

타이밍 체인 시스템 유압 텐서너 성능 측정 및 특성 곡선 이해

조경철* · 선영택

보그워너평택 기술부

Hydraulic Tensioner Performance Measurement and Characteristic Curve Understanding

Kyung Chul Joe* · Young Taek Sun

Engineering Team, BorgWarner Pyongtaek, 47-18 Cheongbulsandan-ro, Cheongbuk-eup, Pyeongtaek-si, Gyeonggi 17792, Korea

(Received 15 September 2022 / Revised 31 October 2022 / Accepted 13 January 2023)

Abstract : Hydraulic tensioners are normally applied to the engine timing chain system to support proper operation. Hydraulic forces using engine oil and mechanical force from spring are applied to control the timing chain tension through hydraulic damping force of the tensioner piston. In recent research, tensioner hydraulic characteristics control has emerged as one of the key techniques in ensuring the function and durability of a timing chain system by satisfying various conditions of a running engine. Various techniques about hydraulic characteristics control have been used. However, limited information is available regarding the hydraulic characteristics of a tensioner. Also, it is not easy to measure due to the difficulty of maintaining oil supply and piston displacement control the same as the engine running conditions. In this paper, we explain how the hydraulic damping force of a tensioner can be evaluated objectively and determine the differences in hydraulic force characteristics according to leakage control using the force-displacement curve.

Key words : Timing chain system(타이밍 체인 시스템), Hydraulic tensioner(유압식 텐서너), Damping force(반력), Damping response(응답성), Vent disc(벤트 디스크), Pressure relief valve(감압밸브), UTM(다목적 시험기), Rate of change(변화율)

Nomenclature

- A : amplitude, Hz x mm
- D : displacement, mm
- F : force, N
- P : pressure, bar
- R : rate of change, %
- f : oil flow, cc/sec

Subscripts

- PRV : pressure relief valve
- FDC : force and displacement curve
- ROC : rate of change
- f_M : main oil flow
- f_L : leakage oil flow

1. 서론

차량에 적용되는 대표적인 동력 전달 기술인 타이밍 체인 시스템은 크랭크축에서 발생하는 동력을 체인을 통하여 캠축을 가동시키는 방식이다.¹⁾ 이 타이밍 체인 시스템의 체인 장력 및 거동을 제어하는 부품인 유압식 텐서너는 유압 및 유량을 제어하여 체인 장력이 발생될 때 피스톤의 반력으로 체인 장력을 낮추거나, 체인 장력이 감소되어 체인이 이완될 때 텐서너 피스톤의 확장을 통해서 크랭크 축과 캠 축의 밸브 타이밍을 유지한다. 선행된 연구 결과에 따르면, 체인 시스템의 장력을 결정하는 주요 부품인 텐서너가 체인에 가하는 힘이 변화하는 경우, 체인의 장력, 진동, 전달 오차가 힘의 증감과 같은 경향으로 변화한다.²⁾ 하지만 텐서너가 체인에 가하는 힘, 즉 텐서너 피스톤의 반력을 측정하는 방법에 대한 표준

*Corresponding author, E-mail: kcjoe@borgwarner.com

¹This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

과, 텐서너 내부에 충전된 오일의 누설량에 따른 피스톤 반력의 상관관계에 대한 정보가 부족하다. 본 논문에서는 텐서너의 유압 강성 측정 방법을 도모하고, 텐서너 내부 오일 누설량 제어 방법에 따른 유압성능 특성을 실험 결과 분석을 통해 소개하고자 한다.

