

철길건널목용 고무보판 안전성 평가

A Safety Evaluation on the Rubber Panel for Railway Crossing

윤성철¹, 정종덕²

Sung-Cheol Yoon, Jong-Duk Chung

Keywords : Rubber(고무), Natural Frequency(고유진동수), Wheel Weight(윤하중), Finite Element Method(유한요소법)

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 Finite Element Method 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[1]. 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 전기

누전, 열변형에 의한 아스팔트 파손, 단차 등에 의해 빈번히 문제가 발생되고 있는 실정이다. 그리하여 철길건널목이 상습정체구간 및 차량파손의 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 논문에서 사용된 상하부보판의 사용재질은 타이어 분말, carbon black 및 약품 등으로 배합하고 혼합하여 처리한 내면고무와 합성고무를 주로하고 내마모성, 내노화성, 내후성 및 내유성 등 모든 사용조건하

¹ 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원

² 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원

에서 우수한 성능을 발휘할 수 있는 carbon black 및 노화방지제를 혼합하여 처리한 외면고무를 사용하였다. 시험규격은 KS M 6604, 6518이며 이 기준에 합격하여야 하고 고무보판의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다. 각종 하중에 의해 고무보판에 발생하는 실거동을 정확히 나타낼 수 있도록 고무보판, 레일침목 및 도상을 3차원 유한요소를 사용하여 모델링하였다. 모델링시 고무보판은 Fig. 1과 같이 셸요소(Shell Element)를, 레일과 PC침목은 Fig. 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[2]. 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 [1, 2]. Fig. 3은 고무보판, 레일, 침목 및 도상의 전체 3차원 해석모델을 보여준다.

Table 1 Physical character of rubber panel

항 목	단 위	내면고무	외면고무	
상태물성	경도(Shore-A)	Point	64	62
	인장강도	kgf/cm ²	176	184.5
	신장율	%	510	620
	밀도	g/cm ³	1.28	1.25
탄성계수	18℃	kgf/mm ²	0.834	0.763
	-60℃	kgf/mm ²	20.347	20.084
스프링정수	kg/cm	4,500	-	
내마모성	mm ³	-	155	
사용온도	℃	-35 ~ 90		
열팽창계수	℃ ⁻¹	4.7×10 ⁻⁴		
포아송비	-	0.45 ~ 0.5		
마찰계수	건조시	μ ³	-	0.79
	oil spray시	μ ³	-	0.41
허용응력 (5mm 압축시)	kgf/cm ²	22.5		

