

# ANSYS를 이용한 현수애자의 계면팽창거동에 따른 특성평가

論 文
52C-8-5

## Simulation of Interface Ageing Effect of Suspension Insulator Using ANSYS

禹炳哲\* · 韓世元\* · 趙漢九\*\*  
(Byung-Chul Woo · Se-Won Han · Han-Goo Cho)

**Abstract** - The suspension insulators are subjected to harsh environment in service for a long time. Long term reliability of the insulators is required for both mechanical and electrical performances. We studied an analysing method to find out a deformation of brittle porcelain with a thermal expansion of simulation analysis and experimental results show that cement volume growths affect severely to b mechanical failure ageing..

**Key Words** : Simulation, Thermal expansion, Suspension insulator, Interface ageing, Brittle porcelain

### 1. 서 론

전력용 애자는 선로의 절연을 유지하고 적절한 강도를 가져야 한다. 현재 사용되고 있는 많은 애자들은 자기재 애자(porcelain insulator)로 유리 애자와 고분자 애자보다 오래전부터 사용하여 왔으며 아직까지 주류를 이루고 있다. 국내의 경우 대부분 자기재 애자를 사용하고 있으나 일부 선진국에서는 유리와 고분자로 제조된 애자가 많이 사용되고 있는 실정이다. 이러한 애자는 사용 환경과 시간에 따라 초기 설치시의 특성과 달리 그 특성이 변하게 되며 이러한 원인 중 수분에 의한 영향이 가장 크다고 알려져 있다. 본 연구에서는 초기 제조과정에서 발생된 형상에서 일정시간까지의 시멘트부의 수축과정을 거친 후 팽창하는 과정에서 발생하는 열응력특성을 평가하여 자기재의 취성부위에 영향을 미치는 경향을 파악하고자 하였다.

본 연구에서는 ANSYS를 사용하였으며 2차원 축대칭 문제로 해석하였다. 시간에 따른 시멘트 부위의 팽창을 고려하여 팽창이 없는 조건에서 1%의 열팽창이 있을 경우를 비교하여 시멘트와 자기재 부위의 열응력 거동을 알아보았으며 원통의 내압을 적용한 열팽창 거동의 연구결과와 유사한 특성을 얻을 수 있었다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 송전선용 현수애자의 형상

송전선용으로 사용되고 있는 현수애자의 형상을 그림 1에 나타내었으며 구조상 금구류, 자기재 및 시멘트 부로 크게

나눌 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 pin 부위에서는 외부의 금구류에 의해서 고정되는 구조를 가지고 있으며 cap 부위는 cap의 내부에 금구류가 위치하게 되어 약간의 변형이나 움직임에 의해서 발생하는 굽힘이나 회전으로 인한 변형을 완화하는 역할을 하게 된다.

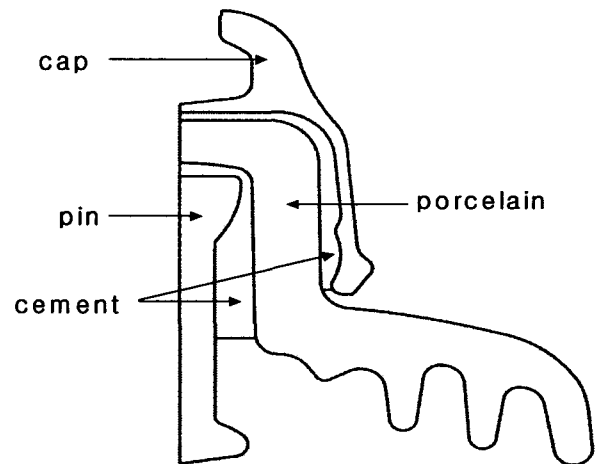


그림 1 일반적인 현수애자의 형상  
Fig. 1 Configure of a general suspension insulator

그림 1에서 금구류와 자기재 애자를 고정하는 재료는 특수용 시멘트를 사용하고 있으며 시멘트의 특성상 경화되는 과정에서 수축과 팽창과정을 거치게 된다. 이러한 수축과 팽창의 특성을 보상하기 위해서 일정 압력을 가하면서 성형하는 방식으로 제조되고 있고 수축 후 수일만에 걸쳐 팽창하는 과정을 거치는 것으로 알려져 있다.

