

이중질량플라이휠의 단품 구조해석 Structural Analysis of Dual Mass Flywheel

오경훈*·이강우*·정재훈**·송영래**·지태한**·이성철**
K.H. Oh, K.W. Lee, J.H. Jung, Y.R. Song, T.H. Jee, S.C. Lee

Key Words : DMFW(이중질량플라이휠), FEM, SAE, RICARDO, Power Train System(구동계), COSMOS/DesignSTAR

ABSTRACT

In this paper, the structural and thermal integrity of a Dual Mass Flywheel (DMFW) being developed by HMC is assessed with conventional FEM code. Some parts were modified in order to satisfy the SAE and RICARDO's assessment limit, and we found that FEM was valuable tools in developing new DMFW system

1. 서론

현대의 자동차메이커들은 연비향상과 승차감 향상이라는 두 가지의 상반된 목표를 달성하기 위해 노력하고 있다. 일반적으로 연비향상을 위하여 수행되는 부품의 경량화는 엔진의 고출력화와 더불어 구동계의 심한 진동을 유발하므로, 이에 대한 적절한 해결방법이 요구된다. 이중질량플라이휠(DMFW)은 이러한 구동계의 진동소음을 저감하고 차량의 승차감을 향상시키기 위해 연구되어 온 다양한 해결방법중의 하나로, 현재 현대자동차(이하 HMC)에서는 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 HMC 에서 개발중인 동적특성의 검증이 완료된 이중질량플라이휠에 대해 구조적/열적 건전성을 평가하는 방법과 그 결과에 대하여 검토하였다. 이러한 건전성평가는 수치해석적 방법의 하나인 유한요소해석법(FEM)과 시험을 통하여 그 결과를 검증하였으며, 여기에서는 수치해석적인 방법에 대해서만 검토하였다.

단품해석은 크게 응력, 내구 및 고속에서의 파단(burst)평가를 위한 강도해석과 열전달특성을 파악하기 위한 열전달해석으로 구분할 수 있다. 강도해석은 HMC 에서 개발중인 2 가지 모델(모델 A, 모델 B 라 칭함)에 대하여 검토하였으며, 열전달해석에는 이 두 모델과 함께 타사에서 양산 중인 모델도 함께 고려하여 그 결과를 비교분석하였다.

해석에는 빈번하게 수정되는 설계모델의 평가를 원활하게 할 수 있도록 설계된 3 차원 솔리드 모델을 이용하여 자동으로 요소를 생성, 해석까지 수행할 수 있는 미국 SRAC(사)의 COSMOS/DesignSTAR 를 주 프로그램으로 사용하였으며, ANSYS 5.7 도 함께 사용하였다.

* 프리즘(주)
E-mail : PRISMCO@hitel.net
Tel : (031) 716-9578, Fax : (031) 713-8507

** 현대자동차(주)

2. 강도해석

2.1 평가방법

(1) 내구평가

내구평가에서는 구조물들 파손되지 않은 채 요구되는 시간동안 사용될 수 있는지를 평가하며, 여기서는 이러한 평가의 간단한 기준의 하나인 Goodman diagram 을 사용하였다. Goodman diagram 을 이용할 경우 구조물의 안전계수는 (1)식으로 표현되며,

$$SF = \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \left(1 - \frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{uts}} \right) \quad (1)$$

여기서 σ_f , σ_{uts} 는 각각 재료의 피로강도와 최대 인장강도를, σ_a , σ_{mean} 는 반복응력과 평균응력을 나타낸다. 일반적으로 σ_a , σ_{mean} 등은 교변하는 두 가지 응력상태로부터 정의되는데, 본 연구에서는 모든 종류의 하중이 함께 작용하는 엔진작동시를 하나의 응력상태로, 엔진이 정지되어 정적하중(볼트하중과 ring gear 의 끼워맞춤 압력 등)만이 작용하는 상태를 또 하나의 응력상태로 가정하였다.

플라이휠의 경우 RICARDO 와 SAE 에서 추천하는 판단기준은 다음과 같이 서로 약간 다르다.

RICARDO: At rated speed(6500RPM)

Safety Factor > 2.0

SAE: At over speed (7540RPM)

Safety Factor > 1.0

(2) Burst 평가

Burst 평가에서는 재료의 최대인장강도(UTS)에 대한 부재의 응력상태를 평가하며, RICARDO 와 SAE 에서는 다음의 기준을 제시하고 있다.

