케이블 부재의 방청성능 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristic of Anti-corrosive Performance for the Cable Members

안 승 환* 한 상 을** 이 상 주***

Ahn, Seung-Whan Han, Sang-Eul Lee, Sang-Ju

요 약

최근 건축물 및 교량 건설에 있어 연성 재료를 사용함으로써 구조형식의 다양화가 적극적으로 이뤄지고 있는 실정이다. 그 중 하나인 케이블 부재는 인장력의 도입으로 인한 전체 구조물의 강성을 증대시킬 수 있으며 흥미로운 연구 대상이라 할 수 있다. 국내에서도 건축물 또는 교량에 케이블 부재를 사용하는 시공 방법이 점차 증가 하고 있고 그에 따라 설계 및 시공 기술도 장족의 발전을 이루고 있다 할 수 있다. 설계에 반영된 케이블 부재가 영구적으로 성능을 유지하기 위해서는 케이블 부재의 방청성능이 가장 중요하나, 이에 대한 기술자들의 인식이 다소 부족한 점을 느껴 본 논문에서 케이블의 방청성능에 대해 고찰 하고자 한다.

ABSTRACT

Recently nonlinear materials are used in construction of building and bridge then various structure formats are achieved positively. one of them, cable members, are the interesting study object which increase rigidity of a total structure by inducing tension. The way of construction using cable members is increasing, so the technology of design and construction are developing. Protection Fretting Fatigue is very important to maintain efficiency of cable member permanently. However, engineer's recognition of this is somewhat humble and this paper considers anti-corrosive performance of cable.

키워드 : 연성재료, 케이블, 부식, 방청, 피로성능, 아연도금

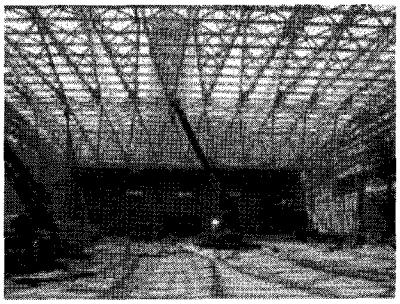
Keywords: ductile material, cable, corrosion, protection, fretting fatigue, zinc galvanizing

1. 서 론

1.1 연구의 배경

대공간 구조의 필요성이 증대함에 따라 효율적인 부재의 설계 (최적화 설계) 및 공간 디자인에 대한 관심이 점차 증가되고 있다. 현대 건축물의 대공간 활용의 실현을 위해 사용되는 케이블 부재의 장점은 부재의 효율성과 함께 선재의 구조미를 빼놓을 수 없다. 즉, 케이블의 선형미를 활용해 구조물의 미관을 향상시키기 위해서는 외부에 노출이 필요하며, 이에 따른 케이블 부재의 방청성능은 최우선적으로 확보해야 하는 항목이라 할 수 있겠다. 그동안 '부식에 의한 성능 저하'라는 재료적인 취약점을 보완하고자 방청재료인 아연을 이용한 도금 또는 에폭시를 이용한 부식방지 등의 기술 발전이 거듭하고 있으나, 그 또한 완벽한 방청성능을 기대함에 있어서는 부족함을 내포하고 있다. 이에 케이블 부재의 부식에 대한 메커니즘을 규명을 위하여 연구를 수행하였다.

