

탈·부착식 교량 방호울타리의 3차원 유한요소 정적해석 및 안전성 평가

이상열^{*}

¹안동대학교 토목공학과

Three-dimensional finite element static analysis and safety evaluation of attachable roadside barriers on bridges

Sang-Youl Lee^{*}

¹Department of Civil Engineering, Andong National University

요 약 본 연구에서는 교량 통합 부대시설 모듈 구조 개발을 위하여 측면 탈·부착식 교량 방호울타리의 3차원 유한요소 해석 및 구조 안정성 평가를 수행하였다. LS-DYNA 프로그램을 사용하여 연결 모듈의 격벽 간격 및 볼트 갯수 변화가 방호울타리 구조의 변위 및 응력에 미치는 영향을 상세 분석하였다. 본 연구에서는 LS-DYNA 프로그램을 사용한 유한요소해석은 콘크리트 바닥판에 삽입된 앵커볼트로 연결된 모듈 위에 설치된 방호울타리의 정적 거동과 구조 안전성을 분석하기 위하여 확장되었다. 수치해석은 6개의 매개변수에 대하여 방호울타리에 발생한 처짐 및 응력분포를 비교 분석하였으며 모두 구조적으로 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

Abstract This study carried out three-dimensional finite element analysis and structural safety evaluation of attachable roadside barriers. The effects of diaphragm distance and the number of bolts on displacements and maximum stresses for various parameters are studied using the LS-DYNA finite element program for this study. In this study, the existing finite element analysis of barriers using the LS-DYNA program is further extended to study static behaviors and structural safety of the barrier with module structures connected by anchor bolt inserted through concrete bridge decks. The numerical results for six parameters are verified by comparing different models with displacements and stress distribution occurred in the barrier and shows good structural performance.

Key Words : Attachable roadside barriers, finite element analysis, structural safety, LS-DYNA

1. 서론

지속적인 국토 개발과 산업화의 가속으로 국내의 각종 도로 시설물은 크게 증가되어왔다. 도로 및 교량에 설치되는 각종 시설물은 원활한 차량 소통 및 안전보호, 그리고 차량 운전자의 정보 제공 등의 유익한 역할을 한다. 그러나, 도로 및 교량을 통행하는 각종 차량수가 지속적으로 증가하면서 트럭 등 중차량 및 승용차의 과속 주행 등에 의한 각종 사고로 인명 및 재산피해도 빈번하게 발생되고 있다. 이러한 사고에 의한 피해를 예방 또는 최소화하기 위하여 도로 및 교량에는 방호울타리 또는 충격

흡수시설 등이 설치되어 있다.

교량의 부대시설로 설치되는 이와 같은 차량방호 안전시설은 실물 차량충돌시험을 통해 탑승자 보호성능, 시설의 거동, 충돌 후 차량의 거동을 조사하여 성능평가를 한다[1]. 차량방호 안전시설의 거동과 충돌 후 차량의 거동에 관한 평가는 주로 변위계측을 통하여 실행하고, 탑승자 보호성능에 관한 평가는 계측된 가속도 및 각속도 자료를 활용하여 실행한다. 그리고 탑승자 보호성능에 대한 평가는 차량무게중심에서 계측된 가속도와 각속도를 이용하여 결정된 탑승자 안전지수를 검토하여 실행한다[1]. 또한 방호울타리 외 부대시설을 설치하기 위해

^{*}Corresponding Author : Sang-Youl Lee(Andong National University)

Tel: +82-10-3011-4696 email: lsy@anu.ac.kr

Received December 3, 2013

Revised January 3, 2014

Accepted April 10, 2014

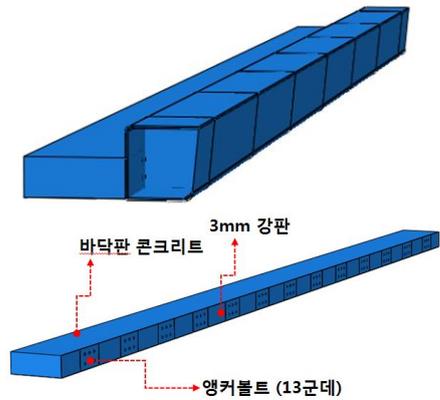
서는 현치부 시공이 필요하다. 현치부 시공은 추가적으로 비용이 발생하고, 중방향 부분 설치로 인해 미관상 좋지 않다. 최근 국토해양부에서 주관하여 포항산업과학연구원에서 개발되고 있는 측면 탈·부착식 부대시설 연결 구조시스템은 이런 부분을 보완해 줄 수 있는 시스템이라 할 수 있다[2]. 이러한 구조형식은 측면에 작용되는 각종 하중에 취약할 수 있으나, 상세 거동해석은 아직 미미한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 측면 탈부착식 모듈로 연결된 방호울타리 구조를 대상으로 하여 3차원 상세 유한요소 해석을 실시하여 변위 및 응력 분포를 분석하고 구조적 안전 평가를 수행하기로 한다.

