

## 파워트레인 부품의 피로수명에 미치는 열처리의 영향

허만대\* · 심태양\*\*\* · 이광오\*\* · 유금빈\*\* · 강성수\*\*

\*평화 발레오

\*\*부산대학교 기계공학부

## Effect of Heat Treatment on Fatigue Life of the Power Train Part

M. D. Hur\*, T. Y. Shim\*\*\*, K. O. Lee\*\*, G. B. Yu\*\*, S. S. Kang\*\*

\*R & D Center, Valeo Pyeong Hwa Co., Ltd. 306-70 Jangdong, Dalseo Gu, Daegu 704-190, Korea

\*\*School of mechanical engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

**Abstract** Dual mass flywheel is the newly developed flywheel system which reduces the noise and vibration and make a better and comfortable ride of cars by adding inertia mass and damping device. However, verification of performance for this system should be carried out since this system is under developing status in our country. Especially, the durability for each part of this system should be guaranteed. Durable properties of driver plate which is the key component of dual mass flywheel were first investigated both in the raw (SCM435 in JIS) and heat-treated material. In addition, fatigue life analysis of driver plate was preformed in the real condition and the results were verified by comparison with the results of rig test.

(Received May 21, 2009; Revised May 27, 2009; Accepted June 1, 2009)

**Key words:** Fatigue life, Heat treatment, Dual Mass Flywheel (DMF), Strain-based fatigue analysis, Damping device, SCM435

### 1. 서 론

자동차 산업에서 파워트레인(power train)은 끊임 없는 기술 발전을 통해 성능향상 및 연비증대를 목표로 하고 있다. 특히, 엔진의 고출력 고효율을 위하여 여러 가지 기술을 적용하고 있으며 기본적인 기능뿐만 아니라 차체의 소음과 진동 그리고 승차감의 향상을 요구되고 있는 실정이다.

이중 질량 플라이휠(dual mass flywheel)은 동력 전달장치로써의 기본적인 기능뿐만 아니라 소음, 진동, 승차감의 성능향상에 효과적인 클러치 시스템이며[1], 차량의 동력전달계 플라이휠로써, 기존의 단일 질량 플라이휠(single mass flywheel)과는 달리 이 중 질량체를 가지며 이 질량체 사이에 감쇠장치를 삽입시킴으로써 동력전달계 소음과 진동을 획기적으로 감소시킬 수 있는 장치이다[2, 3].

내연기관은 폭발행정 때문에 일정하지 않은 주기의 토크를 가지는 동력이 발생한다. 엔진의 폭발시 발생되는 회전 속도의 불규칙성은 차량의 구동계에 진동

의 원인이 된다. 엔진작동 중 회전주파수가 구동계의 고유 주파수와 일치하였을 때, 극도로 높은 진동증폭이 발생한다. 이는 트랜스미션의 소음과 진동(body boom)의 원인이 된다. 기존의 단일 질량 플라이휠이 가진 클러치시스템은 공진점이 일반 주행 영역에 있기 때문에 심한 소음과 진동이 상시로 발생되고 있는 실정이다.

반면, 이중 질량 플라이휠은 관성체(inertia mass) 추가와 감쇠장치의 적용으로 모든 주행 영역에서 공진점을 주행영역 밖으로 이동시켜 소음·진동을 최소화 할 수 있다. 하지만 출력의 증기를 위한 개발 과정에서 이중 질량 플라이휠부품의 내구성을 정량적으로 평가하여 신뢰성을 높이는 연구가 필요한 실정이다[4].

Fig. 1은 이중 질량 플라이휠 구성 부품 중에서 가장 기혹한 하중을 받는 드라이브 플레이트(drive plate)를 나타낸 것으로 네cks(neck part)에 응력이 집중되어 파단되는 현상이 보고되고 있어 열처리를 통하여 내구성향상을 필요하게 되었다.

