

급곡선용 레일탄성체결장치를 사용한 생력화궤도 시공 사례

Construction Case of Maintenance-free Track System in Application of Elastic Rail Fastening System for Sharp Curved Section

공선용*
Kong, Sun-Yong

김상진**
Kim, Sang-Jin

ABSTRACT

SMSC(Seoul Metropolitan Subway Corporation) is substantially taking the core role of mass transit system in Seoul Metropolitan area. When it was built, the design had challenged to sharp curved tracks less than 250m radius considering the protection of buildings and cultural properties as well as the connection to ground roads. Such circumstances have required a certain extent of slack in track geometry and therefore led to the construction of ballasted track with wooden sleepers. However, the dynamic force from running on sharp curved track has caused the misalignment and abnormal failure of track geometry, and it has resulted in a frequent maintenance and repair works which require a lot of cost and manpower. In this paper, we present the construction case of maintenance-free track system by using of concrete sleeper and elastic rail fastening system to ensure the safety of both passengers and trains, and to contribute the effective maintenance for track facilities of SMSC.

1. 서 론

우리나라 최초로 건설되어 서울과 수도권 대중교통의 중추적인 역할을 수행하고 있는 서울지하철은 도심구간내 대형 건물과 문화재, 지상도로 등의 영향으로 R250m이하의 급곡선이 설치되고 이러한 곡선에는 상당량의 Slack 설치가 필요하므로 목침목을 사용하는 궤도구조로 건설되었다. 그러나, 급곡선 구간을 열차가 주행할 때에 궤도에 발생하는 각종 부담력으로 인해 빈번한 궤도 틀림과 재료훼손 등이 발생되어 승객과 열차의 안전 확보를 위한 점검과 보수에 막대한 인력과 비용이 투입되게 되었다.

본 발표는 콘크리트침목과 레일탄성체결장치를 사용한 급곡선 궤도구조의 생력화를 통하여 승객과 열차의 안전운행을 확보하고, 궤도시설 유지·관리에 효과적으로 기여하고 있는 서울지하철 공사의 생력화(maintenance-free) 궤도구조 개발 및 시공 사례를 소개하고자 하며, 나아가 궤도 설계에 적극 활용되고 기여할 수 있기를 기원한다.

2. 급곡선 생력화 궤도구조 개요 및 Slack 검토

2.1 설계조건

- (가) R200m이하 급곡선 구간 운행선상에서의 안전한 열차 주행성 보장
- (나) 기존 선로와 동일한 Slack량 범위 충족(※서울지하철 R140m 곡선의 Slack=16mm)
- (다) 자갈도상과 콘크리트도상 두 궤도조건 충족
- (라) 횡압에 대한 안전성 충족 및 진동저감 성능 보장

* 서울지하철공사 철도토목처장, 정회원

** 서울지하철공사 철도토목처 선임, 정회원

2.2 급곡선 생력화 궤도구조 개요

서울지하철에서 시공한 급곡선 생력화 궤도는 크게 자갈도상과 콘크리트도상 두가지 형태로 분류되며, 중량의 콘크리트침목(@330kg/정)에 궤간조절 기능을 갖는 탄성체결장치로 레일을 체결하는 구조로 운전자 필요에 따라서 자갈도상이나 콘크리트도상에 모두 적용하여 시공할 수 있도록 설계되었다. 급곡선 생력화 궤도의 자갈도상과 콘크리트도상의 구조는 아래 그림1, 그림2와 같다.

