

## 무인자동운전 경전철시스템 고가교량의 비상운전 중 안전성평가

# Safety Evaluation of Elevated Guideway during Abnormal Operation on LRT of Driverless Automatic Driving System

손은진\* · 김민수\* · 임영수\*\* · 임종필\*\*\*

Eun-Jin Son · Min-Soo Kim · Young-Su Lim · Jong-Pil Lim

### Abstract

Trains in LRT(Light Railway Transit) system usually have shorter car length than metro's because of their smaller passengers demand. Therefore it is very likely that the load condition of LRT system in abnormal operation, in case of which trains are in close proximity by system broke or train rescue works, could be worse rather than in normal operation, in spite of rare probability of abnormal operation. In this study, the target reliability indexes of several abnormal operations are estimated in accordance with the occurrence probabilities of each abnormal operation case and the reliability index of normal operation presented by the specification. From the indexes, load factors for the abnormal operation cases are estimated and the safety evaluation is performed for Yong-in LRT project.

**Keywords** : Reliability Index(신뢰도 지수), Abnormal Operation(비상운전)

## 1. 서론

경전철은 도시철도에 비하여 일반적으로 차량길이가 짧고 편성당 차량수가 적어 열차의 총 길이가 작으므로 운영 중 시스템의 고장으로 인해 열차간 거리가 근접되는 경우 또는 차량의 구난시 등과 같은 비상운전 조건시, 정상운전 중의 경우보다 구조물에 불리한 하중조건이 발생할 수 있다. 그러나 시방서에서 제시하고 있는 하중조합의 하중계수 및 안전율은 정상운전조건에서의 차량하중에 대한 변동성 등이 고려된 값으로, 이를 발생확률이 극히 적은 비상운전 조건시에 대하여 일률적으로 적용하는 것은 필요 이상의 비대한 구조물을 발생시킬 수 있다. 구조물 설계시 바람직한 방향은 정상운전 및 비상시 운전조건들 각각에 대하여 유사한 파괴확률을 갖도록 설계하는 것이며, 이를 위해서는 신뢰도 지수(Reliability Index)에 바탕을 둔 하중저항계수설계법의 적용이 필요하다. 그러나, 현재 국내의 설계기준은 허용응력설계법과 강도설계법을 사용하고 있

고, 경전철의 비상운전 시와 같은 특수한 하중조건에 적합한 허용안전율 또는 하중계수의 적용기준이 없어, 비상운전조건에 대하여 정상운전조건과 동일하게 일관성 있는 신뢰도 지수를 갖도록 설계하는 것은 어려움이 있다.

본 검토에서는 용인경량전철 고가구조물을 대상으로 정상운전시의 하중조건에 대한 시방서의 목표신뢰도 지수에 상응하는 비상운전 시나리오별 발생확률에 따른 목표신뢰도 지수를 추정하고 이를 이용하여 각 시나리오별 하중계수를 산정한 후 비상운전조건에서의 구조물 안전성을 평가하였다.

## 2. 용인경량전철 사업개요

용인경량전철은 용인시 기흥읍 구갈리에서 에버랜드가 위치하는 포곡면 전대리까지 총 연장 약 18.4km의 경전철 사업으로 복선의 고가 및 토공 선로와 정거장 15개소 및 차량기지 1개소로 구성되어 있다. 차량운전방식은 이동폐색(Moving Block)방식에 의한 완전무인 자동운전방식이며, 구동방식은 선형유도전동기(LIM, Linear Induction Motor)방식으로 되어 있다. 운영은 영업개시 후 약 30년간 1량 편성 운영으로 계획되어 있으나, 향후 증편운영시를 대비하여 시설변경이 곤란한 본선 및 정거장의 토목 및 건축 등 고정

\* 책임저자 : 회원, (주)서영엔지니어링, 철도설계실, 이사  
E-mail : eunjins@seoyeong.co.kr  
TEL : (02)589-4286 FAX : (02)589-4270

\* (주)서영엔지니어링, 철도설계실, 부사장

\*\* (주)서영엔지니어링, 철도설계실, 전무이사

\*\*\* 대림산업(주), 부장

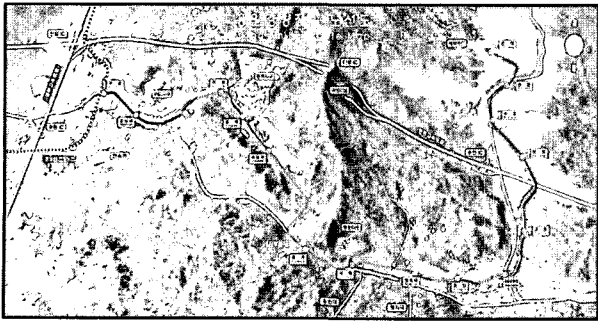


Fig. 1. 용인경량전철 노선도

시설물의 설계는 2량 편성 운영시를 고려하여 설계하였다.

