

박용 디젤엔진용 분리형 피스톤의 내구설계

손정호^{*†} · 하만영^{**} · 안성찬^{*} · 최성욱^{*}

* 현대중공업 선박해양연구소, ** 부산대학교 기계공학부

Durability Design of Composite Piston in Marine Diesel Engines

Jung Ho Son^{*†}, Man Yeong Ha^{**}, Sung Chan Ahn^{*} and Seong Wook Choi^{*}

** Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.,

** School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received August 28, 2009 ; Revised February 24, 2010 ; Accepted February 24, 2010)

Key Words : Composite piston(분리형 피스톤), Fatigue influence factor(피로영향계수), Cocktail-shaking(요동 냉각), Fatigue analysis(피로해석), Marine diesel engine(박용 디젤엔진)

초록: 180 bar 이상의 최대 폭발압과 높은 열부하를 가진 박용 디젤엔진의 분리형 피스톤은 크라운과 스커트를 각각 고강도 합금강과 연성주철을 사용한다. 피스톤의 피로설계를 위해서는 작용 하중, 표면조도 뿐만 아니라 온도영향에 의한 강도 저하를 고려해야 하며, 실린더 내부의 폭발력이 크라운을 거쳐 스커트에 전달되는 하중의 분율도 고려되어야 한다. 본 연구에서는 노치부의 피로강도 증분을 응력구배방법을 사용하여 고려하였으며, 열전달해석과 그에 따른 온도영향을 고려하였다. 하중 분율과 접촉압력은 공차해석을 통해 최적화하였으며, 프로타입 엔진에 대한 실차 시험을 통해 냉각 및 내구설계를 검증하였다.

Abstract: A composite piston with a crown made of steel and a skirt made of NCI is used in a marine diesel engine, which has a maximum firing pressure of over 180 bar and a high thermal load. In the fatigue design of the composite piston, the fatigue is influenced by factors such as the load type, surface roughness, and temperature; further, the distribution ratio of the firing force from the crown to the skirt is important for optimizing the design of the crown and skirt. In this study, the stress gradient method was used to consider the effect of the load type. The temperature field on the piston was predicted by cocktail-shaking cooling analysis, and influence of high temperature on fatigue strength was investigated. The load transfer ratio and contact pressure were optimized by design of the surface shape and accurate tolerance analysis. Finally, the cooling performance and durability design of the composite piston were verified by performing a long-term prototype test.

1. 서론

박용 디젤엔진에서 주로 사용되는 분리형 피스톤(composite piston)은 고온, 고압에 노출되는 크라운(crown)과 피스톤으로 전달된 폭발력을 피스톤 핀을 통해 커넥팅 로드로 전달하는 스커트(skirt), 크라운과 스커트를 조립하는 결합하는 볼트로 구성된다. 고온, 고압에 노출되는 크라운은 고강도의 저합금강(low alloy steel)을 사용하며, 폭발압력을 주로 받는 스커트는 높은 압축강도를 가지며 복잡한 형상 구현이 가능한 구상흑연주철(NCI, nodular cast iron)이 사용된다.

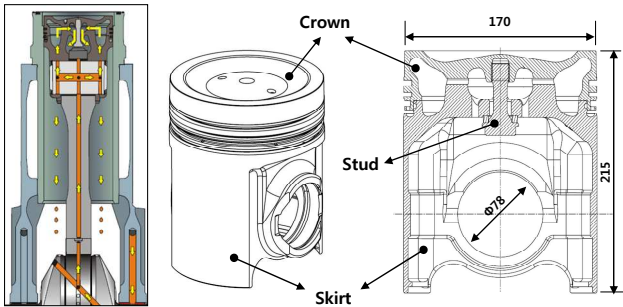
박용 디젤엔진은 상용차(commercial vehicle)이나

발전용으로 쓰이는 엔진과 달리 엔진 회전속도가 600 ~ 1,200 rpm 미만에서 운전되며, 이러한 경우 피스톤의 냉각은 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 커넥팅 로드를 통해 공급된 윤활유를 피스톤으로 유입시켜 냉각 갤러리(cooling gallery)에 채우고 이를 상하 왕복운동에 따른 출렁이게 하여 냉각하는 요동형 냉각방식(cocktail-shaking)을 채택하고 있다.

