

&lt;학술논문&gt;

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.8.721>ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 회주철의 미세구조와 인장거동 분석 및 확률론적 피로수명평가

성용현\* · 한승욱\*\* · 최낙삼\*\*\*†

\* 한양대학교 대학원 기계설계공학과, \*\* 한양대학교 기계공학과

### Microstructure, Tensile Strength and Probabilistic Fatigue Life Evaluation of Gray Cast Iron

Yong Hyeon Sung\*, Seung-Wook Han\*\* and Nak-Sam Choi\*\*\*†

\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Hanyang Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received December 20, 2016 ; Revised March 25, 2017 ; Accepted April 10, 2017)

**Key Words:** Gray Cast Iron(회주철), Microstructure Analysis(미세조직분석), Rotary Bending Fatigue Test(회전굽힘 피로시험), P-S-N Curve(확률-응력-수명 곡선)

**초록:** 보통회주철(GC300)에 Cr, Mo, Cu 첨가제를 넣어 고급 회주철(HCI350)을 제작하고, 미세 조직과 기계적 물성치, 피로강도의 변화를 연구하였다. 주철을 환봉형과 평판형 주물로 제작하였으며, 이들을 절단 및 연마하여 나이탈 수용액으로 에칭한 후 미세조직의 면적비율을 측정하였다. 첨가물에 의해 편상 흑연결정(flake graphite)의 크기가 감소하고 고밀 펄라이트 함량이 증가하여 인장강도, 피로강도의 향상이 확인되었다. 피로시험 결과 획득한 피로수명 데이터를 바탕으로 최우추정법이 적용된 2모수 와이블 분포를 이용하여 확률-응력-수명 곡선을 산출하였다. 확률-응력-수명곡선 산출 결과 HCI350은 GC300에 비해 피로강도는 크게 개선되었고 수명데이터의 분산성은 낮아졌으나, 피로응력완화에 따른 피로수명의 증가가 크게 나타났다. 산출된 확률-응력-수명 곡선을 이용하여 요구수명 사이클 수에 대한 허용응력 값을 정량적으로 제시함으로써 신뢰성 수명설계에 위한 기초자료를 제시하였다.

**Abstract:** High-grade gray cast iron (HCI350) was prepared by adding Cr, Mo and Cu to the gray cast iron (GC300). Their microstructure, mechanical properties and fatigue strength were studied. Cast iron was made from round bar and plate-type castings, and was cut and polished to measure the percentage of each microstructure. The size of flake graphite decreased due to additives, while the structure of high density pearlite increased in volume percentage improving the tensile strength and fatigue strength. Based on the fatigue life data obtained from the fatigue test results, the probability - stress - life (P-S-N) curve was calculated using the 2-parameter Weibull distribution to which the maximum likelihood method was applied. The P-S-N curve showed that the fatigue strength of HCI350 was significantly improved and the dispersion of life data was lower than that of GC300. However, the fatigue life according to fatigue stress alleviation increased further. Data for reliability life design was presented by quantitatively showing the allowable stress value for the required life cycle number using the calculated P-S-N curve.

#### 1. 서 론

회주철은 우수한 주조성, 내식성, 열전도성, 진동 감쇠능, 내마모성 및 저렴한 가격(강재에 비해 20-40%의 가격)으로 인해 산업기계에 널리 사용되

는 주물 소재이다.<sup>(1-4)</sup> 이 때문에 주철의 미세구조, 기계적 특성 및 피로거동의 개선에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 회주철의 미세구조는 주물 전에 혼합된 화학적 조성에 크게 의존하며, 용탕에 혼합하는 집중제(inoculant)와 주물의 냉각조건에 의해서도 상당히 달라진다. 회주철은 철 결정 기지재(ferrous matrix)에 분산되어 있는 흑연 층상 결정(graphite lamellas)으로 구성되어 있다. 편상

† Corresponding Author, nschoi@hanyang.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

흑연들(graphite flakes)의 크기와 형태, 함량, 분포는 흑연결정 자체의 층상구조적 특성, 철결정 기지재의 특성과 함께 회주철의 기계적 성질에 결정적인 영향을 주게 된다.<sup>(5)</sup> Collini 등<sup>(6)</sup>은 서로 다른 주조공장에서 제작된 펄라이트 회주철에 대해 미세구조 차이에 따른 재료의 기계적 특성을 비교했다. 그 결과 미세구조 차이와 기계적 거동사이에 명확한 관계를 비교할 수는 없었지만, 흑연에 의해 기계적 물성이 낮아지고 공융결정(eutectic crystal)의 미세구조 밀도가 피로한도를 높였으며 조직분석결과가 기계적 특성의 차이를 추정하는데 유용하다고 하였다.

