

Clamp Type-dependent HCF Life Estimation of the Overhead Cable for Distribution Grids

고정 방식 차이에 따른 배전 가공전선의 고주기피로 수명 특성 비교 평가

Dooyoung Lee, Jinseung Jung, Youngdae Kim, Jiye Bang
이두영, 정진성, 김영대, 방지예

Abstract

High cycle fatigue life for the cables with two different types of clamps is estimated comparatively through acceleration testing. The high cycle fatigue fracture of overhead lines is caused mainly by the aeolian vibration which is induced by vortex shedding. It is necessary to manage the integrity of cables continuedly considering that the aeolian vibration is unavoidable since it occurs in steady and relatively low wind velocity. Two types of clamps which are largely used for overhead lines of the distribution grids are selected and failure data are obtained by step stress testing with a electrodynamic shaker with them. The inverse power law is assumed to describe the stress-life relationship and the fatigue limit at any specified life is supposed to follow Weibull distribution. The life of the cable is defined as the number of cycles to the time that one of strands is completely broken. Finally, the fatigue limits of the cables with two clamp types are estimated at the reference life of 500 Mcycles and compared each other based on a bending vibration amplitude.

Keywords: Aeolian vibration, High cycle fatigue, Vortex shedding, Step stress test, Life estimation, Fatigue limit

I. 서론

전선은 구조상 매우 유연한 형태로, 바람에 노출된 전선은 언제라도 주기적 진동이 일어날 수 있는 환경에 노출되어 있다. 바람에 의해 발생하는 진동은 와류진동(aeolian vibration), 갈러핑(galloping), 후류진동(wake induced oscillation) 등으로 구분되며, 어떤 형태의 진동이라도 바람에 의한 힘이 기계적 에너지로 전선에 지속적으로 흡수되면 전선은 손상되거나 파손될 가능성이 증가된다. 와류진동은 전선의 피로 파손의 주요 원인으로, 전선 손상과 관련된 가장 중요한 문제 중 하나이며, 이 진동은 유동의 관점에서 와류박리(vortex shedding)와 이로 인한 항력의 변화와 관련된 현상이다. 와류진동은 진폭이 도체의 직경 이내로 육안으로 분명히 보이지 않을 수 있으나, 풍속 1 ~ 7 m/sec의 바람이 일정하게 불 때, 3 ~ 200 Hz의 주파수 대역에서 일어나고, 감쇠가 충분히 되지 않으며 피로에 의한 파손으로 이어지게 된다. 전선 파단은 계통의 안정성을 낮추고, 경제적 손실 뿐만 아니라 인적 피해를 초래하기 때문에, 바람에 의한 진동 현상의 원인, 영향 및 대책에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다 [1].

와류진동은 비교적 낮은 풍속대에서 발생하기 때문에 일상 기후 조건에서 항상 존재하는 현상으로, 설비의 안정적 운영을 위해서 지속적인 관리가 필요하며, 전선의 피로 파손을 일으키는 주

원인으로써, 다각적인 실험과 해석을 통해 전선의 고주기피로 특성에 영향을 미치는 변수와 손상 특성을 파악하고, 적합한 방지대책을 수립하여야 하며, 궁극적으로는 진동에 의한 피로 특성을 반영한 설계 및 운영기준을 수립할 필요가 있다.

본 논문은 바람으로 인해 크고 작은 사고가 지속적으로 발생하고 있는 배전선로의 전선 손상을 방지하고, 안전하게 관리하기 위한 노력의 일환으로, 전선의 고정방식에 따른 전선의 피로 특성을 평가한 내용으로, 배전선로에서 주로 사용되는 볼트형과 썬기형 클램프 차이에 따른 전선의 수명의 차이를 가속시험을 통해 분석하였다. 볼트형 클램프는 U볼트를 이용하여 전선을 상하에서 눌러 고정하는 방식이고, 썬기형은 전선에 걸리는 장력으로 썬기가 당겨지면서 안쪽으로 압착되어 전선을 고정하는 방식으로 서로 다른 원리에 의해 체결력을 부과한다.

수명시험은 계단형 응력시험(step stress test)에 의한 가속시험법에 의해 수행하였고, 응력과 수명의 관계는 역누승관계로 가정하였다. 소선 하나가 파단되는 시점까지를 수명으로 정의하여, 기준수명에서의 피로한도를 와이블 분포를 따르는 확률분포로 가정하여 두 클램프에 따른 전선의 수명을 비교하였다 [2].

전선의 파단까지의 피로하중은 전자식 가진기를 이용하는 공진형 가진시험법을 적용하였으며, 이 시험법은 전통적인 인장, 압축에 의한 피로시험법이나 회전 피로시험법과 비교해 낮은 비용으

Article Information

Manuscript Received May 31, 2021, Accepted September 27, 2021, Published online December 30, 2021

The Authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Dooyoung Lee (dooyoung.lee@kepco.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

