

AMC를 이용한 송전용량 증대용 전선 개발 모델 특성 분석

심순보\* 민병욱\* 위화복\* 박재웅\*\* 윤성종\*\*\*  
 \*한국전력공사 송변전건설처 \*\*한밭대학교 전기공학과 \*\*\*한국스리엠(주)

Charateristics Analysis of development Model  
 for Increased Ampacity Conductor using AMC

Sun-Bo.Sim\* Byeong-Wook.Min\* Hwa-Bok.Wi\* Jae-Ung.Park\*\* Seong-Jong.Yoon\*\*  
 \*KEPCO \*\*Hanbat National University \*\*\*3M Korea

**Abstract** - In case the overload of an existing power line is expected as the consumption of electric power increase, we substitute STACIR/AW which has better thermal characteristic for ACSR. That can approximately double the transmission capacity. In that case the mechanical characteristics of STACIR/AW should meet the design condition of the existing tower. However, the strength of invar in STACIR/AW is lower than that of steel in ACSR, which makes it difficult to keep the safety of a conductor specially in a long span.

In this regard, this paper presents the new conductor model using the AMC and the analysis of its characteristics.

도전을 14%의 알루미늄피복강선을 사용하고 있으며, ACSR계 전선의 구조는 그림1과 같다.

STACIR계 전선의 외부소선은 내열성을 향상시켜 열용량을 증대시키기 위하여 알루미늄에 zirconium을 첨가한 도전을 60%의 초내열 알루미늄선을 사용하여 연속 허용온도를 ACSR 90℃보다 높은 210℃로 증가시키므로써 송전용량을 동일 규격의 ACSR에 비해 약 2배 증가시켰다. 내부소선은 전선온도가 증가할 경우 이도 증가를 억제하기 위해 invar선을 사용하여 선펡창계수는 기존 ACSR에 비해 1/5~1/6 정도로 매우 낮고 탄성계수는 1.6~2.1배로 높였다. STACIR의 내부소선은 아연도금인바선, STACIR/AW의 경우에는 도전을 14%의 알루미늄피복인바선(AI clad invar wire)을 사용하고 있으며, STACIR계 전선의 구조는 그림2와 같다.[2]

1. 서 론

우리 나라의 전력수요는 최근 10년간 매년 10~16% 증가하여 왔으며 전력설비 확충계획의 기본이 되는 최대 전력은 향후 10년간 매년 14~17% 증가할 것으로 예상되고 있다. 이에 대한 발전설비의 확충계획에 따라 발전력을 수송하기 위한 송전선로도 2002년부터 2010년까지 8,524C-km가 추가로 건설될 계획이다.[1]

그러나 송전선로 건설 용지의 확보 지연과 집단민원 발생 등으로 신규 송전선로의 건설이 지연되거나 전력사용량이 급증할 경우 기존 송전선로에 과부하가 발생하게 된다. 이에 대한 과부하 해소 대책으로 기존 전력선인 ACSR을 내열성을 향상시켜 열용량을 증대시킨 STACIR/AW (super thermal resistant aluminum alloy conductors, aluminum clad invar reinforced)로 교체하여 기존 송전선로의 전력수송용량을 약 2배로 증대시키고 있다. 기존 송전선로의 송전용량을 증대시키기 위해서는 기존 철타를 그대로 사용하여야 하므로 STACIR/AW의 기계적 구조는 기존 철타의 설계하중조건을 만족하여야 한다. 그러나 기존 ACSR과 동일한 기계적 구조로 개발된 STACIR/AW의 invar 강심은 기존 ACSR 강심인 아연도금강선에 비해 인장강도가 낮아 전선의 안전율을 확보하기가 곤란하고 높은 전선온도에서 이도 억제효과를 저하시키는 원인이 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 STACIR/AW와 동등한 송전용량을 가지면서 전기적, 기계적 특성과 이도 억제특성을 향상시키고 전선의 인장하중을 증대시킬 수 있도록 AMC (aluminum matrix composite)를 이용한 송전용량 증대용 전선의 특성을 분석하고 개발 모델을 제시하였다.

