

100,000 RPM급으로 회전하는 에어공구의 성능측정에 관한 연구

조수용* · 김은종**

Study on Measuring the Performance of an Air Tool Operating at 100,000 RPM Class

Soo-Yong Cho*, Eun-Jong Kim**

Key Words: High pressure Air Tool (고압에어공구), Axial-Type Rotor (축류형동익), Torque Meter (토크계), High RPM (고속회전), Low Torque (저토크), Dynamometer (동력계)

ABSTRACT

An experiment is conducted for measuring the performance of an air tool, which is operated at 100,000 RPM in an unloaded state with very low torque. A 551 kPa in gauge pressure is supply to the inlet of an air tool. An experimental apparatus is developed as a friction type dynamometer. Inlet total pressure, air flow rate, rotational speed and operating force are measured simultaneously. Torque, output power and specific output power are obtained with different rotational speeds. Those are compared with the experimental results which were obtained by a commercial dynamometer. However, no commercial dynamometers are available for measuring the torque above 30,000 RPM. In order to reduce the rotational speed, a reduction gear is applied between the air tool and the commercial dynamometer. Torque and power obtained by the commercial dynamometer show 55% lower than those obtained by the developed friction type dynamometer, because the mass is added to the rotor of air tool for the braking system of the commercial dynamometer and power loss is generated by the reduction gear. From the compared results, the friction type dynamometer should be applied for measuring the performance of the air tool operating at low torque and high RPM.

1. 서 론

회전기에서의 성능을 평가를 하기 위하여서는 회전하는 상태에서 토크의 측정은 불가피하다. 가령 소형의 에어공구는 콜렛의 크기가 6mm 이하로써 끝

부분에 그라인더를 부착하여 금속 구조물의 마무리작업, 알루미늄 다이캐스팅, 프라스틱 구조물 등의 표면 가공뿐만 아니라 금속, 목재, 세라믹 등을 가공한 후 마무리 작업이나 광택을 내는데 사용되어진다. 또한 금속의 용접부위 표면 마무리 작업에도 적용되어지며 금속 단조물의 금형제작에도 적용되어진다. 그 외에도 경사면이 있는 바퀴나 돌출부위의 제거, 표면사상, 구조물의 외형성형 및 교정, 융합과 같은 정교한 마무리 작업 등 아주 다양하게 사용되어지는 공구이다. 또한

* 경상대학교 항공기부품기술연구센터(기계항공공학부)

** 경상대학교 대학원

책임저자 E-mail : sycho@gmsnu.ac.kr

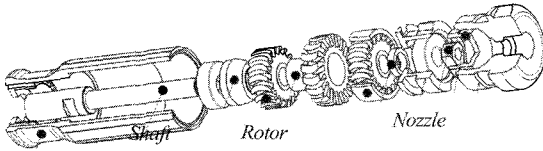


Fig. 1 Cut off view of small air tool grinder operating by two stage axial type turbine

상기의 가공뿐만 아니라 여러 분야에 다양하게 적용되어지기 위하여 필요에 따라서는 아주 작은 그라인더를 부착하여 사용하는데 소형이므로 가공에 필요한 선속도를 얻기 위하여 아주 높은 속도를 유지하여야 한다.

일반적으로 베인형식의 장치가 대부분 사용되고 있으나 높은 회전수에서 베인과 실린더의 미끄럼운동으로 접촉부에 마모와 열이 발생하여 베인의 파손을 야기하므로 최고속도를 40,000 RPM 정도로 제한하여야 한다. 그러나 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 비접촉식인 터빈형으로 변경하는 경우에는 100,000 RPM 까지 회전속도를 얻게되어 충분한 선속도를 얻게될 뿐만 아니라 또한 조립도 간단하다. 하지만 높은 속도의 영역에서 작동하므로 상대적으로 낮은 토크를 발생한다. 이와 같은 작동특성을 가진 에어공구의 성능을 평가하기 위하여서는 회전속도의 변화에 따른 토크를 측정하여야 하는데 현재 상용으로 판매되고 있는 다이아몬드에서는 100,000 RPM 급으로 회전하는 기계의 저토크를 측정하는 장치는 없다.

