

철길건널목 적용을 위한 고무보판 설계에 관한 연구

A Study on Design of Rubber Panel for Railway Crossing

윤성철*
Yoon, Sung-Cheol

한석윤**
Han, Seok-Yoon

민재홍***
Min, Jea-Hong

ABSTRACT

As the public use part of the railway and the road, the railway crossing is important to work properly by two transportation means. Also, It is important to provide the good face of friction on the railway crossing in aspect of protecting the railway crossing accident.

Lately, the material of railway crossing panel is the wood, the asphalt, and the steel. As they have a various fault, it was studied to analyze the structural action of the new material, rubber panel.

This paper analyzed eigenvalue, stress and displacement by truck passing weight, thermal stress and train moving weight, using the FEM model

1. 서론

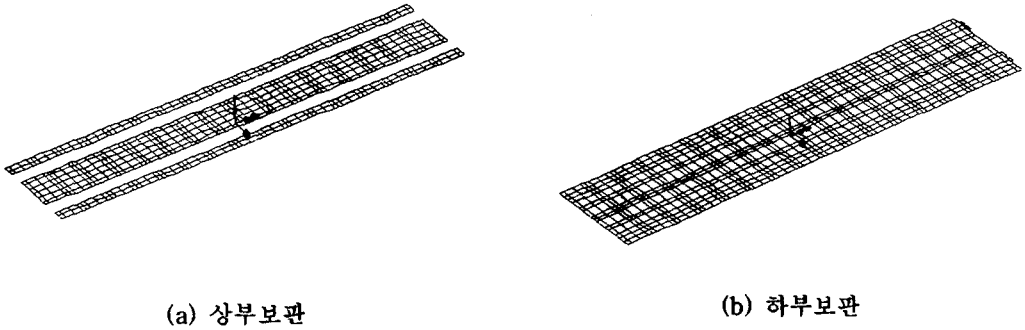
건널목은 철도와 도로의 공용부분이기 때문에 두 교통수단의 원활한 소통을 위해 중요하며, 또한 건널목 사고방지의 관점에서 건널목에서 양호한 노면을 제공하는 것은 대단히 중요하다고 할 수 있다. 도로와 철도선로가 교차할 경우 행인 및 도로차량의 원활한 통행로 확보와 이들 통행시 철도레일의 보호를 위해 건널목 보판을 사용하여야 한다. 건널목 보판으로는 목재보판, 아스팔트보판 및 철재와의 혼용보판이 주로 사용된다. 그러나 목재보판은 고정못이 자주 돌출되어 통과차량의 타이어를 손상시키거나 단차로 인한 중차량 통과시 큰 충격 및 소음이 발생하고 이로 인해 보판의 조기파손 및 사고의 위험성이 높다. 그리하여 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 철재 또는 아스팔트와 혼용하여 사용하고 있으나 전기누전, 열변형에 의한 아스팔트 파손, 단차 등에 의해 빈번히 문제가 발생되고 있는 실정이다. 그리하여 철길건널목이 상습정체구간 및 차량 파손의 원인을 제공하기도 한다. 따라서 외국에서는 새로운 철길 건널목 포장으로서 고무재 건널목이 보급되어 사용되고 있으며 앞으로 사용이 확대될 것으로 예상된다. 그러나 국내의 경우 철도 건널목용 보판의 구조적 거동에 관련된 실험적·이론적 연구는 현재까지 수행된 바 없으며, 주로 경험적 방법에 따라 설계 및 시공·유지관리를 하고 있는 실정이어서 최근까지 사용되고 있는 보판들의 근본적인 문제점 해결방안은 제시되어 있지 않다.

