

고강도 저손실 가공송전선의 개발(II) - 전기적 특성

Development of High Strength and Low Loss Overhead Conductor(II) - Electric 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 clad 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. The conductivity at 0.78 mm thickness of Aluminum clad NM wire is about 7 %IACS higher than 20 %IACS of HC wire used as core of commercial ACSR overhead conductor. The corrosion resistance is about 3 times higher than that of HC wire.

Key Words : High strength low loss overhead conductor, ACNR, Nonmagnetic steel, AC loss

1. 서론

ACSR(Aluminum Conductor Steel Reinforced) 가공송전선은 고탄소강선과 알루미늄도체로 구성된 복합체로 전류의 흐름에 의하여 코어(Core)부에 자기장이 발생되어 투자율이 증가되고 이로 인하여 알루미늄층에서 전류가 재 분포 된다. 이러한 전류의 재 분포, skin effect, hysteresis, 코어에서의 eddy current lose 등은 전선의 inductance와 저항을 변화시켜서 전력손실을 발생시킨다. 또한

자기적 손실은 Joule열을 발생시켜 전선온도의 상승과 더불어 전기에너지의 손실을 초래한다. 전선의 온도 증가는 계통의 불안정성을 가져오는 원인을 제공하게 된다. 이로 인한 전력손실을 최소화하는 방법으로는 코어의 재질을 자성체인 고탄소강선 대신에 비자성강으로 교체하는 방법이 있다. 본 연구에서는 기존의 고탄소강선 대신에 고강도 비자성강을 코어(Core)에 적용한 ACNR(Aluminum Conductor Nonmagnetic Steel Reinforced) 가공송전선을 개발하였다. 기존의 전선 강도를 유지하면서 도전을 향상과 전선내의 부식을 방지하기 위하여 강선에 최대 0.63 mm의 두께로 알루미늄 클레이딩(cladding)처리를 하였다. 기존의 ACSR가공송전선의 코어(Core)인 고탄소강선 대신에 비자성인 고강도인 새로운 강선을 코어재료로 채택한 ACNR(Aluminum Conductor Nonmagnetic Steel

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. 20

Reinforced)가공송전선을 전선적용 가능성을 조사하고자 한다. 현재 사용되고 있는 가공송전선(ACSR)을 기본으로 하여 알루미늄도체는 기존의 소재와 형상을 그대로 사용 하였다. 본 연구에서는 개발된 가공송전선(ACNR)을 전편의 기계적 특성이외에 부식 특성과 전기적 특성에 대하여 조사하였다.

2. 실험

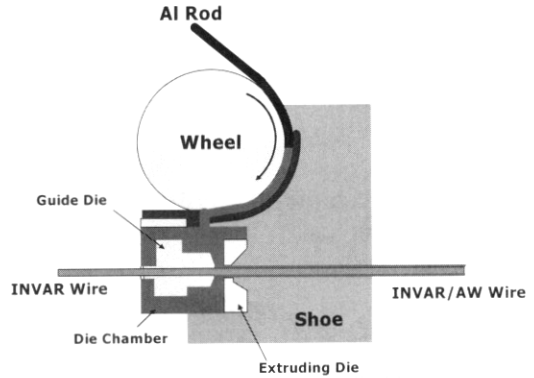
2.1 제조공정

ACNR전선은 기본적으로 현재 국내에 가장 많이 보급되어 있는 ACSR전선을 기본으로 하여 개발하였다. 알루미늄도체는 ACSR전선에 사용되고 있는 도체를 이용하였으며 강심을 기존의 고탄소강선(HC 강선) 대신에 비자성강(NM 강선)으로 대체하여 최대의 효과를 도출하고자한다. 본 연구에 사용된 고강도 비자성강의 화학조성은 표 1과 같으며 송전선의 지지선으로 사용하기 위한 제조공정은 다음과 같다. 초기 약 7~8 φ의 선재로부터 흠집제거, 고용화 열처리, 산세 피막생성 및 신선과정을 거쳐 목표 직경까지 신선하였다. 이후 목적에 따라 알루미늄을 피복하는 알루미늄크래딩(Al cladding) 공정과 신선공정을 거쳐 최종적으로 3.0 φ, 3.5 φ 직경으로 제조하였다. 각 소선 7가닥을 연선하는 연선공정을 통해 7/3.5 연선재를 제조하였다. 이후 알루미늄 도체와 강연선재를 연선하는 공정을 거쳐 규정된 가공송전선을 제조한다. 크래딩공정은 그림 1에 나타난 바와 같이 용도가 다른 이중 소재를 복합적으로 이용하기 위하여 용점 이하의 온도 500~600 ℃에서 압력을 가하여 이중 소재를 접합시키는 공정이다. 알루미늄 크래딩 두께는 최대 0.9 mm까지 조절하였다. 그림 1(b)에 나타낸바와 같이 알루미늄 크래딩층과 강선의 계면에서는 어떠한 계면균열도 발견할 수 없었다. 알루미늄 크래딩은 전기전도도의 향상과 부식을 억제하는 역할을 수행 한다.