2. STACIR계 전선의 특성

2.1 전선의 구조

ACSR계 전선은 외부 소선으로 도전을 60%의 경알루미늄선을 사용하며, 장력을 유지하기 위하여 사용되는 내부 소선은 ACSR의 경우 아연도금강선을 사용하고 ACSR/AW의 경우에는 내부식성을 향상시키기 위하여

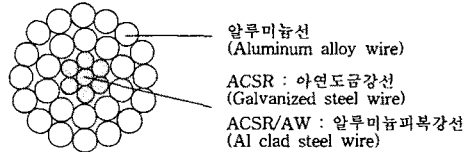


그림 1 ACSR계 전선의 구조  
 Fig. 1 Construction of ACSR and ACSR/AW

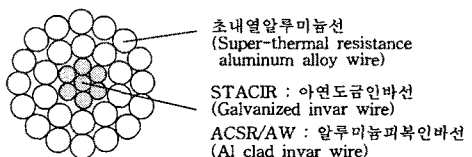


그림 2 STACIR계 전선의 구조  
 Fig. 2 Construction of STACIR and STACIR/AW

2.2 STACIR계 전선의 이도 억제 특성

2개 이상의 다른 금속으로 구성된 이중 합성연선, 즉 ACSR이나 STACIR/AW의 경우 알루미늄선과 강심의 장력 분담은 식(1), (2)와 같다.[3]

$$T_a = \frac{T - E_s A_s (\alpha_s - \alpha_a)(t - t_0)}{E_s A_s + E_a A_a} \cdot E_a A_a \quad (1)$$

$$T_s = \frac{T - E_a A_a (\alpha_a - \alpha_s)(t - t_0)}{E_s A_s + E_a A_a} \cdot E_s A_s \quad (2)$$

여기서,  $T$  전선장력 ( $T = T_a + T_s$ )  
 $t_0, t$  초기조건(제1조건) 및 제2조건의 온도  
 $E_a, E_s$  알루미늄선 및 강심의 탄성계수  
 $\alpha_a, \alpha_s$  알루미늄선 및 강심의 선펡창계수  
 $A_a, A_s$  알루미늄선 및 강심의 단면적

STACIR계 전선의 장력은 Al과 invar 강심이 동시 분담하고 있다가 전선의 온도가 상승함에 따라 선팅창계수가 크고 탄성계수가 작은 Al은 더 늘어나게 되어 장력 분담이 감소하게 되고, 선팅창계수가 작고 탄성계수가 큰 invar선은 적게 늘어나게 되어 장력 분담이 증가되는 상태가 지속되다가 어느 온도로 상승하게 되면 장력이 invar 강심에 전부 걸리게 되며 이 순간의 전선온도를 천이온도라고 한다. 즉, 천이온도  $t_c$ 에서 Al의 분담장력  $T_a$ 는 0이기 때문에  $T_a=0$ 을 식(1)에 대입하면 천이장력  $T_c$ 는 식 (3)과 같이 순전히 invar 강심에 의해서만 전선의 장력이 결정되게 된다.

$$T_c = E_s A_s (\alpha_a - \alpha_s)(t_c - t_0) \quad (3)$$

ACSR의 선팅창계수와 탄성계수는 전선온도에 관계없이 일정한 값을 갖고 있으나 STACIR/AW의 경우에는 선팅창계수와 탄성계수가 천이온도를 기준으로 2개의 값을 갖고 있다. 천이온도 미만에서의 선팅창계수와 탄성계수는 Al과 invar선의 합성 값이고 천이온도 이상에서는 장력을 invar 강심이 전담하게 되므로 순전히 invar선에 의한 선팅창계수와 탄성계수의 값을 갖는다.