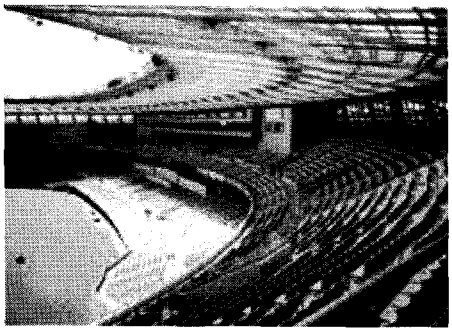
1.2 대공간 구조의 사용 예



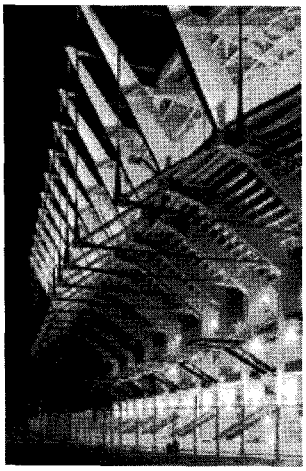
〈사진 1〉 일본 니아가타 컨벤션 센터

* 정회원, 인하대학교 건축공학과 석사과정
** 정회원, 인하대학교 건축공학과 교수
*** 정회원, (주)플러스구조 엔지니어링 과장

〈사진 2〉 일본 시모노세키 수산 시장



〈사진 3〉 일본 동경 스타디엄



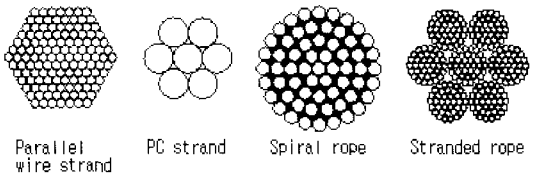
〈사진 4〉 울산 문수 월드컵 경기장

케이블 부재를 주부재로 사용하는 실례를 몇 가지 소개 한다.

2. 케이블 부재의 방청성능 필요성

2. 1 케이블의 형상에 따른 요구 되는 방청 처리

<그림 1>에서 보는 바와 같이 케이블은, 소직경의 다수의 선재를 묶음 또는 연선으로 사용하는 것이 일반적이다. 단일 부재인 강봉과는 다르게, 다수



〈그림 1〉 케이블의 종류

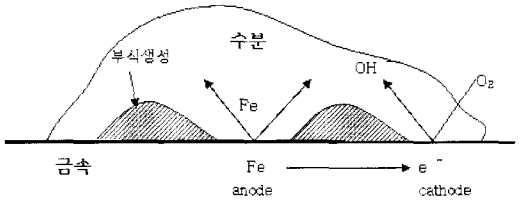
의 가닥을 묶음 또는 연선 처리를 함으로써 응력집중 현상을 피할 수 있는 장점 외에 다음과 같은 장점이 있다.

1) 강봉보다 뛰어난 유연성을 확보할 수 있으며
2) 곡률을 갖는 곳에 사용이 가능하며,
3) 길이가 긴 제품을 사용할 수 있고, 운반이 용이하다.

한편, 이러한 장점에 반해서, 형상에서 기인되는 공간격으로 인해서 인장하중의 저하가 있고, 연선의 경우는 연선 효율에 따른 저하를 단점으로 생각할 수 있다. 또한, 소선을 묶음 또는 연선으로 사용함으로서 방청성능을 확보해야 하는 가장 취약한 단점이 있다.

2.2 형상에 의한 부식 메커니즘

일반적인 금속표면의 부식 메커니즘은 양극화 현상과 음극화 현상의 이온화에 의한 것이다. 일반적 환경에는 산소와 물이 존재하고, 금속과 산소는친화성이 높아서, 표면에 산화물이 발생한다. 하지만, 이 상태에서는 부식이 문제를 일으키지는 않고, 부식이 철에 심각한 영향을 주게 되는 것은 생성된 산화물층이 파괴되어서 전기적 성질, 화학적 성질 등으로 문제가 발생되는 레벨로 성장한 경우이다.



〈그림 2〉 금속 이온화 메커니즘

금속의 용해반응 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

산소의 환원반응 $1/2\ O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$

상기와 같은 전기, 화학 반응에 의해서 표면이 부식되면, 그 부식된 표면이 금속표면을 덮게 되어서 산소의 확산이 제한되고, 그 후의 부식 속도는 상당히 저하 된다. 하지만, 녹은 다공성 (핀홀) 이기 때문에 부식이 정지되는 것은 아니다.

케이블의 경우를 고찰해 보면, 다수의 소선을 사용한 케이블 부재는 소선 간에 미소한 마찰이 발생하며 그 마찰에 의해 표면이 산화되어 피로성능과도 밀접한 관계를 가지는 Fretting corrosion 으로 발전하게 된다. 케이블의 경우는 상기의 일반적 부식의 메커니즘에서 부식표면이 산소의 확산을 제한하는 과정이 Fretting현상에 의해서 없어지므로, 계속적인 산화 반응이 발생 되어 심각한 부식 및 마모가 따르게 된다. 따라서 케이블의 경우는 Fretting을 방지하기위해서는 금속표면의 마찰을 제어하는 것이 무엇 보다 중요하다.

