잔류유효긴장력 추정에 의한 철도교 PSC Beam의 내하력 평가기법
Evaluation of rating of railway bridge PSC beam by prediction of residual effective prestress force

이승원*　　이기성**　　김현길***

Lee Seong-Won　Lee Ki-Seong　Kim Hyeon-Gil

ABSTRACT

This study is the evaluation of rating of railway prestressed concrete beam bridges by prediction of residual effective prestress force. Therefore, developed prediction method is based on the center camber of prestressed concrete beam, structural design report of various PSC beams, construction reference materials of PSC beams. Both rating evaluation and residual effective prestress force by developed method is compared with evaluation by structural design. This comparison results shows that this developed method is very effective method. Therefore evaluation of rating by prediction of residual effective prestress force will be used for evaluation of the rating of railway PSC beam bridges.

---

1 서론

국내 철도 교량중 PSC빔 교량은 상당부분을 차지하는 교량 상부구조형식이다. 이러한 PSC빔 교량의 구조적성능은 주로 유효긴장력에 의해 결정된다. 그러나 PSC빔은 구조적 특성상 초기에 도입된 초기유효긴장력이 시간의 경과에 따라 손실되어 현재에는 도입될 당시의 긴장력과는 상당한 차이가 있는 잔류유효긴장력을 갖게 되어 교량의 구조적성능(내하력)이 저하되게 된다. 따라서 이러한 PSC빔내의 PS강선 잔류유효긴장력 산정은 공용중인 PSC빔 교량의 정밀안전진단시 내하력 평가를 위해 가장 중요하며 필수적인 요소이다. 그러나 국내의 경우 국내실정을 고려한 잔류유효긴장력의 추정기법이 정립되어있지 않아 PSC빔 교량에 대한 정밀안전진단시 내하력 평가에 많은 애로사항을 겪고 있다. 따라서 본 연구에서는 철도교 PSC빔 교량을 대상으로, 이론적 프리스트레스 손실에 의한 처짐과 수집 및 측정된 솟음량으로부터 PSC빔의 내구성과 장기처짐 특성을 고려한 잔류유효긴장력 추정 및 내하력 평가기법에 대하여 연구하였다.

---

* 경복대학 토목설계과 교수　** 영동엔지니어링 전무이사　***경복대학 토목설계과 강사

2. PSC빔의 잔류유효긴장력 추정 기법

PSC빔 교량의 내하력평가를 위해서는 교량에 사용되는 PSC빔의 잔류유효긴장력을 엄밀히 결정하여야 하는데, 긴장력 도입 직후부터 현재까지 빔과 PS강선에 발생한 응력변화에 대한 장기 계측 결과가 있어야 하므로 현 상태에서 PSC빔의 잔류유효긴장력 엄밀평가는 사실상 불가능하며, 단지 빔 중앙부의 솟음량 변화상태와 시공당시 설계자료 분석을 통하여 이론적으로 빔의 잔류유효긴장력과 이에 대응하는 기본내하력을 근사적으로 추정할수 있다. 따라서 다음과 같은 방법으로 본 연구가 진행되었다.

우선, 철도교 PSC빔 교량의 도입긴장력 및 솟음치에 대한 자료수집이 가능한 현장 즉 철도청 노반공사 2개 현장의 PSC 빔들을 대상으로하여 PSC빔 도입긴장력, PSC빔 설계자료(구조 및 수리계산서, 단면 재료, 설계처짐치, PSC빔 설계제원등), 콘크리트 타설자료, PSC빔 상세설계도면(PS 강선 상세설계도면)등의 자료를 수집하였다.

