

금속계열선의 전기기계적 상관작용과 긴장력 계측이 가능한 긴장재 Electromechanical Relation of metallic heat wires and Its Application to the Estimation of In_situ Stress of Structural Tendons

지 광 습* · 전 기 우**
Zi, Goangseup · Jun, Kiwoo

ABSTRACT

It is proposed that the electromechanical relation of the conductive materials with high electrical resistance may be used to estimate the current stress of prestressing tendons. To choose the best conductive material to this end, we studied the electromechanical relations of carbon fibers and metallic heat wires experimentally. It is found that the relation of carbon fibers can be modelled by a parabolic(or hyperbolic) function in the early stage of deformation. However because the relation is not consistent when it is unloaded and reload, carbon fibers are not suitable for this purpose. Metallic heat wires show a consistent linear relation during loading and unloading in the elastic deformation and are suitable for this purpose. To estimate the electromechanics relation of metallic wires, we developed a simple formula based on the rigid plasticity. We propose a new kind of prestressing tendons whose stress can be monitored.

Keywords: Electromechanical Relation, prestressing tendons, Estimation of In_situ Stress, Metallic heat wires, carbon fibers

1. 서 론

프리스트레스 구조물에 도입된 프리스트레스는 시간이 지남에 따라 정착부의 이완, 마찰손실, 콘크리트의 시간적 변형 등의 원인으로 이완하게 되고, 프리스트레스의 이완은 단면의 응력상태를 악화시켜 구조체의 표면에 균열을 야기하며, 단면의 저항능력을 심각하게 저하시키게 된다. 따라서 현재의 긴장력을 예측하는 것은 구조물의 유지관리 측면에서 매우 중요하다.

일반적으로 긴장재의 응력은 긴장재의 변형률로부터 구성방정식을 이용하여 구할 수가 있으며 본 연구에서는 선 형태의 고저항전도체에 변형을 가하면 전기저항이 바뀌는 전기기계적 상관관계를 이용하여 긴장재의 변형률을 구하는 방법을 제안했다. 즉, 고저항전도체 중 탄소섬유와 금속계열선의 전기기계적 상관작용을 실험을 통해 규명하고 이를 긴장재에 병렬 연결하여 금속계열선의 저항변화률로부터 긴장재의 변형률을 구하여 잔류응력을 예측하는 제안하였다.

2. 전도체의 전기기계적 상관작용 및 계측

* 정희원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수

** 정희원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

작용응력으로 인해 고체에 변형이 생길 때 고체의 전기저항이 바뀌게 되며 이 성질을 일반적으로 전기기계적 상관작용이라고 한다. 전기기계적 상관작용은 일차원 선형탄성 변형의 경우에 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\rho = k\varepsilon \tag{1}$$

여기서 $\rho = \Delta R/R_0$ 는 저항변화율, ΔR 는 저항변화량, R_0 는 변형이 없을 때의 초기 저항, k 는 전기기계적 상관계수, ε 는 변형률이다. 3차원 변형에서는 상관계수가 8차 텐서형태로 표현되어 매우 복잡하게 된다 (Sevostianov 등, 2000). 소성변형이나 점탄성 변형 등의 복잡한 비탄성 거동이 있을 때에는 식 (1)의 선형관계를 더 이상 사용할 수 없으며 식 (2)와 같이 변형경로(deformation history)에 의존하게 된다.

$$\rho = f(\Delta\varepsilon, \varepsilon) \tag{2}$$

일차원 전기기계적 상관관계를 연구하기 위해 일반적으로 선 형태로 가공된 재료를 재하하면서 동시에 저항을 계속해서 상관계수 k 를 측정한다.

3. 탄소섬유와 금속계열선의 전기기계적 상관작용

3.1 실험재료 및 실험방법

고저항전도체로서 CFRP의 원료가 되는 탄소섬유(Carbon Fiber)와 철에 크롬(Cr) 22%, 알루미늄 4%~5%가 첨가된 금속계열선(metallic heat wires)의 전기기계적 상관작용을 알아 보기 위해 인장시험을 하였다. 탄소섬유는 각 3곳에서 제조된 섬유를 사용하였고(표 1), 금속계열선은 직경 1mm의 칸탈 A1 재료를 사용하였다. 각 시편의 길이는 51cm이고, 0.005mm/sec의 속도로 변위제어 하면서 변위와 저항을 측정하였다. 변위는 LVDT를 이용하여 측정하였고, 저항은 시편 양 끝에 전극을 47cm간격으로 설치하여 탄소섬유는 multimeter, 저항이 탄소섬유(137Ω/m)에 비해 작은 금속계열선(1.85 Ω/m)은 currentsource와 nanovoltmeter를 사용하여 각각 측정하였다.

