

I형 프리스트레스트 콘크리트 거더교의 활하중 분배

Live Load Distribution in Prestressed Concrete I-Girder Bridges

이 환 우† 김 광 양*

Lee, Hwan-Woo Kim, Kwang-Yang

(논문접수일 : 2008년 1월 10일 ; 심사종료일 : 2008년 4월 21일)

요 지

표준 I형 프리스트레스트 콘크리트 거더교(I형 PSC 거더교)는 우리나라의 중·소 지간 교량에서 가장 많이 적용되는 교량형식이다. 이 교량 형식의 상부거더 안전성을 판단하기 위해 설계단면력을 결정할 때 유한요소법 등을 이용한 정밀한 해석보다는 설계기준들에서 제시한 활하중 분배계수나 단순화된 실용식을 일반적으로 이용하고 있다. 한편, 우리나라의 설계 실무에서 사용되는 활하중 분배계수는 대부분 외국의 연구결과나 설계기준이 그대로 반영된 것들이다. 따라서 표준 I형 PSC 거더교의 교량단면과 부재의 설계 기준강도 등을 고려한 우리나라의 설계여건에 적합한 활하중 분배계수식의 개발이 필요하였다. 본 연구에서는 활하중 분배계수식을 개발하기 위하여 교량의 폭, 지간길이, 주형간격과 차로폭 등에 대한 수많은 매개변수 해석과 민감도해석을 수행하였다. 그 결과 분배계수의 크기를 결정하는 주된 변수들로서 외측주형의 경우에는 주형간격, 내민길이와 지간길이를 선택하였다. 인접내측주형은 주형간격, 내민길이, 지간길이와 교폭으로 하였다. 내측주형은 주형간격, 교폭과 지간길이를 하였다. 이어서 매개변수 해석결과들에 대한 다중선형회귀분석을 통하여 I형 PSC 거더교를 위한 활하중 분배계수식을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 활하중 분배계수식을 가지고 설계실무자들은 교량 설계 시 적절한 안전율이 보장된 설계단면력을 보다 쉽게 결정할 수 있을 것이다. 또한 예비설계시에 I형 PSC 거더교의 구조적인 효율을 향상시키기 위해 필요한 반복 설계에 소요되는 설계시간을 크게 줄일 수 것으로 기대된다.

핵심용어 : 활하중 분배계수식, I형 프리스트레스트 콘크리트 거더교, 구조해석모델, 매개변수 해석, 민감도 해석

Abstract

The standard prestressed concrete I-girder bridge (PSC I-girder bridge) is one of the most prevalent types for small and medium bridges in Korea. When determining the member forces in a section to assess the safety of girder in this type of bridge, the general practice is to use the simplified practical equations or the live load distribution factors proposed in design standards rather than the precise analysis through the finite element method or so. Meanwhile, the live load distribution factors currently used in Korean design practice are just a reflection of overseas research results or design standards without alterations. Therefore, it is necessary to develop an equation of the live load distribution factors fit for the design conditions of Korea, considering the standardized section of standard PSC I-girder bridges and the design strength of concrete. In this study, to develop an equation of the live load distribution factors, a parametric analysis and sensitivity analysis were carried out on the parameters such as width of bridge, span length, girder spacing, width of traffic lane, etc. As a result, the major variables to determine the size of distribution factors were girder spacing, overhang length and span length in case of external girders. For internal adjacent girders, the determinant factors were girder spacing, overhang length, span length and width of bridge. For internal girders, the factors were girder spacing, width of bridge and span length. Then, an equation of live load distribution factors was developed through the multiple linear regression analysis on the results of parametric analysis. When the actual practice engineers design a bridge with the equation of live load distribution factors developed here, they will determine the design of member forces ensuring the appropriate safety rate more easily. Moreover, in the preliminary design, this model is expected to save much time for the repetitive design to improve the structural efficiency of PSC I-girder bridges.

Keywords : equation of live load distribution factors, prestressed concrete I-girder bridges, structural analysis model, parametric analysis, sensitivity analysis

† 책임저자, 정회원 · 부경대학교 건설공학부 교수
Tel: 051-629-6073 ; Fax: 051-629-6063
E-mail: hwanwoo@pknu.ac.kr
* 부경대학교 산업과학기술연구소 전임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 10월 31일까지 본 학회에 보내주
시면 2008년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

I형 프리스트레스트 콘크리트 거더교(이하 I형 PSC 거더교)는 우리나라의 중·소 지간 교량에서 가장 많이 채택되는 교량형식이다(건설교통부, 2005a). 또한 실무자들의 풍부한 경험으로 인하여 설계 및 시공시에 큰 기술적 고민이 필요 없는 것으로 인식되어 있다. 따라서 교량의 안전성을 판단하기 위해 설계단면력을 결정할 때도 유한요소법 등을 이용한 정밀 해석보다는 활하중 분배계수를 이용하는 것이 일반적이다. 활하중 분배계수를 적용할 때도 적용방법들의 정확성에 대하여는 크게 고민하지 않고 개인적 주관이나 경험에 의해 선택한다.

현재 설계실무에서 적용되고 있는 대표적인 활하중 분배계수 산정방법은 도로교설계기준(건설교통부, 2005b)과 AASHTO 기준(AASHTO 표준기준, 1996 ; AASHTO LRFD 기준, 2007), 1940년대 제안된 판이론에 기초한 Guyon-Massonet 방법과 격자이론에 기초한 Leonhardt-Homborg 방법 등(한국건설기술연구원, 1992)이 있다. 그러나 이러한 방법들에 의해 결정된 하중분배량이 우리나라 I형 PSC 거더교에 필요한 적절한 수준의 안전율을 보장하고 있다고 할 수 없다. 그 이유는 활하중의 분배는 표준트럭의 제원과 주형간격 및 강성, 가로보, 바닥판 그리고 방호벽의 강성 등의 영향이 나타나는데, 현재 설계실무에서 사용되는 방법들은 개발되지 오래되었거나 외국의 연구결과를 바탕으로 하고 있기 때문이다.

따라서 우리나라의 설계기준과 실무에서 일반적으로 활용하는 표준화된 교량단면(한국도로공사, 2003a)에 적합하면서 적절한 수준의 안전율이 보장되는 활하중 분배계수식의 개발이 필요하다. 개발되는 활하중 분배계수식은 설계실무에서 신뢰할 수 있는 설계단면력을 제공할 것이며, 또한 반복적인 예비설계과정에서 간편하게 이용될 수 있으므로 I형 PSC 거더교의 구조적인 효율을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 활하중 분배계수식의 개발

2.1 활하중 분배계수

활하중 분배계수는 교량에 설치된 여러 개의 주형 중에서 1개의 주형이 분담하는 차량하중의 분담 비율을 의미한다. 그림 1은 설계차량이 교량의 바닥판에 재하된 형상과 활하중 분배계수의 개념을 나타낸 것이다. 즉, 활하중 분배계수란 설계 차량이 재하될 때 1개 주형이 분담하는 축하중이다(Bakht 등, 1985). 이러한 활하중 분배계수를 이용하여 예

