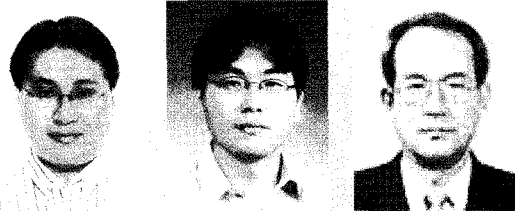


교량용 고성능강 HSB의 개발현황 (Development of Korean High-Performance Steel for Bridges, HSB)

이종관 RIST 강구조연구소 토목연구본부 책임연구원
 김기석 RIST 강구조연구소 토목연구본부 책임연구원
 윤태양 RIST 강구조연구소 토목연구본부 본부장,
 차세대시설물용신재료활용기술 연구단장



1. HSB의 소재 개발 현황

교량은 국가의 중요한 기간시설물로서 경제성, 안전성, 내구성이 확보되도록 설계, 제작, 시공, 유지관리 되어야 한다. 최근 설계 및 시공기술의 발전으로 교량이 점차 대형화, 장대화 되고 있는 추세이다. 이러한 교량시장의 요구에 대응하기 위해 미국, 일본 등은 1990년대 초부터 교량 전용의 고성능 강재를 개발하여 실교량에 적용하고 있다. 그러나, 기존의 국내 강교량의 설계 및 제작은 KS의 일반구조용 압연강재(KS D 3503) [3] 및 용접구조용 압연강재(KS D 3515) [4]의 사용을 전제로 하고 있어 교량용 강재로서의 성능을 충분히 반영하지 못하고 있었다. 또한, 고강도 콘크리트의 개발과 경제적인 신형식 교량 개발 등 콘크리트 교량의 지속적인 발전으로, 국내 강교량의 가격 경쟁력이 떨어져서 콘크리트 교량 대비 강교량의 설계 적용율이 2003년 48% 수준에서 2008년 이후에는 10% 대로 급감한 것으로 조사되었다.

국내의 강교량 경쟁력 개선을 유도할 수 있는 고성능 강재의 개발 필요성이 대두되었다. 이에 건설교통부가 주축이 되어 건설기술혁신사업으로 “차세대 시설물용 신재료 활용기술 연구단”이 출범하여 교량 맞춤형 고성능 강재 및 이용기술 개발 연구가 2005년에 착수되어, 인장강도 600MPa급의 HSB600과 인장강도 500MPa급의 HSB500이 개발에 성공하였다[8-10]. 교량용 고성능강인 HSB는 판두께 100mm 까지 판두께에 관계없이 동일한 강도를 갖고 용접이 용이하며 영하 20도에서도 취성 파괴에 잘 견디는 성능을 가진 강재이다.

교량 맞춤형 고성능 강재의 목표성능은 교량 관련 설계, 제작, 학계 전문가들에 대한 설문조사 결과 및 해외 사례를

참고하여 강재 생산자 측면이 아닌 사용자 관점에서, 사용자 중심의 요구성과 생산품질 및 공급 안정성을 고려하여 성능 규격을 설정하였다(표 1). 기존 강재의 사용환경이 0℃ 또는 영하 5℃로서 한강 이북의 추운 지역에서는 취성과파괴 등의 구조안전성에 대한 의구심을 해소하고, 고속철도 등의 중차량용 강교량에서 요구하는 영하 20℃에서의 충격인성을 보증할 수 있는 고인성 강재의 개발이 요구되었다.

개발된 HSB500 및 HSB600은 동급 수준의 국내의 기존 강종뿐만 아니라 해외의 교량용 고성능강과 비교하여 우수한 소재성능을 보유하고 있다(표 1). HSB가 기존 동급 강도의 강재와 비교하여 강도성능, 용접성, 인성 및 제조 측면에서 우수한 강재로 개발되었다. 또한 HSB는 해외의 교량용 고성능강과 비교하여 소재 성능은 비슷하지만 제조성능 측면에서 우수한 성능을 보유하고 있다.

