



고강도 강연선의 응력부식 성능 및 평가방법

Stress Corrosion of PS Strand for Prestressed Concrete

김진국 Jin-Kook Kim (주)포스코 철강솔루션센터 책임연구원
성택룡 Taek-Ryong Seong (주)포스코 철강솔루션센터 수석연구원
윤석구 Seok-Goo Youn 서울과학기술대학교 토목공학과 교수
전세진 Se-Jin Jeon 아주대학교 건설시스템공학과 교수
김기현 Ki-Hyun Kim 컨택이앤씨 대표이사

1. 머리말

콘크리트는 인장에 취약한 구조재료로 이를 보강하기 위해 철근, 강섬유 또는 강연선과 함께 사용된다. 특히, 구조물이 장경간화 또는 대형화 될 경우 고강도 강연선을 이용한 프리스트레싱은 필수적으로 요구되며, 교량거더, 장경간 교량 바닥판 또는 건축 슬래브, 원자력 발전소 외벽, LNG 외벽 구조물 등에서 콘크리트의 보강용으로 사용되고 있다.

강연선은 일반적인 강재와는 달리 제철소에서 생산한 선재(wire rod)를 고려제강, 만호제강 등의 신선사에서 신선(drawing)과 연선(stranding)하여 최종 제품으로 만든다. 즉, 고강도 강연선을 개발하기 위해서는 제철사와 신선사의 협력이 필요한데, 전 세계적으로 이러한 노력들이 부족하여 새로운 강연선의 개발은 콘크리트의 강도발전에 대비해 느린 실정이다. 국내에서는 케이블 교량의 기술자립과 나아가 세계 선도를 목표로 국토교통부의 지원하에 초장대케이블 교량사업단 연구과제를 수행하였으며, 그 결과중 하나로 세계 최고강도 2,400 MPa 강연선을 개발하였다. 이 강연선은 KS(KS D7002)에 2011년 3월에 SWPC7D로 포함되었다. 참고로 기존 1,860 MPa 강연선은 SWPC7B, 2,160 MPa 강연선은 SWPC7C이다.

일반적으로 구조 재료는 강도가 증가되면 구조물 파괴시 연성거동에서 취성거동으로 변화되는 특성을 보인다. 특히 고강도 PS강연선은 매우 큰 인장응력이 작용하는 부재로 강연선에 물리적 또는 화학적 손상이 발생하면 급격히 취성 파괴된다. 고강도 PS강연선의 취성 파괴는 PS강연선을 구성하는 강선들이 한 가닥씩 파단 되다가 일정 수준에 도달하면 PS강연선 전체가 파단된다. 고강도 PS강연선이 파단되는 요인은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 첫 번째는 응력부식에 의한 지연파괴이고, 두 번째는 부식에 의한 파단이다. 일반적으로 강재의 부식은 강재가 산화되면서 점차적으로 단면적을 잃어가고 그로 인해 단면 또는 부재 강도가 저하되는 특성을 보인다. PS강연선의 부식은 PS강연선을 부식 환경에 노출시키지 않는 경우 발생하지 않기 때문에 설계 및 시공시 PS강연선의 부식 방지를 고려한 방안들이 고려될 수 있다. 강재의 부식과 달리 응력부식은 특정 부식환경 하에서 강재에 수소가 침투되어 미소조직을 깨면서 갑작스런 파괴를 유도한다. 이러한 특성은 고강도 강재에서 종종 나타나는 특성으로, 고강도 강연선의 경우 응력부식에 의한 지연파괴에 대한 저항능력 평가가 반드시 필요하다고 판단된다. 그러나 아쉽게도 아직 국내에는 관련규정이 미흡한 실정이다.

초장대교량사업단에서는 한국콘크리트학회 프리스트레스트콘크리트위원회와 함께 프리스트레싱 강재의 응력 부식 저항성 시험(안)(KCI-R-14-4)을 수립하였으며, 그 시험(안)에 따라 2,400 MPa PS강연선에 대한 응력부식 시험을 실시하였다. 본고에서는 시험(안)과 응력부식 시험결과에 대해 소개하고자 한다.

