

펄라이트 강 신선공정에서 공정조건의 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of Process Conditions in Wire Drawing of Pearlitic Steel

*#이용신¹, 윤상현¹, 남원종², 박경태³

*#Y-S Lee(yslee@kookmin.ac.kr)¹, S.H. Yoon¹, W.N. Nam², K.T. Park³

¹ 국민대학교 기계시스템공학부, ² 국민대학교 신소재공학부, ³ 한밭대학교

Key words : Process map, Pearlitic steel wire, Damage evolution, wire drawing

1. 서론

높은 인장 강도를 갖는 강선은 현수교의 주 케이블, 타이어의 보강재로 쓰이는 타이어 코드, 콘크리트 보강용 강선, 그리고 구조용 강선 등으로 널리 사용되어, 고강도 선재의 개발은 산업체의 많은 관심을 받아왔다. 일례로, 펄라이트 강 선재는 페라이트에 시멘타이트 조직이 존재하여 고강도를 갖도록 냉간 인발에 의해 제작된다. 이러한 펄라이트 강의 높은 강도는 일반적으로 연성을 낮게 제한하여 얻어지나, 펄라이트 강 선재의 시멘타이트 사이의 크기, 방향 및 간격 등의 미세조직의 구조와 펄라이트강의 강도와 연성과의 관계를 규명하는 연구가 많았고, 미세조직의 구조를 변화시켜 강도 및 연성을 조절하는 노력도 시도되고 있다[1-5].

Nam[6] 등은 펄라이트 강 선재의 연성을 제한하는 미세조직은 조직들간에 존재하는 미세기공의 성장에 의한 것으로 보고하였다. 한편, 미세기공이나 미세 크랙에 의한 소재의 파괴를 규명하는 연구들도 보고되었다[7-10]. 펄라이트 강의 신선 공정 중에 유발되는 미세조직의 변화는 신선된 소재의 강도와 연성에 영향을 주는 것은 물론 신선공정 자체의 성공여부에도 영향을 끼친다. 따라서 신선공정 중에 유발되는 미세기공의 성장과 그에 따른 소재의 파괴를 예측하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 펄라이트 강선의 인발공정을 유한요소 해석한 결과에, 결합성장 모델의 비교연구[11]를 토대로 Lee and Dawson의 결합성장 모델을 이용하여, 인발공정 중에 결합의 성장을 조사한다. 신선공정에서 다양한 단면감소율 및 다이 반각 등의 공정조건이 결합 성장에 미치는 영향과 신선공정의 성공여부를 조사 한다. 궁극적으로는 신선공정의 설계에 기초가 되는 펄라이트 강 선재 인발 공정의 기초자료를 제시한다.

2. 결합성장모델

본 연구에서는 Cockcroft et al.[7], Brozzo et al.[8], Oyane[9], Lee and Dawson[10] 등이 제시한 결합 성장모델을 비교한 연구[11]를 바탕으로 Lee and Dawson[10]의 결합성장모델을 이용한다.

Lee and Dawson은 기공률을 연성결함으로 정의하고 변형경화와 변형률 속도 경화를 갖는 금속재의 결합성장 모델을 제시하였다. 그들은 평균응력을 상태변수로 나눈 비를 지수함수 함수의 형태로 반영하였고, 결합 성장 속도가 현재 결함 크기에 의존하는 형태로 제시하였다.

$$d\phi_{Lee} = c_1 \frac{\phi}{1-\phi} \text{Exp}[c_2 \frac{\sigma_m}{\sigma^*}] d\epsilon_e \quad (1)$$

윗 식에서 σ^* 는 점소성 재료의 변형경화 상태를 나타내는 상태변수로 변형률 속도의존성이 없는 경우에는 경화를 반영한 항복응력을 사용하여도 큰 차이는 없다. 본 연구에서는 결합 해석을 위한 모델 상수 c_1, c_2 를 일축인장에서 파단시의 변형률에 도달하였을 때에 결함값이 파단결함값 (ϕ_f)이 되도록 구하였다.

3. 유한요소해석

신선공정의 유한요소해석은 정상상태 성형공정의 오일러리안 해석기법으로 개발된 Hickory를 이용하였다. Hickory에 사용된 상세한 유한요소 정식화 과정은 참고문헌[12]에 주어진다.

