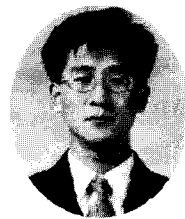


철도교 설계기준에 대한 비교·고찰



최진우*



오지택**

1. 서론

대륙간 철도연결이 활성화되어 남북한을 잇는 대륙철도연결이 이루어지게 되면 가까운 미래에 유럽의 열차들이 한반도를 통과하게 될 것으로 기대된다. 대륙간 철도 연결을 위해서는 외교적인 노력도 중요하지만 선로부담력과 선로설계기준 등과 같은 기술적인 검토도 매우 중요한 과제라고 할 수 있다. 유럽의 차량은 우리나라의 차량과는 축중이나 축배치 등이 상이하고 교량 등과 같은 구조물의 설계하중이나 거동한계기준이 상이한 만큼 이에 대한 검토를 통하여 차량의 통행에 안전성을 확보하는 것이 필요하다.

철도교는 도로교와는 달리 자중에 비해 상당히 큰 차량하중을 부담하기 때문에 차량하중의 특성에 많은 영향을 받게 되며, 특히 주행중인 열차와 구조물과의 상호작용으로 인한 동적응답이 상당히 민감하게 나타날 수 있다. 즉, 차량하중이나 주행 특성에 따라 교량의 동적안전성이나 차량의 주행 안전성과 승차감이 상당한 영향을 받게 되므로 설계당시부터 이에 대한 충분한 검토가 이루어져야

할 필요가 있으며, 이를 바탕으로 철도교량의 거동한계기준을 제시하게 된다. 유럽과 일본 등에서는 고유진동수, 상부구조의 수직가속도, 거더의 동적 처짐, 차량의 수직가속도 등을 제한함으로써 주행 안전성 및 사용성을 확보하고 있고, 우리나라의 경우에는 고속철도용 교량에 대해서 유럽의 기준을 원용하여 주행안전성 및 사용성을 확보하고 있지만 기존선 철도교량의 경우에는 동적거동에 대한 한계기준이 마련되어 있지 못한 실정이다.

교량의 설계하중은 대부분의 국가에서 운행가능성이 있는 모든 열차하중에 의해 발생하는 하중효과를 고려할 수 있는 표준열차하중(Standard Live Load)을 정하여 사용하고 있고, 차량의 주행에 의한 동적증폭효과를 고려하기 위하여 충격계수 혹은 동적증폭계수를 표준열차하중에 곱하여 동적효과를 정적효과로 치환하여 고려하고 있다. 국가별로 철도의 운행환경이 상이하기 때문에 각각의 고유한 하중체계를 사용하고 있으므로, 각국의 설계하중들에 비교·분석을 통하여 현재 국내에서 적용하고 있는 설계하중의 수준을 파악하는 것은 차량과 구조물의 안전성확보를 위하여 반드시 필요

* 한국철도기술연구원 철도토목연구팀 선임연구원
 ** 한국철도기술연구원 철도토목연구팀 팀장

하다고 할 수 있다.

따라서 본 고에서는 유럽과 일본, 미국 등에서 적용하고 있는 철도교량의 설계기준을 검토하여 교량의 거동한계기준과 설계하중에 대한 비교·고찰을 수행하였다.

2. 각 국의 거동 한계 기준

2.1 UIC

2.1.1 처짐 한계

UIC 기준 776-3R에서는 또한 차량의 주행안전성과 승차감을 확보하기 위하여 주행중인 열차하중에 의한 처짐한계를 차량의 주행속도 및 교량의 경간길이별로 경간의 구성에 따라 제안하고 있다.

2.1.2 진동수 한계

UIC 기준 776-1에서 기존 교량에 대한 동적충격계수를 고유진동수의 함수로서 산정하게 되어 있는데, 이때 적용할 수 있는 교량의 고유진동수 범위를 제한하고 있다. 이 고유진동수 한계를 UIC 기준 776-3R에서는 처짐에 대한 기준으로 제시하고 있는데 이는 UIC 776-1의 부록 102에 제시된 고유진동수 기준을 UIC 776-1에 제시되어 있는 기존 교량의 고유진동수와 처짐과의 관계식에서 산

출한 것으로 결국 고유진동수로 제안한 것과 같다 고 볼 수 있다.

UIC에서 제시하고 있는 고유진동수제한을 위한 처짐한계는 그림 1과 같다.

이 기준을 근거로 UIC 776-1에 제시된 고유진동수와 처짐과의 관계식을 이용하여 역산하면 고

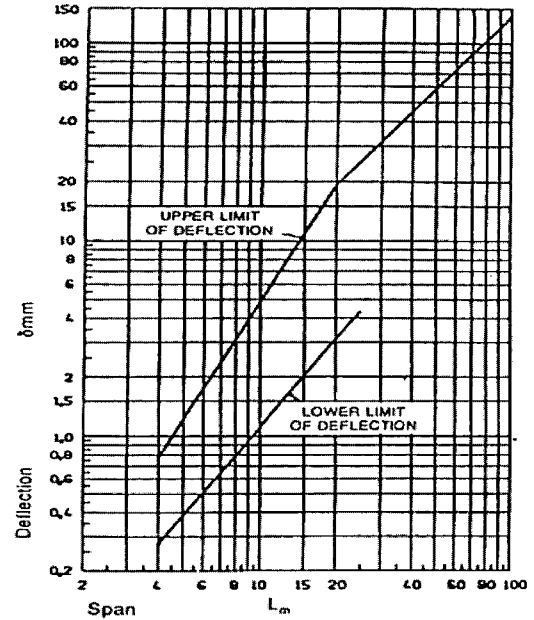


그림 1 UIC 776-3R의 고유진동수 제한을 위한 처짐 한계

● 보통 수준의 승차감 확보시

| 속도 (km/h) | 경간길이(L)/처짐(Δ) | | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| | 1개~2개의 경간이 인접 (단순교 또는 연속교) | | 3개~5개의 경간이 인접 (단순교 또는 연속교) | |
| | $L \leq 25m$ | $L > 30m$ | $L \leq 25m$ | $L > 30m$ |
| $V \leq 120$ | 350 | 350 | 450 | 800 |
| $120 < V \leq 200$ | 450 | 600 | 700 | 2000 |
| $V > 200$ | 550 | 700 | 700 | 2000 |

● 높은 수준의 승차감 확보시

| 속도 (km/h) | 경간길이(L)/처짐(Δ) | | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| | 1개~2개의 경간이 인접 (단순교 또는 연속교) | | 3개~5개의 경간이 인접 (단순교 또는 연속교) | |
| | $L \leq 25m$ | $L > 30m$ | $L \leq 25m$ | $L > 30m$ |
| $V \leq 120$ | 400 | 400 | 500 | 900 |
| $120 < V \leq 200$ | 500 | 800 | 1000 | 2200 |
| $V > 200$ | 800 | 1000 | 1200 | 2200 |

유진동수 제한식을 얻을 수 있다.

