

쾌삭강의 피로수명 및 절삭성에 미치는 인발-열처리의 영향

서창희¹·김동배¹·오상균¹·정윤철[#]·박명규²·김영석³

The Effect of Drawing and Heat Treatment on Fatigue Life and Machinability in Free Machining Steel

C. H. Suh, D. B. Kim, S. K. Oh, Y-C. Jung, M. K. Park, Y. S. Kim

(Received November 16, 2009 / Revised January 21, 2009 / Accepted January 25, 2009)

Abstract

Drawing and normalizing are efficient means for controlling strength, fatigue and machinability of free machining steel. Normally strength and machinability are conflicting properties which need to be optimized. In this study, the effects of normalizing temperature and reduction of area on strength, fatigue and machinability were investigated. Fine grains were generated at lower normalizing temperature and fatigue life was increased with decreasing grain size. Matrix was work hardened and elongated with increasing reduction of area. Inclusions also were elongated and cross-sectional area of inclusions along drawing axis was decreased. The effects of work hardening and grain size on fatigue life were significant, but only work hardening affected machinability. Shape and distribution of inclusions after drawing had little effect on fatigue life and machinability.

Key Words : Cold Drawing, Normalizing, Inclusions, Free Machining steel, Machinability, Fatigue Life

1. 서 론

자동차용 조향장치 부품의 하나인 조향입력축(input shaft)은 오일셀(oil seal)과 조립되어 유압유의 흐름을 제어하며, 운전자의 핸들 조작시 발생하는 토크를 피니언(pinion)에 전달하는 역할을 한다. 조향입력축용 소재는 반복 하중에 견디기 위한 내피로성과 원활한 제조를 위한 절삭성이 요구된다. 절삭 가공량이 많기 때문에 SAE 1144 과 같은 쾌삭강이 조향입력축용 소재로 사용되며, 강인성과 내구성을 부여하기 위해 열처리와 인발 가공을 조합한 가공열처리를 실시한다. 조향입력축은 연속주조(hot coil)한 상태의 환봉형 소재를 고온에서 균질화(normalizing)한 다음 인발 가공 후 절삭 가

공하여 Fig. 1 의 형태로 제작한다. 균질화 조건(유지온도, 유지시간 등)에 따라 결정립의 크기, 고용원소의 고용 정도 등에 차이가 발생하며, 이러한 차이는 인발 가공성과 소재의 물성에 영향을 미치게 된다. 인발 가공으로 인하여 황화물과 같은 개재물(inclusions), 페라이트와 필라이트는 인발 방향에 평행하게 연신되며, 이러한 변형은 재료의 물성에 커다란 영향을 미친다. 특히 황화물은 그 분포와 방위, 형상, 크기 등에 의해서 재료의 피로특성과 절삭성에 영향을 미치게 된다. Ransom[1]은 크기가 작고 구형인 개재물들이 존재하는 소재가 크기가 크고 긴 형상의 개재물들이 존재하는 소재에 비해서 피로특성이 우수하다고 보고하였다. 그리고 Murakami 등[2]은 비금속 개재물을

1. 대구기계부품연구원 기계부품소재시험평가센터
2. 영남이공대 기계과
3. 경북대학교 기계공학부
교신저자: 대구기계부품연구원, E-mail:ycjung@dmi.re.kr

초기 균열의 발생원으로 가정하고 그 크기와 형상을 면적제곱근(square root of area)이라는 파괴 역학적 개념을 도입하여 균열이 전파되기 시작하는 개재물의 임계크기에 대해 연구하였다. Tipnis[3]와 Kovach[4]가 황화물을 절삭성 측면에서 연구한 결과에 의하면, 절삭 가공시 전단면을 따라 분포하는 황화물이 응력 집중원으로 작용하여 절삭 저항을 감소시키며, 윤활작용으로 공구의 수명을 향상시킨다고 하였다.