또한 약 7일간의 양생과정 중 계속 팽창하는 과정을 거친 후 수년간에 걸쳐 다시 수축하는 과정을 거친다. 이러한 과정은 시멘트의 기본적인 물성이며 외부의 환경적인 요인이라기보다는 시멘트가 가지는 특성에 의한 결과이다.

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 新素材應用研究그룹  
接受日字 : 2003年 5月 9日  
最終完了 : 2003年 6月 9日

그러나 수년간의 시멘트의 수축과정 후 또 다시 팽창하는 과정을 겪게 되는데 이것은 외부의 습기와 오손 등의 환경에 의한 요인으로 알려져 있다. 그림 2는 시멘트 부위의 양생과정 중 발생하는 부피팽창 선도를 나타내고 있다.

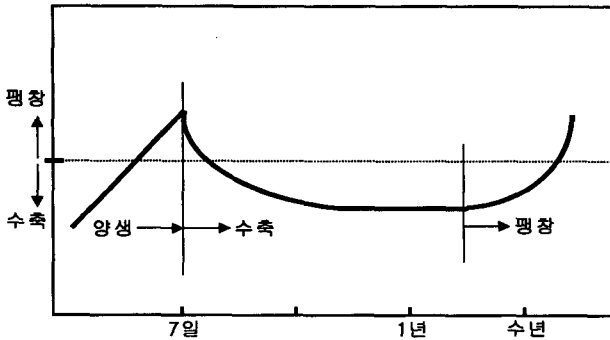


그림 2 현수애자의 시멘트 부위의 부피 변화  
Fig. 2 Variation of cement volume at suspension insulator

본 연구에서는 수년간 사용된 현수애자의 급격한 팽창거동을 모델화하였으며 이러한 팽창거동이 20-30년간 사용되는 자기재 현수애자의 파손 원인으로 작용할 가능성을 타진하였다.

### 2.2 Simulation model

본 논문에서 사용한 시뮬레이션 형상은 그림 1을 적용하였으며 현수애자의 형상을 기본으로 축대칭 2차원 모델로서 높이 127mm, 반경 131mm이며 그림 3과 같다.

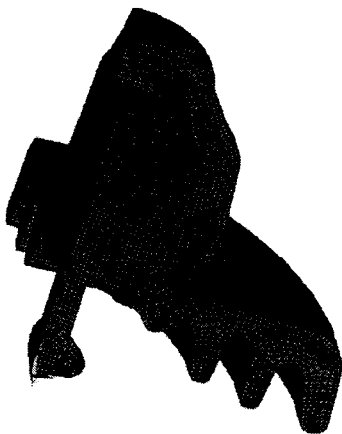


그림 3 시뮬레이션 모델의 형상  
Fig. 3 Configuration of simulation model

그림 3은 축대칭 모델로서 2800개의 element로 구성되어 있으며 ANSYS 6.0 plane42 element 방정식을 사용하였다. 축대칭 중심부를 중심으로 축방향의 굽힘은 없는 것으로 가정하였으며 축의 아래 부분이 고정되어 있고 윗부분에서 장력을 인가하는 방식으로 구속조건을 적용하였다. 또한 송전선용 애자의 실제 구속조건을 고려하여 작용하는 하중을 애자

의 cap 부분에 축 방향으로 작용하는 압력으로 인가하였다.

그림 3은 실제 형상의 1/4 모델로서 축대칭 문제로 해석하였기 때문에 원통방향의 요소의 형상을 확인할 수 없지만 실제 계산에서 얻어지는 특성은 원통방향의 계산을 정확히 할 수 있는 특성을 가지고 있다.

또한 시멘트 부위의 팽창을 고려하기 위해서 열팽창 문제로 해석하였으며 시멘트 부위를 제외한 나머지 재료에서는 실제 열전도율의 0.1%로 계산하여 특성치로 적용하였다. 표 1은 실제 사용된 재료의 특성을 나타내었다.

