하이브리드 강합성 거더 적용성 검토

기술심사처-2832
(2017.12.22)

1 검 토 배 경

□ 최근 강구조물 설계시 HSB[3]800을 포함한 **고강도 강재 적용이 일반화**되고 있으며, 미국 등 해외에서는 **강도 기여도가 적은 복부에는 저강도 강재를 혼합한 하이브리드 거더[4] 적용**

□ 국내에서는 기존 허용응력 설계법에 익숙하여 **관습적으로 동일 강종을 적용**하고 있으나, 설계기준 개정에 맞추어 **하이브리드 거더의 구체적 설계방법 및 효과 검증 필요**

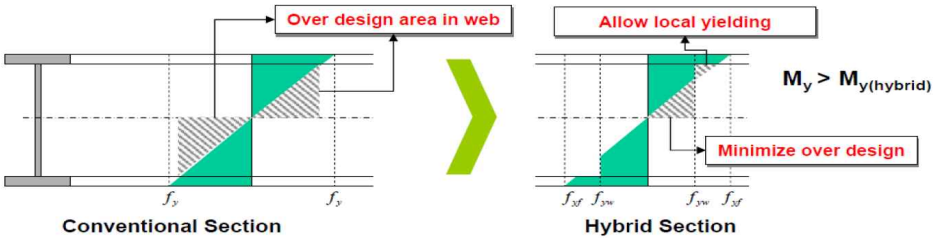
2 추 진 경 위

제·개정 (년, 월)	설계기준	주 요 내 용
개정 (2010. 9)	도로교 설계기준	▶ 하이브리드 거더 도입(3.8.4.2) - 복부판의 최대 휨응력이 허용응력 초과 허용, 사용하중 상태에서 항복강도 이내로 제한
개정 (2011.12)	철도설계기준 (노반편)	▶ 하이브리드 거더 도입(9.10.1) - HSB800 강종조합을 제외하면, 도로교 설계기준(2010)과 동일
제정 (2011.12)	도로교 설계기준 (한계상태설계법)	▶ 하이브리드 단면의 플랜지 강도감소계수(이하 하이브리드계수(R_h))를 이용하여 조기항복효과 고려(6.10.4.3) - 직선교에 한정 적용, 정·부모멘트 분리식 적용
개정 (2014. 4)	하중저항계수설계법에 의한 강구조 설계기준	▶ 도로교 설계기준(2012)과 달리 하이브리드 단면의 플랜지 강도감소계수 단일화된 공식 적용(6.3.1.1.10) - 직선교, 곡선교 모두 적용 가능
제정 (2016. 6)	강교설계기준 (한계상태설계법) (KDS 24 14 31)	▶ 강구조부재 설계기준(KDS 14 31 10)을 따르도록 코드 통합

3) HSB : High performance Steel for Bridge(교량용 고성능 강재)
4) 하이브리드 거더 : 플랜지와 복부판에 강도가 다른 강종을 혼합해서 사용한 거더

3 하이브리드 거더 개요

□ 개　　념 : 한쪽 혹은 양쪽 플랜지와 복부판에 강도가 다른 강종을 혼합해서 사용한 거더를 의미하며, 복부판의 국부적인 항복을 허용하여 설계 최적화가 가능한 거더

