

슬래브궤도에 대한 유한요소와 횡방향 동특성에 관한 연구

A Study on the Laterally Dynamic Characteristics and the Finite Elements of Concrete Slab Track

조병완* 권병윤** 태기호*** 마성운****

Jo, Byung-Wan Gyun, Byung-Yun Tae, Ghi-Ho Ma, Seong-Woon

ABSTRACT

In this study, Interaction among each element was construed by the unit of new stiffness matrix to analyze the finite element about Japanese precast concrete slab track and improved slab track. Dynamic analysis which is assumed a static analysis and a trainload on the transverse and the longitudinal load of the train into a series periodic function was performed by using the common program. And then, the difference of the movement between an improved section and an existing structure type was realized.

Longitudinal static analysis indicated that the stress of the improved section is smaller than that of the protrusion of the existing slab track. And static and dynamic analysis on transverse load showed a little decrease of the displacement on new slab track. But, the dynamic analysis result showed that new track system was considerably decreased by 30% compared with the existing Japanese slab track.

국문요약

본 연구에서는 콘크리트도상궤도의 일본식 프리캐스트식 슬래브 궤도와 수정된 단면궤도에 대하여 유한요소 해석을 위한 새로운 강성행렬의 조합을 통하여 각 요소들간의 상호 작용에 대하여 파악하였으며, 상용 프로그램을 이용하여 열차의 횡방향 및 종방향 하중에 대한 정적 해석 및 열차하중을 일련의 주기함수로 가정한 동적 해석을 실시하여, 이미 제안된 바 있는 개선된 단면과 기존의 구조 형식과의 거동의 차이를 파악하였다. 종방향 정적 해석의 결과, 개선된 단면의 응력이 기존의 슬래브궤도의 돌기부에서의 응력보다 작은 값이 나타났으며, 횡하중에 대한 경·동적 해석을 수행한 결과 새로운 슬래브 궤도에서 미소하나 변위량의 감소가 발생하였다. 그러나 동적 해석의 결과, 새로운 궤도 시스템이 기존의 일본식 슬래브궤도 시스템에 비하여 가속도 값이 약 30%이상의 상당한 감소가 있었다.

1. 서론

열차운행시 궤도 및 하부 구조물에 발생하는 큰 진동으로 인하여 궤도파괴 및 구조물의 흔들림 및 균열 등이 발생하며, 이는 구조물의 사용성과 안전성에 악영향을 초래하게 된다. 특히 고속철

* 한양대학교 교수, 정회원

** 건설교통부 사무관, 정회원

*** 한양대 박사과정

**** 한양대 석사과정

도 와 같은 운행속도의 증가는 이러한 현상의 증대를 초래하였다. 철도의 고속화에 따라 발생하는 진동현상은 열차와 구조물의 동특성 뿐만 아니라 열차의 속도, 전과경로, 및 선로상태 등 여러 가지 원인에 의해 영향을 받고, 열차와 선로 또는 선로구조물의 상호작용에 의해서도 크게 달라진다. 이에 본 연구에서는 고속철도용 궤도로 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트도상궤도 중 가장 우수한 구조 형식 중 하나이고 국내 고속철도에도 사용하기에 적합한 것으로 판단되는 일본의 프리캐스트 슬래브궤도 시스템과 구조 형상을 변화시켜 동특성을 향상시킨 단면에 대한 유한요소해석을 통하여 각각의 결과를 비교 검토하여 새로운 구조 형식에 대한 정적·동적 특성을 파악하고 구조 형식과 궤도 동특성과의 상관관계를 제시하고자 하며, 나아가 내진 성능 및 궤도 틀림 등에 대한 향후의 연구에 대한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 콘크리트 슬래브궤도

일반적으로 철도의 운행속도가 시속 200 km/h 이상이 되면 재래식 자갈도상 궤도의 경우 자갈층의 마모, 레일의 밀림과 침하 현상이 현저하게 증가하므로 철도노반의 유지관리가 어렵고 고속철도 차량운행에도 상당한 차질을 초래하게 된다. 자갈도상궤도는 구조의 강약에 따라 다소의 차이는 있지만 비교적 단기에 파괴가 진행되며 특히 속도 향상에 따른 궤도파괴와 횡압의 증대, 패적성의 저하 및 자갈도상의 세립화, 유동화 현상 등 여러 문제점이 있어 이를 극복하는 방법이 자갈도상을 콘크리트로 대체하는 콘크리트도상궤도이다. 특히 시속 350km 이상의 고속열차에서는 궤도선형을 유지하기 위해서는 슬래브궤도의 채택이 필수적이라는 연구 발표도 있었다.

