



2,160 MPa/2,400 MPa PS강연선 및 포스트텐셔닝(PT) 기술개발 현황

Development of 2,160 MPa/2,400 MPa PS Strand and its Application Technology

김진국 Jin-Kook Kim
(재)포항산업과학연구원 책임연구원

성택룡 Taek-Ryong Seong
(재)포항산업과학연구원 책임연구원

이종관 Jong-Kwan Lee
(재)포항산업과학연구원 책임연구원

1. 머리말

PS강연선은 포스코 등의 제철소에서 공급받은 피아노선재를 고려제강, 만호제강 등의 회사에서 신선 및 냉간 가공하고, 그 강선을 꼬아 합친 후 잔류변형을 제거하기 위해 저온열처리를 한 강재 제품이다. 현재 전 세계적으로 사용되고 있는 PS강연선의 인장강도는 1,860 MPa이며, 0.82% 탄소함량 선재인 SWRS82 또는 SWRH82로 생산되는데 1980년대 초에 상용화된 이래로 거의 30년간 강도변화 없이 사용되고 있다. 2000년대 초반 신일본제철(NSC)과 스미토모(SEI) 등에서는 구조물의 슬림화를 위해 2,230 MPa급 이상의 PS강연선을 개발하였고, 2006년에는 동경 아카하바라역 앞의 보도육교에 시범적으로 적용한 바 있다. 그러나 규격, 설계기준, 정착시스템 등의 제반기술이 완성되지 않아 상용화되지 못하고 있는 실정이다.

국내에서는 포스코와 고려제강이 지식경제부 Mega Structure 연구과제¹⁾의 일환으로 2008년 인장강도 2,160 MPa에 해당하는 선재와 PS강연선을 개발하였다. 나아가 국토해양부의 지원을 받아 한국도로공사와 (재)포항산업과학연구원 등에 의해 수행 중에 있는 초장대교량사업단²⁾에서는 최근 인장강도 2,400 MPa의 고강도 PS강연선을 개발하였으며, KS(2011.3)에도 반영한 바 있다. 이와 더불어 초장대교량사업단에서는 2,160 MPa와 2,400 MPa 강연선에 대응하여 구조물에 함께 적용할 수 있는 정착시스템을 개발하였으며, 설계 적용성 측면에 있어서 다양한 검토를 수행하였다. 본 고에서는 이처럼 고강도화되는 강연선에 있어서 요구되는 성능과 나아가 구조물에 설계적용 시의 방법에 대해 상세히 소개하고자 한다.

2. KS와 고강도 강연선의 요구성능

KS에서 PS강연선은 KS D 7002에 'PC강연선'으로 정의되어 있어 아직 많은 엔지니어들은 PC강연선을 혼용하고 있으나 도로교 설계기준^{3, 4)}과 콘크리트 구조설계기준⁵⁾에서는 PS강연선으로 명시하고 있다. KS에서는 강연선과 관련하여 <표 1>과 같이 강도와 연신율, 릴렉세이션(Relaxation)에 대해서만 그 성능을 정의하고 있다. 도로교 설계기준에서는 "2.3.1 강재" 부분의 해설에서만 기존 강재 대비 고강도 강재를 사용할 경우 "지연파괴의 검토 등 설계와 시공상의 주의사항에 대해 별도의 검토가 필요하다."는 문구를 담고 있지만 이에 대한 엔지니어들의 이해도는 아직 많이 부족한 실정이다.