회주철은 저렴하지만 타 소재에 비해 기계적 물성치가 떨어지는 경향이 있어 고강도의 재료로 사용하기 위해서는 강화가 필요하며, 강화 방법에는 접종제(inoculant) 투여와 열처리법이 있다. 접종제를 용탕에 투입하여 균등하게 혼합하고 용탕을 주형에 주입하며 냉각과정에서 흑연결정의 중심핵이 되어 흑연결정이 적절한 크기와 분포로 생성되도록 한다.<sup>(7)</sup> Xue와 Li<sup>(8)</sup>는 접종제 SiC와 FeSi75가 회주철의 미세구조와 물성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 열처리하는 철 기지재(ferrous matrix)의 결정상태를 변질시키는데, Liu와 Previtali<sup>(9)</sup>는 회주철 표면을 다이오드 레이저로 열처리하여 표면의 경도 및 내마모성 향상에 대한 연구하였고, Hsu 등<sup>(10)</sup>은 오스템퍼링 열처리가 회주철의 미세 조직과 파괴인성에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

Fan 등<sup>(11)</sup>은 엔진 실린더 블록용 회주철에 대해 동일한 전체 변형률 진폭에서의 고온 저 사이클 피로특성에 대해 연구하였다. Pevec 등<sup>(12)</sup>은 자동차 브레이크 디스크용 회주철에 대해 고온의 작동온도에서 피로수명 특성을 평가하였다. Weinacht와 Socie<sup>(13)</sup>는 비틀림 하중과 축 방향 하중을 받는 회주철에 대한 결함의 영향과 피로거동에 대해 연구하였다. Kim 등<sup>(14)</sup>은 브레이크 디스크용 회주철에 발생된 균열의 피로 균열전파거동에 대해 연구하였다. Shi 등<sup>(15)</sup>은 PTA(Plasma Transferred Arc)로 회주철에 TiC-W-Cr을 합금화시킨 재료의 피로 특성 향상에 대해 조사하였다. Willidal 등<sup>(16)</sup>은 고해상도의 응력 - 변형 측정을 통해 서로 다른 미세 구조에 대한 기계적 특성의 영향에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 널리 상용중인 보통 회주철(KS\_GC300)과 첨가제로 Cr, Mo, Cu를 투여한 고급 회주철(KS\_HCI350)을 환봉형과 판상형으로 제작하고, 이에 대한 기계적 물성치와 피로강도를 비교하였으며 미세 조직과 파면의 관찰로 그 차이의

원인을 분석하였다. HCI350 소재는 보통 회주철에 Cr, Mo, Cu성분을 첨가하여 제작되는 고급 회주철이며 미세 조직 및 기초 물성치가 보통 회주철에 비해 상당히 다를 수 있기 때문에 피로수명시험 데이터에 대해서는 확률론적 수명 평가가 요구된다. 또한 주물 형상에 따라 이들 회주철에 대한 피로수명의 분산을 정량적으로 분석하고, 피로시험 데이터에 대한 신뢰도를 고려한 확률-응력-수명(P-S-N) 곡선을 제시한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 주조물 및 시험편 제작

자동차 부품, 기어, 공구, 프레스 금형에 사용되는 회주철 KS\_GC300과 KS\_HCI350을 동진주공(주)에서 제작하여 사용하였다. 환봉형과 판상형의 주조물을 제작하기 위한 샌드몰드를 만들고 이를 통해 성형한 시편 주조물의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 용탕 주입온도는 1370°C, 출탕온도는

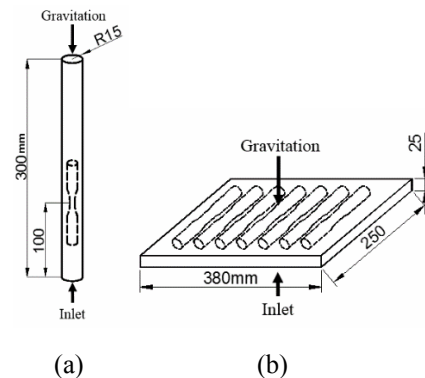


Fig. 1 Geometries of gray iron casting: (a) round bar, (b) plate

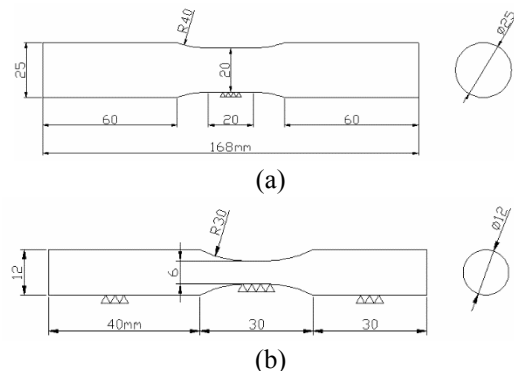


Fig. 2 Geometries of specimen machined from the molded cast iron: (a) tensile test specimen, (b) fatigue test specimen for rotary bending fatigue testing

Table 1 Chemical composition of gray cast iron

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu
GC300	3.00	1.72	0.82	0.03	0.07			
HCI350	3.02	1.88	0.93	0.04	0.08	0.38	0.35	0.44

1500℃로 하였다. 지름 30 mm의 환봉형 주조물은, 용탕을 몰드의 하부에서 상부로 중력의 역방향으로 충분히 채워 넣은 뒤에 냉각하여 제작하였으며, 미세기공과 개재물 결합이 내재할 수 있는<sup>(17)</sup> 상부를 제거한 뒤 하부에서 시험편을 절취하여 제작하였다. 시험편 제작을 위한 판상 주조물은 두께 25mm의 평판을 역시 하부에서 두께 방향(중력의 역방향)으로 용탕을 주입하여 충분히 채운 뒤 냉각 제작하였으며, 인장 시험편은 주조물 폭 방향으로 제작하였다. 인장시험용 시험편은 Fig. 2와 같이 KS B 0801규격에 의거하여 제작하였고, 피로 시험용 시험편은 JIS Z 2274규격에 의거하여 제작하였다.