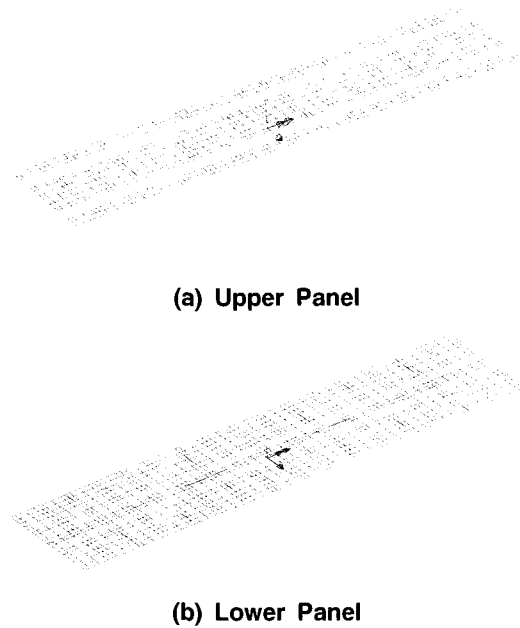


Fig. 1 Model of panel applied Shell Element

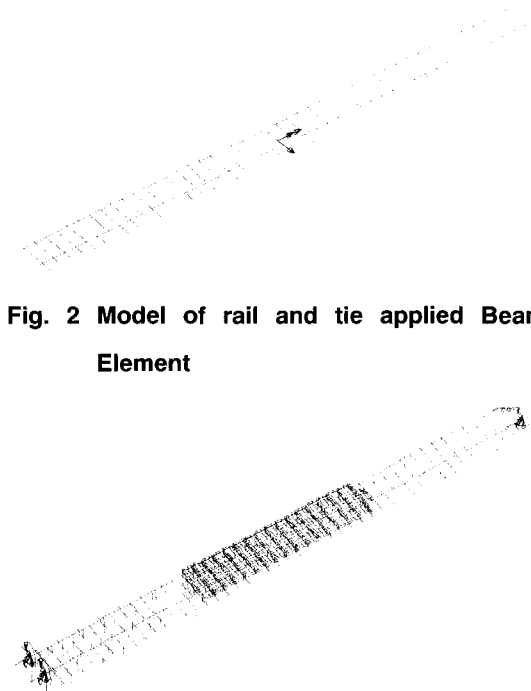


Fig. 3 3-D analysis model for all parts

3. 구조안전성 해석

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

3.1 고유치해석

고무보판의 안전성을 평가하기 위해 3차원 FEM 모델에 대해 고유치해석을 실시하였다. 해석결과 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 차량 주행시 고무보판 건널목과 통과차량과의 공진현상은 발생하지 않는 것으로 판단된다[3, 4]. Table 2에 모드별 고유진동수를, Fig. 4 및 Fig. 5에 상·하부보판의 모드형상을 나타내었다.

Table 2 Natural Frequency of rubber panel

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

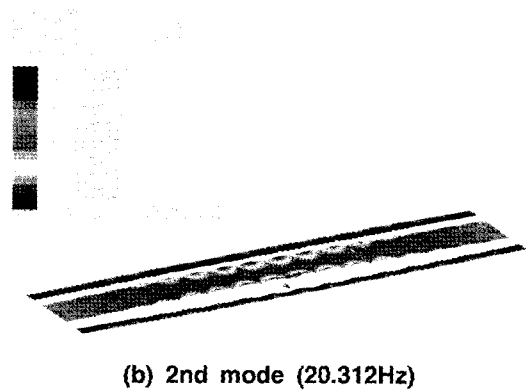
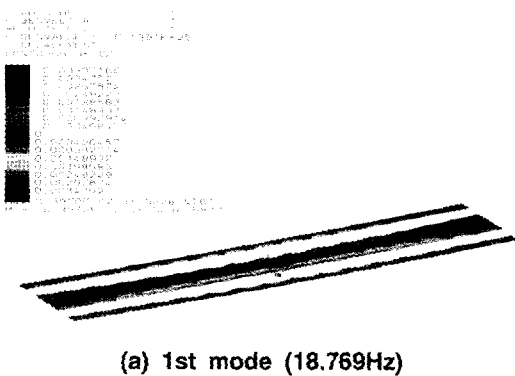


Fig. 4 Mode shape of upper panel

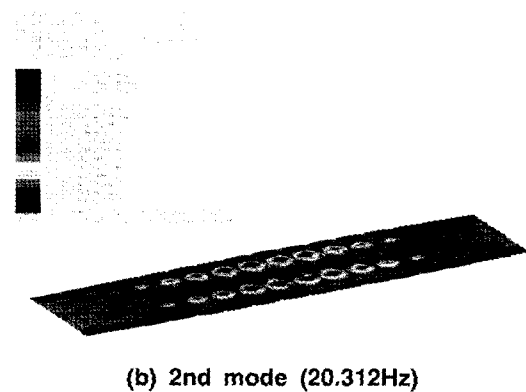
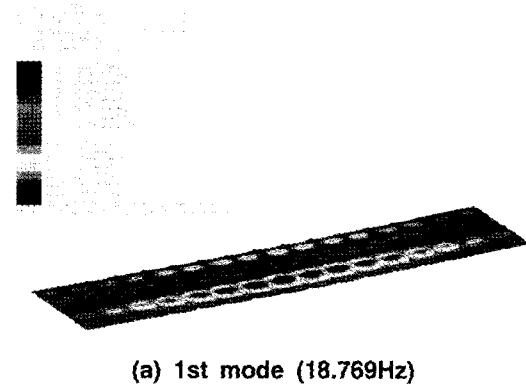