표 1 현수애자용 재료의 특성  
Table 1 Material properties of suspension insulator

property material	Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Thermal Expansion (10 <sup>-6</sup> /K)	Poisson ratio
Pin	14060	12	0.25
Porcelain	6890	7	0.2
Cement	2250	10	0.22

표 1에서 알 수 있듯이 열팽창계수는 7-12x10<sup>-6</sup>/K로서 큰 차이가 없지만 실제 시멘트의 열팽창을 적용하기 위해서 핀과 자기부에는 7, 12x10<sup>-6</sup>/K로 적용하여 계산하였다. 즉 시멘트 부위에서 1%의 부피팽창을 적용할 경우 핀과 자기부에서는 0.001% 정도의 부피팽창이 일어난다는 조건으로 해석하였다.

제조공정에서 얻을 수 있는 상태와 시간에 따른 팽창거동을 고려하기 위해서 0.01%에서 1%의 부피팽창에 따른 자기재 애자의 취약부인 애자와 시멘트 부위의 팽창거동을 알아보았으며 자기재 애자의 내부면과 외부면에 따른 특성을 비교 분석하였다.

## 3. 해석 결과 및 고찰

### 3.1 자기재의 팽창에 따른 응력-변형 특성

36,000 [lb]의 강도를 가지는 송전용 국산 자기재 애자를 대상으로 실제 기계적, 열적 환경을 고려한 시멘트의 수축, 팽창 거동에 따른 자기재의 앞 뒤에서 얻어지는 응력과 변형거동을 알아보기 위해서 인가하중은 500 [kg]으로 고정시키고 자기재의 양쪽에 고정용으로 사용한 시멘트의 팽창을 0.1%고려할 경우 얻어지는 응력과 변형특성을 평가한 결과는 다음과 같다.

그림 4에서 알 수 있듯이 현수애자의 전단응력은 중심부에 해당하는 탄소강의 끝부분과 시멘트가 닿는 부위와 시멘트와 자기재 애자가 닿는 부위에서 최대값을 가지게 됨을 확인할 수 있다. 이 결과는 자기재 애자가 파손되는 전단력을 고려할 경우 자기재 부분에서 최대 전단력이 발생되는 부위가 취약하다는 것을 알려주고 있다.

그림 5는 그림 4에서 얻어지는 전단응력과 애자의 전체에 작용하는 다음 성분을 조합한 Von Mises equivalent stress를 나타내고 있다.