Holman⁽¹⁾은 토크 측정에 대한 일반적인 기술에 대하여 요약하여 놓았으며 그 동안 토크 측정에 대한 많은 연구가 있었으나, 최근에는 축변위에 따른 자장의 변화를 고려하여 토크측정의 정밀도를 높이는 연구를 Garshelis 등^(2,3)이 수행하였다. 하지만 이러한 자기탄성 토크계를 사용하는 경우 축의 직경이 자장의 변화를 감지할 수 있을 정도로 큰 경우이므로 가솔린엔진의 성능측정에 응용되며 측정속도는 4,000 RPM 정도이다. 그 외에도 Sobel 등⁽⁴⁾은 자기탄성 토크계를 이용하여 4실린더 엔진의 크랭크샤프트에서의 토크 측정에 활용하였으며 Zabler 등⁽⁵⁾은 비접촉식토크 측정방식을 10 Nm~60 Nm의 영역에 적용할 경우에 가압조립형이나 용접형에 높은 정밀도를 갖는 스트레인게이지를 사용하는 것이 좋은 결과를 보여준다는 것을 제시하였다. Fleming⁽⁶⁾은 비접촉식 토크계인 자기장을 이용하여 토크를 측정하는 여러방식에 대하여 비교 검토하였으며 Doebelin⁽⁷⁾은 토크 측정을 위한 장치에 대하여 전체적으로 잘 요약하여 놓았다. 특히

낮은 토크의 측정을 위하여 베어링의 손실을 감소하기 위하여 에어베어링을 사용할 수 있음을 보여주었다.

이상과 같이 토크측정에 대한 대부분의 연구가 저속이면서 고토오크를 발생하는 장치에서 토크측정에 관한 연구를 중점적으로 하였다. 따라서 본 연구에서처럼 80,000 RPM의 회전속도에서 5 N·mm 정도의 토크를 발생하는 회전장치의 경우에는 상용화된 제품으로는 직접적인 방법으로 토크를 측정하기는 어렵다. 그러므로 마찰방식의 토크 측정장치를 개발하여 측정된 결과와 감속기를 부착하여 상용화된 제품에서 측정되어진 결과와 비교하여 고속저토크 회전장치에서의 올바른 성능시험방법을 제시하고자 한다.

2. 토크 측정장치

2.1 토크 측정용부재

일반적인 토크 측정방법은 탄성의 부재에 스트레인게이지를 적절히 부착하여 탄성부재에서 발생하는 비틀림변형을 감지하여 측정한다. 원형의 축에 토크 T 가 가하여 졌을 때 최대의 전단응력은 표면에서 얻어지며 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$\tau_{max} = \frac{T r_o}{J} = \frac{G r_o \theta}{L} \quad (1)$$

r_o 는 원형축의 반경을 나타내며 J 는 원형축의 극관성모멘트를 의미한다. G 는 전단 모듈을 나타내며 θ 는 비틀림각도를 나타낸다. L 은 원형축의 길이를 의미한다. 순수비틀림을 받는 경우에는 수직응력 σ_x , σ_y , σ_z 는 존재하지 않으며 주 응력은 축방향을 중심으로 45°의 각도에서 발생되어진다. 따라서 원형축에 스트레인게이지를 원주방향으로 90°떨어진 위치에 축방향에 45°의 방향으로 교차되게 부착하면 두 스트레인에서 얻어지는 신호는 각각 반대를 보여주게 된다. 이러한 원리에 의하여 이 위치에 휘스톤 브릿지에 4액티브 스트레인게이지를 접착하여 브릿지 출력전압에 의하여 토크를 측정한다.