쾌삭강의 주요 미세조직은 페라이트와 펄라이트이며, 강도를 향상시키기 위해 강한 인발 가공을 실시하여 높은 밀도의 전위를 도입한다. Collins[5]는 큰 압축하중을 받아 소성변형하는 소재내의 입자와 석출물은 미세해지고, 소성유동 방향에 따라 조직의 방위가 재정렬 됨으로써 피로 수명이 향상된다고 하였다. 그러나 소성 가공량이 과도하게 증가하면 페라이트와 펄라이트의 계면, 펄라이트 내의 시멘타이트 등에서 응력 집중이 발생하여 균열이 생성됨으로써 오히려 피로수명을 저하시키게 된다. 또한 소성 가공량이 증가할수록 소재의 강도가 증가하여 절삭시 공구의 마모를 촉진시킴으로 피로특성과 절삭성을 동시에 고려한 가공열처리의 최적화가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 SAE 1144 소재의 균질화 처리와 인발 가공 정도에 따른 미세조직 변화와 황화물의 형상 변화 등이 강도와 피로수명, 절삭성에 미치는 영향을 검토하였으며, 균질화 처리와 인발 가공의 최적 조건에 대해서 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 SAE1144 쾌삭강이며, 그 화학 조성은 Table 1 과 같다.

연속주조한 핫코일 상태의 소재를 850~900℃의 온도 범위에서 3시간 등은 유지하여 균질화한 다음 단면감소율(reduction of area)을 0~25%로 변화시켜 인발 가공 하였다. Table 2에 가공열처리 조건을 나타내었다. 기호에서 앞의 숫자는 균질화 처리 온도를 의미하며, 뒤의 숫자는 단면감소율을 나타낸다.

미세조직과 개재물은 가공열처리한 시편을 길이방향으로 절단하여 마운팅하고, 기계 연마와 경면 연마한 다음 2%의 나이탈 용액으로 부식한 후 광학 현미경을 사용하여 관찰하였다. 인장시편은 가공열처리에 의한 표면과 중심부의 편차를 최소

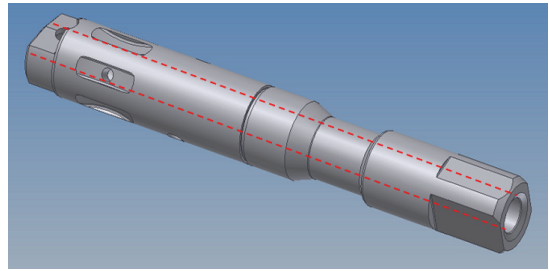


Fig. 1 Geometry of input shaft

Table 1 Chemical composition of SAE1144 used in the present study(wt%)

C	Si	S	P	Mn
0.438	0.209	0.270	0.013	1.625

Table 2 Conditions of normalizing and drawing

Mark	Normalizing	Reduction of area
900-0	At 900℃ for 3h	0 %
870-0	At 870℃ for 3h	
850-0	At 850℃ for 3h	
900-20	At 900℃ for 3h	20 %
870-20	At 870℃ for 3h	
850-20	At 850℃ for 3h	
900-25	At 900℃ for 3h	25 %
870-25	At 870℃ for 3h	
850-25	At 850℃ for 3h	

화하기 위해 표점거리부의 단면이 큰 KS B 0801 4호 규격을 채택하였으며, 실험은 크로스헤드 속도를 일정하게 하는 변위제어 방식으로 120mm/s의 속도로 하였다. 경도는 시편을 원주방향으로 절단하여 로크웰 경도기로 시편 중심부의 경도를 측정하였다.

가공열처리 조건이 피로수명에 미치는 영향을 검토하기 위해 850℃와 900℃에서 균질화처리한 후 단면감소율 20%로 인발한 시편과 850℃에서 균질화처리한 후 단면감소율 20%와 25%로 인발한 시편을 준비하였다. 피로시험용 시편은 인발 방향에 평행하게 표점거리부의 지름이 8mm가 되도록 제작하였으며, 시편의 표면 거칠기 영향을 최소화하기 위해 입자가 매우 미세한 사포(#240-#2000)를 이용하여 기계연마한 다음 최종적으로 1µm의 알루미늄 입자를 사용하여 길이방향

으로 최종 연마하였다. 피로시험은 하중제어 방식으로 소재가 400MPa의 탄성응력을 받도록 하였으며, 10Hz의 속도에서 수행하였다. 응력비(최소응력/최대응력)가 -1이며, 평균응력이 0인 사인파를 이용하여 시험하였다. 실험의 신뢰성 확보를 위해서 3회 시험하여 평균 수명을 사용하였다.