따라서 STACIR계 전선의 경우 천이온도 이상에서의 전선의 이도는 순전히 invar 강심의 단면적과 선팅창계수 및 탄성계수에 의해 결정되므로 전선의 온도 상승에 의한 늘어남은 둔화되어 이도 증가를 억제하게 된다.[4][5]

### 3. 송전용량 증대용 신전선의 개발 모델

#### 3.1 내부소선 복합소재

최근에는 가공 송전용 전선의 강심소재를 금속계 복합소재(metal matrix composite)로 대체하고자 하는 연구와 복합소재 전선의 개발이 미국과 일본을 중심으로 활발히 이루어지고 있다. 미국 3M사에서는 그림1과 같이 AMC(aluminum matrix composite)를 이용한 ACCR(aluminum conductor composite reinforced)을 개발하여 전선의 특성을 크게 향상시켜 시험사용 중에 있으며, 일본에서는 고도전성 탄소섬유(carbon fiber)를 개발 완료하고 이를 이용한 ACFR(aluminum conductor carbon fiber reinforced)을 개발하여 시험사용하고 있다.[6][7]

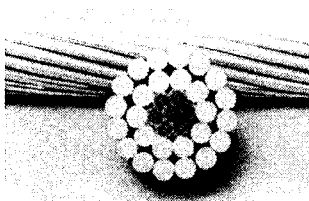


그림 3 복합소재(AMC) 알루미늄연선  
Fig. 3 ACCR (aluminum conductor composite reinforced)

AMC는 ceramic alumina fiber, 즉 순도 99.9% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fiber를 알루미늄 속에 분산시킨 소선이다.

AMC는 알루미늄이나 화이버 특유의 높은 비강도 특성이 높아 소선의 인장강도가 invar선에 비해 약 28% 높고 도전율을 27%까지 얻을 수 있어 저이도 특성 뿐만 아니라 송전용량 증대와 전력손실을 저감시킬 수 있다.[6]

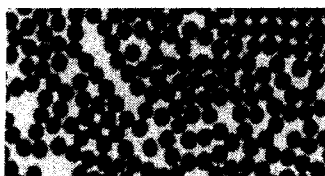


그림 4 알루미늄 기지의 세라믹 화이버  
Fig. 4 Ceramic fibers embedded in aluminum

#### 3.2 AMC를 이용한 신전선의 개발 모델

기존 선로의 송전용량을 증대시키기 위해서는 기존 철탑은 그대로 사용하고 전력선만 교체하여야 하므로 신전선의 개발 모델은 기존 철탑의 설계하중조건을 만족하여야 한다. 따라서 개발 모델 전선의 기계적 구조는 기존 전선인 ACSR과 동일하게 연선을 구성하고 외부소선은 초내열 알루미늄소선, 내부소선은 AMC를 사용한다.

개발 모델 전선인 STACCR(super thermal resistant aluminum alloy conductors composite reinforced)의 전선구조는 그림1과 같으며, 개발 모델 전선의 규격 및 특성은 표1 및 표2와 같다.

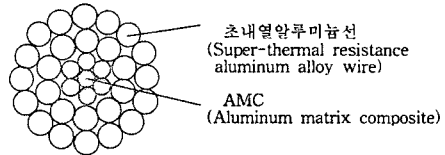


그림 5 STACCR의 전선 구조  
Fig. 5 Construction of STACCR

표 1 STACCR 전선의 개발 규격

Table 1 Development Standards of STACCR

전선규격	연선구성 [No./mm]		전선외경 [mm]	전선중량 [kg/km]	최소인장 하중[kgf]
	STAL	AMC			
240mm	30/3.2	7/3.20	22.40	861.7	11,260
330mm	26/4.0	7/3.10	25.30	1,079	12,070
410mm	26/4.5	7/3.50	28.50	1,375	15,400
480mm	45/3.7	7/2.47	29.61	1,456	11,940

표 2 STACCR의 전선 특성

Table 2 Typical Characteristics of STACCR

전선규격	탄성계수 [kgf/mm <sup>2</sup> ]		선팅창계수 [1/°C × 10 <sup>-6</sup> ]	
	천이온도미만	천이온도이상	천이온도미만	천이온도이상
240mm	8,416	22,100	14.7	6.35
330mm	7,584	22,100	16.2	6.35
410mm	7,588	22,100	16.2	6.35
480mm	6,321	22,100	19.2	6.35

### 4. STACCR 전선의 특성 분석

#### 4.1 전선 특성 비교

STACCR은 현재 송전용량 증대용 전선으로 사용중인 STACIR/AW의 외부 소선과 동일하게 초내열 알루미늄선을 사용하고 내부 소선만 알루미늄피복인바선 대신 AMC를 사용한다. 따라서 전선특성은 내부소선의 특성만 다르며, 알루미늄피복인바선과 AMC의 특성은 표3과 같다.

