

고강도 저손실 가공송전선의 개발(I) - 기계적 특성

Development of High Strength and Low Loss Overhead Conductor(I) - Mechanical Properties

김병걸¹, 김상수^{1,a}, 박주환²

(Byung-Geol Kim¹, Shang-Shu Kim^{1,a}, and Joo-Hwan Park²)

Abstract

New conductor is developed by using high strength nonmagnetic steel(NM) wire as the core of overhead conductor. This conductor is called ACNR overhead conductor(Aluminum Conductor Nonmagnetic Steel Reinforced). Formed by the combination of aluminum alloy wire and high strength nonmagnetic steel wire, it has about the same weight and diameter as conventional ACSR overhead conductor. To enhance properties beneficial in an electrical and mechanical conductor during the process of high strength nonmagnetic steel wire, we made a large number of improvements and modifications in the working process, aluminum cladded method, and other process. ACNR overhead conductor, we successfully developed, has mechanical and electrical properties as good as or even better than conventional galvanized wire. Microstructure of raw material NM wire was austenite and then deformed martensite after drawing process. Strength at room temperature is about 180 kgf/mm² ~ 200 kgf/mm². NM wire developed as core of overhead conductor shows heat resistant characteristics higher than that of HC wire used as core of commercial ACSR overhead conductor. Strength loss was not occur at heat resistant test below 600 °C. Fatigue strength of vibration fatigue is about 32 ~ 35 kgf/mm² and that of tension-tension fatigue is 90 ~ 120 kgf/mm² which is 50 ~ 65 % of tensile strength.

Key Words : High strength low loss overhead conductor, ACNR, Nonmagnetic core, Sag

1. 서 론

최근에 미국이나 러시아를 중심으로 가공송전선의 송전효율을 증대시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있으며 어느 정도 성과를 거두고 있다. 송전효율을 증가시키기 위한 기본적인 방향은 다음 2가지로 제시되고 있다. 첫째, 전선 중에서 기존에 같은 크기를 일률적으로 구성되어 있는 알루미늄

미늄도체를 각각 다른 크기로 새롭게 조합시켜 손실을 획기적으로 절감시키는 방법과 둘째, 기존의 ACSR송전선에 사용되고 있는 탄소강 코어(Core)를 비자성강으로 대체하는 방법이다. 고탄소강선과 알루미늄도체로 구성된 ACSR가공송전선에서는 전류의 흐름에 의하여 코어(Core)에 자기장이 발생되어 투자율이 증가되고 이로 인하여 알루미늄층에서 전류밀도의 재 분포가 발생된다. 전류밀도의 재 분포, skin effect, hysteresis, 코어에서의 eddy current lose 등은 전선의 inductance와 저항을 변화시켜서 전력손실을 발생시킨다[1,2]. Transformer effect를 최소화 하는 방법으로는 알루미늄층을 짝수층으로 구성하여 magnetic flux를 없애는 방법과 core의 재질을 비자성강으로 교체하는 방법이 있다

1. 한국전기연구원 신소재응용연구그룹
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 고려상사(주) 연구개발부
a. Corresponding Author : shangshu@keri.re.kr
접수일자 : 2005. 9. 7
1차 심사 : 2005. 10. 11
심사완료 : 2005. 10. 25

[1,2]. 본 연구에서는 기존의 ACSR가공송전선의 코어(Core)인 고탄소강선 대신에 비자성이면서 고강도인 새로운 강선을 코어재료로 채택한 ACNR (Aluminum Conductor Nonmagnetic Steel Reinforced) 가공송전선을 개발하여 적용하고자 한다. ACNR가공송전선은 ACSR 가공송전선을 기본으로 하여 알루미늄도체는 기존의 소재와 형상을 그대로 사용하였으며 지지선으로 사용되고 있는 고탄소강을 고강도비자성강으로 대체하였다. 개발된 전선(ACNR)의 강도와 비틀림강도, 부식 등의 기계적 특성과 피로특성에 대하여 조사하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험방법

