大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第26卷 第2A號 · 2006年 3月
pp. 363 ~ 370

고저항 전도체의 전기기계적 상관작용과 작용응력 예측이 가능한 긴장재의 제안

Electromechanical Relation of Conductive Materials with High Electrical Resistance and Its Application to the Estimation of In_situ Stress of Structural Tendons

지광습* · **전기우****
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 metalic heat wires experimentally. The strain of those materials was controlled instead of the stress during the experiment. 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. As a side result of this study, we found that the electromechanical relation of carbon fibers without epoxy matrix becomes almost linear after a certain strain.

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

요 지

프리스트레스 긴장재에 현재 작용하고 있는 응력을 계측하는 방법으로서 고저항 전도체의 전기기계적 상관작용을 이용하는 방법을 제안했다. 사용 고저항 전도체를 선택하기 위해 탄소섬유와 금속계 열선의 특성을 일반적인 응력제어와는 달리 변형률제어를 통해 실험적으로 연구했다. 탄소섬유의 경우 변형 초기에는 일반적으로 알려진 포물선 형태의 상관관계를 보였으나 재하-제하시 상관관계의 기울기가 일정하지 않아서 본 목적에는 부합하는 않는 것으로 확인되었다. 금속계 열선은 거의 전 구간에서 탄성 재하, 제하 및 재재하시 일정한 선형 상관계수를 보여 본 목적에 매우 적합한 것으로 확인되었다. 금속계 열선의 전기기계적 상관관계를 예측하기 위해 완전소성론에 기초한 간단한 식을 제안하였다. 또한 금속계 열선을 이용한 긴장력 측정이 가능한 긴장재를 최초로 제안했다. 본 연구의 부수적인 결과로서 함침되지 않은 탄소섬유의 경우, 특정 변형률 이후 추가 변형에 대해 거의 선형적인 전기기계적 상관관계를 갖는 새로운 경향을 발견했다.

핵심용어 : 전기기계적 상관작용, 긴장재, 작용응력 예측, 금속계 열선, 탄소섬유

1. 서 론

시공성과 경제성 등의 장점 때문에 콘크리트 구조물은 거의 모든 종류의 토목 구조물에 널리 채택된다. 일반적으로 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 약 $\frac{1}{8}$~$\frac{1}{10}$ 정도에 불과한 재료적 성질 때문에 내부의 응력상태를 개선하기 위해 초기 압축응력을 도입한 프리스트레스 구조물이 사용되기도 한다. 단면에 균등한 프리스트레스가 도입된 경우 그림 1(a)에 보인 바와 같이 전체적인 응력 분포를 압축 측으로 이동시키게 한다. 프리스트레스 구조물에 도입된 프리스트레스는 도입직후 시간 에서 최대의 값을 가지며 시간이 흐름에 따라 정착부의 이완, 마찰손실, 크리프와 건조수축과 같은 콘크리트의 시간 의존성 변형 등 때문에 이완하게 된다. 도입된 프리스트레스의 이완은 단면의 응력상태를 악화시켜 구조체의 표면에 균열을 야기시키며, 단면의 저항능력을 심각하게 저하시킨다(그림 1(b)). 그러므로 프리스트레스 콘크리트 구조물을 평가하고 유지관리 할 때 가장 중요한 요소는 현재의 긴장력을 어떻게 예측 혹은 추정하는 것이다.

*정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수(E-mail: g-zi@korea.ac.kr)
**고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정(E-mail: junkiwoo@korea.ac.kr)

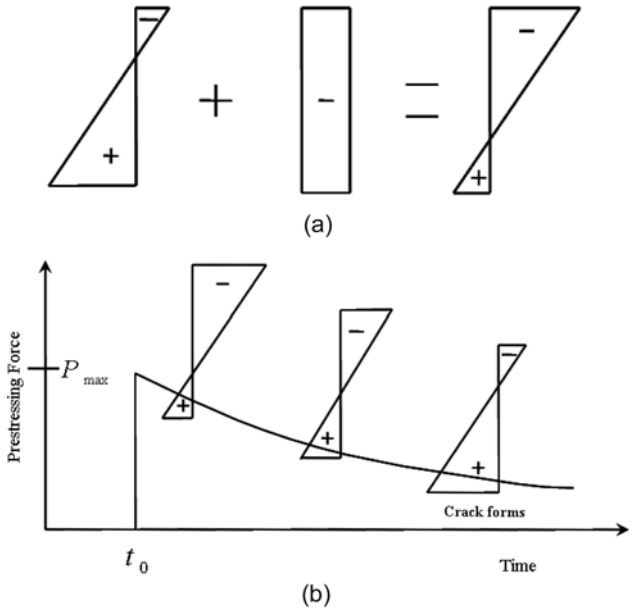

그림 1. 시간에 따른 프리스트레스 응력의 변화

현재 가용한 긴장력 예측 방법으로는 진동법에 의한 측정에 의한 방법(Saiidi 등, 1994), 응력파를 이용하는 방법(Chen 등, 2001; Chen 등, 2002; di Scalea 등, 2003), 노출 실험에 의한 측정방법(Civjan 등, 1995), 균열 닫힘을 이용하는 방법(Azizinamini 등, 1996)등이 있다.