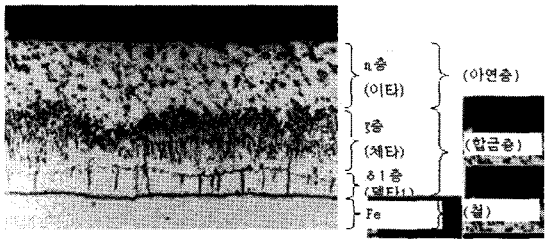
〈그림 3〉 Fretting의 모델링

3.방청의 방법

3.1 아연도금

3.1.1 아연의 특성

용융 아연도금을 한 경우의 피막층을 확대한 사진은 이하와 같다.

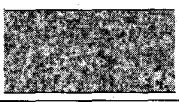
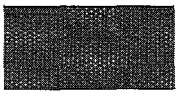
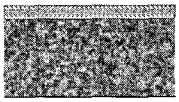
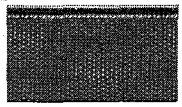
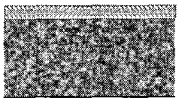
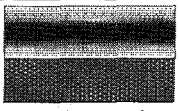


〈그림 4〉 용융 아연도금의 표면

<그림 4>와 같이 용융 아연 도금은 철과 합금층을 형성하여, 철 소지와의 뛰어난 밀착성이 있으며, 아연의 보호피막 작용과 자기희생방청 (sacrificial) 성능에 의해서 뛰어난 방청 성능을 확보하고 있다. 그러나 아연의 단점으로는 환경에 따른 상이점은 있으나, 이온화 경향을 통해 자신이 부식하여 철 소지를 보호함으로써 유지보수가 필요하다는 점이다.

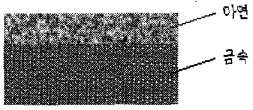
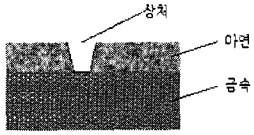
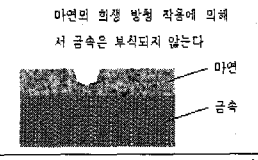
3.1.2 아연의 자기 희생 방청 성능 (sacrificial)

부식 환경 하에서 아연 도금은 표면에 얇은 산화 피막이 생성되며, 이 얇은 산화 피막이 강력한 보호 피막의 역할을 함으로써 금속을 보호하는 방청성능이 있다.

	아연도금	금속
소지		
녹의 발생	 얇은 녹피막이 생성된다.	 적녹의 발생
녹의 발생	 얇은 녹피막이 보호막으로 작용	 적녹의 보호력은 미소하여 녹이 진행된다

〈그림 5〉 아연도금과 금속의 산화

아연 도금의 피막에 상처가 발생하면, 주위의 아연이 양이온으로 되며, 금속의 부식을 억제하는 방청작용을 한다.

	아연도금
소지	
상처의 발생	
상처의 발생 후	

〈그림 6〉 아연도금의 방청성능

3.1.3 아연도금의 내구성

상기 3.1.2에서 언급함과 같이 아연도금은 뛰어난 방청성능을 가지고 있지만, 자신이 부식을 함으로써, 금속을 보호 하는 역할을 하기 때문에 영구적인 효과를 얻을 수는 없고, 사용연한을 정확히 파악하여야 한다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 PC강연선을 예로 하여, 그 내구성을 고찰해 본다.

1) 용융 아연 도금의 피막

평균 도금량은 210~250 g/m^{2}이다. 일반적으로 도막의 두께와 부착량 과의 관계는 이하의 식으로 산정한다.

$$A = 7.2 \times t \quad (1)$$

A : 아연 부착량 (g/m^2)

7.2 : 맥기층의 밀도

t : 도막두께 (μm)

그러므로, 상기 평균도금량의 최대치인 250 g/m^{2}를 두께로 환산하면, 35μm가 된다.