<sup>\*</sup>E-mail : simsun@pusan.ac.kr

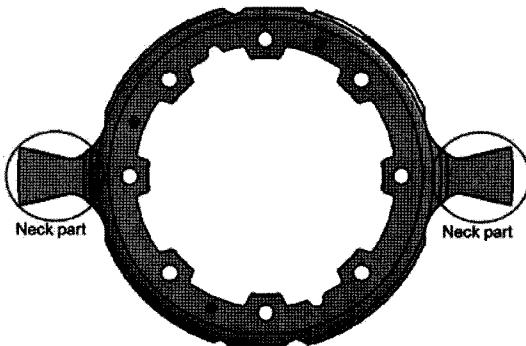


Fig. 1. Neck parts of the drive plate.

본 연구에서는 드라이브 플레이트의 원소재와 열처리소재에 대하여 피로물성을 획득하여 피로해석을 통하여 수명예측을 하고자 한다. 피로해석은 실제 제품에 대한 리그테스트를 통하여 타당성을 검증하고 나아가 동일 강중의 설계에 있어 피로해석을 실시하여 개발 비용과 시간을 감소시키고자 하며, 열처리가 피로수명에 어떠한 영향을 끼치는지 연구하고자 한다.

## 2. 피로실험

### 2.1 재료 및 시험편

실험에 사용된 재료는 이중 질량 플라이휠의 드라이브 플레이트 소재로 사용되고 있는 크롬 몰리브덴강(SCM 435)을 사용하였다. 재료의 기본적인 물성을 획득하기 위해서 Fig. 2와 같은 형상의 시편을 사용하였다. 이 시편은 인장시험과 피로시험에 사용되는 동적 연신률계의 규격과 단축피로시험기의 상온지그를 고려하여 설계되었다[5, 6].

### 2.2 시험편의 열처리

드라이브 플레이트의 넥파트에 고주파열처리를 하며 경화된 표면층에서 파단이 시작되고 미시적으로 열처리되어있는 부분은 시험편을 전경화 열처리하는 방법으로 재연 할 수 있다. 시험편에 적용된 열처리 공정은 실제 제품에 적용되는 열처리법과 동일한 고주파유도가열 열처리공정으로 고주파유도가열 열처리기(IS-SP10W)를 사용하여 870°C로 가열(Fig. 3) 하여 완전한 오스테나이트 조직을 만들었으며 표면과 내부의 균일한 온도가 되도록 약 2분간 유지한 후, 상온의 냉각수 속으로 침지시킴으로써 마르텐사이트

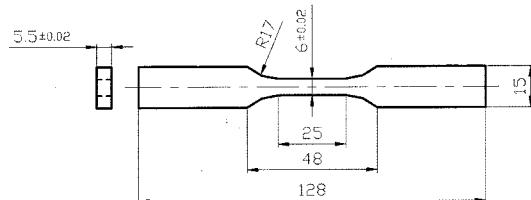


Fig. 2. Specimen for the tensile and the fatigue tests.

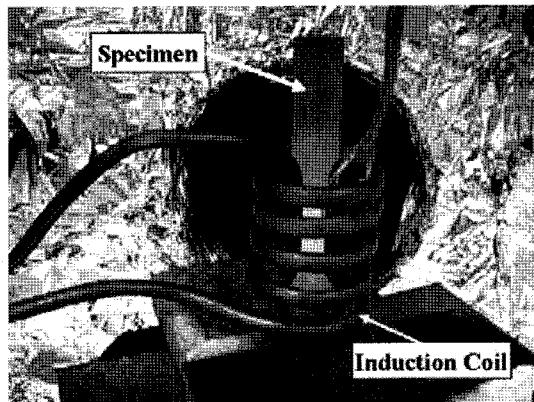


Fig. 3. Induction heating of a specimen.

조직을 만들었다.

드라이브 플레이트의 실제 제품은 열처리 후 표면부  $H_{RC}$  경도가 52~58에 형성이 되며, 열처리한 시편의  $H_{RC}$  경도가 52~56에 형성이 되므로 열처리의 재연성이 확보되었음을 고려할 수 있다.