진동을 이용하는 방법은 이론적으로 균질한 보에서 축력이 존재하면 진동수가 바뀌는 원리는 이용한 방법이다. 그러나 실제 공용중인 교량이 진동시험을 통하여 유효강성 혹은 긴장력을 측정하기 위해서는 이론에서 가정한 지점 조건을 만족하기 위해 여러 가지 선행 작업이 소요되며, 그 밖에 완전히 해석되지 않은 다양한 요소들의 영향으로 공용중인 교량에 직접적으로 사용하기는 어려운 것으로 판단되고 있다. 응력파를 이용하는 방법은 긴장재에 작용하고 있는 응력상태에 따라 응력속도가 달라지는 물리적 성질을 이용하는 방법으로써 아주 작은 응력파 신호를 계측하기 위해 고가의 장비가 필요하며, 장착장치에서 손실 및 분산되는 응력파를 고려해야 하는 문제점과 종종 분석자의 주관적인 판단이 필요한 경우가 있다(Chen 등 2002). 또한, 노출시험법에 의한 방법은 프리스트레스 강재를 둘러싸고 있는 콘크리트를 제거한 후, 측정장비를 이용해 긴장력을 측정하는 방법으로 측정시마다 구조물의 일부를 제거해야 하는 단점이 있다. 마지막으로 균열 닫힘을 이용한 방법은 프리스트레스 구조물의 표면에 구멍을 뚫는 과정에서 구멍 주변의 응력상태의 변화를 이용하는 방법으로서 현장적용에 사용하기 위해서는 현장의 지점조건과 구조해석시의 지점조건을 모델할 수 있는 방법이 필요하다. 이와 같이 여러 가지 방법이 제안 되었지만 아직까지 정확하고 간편하게 측정할 수 있는 방법은 없는 실정이다(신호상, 1999).

본 연구에서는 재료에 변형이 가해지면 전기저항에 변화가 생기는 전기기계적 상관작용을 이용해서 진장재의 긴장력을 상시 계측할 수 있는 방안을 제안했다. 즉, 전기기계적 상관작용이 뚜렷한 선형태의 재료를 구조용 긴장재에 병렬연결시키면 소기의 목적을 달성할 수 있는 것으로 기대된다.

최근 이러한 전기기계적 상관작용을 이용하려는 연구가 센서 및 구조물 모니터링 분야에서 연구되고 있다. 최근 전통적인 구조재료 이외에 광범위하게 응용되고 있는 탄소섬유 보강 합성수지(Carbon fiber reinforced plastics; 이하 CFRP)는 고저항 전도체로서 파단시점에서 그 저항이 급격히 증가하게 되는 전기기계적인 상관작용이 있으며, 이를 이용해서 CFRP의 손상여부를 감지하는 연구가 최근 진행되고 있다(Abry 등, 1998; Kupke 등, 2000; Abry 등, 2001; Prasse 등, 2001; Park 등, 2002; Li 등, 2004). 하지만 이 연구들은 작용응력의 추정보다는 손상의 감지 가능성에 그 무게를 두었다. 또한, 이온 폴리머 금속 복합체(Ionic polymer-metal composites, IPMCs) 등의 능동 폴리머의 전기기계적 상관거동을 이용하여 센서, 진동기, 인공근육 등에 관한 연구(Nemat-Nasser 등, 2000; Kim 등, 2005)가 진행되었으나, 본 연구와 같이 금속의 변형에 의한 저항변화 만을 고려하는 간단한 상관관계와 비교할 때 매우 복잡하다.

본 연구에서는 상시 긴장력 계측이 가능한 고저항 전도체로서의 탄소섬유의 전기기계적 상관작용을 실험적으로 연구했으며, 금속성 고저항 전도체의 전기기계적 상관작용을 이용하는 방안을 제안하고 그 거동을 실험적으로 연구하였다. 그리고 이를 이용한 긴장재 개발방안을 제시하였다.

2. 전도체의 전기기계적 상관작용 및 계측

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, ΔR는 저항변화량, R_0는 변형이 없을 때의 초기 저항, k는 전기기계적 상관계수, ε는 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.

표 1. 탄소섬유 인장시험 시편

시편명	시편재료	필라멘트 개수	탄성계수 [GPa]	에폭시함침 유 무	재하속도 (mm/sec)
CF_A	HTA3K	3,000	235	무	0.005
CF_B	TC35-12K	12,000	240	무	0.005
CF_C	SK 케미칼	3,000	240	유	0.005
CF_ D	HTA3K	3,000	235	무	그림 3(b)참고

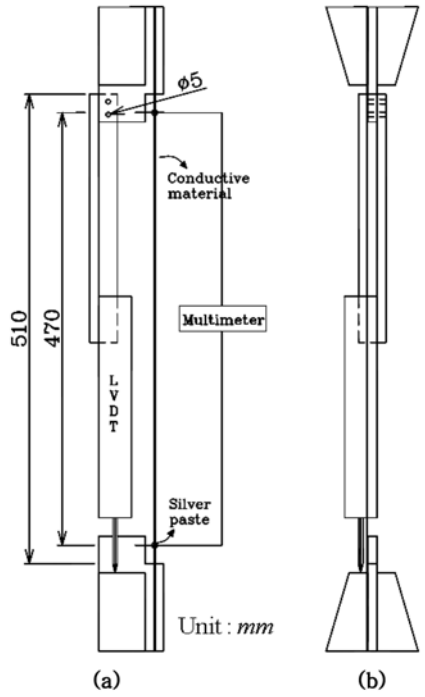

그림 2. 상관계수 k를 계측하기 위한 실험의 구성; (a) 정면도, (b) 측면도

$$\rho = f(\Delta\varepsilon, \varepsilon) \quad (2)$$

일차원 전기기계적 상관관계를 연구하기 위해 일반적으로 선 형태로 가공된 재료를 재하하면서 동시에 저항을 계측해서 상관계수 k 를 계측한다(그림 2).