Fig. 5 Mode shape of lower panel

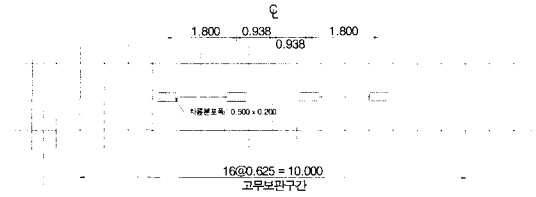
3.2 차량통과하중에 의한 응력 및 변위해석

고무보판의 3차원 FEM모델을 사용하여 차량통과하중에 의한 응력 및 변위해석을 실시하였다. 이때 차

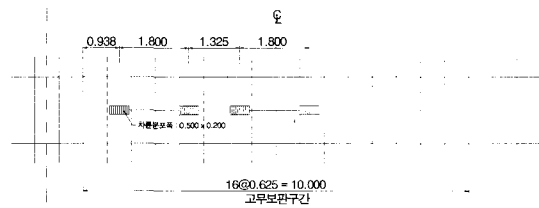
량하중은 2대의 DB-24 표준트럭하중(총중량 43.2 t)을 사용하였으며[5, 6], 재하위치는 고무보판에 대하여 중앙부에 대칭으로 재하되는 경우(LC 1)와 최악조건을 고려하여 편측으로 재하되는 경우(LC 2)의 2가지 경우에 대하여 고려하였다. 또한 상·하부보판간의 접촉면을 이상화시킨 스프링요소에 대하여 선형거동을 하는 경우와 비선형거동을 하는 경우에 대해서도 각각 해석을 수행하였다. 해석결과 선형해석시와 비선형해석시의 해석결과는 응력이나 압축변위의 경우 서로 거의 차이가 없었으나 비선형해석의 경우 선형해석과는 달리 상부보판에서 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. 해석결과의 분석에서 Fig. 8의 경우 그림에 나타나 있는 값을 살펴보면 응력은 Max 0.5997E+06, Min 76.89 Mpa가 발생하였으며, 변위는 Max 0.9781E - 03, Min 0.5598E - 0.2 m가 발생하여 이중 큰값을 선택하여 환산하면 응력은 6.12 kgf/cm², 변위는 +0.98mm, -5.60mm가 발생한다. 지면제약상 모든 해석결과 그림을 다 나타낼 수는 없었으며 각 그림으로부터 위에서 설명한 바와 같이 분석결과를 정리하면 고무보판에 발생하는 최대응력은 14.48 kgf/cm², 최대변위는 하향으로 18.11mm, 상향으로 2.87mm인 것으로 나타났다. Fig. 6에 DB-24하중의 제원 및 윤하중을, Fig. 7에 DB-24하중의 재하위치를, Table 3에 DB-24하중 작용시 고무보판에 발생하는 최대응력 및 변위해석결과를 나타내었으며, Fig. 8~Fig. 11에 비선형해석시의 상·하부보판에 발생하는 응력 및 처짐분포도를 나타내었다.