2. 응력부식 및 응력부식 균열

응력부식이란 외부응력 또는 내부응력의 존재하에서 금속의 부식이 현저하게 촉진되는 현상으로, 인장응력이 합금에 작용하여 소성변형이 생기면 표면의 피막이 파괴되고 원자들의 이동으로 금속내부에 결함이 형성되어 부식이 촉진되게 된다.

응력과 같은 기계적 힘 자체가 금속에 부식을 일으키는 것은 아니지만, 이러한 힘이 적당한 부식 환경에서 작용할 때 금속의 구조가 쉽게 파괴되어 발생한 균열을 응력부식 균열이라 한다. 금속의 손상 원인 중 20~30%를 차지하고 있고, 또한 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 프리스트레싱 강재의 내구성을 저하시키는 원인이 되고 있다. 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 일반적으로 고강도의 콘크리트와 고장력의 금속(프리스트레싱 강재)을 사용하고 그러한 프리스트레싱 강재에는 큰 하중이 작용하기 때문에 응력부식 균열에 대한 검토가 요구되고 있다. 응력부식 균열은 결정입계를 따라 진행되는 입간파손과 결정 내부를 따라 진행되는 입내파손으로 나눌 수 있다(그림 1).

3. 강연선 응력부식 관련 국내외 규정

3.1 ISO 15630-3

ISO 15630-3 ‘Steel for the reinforcement and prestressing of concrete-Test methods-Part3: Prestressing steel’에는 프리스트레싱 강재에 대한 시험법이 정의되어 있다. 이 기준에는 인장시험(Tensile test), 부착시험(Bond test), 역전굽힘시험(Reverse bend test), 릴랙세이션시험(Isothermal relaxation

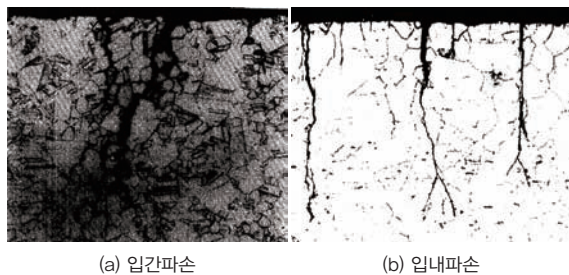


그림 1. 입간파손과 입내파손의 형태(윤경석, 1983)

test), 피로시험(Axial force fatigue test), 응력부식시험(Stress corrosion test in a solution of thiocyanate), 굴절인장시험(Deflected tensile test) 등이 규정되어 있다.

이 기준에서 응력부식시험편을 살펴보면, 일정온도에서 티오시안산염(thiocyanate) 용액에 담그고 일정한 초기 인장력 F_0 을 가하여 시험편이 파단되는 시간을 측정하는 시험으로, 인장력 F_0 는 관련 생산 기준에서 정의한다고 되어 있다. 응력부식시험을 위한 시험편의 개수는 최소 6개의 시험편을 시험하도록 되어 있으며, 최소 2개의 시험편에 대해서 인장시험을 수행하여 실제 인장강도 \bar{F}_m 을 결정하도록 되어 있다. 초기 인장력 F_0 는 \bar{F}_m 의 %로 표기하도록 되어 있으며, 그 예로 80% \bar{F}_m 을 들고 있다.

시험용액은 티오시안산염의 농도가 높고 낮음에 따라 다음과 같이 두 가지 용액으로 정의되어 있다.

1) 용액 A : NH_4SCN 200 g을 800 ml의 증류수에 녹인 수용성 암모니움 티오시안산염을 준비한다. 암모니움 티오시안산염 용액은 최소 99%의 NH_4SCN 와 최대 0.0005% Cl^- , 0.005% SO_4^{2-} , 0.001% S^{2-} 을 함유하고 있어야 한다.

2) 용액 B : 증류수를 사용한 황산칼륨(K_2SO_4), 염화칼륨(KCl), 티오시안산칼륨(KSCN) 수용성용액을 준비한다. 시험용액 B는 SO_4^{2-} 5g/l, Cl^- 0.5g/l, 1g/l SCN^- 을 함유하고 있어야 한다.