3.탄소섬유(Carbon fiber)의 전기기계적 상관작용

3.1. 실험재료 및 방법

탄소섬유(Carbon Fiber)의 전기기계적 특성을 파악하기 위해서 인장시험을 실시하여 변형율과 저항의 변화를 측정하였다. 두께 10 mm의 아크릴 판에 에폭시 본드로 탄소섬유를 붙인 다음, 인장시험기에 아크릴 판을 고정시키고 실버페이스트를 이용하여 전극을 만든 후 변위계와 저항측정기(multimeter)를 이용해 변형률과 저항을 동시에 측정하였다. 실험에 사용된 탄소섬유로서 에폭시가 함침되지 않은 일본 Toho Tenex사의 HTA3K와 홍콩 High Gain Industrial Limited사의 Tairyfil TC35-12K, 그리고 HTA3K에 에폭시를 함침시킨 SK 케미칼에서 제작한 프리프레그를 이용하였다.

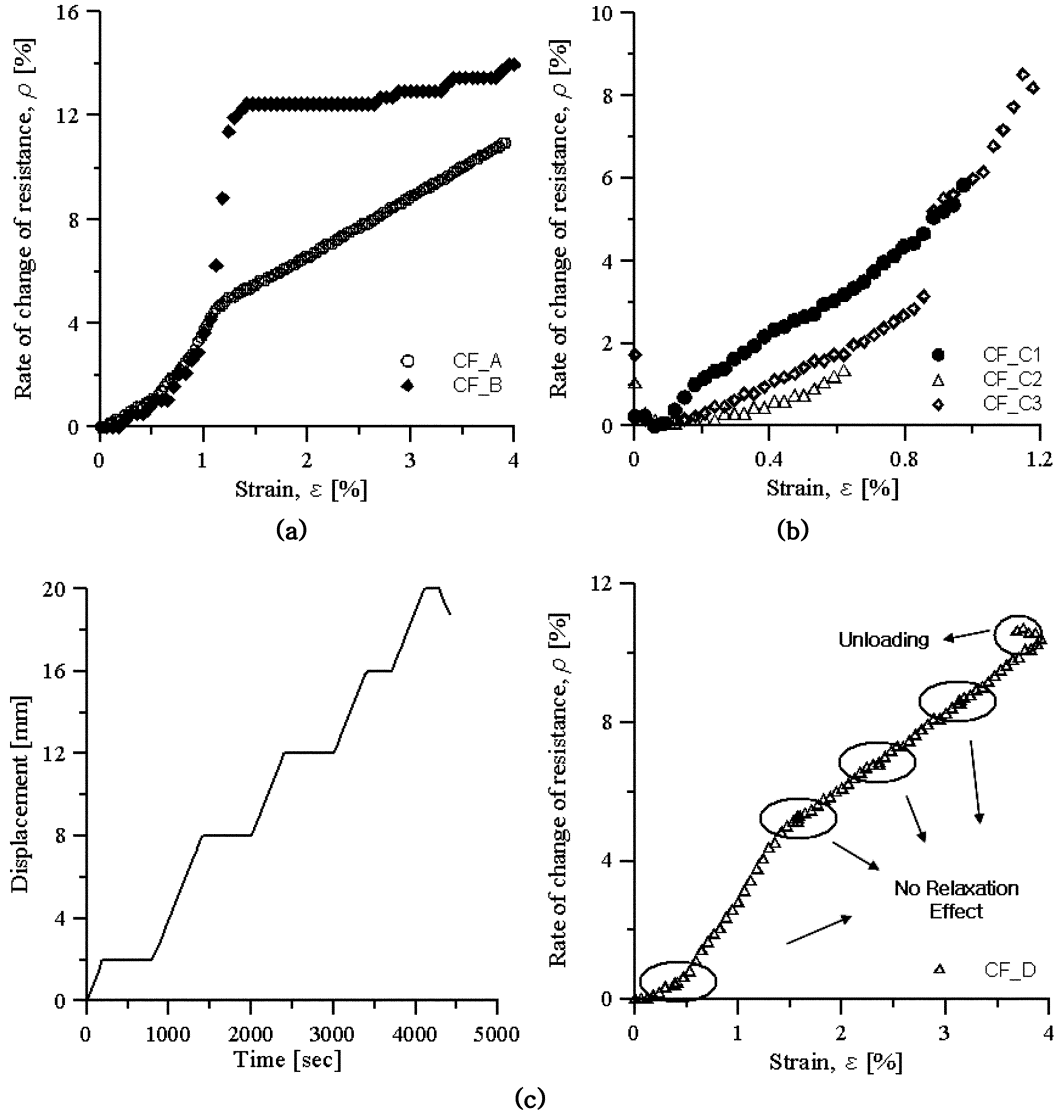

그림 3. 탄소섬유의 전기기계 상관 관계; (a) 에폭시 함침되지 않은 탄소 섬유의 일정 재하속도시의 상관관계; CF_A, CF_B, (b) 에폭시 함침된 탄소 섬유의 일정 재하속도시의 상관관계; CF_C, (c) 에폭시 함침되지 않은 탄소 섬유의 변형지속 시간의 영향; CF_D

시편의 종류는 총 4종류이며 각각 시편의 차이와 사용된 탄소섬유의 재료물성은 표 1과 같다. 섬유의 길이는 510 mm이고 두 전극 사이 간격은 470 mm로 일정하게 유지하였으며 0.005 mm/sec의 속도로 변위제어를 통해 재하하였다.