Fig. 6 DB-24 weight and wheel weight



(a) Symmetric weigh from center (LC 1)



(b) Not symmetric weigh from center (LC 2)

Fig. 7 Weight position of DB-24 weight

Table 3 Maximum stress and displacement by DB-24 weight

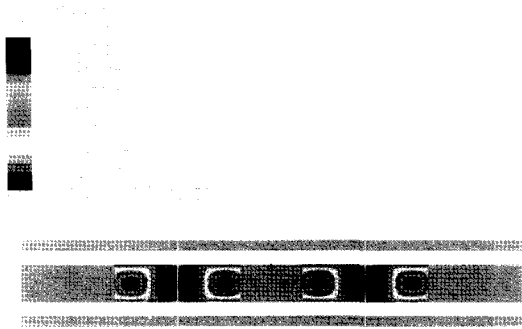
구 분		선형해석		비선형해석		허용응력 (kgf/cm ²)
		응력 (kgf/cm ²)	변위 (mm)	응력 (kgf/cm ²)	변위 (mm)	
상부 보판	LC 1	6.12	-5.56 / 0.25	6.12	-5.60 / 0.98	22.5
	LC 2	14.48	-18.00 / 0.82	14.48	-18.11 / 2.87	
하부 보판	LC 1	0.20	-3.92 / 0.13	0.20	-3.95 / 0.13	
	LC 2	0.61	-12.67 / 0.46	0.61	-12.76 / 0.47	

주) 변위의 부호 : + 상향, - 하향

```

Contour Plot 4
MID STRESS
CONTOUR BY: S1
0
37478.8
74957.6
112436.4
149915.2
187394
224872.8
262351.6
299830.4
337289.2
374788
412256.8
449745.6
487234.4
524723.2
562212
599700.8
637189.6
674678.4
6508.1108
Min: 76.89 at Node 5013
    
```

< Stress diagram (pa) : LC 1 >

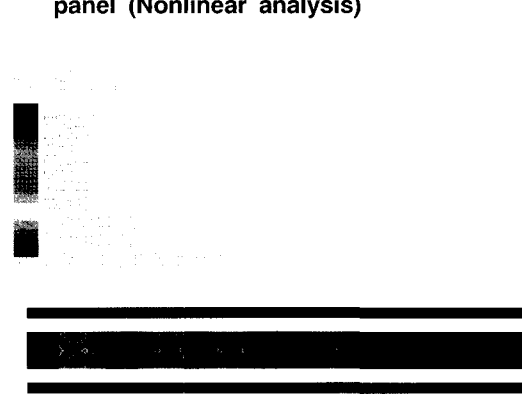


< Displacement diagram (m) : LC 1 >

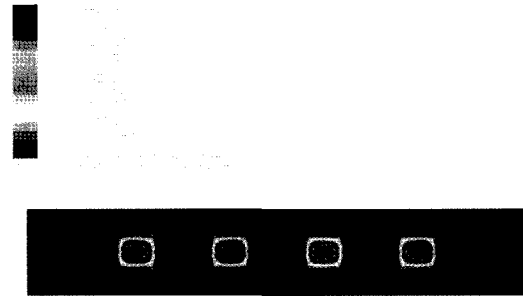


< Stress diagram (pa) : LC 1 >

Fig. 8 Stress and displacement diagram of upper panel (Nonlinear analysis)

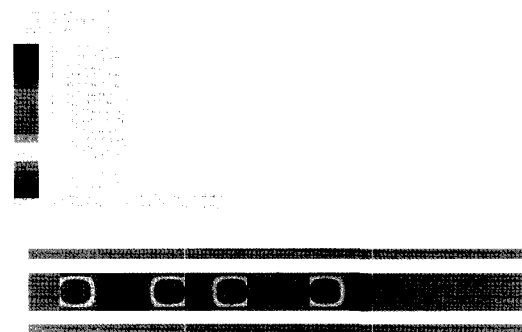


< Stress diagram (pa) : LC 2 >

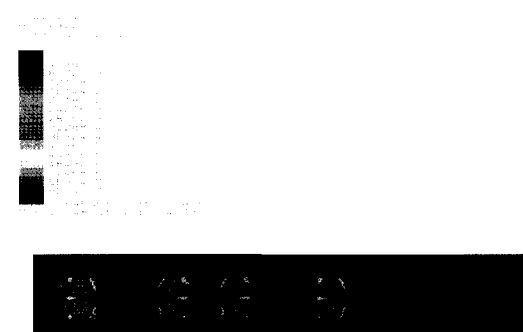


< Displacement diagram (m) : LC 1 >

Fig. 10 Stress and displacement diagram of lower panel (Nonlinear analysis)