## 2.2 인장시험

만능재료시험기(Z250, ZWICK)를 사용해서, 회주철 GC300, HCI350의 환봉형 및 편상형 소재별로 10개의 시험편을 0.5 mm/min의 부하속도로 인장시험을 수행하였다. 각 소재의 인장응력-인장변형률 곡선을 구하고 항복강도와 인장강도, 파단시 신장률을 구했다. 항복강도는 0.2% offset 강도로 측정하였다.

## 2.3 피로시험

피로수명 데이터를 획득하기 위하여 4절점 회전 굽힘피로시험기(H7, SHIMAZU)를 사용하여 피로시험을 수행하였다. 회전굽힘피로시험은 재료의 표면에 인장과 압축을 교대로 주며 피로를 일으키게 하도록 고안된 시험방법이다. 시험편의 표면에 작용하는 공칭인장응력  $\sigma$ 는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

M은 최대 굽힘모멘트, c는 시험편의 가로 중심축으로부터 시험부 표면까지의 거리(3mm), I는 시험편 게이지부의 원형 관성모멘트를 의미한다. 식 (1)을 재정리한 식 (2)를 이용하여 시험편 게이지부의 표면에 발생하는  $\sigma$ 를 계산할 수 있다.

$$\sigma = \frac{16Ps}{md^3} \quad (2)$$

P는 추의 하중, s는 시험편이 시험기에 고정되는 거리(30 mm), d는 시험편 게이지부의 지름(6 mm)이다.

시험 조건은 응력비 -1, 회전 수 3000rpm으로 설정하였으며, 시험 응력은 총 5개의 응력레벨로 나누어 응력 레벨 당 7개의 시험편을 사용하였다. 하중레벨은 피로시험 결과가  $10^3$  사이클 이상의 피로한도 내에 나타나도록 GC300은 앞에서 구한 인장강도의 14%, 27%, 40%, 54%, 67%로 설정하였고, HCI350은 인장강도의 30%, 40%, 50%, 61%, 71%로 설정하여 시험을 수행하였다. 본 시험에서는  $10^7$  사이클을 시험종료(RUN-OUT) 시간으로 설정하였다.

## 2.4 주사전자현미경(FE-SEM) 관찰

제작된 주조물을 절취한 후, 샌드 연마지(#2000)를 사용하여 표면연마하고 1  $\mu$ m 등급의 다이아몬드 슬러리를 사용하여 미세한 표면연마를 실시하였다. 폴리싱 표면을 3% 나이탈 부식액에 9초간 에칭한 후 주사전자현미경(FE-SEM)을 이용해 미세조직을 관찰하였다. 미세조직을 2000배로 확대하여 우선 관찰한 후 무작위로 세 곳의 위치에서 500배 화면에서 조직사진을 촬영하고 이미지 프로세싱 프로그램(I-solution, IMTechnology사)을 이용하여 각 조직의 면적 비율을 측정하였다. 시험편의 파면을 FE-SEM을 통해 관찰하고 피로 파괴의 시작점과 파괴과정을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

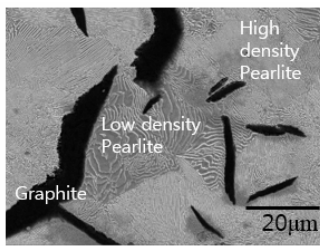
### 3.1 미세 조직 분석

Fig. 3(a)와 (b)는 회주철 GC300 환봉의 미세조직에 대한 SEM촬영 사진이다. 편상 흑연결정(flake graphite)이 생성되었고 그 주위를 고밀 펄라이트와 저밀 펄라이트의 철 결정 기지조직(ferrous crystalized matrix)이 형성된 3상의 조직으로 구성되어 있었다. 펄라이트는, 경도가 큰  $Fe_3C$ 와 연성이 좋은  $\alpha$ -Fe의 공정 층상조직(eutectic lamella structure)으로 강도와 연성이 함께 좋은데, GC300 주철은  $Fe_3C$ 의 층이 저밀도와 고밀도로 구분된 특이한 기지조직을 보였다. Fig. 3(c)는 각 조직에 대한 면적비를 산출하기 위해 이미지 처리(I-solution)한 결과이다. 이 이미지분석을 통해 본 주철들의 편상흑연, 고밀펄라이트, 저밀펄라이트의 면적비율을 산출하여 Table 2에 나타내었다.

