

< 논문 >

구상흑연주철 극저사이클 피로파괴의 시뮬레이션 구현

김민건* · 임복규*

(2006년 5월 24일 접수, 2006년 10월 30일 심사완료)

Simulation of Extremely Low Cycle Fatigue Fracture in Ductile Cast Iron

Min gun Kim and Bok kyu Lim

Key Words: Extremely Low Cycle Fatigue(극저사이클 피로), Spheroidal Graphite Cast Iron(구상흑연주철), Microvoids(미소공동), Fatigue Fracture(피로파괴)

Abstract

In this study, fatigue tests were carried out under push-pull loading condition using spheroidal graphite cast iron in order to clarify the internal fatigue fracture mechanism in an extremely low cycle fatigue regime. It is found that a successive observation of internal fatigue damage it is found that the fracture processes go through three stages, that is, the generation, growth and coalescence of microvoids originated from debonding of graphite-matrix interface. It is also found that the crack which is initiated from the void propagates by coalescence of neighboring cracks and the fatigue crack growth rate can be expressed in form of the Manson-Coffin rule type. In this paper, quantitative analyses of fatigue properties for realization of simulation about fatigue life evaluation are also presented.

1. 서론

최근 지진파와 같이 극소수회의 과대하중을 발생시키는 이른바 극저사이클 피로(Extremely Low Cycle Fatigue ; ELCF)^(1,2)의 문제가 관심의 대상이 되고 있다. 소수회의 과대하중은 비록 지진과 같은 현상이 아니더라도 구조물에 가해질 수 있는 요인은 많다. 기계 · 구조물 중 특히 가스저장 시설 및 원자력 발전소에 과대하중이 걸려 파괴된다면, 그 피해는 너무나 참혹할 것이다. 구조물이 과대하중을 받게 되면 응력집중부에 대변형을 일으키게 되고, 이것이 반복되게 되면 극저사이클

피로의 독특한 파괴 양상을 보이게 된다.

극저사이클 피로에 대한 실험적 연구는 외국에서 찾아 볼 수가 있다. Yonekura와 Komotori는 극저사이클 피로가 재료 내부에서부터 시작되며, 정적 인장시험시의 파괴연성과 밀접한 관계가 있다고 보고 하였다.⁽³⁾ Shimizu는 내부에서 시작된 미소 결함이 서로 합체하여 균열로 발전하며, 이 균열은 저사이클 피로의 Manson-Coffin법칙에 따라 전파함을 보였다.⁽⁴⁾ 그러나 이 방법의 국내 연구는 거의 찾아볼 수가 없으며, 특히 파괴의 진행상황을 정량적으로 다룬 연구는 발견되지 않는다. 그동안 저자는, 극저사이클 피로의 특성을 정량적으로 파악하는 기초 연구를 수행하여, 그 연구 성과를 학술지에 보고한 바 있다.^(5,6)

본 연구에서는, 기계 및 구조재로 많이 사용되고 있는 구상흑연주철을 대상으로 하여, 소성변형진폭(plastic strain range, $\Delta\epsilon_p$)의 증가에 따른 부분손상의 축적거동을 정량적으로 측정 · 평가하여

† 책임저자, 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
E-mail : kmg@kangwon.ac.kr
TEL : (033)250-6313 FAX : (033)250-6313

* 회원, (재)울산산업진흥테크노파크 자동차부품혁신센터

Table 1 Chemical composition(wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
GCD45	3.75	3.0	0.15	0.03	0.015	0.04	bal.