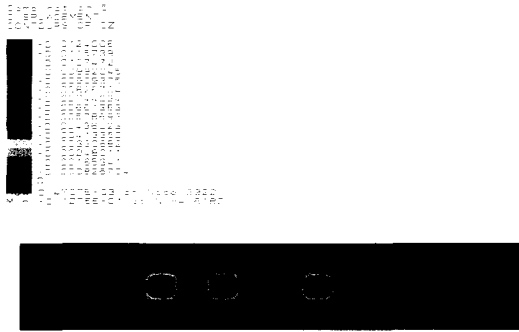


< Displacement diagram (m) : LC 2 >



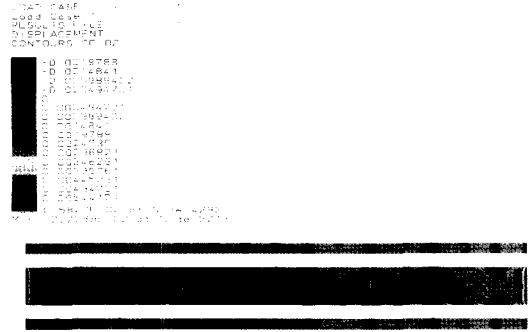
< Stress diagram (pa) : LC 2 >

Fig. 9 Stress and displacement diagram of upper panel (Nonlinear analysis)



< Displacement diagram (m) : LC 2 >

Fig. 11 Stress and displacement diagram of lower panel (Nonlinear analysis)



< Displacement diagram (m) >

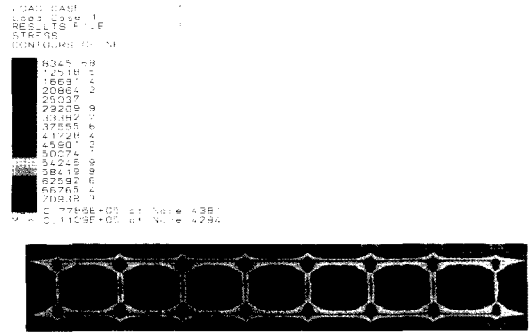
Fig. 12 Stress and displacement diagram of upper panel

3.3 열응력해석

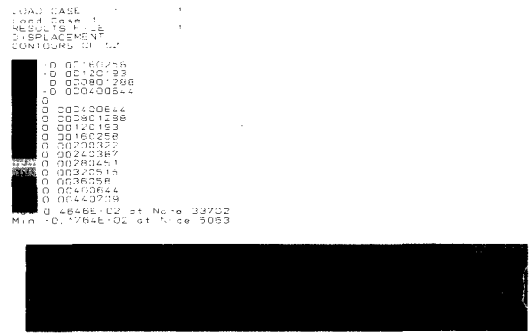
3차원 FEM모델에 대해 열응력해석을 실시하였다. 이때 온도변화는 관련문헌 등을 참조하여 레일의 경우 -20~60℃를[7], PC침목 및 고무보판의 경우 -20~40℃를 적용하였으며, 또한 고무보판의 경우 보판 상·하면의 온도차로 10℃를 적용하였다. 해석결과 고무보판에 발생하는 최대응력은 11.12 kgf/cm², 최대 변위는 2.09mm(하향)인 것으로 나타났으며, Table 4에 열응력 해석결과를, Fig. 12 및 Fig. 13에 상·하부 보판의 응력 및 변위분포도를 나타내었다.

