

도심형 자기부상열차 선로 종곡선 구간에서의
PSC-U 형 거더와 프리캐스트 바닥판 적용성 평가
Applicability Evaluation of PSC-U Type Girder and Precast Deck
to the Vertical Curves in Urban Maglev Train Route

진병무* 김인규** 김영진*** 이윤석**** 마향욱***** 오현철*****
Jin, Byeong Moo Kim, In Gyu Kim, Young Jin Lee, Yun Seok Ma, Hyang Wook Oh, Hyun Chul

ABSTRACT

One of the characteristics of the Maglev Train is the prominent capability of upgoing. Maglev train with the aim of longitudinal slope 7/100 is under development by the Center for Urban Maglev Program in Korea. To realize these slope, vertical curves must be inserted before and after the slope. The inserted curve has the radius of 3,000m generally. The insertion of these vertical curve results in the additional differences between the girder upper face and the guide rail, and the alignments are controlled by cast in place concrete at present. In this study, for longitudinal curved route with longitudinal slope 6/100, the applicability of PSC-U type girder and precast deck was evaluated for the span length 25m, 30m and vertical curve radii with 3,000m and 1,500m with respect to longitudinal slope 6/100.

1. 서 론

자기부상열차의 특징 중 하나는 탁월한 등판능력이다. 도심형 자기부상열차 실용화 사업에서는 자기부상열차의 등판능력을 종구배 7/100 이상을 목표로 차량을 개발하고 있다. 자기부상열차 노선에 종구배를 구현하기 위해서는 종구배 전후에 종곡선이 삽입하며, 일반적으로 종곡선의 반경은 3,000m 이다. PSC 거더에 의한 종곡선의 구현은 필연적으로 직선 형태의 거더의 상면과 원호 형태의 궤도의 종단선형 사이에 이격을 갖게 된다. 현재로는 이러한 이격을 궤도침목의 지지하는 패딩 높이를 현장타설방식으로 조정하여 궤도의 종단선형을 조정하고 있다. 이러한 현장타설방식에 의한 종단선형의 조정은 현장작업을 요구하며, 따라서 현장작업시간과 노력을 요구하고 있다. 본 연구에서는 종단선형조정에 있어 현장작업의 시간과 노력을 최소로 하며 보다 정밀한 선형조정을 위하여 프리캐스트 바닥판과 PSC-U형 거더 시스템에 적용하는 것을 검토하였다.

2. 종구배에 따른 기하학적 종단선형 계산

그림 1에는 종구배 1:m을 갖는 종단선형에 대하여 종곡선을 개념적으로 나타내었다. 선분 OA는 종평면상에서 구배가 없는 평면선형을 의미하며, 선분 BD 1:m의 구배를 갖는 종구배를 의미한다. 원호 AB는 종곡선 반경 R로 종구배를 갖기 위하여 삽입된 종곡선을 의미한다. 이 때 종구배 m과 종곡선 반경 R에 의하여 결정되는 종곡선 길이 S는 다음과 같은 관계를 갖는다.

* (주) 대우건설, 토목연구팀, 책임연구원, 비회원
E-mail : jinbm@dwconst.co.kr TEL : (031) 250-1190 FAX : (031) 250-1131
** (주) 대우건설, 토목연구팀, 책임연구원, 비회원
*** (주) 대우건설, 토목연구팀, 수석연구원, 비회원
**** (주) 대우건설, 토목연구팀, 전임연구원, 비회원

