

중·소규모 강교량의 고강도강 적용성 비교

A Comparative Study on the Use of High-strength Steel to the Medium-span Bridges

김창우* 박용명** 황민오*** 박찬희***
Kim, Chang-woo Park, Yong-Myung Hwang, Min-Oh Park, Chan-Hee

ABSTRACT

A study has been performed to investigate the applicability of the high-strength steel to the medium-span composite girder bridges. A two- and four-girder simple and continuous bridges are considered. A proper span-to-depth ratio for the model bridges with SM490 and SM570 was evaluated by using the section optimization program, respectively. For the determined span-to-depth ratio, deflections and fatigue performance were also investigated. It was acknowledged that the high-strength steel reduces the weight of girder but the increase of deflection and fatigue stress should be considered especially in the positive moment area.

1. 서 론

고강도 구조용강은 일반 구조용강에 비해 강도, 인성 등의 성능을 복합적으로 향상시킨 강재로서 강교량에 적용시 강재사용의 절감, 제작비용 및 유지보수비용 등을 절감할 수 있는 소재이다.

따라서 최근에는 일반교량에서도 강교량의 경제성과 합리화를 목적으로 고강도강재의 적용을 적극적으로 검토하고 있는 추세이다. 기존의 설계방법으로는 고강도 구조용강의 장점을 충분히 반영하지 못할 가능성이 크다.⁽¹⁾⁽²⁾ 이에 본 연구에서는 일반구조용강과의 설계변수의 변화에 따른 고강도교량의 최소강중에 따른 형고비를 결정하여 적정 단면을 제시하고자한다.

강교량에 관한 국내의 설계기준⁽³⁾은 재료의 허용응력에 기초한 허용응력설계법으로 규정되어 있으며, 작용하중에 의한 발생응력을 허용치 이내로 제한함으로써 안정성을 확보한다. 그러나 고강도화에 따른 강교량 구조부재의 좌굴, 반복하중에 의한 피로, 활하중에 의한 처짐 등에 대해서도 안정성 및 사용성이 확보되어야 하므로 이에 관련 설계기준에 의한 검토가 필요하다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 격자구조모델에 기초하고 주형단면자동산정 알고리즘을 사용하여 중소규모의 일반 강교량에 대한 고강도 강재의 적용성을 비교, 검토하였다. 또한, 교량을 구성하는 거더개수 및 경간길이에 따른 최소중량단면의 변화경향을 비교 분석하기위해 2주형, 4주형교를 대상으로 검토하였으며, 경간길이는 40m 단순교, 40+50+40m 연속교의 경우에 대해 검토하였다.

* 부산대학교 토목공학과 석사과정

** 정희원 · 부산대학교 토목공학과 교수

*** 정희원 · (재)포항산업과학연구원, 책임연구원

2. 설계하중에 대한 해석

2.1. 해석 대상 교량 제원

본 연구에서 고강도 강재의 강교량 적용성을 검토하기 위하여 기본모델로 두 개, 네 개의 거더를 갖는 강합성 플레이트 거더교를 기본모델로 선정한 교량의 횡단면도는 그림 1과 같고 사용한 모델교량의 제원은 다음과 같다.

- 단순교 : 40m
 - 연속교 : 40 + 50 + 40m
 - 교폭 : 12.15m
 - 교량등급 : 도로교 1등급
 - 설계활하중 : DB-24 및 DL-24
 - 거더의 개수 : 2본, 4본
 - 사용 재료 : 거더(SM490, SM570), 가로보(SM490, SM570)
- 콘크리트(4주형 : $f_{ck} = 270 \text{ kg/cm}^2$, 2주형 : 350 kg/cm^2)
- 콘크리트 바닥판 두께 : 4주형 - 25cm, 2주형 - 34cm
 - 가로보 간격 : 5m

