

PPWS용 정착소켓의 최적설계를 위한 매개변수해석 및 안정성 검토

Parametric study of optimum design variables of PPWS socket and stability analysis

유 훈* · 서 주 원** · 정 운*** · 이 성 형****

Yoo, Hoon · Seo, Ju-Won · Jung, Woon · Lee, Sung-Hyung

요 약

본 논문에서는 최소 중량을 갖는 PPWS용 소켓의 기하형상을 결정하기 위하여 소켓의 경사각, 스트랜드의 강도 및 스트랜드의 직경을 주요 설계변수로 결정하고 각 설계 경우에 대한 매개변수해석을 수행하였다. 소켓의 경사각은 5도에서 13도까지를 범위로 하였고 스트랜드의 강도는 1860MPa급, 1960MPa급 및 2100MPa급의 고강도 강선을 적용한 경우를 고려하였으며, 스트랜드의 직경은 91, 127, 169 및 217개의 강선을 적용한 경우를 대상으로 하였다. 또한, 매개변수해석에서 도출된 기하형상을 갖는 소켓의 안정성을 검토하기 위하여 유한요소해석을 이용하여 소켓을 해석하고 스트랜드의 허용인장력 작용시 소켓의 안정성을 검토하였다. 해석 결과, 소켓의 중량을 최소화하는 내부 경사각은 스트랜드의 직경에 큰 영향을 받음을 알 수 있었으며, 매개변수해석으로부터 설계된 소켓은 스트랜드의 허용인장력 작용시 충분한 안정성을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

keywords : PPWS(Prefabricated Parallel Wire Strand), 소켓, 현수교, 케이블, 고강도 강선

1. 서 론

현수교 주케이블로 PPWS(Prefabricated Parallel Wire Strand)를 적용하는 경우에는 PPWS 내부 강선의 길이 조정 문제와 함께 PPWS를 지지하는 소켓의 안정성 확보가 매우 중요한 설계 항목이다. 현재 적용되고 있는 PPWS용 소켓의 설계는 허용응력설계를 기반으로 강선과 합금주입재의 부착강도, 합금주입재의 압축강도 및 소켓 본체의 안정성 검토를 통하여 이루어지고 있다(Komura 등, 1990). 그러나, 썩기형 소켓의 경사각, 합금주입부의 길이, 소켓 단부 직경 등과 같은 불확실성이 많은 설계변수는 경험적인 방법이나 기존의 시공 사례에 의존하고 있는 경우가 많다. 현수교 주케이블용 PPWS는 스트랜드 제작, 소켓 제작 및 소켓 합금재 주입과 같은 주요 제작 공정이 모두 공장에서 이루어지기 때문에 소켓의 합리적인 설계변수 및 기하형상 결정은 공장제품화 된 PPWS의 경제성을 결정짓는 중요한 요소다.

본 논문에서는 최소 중량을 갖는 PPWS 소켓의 기하형상을 결정하기 위하여 소켓의 경사각, 스트랜드의 강도 및 스트랜드의 직경을 주요 설계변수로 결정하고 각 경우에 대한 매개변수해석을 수행하였다. 매개변수

* 정희원 · 현대건설 기술품질개발원 과장, 공학박사 hoonyoo@hdec.co.kr

** 정희원 · 현대건설 기술품질개발원 부장, 공학박사 jwseo@hdec.co.kr

*** 현대건설 기술품질개발원 과장, 공학석사 maskwj@hdec.co.kr

**** 현대건설 기술품질개발원 대리, 공학석사 hlstl@hdec.co.kr

해석으로부터 최소중량을 갖는 소켓의 내부 경사각, 합금주입재 길이 및 소켓의 직경을 결정하였고 각 설계 변수의 상관관계를 도출하였다. 또한, 결정된 기하형상을 갖는 소켓에 대하여 유한요소해석을 이용하여 스트랜드의 허용인장력이 작용하는 경우에 소켓의 안정성을 검토하였다.

