	415	-	-
τ_{allow}[MPa]	240	-	-

2.2 군용하중급수

미군교범에 기술된 군용하중급수분류법(MLC, Military Load Classification)은 미 공병단에서 개발하여 현재는 NATO 회원국 및 우리 군의 표준으로 사용하고 있는 교량해석 방법이다[9]. 세부 내용을 Table 2에 나타낸 것처럼 임의의 군용차량이 교량에 미칠 영향과 동일한 영향력을 가질 것으로 예상되는 표준가상차량의 무게를 해당 군용 차량의 급수로 지정토록 하였다. 따라서, MLC는 여러 종류의 군용차량과 교량의 수준을 상호 비교하여 교량통과 가능성을 판단하고 통과방법(정상·주의·위험통과)을 결정하는 분류법이다.

여기에서 사용하는 1톤은 약 8.9 kN에 해당하며, 궤도차량은 T(Tracked Vehicle)를, 차륜차량은 W(Wheeled Vehicle)를 무게 뒤에 붙여서 50T, 60W 처럼 단위없이 사용하고 있다[10,11].

Table 2. MLC definition

Section	Military Load Classification(MLC)
Basis	NATO Convention (STANAG 2010/2021)
Target bridge	Standard Fixed and Adjacent Bridges
Reference vehicle	16 standard virtual vehicles (wheel/track vehicles)
Load	Fixed load, moving load, impact load, etc. (Use the largest number)
Load capacity calculation	Calculation of MLC for moment and shear force of bridge
Display Results	Display MLC numbers on vehicles and bridges
Vehicle classification	Pre-MLC classification for standard virtual vehicles
Pass method	Passing of normalcy, caution and danger
Restriction of passage	Normal Pass when vehicle MLC 〈 bridge MLC

3. 해석방법

3.1 교량 모델링

병역자원 감소로 가설 인원이 축소되고 있고 전시 긴박한 상황을 고려하여 트러스 구조 장간조립교의 장간 층수가 1단이고, 장간의 좌우에 트러스 열이 3개인 1단 3중식 모델을 사용하였다. 교량의 폭이 6.5m이고, 총 길이가 58m인 해당 모델은 CATIA를 사용하였으며, 이를 범용 해석 소프트웨어인 ANSYS Workbench를 이용하여 계산하였다. 이때, 해석시간 단축을 위해 Fig. 2와 같이 Symmetry조건을 사용하여 Half model을 적용하였으며, 기계적 성질은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

3.2 하중 조건

미군교범의 군용하중급수분류법에서는 임의차량의 급수를 분류하기 위해 차량으로 인해 발생하는 최대 휨 모멘트와 전단력을 대상으로 급수 4톤에서 150톤의 범위에 걸쳐 표준가상차량을 분류하고 있다[10]. 그리고 선진 각국에서 운용중이거나 개발중인 교량 가설장비의 특성이 기존 장비에 비하여 기동성 증대, 가설인원 및 소요시간 단축, 가설길이 연장 및 통과하중 증대 방향으로 발전하고 있다[12]. 이에 따라 MLC 50에서 MLC 80까지를 해석범위로 Table 3과 같이 궤도차량과 차륜차량에서의 하중 조건으로 적용하였다[13].

