

기계적 및 열적 물성을 고려한 클러치 압력판의 거동해석

허만대* · 이상욱** · 김국용† · 강성수**

(원고접수일 : 2009년 2월 24일, 원고수정일 : 2009년 4월 15일, 심사완료일 : 2009년 5월 14일)

Analysis of Pressure Plate Behavior of a Clutch Including Thermal and Mechanical Material Properties

Man-Dae Hur* · Sang-Uk Lee** · Gug-Yong Kim† and Sung-Su Kang**

Abstract : In the mechanical clutches, the pressure plate is one of the important parts for transferring the power and reducing the vibration. Instead of gray and ductile irons, CGI(Compacted Graphite Cast Iron) is concerned to be the replacement recently. A thermo-mechanical coupled analysis was performed to investigate the behavior of the pressure plate for manual clutches. Thermal and mechanical properties of three kinds of cast irons were obtained from the mechanical experiments and referred other technical reports. The results of FEM analysis, were well match with the experimental ones. In this designated FEM method, temperature distribution, stress distribution and thermal deformation were successfully gained and these results will help to design the pressure plate which was made by cast irons including CGI.

Key words : Clutch(클러치), Cast iron(주철), Pressure plate(압력판), Thermo-mechanical coupled analysis(열적/기계적 연성해석), Thermal deformation(열변형)

1. 서 론

엔진에서 발생하는 동력을 트랜스미션으로 전달하는 부품인 클러치는 원판 마찰 클러치가 사용된다. 이 마찰 클러치는 동력 전달 시 슬립을 허용하도록 설계되어 있어, 사용 중 상당한 마찰열이 발생한다. 클러치에서 마찰판의 상대부품으로 압력판을 사용하는데 이 부품의 재질로 진동감쇠능과 마찰 특성 등으로 주철을 주로 사용한다. 압력판은

동력 착탈 시 상대운동에 의한 마찰에 의해 상당한 열이 발생하게 된다.

회주철은 큰 진동 감쇠능을 가질 뿐만 아니라 열전도계수가 높아 열변형이 거의 발생하지 않지만 인장강도가 약하여 그 사용에 많은 제약이 따르고 있다.^[1] 반복적인 열하중에 의한 파손이 일어나기도 하는데, 고속회전하고 있는 압력판의 파손은 큰 사고로 이어질 수 있다. 한동운 등^[2]은 회주철의 진동감쇠능을 유지하면서 인장강도를 높이기 위해

† 교신저자(부산대학교 기계공학부, E-mail: beaverx@pusan.ac.kr, Tel: 051)510-1454

* (주)평화발레오 기술연구소

** 부산대학교 기계공학부

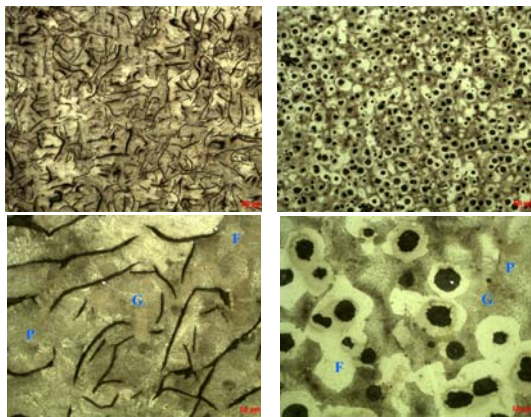
오스템퍼링 열처리에 대한 연구를 하였으나 열처리 비용과 가공성이 떨어지는 등 경제성 측면에서 문제가 많다. 구상흑연주철은 높은 인장강도를 만족하지만 열전도율이 낮아 열구배에 의한 열변형이 심해 접촉성이 떨어진다. 흑연형상이 회주철과 구상흑연주철의 중간상인 CV(compact vermicular) 흑연 주철에 대한 연구도 많이 진행되었으나^{[3]-[5]} 제작 단가 문제로 채택되는 데는 문제가 되고 있다.

기존의 연구들은 주철로 된 부품의 상온거동에 대한 것이 많고 실제 작동 시 문제가 되는 열변형에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.^{[6][7]} 따라서 본 연구에서는 압력판 주철 재질 3종에 대하여 유한요소 해석을 시험하고, 실험데이터와 검증을 통해서 결과들을 비교해보고자 한다.

