

빔 모델을 이용한 전차선 불균일율에 관한 연구

A Study on the Elasticity Disuniformity for Catenary using by Beam Model

권삼영*
Kwon, Sam-Young

이기원**
Lee, Kiwon

조용현*
Cho, Yong Hyeon

정홍채***
Chung, Heungchai

Abstract

A catenary system should be designed to be an uniform elasticity over a span in order to maintain the lowest possible loss of contact between a pantograph and a contact wire. A elasticity disuniformity of a catenary can be regarded as a important design factor used for predicting the current collection performance for a catenary.

There are a couple of formulas to calculate elasticity disuniformity of a catenary according to the literature survey. The effectiveness of these formulas is reviewed by performing catenary elasticity and loss of contact analysis for 5 different configurations of catenary systems using a beam element based FEM program, KRRI developed program, and the loss of contact by GASENDO, RTRI developed program, respectively. The results reveals that these formulas are not suitable to predict the current collection performance for a catenary.

Therefore, a new formula based on the standard deviation of the elasticity over a span is proposed in this study. The analysis results show that the new formula for an elasticity disuniformity of a catenary is very effective in predicting the current collection performance for a catenary.

1. 서론

전차선로(Catenary)는 주행하는 열차에 전력을 공급하기 위한 시스템으로서 레일을 따라 도체인 전선을 양쪽에서 잡아당기고 있는 구조로 전차선(Contact wire)과 조가선(Messenger wire)이 상하로 배치되어 일괄 또는 별개의 장력 조정 장치에 의해 일정 장력이 유지된다. 전차선과 조가선 사이를 드로퍼(Dropper)라고 불리우는 연결체를 일정 간격마다 배치하고 있다. 드로퍼는 하부에 위치한 전차선의 자중을 조가선에 전달하는 역할을 하며, 드로퍼의 길이를 조정하여 전차선이 공중에서 설계자가 원하는 위치에 있도록 한다. 전차선로는 구조에 따라 크게 단순형 가선(Simple Catenary, 그림 1 참조), 변Y형 가선(Y-Stitched Catenary), 복합 가선(Heavy Compound Catenary) 등으로 분류된다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 연구원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원

전차선로는 열차에 장착되어 있는 팬터그래프(Pantograph)와 지속적인 접촉을 유지하는 것이 핵심 관건이다. 그러나 팬터그래프는 전차선로와의 전기적 접촉에 필요한 힘을 확보하기 위하여 전차선을 밀어 올리면서 동시에 앞으로 주행하여야 하므로 전차선과 팬터그래프 사이에는 동력학적 상호 작용이 생기게 된다. 이러한 동력학적 상호 작용 중에 전차선과 팬터그래프가 일시적으로 떨어지는 이선(離線, Loss of contact)이 생기게 되며, 이선의 발생량은 전차선로와 팬터그래프 시스템의 성능을 나타내는 대표적인 항목으로 여겨지고 있다.

이선이 발생하는 원인으로는 전차선로의 탄성 특성 즉 탄성(Elasticity)이 균일하지 않은 것이 주요한 원인으로 알려져 있다¹⁾²⁾. 따라서 전차선로의 탄성 특성을 평가하는 것은 전차선로와 팬터그래프 사이의 동력학적 특성을 예측해 볼 수 있는 중요한 요소가 되기 때문에 전차선로의 정적(Static) 특성 중에서 중요한 설계 검토 항목으로 간주되고 있다.

본 논문에서는 문헌 조사를 통하여 전차선로의 탄성 불균일성을 평가하는 데에 사용되어 온 공식들을 조사해 보았다. 이들 공식들이 전차선로의 집전 성능을 예측하는 데에 있어서 실효성이 있는지를 검토해 보기 위하여 전차선로의 탄성 해석과 이선을 해석을 수행하였다. 전차선로 탄성 해석을 위하여 전차선과 조가선을 비롯한 전선을 빔(Beam) 요소로 모델링하여 계산하는 탄성 계산용 유한요소 프로그램을 개발하였으며, 이선을 해석을 위하여 일본 철도종합기술연구소(RTRI)에서 개발한 가선도 프로그램을 사용하였다. 이선을 해석 결과와 기존 공식을 이용한 탄성 불균일율과의 관계를 검토하여 이들 공식의 적용상 문제점을 파악해 보고 이를 보완할 수 있는 새로운 탄성 불균일 평가 공식을 제안해 보았다.