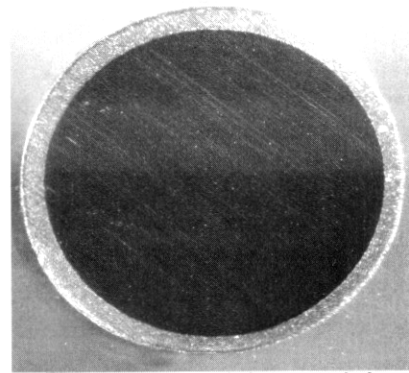
표 1. 고강도 비자성강(NM)의 화학성분.

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) 알루미늄의 크래딩공정



(b) 알루미늄 크래딩된 NM강선

그림 1. 알루미늄 크래딩 공정과 제조된 알루미늄 크래딩 강선.

Fig. 1. Aluminum cladding process and Aluminum clad NM wire.

2.2 실험방법

고강도 비자성강(NM wire)을 적용한 ACNR가공송전선의 직류 및 교류에 의한 송전선 손실을 파악하기 위하여 일정 전류 하에서의 온도 변화에 대한 전압강하를 측정하였다. 비교재로 동종의 ACSR전선을 채택하였다. 인가 전류가 직류인 경우는 송전선의 저항에 따른 손실항으로 나타나지만 교류 전류에서는 식 (1)에 나타난바와 같이 직류성분과 동일한 저항손실(R)과 인덕턴스에 의해 유기되는 L성분, 리액턴스에 의해 유기되는 C성분으로 구별된다.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} [\Omega],$$

$$X_L = j\omega L, \quad X_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

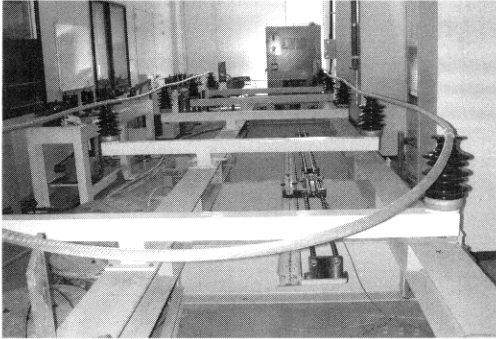


그림 2. 송전선 손실측정 시험 전경.
Fig. 2. The outlook of current loss test.

그림 2는 송전선의 손실을 측정하기 위한 시험 장치를 나타낸 것으로 크게 시험재료와 고온특성을 얻기 위한 가열부, 전류를 인가하는 power source, 전압의 변동을 측정하는 측정부로 구성되어 있다. 교류에서는 전선의 위치나 형상루프에 따라 변화를 초래하므로 일정한 형상을 유지하기 위하여 애자를 사용하여 일정한 루프를 유지하게 하였다. 사용된 시험편의 길이는 20 m이며 외부의 영향을 최소화하기 위하여 지상으로부터 1 m 이상 간격을 유지하였다.

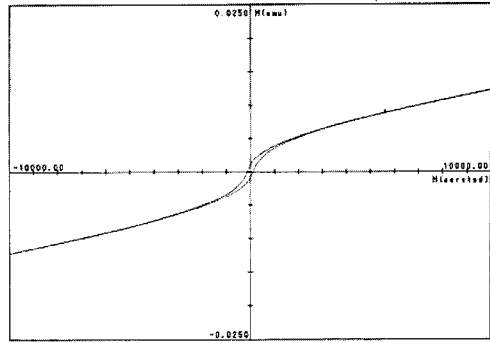
3. 결과 및 고찰

3.1 비자성 특성

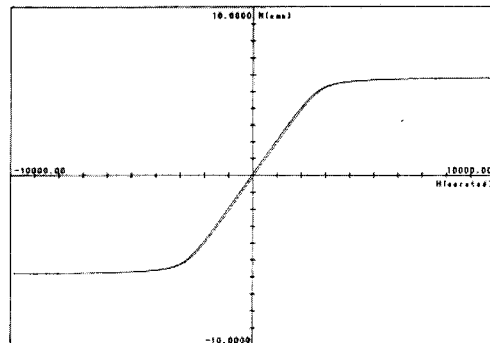
그림 3은 개발된 ACNR 전선의 지지선으로 개발된 NM강선(그림 3(a))과 기존의 ACSR 전선용 지지선으로 사용되고 있는 고탄소강선(HC, 그림 3(b))의 자속밀도-자화강도 곡선을 나타낸 것이다.