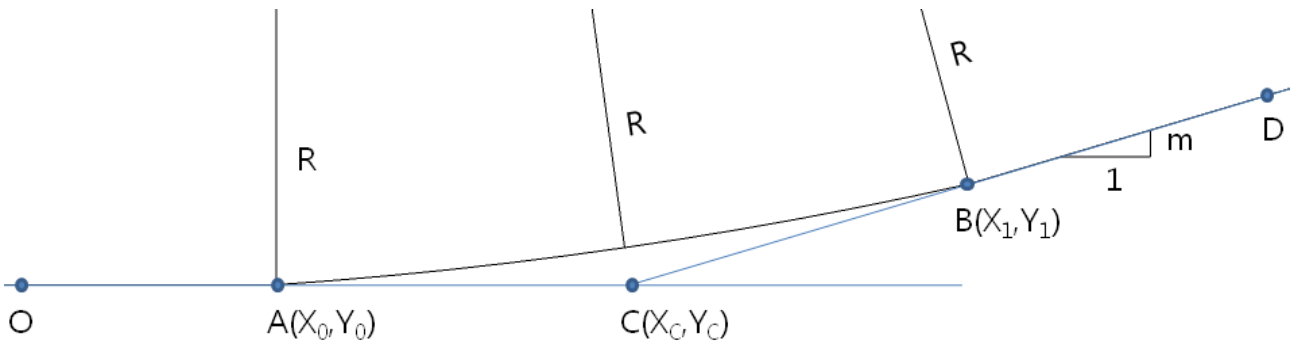


그림 1. 종평면도에서 종구배(BD) 및 종곡선(AB)

$$S = R \times \text{atan}(m)$$

중단선형을 표현하는 종평면 상의 점 A, B, C의 좌표는 기하학적 관계로부터 유도할 수 있으며 여기에서는 이에 대한 설명은 생략한다.

3. 자기부상열차 궤도선형의 조정

자기부상열차는 가이드레일(궤도레일) 위에 부상하여 리니어모터로 추진하는 시스템이다. 따라서 궤도레일의 시공 정밀도가 자기부상열차의 운행 성능 및 승차감과 직결된다고 할 수 있다. 그림 2는 도심형 자기부상열차 실용화 연구단의 3-1세부(선로구축물 성능개선)과제에서 제안한 새로운 형식의 가이드웨이 시스템(좌측)과 기존 방식의 가이드웨이 시스템(우측)과 비교한 것이다. 제안하는 공법의 차이점은 분리형 궤도시스템을 적용하기 위해 기존공법과 달리 프리캐스트 바닥판을 적용하였다는 점이다.

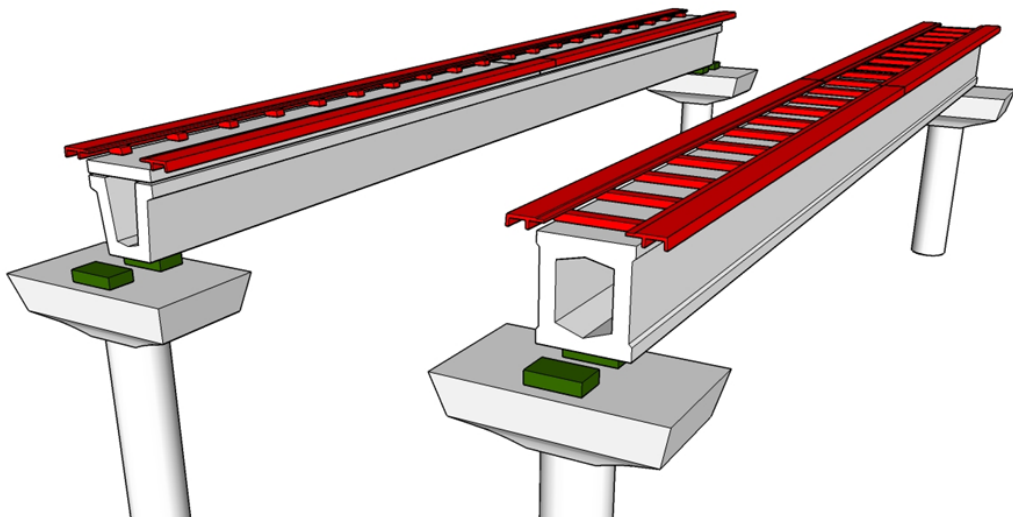


그림 2. 제안안(좌측)과 기존 방법(우측)의 외형적 비교

그림 3과 그림 4는 가이드웨이의 단면도로 제안안과 기존방법의 시스템 구성을 보이고 있다. 표 1에는 두 시스템의 구성품과 연직방향 궤도선형 조정에 대해 비교하였다. 두 시스템의 큰 차이는 제안 방법은 프리캐스트 바닥판으로, 기존 방법은 침목부를 지지하는 패딩층으로 침목부의 연직방향 선형 조정을 한다는 것이다. 제안방법의 프리캐스트 바닥판은 프리캐스트 바닥판에 미리 설치되어 있는 레벨링 볼트에 의해 프리캐스트 바닥판 자체의 레벨(연직 방향)을 큰 어려움 없이 조정 가능하여 궤도레일의 연직방향 선형 조정 능력이 크게 향상 될 수 있다. 그러나 프리캐스트 바닥판을 적용한 제안방법이 기