2.1 일본 슬래브궤도

1960년대의 고도성장에 따른 수송량의 증대와 궤도보수를 위한 노동력 수급의 압박과, 1964년 동해도 신간선의 개발과 신간선망 계획을 책정하는 배경 아래 새로운 궤도구조에 대한 연구가 시작되었으며, 여러 가지 궤도구조에 대한 검토가 진행된 결과 프리캐스트 콘크리트판을 진충재(CAM, Cement Asphalt Mortar)를 주입, 설치하는 독자적인 슬래브궤도가 개발되어 500kg의 시험 부설을 거쳐 1975년에 개업한 산양 신간선 오까야마-하까다 사이에 실용화하였으며, 이후 상월·동북 신간선에서는 궤도의 기본구조로 채택되어 90% 이상을 슬래브궤도로 부설하였다. 기본 구조는 그림 1과 같다. 슬래브궤도는 구조상 횡압이나 레일온도 신축에 따른 수평방향 하중에 대해서는 고가교 또는 터널의 노반 콘크리트상에 5m 마다 설치된 정착용 돌기에 의해 저항한다.

시멘트 아스팔트 모르타르(CAM)는 하중전달과 높이를 조정하기 위하여 궤도슬래브와 노반콘크리트 사이 및 돌기 주위에 진충된다.

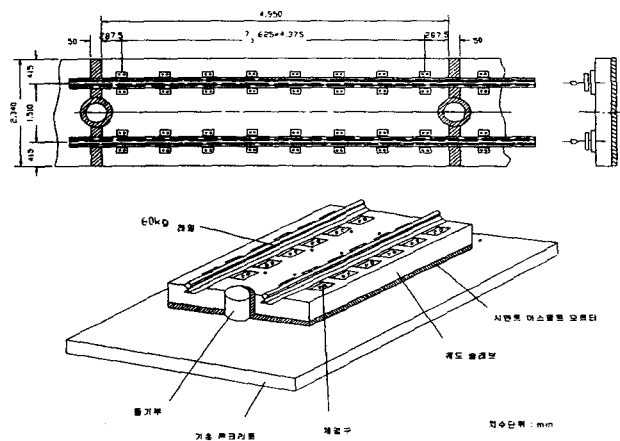


그림 1. 일본 슬래브케도의 구조 형식

2.2 단면이 개선된 슬래브케도

일본의 표준 슬래브케도는 프리캐스트 슬래브간의 종방향 또는 횡방향 하중을 전달하고 종·횡방향 변위를 구속하는 역할을 하는 돌기부가 프리캐스트 단부의 중앙에 설치되어 있으나 이를 양 끝단 두 곳에 설치하는 것으로 변경하였다. 이는 프리캐스트의 제작의 간편성을 고려하고, 프리캐스트 슬래브의 종방향 및 횡방향 틀림에 대한 저항을 기존 슬래브케도에 비해 향상시키기는 것을 목표로 한 것이다. 또한, CAM에 의한 회전 구속이 약아지므로 진동의 저감에도 영향을 미칠 것으로 판단하고 있다. 구조 형식을 제외한 다른 영향을 배제하기 위하여 프리캐스트 슬래브의 폭과 길이, 캐관과 레일체결 간격 등은 기존 슬래브케도와 동일하게 설정되어 있다.

