

철도 PSC빔교의 하중횡분배 거동에 관한 고찰

Investigation of the Behavior of Lateral Load Distribution of Railway PSC Girder Bridges

정찬목

우송대학교 철도건설시스템학과

Chanmook Jung(cmjung@wsu.ac.kr)

요약

PSC교량형식은 철도교에서 소규모 지간에 가장 많이 사용되고 있는 교량형식이다. PSC교에서는 통상적으로 4~5개의 주형이 설치되고, 공용중인 PSC 교량은 주형의 하중횡분배를 위하여 지간당 3개의 중간 가로보가 설치되어 왔다. 본 논문에서는 가로보의 설치개수가 PSC 철도교의 횡분배에 미치는 영향을 간편한 해석방법인 격자해석법과 정밀한 유한요소법을 이용하여 비교검토하였다. 해석결과 효율적인 하중횡분배를 위해서는 지간중앙부에 적어도 한 개의 가로보 설치하는 반드시 필요한 것으로 나타났다. 이러한 가로보 설치에 따른 하중 횡분배효과는 지간내에 설치되는 중간가로보의 설치 개수가 증가하여도 크게 차이가 나지 않아 시공성 및 경제성 측면에서 PSC 교의 중간가로보는 1개만 설치하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

■ 중심어 : | PSC 철도교 | 격자해석 | 유한요소해석 | 하중의 횡분배 |

Abstract

This paper presents results from the theoretical analysis of the lateral load distribution for a railway bridge designed with PSC girders which is one of most popular types of bridge in Korea. Typically, 3 sets of intermediate cross beams within a span have been installed for lateral load distribution. In this paper, the effect on the lateral load distribution by the number of intermediate cross beams were examined by both simple grillage analysis and finite element method. This study showed that at least, one set of cross beams at midspan should be needed to ensure the proper load distribution. However, the effect of cross beams on the load distribution becomes not significant though more than one set of cross beams are installed. Therefore, only one set of cross beams at midspan is recommended for constructibility and economic efficiency.

■ keyword : | Composite Bridge | Finite Element Method | Grillage Analysis | Load Distribution |

I. 서론

거더와 콘크리트슬래브로 이루어진 합성형교량에서

거더와 거더사이에 보 형태의 가로보를 설치하는 이유는 차량하중, 또는 열차하중이 위치하는 거더의 하중부담력을 인접하는 주변거더로 하중의 일부가 분배되는

것을 위해서이다. 일반적으로 PSC(Prestressed Concrete) 거더교의 설계시 횡방향 하중분배는 거더 간격을 단순 보로 가정하여 분배하는 관용법, 격자해석법, 유한요소 해석법 등이 설계자의 편의에 따라 설계에 적용되고 있다. 도로교에서는 가로보의 횡하중분배에 대한 영향에 대해서는 많은 연구결과가 축적되어 있으나, 철도교에서는 지금까지 가로보의 횡분배에 미치는 관련 연구가 거의 없는 실정이며, 현장에서는 도로교의 연구성과를 준용하여 가로보를 설계하는 실정이다.

그러나, 도로교에서의 하중과 철도교에서의 횡하중 분배는 도로교 및 철도교가 받는 하중크기 뿐만 아니라, 하중의 형태(열차의 편측재하측면)가 상이하므로 이를 고려한 하중횡분배를 설계에 반영하는 것이 필요하다. 과거에는 25m 단순경간을 기준으로 중간가로보를 3개 설치하였으나, 최근에는 중간가로보를 1개소로 설계하는 경향이 많다. 그러나, 이러한 변화는 철도하중의 특수성을 고려한 이론적 결과에 근거하기 보다는 도로교에서의 연구결과를 준용한 것으로 판단된다. 특히 철도교량은 도로교량에 비하여 열차궤도와 관련된 자갈도상, 레일등의 고정하중이 재하되고 있고 규모가 큰 열차하중이 재하되므로 일반적으로 매우 큰 강성의 거더단면이 사용되고, 열차하중이 편측에 재하되는 경우가 많으므로, 이러한 철도하중의 특수성을 고려하여 하중의 횡분배를 정확하게 계산하고, 이에 근거한 가로보 설계의 적절한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 활하중횡분배에 대하여 지금까지 많은 연구가 이루어진 도로교와 달리 철도교 형식중 가장 많이 사용되는 교량형식인 PSC 철도교를 대상으로 격자이론에 근거하여 횡분배계수를 산출하고, 산출된 횡분배계수의 신뢰성 확보를 위하여 동일한 교량으로 3차원 입체모델링을 수행하여 유한요소해석에 의한 부재력을 산출한 후 횡분배계수를 적용하여 산출된 부재력과의 비교검토를 수행하였다. 현재 공용중인 대다수의 PSC 철도교는 횡하중분배를 위하여 시간내에 3개의 중간가로보를 설치하고 있는 바, 중간가로보의 개수가 거더의 횡분배에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 중간 가로보의 개수를 1, 3, 5개로 변화시키면서 횡방향 분배율을 계산하고 동일한 조건으로 유한요소해석 결과와

