

## 송전용 자기재 애자의 시멘트 변위 응력에 관한 시뮬레이션

한세원, 조한구, 우병철 \*정길조, \*이동일, \*최인혁  
한국전기연구원, \*전력연구원

### A Simulation on the Displacement Stress of Cement in Porcelain Insulators for Transmission Line

S. W. Han, H. G. Cho, \*B. C. Woo, \*G. C. Jung, \*D. I. Lee, \*I. H. Choi  
KERI, \*KEPRI

#### Abstract

The ageing cause in many porcelain suspension insulators which occur on transmission and distribution line with dead-end stings is mechanical stress in interface between porcelain and cement materials. It is known that the principal mechanical stress which give electrical failure is the results of the displacement is due to cement growth. We studied the effect of cement displacement resulting environmental ageing parameters on porcelain insulator mechanical properties for transmission line by simulation (ANSYS/NASTRAN program) and test methods. These simulation analysis and experimental results show that cement volume growth affects severely to be mechanical failure ageing.

**Key Words** : porcelain insulator, transmission line, cement displacement, simulation

#### 1. 서론

전력용 애자는 기계적 강도와 전기적 내구성의 2가지 기능을 가지도록 설계된다. 현재 세계적으로 가장 많이 사용하는 송전용 애자 종류는 자기재 애자(porcelain insulator)로 유리 애자와 고분자 애자보다 훨씬 많다. 국내의 경우 거의 전부가 자기재 애자를 사용되고 있는 실정이다.

사용 환경상 모든 절연물은 열화가 불가피하다. 자기재 애자는 구성상 절연을 담당하는 자기부, 접합을 위한 시멘트부 및 기계적 강도를 유지하는 금구류부의 조합으로 이루어져있기 때문에 사용 환경에서 냉열 변화를 받는 경우 애자 각부의 열팽창 계수 차이로 인한 응력이 자기부 계면에 작용하게 된다. 따라서 이러한 응력이 자기 절연물의 파단에 이르지 않도록 형상 설계와 완충 설계 기술이 개발되어 있다.

자기와 금구류를 접합하는 시멘트는 양생 종료

후에 건조 경화된다. 이때 시멘트는 수축하게 되는데 K. Morita 외 연구자의 실험 결과에 의하면 약 6개월 이후에 0.08% 수축 변위가 발생하면서 경화되는 것으로 알려져 있다. 이 과정에서 시멘트 및 자기부 접합 계면에 부분적인 균열을 수반한다. 따라서 외기 중에 노출된 시멘트는 이 후 수분을 흡수하여 체적과 경도의 증가를 가져온다. 즉 시멘트 성장(cement growth)으로 불리우는 팽창 응력이 자기부와 금구류에 가해지는 것이다. 이와 같은 시멘트의 경년 팽창은 핀 애자나 현수 애자의 주 열화 요인으로 주목하여 연구가 진행되어 왔다. 일본, 캐나다 등에서는 자기 제품 물성에 맞는 조건으로 시멘트 수축, 팽창이 송전용 애자에 미치는 영향과 대책에 관해 상당한 연구가 진행되어 왔으나, 국내에서는 아직 이러한 연구 실적이 부진하고 특히 다양한 송전용 애자 사용 환경을 고려한 국산 애자의 응력 특성을 시뮬레이션하는 연구는 거

의 없었다. 따라서 본 연구에서는 송전용 국산 자기재 애자(36,000lb)를 대상으로 실제 기계적, 열적 환경을 고려한 시멘트의 수축, 팽창 변위에 따른 계면의 응력 거동을 시뮬레이션하여 시멘트 변위가 송전용 애자 각 부위에 미치는 응력 특성을 정량적으로 분석하고, 가능한 억제 대책을 간구하고자 한다.

## 2. 송전용 현수애자 사고

현수애자가 송전 시스템에 미치는 가장 치명적인 고장은 애자런이 파손, 분리되어 전선을 지상으로 낙하시키는 것이다. 현수애자의 구조는 그림 1 과와 같이 절연 자기, 캡/핀 금구류와 금구류와 자기를 결합하는 시멘트로 구성되어 있다.

