

케이블 삼상단락 실증시험을 통한 전자기력 영향 검토

홍동석*, 김해준*, 박성민*, 장우석*, 박흥석**, 장태인**, 강지원**
 대한전선(주)*, 한전전력연구원**

The Study of Electromagnetic Force by Three Phase Short-Circuit Test of Cable

Dong-Suk Hong*, Hae-Jun Kim*, Sung-Min Park*, Woo-Suk Chang*, Heong-Suk Park**, Tae-In Jang**, Ji-Won Kang**
 Taihan Electric Wire Co., Ltd*, Korea Electric Power Research Institute**

Abstract - This paper handles with effect of electromagnetic force on the cables by fault current accompanied by accident of underground transmission cable. Even though underground transmission cable is an essential transmission method to supply stable power for downtown and population center, interaction of electromagnetic force from fault current is very large comparing to overhead transmission line due to restricted installation space such as tunnel, etc. and close consideration is required for it. This paper describes the effect of electromagnetic force through results of three phase short-circuit test and electromagnetic force analysis using theoretical calculations and electrical evaluation test after three phase short-circuit test, which will be utilized as basic materials for improvement and development of cleat, hanger, etc. to reduce and release effect of electromagnetic force in the future.

1. 서 론

최근 도심지의 인구집중현상과 함께 전력수요의 밀도가 급격히 높아짐에 따라 송전선로 건설의 필요성이 증대되고 있으나 도심지 통과 및 환경적 요인 등 인구 밀집지역 내의 가공송전선로가 갖고 있는 한계 때문에 지중송전선로의 건설이 증대되고 있다. 이러한 추세는 앞으로도 서울 등 대도시를 중심으로 계속 확산될 전망이며, 지중 케이블 시스템의 확장도 더불어 노후 되고 복잡한 기설 케이블의 고장발생 우려를 증가시키고 있다. 이러한 지중케이블 고장은 대부분 케이블의 지락 및 단락과 같은 현상을 동반하며, 이러한 경우 케이블에 대전류가 흐르게 된다. 최근에는 지중케이블 계통이 복잡 및 복잡화되어 전체 고장전류 크기가 커지는 경향이 있어 사고발생시 고장전류에 의한 케이블 악영향이 더욱 우려가 되고 있다.

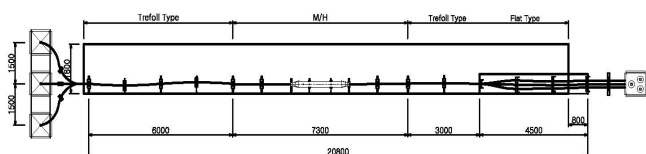
특히, 단락고장의 경우 고장전류의 크기도 크지만 고장전류 발생에 따른 전자기력을 동반하게 되어 케이블 및 접속함, 각종 금구류에 전기적, 기계적인 스트레스를 야기할 수 있으며, 심각한 경우 2차사고로 파급될 수도 있다[1,2]. 이러한 전자기력은 고장전류의 크기 및 케이블 포설환경에 따라 다양하게 변화하지만, 현재 지중케이블 포설 및 시공을 위한 단계에서 전자기력에 대한 구체적인 검토 없이 기존의 설계방식을 답습하여 설계하는 경우가 대부분이며, 각각의 포설환경 조건에 맞는 검토가 진행되지 못하고 일괄적인 기준을 적용하여 시공이 이루어지고 있는 현실이다.

따라서, 본 논문에서는 케이블 삼상단락 실증시험을 시행하였고, 이론적인 계산식을 이용한 전자기력 해석과 실증시험 결과, 그리고 시험 후 케이블 해체 결과 및 전기적 평가를 통해 지중케이블 삼상단락 고장 시 전자기력 발생에 따른 영향을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 케이블 삼상단락 실증시험 조건

케이블 선종은 154kV OF 1200mm² 케이블을 적용하였으며 <그림 1>에 실증시험선로의 구성개요도를 나타내었다.



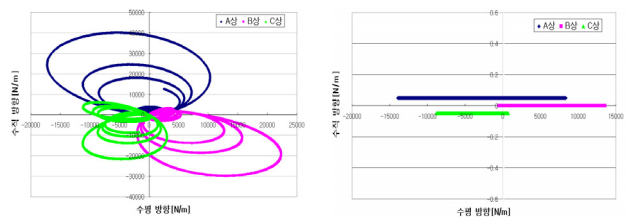
<그림 1> 케이블 삼상단락 실증시험 선로 개요도

<그림 1>에서와 같이 선로 구성은 최대한 실제 포설조건에 맞춰 양쪽 단말 부분은 삼상일괄형 EBG와 에폭시를 이용한 EBA 둘 다를 고

려하였고, 케이블 본선 구간은 총 20[m]의 모의 전력구 안에 절연접속함을 기준으로 에폭시 단말 측은 삼각배열 수평스네이크 한피치, EBG 측은 삼각배열 수평스네이크 반피치, 수평배열 수평스네이크 반피치로 설치를 하였다. 한편, 단락전류 인가는 EBG측에서 3상 common을 잡고 EBA에 단락발전기를 통하여 삼상 단락전류를 인가하는 방식으로 시험이 진행되어졌다. 단락전류 크기 및 투입 시간은 한전의 전압등급별 차단기 용량 및 차단시간 규격을 고려하여 50[kA_{rms}], A상에 125[kA_{Peak}], 4Cycle로 정하였으나 실제적으로 투입된 단락전류는 A상에 151 [kA_{Peak}]가 인가되었다.