표 1. KS D7002 강연선의 규격

강연선	직경 (mm)	공칭 단면적 (mm ²)	인장 강도 (kN)	0.2% 오프셋 항복강도(kN)	연신율 (%)	릴렉 세이션 (%)
2,400 MPa	15.2	138.7	≥ 333	≥ 283	3.5	2.5
2,160 MPa	15.2	138.7	≥ 300	≥ 255	3.5	2.5
1,860 MPa	15.2	138.7	≥ 261	≥ 222	3.5	2.5

한편, 유럽, 미국, 일본 등에서는 인장강도 1,860 MPa을 초과하는 고강도 강연선을 구조물에 사용하기 위해서는 ISO 15630-3¹³⁾에서 명시하고 있는 시험방법에 따라 <사진 1>과 같이 응력부식시험 등을 실시하고 EN10138-3¹¹⁾에서 명시하고 있는 요구조건을 만족하도록 하고 있다. 응력부식 시험은 부식을 유발하는 용액에 강선을 노출시킨 상태에서 강선 공칭강도의 80% 수준으로 지속하중을 가해 파단이 발생하는 시점까지의 시간을 측정하여 그 성능을 평가하는 것이다. 이때 시험용액은 A(NH₄SCN)와 B(K₂SO₄ 등)가 있으며, 둘 중 하나에 대해 시험을 하도록 하고 있다. 시험용액 A는 파단시 강연선에 수소침입을 유발하기 때문에 일본에서는 수소지연파괴로 불리기도 한다. 이때 최소 6개 이상의 시편에 대해 시험을 실시해야 한다.

EN10138-3에서는 시험용액 A의 경우 최소 파단시간은 2시간 이상이어야 하고, 중간값은 5시간 이상이어야 한다. 시험용액 B의 경우 최소 파단시간은 2,000시간 이상이어야 한다. 시간의 제약 때문에 통상적으로 시험용액 A를 선택하여 응력부식시험을 실시하고 있다.

국내에서 개발된 2,160 MPa와 2,400 MPa 강연선은 KS의 요구조건을 모두 만족하고 있지만 추가적인 성능 검증을 위해 현재 ISO 15630-3에 따른 응력부식시험을 진행 중에 있다. 응력부식시험은 강연선을 구성하는 소재와 제작 프로세스에 영향을 받기 때문에 소재가 바뀌



사진 1. 고강도 강연선과 응력부식 시험

거나 강연선을 제작하는 신선사가 다를 경우 별도의 성능평가를 할 필요가 있다.

3. 정착구의 성능기준

고강도 PS강연선이 구조물에 적용되기 위해서는 그에 적합한 정착시스템이 함께 사용되어야 한다. 정착장치의 성능평가기준은 전세계적으로 미국의 PTI 기준¹⁴⁾이나 유럽의 ETAG013 기준¹⁰⁾이 통용되고 있으며, 국내에서는 처음으로 2009년에 콘크리트 표준시방서에 관련 시험기준인 KCI-PS101⁷⁾을 제정하였다. KCI-PS101은 ETAG013을 기준으로 작성되었으나 피로의 영향을 거의 받지 않는 부착텐던의 경우 피로시험을 생략할 수 있다고 명시하고 있다.

정착시스템의 구성요소는 <그림 1>과 같이 앵커헤드, 썸기, 정착구(또는 캐스팅) 등으로 구성되어 있다. 강연선의 정착효율은 앵커헤드, 썸기와 상호관계에 의해 결정되는 것으로 정하중시험과 피로하중 시험을 통해 평가를 하고 있다. 정하중시험에 의한 정적성능은 정착시스템을 포함한 케이블 시스템이 텐던 실제 인장강도의 95% 이상이 요구된다. 피로성능은 텐던 공칭강도의 65% 수준에서 80 MPa의 응력범위에 대해 200만회 피로시험을 실시하여 5% 이상의 단면손실이 발생하지 않아야 한다. 이때 시험은 <사진 2-(a)>와 같이 실구조물과 유사하게 정착장치를 설치한 시험체를 이용하여 이루어져야