MDO(marine diesel oil)와 HFO(heavy fuel oil)을 주로 사용하는 박용 디젤엔진의 경우 연료 및 윤활유 포함된 탄소가 피스톤 링 그루브(ring groove) 또는 피스톤 내부에 쌓여 피스톤의 피로 파손 또는 내마멸성을 저하하기 때문에 적정 수준으로 냉각 성능이 확보되어야만 한다.^(1,2)

피스톤의 내구설계와 관련해서는 온도가 높아짐에 따라 감소하는 강도, 작용 하중에 따라 다르게

† Corresponding Author, jhson@hhi.co.kr



(a) Oil-supply path (b) Composite piston
Fig. 1 Composite piston

나타나는 피로강도, 가공 또는 주조에 따라 달리 나타나는 표면조도의 영향을 정확하게 고려해야 주어 야만 피스톤의 높은 구조 신뢰성이 보장된다.

본 연구에서는 피스톤의 내구설계를 위해 요동형 냉각에 따른 피스톤의 열전달해석 및 온도 예측을 수행하였으며, 피스톤의 온도분포를 이용한 열응력 해석을 포함한 재료 및 접촉 비선형 구조 해석을 통한 공차 설계를 수행하였다. 피스톤의 내구성은 구조해석으로부터 구한 응력을 사용하여 피로해석을 수행함으로써 시제품 제작 전 단계에서 검증하였으며, 시제품에 대한 내구성 시험을 통해 최종적인 내구설계를 확정하였다.

2. 피로해석 방법

2.1 피로영향계수

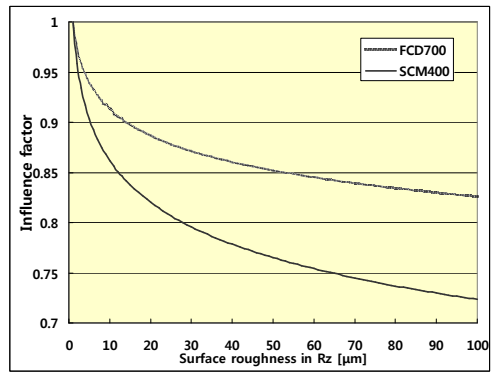
피로영향계수(fatigue influence factor)는 시편 피로 시험을 통해 얻어진 피로 물성치를 실제 구조물에 적용할 때 그 차이를 보정해 주는 값을 의미한다. 가장 적용하기에 애매한 피로영향계수는 하중계수로 기존의 방법⁽³⁾은 굽힘 또는 인장압축 하중 및 비틀림 하중으로 구분하여 초기 피로한도를 추정한다. 본 연구에서는 응력구배방법(stress gradient method)을 사용하여 하중의 영향을 평가하였다.⁽⁴⁾ 응력구배방법은 식 (1)과 정의되는 것으로 인장압축 피로시험으로부터 얻어진 피로한도를 계측이나 구조해석을 통해 얻어진 2 개 지점 사이의 응력구배를 계산하여 응력구배가 크면 피로한도를 증가시키는 방법이다.

$$\chi = \frac{1}{\sigma_{max}} \frac{d\sigma}{dx} \tag{1}$$

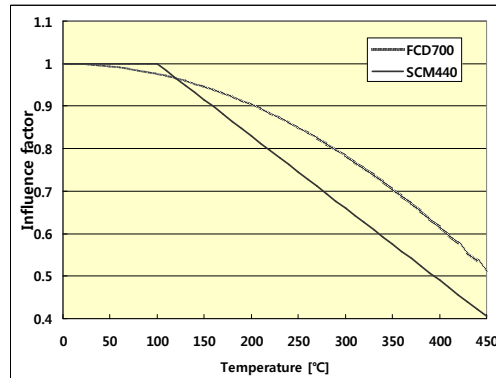
표면조도의 영향은 피로영향계수 중에 가장 일반적이고도 중요한 계수로 인장강도에 따른 표면조도계수(surface roughness factor)를 적용하고 있으