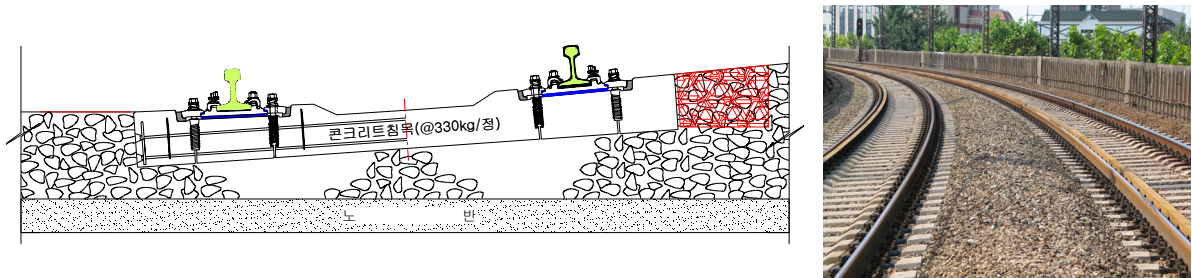


그림 1. 자갈도상 생력화 궤도구조 및 시공사례

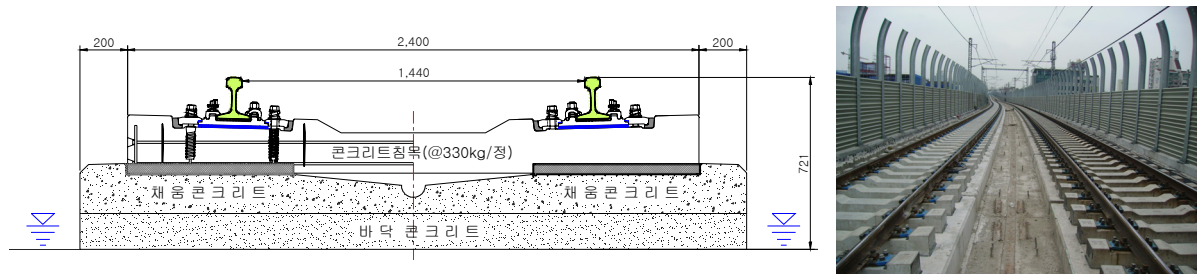


그림 2. 콘크리트도상 궤도구조 및 시공사례

그림1은 2호선 구의~강변간 R350m 개소 자갈도상 구조에서의 생력화 시공구간으로 당초 목침목 궤도구조로 건설된 것을 본 궤도구조를 사용 개량하였으며, 횡압으로부터 레일좌굴 예방을 위하여 곡선 외측부에 도상안정체를 살포하여 1,000kg/m² 이상의 도상횡저항력을 갖도록 하였으며, 실제 계측결과 1,200kg/m² 이상의 안정적인 결과를 얻을 수 있었다.

그림2는 2호선 건대~구의간 고가교 개소 콘크리트도상구조 시공 구간으로 2006년 3월 준공 목표로 현재 시공하고 있는 구간이다. 콘크리트도상구조에도 자갈도상에서 사용하고 있는 동일한 콘크리트침목과 레일체결장치를 사용하고 있으며, 콘크리트도상의 사하중 경감, 배수성 확보 등에 적합하도록 콘크리트침목 저부에 침목 Boot를 삽입하여 도상콘크리트와 콘크리트침목이 분리되는 구조로 설계되었다. 침목Boot는 고가교에서 발생할 수 있는 온도변화와, 내오존성 확보를 위하여 재질을 Polyamide로 선정하였으며, 도상콘크리트의 압력으로 인해 침목Boot의 측면이 변형(축소)되는 현상을 방지하기 위하여 충분한 강도를 지니도록 설계하였다. 또한, 레일체결구는 Vossloh사 SKL12 텐스크램프와 레일신축을 고려한 블럭식 종방향 활동체결구를 병용하여 시공하고 있다.

2.3 급곡선 구간 Slack의 필요성에 대한 고찰

열차의 원활한 주행을 위하여 곡선부에서는 일정량의 Slack을 필요로 하고 있으나, 각 국의 Slack량을 비교해 보면 점점 축소되고 있는 추세이며, 지하철의 경우에도 건설당시 $S=2,250/R-S_1$ 에서 $S=1,250/R-S_1$ 로 축소 건설되고 있다. 그러나, R200m이하 급곡선의 경우 1/2로 축소된 Slack량에 의하여 외측레일의 측마모가 레일교환후 초기에 급격하게 발생되고 있으며, 일정량의 레일마모가 발생된 후 마모 진행속도가 현저히 줄어드는 이상 현상이 지속적으로 발생되고 있는게 현실이다. 따라서, Slack 축소와 레일마모와의 상관관계에 대하여 보다 많은 연구와 검증이 필요하다고 판단된다. 실례로 독일의 경우 R200m미만에만 Slack을 붙이고 $S=6,000/R-S_1$ 공식을 적용하고 있다. 이 공식을 국내 최고 급곡선(영업선중)인 1호선 시청~종각 구간 R140m에 대입하면 13~43mm 정도의 Slack이 필요하게 되며, 서울지하철의 $S=2,250/R-S_1$ 공식을 적용하면 16mm 정도의 Slack이 필요하게 된다.