비교하여 적절한 가로보 설치개수에 대하여 고찰하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 활하중 분배에 대한 기존 연구성과에 대해 기술하고, 3장에서는 하중횡분배에 대한 기본이론을 소개하고, 4장과 5장에서는 각각 격자이론 및 3차원 유한요소해석에 의한 해석결과에 근거하여 PSC 철도교의 가로보설계에 대한 합리적인 안을 제시하고, 마지막 6장에서 본 논문의 결과 및 향후 연구방향 제시로 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

도로교의 횡하중분배에 대한 연구동향을 보면, 1980년대 중반 미국 교통연구원(National Research Council of the Transportation)은 교량에 있어서 차량하중 분배에 따른 기준을 제시하기 위하여 NCHRP Project 12-26를 수행하여, NCHRP Project 보고서가 1988년에 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials) LRFD(Load and Resistance Factor Design) 설계기준으로 채택되었다. 1991년에 김대호는 횡분배 해석을 통하여 가로보의 강도가 주거더에 미치는 영향을 검토하여 가로보의 강도는 거더 강도의 1/2 정도가 바람직 한 것으로 검토하였다[1]. 1994년에 김웅상은 RC(Reinforced Concrete) T형 교량의 가로보를 설치하여 보강한 교량의 가로보 설치로 인한 고정하중 증가로 3%의 변위가 증가하였으나 활하중을 고려할 때 15~23%의 수직 변위가 감소하며 수직응력은 9~21% 감소 효과가 있는 것으로 연구하였다[4]. 2001년에 이호근은 가로보의 설치 개수와 위치 및 사용재료를 서로 다르게 하여 실험한 결과 가로보 설치로 인한 횡분배 효과는 하중이 외측 거더에 작용하는 경우가 내측 거더에 작용하는 것보다 효과가 크며 중간 가로보가 없는 시험체에 비하여 외측 거더의 경우 10.7%, 내측거더의 경우 6.5%의 횡분배 성능이 향상된 것으로 연구하였다[5]. 2006년 윤동용은 압연형강거더교의 가로보의 형식이 활하중 횡분배에 미치는 영향을 검토하여 강교의 경우 가로보의 형식이 활하중횡분배에는 큰 영향이 없으므로, 시공성 및 경제성을 고려하여 결정하는 것이 바람직하다고 제시하였다[7]. 또한 정

용원은 2주형 소수강거더 연속교의 활하중분배에 대하여 주형의 간격, 슬래브의 두께, 가로보의 간격등이 하중횡분배에 미치는 영향에 대하여 연구하였다[8]. 도로교에서는 가로보의 횡하중분배에 대하여, 가로보의 개수, 가로보의 형태, 주형과의 집합위치 등 많은 연구결과가 축적되어 있으나, 철도교에서는 지금까지 가로보의 횡분배에 미치는 관련 연구가 거의 없는 실정이며, 현장에서는 도로교의 연구성과를 준용하여 가로보를 설계하는 실정이다.