Table 2 Characteristics of the graphite

Treatment Condition	D _{sg} (μm)	H _{sg} (%)	V _{sg} (%)	N _{sg} (1/mm ²)
Annealing 600℃, 2hr	20	61	27	237

D_{sg} : Average size of graphite

H_{sg} : Nodularity of graphite

V_{sg} : Volume fraction of graphite

N_{sg} : Nodule count of graphite

보이드의 전파법칙을 이끌어내고, 이 보이드의 전파법칙을 변형하여 Manson-Coffin 법칙형의 피로 수명식을 유도한다. 또한 여기에 관련된 피로 현상을 지배하는 제반 인자들을 정량화하고, 이를 바탕으로 실제 실험을 하지 않고서도 피로특성을 파악할 수 있는 시뮬레이션 기법을 개발하고자 한다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 시험편은 구상흑연주철(GCD 45)이다. 화학성분은 Table 1에 나타내었으며, 흑연 조직인자의 특성은 Table 2에 정리하였다. Fig. 1은 시험편의 조직사진이다. Fig. 2에 제시된 시험편 형상은 φ10, R20의 모래시계형이며, 시험부를 에머리페이퍼와 알루미늄 파우더를 사용하여 경면으로 연마하였다. 그 후 기계가공으로 인한 잔류응력을 제거하기 위해 600℃에서 1시간동안 진공풀림처리를 하였다.

극저사이클 피로시험에 사용된 시험기는 SHIMADZU Co.의 유압 서보식 만능피로시험기(10KN-20L, CAP:10tf±50mm)이다. 시험은 응력비 R=-1, 주파수는 20Hz, 인장과 압축이 일정한 정현파로 실시하였다. 실험 시의 최소 직경부의 변형률의 측정은 시험편 중앙에 변위 게이지를 부착하여 발생한 신호를 A/D변환기(Converter)를 통해 소성변형진폭(Δε_p)을 일정하게 제어하였다.

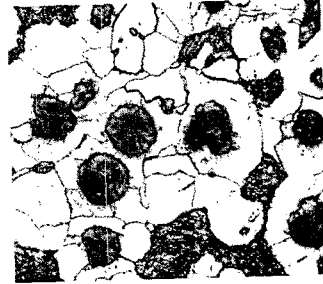


Fig. 1 Microstructure of specimen. ×200

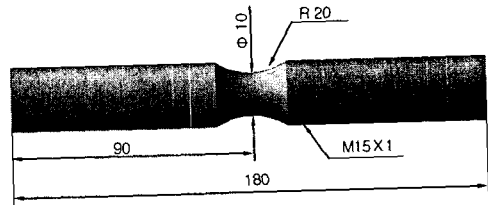


Fig. 2 Specimen configuration for fatigue test(mm)

또한 소정의 반복 사이클에서 내부 손상량을 관찰하기 위해, 각각의 사이클 최대 인장점에서 피로시험을 중단하고, 시험편을 액체질소(Liquid nitrogen)로 냉각시켰다. 이 후, 시험편을 인장 취성파단시켜서, 피로손상을 받은 파단면을 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰한다.

3. 실험결과 및 고찰

극저사이클 피로시험 결과 Fig. 3과 같은 파면을 관찰할 수 있다. 파면에서 검게 나타나는 부분은 반복하중에 의한 피로 손상부이며, 광택이 있는 부분은 극저온의 액체질소에 의한 취성파면 부분이다. 반복수비 n/N_f=0.4의 단계에서는 파면의 대부분 취성파괴가 관찰되었다. 그것에 비해, n/N_f=0.9의 단계에서는 파면 중심부에서 거시적인 피로손상부가 관찰되었다. 이러한 파면을 종합적으로 관찰하면 재료내부에서 발생된 미소균열은 파단직전에 급속하게 성장하여, 인접한 균열과의 연결과정을 거쳐서 최종파단 된다고 판단된다. 미소균열 성장거동을 더욱 상세히 관찰하기 위하여 주사형 전자현미경(SEM)을 사용한 관찰을 수행하였다.

