

고주파 열처리된 SAE1055 강의 피로거동 및 이의 확률론적 평가

이선호* · 이승표* · 강기원**†

* (주)일진글로벌 기술연구소, **국립군산대학교 기계자동차공학부

Probabilistic Analysis of Fatigue Behavior of Induction Hardened Steel

Seon-Ho Lee *, Seung-Pyo Lee * and Ki Weon Kang **†

* R&D Center, ILGIN GLOBAL

** School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kunsan National Univ.

(Received September 13, 2012 ; Revised November 12, 2012 ; Accepted November 14, 2012)

Key Words: Fatigue Behavior(피로거동), Induction Hardening(고주파열처리), Probabilistic Analysis(확률론적 해석), Rotary Bending Fatigue Test(회전굽힘 피로시험), SAE 1055 Bearing Steel(SAE 1055 베어링강)

초록: 본 논문에서는 고주파 열처리된 SAE1055 베어링강의 경도에 따른 피로 거동 및 이의 확률론적 평가를 수행하였다. 이를 위하여 경도 수준에 따른 5 종류의 시험편(A : 원재료, B : HV390-전경화, C : HV510-전경화, D : HV700-전경화 및 E : HV-700 표면경화)를 준비하였다. 피로시험은 4 점 회전굽힘 피로 시험기를 이용하여 응력비 $R=-1$ 의 조건하에서 수행하였다. 그 결과, SAE1055 강의 피로 거동은 경도에 따라 크게 변화하였으나 HV510 수준이상에서는 피로한도의 증가는 관찰되지 않았다. 또한 피로 파손 기구에 대한 경도의 영향을 평가하기 위하여 SEM(scanning electron microscope)을 이용한 파면 관찰을 수행하였다. 피로수명의 통계적 특성은 $P-S-N$ (probabilistic $S-N$) 곡선을 이용하여 평가되었으며 이에 대한 경도의 영향은 잔류치 해석(residue analysis)을 통하여 수행하였다.

Abstract: This study considers how the fatigue behavior and probabilistic properties of SAE1055 steel are related to its hardness level. SAE1055 steel was heat-treated using induction hardening. Five types of specimens were prepared (A: base material, B: through hardened material with HV390, C: through hardened material with HV510, D: through hardened material with HV700, and E: surface hardened material with HV700). Fatigue tests were performed under a stress ratio of $R = -1$ using a 4-point rotary bending fatigue tester. The fatigue behaviors were greatly influenced by the hardness, but the fatigue limit did not increase over a hardness of HV510. In addition, the effect of the hardness level on the failure mechanism was evaluated using a scanning electron microscope. The probabilistic properties of the fatigue life were investigated using a probabilistic $S-N$ approach, and the effect of the hardness level on these properties was evaluated using a residue analysis.

1. 서 론

산업의 고도화에 따라 다양한 분야에서 고강도 강(high strength steel)에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다.⁽¹⁾ 특히 자동차 등의 산업분야에서는 높은 정적 강도 조건뿐만 아니라 피로파손(fatigue failure)에 대한 높은 저항성(fatigue resistance) 역시 요구하고 있다. 따라서 고수명영역(high cycle region)

에서의 고강도 금속재료의 피로 파손은 지난 수십 년간 많은 연구주제가 되고 있다.^(2,3)

저강도 및 중강도 강의 피로저항성은 경도 및/또는 인장강도에 따라 증가하는 것이 일반적이다.⁽³⁾ 그러나 열처리강 등과 같은 고강도강의 피로 저항성 특히 피로한도(fatigue limit)는 특정한 경도(hardness) 또는 인장 강도(tensile strength) 수준에 도달하면 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되는 현상이 나타난다.⁽⁴⁾ 이러한 현상은 열처리 공정 중에 발생할 수 있는 표면 결함(surface defect) 또는 개재물(inclusion) 등에 의하여 피로파손이 야기된다는 고강도 강의 파손기구(failure mechanism)에 의하여 설명될 수 있다.^(5,6) 한편 대부분의 기계구

† Corresponding Author, Kwkwang68@kunsan.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

조물 및/또는 부품의 경우, 보다 높은 강도 및 피로저항성 확보를 위하여 고주파 열처리(induction hardening) 등의 공법을 이용한 열처리가 요구되며 이를 통한 높은 표면 경도는 피로 저항성 확보에 매우 중요하다.⁽⁷⁾ 또한 고강도강의 피로거동은 상당한 양의 데이터 분산을 보이고 있으며 이는 위에서 언급한 파손기구(표면 및 내부 발생 파손)과 밀접한 관계가 있다고 보고되고 있다.⁽⁶⁾ 따라서 매우 광범위하게 적용되고 있는 열처리 고강도강의 정도에 따른 피로거동 및 이에 대한 확률론적 특성 평가는 중요한 연구분야이다.

