

전선심선온도의 동적변화특성에 대한 모의측정방법

리철준, 임성일

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《첨단과학기술분야에서 세계적경쟁력을 가진 기술들을 개발하기 위한 투쟁을 힘있게 벌려야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 39페이지)

전선의 심선온도가 사용한 절연재료의 허용온도보다 4°C 증가하면 전선의 수명이 절반으로 감소한다. 그러므로 전선의 수명결정에서 심선온도를 정확히 측정하는것은 매우 중요하다.

일반적으로 전선의 심선온도는 열안정상태에서의 열등가회로모형에 기초하여 해석적인 계산방법으로 결정한다. 그러나 전선의 동작조건이 급격히 변하는 경우 정적해석으로는 전선의 심선온도를 정확히 결정할수 없기때문에 지난 시기 유한요소법에 기초한 수값해석방법으로 동적모의를 진행하였으나 재료특성지표들의 동적변화특성을 고려하지 못한 것으로 하여 모의결과의 정확성을 담보하지 못하였다.[1-3]

론문에서는 전선시편의 심선온도에 대한 측정결과와 ANSYS에 의한 모의결과를 대비분석하여 심선온도의 변화특성을 절연 및 보호재료의 열전도도변화특성으로 모의함으로써 수값계산의 정확성을 높일수 있는 방법을 제기하였다.

1. 시편측정실험에 의한 심선온도의 동적변화특성분석

시편으로는 심선반경 r_1 이 8.74mm, 절연층의 반경 r_2 가 10.94mm, 보호층의 반경 r_3 이 13.44mm, 길이가 8m인 에틸렌프로필렌절연전선을 사용하였다. 측정의 정확도를 보장하기

위해 오차범위가 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 분해능이 0.001°C 인 온도수감기들을 심선과 절연층의 내부와 보호층의 표면에 설치하였다.(그림 1)

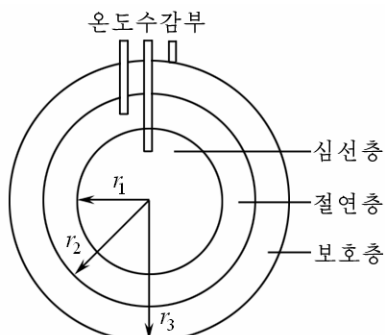


그림 1. 전선시편모형에서
온도수감부의 배치상태

전선의 길이방향에서의 열전도특성을 고려하기 위해 전선시편을 수평대우에 설치하고 3개의 측정점을 선택하였다.(그림 2) 그림 2에서 직선부분의 길이는 3m이고 곡선부분의 길이는 2m이며 측정점 2와 3사이의 거리는 1.5m, 측정점 1과 3사이의 거리는 2m이다. 전원장치는 최대 300A까지의 전류를 흘려보낼수 있는 직류전원이다.

정적상태해석에 의해 결정한 심선반경이 8.74mm인 에틸렌프로필렌절연전선의 최대부하전류는 400A이고 실제 작업전류는 250A이므로 부하전류의 변화에 따르는 심선온도의 변화특성을 분석하기 위해 실험에서는 측정전류를 50, 100, 140, 200A로 선택하고 계단식으로 전류를 증가시켰다. 이때 심선온도의 상승속도를 1°C/h 이하로 보장하였다.

전류의 증가에 따르는 전선온도의 동적변화특성은 그림 3과 같다. 그림 3에서 보는바와 같이 전류를 계단식으로 증가시킬 때 심선온도와 전선표면온도의 변화경향성은 같으며 부하전류의 증가에 따르는 온도의 변화곡선은 로그함수에 따른다는것을 알수 있다.

또한 50A의 전류가 흐를 때 심선온도가 안정상태로 되는데 5.4h이 걸리며 전선표면의 온도가 안정상태로 되는데는 더 많은 시간이 걸린다는것을 알수 있다.