3.2 국내 도로교설계기준과 케이블소재적용지침

국내 규정에서는 강연선 응력 부식에 관한 자세한 기준이 아직은 미비한 실정이다. KS에는 응력부식 관련 기준을 제시하지 않고 있으며, 도로교설계기준해설(2008)과 케이블소재적용지침(2008)에만 관련 기준을 제시하고 있다. 도로교설계기준해설 2.3.1 강재편에 언급된 내용은 다음과 같다. “표 2.3.1에 나타난 PS강재 이외의 다른 PS강연선 혹은 그 외의 강재 등에 대해서는 KS D 7002, KS D 3505 혹은 동종의 강재에 적용되는 KS에 규정된 품질시험에 준한 시험을 행하여 품질을 조사, 확인하고 인장강도, 항복점 등을 정해야 한다. 다만, 표 2.3.1에 규정하는 PS강재보다 품질이 고강도인 것을 사용하는 경우에는 지연파괴의 검토 등 설

계와 시공상의 주의사항에 대해 별도의 검토가 필요하다.” 여기에서 표 2.3.1에는 1,900 MPa의 강연선이 가장 고강도의 강연선으로 수록되어 있다. 이는 국제적인 규격에서는 1,860 MPa에 해당하는 강도로, 이전 시방서의 kgf/cm^2 을 MPa 단위로 환산하면서 차이가 발생했다. 현재 가장 일반적으로 사용되는 강연선의 강도이기도 하다. 또한 표 2.3.1은 2008년 이전에 발행된 KS D 7002에서 정의된 강연선의 목록이지만, 현재 최종판인 KS D 7002:2011에서는 SWPC7CL(2009년)과 SWPC7DL(2011년)이 추가되었다.

국내의 기준 중에서 강연선 응력부식 시험에 대해서 가장 상세히 수록한 기준은 케이블소재적용지침(2008)으로 현재 개정판이 수정 중에 있다. 여기에서는 KS에서 정의되지 않은 15.7 mm 직경의 강연선이 수록되어 있으며, 3.2.2.10에는 응력부식 시험이 정의되어 있다. 그 내용은 다음과 같다.

“이 시험은 도금이 내부 부식방지층으로 사용되지 않은 강선에 대해 수행한다. 다만, 현수교에서는 주 케이블을 이루는 구성 강선에 대해서만 수행한다. 도금하지 않은 소선 또는 연선에 대하여 ISO 15630-3에서 제시된 ‘티오시안산염 용액에서의 응력부식시험’의 용액(solution) A로 시험한다. 시험한 소선 또는 연선은 모두 파단 시간이 최소값 2시간, 중앙값(median) 5시간 이상이어야 한다.”

3.3 FprEN 10138-3과 fib Model Code for Concrete Structures 2010

유럽표준의 마지막 Draft인 FprEN 10138-3 ‘Prestressing steels-Part 3 : Strand’에는 응력이완(stress relieving) 열처리 고강도 강연선의 기술적 요

구조건에 대해서 규정하고 있다. 참고로 FprEN 10138의 Part 1은 일반 요구사항, Part 2는 강선, Part 4는 강봉에 대한 규정이다. 이 기준에는 7연선의 경우 1,860 MPa, 1,960 MPa, 2,060 MPa, 2,160 MPa의 인장강도가 수록되어 있다.

이 기준들 역시 ISO 15630-3에 명시된 기준에 따라 시험을 실시하도록 하고 있다. 다만, 시험에 대한 허용기준을 <표 1>과 같이 보다 세분화 하였다. 용액 A와 용액 B의 적용기준에 대해서는 같은 규정 중 일반 사항을 수록하고 있는 FprEN 10138-1 ‘Prestressing steels-Part 1:General requirements’에 설명하고 있다. 별도의 의무규정이 있는 경우 새로운 제품이나 새로운 생산자는 용액 B를 사용하여 시험(Initial type testing)을 해야 한다고 명시되어 있으며, Initial type testing의 시험 빈도는 용액 A로 2회, 용액 B로 1회의 시험을 수행하도록 되어 있다.