### 3. 차량하중조건

설계시 고려한 차량하중은 ACI 358.1(Guideway Structures)을 참고로 하여  $8인/m^2$ ( $\approx 500kgf/m^2$ )의 승차밀도를 갖는 AW4기준 차량이 2량 연결되어 운영되는 조건을 활하중으로 적용하였으며, 차량 제원 및 하중은 다음과 같다.

Table 1. 승객밀도별 차량하중

구분	승차밀도	Mass/Car (kg)	Average Load /Axle (kN)
AW0	공차	24,000	58.9
AW1	좌석만석(41인)	26,542	65.1
AW2	입석밀도 $4p/m^2$ (164인)	34,168	83.8
AW3	입석밀도 $6p/m^2$ (226인)	38,012	93.2
AW4	입석밀도 $8p/m^2$ (288인)	41,856	102.7

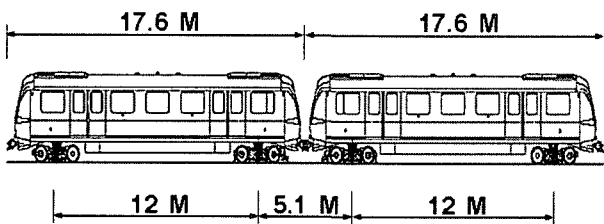


Fig. 2. 용인경전철 차량 제원

### 4. 운전 시나리오

#### 1) 시나리오 1A : 정거장에서 열차 정체

이 시나리오는 승강장에서 비상응급상황, 열차문의 고장 등에 기인한 상황으로, 승강장에 도착한 열차는 출발하지

못하며, 따라서 정거장에 정차된 열차 후방으로 후속 열차가 정체된다. 상황이 종료될 때까지 최대 5개 열차가 최소 13m 간격으로 도착될 수 있다.

이 시나리오는 다음의 2가지 경우로 구성된다.

- a) 단선 선로 지장 : 한쪽 선로에서 열차가 정체되고, 나머지 선로는 정상 운전 상태에 있는 경우로 발생시간 중 약 80%에 해당한다.
- b) 복선 선로 지장 : 한쪽 선로에서 열차가 정체되고, 나머지 선로는 열차진입을 통제하게 되며 발생시간 중 약 20%에 해당한다.

#### 2) 시나리오 1B : 분기기 위치에서 열차 정체

이 시나리오는 분기기의 고장에 기인될 것이며, 기술자가 도착해서 문제를 해결할 때까지 지속된다. 고장난 분기기에 도착한 열차는 더 이상 진행하지 못하고 분기기 전방 안전거리에서 멈추게 되며, 후속 열차는 정체된다. 상황이 종료될 때까지 최대 5개 열차가 최소 13m 간격으로 정차될 수 있다. 상황종료 시 선두 열차는 출발하고 이어서 후속열차가 차례로 출발하게 된다. 열차는 즉시 연속적으로 출발하지 않으나, 해당 구간의 목표 속도까지 가속되고 해당 속도에서의 안전거리를 확보하게 될 것이나, 이 시나리오에서의 이격거리는 150m이상으로 간주될 수 있다.

#### 3) 시나리오 1C : 단선의 열차 정체

이 시나리오는 열차가 통신기능을 상실하여 완전히 정차되는 통신고장에 기인된다. 고장 상태가 복구 될 때까지 최대 5개 열차가 정체될 수 있으며, 열차간 최소 이격거리는 13m이다. 복구 중 반대쪽 선로는 정상 운전되며, 만일 고장이 해결될 수 없다면 고장열차에 대한 구난(시나리오 4)이 시작된다. 이 경우에 정체된 열차는 이전 정거장까지 후진하여 승객을 하차 시키게 된다.

#### 4) 시나리오 1D : 복선의 열차 정체

#### 5) 시나리오 2 : 유인운전경우(Manual Operation)

유인운전차량은 시스템의 임의 위치에서부터 차량을 유치 또는 대피시킬 위치까지 운전하게 된다. 열차는 만차(AW4) 상태에서 전방의 다음 정거장까지 운행되고 모든 여객이 하차한 후 최고 25km/h의 속도로 공차(AW0)상태에서 운전하게 된다. 이 시나리오에서 다른 유인운전열차 또는 ATO 열차로부터 간격은 150m 이상 유지되며, 반대쪽 선로는 정상 운전된다.

