

금속합금선의 소성 압전 특성

Plastic Piezoresistivity of a Steel-Alloy Wire

지광습* · 진기우** · 강진구***
Zi, Goangseup · Jun, Kiwoo · Kang, Jingu

ABSTRACT

We studied the piezoresistivity of a steel-alloy wire when the deformation exceeds the elastic limit. It is that the piezoresistivity of the steel-alloy wire could be modeled by a bilinear function. To predict the plastic piezoresistivity relation, we developed a simple plastic piezoresistivity model based on the classical hardening plasticity. If structural members such as prestressing tendons in concrete structures are concerned, it is a very efficient and simple tool for monitoring.

Keywords: Electromechanical relation, steel alloy, plastic piezoresistivity, estimation of in-situ stress

1. 서론

최근에 구조물의 안정성에 대한 모니터링을 위해, 구조물의 변형 및 손상을 정확하게 측정할 수 있는 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 압전(piezoelectric) 센서, 광섬유(optical fiber) 센서, 음향 감지법(acoustic emission) 등 수많은 비파괴 검사와 센서 시스템들이 개발되고 있다.

고체 재료에 응력이 작용하여 변형이 일어나면 전기저항이 바뀌게 되는데 이것을 전기기계적 상관작용(electromechanical relation) 또는 압전성(piezoresistivity)이라고 한다. 대부분의 변형을 계이저는 센서의 역학적 변형과 전기저항 변화 사이의 선형적 상호관계를 기초로 하여 설계한다. 만약 구조물에 어떤 변형이나 손상이 생겼을 때 전기저항의 변화를 측정할 수 있고, 그 관계 또한 일정하다면 압전성을 기초로 한 기술은 구조물의 안정성을 쉽고 간편하게 모니터링 할 수 있는 유용한 방법이다.

본 연구에서는 금속합금선(steel-alloy wire)의 압전성에 대한 다양한 변형경로(deformation history)를 관찰하였고, 응력-변형률 그래프에서 소성영역을 벗어나는 부분까지 연구하여 금속합금선의 소성 압전성의 특성을 확인하였다.

2. 전도체의 압전성

전도체의 전기저항은 고체에 변형이 생김에 따라 변화한다. 일차원 선형탄성 변형의 경우에는 다음과 같이 표현될 수 있다.

* 정희원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 조교수 Email: g-zi@korea.ac.kr
** 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사 Email: junkiwoo@korea.ac.kr
*** 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 Email: jjg81@korea.ac.kr

$$\rho = \alpha \epsilon \quad (1)$$

여기서 $\rho = \Delta R/R_0$ 는 저항변화율, ΔR 는 저항변화량, R_0 는 변형이 없을 때의 초기 저항, α 는 상관계수(gage factor)라는 비례상수이다. ϵ 는 일차원 선형탄성의 변형률(σ/E)이고, σ 는 작용한 응력, E 는 탄성계수이다. 3차원 변형에서도 역시 비슷한 관계를 갖지만 매우 복잡하게 된다(Sevostianov 등, 2000). 식(1)은 단지 선형관계에서 표현된 것이고, 만약 소성변형, 손상 등에 의한 어떤 비선형 효과가 발생된다면, 식(2)와 같은 변형경로(deformation history)에 의존하게 된다.

$$\dot{\rho} = \alpha f(\epsilon, \dot{\epsilon}) \quad (2)$$

$\dot{\rho}$ 는 정규화된 저항의 비율이며, α 는 순간적인 상관계수이고, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률량이다.

단일방향 복합체에서 상관계수는 표준화된 저항과 변형률 ϵ 로부터 쉽게 측정할 수 있으며, 탄성영역에서의 상관계수는 일정하다.

표 1 금속합금 열선의 제원

시편 종류		filament 수	gage 길이 [mm]	변형 종류	변형 비율
금속합금	SA1	1	450	제하-제하-재제하	0.005
	SA2	1	450	탄성영역에서의 반복하중	0.005