본 연구에 사용된 고강도 비자성강의 화학조성은 표 1과 같다. 송전선의 지지선으로 사용하기 위한 제조공정은 다음과 같다. 초기 약 7~8 mm의 선재로부터 흠집제거, 고용화 열처리, 산세 피막생성 및 신선과정을 거쳐 최종적으로 목표 직경까지 신선한다. 이후 목적에 따라 알루미늄을 피복하는 알루미늄클래딩(Al cladding) 공정과 신선공정을 거쳐 최종적으로 3.0 mm, 3.5 mm 직경으로 제조하였다. 각 소선 7가닥을 연선하는 연선공정을 통해 7/3.5 연선재를 제조하였다.

인장시험은 JIS Z 2201 9A 시험편으로 Zwick사의 전선 전용 인장시험기를 이용하였으며 약 300 mm의 시험편에 100 mm의 신율계를 부착하여 10 mm/min의 속도로 인장시험을 실시하였다.

비틀림시험은 IEC 1232시험규정에 따라 직경의 100배인 350 mm의 시험편에 대하여 10 cycle/min 속도로 회전하였다. 시험편에 인가된 하중은 인장강도의 약 2 %인 21 kgf를 인가하였다.

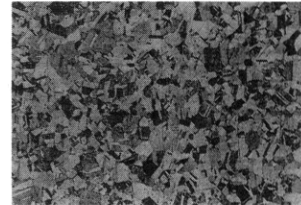
피로시험은 선재의 피로시험이 가능하도록 고안된 나카무라식 피로(NAKAMURA's fatigue)시험기로 시험을 실시하였다[1]. 시험에 이용된 시험편의 길이는 약 700 mm이며 선재에 4 점 굽힘모멘트를 가한 상태에서 5 Hz의 주파수로 회전시키면서 인장과 압축을 동시에 가하여 시험하는 장비로서 바람에 의한 진동으로 전선에 굽힘응력이 작용한 경우와 유사하다. 피로강도는 약 10^7 cycle 까지 파단되지 않은 응력으로 정하였다.

직경 3.5 mm의 7가닥 소선을 연선한 연선재의 피로시험은 진폭 10 mm에서 30 mm까지 변화시키면서 피로시험을 실시하였다.

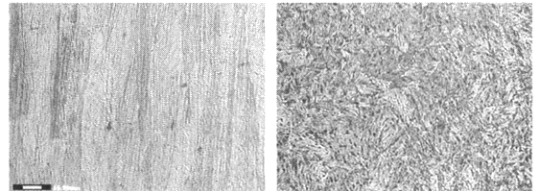
표 1. 고강도 비자성(NM)강의 화학성분.

Table 1. Composite of NM wire.

C	N	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Si
0.12	0.65	0.09	19.72	0.10	10.32	0.08	6.64	0.38



(a) 7 φ 강선의 미세 조직



(b) 길이방향 (3.5 mm) (c) 수직 단면 (3.5 mm)

그림 1. 냉간 인발된 강선의 미세조직.

Fig. 1. Microstructure of NM wire after drawing.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직

그림 1은 7.0 φ 모재와 3.5 φ로 신선한 선재의 미세조직을 나타낸 것이다. 그림 1(a)의 7 φ 모재는 전형적인 오스테나이트조직을 나타내고 있으며 약 82 % 가공된 3.5 φ 강선의 미세조직에서는 신선방향(그림 1(b))을 따라 길게 연속적으로 배열된 미세 섬유상조직(fiber structure)이 잘 형성되어 있으며, 신선방향과 수직면(그림 1(c))은 결정립이 치밀해지고 미세화 되었으며 초기의 조직과는 다른 새로운 상인 가공유기 마르텐사이트(α')가 관찰되었다. 7 φ 강선에서는 완전한 FCC 구조를 나타내고 있지만 3.5 φ로 신선하게 되면 FCC과 마르텐사이트가 혼합되어 있는 것으로 나타났다.