존방법에 비해 시스템 구성품이 많은 것처럼 보이고, 가이드웨이 한 단면에서 연직방향의 레벨조정만을 비교한다면 프리캐스트 바닥판에 의한 궤도선형의 1차조정은 기존방법보다 복잡하며 장점이 없는 것처럼 보일 수도 있다. 그러나 프리캐스트 바닥판이 주거더와 합성시 무수축 모르타르로 충전되는 베딩층이 있으며, 이 베딩층의 두께가 40mm 정도에서도 프리캐스트 바닥판에 의한 합성 거동이 보장된다. 역으로 베딩층의 두께가 40mm 정도까지는 교각, 교좌장치부, 거더 등 거더 상면까지의 발생할 수 있는 제작 및 시공오차를 흡수하여 프리캐스트 바닥판의 상면을 높이를 어떤 설계 레벨까지 맞출 수 있다.

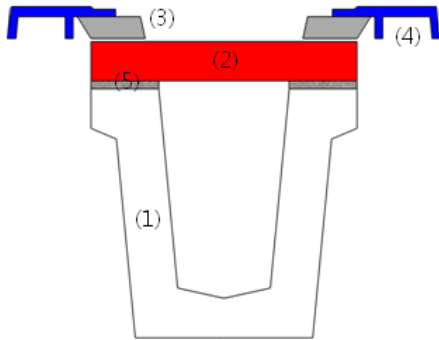


그림 3. 가이드웨이 시스템 제안안

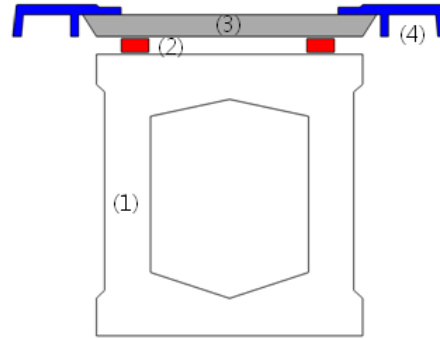


그림 4. 기존 가이드웨이 시스템

표 1 가이드웨이 시스템의 비교

항 목	제안 방법	기존 방법
시스템 구성	(1) PSC-U형 거더 (2) 프리캐스트 바닥판 (5) 베딩층 (6) 레벨링 볼트 (7) 탄성재 (3) 침목부 (4) 궤도레일부	(1) PSC-Box 거더 (2) 패딩층 (3) 침목부 (4) 궤도레일부
궤도선형조정 (연직방향)	1차 조정: 프리캐스트 바닥판의 높이 2차 조정: 침목부의 미세조정	1차 조정: 패딩층의 높이 조정 2차 조정: 침목부의 미세조정