2. 타이밍 체인 시스템 유압식 텐서너

2.1 유압식 텐서너의 구조 및 누설량 제어 방법

엔진 타이밍 체인 시스템의 유압식 텐서너는 텐서너 바디, 피스톤, 스프링, 체크밸브와 벤트 디스크 또는 감압밸브(Pressure relief valve)로 구성되어 유압 의해 작동하는 동적 반응 장치이다. 텐서너는 엔진 오일펌프에 의해서 충전되는 내부의 오일 압력과 스프링에 의해서 피스톤을 밀고 나가게 되며, 크랭크축의 동력을 캠축에 전달하는 타이밍 체인에 장력이 발생되어 체인을 지탱하는 텐서너 압에 힘이 전달되면 텐서너 피스톤을 누르게 된다. 이때 텐서너의 내부 오일이 외부로 누설되면서 체인 장력을 흡수하게 되며, 이 누설되는 오일의 양에 따라서 텐서너의 유압력인 피스톤 반력이 결정된다. 오일 누설량을 제어하는 대표적인 방법으로는 피스톤 내부에 벤트 디스크 또는 감압밸브를 적용하여 피스톤 노즈 홀을 통해 오일을 누설하는 방법과, 피스톤 외경과 텐서너 보어 내경의 틈새 간극(Piston bore clearance)으로 제어하는 방법이 있다.

텐서너 내부에 벤트 디스크 또는 감압밸브가 없이 틈새 간극으로 누설량을 제어하기 위해서는 피스톤의 노즈 홀을 막는 것이 보편적이며, 차량 장기 마칭 시 텐서너 피스톤의 장착 방향에 의해서 발생될 수 있는 잠재적인 텐서너 내부 오일 누유를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 하지만 바디의 재질과 보어 내경, 피스톤 외경의 필요 가공 공차로 인해 세밀한 텐서너 튜닝에 한계가 있다. Fig. 1은 틈새 간극 제어 방법을 보여주고 있다.

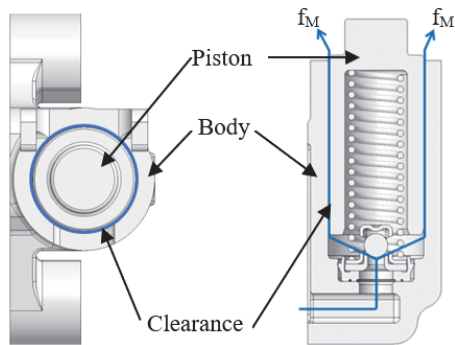


Fig. 1 Oil leakage control by piston and bore clearance

벤트 디스크는 텐서너 내부에서 피스톤 내측 상부와 스프링 사이에 장착되어 누설량을 제어한다. 벤트 디스크 상부에는 피스톤 노즈 홀로 이어지는 오일의 유로가 있으며, 이 유로의 깊이, 너비 및 길이에 의하여 유량을 조절하기 때문에 텐서너 누설량 제어가 용이하고 그로 인해 텐서너 튜닝이 쉬운 장점이 있다.³⁾ 하지만 오일 누설 유량이 텐서너 내부의 압력에 따라 선형적으로 변화하기 때문에 유압력 제어에 한계가 있다. Fig. 2는 벤트 디스크를 통한 누설량 제어방법을 보여주고 있다.

감압밸브는 벤트 디스크와 마찬가지로 상부 벤트 캡의 유로를 통해서 감압밸브가 개방되기 이전 유량을 1차로 제어하고, 이후 특정 압력에서 감압밸브 개방에 의해 유량이 급격하게 증가된다. 감압밸브의 작동 조건은 내부 스프링의 하중에 의해서 첫 번째로 결정되지만, 벤트 캡의 유량에 의해서도 그 작동 시점이 정해지기도 한다.

감압밸브는 엔진 회전속도가 낮아 오일펌프의 공급 압력이 낮을 시 벤트 캡의 낮은 유량 제어를 통해 체인의 거동을 감소시키고, 엔진 고회전 시 오일 압력 상승에 따른 텐서너 유압력 증가 및 체인 장력 상승을 감압밸브 개방으로 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 반면에 감압밸브 내부 구조가 타 부품에 비해 복잡하다. Fig. 3에서 감압밸브를 통한 누설량 제어 방법 및 구조를 보여주고 있다.