2. 유한 요소 모델

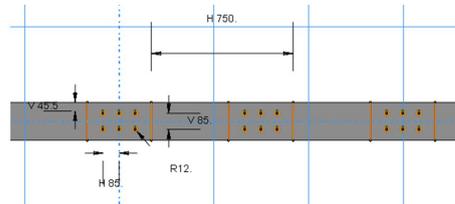
본 연구에서는 국토해양부 연구개발사업 중 모듈러교량 기술 개발 및 실용화 연구단의 주관기관인 포항산업과학연구원에서 2010년부터 연구개발 중인 모듈러 교량 구조 중 측면 탈·부착식 통합 부대 시설물 정보를 인용하였으며 개발 중인 구조물을 대상으로 유한요소 정적 해석을 수행하였다 [2]. 이러한 시설물의 통합 모듈 시스템은 시공 및 유지관리 관점에서 여러 가지 장점을 갖고 있으나, 각 시설들을 구조적으로 안전하게 연결하는 것이 중요한 문제가 된다[3]. 특히, 이러한 구조에 대하여 방호울타리에 차량이 충돌하는 경우에 대한 운전자 및 구조물 안전에 대한 분석은 본격적인 실용화에 앞서 매우 중요하다[4-6]. 그림 1은 측면 탈·부착식 연결모듈의 상세를 보여준다.

측면 탈부착식 부대시설물에 대한 유한요소 모델링은 전문 LS-DYNA 프로그램을 사용하였다[7]. 대상 구조물의 경계조건은 방호울타리와 모듈구조, 그리고 강판구조는 가상의 절점으로 연결하여 자유도를 부여하였으며, 콘크리트 바닥판과 연결되는 부분은 앵커볼트를 모델링하여 체결력으로 연결하도록 구성하였다. 그림 2는 측면 폐쇄형 단면에 대한 3차원 유한요소 모델링을 보여준다. 전체 구조물에 대하여 189,146개의 요소를 사용하였으며, 204,903개의 절점수가 적용되었다. 본 연구에서는 6가지 해석경우로 나누어 수치해석을 실시하였으며, 요약하면 표 1과 같다. 수치해석은 측면 폐쇄 또는 개방구조에 대하여 격벽의 간격 및 유무, 그리고 측면 앵커볼트의 개수 등으로 구분하여 각 경우에 대하여 상세 해석을 실시하였다. 또한, 모듈 사이에 일정 간격으로 격벽을 설치하고,

격벽 유무에 대한 해석 결과도 비교하였다.

