

경량전철 고무차륜 AGT 하중의 동적특성을 고려한 강박스거더의 단면 최적설계

Optimum Design of Steel Box Girder Considering Dynamic Characteristics of LRT with Rubber Wheel

이희업* 이준석** 방춘석* 최일윤*
Lee, Hee-Up Lee, Jun S. Bang, Choon-seok Choi, Il-Yoon

ABSTRACT

The metropolitan cities and operation companies of urban transit railway are driving to construct the LRT(light rail transit) system because of the advantage of construction cost and environmental serviceability. This study suggests the optimal design method of steel box girder considering dynamic characteristics of LRT with rubber wheel. The behavior and design constraints are formulated based on the structural design criteria for LRT. Genetic algorithm is applied to the minimum weight design of structural system. A typical example is solved to illustrate the applicability of the proposed minimization algorithm. From the results of application example, the optimum design of steel box girder is successfully accomplished. Therefore, this system can act as a consultant to assist novice designers in the design of steel box girder for LRT with rubber wheel.

1. 서 론

최근 국내에서도 새로운 대중교통수단으로 환경 친화적인 경량전철(LRT, Light Rail Transit)에 관심을 갖게 되었으며, 정부는 이를 촉진하기 위하여 민간투자가 가능하도록 관련법을 제정하여 시행하고 있다. 이러한 배경을 토대로 한국철도기술연구원이 지난 5년 전부터 경량전철시스템 기술개발사업을 총괄하여 연구를 수행하고 있으며, 차량, 전력, 신호 그리고 선로구축물 등 분야별로 여러 기관 및 업체가 이 사업에 참여하고 있다. 선로구축물 분야에서는 토목설계기준, 상부 및 하부구조 설계기술, 시공 및 유지관리 기술 등 세부과제들의 연구가 수행되었고, 일부는 지금도 진행중에 있다. 이 과업에서 수립된 토목설계기준(안)의 일부 항목들은 실제 국내에서 경량전철의 운용사례가 없기 때문에 현재 구축중인 시험선로에서의 각종 실험결과에 근거하여 개정 및 보완할 계획이다. 철도교량의 경우 설계시 경량전철 차량 및 교량의 동적특성과 승객의 승차감을

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

고려하는 것이 중요한데, 수립된 설계기준(안)에서는 활하중에 충격계수를 고려하여 동적특성을 반영하도록 하고 있다. 설계시 설계자의 경험에 의존하여 가정된 몇 가지 단면 중 설계조건과 시방서의 제약조건을 만족하는 단면을 선택하는 기존의 방법은 여러 가지 불합리성을 내포하고 있다. 특히 동적특성이 설계조건에 포함되면 더욱 그러한데, 이러한 번거로운 문제점을 일괄처리 하기 위해서는 세부설계과정에 최적설계 기법을 도입하면 효율적이다.

본 연구에서는 경량전철 고무차륜 AGT(Automated Guideway Transit) 하중의 동적특성을 고찰하고, 확률론적 최적설계 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms, GAs)을 이용하여 강박스 거더의 단면 최적화를 수행하였다. 즉 강박스거더의 설계변수 초기집단이 확률론적 과정에 의해 무작위로 생성되고, 설계점들의 개선을 위해 자연선택과 적자생존의 원리가 적용되었다. 최적화의 목적함수로는 구조물의 중량을 사용하였고, 거동 및 설계 제약조건식은 경량전철 토목설계기준(2002)에 맞추어 정식화하였다. 이동하중에 의한 동적응답을 고려하기 위해 철도 선진국에서 권고하고 있는 승차감 기준, 고유진동수 제한범위 등을 참고하여 설계 제약조건을 구성하고 최적화를 수행하였다. 몇 가지 최적설계 예제를 통하여 본 연구에서 제시된 최적화 알고리즘의 수렴성을 검토하고 신뢰도를 확보하였다.

2. 한국형 고무차륜 AGT 시스템

2.1 시스템의 개발사양

한국형 고무차륜 AGT 시스템의 개발사양(건설교통부 고시 제 1998-53호)은 표 1과 같으며, 표 2는 개발사양 차량의 고유진동수와 무게중심을 나타낸 것인데, 차량 인터페이스 관련 하중 및 선로선형 설계기준 정립에 이용된다.