그림 5와 그림 6에는 궤도선형 조정방법을 교축을 따라 도시적으로 나타내었다. 앞서 언급하였듯이 토목구조물에 있어 교각, 교좌장치, 거더 형고 등에서 수mm에서 십 수mm 정도의 제작 및 시공오차가 발생할 수 있고, 이러한 오차는 궤도의 설계 레벨과 궤도의 실제 레벨의 차이를 야기할 수 있다. 또한 거더의 자중 및 기타 사하중(침목부 및 궤도레일부)에 의한 처짐과 및 PSC 거더의 특징인 텐던 긴장에 의한 거더의 솟음이 발생할 수 있다. PSC 거더의 처짐과 솟음은 이론적으로 예상 가능하나, 실제 시공에서 이론값(그림 5, 6의 직선 AC'B)과 실측값(그림 5, 6의 곡선 AC'B)은 상이할 수 있다. 그림 5에 나타난 제안안은 기존방법에서는 각 침목 위치에서 패딩층의 높이를 조정하여 침목부의 수직 레벨(그림 6의 직선 DE)을 맞추는 것으로 기본적인 선형조정을 하는 것에 비하여, PSC-U 거더에 프리캐스트 바닥판과 침목 및 궤도레일부를 임시 거치하고 프리캐스트 바닥판의 레벨링 볼트에 의해 프리캐스트 바닥판 상면의 수직 레벨(그림 5의 직선 DE)을 맞추어, 교축 방향으로 임의의 높이를 갖는 베딩층을 무수축 모르타르를 충전하므로써 궤도 레일의 1차 선형 조정을 한다는 것이다. 따라서 현장에서는 단지 프리캐스트 바닥판의 거치 및 레벨조정 그리고 베딩층 충전 등의 단순작업만을 수행하기에 현장에서의 작업과 노력을 최소화 하는 급속시공 이 가능할 뿐 아니라, 레벨링 볼트에 의한 프리캐스트 바닥판의 1차 연직 방향 레벨의 정밀조정이 가능하다. 이러한 프리캐스트 바닥판의 적용성 검증을 위하여 12.5m 길이의 프리캐스트 바닥판을 제작, 모의시공을 통하여 급속시공 및 정밀시공의 시공성을 입증한 바 있다.

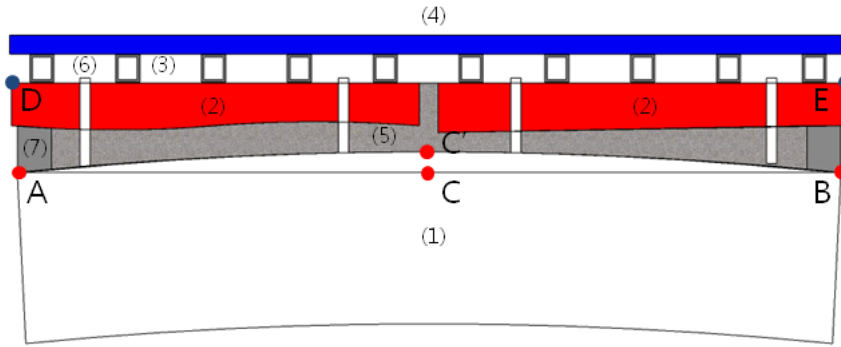


그림 5. 제안안의 궤도 선형조정 방법

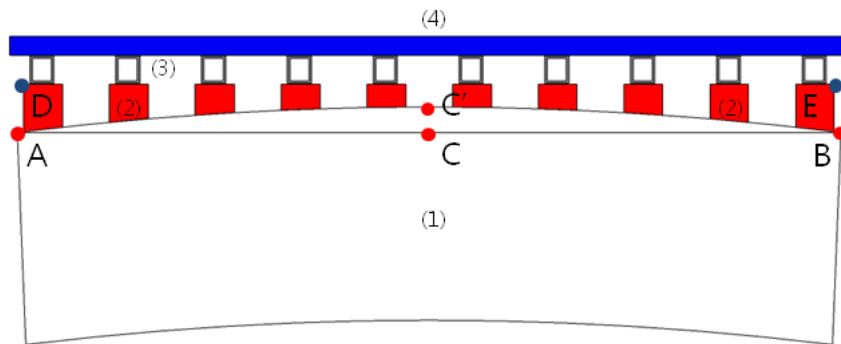


그림 6. 기존방법의 궤도 선형조정 방법

4. 종곡선 상의 프리캐스트 바닥판 적용성 검토

앞서 그림 1의 S는 종곡선의 길이를 나타내며 이는 종구배를 1:m을 갖기 위해 종평면 상에 삽입되는 종곡선의 길이이다. 이 종곡선 구간에서는 구배가 0에서 m까지 변화하게 된다. 이러한 구간에 종평면상 직선형태인 PSC 거더로 선로구조물을 시공하게 된다면, 필연적으로 거더 상면과 궤도의 선형은 위치에 따라 이격거리를 갖게 된다. 그림 7과 같이 종곡선상의 PSC-U형 거더에 프리캐스트 바닥판을 적용한 경우, 거더의 길이 및 개수에 따른 프리캐스트 바닥판의 적용성을 다음과 같이 검토하였다.