2. 수치해석용 모델

본 논문에서는 각종 하중에 의해 고무보판에 발생하는 실거동을 정확히 나타낼 수 있도록 고무보판, 레일침목 및 도상을 3차원 유한요소를 사용하여 모델링하였다. 모델링시 고무보판은 그림

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 비회원
*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

2.1과 같이 셸요소(Shell Element)를, 레일과 PC침목은 그림 2.2와 같이 보요소(Beam Element)를 사용하여 이상화하였으며, 하부보판과 침목사이, 침목과 도상사이, 하부보판과 도상사이 및 상·하부보판간 접촉면에는 스프링요소(Spring Element)를 사용하여 접촉상태를 이상화하였다. 이때 상·하부보판간 접촉면을 이상화한 스프링은 일반적인 선형 스프링요소와 상부보판의 들림정도를 검토하기 위하여 압축만을 받는 비선형 스프링요소의 두가지 경우에 대하여 각각 적용하였다. 또한 건널목 폭은 고무보판 도면을 참조하여 10m(단선기준)로 모델링하였고 차량하중에 영향을 받지 않도록 건널목 전·후로 10m씩의 자갈도상구간을 추가로 모델링하였으며, 레일 끝단의 경계조건은 핀(Pin)으로 하였다. 그림 2.3은 고무보판, 레일, 침목 및 도상의 전체 3차원 해석모델을 보여 준다.



(a) 상부보판

(b) 하부보판

그림 2.1 셸요소(Shell Element)를 이용한 고무보판의 모형

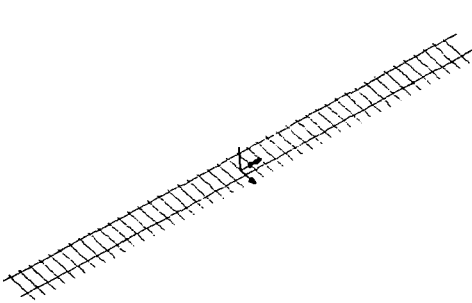


그림 2.2 보요소(Beam Element)를 이용한 레일 및 침목의 모형

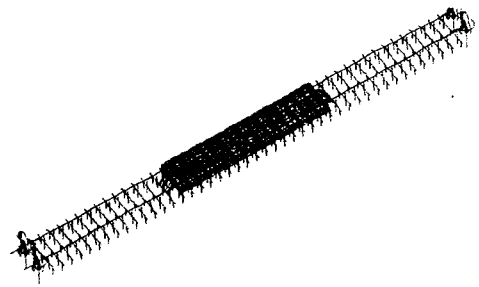


그림 2.3 전체 3차원 해석 모형

3. 구조안전성 해석

고무보판의 3차원 FEM모형을 작성하여 고무보판 건널목과 통과차량의 공진여부를 검토하기 위한 고유치해석을 실시하고, 각종 하중에 의해 고무보판에 발생하는 응력과 변위 등을 나타내었다.

3.1 고유치해석

고무보판의 현장적용을 제시하기 위해 3차원 FEM모델에 대해 고유치해석을 실시하였다. 해석 결과 고무보판 건널목의 1차 고유진동수는 18.77Hz인 것으로 나타났으며, 문헌(橋梁振動研究會編, 1993)에 의하면 덤프트럭 주행시 탁월진동수는 약 3Hz이므로 고무보판 건널목과 통과차량의 진동수 차이가 매우 커 차량주행시 고무보판 건널목과 통과차량과의 공진현상은 발생하지 않는 것으로

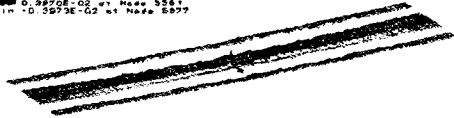
로 판단된다. 표 3.1에 모드별 고유진동수를, 그림 3.1 및 그림 3.2에 상·하부보판의 모드형상을 나타내었다.