2.2 시험전류 단락전자력 계산

본 절에서는 실증시험의 전류조건에 따른 단락전자력을 계산하였으며, <그림 2>에 시험 시의 포설구간별 단락전자력 제적을 나타내었다.



(a) 삼각배열 구간
(b) 수평배열 구간
<그림 2> 케이블 삼상단락 시의 포설구간별 전자기력 제적

<그림 2>에서 알 수 있듯이 삼각배열의 경우 최대 단락전류가 인가된 A상에서 40,644[N/m]의 가장 큰 전자기력이 발생하였으며 이때 B상 및 C상의 최대 전자기력은 각각 33,655[N/m], 22,349[N/m]을 나타내었다. 수평배열의 경우도 최대 단락전류가 인가된 A상에서 -13,947[N/m]의 가장 큰 전자기력이 발생하였고 B상 및 C상의 최대 전자기력은 각각 13,575[N/m], -8829[N/m]를 나타내었다.

2.3 실증시험 결과

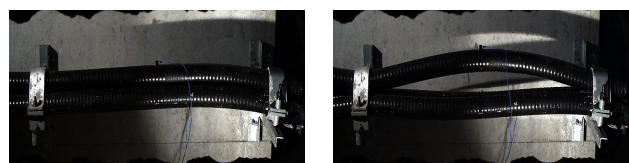
2.3.1 삼각배열 구간의 결과

<그림 3>에 삼각배열구간의 시험결과 사진을 나타내었다.



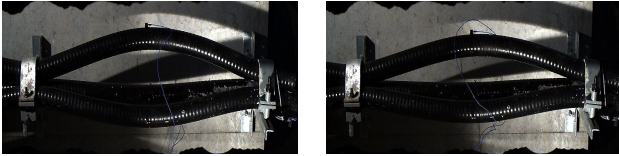
<그림 3> 삼각배열구간 시험결과 사진

케이블 변형이 가장 많이 발생한 구간의 변위량은 A-B사이가 197[mm]로 가장 큰 변형이 발생하였으며 B-C는 75[mm], C-A는 127[mm]의 변형이 발생하였다. 한편 삼각배열 구간에 고속카메라를 설치하였고 <그림 4>에 시간별 고속카메라 영상을 나타내었다.



(a) 시험 전

(b) 1/2 cycle 후



(c) 3/2 cycle 후 (d) 시험 종료 후
 <그림 4> 삼각배열 구간의 시간별 고속카메라 영상

<그림 4>에서 알 수 있듯이 최대 단락전류가 나타나는 1/2Cycle 지점이 아닌 대략적으로 3/2Cycle에서 최대 변위가 발생하고 이후에는 소성 변형영역 상태에서 작게 진동하며 최종변위지점에서 종료되었다.

케이블 행거는 고속카메라 영상을 통하여 확인한 결과 전자력 발생에 따른 케이블의 거동에 따라 상하좌우로 움직였지만 시험 종료 후 소성 변형은 발생하지 않았으며, 클리트의 경우 시험 전에 클리트 양쪽에 마킹을 하고, 시험 종료 후 마킹의 위치를 확인하여 케이블 축 방향으로의 움직임을 파악한 결과 케이블 축 방향으로의 움직임도 발견되지 않아 클리트의 파지력 또한 양호한 것으로 사료된다.

2.3.2 접속함 및 오프셋 구간의 실증시험 결과

<그림 5>에 접속함 및 오프셋 구간의 시험결과 사진을 나타내었다.



(a) 접속함 구간 (b) 오프셋 구간
 <그림 5> 케이블 삼상단락 시의 포설구간별 전자력 궤적

<그림 5>에서 알 수 있듯이 접속함 및 오프셋 구간은 A상 부분 접속함 및 케이블이 위쪽 방향으로의 이격현상이 발생되었는데 이는 전자력이 수직방향으로 발생하여 생긴 현상으로 사료된다.

2.3.3 수평배열의 실증시험 결과

<그림 6>과 <표 1>에 수평배열의 시험 전/후 결과 사진 및 이동슬라이더의 시험 전/후 이동량 측정결과를 나타내었다.



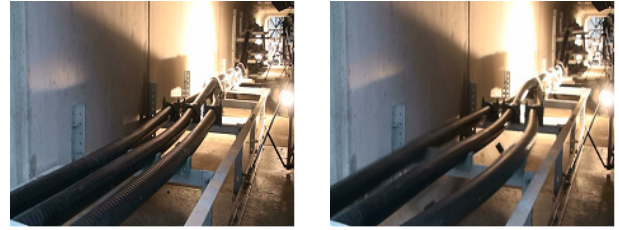
(a) 시험 전 (b) 시험 중
 <그림 6> 수평배열 구간 시험결과 사진

<그림 6>에서 알 수 있듯이 단상 이동슬라이더 부분에 많은 변형이 발생하였으며, B상 단상 슬라이더가 기존 위치에서 탈락되어 있는 모습을 확인할 수 있다.