그림 7에서 직선형 거더와 궤도선형의 최대이격거리는 dR이라 표현하였다. 이 이격거리는 한 거더 위에서 거더 상면과 궤도선형의 이론적인 이격거리이며, 이 값에 의하여 현장타설방식에서는 궤도침목의 패딩층의 두께를 결정하게 된다. 한가지 예를 들어, 종구배 m=6%인 경우, 종곡선장은 약 180m이며 PSC 거더의 길이가 30m 일 때 패딩층의 두께는 거더 양단의 값이 거더 중앙보다 약 37mm 정도 높게 설정되어야 한다. 이는 궤도 침목의 위치에 따라 변화하는 값이며, 현장타설의 경우 실측을 통해 패딩층의 두께를 일일이 조정하여야 함을 의미한다. 표 2은 종구배 m에 따라 거더의 종곡선장(S)을 계산하고 이 종곡선장을 n개의 거더로 시공하였을 경우 거더 상면과 궤도의 이격거리 dR 및 프리캐스트 바닥판과 궤도의 이격거리 dR'을 나타내었다.

표 2는 인천영종도 시험노선의 기본설계안의 경우, m=6%, 4%, 2.5% 그리고 0.2% 등 4가지 경우의 종구배가 있으며, 이들 종구배에 대해 각각 종곡선 반경 3,000m 및 1,500m에 대하여 프리캐스트 바닥판의 적용성을 검토한 것이다. 최대 종구배값 6%에 대하여 종곡선 반경 3,000m의 경우, 거더 길이 약 30m 및 1개 거더에 2개의 프리캐스트 바닥판을 사용하여도 충분한 궤도선형을 맞출 것으로 판단된다. 종구배 4%에 대하여 종곡선 반경 3,000m의 경우, 6%의 종구배와 마찬가지로 거더 길이 30m와 1개 거더에 2개의 프리캐스트 바닥판이 적용 가능하다. 그러나, 종곡선 반경이 1,500m인 경우 종구배 6%에 대해서는 22.5m 정도의 거더의 경우 프리캐스트 바닥판을 바로 적용하기는 곤란할 것으로 판단된다.

표 2. 종곡선 상 PSC 거더와 프리캐스트 바닥판의 적용성 검토

종곡선 반경 R (m)	종구배 m	X_1	Y_1	X_c	Y_c	종곡선장 S (m)	거더수 n	거더길이 dS	dR (mm)	dR' (mm)	프리캐스트 바닥판 적용여부
3,000	0.06	179.677	5.385	89.919	0.000	180	6	29.96	37.4	9.4	ok
							7	25.68	27.5	6.9	ok
							8	22.47	21.0	5.3	ok
							9	19.98	16.6	4.2	ok
	0.04	119.904	2.397	59.976	0.000	120	3	39.98	66.6	16.6	na
							4	29.98	37.5	9.4	ok
							5	23.99	24.0	6.0	ok
							6	19.99	16.6	4.2	ok
	0.025	74.977	0.937	37.494	0.000	75	3	24.99	26.0	6.5	ok
							4	18.75	14.6	3.7	ok
	0.002	6.000	0.006	3.000	0.000	6	1	6.00	1.5	0.4	ok
	1,500	0.06	89.838	2.693	44.960	0.000	90	3	29.96	74.8	18.7
4								22.47	42.1	10.5	na
5								17.98	26.9	6.7	ok
0.04		59.952	1.199	29.988	0.000	60	2	29.98	74.9	18.7	na
							3	19.99	33.3	8.3	ok
0.025		37.488	0.469	18.747	0.000	37	1	37.49	117.1	29.3	na
							2	18.75	29.3	7.3	ok
0.002		3.000	0.003	1.500	0.000	3	1	3.00	0.7	0.2	ok