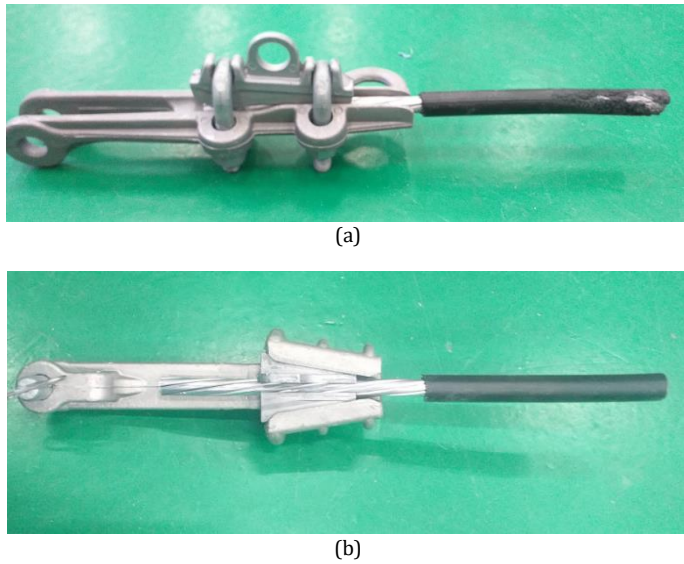


Fig. 1. Clamped test cable, (a) Bolt type, (b) Wedge type

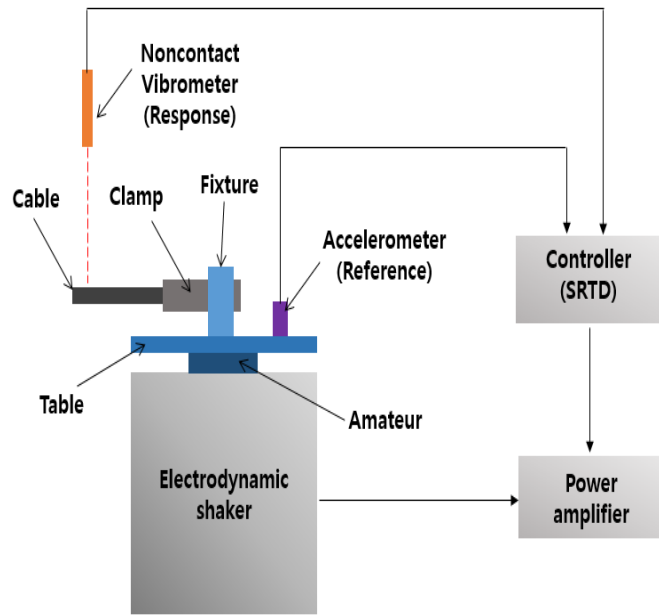


Fig. 2. Test setup

TABLE 1
Test cable specification

KEPCO Part Number	Area (mm ²)	Strand (mm)			Insulation Thickness (mm)	Product Overall Dia. (mm)	Tensile Strength (kgf)	mass (kg/km)
		No.(Al) Shape	No.(St) Dia.(mm)	Dia. (mm)				
100570	95	6/SB	1/3.5	12.0	3.5	19.0	2,360	530

로 단기간에 수행이 가능한 효과적인 가속시험 방법으로, 외팔보 형태의 시편의 일단을 가진기의 진동부에 고정하고, 시편의 고유진

동수로 공진시키는 기법으로, 공진으로 인해 증폭된 동하중이 시편에 가해진다 [3].

II. 시험방법, 진동 및 응력 계측

A. 시험 조건 및 방법

시험 대상 전선은 배전용으로 주로 사용되는 전선 중 하나로, Table 1과 같이 중앙에 1개의 강심, 주위에 6개의 알루미늄 소선과 이를 감싸고 있는 절연체로 구성된 알루미늄 피복강심 절연전선 (ACSR/AW-OC)으로, 공칭 단면적은 95 mm², 완성품의 외경은 19.0 mm 이다.

비교 시험에 사용한 클램프는 볼트형과 썬기형으로, 볼트형은 U볼트를 이용하여 전선을 상하에서 눌러 고정하는 방식이고, 썬기형은 장력으로 전선이 당겨질 때 발생하는 마찰력으로 썬기가 당겨지고, 양측 썬기 사이의 공간이 좁아지면서 압착되어 고정력이 발생하는 원리를 이용한 것이다.

전선 시편은 Fig. 1과 같이 외팔보 형태로 클램프에 물릴 수 있도록 절단하였고 클램프에 물리는 부분은 피복을 제거했다. 클램프와 물리는 끝단에서 자유단까지의 전선 길이는 200 mm이다.

B. 공진형 가진시험

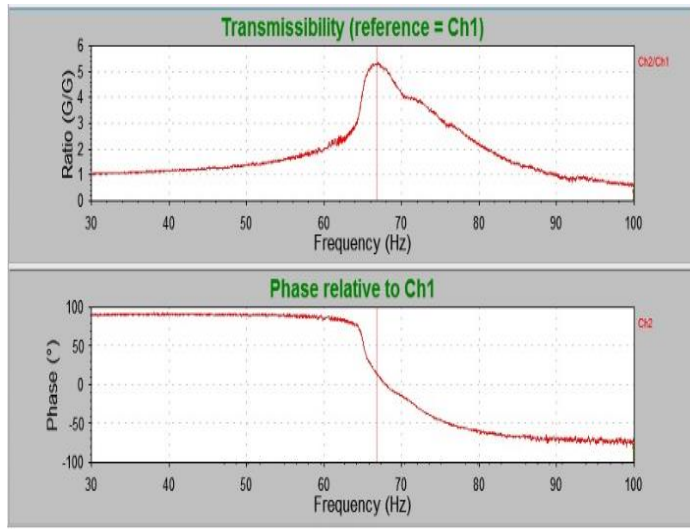
전선 시편의 고유진동수 측정, 진동 변위와 응력간의 관계 계측 및 수명시험을 위한 동하중 인가에 전자식 가진기를 이용하였다. 가진기를 이용한 공진형 가진시험법은 시편을 외팔보 형태 가진기의 구동부에 고정하고, 공진점에서 가진시켜 시편에 동하중을 인가하는 기법으로, 와류진동에 의해 전선이 받는 굽힘 하중을 그대로 모사할 수 있는 장점이 있다. 한편 시험 중 동하중을 일정하게 유지하기 위해서 공진 상태가 지속적으로 유지되어야 하는데, 공진이라는 부하가 높은 시험 환경에서 체결부가 느슨해지거나, 온도 변화 등에 의해서 고유진동수가 변동하여, 공진점을 벗어나고 충분한 가진이 불가능하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고유진동수 변동에 대응할 수 있는 제어가 요구되는데, 위상제어에 의한 공진점 추적 가진(sine resonance track-and-dwell) 기능을 통해 구현되고 있다. 수명 시험은 시편에 균열이 발생하는 시점까지의 시간과 이 기간동안 가해진 응력의 크기로부터 응력과 수명의 관계를 도출한다.

가진기를 포함한 시험 장비는 Fig. 2와 같이 구성되며, 전선의 진동 응답은 비접촉식 레이저 속도계를 이용하여 측정하였다.