2. 실험

2.1 열적 물성 시험

회주철과 구상흑연주철의 가장 큰 차이점은 흑연 형상에 있다. 페라이트(ferrite) 혹은 펄라이트(pearlite)로 이루어진 기지조직 속에 회주철의 경우 판상, 구상흑연주철의 경우 구상의 흑연이 정출되어 있다(Fig. 1).



Gray Iron(GC250) Spheroidal Cast Iron(GCD500)

Fig. 1 Microstructure of cast iron (Etch: 4% nital; X100 & X500)

일반적으로 흑연의 경우 결정이 판상으로 성장하

게 되는데, 회주철의 경우 이 판상 흑연들이 철 결정구조의 연속성을 끊어 놓기 때문에 뛰어난 진동 감쇠능을 가지게 된다. 그러나 하중을 받을 때 판상흑연에서 응력집중이 일어나게 되고 흑연자체가 힘의 부하를 지탱 못하기 때문에 인장강도가 약하다. 흑연의 경우 열전달 방향에 따라 열전달율의 차이가 크다. 300K에서 층과 평행한 방향으로 열전도계수는 1.950 W/m/K 인데 반해 층과 수직 방향으로는 5.7 W/m/K 밖에 되지 않는다.^[8] 다시 말하면, 판상 흑연이 뻗어나가는 방향으로 열전달이 잘되고, 수직한 방향으로 열전달이 잘되지 않는다. 따라서 흑연이 길게 뻗어있는 회주철의 경우 열전달이 잘되고, 구상흑연주철의 경우 흑연보다는 기지 조직을 통하기 때문에 열전달이 잘 되지 않아 온도 구배에 따른 열변형이 발생하기 쉽다.

압력판에 주로 사용되고 있는 회주철(GC250, GC350)과 구상흑연주철(GCD500)에 대한 열적 물성을 시험하였다.

2.1.1 실험방법

열적 물성을 획득하기 위해서 레이저 플래시(laser flash)법^[8]을 사용하였다. 레이저 플래시법은 기존의 열전도 측정 시 문제가 되었던 정상상태에서의 접촉저항을 제거하기 위한 방법으로 열확산 측정을 위해 개발되었다. 이 열전도 측정법은 열 확산 및 온도의 측정범위가 넓고, 시편의 크기를 작게 할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 섬광법에 의한 열전도율(λ)는 레이저 플래시에 의해 확산(a), DSC에 의한 비열(C_p), 아르키메데스의

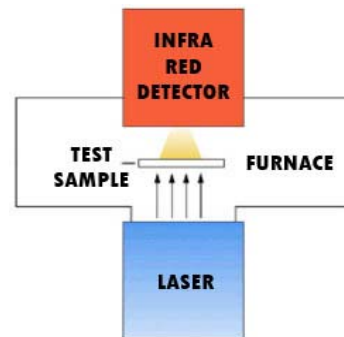


Fig. 2 Schematic diagram of thermal diffusivity using flash method

원리를 이용한 용적 밀도(ρ)로부터 열전도율 ($\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho$)이 결정된다. 본 측정은 레이저 플래시를 광원으로 하여 시료 표면에 투사된 광원에 의해 전달되는 열이 반대편으로 전달될 때의 시간을 측정하는 방법으로 열전도도를 측정, 계산하게 된다. 이 때 관계되는 시료의 열저항(thermal resistance) 값을 측정하여 매개 변수로 사용한다.

2.1.2 실험결과

실온(25°C), 100°C, 300°C, 500°C에서의 열적 물성 실험 측정결과는 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Thermal properties of cast iron

Material	Temperature (°C)	Conductivity (W/m/K)	Specific heat (J/kg/K)	Density (kg/m ³)
GC250	25	53.977	469	7200
	100	49.646	525	
	300	44.532	607	
	500	40.030	702	
GC350	25	49.539	499	7300
	100	46.989	530	
	300	42.109	597	
	500	39.852	714	
GCD500	25	34.591	513	7100
	100	33.655	544	
	300	32.031	628	
	500	30.530	732	

2.2 기계적 물성 실험

열팽창계수는 열팽창계수 측정 시스템인 Dilatometer (DIL 402C)를 사용하여 측정하였으며, 탄성계수 및 프아송 비(0.27)는 주조공정 전문 해석 프로그램인 MAGMASOFT의 물성 값을^[9]를 참조하였다.