표 1. 한국형 고무차륜 AGT 시스템의 개발사양

구분	개발사양	구분	개발사양
차량편성	2, 4, 6량 1편성	가속도	3.5 km/h/s
최급구배	본선 : 58 % 측선 : 70 %	감속도	상사: 3.5 km/h/s 비상사: 4.5 km/h/s
최소곡선반경	본선 40m, 측선 30m	승강장연단높이	1,080 mm (주행면기준)
궤간	1,700 mm	연결면간거리	9,640 mm (1량기준)
최대승객하중	6 tonf/량	차체길이	9,140 mm (1량기준)
만차중량	18 tonf	대차중심간거리	5,300 mm
공차중량	12 tonf	최대차체폭	2,400 mm
성능최고속도	70 km/h 이상	지붕높이	3,500 mm (주행면기준)
최고운행속도	60 km/h	객실상면높이	1,110 mm (주행면기준)

표 2. 차체 고유진동수 및 차량 무게중심

고유진동수	공차조건	만차조건	무게중심	Mc1	Mc2
Pitching	1.80 Hz	1.52 Hz	길이방향(X, 전두부+)	-17.3 mm	43.7 mm
Yawing	1.40 Hz	1.10 Hz	좌우방향(Y, 좌측+)	-19.2mm	23.4 mm
Rolling	0.73 Hz	0.46 Hz	상하방향(Z)	공차 : 1,476 mm 만차 : 1,661 mm	

2.2 개발차량에 연계된 설계하중

고정하중은 구조물의 자중 외에 안내레일, 주행로, 점검용 통로, 케이블, 전차선, 기기실 및 가건물, 대피소 등의 부대시설물의 중량을 고려하는 것으로 한다. 또한 장래 중량의 변화가 예상되는 경우에는 그 변화를 고려해서 정하는 것으로 한다. 그림 1은 단선인 경우의 단면도 예를 나타낸 것이다.

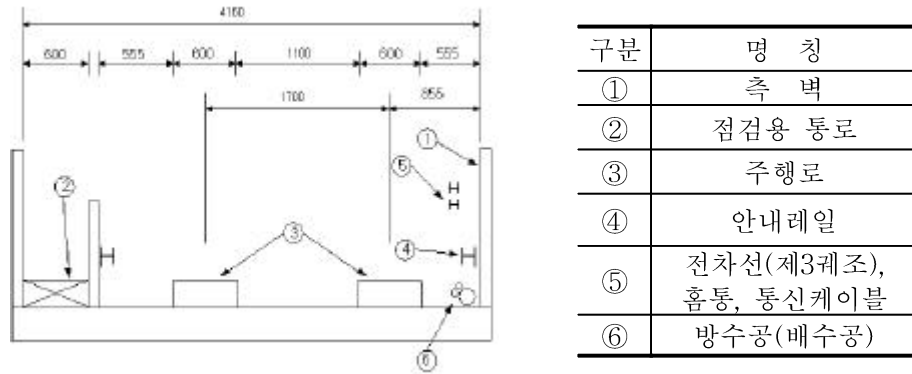


그림 1. 단선의 경우 단면도(예)

활하중, 즉 열차하중은 1편성으로 되는 연행하중으로서 이것을 분단시키지 않고 부재에 가장 불리한 응력이 되도록 재하하는 것으로 한다. 고무차륜 AGT 시스템의 열차하중 1편성은 2, 4, 6량이 기본 편성이며, 표 3은 1량기준의 차량하중(W)과 축중(P)을, 그림 2는 열차축중의 배치도를 나타낸 것이다. 열차하중은 만차하중(L1)과 공차하중(L2) 및 정원하중(L3)으로서 통상 활하중은 만차하중(L1)을 기준으로 한다.

