

流体回轉機械에서 最近의 振動問題

梁 保 錫
(釜山水産大學)

1. 序 論

두차레에 걸친 世界的인 石油危機 以後 省資源, 省에너지의 절실한 必要性和 함께 플랜트의 高性能化, 大容量化, 多樣化가 이루어져, 各種流體回轉機械는 高壓, 大形化하는 傾向이다(그림1).

이러한 傾向은 동시에 高速化의 要求和 연결되어 많은 새로운 技術上의 問題解決을 必要로 하고 있다. 耐壓強度 뿐만이 아니고 高壓을 발생시키는 高速回轉機械로서의 強度, 機能의 確保와 플랜트稼働率의 점에서 높은 信賴性이 要求된다. 信賴性을 向上시키고 トラブル을 防止하기 위한 重要한 point의 하나는 回轉軸系의 振動解析이다. 流體回轉機械는 一般回轉機械와 달리 作動流體로부터 發生하는 流體力이 軸系에 作用하며, 最近 流體機械의 高壓, 高速化에 의해 이 流體力이 不安定振動을 일으키는 것이 重要한 問題로 되고 있다. 즉 原子力, 火力發電플랜트 등에 使用되는 冷却循環系統의 各種 펌프, 보일러給水펌프와 各種壓縮機의 段사이에 使用되는 Wearing, 中間段 Seal, Balance drum 등의 細隙部와 羽根車에서 發生하는 流體力이 그 원인이다.

이 流體力은 系의 性能向上 및 構造的인 理由에 의해 피할 수 없으며 不安定한 振動을 防止하기 위하여는 不安定한 힘이 作用하더라도 系全體의 安定性을 유지하도록 回轉軸系를 設計하는 것이 必要하다. 本 解説에서는 遠心펌프와 壓縮機

를 中心으로 流體力의 特性을 明確히 함과 동시에 이 流體力을 考慮했을 때의 系의 振動特性을 評價하므로써 系의 安定性을 向上시키기 위한 지침을 제공하고자 한다.

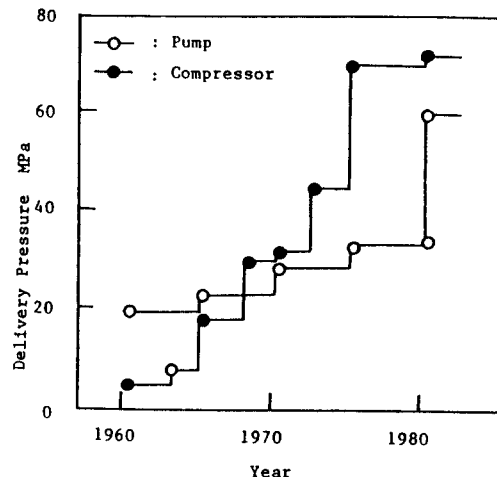


그림 1. 吐出壓力의 高壓化

2. Rotor에 作用하는 힘

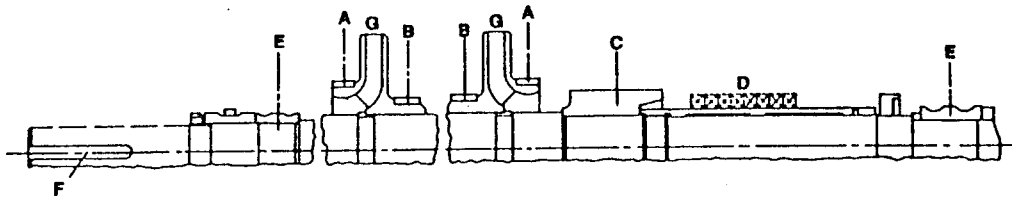
流體回轉機械의 경우, Rotor에 作用하는 힘 (Radial force)은 Rotor의 變位에 의한 힘과 不平衡 등에 의한 勵振力의 두 種類가 있다. 그림 2는 이 힘들에 대한 概略圖를 나타내고 있다.

□ 解 說

微小細隙部에서 Rotor의 變位에 起因하여 發生하는 流體力은 通常 靜的平衡點에 對해 綜形化하여 그 때의 Rotor의 變位, 速度 및 加速度에 比例하는 動的係數로서 다음과 같이 表現된다.

