

< 논문 >

선박 엔진용 Fuel Pump Block 소재(CK35)의 피로파손 원인규명

김태규[†] · 최성종* · 강창원**
(2004년 9월 10일 접수, 2005년 3월 18일 심사완료)

A Cause Analysis of Fatigue Failure of Fuel Pump Block Material(CK35) for Marine Engine

Tae Gyu Kim, Sung Jong Choi and Chang Won Kang

Key Words: Fuel Pump Block(연료 펌프 블록), Marine Engine(선박 엔진), Inclusions(개재물), Fatigue Fracture(피로 파괴), Fatigue Crack(피로 균열), Cavitations(공동)

Abstract

DIN CK35 (JIS S35CK) steels have been used as a material in fuel pump blocks for marine engines. Failures in the inner surface of a drilling hole, due to the initiation of fatigue cracks have been frequently reported. However, the mechanism initiating these cracks and growths has not been clearly diagnosed yet. This study was conducted using a scraped fuel pump block, containing an initiated fatigue crack in the inner surface of a drilling hole. Initially, the cracks and fractured surfaces inside the block were investigated using an optical microscope and a SEM (Scanning Electron Microscope). In addition, microstructure observation, fatigue life test and fatigue crack growth test were performed using a specimen, which was taken from the same block. Results from these tests are summarized as follows; (1) The early crack in the block was supposed to occur inside the inner surface of the drilling hole. (2) The fatigue endurance of this material was about 330 Mpa. (3) The early crack was generated in the cavitations created by the breakdown of a big inclusion, or separation between the big inclusion and the base metal, in which the fundamental ingredients of the inclusion were C, S, and Mn. (4) In order to prevent these types of failures, the suppression of inclusions inflow by improving the casting process, formation of fine inclusions by applying a heat treatment process, and coating of the surface of the drilling hole were required.

1. 서 론

1980년대 이후, 급속한 경제성장과 더불어 중화학 분야, 전기전자 분야, 정밀기계 분야, 자동차 및 수송기계 분야 등 거의 모든 제조업 분야에서 기술발전을 이루었다.

특히 조선업 분야에 있어서도 수입에 의존하여 온 많은 소재 및 부품의 국산화를 실현하였으며,

자체 기술력만으로 엔진을 개발하는 등 상당한 경쟁력을 축적하여 현재는 일본을 뛰어넘어 세계 시장을 이끌어 가고 있다.

그러나 선박엔진의 연료 및 배기 구동장치 부품인 fuel pump block은 아직까지 대부분 수입에 의존하여 오고 있어 국산화가 시급한 상황이다.

더구나 세계 양대 선박설계사의 하나인 NSD사에서 설계 제작한 fuel pump block에서 피로균열(fatigue crack)에 의한 파손이 발견되고 있으나, 명확한 발생 원인이 밝혀지지 않고 있는 실정이다. 이러한 손상원인 및 기구를 검토하여 국산화에 필요한 기초 데이터를 보유함으로써 국제적 기술력의 우위를 선점하고 경쟁력을 확보할 필요가 요구되고 있다.

† 책임저자, 회원, 밀양대학교 신소재공학과
E-mail : tgkim@mnu.ac.kr
TEL : (055)350-5452 FAX : (055)353-5457

* 회원, 경일대학교 기계자동차학부

** 밀양대학교 대학원

본 연구에서는 사용도중에 소재 내부의 피로균열 발생으로 인하여 폐기된 NSD사의 fuel pump block을 대상으로 하여 손상 및 파괴원인을 분석하고 검토하여 국산화에 필요한 소재의 기초자료를 확보하고, 파손 재발을 방지하기 위한 대안의 수립 및 피로수명을 개선시키기 위한 방법개발 또는 향상된 재료개발에 필요한 데이터를 확보하고자 하였다.

2. 시험 재료

본 연구의 수행에 사용된 재료는 선박 엔진의 hydraulic actuator pump block의 소재로서 사용되고 있는 구조용 탄소강 DIN 17200 CK35 (JIS S35CK)⁽¹⁾이며, 모든 분석 및 시험에 사용된 재료는 사용 중 결함발생으로 용도 폐기된 Mitsubishi사에서 공급한 block으로부터 채취된 것이다.