Table 1 Mechanical properties

부품	재질명	항복응력 [MPa]	인장강도 [MPa]	비고
크라운	SCM440	650	900	
스커트	FCD700	440	700	인장
		546	910	압축



(a) Surface roughness



(b) Temperature

Fig. 2 Fatigue influence factor⁽⁴⁾

나, 적용 재질이 달라지면 그 계수가 달라지는 것을 고려하지 못 하는 단점이 있다.⁽³⁾ 크라운의 재질은 SCM440이며, 스커트의 재질은 FCD700이다. 각 재질에 대한 기계적 성질은 Table 1에 나타난 바와 같다. 재질에 따른 표면조도계수는 Fig. 2(a)에 보이는 바와 같다.⁽⁴⁾ FCD700이 SCM440보다 표면조도의 영향을 상대적으로 적게 받음을 알 수 있다. 따라서, 크라운은 가공 정도에 따라 피로강도의 증감을 크게할 수 있다. 스커트와 같은 주물품의 경우 부재의 두께에 따라 냉각 속도를 달리함에 따라 나타나는 강도의 증감이 더 큰 영향을 미치기 때문에 두께의 영향이 매우 중요하게 된다. 고온 상태에 놓이게 되는 피스톤의 경우 온도영향계수가 중요한 인자가 된다. 온도영향계수는

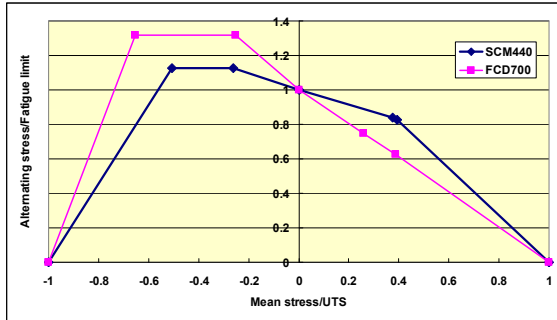


Fig. 3 Haigh diagram of crown and skirt

온도 상승에 따른 재료의 인장강도 저하와 관련 있는 것으로 본 연구에서는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같은 온도영향계수를 적용하였다.⁽⁴⁾

2.2 Haigh 선도

인장-압축 피로한도를 기준으로 응력구배 효과에 따른 피로한도를 구한 다음 표면조도계수와 온도계수를 곱하여 평가 지점의 평균응력이 없는 국부 피로한도를 계산하였다. 크라운과 스커트의 인장-압축 피로한도로 각각 405 MPa와 204 MPa를 사용하였다.

평균응력의 영향을 고려하기 위해 인장 및 압축 평균응력에 따른 피로시험을 통해 얻을 수 있으며, 피로시험을 통해 Haigh 선도를 만들기 위해서는 응력비(stress ratio) $R=-1$ 지점 외에 $R=0$ 지점에서의 값이 필요로 한다. 본 연구에서 사용한 크라운의 재료인 SCM440과 스커트 재료인 FCD700의 Haigh 선도는 Fig. 3에 보이는 바와 같다.

구조해석에서 변동응력과 평균응력이 계산되면 Fig. 3에 보이는 Haigh 선도에 넣어 평균응력이 있을 때 감소한 피로한도를 계산하고 이 값을 변동응력으로 나누어 주어 피로안전율을 계산하였다.

크라운에 대한 피로해석을 할 때 변동응력 축에 $R=-1$ 에서의 피로한도를, 평균응력 축에 인장강도를 찍어 직선으로 연결한 Goodman 선도를 사용하면 보수적인 평가가 되어 경량화에 대한 저해요인이 될 수 있다. 스커트의 경우는 압축 평균응력 영역에서 피로강도의 상승이 30% 이상이기 때문에 폭발에 의해 압축 하중을 주로 받는 스커트의 강건설계에 활용할 수 있다.⁽⁴⁾