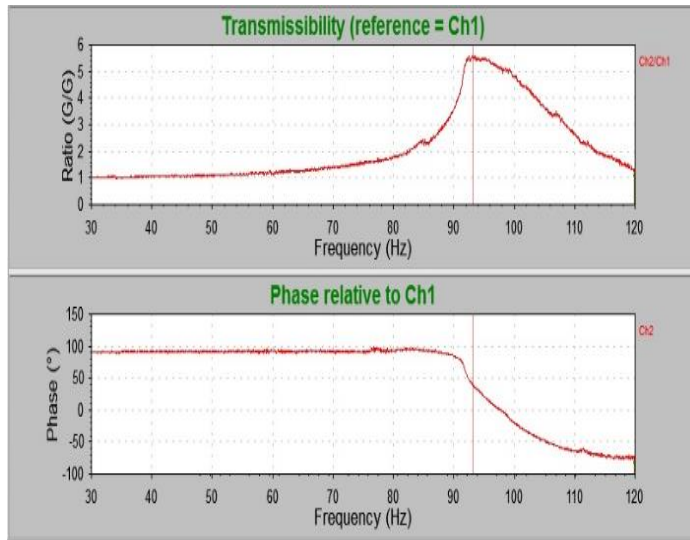
C. 고유진동수 측정

전선 시편은 클램프에 견고하게 체결되어야 하고, 전선이 체결된 클램프 또한 가진기 상판에 단단히 고정되어야 한다. 이러한 체결 조건을 확인할 수 있는 하나의 방법이 고유진동수의 변화를 보는 것이다.

정현파 스윕(sine sweep)으로 측정된 전선의 고유진동수는 Fig. 3과 같이, 볼트형은 89 Hz, 썬기형은 67 Hz 근방으로, 볼트형이 웨지형 클램프 방식에 비해 고유진동수가 높게 나타났다. 이는 체결력을 초과하는 원리의 차이에 의한 것으로, 볼트형의 경우 체결력은 볼트를 조여 충분히 확보할 수 있는 반면, 앞서 설명한 바와 같이 웨지형은 장력이 강할수록 더욱 강하게 조여지는 원리로, 이 시험에서는 장력이 없는 상태이기 때문에 썬기를 밀어 전선을 압착시키야 하는데, 볼트형만큼 강한 체결력을 인가하는 것이 불가능하였다. 한편 썬기형의 경우에도 시험 중 체결이 풀리는 경우가 발



(a)



(b)

Fig. 3. Frequency response function (magnitude and phase), (a) Clamped with bolt type, (b) Clamped with wedge type

생하지 않았고, 전선의 파단까지 공진이 정상적으로 유지되었기 때문에, 수명시험을 위해 충분한 체결력이 주어졌다고 할 수 있다.

여러 시편마다 동일한 힘으로 체결할 수 없어 고유진동수는 다소 변동할 수 있지만, 개별 시편에 대해 각각의 공진주파수와 응력의 차이가 분석 과정에 반영되기 때문에 전선의 특성 결과에는 영향을 미치지 않는다.

D. 진동 변위와 응력 관계의 계측

수명시험 시 전선에 인가되는 응력을 스트레인게이지를 통해 모든 시편을 상시 계측하는 것이 가장 바람직하지만, 시험 중 시편에 균열이 발생하기 전에 스트레인게이지가 먼저 끊어질 수 있고, 경제적, 시간적으로 비효율적인 측면이 있기 때문에, 우선 사전시험을 통해 진동변위를 변화시키면서 이에 따른 응력을 계측하여 두 물리량의 관계를 찾고, 실제 수명시험에서는 진동변위만을 계측하여 응력을 선형적으로 계산하는 방법을 취하는 것이 일반적이다.

시편의 공진변위 크기에 따른 전선의 외측 알루미늄 소선의

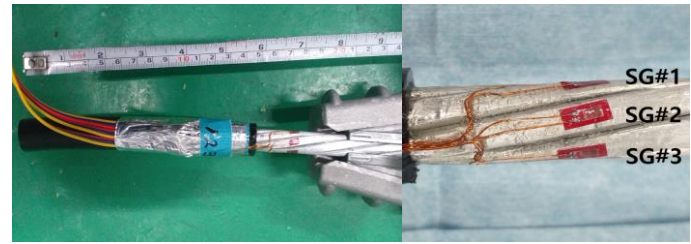


Fig. 4. Strain gauge attachment

TABLE 2
Measured strain with the bolt type clamp

Acc.[G]	Freq.[Hz]	Disp.[mm]	Strain[$\mu\epsilon$]		
			SG#1	SG#2	SG#3
5	87.06	0.33	22.27	34.93	26.97
10	86.13	0.67	42.04	68.25	48.22
15	87.41	0.98	73.24	118.40	78.43
20	87.62	1.30	92.53	161.40	105.20
25	87.03	1.64	132.00	243.80	159.30
30	86.17	2.00	196.00	387.08	257.20

TABLE 3
Measured strain with the wedge type clamp

Acc.[G]	Freq.[Hz]	Disp.[mm]	Strain[$\mu\epsilon$]		
			SG#1	SG#2	SG#3
5	64.40	0.60	15.87	25.75	28.25
10	63.67	1.23	54.44	89.94	55.34
15	64.39	1.78	69.76	124.00	58.87
20	63.90	2.47	108.90	231.30	128.60
25	63.48	3.08	109.00	269.30	162.10
30	63.47	3.70	119.70	359.30	228.50

변형율을 측정하여 두 변수간의 선형 관계식을 구하기 위해서, 스트레인게이지를 Fig. 4와 같이 상부 3개의 소선에 각각 길이방향으로, 고정단에서 25 mm 떨어진 위치에 부착하였다. 비접촉 레이저 속도계로 측정되는 가속도응답은 자유단 끝에서 약 100 mm 위치에서 측정하였다.

볼트형 클램프에 물린 전선에 대해서, 가속도 응답을 5G에서 30G까지 5G 단위로 증가시키면서 측정한 변형율 결과는 Table 2와 같다. 변형율 크기는 중앙 소선(SG#2)이 가장 크고, 고정점에서 봤을 때 좌측 소선(SG#3), 그리고 우측(SG#1) 소선의 순으로 나타났다. 동일한 방법으로 썬치형 클램프에 대한 측정된 결과는 Table 3과 같다.