**6) 시나리오 3A/3B : 운전시격규정(Headway Regulation)**

열차는 정상 서비스를 제공하며 최소 운전시격에서 운행된다. 초기의 System 운영은 135초의 운전시격에서 열차를 운영하는 것이 요구되며, 최대 System 운영은 90초의 운전시격이 고려된다.

**7) 시나리오 4 : 열차 구난 경우(Train Recovery)**

만차(AW4)조건의 열차가 선로에서 운행이 불가하여 멈추게 되는 경우이다. 기술자가 "Taxi mode"에서 정해진 Route로 정상 서비스 열차(최대 AW4)로 현장에 출동하게 된다. 기술자가 탑승한 열차는 고장난 열차의 전방 또는 후방으로부터 동일한 선로쪽 또는 반대 선로쪽으로 ATO 조건에서 접근하게 된다. 만일 동일한 선로를 이용하는 경우 13m까지 근접될 수 있다.

만일 구난(Recovery)이 필요하면 다른 공차(AW0)가 접근하여 고장차량(AW4)과 연결한 후 고장차량을 서비스 지역 외부로 이동시키게 되며, 이 경우 우선 다음 정거장까지 이동하여 승객을 하차시키고 공차로 차량기지까지 운행하며, 반대쪽 선로는 만차(AW4)차량으로 정상 운전된다.

**8) 시험운전**

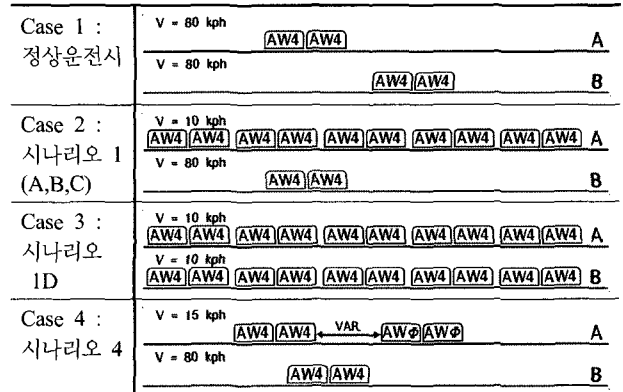
시험운전의 초기단계는 제한된 수의 열차로 시행된다. 후속 단계는 일반적으로 공차를 이용한 서비스 시뮬레이션이 포함된다. 그러므로 위의 시나리오는 시험운전단계에서도 포함된다.

**Table 2.** 시나리오별 발생확률

시나리오	구분	발생 위치	속도 (kph)	최소 이격거리	발생확률
1A	정거장 정체	정거장	0-10	13m	평균-1회/주
1B	분기부 정체	분기부	0-10	"	평균-4회/년
1C	선로부 정체	전 체	0-10	"	평균-1회/년
1D	선로양측정체	"	0-10	"	평균-1회/15년
2	수동운전	"	0-25	150m	공차-1회/월
4	구난시	"	0-15	13m	평균-1회/2년

**5. 비상운전조건에서의 활하중 영향**

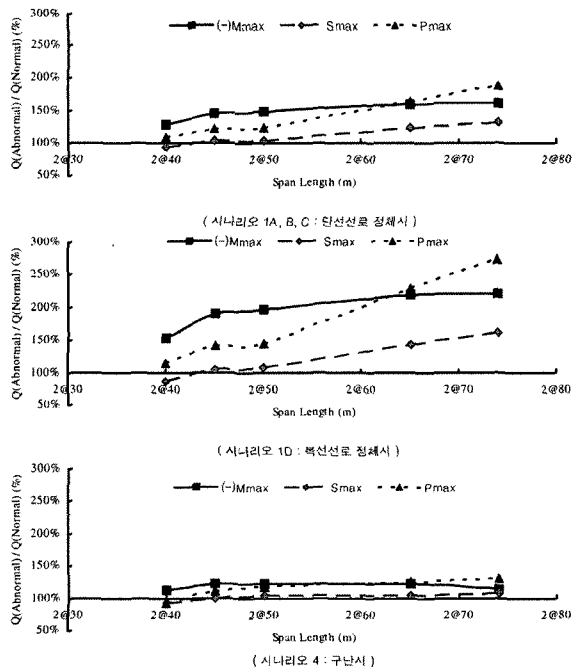
비상운전 시 고가 구조물에 구조적으로 불리한 영향을 발생시킬 수 있는 열차 정체(시나리오 1A~1D) 및 구난(시나리오-4) 조건에 대하여 고가 구조물의 활하중 영향을 검토하였다.