토크 측정에 사용되는 탄성부재는 원형부재가 가장 일반적으로 사용되나 굽힘하중이 작용하는 경우에 부정확한 결과를 얻게 되므로 굽힘강성이 큰 중공관축을 사용하기도 한다. 낮은 토크의 측정에는 십자형의 탄성부재를 사용하는데 비틀림하중에서 구석효과

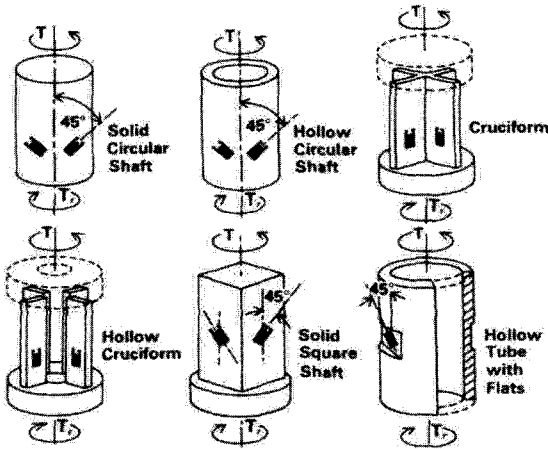


Fig. 2 Elastic bars for torque measurement⁽⁸⁾

(fillet effect)를 피하기 위하여 중심부를 없앤 중공십자형을 사용하기도 한다. 그 외에도 큰 토크의 측정을 위하여서는 사각형의 탄성부재를 사용하기도 하고 스트레인의 부착을 위하여 중공관의 탄성부재 측면을 편편하게 가공한 부재가 사용되어지기도 한다. Fig. 2는 각각의 부재에 대하여 보여주고 있다.

2.2 회전형 토크미터

회전하는 장치에서 토크를 측정하기 위하여서는 회전하는 부재에 단단하게 부착된 슬립링을 일반적으로 사용한다. 슬립링의 경우는 미끄럼 접촉으로 접촉저항의 변화는 신호저하와 잡음을 발생하므로 주기적인 유지보수를 하여야 한다. 비접촉의 방식으로는 회전형 트랜스방식을 많이 사용하며 입력전압을 원형 실린더형 변압기를 통하여 전달하며 반대로 출력신호도 같은 방식으로 받는다. 그 외에도 축에서의 자기장의 변화를 감지하여 측정하는 자기탄성 토크계가 사용되기도 하며 축에 두 개의 광선을 조사하여 토크에 따라 축에 발생하는 비틀림을 광선의 상 (phase)전이를 이용하여 측정하는 광센서방식이 사용되기도 한다. 또한 원격계측시에는 무선주파수방식이 사용되며 적외선방식 등도 사용된다.

2.3 제동장치

회전속도의 변화에 따른 회전장치의 토크를 측정하기 위하여서는 회전속도를 제어하는 장치가 필요하다. 또한 회전장치의 축동력은 각속도와 토크로 부

터 얻을 수 있다.

$$P = \omega T \quad (2)$$

축동력 (P : Watts)는 각속도 (ω : rad/s)를 알아야 하므로 회전속도를 동시에 측정하여야 한다. 역사적으로 가장 오래된 제동장치로는 프로니 브레이크가 있다. 이 프로니 브레이크는 회전하는 구동축을 원주방향으로 목재블록으로 조여서 제동력을 가하고 압에 가하여진 힘으로 토크를 측정하였다. 이러한 형식을 흡수식방식이라고 하며 이것과는 달리 구동축의 정지부분을 움직이지 않도록 하는데 필요한 반동토크를 이용하여 토크를 측정하는 방식을 요람형방식이라고 한다. 일반적으로 제동장치의 방식에 따라 동력계를 분류하는데 가장 많이 사용되는 와전류형 제동장치는 구동축에 연결된 회전편에 와전류를 발생하여 제어되도록 한다. 따라서 발생된 와전류는 열에너지로 변환되므로 냉각장치를 필요하다. 자기분말제어장치는 자장을 발생하여 분말을 부착하여 회전력을 제어하는 방식으로 주기적인 분말의 보충이 필요하다. 물브레이크형식은 구동축의 에너지를 유체마찰에 의하여 에너지를 소모하는 방식으로 고속회전에 유리하다. 교류 및 직류발전형은 구동축을 발전기와 연결하여 발생된 에너지를 다른장치에 사용하여 에너지를 흡수하며 발전장치의 반동토크를 측정하여 구동축의 출력을 측정한다. 그 외에도 팬을 부착하여 제어하는 방식 등 다양한 방법이 적용되고 있다.