표 1 탄소섬유 제원

시편명	제조회사	제품명	필라멘트 개수	탄성계수[GP a]	에폭시합침유 무
CF_A	Toho Tenex	HTA3K	3,000	235	무
CF_B	High Gain Industrial Limited	TC35-12K	12,000	240	무
CF_C	SK케미칼	없음	3,000	240	유

3.2 실험 결과 및 고찰(탄소섬유)

그림 1(a)는 세종류의 탄소섬유 중 에폭시 합침되지 않은 CF_A, CF_B의 변형률을 단순 증가할 때 변형률과 저항변형률의 관계이고 그림 1(b)는 에폭시 합침된 CF_C의 결과이다. 그림 1(a)의 두종류의 실험결과가 초기 약 0.01 이하에서는 섬유 필라멘트의 파단으로 인해 포물선 형태의 거동을 보였으며

그 이후에는 선형적으로 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다. 섬유의 파단은 재료의 회복 불가능한 손상으로 이어지기 때문에 재하시 상관계수는 초기의 상관계수 보다 감소하게 된다. 여러번의 실험 결과에서 규칙적인 관계를 가진 CF_A 시편과 CF_B의 시편과는 달리 CF_C의 경우는 여러번의 실험 결과가 매우 불규칙하였는데 이것은 에폭시의 영향 때문이다. 그림 1(c)는 탄소섬유의 전기기계적 상관관계의 릴렉세이션을 알아보기 위해 CF_A 시편의 변형률을 단순증가 시키는 중간 중간에 변형률의 증가를 멈추었다가 다시 증가시키는 구간을 둔 실험 결과이다. 그림과 같이 탄소섬유의 릴렉세이션 효과는 없는 것으로 밝혀 졌다.

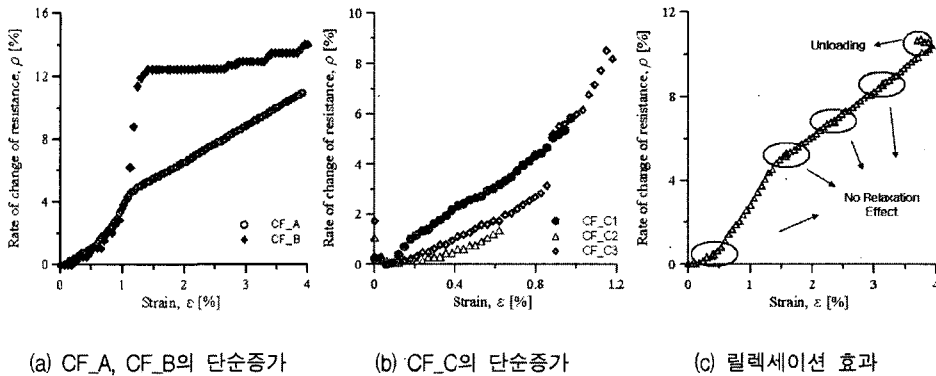


그림 1. 탄소섬유의 전기기계적 상관관계

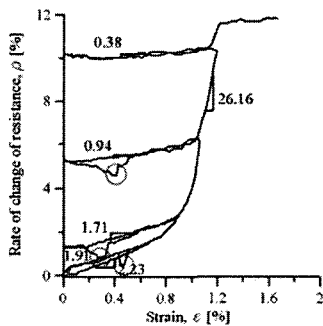


그림 2. 탄소섬유(CF_B)의 변형경로와 전기기계적 상관관계

그림 2는 재하와 제하 및 재재하의 상관관계를 실험적으로 도시하였다. 제하 구간의 상관계수는 초기 2.23부터 26.16까지 포물선 형태로 증가하였으나, 제하 및 재재하시의 상관계수는 탄소섬유의 파단에 의한 탄성회복량 감소로 인해 1.91에서 0.38로 변형률이 증가할수록 감소하였다. 이러한 탄소섬유의 파단은 섬유간의 접촉변화를 초래하여 그림 2에서 관찰되는 것과 같은 불규칙성을 초래하기도 한다.