RICARDO : At rated speed × 2
 13000RPM, Safety factor > 1.0
 SAE : At rated speed × 2.5
 16250RPM, Safety factor > 1.0

여기서, safety factor 는 최대인장강도에 대한 해석 응력의 비이며, DMFW 의 경우 사용된 모든 재료는 연성을 가지므로 계산에는 Von Mises 등 가응력을 사용하였다.

2.2 해석대상

(1) 유한요소해석 모델

표 1 은 강도해석에 사용된 DMFW 의 구성품들을 정리한 것으로, 해석시 단품들의 간섭효과는 고려하지 않았다. 그림 1 은 사용된 유한요소모델의 한 예로써 모델 A 의 일차질량(primary mass)이며, 경계조건등은 이 모델을 기준으로 설명하였다. 모델링에 사용된 요소는 2 차 tetra 요소이다.

표 1 각 모델별 해석대상

Model	해석대상
모델 A	Primary mass Secondary mass
모델 B	Primary mass Secondary mass Drive plate
공통	Ring gear

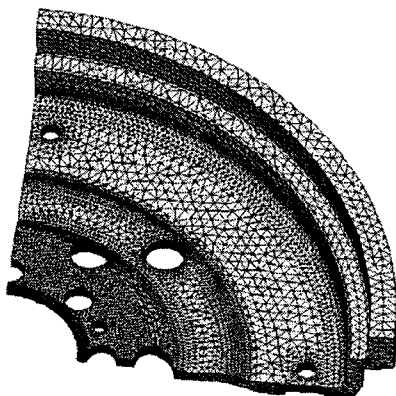


그림 1 유한요소모델(모델 A, primary mass)

(2) 각 재료의 물성치

표 2 는 강도해석에 사용된 재료의 기계적 물성치를 정리한 것이다. 여기서 E_t 는 비선형해석시 사용되는 tangent modulus 로서 재료의 연신률로부터 계산하였으며, 내구평가시 요구되는 재료의 피로강도는 형상, 크기, 온도, 가공정도 등을 고려하여 극한강도의 35%에 해당하는 값을 사용하였다.

표 2 각 재료의 기계적 물성치

종 류	S45C	FCD450	SCM415	S48C
E [GPa]	207	159	207	207
ν	0.30	0.29	0.30	0.30
ρ [kg/m ³]	7850	7196	7850	7850
E_t [GPa]	1.25	0.931	1.235	1.785
항복강도[MPa]	310	310	786	580
극한강도[MPa]	565	448	979	830
피로강도[MPa]	197.8	156.8	342.65	290
비 고	primary mass	secondary mass	drive plate	ring gear

2.3 하중 및 경계조건

작동중인 DMFW 에는 엔진회전에 의한 원심력 뿐만 아니라 다음의 하중들도 함께 작용한다.

먼저, 링기어가 끼워지는 일차질량에는 끼워맞춤으로 인한 압력이 작용하며, thick cylinder theory 에 근거하여 계산된 압력의 크기는 최대/최소 끼워맞춤시 각각 16.984MPa 과 9.414MPa 이었다. 해석에 적용된 값은 이들의 평균값인 13.2MPa 이다.

DMFW 은 볼트에 의해 크랭크축에 장착되며, 이때 볼트에 의한 체결력은 체결토크로부터 계산하였고, 이를 다시 체결부위에 면압의 형태(계산된 압력의 크기는 73.97MPa)로 인가하였다.

또한, 엔진의 회전에 의한 원심력은 각속도로 인가하였다.

표 3 은 해석에 사용된 적용하중을 정리한 것이며, 그림 2 는 Case1 의 경우를 보여주고 있다.

표 3 CASE 별 적용하중

	적용하중
CASE 1	Bolt load+ gear fitting force/면압
CASE 2	CASE 1 + 원심력(6500RPM)
CASE 3	CASE 1 + 원심력(7540RPM)
CASE 4	CASE 1 + 원심력(13000RPM)
CASE 5	CASE 1 + 원심력(16250RPM)

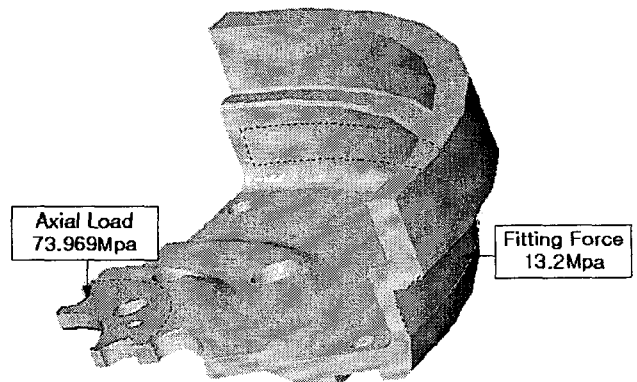


그림 2 하중조건(모델 A, primary mass)