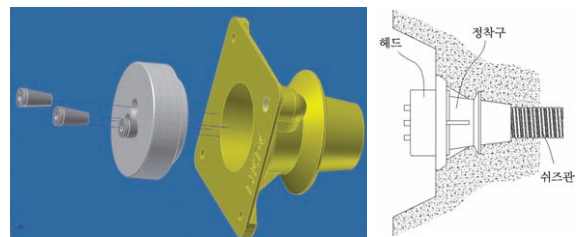


그림 1. PS강연선의 정착시스템

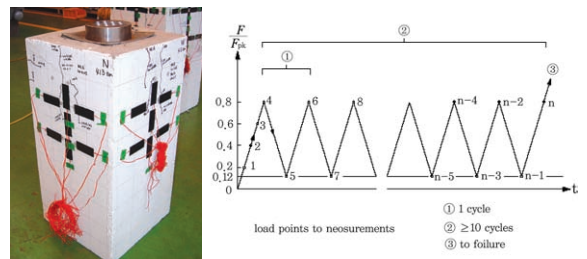
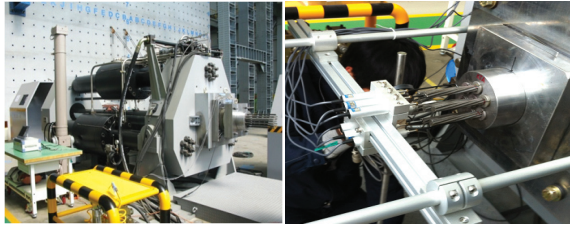


그림 2. 정착구의 하중전달시험체와 하중가력계획



(a) 정하중/피로하중 시험체 설치전경 (b) 강선 상대변위 계측기 설치

사진 2. 정착장치의 정하중/피로하중시험체 설치 예

하며, 정하중시험의 경우 <사진 2-(b)>와 같이 강연 내 강선과 강선사이의 상대변위와 강선과 뼈기 사이의 상대 변위를 계측하도록 하고 있다.

정착구의 경우 <그림 2>와 같이 콘크리트 블럭을 포함 하여 하중전달시험을 하고, 반복하중이 가해지는 과정 중 강연선을 통해 콘크리트로 전달되는 하중이 효과적으로 콘크리트 블럭으로 분포되도록 해야 한다. 즉, 반복하중 가력에 의한 콘크리트 표면에서의 균열이 0.25 mm 이하로 발생해야 하며, 최대 강도는 텐던의 공칭강도 대비 110% 이상이 확보되어야 한다.

4. 구조물 적용을 위한 설계 방법

2,160 MPa, 2,400 MPa 고강도 강연선이 구조물에 적용되기 위해서는 그에 맞는 설계식의 개발 또는 기존 식의 적합성 평가가 이루어져야 한다. 프리스트레싱 관련한 주요 설계식은 탄성수축, 마찰, 장기거동 등에 의한 손실로 그중 장기거동의 경우 크리프와 건조수축을 정확히 고려하는데 한계가 있어 설계상의 편의를 위해 단순화된 식을 사용하고 있다. 국내 도로교 설계기준³⁾의 경우 2000년대 초반의 AASHTO 간략식⁸⁾에 기반하고 있고, 이는 강연선의 강도별로 프리스트레스 손실식을 구분하도록 하고 있다. 현재까지는 1,860 MPa 저릴렉세이션 강연선이 일반적으로 사용되기 때문에 이 강재에 대한 식을 일반적으로 사용하고 있다.

2010년도 도로교 설계기준에서는 2,160 MPa 이상의 고강도 강연선에 대해서는 상세해석 또는 실험을 통해서 손실을 평가하도록 하고 있다. 그러나 구조설계를 하는데 있어 매번 상세해석이나 실험을 하기에는 한계가 있어 고강도 소재를 사용하는데 제약이 되고 있다. 따라서 기존 국내·외 설계기준 식들과 상세해석결과를 비교

하여 고강도 강연선의 설계기준식 적용 적합성을 평가해보았다.

한편, 2007년 AASHTO LRFD⁹⁾나 유로코드¹⁰⁾(또는 도로교 설계기준 한계상태설계법 2012)⁴⁾에서는 강도별로 식을 구분하지 않고 프리스트레스 콘크리트 구조 단면 내에서 강연선의 단면적과 응력수준을 고려한 설계식을 제시하고 있다.