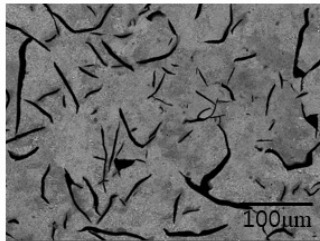
Fig. 4는 고급회주철 HCI350 환봉의 미세조직 사진을 나타내고 있다. GC300에 비해 흑연의 크기

**Table 2** Microstructural analysis results for gray cast irons

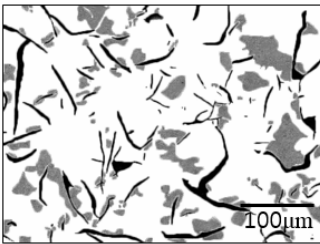
	GC300	HCI350
Graphite shape	Flake	Flake
Graphite size (μm)	20~280	20~170
Graphite (%)	6.68(±0.10)	2.69(±0.66)
High density pearlite (%)	80.19(±0.84)	84.37(±0.42)
Low density pearlite (%)	13.13(±0.93)	12.94(±0.34)



(a)



(b)

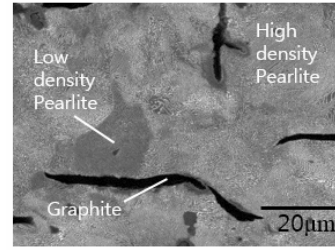


(c)

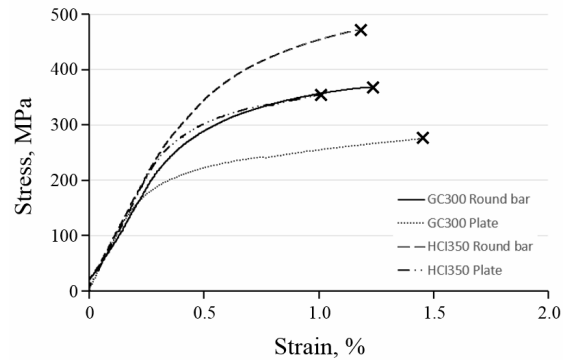
**Fig. 3** Microstructure of GC300: (a) SEM photo (2000x), (b) SEM photo(500x), (c) SEM photo for image analysis

가 확연히 작아지고, 펄라이트조직의 함량이 상대적으로 많아져 기계적 물성치가 다소 향상될 수 있을 것으로 생각되었다. HCI350 또한 미세조직사진의 이미지 분석을 통해 각 조직에 대한 면적비율을 산출하였다.

GC300과 HCI350의 구성 조직의 형태와 면적 비율은 Table 2와 같다. HCI350에서는 편상흑연의 최대 크기가 GC300에 비해 약 40% 작아졌고 흑



**Fig. 4** Microstructure of HCI350(2000x)



**Fig. 5** Typical stress- strain curves of gray cast irons tested in this study

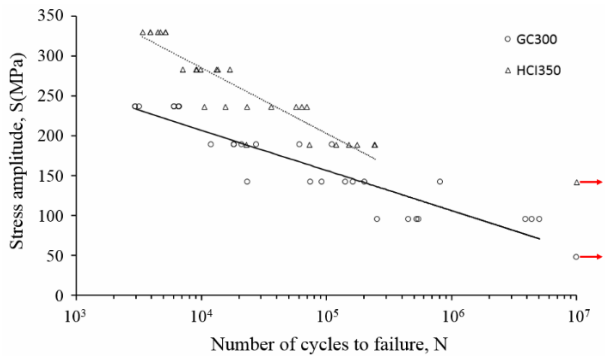
연의 면적 비율은 약 4%p 감소하였다. 저밀 펄라이트의 면적 비율은 큰 변화가 없었으며 고밀 펄라이트의 면적 비율은 약 4%p 증가하였다. HCI350에서 흑연결정의 크기와 함량은 줄어들고 강도향상을 야기하는 고밀 펄라이트의 함량이 증가한 결과는 Cr, Mo, Cu의 첨가제의 효과로 생각되며, HCI350의 기계적 인장강도와 피로강도의 향상에 좋은 영향을 미칠 것으로 예상된다. GC300과 HCI350을 판상형으로 제작하였을 경우, 두께 25mm의 평판 공간의 하부에서 두께 방향(중력의 역방향)으로 용탕을 주입하였기 때문에 주물에서는 미세한 기공이나 미세 개재물이 상부로 떠오르지 못한 채 일부 존재하였음을 확인할 수 있었다.

3.2 인장특성

Fig. 5는 회주철 GC300, HCI350의 환봉형 하부 및 판상형 소재의 인장응력-인장변형률 곡선을 나타낸다. HCI350소재는 GC300보다 강도가 전반적으로 우수하였으나, 판상형 주철의 인장 및 항복 강도는 환봉형에 비해 매우 열등해졌으며(t-검정 p<0.05), 판상형 HCI350의 인장강도는 GC300의 환봉형 수준으로 떨어지고 신장률은 오히려 GC300보다도 저하되었다(Table 3). 이와 같이 HCI350의 인장물성은 GC300보다 크게 우수하였음에도 주물의 형상에 따라 크게 차이가 나는 것은 내부 조직