Table 1에 DIN 규격 및 JIS 규격에서 요구하는 화학성분과 본 연구에서 실제로 사용된 재료의 Mitsubishi 평가결과 및 한국기계연구원(KIMM)의 평가결과를 병기하여 제시하였다. 거의 동일한 결과를 보여주고 있으나, Mitsubishi 평가결과에서 황(S)의 양이 다른 시험결과와 상당한 차이를 보이고 있었다.

또한, Table 2에는 본 연구재료의 기계적 특성치를 제시하고 있으며, DIN 규격 및 JIS 규격의 요구기준과 실제로 사용된 재료의 Mitsubishi 평가결과 및 본 연구에서의 평가결과를 병기하여 제시하였다. 그러나 Mitsubishi 평가결과보다 본 연구에서 실시한 평가결과가 강도레벨이 비교적 높게 나타났다. 이러한 평가결과 차이는 Mitsubishi에서는 사용되지 않은 재료에서 얻은 값이라고 추측되나, 본 연구에서는 고온(약 450°C)에서 장시간 사용되어지고 결함이 발생하여 폐기된 재료에서 시험편을 채취하여 평가한 결과에 기인하는 차이라고 사료된다. 즉 많은 합금강에서 보고되고 있는, 고온 환경 하에서의 장기사용에 따르는 뜨임취화(temper brittleness)와 동반하는 재질의 열화현상에 기인한다고 추정되어진다.⁽²⁾

조직관찰에 사용된 재료도 사용 중 결함생성으로 폐기된 hydraulic actuator pump block으로부터

채취된 DIN 17200 CK35 (JIS S35CK)이다.

조직관찰 시험편은 block으로부터 채취한 후, 에머리 페이퍼(emery paper)를 이용하여 #2000까지 단계적으로 연마한 후, 산화 알루미늄(Al_2O_3) 분말을 이용하여 표면을 마무리 연마하였다. 시험편을 초음파 세척 후, 2% 나이탈(nital) 용액으로 약 20초 동안 에칭(etching)하고 광학현미경으로 관찰하였다. 관찰된 조직사진을 Fig. 1에 제시하는 것과 같이 등축 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)⁽³⁾가 혼재하는 노멀라이징(normalizing) 열처리 조직의 특징을 잘 보여주고 있었다.

Table 1 Chemical composition of the CK35

	C	Si	Mn	P(max)	S(max)
DIN 17200 CK35	0.32 ~0.39	0.15 ~0.35	0.50 ~0.80	0.035	0.035
JIS S35CK (S35C)	0.32 ~0.38	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	0.030	0.035
Mitsubishi	0.33	0.30	0.69	0.011	0.007
KIMM	0.37	0.42	0.70	0.014	0.010

Table 2 Mechanical properties of the CK35

	TS (MPa)	YS (MPa)	E (%)	RA (%)	HT
DIN 17200 CK35	539 ~686	323	20	50	QT
	490 ~637	274	27	-	Norm.
JIS S35CK (S35C)	490 ~610	255	14	35	QT
Mitsubishi	558	333	22.9	37.8	QT
Miryang Univ.	590	472	13.5	37.3	

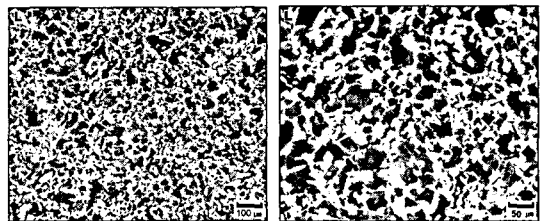


Fig. 1 Optical micrographs of the CK35

재료를 공급한 Mitsubishi사에서 880°C에서 7시간 유지 후, 수냉(Water Quenching: WQ) 처리한 다음 이어서 580°C에서 12시간 유지 후, 공냉(Air Cooling: AC)하는 QT처리를 실시했다고 보고하였으나, 재료의 조직은 일반적인 노멀라이징(normalizing) 열처리 조직을 하고 있었다.