3.2. 실험결과 및 고찰

그림 3(a)와 그림 3(b)는 변형률을 일정 속도로 단조 증가시킬 때의 상관관계이다. 시편 CF_A와 CF_B는 여러 번의 실험결과가 모두 규칙적인 형태의 전기기계적 상관관계를 나타내었으나, CF_C의 경우는 에폭시의 영향으로 여러 번의 실험 결과(CF_C1, CF_C2, CF_C3)가 일정하지 않고 불규칙하였다. 세 종류의 탄소섬유 모두 변형률이 약 0.01 이하의 초기 변형에서는 포물선 형태의 거동을 보였으며 이 변형 초기의 거동은 점진적으로 증가하는 파단된 섬유들에 의한 것이라고 알려져 있다(Xu 등, 1996; Cho 등, 2000; Park 등, 2001).

$$\rho = n_f/(n-n_f)+(1+2\nu)\varepsilon \tag{3}$$

여기서, n은 탄소섬유 필라멘트의 수, n_f는 파단된 탄소섬유 필리멘트의 수, ν는 탄소섬유의 포아송 비이다. 섬유의 파단이 발생하면, 재료의 회복 불능한 손상으로 작용하기 때문에 제하(unloading)시의 상관계수는 초기 상관계수보다 감소하게 된다(Xu 등, 1996; Abry 등, 1998; Abry 등, 2001; Prasse 등, 2001). 탄소섬유의 전기기계적 상관작용에 있어서 기존의 연구에서는 관찰되지 않은 특이한 점이 발견되었다. 포물선 형태로 증가하던 상관계수 k는 특정 변형률(약 0.01) 이후에는 거의 일정한 값으로 고정되었다. 그래서 전체적인 상관도는 그림 3(a)와 같이 실험적으로 도시되었다. 이 구간에서 변형률 재하시간과 상관관계를 검증하기 위해 그림 3(b)와 같은 재하경로를 선택하여 실험 하였다. 그 결과 재하시간으로 인한 릴렉세이션(relaxation) 효과는 거의 관찰되지 않았다.

그림 4에서는 재하와 제하 및 재재하시의 상관관계를 실험적으로 도시하였다. 재하구간의 상관계수는 초기 2.23부터 26.16까지 포물선 형태로 증가하였으나, 제하 및 재재하시의 상관계수 k는 1.91에서 0.38로 변형률이 증가할수록 감소하였다.

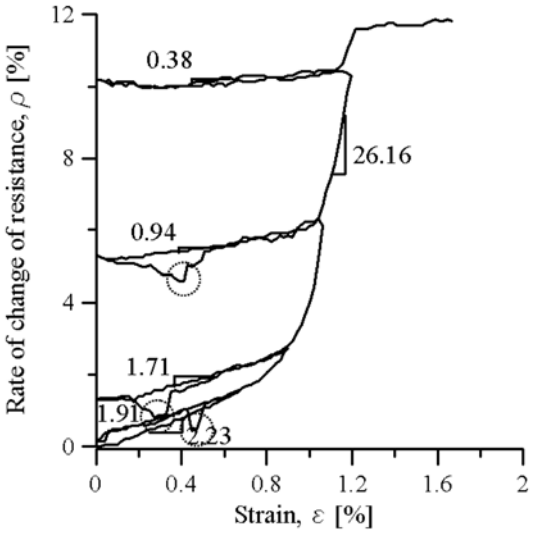

그림 4. 탄소섬유(CF_B)의 변형경로와 전기기계적 상관작용

제하 및 재재하시 탄소섬유의 상관계수 k가 재하시 상관계수 보다 매우 작고 변형률이 증가할수록 작아지는 것은 탄소섬유의 파단에 의한 탄성회복량의 감소에서 기인한 것으로 이러한 탄소섬유의 파단은 섬유간의 접촉변화를 초래하여 그림 4에서 관찰되는 것과 같은 제하 및 재재하시의 불규칙성의 원인이 된다. 탄소섬유대신 에폭시 등의 매트릭스로 합침된 CFRP를 사용한 연구(Xu 등, 1996)에서는 매트릭스의 탄성거동으로 인해 제하 및 재하시의 상관계수 k가 약 2.5 정도로 약간 더 큰 값이 관찰되었다. 그러나 이 경우에도 변형경로가 루프 형태로 나타나서 재하 및 제하시의 상관계수가 다르게 된다.

변형률이 최대강도에 해당하는 변형률 0.01에 근접할수록 저항의 증가율이 급격히 증가하였다. 그러므로 전기기계적 상관작용을 이용해서 탄소섬유의 파단여부를 추정하는 것은 가능할 것으로 판단된다. 하지만 작용하고 있는 응력을 정밀하게 추정하기 위해서는 재하, 제하, 재재하시의 저항변화율이 일관성이 있어야 하며, 변형률이 변화할 때 뚜렷한 저항변화가 있어야 한다. 하지만 그림 4에 보인 바와 같이 탄소섬유의 경우, 제하(unloading)이후의 상관계수, k=1.91~0.83가 재하시의 상관계수보다 매우 작고 경로에 따라 다른 값을 가지므로 작용 응력을 추정하기 위해 탄소섬유를 사용하기는 비효율적이다. 또한, 섬유의 파단은 미세구조를 본질적으로 변화시키게 되고, 전술한 파단된 섬유 간의 접촉으로 인해 문제를 단순화시키기가 어렵게 된다.

4. 금속계 열선(Metallic heat wires)의 전기기계적 상관작용

4.1. 실험재료 및 방법

철(Fe)은 탄성변형시의 거동과 소성변형시의 거동의 차이가 매우 뚜렷한 특성을 나타낸다. 그리고 소성 변형 후 제하시에도 초기 탄성거동과 거의 같은 기울기로 거동하는 특징이 있다. 소성변형은 디스로케이션(dislocation)의 재배치에 의한 것으로서 섬유파단과 같은 손상과는 근본적으로 다른 매카니즘이다. 그리고 대부분 구조 긴장재의 주성분이 철이라는 점에서도 긴장재의 가용 변형률과 비슷한 정도의 파단 변형률을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이 긴장재 자체의 전기저항을 직접 측정하는 것도 생각해 볼 수 있으나, 철의 전기 비저항은 약 9.68×10^{-8} Ωm로서 거의 측정이 불가능하므로 실현 가능성이 매우 낮다.