2) 아연도금의 부식 조건

① 자연 공기 중 부식에 관한 실험데이터

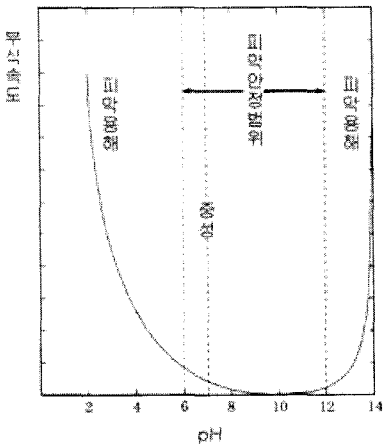
상기는 일반 대기 중에서 실험한 대기 중 부식에 관한 실험결과이다.

〈표 1〉 아연도금의 부식량

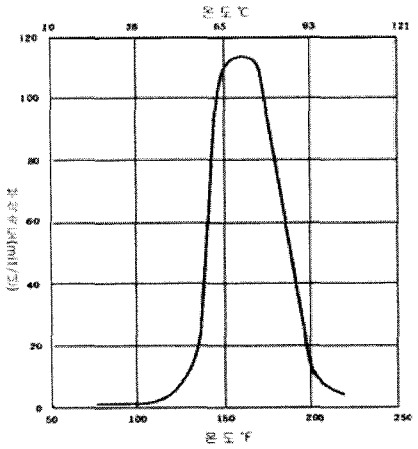
공시체	기간 (년)	부식감량		
		g/m^2/년		평균치
표준도금 (400 g/m^2)	1	7.31	7.77	7.54
	2	7.94	7.82	7.88
두꺼운 도금 (600 g/m^2)	1	8.22	8.45	8.34
	2	8.15	8.28	8.22
얇은 도금	1	10.12		10.12
	2	10.92		10.92

② 수중에서의 부식에 관한 데이터

수중에서의 아연도금은 pH와 온도에 상당한 영향을 받는다. pH6~12.5가 아연의 내부식 성능을 갖는 농도이고, 그 범위를 벗어나면 급속한 부식이 진행된다. 온도는 65°C에서 급속한 부식이 진행된다.



〈그림 7〉 pH에 의한 아연피막의 용해속도



〈그림 8〉 기온에 의한 아연 부식속도

3) 아연도금의 부식 속도

아연도금의 내용년수 계산식 (2)

내용년수 = 아연부착량 (g/m2)/부식속도 (g/m2/년) × 0.9

※ 90%아연이 부식되었을 때, 소지의 철이 부식되는 것으로 계산한다.

아연도금강연선의 경우, 최대도금량이 250 g/㎡이므로

최대 : 내용년수 = (258/7.71) × 0.9 = 30년 (3)

최소 : 내용년수 = (175/7.71) × 0.9 = 20년

이 된다.

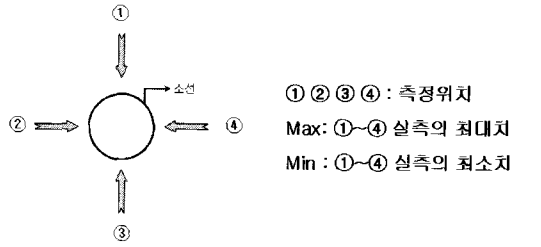
4) 아연도금의 균일성 실측

강연선의 부식 방지 효과는 그 방청층의 전 구간에 걸친 균일성에 의해서 확보 되므로, 아연 도금의

진원도를 실측하여 그 균일성을 파악해 보았다.