Fig. 2에는 Mitsubishi사에서 공급받은 결함이 발견된 hydraulic actuator pump block을 절단하여 block 내부의 균열을 관찰한 것이다.

초기균열은 가공 hole 표면부에서 발생하여 block

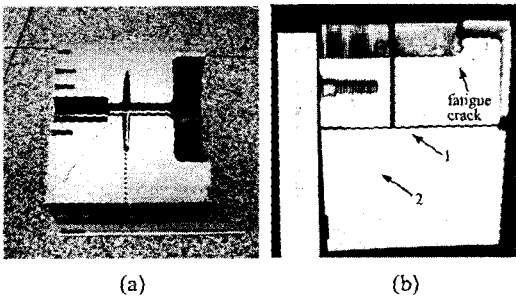
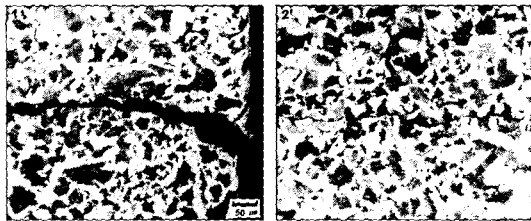
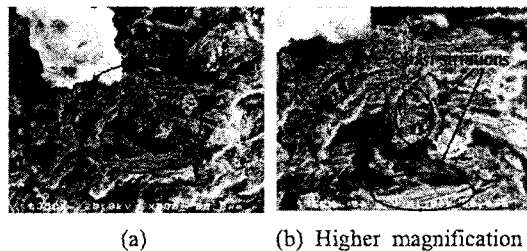


Fig. 2 Fatigue crack in hydraulic actuator pump block



(a) Micrograph of area 1 (b) Micrograph of area 2 in Fig. 2(b) in Fig. 2(b)
Fig. 3 Fatigue crack path in hydraulic actuator pump block



(a) (b) Higher magnification view of A in (a)
Fig. 4 SEM micrographs of fatigue fracture surface of hydraulic actuator pump block

내부로 성장한 것으로 추정되어진다. 균열 성장경로와 재료조직과의 관계를 보다 면밀하게 검토하기 위하여 균열 표면부의 하부조직을 관찰한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 균열이 페라이트(ferrite) 및 펄라이트(pearlite) 입내로 전파하는 입내파괴(transgranular fracture)와 계면을 따라 전파하는 입계파괴(intergranular fracture)⁽⁴⁾의 양상이 혼재하고 있었다.

Fig. 4에는 block으로부터 채취한 파면의 SEM(Scanning Electron Microscope)관찰로부터 얻은 전형적인 파면사진을 나타내었다. 파면은 전체적으로 산화 및 연료 등으로 오염되어 있었으나 전형적인 피로파면을 형성하고 있었으며, Fig. 4(b)에 나타내는 것과 같이 피로파괴의 특징적인 모양으로 알려진 quasi-striation⁽⁵⁾도 관찰되었다.

3. 실험 방법

DIN 17200 CK35 (JIS S35CK)의 피로한도 및 피로수명 평가를 위하여 hydraulic actuator pump block에서 채취한 재료로 ASTM E466-82⁽⁶⁾에 의거하여 기계가공으로 Fig. 5에 나타내는 것과 같은 치수와 형상을 가지는 plate 형 표준 시험편을 제작하였다. 또한, 피로균열 진전특성의 검토를