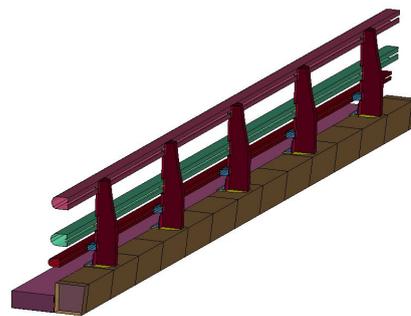


(a) Module connected to a deck

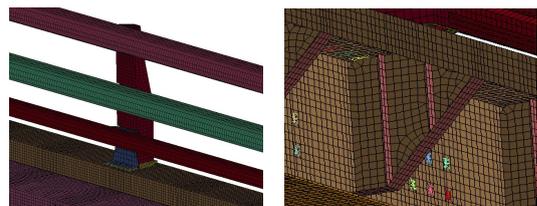


(b) Detail in bolting

[Fig. 1] Details of attachable modules developed by RIST



(a) Entire modeling



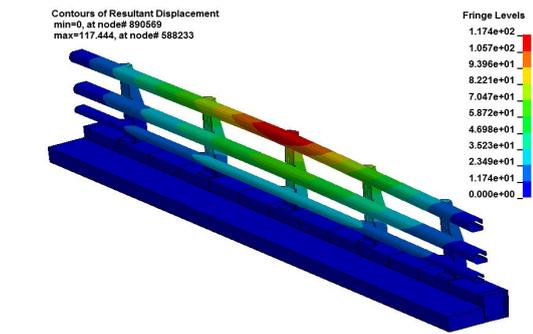
(b) Modeling in detail

[Fig. 2] Finite element modeling

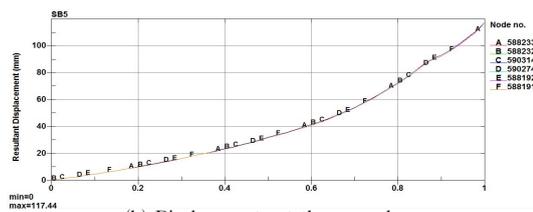
[Table 1] Finite element analysis models

Case	Diaphragm distance (m)	Number of anchor bolt
Case 1	0.75	6
Case 2	0.75	8
Case 3	1.5	6
Case 4	1.5	8
Case 5	-	6
Case 6	-	8

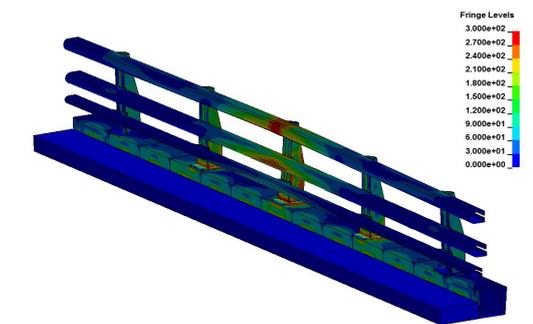
재하 하중의 경우는 14톤의 차량이 80km/h의 속도로 15도로 경사져서 충돌할 때를 OLSON 모델 산정 방식으로 계산하면 23ton이 계산된다. 최소 23ton이상의 횡방향 저항력을 확보해야 하므로 본 해석에서는 24ton을 적용하여 수행하였다. 응력 해석은 준정적 해석을 수행하였다. 앵커볼트의 체결력이 적용이후 하중이 적용되도록 시간을 정하였다.



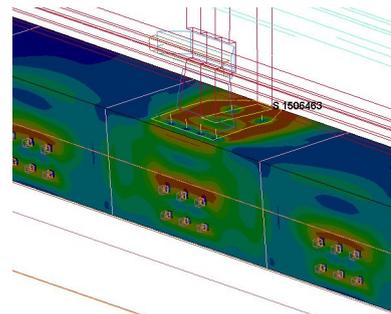
(a) Entire displacement contour



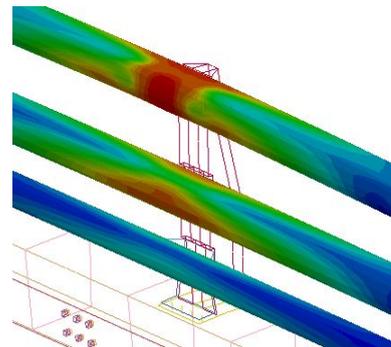
(b) Displacements at the upper beam



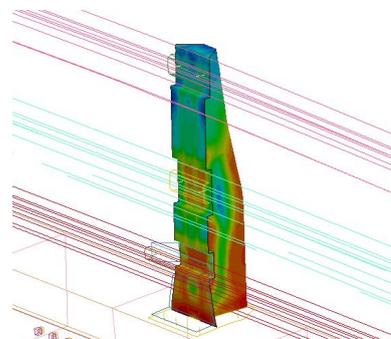
(c) Entire stress contour



(d) Maximum stress at the module



(e) Maximum stresses at the rails



(f) Maximum stresses at the post

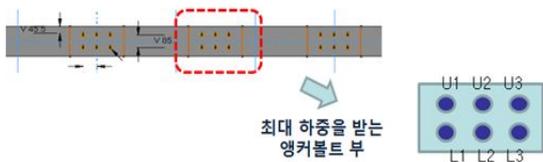
[Fig. 3] Displacement and maximum stress distributions for Case I