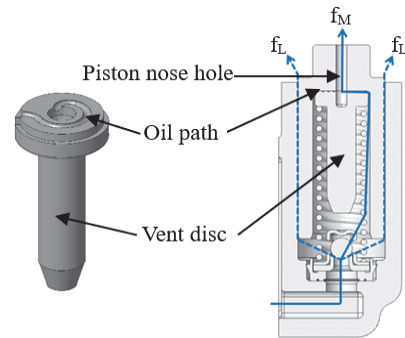


Fig. 2 Oil leakage control by vent disc

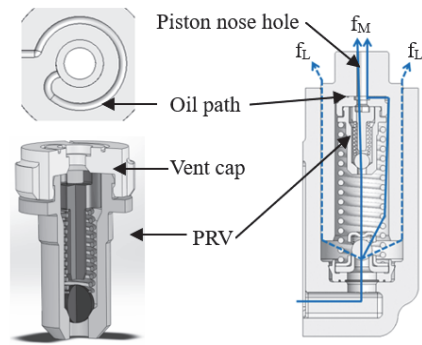


Fig. 3 Oil leakage control by PRV

3. 텐서너 유압 강성

3.1 유압 강성 측정

텐서너의 유압 강성을 측정하기 위해서는 공급되는 오일의 온도 및 압력을 조절하고, 피스톤을 정해진 변위와 가진 주파수로 제어하며, 동시에 피스톤의 반력을 측정할 수 있는 장치로 구성되어야 한다. 본 시험에서는 가진 주파수 제어가 가능한 다목적 시험기(Universal test machine)을 바탕으로 텐서너 유압 강성 측정을 위해 Fig. 4와 같이 전용 지그를 구축하였다.

텐서너에 오일을 공급하기 위해서 모터와 펌프로 구성된 장비를 별도 설치하였고, 지그 제작 검토 시 오일펌프로부터 텐서너에 오일을 공급하는 동시에 누설되는 많은 오일을 펌프 저장탱크로 재순환 가능하도록 고려하였으며, 피스톤 노즈 홀에서 누설되는 오일의 온도를

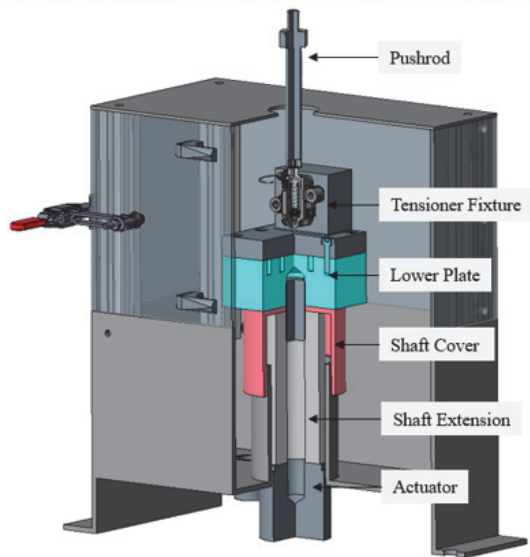


Fig. 4 UTM & Fixture for hydraulic tensioner damping force

	Oil supply		UTM control	
	Temp [°C]	Pressure [bar]	Amplitude [Hz]	Disp. [mm]
Condition. 1	30	1	15	± 0.5
Condition. 2			75	± 0.2
Condition. 3		3	15	± 0.5
Condition. 4			75	± 0.2
Condition. 5	90	1	15	± 0.5
Condition. 6			75	± 0.2
Condition. 7		3	15	± 0.5
Condition. 8			75	± 0.2

Fig. 5 Test matrix

실측하기 위해 푸시로드에 별도의 온도센서(Thermocouple)를 부착하였다. 푸시로드는 다목적 시험기의 로드셀에 부착되어 피스톤의 반력을 측정한다.