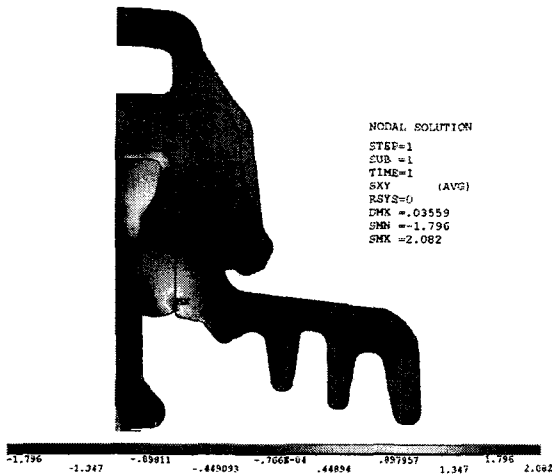


그림 4 현수애자의 전단응력 특성  
Fig. 4 A shear stress of suspension insulator

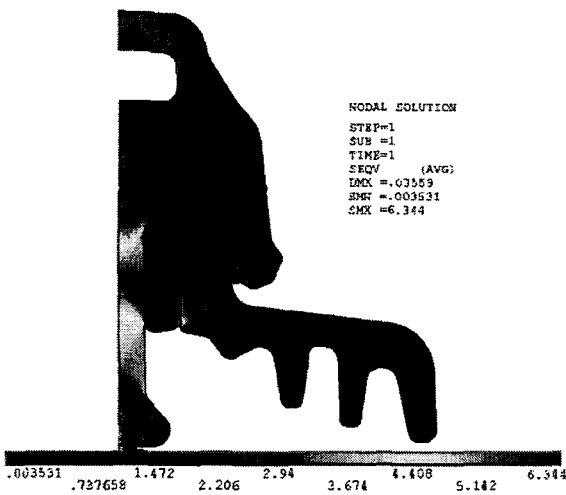


그림 5 현수애자의 상당응력 특성  
Fig. 5 Von Mises equivalent stress of suspension insulator

그림에서 알 수 있듯이 전체 응력은 각방향의 전단응력과 애자의 장력으로 인해서 발생된 인장력 그리고 다른 성분을 조합한 결과를 보여주고 있으며 자기재 애자와 시멘트 부위에서 발생하는 응력이 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 탄소강과 내부 시멘트 경계선상의 응력-변형 특성

현수애자의 특성상 탄소강과 절연을 목적으로 하는 자기재가 공존하게 되며 이를 연결해주는 시멘트가 압축 성형되는 공정을 거치게 되는데 자기재의 양쪽에 고정된 시멘트의 변형으로 인해서 자기재에 힘을 받게 된다. 그림 6은 자기재의 외부부를 지탱해 주고 있는 시멘트 부위를 나타내었으며 자기재의 안쪽과 시멘트 경계, 그리고 탄소강과 시멘트의 경계를 이루고 있는 부분의 응력과 변형특성을 알아보았다.

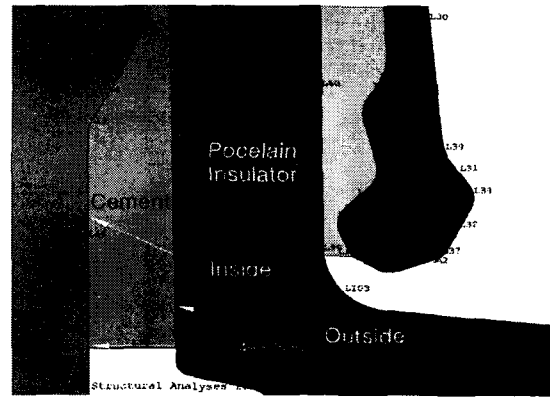


그림 6 자기재와 시멘트 부위의 형상  
Fig. 6 Configuration of porcelain insulator and cements

탄소강과 시멘트 경계선상의 응력과 변형 특성은 중심부를 지탱하고 있는 탄소강의 외부와 자기재 애자 사이에 있는 시멘트의 경계를 기준으로 자기재 애자부를 따라 직선선상에서 얻어진 특성을 비교, 검토한 결과이다.

그림 7은 시멘트 부위의 팽창에 따른 반경방향의 변형특성을 나타내었으며 팽창에 따라 급힘응력으로 전달됨을 확인할 수 있다.