**2.3 변형율 제어 피로실험 결과 및 피로물성 획득**  
기계적 물성과 피로물성을 획득하기 위하여 본 연구에서는 유압식 단축 만능 재료시험기(Instron 8501, Fig. 4)를 사용하여 수행하였다[7]. 상온 피로시험은 변형율 제어(strain control)로 수행되었으며, 변형율 제어를 하기 위하여 Fig. 5와 같이 동적 연신율계를 사용하였다. 실험은 크게 2가지로 분류되어 실험방법은 다음과 같다.

실험은 상온에서 인장시험을 통해 재료의 정적 응력 · 변형율 곡선과 기본 물성치를 획득하고 상온단축 변형율 제어 피로실험을 수행하여 변형율에 따른 수명 데이터를 획득한다. 이 때  $R$ 은 -1로 하고 진행하였으며 사이클 속도는 1 Hz로 수행하였다.  $\epsilon_a$ (strain amplitude)는 정적 응력 · 변형율 곡선을 고

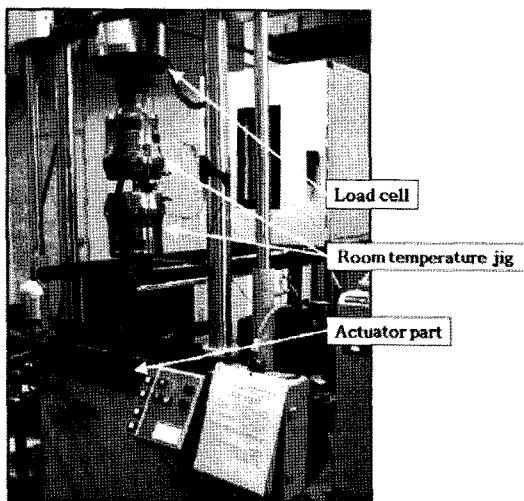


Fig. 4. Device of uniaxial fatigue test.

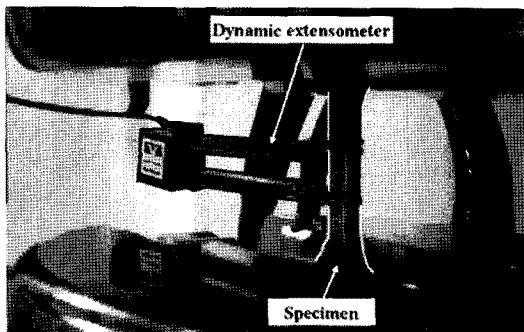


Fig. 5. Specimen with a dynamic extensometer.

려하여 원소재 시편의 경우에는 0.2% 변형율에서 0.9% 변형율까지 적용하였으며, 열처리 시편의 경우에는 0.2% 변형율에서 0.6% 변형율까지 적용하여 수행하였다.

연신율계를 이용하여 정확한 탄성계수를 확보 할 수 있었다(Fig. 6). 시험결과 탄성계수 값이 205 GPa 값을 가지며 일반적인 금속재료의 탄성계수와 비슷한 계수를 가진다. Fig. 7은 일정 변형을 진폭에 따른 피로수명을 나타낸 것이다.

원소재 시편과 열처리 시편을 각각 피로시험을 통하여 0.4% 반복 변형율의 근처에서 수명이 역전되는 현상이 있음을 확인하였다. 원소재와 열처리품이 탄성변형을 일으키는 반복 변위구간에서는 열처리품이 장수명을 나타내었으나, 소성변형을 일으키는 반복변위 구간에서는 원소재가 장수명을 가진다. 반복

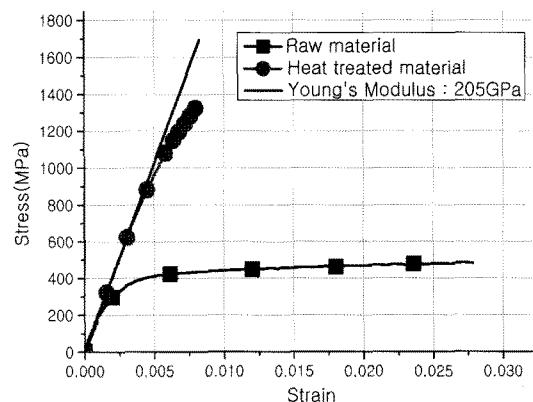


Fig. 6. The result of tensile test with a extensometer.