2.3 압력판 온도측정 실험

2.2.1 실험방법

회전하는 물체의 온도를 측정하는 일은 센서의 부착은 물론 측정값을 불러들이는데도 어려움이 있다. 실제 차량에서 구동되는 압력판과 거의 유사하

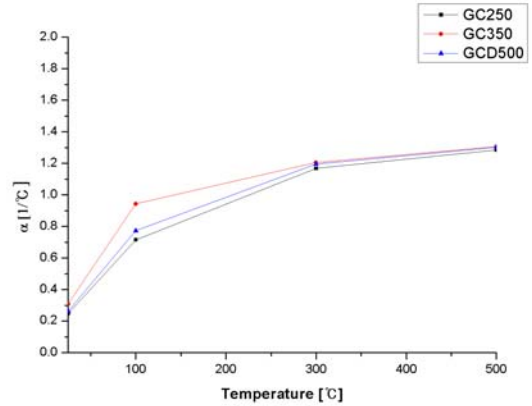


Fig. 3 Thermal Expansion coefficient

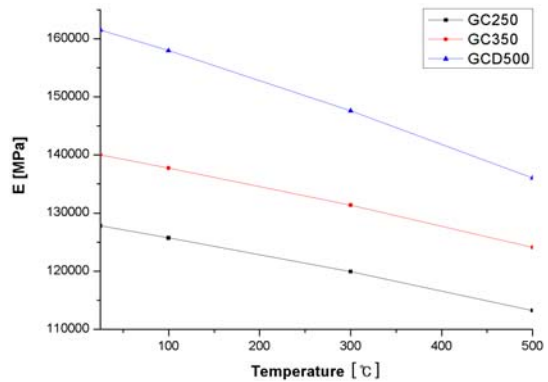


Fig. 4 Young's modulus^[9]

	25°C	100°C	300°C	500°C
GC250	127,800	125,700	119,900	113,200
GC350	140,000	137,760	131,362	124,109
GCD500	161,544	157,988	147,625	136,042

게 리그 테스트기를 구성하고(Fig. 5), 센서가 회전에 영향을 받지 않도록 장착하였다. 모터 구동에 의해 관성차(inertia weight plate)를 원하는 에너지 레벨로 만들고, 이 에너지를 일순간에 클러치 장치가 흡수하도록 하였다. 클러치가 작동할 때 플라이휠과 디스크패드, 디스크패드와 압력판 사이에서 미끄럼이 발생하며 약 1~2 sec 만에 정지된다. 이 때 모든 에너지는 클러치 장치 내부에서 마찰열

로 전환된다. 리그 테스터기의 개략도는 Fig. 6과 같다.

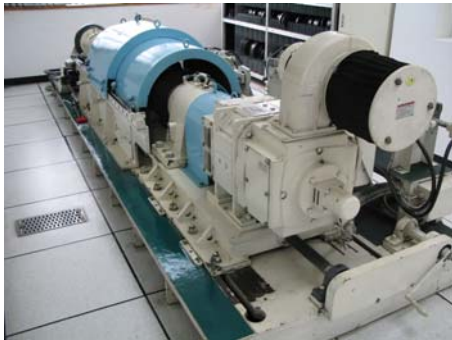


Fig. 5 Clutch full-size tester

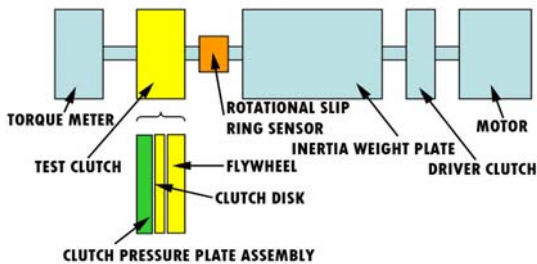


Fig. 6 Schematic diagram of the clutch full-size tester

열전대의 위치는 Fig. 7과 같이 압력판 마찰부의 동일위치로 통일시켰으며, 마찰부 표면의 효과를 약화시키기 위해 약 0.3 mm 정도 안쪽에 열전대가 위치되도록 하였다. 이 실험에서 사용한 에너지 레벨은 실제 수동 변속 차량에서 변속 시에 클러치가 받는 양의 약 2배에 해당하는 82 kJ을 기준으로 하였다. 즉, 한 사이클 동안 클러치 장치가 흡수하게 되는 에너지는 82 kJ이며, 관성차는 이 값에 해당하는 RPM을 만들기 위해 평면 운동을 하는 강체의 회전운동에너지(E_R)에 대한 식 (1)을 이용하였다.