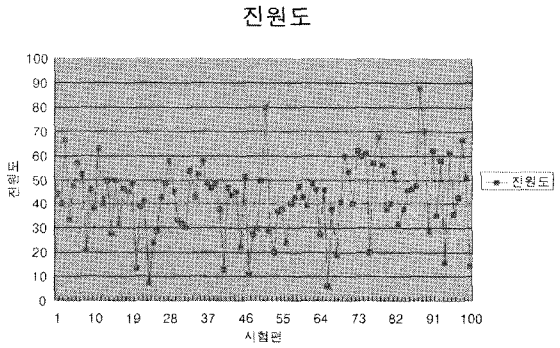
도금의 진원도는 실측한 데이터로부터 하기와 같이 계산 한다.

$$\text{진원도} = ((\text{Max}-\text{Min})/(\text{Max}+\text{Min})) \times 100 \qquad (4)$$



〈그림 9〉 측정방법

그림에서 확인 할 수 있듯이 아연 도금의 진원도는 매우 불규칙함을 알 수 있다. 즉 일정한 진원도를 유지해야 균일한 방청 성능을 기대할 수 있으나, 이와 같이 불규칙한 진원도에서는 균일한 방청 성능을 기대 하기 어렵다.



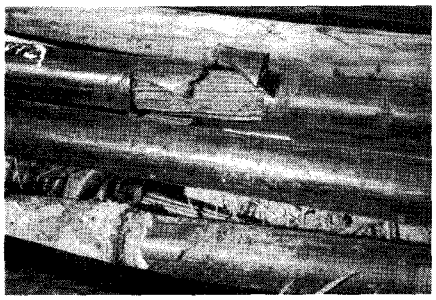
〈그림 10〉 진원도 실측 데이터 그래프

3.1.4 아연 도금의 부식 실례

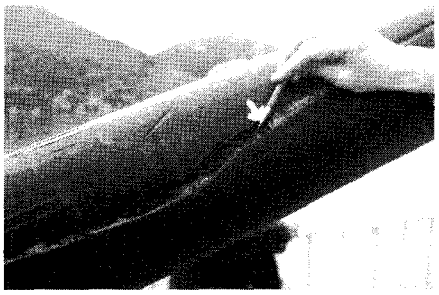
아연 도금은 금속과는 달리, 자신이 부식되는 과정에서 백녹이 발생 하고, 아연이 부식된 후에 사진에서 보는 바와 같이 금속 소지의 적녹이 발생 하게 된다.

아연 도금 강연선의 방청 성능을 확인하기 위하여, JIS Z 2371 (염수 분무 실험 방법)에 의해서 실험을 실시한 결과, 200시간 경과 후에 아연이 부식되는 백녹이 발생, 500시간 경과 후 부터는 금속 소지의 적녹이 발생되기 시작한다. (JIS Z 2371 : 1,000시간 염수 분무 실험 결과 이상이 없어야 한다.)

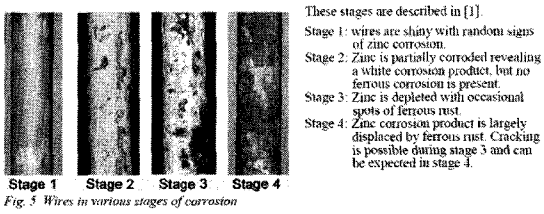
〈사진 5〉 Szechuan Chienwei bridge (China, 가설 13년후)



〈사진 6〉 Jiuiiang Bridge (China, 가설 9년 후)



〈사진 7〉 그라우트 충진의 경우 (Spain ,가설 20년 후)

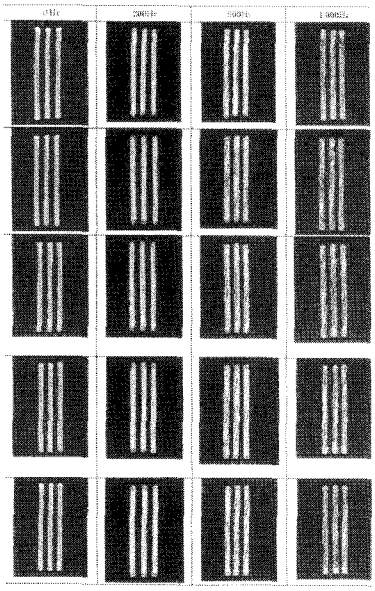


〈사진 8〉 아연의 부식과정

3.2 도장 및 도포

케이블에 도장의 사용은 그 종류에 따라서 효율성을 극대화 할 수 있는 경우와 그렇지 못한 경우가 있다. 또한 도장의 사용은 방청성능 이외에도 경관을 미려하게 하기 위해서, 색을 표현 할 수 있는 이

점을 가지고 있다.