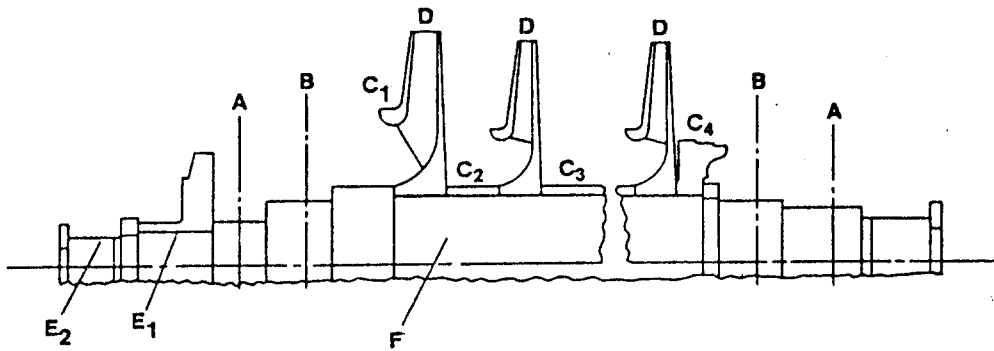
$$-\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ \Delta \dot{Y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{xx} & 0 \\ 0 & M_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{X} \\ \Delta \ddot{Y} \end{bmatrix}$$

여기서 F_x , F_y 는 水平, 垂直方向의 流體力이고, 右邊의 變位, 速度, 加速度에 比例하는 係數를 各各 剛性, 減衰, 附加質量係數라 부른다. 이 힘들 中에 Rotor 支持部 즉, 베어링의 流體力(通常 油膜力이라 함)을 表現하는 動的係數는 오래전부터 各形式에 對해 理論, 實驗으로 잘 알려져 있다. 또 이 油膜力에 起因하여 發生하는 Oil Whip이라는 不安定振動도 많은 研究에 의해 解明되었다.



- A NECK RING SEAL
- B INTERSTAGE SEAL
- C BALANCE PISTON SEAL
- D PACKING GLANDS, OR BREAKDOWN BUSHINGS
- E BALL BEARINGS (ASYMMETRY AND NONLINEARITY)
- F FRICTION DAMPING AND/OR ASYMMETRIC STIFFNESS PROPERTIES
- G WORKING FLUID: STATOR/IMPELLER INTERACTION

a) 多段펌프



- A FLUID FILM BEARINGS
- B BUFFER GAS/OIL SEALS
- C_n LABYRINTH SEALS AT INLET, INTERSTAGE, CENTER SPAN, AND BALANCE PISTON
- D WORKING FLUID: DIFFUSER/IMPELLER INTERACTION
- E FRICTION DAMPING AT LONG SHRINK FIT, SPLINE COUPLING
- F INTERNAL MATERIAL DAMPING AND ASYMMETRIC STIFFNESS PROPERTIES

b) 多段壓縮機

그림 2. Rotor에 作用하는 힘

두번째로 Wearing (또는 neck ring), 中間段 Seal Balance Drum (또는 piston) 等の Seal 部에서 發生하는 流體力의 경우, 1969年 Black²⁾ 에 의한 同心環狀平行 Seal에 대한 研究以來 이 形式에 대해서는 어느 정도 定量的인 評價式이 可能하게 되었고, 最近 偏心時의 流體力 評價式³⁾을 비롯하여 各種의 複雜한 形式에 대해서도 理論, 實驗的으로 研究가 進行되고 있다.

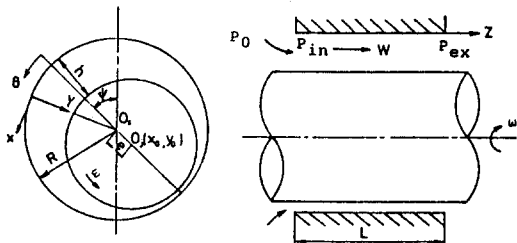
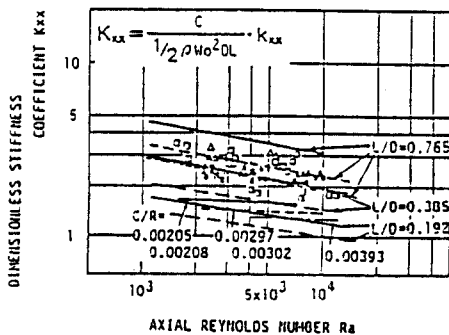
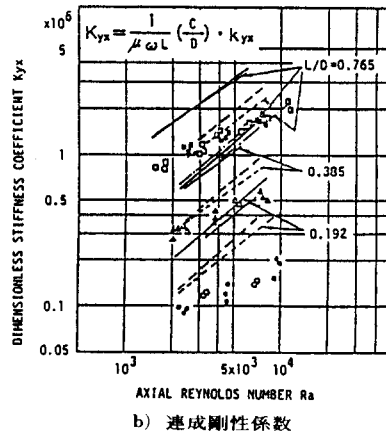