그림 3(b)의 HC 강선의 경우, 자속밀도(H)가 증가할수록 초기에는 자화강도가 직선적으로 증가하지만 일정자속밀도 이후에는 자화 강도값이 포화되는 강자성체의 특성을 나타내었다. 강자성체인 HC 강선을 지지선으로 사용하고 있는 ACSR전선의 경우 교류전류에 의해 와전류손이 발생하게 되어 송전손실이 발생하게 된다[1,2].

그림 3(a)의 NM 강선의 경우, 자속밀도가 증가하여도 자화강도는 포화되지 않고 계속 증가하는 비자성의 특성을 나타내었다. 즉 NM 강선의 투자율은 거의 1임을 알 수 있다. 따라서 NM강선을 지지선으로 사용하는 ACNR 전선의 경우 지지선에 의한 자기장 형성과 그에 따른 송전손실은 거의 발생되지 않는다[1,2].



(a) NM강선의 자화밀도-자화강도 곡선



(b) HC강선의 자화밀도-자화강도 곡선

그림 3. NM강선과 HC강선의 자화곡선.

Fig. 3. Hysteresis curve of NM wire(a) and HC wire(b).

3.2 내부식 특성

해안지역이나 공단지역과 같이 부식환경 하에서 사용되는 전선은 강선의 부식과 저항의 증가로 인하여 급작스런 파단이 발생하는 경우가 빈번히 발생되고 있다. 그림 4는 개발강선인 NM강선과 비교재인 HC강선의 부식특성을 조사하기 위하여 5% 염수분무시험을 실시한 후 부식시간에 따른 중량변화와 인장강도 잔존율을 나타낸 것이다.

시험은 KS D 9502 규정에 준하였으며 항온조의 온도를 35 ℃로 일정하게 유지하였으며 염농도는 5 wt%로 최대 10,000시간 동안 시험하였다. HC 강선의 중량감소율(그림 4(a))은 시간에 따라 크게 증가하였으며 최대 10000시간까지 5~6% 정도 중량감소율이 증가하였다. 직경이 작을수록 중량감소율이 큰 것은 단위면적당 무게비가 직경이 작을수록 크기 때문이다. 반면에 NM강선의 경우, 염수에 노출된 시간에 관계없이 거의 중량변화는 일

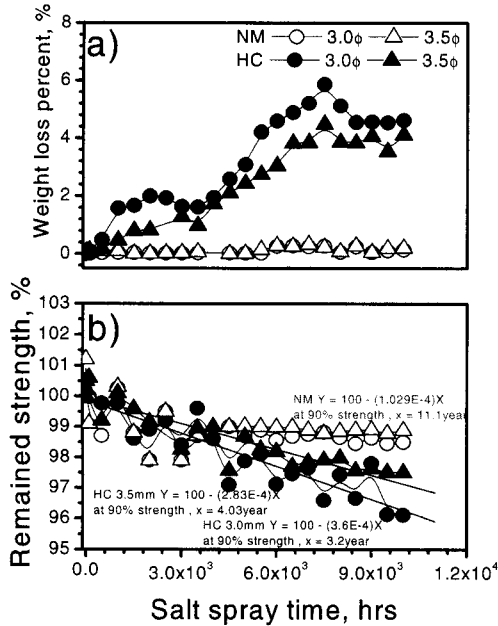


그림 4. 5 % 염수분무시험 후 시간에 따른 (a) 중량감소율 (b) 인장강도잔존율 변화.
 Fig. 4. The change of (a) weight loss percent and (b) remained strength in accordance with time after 5 % salt spray test.

어나지 않았으며 최대 10,000시간 하에서도 0.1 % 이하의 중량변화를 나타내었다.

그림 4(b)에 염수분무에 노출된 시간에 따라 강도 잔존율을 나타낸 것으로 HC강선은 노출시간에 따라 강도는 거의 직선적으로 감소하였다. 10 %의 강도저하가 발생하는 시간은 3.0 φ HC강선의 경우 3.2년, 3.5 φ는 4년이다. 반면에 NM강선의 경우 강도 10 % 감소에 걸리는 시간은 11년으로 HC강선에 비하여 부식저항성이 약 3배 이상으로 우수하였다.