본 연구에서는 자동차용 허브베어링(hub bearing)에 적용되는 SAE1055 강의 정도에 따른 피로거동과 이에 대한 확률론적 특성 평가를 수행하였다. 이를 위하여 고주파 열처리 공법을 적용하여 5 가지 수준의 정도를 갖는 시험편을 준비하였으며 이들에 대한 4 점 회전굽힘피로시험(rotary bending fatigue test)을 실시하였다. 정도에 따른 피로거동 및 파손 기구는 S-N 선도 및 SEM(scanning electron microscope)를 통하여 평가하였다. 또한 P-S-N 곡선 및 잔류치 해석(residue analysis)를 통하여 피로거동의 확률론적 특성 및 이에 대한 정도의 영향 역시 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서는 승용차용 허브 베어링(hub bearing)의 외륜 및 허브에 적용되는 SAE1055 강을 시험편 재료로 사용하였으며 이의 화학적 조성은 Table 1 과 같다. 사용된 SAE1055 강은 열간압연 환봉재를 연속로 공법을 이용하여 노멀라이징 처리한 것으로서 모재의 경우 HV240 의 공칭경도를 갖는다. 이를 이용한 정적 및 피로특성 평가용 시험편은 각각 KS B ISO 1143⁽⁸⁾ 및 ASTM E8M⁽⁹⁾ 규격에 따라 제작되었으며 이의 형상은 Fig. 1 과 같다. 이러한 정적 및 피로시험편은 1 차 가공후 고주파 열처리를 적용하여 적절한 정도를 얻은 후 2 차 연마 가공하였다. 고주파열처리는 50kW 의 전원을 이용하여 840~870°C 의 온도범위에서 수행되었으며 또한 정도 및 표면경화 등의 요구조건 충족을 위하여 템퍼링 온도를 조절하였다. 이러한 공정을 거쳐 열처리 조건에 따라 정도가 상이한 총 5 종류의 시험편(Type A : HV240-원재료, Type B : HV390-전경화, Type C : HV510-전경화, Type D : HV700-전경화 및 Type E : HV-700 표면경화)의 시험편을 준비하였다.

Table 1 Chemical composition of SAE1055 steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.56	0.20	0.80	0.01	0.01	0.15	0.2	0.08

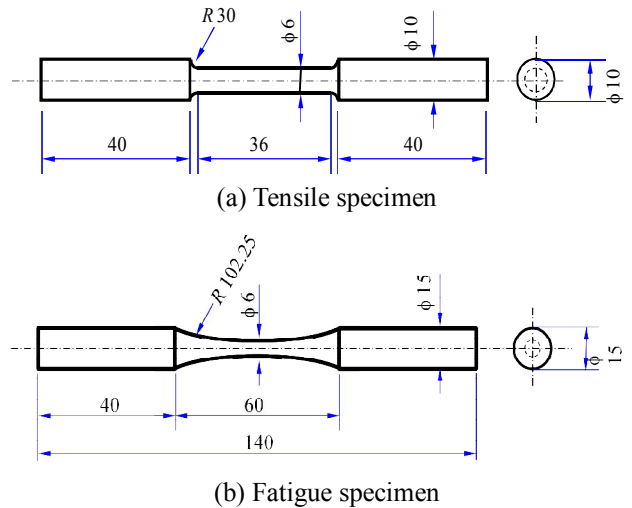


Fig. 1 Specimens



Fig. 2 Rotary bending fatigue tester

2.2 인장 및 피로시험

열처리 시험편의 건전성 평가를 위하여 비커스 정도 시험기(Vickers hardness tester, AFFRI model DM-2S)를 사용하여 각 종류의 시험편의 단면에 대한 정도시험을 수행하였다. 측정결과 열처리 시험편의 정도는 공칭 정도 $\pm 5\%$ 범위 내에 포함됨을 확인하였다.

열처리 조건에 따른 정적 거동 평가 및 피로시험에 적용할 응력레벨을 정하기 위하여 서보-유압식 피로시험기(Instron model 8801)을 이용한 정적 인장시험을 실시하였다. 시험은 2 mm/min 의 크로스헤드 속도로 변위제어(displacement control) 조건 하에서 실시하였으며 변형량은 25mm 의 게이지 길이를 갖는 연신계(extensometer)를 사용하였다.