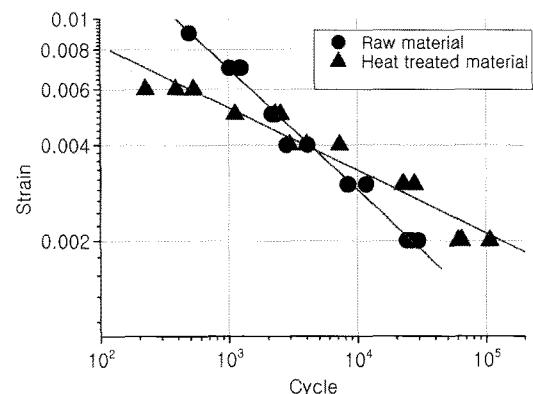


Fig. 7. Strain-life points of heat treated and raw material specimens.

변위 구간이 열처리품과 원소재품의 탄성영역에 존재 할 경우, 동일한 변형에너지지를 받음에도 불구하고 열처리품이 높은 표면경도를 가지기 때문에 균열 발생 수명이 길어진 결과로 장수명이 나타난다. 반면, 원소재가 소성변형을 일으키는 반복 변위구간에서는 원소재에 적용되는 변형 에너지보다 열처리품에 적용되는 변형 에너지가 더욱 크다. 이 큰 변형 에너지는 원소재에 있어서는 소성변형이 손상을 줄이는 효과를 주며, 열처리품 보다 장수명을 가진다고 평가할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 안정화된 사이클에서의 원소재와 열처리품의 히스테리시스 루프를 나타낸 것이다. 특히, Fig. 8은 정적 응력 · 변형율 선도보다 낮은 응력범위에서 반복적 응력 · 변형율 선도가 형성되므로 본 연구에서의 재료는 반복적 연화(cycle softening)

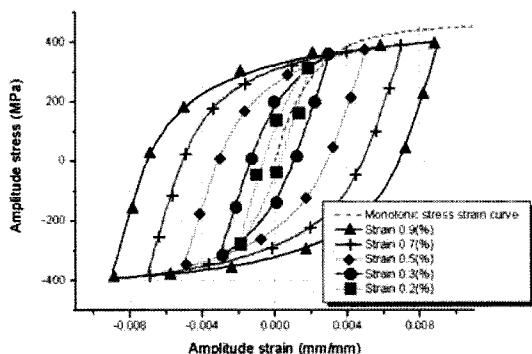


Fig. 8. Family of hysteresis loops with various strain amplitude levels and monotonic stress strain curves of raw materials.

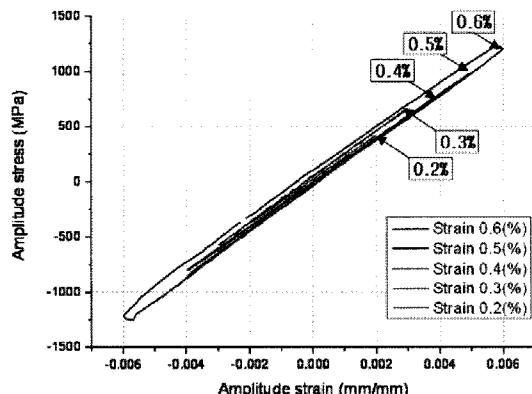


Fig. 9. Family of hysteresis loops with various strain amplitude levels and monotonic stress strain curves of heat treated materials.

의 재료거동을 가진다.