• UIC 진동수 한계식

• 상한기준

- $4m \leq L \leq 25m$ 인 경우, $n_0 = \frac{94.756}{L^{0.74807}}$

- $L > 25m$ 인 경우, 한계기준 없음

• 하한기준

- $4m \leq L \leq 20m$ 인 경우, $n_0 = \frac{80}{L}$

- $20m \leq L \leq 100m$ 인 경우, $n_0 = \frac{23.58}{L^{0.592}}$

2.1.3 거더의 진동가속도

거더의 진동가속도에 대한 제한은 두 가지 목적에서 고려되어야 하는데, 하나는 유도상 교량의 경우에 도상의 교란을 방지하기 위함이고 다른 하나는 승객의 승차감을 확보하기 위함이다. 프랑스의 TGV용 철도교량의 설계기준에서는 도상의 교란을 방지하기 위한 목적으로 거더의 수직진동가속도를 0.35g 이하로 제한하고 있다.

2.2 일본

2.2.1 처짐 한계

일본철도구조물 설계표준동해설 강합성구조물 편에서는 사용한계상태를 만족시키기 위한 열차의

종별 및 속도에 따른 거더의 처짐제한에 대한 기준을 표 1과 같이 제시하고 있다.

2.2.2 진동수 한계

일본철도구조물 설계표준동해설 강합성구조물편에서도 신간선인 경우에 동적충격계수를 고유진동수의 함수로서 산정하게 되어 있는데, 이때 적용할 수 있는 교량의 고유진동수 범위를 제한하고 있다. 일본철도구조물 설계표준동해설 강합성구조물편에서 제시하고 있는 비 재하시 교량의 고유진동수 한계는 다음 식과 같은데 UIC 776-1에서와 같은 식이다.

• 일본의 고유진동수 제한식

$$n_0 = \sqrt{\frac{31.5}{d}} > \frac{100}{L}$$

여기서,

n_0 : 비재하시의 고유진동수(Hz)

d : 고정하중에 의한 처짐(cm)

L : 지간(m)

2.3 미국

미국의 경우에는 철도가 중요한 교통수단으로 활용되고 있지 않기 때문에 유럽이나 일본과 같이 사용성이나 차량의 주행안전을 위한 자세한 설계

표 1 일본의 처짐제한 기준

| 기관차 하중 | 경간장 L(m) | | | 0 < L < 50 | | L ≥ 50 | |
|------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------|-------------|--------------|---------|
| | | | | L/800 | | L/700 | |
| 재 래 철 도 | 전차 · 내연 동차 하중 | 경간장 L(m) | | | 0 < L ≤ 20 | 20 < L < 50 | L ≥ 50 |
| | | 2연이상 연속교의 경우 | 열차 속도 (km/h) | V ≤ 100 | L/800 | L/850 | L/700 |
| | | | | 100 < V ≤ 130 | L/1000 | L/1100 | L/900 |
| | 단연의 경우 | 열차 속도 (km/h) | V ≤ 100 | L/700 | | | |
| 100 < V ≤ 130 | | | L/800 | | L/700 | | |
| 신간선 | 경간장 L(m) | | | 0 < L ≤ 40 | 40 < L ≤ 50 | 50 < L < 100 | L ≥ 100 |
| | 2연이상 연속교의 경우 | | | L/1800 | L/2000 | L/2500 | L/2000 |
| | 단연의 경우 | | | L/1600 | | | |

주: 1) 재래철도에서 트러스교량일 경우에는 처짐 한계치를 L/1000으로 한다.

2) 레일면의 솟음을 주는 등 처짐을 상쇄하도록 고려되어 있는 경우에는 위 표의 값을 완화해도 좋다.

3) 위 표에서 재래철도의 기관차하중은 130km/h, 신간선은 260km/h 이하의 열차속도에 대하여 적용한다.

기준을 제시하고 있지 않고 처짐에 대한 한계식만을 제시하고 있다. 이 처짐의 한계식 또한 속도대역으로 자세하게 분류되어 있지 않고, 미국내에서 운행되고 있는 모든 종류의 열차와 속도대역에 대해서 한가지 기준만이 제시되어 있는데, 미국 AREMA 15장 강구조물 편에서 경간길이의 1/640 이하로 제한하고 있다.

2.4 한국

국내의 철도관련 설계기준은 기존선에 대한 설계기준과 고속철도 교량에 대한 설계기준으로 구분되어 있는데, 기존선의 설계기준인 철도교설계기준에서는 고유진동수 한계나 진동가속도에 대한 제한 등과 같은 기준은 제시되어 있지 않고, 사용성과 주행안전성을 확보하기 위한 처짐제한 기준만이 제시되어 있다. 고속철도 구조물에 대해서는 설계시방서와 선로설계기준 및 건설규칙 등에서 UIC에서와 같이 처짐기준, 수직가속도 등에 대한 한계기준을 제시하고 있다. 고유진동수에 대한 한계기준은 제시하고 있지 않는데 충격계수의 산정방법을 UIC의 기준으로 채택하고 있으므로 명시적으로 제시되어 있지는 않지만, UIC에서 제한하고 있는 고유진동수 한계기준을 따른다고 보아야 할 것으로 판단된다.

2.4.1 처짐 한계

가. 철도교 설계기준

철도교 설계기준 강교편에서는 교량설계시 주거더의 처짐은 특별한 경우를 제외하고 가능한 한 다음 표 2의 값을 넘지 않는 것으로 하고 있다.

표 2 철도교 설계기준

| 교량 종류 | 지간길이L(cm) | |
|-------|--------------------|---|
| | 열차속도V(km/h) | |
| 강거더교 | $V \leq 130$ | $0 < L < 50$: L/800, $L \geq 50$: L/700 |
| | $130 < V \leq 160$ | L/1100, L/900 |
| 트러스 | $V \leq 160$ | L/1000 |

나. 고속철도 강교량 및 합성형 교량 설계표준 시방서
고속철도 강교량 및 합성형 교량 설계표준 시방서에서는 교량거더의 처짐에 대하여 다음 표 3과 같이 제한하고 있다.

표 3 교량거더의 처짐의 제한

| 2연이상 연속하는 경우 | 단연의 경우 |
|--------------|--------|
| L/2500 | L/1600 |

2.4.2 진동수 한계

제안된 기준이 없으나 충격계수의 산정방법을 UIC의 기준을 적용하고 있으므로 명시적으로 제시되어 있지는 않지만 UIC에서 제한하고 있는 고유진동수 한계기준을 따른다고 보아야 할 것으로 판단된다.