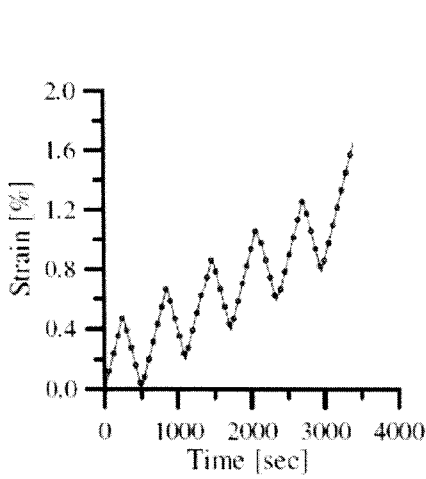
3. 실험재료 및 방법

직경 1mm의 원형단면의 철(Fe)은 약 $0.123\Omega/m$ 로 매우 작은 저항이므로 일반적인 멀티미터(multimeter)로는 정확하게 측정할 수가 없다. 그렇기 때문에 전원으로서는 DC 10mA를 양단에 인가하고, 전위차를 전위차계를 이용하여 계측한 후 저항을 측정하였다. 또한 접촉저항에 의한 오차를 제거하기 위해 전류 방향이 반대 일 경우의 전위차도 계측하여 다음 식과 같이 절대값의 평균치를 사용하였다.

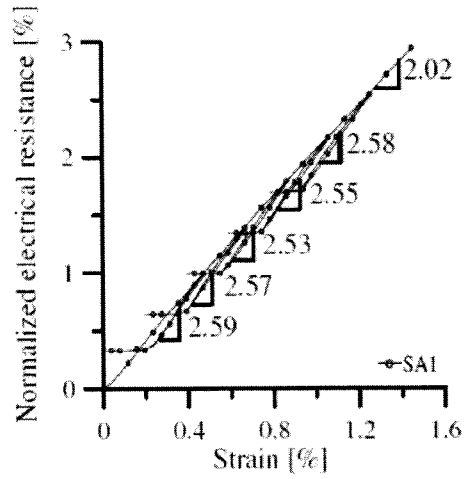
$$R = (|\Delta V^+| + |\Delta V^-|) / 2I \quad (3)$$

여기서, ΔV^+ 과 ΔV^- 는 각각 다른 방향으로 인가된 전류로 인한 전위차이고, I 는 전위이다. 금속합금선의 시편 SA1과 SA2를 준비하였으며, 자세한 것은 표1에 나타내었다. 금속합금선의 시험은 반복적인 제하-제하-재제하를 통하여 전반적인 변형률을 2%까지 증가시켰으며, 초기 길이는 510mm로 하여 변형률을 계산하였다. 시편 SA1의 변형률은 그림1에서와 같이 5회의 제하-제하-재제하를 반복하여 증가시켰다. 이 반복제하과정에서 변형률의 변화는 금속합금선의 항복변형률 $\epsilon_y = 0.3\%$ 보다 큰 0.4%로 측정되었다.

시편 SA2는 소성 변형 후 탄성변형이 0.30%까지 회복되도록 제하하고 5회 반복제하를 하였다. 그림3과 같이 앞의 반복제하에 영향을 받지만, 탄성영역에서 수행하였기 때문에 그 변형률은 항복변형률보다 작은 0.2%로 측정되었다.



(a) 변형경로(The deformation history)



(b) 압전성(piezoresistivity)