$$E_R = \frac{1}{2} I_G \omega^2 \quad (1)$$

여기서 w : angular velocity,

I_G : moment of inertia이다



Fig. 7 Measurement location of temperature on the friction surface of pressure plate

$3.43 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 의 질량관성 모멘트를 가지는 관성차의 82 kJ에 해당하는 모터의 회전수 2,089 RPM을 산출하여 시험 조건으로 사용하였다. 시험장치의 구동을 포함한 한 사이클 당 시간은 약 80 sec 정도였다(시간이 일정하지 않은 이유는 모터의 자유회전 시간에 영향으로 1~2 sec 상간으로 오차를 가짐). 한 사이클 동안 시험 장치의 동작은 개략적으로 다음 Fig. 8과 같다.

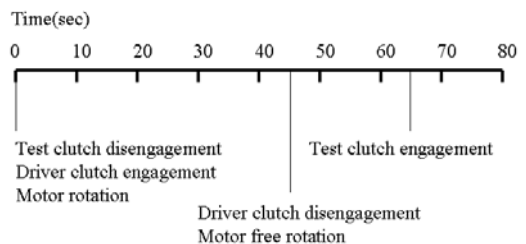


Fig. 8 A typical motion of rig tester for 1 cycle

총 60 사이클 동안 온도를 실시간으로 측정하였으며, 직경 235 mm인 동일 모델의 압력판을 사용하였다. 현재 자동차 압력판으로 가장 많이 사용되는 재질인 GC250, GC350, GCD500의 3가지 샘플에 대하여 실험을 수행하였다.

2.1.2 실험결과 및 고찰

다음의 Fig. 9는 재질별 2개씩 시험한 결과, 각 사이클별로 최고온도를 출력 한 것이다. 회주철(GC250, GC350)의 경우 약 30 사이클 이후부터

약 220℃정도로 수렴하는 것으로 나타났다. 구상흑연주철(GCD500)의 경우 사이클 초반부터 기울기가 회주철보다 크고 온도가 높은 값을 유지하며 사이클 후반부로 가면서 조금씩 더 증가하는 경향을 보였다. 또한 온도가 튀는 값들도 보이는데, 이것은 구상흑연주철에서 열전달이 원활히 이루어지지 않아 생기는 현상으로 보인다. 최고 온도 측정 결과만 놓고 본다면 회주철의 성능이 구상흑연주철보다 뛰어나다고 할 수 있다.

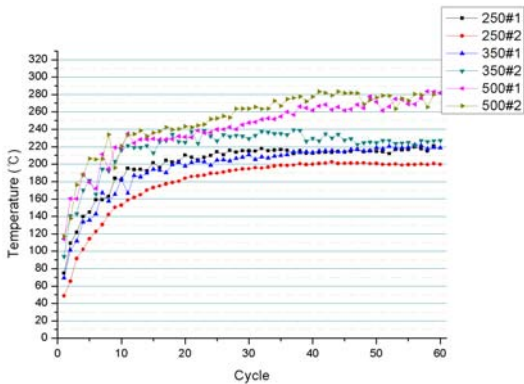


Fig. 9 Maximum temperature of each cycle

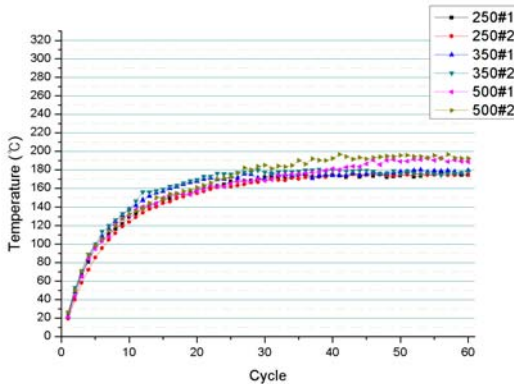


Fig. 10 Minimum temperature of each cycle

Fig. 10은 각 사이클별 최저온도를 출력 한 것이다. 회주철과 구상흑연주철 모두 온도증가의 기울기가 비슷하며 약 30 사이클 이후로 기울기가 상당히 완만해 짐을 알 수 있다. 사이클 후반부에 도달하게 되는 최종온도의 크기순서는 GCD500 > GC350 > GC250 순으로 나타났다. 이것은 판상흑연이 구상흑연보다 열전달이 잘되는 것을 보여주

는 것으로, GC350과 GC250의 미세한 차이는 탄소 및 규소의 함량이 더 큰 GC250의 흑연이 더 큰 판상으로 형성되었기 때문인 것으로 보인다.