2.4.3 거더의 진동가속도

거더의 진동가속도에 대한 기준 역시 기존선 철도교량에 대해서는 제시되어 있지 않으며, 고속철도 교량의 경우에는 프랑스의 TGV용 철도교량의 설계기준과 마찬가지로 도상의 교란을 방지하기 위한 거동의 수직진동가속도를 0.35g 이하로 제한하고 있다.

3. 각 국의 정적설계하중

교량의 부담력은 교량 위를 통과하는 여러 가지 차량에 대한 각각의 하중을 재하여 그 중에서 가장 영향이 큰 값을 구하여야 하므로, 대부분의 국가에서 운행가능성이 있는 모든 열차하중에 의해 발생하는 하중효과를 고려할 수 있는 표준열차하중(Standard Live Load)을 정하여 사용하고 있다. 또한 차량의 주행에 의한 동적증폭효과를 고려하기 위하여 충격계수 혹은 동적증폭계수를 표준열차하중에 곱하여 동적효과를 정적효과로 치환하여 고려하고 있다. 따라서 본 절에서는 유럽, 일본, 미국, 한국에서 사용하고 있는 표준열차하중과 충격계수를 국가별로 정리하고 비교·분석하였다.

3.1 UIC

3.1.1 표준열차하중

유럽에서 사용되고 있는 UIC표준열차하중은 UIC 702에 제시된 UIC하중모델71(HL-25)하중인데 최대축중이 25ton이며, 다음 그림 2와 같은 축배치를 가지고 있다. 이 표준열차하중은 유럽에서 운행되

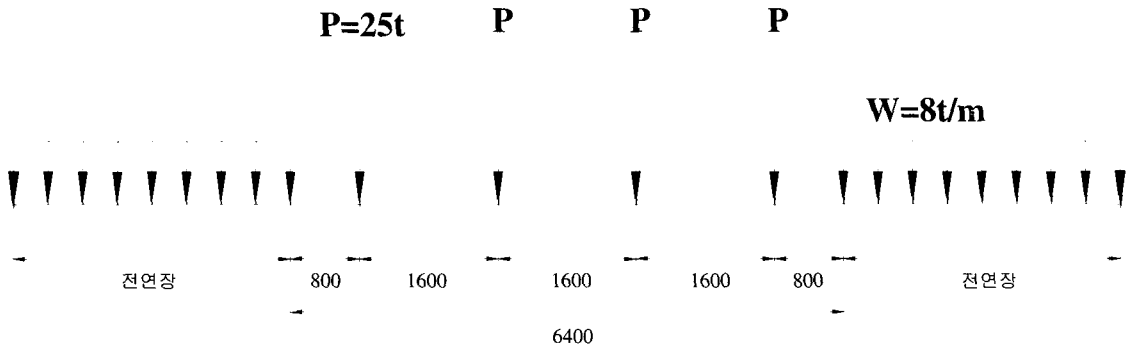


그림 2 UIC 하중모델 71 표준열차하중(HL-25 하중)

는 모든 종류의 열차하중에 의한 효과를 고려할 수 있도록 채택되었다.

3.1.2 충격계수

UIC에서는 신설구조물의 설계시 사용하는 동적 증폭계수를 모멘트 및 전단력에 대하여 별도로 구분하여 사용하고 있으며, 교량 및 부재의 경계조건 및 형상에 따른 충격효과의 변화를 고려하기 위한 특성길이의 함수로서 다음과 같이 제시하고 있다.

$$\phi_1 = \frac{0.96}{\sqrt{L_\phi - 0.2}} + 0.88$$

$$\phi_2 = \frac{1.44}{\sqrt{L_\phi - 0.2}} + 0.82$$

$$\phi_3 = \frac{2.16}{\sqrt{L_\phi - 0.2}} + 0.73$$

충격계수는 위 식들에서 1을 빼기(-)함으로서 구할 수 있다.

표준궤도를 갖는 본선에 대해서 전단력을 계산할 때는 ϕ_1 을, 휨모멘트를 계산할 때는 ϕ_2 를 사용하며, 그 외 측선에 대해서 전단력을 계산할 때는 ϕ_2 을, 휨모멘트를 계산할 때는 ϕ_3 를 사용한다.

3.2 일본

일본의 열차하중은 재래선용과 신간선용으로 구분되어 있다. 재래선에 사용되는 열차하중은 과거에는 KS하중이 주로 사용되었지만 최근 동력이 근대화되어 증기기관차가 모습을 감추고 전기기관차, 디젤기관차로 대체되고 대도시를 중심으로 전차운행 전용구간의 확대 및 화물열차가 운행되지 않는 구간이 증대되어왔기 때문에 KS하중체계가 현행 열차운행 실태에 꼭 적합하지는 않게 되었기 때문에 1987년도부터 JR사에서는 KS하중 외에 기관차 견인의 열차하중으로 그림 3에 나타낸 EA하중과 전차·내연동차 전용선에 대한 열차하중으로 그림 4에 나타낸 것과 같은 M하중이 이용되게 되었다.

| | tf | | | | | | | | | | tf/m | | | | | |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|-----|------|------|------|------|
| E-10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 2.9 | A-10 | 7.6 | 11.2 | 11.2 |
| E-11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 3.2 | A-11 | 8.4 | 12.3 | 12.3 |
| E-12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 3.5 | A-12 | 9.2 | 13.4 | 13.4 |
| E-13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 3.8 | A-13 | 9.9 | 14.5 | 14.5 |
| E-14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 4.1 | A-14 | 10.7 | 15.6 | 15.6 |
| E-15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 4.4 | A-15 | 11.5 | 16.8 | 16.8 |
| E-16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 4.7 | A-16 | 12.2 | 17.9 | 17.9 |
| E-17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 5 | A-17 | 13 | 19 | 19 |

