非円形静圧空気ジャーナル軸受の安定特性に関する研究*

金 敬 雄^{*1}, 金 錦模^{*2}A Study on Stability Characteristics of Externally Pressurized
Noncircular Air-Lubricated Journal Bearings

Kyung-Woong Kim and Keum-Mo Kim

An experimental study is performed for investigating the threshold of whirl instability of the rigid rotor supported by two externally pressurized air-lubricated journal bearings. Three types of bearings, that is, 3-lobe, 4-lobe and circular bearings, of 40 mm diameter and 40 mm length are tested. The rotor rotates horizontally and air supply pressure varies from 0.098 MPa to 0.49 MPa. The effect of supply pressure and radial load, which is applied to the rotor by means of an electromagnet, from 8.1 N to 32.6 N with constant rotor mass on the threshold of whirl instability are discussed. It is shown that the noncircular bearing is effective for the prevention of whirl instability.

Key Words: Whirl Instability, Noncircular Bearing, Air Bearing, Externally Pressurized Bearings

1. 序 論

空気ジャーナル軸受で支持された回転軸は、潤滑剤である空気の粘度が小さいので、発熱や摩擦損失が小さく、高速回転時の性能が優れている。しかし、空気軸受で支持された軸が高速で回転するときには、危険速度の2倍以上の回転速度でホワールと呼ばれる不安定なふれまわり現象が発生する。これは軸の回転に伴って軸受すきま内に発生する空気膜力に基づく自励振動であり、共振現象とは異なって、回転速度が増加しても振動が減衰せず、ホワールが発生すると、多くの場合軸と軸受が直接接触し軸受系の破壊につながる。したがって、空気軸受を用いた高性能高速回転機器の開発においては、ホワールの発生防止が非常に重要な課題となる。

一方、油潤滑の軸受においても類似の自励振動が発生するが、この場合には、適当な形状の非真円軸受を使用することによって、ふれまわり発生速度を高めることができることがよく知られており、実用にも供さ

れている。また Pinkus⁽¹⁾は、動圧空気軸受の空気膜のばね係数および減衰力を計算し、動圧空気軸受の場合には多円弧軸受が真円軸受よりも安定であることを示している。静圧空気軸受では、低速回転時には動圧の効果は小さいが、高速回転時には動圧の効果も大きくなり、これがホワール発生の原因となっていると考えられるので、静圧空気軸受の場合にも非真円軸受がホワール抑制に有効であることが期待できる。

静圧空気軸受におけるホワール抑制の工夫としては、軸受ブッシュを弾性支持する方法、浮動ブッシュ軸受を用いる方法⁽²⁾などが提示されているが、非真円軸受を用いる方法に関する研究は見当たらないようである。本研究では、非真円静圧空気ジャーナル軸受がホワール抑制にどのような効果を持つかについて実験的に検討する。

2. 実験装置および実験手順

実験装置の概略を図1に示す。一対の試験軸受1で支持された軸2は、軸の中央部分の空気タービン5により駆動され、軸の振動は軸の両端にそれぞれ2個ずつ垂直に設置された変位計3により測定される。軸の直径は39.85 mm、長さは190 mmで、中央部には空気タービン用の溝を16箇所ミーリングカットにより

* 昭和62年11月28日 関西支部第247回講演会において講演、原稿受付 昭和62年2月25日。

^{*1} 正員、韓国科学技術院（韓国ソウル特別市東大門区清涼里洞207-43）。

^{*2} 大宇電子(株)（韓国仁川直轄市北区佳佐洞541-57）。

加工してある。また軸には電磁石 4 により荷重が加えられるようになっており、軸の質量を変えずに軸受荷重を変えることができるようになっていいる。また 6 は自成絞り単一給気孔を持つ円板形静圧スラスト軸受である。