신선이라는 가공법에 의해 제조된 선재는 가공 방향을 따라 매우 큰 방향성을 가지면서 고밀도화된 섬유상조직을 나타내게 된다. 이러한 조직은 가공방향의 강도와 내피로 특성(인장-인장)이 가공방향의 수직면의 내피로 특성(진동피로)에 비하여 우수하다.

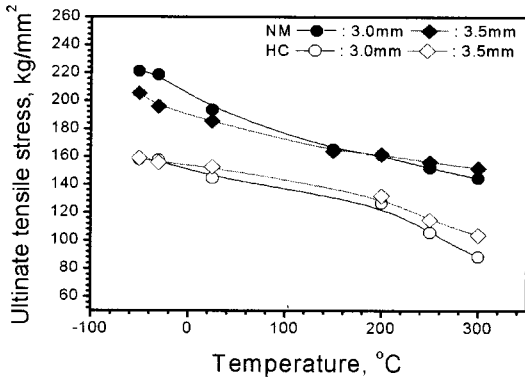


그림 2. 온도에 따른 인장강도 변화.
Fig. 2. Tensile strength in accordance with temperature.

3.2 내열 특성

직경 7 φ 선재를 신선하게 되면 가공경화와 가공유기마르텐사이트의 형성에 의해 강도가 향상되게 된다. 냉간신선에 의해 제조된 3.0 φ와 3.5 φ NM 강선의 인장강도는 약 185 kgf/mm² 이상의 고강도 특성이 얻어졌다. 이는 기존의 ACSR 전선용 강선(HC)에 비하여 약 40 kgf/mm² 이상의 우수한 고강도 특성을 나타내었다. 초기 선재의 높은 강도 확보는 알루미늄 크래딩 두께 조절을 가능하게 하여 도전율을 향상시킬 수 있는 이점이 있다.

그림 2는 개발된 강선(NM)과 기존의 ACSR 전선의 지지선으로 사용되고 있는 고탄소강선(HC)의 고온열적특성을 나타낸 것이다. 고온강도는 온도에 선형적으로 영향을 받으며 200 °C의 온도에서 고온강도는 약 160 kgf/mm²으로 기존의 HC강선 120 kgf/mm²에 비해 약 40 kgf/mm² 이상 우수한 열적특성을 나타내고 있다.

그림 3은 직경 3.0 φ와 3.5 φ 강선의 내열특성(각 온도에서 1시간유지 후 상온인장강도)을 나타낸 것으로 약 500 °C까지는 상온에 비해 강도가 약 10 % (19 kgf/mm²) 증가하였으며 500 °C이상의 온도에서는 강도가 급격히 감소하기 시작하였다. 이는 500 °C이하에서는 저온시효에 의해 강도가 증가하지만, 500 °C 이상에서는 회복, 재결정 및 결정립 성장에 의해 강도가 급격히 감소한다.

반면에 기존의 HC 강선은 약 300 °C 이후부터 강도가 감소하기 시작하였다. 본 연구에서 개발된 NM 강선이 기존의 ACSR전선용 강선(HC)에 비하여 우수한 내열 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

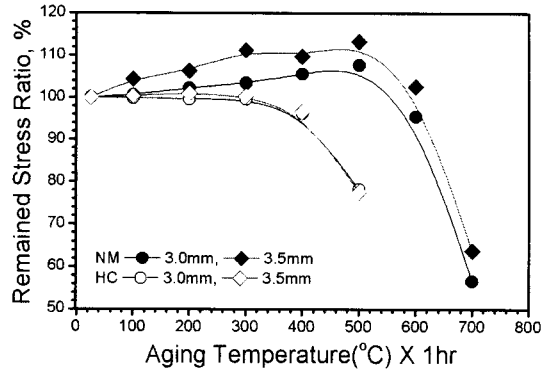


그림 3. 내열성강도의 변화.
Fig. 3. The change of strength after heat resistant test.

