

탄소섬유와 금속계 열선의 전기기계적 상관작용에 대한 비교연구 및 긴장재의 작용응력 계측

A Comparative Study on Electromechanical Relation of Carbon Fiber and Metallic Heat Wires and Estimation of In_situ Stress for Prestressing Tendons

지광습* · 전기우** · 오홍섭***

Zi, Goangseup · Jun, Kiwoo · Oh, Hong Seob

1. 서 론

고체에 변형이 생길 때 전기저항이 바뀌게 되며 이러한 성질을 일반적으로 전기기계적 상관작용이라고 한다. 일차원 선형 탄성 변형의 경우는 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. 이러한 전기기계적 상관작용을 이용하면 저항변화율을 측정함으로써 변형률과 응력을 계산할 수 있으며, 압전소자의 전기기계적 상관관계를 이용한 전기저항식 변형률계이지와 긴장력을 측정하기 위해 고안된 나선형 변형률 게이지 등이 있다.

본 연구자는 현재 건설 및 기계, 항공 분야에서 활발히 사용되고 있는 CFRP의 원료가 되는 탄소섬유와 공업용, 가정용 히터의 원료가 되는 금속계열선의 전기기계적 상관관계를 실험적으로 연구하였으며, 탄소섬유와 금속계 열선이 나선형 변형률 게이지 등에 사용되어 응력측정을 위한 재료로서 적합한지를 판단하였다. 또한 금속계 열선을 실제 긴장재에 부착하여 긴장력의 예측의 성능을 검증하였다.

2. 탄소섬유(Carbon fiber)와 금속계열선(metallic heat wires)의 전기기계적 상관작용

2.1. 실험재료 및 실험방법

고저항전도체로서 CFRP의 원료가 되는 탄소섬유와 철에 크롬(Cr) 22%, 알루미늄 4%~5%가 첨가된 금속계열선의 전기기계적 상관작용을 알아 보기위해 인장시험을 하였다. 탄소섬유는 각 3곳에서 제조된 섬유를 사용하였고(표 1), 금속계 열선은 직경 1mm의 칸탈 A1 제품을 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(1.85Ω/m)은 currentsource와 nanovoltmeter를 사용하여 각각 측정하였다.

표 1 탄소섬유 제원

시편명	제조회사	제품명	필라멘트 개수	탄성계수[GP a]	에폭시함침유
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

* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail: g-zi@korea.ac.kr

** 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

*** 정회원 · 진주산업대학교 조교수 · 공학박사

2.2. 실험 결과 및 고찰(탄소섬유)

그림 1(a)는 세 종류의 탄소섬유 중 에폭시 함침되지 않은 CF_A, CF_B의 변형률을 단순 증가할 때 변형률과 저항변형률의 관계이고 그림 1(b)는 에폭시 함침된 CF_C의 결과이다. 그림 1(a)의 두 종류의 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 제하시 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.