표 3.1 고무보판 건널목의 고유진동수

구 분	고유진동수 (Hz)
1차 모드	18.769
2차 모드	20.312
3차 모드	22.480
4차 모드	23.553
5차 모드	25.408
6차 모드	25.556
7차 모드	26.406
8차 모드	26.643
9차 모드	26.920
10차 모드	27.166

```

LOAD DUMP :
EIGENVECTOR :
RESULTS FILE :
EIGENVALUE : D.18769E+00
DISPLACEMENT :
CONTOURS OF DZ
-D 0.003871866
-D 0.00327753
-D 0.00228972
-D 0.00198529
-D 0.00198529
-D 0.000982914
-D 0.00084437
-D 0.000458157
-D 0.00028214
-D 0.00148057
-D 0.00188593
-D 0.00148057
-D 0.00127874
-D 0.00148057
MIN : D.2820E-02 AT Node 3261
MAX : D.3879E-02 AT Node 8897
    
```



(a) 1차 모드 (18.769Hz)

```

LOAD DUMP :
EIGENVECTOR :
RESULTS FILE :
EIGENVALUE : D.18228E+00
DISPLACEMENT :
CONTOURS OF DZ
-D 0.00134687
-D 0.00088714
-D 0.00048937
-D 0.00048937
-D 0.00048937
-D 0.00134687
-D 0.00178934
-D 0.00134687
-D 0.00225278
-D 0.00169274
-D 0.001427
-D 0.00335185
-D 0.0004051
-D 0.00148057
-D 0.00198529
-D 0.00198529
MIN : D.5698E-02 AT Node 5281
MAX : D.1814E-02 AT Node 6266
    
```



(b) 2차 모드 (20.312Hz)

그림 3.1 상부보판의 모드형상

```

LOAD DUMP :
EIGENVECTOR :
RESULTS FILE :
EIGENVALUE : D.18769E+00
DISPLACEMENT :
CONTOURS OF DZ
-D 0.0041782
-D 0.00313889
-D 0.00213389
-D 0.00213389
-D 0.0008891
-D 0.0008891
-D 0.00041559
-D 0.000522275
-D 0.000522275
-D 0.000522275
-D 0.000522275
-D 0.000522275
-D 0.000522275
-D 0.000522275
-D 0.000522275
MIN : D.172E-02 AT Node 3280
MAX : D.4182E-02 AT Node 8897
    
```



(a) 1차 모드 (18.769Hz)

```

LOAD DUMP :
EIGENVECTOR :
RESULTS FILE :
EIGENVALUE : D.18228E+00
DISPLACEMENT :
CONTOURS OF DZ
-D 0.00147264
-D 0.00091884
-D 0.000470847
-D 0.000470847
-D 0.000470847
-D 0.00147264
-D 0.00198529
-D 0.00147264
-D 0.00235476
-D 0.00178934
-D 0.00147264
-D 0.00235476
-D 0.00178934
-D 0.00147264
-D 0.00147264
MIN : D.3881E-02 AT Node 3280
MAX : D.0534E-02 AT Node 6266
    
```



(b) 2차 모드 (20.312Hz)

그림 3.2 하부보판의 모드형상

3.2 차량통과하중에 의한 응력 및 변위해석

고무보판의 3차원 FEM모델을 사용하여 차량통과하중에 의한 응력 및 변위해석을 실시하였다. 이때 차량하중은 2대의 DB-24 표준트럭하중(총중량 43.2 t)을 사용하였으며, 재하위치는 고무보판에 대하여 중앙부에 대칭으로 재하되는 경우(LC 1)와 최악조건을 고려하여 편측으로 재하되는 경

우(LC 2)의 2가지 경우에 대하여 고려하였다. 또한 상·하부보판간의 접촉면을 이상화시킨 스프링 요소에 대하여 선형거동을 하는 경우와 비선형거동을 하는 경우에 대해서도 각각 해석을 수행하였다. 해석결과 선형해석시와 비선형해석시의 해석결과는 응력이나 압축변위의 경우 서로 거의 차이가 없었으나 비선형해석의 경우 선형해석과는 달리 상부보판에서 들림현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 선형해석시에는 일반적인 선형 스프링요소를 적용한데 반하여 비선형해석시에는 압축만을 받는 비선형 스프링요소를 적용하였기 때문이며 선형해석의 경우보다 고무보판의 실거동에 더 부합되는 것으로 판단된다. 한편, 고무보판에 발생하는 최대응력은 14.48kgf/cm^2 , 최대변위는 하향으로 18.11mm , 상향으로 2.87mm 인 것으로 나타났다. 그림 3.3에 DB-24하중의 재원 및 윤하중을, 그림 3.4에 DB-24하중의 재하위치, 표 3.2에 DB-24하중 작용시 고무보판에 발생하는 최대응력 및 변위해석결과를 나타내었으며, 그림 3.5~그림 3.8에 비선형해석시의 상·하부보판에 발생하는 응력 및 처짐분포도를 나타내었다.