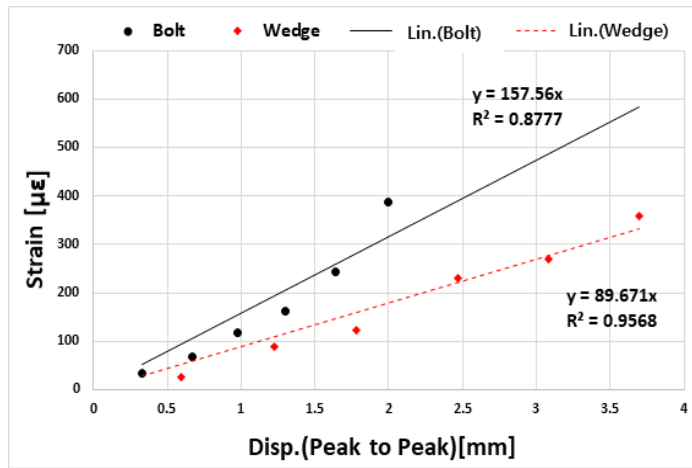


Fig. 5. Displacement vs. strain (strain gauge Ch #2)

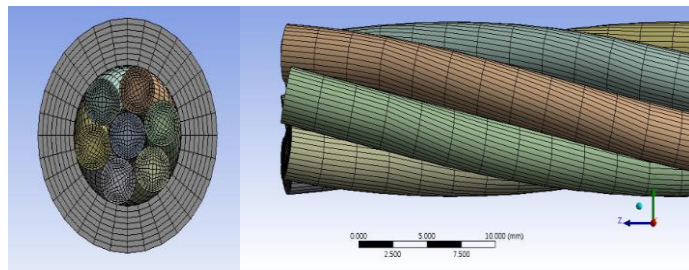


Fig. 6. FE model

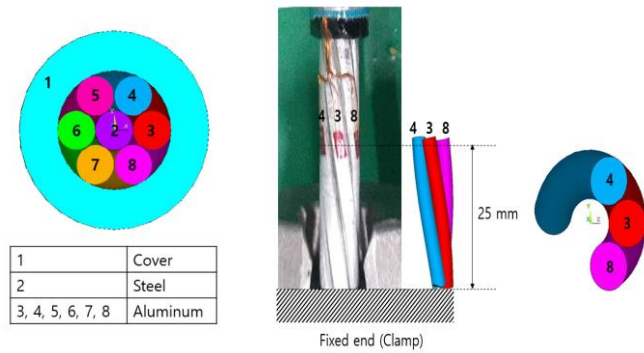


Fig. 7. Strand numbering convention

Fig. 5는 볼트형과 썸기형의 클램프 차이에 따른 변형을 측정 결과를 비교하기 위하여, 측정 결과 중에서 스트레인게이지 2번 채널의 변형을 측정값과 선형으로 곡선맞춤한 결과를 나타낸 것이다. 가로축은 Table 2와 3의 제3열에 해당 되는 값으로, 이는 가속도 응답치와 공진주파수로 연산하여 변위(peak-to-peak)로 변환된 수치이다. 선형식의 기울기가 각각 157.6, 89.7로 볼트형이 썸기형에 비해 약 1.76배 높게 나타났고, 이는 고정 조건의 차이에 의한 결과로, 볼트형 클램프로 체결된 전선의 곡률이 더 크게 굽혀진 것을 의미하고, 이는 볼트형 클램프로 고정된 전선의 고유진동수가 높은 이유와 같다.

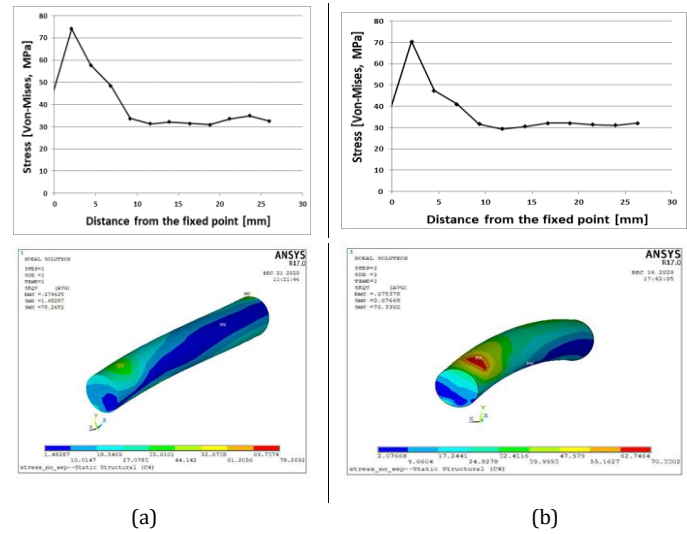


Fig. 8. Stress contour (Von-Mises equivalent stress), (a) Strand #3, (b) Strand #4

E. 소선의 최대 응력 계산

스트레인게이지를 이용한 소선의 응력은 고정점으로부터 25 mm 떨어진 위치에서 측정되었다. 통상 균열이 일어나는 위치는 고정점으로 실측시 바로 이 지점에 게이지를 바로 부착하는 것이 최선이지만, 클램프와의 간섭으로 인해 불가능하여 일정 거리를 둔 지점에서의 응력을 측정하게 된다. 따라서 균열 위치에서의 응력을 추정하기 위해서는 보완적인 방법이 필요한데, 유한요소해석을 통해 구한 소선의 응력 분포를 사용하였다. 해석 결과로부터 최대 응력 해석값과 스트레인게이지를 부착한 위치에서의 해석값의 관계를 구하고, 이 관계를 그대로 측정결과에도 적용하여 실측한 스트레인게이지 부착위치의 응력값으로부터 최대치를 추정하는 방법이다.