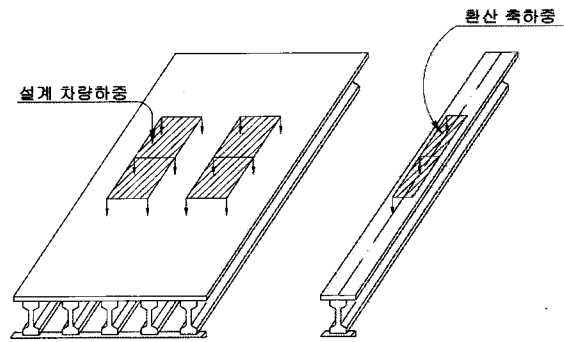


그림 1 활하중 분배계수의 개념

비설계과정에서 경제성과 안전성이 고려되는 적정단면을 편리하게 예측을 할 수 있다. 그리고 활하중분배 계수가 적정 수준의 정확성을 가진다면 상세 설계과정에서도 교량의 설계 단면력을 간단한 방법으로 산정할 수 있다. 그러나 활하중 분배계수와 같이 구조해석의 편의를 위해 교량 구조체의 지나친 이상화는 실제교량의 구조적 거동을 정확히 반영하지 못하는 경우가 있을 수 있다. 따라서 설계실무에서는 우리나라의 설계기준과 실무에서 활용되는 표준화된 교량단면 등에 적합한 활하중 분배계수를 이용하여야 한다. 그러므로 활하중 분배계수식의 개발은 적정 수준의 안전율을 유지할 수 있는지에 대한 충분한 사전 분석이 이루어져야 한다.

2.2 구조해석모델

활하중 분배계수식의 개발 과정에서는 무수히 많은 경우의 수치해석이 필요하다. 그래서 이때 사용되는 구조해석모델은 결과의 정확성과 함께 모델링의 용이성도 동시에 가지고 있어야 한다. 구조해석모델은 활하중 분배계수식을 개발하기 위하여 선행된 I형 PSC 거더교의 구조해석모델을 비교한 연구결과(이환우 등, 2008)로부터 결정하였다. 이 연구에서는 기존 연구들에서 사용하였거나 설계 실무에서 사용하고 있는 여러 가지 구조해석모델들을 비교하였다. 그리고 교량단면에서 방호벽과 가로보의 휨강성 변화가 활하중 분배계수에 미치는 영향을 수치해석 결과와 재하시험 결과를 이용하여 분

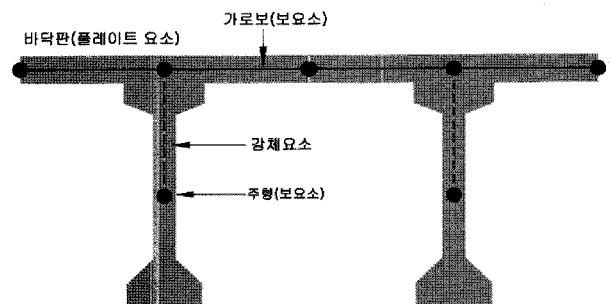


그림 2 매개변수 해석을 위한 구조해석모델

석하였다. 채택된 구조해석모델을 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보는바와 같이 본 연구에서 사용한 구조해석모델은 주형과 바닥판과의 편심을 고려하였고, 가로보는 전 단면이 유효한 것으로 가정된 상태에서 편심을 고려하지 않았고, 방호벽은 구조해석모델에서 무시하였다.

2.3 매개변수 해석

2.3.1 매개변수의 선정

활하중 분배계수식의 개발을 위해서는 교량 기하구조를 형성하고 있는 설계인자들의 영향이 매개변수 해석을 통하여 정확히 분석되어야 한다. 그림 3은 본 연구에서 적용할 매개변수들과 주형의 명칭을 나타낸 것이고, 표 1은 활하중 분배계수식의 개발을 위해 적용할 매개변수와 범위를 정리한 것이다. 매개변수와 그 적용범위는 설계기준들과 선행 연구결과(최장근 등, 2001 ; Cai 등, 2004 ; Barr 등, 2001 ; Sotelino 등, 2004 ; Bishara 등, 1993)를 반영하여 결정하였다.

지간길이는 I형 PSC 거더교에서 표준화되어 있는 25m, 30m와 35m를 선택하였다. 그리고 40m 지간길이는 PSC 거더교 형식의 공법개선이 지속적으로 이루어지고 있는 현실을 고려하여 매개변수의 범위에 포함하였다. AASHTO 표준기준(1996)과 도로교설계기준(건설교통부, 2005b)에서는 주형간

격을 4.2m로 제한하고 있으며, AASHTO LRFD(AASHTO LRFD, 2007 ; Zokaie 등, 1991)에서는 1.10~4.90m로 제한하고 있다. 선행연구들(구민세 등, 2003 ; 김진호 등 2004 ; Shahawy 등 ; 2001)의 주형간격은 1.10~3.60m의 범위에서 이루어졌다. 따라서 본 연구에서 주형간격의 범위는 설계기준, 선행연구결과와 실무적인 범위(한국도로공사, 2003b)를 고려하여 1.0~4.0m로 하였다. 내민길이에 대한 규정은 AASHRO LRFD(2007)기준에서만 제시하고 있는데, 그 범위는 -0.30~1.70m이다. 본 연구에서는 내민길이를 설계기준의 범위를 포함할 수 있도록 -0.25~3.00m로 하였다. 여기서 음(-)의 내민길이는 방호벽의 내측단부가 외측주형의 중심선보다 내측에 위치하는 것을 의미한다. 교폭 변수는 12.5m와 24.5m로 하였다. 12.5m는 일반적인 2차로 분리형 교폭을 기준한 것이다. 24.5m는 교폭과 주형의 수에 의한 영향을 해석 결과에 포함되도록 하기위해 주형의 간격은 동일하게 유지한 상태에서 교폭 12.5m보다 주형의 수가 2배가 되도록 계획한 것이다. 설계 차로폭은 도로교설계기준의 최소 및 최대 차로폭으로 3.0m와 3.6m를 매개변수로 하였다. 설계 차로수는 1~3 차로를 적용하였다. 교폭 변수 중에서 12.5m는 도로교설계기준에 따르면 3차로까지 차량하중이 재하된다. 활하중의 재하는 내·외측주형에 각각 불리한 위치로 하였다. 설계기준(건설교통부, 1996 ; 건설교통부, 2005b)에서는 최소 바닥판 두께로 0.22 ~0.25m를 규정하고 있다. 본 연구에서는 현행 설계기준(건설교통부, 2005b)의 경험적 설계법에서 제시하는 0.24m를 적용하였다. 매개변수해석에서 주형단면의 제원과 재료특성 값은 설계실무에서 활용하는 표준단면(한국도로공사, 2003a)을 적용하였다.

2.3.2 매개변수해석 결과

그림 4는 각 주형들의 활하중 분배계수에 대한 매개변수들의 민감도를 해석한 결과이다. 그림 4의 매개변수비(ratio of parameter)는 지간길이(L) 30m, 주형간격(S) 2.5m, 내민길이(OV) 0.75m, 교폭(B)은 12.5m, 설계 차로폭(Wc) 3.0m를 기준으로 한 것이다. 차로하중은 2차로를 기준으로 하였다. 차로수(N)는 차로수에 따라 분배계수식이 분리될 것이므로 민감도와는 밀접한 관련은 없지만 변화형상을 알아보기 위하여 비교하였다. 그림 4에서 GDF는 매개변수 해석과정에서 얻어진 활하중 분배계수이다.