3.4 프리스트레싱 강재의응력 부식 저항성 시험 (안)(KCI-R-14-4)

유럽 규격에서는 초기 시험에서는 용액 B를 사용한 시험을 언급하고 있으나 아직까지 국내에서는 유일한 지침이 케이블소재적용지침으로 용액 A만을 규정하고 있고, 일본 프리스트레스트 콘크리트기술협회(JPCI)에서 발간한 ‘고강도 PS강재를 이용한 PS구조물 설계시공지침’에

표 2. 응력 부식 시험 빈도

구분	초기 시험 (Initial type testing)	정기 시험 (Audit testing)
Solution A	2 test series	1 test series

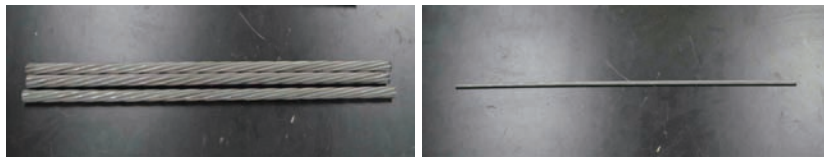
*Solution B를 사용하는 초기 시험은 EN 규정을 따르는 국가나 프로젝트에서 요구받을 수 있다.

표 1. 응력부식저항 요구조건

Property			Specification		
Stress corrosion resistance 80% actual max. force	Class C1	Solution A	-	Minimum(h)	Median(h)
			$d_{sw} \geq 3.2\text{mm}$	2.0	5.0
			$d_{sw} < 3.2\text{mm}$	1.5	3.0
	Class C1L	Solution A	$d_{sw} \geq 3.2\text{mm}$	1.5	4.0
			$d_{sw} < 3.2\text{mm}$	2.0	5.0
	Class C2	Solution A	$d_{sw} \geq 3.2\text{mm}$	2.0	5.0
$d_{sw} < 3.2\text{mm}$			1.5	3.0	
	Solution B	-	2,000	-	

표 3. 2,400 MPa PS강연선의 응력부식 시험결과

강연선 종류	시험체개수	최소 파단시간	중간 파단시간
1,860 MPa	12	2.9	7.9
2,160 MPa	12	3.3	12.2
2,400 MPa	12	2.7	7.7

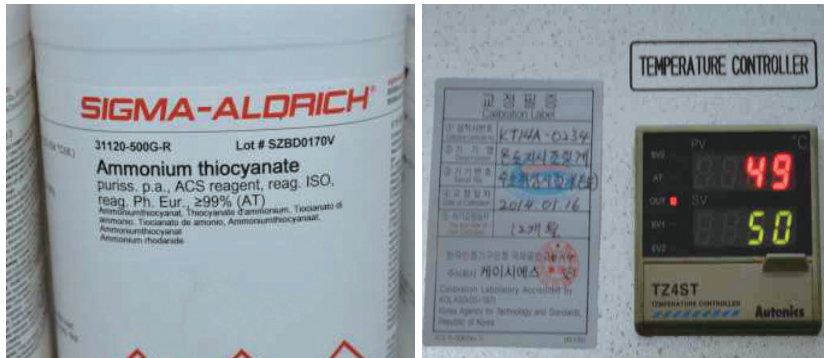


(a) 2,400 MPa 15.2mm PS강연선 (b) 대상 시험체(강연선 중심소선)

사진 1. 시험체 사진



사진 2. 응력부식 시험 전경(고려제강)



(a) 암모니움 티오시아염 (b) 온도 조절장치

사진 3. 시험용액 준비



사진 4. 응력부식 시험 후 강선

도 용액 A를 사용하는 응력부식시험만이 규정되어 있다. 이러한 점을 감안하여 2014년 3월 발간한 KCI-R-14-4에서는 ISO 15630-3에 따라 시험을 하고 허용기준 또한 <표 1>의 것을 따르되 시험빈도에 대해서는 <표 2>와 같이 규정하였다.

4. 고강도 강연선의 응력부식 시험 결과

2,400 MPa 강연선 시편 12개에 대해 ISO 15630-3에 따라 응력부식시험이 이루어졌으며, 시험 용액은 A를 사용하였다. 시험에는 강연선에서 추출한 중심소선 12개를 시험체로 사용하였으며<사진 1>, 이를 <사진 2>의 시험기에 설치하여 시험을 실시하였다. 시험용액의 온도는 $50 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 제어하였다<사진 3>.

