

## 듀얼매스 플라이휠의 최적 댐퍼 특성에 대한 고찰

### A Review of Optimum Damper Characteristics of Dual Mass Flywheel

박 동훈\* · 최 명진\*\*

Dong-Hoon Park, Myung-Jin Choi

**Key Words** : Dual Mass Flywheel(듀얼매스 플라이휠), Damper(댐퍼), Spring(스프링), Hysteresis(히스테리시스), Drivetrain(구동계), Clutch(클러치)

#### ABSTRACT

Dual Mass Flywheel(DMF) is used in order to improve the vibration characteristics of drivetrain of manual transmission vehicles. Regardless of its complexity and high cost, application of DMF is keep increasing due to a trend of using Diesel engines in passenger cars and light weight design of drivetrains. Modeling and analysis of DMF is rather simple, but finding out optimum parameters of damper may not be easy. Furthermore, its realization in DMF has some limitations due to DMF's structure and its structure dependent damping characteristics. Requirements on spring-damper characteristics of DMF has been reviewed and investigations on structures and damping characteristics of currently produced DMFs have been made in this paper. Also, ideal spring and damper characteristics has been proposed based on such investigations.

#### 1. 서 론

듀얼매스 플라이휠은 수동변속기 차량의 구동계 진동 특성을 개선시키기 위하여 1985년부터 장착되기 시작하였다.<sup>1)</sup> 듀얼매스 플라이휠은 복잡한 구조와 높은 원가에도 불구하고 우수한 제진(制振) 특성으로 인해 장착율이 계속 증가하고 있다. 최근에는 디젤엔진의 승용차 적용 및 구동계의 경량화 추세에 따라 그 필요성이 더욱 증가되고 있다.

듀얼매스 플라이휠은 수동변속기 차량의 점유율이 높은 유럽에서 먼저 개발되어 상용화되었으나 최근에는 북미 및 일본, 그리고 국내 시장에서도 적용되고 있다.

듀얼매스 플라이휠의 수학적 모델링과 해석은 비교적 용이한 편이나 댐퍼의 최적 파라미터를 결정하는 것은 그리 쉬운 일은 아니다. 또한, 이론적으로 구한 최적 파라미터를 실제로 구현하는 데는 듀얼매스 플라이휠의 구조와 그에 의해 크게 의존되는 스프링-댐퍼 특성으로 인해 상당한 제약

이 따른다. 본 논문에서는 듀얼매스 플라이휠에서 요구되는 스프링-댐퍼 특성에 대해 고찰하였고 현재 상용화되어 있는 듀얼매스 플라이휠의 구조와 댐핑 특성을 조사, 분석하였다. 그리고 그 결과를 토대로 이상적인 듀얼매스 플라이휠의 스프링-댐퍼 특성을 제시하였다.

#### 2. 듀얼매스 플라이휠 댐퍼의 요구 특성

##### 2.1 듀얼매스 플라이휠의 기능

듀얼매스 플라이휠은 Fig.1과 같이 엔진과 연결되는 프라이머리 매스(primary mass)와 클러치 및 변속기와 연결되는 섀컨더리 매스(secondary mass) 및 그 사이에 설치되는 비틀림 댐퍼(torsional damper)로 구성된다.

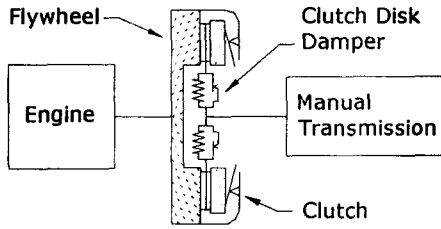
듀얼매스 플라이휠을 장착하면 섀컨더리 매스로 인해 구동계의 회전관성은 증가되고 이로 인해 구동계의 고유 진동수가 엔진의 가진 주파수 영역 이하로 낮아져 구동계의 공진 가능성을 최소화시킬 수 있다.<sup>2)</sup> 구동계의 공진은 차량의 부밍 소음(booming noise)를 유발한다.