측정 시 데이터의 샘플링 수는 1 kHz로 10초간 취득되었으며, 3기통 엔진의 구동 특성을 고려하여 Idle 600 rpm 구간과 중/저속 3000 rpm 구간의 피스톤 가진 주파수인 15 Hz와 75 Hz로 선정하였다. 시험기 특성인 가진 주파수에 따른 변위 제어의 제한적인 조건과, 실 엔진에서 타이밍 체인 기능 평가 시 확인된 텐서너 피스톤의 최대 거동량을 참고하여 각 ±0.5 mm, ±0.2 mm로 제어하였다. 또한 오일펌프로부터 공급되는 오일 조건에 따른 텐서너 유압 강성 변화를 비교하기 위해, 온도와 압력은 각각 30도 및 90도, 1 bar와 3 bar로 제어하였다. 사용된 오일의 종류는 가솔린/디젤 엔진용 0W20이다. 텐서너는 동일한 부품들의 조합 조건에서 틸트 간극으로만 누설량을 제어할 때와, 피스톤 내부에 벤트 디스크 또는 감압 밸브가 장착된 조건에서의 성능 곡선 차이를 비교하였다. Fig. 5는 각 텐서너의 유압 강성 측정 조건이다.

3.2 텐서너 성능곡선의 이해

텐서너의 유압 강성과 피스톤의 응답성을 가시화하기 위해서 부하-변위 선도(Force and displacement curve)를 활용하였다. 부하-변위 선도는 피스톤에 정해진 변위 값을 사인파 형태로 가진 하였을 때 10초간 기록된 데이터를 이용하여 X축을 변위, Y축을 하중으로 표현한 것이다.

유압 강성 측정을 통해 취득한 부하-변위 선도에서 텐서너의 최대 반력과 응답성을 확인할 수 있다. 최대 반력은 피스톤을 일정한 속도와 변위로 눌렀을 때 발생하는 피스톤의 저항을 하중으로 나타낸 것으로, 실 엔진에서 텐서너의 반력이 높으면 피스톤의 거동양을 줄여줄 수 있지만, 체인의 장력을 증가시킬 수 있다.

텐서너 피스톤의 응답성은 변위(mm)당 하중(N)의 증가량으로 반력의 생성률을 나타낸다. 이는 텐서너 피스톤이 최대로 압축되었을 때 소모된 내부 오일의 양과, 처음 위치로 되돌아오는 과정에서의 오일 충전 기능이 원

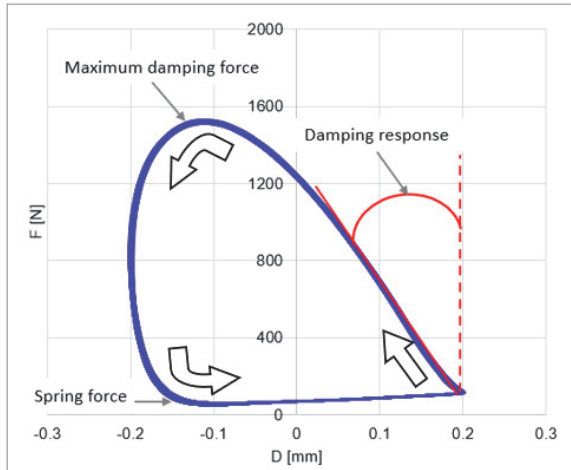


Fig. 6 Hydraulic tensioner FDC (General vent disc type)

활한지에 대한 여부와, 반력 생성 곡선의 기울기를 통한 각 텐서너 반응속도를 상대 비교할 수 있다.

부하-변위 선도에서 하단부 구간은 압축된 피스톤이 처음 위치로 돌아올 때 검출된 내부 스프링의 하중과 오일펌프의 공급 압력의 합이다. Fig. 6은 벤트 디스크가 장착된 텐서너의 유압 강성을 부하-변위 선도로 표현한 것이다.

3.3 누설량 제어방법에 따른 성능곡선 차이

누설량 제어방법에 따른 성능곡선 차이를 비교하기 이전에 각 단품이 가지고 있는 유량 특성을 파악하였다. 유량측정용 지그에 벤트 디스크 또는 감압밸브를 삽입 후, 전용 오일펌프의 공급 압력을 높였을 때, 각 단품별 유량을 오일 유량 측정기를 이용하여 측정하였다. 틸새 간극만을 이용한 유량 측정은 텐서너에 노즈 홀이 막혀 있는 피스톤을 조립 후 텐서너에 직접 오일을 공급하여 유량을 측정하였다. Fig. 7에서 유량 측정 장비의 구조와, 유압 강성 측정에 사용한 누설량 제어 부품들의 단품 유량 결과를 보여주고 있다.