구동축 회전속도를 제어하는 장치로서 일반적으로 많이 사용되어지는 것이 비접촉식의 장치이다. 하지만 비접촉식의 장치에서는 토크 측정을 구동축 지지부에서의 반동력을 이용하여 측정하기 때문에 구동축을 제어하기 위한 장치와의 연결이 필수적이다. 이러한 다른 장치와의 연결은 구동축에서 발생하는 회전토크가 충분한 경우에는 제어장치로서 부가된 질량을 무시할 수 있지만 낮은 토크를 발생하는 경우에는 부가된 질량으로 인하여 관성력이 증가하여 정확한 토크를 측정할 수 없게 된다.

2.4 실험장치

현재 상용으로 적용되어지고 있는 저토크의 측정장치로는 Lebow⁽⁸⁾의 제품에서 가장 저토크를 측정할 수 있는 슬립링 타입인 경우가 $70 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 이며 최

Table 1 Degree of accuracy and models for experimental apparatus

Measuring equipment	Models	Accuracy
Flowmeter	HFM201 Hastings Instruments	Less than 0.5% @%FS 0~200 L/min air
Loadcell	34/1944-07 Sensotec	±0.02% Max. 250 gf
RPM gauge	ACT-3 Monarch	±0.0015% Max. 100,000 RPM
Pressure gauge	811 FMG Sensotec	Less than 0.25% @% FS 150 psi gauge
DAQ	NI 6014	200kS/s

고 측정가능한 회전수는 20,000 RPM이다. 회전트렌스포머형의 경우는 350 N·mm이며 마찬가지로 최고 측정 회전수는 20,000 RPM이다. 따라서 본 연구에서 측정하고자 하는 에어공구에서 발생되어지는 최고 토크는 30 N·mm의 영역이며 무부하에서의 회전수는 100,000 RPM이 된다. 따라서 본 연구에 적용되는 에어공구의 경우는 상용으로 판매되는 토크센서로는 직접적인 측정이 불가능함을 알 수 있다. 또 다른 상용 메이커로 동력계를 판매하는 Magatrol⁽⁹⁾사의 제품에도 측정 가능한 속도는 30,000 RPM으로 한정되어있다. 따라서 이를 사용하여 측정하기 위하여서는 입력되는 속도를 감속하여야 한다. 상용제품을 사용하여 측정하기 위하여서는 에어공구의 구동축과 동력계의 입력축 사이에 감속기를 삽입하여 측정하였다.

알철의 제동장치에서 언급한 것처럼 본 연구에서는 저 토크를 측정하기 위하여 구동축에 추가적인 질량을 부가하지 않았다. 따라서 구동축과 토크 측정부분은 직접적인 마찰방식에 의하여 제어된다. 접촉부에서 마찰에 따른 진동의 영향을 최소화하기 위하여 접촉부의 형상을 원추형으로 제작하였으며 접촉부가 가능한 선접촉이 될 수 있도록 하였다. 원추형의 형상은 구동축과의 동심도와 직진도를 쉽게 맞출 수 있는 장점이 있다. 접촉부는 접촉시간에 따라 마모되어져 진동이 발생되어지지 않도록 연마한 후 침탄처리를 하여 충분한 강도를 갖도록 하였다.

마찰식 제동장치의 축에는 두개의 볼베어링을 사용하여 지지하여 회전방향으로의 손실이 최소가 되도록 하였으며 이 볼베어링의 하우징은 외부의 고정장치에 의하여 지지하였다. 에어공구의 지지대는 3축 트래버스에 의하여 위치의 정밀제어가 가능하도록 하였으며