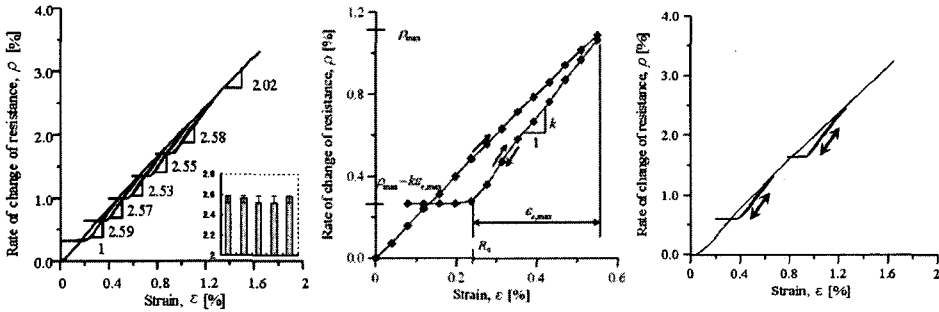
3.2 실험 결과 및 고찰(금속계 열선)

금속계 열선의 전기기계적 상관관계를 실험적으로 연구하기 위해 두가지 실험을 고안하였다. (a)반복적인 재하-제하-재재하를 통한 전반적인 변형률을 2%까지 증가, (b)제하 후 탄성영역 내의 반복변형. 첫 번째 실험은 상관계수 k 가 재료의 소성변형률에 의존하는 정도를 파악하기 위해 고안된 것으로 실험 결과를 그림 3(a)에 나타내었다. 재하시 상관계수 k 는 2.02로 측정되었고 제하 및 재재하시 상관계수 k 는 거의 서로 일치하며 서로 다른 최대 변형률에서도 통계적으로 평균 2.56, 표준편차 0.02로서 재료물성치적인 특성을 지니고 있는 것으로 확인되었다. 그림 3(b)에 표시된 바와 같이 최대 변형률 $\epsilon_{t,max}$ 이후 제하를 수행하면 최대 탄성변형률 $\epsilon_{e,max}$ 가 회복되고, 이 과정에서 전기기계적 상관계수 k 는 상수이다. 최대 탄성변형률 $\epsilon_{e,max}$ 가 회복된 이후 나머지 변형률 $\epsilon_{t,max} - \epsilon_{e,max}$ 은 소성변형률 ϵ_p 이므로 더 이상 회복되지 못하고, 인장력과 상관계수가 모두 0이 된다. 그림 3(a)의 실험결과에서 최대 탄성변형률은 0.28%~0.32%이다.그림 3(b)의 관계로부터 탄성영역

에서 현재의 저항변화를 ρ 에 대해 변형률 ε 의 관계로서 완전소성론과 비슷한 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_{\max}}{k} + \varepsilon_{t, \max} \quad (3)$$

여기서 ρ_{\max} 는 최대 저항변화율, $\varepsilon_{t, \max} = \varepsilon_{e, \max} + \varepsilon_p$ 는 최대 변형률, ε_p 는 소성변형률이다. 소성변형률 ε_p 를 사용하는 것보다 실제 계측이 용이한 최대 변형률 $\varepsilon_{t, \max}$ 를 이용하는 것이 더 효율적이다.



(a) 반복적인 wog-제하-재제하를 통한 변형률 증가시의 상관관계

(b) 탄소성변형과 전기기계적 상관작용

(c) 제하 후 탄성영역 내의 반복변형

그림 3. 금속계열선의 전기기계적 상관관계

두 번째 실험인 탄성영역내의 반복실험을 통해 반복적인 하중에서도 동일한 상관계수를 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 소성 변형 후 탄성변형이 0.30%까지 회복되도록 재하하고 변동 폭 0.20%로 5회 반복재하 하였다. 그림 3(c)과 같이 계측오차 이외에는 차이가 보이지 않았다.