III. 교량의 횡분배이론

거더와 콘크리트슬래브로 이루어진 합성형교량은 주형과 가로보로 형성되는 격자구조로 구성되어 있다. 일반적으로 거더와 거더사이에 보 형태의 가로보를 설치하는 이유는 통상적으로 하중이 위치하는 거더의 하중부담력을 인접거더로 분배시키는 역할을 위해서이다. 모든 교량은 가설후 사용시에 거더, 바닥판, 가로보 등의 구조체 전체가 이루는 강성에 의해 하중을 지지한다. 한편, 일반 설계에서 많이 사용되는 관용설계법에서는 [그림 1]에서 보여지는 것처럼, 거더위의 슬래브를 힌지로 처리하여 콘크리트슬래브와 거더, 그리고 가로보에 의한 연결성을 무시하고, 하중분배를 고려하지 않게 된다[2]. 이러한 관용설계법은 해석은 간단하나 실제의 거동에 적합하지 않고 특정거더의 부담력을 과도하게 산정하여, 과다설계를 유도하고, 사용시 내하력 또는 안전도가 균일하지 못하게 되는 단점이 있다.

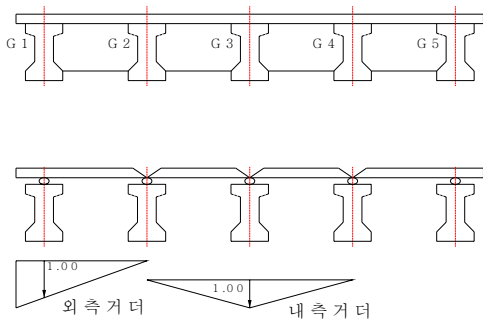


그림 1. 합성형교 구조 및 관용설계법

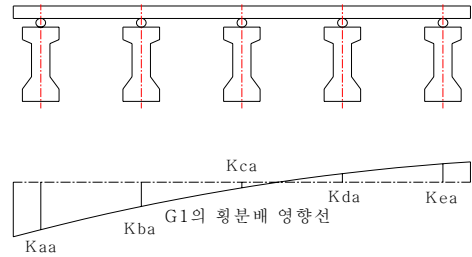


그림 2. 실제 하중횡분배 영향선

실제의 구조에서는 바닥판, 가로보등이 연속되어 있고 거더와 연결되어 거더의 비틀림 강성이 유효하므로 기본 구조는 [그림 2]와 같이 하중횡분배가 일어난다고 가정할 수 있다.

이러한 실제 거동에 가까운 하중횡분배 영향선을 구하는 대표적인 이론해석방법이 격자구조해석이다. 격자구조해석에서는 교축종방향으로는 슬래브와 거더의 연결성을 인정하여 합성단면으로 처리하고, 횡방향으로는 종방향 합성단면과 가로보가 서로 연결된 격자구조로 모델링을 한다. 하중의 횡분배는 시간과 폭원의 비, 거더의 갯수, 거더의 간격, 거더의 휨강성 및 비틀림 강성, 가로보의 배치 및 휨강성 등의 영향을 받는다. 교량의 하중 횡분배에 대한 계산방법으로는 레온하르트와 홉벨그의 빔이론 방법등이 일반적으로 널리 사용되고 있다[3].

레온하르트와 홉벨그의 이론에 의하면 격자빔의 횡방향 하중분포는 주형의 휨강도와 가로보의 휨강도의 비에 의해 정해진다. 하중분배의 정도를 표시하는 지표로서는 휨격자강도 z 가 사용되며, 이 값은 주형의 지간 (l)과 주형의 간격(a), 주형의 단면2차모멘트(I_G)와 가로보의 단면2차모멘트의 비(I_C)에 의하여 결정된다.

$$z = \left(\frac{l}{2a}\right)^3 \frac{I_C}{I_G} \quad (\text{식 1})$$

IV. 격자해석

1. 교량의 제원 및 해석조건

본 연구에 적용하는 교량의 제원은 철도교 복선 25m PSC거더교이다. 일반철도 복선의 경우 폭원 10.9m가 표준적으로 적용되고 있어 본 연구의 해석시 10.9m를 적용하였으며 주형간격은 최근 한국철도시설공단의 설계지침[6]에 따라 거더간격 2.0m의 5주형 교량으로 단면을 구성하였다. 25m 경간간의 표준거더를 고려하여 주형의 높이는 2.35m를 적용하였으며, 하부 플랜지 폭원은 68cm이며 복부두께는 20cm이다. 가로보는 30cm, 2.0m의 높이를 적용하였다. 또한 고정하중으로 PSC 거더와 바닥판 및 궤도, 도상, 난간의 하중을 재하하였으며 활하중의 경우 보도하중과 LS-22열차하중을 복선으로 재하하였다. 충격계수는 철도교설계기준으로부터 구하였다[6].