각 조건당 7 개의 시험편에 대한 시험을 실시하였다.

피로시험은 Fig. 2 와 같은 4 점 회전굽힘피로시험기를 사용하여 인장과 압축응력이 반복되는 $R=1$ 및 회전수 3000 rpm 의 조건에서 수행하였다. 또한 적은 수의 시험편으로 신뢰성 높은 데이터를 획득하기 위하여 14S-N 방법⁽¹⁰⁾에 기초한 시험 조건을 설정하여 시험을 실시하였다. 또한 10^7 의 하중반복수에 도달해도 시험편의 파손이 발생하지 않을 경우 무한 수명으로 간주하여 시험을 중지하였다. 피로파손기구 및 내부 개재물 등의 화학 성분을 평가하기 위하여 SEM(scanning electron microscope) 및 EDX(energy dispersive X-ray spectrometry)를 이용한 파면분석을 실시하였다.

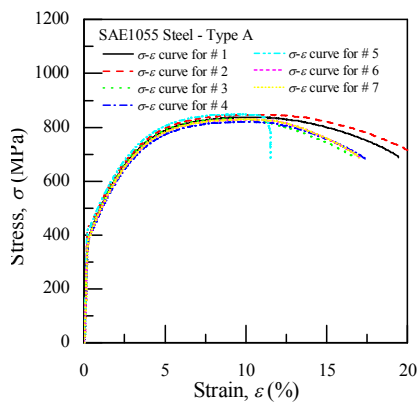
3. 결과 및 고찰

3.1 정적 특성 평가

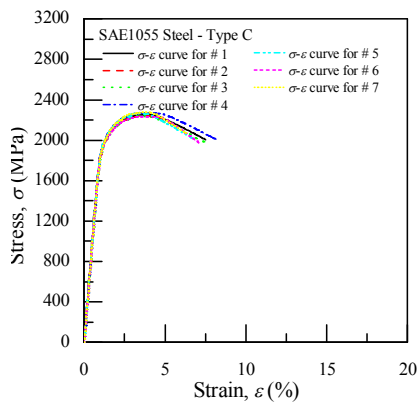
SAE1055 강의 정적 거동에 대한 열처리 조건(경도 및 표면경화)의 영향을 평가하기 위하여 5 중

류에 대한 각 7 회의 정적 인장시험을 실시하였다. Fig. 3 은 이러한 조건하에서 수행된 인장시험 결과의 대표적인 예를 나타낸 것이며 Table 2 는 이의 결과를 종합하여 정리한 것이다. 그림 및 표에서 알 수 있듯이 본 연구에서 사용된 SAE1055 강은 탄소함유량이 0.5%인 고탄소강으로 분류되나 상당한 수준의 가공경화 현상을 나타내고 있다. 그러나 이러한 모재에 대한 열처리를 수행하게 되면 취성이 급격히 증가하여 인장강도는 크게 증가하고 변형률은 감소하는 현상이 나타나고 있다.⁽⁴⁾

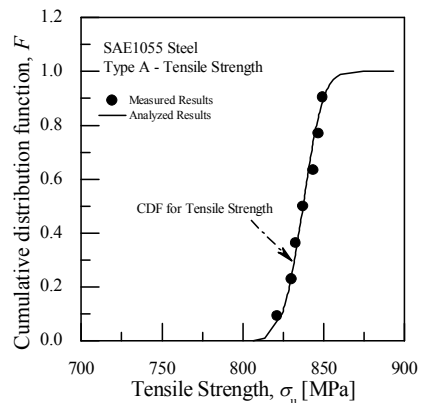
특히 경도 증가에 따라 인장강도 등의 표준편차 역시 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상 역시 열처리에 따른 취성 증가⁽¹⁰⁾ 및 열처리의 불균일성으로 인한 것으로 판단된다. 이러한 현상을 보다 면밀히 검토하기 위하여 Table 2 의 기계적 특성 중 대표적인 물성치인 인장강도에 대한 확률론적 해석을 수행하였다. Fig. 4 는 인장강도를 정규분포(normal distribution)를 사용하여 분석하고 이의 결과를 누적분포함수(cumulative distribution function)로 나타낸 것이다.