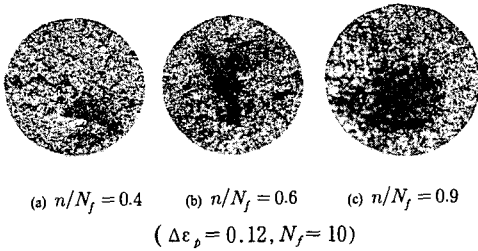


Fig. 3 Macroscopic observation of fracture surface

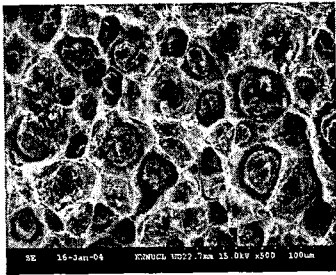


Fig. 4 Observation of coalescence of microvoid

그 결과 Fig. 4와 같이, 인장 압축의 반복부하로 인해 흑연입자와 기지조직이 분리되어 보이드가 형성되었다. 또한 이 보이드는 인접한 보이드와 연결되어 보이드가 성장함을 알 수 있다. 이 결과를 토대로 보이드의 발생과 성장과정을 모식도로 나타내면 Fig. 5와 같다. 반복부하 초기 재료 내부에서 흑연을 기점으로 보이드가 발생하고 (a), 증가되는 반복부하에 의해 보이드가 성장·연결을 되풀이 하고(b, c), 파단직전에는 보이드 사이의 연결이 급속하게 일어나 거시적 내부균열을 형성하게 된다. 즉, 극저사이클 피로파괴 과정은 흑연주위의 보이드의 생성, 성장, 연결, 합체로 이어진다는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 극저사이클 피로파괴의 모델화

4.1 보이드 발생과정의 모델화

흑연과 기지조직이 완전히 분리하는 상태를 보이드라고 정의하면 최초 인장과 압축과정에서 반복수 $n=5/4$ 회에서 보이드가 발생되었다. 따라서 $n=5/4$ 회를 본 시뮬레이션에서는 $n=1$ 회로 설정하

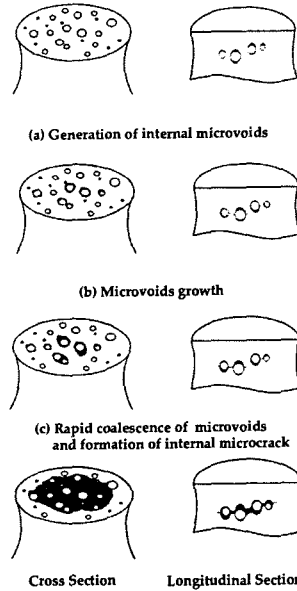


Fig. 5 Schematic diagram illustrating fracture mechanism

여 $n=1$ 회에서 보이드가 발생한다고 했다. 그리고 그 때의 평균 흑연지름은 $20\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 따라서 흑연입자에서 보이드가 발생하는 초기 보이드 지름(D_i)은 식 (1)과 같이 결정된다.

$$\Delta\epsilon_p = 4\ln\frac{D_g}{D_i}$$

$$e^{\frac{\Delta\epsilon_p}{4}} = \frac{D_g}{D_i}$$

$$D_i = \frac{D_g}{e^{\frac{\Delta\epsilon_p}{4}}} \Rightarrow D_i = \frac{20\mu\text{m}}{e^{\frac{\Delta\epsilon_p}{4}}} \quad (1)$$

4.2 보이드 성장과정의 모델화

시뮬레이션에서는 흑연을 기점으로 발생한 보이드와 보이드에서 발생한 내부균열을 시험편 직경 방향으로 흑연을 중심으로한 동심원상에 보이드를 성장시킨다. 그 때의 보이드 성장속도는 다음과 같이 도출한다.

4.2.1 보이드 직경의 성장속도($\frac{dD}{dn}$)산출

Fig. 6과 같이 반복부하(N)에 따라 보이드 직경

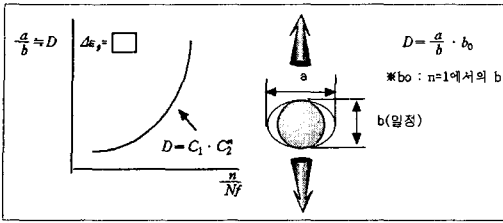


Fig. 6 Schematic illustration explaining shape factor a/b

(D)이 지수 함수적으로 증가(실험적 사실)하므로,

$$D = C_1 \cdot C_2^n \quad (2)$$

보이드 직경의 성장속도가 보이드 직경에 비례한다고 가정하면,

$$\frac{dD}{dn} = C_3 \cdot D \quad (3)$$

식 (2)을 미분하면

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dn} &= C_1 \cdot C_2^n \cdot \ln C_2 \\ C_1 \cdot C_2^n \cdot \ln C_2 &= C_3 \cdot D = C_3 \cdot C_1 \cdot C_2^n \\ \therefore C_3 &= \ln C_2 \end{aligned}$$

이것을 식 (3)에 대입하면

$$\frac{dD}{dn} = \ln C_2 \cdot D = \ln C_2^D \quad (4)$$

실험에 의해 D와 N과의 관계를 구하고 위의 회귀곡선으로부터 C₁, C₂, n 값이 구해진다.