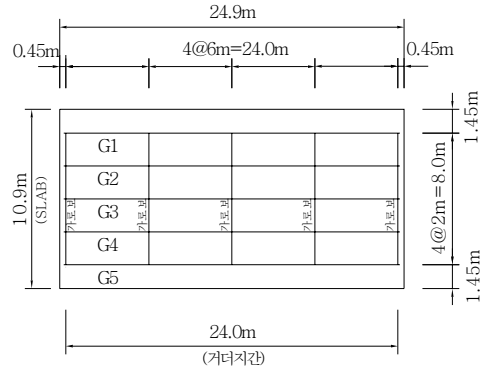


그림 3. 거더의 격자구조(중간가로보 3개일 경우)

격자해석을 위한 해석조건은 다음과 같다.

- 계산지간 = 24 m
- 거더의 갯수 = 5 개
- 거더의 간격 = 2 m
- 가로보의 개수
 - 단부 가로보: 양단에서 1개
 - 중간 가로보: 1개, 3개, 5개 사용
- 거더와 가로보의 강성비($\frac{I_C}{I_G}$) = 0.6567

$$i(\%) = 24 + \frac{240}{l - 0.6} \quad (\text{식 2})$$

바닥판의 두께는 바닥판의 내구성을 확보하는 관점에서 280mm를 적용하였다. 철도교의 경우 외측캔틸레버부는 연석 및 공동구가 설치되고 보도하중이 재하되는 구조로 큰 활하중이 재하되지 않으므로 본 연구에서는 1.45m를 적용하여 검토하였으며 거더의 배치는 캔틸레버 부분을 제외한 폭원을 균등 분배하여 2.0m 간격으로 배치하여 검토하였다. [그림 3]에 격자구조를 포함한 교량의 전체적인 제원을 나타내었다. 가정된 단면의 단면 특성은 바닥판이 시공되어 하중으로만 작용하는 합성전의 상태와 바닥판이 경화되어 PSC 거더와 합성작용을 하게 되는 합성 후의 상태에 따라 구분되며 각각 산출된 단면2차모멘트는 합성전과 합성후 각각 0.614 m^4 , 1.196 m^4 이다.

PSC 거더교의 격자해석시 PSC 거더가 바닥판과 합성작용을 하기 전까지는 가설시의 하중을 포함하는 모든 하중이 PSC 거더에 직접 작용하고, 바닥판이 강도를 발현하여 합성 작용이 이루어지면, 이후 추가되는 고정하중 및 활하중은 격자이론의 분배계수에 따라 분배된다. [그림 3]은 중간가로보가 3개로 이루어져 있는 현재 공용중인 PSC 철도교를 모사하고 있다.

2. 격자해석 결과

본 연구에서 격자이론을 적용하여 산출된 거더 개수에 따른 횡분배계수는 [표 1]과 같다. 가로보 갯수를 1개, 3개, 5개를 설치하였을 때의 각 거더의 횡분배 계수의 변화는 [그림 4][그림 5]와 같다. 외측거더인 G1의 경우 가로보를 5개 설치시 가로보 1개 설치시보다 분배효과가 0.9%~1.7%의 향상이 있으며 내측 거더인 G2, G3는 0.2%~0.8%의 분배효과의 향상이 있는 것으로 나타났다. 전체적으로 거더 개수의 증가로 인한 분배효과는 0.4%~2.0% 정도로 나타났다. 철도 PSC 거더 교 설계시 통상적으로 적용되고 있는 격자해석방법에 따른 이러한 결과는 가로보의 개수가 많고, 가로보의 강성이 클수록 횡분배의 효과는 양호하게 발생하나 가로보의 개수가 1개 이상이면 그 차이는 매우 적은 것으로 나타나는 것을 알 수 있다.