〈사진 9〉 아연 도금 강연선의 염수 분무 실험 결과

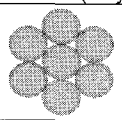
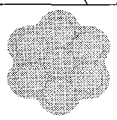
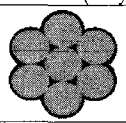
3.2.1 도장의 방법

도장의 방법으로는 아래와 같이 3가지 방법이 대표적인 방법 이라 할 수 있다.

〈표 2〉 도장의 방법

분류	방법	용도
분체 도장 방법	피 도장 물체에 분체를 뿌림	평면에 도장을 하는 경우
유동 침적 도장 방법	피 도장 물체를 액상화 시킨 분체조에 담금	두꺼운 도장을 할 경우
정전분체 도장 방법	분체에 정전기를 발생시켜 피 도장 물체에 부착시킴	피막에 균일한 도장이 필요한 경우

3.2.2 도장 형식의 분류

소선별 도장 (A-Type)	일체형 도포 (B-Type)	일체형 도포 (C-Type)
		
PC강연선을 구성하는 각 소선 각각에 열강화성의 경질에폭시 수지를 정전 분체 도장에 의해서 밀착 시킨 것으로, 비교적 얇은 피막에서 내부까지 완전 방청 성능을 유지 하는 것이 가능한 방식이다. 각 소선의 피막 두께는 200㎛ 정도 이다.	강연선 외주에 열경화성 경질 에폭시 수지를 정전 분체 도장에 의해서 밀착 시킨 것으로, 외주의 피막 두께는 600㎛ 정도이다.	강연선의 내면 공간격에 열가소성 고밀도 폴리에틸렌계 수지를 완전 충진 시키고, 외주에는 내충격성의 열가소성 수지를 피복한 것이다. 외주의 피막은 400㎛ 정도 이다.

3.2.3 도장 형식의 비교

아래의 <표 3>에서 확인 하면, A의 방청 방법이 B, C의 방청 방법의 단점을 보완 하여 개발된 방법으로 특히 소선 간 Fretting 을 제어 할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

〈표 3〉 도장형식 비교

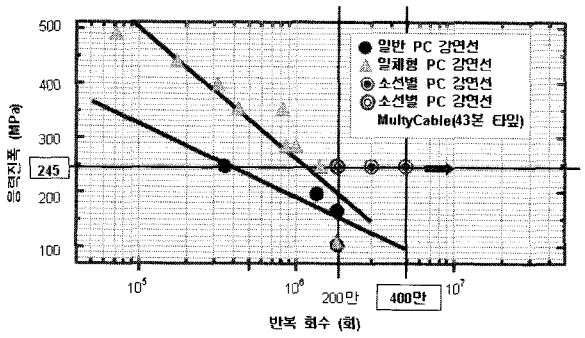
각성능	요건	A-Type	B-Type	C-Type
Fretting 방지	Fretting 방지	내부 및 이부 피막 형성. 소선별 피막으로 선별 Fretting 방지	내부 및 외부 피막 형성. 소선별 Fretting방지 불가	소선별 Fretting 방지 불가
		◎	△	△
규격		기술심사 증명서 (일본토목 연구센터)	없음	없음
방청성능	내부 및 외부 완전 밀착	정전 분체 방식으로 내외부 완전 밀착	정전 분체 방식으로 내외부 완전 밀착	
		◎	◎	
유연성	소선의 구속력	소선별 피막으로 강연선의 유연성을 구속하지 않는다.	일체형 피막으로 유연성에 제한이 따른다.	일체형 피막으로 유연성에 제한이 따른다.
		◎	△	△
부착특성	연선의 굴곡부를 유지	강연선의 외주소선의 접촉부 굴곡을 유지하여, 콘크리트 등과의 부착력이 뛰어나다.	일체형 피막으로 소선 접촉부의 굴곡부 형상이 없으므로 부착력에 제한이 따른다.	일체형 피막이나 외주의 굴곡부는 어느 정도 유지가 됨으로 부착력은 우수하다.
		◎	◎	◎
피로특성	Fretting 방지	소선별 피막으로 Fretting을 피막층이 흡수	일체형 피막으로 소선간의 Fretting 제어가 불가능	일체형 피막으로 소선간의 Fretting 제어가 불가능
		◎	○	○