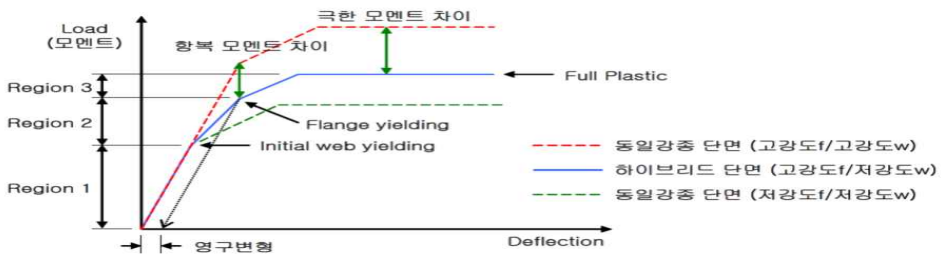


□ 강도특성

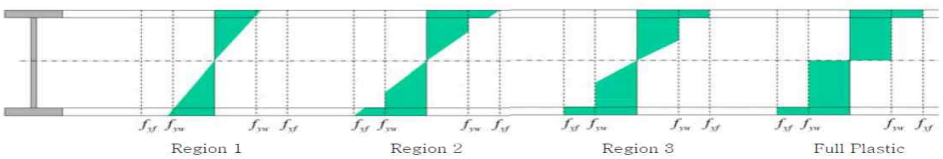
(1) 휨 강도

o **동일강종을 가지는 단면의 경우** : 플랜지 항복 발생 → 복부판 항복 영역이 커지면서 강성 상실 → 복부판 전단면이 항복되면 하중 증가없이 변위만 증가하게 되는 전소성 상태로 변화

o **하이브리드 단면의 경우** : 플랜지 항복 이전에 복부판 항복 시작되고 강성 저하 → 플랜지 항복하면서 한번 더 강성 저하 → 전소성 상태로 변화



【 하이브리드 거더의 하중 변위 곡선 】



【 하이브리드 거더의 하중 단계별 응력 분포 】

(2) 전단 강도

o AASHTO[5]의 경우 하이브리드 단면과 동일 강종 단면의 전단 설계에 차이를 두지 않고 있음.

o 휨과 전단이 동시에 작용하는 경우, 특히 휨모멘트가 상대적으로 클 경우 복부판에 일부 항복이 발생할 수 있으므로 극한거동에 차이를 보일 수 있음.

(3) 횡좌굴 강도

o 주로 단면의 기하학적 특성과 관계되므로, 동일 두께의 균질 단면에 비하여 횡좌굴 강도의 저하는 매우 적음.

□ 피로 성능 특성

o 피로 성능의 경우 소재의 강도특성과는 큰 관계가 없으며, 용접 상세에 큰 영향을 받는 것으로 알려짐.

o 하이브리드 거더의 경우 용접상세는 동일한 조건에서 플랜지와 복부판의 항복강도가 다른 강재를 적용하는 것으로 피로 성능에는 큰 차이가 없음.

□ 이종 강재의 용접

o 서로 다른 강재의 경우 각각의 화학성분이 차이가 나며, 사용하는 용접재료도 달라짐.

o 예열온도, 입열량 등 용접조건에도 차이가 나게 되며, 고강도 강재일수록 용접조건이 일반적으로 까다로움.

o 상대적으로 고강도 강재 용접조건을 적용하고, 저강도 강재 용접재료를 사용하면 문제가 없는 것으로 알려져 있으며, 도로교표준시방서에서도 동일하게 제시하고 있음.

☞ 역학적 특성, 피로강도 및 용접성 등 충분한 적용성 확보

5) AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials(미국도로교통공무원협회)

4 검 토 내 용

□ 국내·외 관련 설계기준 분석

설계기준	설계법	세부구분	강도조건	하이브리드 적용
도로교(2010)	ASD[6]	-	탄성	신규도입-항복강도 이내
AASHTO(2002), 도로교(2012)	LRFD[7]	조밀	소성	M_p 계산시 복부판 항복강도
		비조밀	탄성	정, 부모멘트 분리식 적용
AASHTO(2007), 강구조(2014)	LRFD	조밀	소성	M_p 계산시 복부판 항복강도
		비조밀	탄성	정, 부모멘트 동일식 적용
Eurocode	LSD[8]	Class1, 2	소성	M_p 계산시 복부항복강도
		Class 3	탄성	M_y 계산시 복부일부항복
		Class 4	유효단면	$M_{eff.y}$ 계산시 유효단면반영