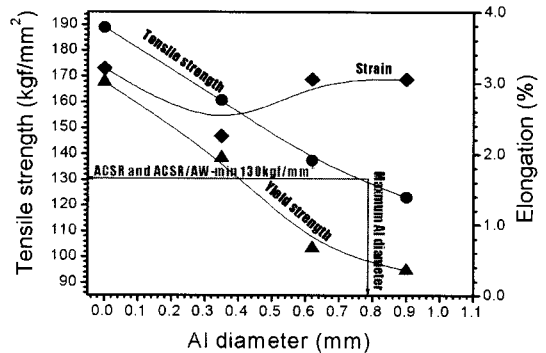


그림 4. 알루미늄크래딩 두께에 따른 강도변화.
Fig. 4. The change of strength in accordance with clad aluminum thickness.

그림 4는 알루미늄 크래딩 두께에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 것으로 한국전력 표준구매시방서에는 ACSR, ACSR/AW용 강선의 최소인장하중이 130 kgf/mm² 규정되어 있다. 알루미늄클래딩 두께가 약 0.78 mm이하가 되면 인장강도 규정을 만족되었다. 이는 기존의 알루미늄 클래딩 두께 0.48 mm에 비하여 약 0.3 mm이상 알루미늄의 두께를 증가시킬 수 있다. 알루미늄의 두께를 증가시킴으로 인해 전선의 저항을 감소시켜 송전효율의 증대와 더불어 내식성 향상이 가능하다.

3.3 비틀림 특성

그림 5는 비틀림 회수에 대한 비틀림 토오크 곡선을 나타낸 것이다.

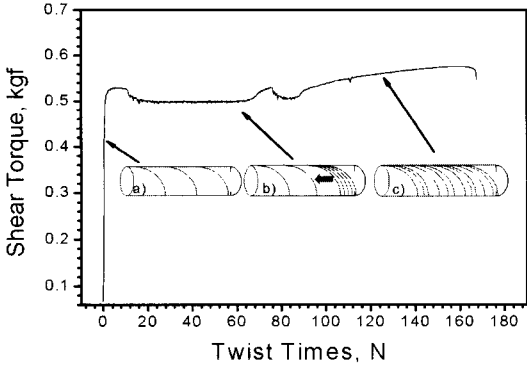


그림 5. NM 강선의 비틀림곡선.
Fig. 5. Torsion curve of NM wire.

비틀림곡선 상에서 비틀림 초기에는 a)와 같이 비틀림하중이 증가하면서 균일변형(Uniform deformation)이 진행되고, 그 다음 단계로 b)와 같이 일정한 비틀림 하중 하에서 국부적인 비틀림 변형(local deformation)이 형성되었다. 국부적인 비틀림 변형이 시험편 전체로 진행하면 c)와 같이 다시 비틀림 하중이 증가하면서 균일변형이 형성되다가 최종적으로 파단되었다. 또는 c)의 과정이 없이 b)의 국부변형과정에서 파단되기도 한다. b)의 과정에서 파단되는 경우는 직경 6.0 mm 이하의 강선에서 마르텐사이트가 발생되어 흔해진 경우이며 c) 과정에서 파단되는 경우는 6.0 mm의 오스테나이트의 균일상에서 나타났다.

그림 6은 선재의 직경(가공량)에 따른 인장강도와 비틀림 회수와의 관계를 나타낸 것으로 인장강도 120 kgf/mm² 이하에서는 비틀림 횟수가 110회 이상으로 매우 높지만 120 kgf/mm² 이상의 고강도에서는 비틀림 특성이 급격히 나빠져 3-5회 정도에서 파단되었다. 직경에 따른 비틀림 토크(kgf·m)는 초기 6.2 mm까지는 일정하게 감소하다가 6.2 mm이하에서는 급격하게 변화하였다. 본 연구에서 사용된 강선의 경우 7 mm에서 냉간 인발하게 되면 6.2 mm에서 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 상변태가 발생하여 비틀림회수가 급격히 감소하는 것으로 사료된다. 잔류오스테나이트에 의한 비틀림 회수 감소를 방지하기 위하여 다각적인 연구가 진행되고 있다. 방안으로 고려되고 있는 것은 열처리에 의한 방법과 신선하는 과정에서 잔류오스테나이트가 발생되지 않도록 하는 방법이 있다[12].