우선, 2,160 MPa 강연선을 사용하는 40 m PSC보(IPC거더)에 대해 기존 도로교 설계기준의 간략식과 Midas에 의한 상세해석 결과와 비교하였다. 대상교량은 담양-성산 간 고속도로 구간 중 남원천교(IPC거더, 40 m × 3경간 = 120 m)로 1,860 MPa 강연선을 적용할 경우 1단계로 15개 강연선 다발로 구성된 텐던 3개에 긴장력(1차 긴장)을 도입하고, 2단계로 9개 강연선 다발로 구성된 텐던 2개에 긴장력(2차 긴장)을 도입한다. 2,160 MPa 강연선을 적용할 경우, 1차 긴장재는 13개 강연선 다발로 구성된 텐던 3개로, 2차 긴장재는 8개 강연선 다발로 구성된 텐던 2개로 설계할 수 있었다.

검토결과는 <표 2>와 같다. 1,860 MPa 강연선에 대해 도로교 설계기준의 간략식을 사용하는 경우 1, 2차 긴장재에 대한 유효긴장력을 86.6%, 87.9%로 평가하고 있다. 반면, Midas를 이용한 상세해석에서는 87.4%, 91.1%로 산정하고 있다. 즉, 도로교 설계기준의 간략식이 상세해석 보다는 프리스트레스 손실을 다소 보수적으로 평가하고 있는 것으로 나타났다. 2,160 MPa 강연선의 경우, 이러한 경향이 계속 유지되는 것으로 나타났으나 손실량이 줄어 유효긴장력이 상대적으로 크게 나타나는 것으로 평가되었다. 고강도 강연선을 사용할 경우 강연선량이 절대적으로 줄게 되는데, 이것이 크리프와 건조수축에 의한 손실을 줄이는 효과를 유발한 것으로 평가된다.

이때, 콘크리트의 크리프와 건조수축 관련 계수는 구조계산과 상세해석에서 동일한 값을 사용하였으며, 그 값은 구조계산에서 계산된 값을 사용하였다.

나아가 <그림 3>의 35 m PSC표준보에 대해서 2,400 MPa 강연선을 적용할 때 각 설계기준에서는 어느 정도 수준으로 손실을 평가하는지 비교하여 설계식의 적합성을 평가하였다. 콘크리트의 크리프와 건조수축 관련 계수 산정은 각 설계기준의 식을 사용하였

다. 이때 상대습도는 70%로 가정하였고, 거더 긴장력 도입은 거더 콘크리트 타설 후 28일, 바닥판 콘크리트 타설은 거더 긴장력 도입 후 90일, 바닥판 동바리 제거는 바닥판 콘크리트 타설 후 15일로 가정하였다. <표 3, 4>의 결과를 보면, 앞의 40m PSC보의 예제에서와 마찬가지로 고강도 강연선을 사용하는 경우 상대적으로 프리스트레스 손실량이 줄어 유효율이 증가하는 것으로 나타났다. 도로교 설계기준의 경우 AASHTO LRFD 상세식이나 유로코드와 비교하여 손실량을 과대평가하는 것으로 나타났다. 그러나 설계식간의 차이는 2,400 MPa 고강도 강연선에서 상대적으로 작게 나타나는데 이 또한 앞의 상세해석결과와의 비교결과와 동일한 형태이다. 한편, AASHTO 간략식은 오히려 도로교 설계기준 간략식보다도 더 보수적으로 손실량을 평가하는 것으로 나타났다.