틈새 간극 제어 방법과 벤트 디스크는 오일펌프의 공급 압력에 선형적으로 유량이 증가하며, 벤트 디스크의 유량이 틸새 간극 유량보다 높다. 감압밸브는 오일 공급 압력 25 bar 이전까지는 벤트 디스크 보다 낮고, 틸새 간극 보다 높은 선형적인 유량을 보이며, 25 bar 이후부터는 감압밸브 개방에 따라 유량이 급격히 높아지면서 가장 높은 유량을 보여준다. 감압밸브 내부 스프링에 의해서 유로를 막고 있는 볼이 오일 압력 25 bar부터 개방되면서 유량이 급격히 증가하게 되는 것이다.

누설량 제어 방법에 따른 텐서너 유압 성능곡선은 크게 두 가지 형태로 표현이 되었는데, 감압밸브가 적용되

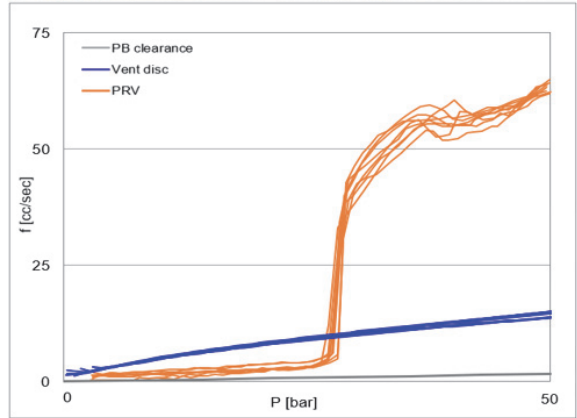
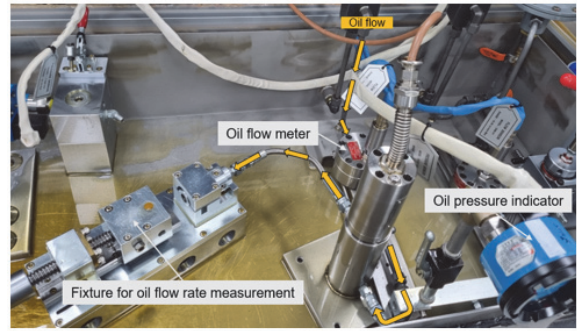


Fig. 7 Oil flow rate measurement and results

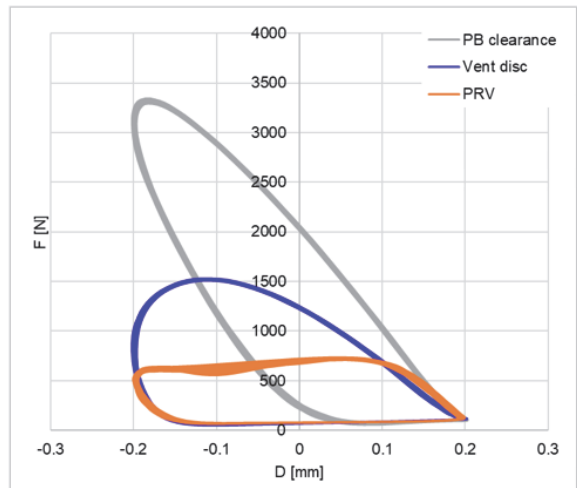


Fig. 8 FDC comparison according to oil leakage type (Oil temp. 30 °C)

었을 때와, 벤트 디스크 또는 틸새 간극만으로 누설량을 제어했을 때로 나뉘어진다. 내부 압력에 의해 선형적으로 오일이 누설되는 벤트 디스크와 틸새 간극은 피스톤이 압축되는 과정 동안 반력이 지속적으로 상승하며, 각 누설량 차이에 따른 최대 반력 차이만 발생한다. 피스톤의 노즈 홀을 막고 틸새 간극만으로 제어된 텐서너의 누

설량이 벤트 디스크 대비 현저히 낮기 때문에 최대 반력이 상대적으로 더 높다. 반면 감압밸브가 적용된 텐서너는 일정 하중 이후부터 하중 상승 없이 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 내부에 장착된 감압밸브로 인해서 텐서너 내부 압력이 목표치에 도달할 시 유로가 열리면서 내부 압력을 일정하게 유지시켜 주기 때문이다.