試験軸受としては、真円、3 円弧、4 円弧軸受の 3 種類を用意し、軸受すきま比(多円弧軸受では、同心状態での最小すきまを基準とする)は順に 4.5×10^{-3} 、 4.6×10^{-3} 、 4.7×10^{-3} であり、幅径比はすべて 1 である。3 円弧、4 円弧軸受の製作には弾性変形を利用した。すなわち、まず内径がやや小さめの真円円筒を製作し、三つ爪あるいは四つ爪チャックに取付けた後適当な弾性変形を生じる程度に強くはさみつける。その状態でさらに内径を円形に加工した後にチャックから取りはずすと、スプリングバック現象により多円弧軸受ができあがる。図 2 は、このようにして製作した多円弧軸受の真円度測定結果の例である。図 2 からわかるように、製作方法との関係より、本研究で用いた軸受はいわゆる通常の多円弧軸受ではなく sinusoidal-lobe 軸受である。試験軸受の給気様式は自成絞り形の単列孔給気で、給気孔の直径は 0.4 mm、給気孔の数は真円軸受と 4 円弧軸受では 8 個、3 円弧軸受では 6 個である。図 3 は、3 円弧軸受および 4 円弧軸受の給気孔の位置と荷重 (W) 方向を示したもので、真円軸受の場合は 4 円弧軸受と同じである。

実験は次の手順で行う。軸受給気孔に加圧空気を供給して軸を浮上させた後、変位計の出力をデータレコーダに収録すると同時にオシロスコープで観察しながら、空気タービンにより軸の回転速度を徐々に増加させ、危険速度を過ぎホワールが発生したところで、空気タービンへの空気の供給を停止する。給気圧力、荷重、軸受形状を変えて、上記の実験を繰り返す。

図 1 実験装置

3. 実験結果および考察

図 4 は、回転速度によって軸の振動の振幅が変化するように表すグラフの一例である。空気タービンに空気を供給し軸の回転速度を上げていくと、不釣合いによる加振力のため、軸は静的平衡点のまわりを回転速度に同期した旋回振動を行う。その振幅は初め的小さく、回転速度が危険速度に近づくと急速に大きくなるが、危険速度を過ぎるとまたすぐに小さくなった。さらに回転速度を増していくと、ある回転速度でホワールが発生した。その時点でタービンへの空気の供給を止めると、回転速度は徐々に小さくなり始めるが振幅はすぐには小さくならず、ホワールが発生した回転速度よりも低い回転速度までホワールの成分が持続する現象が観察された。

図 5(a)~(c) は、安定限界付近での軸の振動を周波数分析して得られたパワースペクトルの例である。例えば図 5(a)において、378 Hz の振動成分は回転速

図 2 多円弧軸受の真円度測定結果

図 3 給気孔の位置および荷重方向

図 4 軸振動の振幅特性

図 5 軸振動の周波数分析結果

表 1 ホワール開始時のモード

P_s (MPa)	0.098	0.15	0.20	0.25	0.29	0.39	0.49
W (N)							
3.2	●				CY		
	▲				CY		
	■				CY		
8.1	●	CY			CY	CY	CY
	▲	CO			CO	CO	CO
	■	CY			CY	CY	CY
13.0	●				CY		
	▲				CO		
	■				CO		
17.9	●	CY			CY	CY	CY
	▲	CO			CO	CO	CO
	■				CO	CO	CO
					CO		
					CO		
27.7	●	CY	CO	CO	CO	CO	CO
	▲		CO	CO	CO	CO	CO
	■		CO	CO	CO	CO	CO
32.6	●		CY	CO	CO	CO	CO

Type of bearing: ● circular, ▲ 3-lobe, ■ 4-lobe
 CO : conical mode, CY : cylindrical mode

図 6 ホワール開始速度の変化

度に同期した不釣り合い振動成分で、104 Hz のがホワールによる振動成分である。安定限界付近では、ホワールが発生して振幅が大きくなる前に、狭い回転速度範囲ではあるが、ホワールによる振動成分が現れたり消滅したりする領域があり、ホワールによる振動成分が初めて現れるときを安定限界とするのは適切ではない。ホワールの発生する回転速度を決定する基準は必ずしも明確ではないが、本研究ではホワールによる振動成分のパワースペクトルの大きさが不釣り合い振動成分のパワースペクトルの大きさの 1/2 程度になるときをホワール発生時期とした。このときの振幅は、ホワールが発生する前の約 1.5 倍であり、ここで回転速度を一定に保つと、ホワールによる振動成分は成長も消滅もせずそのままの状態維持され、回転速度をわずかに大きくするだけでホワールが急激に成長する。

図 5(b), (c) ではホワールによる振動成分が二つ現れているが、これらのうち周波数の小さいほうの振動モードは平行モードで、周波数の大きいほうのは円すいモードである。二つのホワールの成分のうち、パワーの小さいほうは、回転速度が大きくなるにつれて次第に小さくなり、パワーの大きいほうの成分はまず