2. PPWS 소켓의 설계법 및 설계 매개변수

PPWS용 소켓의 기본적인 설계 원칙은 소켓의 강도가 소켓이 지지하는 스트랜드의 강도 이상으로 설계하는 것이다. 즉, 극한상태에서 소켓 자체 혹은 소켓 내부에서 파단이 일어나지 않고 스트랜드에서 먼저 파단이 발생하도록 충분히 안정하게 설계 되어야 한다. 이것은 PPWS 내부 개별 강선의 파단에 의한 전체 케이블의 파괴 양태는 보통 점진적이고 주로 연성 파괴 형태로 나타나지만, 소켓의 파단에 의한 스트랜드 자체의 파괴는 전체 케이블의 급작스런 파괴를 유발할 가능성이 있기 때문이다. 이러한 기본 설계 원칙을 만족시키기 위한 소켓의 설계 검토 항목은 크게 강선과 합금주입재의 부착강도 검토, 합금주입재의 압축강도 검토 및 소켓 본체의 응력 검토로 구분될 수 있다(Komura 등, 1990).

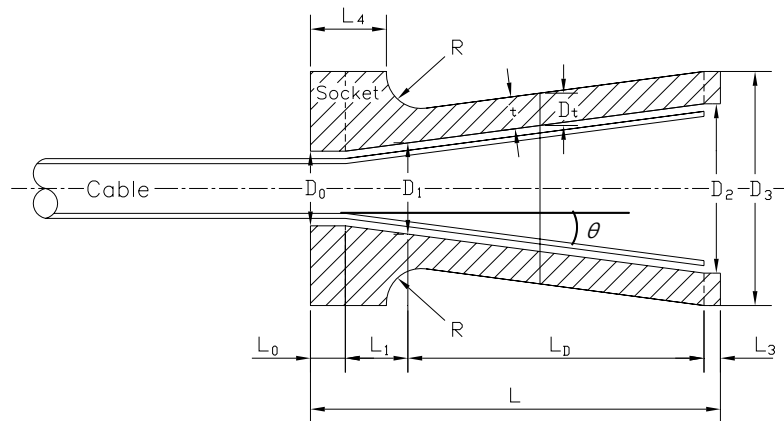
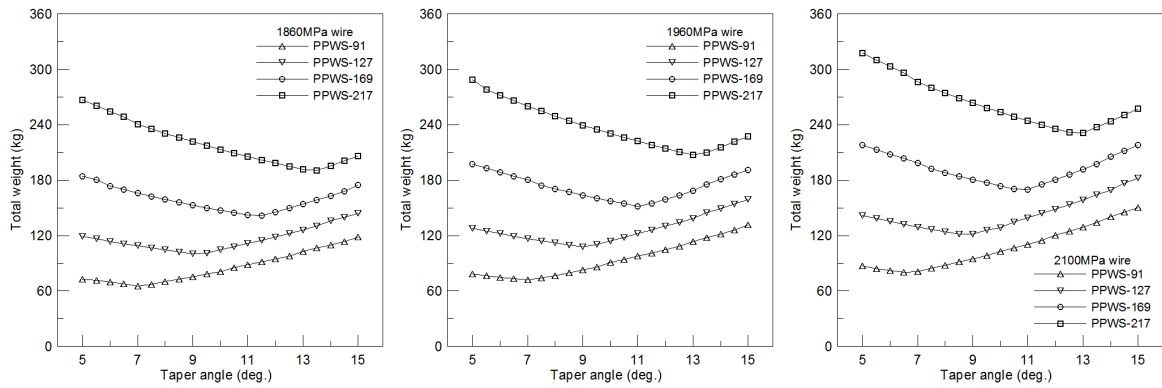


그림 1 소켓의 기하형상 및 설계변수

본 논문에서는 위와 같은 설계절차에 따라서 소켓의 내부경사각, 스트랜드 규격 및 스트랜드 강도로 설정된 설계변수에 대한 소켓의 기하형상을 결정하고 소켓과 합금주입재의 중량을 결정하였다. 소켓의 내부경사각은 $5^{\circ} \sim 13^{\circ}$ 사이에서 0.5° 간격으로 증분된 경우를 고려하였고, 스트랜드의 규격은 91개, 127개, 169개 및 217개의 강선을 적용한 경우를 고려하였으며, 스트랜드 강도는 1860MPa, 1960MPa 및 2100MPa급의 강선을 적용하는 경우를 고려하여 도합 204개의 조합 Case를 설계하였다.