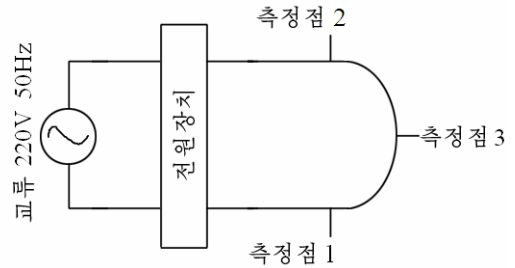


그림 2. 측정점의 위치

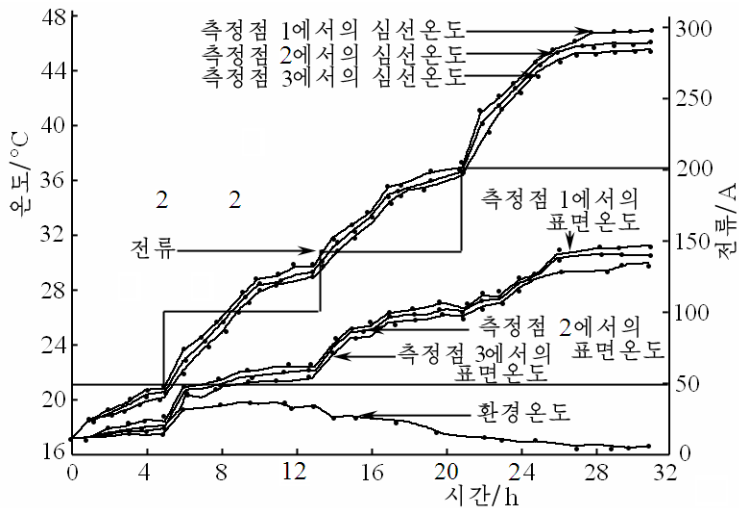


그림 3. 전류의 증가에 따르는 전선온도의 동적변화특성

측정점의 위치가 측정오차에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 3의 측정결과를 이용하여 측정점들사이의 심선온도차에 대한 절대값을 도표로 작성하면 그림 4와 같다.

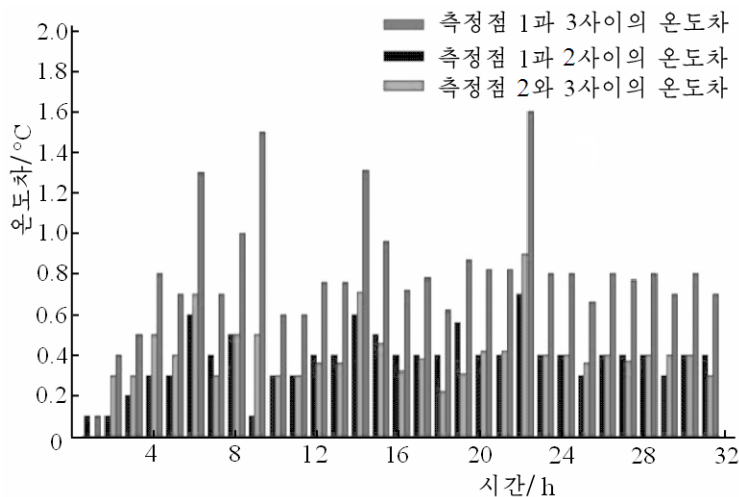


그림 4. 측정점들사이의 심선온도차에 대한 절대값도표

그림 4에서 보는바와 같이 측정점들사이의 심선온도차는 매우 불규칙적으로 변하는데 그것은 전선의 끝부분에서 접촉저항에 의해 중간부분보다 많은 열이 발생하며 그중 일부가 심선으로 전달되기때문이다. 따라서 접촉저항이 측정결과에 미치는 영향을 최대한 줄이기 위해서는 측정점의 위치를 전선의 중간위치로 설정하여야 한다.

2. 모의계산에 의한 심선온도의 동적변화특성분석

일반적으로 수값모의방법에서는 전선의 길이와 재료특성정수변화 등 심선온도의 동적변화특성에 영향을 미치는 실제적인 인자들을 무시한것으로 하여 적지 않은 오차가 생긴다.

시편측정결과와 수값계산결과를 비교분석하기 위해 먼저 열전도도가 변하지 않는 정상상태에 대한 온도마당해석을 진행하였다. 해석에 리용한 전선재료특성값은 표 1과 같다.

표 1. 전선재료특성값

구성요소	구성재료	열전도도/ ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	비열/ ($J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$)	밀도/ ($kg \cdot m^{-3}$)	비저항/ ($\Omega \cdot m$)
심선	동	386.4	385	8 890	$1.7241 \cdot 10^{-8}$
절연층	EPR	0.6	221.2	1 150	—
보호층	네오프렌	0.4	190	1 240	—

부하전류의 변화에 따르는 심선온도의 변화에 대한 계산결과는 그림 5와 같다. 그림 5에서 알수 있는것처럼 모의결과와 실제측정값사이의 오차는 최대값이 $20.2^{\circ}C$ 로서 대단히 크다. 그 원인은 전선의 재료정수들이 전류의 증가에 따라 변화되면서 보다 많은 열을 방출하는데 있다. 절연층과 보호층의 열전도도를 일정하게 유지하면 전선도체와 주위환경사이의 열교환이 실제조건보다 약해져 심선의 온도가 더 높아진다.