듀얼매스 플라이휠에서는 댐퍼 스프링의 계수를 기존의 클러치 디스크용 댐퍼 스프링 보다 작게 설정할 수 있어 엔진의 공회전 및 가감속시 변속기의 래틀(rattle) 억제에 유리하다. 또한, 댐퍼 스프링의 작동 각도도 클러치 디스크

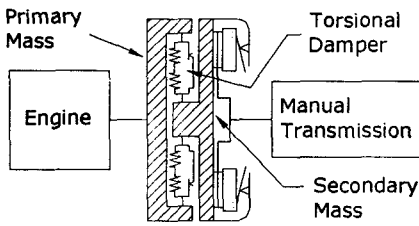
\* MUBEA Korea 이사  
경희대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : mubea@chollian.net  
Tel : (031) 206-1330, Fax : (031) 206-1332

\*\* 경희대학교 기계산업시스템공학부 교수

댐퍼에 비해 크게 할 수 있어 가속 페달의 톱인-백아웃(tip in-back out)시의 구동계의 저크(jerk) 저감에도 우수한 특성을 발휘할 수 있다.



(a) Conventional Flywheel



(b) Dual Mass Flywheel

Fig.1 Conventional Flywheel and Dual Mass Flywheel

그러나, 듀얼매스 플라이휠을 사용하면 낮은 구동계의 고유진동수로 인해 엔진 시동 및 정지시 엔진과의 공진이 발생하게 된다.

또한, 통상 듀얼매스 플라이휠이 장착될 수 있는 공간은 제한되어 있어 프라이머리 및 섀컨더리 매스는 기존의 싱글 매스 플라이휠(single mass flywheel)에 비해 회전 관성 및 질량이 상대적으로 작아질 수 밖에 없다. 작아진 프라이머리 매스의 회전관성은 엔진의 이상 진동을 유발하며 클러치가 장착되는 섀컨더리 매스 역시 질량이 감소하여 클러치 가속 사용조건에서의 발열량을 충분히 흡수하기가 어려운 문제점이 있다.

듀얼매스 플라이휠에 요구되는 기능 및 특성을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 엔진의 공회전 및 가감속시의 변속기 래틀 저감
  - (2) 톱인-백아웃시의 저크 저감
  - (3) 엔진 시동 및 정지시의 공진 억제
  - (4) 프라이머리 매스의 최소 관성질량 확보
  - (5) 섀컨더리 매스의 최소 열용량 확보
  - (6) 장착공간 및 중량의 최소화
- (4), (5) 및 (6)번 항목은 듀얼매스 플라이휠의 기하학적 형상에 의해 크게 좌우되므로 듀얼매스 플라이휠의 장착 공간

이 결정된 실제 제품설계 단계에서만 검토 가능하다. 그러나 (1), (2) 및 (3)번 특성은 댐퍼의 특성에 의해 좌우되므로 이를 만족시키기 위한 댐퍼의 특성을 고찰해 볼 수 있다.

## 2.2 댐퍼의 요구 특성

댐퍼의 특성은 댐퍼 스프링 계수, 댐핑 계수 및 댐퍼의 작동각도, 세 가지에 의해 결정된다. (1), (2) 및 (3)번의 기능을 만족시키기 위해 요구되는 댐퍼의 특성은 엔진 및 구동계의 가진주파수(excitation frequency) 및 가진폭(excitation amplitude)과 밀접한 관계가 있다.

(1) 엔진의 공회전 및 가감속시의 가진 주파수는 비교적 높으며 진폭(각도)은 작다. 이 경우, 변속기의 래틀을 방지하기 위해서는 프라이머리 매스와 섀컨더리 매스를 최대한 절연(isolation)시켜 엔진 크랭크축의 비틀림 진동(torsional vibration)이 변속기로 전달되는 것을 최대한 억제하여야 한다. 이를 위해서는 작은 댐퍼 스프링 계수 및 작은 댐핑 계수가 요구된다.