그림 3 EA하중

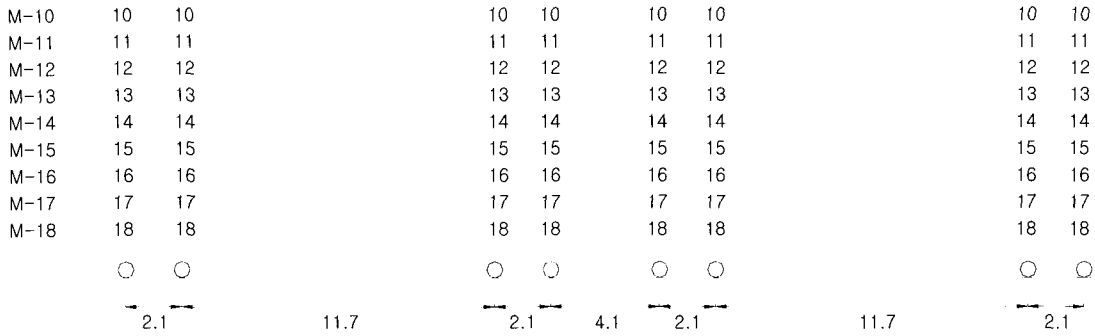


그림 4 M하중

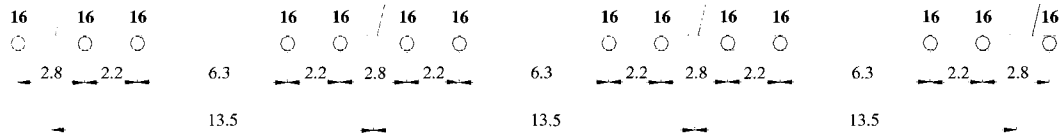
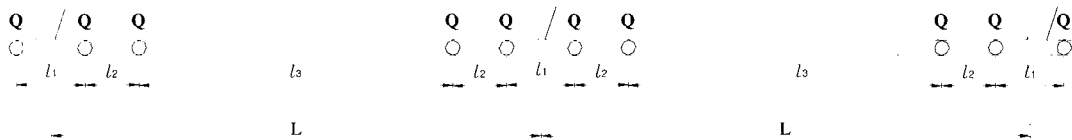


그림 5 N표준 활하중



| 축중(Q) | 거리(m) | L | l1 | l2 | l3 |
|-------|-------|------|-----|-----|------|
| 16 | | 20.0 | 2.8 | 2.2 | 12.8 |
| 17 | | 20.0 | 3.5 | 2.2 | 12.1 |

그림 6 P표준 활하중

신간선에 대해서는 신간선 철도구조규칙(1964년 9월 30일 운수성령 제 70호)에 화물전차를 대상으로 한 N표준 활하중과 여객 전차를 대상으로 한 P표준 활하중이 정해져 있었지만, 현재는 신간선에서 차량의 변화, 설계 방법의 변화와 정원 외 인원의 승차 등 철도 운용환경의 변화를 고려하여 그림 5와 그림 6과 같은 N표준 활하중 및 P표준 활하중의 축중을 최대 적재하중을 상정하여 활중환 표 4와 같은 N하중, P하중을 사용하고 있다.

3.2.1 충격계수

일본 철도 구조물 설계표준 및 동해설에서는 신설구조물의 설계시 사용되는 충격계수를 실측결과와 설계공식 및 계산의 간편화를 고려하여 아래와 같이 제안하고 있다.

$$i = \frac{K_a \cdot V}{500 \cdot L^{0.2}} + \frac{10}{65 \cdot L}$$

여기서,

표 4 각 신간선별 열차하중

| 열차하중 | 구간 | 東海道신간선 | 山陽신간선 | 東北, 上越, 成田 신간선 |
|------|----|-------------------|-------------------|-------------------|
| N하중 | | N-18(N-16 + 2ton) | N-19(N-16 + 3ton) | N-18(N-16 + 2ton) |
| P하중 | | P-18(P-16 + 2ton) | P-19(P-16 + 3ton) | P-19(P-17 + 2ton) |

i : 0.7 이하로 한다.
 단, 전차·내연동차 하중 및 신간선에 대해서는 다음 조건을 만족시키는 것으로 한다.

$$\sqrt{\frac{3.15}{d}} > \frac{100}{L}$$

K_a : 계수(재래철도에서는 $K_a=2$, 신간선에서는 $K_a=1$)

V : 해당 구간을 주행하는 열차의 최고 속도(km/h)로서 기관차의 경우에는 130km/h, 전차·내연동차의 경우는 160km/h, 신간선의 경우는 300km/h로 이하로 한다.

L : 부재에 최대 활하중 단면력을 생기게 하는 동부호 영향선의 기선(基線) 길이(m)로 하는 것을 원칙으로 한다. 단, 하로(下路) 트러스의 중간 수직재, 상로(上路) 트러스의 중간지주, 분격(分格)간 사재(斜材) 종류 이외의 트러스 복부재에 대해서는 지간의 75%로 한다.

d : 사하중에 의한 처짐(cm)

3.3 미국

미국의 AREA에서는 우리나라 LS하중과 같은 축배치를 가지고 있지만 최대축중의 크기가 36.32ton인 Cooper E를 하중표준열차하중으로 채택하고 있다.

3.3.1 충격계수

미국 AREMA에는 디젤 및 전기기관차에 대하여 다음과 같은 충격계수식을 제안하고 있다.

$$L < 80(ft) \text{인 경우} : RE + 40 - \frac{3L^2}{1600}$$

$$L \geq 80(ft) \text{인 경우} : RE + 16 + \frac{600}{L - 30}$$

여기서,

RE : 궤도틀림에 의한 차량의 Rocking 효과를 고려하기 위한 값으로 백분율(%)로 표시되는데 축중(표준설계하중)에 대해서는 10%, 윤중(실주행하중)에 대해서는 20%를 적용

L : 세로보, 세로보가 없는 가로보, 주거더 및 트러스에 대해서는 각 지지점 중심간 거리(feet)로 취하며, 가로보, 세로보 현수재, 트러스의 부(副)사재, 가로보와 세로보의 지지부, 고가교의 기둥의 충격계수 산정 시에는 인접한 주거더, 세로보, 트러스 등의 길이 중에서 긴 길이(feet)로 취한다.

3.4 한국

3.4.1 표준열차하중

가. 기존선

현재 우리나라에서는 국유철도건설규칙에서 LS하중을 표준열차하중으로 채택하고 있는데 설계등급에 따라 LS-18과 LS-22로 구분하여 사용하고 있다. LS표준열차하중은 1894년 Thodor Cooper가 재창한 Cooper E형 표준 열차하중(Cooper series engine load)으로서 소리형 증기 기관차의 2량 중련 후미에 화차 또는 객차를 연결한 것으로 동륜의 축중이 18,144kg이며, 18ton의 정수만을 취하여 표시한 것이다. 여기서, L 은 Live load의 약자로서 기관차 동륜의 축중과 축거 관계를 나타내며, S 는 Special load의 약자로서 객화차중 특수 차량의 축중과 축거 관계를 나타낸다. 그림 8과 같은 표준열차하중은 교량을 설계할 경우 각종 선로에서 운행