그림 4(a)에서 보는바와 같이 외측주형(G_{ext})에서 활하중 분배량의 변화에 가장 큰 영향을 주는 변수는 주형간격이고 다음으로 내민길이, 지간길이, 설계 차로폭의 영향이고 교폭의 영향은 가장 적었다. 그림 4(b)에서 인접 내측주형

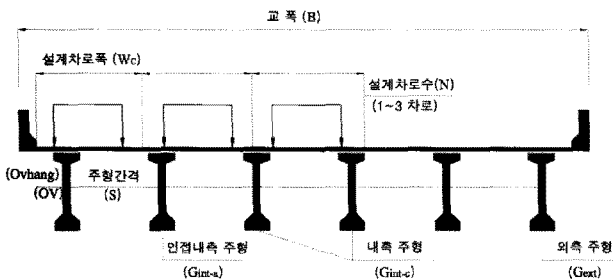
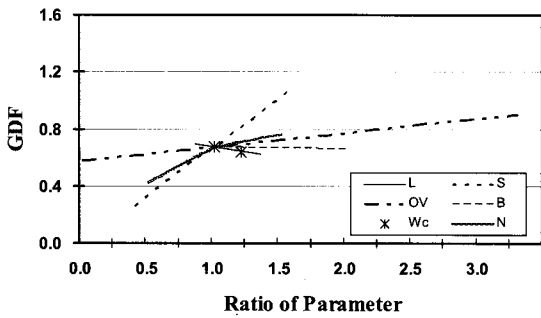


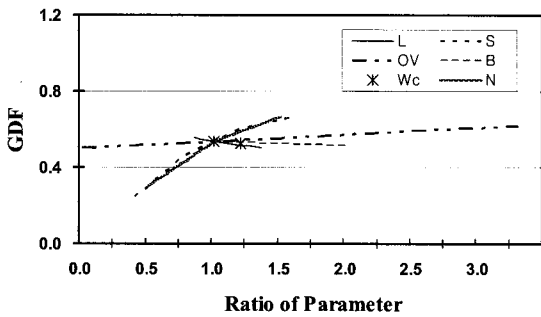
그림 3 매개변수의 명칭

표 1 매개변수의 범위

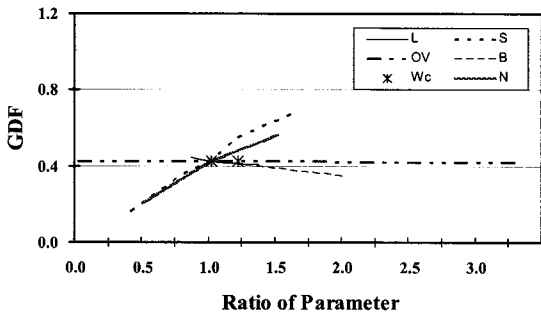
지간 길이 (L, m)	주형간격 (S, m)	내민길이 (OV, m)	교폭 (B, m)	설계 차로폭 (Wc, m)	설계 차로수 (N)	바닥판 두께 (ts, m)
25 30 35 40	1.00	-0.25 0.00 0.50	12.50 24.50	3.00 3.60	1 ~ 3	0.24
	2.00	0.75				
	2.50	1.00				
	3.00	1.25				
	4.00	2.00				
		2.50 3.00				



(a) 외측주형 (G_{ext})



(b) 인접 내측주형 (G_{int-a})



(c) 내측주형 (G_{int-c})

그림 4 매개변수의 민감도 비교

(G_{int-a})의 경우는 주형간격 내민길이, 시간길이, 교폭 순으로 나타난다. 그림 4(c)에서 보는바와 같이 내측주형 (G_{int-c})은 주형간격, 교폭, 시간길이, 내민길이의 순으로 분배량에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

표 2는 매개변수의 변화에 따른 활하중 분배계수들의 변화 비율과 각 주형별로 개발된 분배계수식에 반영할 주요변수의 선정결과를 보여주고 있다. 외측주형의 경우 시간길이가 25m에서 40m로 증가할 때 분배계수는 6~11% 범위에서 감소하는 경향을 보였고, 주형간격이 1.0m에서 4.0m로 증가할 때는 322~331% 범위에서 크게 증가하는 경향을 보였다. 내민길이가 -0.25m에서 3.0m로 증가할 때 분배계수는 45~84%의 범위에서 증가하였다. 교폭 및 차로폭의 증가는 분배계수를 각각 4~7%와 4% 범위로 감소시켰다. 차로수의 경

표 2 매개변수의 채택

주형	G_{ext}		G_{int-a}		G_{int-c}	
	변수 채택	변화비율 (%)	변수 채택	변화비율 (%)	변수 채택	변화비율 (%)
시간길이 (L)	●	-6~-11	●	-5~-10	●	-5~-11
주형간격 (S)	●	+322~+331	●	+148~+156	●	+295~+323
내민길이 (OV)	●	+45~+84	●	+17~+31	-	-0.1~-3
교폭 (B)	-	-4~-7	●	-5~-8	●	-30~-31
차로폭 (Wc)	-	-4	-	-1	-	-1
차로수 (N)	-	+36~+41, +10~+15	-	+39~+46, +13~+22	-	+46~+51, +20~+26

우는 1차로와 2차로, 2차로와 3차로를 비교한 것이다.

매개변수해석 결과로부터 표 2에서와 같이 개발되는 분배계수식의 독립변수로서 외측주형은 시간길이, 주형간격과 내민길이를 채택하였다. 교폭과 차로폭은 변수에서 제외하고 개발된 식에서 부가적인 안전율로 반영하는 것이 적절할 것으로 판단하였다. 내측주형은 시간길이, 주형간격과 교폭을 독립변수로 채택하였다. 인접 내측주형은 시간길이와 주형간격을 우선 채택하였다. 인접 내측주형은 위치에 따른 특성상 외측과 내측주형의 복합적인 형태로 하중이 분배된다. 따라서 이 주형들의 특성을 반영하기 위하여 내민길이와 교폭의 영향을 포함하였다.

2.4. 활하중 분배계수식의 개발

외측주형과 내측주형에서 활하중 분배계수식에 대한 독립변수를 그림 3과 표 1에 설명된 것과 같이 표현하면 각각 L , S , OV 와 L , S , B_g 이다. 여기서 B_g 는 교폭의 영향을 나타내기 위한 것으로 외측주형의 중심간 거리를 의미한다. 내측주형의 경우 내민길이에 영향을 받지 않으므로 교폭의 영향은 외측주형간 거리로 판단할 수 있었다. 인접 내측주형의 독립변수는 L , S , OV , B_g 등 4개이다. 그림 4에서 보는바와 같이 시간길이, 주형간격, 내민길이와 교폭 등이 변함에 따라 활하중 분배계수는 선형적으로 변하는 것을 알 수 있었다. 따라서 분배계수식 개발을 위한 회귀분석은 3~4개의 독립변수를 고려할 수 있는 다중선형회귀분석 방법을 적용하였다.