유압 서보식 동적재료시험장비 MTS 810을 사용하여 피로시험 후 파면을 주사전자 현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였으며, 개재물의 분석에는 에너지 분산형 스펙트럼(EDS)을 이용하였다.

절삭시험은 870℃에서 균질화처리한 다음 단면감소율 20%와 25%에서 인발한 시편을 사용하여 직경 9mm의 초경드릴로 소재의 중심부를 드릴로 가공하였다. 드릴 날부 마모량의 증가에 따라 조향입력축 내경부의 거칠기가 증가하여 불량률이 증가하기 때문에 동일 시간 절삭 후 드릴 날부의 최대 마모길이를 관찰하여 소재의 절삭성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소재 특성

균질화처리 조건에 따른 인장시험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 단면감소율이 0%인 경우 균질화처리 후 인장강도는 약 720~730MPa로 핫코일 상태보다 약 20~30MPa 정도 증가하였으며, 균질화처리 온도가 낮을수록 강도가 증가하였다. 이는 결정립 크기의 영향인 것으로 판단되며, 단면감소율이 20%와 25%에서도 동일한 경향을 나타냈다. 균질화처리 온도의 감소에 의한 인장 강도의 증가는 결정립의 미세화로 설명될 수 있으나, 본 시험 조건에서는 균질화처리 온도가 강도에 미치는 영향은 인발, 즉 가공경화에 의한 영향에 비해서는 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3에 단면감소율의 변화에 따른 인장 강도의 변화를 나타냈다. 단면감소율이 20%까지는 단면감소율의 증가에 따른 인장강도가 큰 폭으로 증가하다가 이후 증가율이 둔화되는 경향을 나타냈다. Fig. 2와 3의 균질화처리 온도와 단면감소율의 변화에 따른 경도의 변화는 인장강도의 변화와 동일한 거동을 나타냈다.

Fig. 4 (a), (b)에 인발 조건에 따른 미세조직의 변화를 나타냈다. 단면감소율이 증가할수록 결정립은 인발 방향으로 길게 연신되었으며, 페라이트와 펄라이트의 이상간격과 층간간격도 감소하였다.