기존의 목침목 궤도구조는 이러한 Slack 설치에 능동적으로 대처할 수 있는 구조이나, 장기간 사용 시 목침목 훼손, 헐거워짐 등으로 인하여 열차 안전운행 확보와 유지보수에 많은 문제점이 유발될 수 밖에 없는 구조적 문제를 안고 있다. 따라서, R140m 구간의 Slack량 16mm를 충족하며, 별도의 간격재나 삽입재를 필요로 하지 않고 레일체결장치 자체의 조합만으로 Slack을 자유로이 조절할 수 있는 아래 그림3의 레간조정 기능을 갖는 레일탄성체결장치를 개발, 시공하게 되었다.

3. 레일탄성체결장치 주요부 설계개요

3.1 레일탄성체결장치 Slack 조정범위

본 레일탄성체결장치는 별도의 부품을 추가하지 않고 콘크리트침목과 간격재의 조합으로 Slack량을 자유로이 조절할 수 있으며, 그 범위는 1,436~1,454mm로 최대 19mm까지 가능하고, 진동저감을 고려하여 발포폴리우레탄 재질의 방진패드를 적용하였다.

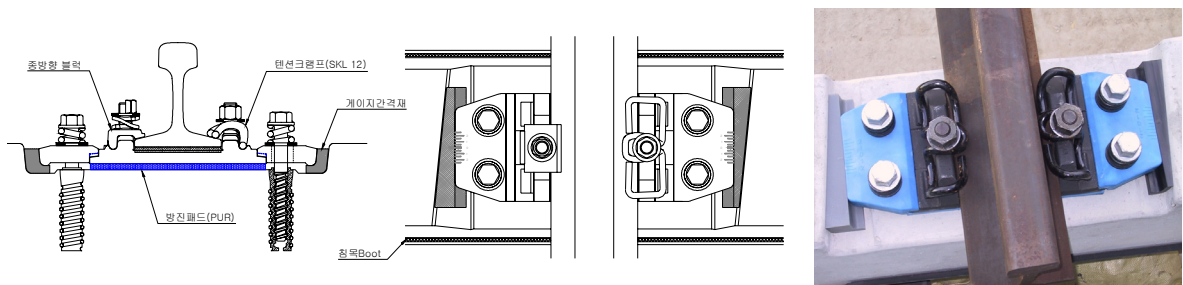


그림 3. 레간조정용 레일탄성체결장치 구조도

급곡선을 기준하였기 때문에 기본레간은 1,440mm로 설계하였으며, 레간조정은 간격재를 이용하여 미세조정이 가능하고 Slack 조정범위는 도표1과 같다.

도표 1. 급곡선용 레일탄성체결장치의 Slack 조정범위

간격재의 조합				레 간 이 동 량 범 위		
좌 레 일		우 레 일		최소변위량 (간격재변위량)	기본레간 (간격재변위량)	최대변위량 (간격재변위량)
대	소	소	대	1,436 (1,438~1,442)	1,440	1,444 (1,438~1,442)
대	소	대	소	1,441 (1,443~1,447)	1,445	1,449 (1,443~1,447)
소	대	소	대			
소	대	대	소	1,446 (1,448~1,452)	1,450	1,454 (1,448~1,452)

이러한 조정범위 기능은 매우 유용하게 사용되고 있다. 즉, 콘크리트도상에서 방향, 레간틀림이나 시공오차가 발생한 경우 도상을 깨지 않고 체결장치만으로 궤도정정이 가능하고 정확한 궤도선형을 보장(정)할 수 있기 때문에 콘크리트도상 시공에 아주 적합한 구조라 할 수 있다. 참고적으로 직선용으로 시공할 경우 기본레간은 1,430mm 레간조정 범위는 ±9mm로 1,426~1,444mm까지 레간을 조정할 수 있게 된다.

3.2 방진패드 설계

방진패드 설계를 위하여 독일 IMB Dynamik사에서 개발한 ISI 프로그램을 사용하여 동일한 선로조건(자갈도상+PCT+레일)에 60km/h와 100km/h 두 설계속도를 적용하여 방진패드의 삽입여

부에 따른 레일처짐량과 진동저감 효과를 해석하였다. 결과는 그림 4, 5 도표 2와 같으며 방진 패드의 정적탄성계수는 22.5kN/mm, 동적탄성계수는 정적탄성계수의 250% 성능을 전제조건으로 하였다.