식 (3)은

$$\frac{dD}{dn} = \ln C_2 \cdot D \quad (5)$$

상수 C₃(= ln C₂)와 소성변형진폭 (Δε_p)의 관

계를 구하면, C₃ = a₂ · Δε_p^{b₂}로 가정. a₂, b₂ = 상수 위의 식을 변경하면,

$$\frac{1}{a_2} = \frac{1}{C_3} \cdot \Delta \epsilon_p = \frac{1}{\ln C_2} \cdot \Delta \epsilon_p^{b_2} \quad (6)$$

양변에 (1/b₂)승을 제공해주면,

$$\left(\frac{1}{a_2}\right)^{\frac{1}{b_2}} = \frac{1}{\ln C_2}^{\frac{1}{b_2}} \cdot \Delta \epsilon_p \quad (7)$$

$$\text{set, } \frac{1}{b_2} = M,$$

$$A^M = B^M \cdot \Delta \epsilon_p \quad (8)$$

즉, const. = B^M · Δε_p가 된다. B^M · Δε_p = const.의 그래프를 양 대수 눈금으로 그리면 a₂의 값은 C₃ = a₂ · Δε_p^{b₂}의 공식으로부터 구해진다. 이하로 각 소성변형진폭 Δε_p에서 보이드 성장속도 dD/dn와 보이드 지름D의 관계식을 나타낸다.

$$\Delta \epsilon_p = 0.04, \frac{dD}{dn} = 0.00044 \cdot D$$

$$\Delta \epsilon_p = 0.06, \frac{dD}{dn} = 0.00164 \cdot D$$

$$\Delta \epsilon_p = 0.08, \frac{dD}{dn} = 0.00441 \cdot D$$

$$\Delta \epsilon_p = 0.10, \frac{dD}{dn} = 0.00703 \cdot D \quad (9)$$

다음으로 식 (3)에서 나타난 상수 C₃와 소성변형진폭 Δε_p의 관계를 구한다. 그 결과를 이하로 나타낸다.

$$C_3 = 9.75 \Delta \epsilon_p^{3.098} \quad (10)$$

따라서 보이드 성장법칙은 다음과 같이 된다.

$$\frac{dD}{dn} = 9.75 \Delta \epsilon_p^{3.098} \cdot D \quad (11)$$

4.3 보이드의 연결과정의 모델화

4.3.1 연결 가능한 흑연지름과 흑연사이의 거리

보이드 사이의 연결 난이도는 보이드를 형성하는 흑연 입자지름과 흑연간 거리가 관련되어 있다고 판단하여 $\Delta \epsilon_p = 0.06$ 에 $n=12$ 의 반복부하 후 극저온에서 인장 취성파단시켜, 그 파면을 이용해서 흑연의 입자지름과 흑연사이의 거리 측정을 했다. 측정 할 때에는 Fig. 7에 보이는 방법을 이용한다. 이때, 흑연사이의 거리 L 은 식 (12)를 사용하여 계산했다.

$$L = l - \frac{(D_a + D_b)}{2} \quad (12)$$

D_a : 연결을 발생시킨 작은 흑연의 입자지름

D_b : 연결을 발생시킨 큰 흑연의 입자지름

l : 흑연과 흑연 중심사이의 거리

4.3.2 보이드의 연결조건

보이드의 연결조건을 모델화하기 위해 흑연에서 발생한 보이드의 지름 (D_a, D_b)과 보이드 사이의 거리 (L_{ab}), 인접한 보이드 사이의 각도 ($\cos \alpha$)