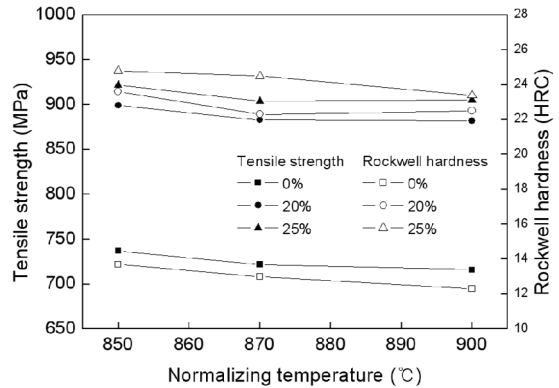


Fig. 2 Variation of tensile strength and hardness with normalizing temperature

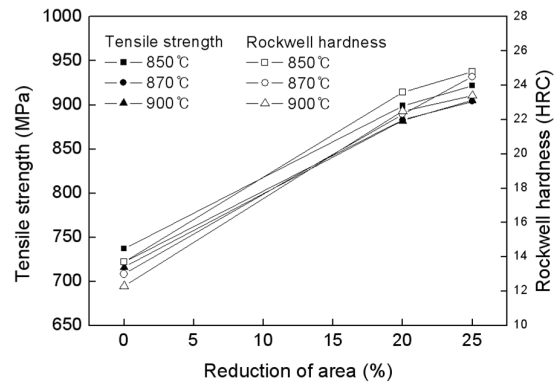


Fig. 3 Variation of tensile strength and hardness with reduction of area

본 실험에 사용된 쾌삭강의 미세 조직은 약 50%의 페라이트와 50%의 펄라이트로 구성되며, 펄라이트는 페라이트와 시멘타이트로 구성된다. 인발공정에 의해 페라이트와 펄라이트는 인발 방향을 따라 길게 연신되며, 임의의 방향으로 존재하던 펄라이트의 콜로니(colony)들이 인발 방향으로 회전하여 집합조직을 형성하게 된다. 또한 펄라이트내의 페라이트와 시멘타이트의 층간 간격(interlamellar spacing)은 좁아지게 된다. 이러한 현상에 의해 소재가 강화되며, 주로 두 가지의 강화기구가 작용하는 것으로 생각된다. 첫 번째로 층간 간격이 좁아지게 되면 전위의 이동이 용이한 페라이트 내에서의 전위의 이동거리가 짧아져 페라이트와 시멘타이트의 계면에 전위가 집적(pile up)하여 가공경화를 일으킨다. 두 번째로는 단면감소율이 증가함에 따라 펄라이트 콜로니의 방위가 인발방향에

평행하게 재배열하여 페라이트와 펄라이트로 구성되는 일종의 복합재료를 형성하게 된다. 즉 펄라이트 콜로니 내의 시멘타이트 층이 섬유강화 원으로 작용하여 강도를 증가시킨다[6].

단면감소율이 증가할수록 개재물도 인발 방향으로 연신되었으며, 이들 개재물은 EDS 분석으로부터 황화물인 MnS 로 확인되었다(Fig. 5). MnS 는 다양한 크기로 분포하였으며, 위치에 따라서는 군집(cluster)을 형성하기도 한다. Kobach[4]와 Poulachon 등[7]에 의하면, MnS 는 연성이 풍부하여 절삭가공과 같이 전단하중을 받는 소성변형시 기지보다 연신되는 양이 더 크다고 하였으며, Hertzberg 등[8]은 기지와 MnS 의 결합력이 약하며 미세 기공이 계면에 분포하고 있어 MnS 가 일종의 미세균열의 역할을 한다고 하였다.

Fig. 4 (c)는 MnS 의 형상을 검토하기 위해 관찰한 광학 현미경 사진이며, 본 연구에서는 전체적으로 MnS 의 형상과 길이는 단면감소율의 변화에 따른 미세조직의 변화와 유사하게 나타났다. 단면감소율의 변화에 따라 개재물의 형상 변화를 정량적으로 측정하지는 못하였지만, 인발 가공에 의한 커다란 압축응력은 개재물을 길게 연신시키며 인발방향의 수직 단면적을 줄이는 역할을 한 것으로 생각된다[9]. 초기 균열로 작용하며 윤활제 역할을 하는 개재물의 단면적이 줄어들어 내경 절삭시 공구의 마모를 촉진하여 절삭성을 악화시킬 것으로 생각된다. 또한 인발 가공시 단면감소율의 증가에 비례해서 개재물 사이의 거리가 가까워져 절삭성을 향상시킬 것으로 예상되지만 개재물들이 불규칙하게 분포하므로 정량적인 평가는 곤란하였다.

3.2 피로 특성

Table 3 에 피로시험 결과를 나타냈다. 균질화처리 조건이 동일한 경우에는 단면감소율이 20%에서 25%로 증가함에 따라서 피로수명이 증가하는 경향을 나타내었으며, 단면감소율이 20%로 동일한 경우 균질화처리 온도가 낮아질수록 피로수명이 증가하는 경향을 나타내었다. 동일 균질화처리 온도에서는 단면감소율이 증가할수록 소재의 강도는 가공경화에 의해 증가하게 되고 균열의 시작점으로 작용하기 쉬운 개재물의 형상은 커다란 압축응력에 의해 연신되며, 부피가 작아지게 되어 축방향의 피로수명을 향상시킨 것으로 생각된다[8]. 그리고 균질화처리 온도가 낮을수록 결정립