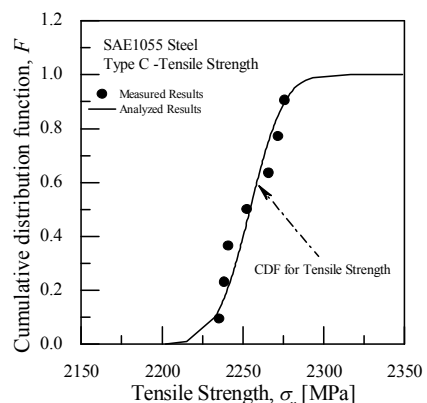
(a) Type A - Base material



(b) Type C - through hardened with HV510



(a) Type A



(b) Type C

Fig. 4 Cumulative distribution function for tensile strength

Fig. 3 stress-strain curves of SAE1055 steel

Table 2 Mechanical properties of SAE1055 steel

Type	Elastic modulus [GPa]		Yield strength [MPa]		Tensile strength [MPa]	
	mean	st. dev	mean	st. dev	mean	st. dev
A	202.34	13.09	413.29	14.36	836.86	9.92
B	208.34	4.87	1575.57	21.12	1638.57	23.52
C	207.20	10.93	1960.29	19.98	2254.57	16.89
D	204.80	18.44	1787.00	146.22	2146.58	251.05
E	196.76	17.38	1546.71	36.27	2043.29	115.24

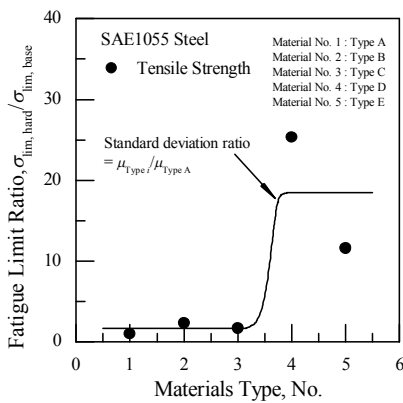


Fig. 5 Standard deviation ratio for tensile strength

여기서 실선은 인장강도의 평균 및 표준편차 (standard deviation)을 이용하여 구한 누적확률밀도 함수를 나타낸 것이고 원형 마크는 중앙순위법 (median rank) 방법을 통하여 구한 실험데이터의 누적확률값이다. 그림에서 알 수 있듯이 이러한 인장강도의 변동성은 정규분포로 평가될 수 있음을 알 수 있으며 특히 경도 증가에 따라 인장강도의 변동성이 증가하는 현상이 나타나고 있다. 이를 보다 명확히 검토하기 위하여 각 열처리 시험편의 표준편차를 Type A의 표준편차로 정규화한 후 시험편 종류에 대하여 나타낸 Fig. 5를 살펴보면, 정규분포로 평가된 인장강도의 변동성은 열처리 수준 즉 경도에 따라 급격히 증가하고 있다. 이러한 결과들을 통하여, 인장강도의 변동성은 정규분포로 평가할 수 있으며 특히 열처리에 따른 변동성 증가 현상 역시 정규분포로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 피로 특성 평가

SAE1055 강의 피로 특성 평가를 위하여 14S-N 시험법에 의거한 4 점 회전굽힘피로시험을 실시하였다. 여기서 피로한도(fatigue limit)는 계단법 (staircase method)를 이용하여 평가하였다. Fig. 6은 5 종류의 시험편에 대한 시험결과를 나타낸 S-N 곡선이다.