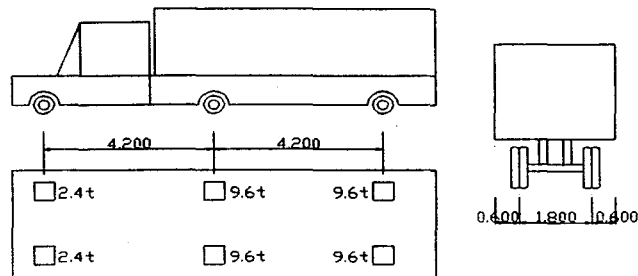
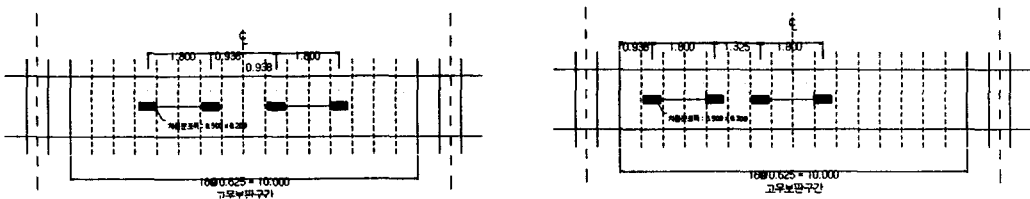


그림 3.3 DB-24하중의 재원 및 윤하중



(a) 중앙부의 대칭 재하 (LC 1)

(b) 편측으로 재하 (LC 2)

그림 3.4 DB-24하중의 재하위치

표 3.2 DB-24하중에 의한 최대응력 및 변위해석결과

구 분		선형해석		비선형해석		허용응력 ²⁾ (kgf/cm^2)
		응력 (kgf/cm^2)	변위 (mm)	응력 (kgf/cm^2)	변위 (mm)	
상부보판	LC 1	6.12	-5.56 / 0.25	6.12	-5.60 / 0.98	22.5
	LC 2	14.48	-18.00 / 0.82	14.48	-18.11 / 2.87	
하부보판	LC 1	0.20	-3.92 / 0.13	0.20	-3.95 / 0.13	
	LC 2	0.61	-12.67 / 0.46	0.61	-12.76 / 0.47	

주) 변위의 부호 : + 상향, - 하향

Combination 4
MID STRESS
CONTOURS OF SE

```

D
0.37478 9
74807 3
115128
148819
187216
254879
283314
289820
274788
145285
449743
374729
382181
D.5597E-06 at Node 4433
Min 75.89 at Node 8036

```



Combination 4
DISPLACEMENT
CONTOURS OF DZ

```

D
0.0054233
0.0048821
0.0043212
0.0141018
0.00369918
0.00353914
0.00287712
0.002486
0.00205509
0.00184437
0.00129305
0.000822036
0.000411019
D.000411019
D.000822036
D.0781E-03 at Node 6086
Min -0.5597E-07 at Node 4329

```



< 응력분포도 (pa) : LC 1 > < 변위분포도 (m) : LC 1 >
그림 3.5 상부보판에 작용하는 응력 및 변위분포도(비선형해석)

Combination 5
MID STRESS
CONTOURS OF SE

```

D
0.98742 4
177486
288279
384072
452745
521458
621201
708044
788888
88713
976174
D.0840E+06
D.1326E+06
D.2124E+06
D.3311E+06
D.4420E+07 at Node 4433
Min 81.52 at Node 8036

