

열연코일 포장밴드의 응력 도출

Investigation on Stresses on Tie Band Used to Wrap Hot Rolled Coils

김영광¹, 박재호¹, 이정운¹, 정일섭², *이종선¹

Y. K. Kim¹, J. H. Kwak¹, J. W. Lee¹, I.S. Jung², *C.S. Lee(cslee@handong.edu)¹

¹ 한동대학교 기계제어공학부, ²영남대학교 기계공학과

Key words : Tie Band, Hot Rolled Coil, Stress

1. 서론

제철소의 코일 포장 작업 시에 밴드 결속수 기준이 과학적 근거 없이 제품별로 상이하게 설정 운영되고 있다. 유사한 강도 및 조건의 코일간 밴드 결속 수의 차이가 2.5배까지 발생하고 있으며 권취코일의 결속수에 대한 공학적 근거가 설정될 경우, 작업부하 경감 및 재료비 절감이 예상된다.

밴드의 역할은 탄소성 변형 후에 남은 탄성회복, 즉 스프링 백(Spring Back)에 의한 풀림을 방지하기 위함이며, 밴드의 또 다른 역할은 권취 코일의 전체적인 안정성(stability)을 높여 이송 또는 보관중의 충격으로부터 보호를 위한 것으로 평가된다.

본 연구에서는 스프링 백의 기본 이론식과 열연코일밴드의 응력-변형을 실험을 통해 열연코일의 제품 특성(강종 및 판 두께, 크기)에 따라 포장밴드에 걸리는 스프링백 응력을 예측할 수 있는 수식을 개발하고자 한다. 도출된 예측식을 사용하면 기존의 밴드 결속 수를 평가하며 새로운 결속 수 안을 마련하는 기초자료로 활용될 수 있다.

연구 대상은 일반강 열연제품으로 두께 1.5mm에서 20mm 사이, 폭 730mm에서 1860mm 사이, 항복강도 200에서 600MPa 사이, 코일 중량 8톤에서 35톤 사이, 코일 내경 760mm인 열연제품이다. 결속 밴드는 단면 0.9mm x 32mm, 인장강도 95kgf/mm², 연신율 10%, 비커스 경도 260이다. 실험은 접근 용이성을 고려하여 리코일이 일어나는 현장에서 실시하였다.

2. 밴드 응력 이론식

현장의 작업조건(코일 지름, 강판의 두께, 코일링시의 장력)을 분석한 결과, 권취 코일은 약 1% 이내의 최대변형률을 나타내므로 변형경화를 고려하지 않은 탄성-완전 소성변형 재료모델이 가능하며, 권취시의 장력에 의한 인장응력의 크기가 항복응력의 10% 정도로 계산되므로 코일링시의 장력을 무시한 채 스프링백 응력에측이 가능하다고 판단된다. 이에 따라 코일소재를 완전 탄소성 강으로 가정하면 밴드에 걸리는 스프링백 응력의 기본 이론식은 다음과 같이 유도된다.

그림 1에서 소성변형을 위해 코일에 축적된 모멘트가 모두 탄성회복한다고 가정하면 식 (1)에서 복원 모멘트 $M_{internal}$ 이 계산된다.^{1,2}

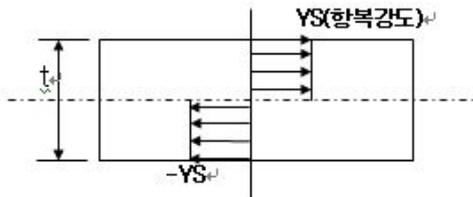


Fig. 1 Stress acting on coils under plastic deformation

$$M_{internal} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y \cdot b \cdot dy = \sigma_y \cdot b \int_{-t/2}^{t/2} y \cdot dy = \frac{1}{4} \sigma_y \cdot b \cdot t^2 \quad (1)$$

여기서, t: 코일 두께, b: 코일 폭, σ_y : 항복강도이다.

감긴 코일의 밀어내는 힘에 의해 포장 밴드에 걸리는 힘은

쉽게 구하기 위해 그림 2에서처럼 복원모멘트를 코일반경으로 나눈다. 한편 밴드장력은 힘의 평형조건에 의해 반발력을 반으로 나누면 된다. 그러므로 밴드에 걸리는 장력(T)과 밴드응력(σ_b)은 식 2로 표현된다.

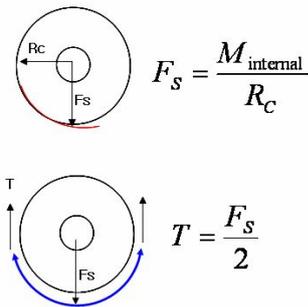


Fig. 2 Tensile force analysis acting on tie bands

$$T = \frac{1}{8} \frac{\sigma_y \cdot b \cdot t \cdot c^2}{R_c \cdot N_b} \rightarrow \sigma_b = \frac{1}{8} \frac{\sigma_y \cdot b \cdot t \cdot c^2}{R_c \cdot N_b \cdot A_b} \quad (MPa) \quad (2)$$

위 수식에서 각 변수의 의미는 다음과 같다.