Table 4 Thermal stress analysis

구 분	응 력 (kgf/cm ²)	변 위 (mm)	허용응력 (kgf/cm ²)
상부보판	11.12	-2.09	22.5
하부보판	0.82	-1.76	

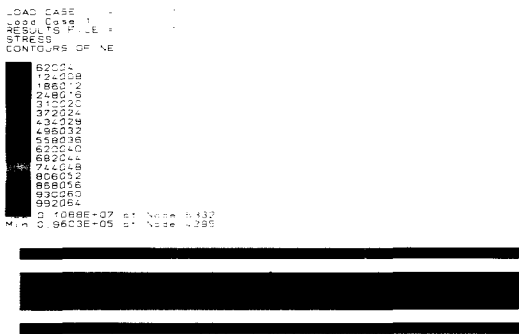


< Stress diagram (pa) >



< Displacement diagram (m) >

Fig. 13 Stress and displacement diagram of lower panel



< Stress diagram (pa) >

3.4 열차이동하중해석

3차원 FEM모델에 대해 열차이동하중해석을 실시하였다. 이때 열차하중은 새마을열차가 궤도를 통과하는 것을 고려하였다. 해석결과 고무보판에 발생하는

최대응력은 0.31 kgf/cm², 최대변위는 하향으로 3.43mm, 상향으로 0.11mm인 것으로 나타났으며, Table 5에 열차이동하중 해석결과를, Fig. 14에 보판의 응력 및 변위분포도를 나타내었다.

Table 5 Train moving weight analysis

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 = 1
MID STRESS
CONTOURS OF SE
0
1859.61
3719.21
5578.82
7438.42
9298.03
11157.6
13017.2
14876.8
16736.5
18596.1
20455.7
22315.3
24174.9
26034.5
27894.1
Max 0.2983E+05 at Node 43377
Min 80.41 at Node 42408
    
```



< Stress diagram (pa) >

```

LOAD CASE = 139
RESULTS FILE = 1
DISPLACEMENT
CONTOURS OF Dz
-0.00331973
-0.00309842
-0.0028771
-0.00265578
-0.00243447
-0.00221315
-0.00199184
-0.00177052
-0.00154921
-0.00132789
-0.00110658
-0.000885262
-0.000663946
-0.000442631
-0.000221315
0
Max 0.1116E-03 at Node 43964
Min -0.3429E-02 at Node 44679
    
```



< Displacement diagram (m) >

Fig. 14 Stress and displacement diagram of panel

4. 결과 및 고찰

대상 고무보판 구조안전성 해석결과 응력과 변위에서 큰 영향은 없었으나 다만 차량통과하중에 의한 변위에서 비선형해석인 경우 상부보판에서 하향으로 최대변위 18mm가 발생하였다. 이 변위량을 줄여주기 위해서 상부보판의 내부중앙에 8mm의 보강판을 추

가하는 것으로 설계하여 해석해 본 결과 처짐량을 크게 줄일 수는 없었으며, 재료의 탄성계수가 높은 열처리한 보강판을 추가하여 해석한 결과 LC 2에서 변위가 5mm정도 감소하는 것으로 나타났다. Table 6에 상부보판의 보강판을 열처리한 경우 해석결과를 나타내었다.

Table 6 Analysis in case of upper panel stiffener to be quenched

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 고무재료의 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 14.48 kgf/cm², 최대변위는 하향으로 18.11mm, 상향으로 2.87mm인 것으로, 열응력에 대한 해석결과 고무보판에 발생하는 최대응력은 11.12 kgf/cm², 최대변위는 하향으로 2.09mm인 것으로, 열차이동하중 해석결과 고무보판에 발생하는 최대응력은 0.31 kgf/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 발생되거나 고무재질의 탄성범위내의 압축현상으로 볼 수 있으며 보판의 안전성에는 문제가 없는 것으로 판단되었으며 열차이동하중의 경우 열차가 보판에 미치는 응력과 변위는 크지 않은 것으로 나타났다. 향후 현장부설시험을 실시하여 현장적용을 위한 추가 검증이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

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