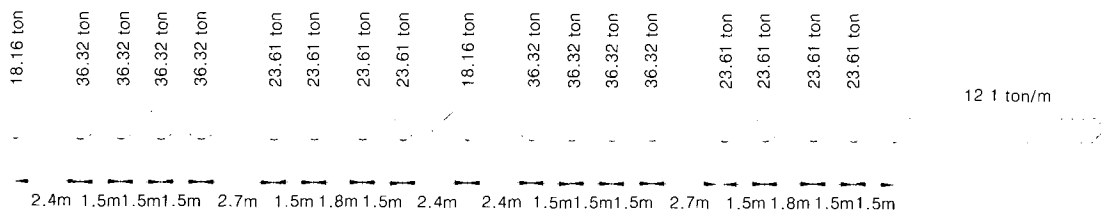


그림 7 AREA 표준열차하중(Cooper E 하중)



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----|----|----|----|----|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 등분포하중 |
| LS-18 | 9 | 18 | 18 | 18 | 18 | 12 | 12 | 12 | 12 | 9 | 18 | 18 | 18 | 18 | 12 | 12 | 12 | 12 | 6 t/m |
| LS-22 | 11 | 22 | 22 | 22 | 22 | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | 11 | 22 | 22 | 22 | 22 | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{22}{3}$ t/m |

| | | |
|-------|-------|-------|
| 축하중 | S 하중 | |
| 번호 | 1 | 2 |
| LS-18 | 22 | 22 |
| LS-22 | 242/9 | 242/9 |

그림 8 국철의 표준 활하중(LS 하중)

하게 될 열차하중 대신에 설계하중으로 L 및 S하중을 정한 것이며, Cooper E하중을 미터법으로 고쳐 근사한 정수만을 택한 것이다. LS하중이란 교량 설계와 같이 L하중과 S하중을 함께 고려한 경우를 말한다.

나. 고속철도

현재 경부고속철도의 표준열차하중은 그림 2와 같은 UIC-702에 제시된 UIC하중모델71(HL-25하중)을 사용하고 있다.

3.4.2 충격계수

가. 기존선

철도교 설계기준에 디젤기관차 및 전기기관차에 대하여 다음과 같이 충격계수를 제안하고 있는데, 이식은 미국 AREMA의 충격계수식에서 RE를 10%로 하고 feet를 m로 단위환산을 한 식과 같다.

$$L < 24(m) \text{인 경우 } 50 - \frac{L^2}{48},$$

$$L \geq 24(m) \text{인 경우 } \frac{180}{L-9} + 26$$

여기서,

L : 세로보, 세로보가 없는 가로보, 주거더 및 트러스에 대해서는 각 지지점 중심간 거리(m)로 취하며, 가로보, 세로보 현수재, 트러

서의 부(副)사재, 가로보와 세로보의 지지부, 고가교의 기둥의 충격계수 산정시에는 인접한 주거더, 세로보, 트러스 등의 길이 중에서 긴 길이(m)로 취한다.

나. 고속철도

고속철도교량에 대한 충격계수식은 UIC의 기준과 동일하다.

$$\phi_1 = \frac{0.96}{\sqrt{L_\phi - 0.2}} + 0.88$$

$$\phi_2 = \frac{1.44}{\sqrt{L_\phi - 0.2}} + 0.82$$

$$\phi_3 = \frac{2.16}{\sqrt{L_\phi - 0.2}} + 0.73$$

여기서,

L : 교량 및 부재의 경계조건에 따른 특성길이(m)

4. 각 국 설계기준의 비교 검토

4.1 거동한계 기준

제안된 각 국의 거동한계 기준들이 다양한 교량 형식과 경간길이, 속도대역별로 제시되어 있는 관계로 여기서는 국내 기존선의 차량운행속도대역인 140km/h 이하의 주행속도와 국내에 가장 많이 분

포하는 30m이하의 교량을 기준으로 하여 비교·검토를 하였다.

고유진동수 기준은 UIC 기준이 한국의 고속철도기준과 같기 때문에 UIC와 일본의 기준만이 비교대상이 된다. 그런데 일본의 경우에는 고유진동수의 하한기준만이 제시되어 있고, 경간길이가 $4m \leq L \leq 20m$ 인 경우에는 그 형태가 UIC의 하한기준과 같기 때문에 직관적인 단순비교만으로도 일본의 고유진동수 하한기준이 더 큼을 알 수 있고, 경간길이가 $20m \leq L \leq 100m$ 인 경우에는 간략한 계산을 통하여 경간길이가 50미만까지는 일본이 더 크게 나타나고, 50m이상부터는 UIC기준이 더 크게 나타남을 알 수 있었기 때문에 상세한 비교검토는 생략하였다. 그리고 거더의 진동가속도에 대한 기준은 UIC와 한국의 고속철도 기준에서만 제시하고 있는데, 그 기준이 동일하므로 비교검토를 생략하였다. 따라서, 본 절에서 처짐에 대한 한계만을 검토하였는데, 국내의 기존선의 대부분이 단순교이고 경간길이가 6m~30m 범위내에 대부분이 분포하므로 이 조건을 만족하는 항목을 추출하여 비교·검토를 수행하였다. 추출된 조건은 다음과 같다.

- UIC 기준
 - Case 1 : 1개~2개경간이 인접한 단순교, $L \leq 25m$, $V \leq 120$, 양질의 승차감 확보
 - Case 2 : 1개~2개경간이 인접한 단순교, $L \leq 25m$, $120 < V \leq 200$, 양질의 승차감 확보
- 일본 기준
 - Case 1 : 전차·내연동차 하중, 단순교, $0 < L \leq 50$, $100 < V \leq 130$
 - Case 2 : 전차·내연동차 하중, 단순교, $0 < L \leq 50$, $130 < V \leq 160$
- 미국 기준
 - 모든 경우에 동일한 기준 적용 : $L/640$
- 한국 기준
 - Case 1 : 기존선, 강거더교, $0 < L < 50$, $V \leq 130$
 - Case 2 : 기존선, 강거더교, $0 < L < 50$, $130 < V \leq 160$

표 5 각 국의 처짐기준 비교

| 구분 | UIC | | 일본 | | 미국 | 한국 | |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | Case 1 | Case 2 | Case 1 | Case 2 | | Case 1 | Case 2 |
| 처짐 기준 | L/350 | L/450 | L/800 | L/1100 | L/640 | L/800 | L/1100 |

표 5는 각각의 경우에 대한 처짐한계기준을 정리한 것인데 이로부터 한국과 일본의 Case 2가 처짐기준이 가장 엄격함을 알 수 있다.