외측주형에 대하여 개발된 활하중 분배계수식을 표 3에 정리하였다. 표 4와 5는 인접 내측주형과 내측주형에 대한 활하중 분배계수식을 정리한 것이다. 개발된 식

표 3 외측주형의 분배계수식

구 분	활하중 분배계수식	적용범위(m)
1차로	$GDF_{ext(1)} = 0.221L^{-0.367} S^{0.767} (OV+4)^{0.760}$	25 ≤ L ≤ 40 1 ≤ S ≤ 4 -0.25 ≤ OV ≤ 3.0
2차로	$GDF_{ext(2)} = 0.179L^{-0.229} S^{0.772} (OV+4)^{0.892}$	
3차로	$GDF_{ext(3)} = 1.14GDF_{ext(2)}$	

표 4 인접 내측주형의 분배계수식

구 분	활하중 분배계수식	적용범위(m)
1차로	$GDF_{int-a(1)} = GDF_{ext(1)}$ $-\frac{1}{40000} S^{1.355} (OV+4)^{1.500}$ $[1440L^{-0.760} + B_g^{0.75} S^{0.845} (OV+4)^{0.200}]$	25 ≤ L ≤ 40 1 ≤ S ≤ 3 -0.25 ≤ OV ≤ 3.0 단, B _g ≤ 12인 경우 8 ≤ B _g ≤ 12
2차로	$GDF_{int-a(2)} = GDF_{ext(2)}$ $-\frac{1}{10000} S^{2.000} (OV+4)^{1.500}$ $[48L^{-0.550} + B_g^{0.198} S^{-1.450} (OV+4)^{2.000}]$	
3차로	$GDF_{int-a(3)} = 1.22GDF_{int-a(2)}$	

표 5 내측주형의 분배계수식

구 분	활하중 분배계수식	적용범위(m)
1차로	$GDF_{int-c(1)} = \frac{1}{2500} L^{0.985} S^{1.200}$ $\{375L^{-1.132} S^{-0.160} - (B_g - 12)^{0.220}\}$	25 ≤ L ≤ 40 1 ≤ S ≤ 4 단, B _g ≤ 12인 경우 8 ≤ B _g ≤ 12
2차로	$GDF_{int-c(2)} = \frac{1}{5000} L^{1.145} S^{1.200}$ $\{1540L^{-1.318} S^{-0.162} - (B_g - 12)^{0.510}\}$	
3차로	$GDF_{int-c(3)} = 1.30GDF_{int-c(2)}$	

의 적용범위는 매개변수 해석범위를 기준으로 정하였다. 외측주형의 경우 지간길이는 25~40m, 주형간격은 1~4m이고 내민길이는 -0.25~3.0m로 하였다. 인접 내측주형은 지간길이는 25~40m, 주형간격은 1~3m이고 내민길이는 -0.25~3.0m로 하였다. 내측주형은 지간길이는 25~40m, 주형간격은 1~4m이다. 여기서 모든 주형에서 3차로는 현행 설계기준(건설교통부, 2005b)에 의한 차로계수(0.90)를 반영하였다.

3. 활하중 분배계수식의 검증

3.1 개발된 활하중 분배계수식의 검증

개발된 분배계수식들의 검증은 기존연구(김진호 등, 2004; Bishara 등, 1993; Shahawy 등, 2001)들과서와 같이 매개

변수 해석과정에서 얻어진 활하중 분배계수와의 비교를 통하여 수행하였다. 또한 개발식의 적정성을 알아보기 위하여 식 (1)을 이용하였다. 식 (1)은 상대오차(R_e)로 개발식에 의한 활하중 분배계수와 구조해석에 의한 분배계수의 차이의 비를 의미한다.

$$R_e(\%) = \frac{EQ - FEM}{FEM} \times 100 \quad (1)$$

여기서, EQ : 개발식에 의한 활하중 분배계수

FEM : 구조해석에 의한 활하중 분배계수

그림 5, 6 및 7은 각각 외측주형, 인접 내측주형 그리고 내측주형을 위해 개발된 활하중 분배계수식 검증 결과를 보여주고 있다. 각 그림 (a), (c)와 (e)는 구조해석(FEM)과 개발식(EQ)에 의한 활하중 분배계수(GDF)를 직접 비교한 결과이고, 구조해석에 의한 활하중 분배계수는 매개변수 해석과정에서 계산된 값을 의미한다. 그림의 ext(1)은 외측주형의 1차로 하중경우를 의미한다. 각 그림 (b), (d)와 (f)는 식 (1)에 의한 상대오차(R_e)를 나타낸 것이다. 그림의 one-lane~three-lane은 1~3차로의 하중경우를 의미한다. 한편 그림 (e)와 (f)의 결과는 지간길이(L) 30m인 경우에 대해서만 나타낸 것이다.

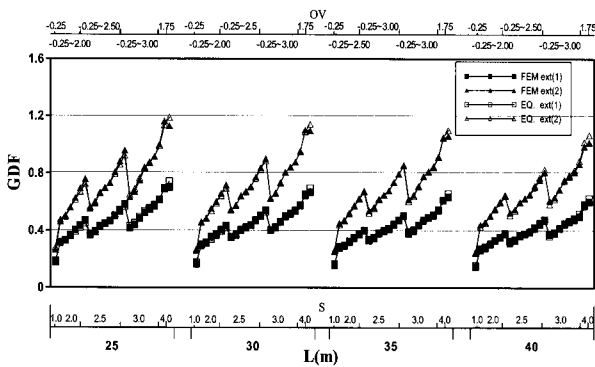
교폭 B=12.5m에 대하여 외측주형의 개발식은 그림 5(b)에서 1차로 하중경우에 구조해석 결과치와 -4.4%~+6%, 2차로 하중경우는 -4.6%~+6.3%의 상대오차를 가졌다. 교폭 B=24.5m에서 개발식은 그림 5(d)의 1차로 하중경우에 -1.44%~+14.2%, 2차로 하중경우는 -2.3%~+13.5%의 상대오차를 가졌다. 그림 5(f)에서 교폭 B=12.5m의 3차로 하중경우 개발식과 구조해석 결과와의 상대오차는 -3.9%~+4.6%를 가졌다. 위의 결과들에서 외측주형의 경우 개발식은 B=24.5m보다는 B=12.5m인 경우가 구조해석의 결과와 잘 일치한다. 그 이유는 외측주형의 개발식은 B=12.5m와 B=24.5m의 교폭 변수중에서 B=12.5m만을 활하중 분배계수식 개발에 이용하였기 때문이다.

교폭 B=12.5m에 대하여 인접 내측주형의 개발식은 그림 6(b)에서 1차로 하중경우에 구조해석 결과치와 -4.1%~+9.2%, 2차로 하중경우는 -5.0%~+13.0%의 상대오차를 가졌다. 교폭 B=24.5m에서 개발식은 그림 6(d)의 1차로 하중경우에 -4.2%~+9.9%, 2차로 하중경우는 -3.1%~+14.0%의 상대오차를 가졌다. 그림 6(f)에서 교폭 B=12.5m의 3차로 하중경우 개발식과 구조해석 결과와의 상대오차는

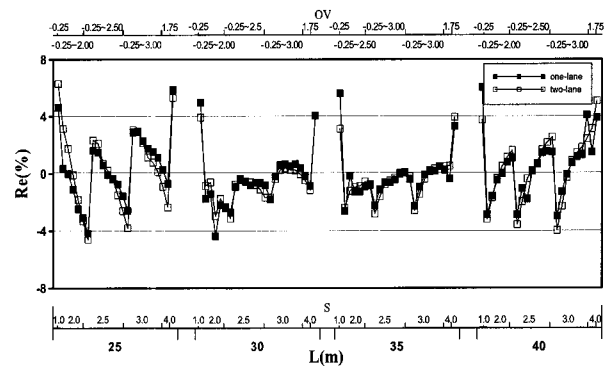
-5.7%~+7.5%를 가졌다. 인접 내측주형의 $B=12.5\text{m}$ 와 $B=24.5\text{m}$ 에서 개발식과 구조해석간의 상대오차 크기는 비슷하게 나타났다. 이는 $B=12.5\text{m}$ 와 $B=24.5\text{m}$ 의 해석결과를 모두 활하중 분배계수식의 개발에 사용하였기 때문이다.