하지만 철에 크롬(Cr) 22%, 알루미늄(Al) 4%~5%가 첨가되면 상온에서 직경 1 mm의 원형 단면은 상온에서 변형이 없을 때 약 1.85 Ω/m의 저항을 가진다. 이 합금은 가정용 및 공업용 전기 히터(heater)에 널리 사용된다. 본 연구에서 대상으로 한 탄소섬유의 전기저항인 137 Ω/m에 비교해서 매우 작은 저항이므로 일반적인 멀티미터로는 저항변화율을 정밀하게 계측하기는 어려우며, 전원으로서 DC 10 mA를 양단에 인가하고, 전위차를 전위차계를 이용해서 계측한 후 저항을 계측하였다. 접촉저항에 의한 오차를 없애기 위해 전류방향이 반대일 경우의 전위차도 계측하여 다음 식과 같이 절대값의 평균치를 사용했다.

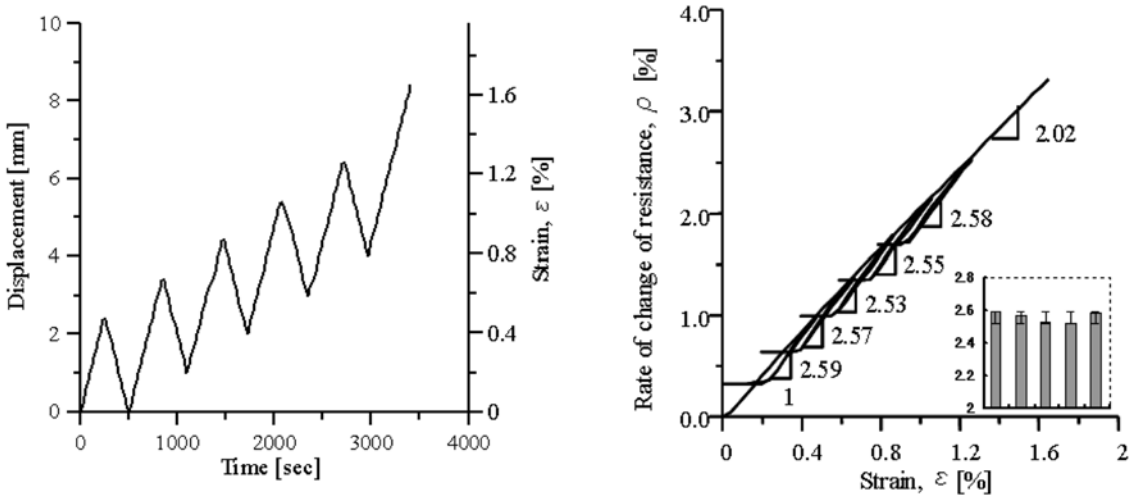

그림 5. 반복적인 재하-제하-재재하를 통한 변형률 증가시의 상관관계

$$R = (|\Delta V^{+}| + |\Delta V^{-}|)/I \quad (4)$$

여기서, ΔV^{+}, ΔV^{-}는 각각 다른 방향으로 인가된 전류로 인한 전위차, I는 전류이다.

변형 전 510 mm의 선을 인장 시험기에 설치한 후 변형 전 기준 450 mm 구간에서 저항을 변형과 동시에 계측하였다. 금속계 열선에 전극을 실버 에폭시를 이용해서 부착했다. 실버 에폭시가 충분히 굳도록 전극 설치 후 약 100°C의 온도에서 1시간이 경과한 후 시험을 수행했다.

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 k가 재료의 소성변형률에 의존하는 정도를 파악하기 위해 고안되었고, 두 번째 실험은 구조물의 공용 중에 노출되는 응력변동시에도 일관적인 상관도를 얻을 수 있는 지를 파악하기 위해 고안되었다.

4.2. 실험 결과 및 고찰

금속계 열선의 첫 번째 실험인 변형율 0~0.015에서 증가하는 반복변형을 가한 결과를 그림 5에 나타내었다. 재하시 상관계수 k는 2.02로 측정되었고 제하 및 재재하시 상관계수 k는 2.52~2.59로 5개의 구간에서 거의 일정한 값을 가졌다.

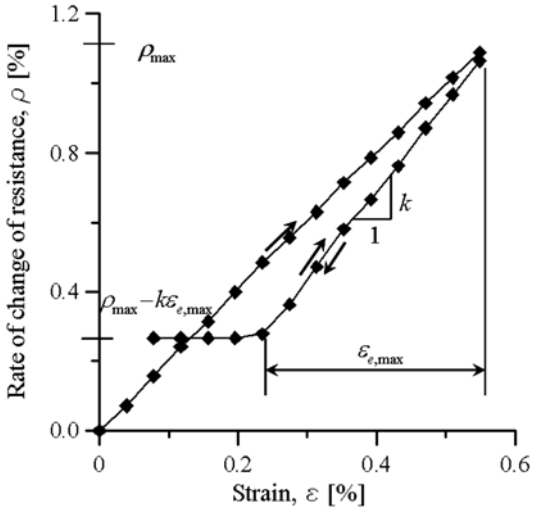

그림 6. 탄소성변형과 전기기계적 상관작용

제하-재재하의 상관계수 k는 거의 서로 일치하며, 서로 다른 최대 변형률에서 통계적으로 평균 2.56, 표준편차 0.02로서 재료물성치적인 특성을 지니고 있는 것으로 확인되었다. 탄소섬유는 제하 및 재재하시 상관계수 k가 재하시 상관계수보다 약 91% 더 작았으나, 대상으로 한 금속계 열선의 경우는 반대의 경우인 26.7% 큰 값이 얻어졌다. 이로 인해 측