유한요소모델은 Fig. 6과 같이 요소를 제작하였고, 고정단은 모든 절점의 자유도를 구속하였고, 자유단에서의 단위 변위에 따른 응력 해석을 수행하였다. 강선, 알루미늄 소선 및 피복재의 접촉은 미끄러짐은 허용하고, 접면의 수직방향으로의 분리는 불가능한 접촉조건을 적용하였다.

Fig. 7에 도시한 바와 같이 계측 시의 스트레인게이지 번호와 해석모델의 소선은 각각, SG#1은 4번, SG#2은 3번, SG#3는 8번과 대응한다.

3번 및 4번 소선의 응력 분포를 나타낸 Fig. 8에서, 상부 그래프는 고정단으로부터 25 mm 거리까지의 등가응력의 변화를 나타낸 것으로 최대응력이 발생한 위치를 기준으로 길이방향으로 위면의 절점을 따라 관측하였다. 3번 소선에서 약간 크지만, 두 소선에서 거의 유사한 경향을 보여주었고, 스트레인게이지 부착 위치에 비해 최대 응력은 약 2배 높게 나타났다.

강심, 나선형의 알루미늄 소선 및 피복 등의 서로 다른 재료로 구성되고, 각각이 복잡하게 접촉하고 있는 구조이기 때문에, 전선의 응력을 정확히 예측하는 것은 매우 어렵다. 한편 진동하는 전선의 이상화된 응력을 계산할 수 있는 해석적 방법으로 Poffenberger-Swart 공식이 있으며, 전선의 피로수명 평가시 널리 사용되고 있다. 이 공식은 양측 고정조건에서 장력(H)을 받는 전선이 진동할 때, 클램프 근방의 진동하는 전도체를 장력을 받는 고정 외팔보로 가정하고, 전선의 진폭으로부터 클램프 위치에서의 응력을 추정하기 위해 제안된 방법으로, 클램프 위치에서의 전선에 작

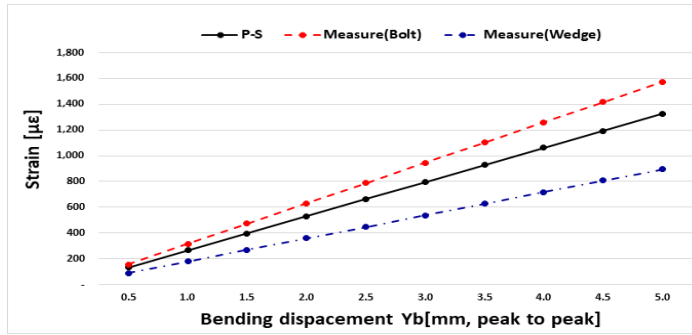


Fig.9. Comparison of strain calculated by P-S formula and measurement(SG#2)

용하는 응력(σ_a)은 다음 수식과 같으며, 전선과 클램프가 접촉하는 마지막 위치로부터 떨어진 거리 $x_m=89$ mm 위치의 진동 변위(Y_b)를 기준으로 계산된다[4].

$$\sigma_a = \frac{dE_a(p^2/4)}{e^{-px_m}-1+px_m} Y_b \quad (2)$$

여기서,

- E_a : Minimum elastic modulus
- Y_b : Displacement(peak to peak) at x_m from the last point of contact
- p : $\sqrt{H/(E_a I)}$
- I : Area moment of inertia
- d : Conductor diameter

스트레인게이지 측정을 통해 구한 응력과 P-S 공식에 의한 값을 비교하면 Fig 9와 같다. 본 시험에서는 장력이 없는 상태로, 계산 결과에 미치는 영향이 없는 정도로 매우 작은 값으로 가정하였다.

Fig. 9는 측정값과 P-S 공식에 의한 계산 값을 비교한 것이다. 여기서 측정값은 유한요소해석의 결과를 반영하여 보정한 최대응력 값이며, 가로축은 고정점으로부터 89 mm 떨어진 위치를 기준으로 한 진동 변위이다. 볼트형 실험 결과는 P-S 공식에 의해 계산 값에 비해 약 20% 높게 나왔고, 썸기형의 경우는 계산 값보다 낮게 나타난 것을 보여준다.

전선의 복잡한 내부 구조를 고려하면 P-S 공식은 간단하면서도 실제 응력 상태를 잘 나타내는 것을 확인하였고, 일관적인 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 수명시험에서 전선에 가해진 응력을 구하는 경우에는 진동 응답 변위를 P-S 공식을 통해 변환하여 상대적으로 비교할 수 있다.

III. 가속시험을 통한 피로수명 분석

A. 계단형 응력 가속시험

계단형 응력 시험은 시료의 내구 특성을 시험하는 대표적 수명시험법으로, 시험대상이 파괴되는 시점까지 낮은 응력 단계부터 시작하여, 기설정된 기준 수명 내에서 파괴가 일어나지 않는 경우, 다음 단계의 하중으로 크기를 높여 시험을 진행하는 방법을 말한다. 가속시험을 통한 피로수명 분석을 위해서는 고장 분포와 수명-응력의 관계를 규정해야 하는데, 본 시험에서는 고장분포는 2모수