교폭 $B=12.5\text{m}$ 에 대하여 내측주형의 개발식은 그림 7(b)에서 1차로의 하중경우에 구조해석 결과치와 -4.9%~+14.1%, 2차로 하중경우는 -4.2%~+7.5%의 상대오차를 가졌다. 교폭 $B=24.5\text{m}$ 에서 개발식은 그림 7(d)의 1차로

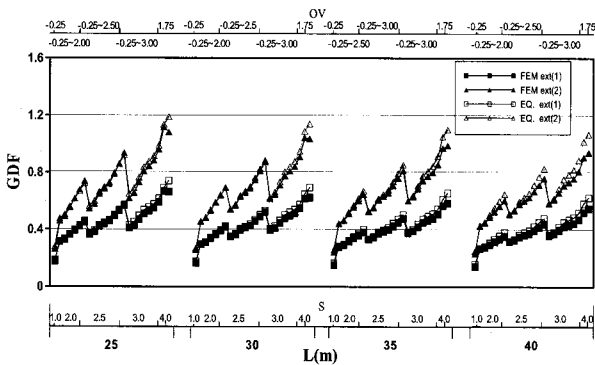
의 하중경우에 -0.9%~+13.8%, 2차로 하중경우는 -4.3%~+7.7%의 상대오차를 가졌다. 그림 7(f)에서 교폭 $B=12.5\text{m}$ 의 3차로 하중경우 개발식과 구조해석 결과와의 상대오차는 -2.7%~+3.3%를 가졌다. 활하중 분배계수식의 개발에 $B=12.5\text{m}$ 와 $B=24.5\text{m}$ 의 해석결과를 모두 반영한 내측주형의 경우도 인접 내측주형과 비슷한 상대오차 분포를 보였다.



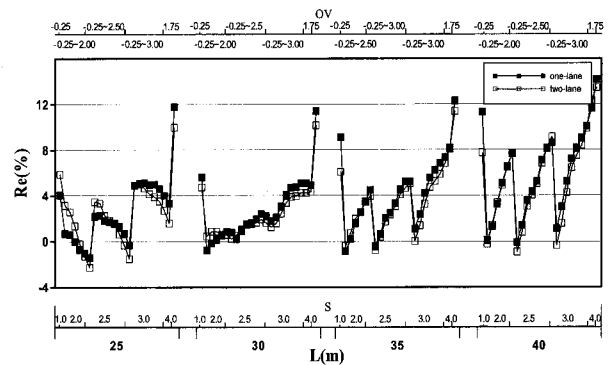
(a) 1, 2차로의 분배계수 비교 ($B=12.5\text{m}$)



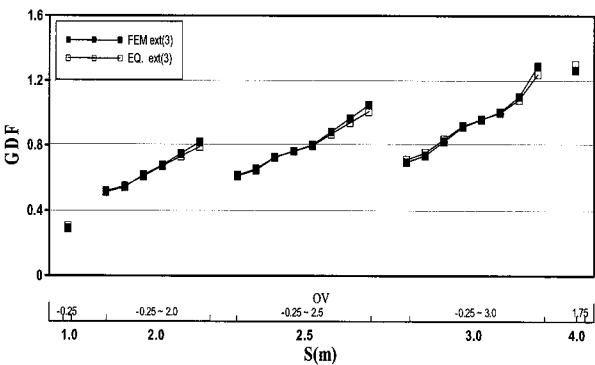
(b) 1, 2차로의 R_e 비교 ($B=12.5\text{m}$)



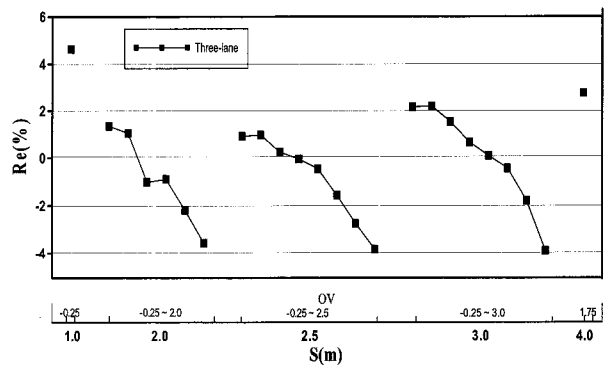
(c) 1, 2차로의 분배계수 비교 ($B=24.5\text{m}$)



(d) 1, 2차로의 R_e 비교 ($B=24.5\text{m}$)

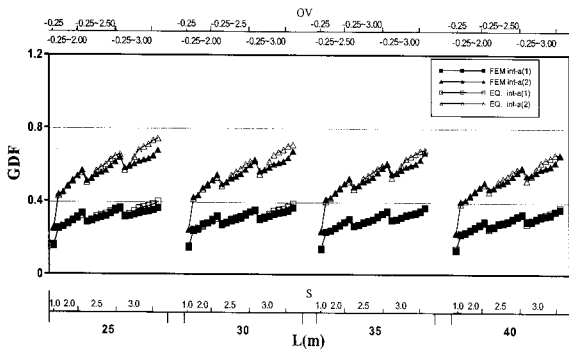


(e) 3차로의 분배계수 비교 ($B=12.5\text{m}$)

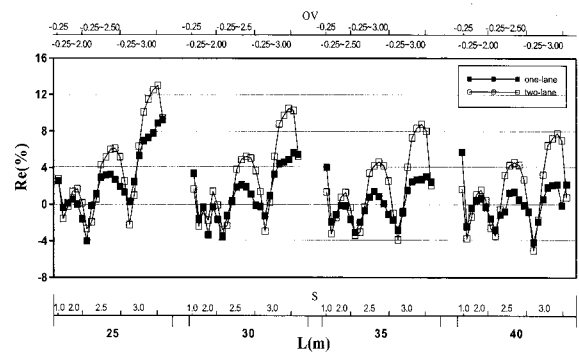


(f) 3차로의 R_e 비교 ($B=12.5\text{m}$)

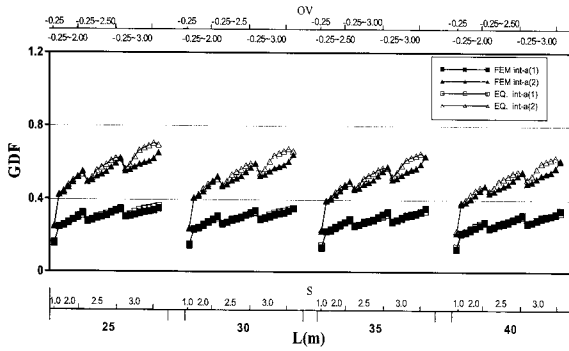
그림 5 개발된 활하중 분배계수식의 검증(외측주형)