시멘트는 품질이 적절하지 않으면 장시간 사용하는 경우 큰 수축이 발생한다. 여기에 금구, 자기 및 시멘트의 열팽창계수차도 영향을 미쳐 자기에 응력 집중이 발생하여 크랙(crack)이 발생하는 경우가 있다. 일반적으로 현수애자는 열화가 발생하여도 그 인장파괴하중은 일반적으로 과전파괴하중 보증치의 70~80% 정도를 유지하는 것으로 알려져 있다. 태풍이나 겨울철 과다 착빙 시, 애자런에 작용하는 이상 하중은 보통 과전파괴하중 보증치의 60%정도이기 때문에 애자 자기두부에 균열이 발생하여도 전선을 기계적으로 지지하는 기능을 잃지는 않는다.

표 1. 외국 현수 애자런 분리사고

송전선로	제조국가 (보증강도)	애자 열화 상태
Ontario Hydro/캐나다 ■115kV 송전선 ■500kV 송전선	캐나다 15 kIP 25/36kIP	수회 분리사고 발생. 철거 애자 전체가 보증강도 이하에서 파괴
QEC/호주 ■132/275kV 송전선	중국 70, 125kN	5회 분리사고 발생. 철거 애자의 28% 균열발생
Hydro Quebec/캐나다 ■69~735kV 송전선	캐나다 15~36kIP	단선사고 20건 발생

그러나 자연 뇌(lightning)의 방전 등에 의해 열화된 애자가 개재된 애자런에 플래시오버(flashover)가 발생하면 속류가 열화 애자의 두부를 경유하는 경우가 있다. 이때 두부에 작용하는 큰 아크 에너지에 의해 캡, 핀 금구의 분리에 따른 폭발이 발생하여 애자의 기계적 지지 기능을 상실

하게 된다. 이를 방지하기 위해 송전선로의 경우 아크혼(arc horn)이나 가공지선 설치 등의 대책이 필요하다. 이러한 대책이 미흡한 경우 발생한 외국 애자런 분리사고 예가 일부 알려져 있다(표 1).

## 3. 송전용 현수애자 해석 모델링

### 가. 해석 모델 형상

그림 1은 시뮬레이션 해석 및 실험 대상인 국산 송전용 애자의 형상과 구조를 나타낸 것이다.

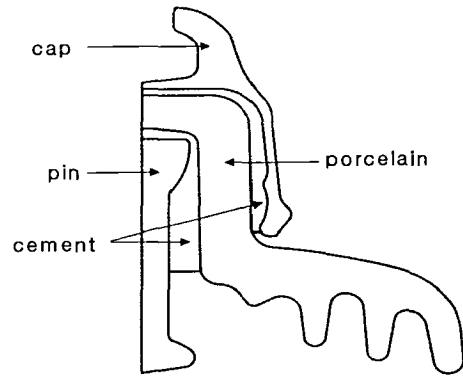


그림 1. 송전용 자기재 애자 형상과 구조

애자의 응력 및 열 해석에 사용된 애자 각 부위의 기초 물성은 표 2와 같다.

표 2. 송전용 애자 각부위 기초물성

특성치 재료	Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Thermal Expansion(10 <sup>-6</sup> /K)	Poisson's ratio
Pin	14,060	12	0.25
Porcelain	6,890	7	0.2
Cement	2,250	10	0.22

### 나. 경계조건

- 인장강도 : 8250kg
- 해석시 인장력 적용 : 5000, 10000, 17000kg
- 축대칭 2차원 해석(결과는 3차원 해석)

### 다. 모델링 조건

- 2차원 축대칭 문제로 ANSYS 6.0 plane42 element 방정식 적용
- element : 2800 node
- 구속조건 아래쪽 면 : 수직변위 = 0
- 위쪽면 압력부여 : 부과하중/단면적 = 압력  
 $5000/\pi \times 17.1^2 = 1.535 \text{ kg/mm}^2$

(5000:1.535, 10000:3.07, 17000:5.219)

- 내부 Cement에 가해지는 압력으로 cement의 열팽창으로 변위 조정(변위가 0.1%가 얻어지기 위해서 20K에서 120K로 조정)

#### 4. 결과 및 고찰

##### 가. 현수 애자의 파괴 거동

자기와 같은 脆性재료의 파괴현상은 자기 중에 내재하는 미세적 결함에 응력집중이 발생하면 그곳으로부터 파괴가 시작 되는 것으로 알려져 있다. 자기의 미세구조 조직은 그림 2와 같다. 미세적 결함은 석영 주위에서 관찰되는 크랙과 알루미나 결정상의 편석(aggregation) 등이 주요인이다.