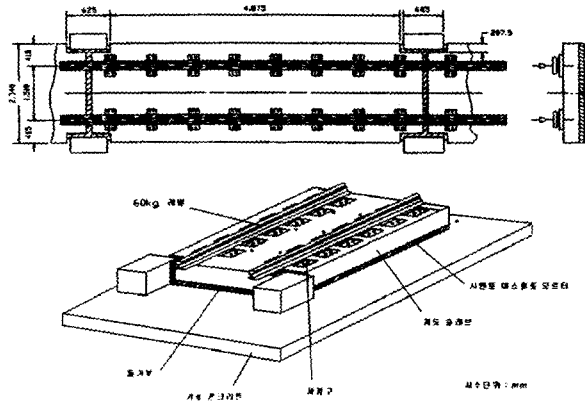


그림 2. 단면이 개선된 슬래브케도의 구조 형식

3. 궤도에 작용하는 하중

궤도에 작용하는 힘들은 레일에 수직인 수직력(normal force), 레일방향의 직각으로 작용하는 횡압(lateral force) 및 레일에 평행한 축방향력(axial force)의 3종류로 나누어 생각할 수 있다. 차륜 통과시 레일에 작용하는 수직력을 나타내는 운중의 경우 정지시의 경우에는 차량의 자중과 축 배치에 따라 정해지며 차량에 따라 다르고 공칭 운중보다 20%에 가까운 차이가 있는 경우도 있다. 차륜으로부터 레일에 작용하는 횡압은 곡선전향의 횡압, 곡선통과시 불평형 원심력의 좌우방향 성분, 차량동요에 따른 횡압, 분기기 및 신축이음매 등의 궤도의 특수개소에 있어서 충격력등이 차량의 주행에 따라 발생하며, 이러한 횡압의 합계는 통상 운중 50%이하지만 최대 80%에도 달하는 경우도 있다. 레일의 길이 방향으로 작용하는 축방향력의 경우 레일의 온도 변화에 의한 축력, 제동 및 시동하중, 구배구간에서 차량 중량의 점착력을 통해 전후로 작용하는 하중이 있다.

4. 슬래브케도의 유한요소 해석

4.1 모델링

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 도상 슬래브에 대해서는 사각형 판요소와 삼각형 판요소를 사용하고 레일에 대해서는 보요소를 사용하여 슬래브케도 시스템을 모델링 하였다. 또한, 레일과 슬래브간의 연결과 슬래브와 슬래브간의 연결을 모사하기 위하여 내부스프링 요소를 사용하였다. 레일의 지지탄성은 레일체결장치부에 있는 궤도패드에 의해 지지되므로 내부 스프링요소를 이용하여 이상화하는 한편 CAM는 슬래브를 지지하는 스프링으로 모델링 하였다. 노반 콘크리트는

무한 강성으로 가정하였으며, 모델링 모양은 그림 3과 같다.

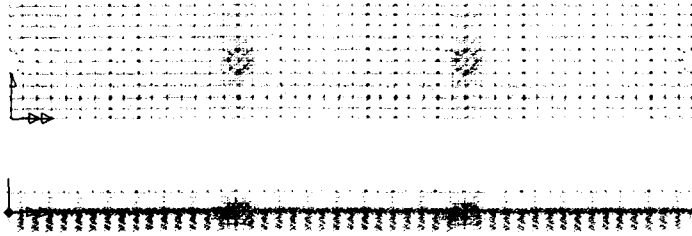


그림 4. 일본 슬래브궤도의 모델링

단면이 개선된 슬래브궤도의 경우 모델링에 대한 기본적인 개념은 일본의 슬래브궤도와 동일하며, 구조 형식을 제외한 다른 영향을 배제하기 위하여 프리캐스트 슬래브의 폭과 길이, 궤간과 레일체결 간격 등은 일본의 슬래브궤도와 동일하게 설정하였다. 이 형식에 대한 모델링은 그림 4에 나타냈으며, 입력제원 및 물성치는 표 1과 같다.