※ (1) 정체선로 및 구난중 고장차량 및 접근차량의 운전속도(15kph이하)를 고려하여 활하중 충격계수는 ACI 358.1을 참고로 0.1을 적용함[1]  
 (2) Case-2, 3의 정체선로(Case-2: A, Case-3: A,B)에는 최대 5대까지의 열차가 13m간격으로 배치되는 것으로 해석함.

**Fig. 3.** 열차하중 개요도

비상운전 중 열차하중 영향은 최대 부모멘트, 전단력 및 교각의 축력에 대하여 검토하였으며, 해석결과를 정상운전 조건시의 열차하중에 의한 최대 단면력에 대한 비상운전조건에서의 최대 단면력의 비율로 나타내면 다음과 같다.



**Fig. 4.** 비상운전조건에서의 열차하중 해석결과

**6. 비상운전경우의 발생확률에 기초한 하중계수**

비상운전조건에서의 구조물 안전성 평가를 위해 비상운전시나리오별 발생확률을 산정하고 설계기준에서 요구하는

정상운전조건에서의 목표신뢰도 지수에 부합되는 비상운전 시의 시나리오별 소요 신뢰도 지수를 각 운전경우의 발생확률에 근거하여 추정하였으며, 이 값을 이용하여 각 경우의 하중계수를 산정한 후 안전성 검토를 수행하였다.

비상운전의 각 시나리오별 발생빈도는 평균 승차인원 조건에서 산정되었으므로 최대 하중조건(만재차량하중)에 대한 검토를 위해 수송수요 및 운전시격을 고려한 차량하중의 빈도 분포함수를 추정하고 이를 이용하여 각 시나리오의 최대 하중조건에 대한 발생빈도를 추정하였다.

**6.1 신뢰도지수와 하중계수**

구조물에 작용되는 하중(Q)이 저항(R)을 초과하는 경우 파괴가 발생되며, 구조물 설계 시 적용하는 신뢰도 지수(Reliability Index)는 평균값 0을 갖고 표준편차가 1인 정규분포 함수  $U(\{\ln(R/Q) - (\ln(R/Q))_m\} / \sigma_{\ln(R/Q)})$ 에서 구조물 파괴시의  $\ln(R/Q)$ 의 값이 평균( $[\ln(R/Q)]_m$ )으로부터 이격되는 표준편차( $\sigma_{\ln(R/Q)}$ )의 배수를 의미하며, 따라서 하중조합별로 일정한 신뢰도 지수를 유지하는 경우 해당 하중조합에 대하여 Random Variable인 하중과 저항의 변동성에 관계없이 일관된 안전성을 유지할 수 있다.

$$p_f = P[(R - Q) \leq 0] \tag{1}$$

$$= P[\ln(R/Q) \leq 0] \tag{2}$$

$$= P[\ln(R/Q) - (\ln(R/Q))_m / \sigma_{\ln(R/Q)} \leq -\ln(R/Q)_m / \sigma_{\ln(R/Q)}] \tag{3}$$

$$= P[U \leq -\ln(R/Q)_m / \sigma_{\ln(R/Q)}] \tag{4}$$

$$= F_U[-\ln(R/Q)_m / \sigma_{\ln(R/Q)}] \tag{5}$$

$$= F_U[-\beta] \tag{6}$$

여기서,  $F_U$ 는 변수 U에 대하여 정규분포화된 누적분포함수(Normalized Cumulative Distribution)의 값이며, 하첨자(Subscript) m은 평균을 의미한다.

위에서 신뢰도 지수는 근사적으로 식 (7)~(8)과 같이 나타낼 수 있으며[2],

$$\beta = \ln(R/Q)_m / \sigma_{\ln(R/Q)} \tag{7}$$

$$= \frac{\ln(R_m/Q_m)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \tag{8}$$

여기서,  $R_m, Q_m$ 은 각각의 평균값을 의미하고,

$$V_R = \sigma_R / R_m$$

$$V_Q = \sigma_Q / Q_m \text{ 이다.}$$

위 식을 정리하면 식 (9)와 같다.