그림 2. 송전용 현수 애자의 미세조직 사진 예

##### 나. 시멘트 수축 특성

일반적으로 현수애자의 상시 사용하중은 과전파괴하중 보증값의 1/5~1/4이다. 이 정도의 영역에서의 수명은 약 10년 이상 대단히 길지만 애자에 과전파괴하중 보증치 이상의 높은 하중이 가해지는 경우 당연히 수명은 대폭 단축된다. 자기는 취성재료이기 때문에 파괴는 일반적으로 최대 응력점 부근으로부터 발생한다. 애자에 높은 하중을 가하는 경우 외에도 상시 사용 하중이지만 장기간 적용한 경우에도 파괴는 최대 응력점 부근으로부터 시작하기 때문에 각각의 파괴 거동은 동일한 것으로 생각 할 수 있다.

시멘트는 물과의 화학적 수화 반응에 의해 경화된다. 애자에 사용되는 시멘트는 수화를 촉진하기 위해 40℃ 정도의 온조에서 수 시간 이상 침적하여 양생한다. 일반적으로 양생 중의 시멘트는 팽창하게 되는데 양생 후 공기 중에 노출되면서부터 경화가 진행되면서 서서히 수축이 발생한다. 하지만 경년이 장시간 진행되면 시멘트 내부로 수분이

침투가 발생하는 경우 시멘트 성분과 수분과의 반응으로 다시 팽창하는 것으로 알려져 있다. 그림 3은 이러한 시멘트의 수축, 팽창을 나타낸 것이다.

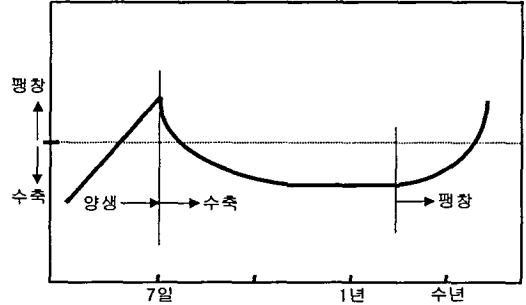


그림 3. 시멘트의 수축, 팽창 특성

현수애자의 구조상 캡, 편금구와 자기는 시멘트로 접합되어있고 자기면은 미끄럼을 방지하는 1.5mm의 굵은 모래(send)가 부착되어있다. 이 모래에 의해 시멘트의 수축과 팽창이 제한되면서 시멘트에 크랙이 발생한다. 반경방향의 수축 변위(displacement)가 계면에서 공극을 형성하여 축방향에는 원주방향의 수축이 모래에 의해 제한되기 때문에 이 반발력으로 인해 자기에는 응력이 발생하게 된다.

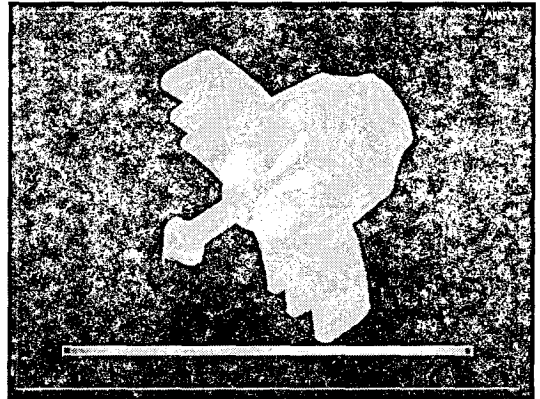


그림 4. 송전용 현수애자의 시멘트 팽창 변위에 따른 전단응력 분포(0.1%, 5,000kg)

그림 4는 시멘트에 0.1%의 부피 팽창에 상당하는 온도구배와 5,000kg의 하중을 고려하여 송전용 현수애자 각부에 작용하는 응력을 시뮬레이션한 결과이다. 자기 표면에 발생하는 축방향 최대 전단응력은 약 200kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 이값은 현수애자

의 캡, 핀 금구류에 과전과피하중 보증치의 1/2에 해당하는 인장하중을 가하는 경우의 그림 5와 같이 자기두부 내외벽 표면에 작용하는 축방향 최대 전단응력인 250kg/cm<sup>2</sup>과 비교하여 약 80%에 해당하는 큰 응력임을 알 수 있다.