2.4 해석결과

응력해석의 경우 먼저 재질을 선형으로 가정하여 해석을 수행하였으며, 계산된 응력이 재료의 항복 응력을 초과하는 경우에는 비선형해석을 추가로 수행하였다. 그림 3 은 계산된 일차질량의 응력상태의 한 예로써 볼트구멍 근방에서 최대응력이 발생함을 보여주고 있다.(최대응력의 발생위치는 표 3 에 정리된 적용하중에 따라 다름)

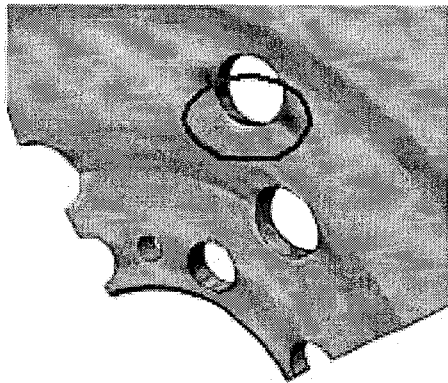


그림 3 일차질량의 응력상태

이미 언급하였듯이 본 연구의 경우 계속된 모델의 변경과 다양한 하중의 적용으로 수많은 해석이 수행되었으므로 그 결과를 모두 언급하기는 어려우며, 여기서는 최종모델에 대한 응력해석결과만을 표 4 와 표 5 에 정리하였다.

표 4 모델 A 의 응력해석결과 [단위: MPa]

평가 종류	엔진 회전수	Primary Mass	Secondary Mass	Ring Gear (A/B 공명)	비고
내구 평가	정하중	108.5	-	428.8	선형해석 적용
	6500	97.83	112.8	590.6	
	7540	122.9	151.8	643.1	
Burst 평가	13000	336	340	588	비선형 해석적용
	16250	396	334	1050	
항복응력		310	310	580	
인장강도		585	488	1695*	

주*) Ring gear 의 경우 표면 열처리 등을 통하여 인장강도가 S45C 의 200% 에 달함

표 5 모델 B 의 응력해석결과 [단위: MPa]

평가 종류	엔진 회전수	Primary Mass	Secondary Mass	Drive Plate	비고
내구 평가	정하중	254.8	-	221.1	선형해석 적용
	6500	260.7	114.1	248.9	
	7540	264.4	153.6	286.1	
Burst 평가	13000	359	361	630	비선형 해석적용
	16250	534	368	808	
항복응력		310	310	788	
인장강도		585	488	979	

표 4 와 표 5 의 결과에 2.1 절의 평가방법을 적용한 결과 내구평가의 경우 DMFW 의 모든 구성 부품들은 SAE 및 RICARDO 평가기준을 만족하였으며, burst 평가의 경우도 SAE 와 RICARDO 의 평가기준을 모두 만족하였다. 참고로 burst 평가가 진행되는 동안, 계산된 최대응력이 재료의 인장강도를 초과하는 경우에는 재질의 비선형성을 고려한 비선형응력해석을 수행하였다.

3. 열전달해석

3.1 해석대상

엔진운전시 DMFW 의 2 차질량과 클러치의 압력판은 단속적으로 접촉하게 되며, 이에 따라 이 부위에서는 상당한 양의 열이 발생하게 된다. 이러한 열부하는 플라이휠의 파손을 초래할 수 있으므로 본 절에서는 DMFW 의 열전달특성을 파악하였으며, 이를 위하여 HMC 에서 개발중인 모델 A, 모델 B 와 이미 상용화되어 사용중인 타사 모델에 대해 다음과 같이 3 가지로 조건을 변경하여 열전달해석을 수행하였다.

- 조건 1, 실제의 3 가지 모델에 대한 해석
- 조건 2, 타사모델의 물성치를 HMC 의 A, B 모델에 적용한 경우
- 조건 3, HMC 모델 A, B 의 secondary mass 두께를 2mm 증가시킨 경우

(1) 유한요소해석 모델

본 해석의 목적은 DMFW 의 전반적인 열전달 특성을 평가하는 것이므로 열전달해석의 대상은 DMFW 의 2 차질량과 클러치 압력판만으로 설정하였으며, 해석시간을 단축하기 위하여 축대칭으로 가정하였다. 동일한 발열조건하에서의 특성을 비교하기 위하여 모든 모델에 동일한 압력판을 사용하였다(즉, 동일한 마찰면적을 적용함). 그림 4 ~ 그림 6 은 해석에 사용된 3 가지의 유한요소모델을 나타낸다.