표 1. HSB의 목표성능

성능 항목	HSB500	HSB600	HSB800
최대판두께	100mm	100mm	80mm
인장강도	500MPa 이상	600MPa 이상	800MPa 이상
기준 항복강도 (허용응력)	380MPa 이상 (230MPa)	450MPa 이상 (270MPa)	690MPa 이상 (380MPa)
충격인성 (L: 저온인성용)	-5℃ 47J이상 -20℃ 47J이상 (L)	-5℃ 47J이상 -20℃ 47J이상 (L)	-20℃ 47J이상 -40℃ 47J이상 (L)
용접성 (최소 예열온도)	예열작업 불필요 (20℃)	예열작업 불필요 (20℃)	저예열 (50℃)
내후성 (도장 불필요)	HSB500W는 내후성 보유	HSB600W는 내후성 보유	HSB800W는 내후성 보유
내라멜라테어	요구시 KS D 0276의 K25보충		
제조법	제어압연(TMCP)		
상용화 시기	'08.1월	'07.1월	개발중 (HSB800L/HSB800W 는 조장대교량사업단 2백식 과제에서 개발중)

차세대시설물용신재료활용기술 연구단에서는 미국 HPS 에 이어 세계에서 두 번째로 교량용 고성능강의 상용화에 성공하였다. HSB600(L)에 대한 제작성 평가, 용접부 피로강도 평가, 구조성능 평가 등의 교량 적용성 평가를 완료하여 상용제품이 2007년 1월 인천대교에 SM570의 대체재로 1,400톤이 초도 공급되었고, HSB500(L)의 경우 2008년 1월에 순천-해룡 상삼 프로젝트의 도로교 3개소에 SM520재의 대체재로 1,013톤이 초도 공급되었다. 상용 공급된 HSB500(L) 및 HSB600 (L)은 2010년 7월까지 총 59,669톤에 이르고 약 5만톤이 교량설계에 반영되었다.

강도와 인성이 강교량의 물량 절감에 따른 초기 공사비의 절감과 한랭 지역에서의 안전성을 확보할 수 있는 중요한 반면, 강교량의 녹색기술로서 장기적인 생애주기비용 관점에서 경쟁력을 확보할 수 있는 요소는 내후성이라고 할 수 있다. 내후성을 보유한 HSB500W와 HSB600W의 시제품이 2009년 개발되어 현재 상용화를 목표로 연구가 진행 중이다[7]. HSB500W와 HSB600W의 시제품이 2009년 4월에 각각 315톤, 384톤이 생산되었으며, 각각의 시제품에 대한 소재성능을 평가한 결과, 목표 성능을 만족하는 것을 확인하였다. HSB500W와 HSB600W의 합금조성에 의하여 내후성 지수 목표치인 5.8을 상회하는 6.2 정도의 내후성 지수를 확보하였고, 항복강도, 인장강도, 충격인성, 연신율의 기계적 성질에 대해서도 모두 기준치를 만족하는 결과를 얻었다.

차세대시설물용신재료활용기술 연구단에서는 인장강도 800MPa급의 HSB800 Pilot 시제품을 개발하였으며, 영하 40℃에서 47J 이상의 충격인성을 보증하는 고인성 강재인 HSB800L과 내후성을 보유하여 내륙에서 도장이 필요없는 강재인 HSB800W에 대한 소재 개발 및 이용기술 개발에 대한 연구는 초장대교량 사업단 2핵심과제에서 연속적으로 진행될 예정이다.

2. KS D 3868 신규 제정 및 개정

HSB는 일반 강재와는 별도로 교량용 강재의 요구특성을 반영하여 강도, 인성, 용접성 등이 우수한 강재로 개발되었으며, HSB500 및 HSB600의 경우 2007년 8월 KS D 3868 [2]에 교량 구조용 압연 강재로 등록되었고, 2009년 2월에는 HSB800 강재를 추가하여 KS D 3868을 개정하였다. KS D 3868에서는 HSB의 화학성분과 탄소당량, 용접

균열 감수성 등을 엄격히 제한하여, 교량 구조물의 안전성 및 경제성을 확보하고자 하였다.

그림 1은 HSB의 종류 및 기호를 보여주고 있다. HSB500, HSB600, HSB800은 일반적인 교량 구조용 강재이고, HSB500L, HSB600L, HSB800L은 저온인성이 우수한 강재이고, HSB500W, HSB600W, HSB800W는 내후성이 우수한 강재이다. KS D 3868에 기재된 HSB500 및 HSB600의 탄소당량(Ceq) 기준치는 각각 0.40이하 및 0.42이하이고, 용접균열감수성(Pcm) 기준치는 0.20이하이다. 화학성분의 조성으로 낮은 탄소당량과 용접균열감수성을 구현하여 기본적인 수분제거 작업만으로 예열없이 상온(℃)에서 용접이 가능하도록 용접성을 향상시켰다.