표 3. 고무차륜 AGT의 차량하중(W)과 축중(P)

구분	차량하중(W)	축중(P)
만차하중(L1)	18톤	9.0톤
공차하중(L2)	12톤	6.0톤
정원하중(L3)	15.5톤	7.75톤
승객정원 입석3명/m ³ (1인 60kgf)	57명	

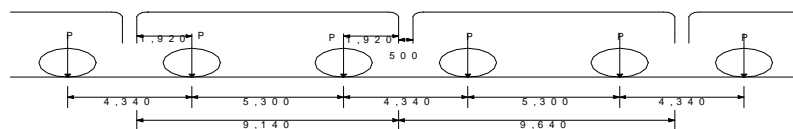


그림 2. 고무차륜 AGT 축하중 모형

2.3 고무차륜 AGT시스템의 동적특성

일반적으로 교량의 고유진동수와 차량의 가진동수가 일치할 경우 공진(resonance)이 발생하며, 이러한 현상은 교량의 고유진동수, 차량의 유효 타격간격(effective beating interval)을 이용하여 검토할 수 있다. 즉 식 (1)과 같이 구조물의 고유진동수와 차량의 유효 타격간격으로 차량의 임계속도를 계산할 수 있으며, 또한 차량의 유효 타격간격으로 주행속도에 따른 가진동수를 구할 수가 있다. 그림 3은 일반적인 철도교에서 하중이 재하되지 않은 상태에서의 고유진동수에 대한 상·하한 값을 지간길이별로 나타내었고, 경량전철 차량의 축간거리 및 대차간 중심거리와 주행속도를 고려하여 가진동수를 구하여 나타낸 것이다.

$$V_{cr} = L_{eff} \cdot f_{str} \quad (1)$$

여기서, $V_{cr}(km/h)$ 는 경량전철 차량의 임계속도, $L_{eff}(m)$ 는 유효 타격간격 그리고 $f_{str}(Hz)$ 는 교량의 고유진동수이다.

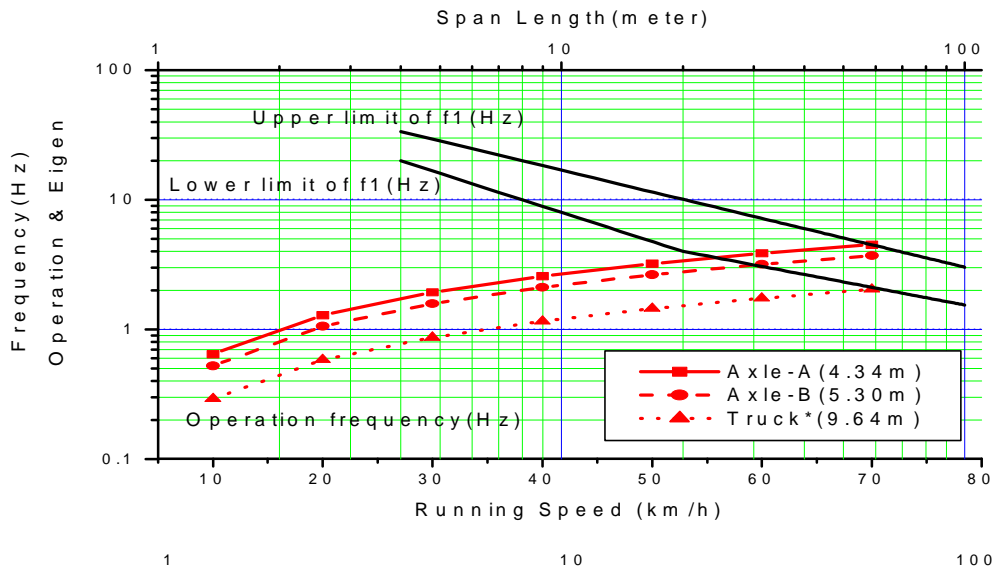


그림 3. 차량의 주행속도에 따른 가진동수 및 고유진동수 범위

3. 최적설계 정식화 및 예제

3.1 목적함수와 제약조건

최적설계에서 주요한 문제는 단위비용과 설계변수로 유도한 목적함수의 정식화와 설계변수를 실제 제작 가능한 이산형으로 취급하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 동적응답의 제약조건을 만족하는 강박스거더의 단면 최적화 알고리즘 수립에 주안점을 두고 설계변수는 연속형으로 하였고, 부재의 중량을 목적함수로 구성하여 이를 최소화하는 것으로 하였다. 또한 강재의 경우 강종과 보강재의 유무에 따라 제약조건이 매우 복잡하여, 본 연구에서는 응력 및 처짐에 관한 제약조건, 고유진동수 및 승차감 등의 동적응답에 관한 제약조건 그리고 표 4와 같은 설계변수의 한계 제약조건만 적용하였다.