3. 수치해석 결과

Case 1~6에 대하여 LS-DYNA를 사용하여 방호울타리 및 상판연결부의 각 부재별 상세 유한요소해석을 수행하였다. 먼저 Case 1에 대하여 해석을 수행하였다. Case 1은 상판과의 연결부가 폐단면이며, 격벽 간격은 0.75m, 그리고 앵커볼트의 개수는 6개인 경우에 해당된

다. 그림 2는 Case 1에 대하여 전체변형(그림 3(a)) 및 집중 하중이 적용된 방호울타리 상단 빔의 변형(그림 3(b))을 보여준다. 해석 결과, 예상대로 방호울타리의 상단 빔에서 최대처짐이 발생함을 알 수 있다. 그림 4(c)는 방호울타리 및 상판연결구조 전체의 응력분포를 보여준다. 또한 그림 3(d)~(f)는 각 부재별 응력분포를 보여준다. 그림 3(d)는 방호울타리와 콘크리트 상판을 연결하는 통합 부대시설 모듈 구조에 대한 응력해석을 보여준다. 해석결과 최대응력은 방호울타리 기둥과 연결되는 부분에서 발생하였으며 310.4MPa로 계산되었다. 그림 3(e)는 방호울타리 빔에서의 응력분포를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 기둥과 연결되는 부분에서 최대응력이 발생하며 372.0MPa로 계산되었다. 그림 3(f)는 방호울타리 기둥에서의 응력분포를 보여준다. 기둥과 상판연결 구조의 접합 부분에서 최대응력이 발생하며 331.8MPa로 계산되었다.

한편, 부대시설을 상판과 연결하는 앵커 연결부는 부대시설의 모든 하중을 측면으로 지탱해야 하므로 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 각 앵커볼트에 걸리는 하중을 알아보기 위하여 그림 4와 같이 최대하중을 받는 각 연결부의 앵커볼트를 U1~U3 및 L1~L3까지 표기하고 각 앵커볼트에 걸리는 하중을 계산하였다. 표 2는 앵커볼트에 걸리는 최대하중을 도시한 것이다. 각 볼트에 걸리는 하중은 걸리는 방향이 압축의 경우 양의 값이 나오며, 인장의 경우 음의 값이 나옴을 알 수 있다.



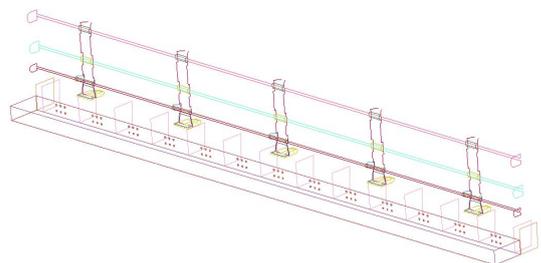
[Fig. 4] Forces at anchor bolts subjected to maximum loading (Case 1)

[Table 2] Clamping and maximum forces for different bolt locations (Case 1)

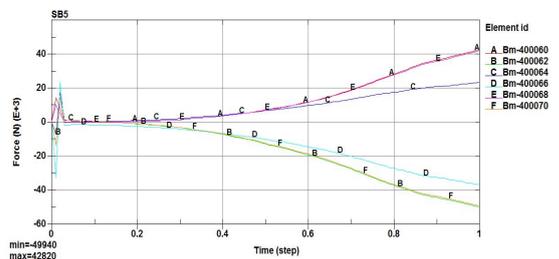
	Bolt location	Bolt clamping force (kN)	Maximum bolt force (kN)
Case 1	U1	14.0	4.214
	U2		2.351
	U3		4.282
	L1		-4.930
	L2		-3.663
	L3		-4.994

본 연구에서는 앞의 해석결과를 기반으로 SB5 방호울타리와 부대시설 연결부 모듈에 대한 구조적 성능 검토를 실시하였다. 표 3는 Case 1~6에 대하여 각 부재에 대한 최대 발생응력 및 소성 변형률을 요약 정리한 것이다. SS400 강종에 대하여 항복응력은 245MPa, 인장강도는 400MPa, 그리고 소성변형률(Plastic Strain)은 0.168이다. 각 경우에 대하여 이러한 허용기준을 만족하는지 비교 검토를 하였다. 본 연구에서 적용한 해석 변수로는 연결부 모듈의 단면 형상, 교량 바닥판과 연결부 모듈을 체결하는 앵커볼트의 개수, 연결부 모듈 사이에 들어가는 격벽 간격 및 격벽 유무이다.