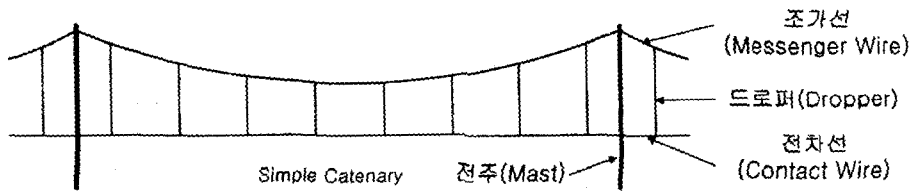


그림 1. 단순형 전차선로(Simple Catenary)

2. 유한 요소 프로그램 개발

2.1 개발 필요성

앞에서 서술한 바와 같이 전차선로는 전차선과 조가선 등 전선을 주 부재(Member)로 하는 구조이다. 그러나 이러한 전선은 시스템마다 다르지만 일반적으로 전차선의 단면적이 약 100mm에서 200mm사이, 조가선의 단면적은 약 60mm에서 150mm사이 정도의 것을 사용하고 있으며, 전기적 목적과 기계적 강도를 확보하기 위하여 동이나 주석 등의 강 재질을 사용한다. 유한요소법 해석시 계산량을 줄이기 위하여 전차선로를 구성하는 전차선과 조가선을 현 요소(String Element)로 모델링하여 왔지만, 전차선과 조가선이 굽힘 강성을 갖는 등 빔의 특성을 갖고 있어 보다 정확한 전차선로의 탄성 해석을 위해서는 빔 요소(Beam Element)를 기초로 한 유한요소법을 개발할 필요가 있다.

2.2 전차선로 강성 행렬

전차선로가 빔으로 거동한다고 가정할 때 빔 요소의 양단을 I와 j라고 하면 전차선로에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\{F\} = [K] \times \{u\} \quad (1)$$

여기서, $u = \{x_i \ y_i \ \phi_i \ x_j \ y_j \ \phi_j\}$

$$\{F\} = \{X_i \ Y_i \ M_i \ X_j \ Y_j \ M_j\}$$

이 빔 요소의 강성 행렬은 다음과 같이 표현된다³⁾.

$$[K] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} \frac{AL^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6L & 0 & -12 & 6L \\ 0 & 6L & 4L^2 & 0 & -6L & 2L^2 \\ -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 & \frac{AL^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6L & 0 & 12 & -6L \\ 0 & 6L & 2L^2 & 0 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, E : Young's modulus, I : 2차 단면 모멘트
L : 길이, A : 단면적

한편, 전차선과 조가선에는 장력이 걸려 있으므로 기하학적 강성이 생기므로 이를 반드시 고려해야 한다. 장력에 의한 기하학적 강성을 포함한 전차선로의 굽힘 강성을 나타내는 행렬은 다음과 같이 쓸 수 있다.⁶⁾

$$[K_C] = [K] - [K_C] \quad (3)$$

여기서, $[K_C]$: 결합된 강성

$$[K_C] = \frac{N}{30L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 36 & 3L & 0 & -36 & 3L \\ 0 & 3L & 4L^2 & 0 & -3L & -L^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -36 & -3L & 0 & 36 & -3L \\ 0 & 3L & -3L & 0 & -3L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, N : 장력

한편 드로퍼는 가요성(Flexibility) 있는 케이블로 제작되기 때문에 드로퍼는 인장(Tensile) 시에는 축력을 받는 강체(Rigid Body)와 같은 거동을 하지만 압축(Compression)이 작용하면 느슨하게 되어 강성이 없는 부재로 변하게 된다. 이러한 특성을 반영할 수 있도록 인장 시에는 강성을 갖고, 압축 시에는 강성이 없도록 드로퍼의 강성을 비선형적으로 표현하였다.

팬더그래프 집전판의 마모를 줄이기 위하여 전차선에 스테거링(Staggering)이 되어 있다. 장력 및 스테거링으로 인하여 전차선에 추가로 수직 방향 강성(Stiffness)이 생기게 되므로 이를 계산하여 곡선당 김금구가 설치되어 있는 절점에 부여하였다.