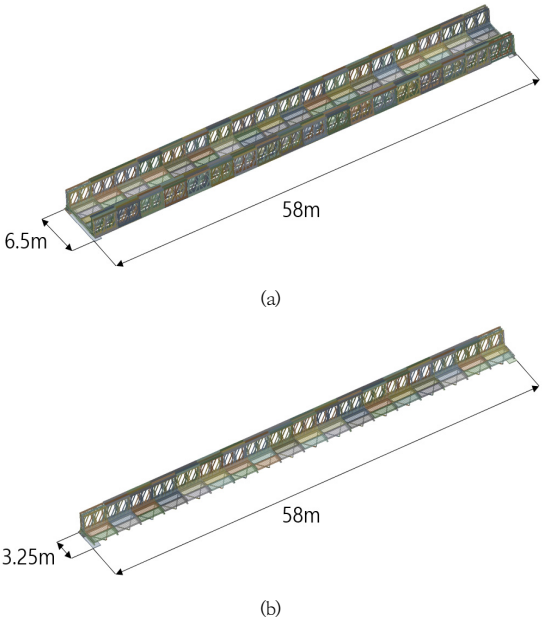
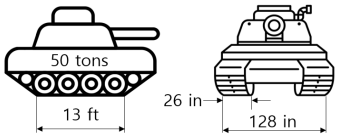
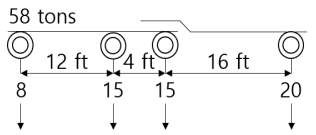
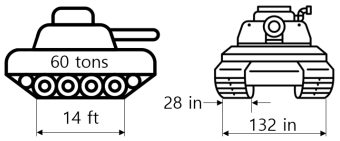
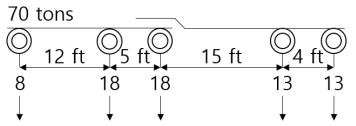
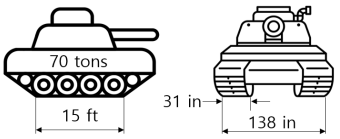
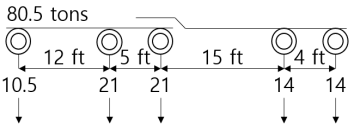
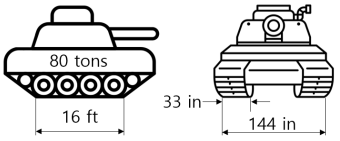
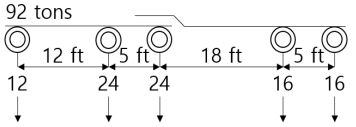


Fig. 2. Model of bridge
(a) Full model (b) Half model

Table 3. Hypothetical vehicles for MLC

Class	Tracked vehicles	Wheeled vehicles
50		
60		
70		
80		

4. 해석결과 및 고찰

4.1 군용하중급수에 대한 해석 결과

요구되는 통과하중 능력의 향상으로 인하여 4가지 군용하중급수에 대해 장간조립교의 정하중 및 동하중 해석을 하였다. 정하중 해석결과는 궤도차량이 Fig. 3, 차륜차량이 Fig. 4와 같고, 동하중은 정하중에 가해지는 힘의 충격에 의한 영향으로 15%의 하중을 추가로 고려하여 해석하였으며[14], 이 때의 해석결과는 궤도차량이 Fig. 5, 차륜차량이 Fig. 6에 나타낸 바와 같다. 모든 조건의 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대 처짐이 발생하는 부위는 바닥판 중앙부 아래에 있는 대각 받침대에서 발생하였다.

4.2 장간조립교의 안전성 평가

교량이 최대하중을 받을 때 추가적인 하중을 얼마나 더 견딜 수 있는지 나타내는 안전율(Factor of safety)을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F.S = \frac{Yield\,Stress}{Allowable\,Stress} \tag{1}$$

정하중과 동하중 각각에 대한 해석 결과인 처짐, 등가응력 및 전단응력을 Table 4에 나타내었으며, HSB 690의 기계적 특성인 허용응력 415MPa을 사용하여 안전율을 계산하였고[8], 이에 관한 결과는 Table 4에 나타내었다. 안전율은 국토교통부의 도로설계기준(한계상태설계법)에서 극한한계 상태에서 중요 교량 기준으로 1.05 이상이 되었을 때 안전성이 있다고 판단하였다[15].

MLC 50에서 MLC 70까지의 경우 안전율이 1.05 이상이 되었지만, MLC 80의 차륜차량은 정하중과 동하중의 안전율이 각각 1.04와 0.91로 구조적 안전성이 미흡한 것을 알 수 있다. 따라서 트러스 구조의 1단 3중식 58m 장간조립교는 궤도차량과 차륜차량 모두 MLC 70까지는 구조적 안전성을 가지고 있으나, MLC 80에서는 차륜차량의 구조적 안전성이 미흡함을 알 수 있다.