시간의 변화에 따른 온도분포와 온도구배를 정확히 구하기 위해서는 상온에서부터 온도가 정상상태에 도달할 때까지의 전과정에 대해 비정상상태의 열전달해석을 수행하여야 하나, 해석에 소요되는 시간을 단축하기 위하여 비정상상태의 열전달해석은 정상상태에 도달하기 전인 일정시간동안만 수행하여 그 시간 내에서의 온도구배만을 평가하는 데 사용하였으며, 각 모델이 도달할 수 있는 최종온도는 정상상태의 열전달해석을 통하여 계산하였다.

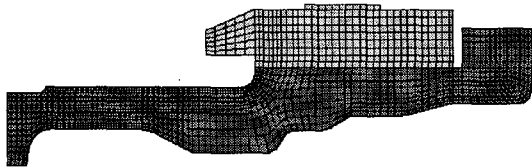


그림 4 타사 모델

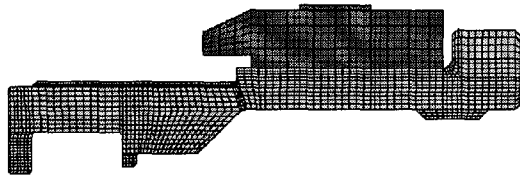


그림 5 HMC의 모델 A

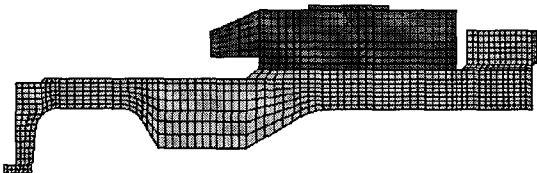


그림 6 HMC의 모델 B

(2) 각 재료의 열적 물성치

해석에 사용된 2 차질량과 압력판의 열적 물성치는 표 6 과 같다.

표 6 각 재료의 열적 물성치

재료	FC250	GGV30	FCD450
E[GPa]	128	145	159
ν	0.26	0.26	0.29
ρ [kg/m ³]	7196	7196	7114
α [m/m ³]	1.11 E-5	1.08 E-5	1.19 E-5
K[W/m ³]	48.5	43	34.6
C[J/kg ³]	490	700	544.3
Convection[W/m ²]	150	150	150
비교	압력판	타사 모델	HMC

3.2 열전달해석시의 경계조건

표 7 은 정상상태의 열전달 경계조건을 나타낸 것으로 마찰면에 가해지는 heatflux 는 비정상상태의 열전달해석에 사용되는 heatflux 의 시간에 대한 평균값을 구하여 적용하였다.

표 7 정상상태 열전달 온도 및 경계조건

	경계조건	비고
Ambient Temperature	130 ^o C	분위기 온도
Uniform Temperature	25 ^o C	모든 절점
Convection Coefficient	150 W/ m ² °C	외부 표면
Heat Flux[W/ m ²]	128187.5	시간에 대한 평균값

비정상상태의 열전달해석시 요구되는 경계조건은 정상상태의 경우와 거의 동일하며 단지 가해지는 heatflux 가 시간에 따라 변한다는 점이 다르다. 그림 7 은 비정상상태의 열전달해석에 사용된 heatflux 입력 데이터(1cycle 동안의 값으로 시험에서 측정된 데이터를 선형화하였음)로, 비정상상태의 해석은 이러한 cycle 이 100 번동안 반복되는 1500 초까지만 수행하였다.

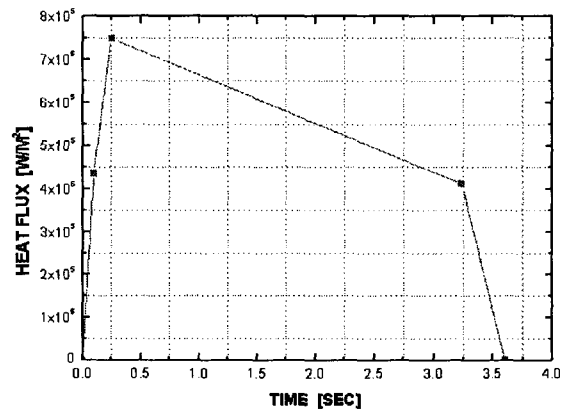


그림 7 1 cycle 동안 가해지는 Heat flux

3.3 해석결과

그림 8 은 정상상태 해석결과와의 한 예로 모델 A 의 온도분포를 보여주고 있다.