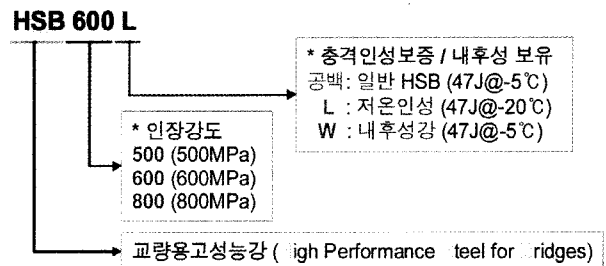


그림 1. HSB의 종류 및 기호

일반적으로 강재는 강도가 높을수록 인성을 확보하는 것이 어렵지만, HSB의 경우 제어압연(TMCP)과 합금원소의 화학조성을 통하여 강도성능과 인성을 동시에 향상시켜 개발하였다. 일반강재의 경우 항복강도가 판두께 별로 차이가 발생하지만 HSB는 항복강도가 판두께 별로 일정한 규격으로 설정된 것이 특징이다. 또한 HSB500과 HSB600의 경우 기존의 SM570재와 같이 시험온도 영하 5℃에서 샤르피 흡수에너지 47J을 보증하지만, 저온인성용인 HSB500L과 HSB600L은 시험온도 영하 20℃에서 샤르피 흡수에너지 47J을 보증하는 고인성 강재로 개발되었다. HSB800의 경우 인장강도 800 MPa급의 해외 유사강종의 인성기준을 참고하여 일반강종의 경우, 시험온도 영하 20℃에서 샤르피 흡수에너지 47J을 보증하도록 하였고, 고인성강재인 HSB800L의 경우, 시험온도 영하 40℃에서 샤르피 흡수에너지 47J을 보증하도록 하였다. 강재의 인성은 시험온도가 낮을수록 그리고 보증하는 샤르피 흡수에너지가 높을수록 크기 때문에 HSB는 저온에서의 취성파괴에 대한 저항력이 크다고 할 수 있다.

3. HSB 적용 도로교 설계기준 개정

HSB500 및 HSB600의 우수한 재료적 성능이 고려된 도로교설계기준(2005) [1]이 2008년 9월 개정 고시되었고 [5, 6], 2010년 개정되는 도로교설계기준에 HSB800 관련 기준을 추가한 개정안이 도로교통협회 자문과 관계기관 검토와 국토해양부 중앙건설심의위원회에서 최종 심의를 거쳐 2010년 9월 고시 예정이다. 도로교설계기준 개정안에서는 기존 강종별 기준 허용응력을 항복강도의 60%로 정의하였다. 다만 HSB800 강재의 경우 해외 유사 사례와 제한적인 시험데이터를 고려하여 안전율의 강화 목적으로 기준 허용응력을 항복강도의 55%로 적용하였다. 그림 4는 강종별 판두께에 따른 허용인장응력이다. 그림 2에서 기존의 강종들은 판두께가 증가함에 따라 허용응력을 저감하고 있으나

HSB의 경우 판두께에 따라 허용응력이 일정하다.

교량용 강재의 인성요구조건은 교량의 취성파괴를 방지할 목적으로 주로 인장응력을 받는 주부재, 특히 용접 이음부에서 피로균열이 발생하여 진전할 위험이 있는 주부재를 대상으로 적용된다. 강교량이 급격히 파괴될 위험성은 추울수록 커지므로 교량이 건설되는 지역의 최저온도에 따라 교량용 강재의 인성 조건을 차별적으로 적용할 필요가 있다. 이에 전국을 최저온도가 -15℃, -25℃, -35℃에 해당하는 3개의 구역으로 구분하고 각 구역에 해당되는 지역을 분류하였다(표 2). 개정된 도로교설계기준의 강재 요구인성기준에서는 강도등급 및 인성규격에 따른 강종별로 교량이 건설되는 지역의 최저 공용온도에 따라 최대 허용 판두께를 제시함으로써 교량 설계 실무자가 사용환경에 따라 적합한 강종과 판두께를 선택할 수 있도록 하고 있다[6].