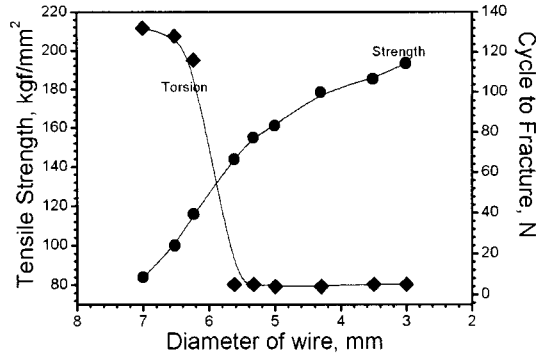


그림 6. 가공에 따른 비틀림회수와 인장강도.
Fig. 6. The relationship between tensile strength and torsion cycle with drawing.

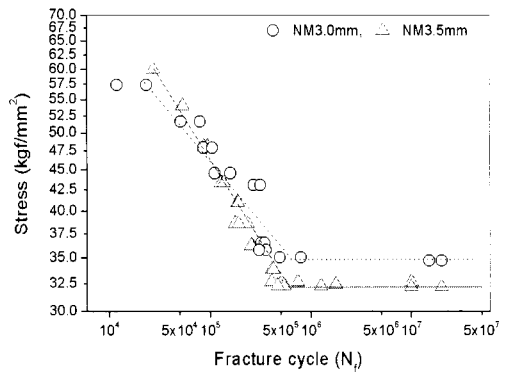


그림 7. 미소진동피로.
Fig. 7. Stress vs fracture cycle curve of vibration fatigue.

3.4 피로특성

송전선의 피로파괴는 주로 바람과 전선의 자중에 의해 발생되고 있으며 이를 구분하면 바람과 자중에 의한 인장-인장피로파괴와 굽힘피로파괴가 있다. 인장-인장피로는 전선의 장력과 전선자중 등의 영향으로 전선길이방향에서 발생되며, 굽힘피로는 전선 또는 전선과 연결되는 부속 금구류에서 바람에 의한 진동으로 굽힘하중을 받게 되고 이로 인해서 강선 내부에서 굽힘피로파괴가 발생된다.

3.4.1 미소진동피로

그림 7은 강선의 굽힘피로특성을 나타낸 것으로 주어진 응력에서 파단이 발생하지 않는 피로강도는 인장강도의 17 ~ 20 % 정도인 32 ~ 35 kgf/mm²

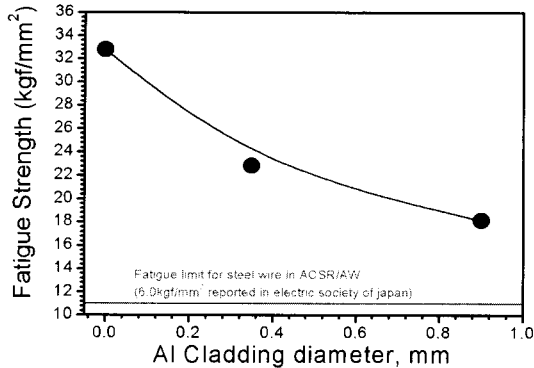


그림 8. Al cladding 두께에 따른 피로강도 변화.
Fig. 8. Fatigue strength in accordance with cladded aluminum thickness.

응력에서 나타났다. 이는 일본의 전기규격에서 ACSR송전선이 요구되고 있는 피로강도 32.0 kgf/mm²보다 우수한 피로특성을 나타내고 있다.