변형율 · 수명커브를 이용하여 피로강도계수, 피로강도지수, 피로연성계수 그리고 피로연성지수를 획득하였다. 원소재와 열처리품의 피로물성은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Fatigue properties of the raw and heat treated materials

Material		Raw	Heat treated
Young's modulus (GPa)	E	205	205
Yield strength (MPa)	YS	404	700
Ultimate tensile strength (MPa)	UTS	205000	205000
Fatigue strength coefficient	sf	599.39603	3741
Fatigue strength exponent	b	-0.06662	-0.1893
Fatigue ductility coefficient	ef	0.41046	0.00264
Fatigue ductility exponent	c	-0.63787	-0.3106

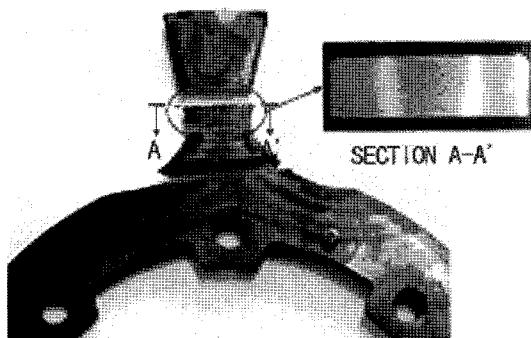


Fig. 10. Sampling of specimen from drive plate.

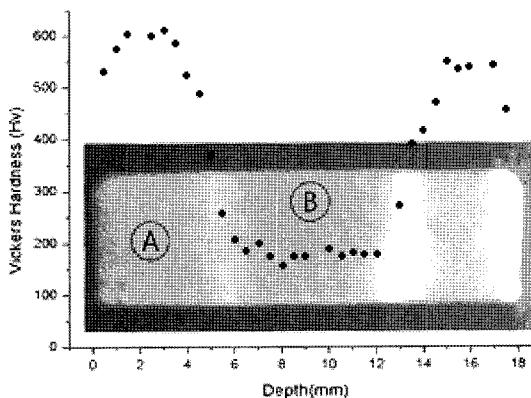
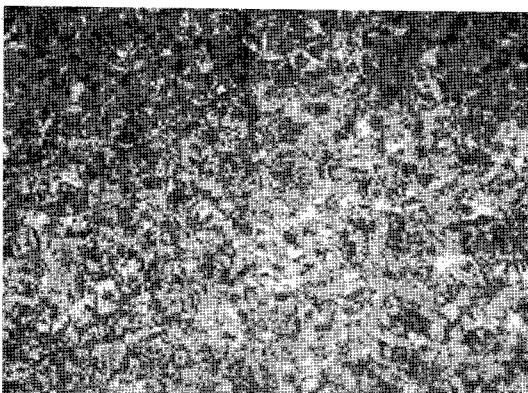
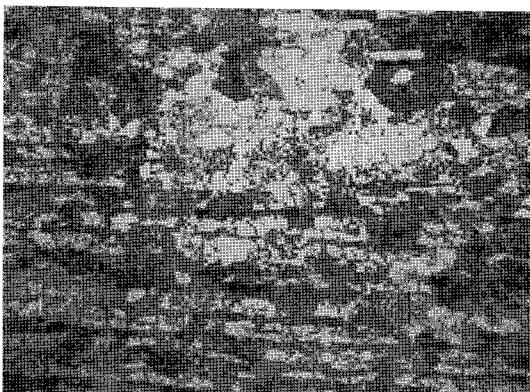


Fig. 11. Hardness test result of Neck part.

### 3. 경도측정 및 조직관찰

구조해석 및 리그 테스트 결과 네파트에서 응력을 받고 실제로 파단이 관찰되고 있으므로 Fig. 10과 같이 네파트의 단면에 대하여 비커스경도를 측정하였다. 추출된 경도측정시편에 대하여 비커스경도를 측정한 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 경도측정결과 5 mm의 경화층이 확인되었다. Fig. 11에서 ①부분

Fig. 12. Micrograph of part “Ⓐ” in Fig. 11 ( $\times 500$ )Fig. 13. Micrograph of part “Ⓑ” in Fig. 11 ( $\times 500$ ).

과 Ⓛ 부분에 대하여 조직관찰을 실시하였다. 조직을 관찰하기 위하여 4% 나이탈(Nital) 용액으로 시편을 부식시킨 후 광학현미경을 이용하여  $\times 500$ 의 배율로 미시조직을 관찰하였다. Fig. 12는 Fig. 11에서 Ⓛ 부분을 관찰한 미시조직이고 Fig. 13은 Ⓛ 부분을 관찰한 미시조직이다.