**Table 3** Mechanical properties of gray cast irons

	Properties	Round bar	Plate
GC300	Tensile strength (MPa)	344.93±12.14	277.40±9.88
	Young's Modulus(GPa)	73.48±9.38	67.60±15.50
	Offset yield Strength(MPa)	295.07±29.85	192.39±25.11
	Elongation (%)	1.22±0.12	1.85±0.35
HCI350	Tensile strength (MPa)	467.67±21.59	376.38±27.62
	Young's Modulus (GPa)	75.09±8.46	70.20±10.8
	Offset yield Strength (MPa)	420.49±33.55	244.89±50.49
	Elongation (%)	1.30±0.10	1.57±0.50

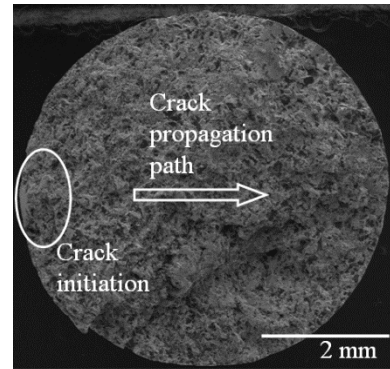
**Fig. 6** Stress-life curve of gray cast irons

의 차이와 미세기공 및 미용융 개재물의 형성으로 그 원인을 생각할 수 있다.

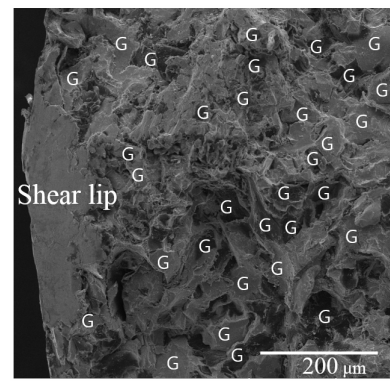
### 3.3 피로강도 및 수명

Fig. 6은 회주철 GC300, HCI350의 시험편에 대한 응력진폭 - 수명사이클 수 데이터 및 곡선을 나타낸다. 피로시험은 내부 결함이 거의 없는 환봉형 주물의 하부에서 절취한 시험편으로 두 소재의 피로강도를 비교하였다. 모든 피로시험편의 최고응력레벨은 정하중 시험에 의해 얻어진 정적 항복강도의 아래에 위치하므로 본 피로시험의 응력범위는 거시적으로 탄성범위 내에 있다. 본 실험에서는  $10^7$  사이클을 시험 종료(RUN-OUT)로 설정하였으므로, 두 소재 모두 피로시험 내 최저응력레벨에서의 피로수명 데이터는 각 소재별 7개의 시험편 모두  $10^7$  사이클을 상회하여 시험종료(RUN-OUT)되었으므로, S-N 곡선 산출에서 제외하였다.

피로시험 결과를 비교하여 보면 본 시험의 수명사이클 수의 범위에서, HCI350의 피로강도가



(a)



(b)

**Fig. 7** SEM observation of the fatigued fracture of GC300: (a) fracture surface, (b) crack initiation area

GC300에 비해 약 35% 향상된 결과를 나타내었다. 이와 같은 피로강도의 증가는 GC300에 비해 Cr, Mo, Cu 성분의 첨가로 주물의 표면이 급랭하여 경화되는 칠드(chill)현상을 방지하고 흑연의 생성이 일정량 억제되어 흑연결정의 크기와 비율이 작아지고 미세조직 내 고밀 펄라이트 비율이 높아졌기 때문으로 생각된다.

### 3.4 피로하중에 의한 파단거동의 분석

Fig. 7은 GC300 회주철의 피로시험에 따른 최저 응력수준에서의 파단면을 나타내며, 시험편의 파괴시작점과 파괴진행 방향을 나타낸다. 반복 하중에 의해 파괴가 시작되었으며, 파괴시작점 부근을 관찰하면 shear lips이 발생하여 파괴초기에는 매우 연성적인 변형 패턴을 보였다. 편상의 흑연결정(flake type graphite)은 일부는 시험의 파괴과정에서 파단되었지만, 파괴초기에는 고강성 구조체(high modulus structure)로서 응력집중원이 되었고(그림에서 G가 편상 graphite들의 흔적임) 흑연결정과 철기지재 사이의 계면파괴를 일으켜 철기지재의 연성파괴의 기점이 되었다. HCI350 경우, 첨가제로



인해 인장강도와 피로강도가 향상하였음에도 불구하고 피로시험에 의한 파괴시작점과 파괴과정은 유사한 형상을 띠고 있었다.

3.5 확률-응력-수명(P-S-N) 곡선의 추정

피로시험을 통해 획득한 응력진폭 수준별 수명 사이클 수 데이터를 바탕으로 두 가지 소재에 대하여 P-S-N 선도를 추정하였다. 일반적으로 정적극한강도와 피로수명분포는 정규분포, 대수정규분포 및 와이블분포를 따르는 것으로 알려져 있다.<sup>(18)</sup> 본 연구에서는 세 가지 분포 함수 중 최우추정법을 이용한 2 모수 와이블분포(2-parameter Weibull distribution)가 수명분포와 가장 좋은 일치를 보인다는 문헌<sup>(19)</sup>에 따라 통계분석법을 이용해 확률-응력-수명(P-S-N, Probability-Stress-Life) 선도를 추정하였다. 재료의 일정한 수명영역에 대해서 S-N 선도를 Basquin<sup>(20)</sup>이 제안한 거듭제곱형태의 식의 양변에 log를 취함으로써 식 (3)과 같이 대수방정식으로 나타낼 수 있으며, S-N 선도 상에 응력진폭 축과 수명사이클 축을 대수 눈금으로 나타내 그럴 수 있다.