그림 8은 알루미늄클래딩 두께에 따른 피로강도의 변화를 나타낸 것으로 클래딩 되지 않은 강선의 피로강도는 약 33 kgf/mm²이며 알루미늄의 두께가 약 0.35 mm이면 피로강도는 23 kgf/mm²으로 약 10 kgf/mm² 감소하였다. 알루미늄의 두께 0.9 mm에서는 18.2 kgf/mm²로 알루미늄 클래딩 두께와 피로강도는 식 (2)의 관계를 가지며 변화하였다.

$$F. S. = 31.08 - 15.57 \times (Cladding Dia.) \quad (2)$$

알루미늄의 두께가 약 0.9 mm 피로강도에서도 기준치(ACSR/AW의 피로강도 : 6.0 kgf/mm²)을 훨씬 상회하는 우수한 특성을 나타내었다.

3.4.2 인장-인장 피로

전선의 장력과 자중에 의해 전선의 길이 방향으로 발생하는 인장 - 인장 피로는 최대공칭응력(P_{max})을 인장강도의 90 %로부터 점차적으로 응력을 감소시키면서 시험하여 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 피로강도는 약 106.7 kgf/mm²으로 인장강도의 약 70~80 % 수준으로 어닐링강의 40~60 %수준 보다 훨씬 높게 나타났다. 또한 미소진동피로의 약 32. kgf/mm²보다 2배 이상 높게 나타났다. 이는 그림 1의 미세조직에서 보여지는 바와 같이 가공방향을 따라 섬유상조직과 같이 길게 연신되어 있으므로 인하여 우수한 피로특성을 나타내었다.

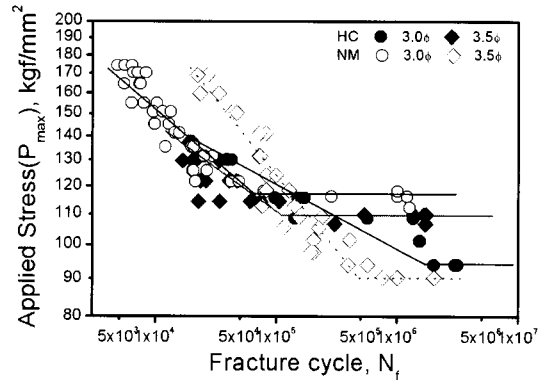


그림 9. 인장-인장피로곡선.
Fig. 9. Stress vs fracture cycle curve of tension-tension fatigue.

3.4.3 연선재의 굽힘피로특성

송전선에서 바람에 의한 진동으로 피로가 발생할 수 있는 주파수는 Strouhal수로 표현될 수 있다.

$$S = \frac{fd}{V} \quad (3)$$

f = 주파수, d = 전선의 직경, V = 풍속

식 (3)에 대하여 Bate와 Callow는 송전선에서 Strouhal수를 0.185로 보고함에 따라 식 (3)은 다음과 표현될 수 있다.

$$f = \frac{0.185 X V}{d} \quad (4)$$

식 (4)에서 본 연구에 사용된 연선재(3.5/7)의 직경 10.5 mm와 풍속 1m/sec에 대하여 진동피로가 발생할 수 있는 주파수는 약 17 Hz이다. 식 (4)에 의해 계산되어진 주파수 17 Hz와 10 ~ 30 mm의 변위진폭 하에서 인장강도의 약 60 % 하중으로부터 점차적으로 하중을 감소시키면서 피로시험한 곡선에서 각 진폭에 대한 피로강도를 나타낸 것이 그림 10이다. 그림에서 변위진폭이 증가함에 따라 피로수명과 피로강도는 급격히 감소하였다. 바람에 의한 진동피로 파단이 발생될 소지가 있는 저진폭(20 mm 이하)에서는 NM강선이 기존의 HC강선에 비하여 우수한 피로 특성을 나타내었으며 고진폭(20 mm 이상)에서는 유사한 피로특성을 나타내었다.