4.2 정적 설계하중

4.2.1 표준 열차 하중

교량을 설계할 때 설계하중은 교량의 설계항목에 따라 최대의 응답을 발생시키게 재하되는데 각국의 설계하중들은 축중배치가 서로 상이할 뿐만 아니라 대상 교량의 경간길이에 따라 하중의 재하 범위가 달라지게 되므로 최대축중 크기의 단순비교로는 설계하중의 크기를 파악할 수가 없다. 따라서 정적설계하중의 상대적인 크기를 알아보기 위하여 국내 공용중인 6m, 9m, 12m, 15m, 22m, 24m, 그리고 30m의 경간길이를 갖는 판형교량들에 각국의 정적 설계하중을 재하시켜 절대최대처짐과 절대최대반력을 구하는 방법으로 경간길이에 따라 어떤 설계하중이 가장 큰 응답을 발생시키는가를 비교하여 보았다.

아울러 현재 국내에서 운행되고 있는 실주행차량하중의 크기와 비교하기 위하여 새마을 PMC 8량 및 16량 1편성, 디젤기관차 7400호대 1량 및 2량 견인시, 그리고 KTX 20량 1편성시 등 5가지 유형의 실주행차량하중에 의해 발생하는 응답도 같이 비교하여 보았다.

앞 절에서 언급한 여러 가지 하중들 중에서 미국의 E-80하중은 우리나라의 LS하중과 축배치가 같으면서 축중의 크기가 우리나라 설계하중에 비해서 지나치게 크기 때문에 제외하였으며, 일본의 설계하중은 동해도 신간선의 P하중에 대해서만 비교하였다.

가. 수치해석

정적수치해석은 상용 유한요소프로그램인 SAP2000N

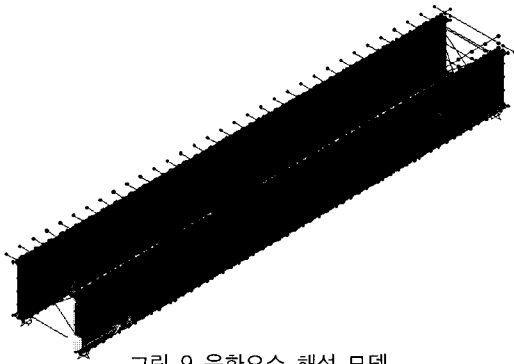


그림 9 유한요소 해석 모델

을 사용하였고, LS-22하중에 대한 철도교 표준단면을 사용하여 6m, 9m, 12m, 22m, 24m 그리고 30m의 경간길이를 갖는 6개 관형교를 대상으로 모델링 하였다. 해석에 사용한 열차하중은 유럽의 UIC 71(HL-25)하중, 일본의 동해도 신간선의 P하중, 한국의 LS-22와 LS-18 등의 4개의 표준설계

하중과 새마을 PMC 2종류(8량 1편성, 16량 1편성), 디젤기관차 2종류(1량 견인시, 2량견인시), 그리고 고속전철인 KTX(20량 1편성)의 5가지 유형의 실주행차량하중을 사용하였다.

다음의 그림 9는 해석대상 교량의 삼차원유한요소 모델의 예로서 복부판과 상하부 플랜지는 각각 Shell 요소 모델링을 하였으며 레일, 침목, 그리고 수직 및 수평 브레이싱은 각각 Frame요소로 모델링 하였다.

그림 10~그림 12는 해석에 사용된 실주행열차들에 대한 하중선도의 예이다. 그림 10은 새마을 PMC의 하중선도(8량 1편성시)를 나타낸 것이고, 그림 11은 디젤기관차에 대한 하중선도(디젤 1량 견인)를, 그리고 그림 12는 고속전철 KTX(20량 1편성)에 대한 하중선도를 나타낸 것이다.

나. 검토

수치해석 결과 각각의 하중에 대하여 구조물의

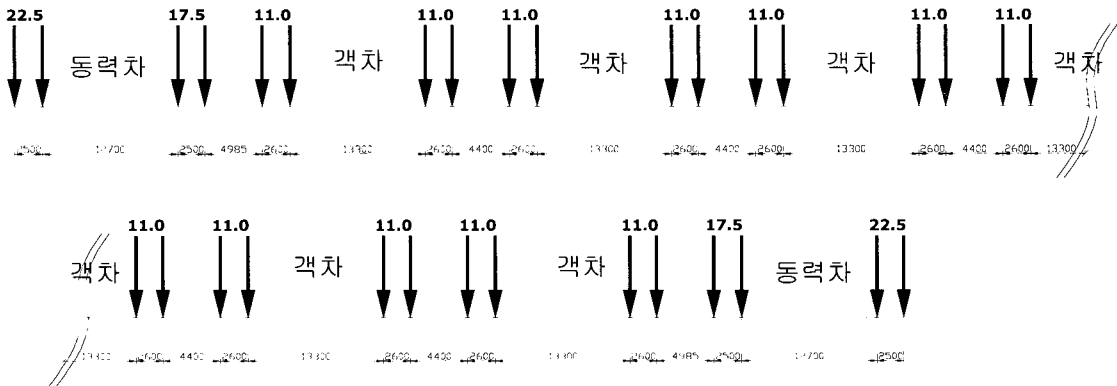


그림 10 PMC 새마을 열차 하중선도(8량 1편성)

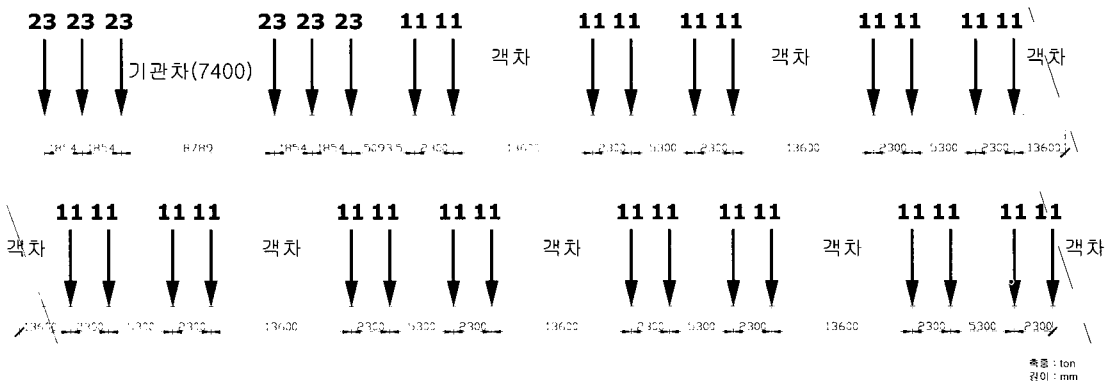


그림 11 디젤 기관차(7400호대) 하중선도(디젤1량 견인)