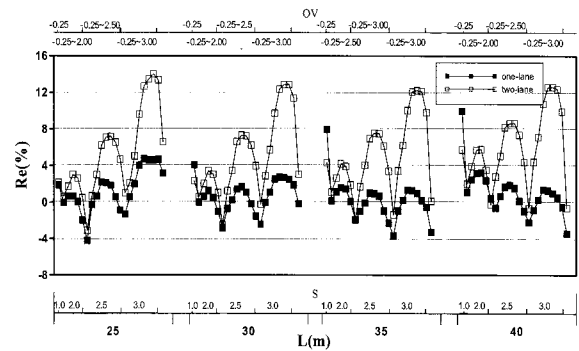
(a) 1, 2차로의 분배계수 비교 ($B=12.5m$)



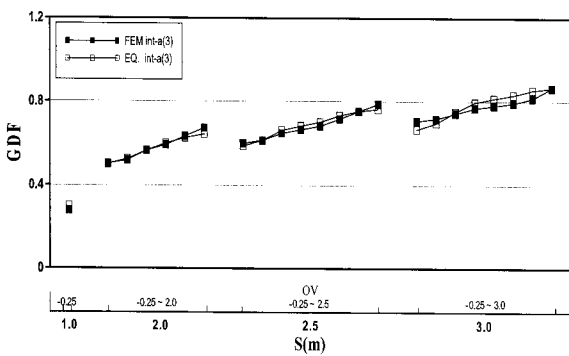
(b) 1, 2차로의 R_e 비교 ($B=12.5m$)



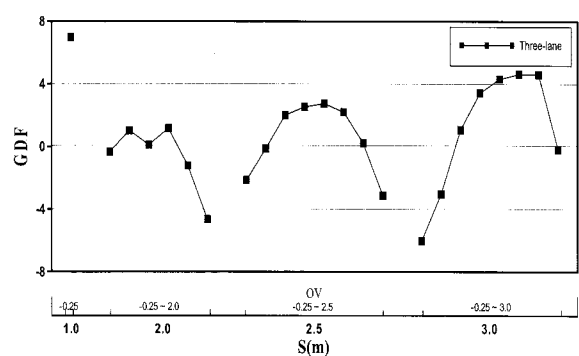
(c) 1, 2차로의 분배계수 비교 ($B=24.5m$)



(d) 1, 2차로의 R_e 비교 ($B=24.5m$)



(e) 3차로의 분배계수 비교 ($B=12.5m$)



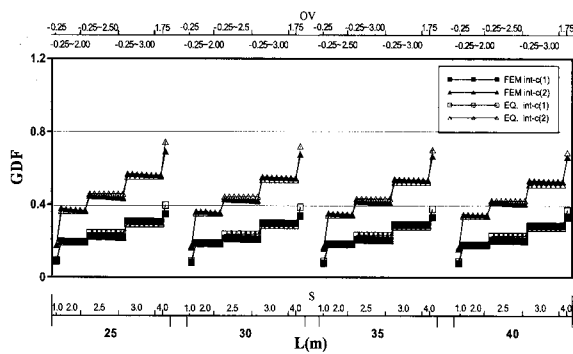
(f) 3차로의 R_e 비교 ($B=12.5m$)

그림 6 개발된 활하중 분배계수식의 검증(인접 내측주형)

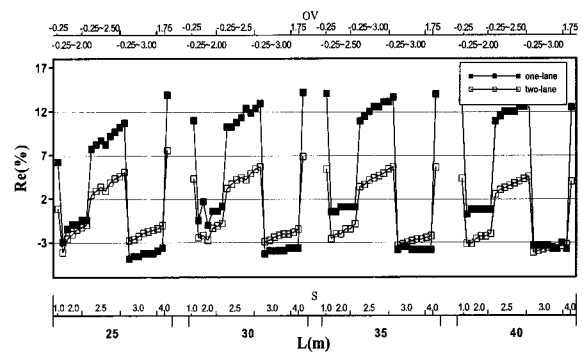
표 6 분배계수식의 검증결과

차로수	주형	G_{ext}		G_{int-a}		G_{int-c}	
		$R_e(\%)$	r^2	$R_e(\%)$	r^2	$R_e(\%)$	r^2
1	$B=12.5$	-4.4~+6.0	0.9932	-4.1~+9.2	0.9825	-4.9~+14.1	0.9061
	$B=24.5$	-1.4~+14.2	0.9433	-4.2~+9.9	0.9905	-0.9~+13.8	0.9810
2	$B=12.5$	-4.6~+6.3	0.9931	-5.0~+13.0	0.9492	-4.2~+7.5	0.9765
	$B=24.5$	-2.3~+13.5	0.9542	-3.1~+14.0	0.9081	-4.3~+7.7	0.9880
3		-3.9~+4.6	0.9890	-5.7~+7.5	0.9723	-2.7~+3.3	0.9912

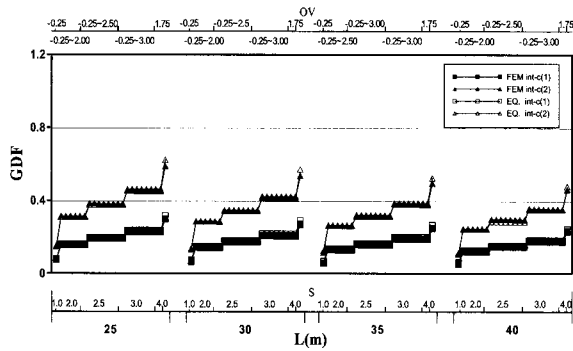
표 6에는 검증해석으로부터 얻은 상대오차를 정리하였고 개발된 활하중 분배계수식의 결정계수 (r^2)를 보여주고 있다. 표 6에서 보듯이와 같이 개발식은 외측주형의 경우에는 구조해석 결과와 -4.6%~+14.2%, 인접 내측주형은 -5.7%~+14.0%이고 내측주형은 -4.9%~+14.1%의 상대오차를 갖는 것으로 분석되었다. 한편, 개발식의 정확도를 의미하는 결정계수의 범위는 외측주형이 95~99%정도, 인접 내측주형과 내측주형은 91~99% 전후이다. 표 6에서 보여주고 있는 상대오차 (R_e)와 결정계수 (r^2)의 크기로 볼 때 개발된 활하중 분배계수식은 실무에 적용할 수 있는 충분한 적정성을 가지고 있다고 판단한다.