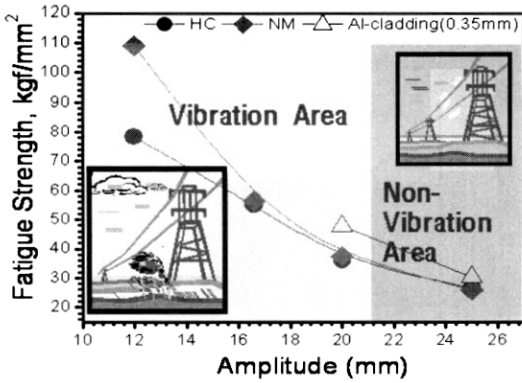


그림 10. 연선재의 진폭과 피로강도.
Fig. 10. The relationship between fatigue strength and amplitude in strand wire(3.5/7).

NM강선의 피로강도는 12 mm 진동진폭에서 인장강도의 약 60.60 %인 109.14 kgf/mm²로 HC에 보다 약 25 kgf/mm² 이상의 우수한 내피로 특성을 나타내었으며 25 mm 진폭에서는 인장강도의 약 14.3 %인 25.7 kgf/mm²로 감소하였다.

보고에 의하면 바람에 의해 유도되어진 연선재의 진동피로 발생은 전선직경의 2배를 넘지 않는다고 하였다[6]. 연선재 직경 10.5 mm에 대한 진동피로의 발생조건은 약 21 mm이며, 이때의 피로강도는 연선재 인장강도의 17.7 %인 32.0 kgf/mm²이다.

그림 11은 진동진폭 20 mm에서 알루미늄 크래딩 두께와 연선재의 피로강도의 관계를 나타낸 것이다. 연선재의 피로강도는 알루미늄 크래딩 두께에 따라 증가하다가 일정한 두께에서 최대 피로강도를 나타낸 후 점차적으로 감소하는 역 포물선의 형태를 나타내었다. 알루미늄 크래딩 두께가 약 0.3 mm에서 피로강도는 약 43.0 kgf/mm²으로 최대값을 나타내었다. 이는 연선재가 구성하고 있는 각소선간의 마찰 마모와 밀접한 관계가 있다. 연선재의 피로파단은 일반적으로 구성하고 있는 소선들 사이의 마찰 또는 마모에 의해 균열이 발생되어 내부로 성장하여 최종적으로 파단 된다.

또한 연선재의 형상은 각 소선이 꼬여 있는 형태이다. 이 경우 소선의 접촉부위(내층과 외층소선)에서는 인가하중과 피로시험과정에서 작용하는 굽힘하중 등에 의해 인접소선을 따라 미세하게 움직임이 형성된다. 소선들 사이의 미세한 움직임에 의해 발생된 미세균열은 연선재내에 작용하는 굽

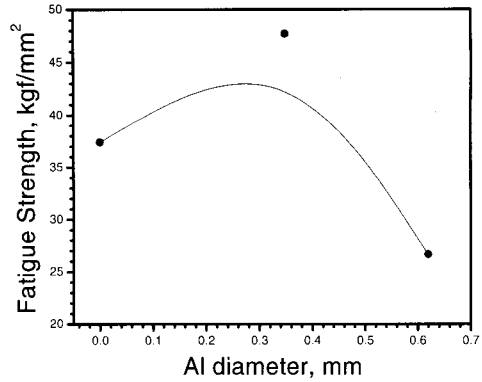


그림 11. 알루미늄 크래딩 두께와 피로강도.
Fig. 11. The relationship between fatigue strength and aluminum cladding thickness in strand wire(3.5/7).

힘응력 등에 의해 균열성장의 우선사이트가 된다. 알루미늄의 크래딩이 각 소선들간의 마모 마찰을 방지하는 윤활재역활을 함으로 인하여 피로강도가 증가하는 현상이 나타나게 된다. 그러나 알루미늄 크래딩 두께가 0.3 mm 이상에서는 피로강도가 감소하게 된다. 이는 앞서 그림 4에서 살펴본 바와 같이 알루미늄 크래딩 두께 증가에 따라 피로특성에 직접적으로 영향을 미치는 인장강도가 반대로 감소하기 때문이다.