축중 : ton
간이 : mm

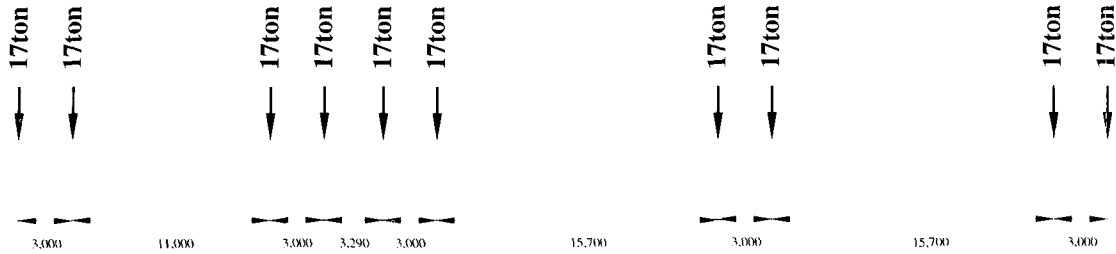


그림 12 KTX 하중선도(20량 1편성시)

중앙부 절대 최대 처짐은 표 6, 그림 13과 같으며, 지점부에 발생하는 최대 반력은 표 7과 그림 14와 같은 결과를 보여주고 있다.

중앙부의 최대 처짐은 대부분의 지간길이에 대하여 HL-25 하중에서 가장 크게 발생하였으며 30m 지간의 경우는 LS-22하중에서 3%정도 큰 처짐을 나타냈다. 새마을 PMC 16량 편성시 처짐은 12m, 15m 지간길이인 경우 외에는 모두 KTX하중에 의한 처짐보다 대부분 약 14%~20% 더 큰 처짐을 발생하였으며, 지간길이 6m인 경우에는 43%까지 더 큰 처짐이 발생되었다. 또한 디젤기관차 2량 편성시 발생하는 처짐의 크기는 LS-18하중 크기에서 발생하는 처짐과 유사하며 그 차이는 10%이내의 범위 내에서 발생되었다. 디젤기관차의 경우 지간길이 9m까지는 기관차 1량 편성시의 처짐과 2량 편성에 의한 처짐이 동일하였으며 12m이상의 지간에서는 디젤 2량에 의한 처짐이 최대 20%정도 크게 발생하였다. 새마을 PMC는 12m까지는 8량 편성과 16량 편성에서 처짐의 크기가 같이 나왔으나 지간길이 22m이후에는 16량 편성시 8량 편성보다 17%~46%정도 크게 발생되었다.

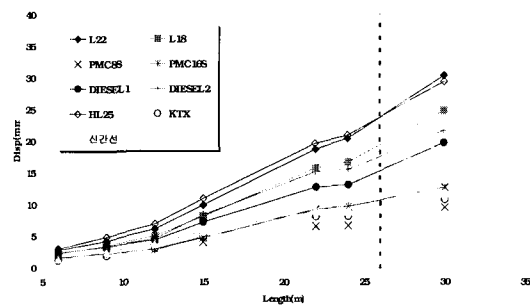


그림 13 경간길이에 따른 중앙부 최대처짐 비교

경간길이에 따른 최대 지점반력은 새마을 PMC 16량 편성시 지간길이 9m이내에서는 8량 편성과 비교하여 약 0.5% 이내의 범위로 거의 같은 크기를 나타내었으나 12m이후부터는 8%~24%정도 더 큰 반력이 발생되었다. 디젤기관차의 경우는 지간길이 15m이내에서는 약 10%이내의 범위내에서 기관차 1량 편성과 2량 편성시 반력의 크기가 유사하게 나타내었으나 22m 이후부터는 약 11%~13% 정도 2량 편성시 더 크게 발생되었다. HL-25하중은 9m의 경우 LS-22하중보다 약 12%정도 더 큰 반력을 나타내었으나 그 차이가 지간길이가 길어

표 6 하중종류별 중앙부 최대처짐 비교

| 하중 L(m) | L22 | L18 | PMC8 | PMC16 | 디젤 1 | 디젤 2 | HL25 | KTX | 신간선 |
|------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 6 | 2.82 | 2.31 | 1.64 | 1.64 | 2.41 | 2.41 | 3.01 | 1.15 | 1.38 |
| 9 | 4.22 | 3.46 | 2.25 | 2.25 | 3.32 | 3.32 | 4.84 | 1.91 | 2.51 |
| 12 | 6.1 | 4.99 | 2.86 | 2.86 | 4.33 | 4.56 | 6.89 | 3.01 | 3.73 |
| 15 | 9.95 | 8.14 | 4.03 | 4.73 | 7.21 | 8.35 | 10.96 | 4.88 | 5.69 |
| 22 | 18.79 | 15.83 | 6.61 | 9.33 | 12.79 | 15.21 | 19.69 | 8.15 | 9.06 |
| 24 | 20.41 | 16.7 | 6.64 | 9.71 | 13.1 | 15.52 | 20.92 | 8.12 | 8.9 |
| 30 | 30.35 | 24.83 | 9.5 | 12.67 | 19.69 | 21.65 | 29.39 | 10.77 | 11.7 |

표 7 경간길이에 따른 지점부 최대반력 비교

| 하중 L(m) | L22 | L18 | PMC8 | PMC16 | 디젤 1 | 디젤 2 | HL25 | KTX | 신간선 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6 | 30.15 | 24.67 | 19.76 | 19.76 | 26.24 | 26.24 | 33.46 | 13.88 | 16.40 |
| 9 | 37.79 | 30.92 | 21.03 | 21.14 | 30.22 | 30.73 | 42.46 | 18.39 | 23.36 |
| 12 | 41.73 | 34.15 | 21.60 | 23.45 | 33.42 | 34.95 | 46.52 | 20.62 | 24.80 |
| 15 | 52.10 | 42.63 | 23.65 | 28.61 | 40.24 | 44.13 | 57.40 | 24.69 | 29.16 |
| 22 | 66.25 | 54.20 | 27.40 | 34.14 | 46.40 | 52.52 | 71.51 | 28.71 | 32.69 |
| 24 | 74.00 | 60.55 | 29.56 | 35.97 | 51.73 | 57.74 | 77.92 | 30.93 | 35.47 |
| 30 | 87.39 | 71.50 | 33.01 | 38.79 | 59.01 | 66.94 | 89.82 | 34.76 | 41.27 |

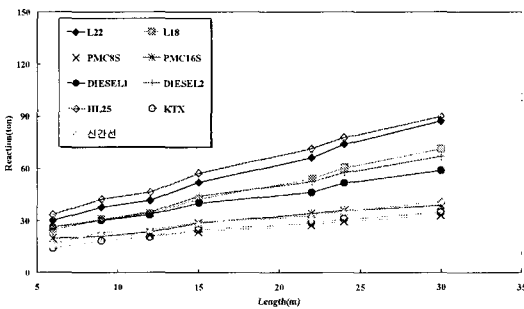


그림 14 경간길이에 따른 지점부 최대반력 비교

질수록 줄어들고 있다. KTX하중에 의한 반력은 지간길이 12m 이내에서는 PMC 8량 편성시보다 반력이 작게 나타났으나 15m 이후에는 최대 약 5%까지 더 크게 발생되었다. 디젤기관차 2량 편성시와 LS-18하중 작용시 결과를 비교하면 6m와 12m의 지간길이인 경우 5% 내외의 차이를 보여 거의 유사한 반력을 나타내었다.