3. 피스톤의 냉각해석

3.1 냉각 갤러리 내부의 요동형 냉각

냉각 갤러리에 충전된 오일은 피스톤의 상하운동에 의해 크라운 상부로부터 전달된 연소열을 소산하게 된다. 이러한 요동형 냉각은 식 (2)와 같이

Table 2 Heat transfer coefficient

	Outer gallery	Inner gallery
D[m]	0.12	0.041
d[m]	0.039	0.0294
D^*	3.06	1.395
Pr	347.1	347.1
Re_b	5,495.4	1,400.6
Nu_b	478.2	181.7
$h[W/m^2K]$	1,030.8	1,148.9

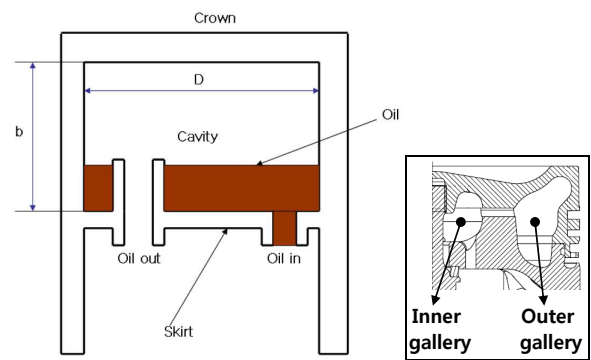


Fig. 4 Heat transfer model of cooling gallery

공동(cavity)이 있는 원통형 실린더로부터 유도된 경험식을 주로 사용한다(Fig. 4 참조).⁽⁵⁾ 공동의 높이 b 와 직경 D 를 기준으로 레이놀즈수(Re_b)와 유효 직경($D^*=D/b$)을 계산하였으며, 외부 및 내부 냉각 갤러리에 적용된 대류열전달계수(h)는 Table 2에 보이는 바와 같다.

$$Nu_b = 0.495(Re_b)^{0.57}(D^*)^{0.24}(Pr)^{0.29} \quad (2)$$

3.2 실린더 라이너로의 열전달

실린더 라이너로의 열전달은 피스톤 링을 통한 열전달은 피스톤 크라운의 옆면인 피스톤 링과 피스톤 링 랜드(ring land)를 통한 열전달과 스커트 옆면을 통한 열전달이다. 피스톤 링과 랜드에서 라이너로의 열전달은 전도이며 열저항 모델을 사용한 총합 열전달계수를 사용하며 여기에는 냉각수에 의한 실린더 라이너의 대류열전달을 포함한다. 피스톤 링과 랜드에 적용한 열전달계수는 각각 $1,080 W/m^2K$ 와 $387 W/m^2K$ 를 적용하였으며, 피스톤 링을 통한 전열량이 더 크음을 알 수 있다.

스커트를 통한 열전달^{(6),(7)}은 피스톤의 속도를 Couette 유동으로 가정하여 계산할 수 있으며, 식 (3)으로 열전달계수를 계산할 수 있다. 스커트의 길이(L)은 156.5 mm, Pr 수는 84.2, 피스톤의 평균

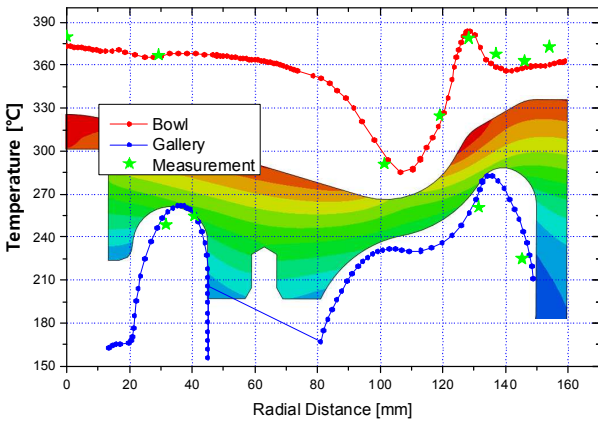


Fig. 5 Predicted and measured temperature

속도 10 m/s 기준으로 계산된 Re_L 수는 132,627.1, Nu 수는 1,082가 되어 최종적으로 계산된 대류열 전달계수는 $844 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이다.

