

운송 차량용 판 스프링의 파손 해석

Damage Analysis of Leaf Spring for Transport Utility Vehicles

김태송¹, 강석희¹, 권영국¹, 윤서현², 남기우^{3*}

Tae-Song Kim¹, Seok-Hee Kang¹, Yung-Kug Kwon¹, Seo-Hyun Yun², Ki-Woo Nam^{3*}

〈Abstract〉

The leaf spring for a truck absorbs shocks or vibrations from the road surface while driving with the elastic force of the material and prevents the shock from being transmitted to the vehicle body. It is subjected to cyclic stress, and fatigue fracture occurs frequently. This study analyzes fractured leaf spring from a 25 ton truck that has been operating for about a year. In the fractured portion, which is the origin of crack, inclusions were observed, and fatigue failure was caused by cyclic stress. In the stress calculation and FE analysis, the stress at the center of the leaf spring was obtained to be 54~65% of the yield strength of the base material and damaged material. It is most important to prevent the mixing of impurities in the steel manufacturing for leaf springs. The large stress portion of the leaf spring needs to introduce compressive residual stress by peening etc.

Keywords : Damage Analysis, Fatigue Fracture, Inclusions, Leaf Spring

1 부경대학교, 재료공학과 대학원생

2 한국폴리텍대학 창원캠퍼스, 금형시스템과 교수

3* 부경대학교, 재료공학과, 마린융합디자인공학과 교수
E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1 Graduate Student, Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

2 Professor, Dept. of Die Mold System, Changwon Campus of Korea Polytechnics

3* Professor, Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

1. 서론

강 구조물은 제련·제강에 의하여 제조된 철강을 사용한다. 그러나 제련 과정에서 정제되지 못한 불순물이 혼합되면 대형 파괴 사고로 이어진다. 타아 타닉호는 불순물인 황과 인이 오늘날의 강보다 각각 4 및 2배 많았다. 대부분의 철강 재료는 반복되는 응력과 변형 하에서 균열 발생과 전파로 일어나는 파손 형태인 피로 파괴가 일어난다. 최초의 제트 여객기 코멧기는 리벳에서 미세한 균열이 발생하고, 균열이 감압과 여압을 반복하면서 진전하여 파괴하였다. 피로 파괴는 파단 응력보다 훨씬 낮은 탄성 영역 응력에서도 큰 변형을 동반하지 않으며 발생한다. 이러한 피로 파괴는 볼트, 스프링 및 터빈 등과 같이 반복하중이나 진동을 받는 부품이나 설비에서 예상치 못하게 종종 발생하여 큰 손실을 초래하는 위험성을 갖고 있다[1-3].

운반용 차량의 완충 기구인 현가장치는 재료의 탄성력을 이용하여, 주행 중 노면으로부터 충격이나 진동을 흡수하여 차체에 충격이 전달되지 않게 하는 역할을 한다[4]. 특히 트럭용 판 스프링은 차량 무게를 지탱하고, 충격을 흡수하기 위한 것이다[5]. 몇 장의 판상 스프링강을 중첩하고, 중심에 볼트를 체결하고, U-볼트나 클립으로 고정하였다. 그리고 양 끝의 스프링 아이(spring eye)는 차체에 고정하여, 하중을 지탱한다. 대부분의 중대형 차량의 현가장치는 판 스프링을 사용한다. 이것은 반복하중을 받아 피로 파괴가 빈번하게 발생한다[6-9]. 이와 같은 파손 사고는 원인 규명과 대책을 제시하여 구조물의 안전성 및 신뢰성을 향상을 도모해야 한다.

본 연구는 25톤 트럭에 사용되는 판 스프링의 파손을 해석하고, 대책을 제시하였다. 파단면 및 파면 성분을 분석하여, 경도 및 인장시험 특성과 파손과의 관련성을 검토하였다. 또한, ANSYS 해석으로 판 스프링에 작용하는 응력 상태와도 비교하였다.