```



Combination 5
DISPLACEMENT
CONTOURS OF DZ

```

D
0.017045
0.0137338
0.014227
0.0121115
0.0148001
0.0104887
0.00817807
0.00788892
0.00623378
0.00524461
0.00392378
0.00262231
0.0013113
D.00081113
D.00262231
D.2688E-02 at Node 6086
Min -0.181E-01 at Node 4329

```



< 응력분포도 (pa) : LC 2 > < 변위분포도 (m) : LC 2 >
그림 3.6 상부보판에 작용하는 응력 및 변위분포도(비선형해석)

Combination 4
MID STRESS
CONTOURS OF SE

```

D
1810.74
2821.48
4432.23
6542.99
7853.72
9064.46
10275.2
12088.7
15107.4
18618.2
18128.9
19838.7
21430.4
24888.7
D.2649E-08 at Node 6327
Min 18.07 at Node 34318

```



Combination 4
DISPLACEMENT
CONTOURS OF DZ

```

D
0.0028262
0.00257121
0.00334843
0.00408104
0.00280909
0.0025397
0.00229578
0.00204089
0.00178281
0.00153052
0.00127542
0.00102055
0.00076578
0.00051072
0.00025087
D
0.1278E-02 at Node 4138
Min -0.395E-02 at Node 6778

```



< 응력분포도 (pa) : LC 1 > < 변위분포도 (m) : LC 1 >
그림 3.7 하부보판에 작용하는 응력 및 변위분포도(비선형해석)


```

LOAD CASE      *
Load Case 1
RESULTS FILE *
STRESS
CONTOURS OF ME
0.7785E+05
1.2518E+05
1.6884E+05
2.0884E+05
2.5037E+05
2.8209E+05
3.2282E+05
3.7553E+05
4.1729E+05
4.5901E+05
5.0074E+05
5.4245E+05
5.8416E+05
6.2587E+05
6.6758E+05
7.0929E+05
MIN: 0.7785E+05 at Node 4281
MAX: 0.1109E+06 at Node 4284

```



```

LOAD CASE      *
Load Case 1
RESULTS FILE *
DISPLACEMENT
CONTOURS OF DZ
0.000140258
0.001201828
0.002060388
0.000400844
0.000400844
0.000801688
0.001201828
0.001602572
0.002003272
0.002404016
0.002804760
0.003205504
0.003606248
0.004006992
0.004407736
0.004808480
0.4646E+02 at Node 23702
MIN: -0.1764E+02 at Node 2082

```



< 응력분포도 (pa) >

< 변위분포도 (m) >

그림 3.10 하부보판에 작용하는 응력 및 변위분포도

3.4 열차이동하중해석

3차원 FEM모델에 대해 열차이동하중해석을 실시하였다. 이때 열차하중은 새마을열차가 궤도를 통과하는 것을 고려하였다. 해석결과 고무보판에 발생하는 최대응력은 0.31kgf/cm², 최대변위는 하향으로 3.43mm, 상향으로 0.11mm인 것으로 나타났으며, 표 3.4에 열차이동하중 해석결과를, 그림 3.11에 보판의 응력 및 변위분포도를 나타내었다.

표 3.4 열차이동하중 해석결과

구 분	응 력 (kgf/cm ²)	변 위 (mm)	허용응력 (kgf/cm ²)
열차이동하중	0.31	-3.43 / 0.11	22.5

```

LOAD CASE      *
139
RESULTS FILE *
MID STRESS
CONTOURS OF SE
1.859E+01
3.719E+01
5.578E+01
7.438E+01
9.298E+01
1.1157E+02
1.3017E+02
1.4876E+02
1.6736E+02
1.8596E+02
2.0455E+02
2.2315E+02
2.4174E+02
2.6034E+02
2.7894E+02
MAX: 0.2808E+03 at Node 43377
MIN: 80.41 at Node 42408