그림 1 시편 SA1의 반복적인 재하-제하-재재하를 통한 변형을 증가시의 상관관계

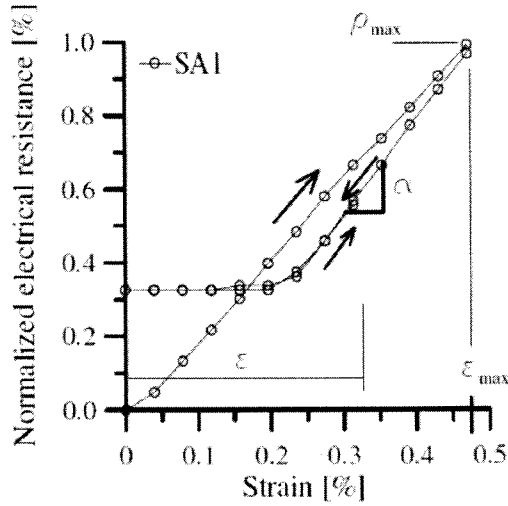


그림 2 시편 SA1의 탄소성형과 압전성

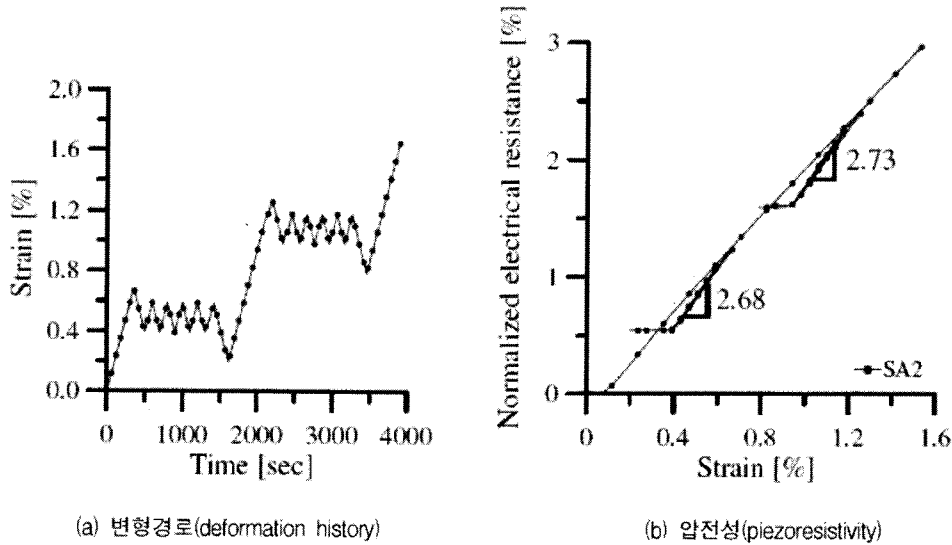


그림 3 시편 SA2의 제하 후 탄성영역 내의 반복변형

4. 실험 결과

시편 SA1의 시험결과는 그림1과 그림2에 나와 있다. 금속합금의 압전성은 이차곡선으로 특징지어질 수 있는 것으로 발견되었다(그림1). 탄성영역에서 저항의 변화는 선형적이고, 항복 변형률 $\epsilon_y = 0.3\%$ 이 초과되면 그 반응은 다른 선형 곡선이 되어 다른 두 상관계수를 얻을 수 있었다. 소성변형의 $\alpha_l = 2.02$ 이고 탄성영역에서 제하와 재제하의 α_u 와 α_r 는 2.53부터 2.59까지이며, 그림2의 수평선은 그 효과 때문이다. 금속합금선은 탄성변형 회복 후에는 압축에 저항할 수 없기 때문에 유효한 변형률의 변화는 없었다. 탄성영역에서의 상관계수는 시편에 하중이 제거됐을 때의 최고 변형률에 의존하여 다소 흩어져있지만 평균값은 2.56이고 표준편차 계수는 0.02으로 재료물성치적인 특성을 지니고 있는 것으로 확인되었다. 탄소섬유의 제하-재제하시 상관계수는 재하시 상관계수보다 작은 약91%였지만, 금속합금선의 경우는 26.7% 큰 값이 얻어져 탄소섬유와는 반대인 결과를 보였다.

제하에서의 관계는 그림2와 같이 재제하 동안에 비슷한 반복이 일어나는 것으로 보아, 탄성영역에서의 여러번 반복되는 변형과정의 그 관계는 가역적인 것으로 보인다. 이런 거동은 소성이론에서의 응력-변형률 관계와 매우 유사하다.

소성계로가 일축으로 변형이 될 때, 응력 변형률 거동은 탄성영역에서는 선형이지만, 응력이 항복강도에 도달하면 더 큰 변형이 일어나더라도 더 이상의 응력은 증가하지 않는다. 만약 어떤 경화된 메카니즘이 있다면, 그것은 다른 선형 곡선의 거동이 된다. 이러한 거동은 디스로케이션(dislocation)의 움직임에 의한 것이고 소성이론에 의해 잘 모델화된다. 또한 금속합금선의 소성 특성은 (탄소섬유의)파괴로 손상에 의해 일어나는 메카니즘과는 상당히 다르다. 금속합금선 압전성의 이차 거동은 경화된 소성 모델의 응력 변형률 관계와 매우 비슷하므로, 소성 압전성 모델은 소성이론을 기초로 하여 표현할 수 있다.

압전성의 탄성거동은 탄성 응력-변형률 관계에서 탄성계수를 상관계수로 대체함으로써 얻을 수 있다.

$$\rho = \alpha \epsilon_e = \alpha (\epsilon - \epsilon_p) \quad (4)$$

여기서, ϵ_e 는 탄성변형률이고 ϵ_p 는 소성변형률이다. 소성변형률의 비율 $\dot{\epsilon}_p$ 는 다음 식에 의해 주어진다.

$$\dot{\epsilon}_p = \gamma \text{sign}(\rho_{eff}) \quad (5)$$

여기서 γ 는 슬립률이고, $\rho_{eff} = \rho - q_p$ 는 정규화된 저항의 효과이며, q_p 는 소성이론의 배후응력과 유사한 배후저항이다. 배후 저항의 비율은 다음 식에 의해 주어진다.

$$\dot{q}_p = \gamma H \text{sign}(\rho_{eff}) \quad (6)$$

여기서 H 는 운동성 경화 계수이다. 소성론에 기초하여 모델식을 표현하기 위해 항복 곡면을 다음식으로 정의 하였다.