3. 매개변수해석 결과 분석

대상으로 한 모든 Case에 대하여 소켓 내부의 경사각을 변화 시키면서 설계를 수행하였고 결정된 소켓의 기하형상으로부터 소켓의 총중량을 산정하였다. 매개변수 해석의 목적 변수는 설계 결과로부터 계산된 소켓과 소켓 내부 합금재의 중량이며 두 중량을 합산하여 소켓의 총중량을 계산하였다. 그림 2는 소켓의 총중량과 소켓 내부경사각의 변화의 관계로, 소켓의 경사각이 증가함에 따라서 소켓의 총중량은 감소하다가 일정 한계 각도를 넘어서면 소켓의 총중량이 증가함을 알 수 있다.



(a) 1860MPa 강선 스트랜드 (b) 1960MPa 강선 스트랜드 (c) 2100MPa 강선 스트랜드

그림2 PPWS 규격에 따른 소켓의 내부경사각의 변화

소켓의 총중량은 소켓의 기하형상으로부터 계산된 것으로 소켓 본체의 용적과 소켓 내부에 주입된 합금재 용적의 함수이다. 또한, 소켓 내부의 합금재와 소켓 본체와 용적은 소켓의 경사각은 물론 합금 주입부의 필요길이와 소켓 본체의 두께에 영향을 받는다. 따라서 그림 2에서 소켓의 내부 경사각의 변화에 의하여 나타난 소켓 총중량의 변화 양상은 어느 한 설계식에 의하여 지배된 것이 아니라 세 가지의 설계식의 영향이 복합적으로 나타난 결과라고 할 수 있다.

소켓 본체가 목형에 의하여 제작되는 주강품이며 소켓 내부의 합금재는 주물 제작됨을 감안하면 소켓의 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 소켓 총중량과 관계된 재료비이다. 따라서 그림 1(a)에서 동일한 스트랜드 규격과 강선을 적용한 경우, 가장 작은 중량을 갖는 소켓이 최적화된 설계라고 할 수 있으며, 이 때의 소켓 경사각을 최적 소켓 경사각이라고 정의 할 수 있다. 그림 2(a)에서 1860MPa급 강선을 적용한 PPWS-91의 최소 소켓 중량을 나타내는 최적 소켓 경사각은 7도이며, 직경이 보다 큰 PPWS-127과 PPWS-169, PPWS-217의 경우에는 각각 9도, 11.5도, 13도임을 알 수 있다. 현재 일본에서는 PPWS용 소켓 설계에서 PPWS 규격이나 강선의 강도에 관계없이 소켓 경사각을 7.5도로 표준화하여 적용하고 있으며, 국내의 과거 설계 사례에서도 소켓 경사각은 7.5도를 준용해 왔다. 본 논문의 매개변수 해석 결과는 이러한 과거의 설계 예에 비추어 다소 다른 결과를 시사하고 있다. 물론 소켓의 기하형상 결정에는 소켓이 정착되는 앵커리지 형태, 소켓 주형 제작의 난이도, 표준화 비용 등과 같은 여러 조건 외에도 새로운 설계변수 도입에 필요한 실험적 검증과 같은 과정이 필요하다. 그러나, 최적화 된 소켓의 설계를 위해서는 PPWS의 규격과 강선의 인장강도 등을 고려한 체계화 된 매개변수 해석이 필요함을 알 수 있다.

4. 소켓의 안정성 검토

설계매개변수에 따라 설계된 소켓 기하형상 Case 중에서 그림 2에서 결정된 최적 경사각을 갖는 소켓에 대하여 유한요소해석을 통하여 소켓의 안정성을 검토하였다. 범용 유한요소 해석프로그램을 이용하였으며 해석모델은 3차원 솔리드 요소를 적용한 하중-중분 해석법을 적용하였다. 이 때, 소켓 본체와 합금주입체는 모두 탄성-완전 소성 거동하는 것으로 가정하였다.