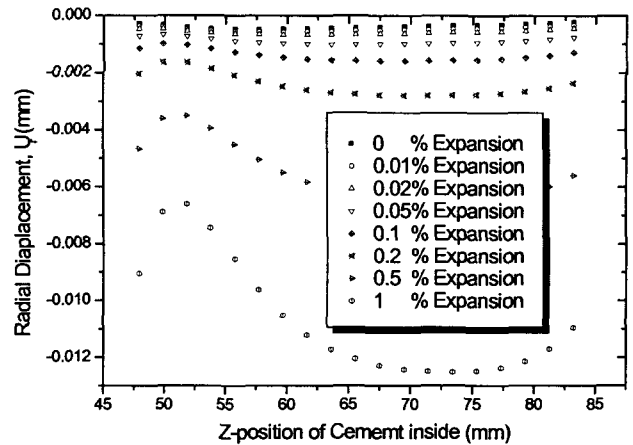


그림 7 시멘트 부의 팽창에 따른 반경방향의 변형  
Fig. 7 Radial displacement with cement expansion

그림 7과 같이 시멘트 부위의 팽창에 따라 반경방향의 변형이 수축하고 있으며 이것은 시멘트의 팽창으로 인해서 내부의 탄소강 쪽으로 누르고 외부의 자기재 애자쪽으로 밀어내는 힘이 작용하기 때문이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 시멘트 부위의 팽창이 0.1%를 넘어가면서 급격하게 변형이 발생되고 있는 경향을 가지게 되며 또한 z 방향으로 50 [mm]인 부위, 즉 탄소강과 시멘트 부위가 만나는 부위에서 급격한 변형의 편차를 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 같은 강도를 가지는 재료라고 가정한다면 파손원으로 작용할 수 있으나 탄소강이 강도가 높기 때문에 파손의 원인으로 작용하지는 않는다.

그림 8은 그림 7에서 얻어진 변형에 따른 반경방향의 응력을 나타내고 있으며 그 양상은 변형특성과 거의 유사하며

수축에 따른 압축응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

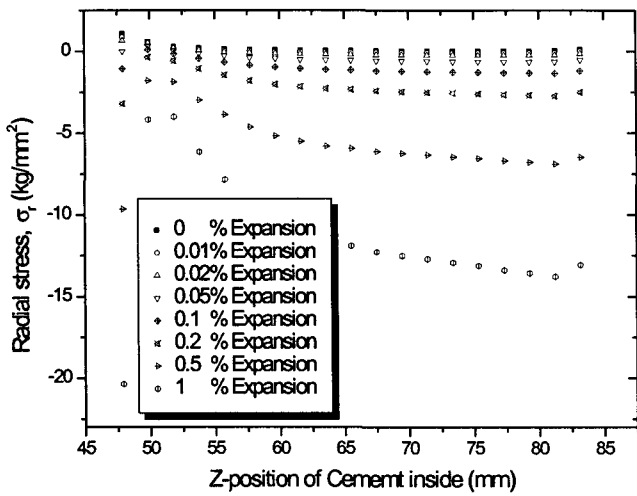


그림 8 시멘트 부의 팽창에 따른 반경방향의 응력  
Fig. 8 Relation between Radial stress and cement expansion

그림 9는 시멘트 부위의 팽창에 따른 전단 응력의 변화를 나타내었으며 대부분의 송전용 애자의 파손이 전단응력으로 인해서 발생하므로 그 특성을 알아보았다.

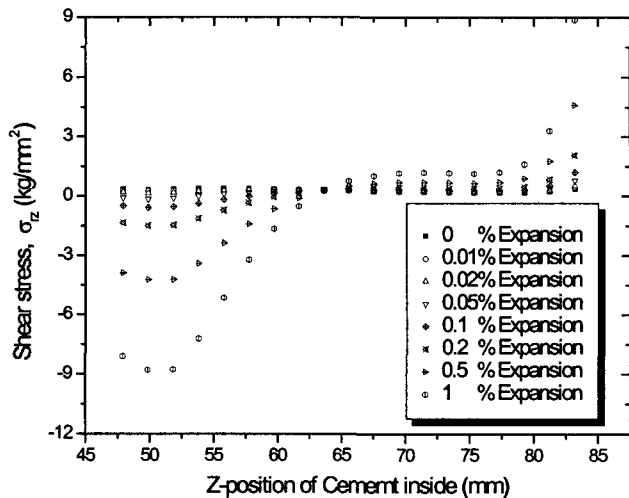


그림 9 시멘트 부의 팽창에 따른 전단 응력  
Fig. 9 Relation between shear stress and cement expansion

그림 7과 8에서 알아본 것과 같이 반경방향의 전단응력도 반경방향의 변형이나 응력과 마찬가지로 탄소강과 시멘트의 부위가 처음 접하는 부위에서 가장 큰 값을 가지고 있으며 시멘트 특성상 압축력에는 강한 특성을 가지고 있어 파손에 이를 수 있는 가능성은 거의 희박하다고 할 수 있으며 그림 9와 같다.