σ_y : 항복강도(MPa), b: 코일 폭(mm), t: 코일두께(mm), R: 코일반경(mm), N: 밴드개수, A: 밴드단면적(mm²), 아래첨자c:코일, 아래첨자b: 밴드. 식 (2)는 코일의 탄성회복에 대하여 간단히 모델링하여 구한 이론식이며 코일의 겹 수가 많고 겹판 사이의 마찰력도 존재하므로 수식의 비례상수 1/8을 그대로 사용하지 않고 실험을 통해 결정한다.

3. 응력측정시스템의 구성

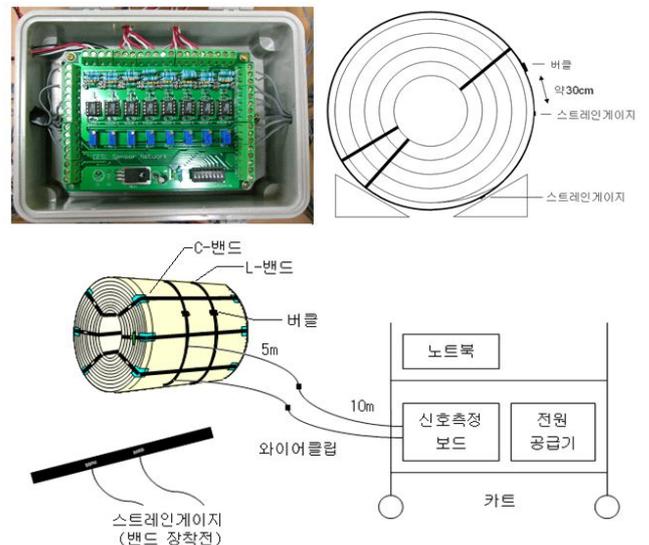


Fig. 3 Stress measurement system

스트레인게이지를 밴드에 부착하여 작업현장에서 응력이 측정될 수 있도록 측정 시스템을 구성하였다. 게이지의 신호를

픽업하는 브릿지회로와 신호증폭을 위한 계측증폭기회로를 연결하여 8채널의 응력을 측정할 수 있도록 PCB기판을 자체 제작하였으며, 더미게이지를 사용하여 온도에 따른 영향을 보정하였다.

그림3에는 제작된 측정보드와 센서부착 상황을 나타내었다. 측정신호는 NI사의 PCMCIA-6014데이터 수집 보드를 통해 노트북에 연결되며 랩뷰 프로그램을 통해 디스플레이 및 저장되었다. 현장의 접근상황을 고려하여 게이지 와이어의 길이를 15m로 연장할 수 있도록 하였고 100Hz의 샘플링을 사용하였다.

그림 3에서 밴드를 코일에 장착하기 전에 밴드가 퍼진 상태에서 스트레인이게이지를 미리 밴드에 부착하고 코일이 실험위치에 도착하면 밴드를 코일에 감는다. 코일 출하 현장에서 사용하고 있는 밴드결속수 기준에 의해 정해진 개수의 밴드가 감겨지면 공압기구를 사용하여 밴드를 조인다. 밴드가 다 조여지면 크레인 기사를 불러서 코일을 잠시 들었다가 놓도록 지시한다. C-밴드는 코일들이 빠져나오지 못하도록 주로 안정성을 확보하기 위한 역할을 하는 관계로 스프링백 응력이 별로 걸리지 않았으므로 L-밴드를 대상으로 실험을 수행하였다.

그림 4에는 스트레인이게이지를 사용한 응력 측정순서를 도시하였다. 기사자의 도움으로 스킵드(지지대) 위에 놓여진 코일에 접근하여 게이지가 장착된 밴드를 코일 외곽의 형상에 따라 곱히고 공압기구를 사용하여 밴드를 조여 버클을 체결한다. 크레인 기사를 부르면 코일을 50cm 정도 위로 들었다가 약 10초 후에 내려놓는다. 크레인에 의해 코일이 들리면 스프링백 현상 때문에 밴드의 응력이 순간적으로 증가하게 되며, 코일이 다시 스킵드에 놓여지면 밴드 응력이 다시 원상태로 돌아가게 된다. 필요에 따라 코일을 들었다가 놓는 작업을 반복하기도 하였다. 밴드의 숫자를 줄일 경우에 밴드에 걸리는 응력의 증가를 알아보기 위해 스킵드에 다시 놓여진 코일에서 밴드 1개를 제거한 후에 크레인으로 들어올려 스프링백에 의한 응력 변화를 측정하였다.

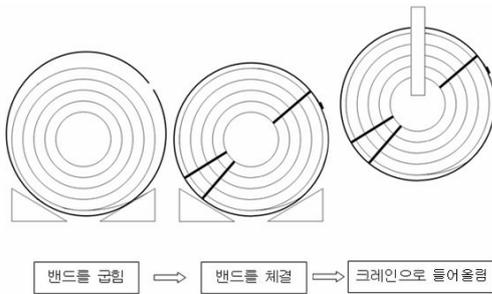


Fig. 4 Sequence for stress measurement

4. 결과

본 연구에서 응력을 도출할 때, 밴드의 곡률에 의한 응력은 밴드 체결부의 파손과는 관계가 적으므로 제거하였다. 선택된 12개 실험소재(두께, 항복강도, 중량, 반경, 폭 등이 다름)에 대하여 밴드의 체결로 인해 형성된 응력은 평균 151.7MPa와 표준편차 53.8MPa로 밴드 체결력의 편차가 코일에 따라 상당한 크기임을 알 수 있었다.