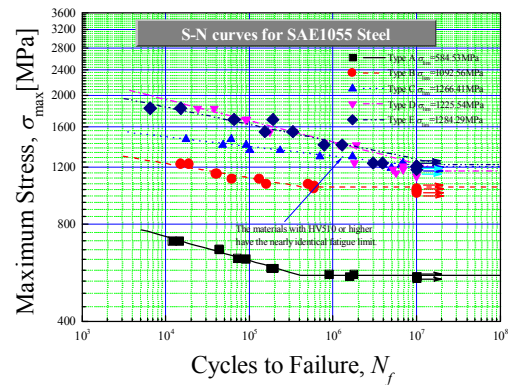


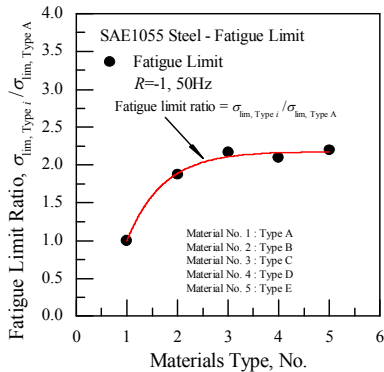
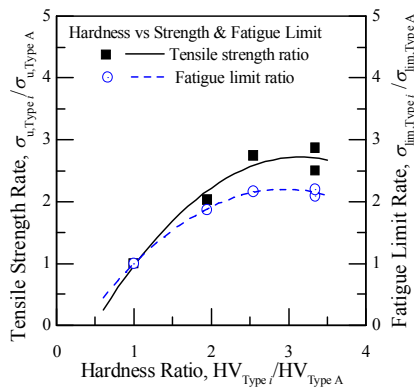
Fig. 6 S-N curves of SAE1055 steel

여기서 실선 및 점선은 최대 부하 응력 σ_{max} 와 피로수명 N_f 와의 관계를 양대수(log-log)관계로 표현한 Basquin 공식 $\sigma_{max} = A \cdot N_f^B$ 에 의하여 평가된 S-N 곡선을 나타낸다. Basquin 공식의 계수 A, B 및 계단법에 의하여 평가된 피로한도는 Table 3에 정리하여 나타내었다. 그림 및 표에서 알 수 있듯이 시험편의 열처리 조건과 관계없이 SAE1055 강의 피로거동은 Basquin 공식에 의하여 잘 묘사되고 있으며 특히 경도의 증가에 따라 피로강도 및 피로한도의 증가현상이 발생하고 있다. 이러한 현상은 경도 및/또는 강도와 피로강도는 비례한다⁽¹⁰⁾는 거동과 일치하고 있다. 그러나 HV510 이상의 경도 수준에서는 거의 유사한 S-N 곡선을 나타내고 있다. 이러한 HV510 이상 (Type C, D 및 E)의 S-N 곡선을 보다 자세히 살펴보면 전체적인 거동은 유사하지만 유한수명 및 무한수명 영역으로 구분하여 살펴보면 일정한 차이점을 확인할 수 있다. 유한수명 영역의 경우 HV510(Type C)에 비하여 HV700-전경화(Type D) 및 HV700-표면경화(Type E)의 경우 높은 피로강도를 나타내고 있다. 이에 반하여 무한수명 영역에서는 Type C, Type D 및 Type E의 피로한도는 거의 동일한 값을 나타내었다.

이러한 거동을 보다 명확히 판단하기 위하여 열처리 조건에 따른 피로한도를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 모재에 비하여 경도의 증가에 따라 피로한도는 증가하지만 HV510 이상에서는 일정한

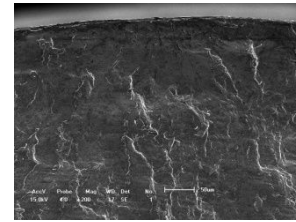
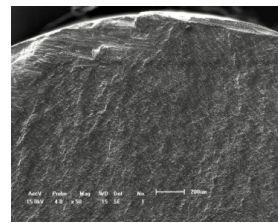
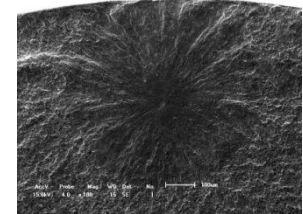
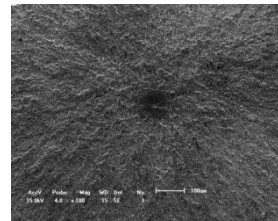
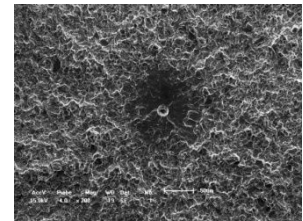
Table 3 Fatigue limits and constants of Basquin's equation

Constants	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
Fatigue limit [MPa]	584.5	1,092.6	1,266.4	1,225.2	1,284.3
A [MPa]	1,515.4	1,951.4	2,064.1	3,754.3	3,171.3
B	-0.0773	-0.0467	-0.0314	-0.0693	-0.0563

**Fig. 7** Fatigue limits with material type**Fig. 8** Hardness vs. strength and fatigue limit

값으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상을 종합적으로 검토하기 위하여 피로한도, 인장강도 및 경도간의 관계를 Fig. 8에 제시하였다. 여기서 피로한도, 인장강도 및 경도는 Type A의 값으로 정규화한 것이다. 그림에서 경도의 증가에 따라 피로한도는 일정한 값을 유지하고 있으며 이는 일정수준의 경도 또는 인장강도이상을 갖는 고강도강의 피로한도는 더 이상 증가하지 않고 일정수준을 유지한다는 보고^(4,10)와 일치하고 있다. 또한 인장강도에 비하여 피로한도는 상대적으로 낮은 경도 연관성을 가지고 있음을 알 수 있으며 이는 서로 상이한 파손기구(failure mechanism) 즉, 피로하중하에서의 피로파괴는 표면 결함(surface defect) 또는 하부 개재물(subsurface inclusion)에 의하여 파손이 발생하기 때문이라고 판단된다.