(※ 현 방진패드 규격 : 정적 20.0kN/mm±20% / 동비 150%미만 / 압축줄임률 5%미만)

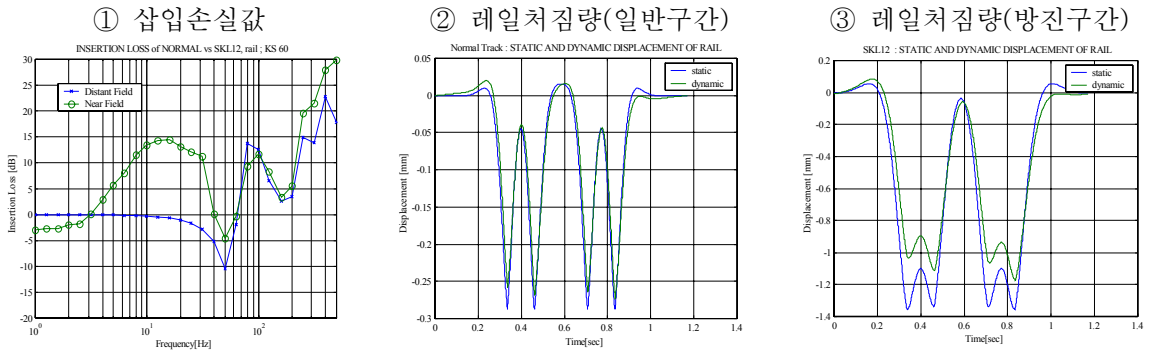


그림 4. 60km/h 방진패드 삽입손실 및 레일처짐량(KS60) 해석값

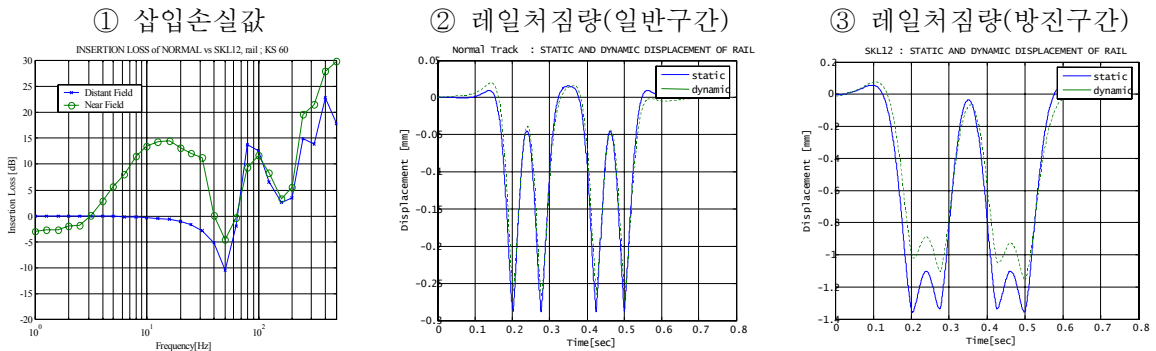


그림 5. 100km/h 방진패드 삽입손실 및 레일처짐량(KS60) 해석값

도표 2. 방진패드 레일처짐량과 삽입손실값

설계속도	레일종별	일반 PCT 궤도	급곡선 방진궤도	비고
0km/h	50kgN의 경우	- 레일 처짐량 : 0.336mm	- 레일 처짐량 : 1.489mm	
	60kg의 경우	- 레일 처짐량 : 0.288mm	- 레일 처짐량 : 1.357mm	
60km/h	50kgN의 경우	- 레일 처짐량 : 0.319mm	- 레일 처짐량 : 1.273mm - 60~100Hz : 0~14dB↓	
	60kg의 경우	- 레일 처짐량 : 0.274mm	- 레일 처짐량 : 1.174mm - 60~100Hz : 0~14dB↓	
100km/h	50kgN의 경우	- 레일 처짐량 : 0.320mm	- 레일 처짐량 : 1.255mm - 60~100Hz : 0~14dB↓	
	60kg의 경우	- 레일 처짐량 : 0.274mm	- 레일 처짐량 : 1.157mm - 60~100Hz : 0~14dB↓	