Fig. 10. Test setup for step stress testing

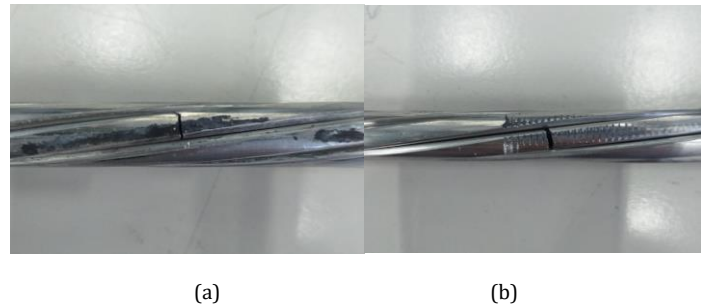


Fig. 11. Cracked strands, a) with bolt type, b) with wedge type

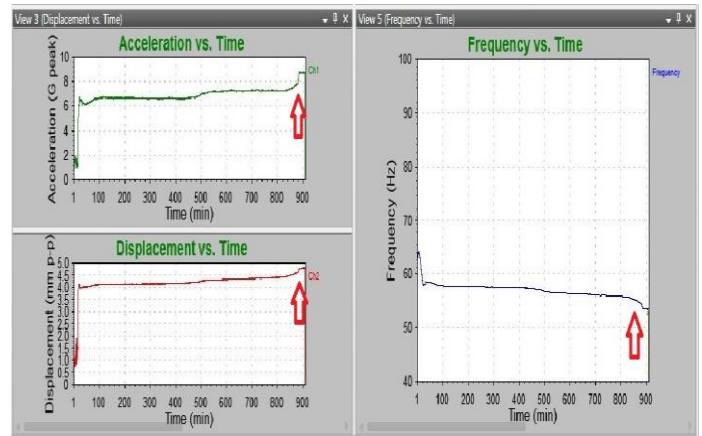


Fig. 12. Event indicating strand fracture

와이בל분포, 수명-응력은 역누승 관계를 따른다고 가정하였다.

전선의 수명을 t 라고 하고, 고장시간의 누적분포함수를 척도모수 η , 형상모수 β 를 갖는 와이בל 분포로 나타내면 다음과 같다.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

서로 다른 응력 수준 간의 등가 수명을 계산하기 위한 응력의 크기 V 와 고장분포의 척도모수 η 의 역누승 관계는 다음과 같다.

$$\eta(V) = \frac{1}{AV^k} \quad (3)$$

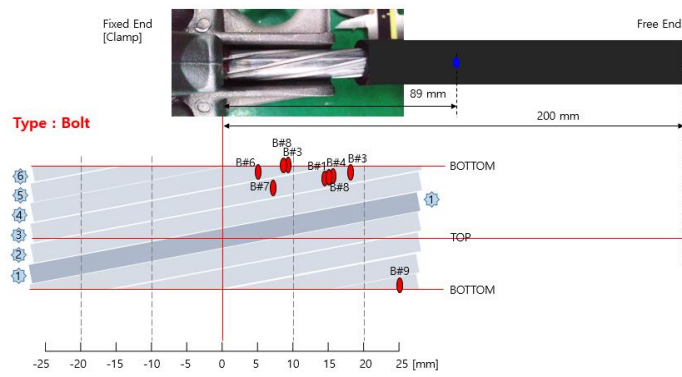


Fig. 13. Fracture location of cable with bolt type clamp

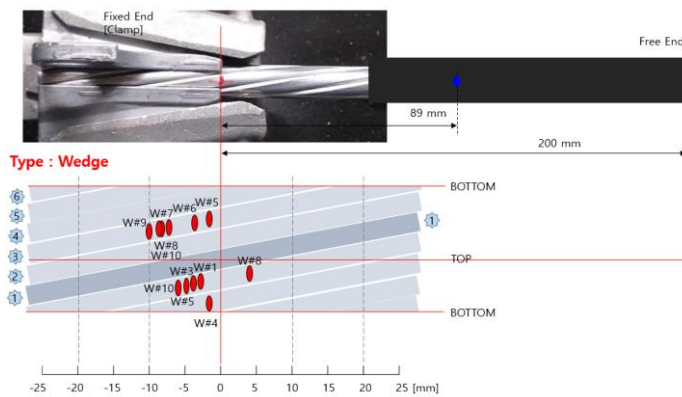


Fig. 14. Fracture location of cable with wedge type clamp

TABLE 4
Stress and failure rate (with bolt type clamp)

i(sorted)	Stress[mm]	Percentage	ln(Stress)	Lnln(1/(1-F))
1	1.02	0.083	0.02	-2.442
2	1.06	0.202	0.06	-1.487
3	1.08	0.321	0.08	-0.947
4	1.13	0.440	0.12	-0.544
5	1.30	0.560	0.26	-0.199
6	1.44	0.679	0.36	0.127
7	1.51	0.798	0.41	0.469
8	1.68	0.917	0.52	0.910

여기서, A, K는 역누승 모형의 계수로 실험으로부터 추정된다. 표본의 고장 자료로부터 누적분포함수를 계산하기 위해서, 시료 n개의 수명자료(X_i)를 크기순으로 배열하고, i번째 고장이 난 제품의 수명 $X_{(i)}$ 에서 표본 분포함수의 값 \hat{F} 은 다음과 같이 메디안 순위에 의한 근사값을 계산하고, 이 값으로부터 와이블 분포의 누적분포함수의 모수를 추정한다.

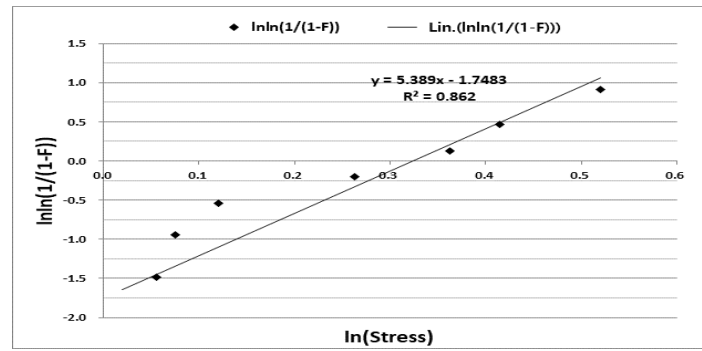


Fig. 15. Linear regression for cable with Bolt type clamp

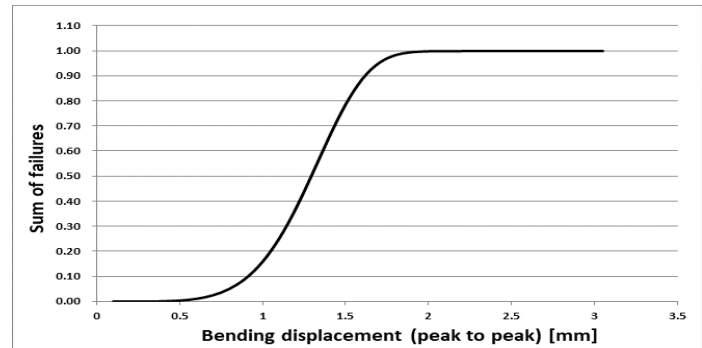


Fig. 16. Sum of failures for the cable clamped with bolt type

$$\hat{F}(X_{(i)}) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (4)$$

B. 수명시험 결과

클램프 방식에 따른 전선의 피로 수명의 차이를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 수명 시험을 위해 전선과 클램프는 Fig. 10과 같이 전자식 가진기에 설치되었다. Fig. 11과 같이 알루미늄 소선 중 하나가 완전히 파단되는 것을 전선의 고장으로 정의하고, 고장 시점은 Fig. 12와 같이 공진변위, 공진주파수의 추이를 관찰하면서 그래프의 기울기가 꺾이는 순간을 기준으로 하였다.