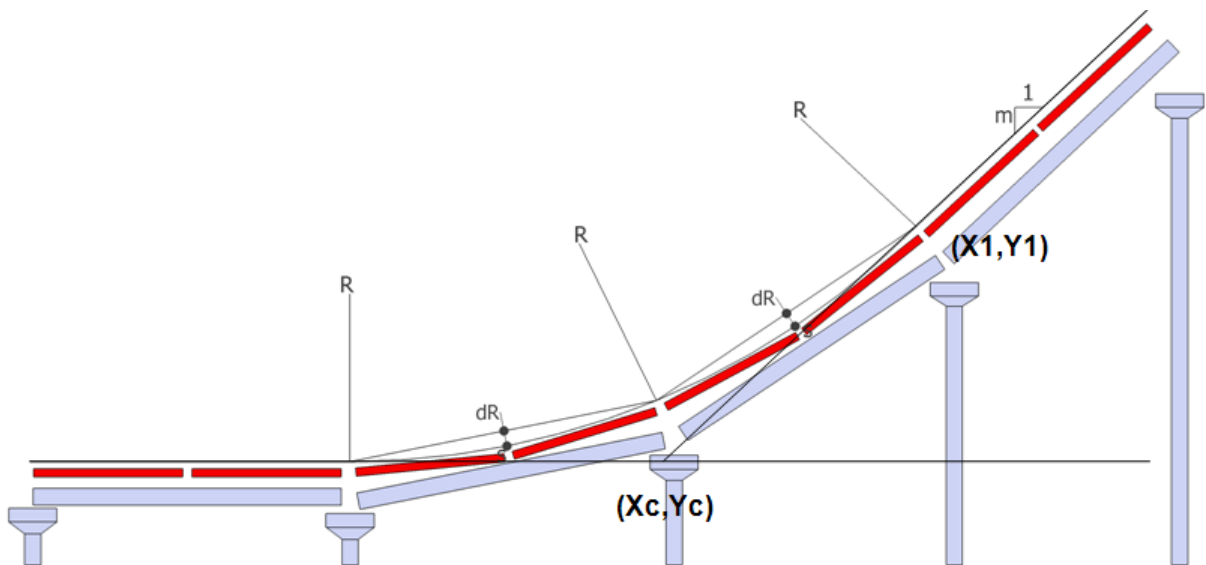


그림 7. 종곡선에서 일반단면 프리캐스트 바닥판 적용

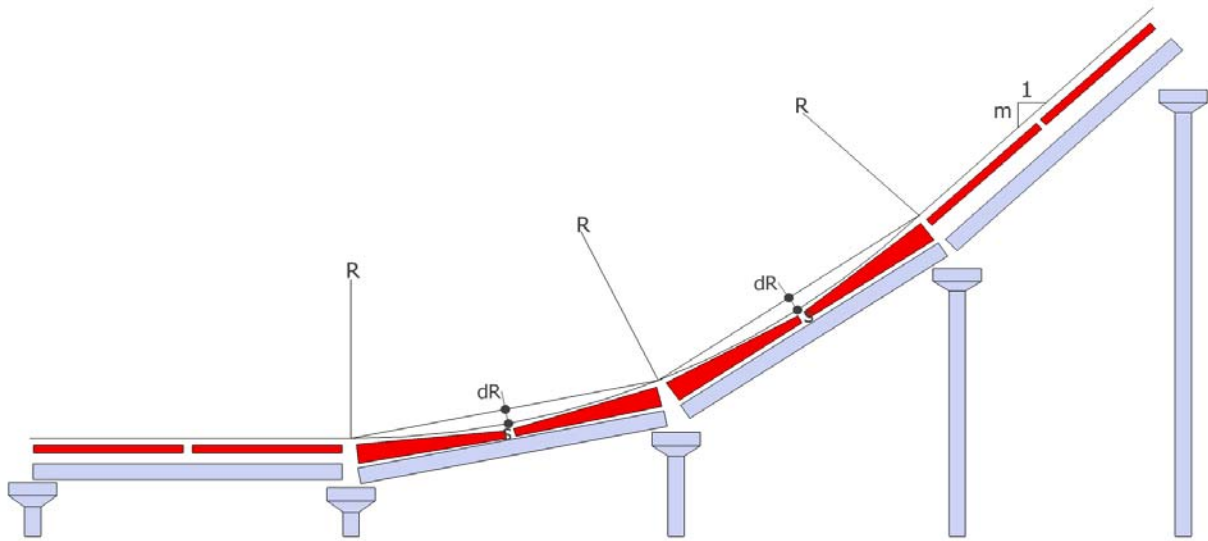


그림 8. 종곡선에서 변단면 프리캐스트 바닥판 적용

표 2와 그림 7의 경우, PSC 거더의 처짐과 솟음이 서로 상반되는 이상적인 경우에 대하여 프리캐스트 바닥판의 적용성을 검토한 것이다. 표 2의 프리캐스트 바닥판의 적용성이 곤란한 경우에도 그림 8과 같이 거더 양단에서의 프리캐스트 바닥판의 두께가 거더 중앙에서의 프리캐스트 바닥판의 두께보다 두껍게 제작(종곡선 반경 1,500m, 6% 종구배, 거더 길이 29.96m의 경우 75mm 두껍게 제작)하는 변단면 프리캐스트 바닥판을 제안한다.

5. 결론 및 맺음말

종곡선 구간에 프리캐스트 바닥판의 적용성을 검토한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 종곡선 반경 3,000m, 거더 길이 30m, 프리캐스트 바닥판 길이 15m에 대해 40mm 정도의 베딩층 높이 조정이 필요하며, 이 경우 프리캐스트 바닥판의 적용이 가능하다.
- (2) 수평에서 상향구배 또는 하향구배에서 수평 구간의 경우, PSC 거더 긴장에 따른 솟음량의 정확한 예측이 필요하며, 긴장에 따라 베딩층 조정능력(40mm) 이상의 솟음이 발생할 수도 있다.
- (3) 상향구배에서 수평 또는 수평에서 하향구배 구간의 경우, PSC 거더의 솟음이 종곡선 구배에 유리하며, 프리캐스트 바닥판으로 선형 조정이 용이하다고 할 수 있다.
- (4) 따라서 수평에서 상향구배 또는 하향구배에서 수평 구간의 경우, 30m 거더를 적용하는 경우 프리캐스트 바닥판을 종방향으로 변단면으로 제작하거나 또는 거더의 경간을 25m 이하로 할 것을 제안한다.
- (5) 종곡선 반경이 1,500m 인 경우, 반드시 변단면 프리캐스트 바닥판 사용할 것을 제안한다.