각 단품별 유량(Fig. 7) 측정 결과, 오일펌프의 공급 압력 25 bar 이전까지의 선형적인 유량 차이는, 텐서너 성능곡선(Fig. 8)에서 피스톤 응답성 각도와 비례하며, 감압밸브가 개방되기 이전까지 유량이 가장 적은 틱새 간극 제어, 감압밸브, 벤트 디스크 순으로 그 응답성이 크다. Fig. 8은 각 누설량 제어 방법에 따른 유압 강성 특성 차이를 하중-부하 선도로 표현한 것이다.

3.4 공급되는 오일 조건에 따른 유압 강성 변화

별도 설치된 오일펌프 장비에서 공급되는 오일의 조건에 의한 유압 강성 변화를 확인하기 위해서 각 텐서너에 오일 온도 30도와 90도일 때, 공급되는 압력을 1 bar와 3 bar로 설정하여 유압 강성을 측정하였다. 오일의 점도는 온도가 올라갈수록 낮아지는데, 낮아진 오일의 점도는 텐서너 내부에 충전된 오일의 누설량을 증가시키기 때문에 최대 반력이 크게 줄어든다. 특히 압력에 선형적으로 오일이 누설되는 벤트 디스크와 틱새 간극 제어 방식이 텐서너의 최대 반력이 크게 감소하였다.

감압밸브의 경우 오일 온도가 상승하여도 최대 반력이 크게 변화하지 않았다. 이는 오일의 점도가 변화하여도 감압밸브 제어를 통해 내부 압력을 일정하게 유지시키고 있다고 판단할 수 있다. 즉 점도가 높은 저온 30도에서 감압밸브가 많이 개방되어 누설량을 높이고, 90도에서는 적게 개방되어 누설량을 낮추기 때문이다. Fig. 9는 각 누설량 제어 방법에 따른 텐서너 피스톤의 최대 반력이 오일펌프에서 공급되는 오일 온도가 30도에서 90도로 상승될 시 변화하는 정도를 비율로 나타낸 것으로, 변화율(Rate of change)의 수식은 다음과 같다.

$$ROC [\%] = \text{Rate of change}$$

$$\text{Current value} = \text{Maximum damping force at } 90^\circ\text{C oil temperature}$$

$$\text{Previous value} = \text{Maximum damping force at } 30^\circ\text{C oil temperature}$$

$$ROC [\%] = \left(\frac{\text{Current value}}{\text{Previous value}} - 1 \right) * 100$$