표 1. PSC빔의 도입긴장력 및 설계자료 수집 현장

현장위치	공사명
경상북도	철도청 노반공사 A 공구
경상북도	철도청 노반공사 B 공구

그다음, PSC빔 교량의 잔류유효긴장력 산정에 관한 이론식 및 각종 추정기법의 장단점을 분석하였는데, 현재 잔류유효긴장력 산정에는 미국 PCI 방법을 주로 사용하고 있는데, 이는 미국에서 주로 사용되는 기법으로 국내 실정(국내 PSC빔 교량의 설계 제원, 재료, 시공기술등)을 고려한 개선방안이 필요하다고 판단되었다. 따라서 대상교량을 중심으로 PSC빔의 도입긴장력 및 각종 설계자료에 대한 각종 data를 수집하고, PSC빔 교량의 솟음량 수집 및 측정을 위하여 다음과 같이 수집 및 측정을 하였다. 솟음량 측정에는 정밀 Level을 사용하였다. 언급한바와 같이 자료입수가 가능한 현장위주로 철도청 노반공사 현장 A 공구의 1개 교량의 측정 가능한 21 개 PSC빔의 솟음량을 측정하였고, B 공구의 1개 교량의 측정 가능한 7개 PSC빔의 솟음량을 측정하였다.

표 2. PSC빔의 현재 솟음량 수집 및 측정 현황

교량명	측정 PSC빔의 갯수	공사명
교량 A	21개	철도청 노반공사 A 공구
교량 B	7개	철도청 노반공사 B 공구

3. PSC빔의 잔류유효긴장력 추정에 의한 내하력평가 기법

위와같이 진행된 연구과정을 거쳐서 다음과 같은 PSC빔 교량의 솟음량 실측에 따른 잔류유효

긴장력 추정 개선방안을 연구하였는데 그 결과를 설명하면 다음과 같다. 현재 PSC 의 프리스트레스는 최초에 PS 강재를 긴장할 때 긴장장치에서 측정된 인장응력과 같지 않은데, 그 이유는 PS강재의 긴장중 혹은 긴장후 여러가지 원인에 의하여 긴장력의 상당량이 손실되기 때문이다. 계산된 프리스트레스 손실량과 실제 손실량과의 오차는 부재의 설계강도에는 영향을 미치지 않지만 사용하중 작용시 구조의 거동, 처짐, 솟음, 균열 등에는 영향을 미친다. 따라서 PSC빔의 잔류유효긴장력의 결정방법으로 주형에서 사하중에 의한 중앙부의 솟음량(Camber) 확보상태를 정밀측정하여 솟음량 상태 및 PSC 빔 설계자료 분석을 통해 잔류유효긴장력을 결정하는 개선방안이 다음과 같이 개발되었으며, 이에대한 상세한 설명은 다음과 같다.