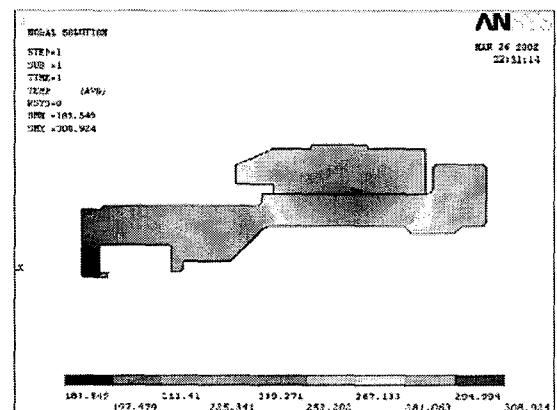


그림 8 온도분포 (모델 A, 조건 1)

정상상태의 해석결과, 모델에 따라 약간의 차이는 있으나 도달 가능한 최고온도는 약 300~310^oC이며, 해석조건에 따라 도달 가능한 최고온도는 다음의 순서와 같이 된다.

- 조건 1 : 타사모델 < 모델 A < 모델 B
- 조건 2 : 모델 A ≤ 모델 B ≤ 타사모델
- 조건 3 : 두께 2mm 증가 < 원래 모델

조건 1의 경우 타사 모델이 HMC 모델에 비해 약간 우수하였으며, 타사 모델에 사용된 재질을 HMC 모델에 적용할 경우 HMC 모델이 약간 우수해 짐을 확인할 수 있었다. 또한, 2차질량의 두께를 2mm 증가시킨 조건 3의 경우, 도달 가능한 최고온도는 약 1°C 정도만 하강하였으므로 그 효과는 그리 크지 않음을 알 수 있었다.

그림 9는 비정상상태 열전달해석결과의 한 예로 모델 A에서 최대온도가 발생하는 부위의 온도변화를 시간에 따른 그린 것이다.

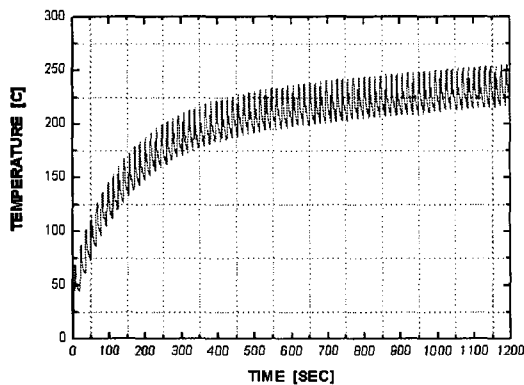


그림 9 시간에 따른 온도변화(모델 A, 조건 1)

조건 1에서 해석을 수행한 결과, 온도가 급격히 상승하기 시작하는 해석초기에는 HMC 모델이 타사 모델에 비해 약 25°C 정도, 해석이 완료되는 시점(1500 초)에서는 그 차이가 5°C 정도로 높은 온도를 가짐을 확인할 수 있었다. 그러나, HMC 모델에 타사 모델에 사용된 재질을 적용한 조건 2의 경우엔 모델에 따른 차이가 거의 없는 동일한 온도곡선을 얻을 수 있었다. (모델의 온도차는 1°C 미만)

모델의 외형치수를 변경한 조건 3의 경우, 원래사양에 비해 열적특성이 약간 개선되기는 하였으나 그 영향은 열적으로 우수한 재질을 사용한 조건 2의 경우에 비해 크지 않았다. 따라서, 열적으로 우수한 성능의 DMFW를 제작하기 위해서는 형상의 변경에 앞서 열적으로 우수한 재질을 적절히 선정하여 사용하는 것이 훨씬 효과적임을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 동적특성이 이미 결정된 DMFW의 부품들에 대한 구조적/열적 건전성을 평가하는 과정을 설명한 것으로, 솔리드모델의 작성과 이를 이용한 자동화된 유한요소 프로그램의 적용으로 초기 설계시 유발되는 잦은 설계변화에 효과적으로 대응할 수 있음을 확인하였다.

HMC의 DMFW은 SAE와 RICARDO에서

제시하고 있는 설계기준을 만족함을 확인하였으며 열적특성을 향상시키기 위해서는 형상의 변경보다는 열적으로 우수한 재료를 사용하는 것이 훨씬 유리함을 알 수 있었다.