그림 5는 부식시험 후 약 9,000시간 노출후의 단면을 나타낸 것으로 HC강선의 경우 약 0.07 mm 정도로 아연도금층이 되어 있음에도 불구하고 시험편 내부에 부식균열이 발생되었음을 확인할 수 있었다. NM강선에서는 알루미늄 크래딩(Al cladding)을 하지 않은 선재에서조차 부식균열은 발생되지 않았다.

송전선에서 발생하는 부식은 대기부식과 전해부식이 있다. 전선의 대부분은 공기 중에 노출된 상태에서 산소와 습도 등의 수분에 의해 부식이 진행되는 대기부식(Atmospheric Corrosion)이 발생된

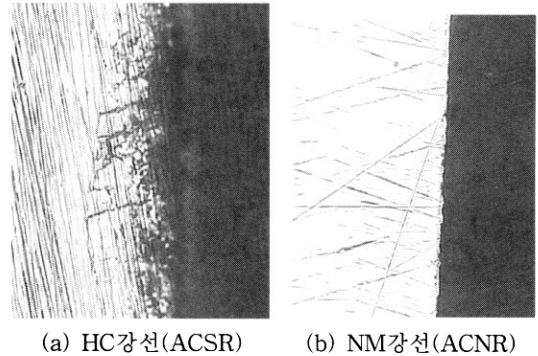


그림 5. 9000시간 부식시험 후 단면.
 Fig. 5. Vertical structure after 9,000 hours in salt spray test.

다. 해안지역과 공단지역과 같은 염공해 지역에서는 아황산가스(SO₂), 염소이온(Cl⁻) 등에 의해 전선과 화학반응을 하여 황산화합물, 염화합물 등을 생성한다. ACSR전선의 전해 부식은 이종금속간에 이온화 현상이 발생하게 되어 이온화 경향이 큰 아연(Zn), 알루미늄(Al), 강선(Fe)의 순서로 부식이 진행된다.

3.3 전기적 특성

3.3.1 알루미늄 크래딩강선(NM/AW)

가공송전선에 전류를 인가하면 도체의 저항과 지지선의 자체저항으로 인하여 전선에 열이 발생되어 전력손실이 발생된다. 지지선의 전기적 특성을 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 그림 6은 알루미늄 크래딩(Al cladding)두께에 따른 인장강도와 도전율과의 관계를 나타낸 것으로 크래딩을 하지 않은 NM강선의 경우 인장강도는 약 190 kgf/mm²이며 도전율은 약 3 %IACS로 나타났다. 알루미늄 크래딩 두께가 증가하면 도전율은 증가하지만 인장강도는 직선적으로 감소하였다.

ACSR/AW 전선의 지지선으로 사용되기 위한 강선의 한국전력의 규정은 인장강도와 도전율은 각각 130 kgf/mm²와 20 %IACS을 상회하여야 한다. 위 규정을 만족하는 알루미늄 클래딩 두께는 그림 6에서 알 수 있듯이 0.47 mm ~ 0.78 mm의 범위를 가지면 가능하다. 이때의 도전율은 최대 27 %IACS을 가지며 ACSR/AW전선용 지지선에 비하여 약 7 %IACS정도의 도전율 향상을 꾀할 수 있다. 도전율 특성이 1 % 향상되면 전체 송전손실의 약 1.5 %를 향상시킬 수 있으므로 약 0.78 mm

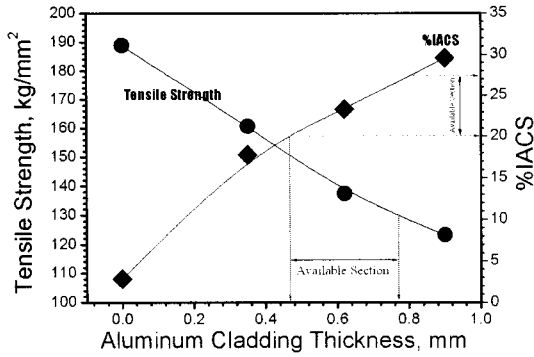


그림 6. Al cladding 두께에 따른 인장강도와 도전율의 관계.

Fig. 6. The relationship between tensile strength and conductivity in accordance with aluminum cladding thickness.