(2) 운전자가 주행 중 급격한 가속페달 조작(톱인-백아웃)을 할 경우 발생하는 저크는 가진 주파수는 매우 낮으나 진폭은 매우 큰 특징이 있다. 이 경우에는 댐퍼 스프링의 계수는 작고 댐핑 계수는 큰 것이 요구된다. 그리고 댐퍼의 작동각은 클수록 유리하다.

(3) 엔진의 시동 및 정지시의 가진 주파수는 비교적 낮고 진폭은 큰 특징이 있다. 이때 발생하는 엔진과 구동계의 공진을 신속하게 억제하지 못하면 듀얼매스 플라이휠 및 구동계가 파손되는 경우가 발생한다.<sup>3)</sup> 이 경우, 댐퍼 스프링의 계수는 작고 댐핑 계수는 큰 것이 요구된다. 그리고 댐퍼의 작동각도 클수록 효과적이다.

(1), (2) 및 (3)번의 기능을 효과적으로 만족시키기 위한 댐퍼의 요구특성 즉, 스프링 계수, 댐핑 계수 및 작동각을 정리해 보면 Table 1과 같다.

Table 1 Required Damper Characteristics

Operating Mode		(1)	(2)	(3)
Problems		Rattle	Jerk	Durability
Excitation Frequency		High	Low	Low
Excitation Amplitude		Low	High	High
Damper Requirement	Spring Rate	Low	Low	Low
	Damping Coefficient	Low	High	High
	Damper Angle	-	High	High

Table 1을 보면 댐퍼 스프링의 계수는 가급적 낮은 것이 요구되고 댐퍼의 작동 각도는 클수록 유리함을 알 수 있다. 또한, 댐핑 계수는 가진폭이 작을 때는 작게, 가진폭이 클 때는 크게 변하는 가변적인 댐퍼특성이 필요함을 알 수 있다.

이와 같은 고찰 결과를 토대로 현재 상용화 되어있는 듀얼 매스 플라이휠의 구조와 댐퍼의 특성을 파악, Table 1의 요구 특성을 어느 정도 만족시키고 있는가를 분석하여 본다.

### 3. 듀얼매스 플라이휠의 구조 및 댐퍼 특성

#### 3.1 아크 스프링(arc spring) 댐퍼

Fig. 2는 2개의 긴 원호(arc) 모양의 스프링을 사용하는 듀얼매스 플라이휠을 나타낸다. 스프링은 댐퍼 하우징의 스프링 가이드와 직접 접촉하는 구조로 되어있다. 따라서, 스프링의 마모와 진동을 방지하기 위해 댐퍼는 그리스(grease)로 충전, 밀봉되어 있다. 이와 같은 구조의 댐퍼에서는 스프링에 작용하는 원심력에 의해 스프링과 스프링 가이드 사이에 마찰력이 발생하게 되는데, 이 마찰력은 스프링의 압축량, 즉 입력 가진폭에 비례하여 증가하므로 별도의 가변 댐퍼를 설치하지 않고 아크 스프링만으로도 댐퍼 스프링 및 가변 댐퍼의 기능을 동시에 수행할 수 있다.

이 듀얼매스 플라이휠은 가변 댐퍼의 기능과 비교적 간단한 구조, 그리고 댐퍼의 작동각도가 크다는 장점이 있으나 동일한 계수를 갖는 아크 스프링을 사용하므로 다단계의 스프링 특성을 실현할 수 없다. Fig. 3은 이 듀얼매스 플라이휠의 댐퍼 특성을 나타낸다.