$$Nu = 0.678(Re_L)^{1/2}(Pr)^{1/3} \quad (3)$$

연소실로부터 발생한 열은 크라운 상부로 전달되며, 이는 일반적으로 연소성능해석 결과를 사용하여 1 사이클 동안의 평균값인 가스 온도와 열전달계수를 사용하여 경계조건으로 적용한다. 본 연구에서는 연소성능해석을 통해 구해진 값을 사용하여 열전달해석을 수행한 후 시제품 제작 후 엔진 운전 중에 Vernolab사의 Templug를 사용하여 온도를 계측하였고, 이 값을 크라운 상면에 반경 방향으로 15 등분하여 적용하여 열전달해석을 통한 온도분포를 재계산하였다.

Fig. 5 는 열전달해석으로부터 계산된 피스톤의 온도분포와 계측 결과를 보여준다. 계측값과 해석값은 피스톤의 중심을 기준하여 비교하였다. 열전달해석으로부터 얻어진 피스톤의 온도 중에 크라운의 온도가 피스톤의 냉각성을 좌우하는 인자가 되며, 크라운에서 주요 온도 기준은 바울 림 끝단(bowl rim edge, 파란 원)에서 450°C 미만, 피스톤 링 그루브(붉은 원)에서 150°C 미만이 되어야 한다. 이 기준을 초과할 경우 냉각 갤러리 내부와 링 그루브에 윤활유 내부에 포함된 탄소가 침착(carbon deposit)이 발생하여 크라운의 고온 부식과 링 그루브의 과대 마모의 원인이 된다. 본 연구에서 바울 림 끝단과 링 그루브에서 예측된 온도는 각각 380°C 와 140°C 로 나타났다.

4. 비선형 구조해석 및 피로해석

4.1 비선형 구조해석

Fig. 6은 분리형 피스톤의 구조해석을 위한 유한

Table 3 Clearance value at contact surface

Position	Shape	$h_{\text{gap}}[\text{mm}]$	
		Min.	Max.
Inner support	Flat	0.00	0.05
Outer support	Slope	0.03	0.05

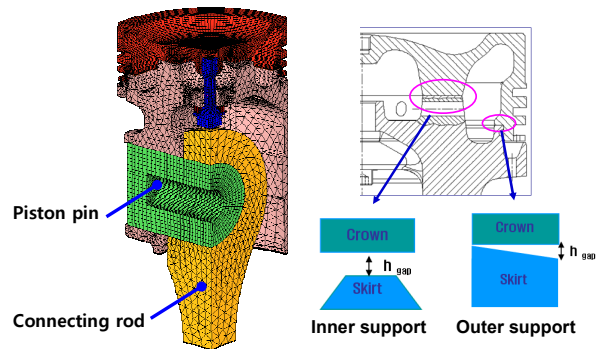


Fig. 6 FE model and contact surface shape

요소모형을 보여주며, 크라운과 스커트의 접촉면 형상 및 간극의 정의를 나타내었다. 구조해석을 위한 유한요소모형에는 피스톤 어셈블리 외에 커넥팅 로드와 피스톤 핀을 포함하여 피스톤 핀과 커넥팅 로드의 변형에 의해 피스톤 스커트로의 불균일한 하중 전달을 고려하였다. 구조해석은 3개 단계로 나누었으며, 이전 단계의 응력과 변형을 유지한 상태에서 다음 단계의 하중의 가하는 비선형 해석을 수행하였다.

- 조립 하중(Step 1) : 볼트 체결력
- 열부하(Step 2) : Step 1 + 온도분포
- 폭발하중(Step 3) : Step 2 + 압력압력

경계 비선형 문제인 접촉해석을 위해 크라운과 스커트의 접촉면의 공차를 고려한 유한요소모형을 구성하고 접촉압력 및 slip을 살펴보았다. 접촉압력이 높고 slip량이 클 경우 프레팅 피로(fretting fatigue)에 의해 접촉면이 깨져 내마멸 성능을 떨어뜨릴 수 있기 때문에 엔진이 운전 중에 크라운과 스커트가 분리되지 않으면서 폭발하중을 견딜 수 있도록 적절한 수준에서 관리되어야 한다.⁽⁷⁾