일반적으로 PSC빔의 장기적인 솟음량(처짐량)의 결정은 시간에 따른 프리스트레스 손실과 프리스트레스 도입후에도 계속되는 콘크리트 강도의 변화 등을 고려하여야 하므로 매우 난해하다고 하겠다. 이러한 PSC빔의 장기솟음량을 추정 즉 결정하는 실용화된 방법중 앞에서 언급한 바와 같이 가장 많이 사용되고 있는 방법은 PCI의 Design Handbook에서 제시하는 초기 탄성솟음의 상향 및 하향성분에 장기적인 효과를 고려하여 추천하는 계수를 곱하는 방법이다. PCI에서 제안하는 방법은 모든 프리스트레스의 손실과 크리프가 일어난 단계에서 솟음과 처짐을 결정하는 방법이며 어느정도 정확도를 가진 방법으로 평가된다. 그러나 PCI에서 제안한 계수들을 사용한 솟음량은 설계시 안전측으로 고려하는 시방서 규정으로 솟음량 결정의 근간이 되나 실제 현장에서의 정밀측량한 솟음량과는 다소의 차가 발생한다. 참고로 실제 현장에서 측정한 솟음량은 위치별로 최대 솟음량과 최소 솟음량의 차가 30~50 mm정도 편차범위에 분포하며 이와 같은 솟음량의 차이는 동일한 PSC 빔 교량에서는 동일한 시공조건이 도입됨을 감안하면 긴장력의 도입시 오차, 위치별 유효긴장력의 손실 발생차이, 거더하단 상태의 제작오차등으로 인해 발생되었을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 연구된 솟음량 실측을 통한 잔류유효긴장력의 추정기법의 잔류유효긴장력 추정과정은 다음과 같다. 추정과정중 이론적 장기솟음량(Δ_d)의 결정시 주형의 콘크리트강도는 현장측정한 평균 비파괴 시험강도를, PS강선의 성능은 교량 준공당시의 설계도에 제시된 물성기준을 적용하였는데, 개발된 잔류유효긴장력 추정의 주요과정은 다음과 같이 두가지로 나뉘어진다. 먼저 Δ_d(PCI규정에 따른 이론적 솟음량) ≤ Δ_{max}(측정된 최대솟음량)인 경우에는 최대솟음량 발생위치는 설계시 도입긴장력이 가해진 것으로 판정하였다. 즉 Δ_{max} 위치의 도입긴장력이 설계긴장력이고, Δ_{max}와 평균 솟음량(Δ_{ave})로부터 평균 도입긴장력(P_{ave})를 결정하였으며, 시방서(도로교, 철도교등) 규정에 따른 손실량 계산후 P_{ave} 로 잔류유효긴장력을 결정하는 방법이다. 다음은 Δ_d(PCI규정에 따른 이론적 솟음량) > Δ_{max}(측량된 최대솟음량)인 경우에는 전 PSC빔이 설계긴장력 이하의 힘이 도입된 상태로 판정하였다. 즉 Δ_d의 솟음 발생상태가 설계긴장력이고, Δ_d와 평균솟음량 Δ_{ave}로부터 평균 도입긴장력(P_{ave})를 결정하였으며, 시방서(도로교, 철도교등) 규정에 따른 손실량 계산후 P_{ave} 로 잔류유효긴장력을 결정하는 방법이다. 이렇게 추정된 잔류유효긴장력으로 PSC빔 교량의 내하력평가를 위하여, 현재 PSC빔이 보유한 긴장력을 일반적인 해석시 발생하는 즉시손실 및 시간적손실을 고려한 유효긴장력(Pe) 대신에, 기타 요인에 의한 추가적인 손실발생을 실제 솟음량 측정을 통하여 판단하고, 추가 손실량을 정량화하여 산정한 잔류유효긴장력(Pe'=(1-추가손실량)×유효긴장력(Pe))으로 현재의 내하력을 결정하는 방법을 사용하였다. 다음의 그림은 이러한 솟음량 실측을 통한 잔류유효긴장력의 추정기법의 잔류유효긴장력 추정과정과 이에따른 내하력 평가과정을 도시한 것이다.

또한 개발된 본 기법은 잔류유효긴장력 산정시 PSC빔의 솟음량실측치에서 계산되는 최대솟음량(Δ_{max}), 평균솟음량(Δ_{ave}), 최소솟음량(Δ_{min}) 산정이 가장 중요하다. 따라서 이러한 최대,평균, 최소 솟음량 산정시, 측정된 솟음량실측치들은 PSC빔 하단의 요철등 실측오차등을 최소화하기 위하여 측정치의 Data 처리작업 즉 신뢰성구간을 분석하여야 한다. 그러므로 측정된 솟음량 실측치에 대하여 원측정치 사용시, 1σ 사용시(71.3% 신뢰구간) 0.7σ 사용(60% 신뢰구간) 등으로 각각 나누어 잔류유효긴장력을 산정한 결과를 분석하여 보면, 0.7σ 사용(60% 신뢰구간)한 경우가 가장 정도가 높은 결과를 보였다. 따라서 본 기법에서는 현장에서 측정한 솟음량실측치 자료에서 최대, 평균, 최소 솟음량 산정시 0.7σ 의 신뢰구간으로 산정토록 하였다. 다음 표는 개발된 본 기법에 의해 산정된 잔류유효긴장력 및 내하력평가 결과이다. 구조계산서에 의한 유효긴장력 및 내하력과 현재의 솟음량 실측치에 의해 산정된 본 기법에 의한 결과가 거의 근접하며 본 기법에 의한 결과가 대부분 약간 작게 나오는데, 이는 안전진단은 안전측으로 내하력평가가 이루어져야 하므로 타당하다고 하겠다. 결론적으로 위와같이 개발된 솟음량실측을 통한 잔류유효긴장력 추정기법의 잔류유효긴장력 추정과정과 이에따른 내하력 평가방법은 노후교량 정밀안전진단시 필수적인 PSC 긴장력 및 각종 설계자료등이 없는 PSC빔 교량의 내하력 평가시 유효하게 사용될 수 있다고 판단된다.