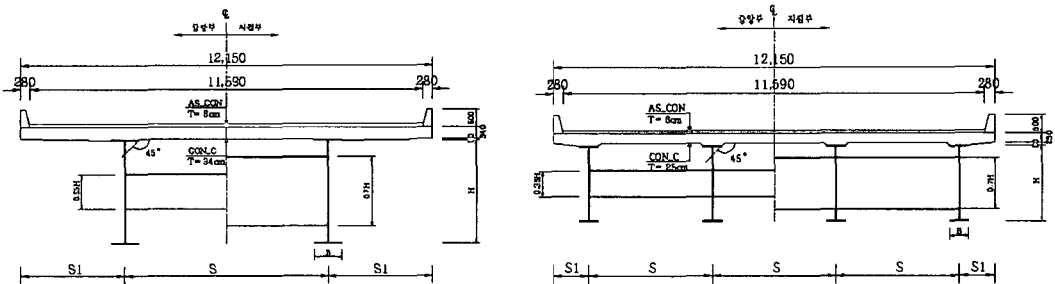


그림 1. 대상교량의 횡단면도

RC 바닥판은 도로교설계기준의 최소두께 규정에 의해 산정하였고, 2주형에서의 PC 판두께는 RC 판두께의 90%를 적용하였다.

가로보는 I-단면으로 하되 복부판의 높이는 참고문헌(5)에 근거하여 단부·지점부에서는 주형고의 70%를 적용하였고, 중간가로보는 휨강도의 증가에 따른 전체구조계 응력에 큰 차이가 없으므로 주형고의 35% 단면을 사용한다.⁽⁵⁾ 예비해석에 의하면, 주형간격 대비 캔틸레버부 내민 길이의 비(S/S1)에 대해서 총 강재 중량의 차이는 거의 없으나 주형의 비틀림모멘트 및 내·외측 주형의 하중 분배 측면에서 결정한 주형간격 대비 캔틸레버부 길이의 비(S/S1)는 다음 표 1과 같다.

표 1. 주형간격 대비 캔틸레버부 길이의 비

구분		S(cm)	S1(cm)	간격비
2주형교	단순교	600.0	307.5	1.95
	연속교	600.0	307.5	1.95
4주형교	단순교	330.0	112.5	2.93
	연속교	340.0	97.5	3.49

2.2 매개변수 및 해석방법

고강도 강재의 적용시 적정 강중 형고비 산정을 위해 2, 4주형 단순교, 연속교의 지간대 주형 높이비 즉, 형고비를 L/15, L/18, L/21, L/24 그리고 L/27인 다섯가지 경우를 고려하였다.

강재의 자중에 대한 해석은 강재 주형의 순단면 자중 외에 보강재 및 접합부 등의 중량을 고려하여 전산 해석시 강재주형 및 가로보 순단면 자중에 30%를 할증하였다.

또한, 활하중에 대한 해석은 DB 및 DL 하중을 2차선 및 3차선으로 재하하고, 각 경간의 최대 정모멘트 및 지점의 최대 부모멘트 발생 경우를 고려하였다. 활하중 해석에 있어서 부모멘트 발생 구간의 보요소는 콘크리트 단면을 제외한 강재 주형의 강성만을 고려하였다.

합성전·후 사하중, 활하중은 각 주형에 작용하는 하중을 계산하기 위해 다음 횡방향 해석을 수행하였다. DB 및 DL 활하중의 횡방향 재하 예는 그림 2와 같다. 주형을 지점으로 하는 연속보로 가정하고 합성전·후 사하중 및 활하중을 교폭에 대해 등분포하중과 단위하중으로 각각 재하하여 주형 위치에서 발생한 반력을 각 주형에 작용하는 하중으로 고려하였다.

적정단면 산정을 위한 시산설계는 다음 2.3절의 단면 자동산정 알고리즘을 이용하였다.