3. 클러치 압력판 거동해석

3.1 해석 모델 구성

압력판의 열변형 형상을 예측하기 위해 압력판 온도 측정 실험에 사용된 동일 모델을 선정하였다. 클러치 커버와 볼트 체결되는 러그(lug)부, 다이어프램 스프링(diaphragm spring)을 지지하는 지점(fulcrum)부 그리고 클러치 디스크와의 미끄럼 마찰열이 전달되는 마찰면을 확인할 수 있다(Fig. 11).

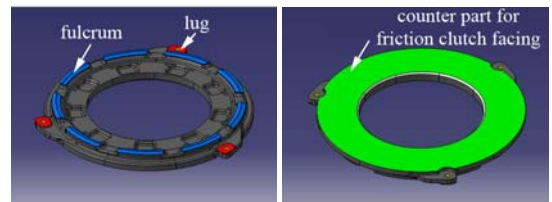


Fig. 11 Geometric model of pressure plate

압력판의 형상을 고려하여 3차원 Cyclic symmetric 문제로 간주하여, 1/3 상을 취하여 요소(element)당 절점(node) 4개를 가지는 Tetra mesh를 생성 후 대칭조건을 주어 전체 모델과 동일한 결과를 얻도록 하였다(Fig. 12).

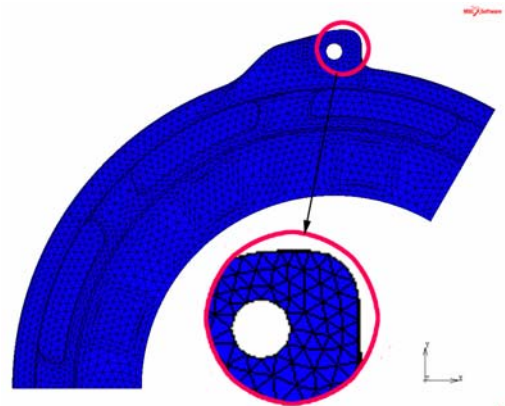


Fig. 12 Mesh generation(Nodes: 6458, Elements: 25813)

유한요소 해석에 입력된 온도 기반의 기계적 및 열적 물성 값은 2장에서 얻은 데이터를 적용하였다. 압력판의 열 거동을 이해하기 위해서는 온도분포를 정확히 해석해야 한다. 불균일한 온도분포를 갖는 압력판의 열 변형은 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 첫째는 온도상승에 비례하는 균일한 열팽창(free thermal expansion)에 의한 것이고, 둘째는 열에 의해 팽창된 구조체가 물체의 연속성을 유지하려고 발생(restrained thermal growth)하는 것이다. 그러므로 압력판의 해석을 위해서는 열전달 해석과 응력해석을 병행해야만 한다. 이러한 해석은 열전달 해석 수행 후 열전달 결과를 이용하여 응력해석을 수행하는 개별 연성(separately coupled) 방식과 열전달과 응력 해석을 동시에 수행하는 완전 연성(fully coupled) 방법이 있다. 본 연구에서는 상용 해석 프로그램인 Marc^[10]를 사용하여 완전 연성해석을 수행하였다. 경계조건으로는 초기 온도 20℃를 주고, 러그부의 구멍에 x, y, z 방향 변위 구속을 하였으며, 열 하중으로 클러치 패드와의 마찰표면에 열 플럭스를 주었다. 압력판 온도 측정 시험과 유사한 환경을 조성하기 위해 한 사이클에서 클러치의 결속과 단속 상태에서의 가열과 냉각을 다음 Fig. 13과 같이 구성하였다.

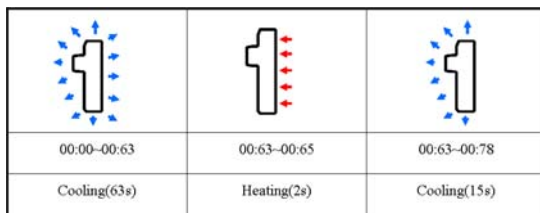


Fig. 13 Thermal boundary condition

1 사이클은 총 78 sec이며 클러치 결속 후 슬립 마찰이 2 sec 간 일어난다고 가정하고, 60 사이클(4,680 sec) 동안 해석하였다. 플라이휠과 압력판이 받는 열에너지는 각각 41 kJ로 열손실 없이 82 kJ의 모든 에너지가 마찰열로 바뀌었다고 가정하였다. 이렇게 하여 산출한 열 플럭스 값은 0.755 W/mm²이다.