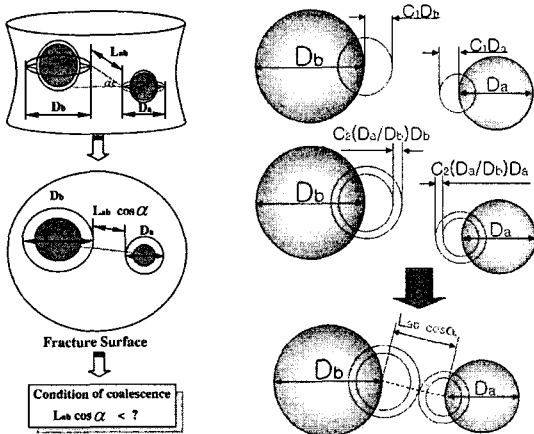


Fig. 7 Modeling of micro void coalescence

를 Fig. 7(a)와 같이 나타내었다. 그리고 $L_{ab} \cos \alpha$ 가 일정한 조건을 갖추면 인접한 보이드끼리 연결하게 된다. Fig. 7에는 보이드의 연결과정에 영향을 주는 요소가 제시되어 있다.

1. 흑연을 기점으로 발생한 보이드는 재료내부에서 응력집중원으로 작용하고, 그 크기는 흑연의 지름과 비례한다($C_1 D_b, C_1 D_a$). 이런 생각을 수평면상에서 원으로 표현하였고, 이 원은 모든 방향에서 인접한 보이드와 연결이 가능하다고 판단하였다.

2. 연결직전 보이드는 상대 보이드 크기에 대한 영향력을 받는 것으로 판단하고 식 (13), (14)로 나타내었다.

$$C_1 D_a + \left(C_2 \frac{D_a}{D_b} \right) D_b \quad (13)$$

$$C_1 D_b + \left(C_2 \frac{D_b}{D_a} \right) D_a \quad (14)$$

보이드 연결에 영향을 주는 계수는 $C_2 D_a / D_b$ 이고, C_2 :상수, $0 < D_a / D_b < 1$ 이다. 이때 인접한 두 원이 만나면 보이드의 연결조건은 성립되고 미소 균열이 발생하게 된다.

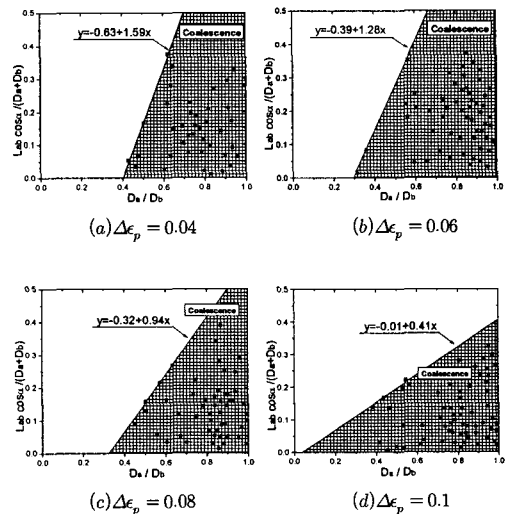


Fig. 8 Relationship of $L_{ab} \cos \alpha / (D_a + D_b)$ vs. D_a / D_b

$$L_{ab}\cos\alpha \leq C_1(D_a + D_b) + C_2\frac{D_a}{D_b}(D_a + D_b) \quad (15)$$

$$\leq (D_a + D_b)\left(C_2\frac{D_a}{D_b} + C_1\right)$$

식 (15)로부터, 보이드 연결 조건식은 $L_{ab}\cos\alpha/(D_a + D_b)$ 와 D_a/D_b 의 관계에 의해 표현됨을 알 수 있다. 따라서 정량화된 보이드 연결 조건식을 도출하기 위해, 실험으로 각 소성변형진폭($\Delta\epsilon_p$)에 대한 $L_{ab}\cos\alpha/(D_a + D_b)$ 와 D_a/D_b 의 관계를 구한다(Fig. 8). 또한, 초기 균열발생은 소성변형진폭에 의존하므로 C_1, C_2 는 소성변형진폭 $0 < L_{ab}\cos\alpha < 0.4(D_a + D_b)$ 의 함수이므로 상수 C_1, C_2 와 소성변형진폭의 관계를 구하면 식 (16), (17)과 같이 된다.