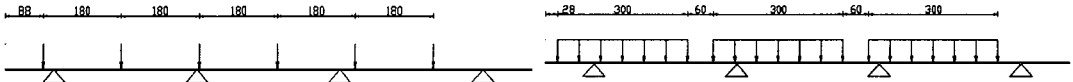


그림 2. 4주형교의 활하중 횡방향 재하 예

2.3 단면 자동산정 알고리즘

적절한 주형단면의 자동 산정은 반복 계산에 의하였으며, 이를 위해 작성한 전산 프로그램의 알고리즘은 그림 3과 같다. 적정 단면의 산정을 위한 반복 계산에서 보요소로 모델링한 주형의 플랜지 두께를 매 반복단계에서 응력수준에 근거하여 결정하며, 모든 단면에 대해 이전 단계에서 얻은 판두께와 현재 단계에서 구해진 판두께의 차이가 1 mm 이내가 되면 반복계산을 종료한다.

반복계산에 의한 플랜지 판두께의 결정을 위해서는 최소 두께와 최대 두께값 및 초기 판두께(최소와 최대의 중간값)를 입력한다. 주어진 단면에 대해 구조 해석을 수행한 후 응력에 여유가 있는 단면은 현재 판두께와 최소 판두께의 중간 판두께를 새로이 적용하고, 응력이 초과하는 단면은 현재 판두께와 최대 판두께의 중간 판두께를 가정하는 이분법(bisection method) 알고리즘을 적용하여 적정 판두께가 구해질 때까지 반복 계산을 수행하였다. 반복 계산이 종료된 후에는 주형과 가로보의 응력이 허용치를 만족하면 계산을 최종적으로 종료하였다.

플랜지의 두께 결정을 위한 시산 설계시 바닥판의 크리프와 건조수축 등의 하중을 고려하지 않은 관계로 휨응력은 도로설계기준에 준하는 허용응력의 80% 이내로 하였고, 조합응력비는 1.0 수준(≤ 1.2)으로 하였다. 이에 따라 전단응력의 허용치를 60% 이내가 되도록 모델 교량을 설계하였다. 주형의 복부판 두께 결정은 도로교설계기준에 근거, 최소 복부판 두께규정에서 수평보강재가 없을때를 가정하여 SM 490 강재에서는 $b/130$, SM 570 강재일 경우에는 $b/110$ 를 고려하였다.

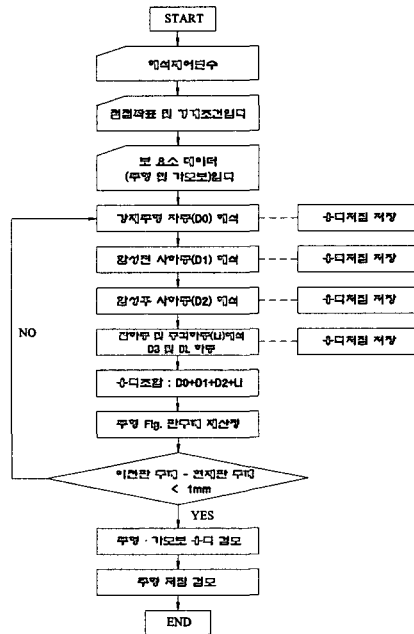


그림 3. 전산프로그램 알고리즘

3. 해석 결과 분석

주형단면자동산정 프로그램을 통해 2, 4주형 단순교, 연속교 모델교량을 해석하고 형고비를 변수로 하여 강중에 따른 강재중량과 최대 판두께를 비교, 분석한다. 또한, 선정된 적정 강중 형고비 경우를 대상으로 사용성(처짐, 피로) 검토를 통해 고강도강재의 적용성을 살펴본다.

3.1 형고비에 따른 강재중량 및 최대 판두께

단순교 및 연속교의 각 지간에 대해 주형의 개수와 형고비에 따른 바닥판 단위면적당 강중 결과와 강중과 형고비에 따른 최대플랜지 두께를 그림 4와 그림 5에 각각 도시하였다. 그리고 수록된 결과는 주형 및 가로보의 순단면에 관한 것이며, 수직 보강재 및 볼트 접합에 의한 중량은 포함되지 않은 결과이다. 그림 5에서 누락된 그래프는 최대 플랜지 두께가 10cm를 초과하는 경우이다.