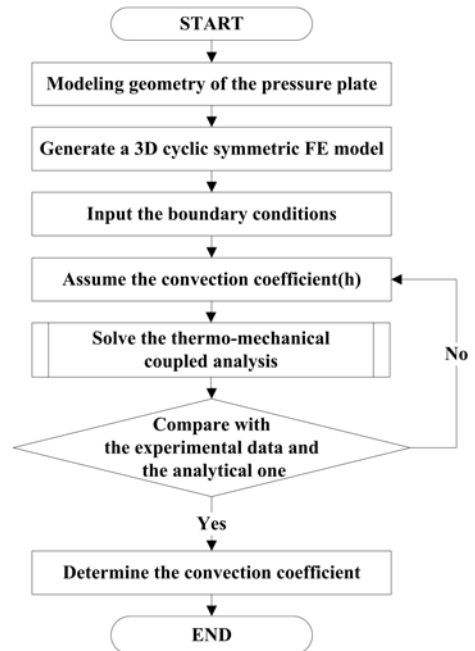


Fig. 14 Flow chart of computation convection coefficient

냉각 시의 대류 열전달 계수를 결정하기 위하여 Fig. 14와 같은 절차로 Inverse heat transfer method를 사용하였다. 압력판 온도 측정 실험값을 이용하여 온도 기반의 h 값을 도출하였다(Fig. 15).

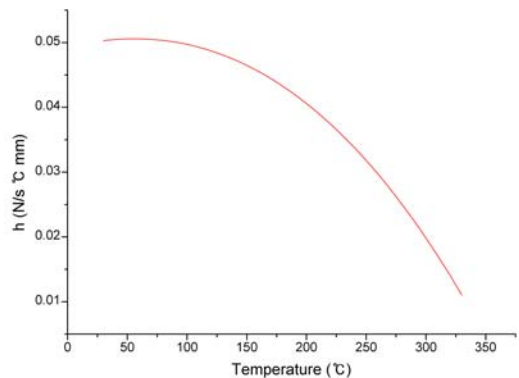


Fig. 15 Convection heat transfer coefficient

3.2 시뮬레이션 검증

압력판 온도 측정 시험 시 열전대가 있던 지점과 동일한 위치에 해당하는 절점(3,435)에서의 온도

값을 출력 하여 GCD500에 대하여 각 사이클의 최저 온도와 최고 온도를 실험값과 비교하였다 (Fig. 16, Fig. 17).

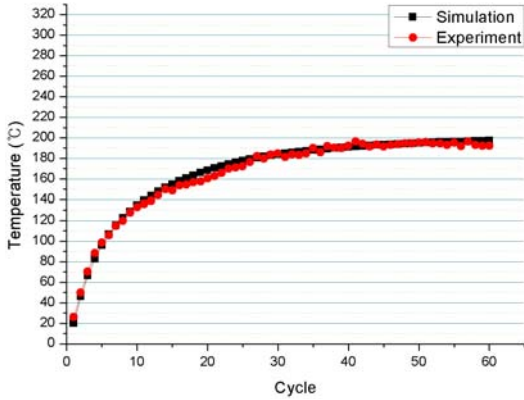


Fig. 16 Minimum temperature in each cycle

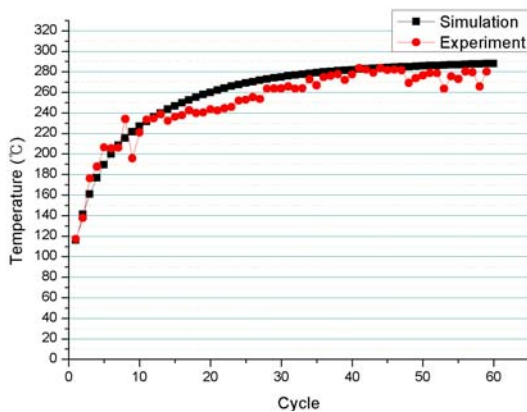


Fig. 17 Maximum temperature in each cycle

실험값의 최고 온도 데이터는 압력판의 미끌림 직후 불안정한 상태에서 읽어진 값을 감안하고, 최저 온도에서 실험과 시뮬레이션을 비교해 볼 때 온도거동이 실험값과 유사하게 따라가는 것으로 시뮬레이션의 타당성이 검증되었다. 해석 시 사용된 h 값은 경계조건과 형상이 동일하므로 온도의 합수로 가정하고 3가지 재질에 동일하게 적용하였다.

