

回轉機械의 振動原因 및 現象

—壓縮機, 터어빈/發電機를 中心으로—

朴 寧 弼

延世大學校 機械工學科 教授



• 1948年 4月 17日生
• 彈性構造物의 安定性 및 振動制御를 專攻하고 미사일이나 로켓등의 動的 安定性, 振動의 能動制御, 로봇이나 高速用 압축기의 振動解析 등에 관심을 가지고 있다.

李 相 朝

延世大學校 機械工學科 教授



• 1953年 9月 6日生
• 加工力學 및 工作機械 動力學을 專攻하고 切削加工 狀態의 온라인 모니터링 信號處理 및 設備診斷, 로봇應用 및 自動化 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

回轉機械의 大型化, 高度化 및 輕量化에 따라 機械의 安全한 運轉과 信賴性의 確保가 必須條件이 되며 이를 위해 回轉機械의 設計·製作, 運用 및 管理에 있어서 세심한 配慮를 必要로 한다.

그러나 이러한 注意에도 不拘하고 現場의 回轉機械에서는 運行中 잦은 故障 및 大型事故 등이 頻繁하게 있으므로 이들 回轉機械의 振動原因 및 現象을 根本적으로 檢討하여 이를 事故의 原因糾明 및 防止對策을 樹立하는 것이 切實한 實情이다.

回轉機械의 運營, 保全管理에 있어서 從來에는 異常이나 故障이 發生된 後 이를 發見, 測定, 調査 및 分析하여 原因을 糾明함으로써 機械나 設備의 稼動率의 低下등 經濟的인 損失 및 機械 運用計劃上의 많은 蹉跌을 招來하고 있다. 또한 運行時間이나 作動狀況 등을 基準으로 한 定期的인 檢査 및 補修를 위해 機械의 分解, 點檢 및 組立을 實施하는 方法도 施行되고 있으나 때에 따라서는 이와 같은 定期的인 診斷方法은 過

多經費의 支出 및 不必要한 機械의 分解 및 組立으로 인한 故障率의 增加를 招來하는 境遇도 發生하게 된다.

最近에는 高速의 데이터 處理能力을 가진 미니컴퓨터의 急速한 發達과 補給에 따라 많은 量의 情報의 蒐集 및 分析이 容易해짐에 따라 機械의 現狀態를 基準으로 하여 運用하는 狀態基準 補修概念을 導入하여 回轉機械에 發生될 수 있는 事故의 未然防止, 異常의 早期發見 및 迅速한 異常의 處置 등이 可能하게 되었다. 이를 土臺로 回轉機械의 補修技術 및 保全業務의 自動化를 目標로 한 研究의 必要性이 增大되고 있다.

本稿에서는 回轉機械의 各種 振動의 諸般事項에 對해 原因을 綜合적으로 分析함으로써 次後 回轉機械의 故障診斷을 爲한 異常診斷專門 시스템(expert system for fault diagnosis)의 開發을 위한 基礎資料를 提示하려 한다.

2. 振動의 原因 및 現象

(1) 不平衡振動

回轉機械의 로우터系의 不平衡力에 依한 振動

現象으로서

- 로우터의 中心과 重心의 不一致
- 터빈의 경우 로우터의 不均一 加熱로 인한 熱的 휨(thermal bow)
- 로우터의 整列(alignment)의 變化
- 로우터部材의 損失 및 破壞
- 커플링의 어긋남

등이 그 主된 原因으로 나타난다. 여기서 나타나는 振動現象의 特徵 및 內容으로는

- 1回轉當 1回의 強制力의 發生
- 一定回轉條件下 振動位相이 安定
- 圓形과 前往形(circular and forward)의 振動軌道

등을 들 수 있다.