Table 3은 내부 서포트(inner support) 및 외부 서포트(outer support)에 정의된 간극의 범위를 나타낸다. 내부 서포트에서의 간극은 외부 서포트보다 더 크게 주어 조립단계에서 내부 서포트만 접촉하게 하고 이후 열부하를 받게 되면 외부 서포트가 추가로 접촉하고 이어 폭발력이 작용하면 접촉면

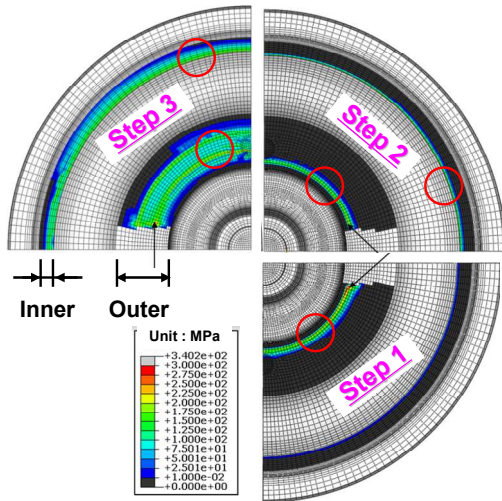


Fig. 7 Contact pressure distribution



Fig. 8 Contact pressure measurement

전체가 접촉하게 된다.

접촉면에서 접촉압력분포를 체결해석(Step 1), 열부하(Step 2) 및 폭발력(Step 3)이 작용함에 따라 Fig. 7에 보인 바와 같이 접촉면압의 변화를 볼 수 있다. Step 1에서 최대 접촉면압은 328 MPa이며, 열하중이 작용하는 Step 2에서는 열변형에 의해 최대 접촉면압이 232 MPa로 떨어지며, 폭발력이 작용하면 접촉면적은 커지지만, 최대 접촉압력은 310 MPa로 다시 커지게 된다.

특히, 폭발력이 작용할 때 내부 서포트와 외부 서포트 사이의 폭발력의 분배 비율은 약 60:40으로 상대적으로 두께가 얇은 외부 서포트로의 하중이 적게 전달되게 하였다. 이는 압축하중에 의한 1st 링 그루브의 압착과 응력집중부의 피로 파손의 확률을 떨어뜨리는 데 기여한다.⁽⁸⁾

시제품 제작 후 Fujifilm사의 고압(HS, 30~130 MPa) 및 저압(LLW, 0.2~0.6 MPa)용 Prescale film을 이용하여 접촉압력과 접촉 패턴을 살펴보았으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 체결단계에서 내

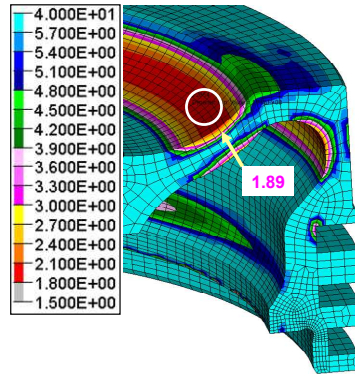


Fig. 9 Fatigue safety contour of crown

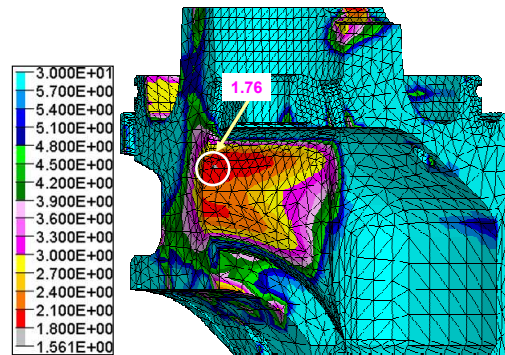


Fig. 10 Fatigue safety contour of skirt

부 서포트 안에서 접촉압력이 발생토록 하였으나, 실제로 바깥쪽이 먼저 접촉하는 것으로 나타나 가공단계에서 공차를 수정하여 개선하였다.