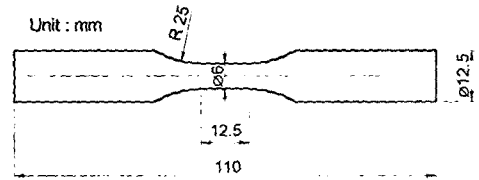


Fig. 5 Shape and dimension of the fatigue life test specimen

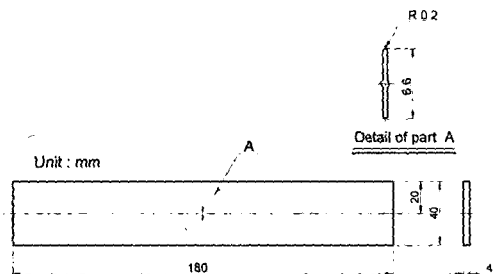


Fig. 6 Shape and dimension of the fatigue crack propagation test specimen

목적으로 ASTM E647-95⁽⁷⁾에 준거하여 Fig. 6에 나타내는 것과 같은 CCT(Center Cracked Tension specimen) 표준 시험편을 제작하여 시험을 수행하였다. 중앙 노치는 피로균열 발생 특성에 미치는 영향과 가공경화(work hardening)를 최소화하기 위하여 센터 드릴로 중앙에 홀(hole)을 뚫은 후, 와이어 가공으로 인공노치 길이 $2a=6.6$ mm, 곡률반경 $\rho=0.2$ mm로 일정하게 가공하였다.

본 시험에 사용된 피로 시험기는 INSTRON사의 유압-서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine: model 8516)로 최대 용량은 10 ton이며, 피로수명 평가시험 조건은 응력 비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) $R=0.1$ 일정의 정현 파형(sine wave), 인장-인장 하중형태를 채택하였다. 하중 반복속도는 20 Hz로 일정하게 유지하였으며, 실온, 대기 중에서 수행하였다.

피로균열 진전 시험조건은 응력 비 $R=0.1, 0.3, 0.5$ 및 0.7 의 정현 파형(sine wave), 인장-인장 하중형태를 채택하였으며, 하중 반복속도는 10 Hz 일정으로, 실온, 대기 중에서 수행하였다.

균열길이의 측정은 1/100 mm 까지 측정이 가능한 이동식 광학현미경을 이용하여 측정하였으

며, ΔK 및 da/dN ⁽⁷⁾의 산출에 있어서는 좌우 균열 길이의 평균값을 이용하였다.

4. 실험 결과

선박 엔진의 hydraulic actuator pump block의 소재로서 사용되고 있는 구조용 탄소강 CK35에 대한 피로수명 평가시험 결과를 최대 응력 σ_{max} 와 파단 사이클 수의 관계로 Fig. 7에 나타내었다. 시험 결과로부터 피로한도(fatigue endurance

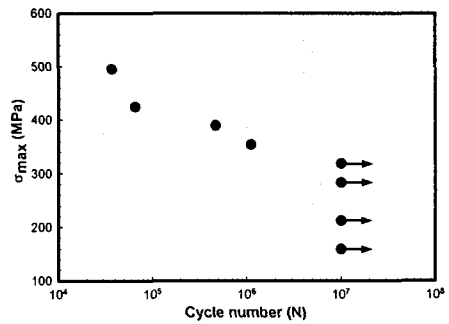
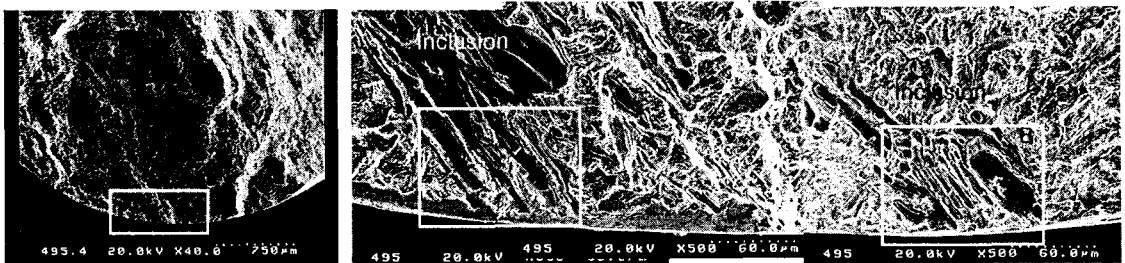
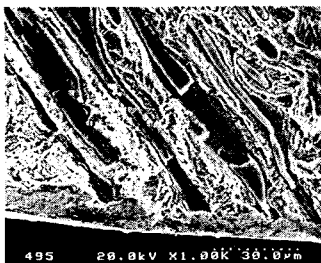