본 연구에서 설정한 설계변수는 그림 4와 같은 단면에서 플랜지 및 복부의 두께, 보강재(rib)의 폭과 두께, 하부플랜지의 폭이며, 목적함수 $F(X)$ 는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F(X) = \gamma_s AL \quad (2)$$

여기서, γ_s 는 강재의 단위 중량이고, A 는 단면적 그리고 L 은 부재의 길이 이다.

구조거동에 관한 제약조건식은 경량전철 토목설계기준(2002)과 동적응답 기준을 적용하여 정식화하였으며, 정규화된 제약함수를 나타내면 다음과 같다.

$$(3) \quad \text{휨} \quad \text{응력}; \quad 1.0 - f / f_a \geq 0.0$$

$$(4) \quad \text{전단} \quad \text{응력}; \quad 1.0 - v / v_a \geq 0.0$$

$$(5) \quad \text{합성} \quad \text{응력}; \quad 1.21 - (f / f_a)^2 - (v / v_a)^2 \geq 0.0$$

$$\text{처짐}; \quad 1.0 - \Delta_{\max} / \Delta_a \geq 0.0 \quad (6)$$

$$(7) \quad \text{LRT의} \quad \text{최대} \quad \text{수직가속도}; \quad 1.0 - a_{\max} / a_a \geq 0.0$$

여기서, f 는 수직 응력, f_a 는 허용응력, v 는 전단응력, v_a 는 강재의 허용 전단응력, Δ_{\max} 는 활하중에 의한 최대처짐 그리고 Δ_a 는 허용처짐이다. 또한 a_{\max} 는 차량의 최대 수직가속도 이며 a_a 는 허용 최대 수직가속도이다. 교량의 지간길이 L 에 따른 고유진동수의 상한 기준은 $4\text{m} \leq L \leq 25\text{m}$ 인 경우 $n_o = 94.756 / L^{0.74807}$ 이며, $L > 25\text{m}$ 인 경우는 한계기준이 없다. 또한 하한 기준은 $4\text{m} \leq L \leq 20\text{m}$ 인 경우 $n_o = 80 / L$ 이며, $20\text{m} \leq L \leq 100\text{m}$ 인 경우는 $n_o = 74.567 / L^{0.92215}$ 이다.

표 4. 설계변수에 대한 제약조건

부재명	설계변수	제약조건(mm)
상부플랜지 두께 t_u	X(1)	$13.0 \leq X(1) \leq 25.0$
복부 두께 t_w	X(2)	$8.0 \leq X(2) \leq 25.0$
하부플랜지 두께 t_l	X(3)	$13.0 \leq X(3) \leq 25.0$
보강재 두께 t_r	X(4)	$8.0 \leq X(4) \leq 25.0$
보강재 폭 b_r	X(5)	$80.0 \leq X(5) \leq 120.0$
플랜지 폭 b	X(6)	$1400.0 \leq X(6) \leq 1800.0$

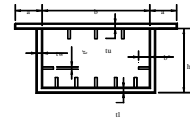


그림 4. 강박스거더 단면

3.2 최적화 흐름도

본 연구에서 적용된 최적화 기법은 GAs이며, 이를 이용한 판형교 주형의 최적화 흐름도는 다음 그림 5와 같다.