4.2 피로해석^(1,9)

피스톤 크라운과 스커트의 응력은 고온에서 강도 저하를 고려한다 하더라도 모두 탄성영역에 놓이게 되며, 본 연구에서는 고주기 피로해석만을 수행하였다. 고주기 피로의 변동응력 성분은 폭발에 의해 발생하고 열부하에 의한 응력은 평균응력에 기여한다. 특히, 스커트는 온도의 영향을 거의 받지 않는다. 변동응력과 평균응력은 Step 2와 Step 3에서의 응력성분을 바탕으로 각각 (Step 3 - Step 2)/2 및 (Step 3 + Step 2)/2와 같은 식으로 계산하였다. 최소 피로 안전율이 나타나는 지점에서의 변동응력과 평균응력은 Table 4에 나타낸 바와 같이 크라운의 경우 각각 120 MPa와 -54.5 MPa이었으며, 스커트의 경우 각각 116 MPa와 -22.1 MPa이었다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 크라운과 스커트의 피로 안전율분포를 보여준다. 크라운의 피로 취약부는 피스톤 바울 림 끝단부로 1.89의 최소 피로안전율을 나타내었고, 스커트의 피로 취약부는 피스톤 핀으로 하중 전달 경로로 피스톤 핀 보스 상부에서 1.76의 최소 피로 안전율을 나타내었다.

Table 4 Fatigue influence factor

Items	Unit	Crown	Skirt
Safety factor	-	1.89	1.76
Stress amplitude	MPa	120	116
Mean stress	MPa	-54.5	-22.1
Stress gradient factor	-	1.08	1.19
Surface roughness factor	-	0.83 (16 μ m)	0.80 (as-cast)
Temperature factor		0.75 (380 $^{\circ}$ C)	1.0 (<100 $^{\circ}$ C)

크라운의 최소 안전율은 높은 변동응력과 온도에 기인한 것이며, 변동응력은 내부 및 외부 서포트가 지지되어 있을 때 폭발하중이 작용하게 되면 굽힘 변형에 의해 크라운 상부는 압축응력이 발생하고 크라운 내부는 인장응력이 발생한다. 열부하에 의한 열응력은 크라운의 원주방향으로 압축응력을 유발함과 동시에, 반경방향으로는 크라운의 상부는 높은 온도로 인해 팽창하지만, 상대적으로 온도가 낮은 크라운 내부에서 수축함으로써 팽창을 구속하여 폭발력이 작용할 때와 마찬가지로 크라운 상부는 압축응력이 발생하고 내부는 인장응력이 발생한다.

Fig. 9 에서 알 수 있듯이 크라운 상부의 바울럼 끝단에서 최소 안전율이 나타나지만 그 아래 부분에서도 낮은 안전율을 보여주어 내부면도 피로에 취약할 수 있음을 알 수 있다. 크라운에서 1st 링 그루브 상부는 폭발력의 40%에 해당하는 압축력이 전달되며 이는 압축에 의한 응력집중이 발생하게 하여 피로강도를 떨어뜨리게 된다.

스커트의 경우 높은 변동응력에 기인하여 피로강도가 낮게 나타난다. 스커트는 체결하중과 열부하의 영향을 거의 받지 않고, 폭발력을 내부 서포트를 통해 피스톤 핀으로 전달하는 역할을 하게 되어 대부분의 높은 응력은 압축응력 상태에 놓이게 된다. 이러한 특성에 잘 부합하는 재질은 주철재이며, 형상의 복잡성으로 인해 주물로 주로 제작되게 된다.

피로해석에서 사용된 피로영향계수를 Table 4 에 나타내었다. 응력구배계수는 스커트가 더 높게 계산되어 강도의 증가 효과가 크라운보다 더 크게

나타났고, 표면조도계수는 비슷하게 값을 가지지만, 앞에서 살펴본 바와 같이 주조면에 해당하는 스커트의 표면조도계수 0.80 은 기계 가공으로 제작되어 낮은 조도를 갖는 크라운과 비교했을 때 주철재인 스커트의 감소폭이 상대적으로 작을 수 있다. 온도영향계수는 높은 온도에 노출되는 크라운 상부에서 25%의 강도 저하를 가져옴을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 박용 중속 디젤엔진에서 주로 사용되는 요동형 냉각 방식을 갖는 분리형 피스톤에 대한 열전달해석 및 구조해석을 통한 피로해석을 수행하였다.