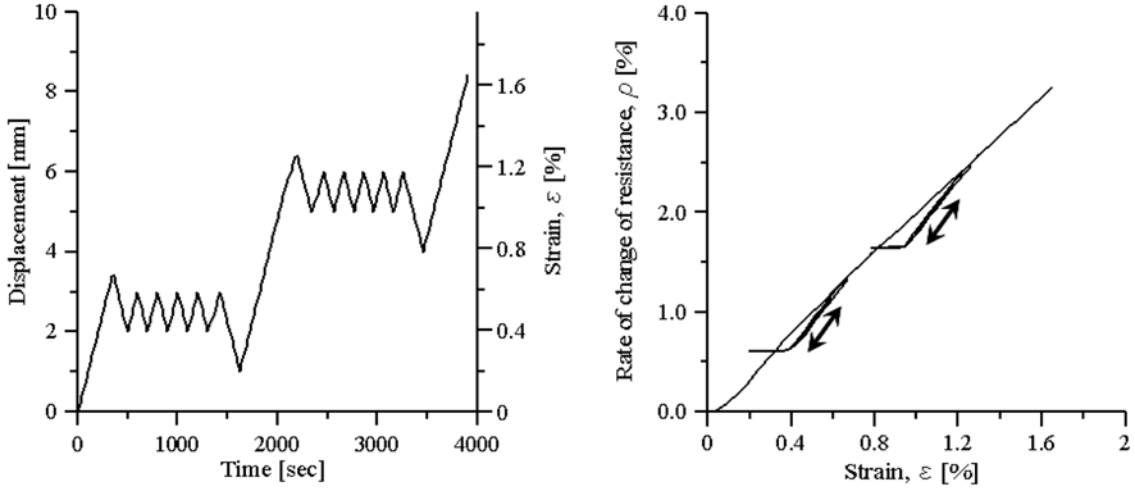

그림 7. 제하 후 탄성영역 내의 반복변형

정된 저항변화율로부터 변형률 추정이 용이하게 된다.

그림 6에 표시된 바와 같이 최대 변형률 $\varepsilon_{t,max}$ 이후 제하를 수행하면 최대 탄성변형률 $\varepsilon_{e,max}$가 회복되고, 이 과정에서 전기기계적 상관계수 k는 상수이다. 최대 탄성변형률 $\varepsilon_{e,max}$가 회복된 이 후 나머지 변형률 $\varepsilon_{t,max}$-$\varepsilon_{e,max}$은 소성변형률 이므로 더 이상 회복되지 못하고, 인장력과 상관계수가 모두 0이 된다(그림 6 참조). 그림 5의 실험결과에서 최대 탄성변형률은 0.28%~0.32%이다.

그림 6의 관계로부터 탄성영역에서 현재의 저항변화율 ρ에 대해 변형률 ε의 관계로서 완전소성론과 비슷한 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_{max}}{k} + \varepsilon_{t,max} \quad (5)$$

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

금속계 열선의 두 번째 실험인 탄성영역내의 반복실험을 통해 반복적인 하중에도 동일한 상관계수를 얻을 수 있는가를 확인하였다(그림 7). 소성 변형 후 탄성변형이 0.30%까지 회복되도록 제하하고 변동 폭 0.20%로 5회 반복재하 하였다. 그림 7과 같이 계측오차이외에는 차이가 보이지 않았다.

5. 작용응력 추정을 위한 재료의 선택

상술한 전기기계적 상관관계를 이용하여 작용응력 추정을 하기위해 고저항 전도체가 갖추어야 할 조건은 (1) 저항이 일반 전도체보다 커서 측정이 용이해야하며, (2) 소성변형한 후 탄성회복 k시 상관계수 k가 일정해야 하며, (3) 추가변형 혹은 회복 시에도 상관계수 k가 일정해야 하며, (4) 최대 변형률에도 사용할 고저항 전도체가 파단되지 않고, (5) 그 변형률에서 탄성회복이 뚜렷하고 상관계수 k가 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 k의 값이 일정하다. 또한 변형률 0~0.015 구간에서 탄성회복이 뚜렷하고 상관계수 k가 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.

6. 내부 긴장력 계측이 가능한 프리스트레스 긴장재 제안

6.1. 생산방법

긴장재의 경우 저항이 매우 작기 때문에 전기기계적 상관관계를 직접 사용하여 작용응력을 측정할 수는 없다. 따라서 고저항 전도체인 금속계 열선를 병렬 연결하여 간접적으로 작용응력을 측정하게 된다. 긴장재 자체가 전도체이므로 고저항 전도체를 붙이기 전에 긴장재를 절연처리하거나 에폭시 코팅된 긴장재를 사용한다. 고저항 전도체는 에폭시를 이용하여 붙이며 긴장재와 완전 일체 거동을 하도록 해야 한다. 그림 8은 내부 긴장력 계측이 가능한 긴장재의 생산방법을 나타낸다.