2. 재료 및 해석방법

본 연구에서 사용된 손상 판 스프링은 D사가 제작하고, H사 25톤 트럭에 사용된 것이다. 판 스프링 장착 외관의 예를 Fig. 1에 나타낸다. 판 스프링의 재질은 SPS9이고, Table 1과 Table 2는 각각 화학 성분과 기계적 성질을 나타낸다. 판 스프링은 길이 1,500mm, 폭 80mm, 두께 12mm이다. 트럭은 약 1년간 운행하였으며, 손상 부분은 main spring으로 위에서 6번째(흰 화살표)이다. Fig. 2는 판스프링의 파단 외관을 나타낸다.

인장 강도는 dog bone type 시험편으로 제작하여, Oriental사의 만능 재료 시험기 (모델명 OUT-JOC)로 평가하였다. 인장시험편은 폭 8mm, 평행부 거리 60mm, 두께 4mm로 KS B 0801에 따라 제작하였다. 인장시험은 크로스헤드 속도 5mm/min으로 실시하였다. 마이크로 비커스경도 (Wolpert wilson, 430SVD)는 Weibull 확률분포로



Fig. 1 Example of leaf spring appearance

Table 1. Chemical compositions of SPS9(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.62	0.26	0.92	0.014	0.009	0.98

Table 2. Mechanical properties of SPS9

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
1,363	1,176	11



Fig. 2 Fractured appearance of leaf spring

손상재와 특성을 비교하였다. 파단면은 SEM(Hitachi (Japan), S-2700)-EDS (Horiba)로 파단부의 성분을 분석하였다. 판 스프링의 응력 상태는 ANSYS INVENTOR로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파단면 관찰

판 스프링의 파단은 Fig. 2에 나타내듯이 체결 볼트 구멍 주위가 아닌 중앙부에서 발생하였다. Fig. 3은 거시적인 파면을 나타낸다. 파면은 점선과 같이 피로에 의하여 균열이 진전한 후, 파괴하였다. 판 스프링은 비교적 밝은 측면부에서 초기 균열이 시작한 것으로 확인되었으며, Beach mark는 관찰되지 않았다.

3.2 파단면 물성치 분석

Fig. 4는 경면 연마한 파단면에서 SEM으로 관찰한 개재물을 나타낸다. 개재물은 균열 발생 기점으로 판단되는 부분에 집중적으로 관찰되었다.