표 3 알루미늄피복인바선 및 AMC의 특성

Table 3 Characteristics of Al clad invar wire and AMC

구 분	최소인장강도 [kgf/mm <sup>2</sup> ]	도전율 [%]	탄성계수 [kgf/mm <sup>2</sup> ]	선팅창계수 [1/°C × 10 <sup>-6</sup> ]
Invar(AW)	110	14	15,500	3.70
AMC	140.6	27	22,100	6.35

또한 STACCR의 송전용량은 ACSR 대비 204%, STACIR/AW 대비 1.6% 증가하게 되어 기존 전력선을 교체할 경우 송전용량을 약 2배로 증대시킬 수 있다.

## 4.2 개발 모델 전선의 물성

STACIR/AW에 비해 STACCR은 AMC의 비강도 (specific strength)가 높아 전선의 최소인장하중은 약 20% 증가하고 단위중량은 약 15% 감소하게 되며, 천이온도 이상에서 이도를 결정하는 내부 소선의 탄성계수는 약 40%, 선팽창계수는 약 70% 증가하게 된다. 410mm 전선의 특성을 비교하면 표 4와 같다.

표 4 STACIR/AW 및 STACCR의 전선특성 (410mm)

Table 4 Characteristics of STACIR/AW and STACCR (410mm)

구분	최소인장 하중 [kgf]	전선중량 [kg/km]	천이온도 이상	
			탄성계수	선팽창계수
STACIR/AW	12,720	1,625	15,500	3.70
STACCR	15,400	1,375	22,100	6.35

## 4.3 이도특성 분석

STACCR은 천이온도  $t_c$ 에서 Al의 분담장력  $T_a$ 는 0이기 때문에 천이장력  $T_c$ 는 식(3)과 같이 순전히 invar에 의해서만 전선의 장력이 결정된다. 또한 이도곡선식에 의한 전선실장과 온도-장력에 의한 전선실장과의 관계에서 유도한 이도 계산식은 식(4)와 같다.

$$T_c + \left[ \frac{q_1^2 W^2 S^2 E \cdot A}{24 T_1^2} - T_1 + \alpha (t_c - t_1) E \cdot A \right] - \frac{W^2 S^2 \cdot E \cdot A}{24} = 0 \quad (4)$$

여기서,

$t_0, t, t_c$  : 제1조건 및 제2조건 온도, 천이온도  
 $E_a, E_s, E$  : Al과 invar선, 합성전선의 탄성계수  
 $\alpha_a, \alpha_s, \alpha$  : Al과 invar선, 합성전선의 선팽창계수  
 $A_a, A_s, A$  : Al과 invar선, 합성전선의 단면적  
 $q_1$  : 제1조건시 부하계수,  $W$  전선단위중량  
 $T_1$  : 제1조건시 전선장력,  $S$  경간

따라서 천이장력  $T_c$ 와 천이온도  $t_c$ 는 식(3)과 식(4)의 연립방정식으로 구할 수 있다. 또한  $t_0$ 에서의 무풍무설 (No wind, No sleet)시의 가선상태에서 위 식을 제1조건으로 하여 장력  $T_0$ 를 구하면

$$t_1 = t_0, q_1 = 1, T_1 = T_0 \quad (5)$$

식(5)를 식(3)과 식(4)에 대입하여 정리하면

$$\left( \frac{T_c}{T_0} \right)^3 + \left( \frac{T_c}{T_0} \right)^2 \cdot (M-1) \cdot \frac{\alpha_a - \alpha}{\alpha_a} = \frac{\alpha_a - \alpha}{\alpha_a} \cdot M \quad (6)$$

여기서,  $M = \frac{W^2 S^2 \cdot E \cdot A}{24 T_0^3}$  (7)

따라서 식(6)에서  $\frac{T_c}{T_0}$ 을 변수로 하여 3차 방정식으로 장력을 계산할 수 있다.