표 3. PSC 빔의 솟음량 실측에 의한 잔류유효긴장력 추정기법으로 산정한 결과

구분	교량 A			교량 B		
	구조계산서	솟음량실측치에 의한 본 기법	내하력	구조계산서	솟음량실측치에 의한 본 기법	내하력
외측빔	464.708 tonf	408.900 tonf	LS-21	464.708 tonf	459.771 tonf	LS-27
내측빔	447.061 tonf	424.526 tonf	LS-24	447.061 tonf	439.959 tonf	LS-34

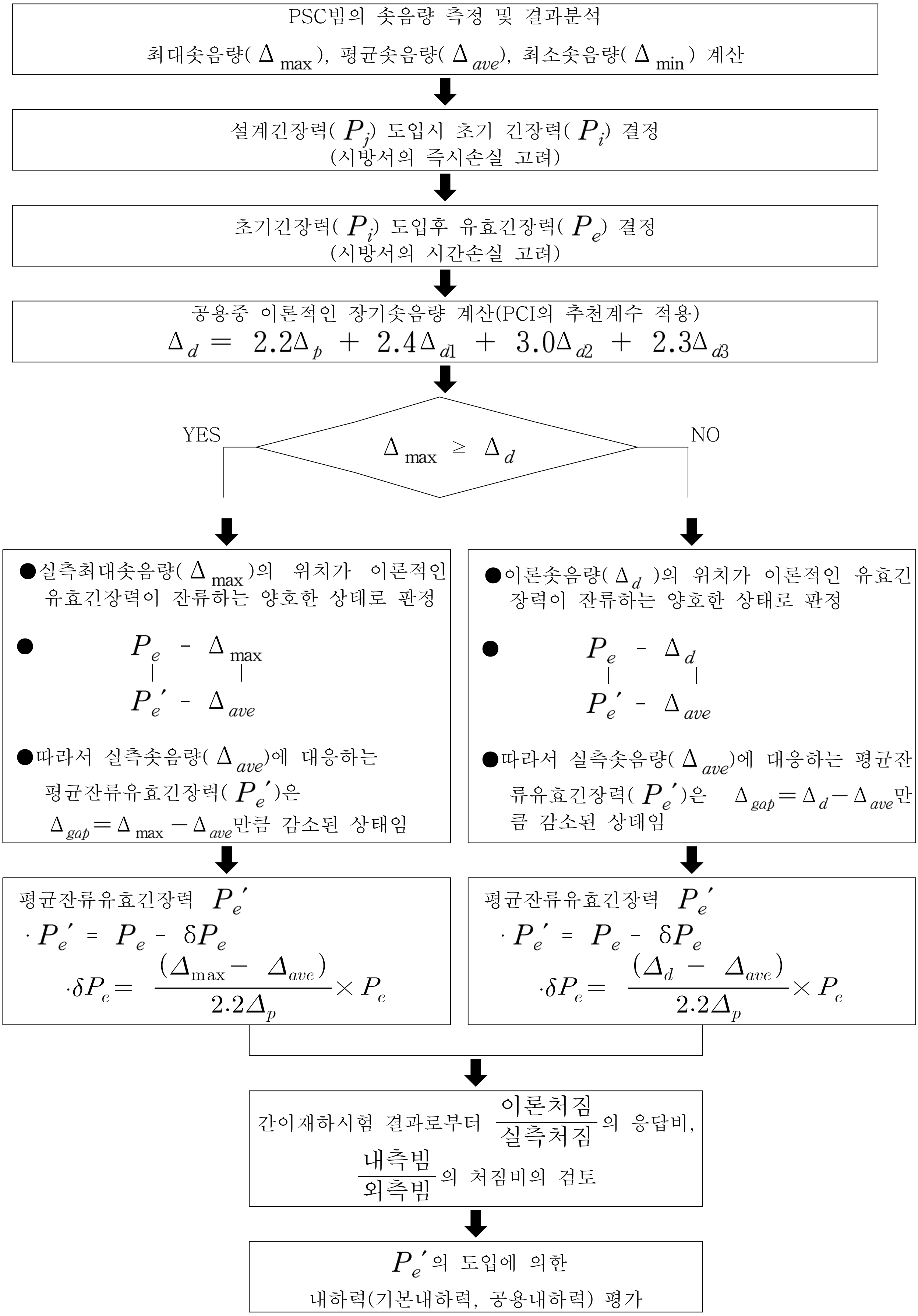

그림 1. PSC빔의 솟음량 실측을 통한 잔류유효긴장력 추정 및 내하력 평가

4. 결론

본 연구에서는 PSC빔 교량의 구조적성능 즉 내하력평가에 중요한 구조적 요소인 PSC빔의 잔류유효긴장력을 추정 및 내하력평가를 위하여, PSC빔 중앙부의 솟음량 변화상태와 시공당시 설계자료 분석을 통하여 PSC빔의 잔류유효긴장력 추정 및 내하력평가 기법에 대해 연구하였다. 이를 위하여 현재 시공중이거나 시공 완료된 PSC빔 교량의 PSC빔의 도입긴장력에 대한 자료를 수집하고 분석하였고, 아울러 잔류유효긴장력에 대한 이론을 정립분석하였다. 그리고 자료가 존재하는 PSC빔의 현재 솟음량을 수집 측정하여 분석하였다. 이러한 연구결과로부터 이론적 프리스트레스 손실에 의한 처짐과 측정된 솟음량으로부터 PSC빔의 내구성과 장기처짐 특성을 고려한 잔류유효긴장력 추정기법 개선방안을 연구하였다. 