알루미늄 크래딩두께의 NM강선은 최대 10.5%의 송전손실을 저감하는 효과를 가진다고 할 수 있다.

3.3.2 ACNR/AW 전선

그림 7에 본 연구를 통하여 제작되는 시제품(ACNR)을 나타낸 것으로 기존의 ACSR 전선의 규격을 기준으로 제작하였다. 전선의 도체 단면적은 410 mm^2 이고 기존의 전선구조와 동일하게 내층과 외층에 각각 4.5/10, 4.5/16로 구성되어 있다. 그러나 ACNR 전선에는 기존의 고탄소강선 대신에 본 연구에서 개발된 강선인 NM 강선을 연선하여 제작한 연선재(3.5/7)를 사용하였다. NM강선의 알루미늄 크래딩 두께는 약 0.65 mm이며 인장강도는 약 140 kgf/mm^2 이다.

그림 7과 같이 제조된 ACNR/AW 410 mm^2 전선의 전기적 특성을 파악하기 위하여 직류 및 교류전류 100 A를 인가하여 전압강하로서 그 손실을 측정하였다.

그림 8은 ACSR 410 mm^2 전선과 ACNR/AW 410 mm^2 전선의 직류저항을 나타낸 것으로 온도 증가에 따라 전선 모두 선형적으로 저항은 증가하였다. 기존의 ACSR 전선에 비해 개발된 ACNR/AW 전선의 전기 저항이 낮게 나타났다. NM 강선을 지지선으로 이용하여 개발된 ACNR/AW 410 mm^2 전선은 기존의 ACSR 410 mm^2 전선에 비해 8 ~ 9% 정도의 손실저감 효과를 확인할 수 있었다. 여기서 나타나는 손실저감은 그림 6의 소선에서 확인한바와 같이 NM강선에 알루미늄을 약 0.63

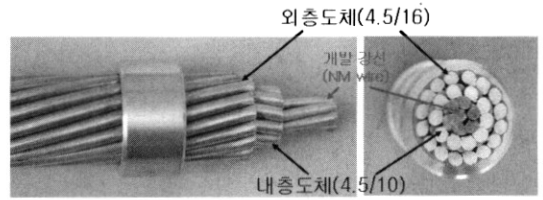


그림 7. NM강선을 이용한 ACNR/AW 410 mm^2 가공송전선.

Fig. 7. ACNR/AW 410 mm^2 overhead conductor manufactured by NM wire.

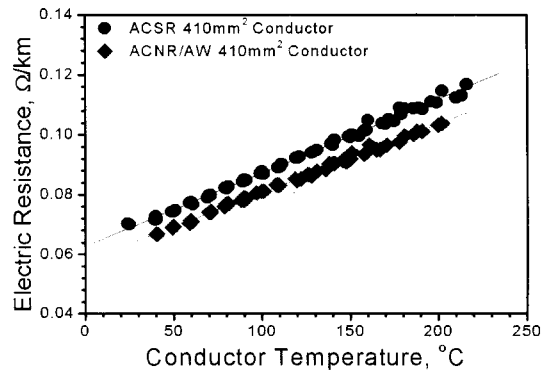


그림 8. ACNR/AW 410 mm^2 전선과 ACSR 410 mm^2 전선의 직류손실 특성 비교.

Fig. 8. Conduct loss of ACSR 410 mm^2 and ACNR/AW 410 mm^2 by DC current.

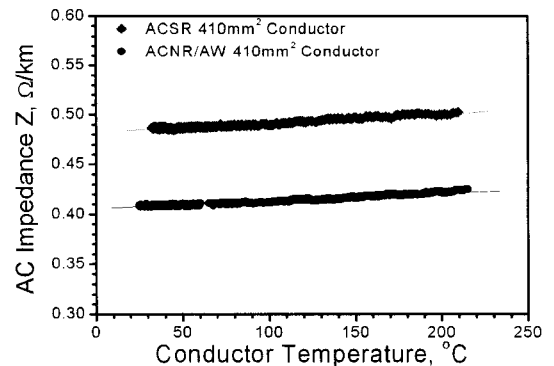


그림 9. ACNR/AW 410 mm^2 전선과 ACSR 410 mm^2 전선의 교류손실 특성 비교.

Fig. 9. Conduct loss of ACSR 410 mm^2 and ACNR/AW 410 mm^2 by AC current.

mm로 크래딩함으로 인하여 전선의 도전율이 전반적으로 향상되었기 때문에 나타나는 결과이다.