※ 국가건설기준(KDS)이 2016. 6월 이후 KDS 14 31 10 [강구조부재 설계기준(하중저항계수설계법)]으로 일원화 되어 적용 가능

□ 하이브리드 강종조합 검토

o 관련 세부기준

▶ AASHTO LRFD(2007) Bridge Design Specification : 6.10.1.3

- 저강도 강재는 **고강도의 70% 및 250MPa 이상의 항복강도를 요구**
- 모든 종류의 하이브리드 거더에 대해 안전하게 적용할 수 있으나, **고강도 플랜지와 한 강재 등급의 저강도 적용을 권장**함.

▶ 강구조 설계기준(2014) : 6.3.1.1.3

- 웨브의 최소항복강도는 **고강도의 65% 이상**이 되도록 요구

6) ASD : Allowable Stress Design(허용응력설계법)
7) LRFD : Load and Resistance Factor Design(하중저항계수설계법)
8) LSD : Limit State Design(한계상태설계법)

o 적용가능 강종조합 검토

강 종			복 부 판					
			HSB800	HSB600	HSB500	SM520	SM490	SM400
		항복강도	690MPa	450MPa	380MPa	355MPa	315MPa	235MPa
플랜지	HSB800	690MPa	**100%**	**65%**	55%	51%	46%	34%
	HSB600	450MPa	-	**100%**	**84%**	**79%**	**70%**	52%
	HSB500	380MPa	-	-	**100%**	**93%**	**83%**	62%
	SM520	355MPa	-	-	-	**100%**	**89%**	**66%**
	SM490	315MPa	-	-	-	-	**100%**	**75%**
	SM400	235MPa	-	-	-	-	-	**100%**

o 국내·외 기준별 적용가능 강종조합

설계기준 / 강 종	AASHTO LRFD	강구조 설계기준
HSB800	-	HSB600
HSB600	**HSB500(권장)**, SM520, SM490	HSB500, SM520, SM490
HSB500	**SM520, SM490(권장)**	SM520, SM490
SM520	**SM490**	SM490, SM400
SM490	**-**	SM400

※ AASHTO LRFD에서는 하이브리드 거더 저강도 강재에 항복강도 250MPa 이상을 요구하므로, SM400(항복강도 235MPa)은 적용 불가

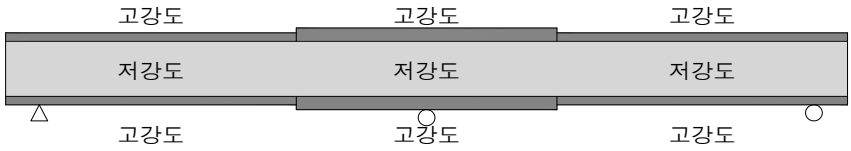
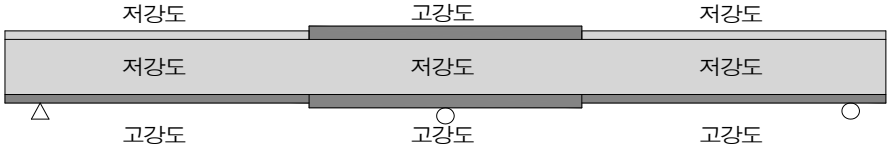
□ 설계자문 내용

o **자문위원** : 한국해양대 경갑수 교수 등 5명

o **주요내용**

- 서로 다른 강종의 강재 용접에 따른 문제점 및 고려사항
- 저강도 강재에 대한 별도의 최소항복강도 기준 필요성
- 강종 조합을 고강도의 65%내에서 자유롭게 적용 가능 여부

□ 하이브리드 거더 적용방안

CASE 1	 · 복부에만 저강도 강재 적용
CASE 2	 · 복부 + 정모멘트부 압축 플랜지 저강도 강재 적용

※ 하이브리드 거더 경제성 검토결과(붙임 1) 참조

o 단경간 적용시(ex. L=70m)