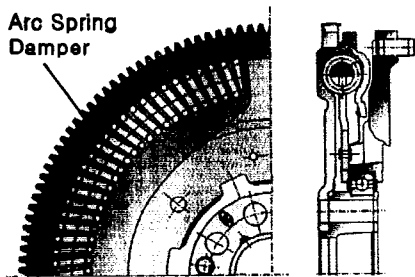


Fig. 2 DMF with Arc Spring Damper

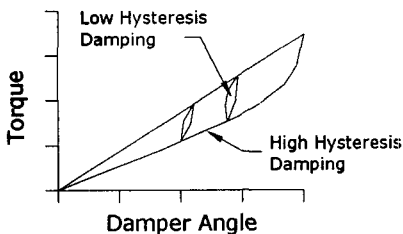


Fig. 3 Characteristics of Arc Spring Damper

#### 3.2 켈지(wedge) 댐퍼

Fig. 4는 켈지(wedge) 모양을 갖는 댐퍼를 이용, 입력 토크에 비례하여 댐핑 계수가 변화하도록 한 듀얼매스 플라이휠이다. 총 6개의 스프링이 켈지 사이에 설치되며 엔진으로부터의 입력 토크가 켈지-스프링-켈지의 경로를 통해 쉐전더리 매스에 전달된다. 댐퍼는 그리스로 충전, 밀봉되어 켈지와 스프링의 마모를 방지하고 있다. 댐핑계수는 켈지의 형상으로 조절할 수 있으며 스프링 계수를 서로 다르게 설정하면 다단계의 스프링 특성도 가능하다.

이 듀얼매스 플라이휠은 댐핑 계수가 입력 토크 및 가진폭에 비례하며 구조가 간단하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 켈지의 큰 크기로 인해 댐퍼의 작동각도에는 한계가 있다. Fig. 5는 켈지 댐퍼의 특성곡선을 나타낸다.

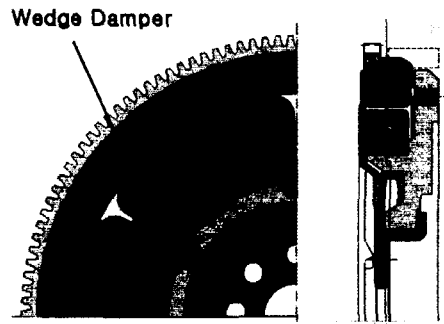


Fig. 4 DMF with Wedge Damper

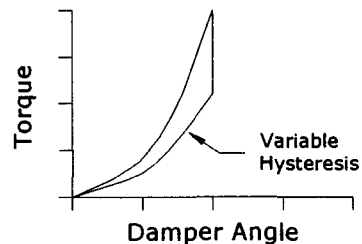


Fig. 5 Characteristics of Wedge Damper

#### 3.3 습식 슬라이딩 블록(sliding block) 댐퍼

Fig. 6은 슬라이딩 블록을 이용하여 댐퍼 스프링을 지지하는 구조의 듀얼매스 플라이휠을 나타낸다. 슬라이딩 블록은 유리섬유가 첨가된 엔지니어링 플라스틱으로 되어 있으며 댐퍼는 그리스로 충전, 밀봉되어 슬라이딩 블록의 마모를 방지한다. 총 10개의 스프링이 슬라이딩 블록 사이에 설치되며 스프링의 계수를 달리하여 다단계의 스프링 특성을 실현하고 있다.

이 듀얼매스 플라이휠은 매우 넓은 댐퍼 작동각도가 특징이나 댐핑 계수를 임의로 조절(tuning)할 수 있는 장치를 가지고 있지 않다. Fig 7은 이 댐퍼의 특성을 나타낸다.