Fig. 7 Relationship between σ_{max} and cyclic number to failure

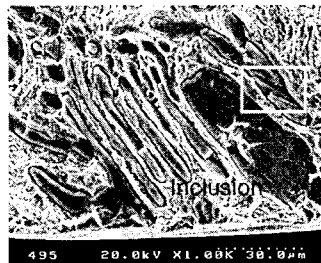


(a) Crack initiation area

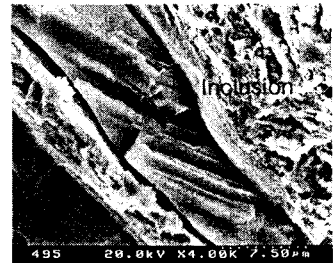
(b) Higher magnification view of rectangle in (a)



(c) Higher magnification view of rectangle A in (b)



(d) Higher magnification view of rectangle B in (b)



(e) Higher magnification view of rectangle in (d)

Fig. 8 SEM micrographs of fatigue fracture surface ($\sigma_{max}=495$ MPa)

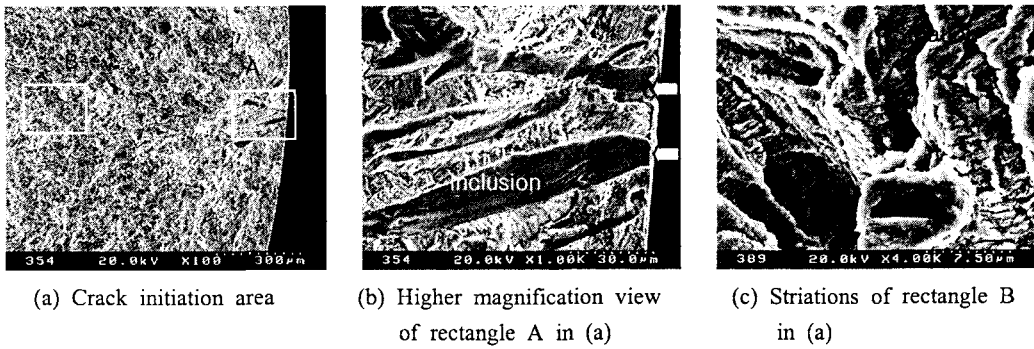


Fig. 9 SEM micrographs of fatigue fracture surface ($\sigma_{max}=354\text{MPa}$)

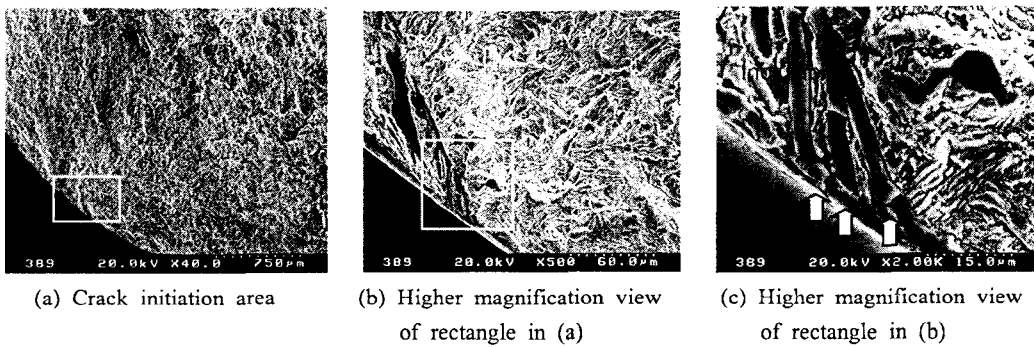


Fig. 10 SEM micrographs of fatigue fracture surface ($\sigma_{max}=389\text{MPa}$)