2.3 개발 프로그램 검증

검증 예제로서 그림 3에 나와 있는 TGV 북부선(표준 경간 길이 54m)의 전차선로를 선정하였다. TGV 북부선의 전차선로의 주요 데이터는 표 2에 나와 있다.

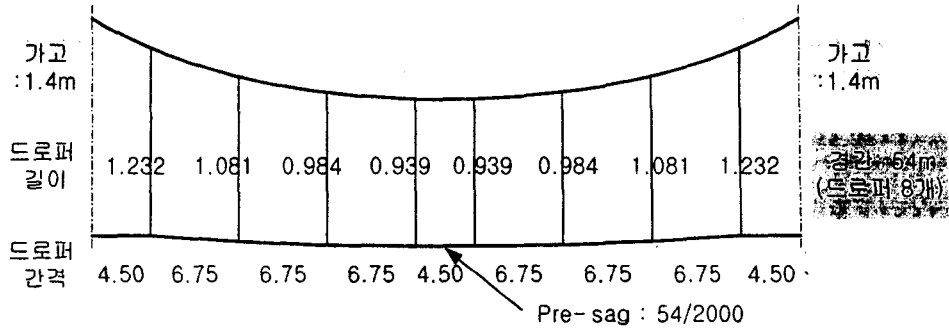


그림 3. 비교 검증용 전차선로 형상(TGV 북부선)

표 2. TGV-북부선 전차선로 데이터

항목	데이터
전차선 장력	20,000 (N)
전차선 선종 및 단위질량	HdCu 150mm ² , 1.334 (kg/m)
조가선 장력	14,000 (N)
조가선 선종 및 단위질량	Bz 65mm ² , 0.605 (kg/m)
드롭퍼 단위질량	0.36 (kg/개)
편위	±0.2 (m)
가고	1.40 (m)
사전 이도(Pre-sag)	span 길이의 1/2000

유한요소법 프로그램을 사용하여 TGV-북부선에 대하여 구한 탄성(Elasticity)이 그림 5에 나와 있다. 유한요소법으로 구한 탄성과 경부고속철도 계약자인 Alstom사에서 제출한 탄성⁴⁾과 거의 정확히 일치함을 그림 5로부터 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 개발한 유한요소법 프로그램은 전차선로의 탄성을 정확히 구할 수 있음을 확인할 수 있다.

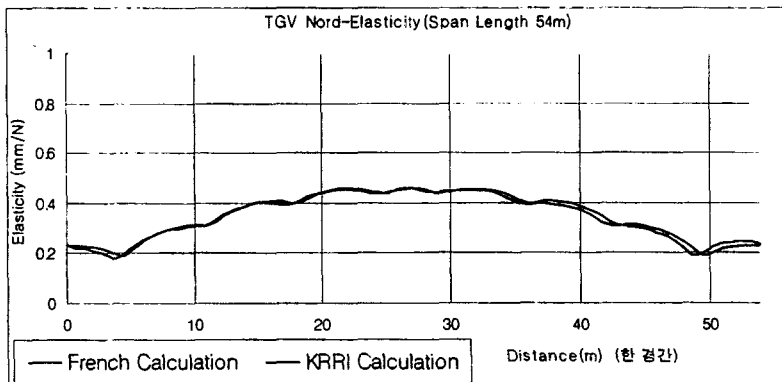


그림 5. 자체개발 프로그램으로 계산한 결과와 TGV 자료와의 비교

3. 전차선로 탄성 해석

3.1 전차선로 형상

본 연구는 드로퍼 간격에 따라서 전차선로 탄성의 불균일 특성이 변하게 되므로 검토 대상 전차선로 형상으로서 다음과 같이 드로퍼 간격이 다른 4가지로 선정하였다. 경간의 길이로는 기존 전철에서 일반적으로 사용하고 50m로 선정하였다. 한편, 드로퍼의 개수로는 기존선에서 10개를 사용하고 있으나 각 형상별로 드로퍼 개수를 변경하여 탄성의 변화 특성을 살펴 보고자 하였다.