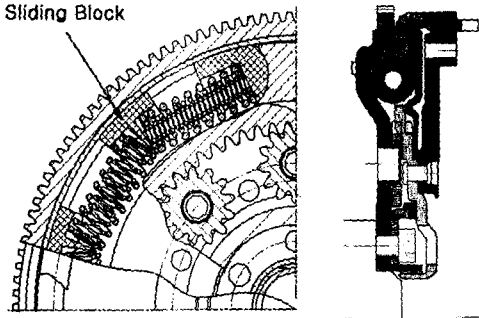


Fig. 6 DMF with Sliding Block Damper

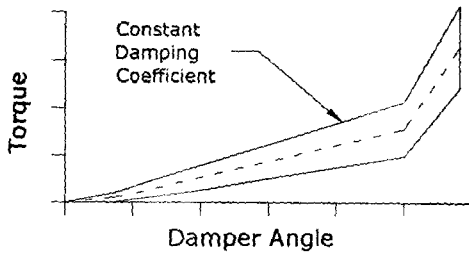


Fig. 7 Characteristics of Sliding Block Damper

### 3.4 건식 2단 댐퍼

Fig. 8은 건식 슬라이더(sl原因) 사용하여 댐퍼 스프링을 지지하는 구조의 듀얼매스 플라이휠을 나타낸다. 슬라이더는 알루미늄으로 제작되어 있으며 슬라이더의 외측에 마찰계수가 적은 자기윤활(self-lubricated) 재질을 적용하여 댐퍼 하우징과의 건식윤활이 가능토록 한 구조이다. 슬라이더 사이에는 16개의 코일 스프링을 삽입하여 다단계 스프링 계수를 실현하고 있다. 가진폭이 작은 고주파 진동의 경우에는 점성 스프링과 마찰판을 이용한 간단한 구조의 저(低)-히스테리시스 댐퍼가 작동하고 저주파 고진폭의 경우에는 별도의 고(高)-히스테리시스 댐퍼가 작동하도록 되어있다.

이 듀얼매스 플라이휠은 가변 댐퍼와 건식 슬라이더의 적용이라는 장점을 가지고 있으나 건식 슬라이더를 이용한 스프링 지지 방식으로 인해 댐퍼의 작동각에 제한이 따른다. 또한, 고주파 영역에서 슬라이더와 스프링의 공진이 우려되며 슬라이더 및 2단 댐퍼의 복잡한 구조로 인해 원가적인 측면에서 불리할 것으로 판단된다. Fig. 9는 건식 2단 댐퍼의 특성 곡선을 나타낸다.

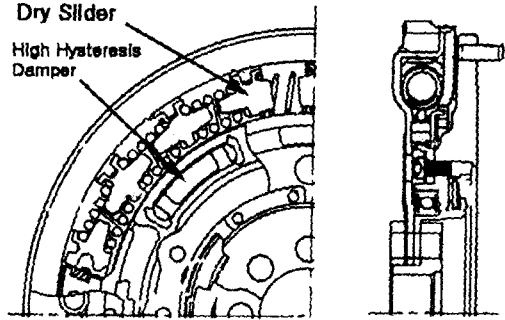


Fig. 8 DMF with 2 Stage Dry Damper

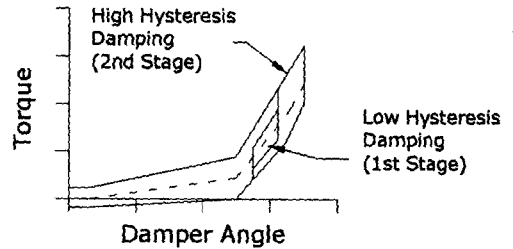


Fig. 9 Characteristics of 2 Stage Dry Damper

### 3.5 건식 마찰 댐퍼

Fig. 10은 가장 간단한 구조의 듀얼 매스 플라이휠을 나타낸다. 댐퍼 스프링은 총 6개로 구성되어 있으며 댐퍼로서 건식 마찰판을 사용하고 있다. 스프링은 양단에 엔지니어링 플라스틱으로 제작된 시트(seat)에 의해 지지된다.

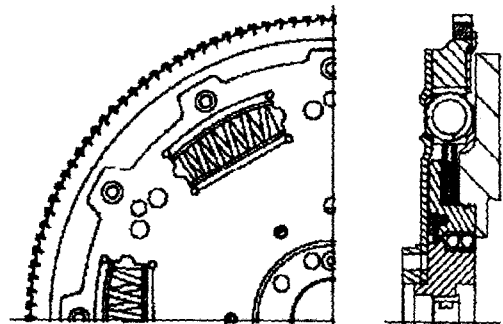
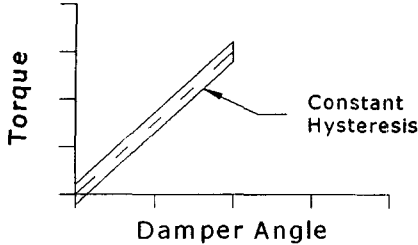


Fig. 10 DMF with Simple Dry Friction Damper

이 듀얼매스 플라이휠은 건식 마찰 댐퍼를 사용하므로 구조가 간단하고 원가 측면에서도 유리하나 댐퍼의 작동각도가 작고 및 고정된 댐핑 계수로 인해 듀얼매스 플라이휠으로서의 기능상 한계가 있다. 따라서, 반드시 기존의 클러



치 디스크 댐퍼와 병행해서 사용하여야 한다.