표 1. 가로보개수 변화에 따른 횡분배계수

구분		G1	G2	G3	G4	G5	비고	
가로보의 갯수	1	G1	0.643	0.401	0.185	-0.002	-0.174	
		G2	0.364	0.295	0.204	0.102	-0.002	
		G3	0.168	0.204	0.222	0.204	0.168	
	3	G1	0.632	0.408	0.198	0.003	-0.184	
		G2	0.370	0.290	0.198	0.101	0.002	
		G3	0.179	0.198	0.208	0.198	0.179	
	5	G1	0.628	0.410	0.202	0.004	-0.188	
		G2	0.372	0.288	0.196	0.100	0.004	
		G3	0.184	0.196	0.203	0.196	0.184	

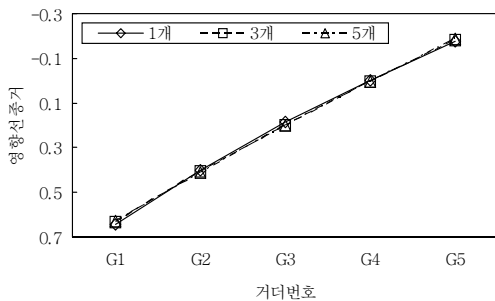


그림 4. 가로보 개수 변화에 따른 G1의 횡분배

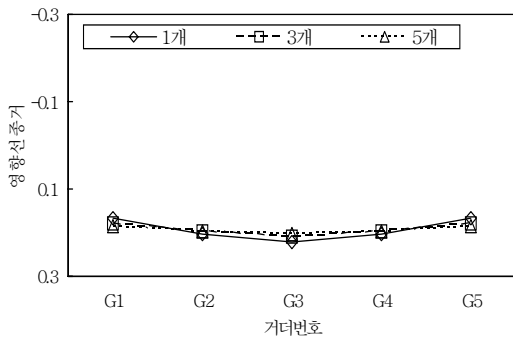


그림 5. 가로보 수량 변화에 따른 G3의 횡분배

V. 유한요소해석

1. 유한요소 모델링

본 연구에 적용한 해석 프로그램은 구조물해석 전용

프로그램인 MIDAS Civil 2000을 이용하여 해석하였다. 유한요소 해석시 상부 바닥판은 PLATE요소로 모델링하였고 하부 거더는 BEAM요소로 모델링하였다. 가로보의 개수를 변수로 하여 거더의 하중분배 상태와 부재력의 증감을 비교 분석하였다. [그림 6]은 중간가로보가 3개 설치된 경우의 유한요소 해석모델을 대표적으로 나타낸 것이다.

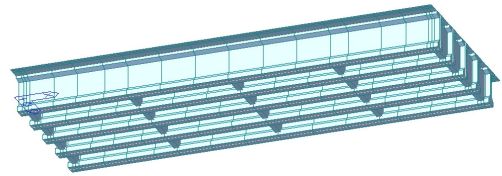


그림 6. 유한요소해석 모델(중간 가로보 3개인 경우)

2. 유한요소해석 결과

격자해석에 의해 산출된 부재력과 정밀한 유한요소 해석을 통해 산출된 부재력의 신뢰성을 확보하기 위하여 두가지 결과를 비교하여 분석하였다. 외측거더 G1과 내측거더 G3의 중앙부모멘트를 산출하였으며 결과는 [표 2]와 같다. 외측거더 모멘트의 경우 격자해석 결과와 2% 이내로 적게 나타나 격자해석의 결과를 적용하여도 문제가 없는 것으로 나타났으나, 내측거더의 경우 유한요소해석 결과가 15%정도 적게 나타났다. 특히 활하중의 경우 격자해석 결과와 22%의 차이가 발생하는데 이는 격자해석시 내측거더의 영향계수가 다소 안전측으로 규정되고 있음을 나타내며 나타난 부재력의 크기가 격자해석 결과보다 적으므로 구조물의 안전에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 철도 PSC 거더고 설계시 통상적으로 적용되고 있는 격자해석에 의한 횡분배계수가 다소 보수적임을 의미한다.