ⓐ 부분의 사진은 유도가열 열처리로 인하여 마르텐사이트의 조직이 관찰되었으며, Ⓛ는 열처리를 하지 않아서 원소재의 조직인 페라이트와 펠라이트조직이 관찰되었다.

실제 제품에 있어서 유도 가열 열처리는 하중이 위하여 큰 응력이 발생하는 영역에서 마르텐사이트 조직을 가지도록 처리되었으며 내부는 원소재의 조직인 페리이트조직과 펠라이트조직을 유지하도록 처리되어 있음을 확인 할 수 있다.

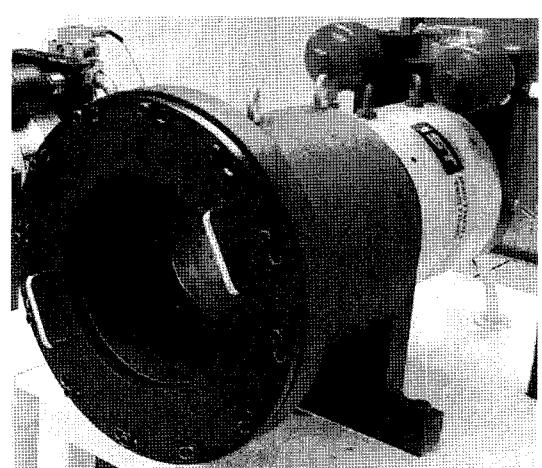


Fig. 14. D3-tester.

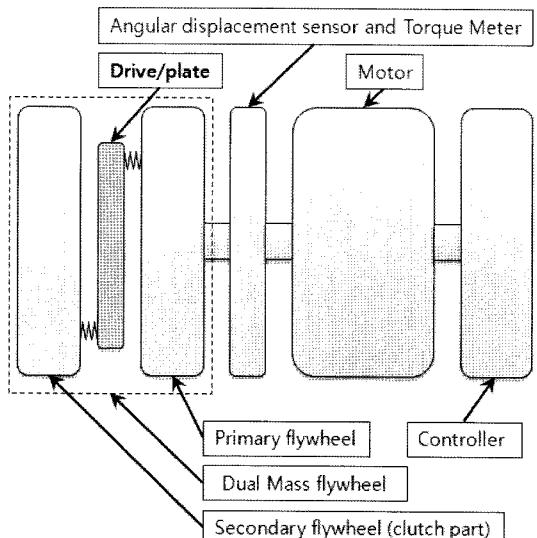


Fig. 15. Schematic diagram of D3-tester.

#### 4. 리그테스트

본 연구에서는 리그테스트에서 적용되는 하중에 대하여 피로해석을 실시하고 수명을 예측하여 리그테스트의 수명과 비교 평가하여 해석을 검증하는데 활용하고자 한다.

이중질량플라이휠은 공진(resonance frequency)영역에서 리그테스트를 실시함으로 상당히 강한 외력을 받게 된다. Fig. 14와 Fig. 15는 리그테스트장비와 그 구조를 간단히 표현하였다. 제어기(Controller)에서 작동각도와 주기를 제어하여 이중질량플라이휠의

공진을 유도한다. Fig. 15에 나타나듯이 동력전달과 정에서 스프링가이드와 드라이브플레이트가 지속적으로 간섭을 받게 되며, 이 과정에서 드라이브플레이트의 네파트가 반복적 굽힘 하중을 받게 된다.

열처리를 하지 않은 이중 질량 플라이휠은 100회의 충격이 가해졌을 때, 드라이브플레이트의 파단이 확인되었으며, 열처리를 한 이중질량플라이휠은 1440회의 충격이 가해졌을 때 드라이브 플레이트의 파단이 확인되었다.

## 5. 피로해석 및 검증

단위하중에 대한 용력·변형율분포를 구하기 위하여 구조해석을 실시하였으며 구조해석은 상용유한요소해석 프로그램인 MSC.MARC를 이용하여 획득하였고, 피로해석은 역시 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC.FATIGUE를 이용하여 수행하였다[11, 12]. 해석방법은 변형율·수명 방법(strain-life method)을 사용하였으며 생존화률은 99%로 실행하였고, 하중조건은 리그테스트에서 작용되는 동일한 하중을 작용하여 피로수명을 구하였다[13-17].