(2) 오일 휨(whip)과 휨(whirl)

回轉機械에 供給되는 오일系統의 不適切로 인해 發生되는 振動現象으로서 오일 휨의 境遇 發生原因으로서

- 베어링 型式의 不適合
- 給油條件의 不足
- 로우터 整列의 變化에 의한 面壓의 變化

등이 있으며

- 軸變位와 油膜의 復原力 方向의 不一致에 의한 휨 토크(whirl torque)의 發生
- 로우터系의 危險速度의 2倍 以上에서의 發生
- 圓形 및 前後進의 振動軌道

등을 特徵으로 갖으며 오일 휨의 경우에 있어서는 輕動荷重(light dynamic load), 豫荷重(pre-load) 및 오일의 性質, 間隙(clearance), 表面速度 및 로우터의 초기처짐등에 의한 오일의 흐름 썩기現象(flowing wedge)이 振動의 主된 原因이 되며 振動現象의 特徵은

- 回轉機械의 約 40~45%로 發生
- 圓形의 前進 振動形

을 들 수 있다.

上記한 바와 같이 오일 휨이나 휨 現象은 軸의 初期처짐이 있는 경우에 發生하며 不平衡力과 같은 重荷重의 境遇에 있어서는 通常 發生하지 않는다.

一般的으로 오일 휨의 크기가 定常狀態의 베어링 間隙의 約 50%를 超過할 때는 修理나 補修의 措置가 必要하다.

(3) 摩擦에 의한 振動

이 振動現象은 主로 嵌合部(fitting part) 및 回轉軸의 內部摩擦에 의한 復元力과 變位의 方向이 不一致하여 휨 토크가 發生됨으로써 일어나는 內部摩擦에 의한 휨(혹은 材料의 히스테리시스 휨)現象과 接觸時 發生되는 摩擦에 의한 反回轉方向의 모우멘트가 發生됨으로써 일어나는 乾性摩擦에 의한 휨(혹은 摩擦 휨)의 現象으로 나타나며 그 主된 原因은 內部摩擦의 경우

- 嵌合部의 슬립(slip)
- 로우터 材料內部的 摩擦

이 있으며 乾性摩擦의 境遇에 있어서는

- 回轉部와 靜止部の 接觸 등에 原因이 있다. 振動現象의 特徵으로서는 內部摩擦의 경우
- 危險速度 以上の 回轉領域에서 發生可能
- 圓形, 前進 혹은 後進의 振動軌道
- 乾性摩擦의 境遇는
- 危險速度 以下の 抵速에서 發生可能
- 回轉과 反對方向의 振動軌道를 갖는다.

(4) 流體力의 不平衡에 의한 蒸氣 휨(steam whirl)

蒸氣터빈의 경우 發生되는 振動現象으로서 라비린스 시일(labyrinth seals) 內의 主方向壓力의 不均一이나 로우터 偏心에 의한 翼末端的의 시일 內部蒸氣力의 主方向 不均一에 主原因이 있으며 이는 高出力의 高壓터빈에 高負荷가 걸릴 때 發生된다. 또한 오일 휨을 防止하기 위해 傾斜 패드 베어링(tilting pad bearing)을 使用할 때 發生하는 性質이 있다.

振動現象의 特徵으로서는

- 危險速度 2倍 以上の 回轉數에서 發生
- 回轉方向의 振動軌道

를 들 수 있다.

(5) 接觸研摩振動(rubbing vibrations)

發電用 蒸氣터빈등에 많이 發生되는 振動으로서 主된 原因으로서는 回轉子의 突出部(high spot)가 라비린스 시일과 같은 固定部 등에 接

觸되어 局部的으로 加熱됨으로써 圓周에 溫度差를 發生시켜 一時的인 굽힘을 誘發시킨 境遇 接觸에 의해 軸을 支持하는 彈性系가 變하여 變位와 復元力의 關係가 非線形으로 되어 分數調波 振動이 發生되는 境遇, 혹은 接觸面의 摩擦에 의해 軸의 휨이 發生되는 境遇 등이 있다.