$$\theta \cdot Q_m \leq R_m = \phi R_n \tag{9}$$

$$\text{여기서, } \theta = \exp(\beta \sqrt{V_R^2 + V_Q^2})$$

또한 Random Variable인 하중(Q)은 구조계산상의 가정 등에 의한 오차(E), 하중의 변동성 영향( $C_b, C_L$ )과 구조계산의 이론과 실제 영향사이의 차이(A, B)등의 Random Variable의 함수로 표현될 수 있으며,  $\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}$ 는 공학적으로  $\alpha(V_R + V_Q)$ 로 변화될 수 있고[3], 이를 적용하면 위 식은 식 (10)~(12)와 같이 변환될 수 있다.

$$Q_m e^{\alpha\beta V_Q} \leq R_m e^{-\alpha\beta V_R} \tag{10}$$

$$Q_m e^{\alpha\beta V_Q} = e^{\alpha\beta V_E} [(1 + \alpha\beta \sqrt{V_A^2 + V_D^2}) C_D D_m + (1 + \alpha\beta \sqrt{V_B^2 + V_L^2}) C_L L_m] \tag{11}$$

$$Q_m e^{\alpha\beta V_Q} = \gamma_E (\gamma_D C_D D_m + \gamma_L C_L L_m) \tag{12}$$

여기서,  $\gamma_E = \exp(\alpha\beta V_E)$

$$\gamma_D = 1 + \alpha\beta \sqrt{V_A^2 + V_D^2}$$

$$\gamma_L = 1 + \alpha\beta \sqrt{V_B^2 + V_L^2}$$

위의 식을 하중저항( $R_n$ )에 대해 정리하면 식 (13)과 같다.

$$\gamma_E (\gamma_D C_D D_m + \gamma_L C_L L_m) \leq \phi R_n \tag{13}$$

따라서 사하중과 활하중을 조합하는 경우의 하중계수는 다음과 같다.

$$\text{사하중 계수 : } \gamma_{DD} = \gamma_E \gamma_D$$

$$\text{활하중 계수 : } \gamma_{LL} = \gamma_E \gamma_L$$

위의 식에서  $\alpha$ (Separation Factor)는 토목의 하중과 저항의 변동성을 고려할 때 공학적 목적으로 0.55가 적용될 수 있다[3].

위의 결과를 이용하여 정상운전조건에서의 사하중과 활하중에 대한 하중계수를 검토하면 다음과 같다.

$$\alpha(\text{Separation Factor}) = 0.55$$

$$\beta(\text{Reliability Index}) = 4.0$$

$$V_E = 0.1, V_A = 0.04, V_D = 0.04, V_B = 0.2, V_L = 0.2$$

을 적용하면,

$$\gamma_E = \exp(\alpha\beta V_E) = \exp(0.55 \times 4.0 \times 0.1) = 1.246$$

$$\gamma_D = 1 + 0.55 \times 4.0 \times \sqrt{0.04^2 + 0.04^2} = 1.124$$

$$\gamma_L = 1 + 0.55 \times 4.0 \times \sqrt{0.2^2 + 0.2^2} = 1.622$$

$$\text{사하중계수, } \gamma_{DD} = 1.246 \times 1.124 \approx 1.4$$

$$\text{활하중계수, } \gamma_{LL} = 1.246 \times 1.622 \approx 2.0$$

따라서, 설계기준의 하중계수와 동일한 값을 얻는다.

## 6.2 차량하중의 빈도분포함수 추정

### 1) 차량하중의 발생빈도 추정

차량하중의 발생확률빈도 결정은 아래와 같은 조건에 의해 결정되었다.

- 2량편성 운행조건.
- 2량 편성 운영시 승차인원은 각 차량에 1량 편성시 평균 승차인원을 고려
- 방향별 승하차 수요는 전 연장에 대하여 평균 재차인원을 고려하는 것이 일반적 방법이겠으나, 노선의 특성상 재차인원이 시점역에서 종점역 방향으로 모두 감소추세를 가지므로 최대 재차인원을 갖는 시점역의 수요를 기준으로 적용.
- 첨두시 운행횟수의 30%는 최대승차조건인 8인/m<sup>2</sup>를 기준으로 승차인원을 적용.
- 평균 열차 운전시격은 120초를 적용
- 활하중이 정규분포를 갖도록 일평균 차량하중의 발생빈도 산정은 일평균 수송수요에서 첨두시 수요를 공제한 수송수요를 상업운전시간과 관계없이 24시간에서 첨두시 1시간과 수요가 작은 공차운전 1시간을 제외한 22시간 균등 배분.
- 비상운전조건 발생확률은 정상운전빈도에 비해 무시할 수 있으므로 빈도수 산정시 무시.