그림 3. 環狀平行 Seal의 形狀

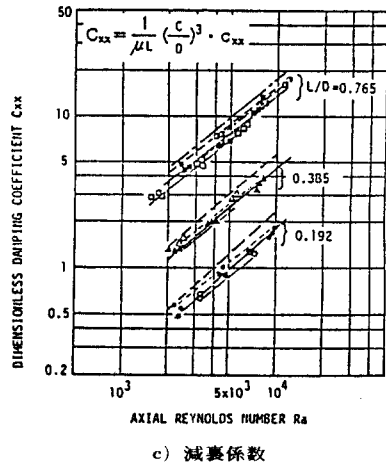
그림 3, 4는 工業的으로 使用되는 Seal 中에 가장 基本的인 環狀平行 Seal의 形狀과 同心時의 動的係數의 例를 나타내고 있다. 이런 形의 Seal은 非接觸狀態로 使用되며, 軸이 回轉하고 Seal이 靜止하고 있는 點은 미끄럼 베어링과 類似하다. 다른 點은 通常 Seal 部는 入口와 出口 사이에서 比較的 큰 壓力差에 의해 軸方向에 강한 壓力흐름이 있고, 틈새가 베어링보다 크므로 通常 亂流인 點이다. 세번째로 통상 임펠러力이라 부르는 羽根車에서 發生하는 流體力이 있다.



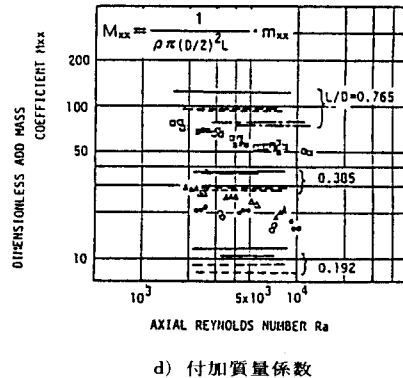
a) 剛性係數



b) 連成剛性係數



c) 減衰係數



d) 附加質量係數

그림 4. 環狀平行 Seal의 動特性

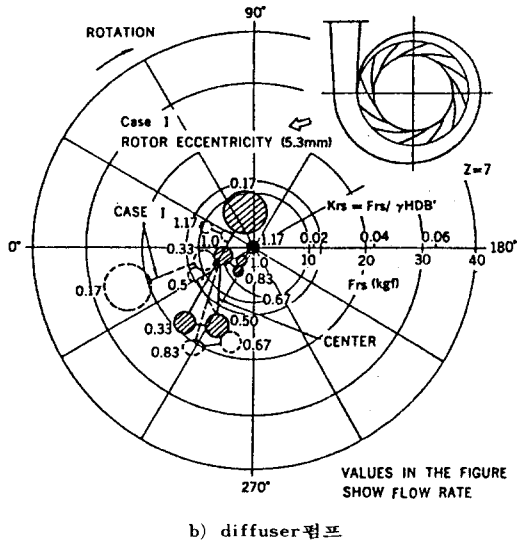
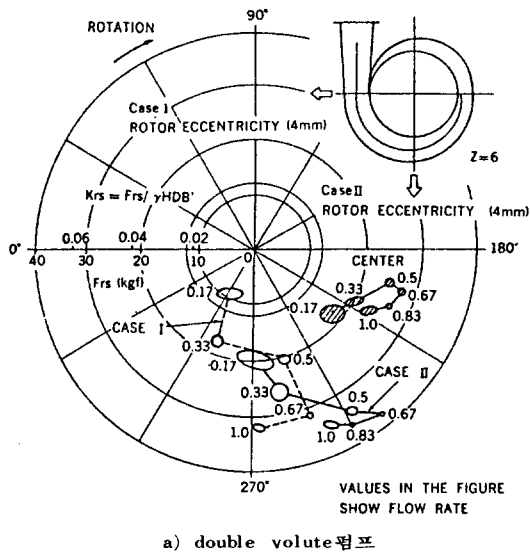


그림 5. 羽根車의 靜的流體力

그림 5는 double volute pump 와 diffuser pump 의 靜的流體力의 計測結果를 나타낸다. 4 그림 중의 圓은 靜的流體力이 이 圓內를 變化하는 것을 뜻한다. 羽根車를 케이스中心에 설치하는 경우 유체력은 매우 적고 羽根車의 偏心を 크게 하

면 偏心方向으로 流體力이 作用하며, 低流量域에서 그 變化量이 크게됨을 알 수 있다. 兩케이스形式의 動的流體力을 구한 結果를 그림 6에 나타낸다. 定格條件에서는 靜的流體力과 거의 같은 크기이나 低流量일 수록 流體力이 크게 증가하고 이는 diffuser pump의 경우 현저하다. 이 그림에서 알 수 있듯이 低流量 즉 部分流量狀態에서 運轉되는 경우 流體力에 의한 變動荷重이 回轉軸系의 安定性에 크게 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 그림 7은 羽根車에 作用하는 靜的 및 動的流體力을 最高效率點 (Best Efficiency Point)에서의 流量과 힘으로 各各 無次元하여 나타내고 있다. 그러나 이 힘은 그림 8에서 보여지는 바와 같이 羽根車 内部 및 주위에서 發生하는 재순환 흐름, 逆流 등의 複雜한 2次흐름의 發生과 段形狀에 따라 그 發生原因과 各種 形狀에 의한 영향이 아직 充分히 究明되지 않고 있다.