구 분	CASE 1-1			CASE 2-1		
플랜지	HSB600	HSB600	HSB600	HSB600	HSB600	HSB600
복 부		HSB500	SM490		HSB500 (상부FL)	SM490 (상부FL)
자재비 (백만원)	459	425	420	459	420	439
경제성 (%)	100	93	92	100	92	96

o 연속경간 적용시(ex. L=60+70+60=190m)

구 분	CASE 1-2			CASE 2-2		
플랜지	HSB600	HSB600	HSB600	HSB600	HSB600	HSB600
복 부		HSB500	SM490		HSB500 (상부FL)	SM490 (상부FL)
자재비 (백만원)	1,225	1,124	1,109	1,225	1,108	1,090
경제성 (%)	100	92	91	100	90	89

☞ (단 경 간) 복부에만 저강도 강재 적용

☞ (연속경간) 정모멘트부 압축플랜지와 복부에 저강도 강재 적용

5 결 론

□ 하이브리드 강합성 거더는 소재의 고강도화에 따라 **효율적으로 고강도 소재를 적용**할 수 있는 방법으로 강합성교 설계시 **설계여건과 경제성 등 검토 후 선택 적용**

> ☞ **하이브리드(Hybrid) 거더 적용시 균질(Homogeneous) 거더에 비하여 <u>자재비의 7~11% 절감 가능</u>**
>
> * 새만금-전주(강합성교 11개소) 노선에 적용할 경우 : **약 8억원 절감**

□ 강종 조합시 저강도 강재는 **최소항복강도 250MPa 이상을 준수**하고, 고강도의 65%내에서 **응력 여유와 자재 수급률 등을 감안하여 유연하게 적용 가능**

6 적 용 방 안

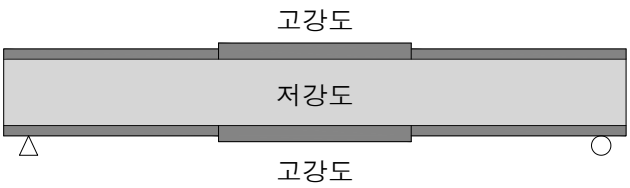
□ 설계 중 노선 : 설계주관부서 검토 후 적용

□ 향후 설계 노선 : 본 방침 적용

붙 임 : 1. 하이브리드 거더 경제성 검토결과
2. 하이브리드계수(R_h) 산정방법 및 유의사항
3. 구조계산서 및 설계도면(CASE 1, 2)
4. 설계자문 결과

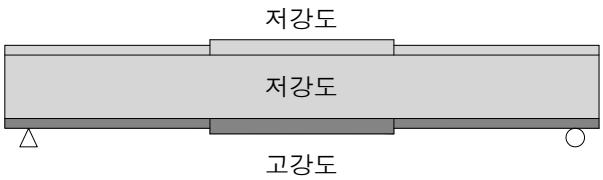
붙임1 하이브리드 거더 경제성 검토결과

□ CASE 1-1 : 복부만 적용 <단경간>

구 분	플랜지 / 복 부	HSB600	HSB600 / HSB500	HSB600 / SM490
경간구성		70m		
교 폭		12.3m(2차로)		
적용 개념도				
하이브리드 계수(R_h)		1.000	0.997	0.976
형 고(m)		3.0m	3.0m	3.0m
플랜지 폭 (mm)	상면	550	550	550
	하면	2,440	2,440	2,440
플랜지 두께 (mm)	상판	24～28	24～28	24～28
	하판	12～26	12～26	12～26
복부 두께(mm)	전구간	20	20	20
안전율	압축	1.095(450/411)	1.092(449/411)	1.068(439/411)
	인장	1.095(450/411)	1.092(449/411)	1.068(439/411)
강종	HSB600	247.765	104.704	104.704
	HSB500	-	144.921	-
	SM490	-	-	147.352
	SM400	53.539	53.539	53.539
	기타	18.456	18.456	18.456
총중량(ton)		319.760	321.620	324.051
자재비(백만원)		459	425	**420**
경제성(%)		**100%**	93%	**92%**