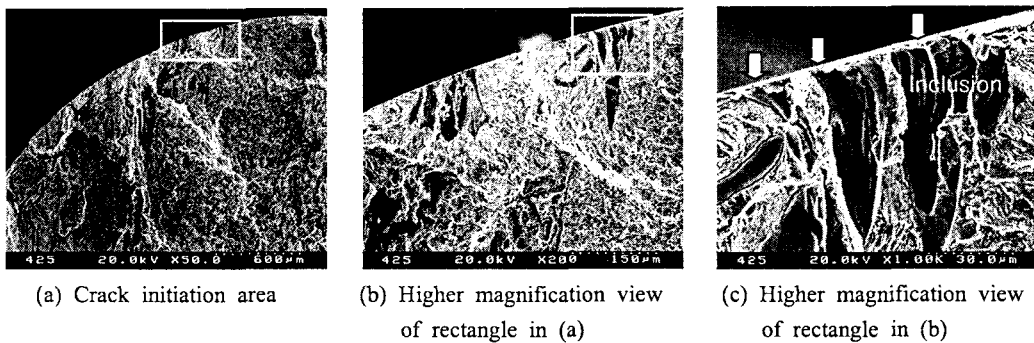


Fig. 11 SEM micrographs of fatigue fracture surface ($\sigma_{max}=425\text{MPa}$)

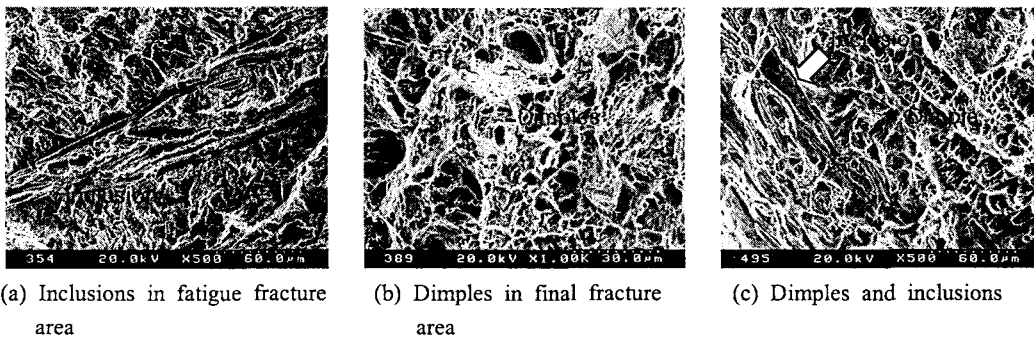


Fig. 12 SEM micrographs of common features in fatigue fracture surface of CK35 steel

limit)⁽⁸⁾는 약 330 MPa 정도로 추정되며, 항복강도 470 MPa의 약 70%의 정도로서 비교적 피로 내구성이 좋은 재료로 평가되었다.

피로시험 종료 후 균열발생 및 성장기구와 재료조직과의 관계를 검토하기 위하여 파면의 SEM 관찰을 수행하였다. 모든 시험편에서 초기균열의 발생은 표면에서 발생하여 내부로 성장하였으며, 때로는 복수의 장소에서 발생한 경우도 있었다.

Fig. 8에 $\sigma_{max}=495$ Mpa의 반복하중에서 파괴된 시험편의 파면으로부터 관찰된 SEM 사진을 제시하였다. 초기균열의 발생은 Fig. 8(a)를 보다 고배율로 관찰하고 있는 (b)에서 확인 할 수 있는 것과 같이 표면 및 표면근방에 존재하는, 길이 수 100 μm 의 방향성을 가지는 규모가 큰 개재물 (inclusions)⁽⁹⁾에서 발생하고 있었다. 이러한 개재물은 황화물(sulfide), 인화물(phosphides), MnO, MnS 등으로 알려져 있으며, 주조 시에 유입된 불순물(entrapped slag)의 경우에도 유사한 형태로 재료 내부에 존재 한다고 보고되고 있다.⁽⁹⁾

개재물은 일반적으로 취성이 매우 강하기 때문에 표면근방에 있는 것이 취성적으로 깨어져서 초기균열을 발생시키거나, 모재와의 경계에서 변형을 차이에 기인하는 박리 및 공동(cavitation)현상으로 초기균열을 발생시킨다고 알려져 있다.⁽¹⁰⁾