4. 케이블의 피로 성능과 방청의 관계

케이블 피로 성능의 지배적인 요인은 Fretting 에 의한 부식 및 마모이다. Fretting 현상은 묶음 또는

연선으로 접촉되는 케이블 소선이 서로 접촉을 일으켜서 부분적으로 산화를 일으키면서 케이블이 부식되는 현상을 말한다. 이러한 이유에서 Fretting을 감소 할 수 있는 방청 방법이 가장 좋은 효율을 갖는다. 다음은 PC강연선의 도장 방법에 따른 피로 성능을 비교한 실험 결과 이다.

실험체는 KS D 7002의 15.2 mm직경 PC 강연선으로 하고, 응력은 상한 하중 0.45 Pu (117.4 kN), 응력진폭 245 N/mm^2, 주파수 5Hz 의 조건으로 실시하였다. (Pu = 261 kN)



〈그림 10〉 소선방법에 따른 피로성능 그래프

상기 각 도장 방법에 의한 피로 성능 실험 결과에 의하면 응력 진폭 245 MPa에서, 일반 강연선의 경우 약 35만회, 일체형 도장의 경우 약150만회에서 그리고 소선별 도장의 경우 약 400만회를 통과하는 결과를 확인 할 수 있었다. 소선별 도장의 경우 Fretting을 제어함으로 뛰어난 피로 성능이 확보됨을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

아연 도금의 경우는 3.1에서 언급한 것 과 같이 뛰어난 방청 효과를 기대 할 수는 있으나, 실질적 환경을 정확히 파악해야 하고, 특히 케이블 외주에 피복을 한 경우에 하절기에는 내부 온도가 급격히 상승 하는 점 및 내부 결로 등을 고려하면 그 사용성이 까다로울 수밖에 없다고 판단 할 수 있다. 그러므로 외부의 환경과 관계없이 케이블 자체를 방청 처리한 방법이 효과적 이라 할 수 있다. 실질적으로 다년간 사용된 아연 도금의 단점에 의해서 점차 도장을 통한 방법으로 대체 되고 있다.

도장의 경우는 케이블의 피로 성능 및 방청 성능을 고려해서, 일체화 도장이 아닌 소선별 도장의 효과가 보다 안정적이라 할 수 있다.

참고문헌

1. 일본건축학회: 케이블 구조설계지침,동해설,1994
2. (사)일본용융아연도금협회 : http://www.aen-mekki.or.jp
3. JR동일본: SED : (Structural Engineering Data) 2003-5 NO.20
4. (사)일본 토목 연구 센터 : 기술 심사 증명
5. 日本鋼構造協会, 吊構造, コロナ社, 1975
6. 日本鋼構造協会, 建築構造ケーブル設計施工指針·同解説, JSSC, Vol. 19, No.207, 1983
7. 日本膜構造協会, 膜構造建築物技術基準·同解説, 1987
8. AISI, Manual for Structural Applications of Steel Cables for Buildings, 1973
9. Gian Carlo Giuliani, On the Collapse of the Milano Sports Palace Roof, Proc. Int. Coll. Space Structures for Sports Buildings, Beijing, pp.558-565,1987
10. Han, S. E., A Study on the Optimal Shape Analysis of a Cable Domes, IASS, 1999.9
11. Krishina, P, Cable Suspended Roofs, McGraw HILL, p.50,1978
12. Otto, F., Tensile Structures, MIT Press, 1966
13. Uematsu, Y., Wind-Induced Dynamic Behavior of Suspended Roofs, The Technolgy Reports of The Tohoku University, 47巻 2号, 1982.12