```



```

LOAD CASE      *
139
RESULTS FILE *
DISPLACEMENT
CONTOURS OF DZ
0.000131873
-0.000908842
-0.0008777
-0.00285178
-0.00283447
-0.00221319
-0.00189184
-0.00177052
-0.00154921
-0.00132788
-0.00110656
-0.000885242
-0.000663926
-0.000442611
-0.000221295
0
0.1166E+03 at Node 43964
MIN: -0.3429E+02 at Node 44679

```



< 응력분포도 (pa) >

< 변위분포도 (m) >

그림 3.11 보판에 작용하는 응력 및 변위분포도

4. 설계검토 및 보완방안

대상 고무보판의 보완방안을 제시하기 위해 상부보판의 보강판을 열처리한 경우에 대하여 최대의 처짐이 발생하는 DB-24하중에 의한 응력 및 변위를 고려하였다. 표 4.1에 상부보판의 보강판 열처리시 해석결과를 나타내었다.

표 4.1 상부보판의 보강판 열처리시 해석결과

구 분		비선형해석		비 고
		응 력 (kgf/cm ²)	변 위 (mm)	
상부보판	LC 1	10.10	-4.37 / 0.61	
	LC 2	26.42	-13.32 / 1.94	
하부보판	LC 1	0.20	-3.08 / 0.28	
	LC 2	0.61	-9.36 / 0.96	

해석결과 상부보판에서 발생하는 최대변위는 하향으로 13.32mm, 하부보판에서 발생하는 최대변위는 하향으로 9.36mm인 것으로 나타났다. 보완전 보다 최대변위가 생기는 상부보판에서 약 5mm 변위가 감소하는 것으로 나타났다. 현재까지 보판의 구조적 거동에 관련된 규격은 없으며 차량통과 DB-24하중에 의한 경우에 변위는 발생되나 고무재질의 탄성범위내의 압축현상으로 볼 수 있고 보판의 안전성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 고무보판을 3차원 FEM모델을 이용하여 모형화하였으며 고유치해석결과 고무보판 건널목의 1차 고유진동수는 18.77Hz인 것으로 나타나 덤프트럭 주행시 탁월진동수가 약 3Hz인 것을 고려해 볼 때 차량주행시 고무보판 건널목과 통과차량과의 공진현상은 발생하지 않을 것으로 판단되며, 차량통과하중에 대한 해석결과 고무보판에 발생하는 최대응력은 14.48kgf/cm², 최대변위는 하향으로 18.11mm, 상향으로 2.87mm인 것으로, 열응력에 대한 해석결과 고무보판에 발생하는 최대응력은 11.12kgf/cm², 최대변위는 하향으로 2.09mm인 것으로, 열차이동하중 해석결과 고무보판에 발생하는 최대응력은 0.31kgf/cm², 최대변위는 하향으로 3.43mm, 상향으로 0.11mm인 것으로 나타났다.

설계보완방안에서 차량통과하중에 대한 응력과 변위를 상부보판의 보강판을 열처리한 경우 해석해 보면 고무보판에 발생하는 최대변위는 하향으로 13.32mm인 것으로 나타나 변위가 감소하는 것으로 나타났다. 현재까지 보판의 구조적 거동에 관련된 규격은 없으며 차량통과 DB-24하중에 의한 경우에 변위는 발생되나 고무재질의 탄성범위내의 압축현상으로 볼 수 있으며 보판의 안전성에는 문제가 없는 것으로 판단되었으며 열차이동하중의 경우 열차가 보판에 미치는 응력과 변위는 크지 않은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 권호진, "최신도로공학", 기문당, 1996
2. 대한토목학회, "도로교표준시방서", 1996
3. 서사범, "선로공학", 도서출판 삶과 꿈, 1999
4. 이종득, "철도공학개론", 노해출판사, 2000
5. FEA Ltd, "Lusas Powerful FE technology for specialist applications", 1999
6. 佐藤吉彦, "軌度高周波振動 理論解析", 鐵道技術研究報告, No.1031. 1976
7. 橋梁振動研究會編, "橋梁振動の計測と解析", 技報堂出版, 1993