4. 결 과

고강도 비자성강을 가공송전선의 지지선으로 적용하여 기계적 특성을 분석한 결과 단시간 및 장시간의 내열특성과 크립 및 부식특성이 기존의 ACSR 강선의 지지선으로 사용되고 있는 HC 강선에 비하여 우수하였다. 그 외의 기계적 및 피로특성의 분석 결과 다음과 같이 나타났다.

1. 고강도 비자성강(NM)의 강도는 HC강선에 비하여 우수하게 나타났다. 특히 상온인장강도는 약 185 kgf/mm²이상으로 전선의 기준값 130 kgf/mm²을 훨씬 상회하였다.
2. 전선의 부식억제와 강선의 도전을 향상을 위해 최대 0.78 mm까지 알루미늄을 크래딩(cladding) 하는 것이 가능하다.
3. 미풍진동피로에서 개발강선의 피로강도는 직경에 따라 약 32 ~ 35 kgf/mm²으로 가공송전선의 지지선으로 사용되기 위한 요구치 32 kgf/mm²을 이상으로 우수한 피로특성을 나타내었다.

4. 인장-인장 피로에서 피로강도는 인장강도의 50 ~ 65 % 수준인 90 ~ 120 kgf/mm²으로 나타났다.

5. 알루미늄 크래딩 처리한 연선재의 피로강도는 진폭과 알루미늄의 크래딩 두께에 의존하였다. 진동진폭 20 mm에서 시험한 결과 알루미늄 크래딩 두께 약 0.35 mm에서 진동피로강도는 43.0 kgf/mm²으로 가장 우수한 피로강도를 나타내었다.

참고 문헌

- [1] Vincent T. Morgan, "Effects of alternating and direct current, power frequency, temperature, and tension on the electrical parameters of acsr conductors", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, p. 859, 2003.
- [2] V. T. Morgan and R. D. Findly, "The effect of frequency on the resistance and internal inductance of bare ACSR conductors", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol. 6, p. 1319, 1991.
- [3] H. Yoshimura, "Microstructure, magnetic permeability and electric resistivity of high Mn-Cr-Ni steel", iron and steel, Vol. 9, p. 80, 1979.
- [4] M. Fujikura, "Effect of Mn and N on the mechanical properties of Fe-18 %Cr-10 % Ni stainless steels", Transaction ISIJ, Vol. 15, p. 464, 1975.
- [5] T. Kato, "Structure stability and mechanical properties of Fe-Mn-Cr alloys", Transaction ISIJ, Vol. 16, p. 673, 1976.
- [6] E. Bate and J. R. Callow, "The quantitative determination of the energy involved in the vibration of cylinders in an air stream", Trans. Institution of Engineers(Australia), Vol. 15, No. 5, p. 149, 1934.
- [7] M. Dollar, I. M. Bernstein, and A. W. Tomson, Acta Metall., Vol. 12, No. 36, p. 311, 1988.
- [8] H. Sunwoo, M. E. Fine, M. Meshii, and D. H. Stone, Met. Trans., A, 13A, p. 2035, 1982.
- [9] M. B. Adeyemi, R. A. Stark, and G. F. Modlen, "Heat Treatment 79", Society, p. 122, 1980.
- [10] J. M. potter and R. A. Millard, "Advance in x-ray analysis", V20, ed., H. McMurdie, Plenum Press, p. 309, 1977.
- [11] A. Kawasaki, R. Watanabe, M. Yuki, Y. Nakanishi, and H. Onabe, Trans. JIM 37, p. 788, 1996.
- [12] 김정훈, 김봉서, 박수동, 김병걸, 이희웅, "송전 선용 고질소강선의 비틀림 특성에 미치는 열 처리의 영향", 전기전자재료학회논문지, 17권, 2호, p. 190, 2004.