그림 5에는 스프링백 응력(체결응력을 뺀 순수 스프링백 응력을 의미함)에 대하여 실험값과 이론식의 회귀분석 기울기 계산 결과를 도시하였다. 수평축은 스프링백 이론식으로 구성되며, 수직축은 측정된 응력에서 체결응력을 뺀 순수 스프링백 응력에 해당된다. 그래프에서 네모는 밴드 제거 전의 값, 동그라미는 밴드 1개 제거 후의 값들을 각각 나타낸다.

그림 5에서 체결밴드가 두꺼울 경우 최대 110MPa 정도의 스프링백 응력이 발생하며 여기에 체결응력을 더하면 260MPa 정도이며, 두께가 얇은 밴드의 경우 스프링백 응력이 작아서 체결응력 보다 약간만 높은 응력이 걸리고 있음을 알 수 있다. 밴드 1개를 제거할 경우에 스프링백 응력은 상당히 증가함을

관찰할 수 있으며 두꺼운 코일의 경우 약 180MPa로 증가하였다. 회귀분석 직선의 기울기는 0.219로 계산되므로, 체결응력의 평균값 151.7MPa를 더하면 다음과 같은 한계 결속밴드의 응력에 예측식이 도출된다.

$$\sigma_b = 0.219 \times \frac{\sigma_c \cdot b_c \cdot t_c^2}{R_c \cdot N_b \cdot A_b} + 151.7 \text{ (MPa)} \quad (3)$$

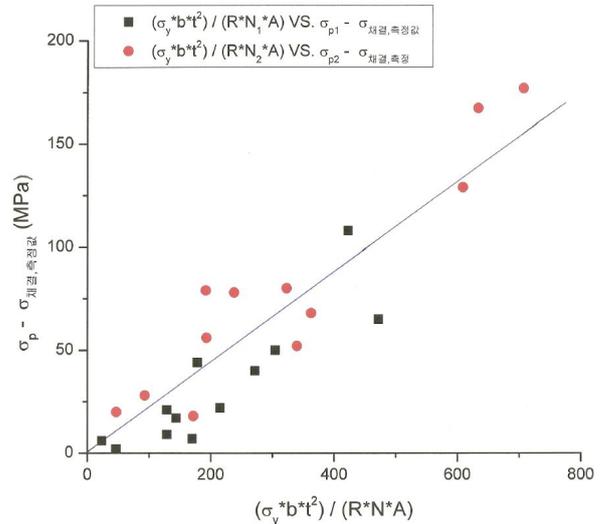


Fig. 5 결속 밴드의 순수 스프링백 응력과 이론식과의 관계

5. 결론

스프링백의 이론식을 유도하고 스트레인이게이지를 포장밴드에 장착하여 밴드의 응력을 측정할 수 있는 시스템을 개발하여 생산현장에서 실험을 수행한 후, 선별 기준에 의해 선택된 데이터(열연 리코일 현장 24회 중에서 12회 선택)에 대하여 응력분석을 하였다. 먼저 포장밴드의 인장테스트를 수행한 결과, 밴드버클부의 파단응력은 601±39MPa이며 밴드소재의 항복응력은 850MPa, 파단응력은 930MPa정도였으므로 밴드의 취약부는 밴드 버클부임이 밝혀졌다.

12개 소재의 밴드 체결응력 151.7±53.8MPa는 밴드버클부 파단응력값 601MPa의 약 1/4 수준이었다. 순수 스프링백 응력값(체결응력 제외)의 평균값은 33MPa, 밴드1개 제거시의 평균값은 79MPa로 급격히 증가하였다.

스프링백에 의한 응력은 항복강도, 폭, 두께제곱에 비례하고 반경(무게), 밴드개수에 반비례한다. 이론식을 실험결과에 맞추어 구한 스프링백 예측식의 기울기는 0.219이며 회귀분석 상관관계수 R값이 0.914로 매우 높아서 사용된 스프링백 이론식의 타당성에 무리가 없음을 알 수 있었다.

실험 분석된 소재의 평균 안전율(밴드버클의 파단응력 대비 밴드응력)은 3.26(체결응력+스프링백 응력=184±62MPa)이었으며, 밴드 1개를 제거할 경우에는 2.60(체결응력+스프링백 응력=231±88MPa)으로서 결속밴드는 밴드버클부 파단응력 601MPa에 대해 비교적 안전한 상태라고 볼 수 있다.

후기

본 연구는 포스코의 지원으로 수행되었으며, 실험 진행에 협조해 주신 분들께 감사드립니다

참고문헌

1. 박관금속의 이론과 실제, 반도출판사, 김기환
2. Mechanics of Materials, Prentice Hall, Hibbeler