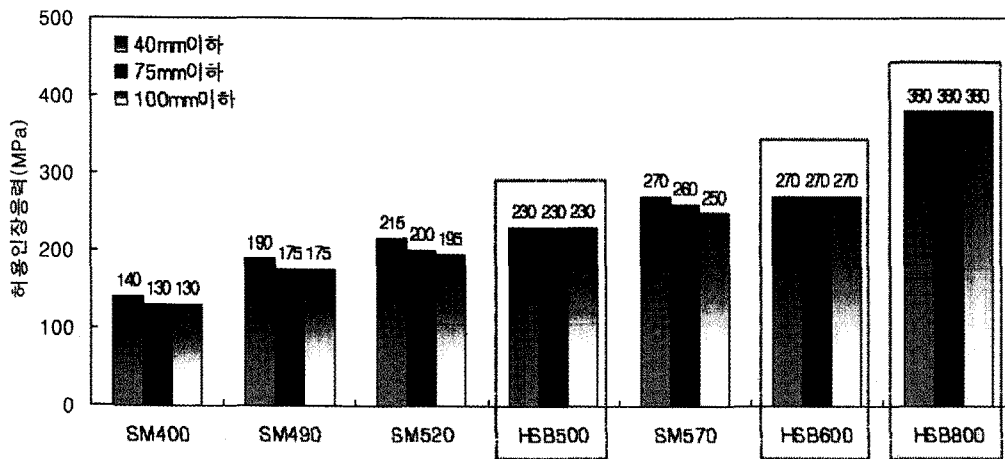
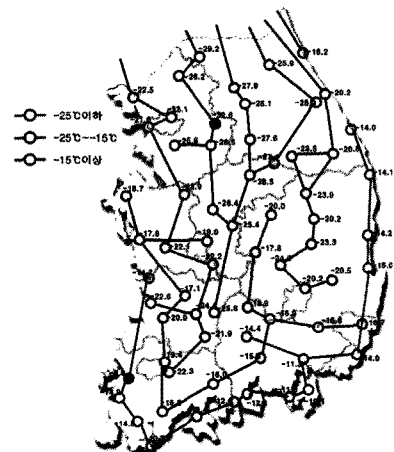


그림 2. 강종별 판두께에 따른 허용인장응력

표 2. 국내 지역별 최저 공용온도에 따른 온도구역 구분 (개정안의 표 3.3.15)

구분	최저 공용온도	대상 지역
온도구역 I	-15℃≤T	부산, 울산, 광주 전체 지역
		전라남도 전체 지역
		경상남도 전체 지역
		경상북도 해안 지역
		제주도 전체 지역
온도구역 II	-25℃≤T<-15℃	서울, 인천, 대구, 대전 전체 지역
		경기도 동부를 제외한 지역
		충청남도 전체 지역
		전라북도 전체 지역
		경상북도 내륙 지역
온도구역 III	-35℃≤T<-25℃	강원도 해안 지역
		경기도 동부지역 (동두천, 이천, 양평 등)
		강원도 내륙 지역
		충청북도 전체 지역