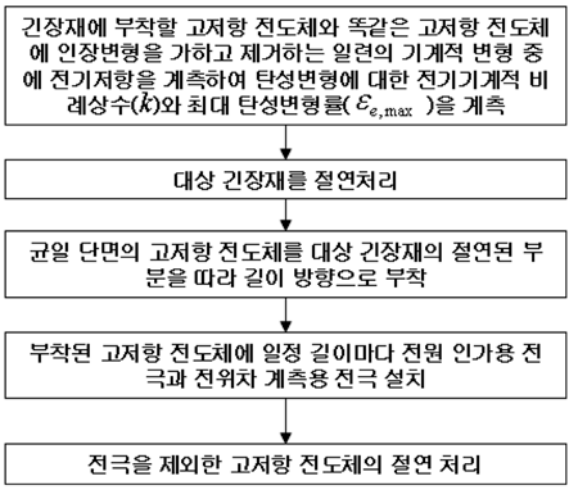

그림 8. 긴장력 계측이 가능한 긴장재의 생산방법

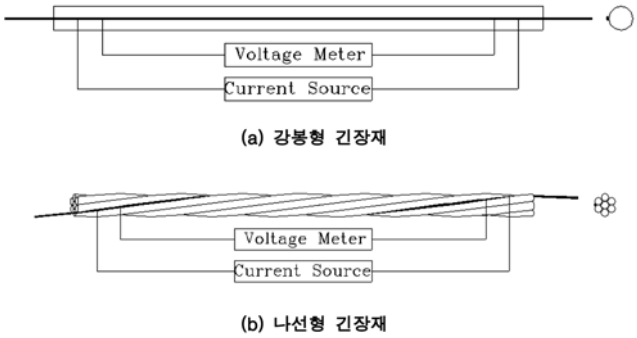

그림 9. 긴장력 계측이 가능한 긴장재의 생산방법

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

6.2. 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 k가 다르므로 식 (5)를 이용하여 변형률을 계산한다. 일반적으로 긴장재는 긴장한 직후 장착장치를 설치하기 전에 최대 변형률 $\varepsilon_{t,max}$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 최대변형이 되는 시점을 예상하거나 일정 시간별 저항측정을 통해 최대 저항변화율 ρ_{max}를 측정한다.

$$\varepsilon_{t,max} = \frac{\rho_{max}}{k_i} \tag{6}$$

여기서, k_i는 초기 재하시 상관계수이다. 본 연구에서 사용된 금속계 열선은 그림 5에 보인바와 같이 k_i는 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 변형율 ε_L과 고저항 전도체의 변형률 ε_l은 같으므로 식 (5)에서 구한 변형률을 직접 이용할 수 있다. 그러나 연선형 긴장재의 경우는 나선형으로 고저항 전도체를 부착하므로 긴장재의 변형율 ε_L과 고저항 전도체의 변형률 ε_l이 다르고 다음과 같은 관계를 가진다(부록).

$$\varepsilon_L = \sqrt{\frac{8l^2 + 4\nu D^2\theta^2}{4l^2 - D^2\theta^2}\varepsilon_l + 1} - 1 \tag{7}$$

여기서, D는 긴장재의 직경, L과 l은 각각 긴장재와 고저항 전도체의 길이이며, θ는 감긴 각도, ν는 긴장재의 포아송비이다.

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

7. 결 론

1. 작용응력의 계측이 가능한 고저항 전도체의 조건을 제시하였고 탄소섬유과 금속계 열선이 전기기계적 상관작용을 실험적으로 검증하였다. 탄소섬유는 전기기계적 상관 계수가 크지만 같은 변형률에서 제하와 재재하시의 상관관계가 크게 차이나서 작용응력 예측재료로서는 부적합하다.
2. 본 연구의 부수적인 결론으로서 함침되지 않은 탄소섬유의 경우 특정변형률 이 후 그 전기기계적 상관관계가 더 이상 포물선 형태가 아니며 선형으로 거동하는 현상이 관찰되었으며, 이에 대한 추가적 연구가 필요하다. 금속계 열선은 작용응력의 계측에 필요한 조건을 잘 갖추었다.
3. 금속계 열선은 재하와 제하 및 재재하시의 다른 상관계수 k가 일정하며 탄성구간내에서 반복적인 변형에도 일정한 관계를 나타냈다. 이러한 특성을 고려하여 완전소성거동과 비슷한 저항변화율로부터 변형률을 계산할 수 있는 간단한 식을 제안하였다.
4. 본 연구는 전기기계적 상관 작용을 이용해 긴장력 계측이 가능한 긴장재의 제작방법 및 계측방법에 관해 제안하였다. 긴장재의 제작시 긴장재와 열선의 일체화와 절연처리 등의 문제점이 고려되어야 하며, 일체화와 절연처리의 가능성을 가정하였으므로 검증을 위한 실험적 연구가 추가적으로 요구된다.

감사의 글

본 논문은 2005년 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-003-D00387)과 건설교통부가 출연하고 한국건설교통평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업 05 건설핵심 D11의 지원으로 이루어 졌습니다.

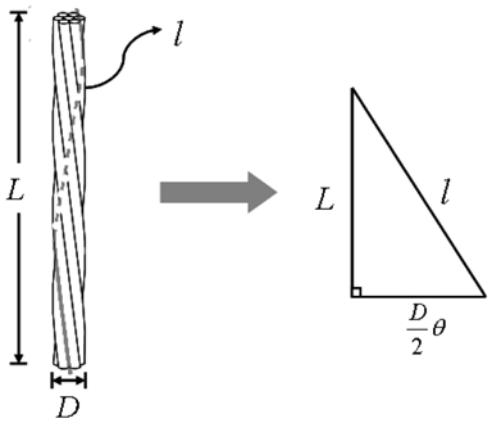

그림 10. 연선형 긴장재의 적합조건

부록: 연선형 긴장재와 고저항 전도체의 적합조건

강연선의 종방향 길이와 고저항 전도체의 길이는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\underline{r} = \frac{D}{2}\cos t\underline{e}_1 + \frac{D}{2}\sin t\underline{e}_2 + L\underline{e}_3 \tag{8}$$

$$\frac{d\underline{r}}{dt} = -\frac{D}{2}\sin t\underline{e}_1 + \frac{D}{2}\cos t\underline{e}_2 + \frac{dL}{dt}\underline{e}_3 \tag{9}$$

$$l = \int_0^\theta \underline{t}\frac{d\underline{r}}{dt}dt$$

$$\left(\underline{t} = \frac{d\underline{r}}{dt}\Big/\left|\frac{d\underline{r}}{dt}\right|\right)$$

$$= \int_0^\theta \frac{d\underline{r}}{dt}\frac{d\underline{r}}{dt}\Big/\left|\frac{d\underline{r}}{dt}\right| d\underline{r} \tag{10}$$

$$L = \sqrt{l^2 - \left(\frac{D}{2}\theta\right)^2} \tag{11}$$

여기서 r은 고저항 전도체의 기하학적 형태함수, D는 긴장재의 직경, L과 l은 각각 긴장재와 고저항 전도체의 길이이며, θ는 둘레방향으로 감긴 각도이다(그림 10).