피로해석에 필요한 하중정보는 각각 구조해석과 MSC.FATIGUE에서 제공하는 레인플로 알고리즘을 이용한 것이다. 하지만, 해석상에서 적용되는 경계조건이 정확히 리그테스트에 적용하기 어려워 그에 상응하는 기중치가 필요하다. 해석상의 경계조건 중 넥파트에 가해지는 압력은 넥파트의 측면에 스프링가이드가 모든 측면에 고르게 접한다는 경계조건으로써 해석이 진행되고 있다. 하지만, 실제 리그 테스트 상에서는 모든 면에 고르게 접촉하지 않는다. 즉, 해석상에서 적용되는 면은 가장 이상적인 면적으로 계산된 것이고 리그테스트 상에서는 면적이 줄어들어 하중이 증가하므로 이에 대한 가중치가 필요한 것이다. 그래서 1.25의 하중 가중치를 적용하여 해석을 실시하였다. 이 1.25의 가중치는 리그테스트 결과를 이용하여 역공학적 방법을 활용하여 획득한 계수이다. 이 계수는 동일한 경계조건을 가지는 다른 피로해석에서도 적용이 가능하다. Fig. 16은 해석결과와 리그테스트 결과를 나타내었으며, 드라이브 플레이트의 취약부분은 구조해석과 피로해석 상에서 넥파트였으며, 리그테스트 결과에서 나타난 파단부분과 일치하게 나타났다.

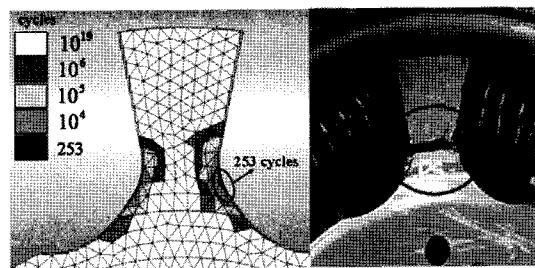


Fig. 16. Region of the shortest life and fracture part of the drive plate.

Table 2. Analysis result versus Rig-test result

	Analysis	243
Result of raw material part	Rig-test	100
	Analysis	1350
Result of heat treated part	Rig-test	1440

Table 2에 예측수명과 리그테스트결과를 나타내었다. 열처리품의 경우에는 해석결과와 리그테스트결과가 근소한 오차를 나타내나 원소재의 경우에는 약간의 오차를 나타낸다.

이는 네 가지 피로상수가 제한된 수의 데이터에 맞춘 곡선으로 나타내므로 더 많은 데이터가 추가될 경우 피로상수는 변화할 것이다. 피로 물성계수의 확보하는 과정에서 사용되는 자수법칙 관계식들이 엄밀히 수학적 편의성의 문제이고 물리적 현상에 기초한 것은 아니기 때문이다. 고주파 열처리를 한 드라이브 플레이트가 원소재의 드라이브 플레이트보다 5배 이상의 수명이 향상되었으며 이는 리그테스트의 결과와 피로해석의 결과에서도 확인 할 수 있다.

## 6. 결 론

파워트레인 부품인 이중 질량 플라이휠에서 동력전달 시 문제가 발생하는 부품인 드라이브 플레이트의 열처리에 의한 피로수명을 평가하기 위하여 이중 질량 플라이휠을 각각 원소재와 열처리품에 대하여 리그테스트를 실시하였다. 그리고 열처리품과 원소재품의 피로시험을 통하여 피로물성을 획득하고, 이 피로물성과 리그테스트의 경계조건을 이용하여 피로해석을 실시하였다. 각각의 리그테스트와 피로해석결과를 통하여 피로수명을 평가하였으며 다음과 같이 요약

할 수 있다.

1. 본 연구에서 적용된 강종은 원소재품과 열처리 품을 각각 피로시험을 통하여 0.4%의 반복변형률 근처에서 수명의 역전현상이 있음을 확인하였다.