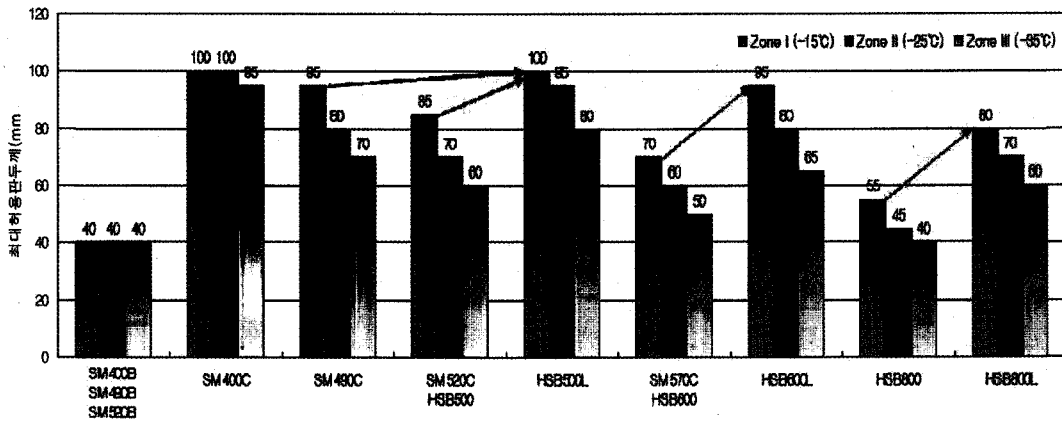


그림 3. 강종별 온도구역에 따른 최대허용 판두께

그림 3의 강종별 온도구역에 따른 최대허용 판두께 그래프에는 기존 강재와 비교하여 저온인성용 HSB의 고인성 특성이 차별화 되어 있다. 온도 구역 I의 경우 SM520C의 허용 가능 최대 판두께는 85mm인 반면 비슷한 강도의 HSB500L는 100mm이고, SM570의 허용가능 최대 판두께는 70mm인 반면 비슷한 강도의 HSB600L은 95mm이다. HSB800이 허용가능한 최대 판두께가 55mm인 반면 HSB800L의 경우에도 80mm까지 허용된다. HSB-L재의 경우 기존의 유사 강종과 비교하여 15~40mm정도 허용 판두께가 확대되었다. 이와 같이 HSB500L, HSB600L, HSB800L은 저온인성용으로 기존 강종 대비 허용가능 최대 판두께가 크게 증가되었다.

4. HSB의 기술적 및 경제적 효과

HSB는 판두께에 관계없이 항복강도와 허용응력이 일정한 강재로 개발되었다. 교량은 구조부재별로 요구되는 강도, 인성, 용접성 등이 다양하기 때문에 기존에는 하나의 교량에 여러 종류의 강재(14종)를 복잡하게 적용할 수밖에 없었지만, HSB(9종)를 적용함으로써 교량에 요구되는 성능을 단일 강종으로 쉽게 확보할 수 있게 되어 교량 설계 및 제작의 편의성을 향상시킬 수 있게 되었다.

교량용 고성능강은 기존 강재와 비교해서 강도, 용접성 및 시공성이 우수하고 강판 두께에 따른 강도 저하가 없으므로 전체 교량사업비를 절감할 수 있다. 미국의 HPS 활용 사례

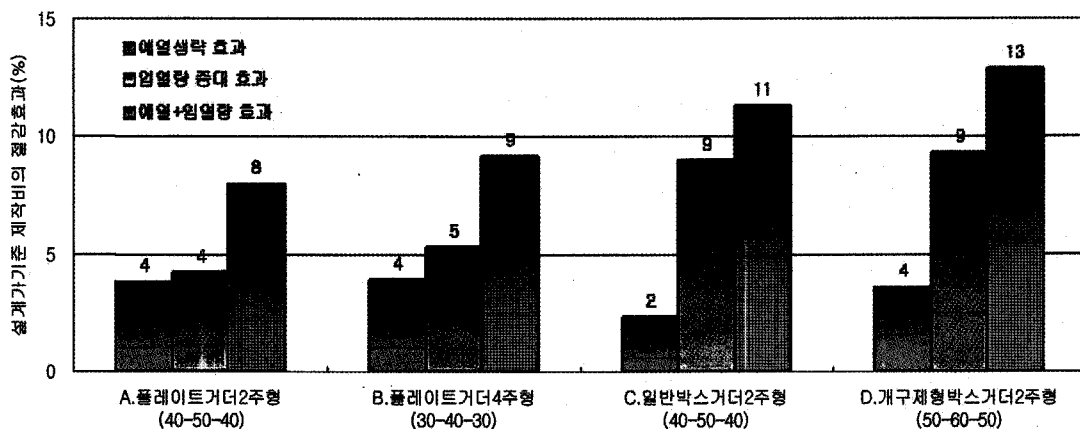


그림 4. HSB의 제작비 절감 효과

를 비추어 볼 때, HSB500 및 HSB600을 활용하여 강교량 구조시스템을 최적화하고 제작 생산성을 향상시킬 경우에 기존 강교량 대비 10% 이상의 건설비용 절감이 가능할 것으로 기대된다. 교량용 고성능강은 기존 강재와 비교해서 강판 두께에 따른 강도 저하가 없으므로 전체 교량사업비의 6~7% 정도를 절감할 수 있다. 제작비 측면에서는 HSB500(L) 및 HSB 600(L)의 경우, 강재표면의 수분을 제거하면 예열없이 상온에서 용접이 가능하기 때문에 예열 생략에 따라 설계가 기준으로 제작비의 2~4%를 절감할 수 있고, 높은 입열량(SAW: 10kJ/mm, FCAW: 5kJ/mm)을 적용하면 설계가 기준으로 제작비의 4~9%를 절감할 수 있다. HSB 용접시 예열을 생략하고 높은 입열량을 동시에 적용할 경우 그림 4와 같이 설계가 기준으로 8~13%의 제작비 절감이 가능하다.