※ 저강도 비에 따른 하이브리드 계수(R_h) 값의 차이가 미미(0.997 ~ 0.976) 하므로 **가능한 가장 저강도의 강재를 적용하는 것이 최적**

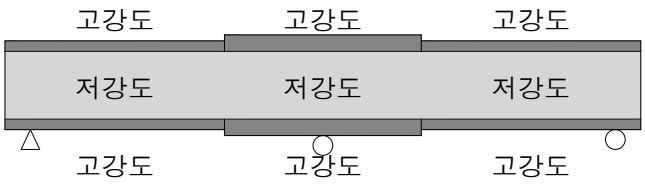
□ CASE 2-1 : 복부+정모멘트부 압축 플랜지 적용 <단경간>

구 분	플랜지	HSB600	HSB600	HSB600
	복 부		HSB500(상부FL)	SM490(상부FL)
경간구성		70m		
교 폭		12.3m(2차로)		
적용 개념도				
하이브리드 계수(R_h)		1.000	0.989	0.961
형 고(m)		3.0m	3.0m	3.0m
플랜지 폭 (mm)	상면	550	550	550
	하면	2,440	2,440	2,440
플랜지 두께 (mm)	상판	24～28	**24～42**	**24～74**
	하판	12～26	12～26	12～26
복부 두께(mm)	전구간	20	20	20
안전율	압축	1.095(450/411)	1.084(376/347)	1.092(284/260)
	인장	1.095(450/411)	1.121(445/397)	1.143(432/378)

강종	HSB600	247.765	59.358	59.358
	HSB500	-	197.176	-
	SM490	-	-	220.114
	SM400	53.539	53.539	53.539
	기타	18.456	18.456	18.456
총중량(ton)		319.760	328.529	351.467
자재비(백만원)		459	**420**	439
경제성(%)		**100%**	**92%**	96%

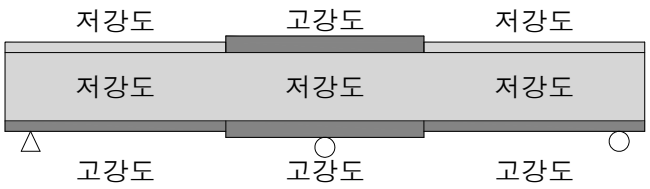
※ 단경간에서는 시공중 압축플랜지 및 극한한계상태의 상하 플랜지 강도에 지배가 되어, 판 두께 증가에 따른 강재량 증가로 저강도 상부플랜지 적용은 경제성 효과가 상대적으로 크지 않음.

□ CASE 1-2 : 복부만 적용 <연속경간>

구 분	플랜지 / 복 부	HSB600	HSB600 / HSB500	HSB600 / SM490
경간구성		60+70+60=190m		
교 폭		12.3m(2차로)		
적용 개념도				
하이브리드 계수(R_h)	정모멘트	1.000	0.983	0.940
	부모멘트	1.000	0.993	0.974
형 고(m)		3.0m	3.0m	3.0m
플랜지 폭 (mm)	상면	550	550	550
	하면	2,340	2,340	2,340
플랜지 두께 (mm)	상판	24	24	24
	하판	12～36	12～36	12～36
복부 두께(mm)	전구간	20	20	20
정모멘트부	압축	2.261(450/199)	2.221(442/199)	2.126(423/199)
	인장	1.654(450/272)	1.625(442/272)	1.555(423/272)
부모멘트부	압축	1.494(384/257)	1.257(323/257)	1.031(265/257)
	인장	1.243(450/362)	1.235(447/362)	1.210(438/362)