전선 시편을 볼트형 클램프에 8개, 쐐기형 클램프에 8개를 체결하여 시험을 진행하고, 고장 자료를 확보하였다. 파단된 전선의 파손 위치는 볼트형 클램프 체결 전선은 Fig. 13, 쐐기형 클램프 체결의 경우는 Fig. 14와 같다. 시험장비가 장기간 자동으로 운전되기 때문에, 확인 시점에서 하나의 전선에서 여러 개의 소선이 끊어질 수 있는데, 이 경우에는 파손된 모든 위치를 그림에 표시하였다. 여러 개의 파손이 일어난 경우에 파단 순서는 알 수 없으며, 하나의 전선에서 첫 번째 소선이 끊어진 시점만을 고장 분석에 사용하였다.

Fig. 13의 볼트형의 파단 결과를 보면, 모든 크랙이 3번과 4번 소선에서 발생하였고, 길이방향 위치는 0 ~ 25 mm 사이, 하부의 클램프 몸체와 닿는 전선의 아래면에 해당한다. 클램프 구조가 전선의 아랫면을 받치고 있는 반면, 위면은 열려 있기 때문에, 굽힘변위가 수평을 기준으로 상하방향으로 대칭적이지 않고 위쪽으로 곡률이 더 크게 변형되는 조건이고, 아울러 전선의 아래면은 클램프 곡면과 진동에 의해 부딪치는 상황이 크랙 발생 위치에 영향을 준 것으로 판단된다.

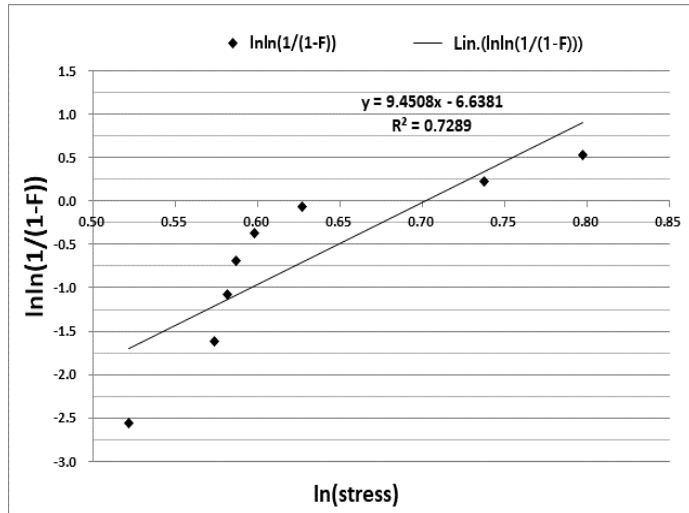


Fig. 17. Linear regression for cable with wedge type clamp

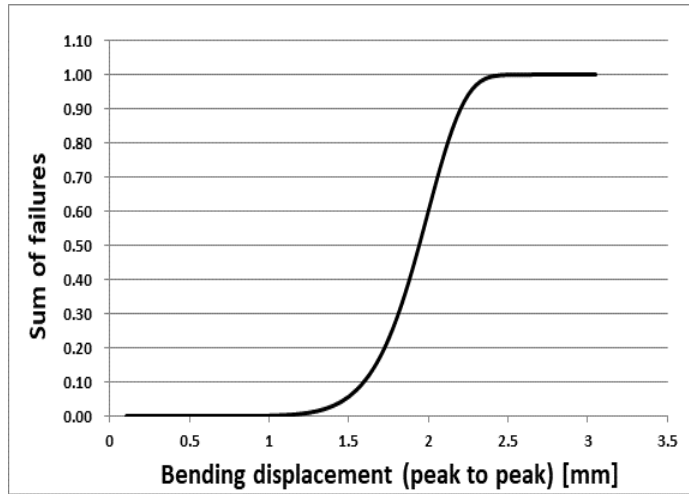


Fig. 18. Sum of failures for the cable clamped with wedge type

TABLE 5
Stress and failure rate (with wedge type clamp)

i(sorted)	Stress	Percentage	ln(Stress)	Lnln(1/(1-F))
1	1.69	0.074	0.52	-2.559
2	1.77	0.181	0.57	-1.612
3	1.79	0.287	0.58	-1.083
4	1.80	0.394	0.59	-0.693
5	1.82	0.500	0.60	-0.367
6	1.87	0.606	0.63	-0.070
7	2.09	0.713	0.74	0.221
8	2.22	0.819	0.80	0.537

썩기형 클램프의 경우 전선의 손상은 3, 5, 6번 소선에서 발생하였고, 파단지점은 고정점부터 썩기 안쪽으로 10 mm 이내에 위치하였다. 이는 썩기형 클램프의 형상과 관계된 것으로, 전선이 풀

리지 않도록 썩기 안쪽이 톱니 모양으로 가공되어 있어 체결시에 톱니에 의한 자국이 생길 수 밖에 없는 구조이다. 이는 하나를 제외한 모든 균열이 톱니 자국에서 시작된 것으로 확인되었다.

전선의 피로 수명이 와이בל 분포를 따르고, 응력에 따른 수명 곡선은 역누승 관계로 가정하여 고장분석을 수행하였다. 여기서 수명곡선의 지수는 통상적 대푯값인 0.12로 가정하였다. 개별 시편에 대한 파단까지의 시간은 500 Mcycle의 수명 기준으로 등가응력(진동변위, Y_b)으로 변환되었고, 볼트형 클램프 전선 고장 데이터의 메디안순위에 의해 계산된 진동변위와 고장률은 Table 4와 같다.