振動現象의 特徵으로서는

- 回轉에 의한 瞬間的인 衝擊形
- 높은 摩擦力에 의한 後進 靫
- 部分接觸研摩에 있어서는 間歇的인 接觸에 의한 衝擊運動이 支配的이며 로우터 應答은 實質 同期(synchronous) 速度와 不安全(truncated) 自由 橫方向 振動數의 合振動數를 갖게 된다.
- 軸과 시일 間의 全環研摩(full annular rub)에 있어서는 接觸이 維持됨으로써 回轉速度와 同期振動速度를 갖으며 특히 로우터 1시일의 連成系의 固有振動數 中에서 後進歲差 自勵振動이 發生되며, 이 歲差運動은 不平衡, 摩擦 및 起動力의 影響을 받는다.
- 上記의 全環研摩振動現象은 共振時 發生하기 쉬우며 回轉速度의 增加 혹은 減少에 影響을 받지 않는다.

(6) 軸의 龜裂에 의한 振動

回轉軸의 一部에 龜裂이 存在하는 境遇에 發生되는 振動으로서 로우터 回轉時 이러한 振動에 의해 크랙은 自重굽힘에 의해 開閉를 反復함으로써 結局 軸이 破壞되는 結果를 招來할 수도 있다.

振動現象의 特徵으로서는

- 2次的인 危險速度와 비슷한 特性을 갖는다.
- 振幅은 破損의 位置에 크게 影響을 받는다.
- 位相과 振動이 繼續 增加되는 振動軌道를 갖는다.
- 振動의 危險速度는 系의 固有振動數이다.

(7) 베어링의 給油不足

미끄럼베어링 類의 給油不足으로 생기는 不安定 振動으로서 一般的으로 大口徑의 베어링으로 支持된 로우터系에서 많이 發生된다. 振動現象의 特徵으로서는

- 振幅과 位相이 0.5~1 秒 程度의 周期로 脈

動하며 回轉數의 增加에 따라 振幅과 脈動數도 增加

- 境遇에 따라 軸系의 固有振動數에 影響을 주어 그 成分의 振幅을 增加

등이 있다.

(8) 커플링의 整列不良(misalignment)

剛體커플링의 境遇 軸中心間의 整列不良이나 齒車커플링의 경우 齒面의 摩擦이나 外部의 整列不良에 基因되는 振動으로서 現象의 特徵으로서는

- 剛體커플링의 境遇 回轉速度의 締結볼트數倍의 토오크變化로 인한 2次 危險速度 發生의 原因이 될 수 있으며 數個의 靫 現狀이 發生된다.
- 剛體커플링의 境遇 勵振力은 크지 않으며 軸心의 整列不良을 작게 하면 振動을 除去시킬 수 있다.
- 齒車커플링의 경우 軸系의 整列不良을 어느 程度 吸收하나 齒面의 摩擦과 關連된 異常 振動의 原因이 된다. 潤滑不良에 의해 齒의 물림부에 乾性摩擦이 發生하여 齒面의 不規則한 슬립에 의한 自勵的인 振動發生

(9) 豫荷重(preload)

方向性을 갖는 負荷 또는 回轉軸에 作用하는 힘에 의해 發生되는 振動으로서 瞬間的인 豫荷重의 結果로 베어링의 한쪽 方向으로 軸에 힘을 加하게 되어 非線形의 拘束이 發生되어 이것이 振動發生의 主要原因이 된다.

豫荷重은 圓周나 平行上의 軸커플링의 整列不良狀態로 인한 外部의 豫荷重 또는 機械케이싱의 變形, 空氣나 流體力, 3個의 베어링으로 設計된 機械의 內部整列不良, 베어링 셸(shell)의 水平 미스인덱싱(misindexing), 한쪽 方向으로 間隙이 줄어든 橢圓·혹은 레몬形의 베어링, 熱變形 또는 設置時의 整列不良에 의해 틀린 베어링 등에 의한 內部 豫荷重 등으로 分類된다.