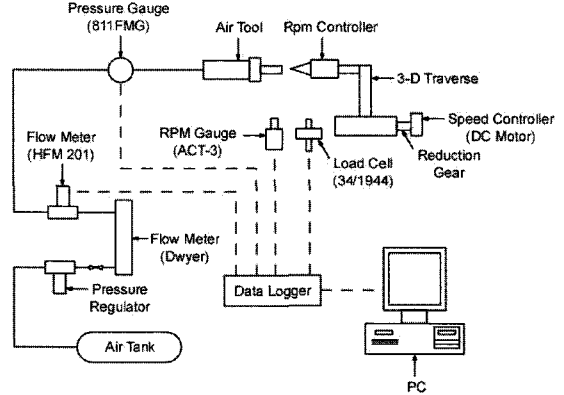


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

마찰력에 따른 회전속도의 정밀제어를 위하여 속도조절 DC모터에 감속기를 부착하여 마찰방향의 속도를 조절하였다. 접촉부의 외형은 연마에 의한 정밀가공을 하여 축의 중심에서 반경의 오차를 최소화하였으며 반경은 8.75 mm로 제작하였다. 이 외주면에 육각구멍불이 멈춤나사를 양쪽 대칭으로 삽입하여 무게의 균형이 유지되도록 하였으며 이 육각 멈춤나사에 유연한 와이어나 실을 연결하였다. 이것에 로드셀이 연결되어 수직으로 가하여 지는 힘을 측정하였으며 얻어진 수직력으로부터 토크를 측정하였다. Fig. 3는 마찰식 측정장치의 개략도를 보여주고 있다. Table 1은 계측에 사용된 장비들의 특성을 보여주고 있다.

3. 결과 및 검토

반복실험을 통하여 측정되어진 작동력의 선도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5는 동시에 측정되어진 RPM선도로써 작동력과 회전수와의 관계를 보여주고있다. 작동력은 회전수가 감소하면서 점차적으로 증대하였다가 낮은 회전수에서 최고의 작동력을 나타내었다. 하지만 로터가 멈추게 되더라도 130gr의 일정한 작동력을 나타내었다. 이는 로터가 축류형이므로 로터의 회전이 없더라도 블레이드에 작용하는 공기력에 의하여 일정한 힘이 얻어지기 때문이다.

시간에 따라 얻어진 결과를 RPM의 변화에 대하여 작동력이 어떻게 변화하는지는 Fig. 6에서 보여주고 있다. 실제 무부하에서의 회전수는 100,000RPM 이상이므로 말미암아 100,000RPM에서 측정된 작동력이 무부하 상태가 아님을 알 수 있다. 이는 측정에 사용된 회전계의 측정범위의 최고회전수가 100,000RPM이기

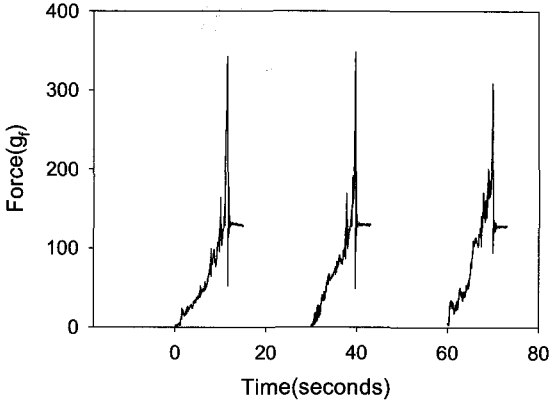


Fig. 4 Variations in operating force on the rotor by controlling the contacting force