3.3 레일체결장치의 횡압에 대한 안전성 해석

횡압에 대한 설계조건으로 축하중은 16ton, 횡압(F_H)은 6.4ton(윤중의 80%)을 기준으로 해석한 결과 X-방향 최대응력은 2.21kg/cm²(인장), -2.28kg/cm²(압축), Y-방향 최대응력은 7.29kg/cm²(인장), -7.26kg/cm²(압축)을 보이며, 베이스플레이트와 게이지블럭의 접촉점 부근에 미세한 응력

이 전달되나 이로 인해 게이시 간격재까지 어떠한 응력변화도 발생되지 않아 횡압에 대한 안전성은 이상이 없음을 알 수 있다.

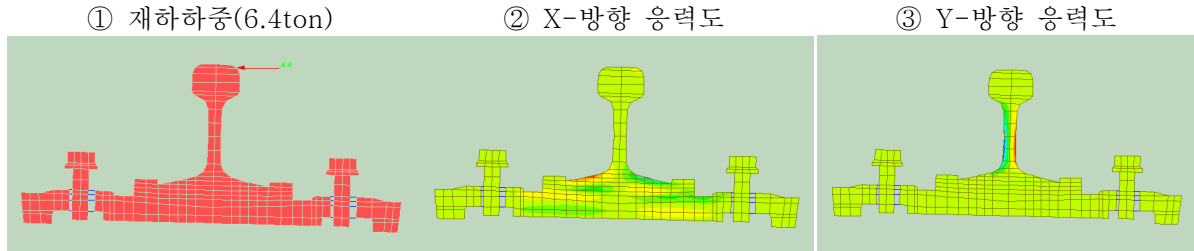


그림 6. 횡압(6.4ton)에 대한 응력해석 결과

3.4 자갈도상 궤도에서의 안전성

본 구조의 콘크리트침목은 침목과 비교하여 볼 때 저부폭이 크고(240mm→300mm), 중량이 커(90kg/정→330kg/정) 충분한 중·횡저항력이 확보되며, 자갈도상 궤도로 시공할 경우 횡압에 대한 안전은 이미 국내의 철도에서 시공되어지고 있고 성능이 검증된 도상안정제를 살포함으로써 급곡선부 레일좌굴 사고로부터 안전한 궤도를 유지할 수 있다. 실제로 2002년도부터 R200m이하 8개 구간 이외에 R400m이하 곡선구간까지 확대하여 시공한 결과 현재까지 단 한번의 기계화다짐(M.T.T) 작업을 하지 않을 정도로 양호한 선로상태를 보여주고 있다.

3.5 콘크리트도상에서의 침목 매입깊이와 도상어깨에 대한 해석

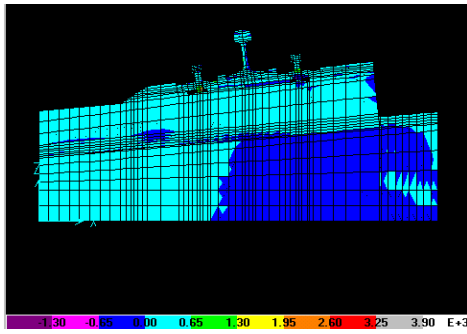
콘크리트도상의 경우에는 현장타설 콘크리트량을 최소화 할 수 있는 최적의 궤도구조가 설계되어야 한다. 콘크리트도상은 침목&도상 일체형과 분리형 두가지 모델을 설계, 해석한 결과 분리형/일체형 모두 파괴계수 이하를 나타내고 있으며, 침목 매입깊이와 도상어깨를 줄여도 응력 분포만 다를 뿐 콘크리트에 균열을 일으킬 만한 응력은 작용하지 않는 것을 확인 할 수 있었다.[도표 3] [그림 6]

본 설계에서는 고가교의 안전성과 사하중을 고려하여 침목매입 깊이는 40mm 도상어깨폭은 200mm로 최적화하여 적용하였고, 2002년 1호선 시청~종각 R140m $l=1,034m$ 준공을 시작으로 2호선 건대~구의 $l=2,736m$ 고가교 구간의 자갈도상을 콘크리트도상으로 개량하는 작업을 수행하고 있다.