원소재와 열처리품이 탄성변형을 일으키는 반복변위구간에서는 열처리품이 장수명을 나타내었으나 원소재가 소성변형을 일으키는 반복변위 구간에서는 원소재가 장수명을 가진다.

2. 반복변위 구간이 열처리품과 원소재품의 탄성영역에 존재할 경우, 동일한 변형에너지를 받음에도 불구하고 높은 경도로 균열발생수명이 길어지므로 열처리품이 원소재보다 장수명이 나타나는 것으로 판단된다.

반면, 변형율이 높은 부분에서는 연신율이 떨어지는 취성재료인 열처리품이 균열진전수명이 대단히 짧기 때문에 단수명을 가지는 것으로 판단이 된다.

3. 본 연구에서는 드라이브 플레이트에 대한 수명 평가 방법을 리그테스트와 비교하여 검증하였다. 또한, 열처리를 한 드라이브 플레이트가 원소재의 드라이브 플레이트보다 5배 이상의 수명증가를 리그테스트를 통하여 확인하였고, 피로해석에서도 열처리를 한 드라이브 플레이트 모델이 원소재의 드라이브 플레이트 모델보다 5배 이상의 수명향상을 확인하였다.

4. 본 연구에서 피로수명평가방법을 이용하여 실차 하중이력 획득과정을 통하여 동일강종에 대한 피로수명을 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 추가적 물성시험과 하중이력 확보를 통하여 피로내구성을 고려한 강종 및 열처리 방법을 제안할 수 있다.

## 참고문헌

- S. Morimoto, A. Hamamoto and Y. Takeda : Vibration control of two-mass system with low inertia ratio considering practical use, Electrical engineering in japan, 125-5 (1998) 1-9.
- K. Yamamoto and M. Umeyama : Consideration of a new type two-mass flywheel, SAE 911059 (1991).
- J. H. Song, D. P. Hong and S. M. Yang : Dual Mass Flywheel 시스템의 설계 파라미터에 관한 연구, 한국자동차공학회논문집 6-1 (1998) 90-98.
- D. Eifler and E. Macherauch : Microstructure and cyclic deformation behaviour of plain carbon and low alloyed steels, International Journal of Fatigue, 12-3 (1990) 165-174.
- KS B 0802 : Method of tensile test for metallic materials, Korea standards (2003).
- KS B ISO 1099 : Metals-Axial load fatigue testing Korea standards (2002).
- 이용복, 김호경, 정진성 : 피로해석의 기초(Fundamentals of metal fatigue analysis), 清文閣, Seoul (1999).
- M. E. Barkey, D. F. Socie and K. J. Hsia : A yield surface approach to the estimation of notch strains for proportional and nonproportional cyclic loading. Journal of Engineering Materials and Technology 116 (1994) 173-180.
- Y. I. Lee, J. Pan, R. B. Hathaway and M. E. Barkey : Fatigue testing and analysis (Theory and Practice) Burlington Mass Elsevier (2005).
- ASTM : Standard practice for strain-controlled fatigue testing, ASTM standard E 606, ASTM Designation: E 606-92 (1998) 1-7.
- Marc® 2007 r1 User's Guide, MSC Software Corporation (2007).
- MSC. Documentation Library, MSC. Software Corporation, (2005).
- A. Fatemi and L. Yang : Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials, International Journal of Fatigue, 20-1 (1998) 9-34.
- N. E. Dowling : Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, Fracture and Fatigue, 2nd ed. Prentice Hall, New York (1998).
- C. R. Williams, Y. Lee and J. T. Rilly : A practical method for statistical analysis of strain-life fatigue data, International Journal of Fatigue, 25-5 (2003) 417-436.
- 김영진, 서명원, 서상민, 서재호 그리고 김중재 : CAE 기법을 이용한 서스펜션 너클의 피로수명 평가, 자동차공학회논문집, 3-2 (1995) 112-121.
- H. Nishi : Elastic-plastic FEM analysis on low cycle fatigue behavior for alumina dispersion-strengthened copper/stainless steel joint, Journal of Nuclear Materials, 329-333 (2004) 1567-1570.