### 3.3 자기재 안쪽과 시멘트 바깥쪽 경계의 변형 특성

앞 절에 알아본 것과 같이 시멘트 안쪽과 탄소강과 접하는 경계에서는 시멘트 부위에 압축응력이 작용하게 되는 결

과를 얻었다. 그러나 시멘트 부위의 팽창 거동으로 인해서 바깥쪽은 팽창에 따라 인장응력이 작용될 가능성이 높으며 이로 인한 결과를 알아보았다.

그림 10은 자기재 애자와 시멘트 경계선상에서 반경방향의 변형을 나타내고 있으며 시멘트의 팽창에 의해서 내부는 압축변형이 작용하였으며 외부는 팽창변형을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

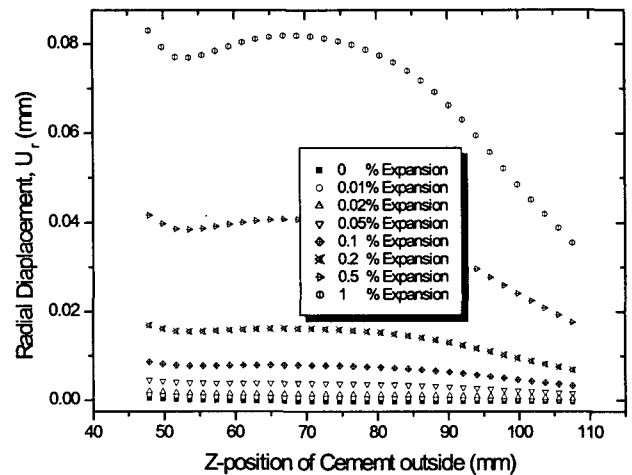


그림 10 시멘트 부의 팽창에 따른 반경방향의 변형  
Fig. 10 Radial displacement with cement expansion

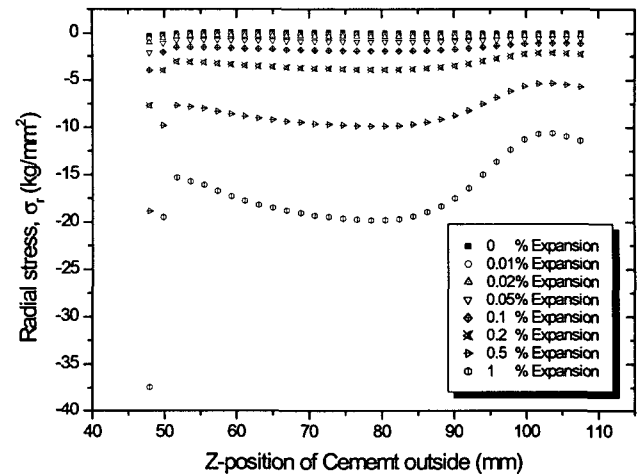


그림 11 시멘트 부의 팽창에 따른 반경방향의 응력  
Fig. 11 Relation between Radial stress and cement expansion

반경방향의 응력 또한 시멘트와 탄소강 경계에서 얻어진 결과와 유사한 특성을 보이고 있으며 반경방향의 길이의 차로 인해서 시멘트와의 경계에서보다 더 큰 압축응력이 가해짐을 알 수 있다. 또한 시멘트 내부의 팽창이 0.1%를 넘어서면서 큰 변화가 발생하고 있음을 알 수 있으며 자기재 애자와 시멘트가 만나는 부위에서 급격한 응력의 변화를 보이고 있다.

그림 12는 자기재 애자의 파손의 원인으로 작용할 가능성

이 가장 큰 반경방향의 전단응력을 나타내고 있으며 자기재의 팽창에 따라  $z=50$  [mm] 부근의 자기재와 시멘트가 접촉하는 부위에서 가장 큰 응력이 발생하고  $z=95$  [mm] 부근에서 가장 큰 압축응력이 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