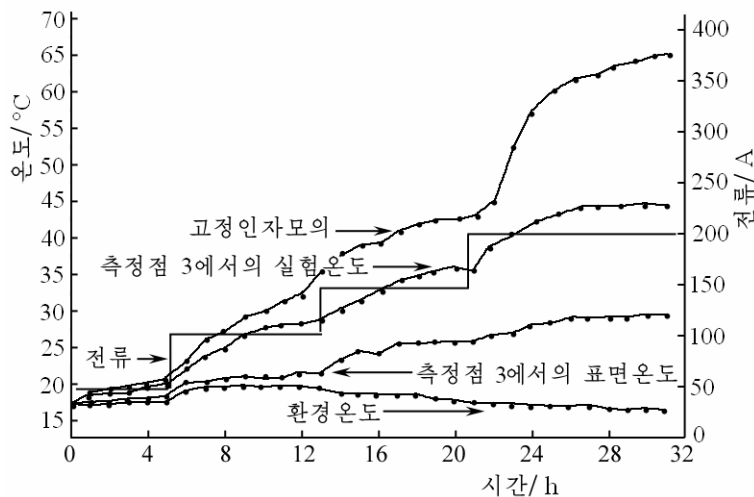


그림 5. 심선온도의 변화에 대한 계산결과

열전도도가 심선온도에 주는 영향분석

열전도도가 심선온도에 주는 영향을 알아내기 위하여 열전도도를 변화시키면서(그림 6) 모의를 진행하였다. 팔호안에 있는 수들은 절연층과 보호층의 열전도도를 의미한다. 절연층과 보호층의 열전도도중 하나를 변화시키면서 해석을 진행하였는데 변동률은 각각 20, 40%이다. 그림 6에서 보여준것과 같이 보호층의 열전도도는 절연층의 열전도도보다 심선온도에 더 큰 영향을 주며 그 영향정도는 부하전류의 크기에 비례한다.

그러므로 모의인자 즉 열전도도를 심선온도의 실험적측정값에 따라 수정해야 한다. 모의결과를 실험적측정값과 일치시키기 위한 열전도도의 변화방법은 두가지로 가를수 있다. 그 하나는 절연층과 보호층의 열전도도중 하나를 고정시키고 다른것을 변화시키는 방법이며 다른 하나는 두가지 인자를 동시에 다 변화시키는 방법이다. 열전도도변화방식과 그에 따르는 모의결과는 표 2와 같다.

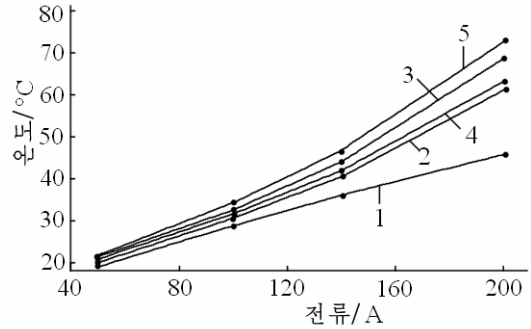


그림 6. 각이한 열전도도에서 심선의 온도
1-(0.6, 0.4), 2-(0.48, 0.4), 3-(0.6, 0.32),
4-(0.36, 0.4), 5-(0.6, 0.24)

표 2. 열전도도변화방식과 그에 따르는 모의결과

전류/A	심선온도/°C	하나의 열전도도만을		2개의 열전도도를	
		변화시킬 때 ($W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$)		동시에 변화시킬 때 ($W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$)	
		보호층	절연층	보호층	절연층
50	19.7	0.6	0.4	0.6	0.4
100	28.8	0.77	0.4	0.62	0.41
		0.6	0.48		
140	35.7	1.06	0.4	0.7	0.51
		0.6	0.6		
200	45.5	1.9	0.4	0.77	0.6
		0.6	0.79		

표 2의 모의자료를 리용하여 진행한 유한요소모형의 과도과정해석결과를 그림 7에 보여주었다. 여러가지 인자들에 대한 심선온도를 측정결과와 대비해보면 모두가 같은 변화경향성을 가지며 고정된 인자값을 리용한 모의결과에 비하여 모두 작다. 그림 7로부터 알수 있는것처럼 고정된 열전도도값을 리용할 때에 비하여 열전도도를 변화시킨 후의 모의결과는 실험값에 대단히 가깝게 접근하였다.