그림 4로부터 형고비가 낮아질수록, 단순교보다 연속교의 경우, 소수주형보다 다수주형에서 강중저감비가 큰 것으로 나타난다. 그리고 강중에 따라 일반강재(SM490)대비 고강도강재(SM570)의 효율을 살펴보면, 4주형 단순교의 경우는 형고비가 L/18 에서 2주형, 4주형 연속교의 경우는 형고비가 각각 L/18, L/24을 기준으로 강중저감 효율이 있는 것으로 나타난다. 한편, 그림 5로부터 형고비가 높은 경우를 보면 도로교 설계기준의 최소 판두께 규정에 의해 고강도강재가 지닌 높은 허용응력을 충분히 활용하지 못함을 알 수 있다. 이상의 해석 결과로부터 최대 플랜지 두께를 80mm로 제한하였을 때 최소강중에 해당하는 형고비는 표 2와 같이 얻어진다.

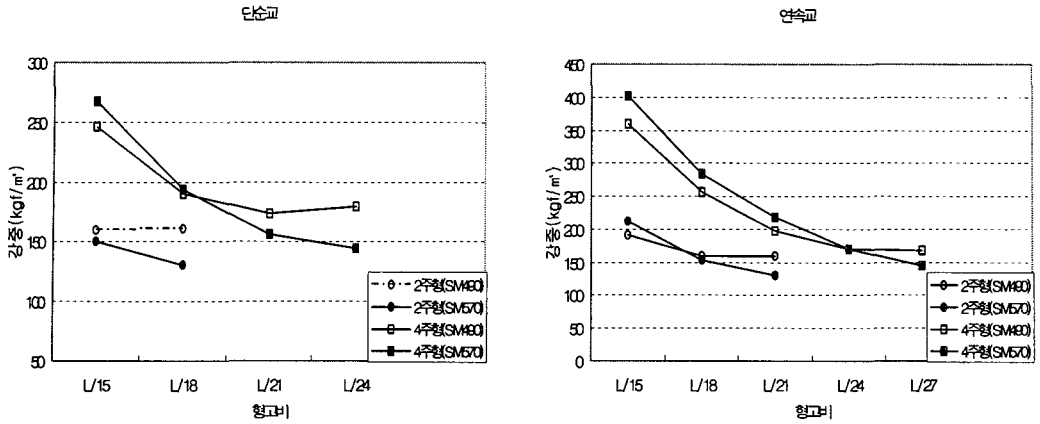


그림 4. 단순교 및 연속교의 각 강종과 형고비에 따른 단위면적에 대한 강중

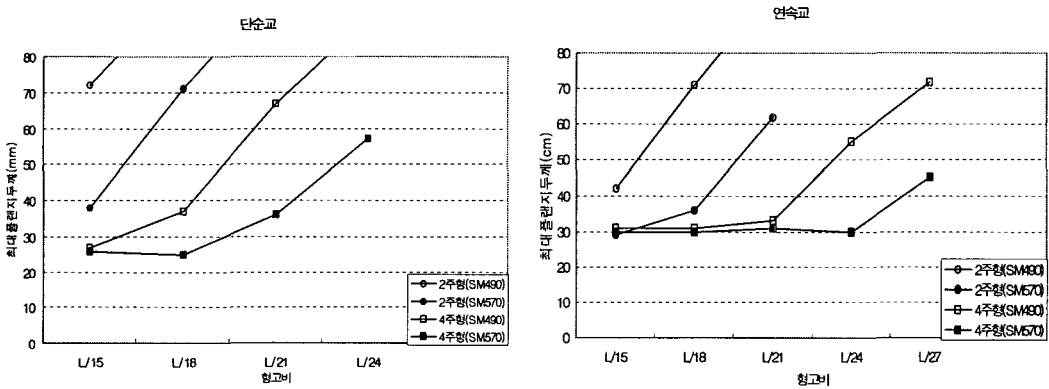


그림 5. 단순교 및 연속교의 각 강종과 형고비에 따른 최대플랜지두께

표 2. 강종에 따른 형고비 및 플랜지 최대두께

구분	강종		SM 490				SM 570				
	형식	주형 개수	형고 비	최대판두께		강중 (kg/m²)	형고 비	형고 h (cm)	최대판두께		강중 (kg/m²)
				Upp. Flg.	Low. Flg.				Upp. Flg.	Low. Flg.	
단경간 40 m	2	L/15	267	3.3	7.2	160.14	L/18	225	3.2	7.1	130.33
	4	L/21	225	2.9	6.7	174.28	L/24	167	2.4	5.4	145.18
연속교 40+50 +40 m	2	L/18	278	7.1	7.1	159.36	L/21	240	6.2	6.2	131.07
	4	L/24	209	4.9	5.5	170.56	L/27	186	3.5	4.5	144.93