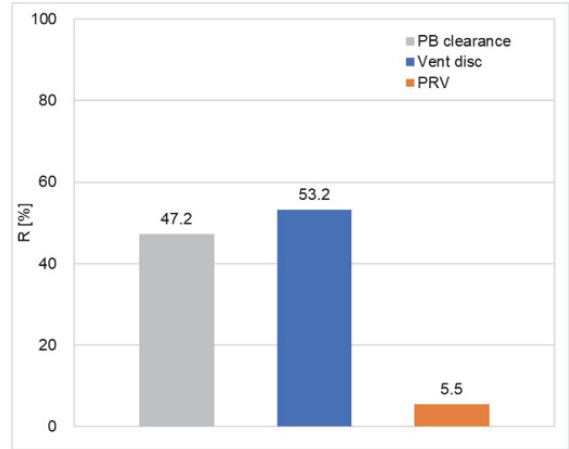
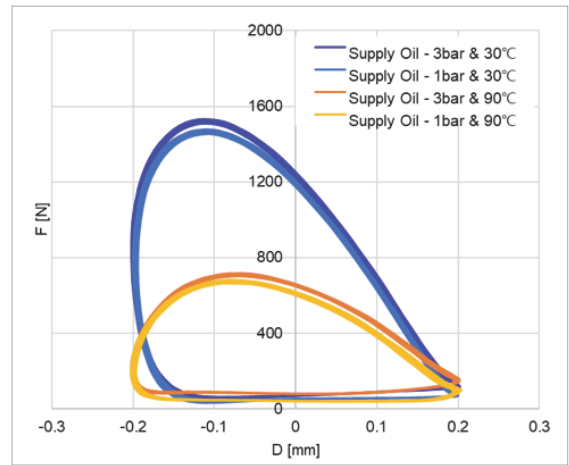
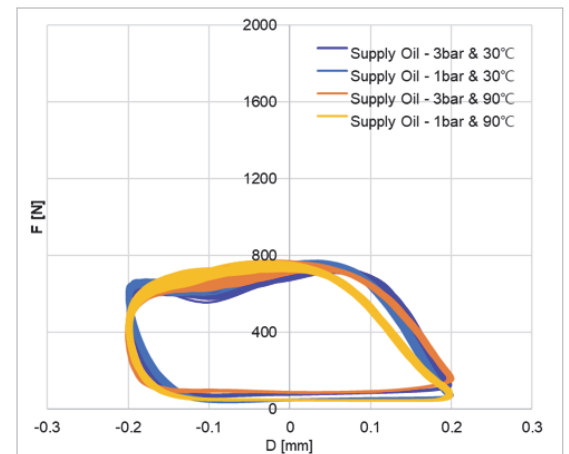


Fig. 9 Rate of change by increased oil temperature (75 Hz, ±0.2 mm)



(a) Vent disc, 75 Hz, ±0.2 mm



(b) PRV, 75 Hz, ±0.2 mm

Fig. 10 FDC difference according to oil temp change

동일한 오일 온도 조건에서 오일펌프의 공급 압력을 3 bar에서 1 bar로 낮추게 되면, 줄어든 압력에 따른 하중 감소로 최대 반력 및 최저 반력 모두 감소되지만, 성능곡선 특성 변화에는 크게 영향을 주지는 않는 것을 볼 수 있다. 즉 공급 압력이 1 bar 이상이면 텐서너는 기능적으로 문제가 없는 것으로 판단된다. Fig. 10은 오일 공급 조건에 따른 텐서너 성능곡선 변화를 보여주고 있다.

3.5 피스톤 가진 속도에 따른 유압 강성 변화

본 평가에서 가진 속도에 따른 텐서너 성능곡선 변화를 비교하기 위해, 가진 속도는 [Hz x 변위]로 저속 구간 [15 Hz x 1 mm]와 중/저속 구간 [75 Hz x 0.4 mm]으로 측정 비교하였다. 그 결과 텐서너의 최대 반력은 가진 속도에 비례하게 상승하는 것을 알 수 있었다. 상승폭은 누설량이 가장 적은 틸새 간극 제어, 벤트 디스크, 감압밸브 순으로 그 차이가 크며, 감압밸브는 시험조건에 따른 최대 반력의 차이가 가장 낮다. Fig. 11은 피스톤 가진 속도에 따른 각 텐서너의 최대 반력을 보여주고 있다.