이의 확인을 위하여 SEM을 이용하여 피로하중

(a) Type A ($N_f=42,900$)(b) Type B ($N_f=507,600$)(c) Type C, ($N_f=698,900$)(d) Type D ($N_f=174,800$)(e) Type E ($N_f=191,100$)**Fig. 9** SEM images of fractured surfaces

하에서 파손된 시험편에 대한 파면관찰을 실시하였다. Fig. 9는 각 시험편 별 전형적인 파괴 표면을 나타낸 것이다. 그림에서 초기 균열이 시험편 표면에서 발생하여 피로파손이 발생한 시험편의 전형적인 파괴 거동을 보이는 Type A 및 Type B의 파면은 파단면의 요철이 심하고 거칠게 생성된 균열이 빠르게 진전되었음을 알 수 있다. 이에 비하여 초기 균열이 시험편 내부에서 발생하여 파단된 Type C, Type D 및 Type E의 경우에는 표면 하부의 내부 개재물로부터 생성된 피로 균열이 상대적으로 느린 속도로 진전하여 만드는 흔적인 어안(fish-eye) 형태의 전형적인 초기 균열 성장 양식^(11,12)을 확인할 수 있다. 일부 연구^(4,12)의 결과를 보면, 상기의 피로 파손 기구는 피로수명 즉, 작용응력의 크기에 따라 변화한다는 보고가 있으나 본 연구에서는 피로수명에 따른 파손 기구의 변화는 관찰하지 못하였다.

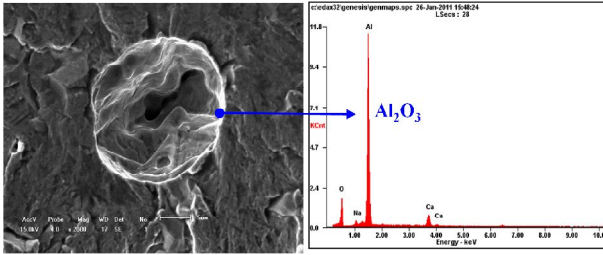
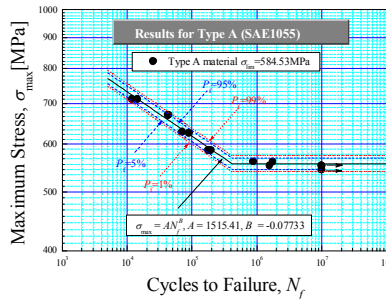
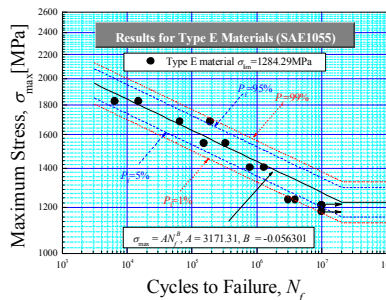


Fig. 10 EDX analysis results



(a) Type A



(b) Type E

Fig. 11 Probabilistic S-N curves of SAE1055 steel

Fig. 10 은 Type E 시험편의 파단부를 EDX 로 성분 분석한 결과는 나타낸 것으로서 어안 영역 중심부에 존재했던 개재물에서 알루미늄 성분이 관찰되었다. 이는 다른 종류의 시험편에서도 확인되었다. 이로부터 내부 균열 파괴 거동은 Al 계 개재물과 이를 감싸고 있는 Fe 계 모재의 탄성계수 차이로 인하여 피로하중하에서 계면부에 응력집중을 야기하고 이것이 초기 균열을 생성하는 것으로 판단된다.^(1,13)

3.3 피로 수명의 확률론적 평가

Fig. 6 에서 알 수 있듯이 SAE1055 강 의 피로수명에는 상당한 양의 데이터 산포가 존재하며 특히 피로수명의 변동성은 열처리 조건 즉, 경도 수준에 의하여 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 상이한 경도 수준에 따른 피로수명의 변동성 평가를

위해서는 확률론적 평가가 요구됨을 알 수 있다.