균열 발생 부분의 성분은 에너지분산형 X선 분

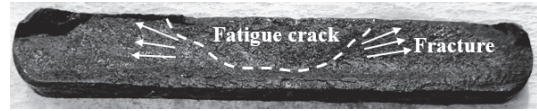


Fig. 3 Observation of the macro fracture surface of a leaf spring

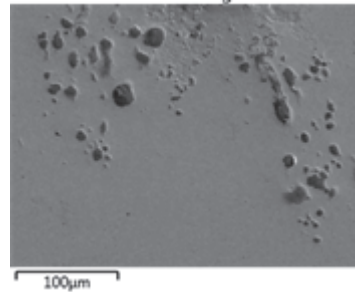


Fig. 4 Inclusions observed by SEM at the fracture surface

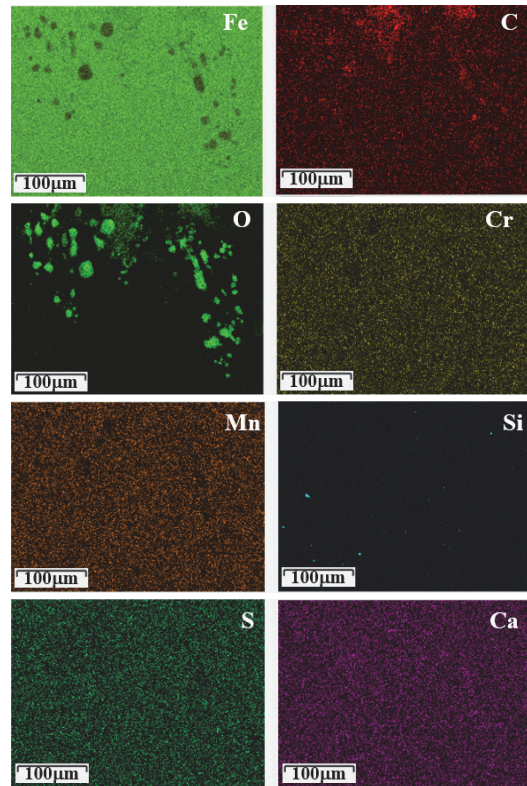


Fig. 5 EDS layered image of fracture surface components

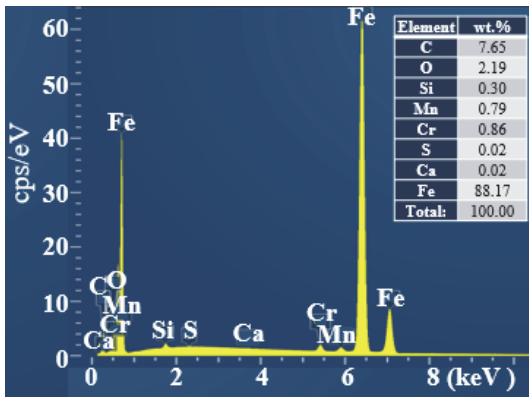


Fig. 6 Spectrum of fracture surface components

광법 (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS)으로 분석하였다. Fig. 5는 파단면 화학 성분의 영상을 EDS 층상으로 나타낸 것이다. C, O, Cr, Mn, Si, S, Ca가 검출되었다. 이것은 Table 1에 나타낸 화학 성분 외에 O 및 Ca가 검출되었다.

Fig. 6은 파단면 성분을 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 그림 중에는 wt.% 성분도 같이 나타낸다. C는 SPS9의 화학 성분보다 많이 검출되었으며, 미량의 Ca도 검출되었다. O가 많이 검출되어, C 및 Ca의 산화물(CaO, CaCO₃)이 계재물의 원인이라 판단된다.

3.3 기계적 특성

본 연구에 사용한 손상재에서 제작한 인장시험편의 인장 특성은 인장강도 1,478MPa, 항복강도 1,432MPa이 얻어졌다. 이것은 Table 2에 나타낸 인장 및 항복강도보다 각각 8.4 및 1.8% 높게 나타났다.

Fig. 7은 손상재와 SPS9 규격의 비커스경도(373~454HV)를 비교한 것이다. 손상재는 462~525HV로서 규격보다 최소 19%, 최대 24% 높은 결과가 얻어졌다. 따라서 손상재는 사용으로 경화되었으며, CaO 및 CaCO₃ 계재물 등의 경도가

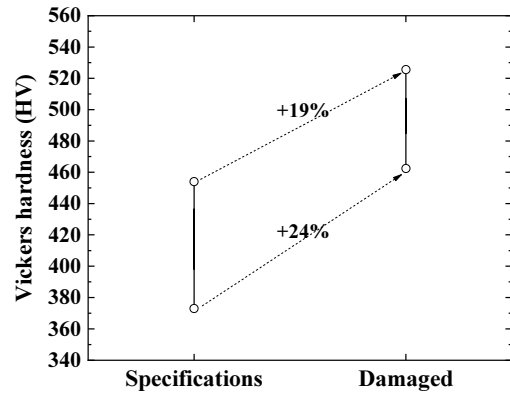


Fig. 7 Comparison of vickers hardness of damaged specimen and standard

높게 측정된 것으로 판단된다.

3.4 판 스프링에 작용하는 응력 평가

트럭은 공차 시 14t, 화물 적재 시 25t으로, 오차를 고려하여 최대하중(P) 약 40t으로 평가하였다. 각 판 스프링이 받는 하중은 10개의 바퀴로 나눈 값이다. 바퀴 1개에 분산된 하중(w)은 식(1)로 평가할 수 있다.

$$w = \frac{Pg}{10} \tag{1}$$

여기서, g는 중력가속도(9.8 m/s²)이다. 식(1)에 의하여 바퀴 1개가 받는 하중(w)은 39,200N이다.

판 스프링 1층에 발생하는 응력(σ)은 식(2)로 평가할 수 있다.

$$\sigma = \frac{3wl}{2nbt^2} \tag{2}$$

여기서, l은 판 스프링 길이 (1,500mm), n은 판 스프링 층수(10층), b는 판 스프링 폭 (80mm), t는 두께 (12mm)이다.