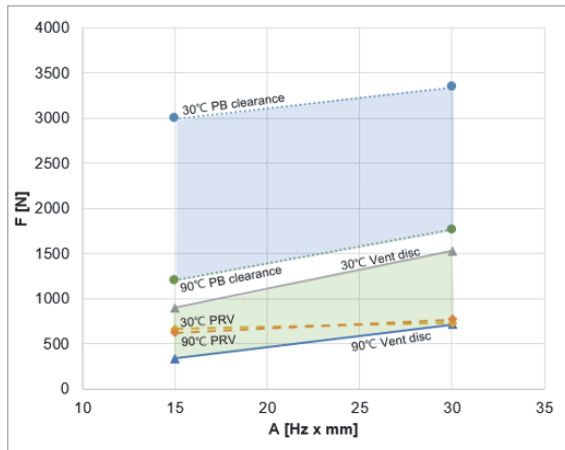


Fig. 11 Peak tensioner damping force differences

3.6 유압 강성 측정 활용

유압 강성 측정을 통해서 텐서너 완제품의 이상 유무를 비교 판단할 수 있다. 양산되는 텐서너의 각 단품별 공차 상/하한치를 선별하여 누설량이 가장 많은 조합과 가장 적은 조합으로 제작 후, 유압 강성 측정을 통해 얻은 각 텐서너의 최대 반력 및 최저 반력을 근거로 본 텐서너의 유압 강성 기준을 선정하였다. 이후 필드 고품 또는 내구시험이 완료 후 분석이 필요한 텐서너 고품을 유압 강성 측정 후 기준값에 대조하여 이상 유무를 판단할 수 있다. Fig. 12는 양산되는 텐서너의 상/하한 조건 및 내구시험 완료 고품의 유압 강성 측정 결과를 보여주고 있다.

Limit tensioner configurations

	Body Bore In-diameter	Piston Out-diameter	Vent disc Flow rate	Spring Force
Tight condition	Low	High	Low	High
Loose condition	High	Low	High	Low

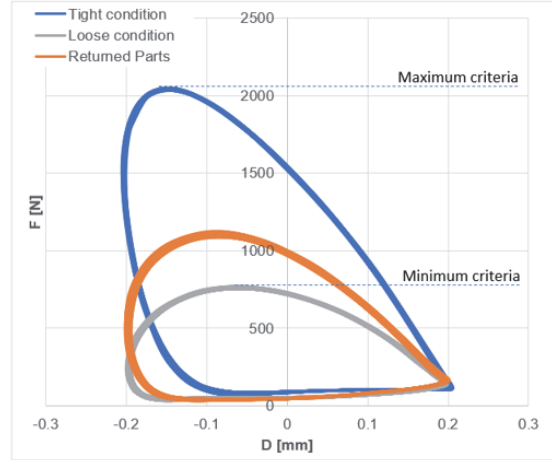


Fig. 12 Returned hardware analysis by tensioner damping force

4. 결론

텐서너의 유압 강성 측정을 통해서 누설량 제어 방법에 따른 유압 성능 특성을 확인하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다목적 시험기를 통한 텐서너의 유압 강성 측정 방법을 설정하고 시험을 통해 입증하였다.
- 2) 하중-부하 선도를 이용하여 텐서너의 유압 강성을 가시화하는 방법을 도출하였고, 그 특성을 확인하였다.
- 3) 텐서너 피스톤의 최대 반력은 텐서너 내부에 충전된 오일이 외부로 누설되는 양과 반비례하고, 틸새 간극 제어, 벤트 디스크, 감압밸브 순으로 피스톤의 반력이 높다. 또한 텐서너에 공급되는 오일의 압력에 비례하여 피스톤 반력이 변화하지만 그 비율이 낮고 오일펌프에 의해서 공급되는 압력이 1 bar 이상이면 텐서너 기능에 문제없다. 감압밸브는 평가 조건에 따른 반력 차이가 가장 낮다.
- 4) 유압 강성 측정을 통해서 텐서너의 성능과 구성부품의 이상 유무를 판단할 수 있다.

References

- 1) Y. Park, T. Jung, Y. Hong, Y. Kim, Y. Park, Y. Lee and C. Cho, "Transmission Error Influences by Initial Tension of Timing Chain System," Transactions of KSAE, Vol.25, No.2, pp.133-139,

- 2017.
- 2) G. Yu, T. Jung and C. Cho, "Dynamic Analysis of Vibration and Tension on Hydraulic Tensioner for Timing Chain System by Variation of Leakage Gap," KSAE Fall Conference Proceedings, p.500, 2017.
 - 3) D. Smith, Functional Statement - Flow Control Vent Path Design Procedure, BorgWarner Morse Systems Design Guide, 2015.