3.3 설계 예제

최적설계 모델은 지간길이 30.0m인 강박스거더이며, 탄성계수 E 는 $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$, 포아송의 비 ν 는 0.3 그리고 강종은 SWS490A를 사용한다. 하중은 경량전철 고무차륜 AGT를 2량 1편성으로 20~80km/h 까지 20km/h 씩 증가시키면서 작용하고, 그림 1과 같은 주행면 시스템은 고정하중으로만 작용한다. GAs를 적용하여 개체집단의 크기와 유전연산자의 확률값 등의 GAs 변수(parameters)를 변화시키면서 연속형 최적설계를 수행하여 그 결과를 검토하면 다음과 같다. 그림 6과 표 5는 각각 경우별 세대수(generation number)에 대한 목적함수의 수렴성, GAs 변수에 따른 최적설계의 결과를 나타내고 있다. 그림과 표를 살펴보면, 3가지 경우 모두 중량의 변화가 없는 거의 동일한 근접 최적해를 얻을 수가 있음을 알 수 있다. 또한 경우 2에서 가장 좋은 최적 결과를 얻을 수 있었고, 91번째 세대에서 목적함수의 값이 전역 최소점 영역부근에 도달하는 것을 알 수가 있다.

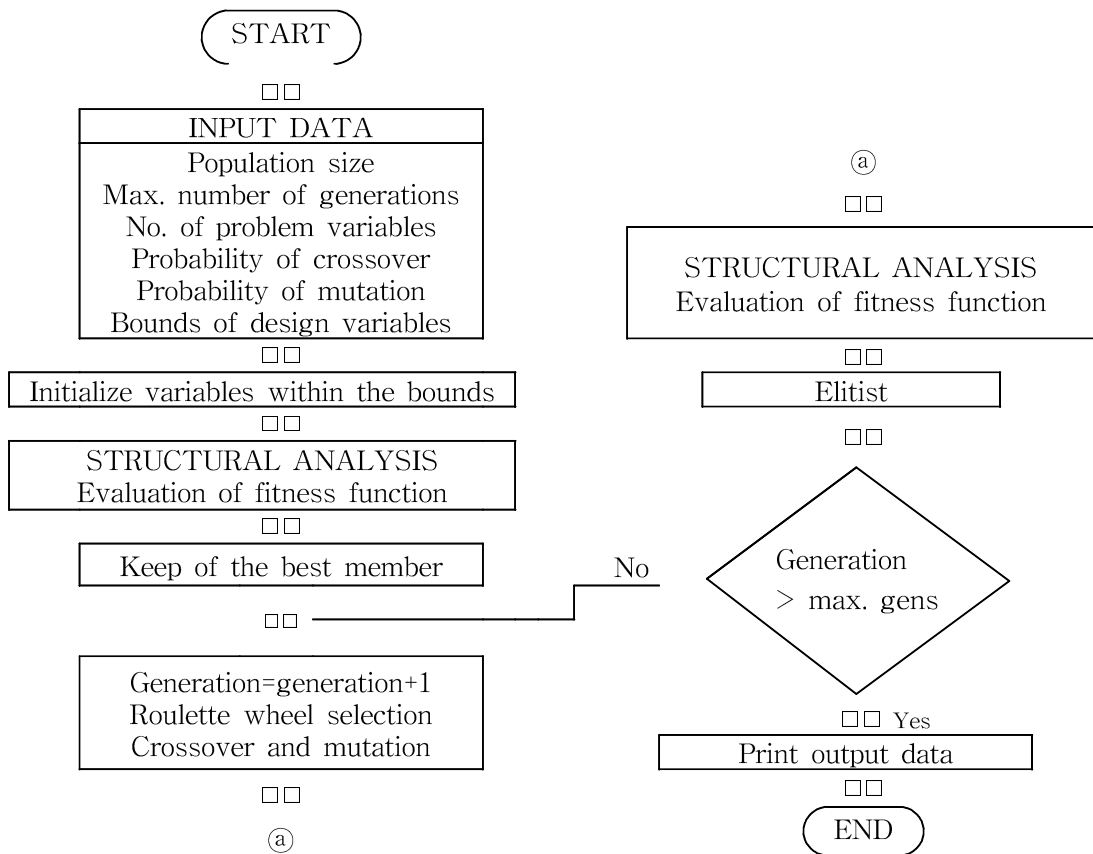


그림 5. 최적화 흐름도

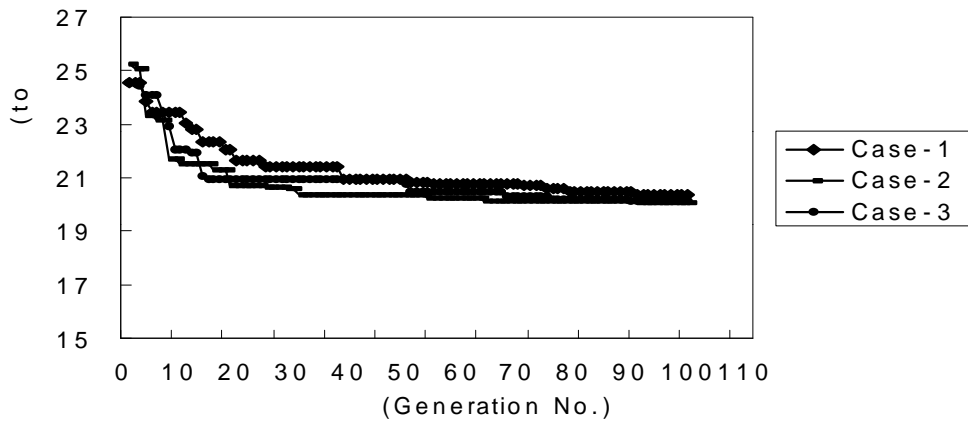


그림 6. 세대수에 대한 목적함수의 수렴성

표 5. 설계조건에 대한 최적화 결과

Case	GAs 변수 (parameters)		설계변수	최적 결과 (mm)	강제 중량 (tonf)
1	개체집단 크기	200	X(1)	13.17	20.36
			X(2)	8.05	
	교배 확률	0.8	X(3)	13.60	
			X(4)	8.10	
	돌연변이 확률	0.1	X(5)	94.79	
			X(6)	1,405.05	
세대수	100				
2	개체집단 크기	100	X(1)	13.22	20.09
			X(2)	8.06	
	교배 확률	0.85	X(3)	13.20	
			X(4)	8.53	
	돌연변이 확률	0.1	X(5)	81.48	
			X(6)	1,420.06	