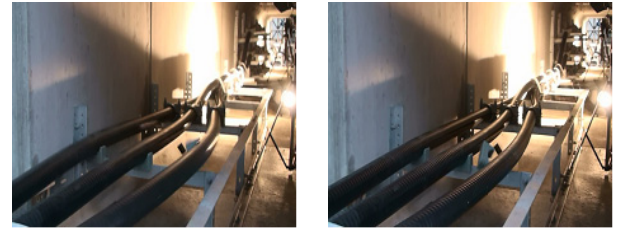
<표 1> 수평배열 구간 시험 전/후 각 상별 벽-클리트 중심간 거리

No.	C상[mm]		A상[mm]		B상[mm]	
	시험 전	시험 후	시험 전	시험 후	시험 전	시험 후
1(고정)	260	249	470	465	685	698
2(이동)	360	190	570	523	780	852
3(고정)	255	230	470	450	690	680

또한 <표 1>의 최종 변위 측정 결과에서도 알 수 있듯이 수평배열 구간 모든 단상 고정 클리트 및 단상 이동슬라이더 부분이 시험 전에 비하여 이동이 되어 있었으며, C상과 A상은 벽쪽으로 이동이 발생하였고 B상은 벽 반대쪽으로 이동이 발생하였다. 이러한 결과는 2.2절에서 계산된 수평배열 구간의 전자력 궤적과 거의 일치하는 경향을 나타내었다. 한편, <그림 7>에서 나타난 캠코더 영상으로도 알 수 있듯이 삼상 단락전류 인가로 인한 전자력 발생 시 C상과 A상은 벽쪽으로 이동이 발생하였고 B상은 벽 반대쪽으로 이동이 발생함을 알 수 있으며, B상의 단상 이동슬라이더가 탈락되는 모습을 확인할 수 있다.



(a) 시험 전 (b) 시험 중-1



(c) 시험 중-2 (d) 시험 종료 후
 <그림 7> 삼각배열 구간의 시간별 고속카메라 영상

2.4 케이블 시료의 전기적 특성평가

본 절에서는 케이블 삼상단락 실증시험 후 시험에 적용되었던 케이블 시료의 전기적 안전성을 확인하고자 한국전력 구매시방서에 따라 뇌 충격 내전압 시험과 상용주파 장시간 내전압 시험을 실시하였으며 <그림 8>에 시험선로 사진을 나타내었다.



(a) 뇌 충격 내전압 시험선로 (b) 상용주파내전압 시험선로
 <그림 8> 전기적 특성평가 시험선로

뇌 충격 내전압 시험은 도체와 알루미늄 시스 간에 900kV 뇌 충격 전압을 3회 인가하여 견디는지 여부를 조사하고, 상용주파 장시간 내전압 시험은 도체와 알루미늄 시스 간에 300kV의 교류전압을 6시간 인가하여 견디는지 여부를 조사한다. 시험결과 모든 시료에 대하여 B/D 발생 없이 양호하였다. 한편 EBG 단말 및 접속함의 해체 조사 결과 단말 부분에서는 벨마우스의 이동 등 의심할 만한 현상이 발견되지 않았으며, 절연접속함도 절연지의 겹과 씌힌 부분 및 도체 슬리브의 회전현상도 발견되지 않았다.

3. 결 론

본 논문에서는 케이블 삼상단락 실증시험을 통해 지중케이블 삼상단락 고장 시 전자력 발생에 따른 영향을 검토하였다. 검토 결과 삼각배열의 경우 최대 197[mm]의 변형이 발생하였으나 케이블 행거 및 클리트는 변형이 발생하지 않았으며, 클리트 파지력 또한 양호한 것으로 확인되었다. 접속함 및 오프셋의 경우 수직방향으로의 이격이 발생했으며, 수평배열의 경우는 단상 이동슬라이더 부분에 많은 변형이 발생하였고 B상 단상 슬라이더가 기존 위치에서 탈락되어 있는 모습을 확인할 수 있었다. 한편 케이블 시료의 해체 검사 및 전기적 특성평가 결과 양호한 결과를 나타내었으나, 보다 정밀한 검사가 시행되어야 할 것으로 사료된다. 본 논문의 해석결과는 향후 전자력 영향 감소 및 해소를 위한 기본 자료로 활용할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] F. Donazzi, R. Gaspari, and et. al., "Research on the Performance of 400kV Extruded Cable System under Short Circuit Conditions", CIGRE 1996: 21-205
 [2] Charles A Damell, "Cable Cleat-A Global Technique to Protect Three-Phase Single Conductor Cables during Short-Circuits" IEEE Transmission on Power Delivery, pp.143-150, 2004
 [3] "Cable Cleats for Electrical Installations", CENELEC, European Standard 50368, November 2001