또한, 유한요소해석에 의하여 동일한 하중조건 하에서 중간가로보의 설치하지 않았을 경우와 1개, 3개, 5개로 변화시켜 가면서 각 거더에 발생한 부재력을 비교하여 가로보의 횡분배효과를 분석하였다. 각 거더에 발생된 부재력의 총계를 각 거더별 부재력으로 나누어 가로보에 의한 횡분배효과를 산정하였다. [그림 7] 및 [표 3]에 합성후 활하중에 대한 부재력, 총방향 부재력을 거

더별로 정리하고 분배율을 계산하여 나타내었다.

표 2. 격자해석과 유한요소해석 결과 비교 (중간 가로보 3개인 경우)

구 분		격자해석 결과 (kN·m)	유한요소해석 결과 (kN·m)	비 고
외측거더 (G1)	고정하중 모멘트	5545.3	5439.0	-1.9%
	활하중 모멘트	3999.5	3954.0	-1.1%
	총 계	9544.7	9393.0	-1.6%
내측거더 (G3)	고정하중 모멘트	5505.1	4974.0	-9.6%
	활하중 모멘트	4055.6	3130.0	-22.8%
	총 계	9560.7	8104.0	-15.2%

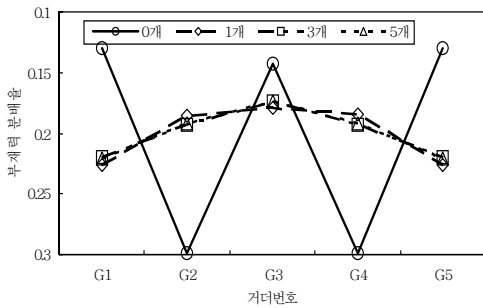


그림 7. 가로보 변화에 따른 활하중의 횡분배

표 3. 열차하중 재하시 활하중에 의한 해석결과

가로보 갯수	G1	G2	G3	G4	G5	총 계	
0개	부재력	2465	5686	2713	5690	2475	1903
	분배율	0.130	0.299	0.143	0.299	0.130	
1개	부재력	4141	3406	3279	3384	4142	18352
	분배율	0.226	0.186	0.179	0.184	0.226	
3개	부재력	3954	3472	3130	3462	3954	17972
	분배율	0.220	0.193	0.174	0.193	0.220	
5개	부재력	3934	3428	3103	3427	3935	17827
	분배율	0.221	0.193	0.174	0.192	0.221	

철도교의 특성상 편측에 열차하중이 작용되는 경우가 더 많으므로 활하중 편재하시의 부재력 변화도 검토하였으며 이에 대한 결과는 [표 4]와 같다. 가로보의 개수를 달리하여 구조해석을 수행한 결과 중앙부에 가로보를 설치하지 않았을 경우보다 가로보를 설치한 경우

가 하중분배가 개선되는 효과가 나타났다. 특히 [표 3]에 나타난 바와 같이, 활하중의 경우 중앙부에 가로보를 설치하기 이전보다 1개소 설치시 G2 및 G4 거더에서 10~11%의 하중분배 효과가 발생하였으며 부재력으로 나타낼 때 2200kN·m 내외의 모멘트 분산효과가 발생하였다.

특히 열차하중이 편측에만 재하되는 경우 [표 4]에서 처럼 G2 거더에서 28% 내외의 하중분배 효과가 발생하였다. 따라서 시간 중앙에 가로보를 설치하지 않으면, 열차하중을 받는 거더가 집중적으로 하중을 부담하는 것을 알 수 있다. 가로보의 개수를 변화시켜가면서 구조해석을 수행한 결과 가로보의 개수가 1개에서 3개, 5개로 증가함에 따라 활하중에 대하여 횡분배율이 미세하게 개선되는 효과는 있지만, 고정하중의 증가에 따른 부재력 증가를 감안할 때 횡분배 효과는 크지 않은 것으로 나타났다[그림 8]. 따라서 고정하중과 활하중이 동시에 작용하는 경우 가로보 1개 설치시 분배효과와 3개 이상 설치시 하중의 횡분배효과 차이는 크지 않다고 판단된다.