주)주형과 가로보의 순단면만 고려

3.2 적정형고비에 따른 고강도 강교량의 사용성(처짐) 검토

교량의 단면은 응력만으로 결정되는 것이 아니라 최소 판두께 규정이나 처짐 및 피로 규정 등으로 단면이 결정되는 경우도 많다.⁽²⁾ 그러므로 결정된 적정단면에 일반강재대비 고강도 강재의 사용성(처짐)검토를 할 필요성이 있다. 전산프로그램을 사용한 적정 강중 형고비에서의 최대처짐은 도로교설계기준⁽³⁾의 허용처짐값을 기준으로 다음 표 3과 같이 나타난다.

표 3. 단순교 및 연속교의 최대처짐

구분	강종	최소 강중 형고비	처짐값 (cm)	허용 처짐값 (cm)	구분	강종	최소 강중 형고비	위치	처짐값 (cm)	허용 처짐값 (cm)
2주형	SM490	$\frac{L}{15}$	1.185	8.0	2주형	SM490	$\frac{L}{18}$	중앙경간	2.448	10.0
	SM570	$\frac{L}{21}$	2.116			SM570	$\frac{L}{21}$	중앙경간	3.921	
4주형	SM490	$\frac{L}{18}$	1.904		4주형	SM490	$\frac{L}{24}$	중앙경간	2.741	
	SM570	$\frac{L}{24}$	3.235			SM570	$\frac{L}{27}$	중앙경간	5.717	

(a) 단순교

(b) 연속교

3.3 피로 검토⁽⁶⁾

피로의 영향이 고강도 강재의 적용성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 앞에서 선정한 적정 강중 형고비의 경우를 대상으로 하였으며, 피로조사위치는 연속교는 그림 6에서 제시한 최대응력범위가 발생하는 단면 1과 단면 2에서 단순교는 중앙단면에서 피로조사를 다음과 같이 하였다.

그리고 응력범주는 그림 7에서 도시한 것과 같이 ① 수직보강재 용접부위는 C등급, ② 와 ③의 주형과 가로보의 접합부위 응력범주는 최하등급인 E등급으로 간주하여 검토하였다.