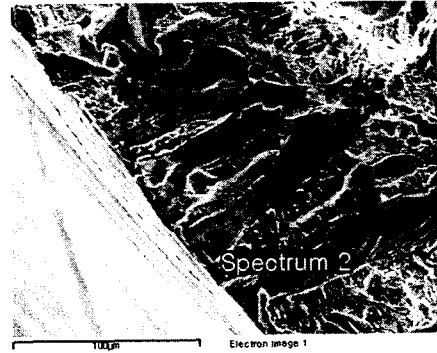
본 시험편에 있어서도 보다 고 배율로 관찰한 Fig. 8(c), (d)에서와 같이 모재와의 경계에서 박리가 발생한 것이 확인 되었다. 또한, Fig. 8(d)를 고 배율로 관찰한 (e)와 같이 개재물의 취성과파괴와 모재와의 계면에서 박리하여 공동현상이 동시에 발생한 경우가 대부분이었다.

Fig. 9 ~ Fig. 11에 나타나고 있는 것처럼 거의 모든 시험편에 있어서 초기 피로균열은 시험편 표면근방에 위치한 개재물에서 발생한 후 내부로 성장하여 최종파단에 이르고 있었다. 또한 일반 피로파괴 영역에 해당하는 파면에서는 Fig. 9(c)에 나타내는 것과 같이 피로파괴의 특징으로 잘 알려진 striation이 관찰되는 곳도 있었다.

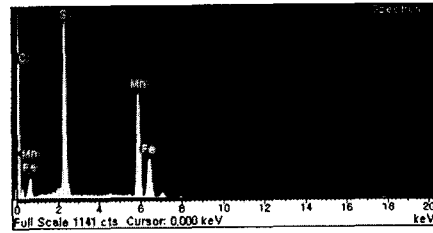
Fig 12에는 모든 시험편에서 공통적으로 관찰되는 일반적인 파면 형상을 제시하였다. (a)는 시험편 내부의 피로파면 영역에서 관찰된 개재물을 보여주고 있으며, (b)는 최종파단부에 형성되어있는 dimple을, (c)는 dimple영역 존재하는 개재물을

나타내고 있다.

개재물의 화학성분을 평가하기 위하여 EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)를 분석한 결과를 Fig. 13에 나타내었다.



(a) SEM micrograph of crack initiation region for EDX analysis



(b) The EDX analysis result of inclusion in (a)

Fig. 13 The result of chemical experiment of inclusion

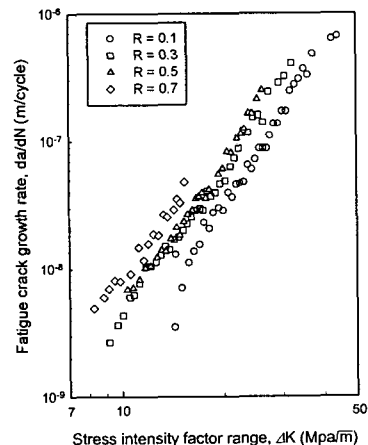


Fig. 14 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

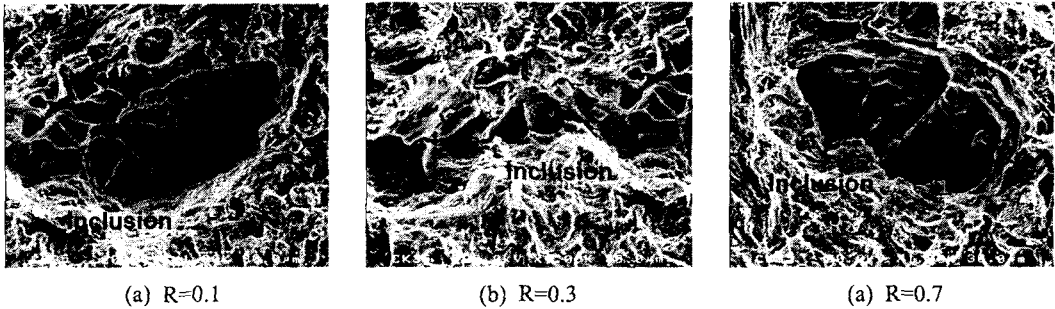


Fig. 15 Inclusions and cavitations on the fracture surface of fatigue crack growth test