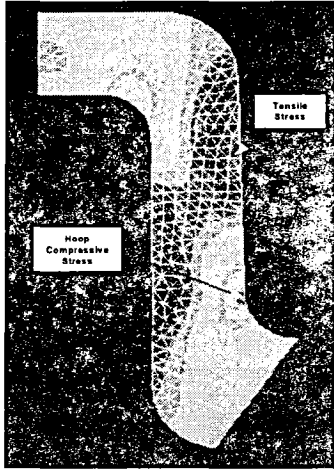


그림 5. 자기두부 내외벽 표면의 축방향 응력 특성

시멘트는 온도구배에 의한 수축, 팽창 외에도 인장하중의 변화에 따라 시멘트 계면에 작용하는 변위와 응력특성이 다른 것으로 나타났다. 그림 6은 시멘트의 부피가 0.1% 팽창하는 경우, 인장하중을 17,000kg까지 증가시킨 경우 계면 주변의 원주 방향 전단응력 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 이때 발생하는 전단응력의 변화는 시멘트 내부 방향 약 52mm 지점에서 응력이 최대로 집중되며 인장하중이 높을수록 응력값도 크게 증가하는 것으로 나타났다.

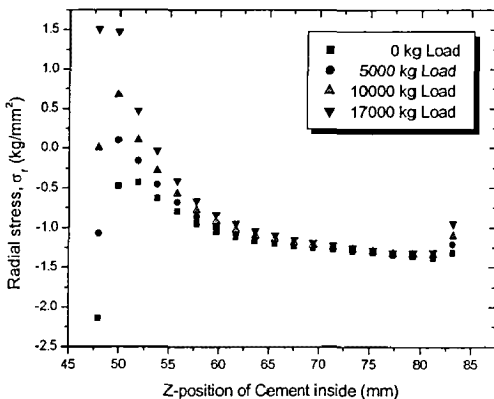


그림 6. 인장하중에 따른 계면변위 특성 변화

한편 인장하중 5,000kg의 조건에서 팽창율의 증가에 따른 변위 특성과 전단응력 특성을 검토하였다. 이때 최대 1%의 팽창 조건을 고려하여 비교하였다. 팽창을 가져오는 온도구배의 경우 시멘트 내부로 작용하는 변위는 네가티브 특성으로 0.2%의 부피 팽창이 발생하는 경우 변위와 응력은 크게 증가하는 경향을 나타내었다.

## 5. 결론

송전용 국산 자기재 애자(36,000lb)를 대상으로 실제 기계적, 열적 환경을 고려한 시멘트의 수축, 팽창 변위에 따른 계면의 응력 거동을 시뮬레이션하여 시멘트 변위가 송전용 애자 각 부위에 미치는 응력 특성을 정량적으로 분석하고, 가능한 억제 대책을 검토하였다. 시멘트의 수축, 팽창에 따른 계면의 응력 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었으며 이는 자기부의 미세 크랙의 진전으로 이루어질 가능성을 확인하였다.

한편 장시간 열화에 의한 시멘트의 경년특성은 팽창, 수축 거동에 따른 계면의 변위로 나타나므로 인한 응력의 증가는 송전용 애자의 장시간 열화의 정도를 이해하는데 주요한 요소로 확인되었다. 따라서 이에 대한 다양한 실험적 비교 검토가 필요하다고 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] Y. Yamada, "Slow crack growth of mullite ceramics", 일본세라믹협회, 논문지, 99(6), 1991
- [2] K. Morita, "Study on long term reliability of suspension insulators", 일본전기학회, 논문지 B, 117(12), 1997
- [3] E. A. Cherney, "Cement growth failure of porcelain suspension insulators", IEEE Transactions, Vol. PAS-102, No.8, 1983
- [4] S. W. Han, H. G. Cho, T. Y. Kim, D. I. Lee, and I. H. Choi, "A study on electrical and mechanical simulation for designing porcelain insulators with high strength", International Conference on Electrical Engineering 2002, Vol.3, 1191, 2002