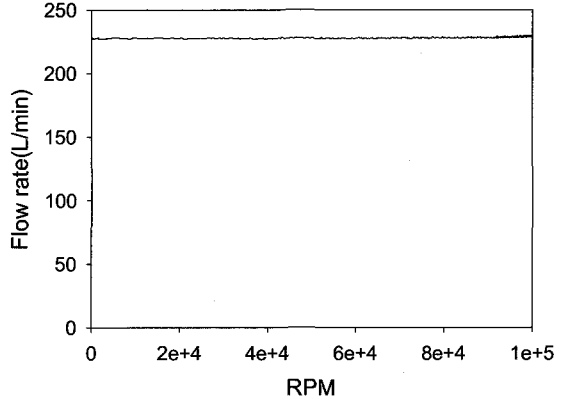


Fig. 7 Variations in flow rate with rotor RPM

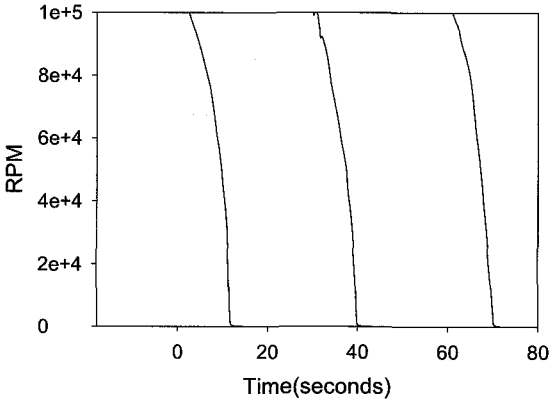


Fig. 5 Variations in RPM on the rotor by controlling the contacting force

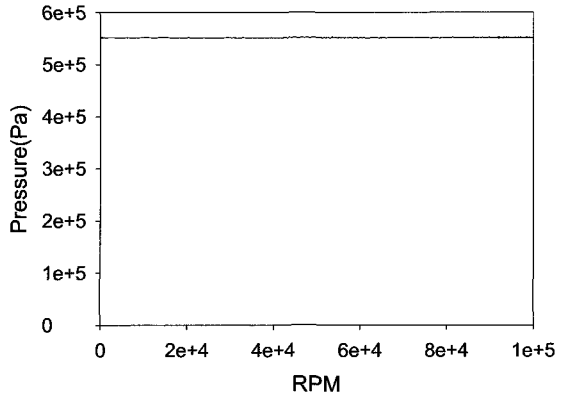


Fig. 8 Variations in inlet static pressure with rotor RPM

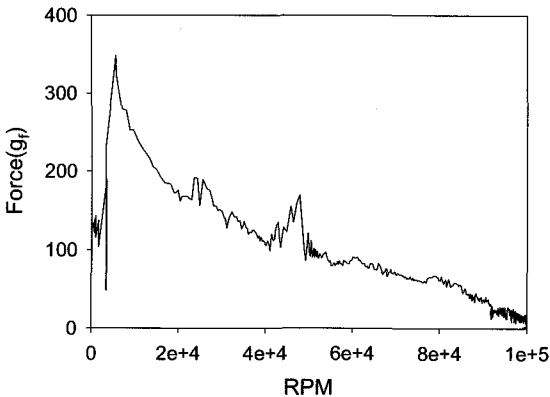


Fig. 6 Variations in operating force with rotor RPM

때문에 발생하였으나 100,000RPM 이하에서는 정확한 결과를 나타내었다. 회전수의 감소와 함께 작동력은 점차적으로 증가함을 보여주고 있으며 회전이 멈춘 상

태에서도 130gf의 작동력이 발생됨을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 실제작동에 소모되어지는 공기량과 입구에서의 전압력을 동시에 측정된 결과이다. 압력은 게이지압력으로 나타내었다. 그림에서 보여주는 것과 같이 압력과 공기량은 회전수의 변화에 민감하지 않음을 보여주고 있다. 이러한 것은 에어공구에서는 고압공기를 터빈로터에 부분분사하여 작동하기 때문이다. 또한 내부유로는 회전속도와 무관하게 일정한 공기를 팽창할 수 있는 충분한 공간이 있으며 압력은 에어공구 입구에서 조정하기에 따라서 결정되어지기 때문이다. 따라서 공기에 의하여 작동하는 공구의 성능은 공기량과 입구압력보다는 작동력에 의하여 상당히 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 9의 토크 곡선은 Fig. 4의 작동력의 곡선으로부터 실제 작동력이 작용하는 반경 (8.75mm)을 곱하여 얻어진 결과이다. 그림에서 상용으로 판매되어지는 다이내모미터에 의하여 측정되어진 결과와 비교되어져