4. 긴장재의 변형률 예측을 위한 재료의 선택

상술한 전기기계적 상관관계를 이용하여 작용응력 추정을 하기위해 고저항 전도체가 갖추어야 할 조건은 (1) 저항이 일반 전도체보다 커서 측정이 용이해야 하며, (2) 소성변형한 후 탄성회복 시 상관계수 k 가 일정해야 하며, (3) 추가변형 혹은 회복 시에도 상관계수 k 가 일정해야 하며, (4) 최대 변형률에도 사용할 고저항 전도체가 파단되지 않고, (5) 그 변형률에서 탄성회복이 뚜렷하고 상관계수 k 가 비교적 커야한다. 탄소섬유는 실험을 통해 살펴 본 것과 같이 변형률에 대해 다른 상관계수를 가지며 그 값이 매우 작으므로 작용 응력 추정을 위한 재료로서는 비효율적이다. 반면 금속계 열선의 경우 비교적 저항이 작아서 정밀한 측정이 요구되지만 전기기계적 상관관계가 여러 변형률 구간에서 일정하며, 계속적인 반복변형에서도 상관계수 k 의 값이 일정하다. 또한 변형률 0~0.015 구간에서 탄성회복이 뚜렷하고 상관계수 k 가 약 2.56으로 비교적 커서 작용응력 추정을 위한 재료로서 적절하다고 판단된다. 연선형 프리스트레스 긴장재의 경우 긴장시 최대 0.7%의 변형률을 가하는 것이 일반적이다. 탄소섬유의 경우 그림 4에 보인 바와 같이 이 최대 변형률에서는 섬유의 파단이 일어나며 제하-재하시의 거동이 매우 복잡하게 된다. 반면 금속계 열선은 일관된 거동을 보이는 장점이 있다.

5. 내부 긴장력 계측이 가능한 프리스트레스 긴장재 제안

5.1 생산방법

긴장재의 경우 저항이 매우 작기 때문에 전기기계적 상관관계를 직접 사용하여 작용응력을 측정할 수는 없다. 따라서 고저항 전도체인 금속계 열선을 병렬 연결하여 간접적으로 작용응력을 측정하게 된다. 긴장재 자체가 전도체이므로 고저항 전도체를 붙이기 전에 긴장재를 절연처리하거나 에폭시 코

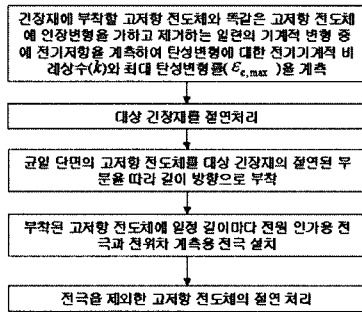


그림 8. 긴장력 계측이 가능한 긴장재의 생산방법

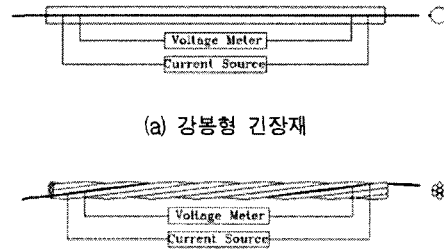


그림 9. 긴장력 계측이 가능한 긴장재의 생산방법

팅된 긴장재를 사용한다. 고저항 전도체는 에폭시를 이용하여 붙이며 긴장재와 완전 일체 거동을 하도록 해야 한다. 그림 8은 내부 긴장력 계측이 가능한 긴장재의 생산방법을 나타낸다.

강봉형 긴장재의 경우는 그림 9(a)와 같이 직선으로 부착할 수 있으며, 나선형 긴장재의 경우에는 그림 9(b)와 같이 나선형으로 부착할 수 있다. 나선형 부착의 경우에는 긴장력의 계산시 나선형 배치의 기하학적인 특성을 고려해야 한다.

5.2 계측방법

긴장력 계측이 가능한 긴장재의 작용응력 예측은 (1) 긴장재에 부착된 고저항 전도체의 전기기계적 상관작용, (2) 고저항 전도체와 긴장재의 적합조건 그리고 (3) 긴장재의 구성방정식에 의해 측정된 전기 저항 변화율로부터 계산하게 된다.