$$C_1=1.01-9.64\Delta\epsilon_p \quad (16)$$

$$C_2=2.41-19.37\Delta\epsilon_p \quad (17)$$

그리고 $L_{ab}\cos\alpha/(D_a + D_b)$ 와 D_a/D_b 의 관계에서 연결을 만족시킨 보이드는 식 (18)과 같은 관계식이 성립된다.

$$0 < \frac{L_{ab}\cos\alpha}{(D_a + D_b)} < 0.4$$

$$0 < L_{ab}\cos\alpha < 0.4(D_a + D_b) \quad (18)$$

결국, 보이드 연결 조건식은 식 (15)~(18)으로 된다.

4.4 흑연 조직인자 정의

시뮬레이션에 필요한 각 조직인자의 정량적인 정의는 다음과 같다.

4.4.1 흑연 체적률

흑연 체적률은 Fig. 9와 같이, 측정영역 내에 존재하는 흑연의 총면적을 측정영역의 면적으로 나눈 값으로 정의한다. 일반적인 구상흑연주철의 탄소량은 대략적으로 3.5%~3.8%의 범위 내에 있으며, 기지조직이 같은 경우 이 값에 큰 차이는

없다.

4.4.2 평균흑연입경

평균흑연입경은, Fig. 10과 같이, 흑연부분 A_g 와 같은 면적을 가지는 A_j 의 원을 추정하고, 그 직경 d_j 로 정의한다. 평균 흑연입경은 재료를 주조할 때의 열이력으로 크게 변할 수 있으며, 흑연에서 발생된 초기 균열은 흑연입자 지름의 영향을 받는다.

4.4.3 구상화율

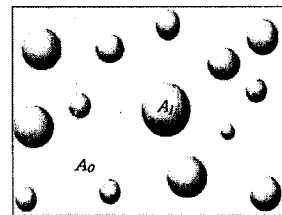
구상화율은, Fig. 11과 같이, 흑연부분의 외접원에 대한 면적률(A_g/A_k)로 계산한다. 우선 면적률을 Table 3과 같이 5단계의 레벨로 분류하고, 각 레벨의 대표적 면적률에 대한 값으로 환산한다. 그 값을 식 (19)로 계산하여 평균치를 구하고 이를 구상화율로 정의한다.

$$H_{sg} = \frac{0 \times N_A + 0.25 \times N_B + 0.5 \times N_C + 0.75 \times N_D + 1 \times N_E}{N_A + N_B + N_C + N_D + N_E} \quad (19)$$

구상화율의 값이 100%에 접근할수록 흑연의 형상이 구(spheroidal)의 형태로 변한다. 구상화율이 높을수록 응력집중이 낮아져 피로수명을 향상시킬 수 있다.

4.4.4 흑연 입자수(N_{sg})

흑연 입자수는 Fig. 12와 같이 단위 면적당 흑연의 수로 정의한다. 본 연구에서는 1mm² 이내에 존재하는 흑연수를 시뮬레이션 상의 흑연입자수라고 정의한다.