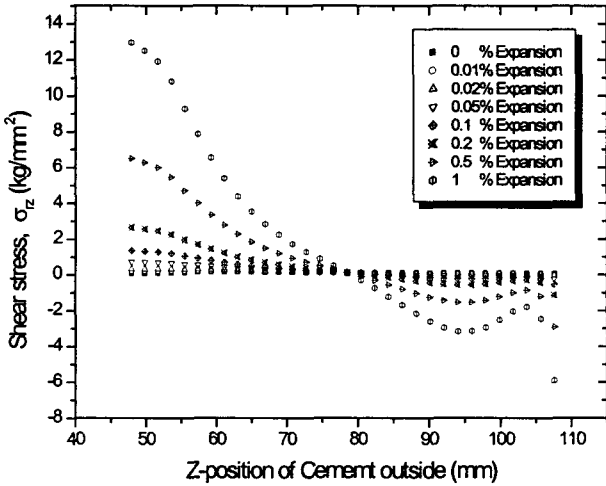


그림 12 시멘트 부의 팽창에 따른 전단 응력  
Fig. 12 Relation between shear stress and cement expansion

즉 시멘트부의 팽창으로 인해서 발생한 응력과 현수애자의 장력으로 인해서 내부의 탄소강의 곡률이 발생하는 부위부터 압축응력이 작용하게 된다. 이러한 경향은 중심부에 위치하고 있는 탄소강의 형상을 조절하면 압축응력이 발생하는 위치를 조절할 수 있는 조건이다.

또한 팽창이 발생하는 시멘트의 두께를 줄일 수 있다면 접착강도를 유지하는 한도 내에서 줄이는 것이 유리하겠다. 시멘트의 팽창에서 발생하는 팽창응력은 중심부의 탄소강과 자기 애자부위에 전달됨으로 최대한 얇게 하면 팽창의 영향은 줄어들게 된다.

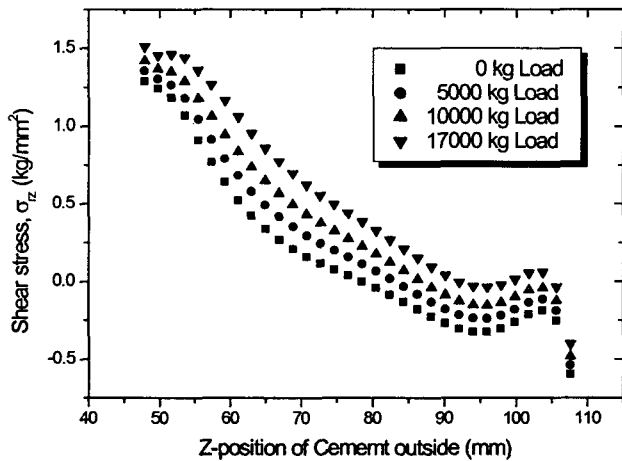


그림 13 현수하중에 따른 전단 응력  
Fig. 13 Relation between shear stress and suspended load

그림 13은 송전선용 현수애자의 하중으로 사용하고 있는 500 [kg]에서 하중의 변화를 줄 경우 얻어지는 전단응력을 변화를 나타내고 있다. 이 결과를 그림 12와 비교해 보면 하중이 17000 [kg]으로 증가하더라도 0.1% 시멘트의 팽창에서 얻어지는 결과보다 낮은 전단응력이 발생하고 있음을 확인할 수 있으며 이것은 시멘트 부위의 팽창이 얼마나 큰 하중으로 작용하게 되는지는 확인할 수 있는 자료이다.

### 3.4 접착용 시멘트부의 팽창에 따른 전단응력

그림 14는 그림 12에서 얻을 결과를 중심으로 시멘트 부위와 자기재 애자 부위가 접촉하는 부분에서 발생하는 최대 전단응력을 자기재 애자의 팽창과 비교한 결과이다.