강연선의 프리스트레스 손실량은 간략식을 사용하는 경우가 상세식을 사용하는 경우보다 다소 과다하게 산정하는 것으로 나타났다. 이 사례로 볼때 일반적인 PSC보의 경우 기존 도로교 설계기준 간략식을 적용하여 설계하더라도 구조 안전성을 확보하는데에 문제는

없을 것으로 예상된다. 그러나 상세식은 식 내에서 다양한 설계변수들을 고려할 수 있도록 하고 있기 때문에, 강연선의 강도변화나 교량거더의 형고변화 등 설계변수 변화에 대응할 수 있어 2160 MPa 이상의 고강도 강연선이 적용되는 구조물에서는 간략식 보다는 상세식의 적용이 보다 적합할 것이다.

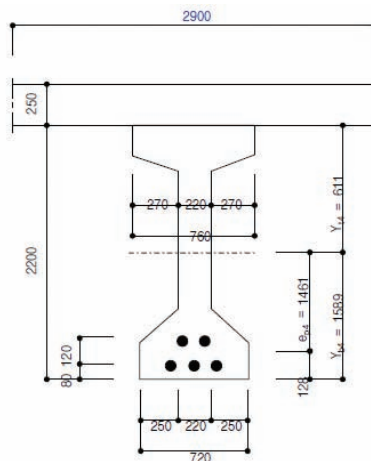


그림 3. 35m PSC 표준보

표 2. 40m PSC보(IC거더)의 도로교 설계기준 간략식과 상세해석 비교

1,860 MPa		긴장력 (Pj)	초기긴장력 (Pi)	크리프& 건조수축	릴렉 세이션	유효긴장력 (Pe)
1차 긴장재	간략식	269,633	227,947	-27,900	-2,627	197,420 (86.6%)
	Midas		232,148	-25,731	-3,546	202,872 (87.4%)
2차 긴장재	간략식	125,829	109,396	-11,923	-1,281	96,192 (87.9%)
	Midas		116,679	-7,831	-2,562	106,285 (91.1%)

표 3. 설계기준에 따른 손실량 비교-1,860 MPa 강연선

1,860 MPa 손실구분	도로교 설계기준 간략식 ³⁾	AASHTO		유로코드2 ¹⁰⁾
		간략식 (2004) ⁹⁾	상세식 (2007) ⁹⁾	
크리이프	112.29	86.07	103.95	67.58
건조수축	36.40	74.49	30.34	56.60
릴렉세이션	14.52	17.00	9.89	11.13
합계	163.21	177.56	144.18	135.31
즉시손실후	1005.08	1005.08	1005.08	1005.08
최종유효	841.87	827.52	860.90	869.77
유효율	0.838	0.823	0.857	0.865

2,160 MPa		긴장력 (Pj)	초기긴장력 (Pi)	크리프& 건조수축	릴렉 세이션	유효긴장력 (Pe)
1차 긴장재	간략식	274,107	233,051	-24,946	-1,882	206,223 (88.5%)
	Midas		236,349	-22,928	-4,126	209,295 (88.6%)
2차 긴장재	간략식	126,511	110,300	-10,502	-919	98,878 (89.6%)
	Midas		117,257	-6,866	-2,829	107,562 (91.7%)

표 4. 설계기준에 따른 손실량 비교-2,400MPa 강연선

2,400 MPa 손실구분	도로교 설계기준 간략식 ³⁾	AASHTO		유로코드2 ¹⁰⁾
		간략식 (2004) ⁹⁾	상세식 (2007) ⁹⁾	
크리이프	95.01	78.00	95.32	58.76
건조수축	36.40	74.49	31.73	61.07
릴렉세이션	13.13	17.00	14.25	17.05
합계	144.54	169.49	141.30	136.87
즉시손실후	1332.82	1332.82	1332.82	1332.82
최종유효	1188.28	1163.33	1191.52	1195.95
유효율	0.892	0.873	0.894	0.897

4.1 2,160 MPa/2,400 MPa 고강도 강연선의 경제성

2,160 MPa, 2,400 MPa 고강도 강연선은 기존 강연선 대비 강도 측면에서 15%와 28% 증가되었다. 그러나 가격도 강도와 유사한 수준으로 증가할 것으로 예상되어 PSC 구조물에 적용될 때 경제성에 대한 검토가 요구되었다. 여기서는 개략적인 수준에서 비교를 위해 2,160 MPa 강연선의 경우 기존 1,860 MPa 강연선 대비 10%, 2,400 MPa 강연선의 경우 15% 가격이 증가한다고 가정하여 경제성을 분석하였다.