$$\text{Volume Fraction} = \frac{1}{A_0} \sum_{j=1}^n A_j$$

Fig. 9 Volume fraction of spheroidal graphite cast iron

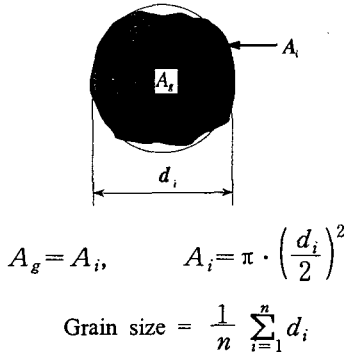


Fig. 10 Grain size of spheroidal graphite cast iron

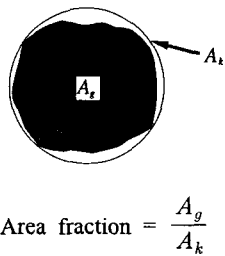


Fig. 11 Nodularity of spheroidal graphite cast iron

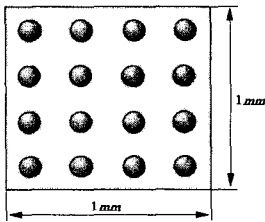


Fig. 12 Nodule count of spheroidal graphite cast iron

Table 3 Quantitative estimation of the spheroidization of graphite cast iron

Form	A	B	C	D	E
N	N _A	N _B	N _C	N _D	N _E
Area	0~	20~	40~	60~	80~
Aver.	0	0.25	0.5	0.75	1.0

5. 결론

본 연구에서는, 구상흑연주철의 극저사이클 영역에서의 피로파괴 거동을 상세히 고찰하고, 각

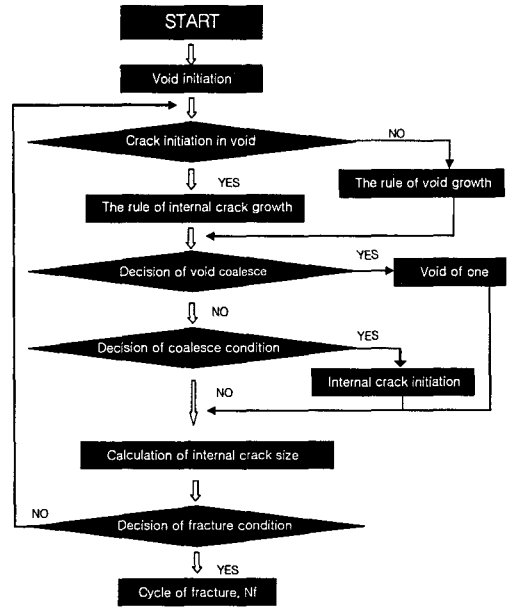


Fig. 13 The simulation of extremely low cycle fatigue

흑연 조직인자의 정의와 균열 발생과 진전, 연결과정의 모델화를 통하여, Fig. 13과 같은 시뮬레이션 기법을 구축하게 되었다. 그리고 이러한 시뮬레이션 구현에 필요한 보이드의 발생과정, 성장과정, 연결과정을 각각 수식으로 도출하였다. 본 연구의 피로파괴 시뮬레이션 기법은 향후 전문가 프로그램(Expert program) 개발을 위한 기초를 제공함과 동시에 막대한 비용과 시간이 소요되는 실험실 실험을 생략할 수 있게 되어, 기계 및 구조물의 신속한 설계 및 최적설계에 기여하게 될 것이다.

후 기

본 연구는 2004년도 강원대학교 학술연구구조성비로 연구하였음.

참고문헌

- (1) Steven R. Lampman., 1996, "Fatigue and Fracture Properties of Cast Irons," ASM Handbook, Vol. 19, pp. 665~679.
- (2) Masatoshi Kuroda., 2002, "Extremely Low

- Cycle Fatigue Life Prediction Based on a New Cumulative Fatigue Damage Model," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 6, pp. 699~703.
- (3) Yonekura, D., Aral, Y., Komotori, J. and Shimizu, M., 1999, "Fracture Mechanism of Ferritic Ductile Cast Iron in Extremely Low Cycle Fatigue," *Trans. of JSME(A)*, Vol. 65, No. 632 pp. 821~826
- (4) Shimada, K., Komotori, J. and Shimizu, M., 1987, "The Applicability of the Manson-Coffin Law and Miner's Law to Extremely Low Cycle Fatigue," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. (A)*, Vol. 53, pp. 1178~1185.
- (5) Kim, M. G, Lee, B. H, Yoo, B. H. and Kim, H. Y., 1999, "The Fatigue Life Prediction by Internal Fatigue Damage under Extremely Low Cycle Loading," *Trans. of KSME(A)*, Vol 23, No 12, pp. 2328~2333.
- (6) Kim, M. G. and Kim, J. H., 1999, "Influence of Matrix Structural and Mechanical Factors on Fatigue Limit in Austempered Ductile Iron," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 23, No. 2, pp. 287~293.