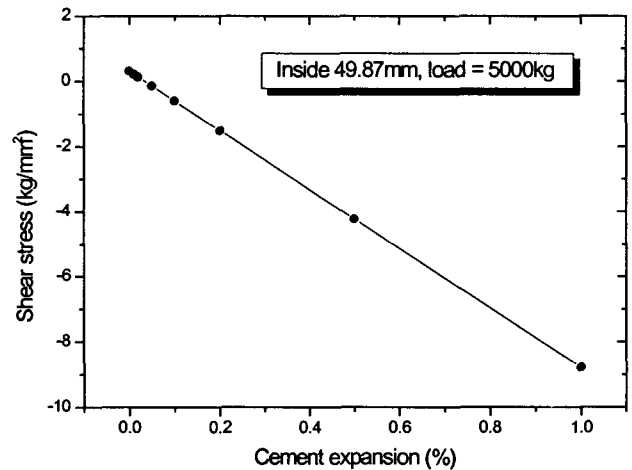


그림 14 시멘트 부의 팽창과 자기재 애자의 전단 응력  
Fig. 14 Relation between cement expansion and maximum shear stress of alumina porcelain

그림 14는 시멘트와 금구류가 접하는 부위 중 위치가 49.87 [mm]인 지점, 즉 금구류와 시멘트가 접하는 시작점의 위치에서 발생하는 전단응력의 특성이다. 그림 14에서도 알 수 있듯이 시멘트부위의 팽창으로 인해 음의 전단응력이 발생되고 있음을 확인할 수 있으며 시멘트와 자기재 애자가 접하는 부위에서는 양의 전단응력이 발생함을 확인하였다. 또한 시멘트부위의 팽창이 1%가 되면 약 9 [kg/mm<sup>2</sup>]의 높은 전단응력이 발생함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

송전선용으로 널리 사용되고 있는 자기애자를 대상으로 열화에 따른 특성을 평가한 결과 시멘트 부위의 팽창에 따른 영향을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 시멘트 부위의 팽창으로 인해서 중심부인 탄소강 부분에서는 압축응력이 작용하게 되고 자기재 애자 부위에서는 팽창응력이 작용하게 된다.
- (2) 시멘트 부위의 팽창으로 인해서 중심부인 탄소강 부분에 작용하는 압축응력은 탄소강 중심부의 곡률변경점에서 큰 변화를 일으키게 되므로 이 부분의 형상을 조

절한다면 충분히 줄일 수 있다.

- (3) 시멘트 부위의 팽창으로 인한 결과를 인가하중과 비교한 결과 하중이 17000kg으로 증가시키더라도 0.1%의 시멘트 팽창보다 작은 전단응력 특성을 가짐을 확인하였으며 시멘트의 팽창이 주요 응력발생원임을 확인하였다.
- (4) 시멘트 부위의 팽창을 고려한 결과 1%의 팽창인 경우 9kg/mm<sup>2</sup>의 전단응력이 발생하였다.

**참 고 문 헌**

- [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, 논문지B, 117(12), 1997
- [3] M. Kumosa, "Finite element analysis of substation composite insulator", Composites Science and Technology, 55(4), pp.375-389 1995
- [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
- [5] 우병철, 한세원, 조한구, 최인혁, "ANSYS를 이용한 현수애자의 계면팽창거동에 대한 해석", 전기학회 전기물성.응용분론회 추계학술대회 논문집, pp.74-76, 2002
- [6] 한세원, 조한구, 우병철, 정길조, "송전용 자기재 애자의 시멘트 변위응력에 관한 시뮬레이션", 전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, pp.476-479, 2002

**저 자 소 개**



**우 병 철 (禹炳哲)**

1963년 7월 22일생. 1989년 영남대 기계공학과 졸업. 2000년 경북대학교 기계공학과 졸업(공학), 1991년~현재 한국전기연구원 신소재응용연구그룹 선임연구원  
Tel : 055-280-1632, Fax : 055-280-1590  
E-mail : bcwoo@keri.re.kr



**한 세 원 (韓世元)**

1961년 1월 16일생. 1984년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(공학), 1986~현재 한국전기연구원 신소재응용연구그룹 선임연구원  
Tel : 055-280-1674, Fax : 055-280-1590  
E-mail : swhan@keri.re.kr



**조 한 구 (趙漢九)**

1957년 2월 28일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(공학), 1986~현재 한국전기연구원 신소재응용연구그룹 책임연구원, 산학연 컨소시엄센터장  
Tel : 055-280-1670, Fax : 055-280-1590  
E-mail : hkcho@keri.re.kr