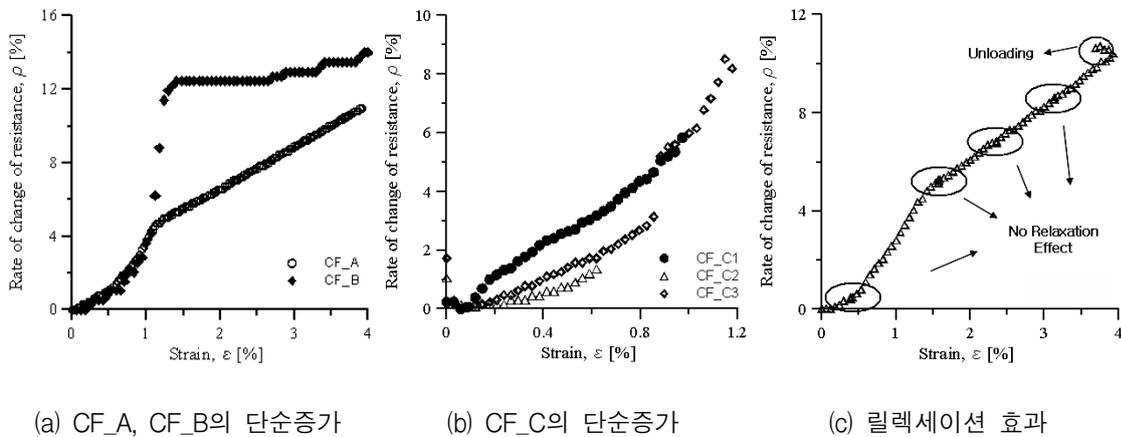


그림 1. 탄소섬유의 전기기계적 상관관계

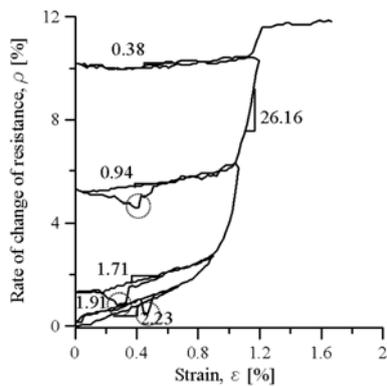


그림 2. 탄소섬유(CF_B)의 변형경로와 전기기계적 상관관계

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.

2.3. 실험 결과 및 고찰(금속계 열선)

금속계 열선의 전기기계적 상관관계를 실험적으로 연구하기 위해 두 가지 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. 각각 3개의 다른 시편에 대해 같은 실험을 했을 때 제하 및 재재하시의 상관계수 k 의 평균이 2.56, 3.03, 2.71로 넓게 분포되었는데 재료와 시편의 균질한 제작으로 편차를 줄일 수있을 것으로 판단된다.

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 이 후 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 탄성영역에서 현재의 저항 변화율 ρ 에 대해 변형률 ε 의 관계로서 완전소성론과 비슷한 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_{\max}}{k} + \varepsilon_{t,\max} \quad (2)$$

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.

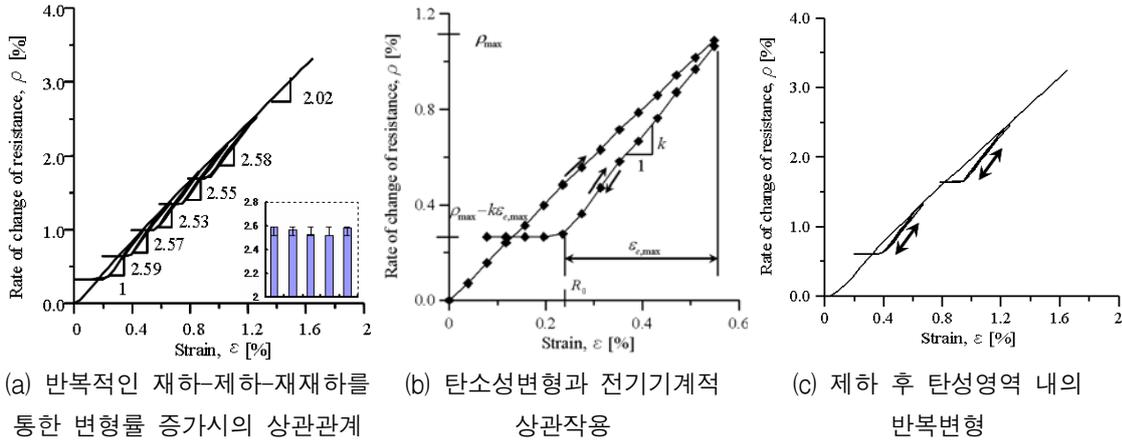


그림 3. 금속계열선의 전기기계적 상관관계

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

2.4. 작용응력 예측재료로서의 적합성

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 과단되지 않고, (5) 그 변형률에서 탄성회복이 뚜렷하고 상관계수 k 가 비교적 커야 한다. 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 프리스트레싱 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.