$$\log N = -b \log S - \log K \tag{3}$$

여기서, b와 K는 재료계수를 나타내며, N은 부하 응력 S에 대한 허용수명을 의미한다. 식 (3)의 계수들을 산출하여 Table 4와 5에 나타냈으며, 이렇게 획득한 계수 값들을 이용해 파손확률 1%, 10%, 50%에 대하여 산출한 P-S-N 선도<sup>(21)</sup>를 Fig. 8과 9에 제시하였다. 여기서 부하응력 S는 해석의 편의상 산술눈금으로 표시하였다.

두 소재를 비교해보면 동일 수준의 응력에서

**Table 4** Calculated coefficients b and K of Eqn. 3 to obtain P-S-N curve in case of GC300 round bar

Probability of failure	b	log(K)
50%(B <sub>50</sub> )	6.530	-19.341
10%(B <sub>10</sub> )		-18.279
1%(B <sub>1</sub> )		-17.426

**Table 5** Calculated coefficients b and K of Eqn. 3 to obtain P-S-N curve in case of HCI350 round bar

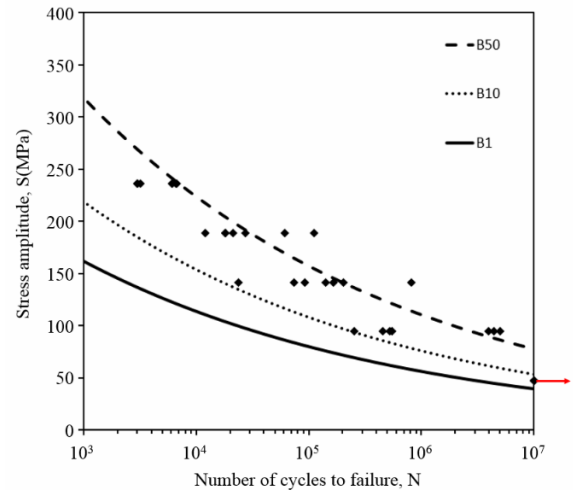
Probability of failure	b	log(K)
50%(B <sub>50</sub> )	6.657	-20.423
10%(B <sub>10</sub> )		-19.943
1%(B <sub>1</sub> )		-19.558

HCI350의 P 선도 폭(파손확률간 수명 값의 변화 폭)이 훨씬 작아졌음을 볼 수 있다. 이는 2모수 와이블분포의 형상모수가 더 컸기 때문이며, 그에 따라 P 선도의 기울기를 나타내는 b 값의 크기와 x절편을 나타내는 log(K)값이 더 크게 되었다. P 선도간의 간격이 작다는 것은 파손확률 변화에 따른 피로수명의 통계적 편차가 작다는 것을 의미한다. 또한, 계수 b가 크다는 것은 피로하중변동에 따른 피로수명의 변화가 크다는 것을 의미하고 절편 log(K)가 크다는 것은 신뢰할 수 있는 안전 수명영역이 넓다는 것을 의미한다. 따라서 HCI350은 GC300에 비하여 하중을 완화하고 파손확률을 낮출 때, 피로수명 예측값의 증가분이 상대적으로 큼을 알 수 있다. 즉, 본 피로시험에서 140MPa 이상의 시험응력 범위를 기준으로 HCI350이 GC300에 비해 동일하중에서 4배 이상의 피로수명이 예측되었으며, 반복하중을 받는 강도부재의 재료로서 HCI350이 훨씬 우수한 소재인 것으로 평가되었다.

본 시험에서 사용한 주철의 피로수명 데이터와 산출한 P-S-N 선도 간의 분산을 평가하기 위해 잔차제곱합(sum of Squared error, SSE)<sup>(21,22)</sup>을 이용하였다. 사용된 식은 아래 (4)에 나타내었으며, 산출된 결과를 Table 6에 제시하였다.

**Table 6** Sum of squared error(SSE) values between average fatigue life and experimental life values for the lower part of round bar

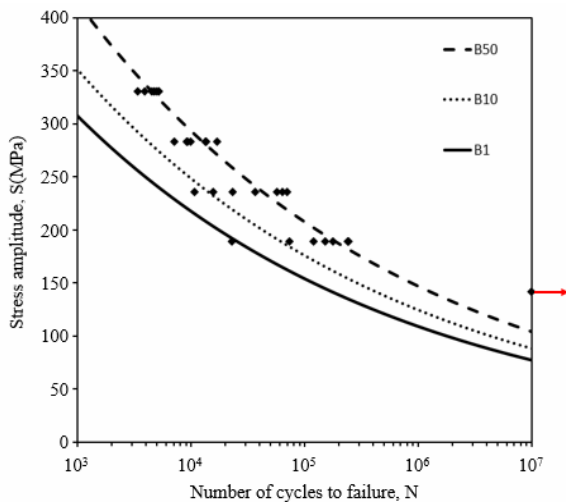
Probability of failure	GC300	HCI350
50%(B <sub>50</sub> )	6.32	1.72