$$f(\rho, q) = |\rho_{eff}| - \rho_y \leq 0 \quad (7)$$

여기서 ρ_y 는 항복곡면에 정의된 항복저항이다. 실험에서 탄성영역의 크기가 일정하게 관찰되기 때문에 등방성 경화 계수를 도입하지 않았고, 제하와 재재하의 압전성의 수직 높이는 거의 일정하게 나타난다(그림1). 식 (4), (7)을 풀면, 변형률 증가에 의존하는 정규화된 저항변화에 대한 증분 식을 얻을 수 있다. 실험 데이터에 가장 적합한 차원이 없는 $\alpha=2.56$, $H=9.58$ 과 $\rho_y=0.67$ 을 사용하여 얻어진다. 시편 SA1에 최적화된 모델은 그림4에 주어졌으며, 모델에 의한 가정과 실험데이터 사이에는 거의 차이가 없었다.

PSC 구조물의 철근에 대한 변형률 변화를 고려하여 보면, 처음 만들어 졌을 때의 초기 변형은 최고이고 시간이 흐른뒤에는 점점 감소한다. 프리스트레스된 철근이 설치되었을 때의 초기 변형률은 보통 약 0.7% 이고 그것은 철근 소성변형률의 보통 두배이다. 그러므로 초기 프리스트레스된 힘을 받았을 때, 철근은 소성거동에 의해 지배받으며, 변형률은 정규화된 저항으로부터 쉽게 계산될 수 있다. 만약 세 개의 변수가 제작 초기에 기록된다면 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\rho - \rho_{max}}{\alpha} + \epsilon_{max} \quad (8)$$

여기서, ρ_{max} =최대 저항변형률이고, ϵ_{max} =프리스트레스 힘을 받았을 때의 최고 변형률이며, α 는 간단한 실험으로 쉽게 결정할 수 있는 탄성영역에서의 상관계수를 나타낸다. 이 변수들의 도식적인 의미는 그림3에 나타나 있다.

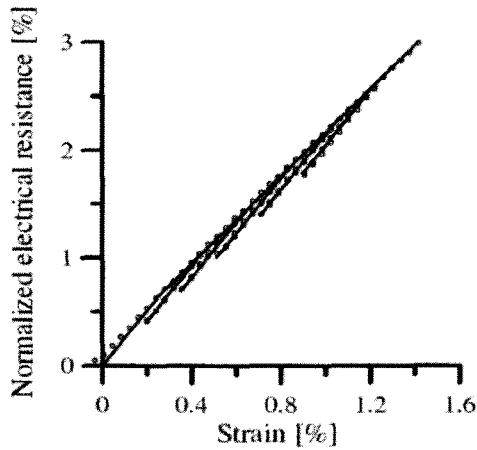


그림 4 소성 압전성 모델에 의해 데이터 적합된 시편 SA1

5. 결론

(1) 크롬과 알루미늄이 첨가된 금속합금선의 압전성은 재료의 기계적인 변형에서 관찰되는 소성 응력-변형률 관계와 유사하다. 본 논문에서 개발한 소성 압전성 관계는 소성이론에 의해 기초하고 있다.

(2) PSC강재와 같이 초기에 가장 큰 변형에 노출되고, 그 후 점진적으로 변형이 줄어드는 경우, 본 소성압전 특성을 이용하면, 매우 경제적이고 간단하게 작용응력을 모니터링 할 수 있다. 이를 위해 최대 변형률과 최대 저항치를 최대 변형시점에 미리 측정해야 한다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부의 재원으로 한국한술진흥재단의 지원(KRF-2005-03-D0387)과 건설교통부가 출연하고 한국건설교통평가원에서 위탁 시행한 건설핵심기술연구개발사업의 지원(05-건설핵심-D11)으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- Zi,G., Jun,K., Oh,H., and Lee,D.H. (2007) A comparative study of piezoresistivity of carbon fibers and a steel-alloy wire, *Smart Materials & Structures*, submitted.
- 지광습, 전기우 (2006) 고저항 전도체의 전기기계적 상관작용과 작용응력 예측, *대한토목학회논문집*, 26(2A), pp.363~370.
- D.D.L.Chung. (2001) Structural health monitoring by electrical resistance measurement, *Smart Materials & Structures*, 41(4), pp.624~636.
- I.Sevostianov and M.Kachanov. (2000) Microcracking in piezoelectrics weakens the electromechanical coupling and changes its directionality, *International Journal of Fracture*, 101(3), pp.L3~L8.