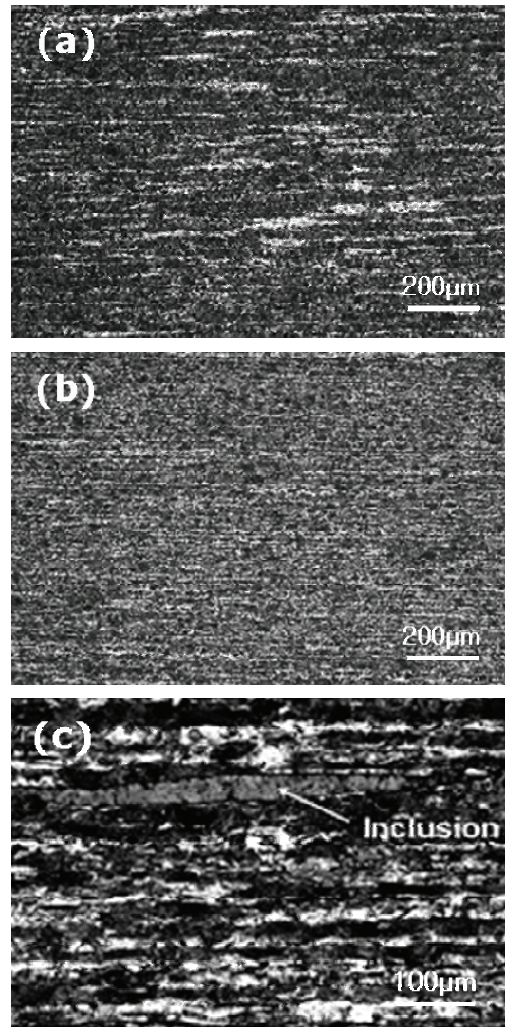


Fig. 4 Variations in optical micrograph with normalizing temperature and reduction of area, (a) no reduction after normalizing at 900°C, (b) 25% reduction after normalizing at 900°C, and (c) 25% reduction after normalizing at 870°C

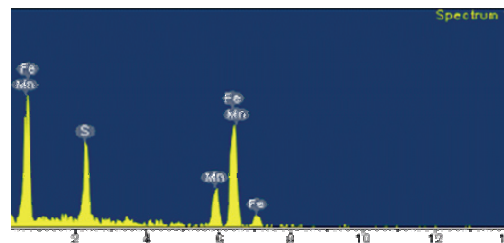


Fig. 5 Results of EDS analysis for the inclusion shown in Fig. 4 (c)

미세화에 의한 영향으로 인해 피로수명이 증가한 것으로 생각된다.

단면감소율의 증가로 인한 소재의 강도 증가는 피로수명을 향상시키는 긍정적인 효과가 있는 반면에 내경 절삭시 공구의 마모를 촉진하여 절삭성을 악화 시키는 요인이 된다. 따라서 피로수명과 절삭성을 모두 고려하는 경우는 850°C의 낮은 균질화 처리 온도로 조직을 미세화 한 후 인발량을 조절하는 것이 효과적일 것으로 생각된다. 또한 균질화처리에 의한 조직의 미세화는 인장 특성보다는 피로와 같은 동적인 하중에 대한 저항성을 더욱 향상 시킨 것으로 판단되며, 단면감소율의 증가에 따른 피로수명의 영향과 유사하게 균질화처리 온도가 피로 수명에 미치는 영향이 나타나고 있다.