Fig. 11 Characteristics of Dry Friction Damper

#### 4. 결론

지금까지 상용화된 듀얼매스 플라이휠의 구조 및 댐퍼의 특성을 비교 분석한 결과 Table 1과 같은 댐퍼의 요구 특성을 완전히 만족시키는 제품은 없는 것으로 나타났다. 물론 Table 1의 요구특성을 완전히 만족시키는 것이 현재의 기술로는 불가능한 일인지도 모르지만 보다 진보된 개념의 듀얼매스 플라이휠에 대한 필요성은 계속 대두되고 있다.<sup>1)2)5)</sup> 새로운 듀얼매스 플라이휠을 개발할 경우, 본문에서의 조사 내용과 Table 1의 요구특성을 근거로 수치화된 개발 목표사양을 결정 할 수 있다. Table 2는 이러한 예를 나타낸다.

Table 2. An Example of Development Target Specifications for a New DMF

Eng. Max Torque	300 N-m		
Eng. Max. RPM	6500 RPM		
Damper Spring	3 stage		
Spring Rate (Nm/°)	1st	2nd	3rd
	9/7	100/40	320/50
Damper Type	Dry, Variable Coefficient		
Hysteresis Torque (Nm)	Idle~Medium Throttle		W.O.T
	≒ 20		≒ 150
Damper Operation Angle (°)	± 50 (+ Drive, - Coasting)		

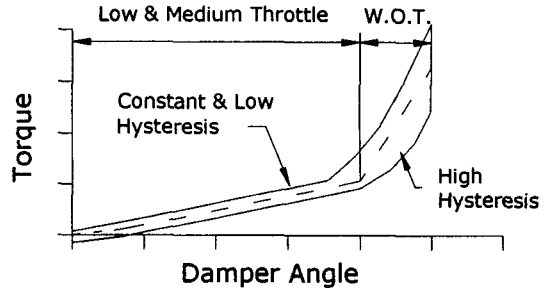


Fig.12 Development Target for a New DMF Damper

Fig. 12는 Table 2를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 12를 보면 스프링의 계수는 엔진의 트로틀 전개도(W.O.T.-wide open throttle) 토크 영역 전까지는 가급적 낮게 설정되어 있고, 히스테리시스는 저중 트로틀 개도 및 작은 가진폭 영역에서는 최소량으로 일정하게 유지되다가 고 트로틀 개도 및 큰 가진폭 영역에서는 급격히 증가함을 알 수 있다.

Table 2와 Fig 12에 제시된 댐퍼의 요구사양은 새로운 개념의 듀얼매스 플라이휠을 개발할 때 여러 설계 개념들에 대한 타당성 검토의 기준으로 사용될 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) Wolfgang Reik, Roland Seebacher, Ad Kooy, 1998, "Dual Mass Flywheel", 6th Kolloquium, 19/20, 03, 1998, LUK
- (2) Albert Albers, 1994, "Advanced Development of Dual Mass Flywheel (DMFW) Design - Noise Control for Today's Automobiles", 5th Kolloquium, 27, May 1994, LUK
- (3) Hans-Jürgen Drexl, 1998, "Motor Vehicle Clutches", Sachs
- (4) Arno Sebulke, 1987, "The Two-Mass Flywheel - A Torsional Vibration Damper for the Power Train of Passenger Cars - State of the Art and Further Technical Development", SAE 870394, SAE
- (5) Wolfgang Reik, 1999, "Electrical Motor in the Drive Train", LUK
- (6) Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger, 서효원 역, 1999, "제품설계 및 개발", 시그마프레스