열전도도변화에 기초한 심선온도의 동적모의측정

열전도도와 온도사이의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \alpha T)$$

여기서 λ_0 은 $0^\circ C$ 에서의 열전도도 ($W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$), α 는 상수, T 는 절연층과 보호층의 온도($^\circ C$)이다.

표 2의 모의자료에 의하여 얻어진 절연층과 보호층에서의 온도와 열전도도사이의 관

계는 그림 8과 같다.

전선에 250A의 부하전류를 가하여 모의결과와 실제실험결과를 대비하였다. 이때 절연층과 보호층의 온도에 해당하는 열전도도의 이론적값이 얻어진다.(그림 8) 이 열전도도값을 적용한 전선모형에서 모의 및 실험에 의한 심선온도곡선은 그림 9와 같다.

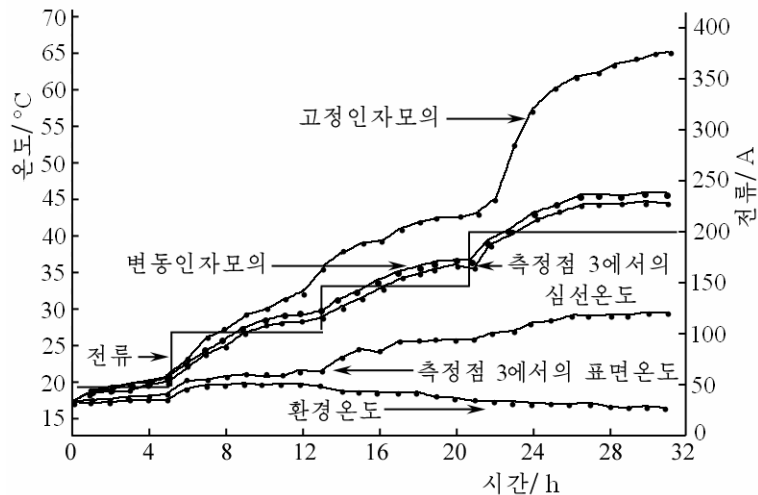


그림 7. 유한요소모형의 파도파정해석결과

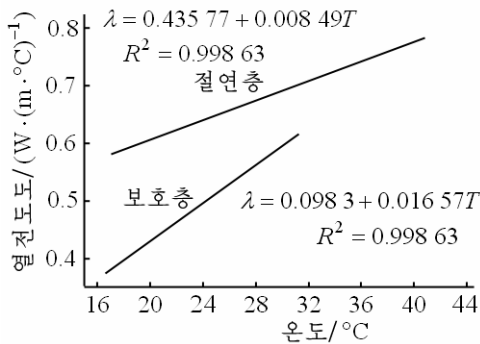


그림 8. 온도와 열전도도사이의 관계

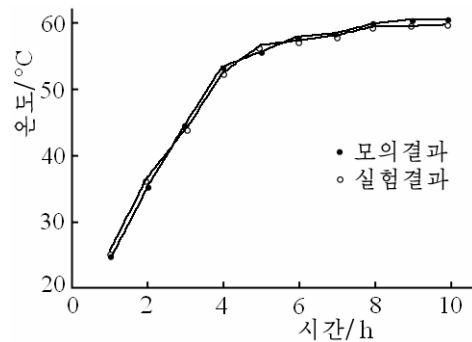


그림 9. 모의 및 실험에 의한 심선온도곡선

그림 9에서 보는것처럼 모의결과와 실험결과는 잘 일치한다.

맺는 말

1) 실제심선온도와 열전도도사이의 관계를 고려하여 열전도도변화에 기초한 심선온도의 동적측정방법을 제기함으로써 모의정확도를 높였다.

2) 보호층의 열전도도가 절연층보다 심선온도에 보다 큰 영향을 준다는것을 확정하였다.

참 고 문 헌

- [1] Z. Wang et al.; Residual Life Assessment of Butyl Rubber Insulated Cables in Shipboard, Proc. CSEE, 32, 34, 189, 2012.
- [2] Electric Cables-Calculation of the Current Rating-Part 1-1: Current Rating Equations and Calculation of Losses-General, IEC Standard 60287-1-1, 1994.
- [3] Y. Dayong et al.; The Research of Infrared Inspection on Cable of Ship, Mech. Elect. Eng. Technol., 2, 42, 34, 2013.

주제107(2018)년 12월 5일 원고접수

A Method of the Numerical Analysis on the Dynamic Change of the Core Temperature in Electric Wire

Ri Chol Jun, Im Song Il

We suggested the method of the numerical analysis on the dynamic change of the core temperature in EPR insulated electric wire based on the variation of thermal conductivity.

Key words: core temperature, dynamic simulation, numerical analysis