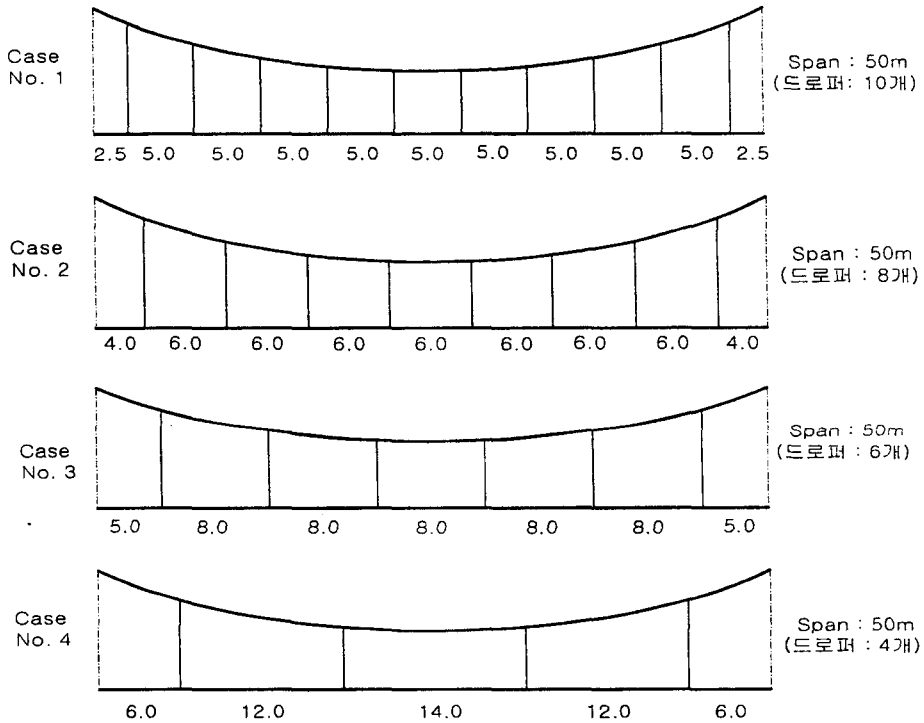


그림 2. 검토 대상 형상(Configuration) 4가지 (케이스 1 ~ 케이스 4)

표 1. 케이스 1에서 케이스 4의 전차선로 데이터

항목	데이터
전차선 장력	10,000 (N)
전차선 선종 및 단위질량	Cu 110mm ² , 0.9877 (kg/m)
조가선 장력	10,000 (N)
조가선 선종 및 단위질량	CdCu 65mm ² , 0.5974 (kg/m)
드로퍼 단위질량	0.30 (kg/개)
편위	±0.2 (m)
가고	0.96 (m)
곡선당김금구 길이	0.9 (m)
곡선당김금구 각도	11 (deg)
사전 이도(Pre-sag)	없음

3.2 전차선로의 유한요소 모델링

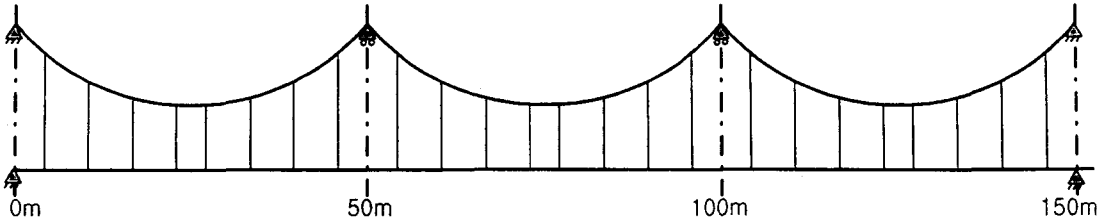


그림 4. 해석 모델

- 1) 고정단의 영향을 배제시키기 위하여 동일한 3경간을 모델링하고, 해석 데이터는 가운데 경간의 데이터만을 취하여 해석
- 2) 구속 조건은 위 그림에서와 같이 병진(Translation) 자유도에 대하여 전차선과 조가선의 양쪽 끝단은 완전 고정, 중간 조가선 현수점은 롤러(Roller) 고정으로 놓았음
- 3) 각 케이스에서 드로퍼 길이는 드로퍼 길이 계산공식에 따라 계산된 드로퍼 길이를 별도로 계산하여 적용하였음.