교량용 고성능강 HSB가 개발되어 이미 일부가 상용화에 성공하였다. 또한 소재개발과 더불어 HSB가 “교량 구조용 압연 강재”로 KS D 3868로 등록되었고, HSB의 우수한 재료적 특징이 적용된 도로교 설계기준 개정안이 마련되어 심의 중이다. 이와 같이 HSB를 사용할 수 있는 제도적 기반이 갖추어져 가고 있고, 설계 및 제작 측면에서 경쟁력을 확보하고 있기 때문에 향후 HSB가 교량용 강재로서 보편적으로 사용된다면, 국내 강교량의 경제성과 안전성을 확보하는데 일조할 것으로 기대된다. 또한 HSB는 유럽의 EN이나 미국의 ASTM 등 국제적인 규격 이상의 재료성능을 보유하고 있을 뿐만 아니라 가격경쟁력까지 확보하고 있기 때문에 해외 교량 프로젝트에 수출할 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다.

5. 대한토목학회 HSB Award 제정

HSB 이용기술 발전에 대한 지원을 위하여 대한토목학회 주관의 HSB Award가 제정되었다. 기금은 HSB를 실용화하여 수여된 상금과 기술료에서 일부를 대한토목학회에 출연하여 마련하였고, 매년 HSB의 적용 활성화에 기여하는 4~5명의 기술자를 선정하여 대한토목학회 정기학술대회에서 상패와 상금을 전달하게 된다. HSB 관련 설계, 시공 및 연구 개발 관련 논문을 대한토목학회 정기학술대회에 접수하면, 강구조위원회에서 심의하여 수상 대상자를 선정하고, 정기학술대회에서 시상과 논문 발표가 이루어진다. 2009년에는 “HSB600을 적용한 하이브리드 합성거더의 소성모멘트”, “HSB를 이용한 강합성교의 설계 및 시공”, “교량구조

용 압연강재(HSB)의 고속도로 교량 적용” 등을 발표한 5명에게 수여되었다. 향후 3년간 먼저 시범적으로 운영한 후에 추가 운영여부를 검토할 계획이다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2005), 건설교통부 제정 도로교설계기준, 사단법인 한국도로교통협회.
2. 산업자원부 기술표준원 (2007), 교량 구조용 압연 강재 (KS D 3868), 산업표준심의회 철강부회.
3. 산업자원부 기술표준원 (1998), 일반 구조용 압연 강재 (KS D 3503), 산업표준심의회 철강부회.
4. 산업자원부 기술표준원 (2004), 용접 구조용 압연 강재 (KS D 3515), 산업표준심의회 철강부회.
5. 이종관, 황민오, 김기석, 권범필, 윤태양, 박영석 (2008), “교량용 고성능강(HSB)의 KS 등록 및 설계기준 개정안 소개”, 제20권 제1호 통권 제74호, pp. 53-57.
6. 이종관, 김기석, 이석중, 윤태양, 배두병 (2008), “강재의 인성요구조건 설계기준 개정안 소개”, 강구조학회지 제20권 제1호 통권 제74호, pp. 58-64.
7. 이종관, 김기석, 윤태양, 조재영 (2009), “내후성 교량용 고성능강 HSB500W 및 HSB600W의 시제품 개발”, 토목학회 학술발표회 특별세션 전문학회 세미나, pp. 1-8.
8. 이종관, 김기석, 윤태양, 조재영 (2008), “HSB500 상용화 및 HSB의 도로교설계기준 개정”, 토목학회 학술발표회 특별세션 전문학회 세미나, pp. 1-8.
9. 이종관, 김기석, 윤태양, 조재영 (2007), “HSB600 상용화 및 HSB500 시제품 개발”, 토목학회 학술발표회 특별세션 전문학회 세미나, pp. 1-8.
10. 이종관, 최종교, 조재영, 윤태양 (2006), “인장강도 600MPa급 교량용 고성능강 시제품 개발 및 소재 성능평가”, 토목학회 학술발표회 특별세션 전문학회 세미나, pp. 1-10.