이를 위하여, 본 연구에서는 P-S-N(probabilistic stress-life) 접근방법⁽¹⁴⁾을 이용하여 SAE1055 강의 피로수명의 변동성을 평가하였다. Fig. 11 은 이의 대표적인 Type A 및 Type E 의 P-S-N 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 점선은 대수정규분포(log-normal distribution)을 이용하여 파괴확률 at $P_f=5\%$ and $P_f=95\%$ 에서의 예측결과를 나타낸 것이다. 이로부터 시험편의 종류에 관계없이 예측결과는 시험결과를 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

또한 Figs. 6 및 11 에서 피로수명의 변동성은 시험편의 종류에 따라 변화함을 알 수 있다. 이의 정량적 평가를 위하여 본 연구에서는 잔류치 해석(residue analysis) 기법을 도입하였다. 먼저 실험값과 Basquin 의 식 (1)에 의한 예측값의 차이를 나타내는 랜덤변수 Z 를 도입하였다.

$$\sigma_{\max} = AN_f^B \rightarrow N_f = \left\{ \frac{\sigma_{\max}}{A} \right\}^{1/B} \quad (1)$$

$$N_f = Z \cdot \left\{ \frac{\sigma_{\max}}{A} \right\}^{1/B} \quad (2)$$

또한 식 (2)의 양변에 상용대수를 취함으로써 랜덤변수 Z 는 다음과 같이 용이하게 계산할 수 있다.

$$\log Z = \log N_f - \log \left\{ \frac{\sigma_{\max}}{A} \right\}^{1/B} \quad (3)$$

여기서 우측변의 첫 번째 항인 피로수명 N_f 는 실험에 의한 피로수명을 의미하며 두 번째 항은 Basquin 공식에 의하여 예측된 피로수명을 의미한다. Basquin 공식에서 파손 확률 50%에 해당하는 식 (3)의 랜덤변수는 피로수명의 변동성을 의미하므로, 랜덤변수 Z 는 평균이 0 인 대수정규분포를 따른다고 가정할 수 있다.⁽¹³⁾ 이를 바탕으로 랜덤변수의 통계적 분포특성 평가를 위하여 중앙순위법 및 대수-정규분포를 이용하였다.

Fig. 12 는 중앙순위법에 의하여 해석된 실험결과와 대수정규분포에 의하여 예측된 누적확률분포함수(cumulative distribution function, CDF)의 대표적인 결과를 비교하여 나타낸 것으로서, 예측 결과는 시험편의 종류와 관계없이 실험결과와 잘 일치하고 있다. 또한 그림으로부터 Type A 의 피로수

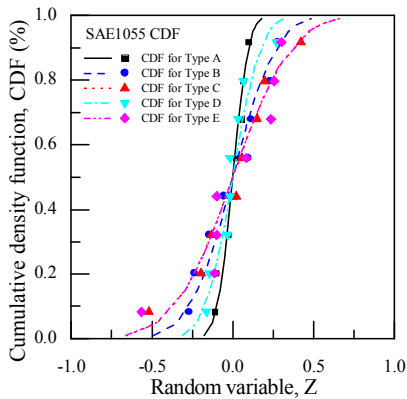


Fig. 12 CDF for Fatigue life

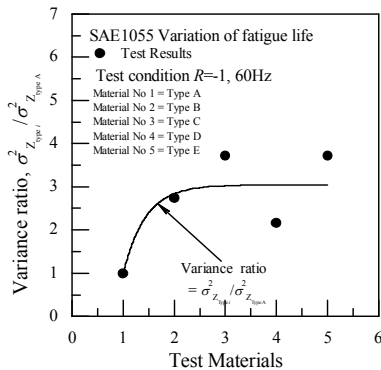


Fig. 13 Variance of Fatigue life

명의 변동성은 다른 시험편에 비하여 상당히 작음을 알 수 있다. 이의 보다 명확한 평가를 위하여 모든 시험편 종류에 대하여 랜덤변수 Z 의 분산 (variance) $\mu_{Z, Type i}^2$ 를 구하였다. Fig. 13은 이를 Type A의 분산 $\mu_{Z, Type A}^2$ 으로 정규화한 결과를 시험편 종류별로 나타낸 것이다. 이로부터 피로수명의 변동성은 시험편의 경도 수준에 따라 급격하게 증가하고 HV510 (Type C) 이상에서는 일정 수준으로 수렴함을 알 수 있다. 따라서 실제 허브베어링에 대한 피로설계시, 본 연구를 통하여 도출된 피로수명 및 이의 분산을 고려하면 보다 신뢰성이 향상된 허브베어링의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 허브베어링에 적용되는 SAE1055 강의 경도에 따른 피로거동과 이에 대한 확률론적 평가를 수행하였으며 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) SAE1055 강의 정적거동은 표면 경도의 증가에 따라 취성 역시 크게 증가하는 현상을 나타내었다. 또한 이의 인장강도 등의 변동성 역시 경도