본 연구에서 사용한 펄라이트 강 선재의 물성은 인장시험으로 얻었으며 다음과 같다.

$$\sigma_e = 2675 (\epsilon_e + 0.002)^{0.2} \quad (2)$$

Fig. 1에서는 선재 인발 공정의 최대칭 유한요소 해석에 사용된 격자를 보여준다. Table 1에서는 해석에 사용된 단면감소율과 다이 반각의 값을 보여주고 있다.

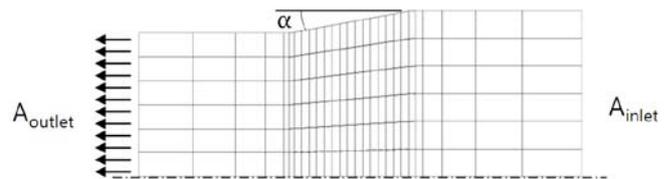


Fig. 1 Typical finite element mesh for wire drawing

Table 1 Data of area reduction ratio and die half angle

공정 조건	변수값				
단면감소율	5%	10%	15%	20%	25%
다이 반각	5°	6.5°	10°	15°	20°

4. 결과 및 분석

신선공정의 유한요소해석에서 출구에서는 일정속도를 가정하였고, 다이와 소재의 접촉에는 마찰경계조건을 적용하였다. 본 연구에서는 유한요소해석의 결과에 결합성장식 (1)을 적용하여 축적된 최대 결합 값 (ϕ_{max})이 파단시의 결합값 (ϕ_f)에 도달하면 신선된 소재에 파단이 발생하는 것으로 가정하였다.

신선공정에서 중요한 공정조건인 다이 반각과 단면감소율이 결합 성장에 미치는 영향을 조사하였다. 식(1)에서 주어진 바와 같이 결합성장에서 가장 주요인자는 평균응력이어서, Fig. 1에서는 단면 감소율이 20%일 때 다이 반각이 6.5°와 20°일 때의 평균응력 분포를 비교하였다. 다이 각이 커질수록 변형구역에서 평균응력이 커지고 있으며, Fig 2에서 단면 감소율이 10%와 15%일 때, 다이 반각이 커짐에 따라 최대 결합 값이 커지는 것을 보여주고 있다. 다이 반각이 10° 이상인 경우에는 단면 감소율이 10%와 15%인 경우 모두에서 최대 결합값이 파단 결합값에 도달하였다.

Fig. 2에서는 다이 반각이 10°인 경우에 단면 감소율의 변화에 따라 최대 결합 값의 변하는 것을 보여준다. 단면감소율이 증가함에 따라 최대 결합 값은 증가 후에 다시 감소하며, 단면 감소율이 10%와 15%인 사이에서 최대가 되고, 최대 결합 값은 파단 결합 값보다 커지는 것으로 조사되었다.

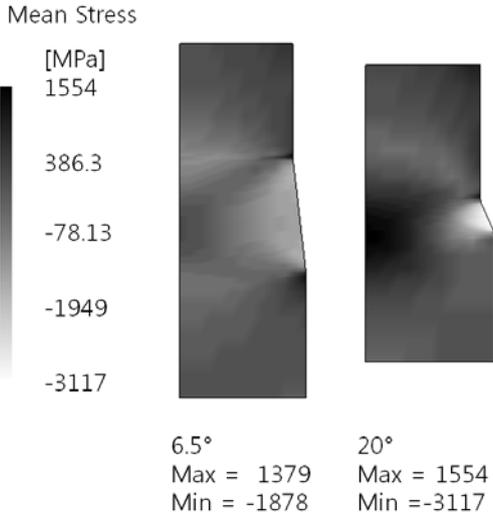


Fig. 1 Distribution of mean stress for the area reduction of 20%.

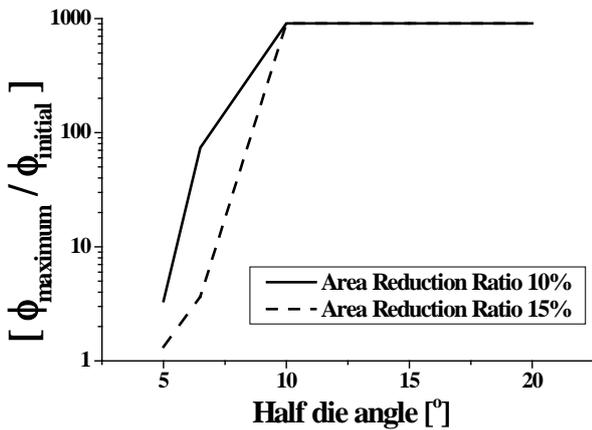


Fig. 2 Effect of the half die angle on the maximum accumulated damage in wire drawing with the area reduction ratio of 10% and 15%.