Fig. 6은 피로시험 후 파면을 실체 현미경과 SEM으로 관찰한 사진이다. 피로균열은 시편의 표면에서 발생하여 내부로 전파하였으며, 모든 시험 조건에서 파면의 양상은 유사하였다. 비금속 개재물이 다량으로 존재하는 소재에서는 일반적으로 개재물이 균열의 시작점으로 작용하는 경우가 대부분이며, MnS와 같은 황화물의 경우는 MnS가 기공과 같은 내부 초기 균열의 역할을 하기 때문에 균열전파를 보다 용이하게 한다. 그러나 모든 개재물에서 균열이 진전하는 것은 아니며, 일정한 크기 이상의 개재물 혹은 클러스터를 이루고 있는 경우에 균열의 시작점으로 작용할 가능성이 커진다고 알려져 있다[5]. 본 연구에서는 피로 균열의 시작점인 표면에서 MnS의 정확한 관찰은 어려웠으나 조직관찰의 결과로부터 개재물의 분포와 형상이 피로수명에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. Fig. 6(c)의 화살표로 나타난 바와 같이 피로균열의 전파과정에서 연신된 MnS들이 기지로부터 빠져나오는 현상들이 관찰되었다. 이는 기지와 MnS의 계면 결합력이 약하기 때문이며, 진전하는 균열의 선단이 MnS를 조우하면 전파가 지연 또는 가속되는지에 대해서는 알 수 없었으며, 금후의 연구 결과에 의존할 수밖에 없다.

3.3 절삭 특성

절삭시험 후 마모된 공구의 형상을 Fig. 7에 나타냈으며, 단면감소율이 20%에서 25%로 증가할 경우에 공구의 마모량은 증가하는 것으로 나타났다. 동일조건에서 시험 후 드릴 날부의 최대 마모량의 크기는 단면감소율이 20%인 경우는 2.7mm

Table 3 Results of fatigue tests at 400 MPa

Normalizing	Reduction of area	Fatigue life
At 850°C for 3h	25 %	2.13×10^5 cycles
At 850°C for 3h	20 %	1.78×10^5 cycles
At 900°C for 3h	20 %	1.39×10^5 cycles

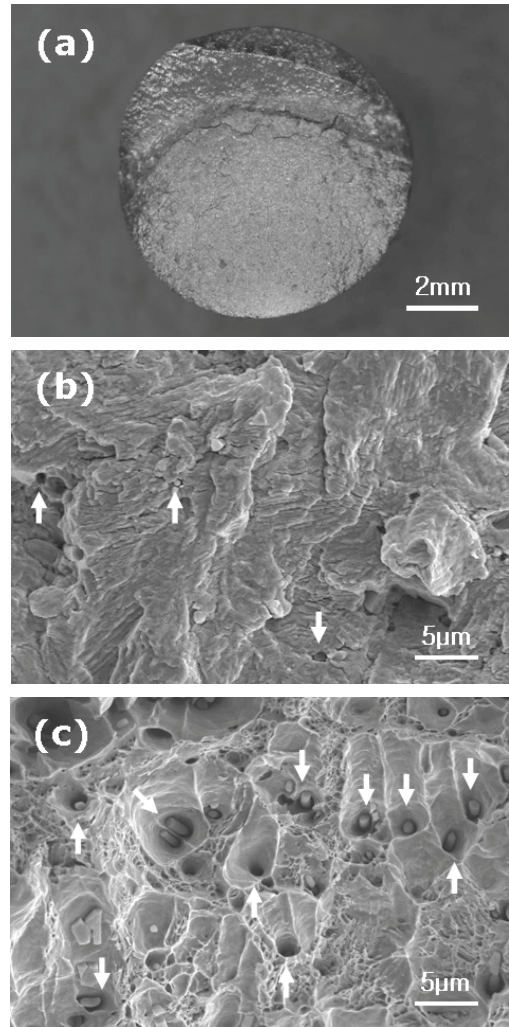


Fig. 6 Fractograph of 850°C-20% fatigue specimen. (a) crack initiation on the surface, (b) striations near the final fracture, (c) dispersion of inclusions on the fractured surface