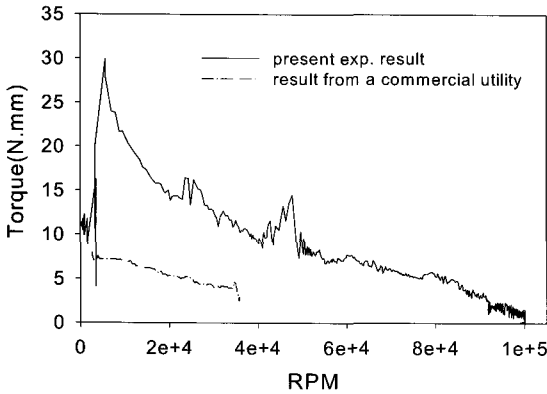


Fig. 9 Comparison with torques obtained on a commercial dynamometer

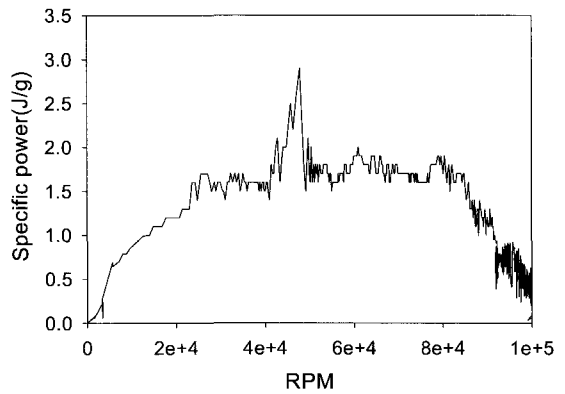


Fig. 11 Variations in specific power with rotor RPM

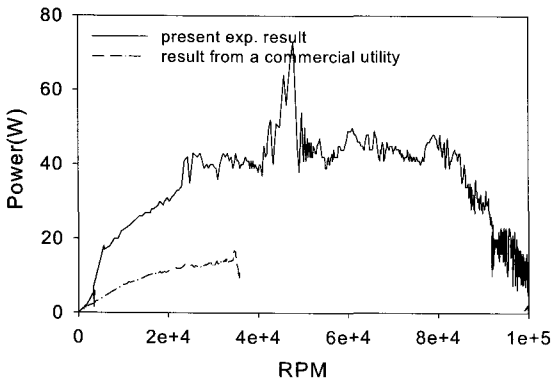


Fig. 10 Comparison with output powers obtained on a commercial dynamometer

있다. 회전수의 변화에 따른 토크전도의 변화는 회전수의 감소에 따라 증가하는 동일한 경향을 보여주고 있지만 그 크기가 매우 낮게 나타났다. 그 이유는 상용으로 판매되어지는 장치의 경우에는 제어시스템이 히스테리시스 모터를 적용하였으므로 로터에 추가적인 질량이 포함되었기 때문이다. 따라서 이 질량에 의하여 발생된 관성저항을 충분히 넘어야만 회전이 시작되므로 실제 작동되어진 회전수는 40,000 RPM 이하에서 시작되어졌다. 또한 관성력보다 높은 토크를 가지게 되는 영역에 도달하게 되면 갑작스런 동작을 하게 된다. 따라서 제동장치에 의한 관성력으로 인하여 실제 작동되어지고 있는 40,000 RPM 이상의 회전영역에서는 영향을 파악할 수 없게 된다. 그리고 히스테리시스형의 제동장치는 회전력에 따라 제동력이 발생되어지므로 충분히 낮은 회전수에서는 제동력이 발생되어지지 않으므로 충분히 낮은 회전수의 영역에서도 성능을 파악 할 수 없는 문제를 가지고 있다.

Fig. 10은 로터의 회전수 변화에 따른 출력의 변화를 보여주고 있다. Fig. 9와 같이 상용으로 판매되어지는 다이내모미터⁹⁾에서 측정된 결과와 비교되어져 있다. 그림에서 보여주는 것과 같이 출력이 같은 회전수에서도 55%정도 감소되어진 결과를 보여주고 있다. 상용으로 판매되어지는 다이내모미터에서는 실제 작동가능한 회전수를 넘지 않도록 하기 위하여 다이내모미터 측과의 연결부를 감속비가 16인 감속기를 부착하여 연결하였다. 따라서 토크와 출력의 관계는 아래의 식으로 얻어졌다.