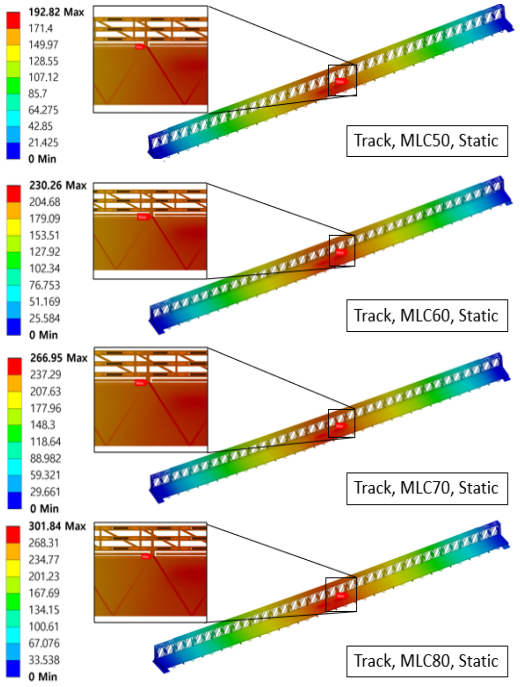


Fig. 3. Deformation of track vehicles under static load from MLC50 to MLC80

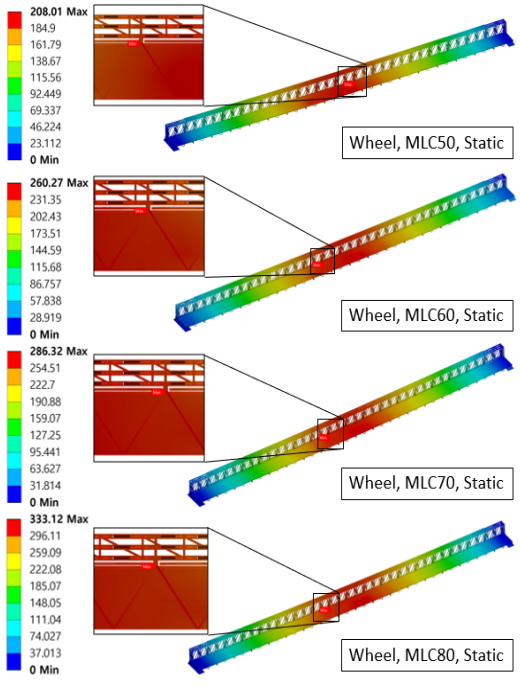


Fig. 4. Deformation of wheel vehicles under static load from MLC50 to MLC80

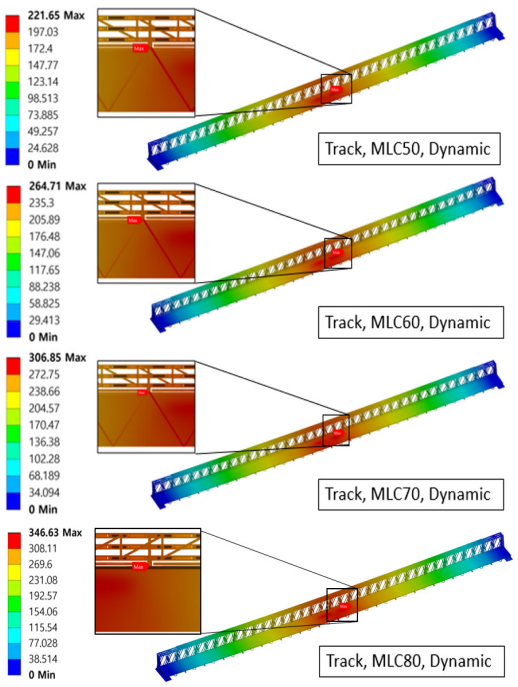


Fig. 5. Deformation of track vehicles under dynamic load from MLC50 to MLC80

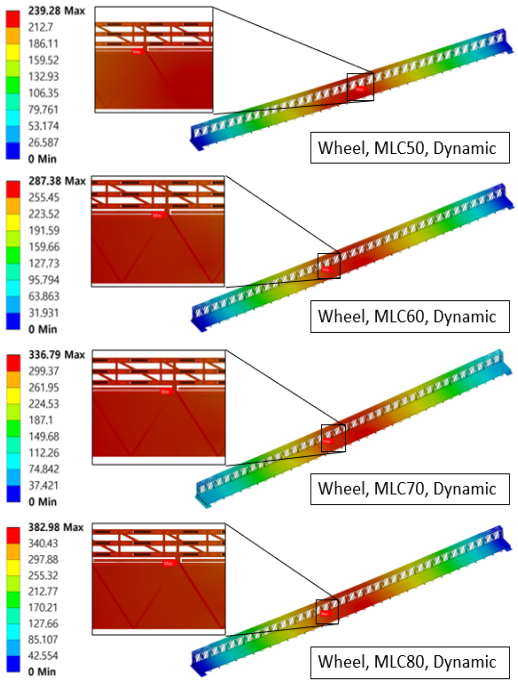


Fig. 6. Deformation of wheel vehicles under Dynamic load from MLC50 to MLC80

Table 4. Maximum equivalent stress and safety factor

Type			Track	Wheel
MLC50	Static Structure	δ_{max} [mm]	192.82	208.01
		σ_{max} [MPa]	212.48	244.62
		τ_{max} [MPa]	74.853	69.981
		F.S	1.95	1.70
	Dynamic Structure	δ_{max} [mm]	221.65	239.28
		σ_{max} [MPa]	243.75	281.76
		τ_{max} [MPa]	86.073	80.387
		F.S	1.70	1.47
MLC60	Static Structure	δ_{max} [mm]	230.26	260.27
		σ_{max} [MPa]	256.2	306.21
		τ_{max} [MPa]	89.596	85.822
		F.S	1.62	1.36
	Dynamic Structure	δ_{max} [mm]	264.71	287.38
		σ_{max} [MPa]	294.02	337.34
		τ_{max} [MPa]	103.16	96.638
		F.S	1.41	1.23
MLC70	Static Structure	δ_{max} [mm]	266.95	286.32
		σ_{max} [MPa]	301.96	338.67
		τ_{max} [MPa]	103.91	94.651
		F.S	1.37	1.23
	Dynamic Structure	δ_{max} [mm]	306.85	336.79
		σ_{max} [MPa]	346.45	390.15
		τ_{max} [MPa]	119.72	108.96
		F.S	1.20	1.06
MLC80	Static Structure	δ_{max} [mm]	301.84	333.12
		σ_{max} [MPa]	336.92	397.85
		τ_{max} [MPa]	116.91	104.8
		F.S	1.23	1.04