3.3 탄성 해석 결과

검토 대상의 형상으로 앞서 제시하였던 케이스 1~ 케이스 4에 대하여 유한요소법 프로그램을 사용하여 구한 탄성(Elasticity)의 특성은 다음과 같다.

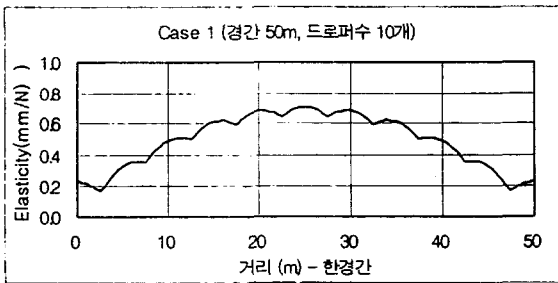


그림 6. 케이스 1의 탄성

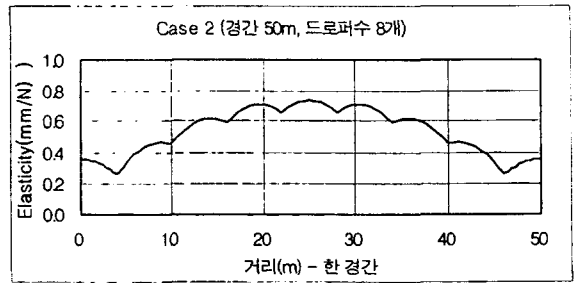


그림 7. 케이스 2의 탄성

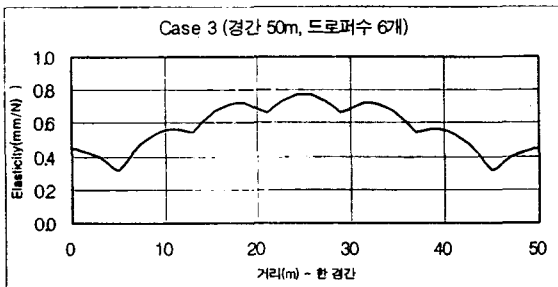


그림 8. 케이스 3의 탄성

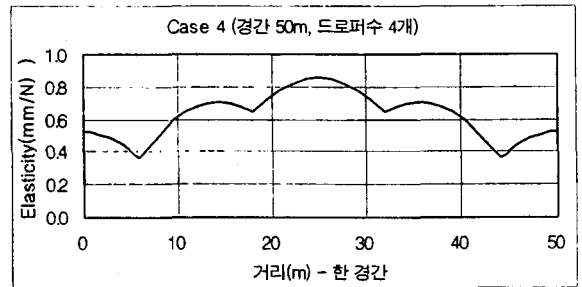


그림 9. 케이스 4의 탄성

4. 전차선-팬티그래프 동역학 시뮬레이션

한편 앞에서 선정된 전차선로 형상에 대하여 팬티그래프와의 동역학 시뮬레이션을 실시하여 보았다.

팬터그래프는 현재 철도청에서 시운전 중에 있는 신형 전기기관차(기관차 번호 : 8101 - 8102)를 모델로 하였다. 탑재된 팬터그래프는 싱글암(Single Arm) 타입으로 형식번호는 8WL0129-6YH40이며 Siemens AG Osterreich사에서 설계 제작하였다⁶⁾.

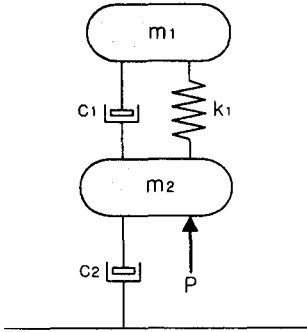


그림 10. 팬터그래프 모델

표 4. 팬터그래프 모델링 데이터

이름	기호	값	설명
집전판 질량	m1	8.0 (kg)	KTGV 팬터그래프 데이터 준용
스프링 하 질량	m2	11.0 (kg)	
고무 스프링 계수	k1	8800 (N/m)	
첫 Stage 댐핑 계수	c1	0	
시스템 댐퍼 댐핑 계수	c2	0	
압상력(정적+양력)	P	70 (N)	공기역학적 양력 고려 안함

본 시뮬레이션에서 120km/h를 열차속도로 설정하고, 전차선로는 동일한 경간이 8경간 연속되어 설치된 것으로 모델링 하였으며, 양 끝단 고정점의 영향을 배제하기 위해 4번째 경간부터 6번째 경간까지의 3경간 데이터만을 유효데이터로 보아 처리하였다. 일본의 철도종합기술연구소(RTRI)에서 개발한 “가선도” 프로그램으로 시뮬레이션을 실시하였다.