$$T = \frac{97.4 * P(Hp) * 750 * 9.8 * 10}{RPM * 16} \quad (3)$$

마찰형으로 측정된 출력의 결과로부터 20,000~80,000 RPM의 영역에서 출력의 차이가 없음을 알 수 있으나 상용의 장치에서 측정된 결과로는 이러한 결과를 알 수 없고 단지 아주 낮은 회전속도 영역의 결과만 확인할 수 있다. 하지만 얻어진 결과에서도 제동장치에서 추가된 질량으로 실제 에어공구에서 얻어지는 출력보다도 상당히 낮은 값을 보여주고 있다. 또한 회전속도를 장치의 한계속도에 맞추기 위하여 사용된 감속기에서 발생되어지는 손실도 상당히 크게 작용하였음을 알 수 있다. 따라서 낮은 토크의 측정은 마찰식이 보다 정확한 결과를 보여줄 수 있다.

Fig. 11은 단위공기유량당 출력을 나타내고 있다. 출력을 소모유량의 비로 나타내었으나 실제 작동상에서 유량이 회전속도와 무관하게 소모되어지기 때문에 비출력의 선도는 출력의 선도와 차이를 보이지는 않는다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 에어공구의 작동이 부분분사에 의하여 작동되어지기에 이러한 결과를 얻

게 되었으나, 비출력 선도는 실제 장치의 성능에 대한 정확한 정보를 제공한다. 그림에서 보여주는 것과 같이 20,000~80,000 RPM 영역에서 비출력이 높은 것을 알 수 있다. 이러한 것은 실제 비접촉식 에어공구의 작동 영역이 이 회전속도의 영역에서 작동하므로 에어공구의 설계가 상당히 잘 되었다고 판단되어진다.

4. 결론

부분분사되어지는 에어공구가 높은 회전속도에서 낮은 토오크를 발생하면서 작동하는 경우에 대한 성능 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고속에서 회전하며 저토크를 발생하는 회전장치의 성능은 히스테리시스형의 제동장치를 사용하게 되면 이 제동장치가 로터에 추가적인 질량을 가하게 되어 정확한 성능을 나타내지 못하게 된다. 따라서 질량을 추가하지 않는 마찰형의 제동장치를 적용하여야 한다.
- 2) 히스테리시스형의 제동장치는 마찰형 제동장치에 비하여 출력이 55% 감소된 결과를 보여 주었으며 회전수는 40,000 RPM 부터 작동되는 결과를 나타내었다.
- 3) 본 연구에 사용된 축류형 터빈의 에어공구의 경우는 넓은 영역에서 작동하여야 하는데 20,000~80,000 RPM 에서 균등한 비출력을 나타내었으므로 에어공구에 적용된 축류형터빈은 높은 적용성을 보여주었다.

후 기

본 연구는 BK21과 항공기부품기술연구센터의 지원

에 의하여 수행된 결과입니다.

참고문헌

- (1) Holman, J. P., 1994, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, pp. 440~443.
- (2) Garshelis, I. J., Christopher, R. C. and Fiegel, W. S., 1995, "A Single Transducer for Non-Contact Measurement of the Power, Torque and Speed of Rotating Shaft," SAE 950536.
- (3) Garshelis, I. J., Aleksonis, J. A., Jones. C. A. and Rotay, R. M., 1997, "Development of a Magnetoelastic Torque Transducer for Automotive Transmission Application," SAE 970605.
- (4) Sobel, J. R., Jeremiasson, J., Wallin, C., 1996, "Instantaneous Crankshaft Torque Measurement in Cars," SAE960040.
- (5) Zabler, E., Heintz, F., Dukart, A. and Krott, P., 1994, "A non Contact Strain Gage Torque Sensor for Automotive Servo Driven Steering Systems," SAE940629.
- (6) Fleming, W. J., 1991, "Computer-Model Simulation Results for Three magnetostrictive Torque Sensor Designs," SAE910857.
- (7) Doebelin, E. O., 1992, *Measurement Systems*, McCraw-Hill Publishing Company, pp.410~433.
- (8) Lebow, 1998, *Load Cell and Torque Sensor Handbook No. 710B*, Lebow Products, Troy, Michigan, USA.
- (9) Magtrol, 2000, *Torque-Speed-Power*, catalogue, Buffalo, New York, USA.