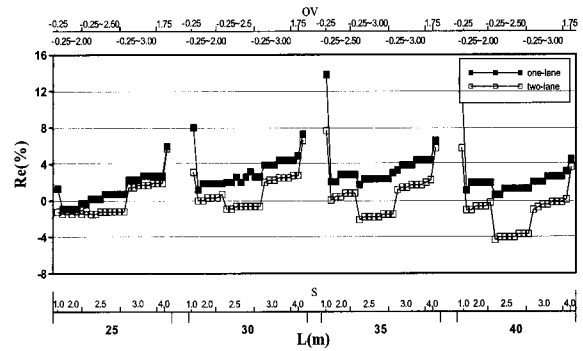
(a) 1, 2차로의 분배계수 비교 ($B=12.5\text{m}$)



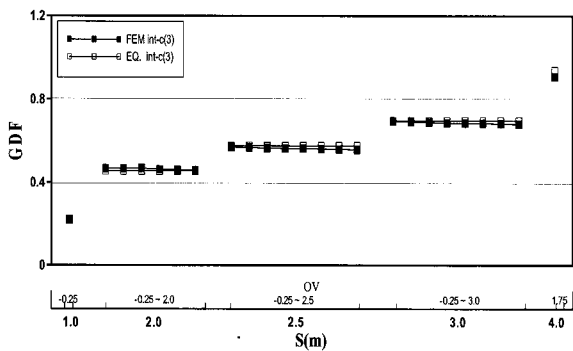
(b) 1, 2차로의 R_e 비교 ($B=12.5\text{m}$)



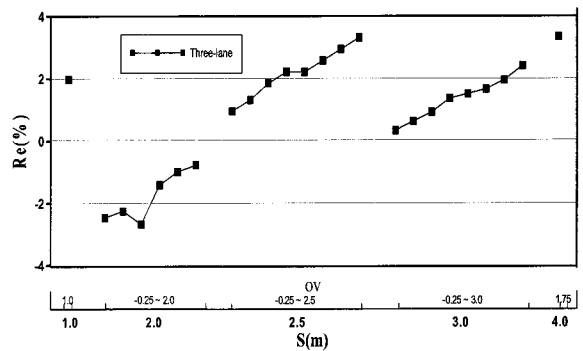
(c) 1, 2차로의 분배계수 비교 ($B=24.5\text{m}$)



(d) 1, 2차로의 R_e 비교 ($B=24.5\text{m}$)



(e) 3차로의 분배계수 비교 ($B=12.5\text{m}$)



(f) 3차로의 R_e 비교 ($B=12.5\text{m}$)

그림 7 개발된 활하중 분배계수식의 검증(내측주형)

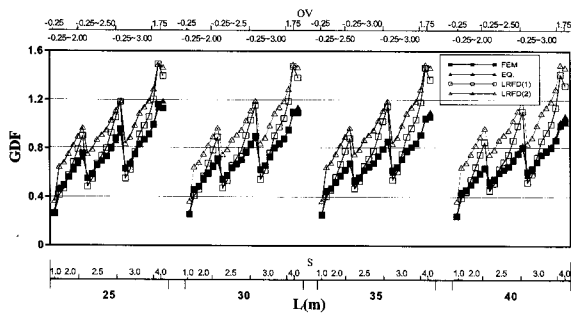
3.2 현행 설계기준식들과의 비교

본 연구에서 개발한 활하중 분배계수식의 우수성을 보이기 위해 현행 설계기준들에서 제시하는 활하중 분배계수식과 구조해석에 의한 결과를 비교하였다. 비교는 실무설계시 주된 설계하중이 되는 2, 3차로 하중경우에 대해서만 수행하였다. 2차로 하중의 경우에 교폭 $B=12.5\text{m}$ 에 대하여 시간길이는 25~40m이고 주형간격은 1.0~4.0m에 대하여 분석하였다. 그리고 내민길이는 -0.25~3.0m이고, 차로폭은 3.0m에 대하여 분석하였다. 3차로 하중의 경우는 다른 변수는 같고 지

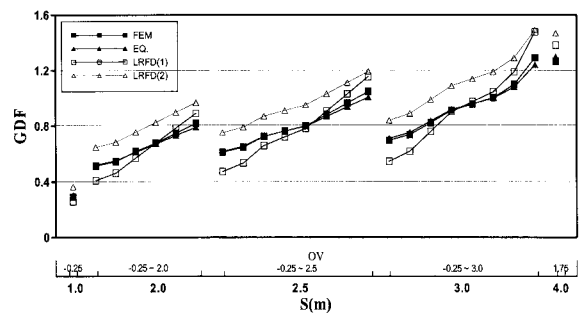
간길이가 30m인 경우만을 비교하였다.

그림 8은 각 각의 주형에 대하여 현행 설계기준과 구조해석에 의한 활하중 분배계수를 비교한 것이다. 그림 8에서 EQ는 본 연구에 의한 활하중 분배계수를 의미하고 LRFD(1)은 AASHTO LRFD 기준, LRFD(2)는 AASHTO LRFD 기준의 특수기준식, FEM은 수치해석 의한 분배계수이고 STAND는 AASHTO 표준기준에 의한 활하중 분배계수를 의미한다.

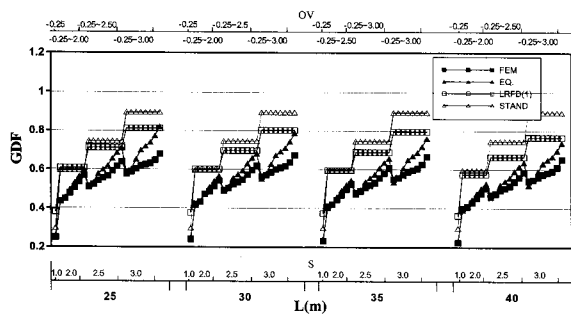
그림 8(a)와 (b)에서 보는바와 같이 외측주형의 경우에 특수기준과 개발식은 내민길이의 증가에 따라 활하중분배계수들이 증가하는 경향이 비슷한 것을 알 수 있다. AASHTO



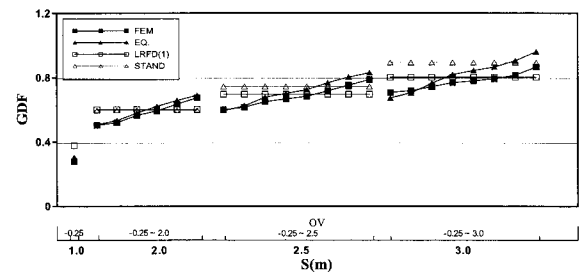
(a) 외측주형 2차로



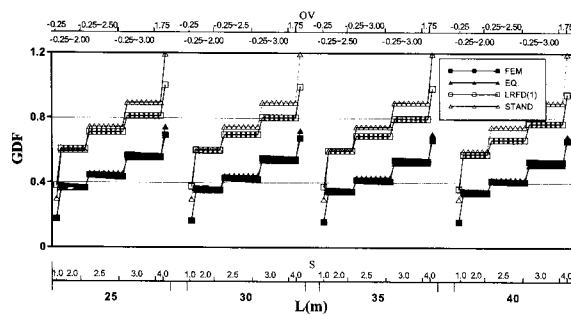
(b) 외측주형 3차로



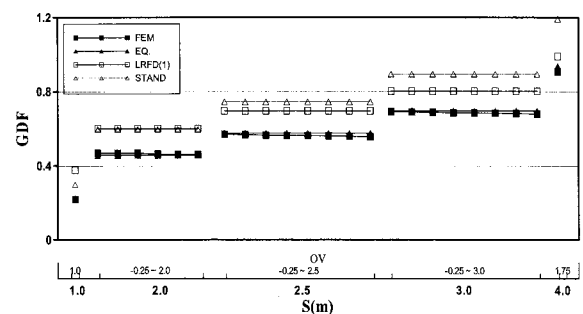
(c) 인접 내측주형 2차로



(d) 인접 내측주형 3차로



(e) 내측주형 2차로



(f) 내측주형 3차로

그림 8 현행 설계기준식들의 검증

LRFD 기준식은 개발식과 비교할 때 2차로 하중에서는 내민 길이 0.5m 이하에서 활하중 분배량을 과소평가하고 3차로의 하중의 경우는 내민길이 1.0m에서 과소평가하였다. 인접 내측주형의 경우는 그림 8(c)와 (d)에서 보는바와 같이 AASHTO LRFD 기준식과 AASHTO 표준기준식은 내민길이의 변화를 고려하지 못하는 것을 알 수 있다. 그리고 LRFD 기준식과 표준기준식이 2차로 하중경우는 대부분 활하중 분배량을 과대평가하지만 3차로 하중경우는 내민길이가 1.5m 이하의 구간에서 활하중 분배량을 과소평가하여 구조적으로 불안정한 설계 결과를 줄 수 있는 것을 알 수 있다. 그림 8(e)와 (f)에서 보는바와 같이 내측주형의 경우에는 LRFD 기준식과 표준기준식은 2차로 하중의 경우 과대하게 산정되어 비경제적인 설계 결과를 줄 수 있는 것을 알 수 있다. 3차로의 경우도 다소 비경제적인 설계 결과를 줄 수