판 스프링에 작용하는 응력은 식(2)에 의하여 766MPa이 얻어졌다. 이것은 SPS9 모재 및 손상재 항복강도의 각각 약 65% 및 53.5%다.

3.5 판 스프링에 작용하는 응력 해석

해석은 ANSYS INVENTOR를 이용하였다. 모델링은 판 스프링 전체를 대상으로, 육면체 20절점 요소와 4면체 10절점 요소를 사용하였다. 항복 조건은 Von Mises 조건을 사용하였다. 해석은 하중 제어 하중점의 절점 반력을 구하였다. 재료 특성은 인장시험에서 얻어진 값을 사용하였다. 영율은 206GPa, 포아송비는 0.3으로 하였으며, 등방 경화칙을 가정하였다. 하중은 판 스프링 상부에 3점 굽힘하중이 작용하는 것으로 가정하였다. Fig. 8은 판 스프링의 유한요소 해석 모델을 나타낸다.

Fig. 9는 해석 결과를 나타낸다. 판 스프링은 만차 시의 하중이 작용하였을 때, 중앙 부분의 응

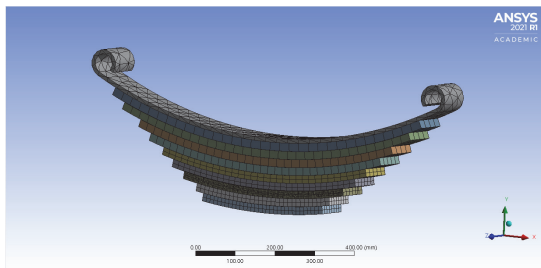


Fig. 8 FE analysis modeling for leaf spring

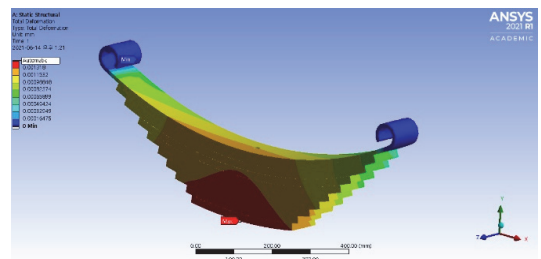


Fig. 9 Stress distribution of leaf spring by FE analysis

력(765MPa)이 가장 큰 상태가 되는 것을 알 수 있었다[8,13,14].

이것으로 판 스프링의 파손은 주행 중의 변동 응력 및 중앙의 응력 집중으로 게재물에서 균열이 발생하여 피로 파괴한 것으로 판단된다.

3.6 파손 방지 대책

본 연구에 사용한 25톤 트럭의 판 스프링은 게재물이 관찰되었고, 과도한 적재물로 인하여 응력이 집중되어 균열이 발생하고, 진전하여 파괴하였다.

근본적인 파괴 사고 방지로서는 제철소에서 제련·제강 시에 불순물의 혼입을 방지하여, 최초에 설계된 강을 제조해야 한다. 이와 같은 불순물은 사용 중에 균열이 발생하는 원인을 제공하므로, 비파괴검사로 불순물을 검출하여 폐기해야 한다. 비파괴검사로 검출되지 않는 미량의 불순물은 열처리하여, 방출 또는 분산시켜 분산 강화를 시도한다. 그리고, 고주파처리 표면 경화법, 질화처리 및 쇼트피닝 등과 같이 표면을 개질하여, 외력에 의한 균열 발생을 억제하도록 한다[13].

4. 결론

본 연구는 25t 트럭에 사용된 판 스프링의 파손 원인을 분석하고, 대책을 제시하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 파괴는 판 스프링의 체결 볼트 구멍 근처가 아닌 중앙부에서 발생하여, 피로 파괴하였다.
- (2) 파괴면은 균열 발생 기점으로 판단되는 부분에 게재물이 집중적으로 관찰되었다. 이것은 SPS9의 성분보다 C가 많이 검출되고, 다량의 O 및 미량의 Ca가 검출되어, CaO, CaCO₃라 판단한다.