에 따라 크게 증가하였으며 이는 취성 및 이에 따른 노치민감도의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

(2) SAE1055 강의 피로거동은 표면 경도의 영향을 크게 받음이 확인되었다. 특히 피로한도 역시 경도의 증가에 따라 증가하였으나 HV510 이상의 경도에서는 일정 수준을 유지하였다. 또한 표면 경도의 영향은 인장강도보다 피로한도에서 낮게 나타났다.

(3) 피로수명의 변동성 정량화를 위하여 P-S-N 접근방법을 이용하여 평가한 결과 예측값은 실험 결과와 일치하였다. 또한 경도의 증가에 따라 SAE1055 강의 피로수명의 변동성은 급격하게 증가하였으나 HV510 이상에서는 일정수준을 유지하였다.

참고문헌

- (1) Yoon, S.J. and Choi, N.S., 2011, "High Cyclic Fatigue Life and Fracture Behaviors of Shot-Peened Bearing Steel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 2, pp.1119~1129.
- (2) Kerscher, E. and Lang, K.H., 2010, "Influence of Thermal and Thermomechanical Treatments on the Fatigue Limit of a Binitic High-Strength Bearing Steel," *Procedia Engineering*, Vol. 2, pp.1731~1739.
- (3) Kerscher, E., Lang, K.H. and Lohe, D., 2008, "Increasing the Fatigue Limit of a High-Strength Bearing Steel by Thermomechanical Treatment," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 483-484, pp.415~417.
- (4) Murakami, Y., Kodama, S. and Konuma, S., 1989, "Quantitative Evaluation of Effects of Non-Metallic Inclusions on Fatigue Strength of High Strength Steels. I: Basic Fatigue Mechanism and Evaluation of Correlation Between the Fatigue Fracture Stress and the Size and Location of Non-Metallic Inclusions," *International Journal of Fatigue*, Vol. 11, No. 5, pp.291~298.
- (5) McGreevy, T.E. and Socie, D.F., 1999, "Competing Roles of Microstructures and Flaw Size," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 22, pp.495~508.
- (6) Li, W., Sakai, T., Li, Q., Lu, L.T. and Wang, P., 2011, "Effect of Loading Type on Fatigue Properties of High Strength Bearing Steel in Very High Cycle Regime," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp.5044~5052.
- (7) Cubberly, W.H., 1993, *Metals Handbook Ninth ed*, Vol. 1, Metal Park, Ohio, USA.
- (8) ASTM E8M. 2009, *Standard Test Method for Tension*

- Testing of Metallic Materials.
- (9) ISO 1143, 2010, Metallic Materials – Rotating Bar Bending Fatigue Testing.
- (10) Dowling, N.E., 1999, *Mechanical Behavior of Materials 2nd Ed*, Prentice Hall International Inc, Virginia, USA.
- (11) Liu, Y.B., Li Y.D., Li, S.X., Yang, Z.G., Chen, S.M., Hui, W.J. and Weng, Y.Q., 2010, "Prediction of the S-N curves of High-Strength Steels in the Very High Cycle Fatigue Regime," *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, pp.1351~1357.
- (12) Ravichandran, K.S., Ritchie, R.O. and Murakami, Y., 1999, "*Small Fatigue Cracks : Mechanics, Mechanisms and Applications*," Elsevier.
- (13) Li, W., Sakai, T., Li, Q., Lu, L.T. and Wang, P., 2010, "Reliability Evaluation on Very High Cycle Fatigue Property of GCr15 Bearing Steel, *International Journal of Fatigue*, Vol.32, Issue 7, pp.1096~1107.
- (14) Kang, K.W., Goo, B.C., Kim, J.H., Kim, D.K. and Kim, J.K., 2009, "Experimental Investigation on Static and Fatigue Behavior of Welded SM490A Steel under Low Temperature," *Steel Structures*, Vol. 9, pp.85~91.