응력부식 시험결과는 <표 3>과 같이 최소 시간은 2.7시간, 중간 시간은 7.7시간으로 나타났다. 참고로 포스코/고려제강 생산 1,860 MPa, 2,160 MPa PS강연선에 대한 이전의 응력부식 시험결과는 1,860 MPa 강연선의 경우 2.9시간, 7.9시간, 2,160 MPa 강연선의 경우 3.3시간, 12.2시간으로 나타났다. 응력부식의 특성상 강선이 파단되더라도 강선 표면에 발생한 부식(pitting corrosion)은 거의 없었으며, 파단은 용액에 담겨져 있는 부분에서 발생하였다<사진 4>.

5. 맺음말

건설재료의 고강도화는 보다 합리적이고 경제적이 구조물의 구현을 가능하게 한다. 그러나 한

편으로는 구조물의 안전에 대한 여유도를 낮출 수도 있다. 따라서 기술이 발전하기 위해서는 일부 낮아질 수 있는 안전 여유도에 대한 부분을 신뢰도 향상으로 극복하는 것이 필요하다. 2,400 MPa PS강연선은 국내 기술진의 힘으로 세계 최초로 상용화 되었고, 이미 일부 구조물(평양 태인2교(ED교) 외)에 적용되어 그 경제적인 효과를 검증하였다. 기술의 시장 확대와 더불어 해외 시장진출, 관련 기술선도를 위해서는 안전에 대한 신뢰성을 확보할 수 있도록 엔지니어의 관련지식 확보가 요구된다.

이 글이 그러한 부분에 조금이나마 보탬이 되었으면 하는 바람이다. □

담당 편집위원 : 김진국(포스코) im.jinkook@posco.com



김진국 책임연구원은 KAIST 건설환경공학과에서 콘크리트-철근의 부착슬립과 RC 기둥의 장기거동 고려 비선형 해석 관련 연구로 박사학위를 취득한 후 2006년 (재)포항산업과학연구원 강구조연구소에 입사하여 PS 강연선 및 정착시스템과 합성구조 관련하여 거더, 교각 등 다양한 연구를 수행하였다. 현재는 부서가 포스코 철강솔루션센터로 이관되어 케이블 관련 업무를 지속해서 수행하고 있다.
kim.jinkook@posco.com



성택룡 수석연구원은 서울대학교에서 M27/M30의 후물볼트와 고장력 F13T볼트 이음기술 등과 관련하여 박사학위를 취득하였다. (재)포항산업과학연구원에서는 10여년간 강구조 관련하여 다양한 연구를 수행하고 있으며, 국토해양부 장관상, 한국강구조학회 기술상, RIST 6시그마우수상 등 여러 분야에서의 수상실적을 보유하고 있다. 현재는 포스코 철강솔루션센터 소속으로 에너지인프라연구그룹 리더를 역임하고 있다.
trseong@rist.re.kr



윤석구 교수는 서울대학교 토목공학과에서 합성형교량 철근콘크리트 교량바닥판의 피로거동 및 피로설계에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 한국국도로공사 도로교통연구원과 영국 교통연구원(TRL)에서 근무하였으며, 2002년부터 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 합성구조, 교량바닥판이며, 우리학회 합성구조위원회 위원장을 맡고 있다.
sgyoun@snut.ac.kr



전세진 교수는 2001년 서울대학교 토목공학과에서 PSC 쉘 구조물의 비선형해석으로 박사학위를 취득한 후 대우건설 기술연구원에서 10여년간 근무하였으며, 2012년부터 아주대학교 건설시스템공학과에서 조교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 PSC 구조물의 해석, 콘크리트구조물의 온도해석(수화열, 화재, 극저온), 항공기 충돌, 격납구조물의 해석 등이며, 우리 학회 매스콘크리트위원회 위원장, 프리스트레스트콘크리트위원회 간사로 활동하고 있다.
conc@ajou.ac.kr



김기현 대표이사는 2008년 서울과학기술대학 토목공학과에서 고강도 강연선의 장기손실에 관한 해석적 연구로 석사학위를 취득하였다. (주)씨씨엘코리아에서 10여년간 기술연구소에서 근무하였으며, 2012년부터 컨텍이앤씨(주)의 대표이사를 역임하고 있다.
pau111@nate.com