振動現象의 特性은

- 豫荷重이 增加하면 橢圓→바나나形→8字形의 振動軌道를 갖는다.
- 整列不良과 關連된 1回轉當 2회의 周波數

로 發生

등을 들 수 있다.

(10) 重力臨界 (gravity critical)

키웨이즈 또는 셋스크루우(key-ways or set screws) 또는 2極 모우터/發電氣의 非對稱軸이나 外部의 整列不良에 의해 軸에 作用되는 모우멘트나 가스壓力自重 등의 여러가지 弱한 豫荷重에 基因되는 振動으로서 振動特徵은

- 系の 共振周波數보다 훨씬 낮은 回轉速度에서 反復力에 의해 共振하는 現象發生
- 大部分의 境遇 回轉速度는 共振周波數의 $\frac{1}{2}$

이며 때때로 $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{5}$ 등도 發生

- 共振增幅係數가 4 以下인 境遇 2 倍의 回轉速度 周波數로 共振發生

등을 들 수 있다.

(11) 回轉部의 弛緩

回轉部의 弛緩으로 인해 若干의 周波數 差異를 가진 2 個의 起動力이 發生됨으로써 일어나는 振動現象으로서 울림(beat)의 振動特性을 갖는다.

(12) 起動토포크의 變化

터어빈등의 起動토포크나 發電意의 反動토포크의 變化등에 의해서 發生되는 비틀림 振動現象으로서 回轉系の 비틀림 共振周波數와 토포크 變化의 周波數가 一致되면 매우 큰 振幅을 갖는 비틀림 振動이 發生한다.

(13) 軸系の 非線形性

回轉軸에 使用되는 베어링 支持 減壓部의 異物混入 및 不安定, 베어링 軸膜反力の 非線形特性, 큰 整列不良으로 인한 非線形化, 베어링부의 헐거움 등으로 인해 非線形 振動의 特性인 分數周波振動現象이 發生된다.

振動特性으로서

- 振動의 跳躍(jump) 및 振動弛歷 發生
- 回轉周波數와 正確히 $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ 등의 周波數成分을 갖는 振動發生
- 回轉速度와 振動速度 間의 位相은 一定
- 復元力이 正/負의 變化에 對해 對稱인 境遇에는 奇數周波共振이 非對稱인 境遇에는 偶數周波共振이 發生
- 整列不良과 베어링부의 헐거움으로 인한 境遇는 $\frac{1}{2}$ 次 分數周波發生 등을 들 수 있다.

(14) 軸굽힘剛性的 非對稱性

回轉機械의 많은 境遇 킴의 設置 등의 理由에서 軸의 굽힘剛性이 方向에 따라 다르기 때문에 이 軸이 回轉할 때 剛性變化로 인해 一種의 衝擊을 받아 發生되는 振動現象이다.

回轉數의 2 倍, 3 倍 등의 高周波의 成分을 갖고 있으므로 危險速度의 $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ 의 回轉數에서 共振이 發生된다. 特히 危險速度의 $\frac{1}{2}$ 의 回轉速度에서 發生하는 共振이 顯著하므로 이를 2 次의 危險速度라고 부른다.

3. 診斷 및 改善方法

앞에서 記述한 各種 振動現象으로부터 回轉機械의 異常을 診斷하여 이를 改善하는 方法이 最近 많은 研究者들에 의해 試圖 및 活用되고 있다. 現在 活用되고 있는 몇 가지 方法을 例示하면 다음 표와 같다. (R.F. Bosmans, "Detection and Early Diagnosis of Potential Failures of Rotating Machinery," BENTLY NEVADA May, 1984 : 參照)