표 5. 동력학 시뮬레이션 결과 데이터

형상	평균 접촉력(N)	최대 접촉력(N)	접촉력 표준 편차(N)	표준편차/평균 접촉력
케이스 1	69.98	91	9.28	13.26 (%)
케이스 2	69.38	99	10.53	15.17 (%)
케이스 3	69.36	106	12.65	18.24 (%)
케이스 4	69.41	141	19.07	27.47 (%)

접촉력의 표준 편차가 클수록 이선이 발생하기 쉽다. 따라서 표 5로부터 집전 성능에 있어서 케이스 1보다 케이스 2, 케이스 2보다 케이스 3, 그리고 케이스 3보다 케이스 4가 나쁘다는 것을 알 수 있다.

5. 탄성 불균일을 평가

5.1 기존 공식 조사 및 검토

전차선로는 일반적으로 한 경간마다 지지해 주는 지지점을 갖게 되므로 위치에 따른 탄성이 균일할 수가 없으며, 일정간격 즉, 한 경간마다 주기적으로 탄성이 변하는 특성을 갖게 된다.

한 경간 내에서 위치에 따른 탄성(Elasticity)을 구하는 방법으로는 해석적으로 구하는 방법과 실험적으로 구하는 방법 등이 사용되어 왔다⁷⁾⁸⁾. 해석적 방법 중에서 유한요소법은 높은 정확도의 탄성 해석 결과를 제공하는 것으로 알려지면서 이 기법이 전차선로의 탄성을 구하는 데에도 적용되고 있다⁹⁾.

한 경간에 걸친 전차선로의 탄성 변화를 평가하는 방법으로 불균일 인자(Disuniformity Factor)를 사용하는 공식이 이제까지 널리 사용되어 왔다¹⁰⁾.

$$\text{불균일율}(U) = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max} + e_{\min}} \times 100 (\%) \quad (5)$$

여기서, e_{max} : 최대 탄성, 즉 경간 중앙에서의 탄성 [N/m]

e_{min} : 최소 탄성, 즉 지지점에서의 탄성 [N/m]

한편, 다음과 같은 단순한 수식으로 불균일을 계수(d)를 정의하여 사용하는 경우도 있다⁴⁾.

$$\text{불균일율}(d) = \frac{e_{max}}{e_{min}} \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 사용하여 전차선로의 균일한 정도를 나타내는 불균일율(Disuniformity)을 평가해 본 결과가 표 6에 나와 있다.

표 6. 여러 가지 정의를 적용한 불균일율(Disuniformity) 계산 결과

형상	불균일률(U) (식(1))	불균일률(d) (식(2))	*불균일률(U')	*불균일률(d')
케이스 1	61.8%	4.23	51.63 (%)	3.13
케이스 2	48.3%	2.39	34.65 (%)	2.06
케이스 3	42.4%	2.47	27.24 (%)	1.75
케이스 4	40.3%	2.35	24.13 (%)	1.64
TGV-Nord(54m)	43.30%	2.53	32.37 (%)	1.96

* E_{max} = 경간 중앙의 탄성(E_{mid}), E_{min} = 전주지점의 탄성(E_{mas})을 적용함

표 5에 따르면 집전 성능은 케이스 1, 케이스 2, 케이스 3, 케이스 4의 순으로 양호하다. 그러나 표 6에 나와 있는 탄성 불균일을 기준으로 집전 성능을 예측해보면 집전 성능해석을 통해 얻은 결과와 반대의 경향을 가지고 있다. 이는 기존 공식을 사용하여 탄성 불균일을 평가하는 것이 전차선로의 집전 성능을 예측하는 데에 실효성이 없다는 것을 의미한다. 따라서 탄성 불균일을 다르게 정의할 필요가 있다.