표 4. 열차하중 편재하시 활하중에 의한 해석결과

가로보 갯수	G1	G2	G3	G4	G5	총 계	
0개	부재력	2463	5640	1686	102	213	10104
	분배율	0.244	0.558	0.167	0.010	0.021	
1개	부재력	4141	2863	2135	1239	117	10495
	분배율	0.395	0.273	0.203	0.118	0.011	
3개	부재력	3903	2942	2016	1109	202	10172
	분배율	0.384	0.289	0.198	0.109	0.020	
5개	부재력	3861	2868	1996	1096	242	10063
	분배율	0.384	0.285	0.198	0.109	0.024	

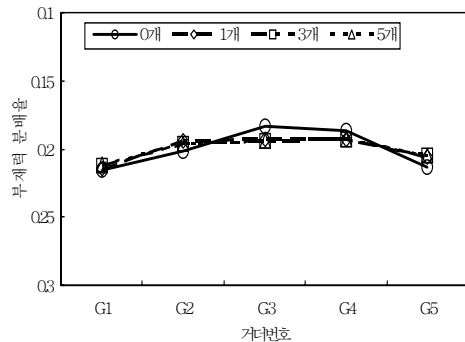


그림 8. 가로보 변화에 따른 고정하중의 횡분배

VI. 결론

본 연구에서는 철도 PSC 거더교의 가로보 설치로 인한 횡분배 효과를 연구하기 위하여 격자이론에 의한 횡분배 해석과 유한요소해석을 실시하였으며 결과에 대한 비교분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 격자이론을 이용한 횡분배 해석결과와 유한요소 해석의 결과를 비교한 결과 외측거더의 경우 유사한 부재력이 발생하나 내측거더의 경우 유한요소 해석이 격자해석 결과에 비해 약 15% 부재력이 적게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 격자해석시 내측거더의 영향계수가 다소 안전측으로 규정되고 있음을 나타낸다. 이러한 결과는 철도 PSC 거더교 설계시 통상적으로 적용되고 있는 격자해석 방법은 충분한 안정성을 확보하고 있다고 판단된다.
- 2) 유한요소해석 결과, 철도 PSC 거더교의 경우, 중앙부 가로보를 설치하지 않은 경우에 비해 가로보를 설치한 경우가 하중 횡분배 개선효과는 발생하나 1개소 이상의 가로보 설치시 하중분배효과는 크게 개선되지 않는 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구가 철도교 PSC거더교 가로보의 횡분배 영향에 수치적인 근거로 제시될 수 있을 것으로 판단되며 추후 SOLID 해석등을 통한 보다 정밀한 구조해석과, 현장계측을 통한 연구등이 뒷받침된다면 시공성과 경제성 측면에서 보다 합리적인 가로보 설치방안이 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

- [4] 김응상, “Cross Beam으로 보강한 RC교량의 내하력 증진효과에 관한 연구”, 경기대학교 산업대학원, pp.22-30, 1994(12).
- [5] 이호근, “PSC거더교 중간격벽의 영향에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집 제 21권, 제6-A호 pp.863-871, 2001(11).
- [6] 철도설계기준, 대한토목학회, pp.15-16, pp.423-425, 2004.
- [7] 윤동용, “압연형강 거더교의 가로보가 활하중 횡분배에 미치는 영향”, 한국강구조학회 논문집 제 18권 5호, pp.535-541, 2006(10).
- [8] 정용원, 소수주거터 연속교의 활하중 횡분배에 따른 구조거동 특성에 관한 연구, 서울산업대학교 산업대학원, pp.30-33, 2007(7).

저 자 소 개

정 찬 목(Chanmook Jung)

정회원



- 1983년 2월 : 서울대학교 기계공학과(공학사)
- 1983년 2월 : KAIST 토목공학과(공학석사)
- 1992년 5월 : Lehigh 대학교 토목공학과(공학박사)

▪ 1995년 3월 : 우송대학교 철도건설시스템학과 교수
<관심분야> 교량구조, 철도구조 해석

참 고 문 헌

- [1] 김대호, “격자빔을 갖는 교량의 활하중 분배에 관한 연구”, 한양대학교 산업대학원, pp.31-33, 1991(6).
- [2] 高島春生, “도로교 횡분배 실용 계산법”, 원기술, pp.275-370, 1993.
- [3] Demetrios E. Tanis, “Bridge Engineering,” pp.121-124, 1994.