Table 3. 차량하중 발생빈도

구분	공차	평균	첨두시평균	만차
승차인원(인)	0	119	209	288
차량중량(kgf)	24,000	31,380	36,960	41,860
중량비(%)	57.3	75.0	88.3	100
발생빈도(%)	4.15	91.70	2.90	1.25

### 2) 차량하중 확률분포함수 결정

하중이 정규분포함수 형태의 발생밀도를 갖는 것으로 가정하는 경우 하중의 확률분포함수는 식 (14)와 같다.

- 평균,  $\mu = 31,380\text{kg}$ (승객인원 119명)
- 분산,  $S = 4,534,180$
- 표준편차,  $\sigma = \sqrt{S} = 2,129$
- 확률분포함수

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{2,129\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-31,380)^2}{2 \times 2,129^2}} \quad (14)$$

위에서 산정된 바와 같이 정상운전조건에서 평균차량하중은 31,380kg(승차인원 119명)정도로 AW1~AW2의 중

간정도 차량하중을 갖는 것으로 판단되었다.

## 6.3 특별한 하중조건에서의 하중계수와 발생확률

비상시 운전조건과 같이 설계기준에서 제시된 특별한 하중조건 중 주하중만을 고려하는 하중조합에서 적용하는 하중계수 및 각 하중의 발생빈도는 다음과 같다.

Table 4. 특별한 하중에 대한 하중계수 및 발생빈도

하중명	하중계수	하 중 개 요	발생빈도
풍하중	1.4	50년내 비초과 확률이 60% 이하의 10분간 최대 평균풍속 $V = 40\text{m/sec}$	<sup>(1)</sup> $3.805 \times 10^{-7}$
지진 하중	1.0	평균재현주기 1000년의 지진 $A_{\text{max}} = 0.14\text{g}$	<sup>(2)</sup> $1.903 \times 10^{-9}$

※ (1) 비초과확률이 60%로 평균치와 근접하므로 설계풍하중을 평균값으로 가정.  
 (2) 지진의 지속시간을 1분으로 가정

비상운전조건과 같은 특수한 하중조건에 대하여 설계기준에서 적용하고 있는 신뢰도 지수는 건축구조물에서 적용하는 기준을 참고하여 적용하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

Table 5. 하중조건별 신뢰도 지수

하 중 명	발생빈도	건축구조물	적용신뢰도지수
정상조건(AW4)	0.0125	-	4.0
풍 하 중	$3.805 \times 10^{-7}$	2.5	3.0
지진하중	$1.903 \times 10^{-9}$	1.75	2.0

## 6.4 비상운전조건 하중에 대한 신뢰도 지수 산정

앞에서 검토된 하중조건들에 대한 신뢰도 지수 기준을 이용하여 발생확률과 신뢰도 지수간의 관계식을 결정하고, 이를 이용하여 비상운전 조건시 각각의 하중경우별 발생확률에 대응하는 신뢰도 지수를 산정하였다.

Table 5의 하중들에 대한 신뢰도 지수와 발생확률간 관계를 함수화 하면 식 (15)와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\beta = \sqrt{a \cdot \ln P(A) + b + c} \quad (15)$$

여기서, P(A) : 발생확률

$$a = 0.39193$$

$$b = 8.15995$$

$$c = 1.46179$$

위의 식을 이용하여 비상운전조건에서의 하중조건별 발

생활률에 대응하는 신뢰도 지수를 산정하면 다음과 같다.

Table 6. 비상운전조건의 하중경우별 신뢰도 지수

구분	개요	차량	발생확률	신뢰도 지수
1A	정거장 정체	μ	$1.98 \times 10^{-4}$	3.657
		AW4	$2.48 \times 10^{-6}$	3.223
1B	분기기 정체	μ	$5.72 \times 10^{-5}$	3.543
		AW4	$7.15 \times 10^{-7}$	3.079
1C	본선(1개) 정체	μ	$4.89 \times 10^{-7}$	3.032
		AW4	$6.11 \times 10^{-9}$	2.326
1D	본선(2개) 정체	μ	$3.26 \times 10^{-8}$	2.647
		AW4	$4.08 \times 10^{-10}$	2.000 <sup>(1)</sup>
4	구난시	μ	$2.45 \times 10^{-7}$	2.943
		AW4	$3.06 \times 10^{-9}$	2.152

※ (1) 최소 신뢰도지수는 2.0을 적용

### 6.5 비상운전조건 하중에 대한 하중계수

앞에서 산정된 신뢰도 지수와 하중계수간 관계를 이용하여 비상운전조건에서의 사하중과 활하중에 대한 하중계수를 산정하였다. 하중계수 산정시 적용된 각각 영향에 대한 Variation 값은 하중의 특성이 동일한 점을 고려하여 상시운전조건과 동일한 값을 적용하였다.