異常原因	振動周波數 (X : 軸의 回轉數)	軌道運動	診斷裝置	改善方案
1. 不平衡質量	1X	一般的으로 圓形 가움前進	scope/camera phase meter tracking vector filter, plotter	補正質量의 加減

異常原因	振動周波數 (X: 軸의 回轉數)	軌道運動	診斷裝置	改善方案
2. 軸의 휨	1X	一般的으로 圓形	scope/camera phase meter tracking vector filter	휨의 제거 熱的/自重
3. 豫荷重	1X 와 2X	楕圓 바나나形	voltmeter scope/camera tunable filter tracking vector filter	絶緣 및 豫荷 重除去
4. 摩擦共通	high frequency can be mult. of 1X	distorted inside loops typical	scope/camera tunable filter tracking vector filter, spectrum display, plotter	絶緣 및 勵振 力 除去
5. 자이로 스코 픽	1X, sub. of 1X	一般的으로 圓形	scope/camera, tracking vector filter	
6. 電氣의 現象	1X, 2X, "N"X at 60Hz 또는 50Hz	一般的으로 圓形	voltmeter scope/camera, phase meter, tunable filter tracking vector filter, spectrum display, plotter	各種
7. 空氣力學的 메카니즘	同期可能		scope/camera tracking vector filter	
8. 他機械로부터 의 勵振	同期	前進 혹은 反轉	scope/camera, tunable filter, tracking vector filter, spectrum display, plotter	identify and isolate machine
9. 支持問題	同期	前進 혹은 反轉	scope/camera tunable filter, tracking vector filter, spectrum display, plotter	構造物調整
10. 流體力	1X 혹은 以下 1X	前進圓	voltmeter, scope/camera, tunable filter, tracking vector filter	軸의 補正
11. 重力臨界	2X(at 1/2 W res)	一般的으로 內部페회 로를 가진 前進圓	scope/camera, phase meter, tracking vector filter	
12. 베어링損傷 (間隙增加)	페로는 1X의 倍數	前進圓	voltmeter, scope/camera, tunable filter, tracking vector filter	베어링固定

回轉機械의 振動原因 및 現象

異常原因	振動周波數 (:軸의 周波數)	軌道運動	診斷裝置	改善方案
13. 軸의 龜裂	1X (2X with gravity critical)	位相과 振幅의 增大	scope/camera phase meter tracking vector filter	軸補正
14. 오일휠	0.40~0.49X frequency with running speed	generally forward circular-moving keyphasors	voltmeter scope/camera tunable filter tracking vector filter, spectrum display, plotter	油壓, 油溫, 베어링 間隙, 베어링 設計, 豫備負荷,
15. 휠	平衡-共振 同期勵振			油壓, 油溫, 베어링 間隙, 베어링 設計, 豫備負荷
16. 스틱				
17. 시일휠				
18. 편평휠				
19. 内部摩擦 휠/휠				
20. aerodynamic cross coupling		前進 혹은 反轉 (moving keyphasors)	voltmeter scope/camera tunable filter tracking vector filter, spectrum display, plotter	
21. 構造共振	同期	前進 혹은 反轉	voltmeter scope/camera tunable filter tracking vector filter, spectrum display, plotter	構造絶緣 및 勵振力 減縮

4. 맺음말

國內 回轉機械의 需要增加 및 機械工業의 發展과 並行하여 이를 보다 安全하고 效果의으로 運用할 必要性이 增大되고 있는 實情이다. 特히 回轉機械의 異常의 主原因인 振動에 對해 그 原因과 現象을 正確하게 分析함으로써 機械의 運

營이나 保全管理에 有益할 뿐더러 事故의 未然防止에도 크게 寄與할 것으로 判斷된다. 特히 電子計測器 및 資料分析裝置의 急速한 發展으로 因해 高速 및 高精度의 情報處理能力을 가진 裝備를 容易하게 求할 수 있기 때문에 各種 異常 診斷專門시스템의 國內 開發도 可能하리라고 생각된다.