- (3) 손상 판 스프링의 인장 및 항복강도는 SPS9의 기계적 특성보다 높으며, 손상부의 비커스경도는 19~24% 높게 나타났다. 이것은 반복하중에 의한 경화와 CaO 및 CaCO₃ 계재물 등이 원인이라 판단된다.
- (4) 판 스프링에 작용하는 응력은 SPS9 모재 및 손상재 항복강도의 54~65%에 해당하였다. FE 해석에서도 파손 위치의 응력은 비슷하였다.
- (5) 판 스프링은 화물 적재로 인한 트럭의 운행으로 인한 변동 응력이 계재물 부위에 작용하여, 균열이 발생하고 진전하여 파괴한 것으로 판단하였다.
- (6) 강 제조에서 불순물의 혼입을 방지하고, 불순물 혼입 시에는 비파괴검사로 검출하여 제거한다. 미량의 불순물은 열처리로 제거하거나 분산 강화를 도모한다. 또한, 열처리 및 피닝 등으로 압축 잔류응력을 부여하여 균열 발생을 지연시켜, 피로 수명을 증가시킨다.

참고문헌

- [1] S. H. Yun, M. H. Kim, K. W. Nam, "Failure Analysis on SCM435 High Strength Bolt of Forging Die," *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 22, no. 6, pp. 649-655, (2019).
- [2] S. H. Yun, M. H. Kim, K. W. Nam, "Failure Analysis of SCM435 Bolt for Fixing Automotive Air Brake Spring," *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 23, no. 1, pp. 73-81, (2020).
- [3] S. H. Yun, K. W. Nam, "Failure Analysis and Countermeasures of SCM435 High-Tension Bolt of Three-Step Injection Mold," *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 23, no. 4, pp. 531-539, (2020).
- [4] C. Y. Oh, I. D. Moon, "Comparison of Vibration Characteristics of a Multi-leaf Spring and a Tapered Leaf Spring of a Heavy Truck," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, vol. 29, no. 2, pp. 270-276, (2005).
- [5] W. K. Moon, C. K. Song, "Hysteretic Characteristics of Leaf Springs in Commercial Vehicles," *Transactions of KSAE*, vol. 16, no. 2, pp. 99-105, (2008).
- [6] C. K. Clarke, G. E. Borowski, "Evaluation of a Leaf Spring Failure," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 6, pp. 54-63, (2005).
- [7] Husaini, N, Ali1, R, Riantoni1, T, E, Putral, H, Husin, "Study of leaf spring fracture behavior used in the suspension systems in the diesel truck vehicles," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 541, paper No. 012046, (2019).
- [8] U. T. Ceyhanli1, M. Bozca, "Experimental and numerical analysis of the static strength and fatigue life reliability of parabolic leaf springs in heavy commercial trucks," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 7, pp. 1-17, (2020).
- [9] Husaini, L. R. Handayani, N. Ali1, M. Sadrawi, "Failure Analysis of a Fractured Leaf Spring as the Suspension System Applied on the Dump Truck," *Key Engineering Materials*, vol. 892, pp 89-98, (2021).
- [10] K. W. Nam, C. S. Kim, S. H. Ahn, "Damage Analysis of Degraded Slitting Knife", *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 5, no. 9, pp. 153-159, (2016).
- [11] K. W. Nam, C. S. Kim, S. H. Ahn, "A study on wear damage of SKD11 steel material for a cutting mold jig," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 5-13, (2016).
- [12] S. H. Kim, H. T. Yu, K. W. Nam, B. K. Choi, "Failure analysis and structural improvement for cracked circular finned tube", *Engineering*

- Failure Analysis, vol. 92, no. 10, pp. 95-106, (2018).
- [13] Mr. V. K. Aher, Mr. P. M. Sonawane, “Static And Fatigue Analysis Of Multi Leaf Spring Used In The Suspension System Of LCV,” International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 2, pp. 1786-1791, (2012).
- [14] M. Nataraj, S. Thillikkani, “Failure analysis of leaf spring suspension system for heavy load truck vehicle,” Int. J. Heavy Vehicle Systems, vol. 27, pp. 1-17, (2020).

(접수: 2022.10.14. 수정: 2022.11.15. 게재확정: 2022.11.22.)