세대수	100				
3	개체집단 크기	200	X(1)	13.22	20.13
			X(2)	8.01	
	교배 확률	0.85	X(3)	13.60	
			X(4)	8.06	
	돌연변이 확률	0.1	X(5)	83.29	
			X(6)	1403.28	
세대수	100				

4. 결 론

본 연구에서는 경량전철 고무차륜 AGT(Automated Guideway Transit) 하중의 동적특성을 고찰하고, 확률론적 최적설계 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms, GAs)을 이용하여 강박스 거더의 단면 최적화를 수행하였다. 최적화의 목적함수로는 구조물의 중량을 사용하였고, 거동 및 설계 제약조건식은 경량전철 토목설계기준(2002)에 맞추어 정식화하였다. 이동하중에 의한 동적응답을 고려하기 위해 철도 선진국에서 권고하고 있는 승차감 기준, 고유진동수 제한범위 등을 참고하여 설계 제약조건을 구성하고 최적화를 수행하였다. 몇 가지 최적설계 예제를 통하여 본 연구에서 제시된 최적화 알고리즘의 수렴성을 검토하고 신뢰도를 확보하였다. GAs는 동적응답의 설계 제약조건이 있는 최적화 문제에 매우 잘 적용되었고, 탐색과정이 확률론적 방식으로 접근하므로

비록 전역최적점에 대한 완벽한 보장은 없으나 이를 찾는 방법으로 적용성이 충분히 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. UIC 776-1 R, Loads to be considered in railway bridge design
2. Eurocode 1, Basis of design and actions on structures
3. 양영순 외(1995), “실수형 Genetic Algorithm에 의한 최적 설계”, 한국전산구조공학회 논문집, 제8권 제2호
4. 이희엽 외(2002), “KNR 용접형 관형교의 동적거동에 관한 해석적 고찰”, 한국철도학회 추계학술회
5. 이희엽 외(2002), “경량전철 토목구조물 설계기준에 관한 연구”, 한국철도기술연구원