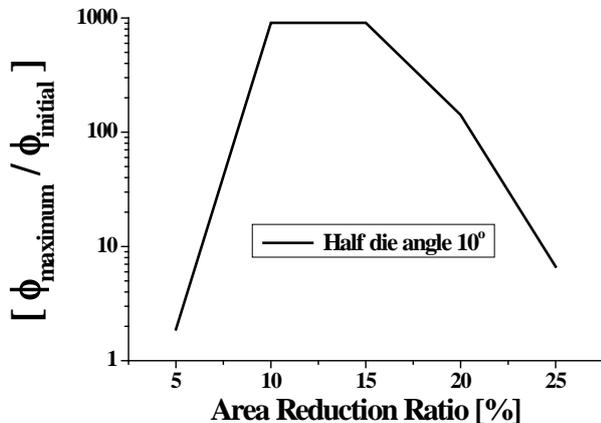


Fig. 3 Effect of the area reduction on the maximum accumulated damage in wire drawing with the half die angle of 10° .

5. 결론

본 연구에서는 펄라이트 강의 신선공정을 유한요소 해석한 결과에, Lee and Dawson의 결함성장 모델을 적용하여, 결함의 성장을 조사하였다. 신선공정에서 다양한 단면감소를 및 다이 반각 등의 공정조건이 결함 성장에 미치는 영향과 신선공정의 성공여부를 조사하였다.

단면 감소율이 15% 이하에서는 다이 반각이 커질수록 최대 결함 값이 커지는 반면에, 다이 반각이 10° 인 경우에는 단면감소율이 10%와 15% 사이에서 축적된 결함 값이 최대가 되는 것으로 조사되었다.

추후에는 보다 다양한 공정조건의 영향을 조사하여 공정지도를 개발하는 연구를 진행할 예정이다.

후기

본 연구는 2007년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 이루어졌으며 (No. R01-2007-000-20239-0), 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. C.M. Bae, W.J. Nam, C.S. Lee, 1996, Effect of Interlamellar Spacing on the Delamination of Pearlitic Steel Wires, Scripta Materialia, Vol.35, No.5, pp641-646.
2. J. Languillaume, G.Kapelski, B. Baudalet, 1997, Cementite Dissolution in Heavily Cold Drawn Pearlitic Steel Wires, Acta Mater. Vol.45, No.3, pp.1201-1212.
3. H.G. Read, W.T. Reynolds Jr., K. Hono, T. Tarui, 1997, APFIM and TEM Studies of Drawn Pearlitic Wire, Scripta Materialia, Vol.37, No. 8, pp.1221-1230.
4. 남원중, 배철민, 2003, 펄라이트 강의 신선가공성에 영향 미치는 인자, 소성가공, Vol.12, No.7, pp.610-614.
5. 김현수, 김병민, 배철민, 이충열, 2004, 고탄소강 펄라이트 조직의 인발 공정시 전단응력의 해석, 한국소성가공학회 2004 추계학술대회, pp.93-96.
6. W.J. Nam, C.M. Bae, 1995, Void Initiation and Microstructural Changes During Wire Drawing of Pearlitic Steels, Mat. Sci. Eng., Vol.203, pp278-285.
7. M.G. Cockcroft and D.J. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals, J. Inst. Met. Vol. 96, pp33-39.
8. P. Brozzo, B. deLuka, R. Rendina, 1972, A new method for the prediction of formability in metal sheets, Proceeding of 7th Biennial conference on Sheet Metal Forming and Formability.
9. M. Oyane, 1972, Criteria of ductile fracture strain, Bull. Of JSME Vol.15 pp1507-1513.
10. Y-S Lee, P.R. Dawson, 1993, Modeling ductile void growth in hardening viscoplastic materials, Mechanics of Materials, Vol.15 pp.21-34.
11. 윤상헌, 이용신, 남원중, 박경태, 윤덕재, 2008, 결함성장 모델의 비교연구, 한국정밀공학회 2008년도 춘계학술대회논문집, pp. 899-900.
12. Y-S Lee, 2006, An Eulerian Finite Element Method for the Steady State Forming of Porous Materials, Metals and Materials, International, Vol.12, No.2, pp.161-166.