신전선 개발 모델에 대한 이도 특성을 분석하기 위하여 전선온도는 연속허용온도를 적용하여 ACSR은 90°C, STACIR/AW와 STACCR은 210°C를 적용하였다. 또한 전선풍압은 한반도 내륙지역인 III지역을 적용하였고, 전선의 안전율은 전선지지점의 안전율이 전기설비기술기준의 규정 안전율을 유지할 수 있도록 2.8을 적용하였다. 이와 같은 조건을 적용하여 이도특성을 분석한 결과 연속허용 온도에서 STACIR/AW의 이도 증가율은 기존 전력선인 ACSR 비해 9~12% 증가하나 STACCR은 반대로 2~13% 감소하였다. 전선의 연속허용 온도에서 410mm의 경간별 이도와 ACSR을 기준으로 한 이도 증가율은 그림 6 및 그림 7과 같다. 즉, AMC는 인바선에 비해 탄성계수와 인장강도가 매우 높아 특히 천이온도 이상에서 이도역제 특성을 크게 향상시킬 수 있다.

그림 6 410mm 전선의 경간별 이도

Fig. 6 Sag of 410mm conductors on span

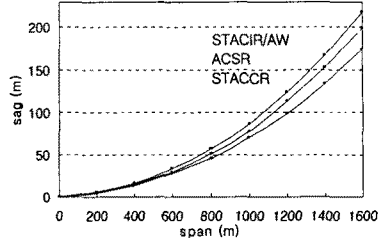
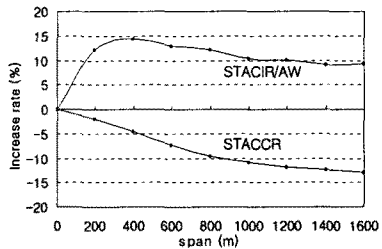


그림 7 경간별 이도 증가율 (410mm)

Fig. 7 Increase rate of sag on span (410mm)



## 5. 결론

현재 송전용량 증대용으로 사용되고 있는 STACIR/AW 전선은 내부소선인 알루미늄피복인바선의 인장강도가 낮아 천이온도 이상에서 전선의 안전율을 확보하기가 곤란하며, 이도 증가율이 높아 장경간에서 사용하기가 곤란하다.

따라서 STACIR/AW의 내부소선인 알루미늄피복인바선을 AMC로 대체한 STACCR을 개발할 경우 AMC의 탄성계수와 비강도가 높아 기존 ACSR에 비해 이도가 감소하며, 장경간에서도 전선의 안전율을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 도전율이 높고 전기저항이 낮아 송전용량이 증대하고 전력손실을 감소시킬 수 있다.

따라서 현재까지는 송전용량 증대용 전선의 이도역제 특성을 향상시키기 위하여 인바선의 인장강도를 높이는 방안이 연구되어 왔으나 앞으로는 복합소재 전선 개발 방안에 대하여 연구가 수행되어야 할 것이다.

## (참고 문헌)

- [1] 2000년 장기송전선설비계획, 한국전력공사, pp.6, pp.35~36, 2001.3
- [2] 민병욱, 박재용, 강희우, "이도역제용 송전용량증대전선의 최적 설계", 가공송전선연구회 논문 제1집, pp.26-31, 2000
- [3] 後藤讓, 送電線路の架線計算, 送電線建設技術研究会 北海道支部, pp.30~35, 1976.7.
- [4] Susumu Sasaki, Toshiro Takebe, Kenji Miyazaki, Minoru Yokota, Ken-ichi Sato, Shigeaki Yoshida, Ichiro Matsubara, "ZTACIR-New Extra-Heat Resistant Galvanized Invar Reinforced Aluminium Alloy Conductor", Sumitomo Electric Technical Review, Number 24, pp.117~123, 1985.1.
- [5] Masaaki Ishikawa, Hideto Ito, "Practical Application of Extremely Low-Sag Invar Reinforced Increased-Capacity Extra-Heat-Resistant Aluminum Alloy Conductor", Sumitomo Electric Technical Review, Number 28, pp.162~170, 1989.1.
- [6] 3M Composite Conductor, 3M, pp.3~4, 2000
- [7] Yoshihiro Furuoka, "The Challenge on the Development of Conductors in Kansai Electric Power Co" The First International Symposium on Advanced Conductors, pp.72~73, 2002.5.