**Fig. 8** Probability-stress-life curves of the lower part of GC300 round bar

**Table 7** Recommended allowable stresses of gray cast irons(GC300, HCl350) according to various life limits. Corresponding percentage against tensile strength is also displayed in each box

	Probability of failure	500,000 cycles	1,000,000 cycles	2,000,000 cycles
GC300	50%(B <sub>50</sub> )	125MPa (36.2%)	110 MPa (31.9%)	99 MPa (28.7%)
	10%(B <sub>10</sub> )	85 MPa (24.6%)	76 MPa (22.0%)	68 MPa (19.7%)
	1%(B <sub>1</sub> )	62 MPa (18.0%)	56 MPa (16.2%)	51 MPa (14.8%)
HCl350	50%(B <sub>50</sub> )	160 MPa (34.2%)	147 MPa (31.4%)	132 MPa (28.2%)
	10%(B <sub>10</sub> )	135 MPa (28.8%)	124 MPa (26.5%)	112 MPa (23.9%)
	1%(B <sub>1</sub> )	121 MPa (25.9%)	109 MPa (23.3%)	98 MPa (20.9%)



**Fig. 9** Probability-stress-life curves of the lower part of HCl350 round bar

$$SSE = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^7 (\log x_{ij} - \log x_i)^2 \quad (4)$$

$x_{ij}$ 는 각 응력레벨에서의 피로수명 값( $i$ =응력레벨 수,  $j$ =시험편 수),  $x_i$ 는 파손확률(50%)에서의 피로수명 예측값을 의미한다. 파손확률 50%는 평균수명에 상당하는데, 이 값을 기준으로 산출한 HCl350의 SSE 결과가 GC300에 비해 약 3.7배 작은 것은 그만큼 수명 데이터의 분산정도가 작아서 HCl350의 피로수명 데이터가 높은 신뢰성을 보였다.

Fig. 8과 Fig. 9에 제시한 P-S-N 곡선으로부터 각 누적파손확률을 기준으로 50만 사이클, 100만 사이클, 200만 사이클에 해당하는 허용응력과 인장강도

대비 허용응력 수준(%)을 구하였으며 Table 7에 정리하였다. 예를 들어 GC300과 HCl350로 제작한 금형이 있을 경우, 누적파손확률을 1%(B1수명)로 정할 때 50만 사이클의 수명을 기대하여 사용하고 자 하면, 금형 내부의 작용응력은 각각 62MPa, 121MPa 이하가 되도록 설계해야 할 것이다. Table 7은 각 주철에 대해 환봉형 주조물의 하부에서 절취한 건전한 조직에서 산출한 허용응력이므로, 금형제작에 이들 소재를 주물로서 쓸 경우 특히 응력집중 부위에 결함이 생성되지 않도록 주조조건을 맞추어야 한다. 만일 주조결함이 응력집중부에 유입되어 있을 경우 Table 7에 제시한 허용응력보다 훨씬 낮은 수치로 적용되어야 할 것이다.

#### 4. 결론

각종 기계 부품 성형용 금형소재에 사용되는 회주철에 대해 미세 조직 분석 및 인장시험과 회전굽힘피로시험을 수행하였다. 일반 회주철 GC300과 이에 Cr, Mo, Cu 성분을 첨가한 고급 회주철 HCl350의 기계적 물성과 피로특성을 비교하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 미세 조직을 분석한 결과 고급회주철 HCl350은 Cr, Mo, Cu를 첨가함으로써 보통회주철 GC300에 비하여 편상흑연결정(graphite)의 크기와 함량이 줄어들고 고밀펠라이트의 함량이 증가하였다.

(2) 회주철을 수직 환봉형으로 성형한 결과, 환봉의 건전한 조직인 하부에서 HCl350의 인장강도가 GC300보다 약 30% 증가하였다. 이는 Cr, Mo, Cu첨가로 인해 흑연의 크기가 작아지고 고밀펠라이트의 함량이 증가하였기 때문으로 볼 수 있다. 판상형 몰드에서 제작한 인장시험편이 환봉 하부에서 제작한 시험편에 비해 낮은 강도를 보였는데, 그 이유는 얇은 판의 특성상 주철 제작과정에서 발생하는 미세기공이나 용융되지 못한 일부 개재물들이 시험편 내부의 일반 조직과 함께 존재했기 때문인 것으로 생각된다.

(3) HCl350은 GC300에 비해 피로강도가 약 35% 향상된 결과를 나타냈으며 피로강도와 수명의 분산 또한 작아졌다. 이는 인장강도 거동과 유사한 결과를 보였으며, Cr, Mo, Cu첨가로 인해 고밀펠라이트의 함량이 증가하고 흑연의 크기가 작아지면서 피로강도가 향상되는 효과를 내고 피로 수명의 분산성을 낮춘 것으로 생각된다.