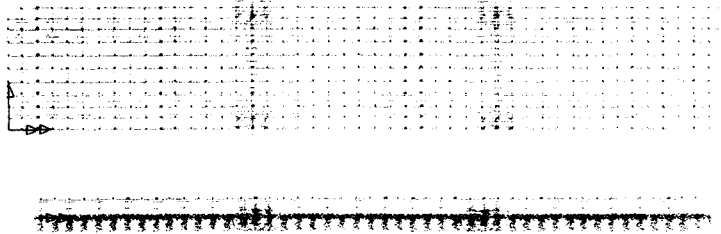


그림 4. 단면이 개선된 슬래브궤도의 모델링

표 1. 슬래브 및 레일의 입력제원과 물성치

레일 관련 제원 및 물성치		슬래브 관련 제원 및 물성치		
레일 단면적	77.50 cm ²	슬래브 매수	3	
단면 2차 모멘트(I _x)	3,090 cm ⁴	슬래브 사이의 간격	495 cm	
단면 2차 모멘트(I _y)	512 cm ⁴	슬래브 폭	234 cm	
단면계수(Z _n)	397 cm ³	슬래브 두께	16 cm	
레일 탄성계수	2100 tf/cm ²	돌기부 지름	40 cm	
포아손 비	0.3	직사각형 돌기부 제원	62.5 × 20.75 cm	
레일 단위중량	60.80 kg/m	슬래브 탄성계수	350 tf/cm ²	
레일 간격	151 cm	포아손 비	0.17	
레일 체결장치 간격	62.5 cm	슬래브의 단위중량	245 kg/m ³	
레일패드 스프링계수	수직	60 tf/cm	CAM 스프링계수	0.20 tf/cm ²
	종방향	25 tf/cm		
	횡방향	43 tf/cm		

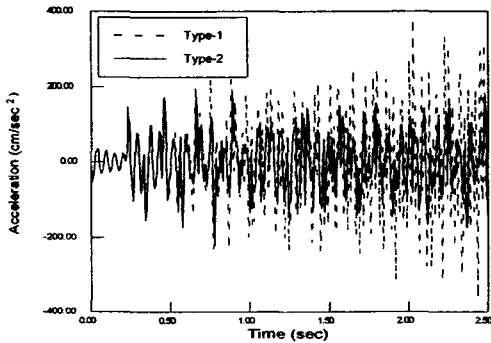
4.2 적용 하중

정적해석의 경우, 축중 17ton의 수직력과, 각 레일에 1.1ton/m의 하중을 레일 전체에 등분포로 재하한 종방향의 시동하중 그리고 최대횡압 3.4ton을 각 레일 당 두 번째 슬래브의 레일 중앙에 재하 하였다. 동적해석의 경우에는, 이동 하중을 간략화 하기 위해서 열차하중군을 18.7m의 유효 타격 간격을 갖는 주기함수로 모델링 하였으며 두 번째 슬래브의 중앙 위치에서 17ton의 수직하중을 레일의 양측에 각각 8.5ton씩 재하하였으며, 6.8ton의 횡하중을 레일의 양측에 각각 3.4ton 재하하여 시간 이력 해석(time history analysis)을 수행하였다.