일반적인 PSC 보의 경우 텐던의 개수 변화를 시키지 않고 단순히 강연선의 수를 줄임으로써 PSC 보의 제작비를 약 2~5% 수준으로 절감할 수 있는 것으로 평가되었다. 한편, PSC 박스거더의 경우 복부의 두께가 쉬스관의 직경에 의해 결정되는 사례가 빈번해 고강도 강연선을 사용하여 쉬스관의 직경을 줄일 경우 박스거더의 복부두께 또한 줄일 수 있게 된다. <그림 4>와 같이 실험교량 중에 복부를 줄일 수 있는 박스거더에 대해 비교설계를 수행해 보았다. 대상교량은 교동 연육교 접속교 시점부로 연장 900 m(=18@50 m), 교폭 12.4m의 왕복 2차로 교량이다. 이 경우 2,160 MPa 이상의 고강도 강연선을 사용함으로써 복부의 두께를 기존 450 mm에서 400 mm로 줄일 수 있었고, 이를 통해 2,160 MPa과

2,400 MPa 강연선을 적용하는 경우 공사비가 각각 8%와 10% 절감 가능한 것으로 평가되었다.

5. 맺음말

고성능 고강도 소재의 사용은 건설비용과 시공성을 향상시키고 건설 시 탄소배출을 감소시키는 것은 결국 시민 삶의 질 향상으로도 연결된다. 본 고에서 살펴본 바와 같이 2,160 MPa과 2,400 MPa의 고강도 강연선 역시 PSC 구조물의 경제성과 시공성 향상에 큰 기여를 할 수 있음을 확인하였다. 그러나 다른 한편으로는 사용재료량이 줄면서 그에 따른 구조물의 여유도 감소 또한 피할 수 없게 되었다. 이는 비단 건설 분야에서만 나타나는 것이 아니라 중공업, 자동차 등 산업 전 분야에서 나타나는 현상이다. 따라서 우리 삶을 우리가 원하는 방향으로 발전시켜 나아가기 위해서는 새롭게 개발되는 제품에 대해 충분한 검증이 요구된다. 고강도 강연선 또한 구조물에 보다 안전하게 적용하기 위해 정착정치의 정착중, 피로하중, 하중전달성능과 강연선의 응력부식 성능 등에 대한 충분한 검증이 필수적으로 요구된다. □