강종	HSB600	656.014	233.121	233.121
	HSB500	-	427.968	-
	SM490	-	-	435.580
	SM400	142.870	142.870	142.870
	기타	56.264	56.264	56.264
총중량(ton)		855.148	860.223	867.835
자재비(백만원)		1,225	1,124	1,109
경제성(%)		**100%**	92%	91%

□ CASE 2-2 : 복부+정모멘트부 압축 플랜지 적용 <연속경간>

구 분	플랜지	HSB600	HSB600	HSB600
	복 부		HSB500	SM490
경간구성		60+70+60=190m		
교 폭		12.3m(2차로)		
적용 개념도				
하이브리드 계수(R_h)	정모멘트	1.000	0.983	0.940
	부모멘트	1.000	0.993	0.974
형 고(m)		3.0m	3.0m	3.0m
플랜지 폭 (mm)	상면	550	550	550
	하면	2,340	2,340	2,340
플랜지 두께 (mm)	상판	24	24	24
	하판	12~36	12~36	12~36
복부 두께(mm)	전구간	20	20	20
정모멘트부	압축	2.261(450/199)	1.879(374/199)	1.392(277/199)
	인장	1.654(450/272)	1.625(442/272)	1.555(423/272)
부모멘트부	압축	1.494(384/257)	1.257(323/257)	1.031(265/257)
	인장	1.243(450/362)	1.235(447/362)	1.210(438/362)

강종	HSB600	656.014	170.949	170.949
	HSB500	-	490.140	-
	SM490	-	-	497.752
	SM400	142.870	142.870	142.870
	기타	56.264	56.264	56.264
총중량(ton)		855.148	860.223	867.835
자재비(백만원)		1,225	1,108	1,090
경제성(%)		**100%**	90%	**89%**

붙임2 하이브리드계수(Rh) 산정방법 및 유의사항

□ 하이브리드계수(R_h) 산정방법

① D_n 결정 : 단면의 탄성중립축에서 플랜지 내면 거리 중 큰 값

- 안전측으로 단기 n합성 단면을 이용 가능
- 부모멘트 구간은 거더+철근의 합으로 구성된 탄성 중립축 적용 (사용한계상태와 극한한계상태에서 동일한 계수값 적용)
- 사용한계 부모멘트에서 바닥판이 유효한 경우 단기 n합성 단면의 중립축에서 하부플랜지 내면거리를 적용

⇩

② A_{fn} 결정 : D_n에 대응하는 쪽의 플랜지 요소의 단면적

- 플랜지 요소는 플랜지, 덮개판 및 플랜지에 부착된 판을 의미
- 중립축이 중심에 위치할 경우 항복이 먼저 발생하는 쪽으로 결정
- D_n이 상부플랜지인 경우 종방향 철근의 면적을 포함
- D_n 및 A_{fn}을 결정 후 β값 결정 ($\beta = 2D_n t_w / A_{fn}$)

⇩

③ f_n 결정 : 플랜지 요소의 최소 항복강도 중 가장 큰 값

- D_n에 대응하는 쪽의 플랜지 요소에 공칭항복 발생시 : A_{fn}의 계산에 포함된 각 플랜지 요소의 최소 항복강도 중 가장 큰 값
- D_n에 대응하는 반대쪽에서 공칭항복 발생시 : D_n 방향에 포함된 각 플랜지 요소의 **계산된 탄성응력 중** 가장 큰 값
- f_n 결정 후 $\rho = \min(F_{yw}/f_n, 1.0)$으로서 1.0을 초과할 수 없음

□ 하이브리드계수(R_h) 적용시 유의사항

- Tub단면 : 하나의 상부플랜지, 복부 및 하부플랜지의 절반 적용
- 폐합단면 : 상하플랜지 절반 및 하나의 복부단면 적용
- 시공성 검토시 비합성단면 R_h, 기타 검토시는 합성단면 R_h를 적용