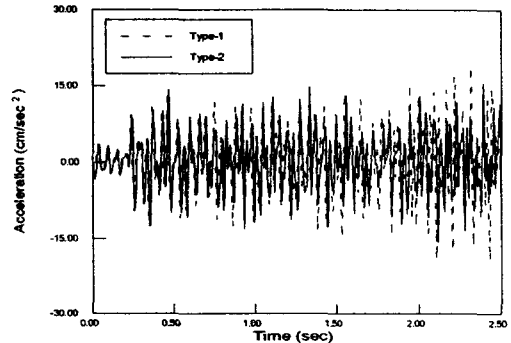
5. 해석결과

5.1 슬래브에 대한 결과

기존의 궤도 슬래브를 Type-1로 표기하였고, 단면이 개선된 궤도를 Type-2로 표시하였다. 수직방향 정적 하중에 대해서는 두 궤도 시스템의 응답은 거의 동일하였으며, 레일의 모멘트와 슬래브의 응력 역시 거의 동일한 거동을 보였다. 동적하중에 대해서는 Type-1의 연직가속도 379.43cm/sec^2 에 비해 Type-2의 연직가속도는 222.02cm/sec^2 로서 레일의 연직가속도가 0.16g 정도 감소하였으며, 레일 처짐의 경우에는 Type-1이 1.102mm, Type-2가 1.092mm로 미소하지만 Type-2의 처짐이 감소하였으며 레일에 발생하는 모멘트 역시 각각 $1.24\text{ t}\cdot\text{m}$ 과 $1.20\text{ t}\cdot\text{m}$ 으로 Type-2가 약 3% 작은 값을 나타내었다. 또한 슬래브 연직가속도 최대응답은 Type-1이 19.23 cm/sec^2 이고 Type-2가 15.79 cm/sec^2 로 이는 프리캐스트와 돌기부의 접촉면이 넓은 Type-2가 진동의 저감에 효과적일 수 있음을 보여주는 것으로 생각된다. 그러나 레일의 진동감소의 효과에 비해 하부구조물인 슬래브의 진동 감소효과는 상대적으로 작았다. 재하점에서의 레일과 슬래브의 연직가속도는 그림 5와 같다.



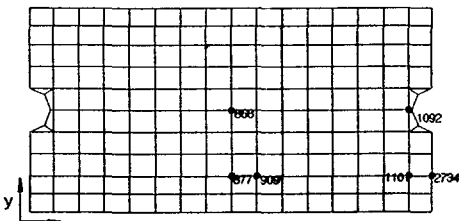
(a) 레일의 연직가속도



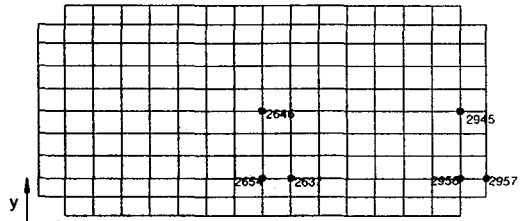
(b) 슬래브의 연직가속도

그림 5. 재하점에서의 응답가속도 비교

종방향 하중에 대해서는 새로운 단면이 일본의 궤도 슬래브보다 상대적으로 약 50%정도의 응력의 감소를 나타냈다. 횡방향 하중에 대해서는 그림 6과 같은 특징적인 조건을 가진 곳을 슬래브 당 8개소씩 선정하여 그 특성을 비교하였다.



(a) 일본의 궤도 슬래브(Type-1)



(b) 새로운 단면의 궤도 슬래브(Type-2)

그림 6. DATA비교 Node

각각의 위치에서의 y방향 변위와 최대 가속도는 표 2, 표 3과 같다.

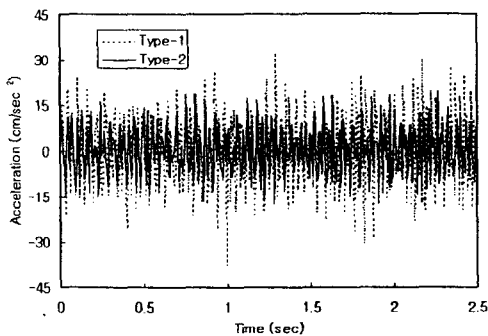
표 2. 정적 및 동적 하중에 대한 y방향 변위

위치	Type-1 (단위는 mm)		Type-2 (단위는 mm)	
	정하중	동하중	정하중	동하중
868	0.00596	0.0148	0.00577	0.01396
877	0.00617	0.01524	0.00597	0.01435
909	0.00734	0.01731	0.00708	0.01628
1101	-0.000102	-0.0096	0.0000786	0.00779
2734	-0.000739	-0.00107	-0.000551	-0.0082
1092	-0.0000166	-0.0087	0.000158	0.00779

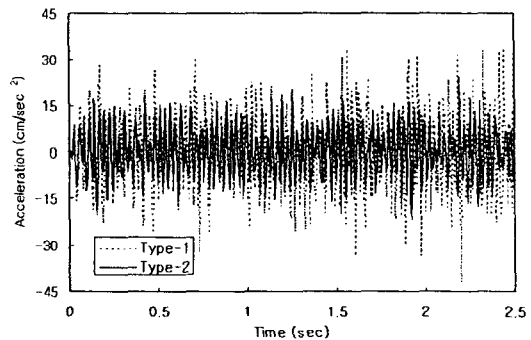
표 3. 하중에 대한 y방향 최대 가속도

위치	Type-1 (단위는 cm/sec ²)	Type-2 (단위는 cm/sec ²)
868	31.79017	19.6032
877	31.94863	22.12778
909	29.38651	23.93943
1101	27.48845	21.00673
2734	34.87981	28.53723
1092	33.16658	24.15441