도심형 자기부상열차 실용화 연구단 3-1세부(선로구축물 성능개선)과제는 자기부상열차 가이드웨이 시공에서 현장작업의 시간과 노력을 최소화 하는 급속시공이 가능하며 또한 정밀시공이 가능할 것으로 기대되는 프리캐스트 바닥판과 PSC-U형 거더를 적용한 가이드웨이 형식을 제안하였다. 연구진은 제안된 가이드웨이 형식의 중요 인자인 프리캐스트 바닥판에 대하여 PSC 거더로 이루어진 종곡선 구간에서의 적용성을 검토하였고, 그 결과 자기부상열차 선로구축물의 종곡선에서 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 도심형 자기부상열차 실용화 사업단의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 도시형 자기부상열차 실용화 사업단, <http://www.maglev.re.kr>
2. 진병무, 김인규, 김영진(2007), "PSC-형식 자기부상열차교량 상부구조의 단면 제안", 2007년 대한토목학회 학술발표회.
3. Jin, B.M., Kim, I.G., Kim Y.J., Yeo I.H., Chung, W.S., Moon, J.S. (2007), "Proposal of Maglev Guideway Girder by Structural Optimization: Civil Works of Center for Urban Maglev Program in Korea," International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2007, Seoull, Korea, 2007.
4. 진병무, 김인규, 김영진, 오현철, 마향욱, 이윤석(2008), "프리캐스트 바닥판의 자기부상열차 가이드웨이 시스템 적용성 평가 : 모의 시공 실험", 2008년 한국콘크리트학회 춘계학술발표회.
5. 진병무, 김인규, 김영진, 이윤석, 마향욱, 오현철(2008), "프리캐스트 바닥판의 자기부상열차 가이드웨이 시스템 적용성 평가 : 정적 성능 실험", 2008년 한국콘크리트학회 춘계학술발표회.