Table 7. 비상운전조건의 하중계수

구분	개요	차량	신뢰도지수	사하중계수	활하중계수
정상운전조건		AW4	4.000	1.400	2.000
1A	정거장 정체	μ	3.657	1.362	1.918
		AW4	3.223	1.314	1.793
1B	분기기 정체	μ	3.543	1.349	1.885
		AW4	3.079	1.298	1.752
1C	본선(1개) 정체	μ	3.032	1.293	1.739
		AW4	2.326	1.219	1.548
1D	본선(2개) 정체	μ	2.647	1.252	1.633
		AW4	2.000	1.186	1.464
4	구난시	μ	2.943	1.283	1.714
		AW4	2.152	1.201	1.502

## 7. 신뢰도 지수에 의한 구조물 안전성 평가

앞에서 산정된 하중계수에 대하여 고가교량에 대하여 시나리오별로 만차조건(2-AW4)과 평균차량조건에 대해 안전성여부를 검토하였다.

정상운전조건에 대하여 설계된 구조물의 설계강도( $\Phi R_n$ )

는 극한하중( $Q_u$ )이상이므로 구조물이 목표 신뢰도지수를 갖고 안전하게 지지할 수 있는 하중의 크기는 상시운전조건에서의 극한하중 이상이다. 따라서 상시운전조건에서의 구조물의 극한하중을 공칭활하중( $Q_{AW4}$ ) 작용시 활하중 단면력( $Q_{LN}$ )의 비로 산정하고 이를 최소설계강도(Minimum Design Strength)로 가정하였으며, 비상운전조건에 대하여 극한하중을 공칭활하중(AW4) 작용시의 활하중 단면력( $Q_{LN}$ )의 비로 산정하여 이 값을 비교하여 목표 신뢰도 지수를 갖는 구조물의 안전성을 검토하였다.

다음은 비상운전시 각 시나리오별 신뢰도지수를 고려한 해석결과와 정상운전조건에서의 단면력 비를 나타낸다.

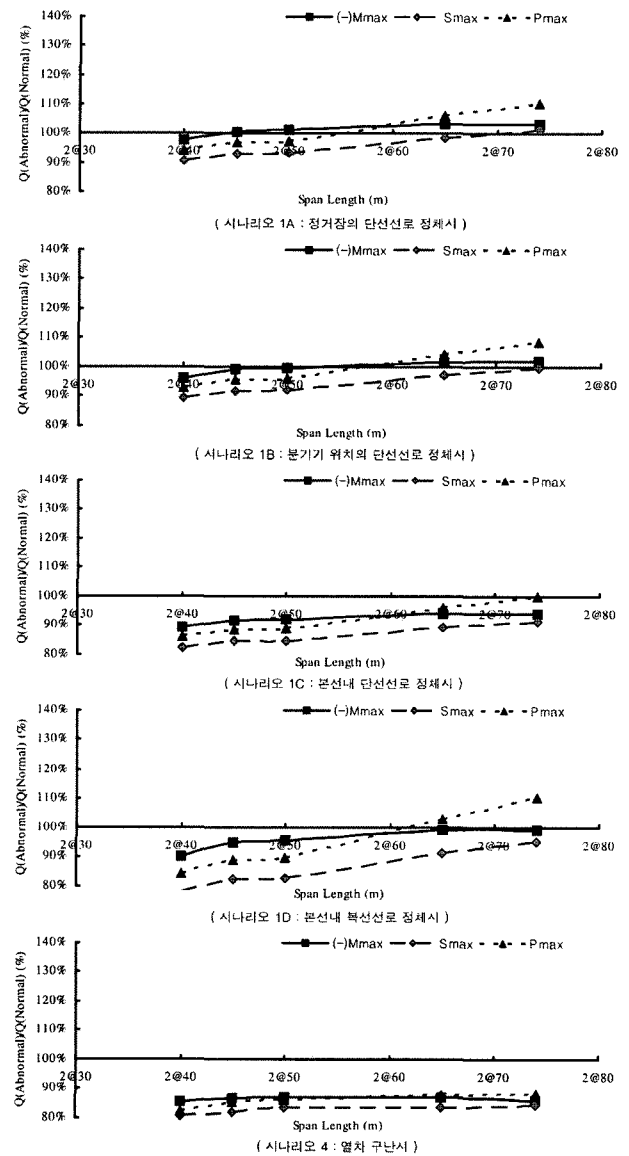


Fig. 5. 비상운전조건의 해석결과

검토결과를 시나리오별로 요약하면 다음과 같다.