결론적으로 지간길이 6m부터 24m까지는 HL-25하중재하에 의한 최대처짐이 LS-22하중 재하보다 약 10%미만으로 크게 발생하였다. 또한 최대 지점반력은 전반적으로 LS-22하중 재하보다 HL-25하중에 의해 더 크게 발생함을 확인하였다. 새마을 PMC 16량 1편성으로 인한 처짐이 12m와 15m 경간을 제외하고는 KTX 하중 재하시보다 14~20% 크게 발생하였다. 디젤기관차 2량 견인(중련운행)시 반력과 처짐의 크기가 LS-18하중과 거의 동등한 수준의 값들을 나타내었다. 설계기준상의 하중과 실 운행열차하중에 대한 판형교의 정적거동에 대한 하중효과 비교결과로부터 하중효과를 순서대로 정리하면 HL-25, LS-22, LS-18, 디젤 2량 견인

시, 디젤 1량 견인시, PMC 16량 1편성시, KTX 및 PMC 8량 1편성시와 같음을 확인하였다. 이러한 정량적인 비교로부터 기존선 판형교의 정적구조안전성 평가시 PMC 및 KTX와 같은 여객전용편성 하중에 비하여 약 40~50%큰 하중효과를 나타내는 디젤 2량 견인에 의한 하중효과가 지배적인 요소가 된다고 할 수 있다.

4.2.2 충격 계수

충격계수의 크기도 각 국가의 충격계수식의 형상이 서로 상이하므로 직접 비교가 불가능하여 열차하중의 비교에서와 마찬가지로 각각의 충격계수식에 국내에 공용되고 있는 표준단면 판형교의 길이를 대입하여 산정하는 방식으로 비교하였다. 한국과 미국은 규정은 서로 같으므로 한국의 기존선에 적용하는 철도교 설계기준의 규정과 UIC, 일본기준과 비교하였다. UIC 기준에서 적용한 식은 표준궤도를 갖는 본선의 휨모멘트를 계산할 때 사용하는 Φ_2 식을 사용하였고, 일본기준을 적용할 때는 차량의 종류를 내연·전기기관차로 가정하여 최고속도를 160km/h로 하였다. 표 8과 그림 15는 설계기준별로 경간길이-충격계수를 나타내고 있다. 이 결과로부터 한국의 철도교 설계기준에 제시된 충격계수 산정식이 가장 큰 충격효과를 반영함을

표 8 각 국가의 충격계수 비교

| 경간길이 | 6m | 9m | 12m | 15m | 18m | 22m | 24m | 30m |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| UIC | 0.460 | 0.334 | 0.261 | 0.212 | 0.176 | 0.141 | 0.126 | 0.093 |
| 일본 | 0.473 | 0.430 | 0.402 | 0.383 | 0.368 | 0.352 | 0.345 | 0.329 |
| 한국 | 0.493 | 0.483 | 0.470 | 0.453 | 0.433 | 0.399 | 0.380 | 0.346 |

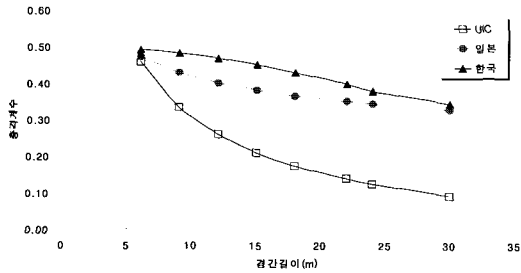


그림 15 각 국의 충격계수 비교

알 수 있고 UIC의 기준이 가장 작음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 고에서는 대륙간 철도연결에 따른 우리나라 철도교량의 설계수준을 알아보기 위하여 유럽과 일본, 미국 등에서 적용하고 있는 철도교량의 설계 기준을 검토하여 교량의 거동한계기준과 설계하중에 대한 비교·고찰을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 각 국에서 적용하고 있는 교량의 거동한계기준을 분석해 본 결과, 유럽의 설계기준이 고유진동수, 진동가속도, 처짐 등에 대해 가장 자세하게 한계기준을 제시하고 있는데, 국내의 설계기준에서도 보다 많은 연구를 통하여 유럽수준의 상세한 거동한계기준을 제시하여 차량의 주행 안전성과 승차감 그리고 구조물의 안전성을 확보할 필요가 있음을 알 수 있었다. 즉 교량의 합

리적인 동적효과의 반영을 위한 충격계수의 산정에 고유진동수항을 포함할 필요가 있으며, 유도상교량의 도상안전성을 확보하기 위한 고유진동수 한계 등이 도입될 필요가 있다. 교량의 처짐한계기준은 국내의 규정이 가장 엄격한데, 승차감과 주행안전성의 연계검토를 통하여 보다 합리적으로 제시하는 것이 경제적인 교량의 설계를 위해 필요할 것으로 생각된다.

2. 철도교량의 설계에 적용되는 표준설계활하중의 비교결과, 유럽기준의 HL-25 하중이 가장 큰 하중을 반영하고 있음을 알 수 있었고, 국내 기준선의 1급선과 2급선에 적용하고 있는 L-22하중은 HL-25 하중보다는 작지만 그 차이가 미소하고 충격계수에 대한 검토 결과, 국내에 적용하고 있는 충격계수가 UIC나 일본의 충격계수에 비해 크게 산정되고 있는 상황을 고려할 때 현재 국내에서 설계되고 있는 교량의 설계하중수준은 유럽의 설계하중수준과 비슷한 수준으로 반영되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 현재 적용되고 있는 국내의 표준설계활하중은 1900년대 초반의 증기기관차의 설계하중이고 충격계수 또한 미국의 규정을 원용하여 사용하고 있는 실정이므로 이에 대한 자세한 검토를 통하여 국제규격에 맞는 표준설계활하중과 교량의 진동특성이 고려된 합리적인 충격계수의 산정법이 보다 많은 연구를 통하여 도입될 필요가 있을 것으로 생각된다. 