	Dynamic Structure	δ_{max} [mm]	346.63	382.98
		σ_{max} [MPa]	386.27	458.36
		τ_{max} [MPa]	134.8	120.8
		F.S	1.07	0.91

5. 결론

본 논문은 장간조립교의 붕괴 사고를 예방하기 위해 적절한 설계를 위한 구조적 안전성 분석을 목적으로 하였다. 궤도차량과 차륜차량이 1단 3중식 장간조립교를 통과할 때의 붕괴 사고를 예방하기 위해 군용하중급수분류법에 따라 MLC 50, 60, 70 및 80의 정하중과 동하중을 적용하여 각 경우에서의 해석 결과를 분석하고, 구조적 안전성을 확인하였다. 모든 해석에서 최대 처짐은 바닥판 아래에 있는 대각 받침대에서 발생하였으며, MLC가 증가함에 따라 처짐의 크기도 증가하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 입력하중 조건이 상이함에 따라 모든 MLC 조건에서 궤도차량의 안전율이 차륜차량의 안전율보다 높다.
2) MLC 70 이하에서는 차륜차량과 궤도차량 모두 안전성 확보가 가능하다.
3) MLC 80에서 차륜차량의 정하중과 동하중 안전율이 각각 1.04, 0.91이 되어 안전성이 확보되지 않으므로 MLC 80 이상의 군용차량 통과는 회피하여야 한다.

본 연구에서는 워크스테이션의 성능과 연산능력의 부족으로 궤도차량과 차륜차량이 장간조립교의 정하중과 15%의 추가 하중을 가한 동하중을 고려하였다. 차후에는 장간조립교의 실제 응력상태를 간이 측정하여 해석결과의 타당성을 비교 연구할 계획이다.

References

[1] Army Headquarters, Panel Bridge Bailey Type M2, Technical Manual, Republic of Korea, pp.1-2

[2] Y. C. Kang and P. J. Lee, "Feasibility Study on Road Bridge Passed by Heavy Equipment Transporter", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 12, No. 2, pp.236-247, 2009 https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO200917639072149

[3] J. W. Lee, S. H. Yoo, I. S. Kim, T. Y. Kim, H. H. Choi, W. S. Yoon and Y. C. Kim, "A Study on the Analysis for the Strength of Bailey Panel Bridge", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 14, No. 1, pp.15-21, 2011. DOI: https://doi.org/10.9766/KIMST.2011.14.1.015