まず大きくなって振幅の大きなホワールへと発達する。表 1 は、ホワールが発達したときのモードを表す。本実験では、運転条件によって平行モードとなる場合もあれば円すいモードとなる場合もあり、軽荷重のときは平行モード、高荷重のときは円すいモードとなる傾向はあるが、給気圧力などにも関係がありはっきりとした特徴は見られない。

図 6 は、ホワール発生時の軸の回転速度（ホワール開始速度）と給気圧力との関係を、軸受荷重をパラメータとして真円、3 円弧、4 円弧の各軸受について表したものである。各軸受ともに、荷重が小さいときは、給気圧力につれてホワール開始速度が大きくなるが、荷重が大きくなると、給気圧力の増加につれて、ホワール開始速度は初めは小さくなりその後大きくなり始める傾向がある。また、ホワール開始速度が大きくなり始める給気圧力は、荷重が大きいほど大きい。荷重の変化によるホワール開始速度については、荷重が大きいほどホワール開始速度も大きくなっている。真円軸受と多円弧軸受とを比べると、高荷重、低給気圧力のときほど（軸受内の空気膜圧力のうち動圧の占める割合が大きくなるほど）多円弧軸受のホワール開始速度が大きくなっている。

図 7 危険速度の変化

図 8 周波数比の変化

ホワールに関する安定性を議論するにあい、ホワール開始速度とホワール速度との比（ホワール比）あるいは、ホワール開始速度と危険速度との比（周波数比）が用いられることが多く、軸と軸受とが同心状態では、ホワール比と周波数比とはほぼ一致する。本実験では、運転条件によっては比回転時の偏心率が0.9を超す場合もあるので、以下ではホワール比と周波数比の両方について考察する。図7は、危険速度と給気圧力との関係を、軸受荷重をパラメータとして各軸受について表したものである。軸受の形状によらず危険速度は給気圧力が高いほど大きく、4円弧軸受で荷重が17.9 Nの場合を除いて荷重が大きいほど危険速度も大きい。また、荷重や給気圧力によらず真円軸受の場合の危険速度が、多円弧軸受の場合のそれよりも大きくなっている。給気圧力および荷重が大きい場合に危険速度が大きくなるのは、静圧および動圧による空気膜の剛性係数の増加のためであると考えられる。

図8は、周波数比と給気圧力との関係を各軸受につ

図 9 ホワール比の変化

いて表したものである。周波数比は、危険速度よりも高い回転速度で運転される場合の安定な回転速度領域の広さを表すものと考えられるが、多円弧軸受のほうが真円軸受の場合よりも周波数比が大きくなっており、多円弧軸受のうちでは、荷重が小さいときには3円弧軸受のほうが、荷重が大きいときには4円弧軸受のほうが大きくなっている。また、軸受の形状によらず荷重が大きいほど周波数比が大きい。

図9は、ホワール比と給気圧力との関係を表したものである。本実験では、運転条件によってホワール比と周波数比にかなりの差が現れており、特に高荷重、低給気圧力のときにその差が著しい。また、周波数比と同じくホワール比も、真円軸受よりも多円弧軸受の場合のほうが大きくなっている。

4. 結 論

非真円静圧空気ジャーナル軸受のホワール安定性について、軸受荷重、給気圧力などを変化させながら実験的に検討した結果、次のことが明らかとなった。

(1) 多円弧軸受の場合は真円軸受と比べて、荷重および給気圧力によらず、危険速度は小さく、周波数比は大きくなる。

(2) 高荷重、低給気圧力のときほど、多円弧軸受のホワール開始速度が真円軸受のそれに比べて大きくなる。

(3) したがって、静圧空気ジャーナル軸受の場合にも多円弧軸受を用いることによって真円軸受よりもホワールに対する安定性を向上させることができる。

(4) ホワール発生時には、ホワールによる振動成分に平行モードおよび円すいモードの両方が混在するときもあるが、ホワールが発達すると、運転条件によってそのうちのどちらか一方のみが発達する。

文 献

- (1) Pinkus, O., *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, **97**-4
(1975), 616.
- (2) Inoue, H., Shimotsuma, Y., Sasaki, A. and Takagi, S.,
Proc. JSLE Int. Trib. Conf., (1985), 755.
-