### 1) 시나리오 1-A, 1-B : 정거장 및 분기부 주변에서 열차가 단선으로 정체되는 경우

본 시나리오의 경우 열차 정체는 최대 5개 열차까지이며, 정체시 열차간 최소 이격거리는 13m이므로 정거장 및 분기부 주변 약 230m [35m(2량편성시 총 열차장) × 5대 + 13m (열차간 최소이격거리) × 4개소] 구간에서 구조적으로 가장 불리한 단순경간 65m, 연속경간으로는 2@50m의 교량에 대하여 안전성을 검토하였다.

단순경간 구조물의 경우 비상운전시 단면력은 최소설계강도(상시운전조건 단면력) 이하로 모든 경우에 대하여 안전성을 확보하고 있으며, 연속경간의 중앙교각위치에서의 최대 부모멘트는 50m 경간장의 경우 만차하중(AW4차량) 조건에서 각각 약 1.2%정도 최소 설계강도를 초과하는 것으로 판단되었다. 그러나 이는 구조물의 파괴를 의미하는 것이 아니며 일관성 있는 파괴방지확률을 갖기 위한 적정 신뢰도 지수의 확보의 부족을 의미한다. 일반적으로 구조물 설계시 약 10% 정도의 잉여 안전율(Redundancy)을 갖는 것을 고려할 때 이는 충분히 신뢰도 지수 확보가 될 수 있는 조건으로 판단되므로, 정거장 및 분기부 위치에서의 정체조건은 모든 경우를 만족하는 것으로 사료된다.

### 2) 시나리오 1-C : 단선 정체 경우

경간장이 제일 긴 77m+71m 교량의 경우에도 AW4 차량 운행조건에서 최대단면력이 최소설계강도 이하로 모두 안전한 것으로 판단되었다.

### 3) 시나리오 1-D : 복선 정체 경우

경간장이 제일 긴 77m+71m 교량의 경우 비상운전중 중앙교각 반력이 최소 설계강도의 110%정도로 일반적인 잉여 안전율(약 10%)을 약간 초과하며, 이외의 교량은 모두 잉여 안전율 이하의 값을 가지므로 목표 신뢰도 지수의 확보를 위해서는 이들 구간에서의 복선 정체를 가급적 피하는 것이 바람직하다.

### 4) 시나리오 4 : Recovery

모든 경우에서 최소설계강도 이하의 단면력 값을 가지므로 안전한 것으로 판단되었다.

## 8. 결론

경전철은 도시철도 또는 일반철도와는 달리 적은 수송수요에 대응할 수 있도록 편성당 열차의 규모(폭 또는 길이)가 상대적으로 작으며, 이는 운영 중 열차 또는 시스템의 이상으로 인한 비상운전 조건시 열차의 정체 또는 구난조건에서 정상운전조건보다 구조물에 불리한 하중을 발생시킬 수 있다.

본 검토에서는 무인자동운전방식인 용인경전철을 대상으로 비상운전 시 각 시나리오별 발생확률을 이용하여 정상운전조건에서의 목표신뢰도지수에 대응하는 신뢰도지수를 추정하고 이를 이용하여 각 시나리오별 하중계수를 산정한 후 비상운전조건에서의 고가 구조물의 안전성을 평가하였다.

본 검토는 시스템의 운전 및 운영계획 시 반영을 위한 것으로 검토 결과에 따라 일부 장치간의 연속교 구간에서 복선정체 조건을 발생시키지 않도록 제안되었다.

최근 여러 지방자치단체에서 새로운 교통수단으로 도입을 검토 및 추진 중에 있는 경전철의 경우에도, 열차장이 짧은 차량의 특성상 이들 시스템의 설계시 비상운전 시나리오에 대한 구조물의 안전성 검토를 통한 운전 및 운영계획의 수립이 필요할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. ACI 358 Committee, "Analysis and Design of Reinforced and Prestressed Concrete Guideway Structures", ACI, 1999
2. Louis, F. G., Robert, O. D., Reidar, B., "Load and Resistance Factor Design of Steel Structures", Prentice Hall, New Jersey, 1994, pp.24-57
3. Lind, N. C., "Consistent partial safety factors", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.97, No.ST6, June 1971 pp.1651-1669