담당 편집위원 : 김진국 (재)포항산업과학연구원 jinkook.kim@rist.re.kr

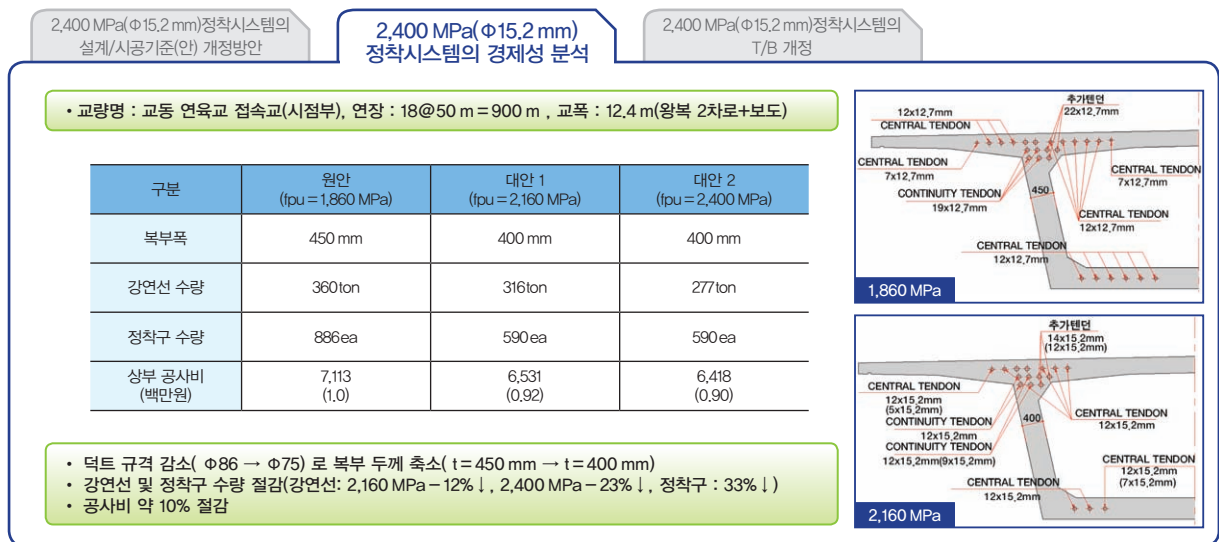


그림 4. 고강도 강연선 적용 PSC 박스거더 경제성 분석

참고문헌

1. 대한금속재료학회, 「차세대 초대형 구조물용 강재 개발」, 2006.
2. 초장대교량사업단
홈페이지, <http://www.longspanbridge.org/>.
3. 한국도로교통협회, 「도로교 설계기준」, 2010.2.
4. 한국도로교통협회, 「도로교 설계기준(한계상태설계법)」, 2012.
6. 한국콘크리트학회, 「콘크리트 구조설계기준」, 2007.
7. 한국콘크리트학회, 「콘크리트 표준시방서해설」, PSC 텐던 정착장치 및 접속장치의 성능시험 방법(KCI-PS101), 2009.
8. American Association of State Highway and Transportation Officials, 「AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (3rd Edition)」, 2004.
9. American Association of State Highway and Transportation Officials, 「AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (4th Edition)」, 2007.
10. European Committee for Standardization, 「Eurocode 2: Design of concrete structures」, 2004.
11. European Committee for Standardization, prEN 10138-3 Prestressing steels – Part 3: Strand, 2009.
12. European Organization for Technical Approval, ETAG013 Post-tensioning kits for prestressing of structures, 2002.
13. International Standard, ISO 15630-3 Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 3: Prestressing steel, 2010.
14. Post-Tensioning Institute, 「Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems」, 1998.



김진국 박사는 한국과학기술원 건설환경공학과에서 콘크리트-철근의 부착슬립과 RC 기둥의 장기거동 고려 비선형 해석 관련 연구로 박사 학위를 취득한 후 2006년 (재)포항산업과학연구원 강구조연구소에 입사하여 PS강연선 및 정착시스템과 합성구조 관련하여 거더, 교각 등 다양한 연구를 수행하고 있다.

jinkook.kim@rist.re.kr



성택룡 박사는 서울대학교에서 M27/M30의 후물볼트와 고장력 F13T 볼트 이음기술 등과 관련하여 박사 학위를 취득하였다. (재)포항산업과학연구원에서 10여년간 강구조 관련하여 다양한 연구를 수행하고 있으며, 한국강구조학회 기술상, RIST 6시그마우수상 등 여러 분야에서의 수상실적을 보유하고 있다.

trseong@rist.re.kr



이중관 박사는 서울대학교에서 고성능 강재의 피로 및 인성과 관련하여 박사학위를 취득하였다. (재)포항산업과학연구원에서는 10여년간 고성능 강재의 이용기술 개발 관련 분야를 전문으로 하며, 현재 초장대교량사업단 제2핵심과제인 '고성능 전락소재 및 이용기술개발'의 책임자를 맡고 있다.

jklee0414@rist.re.kr