(4) 파단면의 분석결과, GC300와 HCl350의 파괴과정을 별 차이가 없었다. 피로파괴의 시작은 연성적인 파괴거동으로 인해 표면부의 시어립 발생

과 함께, 편상흑연이 응력 집중원으로 작용하고 주로 흑연결정과 철 기지재의 계면부에서 파괴가 일어나 철 기지재의 연성파괴를 유발하며 파괴가 진행하였다.

(5) 최우추정법을 적용한 2 모수 와이블분포를 이용하여 다섯 종류의 주철소재에 대해 파손확률 1%, 10%, 50%에 대한 P-S-N 선도를 산출하였는데, 이 선도를 통해 임의의 하중에 대한 피로수명을 정량적으로 예측할 수 있기 때문에 회주철 GC300과 HCl350에 대한 신뢰성 설계 데이터로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단 과제번호 (NRF-2015R1A2A2A01002413)와 2015년도 한양대학교 산학협력연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Saeger, C. M., Jr. and Ash, E. J., 1934, "Properties of Gray Cast Iron as Affected by Casting Conditions," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 13, No. 4, pp. 573~577.
- (2) Stefanescu, D. M., 2005, "Solidification and Modeling of Cast Iron-A Short History of the Defining Moments," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 413-414, pp. 322~333.
- (3) Walton, C. F. and Opar, T. J., 1981, "Iron Castings Handbook: Covering Data on Gray, Malleable, Ductile, White, Alloy and Compacted Graphite Irons," Iron Castings Society, New York, pp. 57~58.
- (4) Holmgren, D. and Svensson, I. L., 2013, "Thermal Conductivity-Structure Relationships in Grey Cast Iron," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 321~330.
- (5) Bartocha, D., Janerka, K. and Suchon, J., 2005, "Charge Materials and Technology of Melt and Structure of Gray Cast Iron," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162-163, pp. 465~470.
- (6) Collini, L., Nicoletto, G. and Konecna, R., 2008, "Microstructure and Mechanical Properties of Pearlitic Gray Cast Iron," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 488, No. 1-2, pp. 529~539.
- (7) Davis, J. R., 1996, *Cast Irons*, ASM International, USA
- (8) Xue, W. and Li, Y., 2016, "Pretreatments of Gray Cast Iron with Different Inoculants," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 689, pp. 408~415.
- (9) Liu, A. and Previtalim B., 2010, "Laser Surface Treatment of Grey Cast Iron by High Power Diode Laser," *Physics Procedia*, Vol. 689, pp. 408~415.
- (10) Hsu, C. H., Shy, Y. H., Yu, Y. H. and Lee, S. C., 2000, "Effect of Austempering Heat Treatment on Fracture Toughness of Copper Alloyed Gray Iron," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 63, No. 1, pp. 75~81.
- (11) Fan, K. L., He, G. Q., She, M., Liu, X. S., Lu, Q., Yang, Y., Tian, D. D. and Shen, Y., 2014, "High-Temperature Low Cycle Fatigue Behavior of a Gray Cast Iron," *Materials Characterization*, Vol. 98, pp. 37~46.
- (12) Pevec, M., Oder, G., Potrc, I. and Sraml, M., 2014, "Elevated Temperature Low Cycle Fatigue of Grey Cast Iron Used for Automotive Brake Discs," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 42, pp. 221~230.
- (13) Weinacht, D. J. and Socie, D. F., 1987, "Fatigue Damage Accumulation in Grey Cast Iron," *International Journal of Fatigue*, Vol. 9, No. 2, pp. 79~86.
- (14) Kim, H. K., Park, J. H., Yang, K. T. and Choi, D. H., 2006, "Fatigue Crack Growth Behavior of Gray Cast Iron for Brake Disc of a Passenger Car," *The Korean Society of Safety*, Vol. 21, No. 4, pp. 19~24.
- (15) Shi, K., Hu, S. and Zheng, H., 2011, "Microstructure and Fatigue Properties of Plasma Transferred Arc Alloying TiC-W-Cr on Gray Cast Iron," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 206, No. 6, pp. 1211~1217.
- (16) Willidal, T., Bauer, W. and Schumacher, P., 2005, "Stress/Strain Behaviour and Fatigue Limit of Grey Cast Iron," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 413-414, pp. 578~582.
- (17) Davis, J. R., 1996, *Cast Irons*, ASM International, USA, pp. 155~172.
- (18) Hwang, W. B. and Han, K. S., 1988, "Analysis on Fatigue Life Distribution of Composite Materials," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 9, pp. 2353~2360.
- (19) Jang, S. S. and Kim, S. T., 2000, "A Statistical Analysis on Fatigue Life Distribution in Spheroidal Graphite Cast Iron," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 46, No. 14, pp. 1755~1764.
- (20) Basuquin, O. H., 1910, "The Exponential Law of Endurance Tests," *American Society for Testing and Materials Proceedings*, Vol. 10, pp. 625~630.
- (21) Lee, J. Y., Jung, D. W. and Choi, N. S., 2012, "Fatigue Fracture Behavior and Statistical Life Evaluation of Hybrid Composite/Metal Beam-Joints for a Low-Floor Bus," *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 14, pp. 1755~1764.
- (22) 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. 9 pp. 1119~1129.