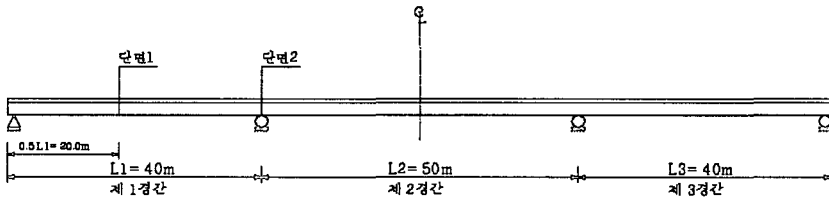


그림 6. 피로조사 위치

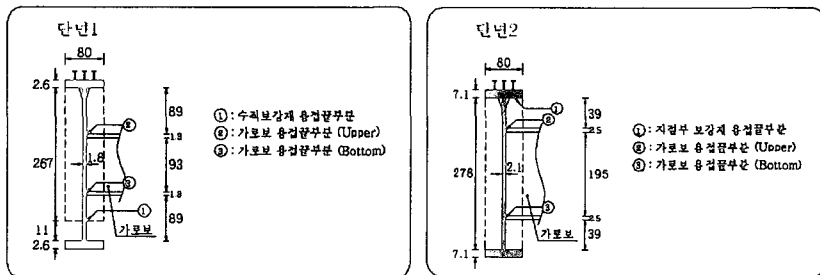


그림 7. 피로조사 위치별 단면

표 4. 단순교 피로설계 적부판정

증양 단면	강종	응력 범주	재하 활하중	허용 응력범위 (kg/cm ²)	설계 응력범위 (kg/cm ²)	판정	증양 단면	강종	응력 범주	재하 활하중	허용 응력범위 (kg/cm ²)	설계 응력범위 (kg/cm ²)	판정			
①	SM490	C	DB	700	337.96	O.K	①	SM490	C	DB	910	358.01	O.K			
			DL	1120	319.01	O.K				DL	1470	341.66	O.K			
	DB		700	469.05	O.K	SM570		DB		910	506.61	O.K				
	DL		1120	442.11	O.K			DL		1470	483.24	O.K				
②	SM490	E	DB	420	최대, 최소 응력이 모두 압축 응력이므로 피로검토생략	②	SM490	E	DB	560	최대, 최소 응력이 모두 압축 응력이므로 피로검토생략	②	SM490	DB	560	최대, 최소 응력이 모두 압축 응력이므로 피로검토생략
			DL	700					DL	910						
	DB		420	SM570			DB		560	SM570			DB	560		
	DL		700				DL		910							
③	SM490	E	DB	420	223.11	O.K	③	SM490	E	DB	560	223.20	O.K			
			DL	700	210.79	O.K				DL	910	213.29	O.K			
	DB		420	322.07	O.K	SM570		DB		560	335.51	O.K				
	DL		700	303.89	O.K			DL		910	320.24	O.K				

(a) 2주형

(b) 4주형

표 5. 연속교 피로설계 적부 판정

단면 1	강종	응력 범주	재하 활하중	허용 응력범위 (kg/cm ²)	설계 응력범위 (kg/cm ²)	판정	단면 2	강종	응력 범주	재하 활하중	허용 응력범위 (kg/cm ²)	설계 응력범위 (kg/cm ²)	판정			
①	SM490	C	DB	700	696.46	O.K	①	SM490	C	DB	700	180.28	O.K			
			DL	1120	732.84	O.K				DL	1120	434.85	O.K			
	DB		700	1045.31	N.G	SM570		DB		700	251.00	O.K				
	DL		1120	1096.01	N.G			DL		1120	614.55	O.K				
②	SM490	E	DB	420	83.88	O.K	②	SM490	E	DB	420	128.08	O.K			
			DL	700	119.99	O.K				DL	700	308.93	O.K			
	DB		420	174.59	O.K	SM570		DB		420	178.00	O.K				
	DL		700	222.25	O.K			DL		700	435.82	O.K				
③	SM490	E	DB	420	425.90	N.G	③	SM490	E	DB	420	최대, 최소 응력이 모두 압축 응력이므로 피로검토생략	③	SM490	DB	420
			DL	700	441.35	O.K				DL	700					
	DB		420	663.30	N.G	SM570		DB		420						
	DL		700	685.32	O.K			DL		700						

(a) 2주형

단면 1	강종	응력 범주	재하 활하중	허용 응력범위 (kg/cm ²)	설계 응력범위 (kg/cm ²)	판정	단면 2	강종	응력 범주	재하 활하중	허용 응력범위 (kg/cm ²)	설계 응력범위 (kg/cm ²)	판정			
①	SM490	C	DB	910	811.36	O.K	①	SM490	C	DB	910	239.14	O.K			
			DL	1470	839.84	O.K				DL	1470	549.83	O.K			
	DB		910	1119.92	N.G	SM570		DB		910	359.86	O.K				
	DL		1470	1160.13	O.K			DL		1470	833.90	O.K				
②	SM490	E	DB	560	90.19	O.K	②	SM490	E	DB	560	172.98	O.K			
			DL	910	131.43	O.K				DL	910	397.72	O.K			
	DB		560	133.96	O.K	SM570		DB		560	260.83	O.K				
	DL		910	203.66	O.K			DL		910	604.42	O.K				
③	SM490	E	DB	560	494.55	O.K	③	SM490	E	DB	560	최대, 최소 응력이 모두 압축 응력이므로 피로검토생략	③	SM490	DB	560
			DL	910	503.85	O.K				DL	910					
	DB		560	699.62	N.G	SM570		DB		560						
	DL		910	712.18	O.K			DL		910						