3.3 거동해석 결과 및 고찰

유한요소해석 결과 중 마지막 사이클에서의 온도 분포에서 재질 별 최고 도달 온도는 GC250 (280.4°C), GC350(281.0°C), GCD500(295.

6°C)로 구상흑연주철보다는 회주철의 열전달이 더 잘 일어남을 확인할 수 있다. 최고 온도 도달 시 온도 편차는 GC250(97.7°C), GC350(99.8°C), GCD500(117.8°C)로 나타났다. 온도 편차가 클수록 반복적인 열 하중을 받는 압력판의 열피로가 커지게 된다. Fig. 18은 대표적인 온도분포 해석 결과이다.

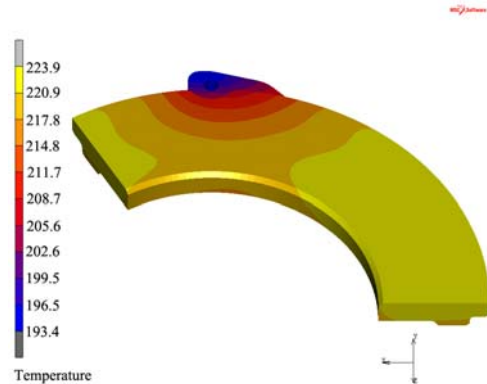


Fig. 18 Temperature distribution of GC250 at the last cycle

마지막 사이클의 응력 분포는 열에 의한 자유팽창을 하는 압력판에 러그부에만 구속되어 있으므로 이 부위에 응력 집중이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 최고 온도 도달 시의 최대 응력 값은 GC250(1046MPa), GC350(1327MPa), GCD500 (1406MPa)로 계산되었다. Fig. 19는 대표적인 응력분포 해석 결과이다.

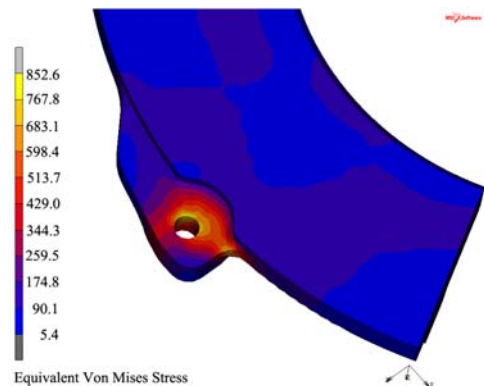


Fig. 19 Equivalent Von Mises stress of GC 250 at the last cycle

클러치 거동에 따른 한 사이클에 대한 압력관의 전형적인 온도변화는 Fig. 20과 같다. 각 사이클에서 최고 온도일 때와 최저 온도일 때의 변형량을 나타내기 위하여 변형이 가장 많을 것으로 예상할 수 있는 리그부에서 가장 멀리 떨어진 지점의 폭 방향 두 절점에서의 변화량을 출력하였다.

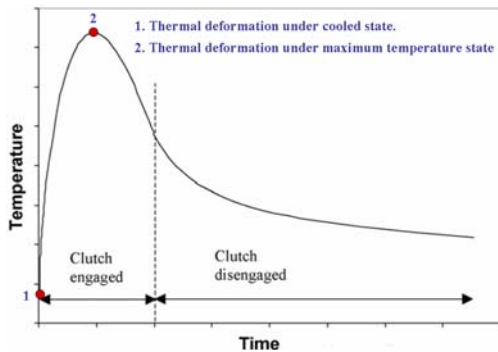


Fig. 20 A typical temperature-time history plot at a node

모든 재질에서 우산형 변형 거동을 확인할 수 있었으며, 특히 열 플럭스가 들어올 때(최고온도 시)는 안쪽 절점과 바깥쪽 절점의 변형 방향이 달라 우산형 변형이 더 심해지는 것을 확인할 수 있다. 최종 사이클에서 각 재질에 대한 최대 변형량 차를 구해보면 GCD500 (0.189mm), GC350 (0.176mm), GC250(0.161mm)로 나타났다. 이 수치가 클수록 압력관은 우산형 변형이 커지며, 이로 인해서 클러치 결속 시 동력전달효율이 떨어지게 된다. Fig. 21은 각 사이클에서 대표적인 변형량을 출력한 내용이다.