Fig. 15는 로그변환된 응력과 고장률의 관계를 선형회귀모형으로 나타낸 것이고, 이로부터 추정된 모델의 불신뢰도를 Fig. 16에 나타냈다. 데이터 분석을 통해 구한 척도모수(scale parameter)는 1.38 mm이며, 500 Mcycle 수명기준의 평균 진동변위는 1.28 mm이다.

썩기형 클램프에 의해 체결된 전선의 시험 결과는 Table 5와 같다. 썩기형 클램프의 전선에 대한 로그변환된 응력과 고장률의 선형회귀모형은 Fig. 17과 같고, 이로부터 추정된 모델의 불신뢰도를 Fig. 18과 같다.

썩기형 클램프의 전선의 고장값으로부터 척도모수는 2.13 mm이며, 500 Mcycle 수명기준의 평균 진동변위는 2.00 mm이다.

두 클램프 차이에 따른 수명 특성을 서로 비교하기 위해서 500 Mcycle 수명을 기준으로 피로한도를 비교하는데, 여기서 전선의 피로한도는 와이בל분포를 갖는 진동변위의 크기로 나타내었다. 볼트형 클램프에 물린 전선은 기준수명에서의 피로한도는 평균변위가 1.28 mm이다. 이는 Fig. 9의 P-S 계산값을 기준으로 318 ue이고, 탄성계수를 69 MPa로 하면 약 22 MPa의 응력에 해당한다. 동일하게 썩기형 클램프의 경우 피로한도 수명에 해당하는 평균 변위는 2.0 mm이다. 이는 Fig. 9에서 볼트형이 썩기형에 비해 스트레인이 1.8배 크게 나온 결과를 고려하면 변형율이 294 ue로 계산되고, 응력으로 약 20 MPa에 해당한다. 이로부터 볼트형 및 썩기형 클램프의 차이에 의한 피로강도는 약간의 차이는 있지만, 정도는 미미한 것으로 나타났다.

IV. 결론

가공전선의 와류진동은 비교적 낮은 풍속대에서 발생하는 특성으로 인해 일상적인 기후 환경에서 항시 발생하는 진동 현상으로, 전선 피로 파손의 주요 원인이며, 전력 설비의 안정적 운영을 위해 지속적으로 관리하여야 한다. 전선의 피로에 영향을 미치는 여러 인자 중에서 클램프 방식에 따른 수명 특성을 가속 수명 시험을 통해 분석하였다.

전선의 응력에 따른 피로 수명을 역누승관계의 와이בל분포로 가정하였고, 공진형 가진시험을 통해 하나의 알루미늄 소선이 파단되는 시점까지의 수명을 계측하여, 500 Mcycle 기준의 수명에 대한 P-S 방법에 따른 응력을 기준으로 피로한도를 산출하였다.

체결 원리의 차이로 인해, 볼트형에 비해 썩기형 클램프 시험 조건에서 체결력이 약하게 고정되어 썩기형 시험 조건에서 고유진동수와 변형율이 낮게 측정되었다.

전선에 걸리는 응력을 P-S 공식을 이용해 계산하였고, 실측을 통해 이와 비교하였다. 볼트형 클램프 조건에서 두 값은 약 20%의 차이를 보였으나, 여러개의 나선 형태의 소선이 접촉하고 있는 복잡한 내부 구조를 고려하면 P-S 계산값을 피로 수명평가에 이용할 수 있는 이상화된 응력으로 적합하다고 판단된다.

제단형 응력시험으로 확보한 고장데이터로부터 500 Mcycle 기준의 피로한도를 와이בל 분포로 가정해 분석한 결과, 볼트형 클

램프에 물린 전선의 피로한도가 썬기형 클램프의 것보다 약 10% 정도 높게 나타났지만, 큰 차이를 보이지 않았다.

전선의 파단 결과를 보면, 볼트형은 6개 중 2개의 소선에 집중되어 나타났고, 길이방향 위치가 고정점에서 0 ~ 25 mm 사이로, 하부의 클램프 몸체와 닿는 전선의 아래면에 해당하였다. 클램프의 비대칭 구조로 인해 크랙이 발생한 하부에 응력이 상대적으로 크게 발생하였고, 전선 하부와 클램프 곡면이 부딪치면서 크랙 발생에 영향을 준 것으로 판단된다. 썬기형 클램프의 경우 전선이 파단된 위치는 전선 체결시에 생성될 수 밖에 없는 썬기의 톱니 자국과 관계되었다. 강한 체결력을 얻기 위한 설계 사양으로 추측되지만, 전선의 수명을 단축시키는 결과를 초래할 수 있어 개선이 필요한 것으로 사료된다.

본 수명시험은 클램프 방식에 따른 전선의 피로 특성 차이를 상대적으로 비교하기 위한 목적으로 상대적으로 경제적, 시간적으로 효율적인 공진형 가진시험법을 활용하였지만, 한편 장력이 없고, 전선의 자중에 의한 정적 굽힘을 고려하지 않은 조건에서 수행되었다는 점을 고려하여, 이 결과를 실제 선로의 손상에 그대로 적용하는데 유의하여야 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Korea Electric Power Corporation through KEPCO Research Institute. (grant number : R20DA22)

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 전력연구원의 2020년 선정 주력연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R20DA22)

REFERENCE

- [1] J. Chan, "EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced conductor motion", Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1012317, 2006
- [2] Wayne B. Nelson, "Accelerated Testing Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis", Wiley-Interscience, 1990
- [3] D. Y. Lee, J. R. Goo, and Doosoo Kim, "Success Run Test for Reliability Demonstration of 1100°C Gas Turbine Blades", KEPCO Journal on Electric Power and Energy, Vol. 3, No. 2., pp. 107-111, 2017, <https://doi.org/10.18770/KEPCO.2018.04.01.019>
- [4] Overhead lines - Method for fatigue testing of conductors, IEC 62568, 2015