3. 긴장재 적용 실험

3.1 실험방법

본 연구에 사용된 긴장재는 고려제강의 예폭시 코팅한 7연선을 사용하였고 긴장재 총길이는 1m이며 시편의 중앙에 50cm간격의 금속계 열선을 부착하였다. (1)열선의 양끝만 고정시킨 시편(A시편)과 (2)열선의 전구간을 긴장재와 부착한 시편(B시편)으로 구분하여 제작하였다. B시편은 A시편과 같은 기존 나선형 게이지의 인장 후 압축변형률의 측정범위가 전도체의 탄성회복변형률(약 0.003)에 의존하게 되는 것을 극복할 수 있는

시편으로 고안되었다. 열선의 양끝에서 5cm안쪽에 설치하였다. 변형률 게이지는 긴장재의 전극사이에 나선방향으로 3개를 붙여서 평균하여 구하였고, 저항변화율은 currentsource와 nanovoltmeter를 사용하여 각각 측정하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

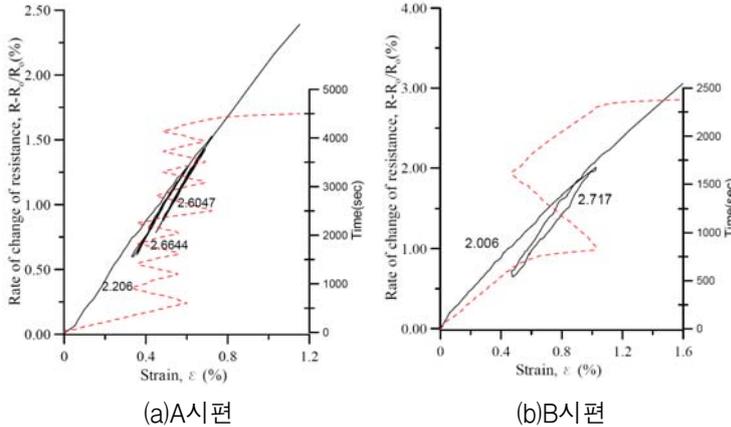


그림 4. 긴장재변형률과 저항변화률과의 관계

그림 4(a)는 A시편의 결과로서 점선은 시간과 긴장재 변형률과의 관계를 나타내고 실선은 긴장재 변형률과 저항 변화률과의 관계를 나타낸다. 그림 3(C)에서 금속계 열선을 탄성회복변형률에서 반복 변형한 것과 같이 금속계 열선을 부착한 긴장재도 탄성회복구간에서 반복 변형을 하였을 때, 재하와 제하 및 재재하시의 상관관계가 선형에 매우 근접하였으며, 다른 변형률 구간에서도 상관계수가 각각 2.665, 2.605로 매우 근사함을 알 수 있다.

그림 4(b)는 B시편의 실험 결과를 나타낸다. 탄성회복변형률(약 0.003)보다 큰

약 0.006정도까지 변형률을 제하 및 재재하를 하였을 때의 상관관계를 나타내었다. 제하 및 재재하시 상관관계가 거의 선형으로 측정되었다. 약간의 루프 형태를 보이는 것에 대해서는 재료의 소성 및 에폭시의 변형에 의한 것으로 추가적인 연구를 통해 그 영향을 파악할 필요가 있다.

3. 결론

- (1) 탄소섬유는 섬유 의 파단으로 인해 포물선형태와 회복 불가능한 전기기계적 상관관계를 보이며, 금속계 열선은 선형의 전기기계적 상관관계를 보인다.
- (2) 탄소섬유는 변형률을 계측을 위한 재료로 부적합하며, 금속계 열선은 나선형 변형률 게이지 등에 사용하여 변형률을 계측을 위한 재료로 사용될 수 있다.
- (3) 금속계 열선을 7연선에 병렬연결하여 금속계 열선의 저항변화률로부터 긴장재의 작용응력을 예측할 수 있음을 실험을 통해 검증하였다.
- (4) 에폭시를 이용하여 고저항 전도체의 전 구간을 긴장재에 접촉함으로써 고저항 전도체의 탄성회복변형률 보다 더 넓은 영역의 압축변형률을 측정할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부의 재원으로 학술진흥재단의 지원(KRF-2005-003-D00387)과 건설교통부가 출연하고 한국건설교통평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발 사업 05 건설핵심 D11의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 오병환, 양인환, 김지상. (2001)프리스트레스드 콘크리트 박스 거더 교량의 프리스트레스 손실 주정에 관한 연구. *한국구조물진단학회* 제5권 제2호 pp111-120
2. 지광습, 전기우. (2006). 고저항 전도체의 전기기계적 상관작용과 작용응력 예측. *대한토목학회논문집* 26(2A): 363-370.