Fig. 13(a)는 분석수행 지점의 위치를 나타내고 있으며 (b)는 성분을 분석한 결과이다. 성분은 주로 C, S, Mn으로 이루어진 화합물임을 알 수 있었다.

또한, 피로 균열진전 특성의 검토를 위하여 수행한 균열진전 시험결과를 Fig. 14에 나타내었다. 응력비 R=0.3과 0.5의 데이터 분포가 다소 중첩되어 나타나고 있으나, 저 ΔK 영역에서는 응력비에 의존하여 균열진전 특성의 차이가 나타나고 있으며, 일반 구조용 탄소강에서 흔히 볼 수 있는 경향을 보여주고 있었다.

Fig. 15에는 피로균열 진전 시험으로 얻은 파면에 존재하는 개재물 및 그 주위에 형성되어 있는 cavitation을 SEM으로 관찰한 것이다. 전체적인 파면의 형태는 피로 수명시험으로 얻은 파면과 큰 차이가 없었다. 그러나 개재물이 취성적으로 파괴하여 대부분이 탈락하고 일부만이 파면에 남아 있는 경우가 많았다.

5. 결론

선박엔진의 fuel pump block 소재로서 사용되고 있는 CK35 강 of block 내부에서 발생한 균열발생의 원인을 분석하고 검토하여 소재의 국산화 및 피로수명 개선에 필요한 기초자료를 확보하기 위하여 수행된 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Fuel pump block의 초기균열은 가공 hole 표면부에서 발생하여 block 내부로 성장하였다.

(2) 피로수명 평가시험의 결과 피로한도는 약 330 MPa이었으며, 초기균열 발생은 시험편 표면

근방에 위치한 방향성이 강하고, 규모가 100 μm 이상의 규모가 큰 개재물(inclusion)의 파괴 및 모재와 개재물 간의 박리에 의한 공동현상에 기인하는 것으로 밝혀졌다.

(3) 피로수명 연장을 위하여 주물공정 개선에 의한 개재물 유입의 억제, 후열처리에 의한 분산, 가공표면 코팅(coating) 등이 요구된다.

(4) 피로균열 진전시험의 결과는 응력비 R=0.1, 0.3, 0.5 및 0.7에서 일반적인 탄소강의 균열진전 특성을 보이고 있었으며, 피로수명 평가시험 파면과 피로균열 진전시험 파면에서는 동일하게 개재물이 다수 존재하고 있었으며, striation이 형성되어 있는 곳도 관찰되었다.

참고문헌

- (1) Japanese Standard Association, 2000, Ferrous Metallurgy: JIS Handbook 1-1, p. 599 (in japanese).
- (2) Shoji, T., 1994, The Aged Degradation and Life Prediction of Structural Materials of Fossil and Nuclear Power Plants, REALIZE INC., p. 59 (in japanese).
- (3) The Iron and Institute of japan, 1997, Heat Treatment of Iron, p. 48 (in japanese).
- (4) Kitagawa, H. and Koterazawa, R., 1977, Fractography, Baihukan, p. 17 (in japanese).
- (5) Koterazawa, R., 1981, Fractography and its Applications, Nikkan Kogyo Shinbunsha, p. 62 (in japanese).
- (6) ASTM E 466-82, 1995, "Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Test of

Metallic Materials," pp. 470~474.

- (7) ASTM E647-95, 1995, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," pp. 578~614.
- (8) Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens and Henry O. Fuchs, 2000, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc. p. 68.
- (9) ASM Handbook 12-Fractography, 1992, pp. 67, 221, 247.
- (10) ASM Handbook 12-Fractography, 1992, p. 65.