그림 9는 ACSR 410 mm² 전선과 ACNR/AW 410 mm² 전선의 교류저항을 나타낸 것이다. ACNR/AW 전선에서 알루미늄 크래딩 두께를 약 0.63 mm로 하였다. 온도 증가에 따라 교류저항(Z)은 직류저항(R)에서와 같이 선형적으로 증가하였다. 두 전선간의 손실특성을 비교한 결과 ACNR 전선이 ACSR전선에 비해 약 19 ~ 20 % 정도의 손실저감효과를 나타내었다. 직류의 8 ~ 9 %에 비하여 약 10 % 이상의 높게 나타났다. 이는 비자성강을 전선의 지지선으로 적용함으로 인하여 교류에서 우수한 특성이 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 ACSR 가공송전선의 경우, 지지선으로 사용되고 있는 고탄소강선은 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 강성체이기 때문에 교류전류가 인가되면 전선에 자기장이 발생되어 투자율이 증가되고 이로 인하여 inductance와 저항을 변화시켜서 교류손실이 발생하였다. 직류, 교류 등의 인가전류 차이에 의하여 발생하는 손실율은 약 5 %정도 인 것으로 보고되고 있다[9].

NM강선을 지지선으로 사용한 ACNR/AW 전선의 경우, 지지선이 비자성체이기 때문에 교류에서도 전선에서 지지선에 의한 자기장 발생 등으로 인한 손실이 발생되지 않는다[9,10].

4. 결 과

고강도 비자성강(NM강선)을 가공송전선의 지지선으로 적용한 ACNR가공송전선의 부식특성과 자기적 및 전기적 특성을 기존의 고탄소강선을 지지선으로 사용하고 있는 ACSR 전선과 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 구하였다.

1. 고강도 비자성강(NM강선)의 자화밀도와 자화강도 곡선에서 자화강도는 포화되지 않는 비자성인 투자율 1을 나타내었다. 개발강선(NM강선)을 지지선으로 사용하는 ACNR 전선의 경우 지지선에 의한 자기장으로 발생하는 송전손실은 거의 없었다.

2. 알루미늄 크래딩두께와 인장강도 및 도전율과의 관계에서 초기 인장강도는 약 190 kgf/mm²에서 크래딩두께가 증가하면 인장강도는 감소하

나 도전율은 증가하며, 한국전력의 최소인장강도 130 kgf/mm²에서 크래딩두께는 약 0.78 mm이며 도전율은 약 27 %로 기존의 ACSR전선 강심체인 고탄소강선의 도전율 20 %에 비해 7 % 정도 도전율이 향상되었다.

3. 염수분무시험에서 분무시간에 따라 고강도 비자성강선(NM강선)의 중량변화는 거의 나타나지 않았으며, 10 %의 강도저하가 발생하는 시간도 기존의 고탄소강선의 4년에 비해 NM강선은 11년으로 부식 저항성이 3배 정도 우수하다.

4. 고강도 비자성강을 지지선으로 적용한 ACNR 전선의 전기적 손실저감효과는 직류에서 8 ~ 9 %를 나타내었으며, 교류에서 19 ~ 20 %를 나타내었다. 직류에 비하여 교류에서 고강도 비자성강을 적용한 ACNR 전선의 손실저감효과가 우수하게 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] E. Dulis, "Age Hardening Austenitic Stainless Steels", Iron St. Inst., 1964.
- [2] Sakamoto, T., Y. Nagayawa, and I. Yamauhi, "Advances in Cryogenic Engineering", edited by R. P. Reed and A. F. Clark, 68.
- [3] R. A. Lula, "Manganese Stainless Steels", Manganese Center, Paris.
- [4] Janik-Czachor, M., E. Lunarska, and Z. Szklarska, Corrosion, 31, p. 394, 1971.
- [5] H. Yoshimura, "Microstructure, magnetic permeability and electric resistivity of high Mn-Cr-Ni steel", iron and steel, Vol. 9, p. 80, 1979.
- [6] T. Kato, "Structural stability and mechanical properties of Fe-Mn-Cr alloys", Transaction ISIJ, Vol. 16, p. 673, 1976.
- [7] H. Berns, "Manufacture and application of high nitrogen steels", ISIJ International, Vol. 36, p. 909, 1996.
- [8] Y. Hosoi, "Phase stability and high-temperature strengths of high manganese-chromium-iron base alloys as reduced radio-activation materials", Journal of Nuclear Materials, 169, Vol. 18, No. 7, p. 257, 1989.

- [9] V. 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.
- [10] 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.