그림 3은 인장강도 1960MPa급의 강선 127개 규격으로 설계된 PPWS에 대하여 스트랜드에 허용장력 작용 시, 소켓의 Von-Mises 응력 분포 형상을 나타낸 것이다. 스트랜드의 허용장력은 일반적인 상황에서 PPWS에 작용하는 최대 장력을 의미한다. 그림 3과 같이 스트랜드에 허용장력이 작용하는 경우, 소켓 본체의 응력

은 소켓 머리와 본체 사이의 오목한 목부분에 집중됨을 알 수 있다. 각각 최적설계된 경우 소켓 부분에서 발생응력은 모두 소켓의 항복응력을 초과하지 않았으며 소켓은 안정상태를 유지함을 알 수 있다.

한편, 그림 4는 스트랜드에 작용하는 장력을 계속 증가시키며 반복 해석하여 소켓 끝단 중심부의 수평 변위와 스트랜드의 허용장력을 기준으로 한 하중계수의 관계를 나타낸 하중-변위 곡선이다. 즉, 하중계수 1.0은 스트랜드의 허용장력이 작용함을 의미한다. 그림 4에서 소켓은 스트랜드의 허용장력에 약 2배에 해당하는 하중계수 2.0에 도달하기까지 거의 선형 거동을 보이고 있다. 이때 소켓의 변위는 1 mm 미만으로 소켓 본체는 충분한 강성을 확보하고 있다. 그러나, 하중계수 2.0을 초과하여 장력이 작용하는 경우, 소켓은 급격한 변형을 일으키며 본체의 거의 모든 부분에서 항복이 발생함을 유추할 수 있다. 따라서 1960MPa급 강선 127 규격의 PPWS 소켓은 주어진 허용장력에 대하여 약 2.0의 안전율을 가진다.

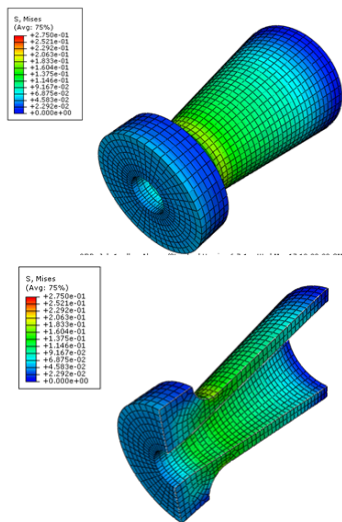


그림 3 소켓의 응력 분포

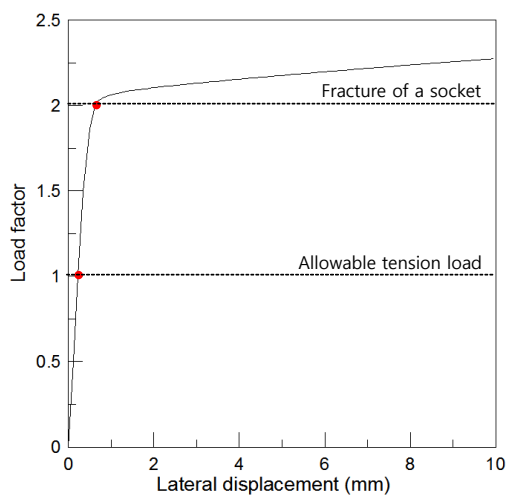


그림 4 소켓의 하중-변위 곡선

5. 결론

- (1) 소켓의 내부 경사각, 스트랜드의 규격 및 스트랜드의 강도를 설계변수로 매개변수해석을 수행한 결과, 소켓의 내부 경사각은 스트랜드의 규격(직경)에 큰 영향을 받았으며, 소켓의 중량을 최소화 하는 내부 경사각은 각 설계변수에 따라서 다양하게 변화하였다.
- (2) 소켓의 중량을 최소화 하는 설계변수를 갖는 소켓에 대한 유한요소해석 결과, 설계된 소켓은 스트랜드의 허용장력 작용시에 안정상태를 유지하였고, 스트랜드의 허용장력에 대하여 약 2.0의 안전율을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 초장대교량사업단 제 2핵심과제의 연구비지원(과제번호: 08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

Komura, T., Wada, K., Takano, H. and Sakamoto, Y. (1990) Study into mechanical properties and design method of large cable sockets, *Structural Eng. & Earthquake Eng.*, 7(2), pp. 251~262.