피스톤의 온도분포를 예측하기 위해 엔진 연소 성능해석과 경험식을 적용한 뒤, 시제품의 온도 계측을 통해 그 신뢰성을 높였다. 계측된 온도가 피스톤 상면에서 모두 450 $^{\circ}$ C 미만으로 고온에 의한 부식 현상은 없을 것으로 나타났다.

피스톤과 스커트의 접촉면에서의 접촉면압은 폭발하중이 작용할 때 접촉면 전체가 고무 접촉하여 최대 320 MPa의 접촉면압을 보여주었으며, 접촉에 의한 내마멸 성능은 지속적인 내구시험을 통해 검증할 예정이다. 구조해석을 통해 접촉면의 공차뿐만 아니라 형상도 결정할 수 있었다.

피로해석에서 예측된 크라운과 스커트의 최소 피로안전율은 각각 1.89 와 1.76 으로 강도 상 문제는 없을 것으로 판단하여 시제품을 제작하여 하여 내구시험을 수행하였으며, 엔진 회전수 900 rpm 기준으로 시간당 27,000 사이클의 폭발력이 작용하며 총 1,400 시간의 내구시험 후에도 안전성에 문제없는 것으로 나타나 본 연구에서 적용한 방법이 충분히 신뢰성을 갖는 것으로 판단하였다.

여기에 결론을 입력하시오

참고문헌

- (1) Roland Schmidt, 2004, "Field Experience with the MAHLE Ferrocomp Piston," Paper No. 35, *CIMAC Congress 2004*, Kyoto.
- (2) Reipert, P. and Griesbach, K., 1993, "Piston Behaviour in Fired Engines - Computer Simulation and Test Results," Paper No. 33, *CIMAC Congress 1993*, London.
- (3) Dowling, N. E., 1997, *Mechanical Behavior of Materials - Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, pp. 418~431.
- (4) Haibach, E., 2003, *FKM-Guideline Analytical*

- Strength Assessment of Components in Mechanical Engineering*, 5th revised edition.
- (5) Bush, J. B. and London, A. L., 1965, "Design for Cocktail Shaker' Cooled Pistons and Valves," *SAE No. 650727*.
- (6) Woschni, G. and Fieger, J., 1979, "Determination of Local Heat Transfer Coefficient at the Piston of a High-speed Diesel Engine by Evaluation of Measured Temperature Distribution," *SAE No. 790834*.
- (7) Wu, H. W. and Chiu, C. P., 1988, "A Study on the Characteristics of Heat Transfer in an Engine Piston," *KSME International Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 19~27.
- (8) Rabb, R., Hautala, P. and Lehtovaara, A., 2007, "Fretting Fatigue in Diesel Engineering," Paper No. 76, *CIMAC Congress 2007*, Vienna.
- (9) Kim, B. K., Kim, Y. S., Kim, H. C. and Lee, Y. H., 2009, "Durability Estimation of the Automotive Engine Compound Considering Non-Linear Material Property," *Proceedings of the KSME 2009 Spring Annual Meeting*, pp. 423~429.
- (10) Yoo, J. H., Son, J. H. and Kim, E. N., 2005, "Structural Strength Assessment of Monoblock-type Piston for Medium Speed Diesel Engine," *Proceedings of the KSME 2005 Fall Annual Meeting*, pp. 1306~1311.
- (11) Son, J. H. Jung, S. S., Yoon, W. H., An, S. C. and Ha, M. Y., 2009, "Design and Application of Composite Piston for High Power Diesel Engine," *SAE No. 2009-01-0192*.
- (12) Lee, J. O., Lee, Y. S., Lee, H. S., Kim, J. H., Jun, J. T. and Kim, C. G., 2007, "Structural Analysis on the Heavy Duty Diesel Engine with Compacted Graphite Iron," *Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Meeting*, pp. 703~708.