도표 3. 콘크리트도상의 침목 매입깊이와 어깨폭에 따른 최대응력값

Type		분리형						일체형			
		도상어깨폭									
		100mm		200mm		300mm		100mm		200mm	
		Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
매입깊이 (10mm)	압축	-46.548		-46.548		-46.548		-46.339		-46.409	
	인장		46.386		46.386		46.386		33.245		33.182
매입깊이 (20mm)	압축	-46.575		-46.575		-46.575		-46.341		-46.414	
	인장		46.337		46.336		46.336		33.242		33.177
매입깊이 (30mm)	압축	-46.601		-46.601		-46.601		-46.343		-46.419	
	인장		46.288		46.288		46.288		33.240		33.168
매입깊이 (40mm)	압축	-46.626		-46.626		-46.626		-46.345		-46.424	
	인장		46.241		46.241		46.241		33.239		33.168
매입깊이 (50mm)	압축	-46.651		-46.651		-46.651		-46.346		-46.428	
	인장		46.194		46.194		46.194		33.237		33.164

① 최대응력분포도



② 인장응력분포도

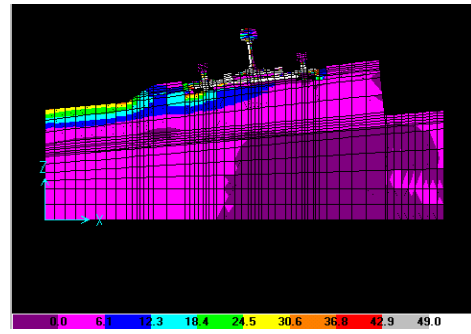


그림 7. 침목 매입깊이와 도상어깨폭에 따른 응력분포도

4. 급곡선용 레일탄성체결장치 생력화 궤도의 성능 평가

4.1 레일탄성체결장치 진동측정 결과

레일탄성체결장치의 정확한 성능 평가를 위하여 동일한 선로조건에 있는 2호선 봉천~신림 R400m 구간을 선정, 진동레벨을 조사하였다. 진동측정 결과 일반 PCT 장대레일 구간과 비교하여 0~250Hz 범위에서 평균 8.8dB 정도 저감되는 것으로 계측되었으며, 열차 운행으로 인한 고체음의 주된 주파수 범위인 40~125Hz 사이 대역에서는 약 10~14dB 이상의 차이가 발생하여 우수한 진동저감 성능이 있음이 검증 되었으며, 설계된 저감량(약10dB)과도 일치하는 것을 알 수 있다.

도표 4. 진동측정개소 선로여건 및 측정결과 DATA

구분	선 로 여 건						진 동 측 정 값			비 고
	레일	방진	침 목	도상	STA	열차속도	평 균	1차	2차	
기 존 구 간	60kg 장대	무	일반 PCT	자갈 도상	31k120 중앙부	54.0km/h	76.4dB	76.5dB	76.3dB	평균 8.8dB 감소
탄 성 구 간	60kg 장대	유	중량 PTT	자갈 도상	31k120 중앙부	55.3km/h	67.6dB	69.2dB	66.0dB	