식 (11)으로부터 긴장재의 변형률이 ε_L일때 고저항 전도체의 변형율 ε_l은 다음과 같이 표현된다.

$$l' = l(1+\varepsilon_l) \tag{12}$$

$$L' = \sqrt{l^2(1+2\varepsilon_l) - \frac{D^2(1-2\nu\varepsilon_1)}{4}\theta^2}$$

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L'-L}{L} = \frac{L'}{L} - 1$$

$$= \frac{\sqrt{l^2(1+2\varepsilon_l) - \frac{D^2(1-2\nu\varepsilon_1)}{4}\theta^2}}{\sqrt{l^2 - \frac{D^2}{4}\theta^2}} - 1 = \sqrt{\frac{8l^2 + 2\nu D^2\theta^2}{4l^2 - D^2\theta^2}\varepsilon_l + 1} - 1 \tag{13}$$

여기서, L', l'은 변형 후 긴장재와 고저항 전도체의 길이이다.

참고문헌

신호상 (1999) 프리스트레스력 측정방법에 대하여. **건설기술정보**, 한국건설기술연구원, 통권191호 pp. 6-11.

Abry, J. C., Bochard, S., Chateauminois, A., Salvia, M., and Giraud, G. (1999) In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements. *Comput Sci. Technol.,* Vol. 59, No. 6, pp. 925-935.

Abry, J. C., Choi, Y. K., Chateauminois, A., Dalloz, B., Giraud, G., and Salvia, M. (2000) In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements. *Comput Sci. Technol.* Vol. 61, No. 6, pp. 855-864.

Angelidis, N., Wei, C. Y., and Irving, P. E. (2004) The electrical resistance response of continuous carbon fibre composites laminate to mechanical strain. *Composites* A, Vol. 35, No, 10, pp. 1135-1147.

Azizinamini, A., Keeler, B. J., Rohde J., and Mehrabi, A. B. (1996) Application of a New Nondestructive Evaluation Technique to a 25-Year-Old Prestressed Concrete Girder. *PCI Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 82-95.

Chen, H.-L. and Wissawapaisal, K. (2001) Measurement of tensile forces in a seven-wire prestressing strand using stress waves. *J Eng. Mech.,* Vol. 127, No. 6, pp. 599-606.

Chen, H.-L. and Wissawapaisal, K. (2002) Application of wigner-ville transform to evaluate tensile forces in seven-wire prestressing strands. *J. Eng. Mech.*, Vol. 128, No. 11, pp. 1206-1214.

Cho, J. W. and Choi, J. S. (2000) Relationship between electrical resistance and strain of carbon fibers upon loading. *J. App. Polym. Sci.*, Vol. 77, No. 9, pp. 2082-2087.

Civjan, S. A., Jirsa, O., Carrasquillo, R. L. and Fowler, D. W. (1995) *Method to Evaluation Remaining Prestress in Damaged Prestressed Bridge Girders,* Texas Department of Transportation.

di Scalea, F. L., Rizzo, P. and Seible, F. (2003) Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves. *J. Mater. Civil. Eng.,* Vol. 15, No. 3, pp. 219-227.

Kim, S. J., Kim, M. S., Shin, S. R., Kim, I. Y., Kim, S. I., Lee, S. H., Lee, T. S. and Spinks, G. M. (2005) Enhancement of the electromechanical behavior of IPMCs based on chitosan/polyaniline ion exchange membranes fabricated by freeze-drying. *Smart Mater Struct.*, Vol. 14, No. 5, pp. 889-894.

Kupke, M., Schulte, K., and Schuler, R. (2001) Non-destructive testing of FRP by D.C. and A.C. electrical methods. *Comput Sci. Technol.* Vol. 61, No. 6, pp. 837-847.

Li, H., Zhou, W. S., and Ou, J. P. (2004) Study on electromechanical behavior of unidirectional carbon fibre sheet without epoxy resin matrix. *Adv. Struct. Eng.*, Vol. 7, No. 5, pp. 437-445.

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., and Takeda, N. (2003) New concept for modeling the electromechanical behavior of unidirectional carbon-fiber-reinforced plastic under tensile loading. *Smart mater. struct.*, Vol. 12 No. 1, pp. 105-114.

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.

Prasse, T., Michel, F., Mook, G., Schulte, K., and Bauhofer, W.A (2001) A comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates. *Comput. Sci. Technol.,* Vol. 61, No. 6, pp. 831-835.

Saiidi, M., Douglas, B., and Feng, S. (1994) Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges. *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 2233-2240

Sevostianov, I. and Kachanov, M. (2000) Microcracking in Piezoelectrics Weakens the Electromechanical Coupling and Changes Its Directionality. *Int. J. fracture.,* Vol. 101, No. 3, pp. 1-8

Xu, M. X., Liu, W. G., Gao, Z. X., Fang, L. P., and Yao, K. D. (1996) Correlation of change in electrical resistance with strain of carbon fiber-reinforced plastic in tension. *J. App. Polym. Sci.*, Vol. 60, No. 10, pp. 1595-1599.

(접수일:2005.11.4/심사일:2006.1.31/심사완료일:2006.2.14)