※ 위치 기준은 Type-1의 Node 새로운 단면의 변위량이 기존의 레도 슬래브보다 작은 값을 나타냈으며, 이는 새로운 단면이 기존의 슬래브보다 횡적거동에서 우수할 것으로 판단된다. 가속도의 경우 부분적으로 차이는 있으나 새로운 구조의 가속도가 일본 슬래브레도의 약 70~80%정도 되었다. 다음 그림 Node 868과 1092에서의 시간-가속도 곡선을 나타낸 것이다.



(a) Node 868에서의 응답가속도 비교



(d) Node 1092에서의 응답가속도 비교

그림 7. 슬래브의 응답 가속도 비교

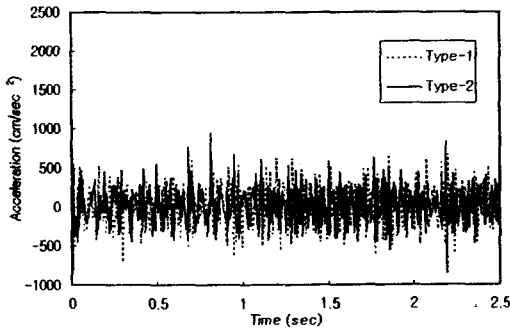
5.2 레일에 대한 결과

레일의 거동은 새로운 단면의 변위가 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 새로운 구조 형식을 적용한다면 기존의 형식 보다 레일과 슬래브 사이의 체결부에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 슬래브 경우에는 다르게 초기 시간에서 최고 응답을 나타내었다. 처짐의 경우 일본 슬래브의 경우에는 0.025 sec에서 최대 변위가 발생하였고 새로운 구조의 경우에는 0.03 sec에서 최대 변위가 발생하였다. 그리고 가속도의 경우 하중점은 0 sec일 때, 그리고 체결부는 0.005 sec일 때 최대 가속도가 일어났다. 이것은 열차 하중을 이동 하중으로 고려하였기 때문에 실제 거동과 유사하리라 판단된다. DMF는 두 경우가 거의 같은 값을 나타내었다. 그러나 슬래브 경우에는 다르게 체결부에서 DMF값이 크게 나타났다. 이것은 직접 하중을 받아 거동하는 구조물과 하중이 전달되어 거동하는 구조물이 동적 거동 특성이 다른 것으로 생각되었으나 명확히 밝힐 수는 없었다. 따라서 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

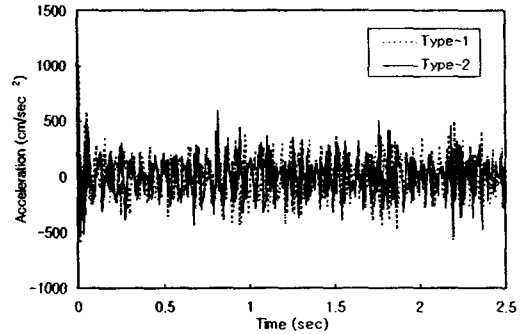
해석 결과(y방향 거동)는 표 4와 같으며, 레일의 응답 가속도는 그림 8과 같다.

표 4. 레일에 대한 해석 결과

위치	New (단위는 mm)		Japan (단위는 mm)	
	정하중	동하중	정하중	동하중
하중점	0.00324	0.005549	0.00255	0.00438
DMF	1.71		1.72	
체결부	0.00284	0.0050589	0.00219	0.0039522
DMF	1.78		1.80	