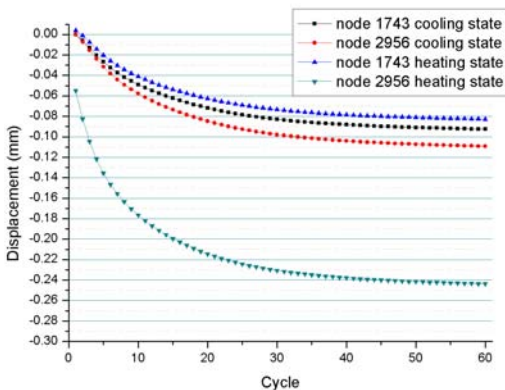


Fig. 21 Displacement Z of GC250

4. 결 론

1) 클러치 압력관 원재료로 사용되는 주철재 (GC250, GC350, GCD500)에 대한 온도기반의 기계적 및 열적 물성값을 실험과 문헌을 통하여 획득하였다.

2) 국부적이고 반복적인 마찰 열하중을 받는 압력관을 연성해석을 통해 거동을 시현하였고, 실험 데이터와 비교한 결과 타당성이 검증되었다. 이를 통해 압력관 거동 시 온도분포, 응력분포, 열변형량을 예측하였다.

3) 압력관 거동 시 우산형 변형을 확인할 수 있었으며, 마지막 사이클에서 최대 변형량 차이 값이 GCD500, GC350, GC250 순으로 작아 열변형 측면에서 GC250이 뛰어난 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시하고 있는 온도기반의 주철 물성값과 연성해석 모델을 이용하면 압력관과 연계되어 있는 다른 주철 부품의 유한요소 해석에 확대 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 압력관의 열변형 예측량은 형상설계의 기초자료로 사용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] R.D. Adams, "The damping characteristics of certain steels, cast irons and other metals", Journal of Sound and Vibration, Vol. 23, pp. 199, 1972.

[2] D. W. Han, J. C. Kim, Y. C. Son and S. H. Baik, "Effect of austempering treatment on damping capacity and mechanical properties in gray cast iron", Journal of Korean Society for

Heat treatment, Vol. 12, No. 2, pp. 108-116, 1999.

- [3] M. Hatate, T. Shiota, N. Takahashi and K. Shimizu, "Influences of graphite shapes on wear characteristics of austempered cast iron", *Wear*, Vol. 251, Issues 1-12, pp. 885-889, 2001.
- [4] Xin Tong, Hong Zhou, Lu-quan Ren, Zhi-hui Zhang, Wei Zhang and Ren-dong Cui, "Effects of graphite shape on thermal fatigue resistance of cast iron with biomimetic non-smooth surface", *International Journal of Fatigue*, In Press, Corrected Proof, Available online , 2008.
- [5] Casting, ASM Handbook, 9th edition, vol. 15, 2002.
- [6] 김용직, 김윤희, "노멀라이징 열처리한 구상흑연 주철의 마찰·마모특성 평가에 관한 연구", *한국마린엔지니어링학회지*, 제23권, 제3호, pp. 440-446, 1999.
- [7] 김종호, 김태형, "열소성변형공정을 시행한 회주철제 실린더 라이너의 재료물성에 관한 연구", *한국마린엔지니어링학회지*, 제29권, 제6호, pp. 671-677, 2005.
- [8] Frank P. Incropera and David P. DeWitt, "Introduction to heat transfer", 4th edition, John Wiley & Sons, 2001.
- [9] MAGMASOFT User's Tutorial Manual v4.4, MAGMA Gießereitechnologie Gmbh, 2007.
- [10] Marc[®] 2007 r1 User's Guide, MSC Software Corporation, 2007.

저 자 소 개



허만대(許萬大)

1959년 2월생, 1990년 경일대학교 기계공학과 졸업, 1998년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 평화발레오연구소 소장



이상욱(李相旭)

1980년 8월생, 2006년 부산대학교 기계공학과 졸업, 2008년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 SK 건설 사원



김국용(金局勇)

1981년생 10월생, 2005년 부경대학교 고분자공학과 졸업, 2008년 부산대학교 대학원 첨단공학협동과정 졸업(공학석사), 현재 부산대학교 대학원 기계공학과 박사과정



강성수(姜成守)

1948년 9월생, 1976년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1980년 서울대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 부산대학교 기계공학과 교수