[4] J. W. Lee, J. Y. Lee, S. S. Cho, S. H. Yoo, H. H. Choi, W. S. Yun and T. Y. Kim, "A Study on the Analysis for the Stability of Bailey Panel Bridge by FEM", *Journal of the Korea Institute of Military Science and*

Technology, Vol. 14, No. 3, pp.335-344, 2011.
DOI: https://doi.org/10.9766/KIMST.2011.14.1.015

[5] Waagner Biro, Panel Bridge System, Design and Erection Manual, Austria, pp.13-14

[6] Mabey, Logistic Support Bridge, General Manual, U.S., pp.26-36

[7] Acrow, 700XS Modular Bridging System, Technical Manual, U.S., pp.9-18, 39-42

[8] MOLIT, KDS 24 14 30, Design Criteria for Steel Bridges(Allowable Stress Design Method, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Republic of Korea, pp.7-25
https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000179211#

[9] Headquarters-Department of the Army, Military Nonstandard Fixed Bridging, Manual, U.S., FM 3-34.343 / 5-446, pp.345-357

[10] H. B. Park, H. G. Kwak, "Military Load Classification (MLC) on Concrete Bridges in North Korea", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 3, pp.513-520, 2017
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2017.37.3.0513

[11] S. H. Moon and D. G. Lym, "Can the K-1 tank pass through the bridge?", *Journal of Military History Studies*, Vol. 122, pp.595-620, 2005
http://audio.dn.naver.com/audio/ncr/1406_1/20120817134906256_ES7X8F2CI.pdf

[12] H. S. Shin, S. W. Kim, J. H. Lee, I. J. Kwak, C. B. Jo, W. G. Na and J. H. Kim, Development of 60m Long-span Lightweight Temporary Bridge for Rapid Construction, Planning and Research Report, Korea Institute Of Construction Technology, Republic of Korea, pp.1, 2018
https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKCRK190418

[13] Headquarters-Department of the Army, Combined Arms Breaching Operations, Manual, U.S., FM 3-34.343 Appendix B
https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/3-34-343/appb.htm

[14] NATO, "NATO STANAG 2021, Military Load Classification of Bridges, Ferries, Rafts and Vehicles", NATO standardization agreement (STANAG), NATO Standardisation Agency

[15] MOLIT, Bridges Design Code, Limit States Design, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp.5-12
https://www.codil.or.kr/viewDtlConWrkDtlSch.do;jsessionid=rCjAHaoDNOF0GftUjOCKmzMACm6ZzdCjH9mKZz1HdVaA9CESV1FFWiR1zpo0mqYr.codil_servlet_engine1?pMetaCode=CIGCDC190019&gubun=std

정 선 우(Sun-Woo Jeong) [준회원]

- 2023년 3월 : 금오공과대학교 기계공학과 (석사 입학)
- 2017년 3월 ~ 2023년 2월 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 (학사)
- 2021년 8월 ~ 현재 : 금오공과대학교 국방신뢰성연구실 학생연구원

〈관심분야〉
시스템엔지니어링, 신뢰성공학, 국방과학, RAM, CBM+

이 준 혁(Joon-Hyuk Lee) [준회원]

- 2023년 3월 : 금오공과대학교 기계공학과 (석사 입학)
- 2017년 3월 ~ 2023년 2월 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 (학사)
- 2021년 7월 ~ 현재 : 금오공과대학교 국방신뢰성연구실 학생연구원

〈관심분야〉
시스템엔지니어링, 신뢰성공학, 국방과학, RAM, CBM+

김 동 윤(Dong-Yun Kim) [준회원]

- 2023년 3월 : 금오공과대학교 기계공학과 (석사 입학)
- 2017년 3월 ~ 2023년 2월 : 금오공과대학교 기계설계공학과 (학사)
- 2022년 12월 ~ 현재 : 금오공과대학교 국방신뢰성연구실 학생연구원

〈관심분야〉
시스템엔지니어링, 신뢰성공학, 국방과학, RAM, CBM+

허 장 욱(Jang-Wook Hur) [정회원]

- 1992년 10월 ~ 1995년 9월 : 일본 동경공대 기계물리공학과 (박사)
- 2009년 1월 ~ 2011년 12월 : 방사청 KHP사업단 체계종합/사업총괄담당 (중령)
- 2012년 3월 ~ 2012년 8월 : 탄약사 기술관리처장 (대령)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 교수

〈관심분야〉
시스템엔지니어링, 신뢰성공학, RAM, CBM+