있다. 따라서 표준단면을 활용하는 우리나라의 I형 PSC 거더교의 설계시 현행 활하중 분배에 관련된 설계기준식으로 설계 단면력을 결정하는 것은 적절하지 못한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 결정계수가 90% 이상이고 상대오차의 범위가 -5% ~ +14%인 활하중 분배계수식을 개발하였다. 한편, 교량과 같은 중요 구조물은 항상 안전성을 확보하고 있어야 한다. 따라서 교량의 설계시 안전측으로 활하중 분배량을 결정하기 위하여 개발된 분배계수식을 +5% 상향 조정하여 다음과 같이 제안한다.

구분	활하중 분배계수식	적용범위(m)
외측 주형	1차로 $GDF_{ext(1)} = 0.232L^{-0.367} S^{0.767}$ $(OV+4)^{0.760}$	25 ≤ L ≤ 40 1 ≤ S ≤ 4 -0.25 ≤ OV ≤ 1.75
	2차로 $GDF_{ext(2)} = 0.188L^{-0.229} S^{0.772}$ $(OV+4)^{0.892}$	
	3차로 $GDF_{ext(3)} = 1.14GDF_{ext(2)}$	
인접 내측 주형	1차로 $GDF_{int-a(1)} = GDF_{ext(1)}$ $-\frac{1}{38095} S^{1.355} (OV+4)^{1.500}$ $[1440L^{-0.760} + B_g^{0.75} S^{0.845}$ $(OV+4)^{0.200}]$	25 ≤ L ≤ 40 1 ≤ S ≤ 3 -0.25 ≤ OV ≤ 1.75 8 ≤ B _g ≤ 12
	2차로 $GDF_{int-a(2)} = GDF_{ext(2)}$ $-\frac{1}{9524} S^{2.000} (OV+4)^{1.500}$ $[48L^{-0.550} + B_g^{0.198} S^{-1.450}$ $(OV+4)^{2.000}]$	
	3차로 $GDF_{int-a(3)} = 1.22GDF_{int-a(2)}$	
내측 주형	1차로 $GDF_{int-c(1)} = \frac{1}{2381} L^{0.985} S^{1.200}$ $\{375L^{-1.132} S^{-0.160}$ $-(B_g - 12)^{0.220}\}$	25 ≤ L ≤ 40 1 ≤ S ≤ 4 단, B _g ≤ 12인 경우 8 ≤ B _g ≤ 12
	2차로 $GDF_{int-c(2)} = \frac{1}{4762} L^{1.145} S^{1.200}$ $\{1540L^{-1.318} S^{-0.162}$ $-(B_g - 12)^{0.510}\}$	
	3차로 $GDF_{int-c(3)} = 1.30GDF_{int-c(2)}$	

2) AASHTO 표준기준과 AASHTO LRFD 기준의 경우 내측주형과 인접 내측주형은 대부분 활하중의 분배를 과대평가하고 있다. 또한 2, 3차로 하중경우에서 내민길이가 각각 0.5m, 1.0m이하의 구간에서는 외측주형의 활하중 분배량을 과소평가하여 불안한 설계가 될 수도 있으므로 이 구간에서의 적용은 지양되어야 할 것으로 판단된다.

3) 본 연구에서 개발된 활하중 분배계수식은 I형 PSC 거더교에 적절한 안전성과 경제성을 제공할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 설계실무자들은 교량 설계시 적절한 안전율이 보장된 설계단면력을 보다 쉽게 결정할 수 있을 것이다. 또한 반복적인 예비설계에서 설계과정이 간소화되므로 I형 PSC 거더교의 구조적인 효율을 향상시킬 수 있는 시간적 여유가 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2005a) 2005교량현황조사, 건설교통부.
 건설교통부 (2005b) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
 건설교통부 (1996) 도로교표준시방서, 대한토목학회.
 구민세, 연정흠, 정재운, 강동현 (2003) 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 사교의 윗하중 분배에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 23(6A), pp.1057~1066.
 김진호, 한경봉, 박선규 (2004) 슬래브를 가지는 PSC-Beam

교량의 차량하중 분배계수 산정, 대한토목학회논문집, 24(1A), pp.27~34.
 이환우, 김광양 (2008) 활하중 분배계수식 개발을 위한 I형 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 구조해석 모델, 한국전산구조공학회논문집, 21(1), pp.91~101.
 최창근, 김경호, 김재범 (2001) 정적해석에 의한 표준적인 P.S.C거더 교량의 적정 가로보 수에 관한 연구, 한국전산구조공학회논문집, 14(1), pp.43~55.
 한국건설기술연구원 (1992) 프리캐스트 PS콘크리트 교량의 설계에 관한 연구, 한국건설기술연구원.
 한국도로공사 (2003a) 고속도로건설공사 표준도, 한국도로교통협회.
 한국도로공사 (2003b) 고속도로공사 교량설계기준, 한국도로교통협회.
 American Association of State Highway and Transportation Officials (1996) *Standard Specifications for highway bridges, Sixteenth Edition*, Washington, D.C.
 American Association of State Highway and Transportation Officials (2007) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Third Edition*, Washington, D.C.
 Barr P.J., Eberhard M.O., Stanton J.F. (2001) Live-Load Distribution Factors in Prestressed Concrete Girder Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, pp.298~306.
 Bakht B., Jaeger L.G. (1985) *Bridge Analysis Simplified*, McGraw-Hill, New York N.Y.
 Bishara A.G., Maria Liu C.L., El-Ali N.D. (1993) Wheel Load Distribution on Simply Supported Skew I-Beam Composite Bridges, *Journal of Structural Engineering*, 119(2), pp.399~419.
 Cai C.S., Shahawy M. (2004) Predicted and Measured Performance of Prestressed Concrete Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 9(1), pp.4~13.
 Sotelino E.D., Liu J., Chung W., Phuvoravan K. (2004) *Simplified Load Distribution Factor for Use in LRFD Design*, Purdue University, FHWA/IN/JTRP-2004/20, Indiana.
 Shahawy M., Huang D. (2001) Analytical and Field Investigation of Lateral Load Distribution in concrete Slab-On-Girder Bridges, *ACI Structural Journal*, 98(4), pp.590~599.
 Zokaie, T., Osterkamp, T.A., Imbsen, R.A. (1991) *Distribution of Wheel Loads on Highway Bridges*, NCHRP 12-26/1, Transportation Research Board, Washington D.C.