연구된 본 기법에 의해 잔류유효긴장력 및 내하력 평가결과, 구조계산서에 의한 유효긴장력 및 내하력과 현재의 솟음량 실측치에 의해 산정된 본 기법에 의한 결과가 거의 근접하며 본 기법에 의한 결과가 대부분 약간 작게 나오는데, 이는 안전진단은 안전측으로 내하력평가가 이루어져야 하므로 타당하다고 하겠다. 결론적으로 위와같이 개발된 솟음량실측을 통한 잔류유효긴장력 추정기법의 잔류유효긴장력 추정과정과 이에따른 내하력 평가방법은 노후교량 정밀안전진단시 필수적인 PSC 긴장력 및 각종 설계자료등이 없는 PSC빔 교량의 내하력 평가시 유효하게 사용될 수 있다고 판단된다. 따라서 본 연구결과를 확대 적용하기 위하여 더욱더 많은 실측자료 및 적용 그리고 이에대한 분석 및 보완이 이루어져야 하겠다.

참고문헌

1. Arthur. H. Nilson (1978년), “Design of prestressed concrete”, John wiley & sons.
2. T.Y. Lin & Ned H. Burns (1981년), “Design of prestressed concrete structure”, John wiley & sons.
3. P.W. Abeles & B.K.Bardhau-Roy (1981년), “Prestressed concrete designer's handbooks”, A Viewpoint publication, 1981.
4. 철도청, “○○선 노반공사(제 A 공구) 설계보고서”.
5. 철도청, “○○선 노반공사(제 A 공구) 구조 및 수리계산서”.
6. 철도청, “○○선 노반공사(제 B 공구) 설계보고서”.
7. 철도청, “○○선 노반공사(제 B 공구) 구조 및 수리계산서”.