금속계 열선은 변형률의 재하시와 제하, 재재하시 상관 계수 k_i 가 다르므로 식 (5)를 이용하여 변형률을 계산한다. 일반적으로 긴장재는 긴장한 직후 장착장치를 설치하기 전에 최대 변형률 $\epsilon_{t,max}$ 을 나타내므로 미리 설치된 전극을 이용해서 장착 직전에 저항을 측정한다.

본 기법은 외부 긴장재 뿐만 아니라 내부 긴장재에도 손쉽게 적용될 수 있다. 내부 긴장재의 경우 콘크리트 타설 및 양생 시에도 응력 상태가 바뀌어 최대 저항 변형률이 측정될 수 있으므로 미리 최대 변형이 되는 시점을 예상하거나 일정시간별 저항측정을 통해 최대 저항변화율 ρ_{max} 를 측정한다.

$$\epsilon_{t,max} = \frac{\rho_{max}}{k_i} \quad (6)$$

여기서, k_i 는 초기 재하시 상관계수이다. 본 연구에서 사용된 금속계 열선은 그림 5에 보인바와 같이 k_i 는 2.02의 값을 갖는다. 임의의 시간이 흐른 후 강봉형 긴장재의 저항을 측정하면 식 (5)와 식 (6)

를 통하여 긴장재에 부착된 고저항 전도체의 현재 변형률을 구할 수 있다.

강봉형 긴장재의 경우, 고저항 전도체를 직선으로 붙이기 때문에 긴장재의 변형률 ϵ_L 과 고저항 전도체의 변형률 ϵ_i 은 같으므로 식 (5)에서 구한 변형률을 직접 이용할 수 있다. 그러나 연선형 긴장재의 경우는 나선형으로 고저항 전도체를 부착하므로 긴장재의 변형률 ϵ_L 과 고저항 전도체의 변형률 ϵ_i 이 다르고 다음과 같은 관계를 가진다(부록).

$$\epsilon_L = \sqrt{\frac{8l^2 + 4\nu D^2 \theta^2}{4l^2 - D^2 \theta^2}} \epsilon_i + 1 - 1 \quad (7)$$

여기서, D 는 긴장재의 직경, L 과 l 은 각각 긴장재와 고저항 전도체의 길이이며, θ 는 감긴 각도, ν 는 긴장재의 포아송비이다.

식 (7)를 이용하여 계산된 긴장재의 변형률과 긴장재의 구성방정식을 이용하여 긴장재의 응력을 구하고 단면적을 곱하여 긴장력을 측정할 수 있다.

6. 결 론

(1) 작용응력의 예측이 가능한 고저항 전도체의 조건을 제시하였고 탄소섬유와 금속계 열선이 전기기계적 상관작용을 실험적으로 검증하였다. 탄소섬유는 전기기계적 상관 계수가 크지만 같은 변형률에서 제하와 재제하시의 상관관계가 크게 차이나서 작용응력 예측재료로서는 부적합하다.

(2) 본 연구의 부수적인 결론으로서 함침되지 않은 탄소섬유의 경우 특정변형률 이후 그 전기기계적 상관관계가 더 이상 포물선 형태가 아니며 선형으로 거동하는 현상이 관찰되었으며, 이에 대한 추가적 연구가 필요하다. 금속계 열선은 작용응력의 예측에 필요한 조건을 잘 갖추었다.

(3) 금속계 열선은 제하와 제하 및 재제하시의 다른 상관계수 k 가 일정하며 탄성구간내에서 반복적인 변형에도 일정한 관계를 나타냈다. 이러한 특성을 고려하여 완전소성거동과 비슷한 저항변화율로부터 변형률을 계산할 수 있는 간단한 식을 제안하였다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부의 지원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-003-D00387).

참고문헌

- 신호상 (1999) 프리스트레스력 측정방법에 대하여. 건설기술정보, 한국건설기술연구원, 통권191호 pp. 6-11
- Nemat-Nasser, S. and Li, J. Y. (2000) Electromechanical response of ionic polymer-metal composites. *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, No. 7, pp. 3321-3331.
- Park, J. B., Okabe, T., Takeda, N. and Curtin, W. A. (2002) Electromechanical modeling of unidirectional CFRP composites under tensile loading condition. *Composites A*, Vol. 33, No. 2, pp. 267 - 275.