구조 성능 검증을 위한 기준으로 방호울타리 지주의 최대변형이 300mm 내외 인지의 여부, 발생 응력이 항복응력을 초과할 경우 소성변형률로 비교하였으며, 앵커볼트에 걸리는 하중이 앵커볼트의 허용 최대인장력 이내인지의 여부 등을 산정하여 평가하였다. 전술한 6가지 Case에 대하여 해석 수행한 결과 모든 검증 산정 기준에 만족한 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Anchors in module



(b) Loads occurred at bolts

[Fig. 5] Forces occurred at six anchor bolts

[Table 3] Summary of maximum stresses and maximum equivalent plastic strains for different cases

	Part	Maximum Von Mises Stress (MPa)	Maximum Equivalent Plastic Strain
Case 1	Module	310.4	0.020
	Rails	372.0	0.032
	Posts	331.8	0.022
Case 2	Module	316.8	0.024
	Rails	386.4	0.036
	Posts	377.1	0.032
Case 3	Module	309.4	0.020
	Rails	369.4	0.031
	Posts	334.8	0.023
Case 4	Module	315.1	0.023
	Rails	381.1	0.034
	Posts	378.1	0.033
Case 5	Module	311.7	0.021
	Rails	358.5	0.028
	Posts	306.4	0.015
Case 6	Module	301.7	0.017
	Rails	371.1	0.032
	Posts	341.4	0.024

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 개발된 탈·부착이 가능한 기능 통합형 부대시설의 방호울타리 구조를 대상으로 유한요소 상해 정적해석을 수행하였으며, 안전성을 평가하였다. 기능 통합형 부대시설은 연결모듈의 단면 폐합 여부, 격벽간격, 앵커볼트 개수 등을 매개변수로 하였으며, 교량 바닥판에 부착하는 모듈의 앵커볼트 연결부의 상해거동을 분석하여 기능 통합형 모듈구조의 성능을 검증하였다. 유한요소 정적 해석결과 폐쇄형 단면을 갖는 모듈의 6가지 Case에 대하여 모든 검증 산정 기준에 만족한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 폐쇄형 모듈 단면은 실제 현장에서 바닥판과의 연결에서 앵커볼트를 체결하기가 난해함으로 실무적 관점에서 이에 대한 보완이 요구된다. 본 연구에서 제시한 유한요소 상해해석 결과는 기능통합형 부대시설 구조형식의 실용적 개발을 위한 기반자료 및 설계 가이드라인으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 실제 실험을 통하여 시뮬레이션 결과를 검증하고 보완하는 연구가 지속적으로 수행되어갈 것이다.

References

[1] H. E. Ross, D. L. Sicking and R. A. Zimmer,

"Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features", NCHRP Report 350, TRB, Washington, D.C., 1993.

- [2] T. Y. Yoon, "Research & business development of modular bridge", Research Institute of Industrial Science & Technology Report, 2011.
- [3] M. C. Lee, K. Y. Kwon, and S. E. Kim, "Performance Analysis of Steel-FRP Composite Safety Barrier by Vehicle Crash Simulation", The Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol.2, No.4, pp. 11-18, 2011.
- [4] A. O. Atahan, "Impact analysis of a vertical flared back bridge rail-to-guardrail transition structure using simulation", Finite Elements Anal. Des., Vol. 41, pp. 371-396, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2004.07.003>
- [5] B. A. Coon, and J. D. Reid, "Reconstruction Techniques for Energy-Absorbing Guardrail end Terminals", Accident Analysis & Prevention, Vol. 38, pp. 1-13, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2005.06.016>
- [6] W. G. Davids, J. K. Botting, and M. Peterson, "Development and structural testing of composite-reinforced timber highway guardrail", Construct. Building Mat., Vol. 20, pp. 733-743, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.060>
- [7] LS-DYNA, "LS-DYNA User's Manual" Vol I., 2007.

이 상 열(Sang-Youl Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2000년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2002년 8월 ~ 2004년 1월 : 미국 메사추세츠 공과대학(MIT) 토목환경공학과 Post-doc.
- 2005년 4월 ~ 2006년 6월 : 스페인 국립 Granada 대학교 구조공학과 연구교수
- 2006년 7월 ~ 2009년 1월 : 한양대학교 건설환경공학과 BK 계약교수
- 2011년 3월 ~ 현재 : 안동대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

복합재료 구조공학, 전산구조역학