5.2 새로운 탄성 불균일율 공식 제안

탄성 불균일율을 적절히 평가하기 위하여는 탄성 변화를 단순히 최대 탄성과 최소 탄성의 차이만으로 표시하기 보다는 탄성 변화의 산포도를 나타낼 수 있는 표준 편차와 드로퍼의 수를 반영하는 것이 바람직할 것으로 사료되어 다음과 같은 형태의 탄성 불균일율을 제안한다.

$$\text{불균일율}(U_s) = \frac{\sigma_E \times 10 \text{ (드로퍼 수 10개를 기준으로 선택)}}{\text{드로퍼 수}} \times 100 \text{ (\%)} \quad (7)$$

여기서, σ_E : 탄성의 표준편차(Standard Deviation of elasticity)

식 (7)에 따라 산출한 불균일율(U_s)는 다음과 같다.

표 7. 제안한 수식 (7)에 따라 산출한 불균일율(Disuniformity)

형상	불균일율(U_s)	비고
케이스 1	18.3 (%)	전차선, 조가선 장력 : 10kN
케이스 2	19.3 (%)	"
케이스 3	23.6 (%)	"
케이스 4	34.9 (%)	"
TGV-Nord(54m)	11.5 (%)	전차선 장력 : 20kN, 조가선 장력 : 14kN

표 7의 결과는 표 5에 나와 있는 전차선로의 집전 성능의 케이스 별 순서와 잘 일치하며, 장력이 다른 경우에도 집전 성능을 예측할 수 있으므로 본 논문에서 제안한 탄성 불균일 공식은 향후 전차선로의

설계시 집전 성능을 예측하는 데에 있어서 적절히 사용될 수 있을 것으로 보인다.

6. 결론

빔 모델을 적용한 전차선로 탄성 해석 프로그램의 개발 내용과 본 프로그램을 적용하여 몇 가지 전차선로 형상에 대하여 탄성을 해석하여 비교·검토하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이 빔 모델에 근거한 개발 프로그램의 해석 결과가 비교 검증 대상과 잘 일치함을 확인하였으며, 아울러 이제까지 관례적으로 사용하여오던 탄성 불균일율의 산출 공식이 실제 전차선로의 성능과 상대비교 파라미터로서도 적절하지 않음을 보여주었다. 이에 따라 탄성의 표준편차와 드로퍼 수를 반영한 새로운 불균일율 산출 공식을 제안하였으며, 제안된 공식이 다양한 형태의 전차선로에 대하여 전차선로 집전 성능을 예측할 수 있는 좋은 지표가 됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 1) Peter R. Scott(1974), "Computer Evaluation of Overhead Equipment for Electric Traction", IEEE Trans. on Industry Applications,
- 2) 최연선, 정대현(1991), "고속전철의 최적 Pantograph 설계를 위한 동적 해석", 대우중공업(주) 위탁연구보고서,
- 3) Mario Paz, "Structural Dynamics Theory and Computation", Third Edition, VAN NOSTRAND REINHOLD, 1991
- 4) 한국고속철도건설공단(1996), 고속철도 전차선로 상세설계훈련 자료
- 5) 권삼영 외(1998) "전차선로 설계기술 및 인터페이스 연구(Ⅱ) 연차보고서", 한국고속철도건설공단
- 6) 대우중공업(1998), "KNR 신형전기 기관차 정비지침서", 철도청
- 7) ORE(1970), "Comparison and analysis of test results - Recommendations concerning the design of pantographs and overhead equipment", Questions A84, Reports No.11(Final report),
- 8) ORE(1970), "Theoretical investigations and experimental tests by BR(static behaviour)", Questions A84, Reports No. 9,
- 9) G. Gaeotti and P. Toni(1997), "Overhead contact line elasticity optimization for railway high speed running", Computer & Structures Vol. 65, No. 6, pp. 975-983
- 10) Karl-Hans Bauer(1989), "Effects of Design Parameters of Overhead Contact Lines on High-Speed Operation - a Comparison of Theory and Testing", Elektrische Bahnen, No. 10, pp. 269~279