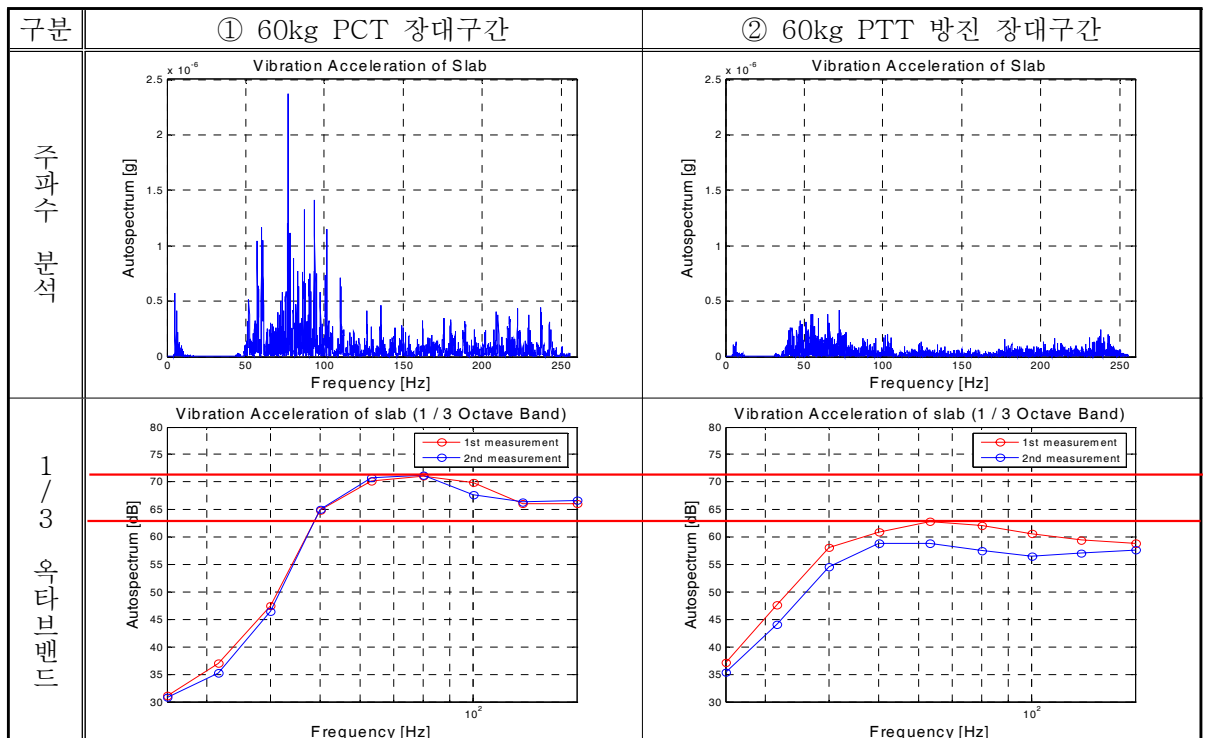


그림 8. 주파수 분석 및 1/3옥타브 밴드 분석 결과

4.2 궤도 유지/보수 점검 결과

2002년 처음 준공된 이래 현재까지 1~4호선 곡선구간을 대상으로 약 10km를 시공 완료하였으며, 궤도의 틀림, 재료이완 및 훼손, 도상균열 등에 대하여 정기적인 점검을 시행한 결과 현재까지 아무런 이상도 발생하지 않았다. 과거 급곡선 구간의 유지 보수를 위하여 년 2회 이상 기계화(M.T.T) 작업과 인력다짐, 궤간정정, 스파이크 보수, 체결구 교환작업을 수시로 시행하였으나, 본 궤도구조 시공 후 이러한 궤도작업은 더 이상 필요하지 않게 되었으며, 주기적인 점검만 수행하고 있다.

이러한 이유는 앞서 언급 했듯이 궤광 자체의 강성이 기존 궤도구조 보다 튼튼하고 저탄성궤도의 조건을 충족하고 있는 이유라 할 수 있으며, 곡선 주행시 발생하는 각종 궤도 부담력에 대하여 각 부재가 적절하게 대응하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 시공사례의 궁극적인 목적은 승객과 철도 인접 시민들의 친환경적인 서비스 제공을 위해 출발되었다고 할 수 있다. 과거와 달리 국민소득과 생활수준의 향상으로 환경문제는 날이 갈수록 복잡, 다양해지고 있으며, 고비용을 수반할 수 밖에 없어 운영주체의 부담은 점점 늘어나고 있다. 특히, 70~80년대 건설되어 급곡선이 많은 서울지하철 1~4호선의 경우 지난 30여년간 급곡선 궤도를 유지/관리하는데 수많은 노력과 비용이 소요되었지만 본 생력화 궤도 System을 개발함으로써 승객과 열차의 안전운행을 확보하고 환경개선 및 궤도시설 유지/관리에 효과적으로 기여하고 있다.

철도나 지하철의 경우 아주 부득이한 경우가 아니면 본선 영업선을 R200m이하의 곡선반경으로 궤도를 건설하지 않는 것이 좋다. 그러나, 예산 및 시공 여건상의 한계로 인하여 어쩔 수 없이 급곡선으로 건설 되어지고 있는 게 현실이며, 각 도시철도 운영기관에서는 이러한 급곡선 궤도를 유지/관리하는데 많은 어려움과 애로사항을 겪고 있을 것이다. 본 생력화 궤도 시공사례는 우리나라에만 있는 고유 형식으로 급곡선 궤도건설 및 유지/관리에 대한 새로운 대안이 아닐까 판단된다.