(b) 4주형

일반강재를 사용하나 고장력강을 사용하나 피로강도 측면에서 동일한 강도를 갖는다고 볼 수 있다.⁽²⁾ 그러므로 연속교의 정모멘트 단면에서 SM490에 비해 SM570의 DB, DL하중 모두 허용응력의 범위를 초과하는 결과를 보이고 있다.

전체적으로 피로분석을 해보면, 단순교 정모멘트 단면과 연속교의 부모멘트 단면에서는 고강도강 적용시 피로영향이 크지않다. 하지만, 연속교 정모멘트 부에서는 활하중에 따른 압축과 인장응력의 변동이 커서 적정형교에서의 고강도강 적용이 유리하지 않다. 그러므로 정모멘트 단면에서의 고강도강재의 높은 강도를 활용하기 위해서는 용접이음부의 개선이 필요할 것으로 생각된다. 즉, 교량의 고강도강재의 적용시 정모멘트 단면보다 부모멘트 단면에서 더 효율적이라 할 수 있겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 중소규모의 일반 강교량에 대한 고강도강재의 적용성 분석을 위해 최적 주형 플랜지두께 산정을 위한 전산 알고리즘을 적용하여 적정단면을 산정하고, 사용성 및 피로검토를 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전체적으로 고강도강 적용시 형고비가 낮을수록 최소강중측면에서 유리하였으며, 적정 강중 형고비에 따른 단면산정은 응력만으로 결정되는 것이 아니고 최소 판두께 규정이 관여하는 것으로 나타났다.

즉, 고강도강의 사용에 따른 경량화 및 경제성을 도모하기가 어려운 경우가 많다는 것을 확인할 수가 있다. 2주형, 4주형 단순교의 경우는 형고비가 L/15, L/18 에서 2주형, 4주형 연속교의 경우는 형고비가 각각 L/18, L/24을 기준으로 강중저감 효율있다.

2) 적정 강중 형고비에 대해 처짐 검토에서는 고강도화에 의한 일반강재에 비해 처짐비가 2.12정도까지 이르며 허용처짐값에 비해서는 안정한 범위에 있지만 사용성면에서 향후 진동에 따른 동적해석을 통한 사용성검증이 이뤄져야하겠다.

3) 고강도강 적용에 따른 피로검토에서는 연속교 정모멘트 부위에서 허용피로응력 이상의 응력범위가 발생하여 고강도강이 가진 높은 허용응력을 충분히 활용하기 위해서는 응력의 작용방향에 대한 연구와 더불어 용접이음의 상세에 대한 연구와 개선이 필요하다.

참고문헌

1. (社)日本鋼構造協會, 合理化桁に關するデザインマニュアル, 2000
2. 이종관, “고장력강의 교량적용에 관해” 강구조학회지 특집기사, 1998, 제10권, 2호, pp.39~48
3. 한국도로교통협회, 2000, 도로교설계기준
4. 전준창, 김석태, 경갑수, 이희현 “고강도 강재의 강교량 적용성에 관한 연구” 한국강구조학회 논문집, 2002, 제14권, 5호, pp.603~612
5. 박용명, 백승용, 황민오 “플레이트 거더교의 가로보 배치에 관한 연구” 한국강구조학회 논문집, 2003, pp.1~8
6. “강도로교의 피로설계요령” 철강엔지니어링센터