(a) 하중점에서의 가속도 응답 비교



(b) 레일 체결부에서의 가속도 응답 비교

그림 8. 레일에서의 가속도 응답 비교

6. 결론

기존의 슬래브궤도와 단면이 개선된 슬래브궤도에 대하여 유한요소법을 이용, 종방향에 대하여 정적 해석을 그리고 수직방향과 횡방향에 대하여 정적 및 동적 해석을 수행하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수직방향의 하중에 대한 결과 구조형식의 개선에 의한 레일과 슬래브의 진동을 저감시킬 수 있었다. 레일의 연직 가속도가 크게 감소하였으며 슬래브의 연직가속도 역시 미소한 감소추세를 보였다.
2. 종방향의 정적 해석 수행 결과 일본 슬래브궤도의 돌기부에서의 응력이 개선된 슬래브궤도보다 약 50% 증가된 값을 나타내었다. 이는 절대적으로 큰 값은 아니지만 의외의 큰 하중이 걸렸을 경우 이에 대한 고려가 필요하리라 판단된다.
3. 횡방향 하중에 대한 정·동적 해석을 수행한 결과 새로운 단면의 변위량은 일본 슬래브 궤도의 변위량에 비해 약 5%정도 감소하였다. 이는 비록 크지는 않지만 궤도의 기하학적 구조가 횡하중에 의한 거동에 영향을 미친다는 것을 의미하는 것으로서 횡하중이 많이 재하되는 부분에서 구조 형식에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
4. 횡방향 변위량 변화에 비해 새로운 구조의 횡방향 가속도는 일본 슬래브궤도에 비해 70~80%정도 값으로 감소하였으며 이는 진동에 대하여 일본 슬래브궤도에 비해 유리하다는 것을 의미한다. 따라서 내진 성능 및 내구성 등에서 우수할 것으로 판단된다.
5. 레일의 경우 새로운 구조의 레일 변위가 기존의 것에 비하여 큰 것으로 나타났다. 따라서 새로운 구조를 적용할 경우 이에 대한 연구와 함께 적절한 대책이 필요할 것으로 보인다.

참고 문헌

1. 강기동, "고속철도, 궤도의 동특성에 관한 연구", 건국대학교 박사 학위논문, 1992. 6.
2. 고속전철 사업기획단, "고속철도 콘크리트 구조물 (RC 및 PC) 설계표준 시방서 (안)", 1991. 9., pp.

3. 박광석, “철도차량의 주행안전성에 관한 연구”, 한양대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1995. 6., pp. 8
4. 양중대, “유한요소법에 의한 콘크리트 슬래브궤도의 구조해석에 관한 연구(1)”, 철도시설 No. 65, 1997. 9., pp. 81
5. 유근주, “고속철도 궤도보수에 관한 연구”, 한양대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1994. 11., pp. 2
6. 이성욱, “저진동궤도 개발을 위한 철도궤도의 동특성에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위 논문, 1996. 12., pp. 20~26
7. 이종득, “철도공학”, 노혜출판사, 1999. 2.
8. 이희현, “차륜-레일 상호작용을 고려한 슬래브궤도의 진동해석”, 전산구조공학회 논문집, 제7권, 제2호, 1994. 6.
9. 진경민, “고속 열차 하중을 받는 슬래브궤도의 동적거동에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위 논문, 1999. 12.
10. 한국 고속철도 건설공단, “슬래브궤도 구조설계 보고서”, 1993. 12., pp. 113
11. Charles O. Frederick, “The Effect of Lateral Loads on Track Movement”, Railroad Track Mechanics and Technology, 1978, pp.109~140
12. FEA Ltd., “Lusas Theory Manual 1”, pp. 2.4-1~2.4-10
13. James Colville, “Design for Asphalt Railway Roadbeds”, Transportation Engineering Journal, 1979. 11., pp. 652
14. Josef Eisenmann, “Railroad Track Structure for High Speed Line”, Railroad Track Mechanics & Technology, Pergamon Press, 1978
15. 佐藤 吉彦. “軌道に生ずる高周波振動とろの考察”, 日本土木學會 論文集, 第77號, 1961.
16. 三浦 重, “軌道構造の動特性モデルの構築”, 日本鐵道總合技術研究報告, Vol.12, 1995.
17. 佐佐木 直樹, “新幹線のスラブ軌道”, 日本鐵道施設協會, pp. 29~30