였으며, 25%인 경우는 5.1mm로 나타났다. 즉, 5%의 단면감소율이 증가하였을 경우 드릴의 마모가

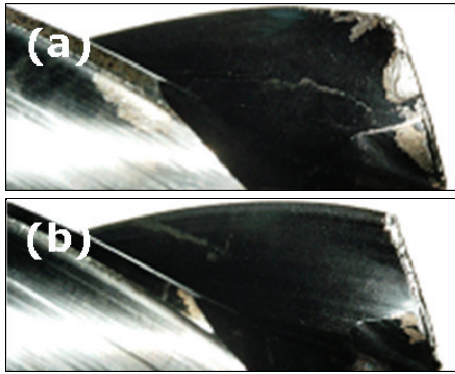


Fig. 7 Worn drill after machining, (a) 870°C-25% specimen (b) 870°C-20% specimen

약 2배 정도 증가하였다. 개재물의 분포와 형상 변화가 단면감소율 5% 에서는 크지 않다고 가정하면 드릴의 마모 증가는 단면감소율의 증가에 의한 소재의 강도 증가로 설명된다. 쾌삭강의 피로특성과 절삭성을 모두 고려하면 균질화 처리 온도를 낮추어 결정립을 충분히 미세화 시킨 후 인발시 단면감소율을 최소로 하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 SAE1144 쾌삭강의 가공열처리 정도에 따른 미세조직의 변화와 황화물의 형상 변화 등이 강도와 피로수명, 절삭성에 미치는 영향을 검토 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

낮은 균질화처리 온도는 조직의 미세화에 기여하여 소재의 강도와 피로특성의 향상에 영향을 미쳤으며 강도적인 면에서는 인발의 영향이 더욱 우세하였으나 피로특성에는 그 영향도가 유사하였다. 단면감소율이 25% 정도 수준까지는 강도와 피로수명이 모두 향상되었으며, 균질화 효과와 단면감소율에 의한 가공경화 효과가 모두 피로수명 향상에 유효한 인자임을 알 수 있었다. 그러나 단면감소율의 증가는 절삭성의 감소와 직결되기 때문에 균질화처리에 의한 조직의 미세화를 통해 피로수명을 향상시킨 후 단면감소율의 최소화를 통해서 절삭성을 향상 시키는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의

부품소재신뢰성기술훈원사업의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. T. Ransom, 1954, The effect of inclusions on the fatigue strength of SAE4340 steels, *Trans. ASM*, Vol. 46, 1954, pp. 1254~1269.
- [2] M. Yukitaka, E. Masahiro, 1983, Quantitative Evaluation of Fatigue Strength of Metals Containing Various Small Defects or Cracks, *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 17, No. 1, pp. 1~15.
- [3] V. A. Tipnis, N. H. Cook, 1996, Influence of MnS-Bearing Inclusions on Flow and Fracture in a Machining Shear Zone, 8th Mechanical Working and Steel Processing Conf., AIME, New York, pp. 288~307.
- [4] C. W. Kovach, 1974, Sulfide Inclusions and the Machinability of Steel, *Pro. International Symposium on Sulfide Inclusions in Steel*, ASM, Port Chester, pp. 459~479.
- [5] S. R. Collins, 1994, Forging Effects on MnS Inclusions as Fatigue Initiation Sites in AISI 4140 Steel, *Case Western Reserve University*, pp. 1~24.
- [6] J. Toribio, 2004, Relationship between Microstructure and Strength in Eutectoid Steels, *Mater. Sci. Eng. A* 387-389, pp. 227~230.
- [7] G. Poulachon, M. Dessoly, C. Le Calvez, J. L. Lebrun, V. Prunet, I. S. Jawashir, 2001, An Investigation of the Influence of Sulphide Inclusions on Tool-Wear in High Speed Milling of Tool Steels, *Wear* 250, pp. 334~343.
- [8] R. W. Hertzberg, K. S. Vecchio, F. E. Schmidt Jr., 1989, Fatigue Performance of AISI 1140 Modified Steel, *J. Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol. 17, No. 5, Sept. 1989, pp. 261~266.
- [9] D. C. Ko, B. M. Kim, J. C. Choi, B. S. Kang, 1994, A Study on Prevention of Central Burst Defects in Wire Drawing, *KSME*, Vol. 18, No. 11, pp. 3098~3107.
- [10] E. S. Jang, W. S. Choi, Y. J. Lee, T. B. Kang, Y. M. Lee, 1999, Chip Breaking Characteristics of Cold Drawn Free Machining Steel, *J. Kor. Soc. Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 4, pp. 45~51.