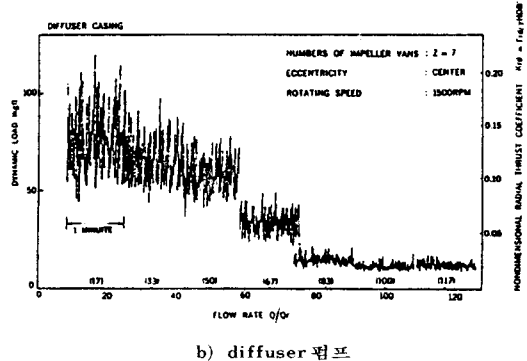
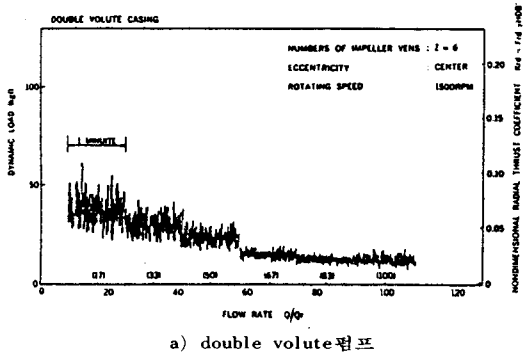


그림 6. 羽根車의 動的流體力

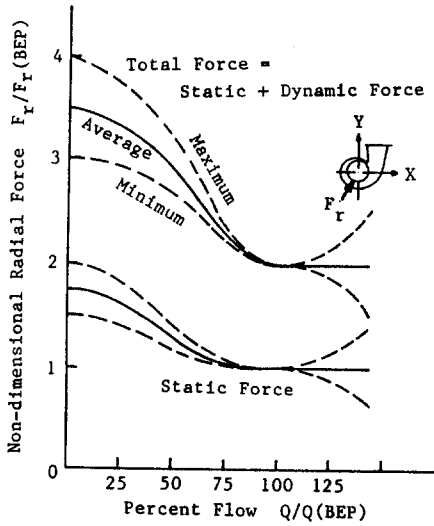


그림 7. 羽根車에 작용하는 流體力

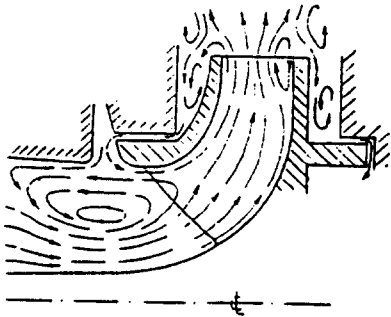


그림 8. 羽根車 内部 및 둘레의 2次 흐름

3. 安定性 및 振動応答

安定性解析의 경우 回轉軸系의 運動方程式에 대해 複素固有値解析을 하면 일반적으로 自由度의 수에 對應한 固有値가 얻어지고 系의 安定上 問題로 되는 振動모드에 대해 對數減衰率을 檢討하면 된다.⁵⁾ 그림 9는 單段兩吸入遠心펌프의 경우 Seal의 流體力를 考慮한 경우(實線)와 無視한 종래의 方法의 結果(點線)에 대해 複素固有値를 구한 結果이다.

1次, 2次 모두 Seal의 流體力를 考慮한 경

우가 Seal 部의 剛性에 의해 固有振動數가 증가하고, 減衰比도 증가한다. 系가 不安定하게 되는 1次모드의 安定限界는 上昇하고 있다. 이와 같이 Rotor 系의 安定性은 베어링의 動特性만이 아니고 Seal, 임펠러 등에서 發生하는 流體力特性에 의해서도 크게 영향을 받는다. 그림 10은 60 MW 發電플랜트용의 보일러給水펌프의 實機實驗의 結果를 나타낸다. 구동측에서 먼 베어링 부근의 응답(3-x 變位計)을 보면 1次危險 速度인 1500 rpm 부근에서는 Seal 과 羽根車의 流體力에 의한 減衰로 인하여 共振피크는 발생하지 않으나 4300 rpm 이상으로 되면 振幅은 급증하여 이후 회전속도를 높여도 振動振幅은 적어지지 않고 Oil Whip과 비슷한 不安定振動이 發生한다. 한편 구동측 베어링 부근(1-x 變位計)의

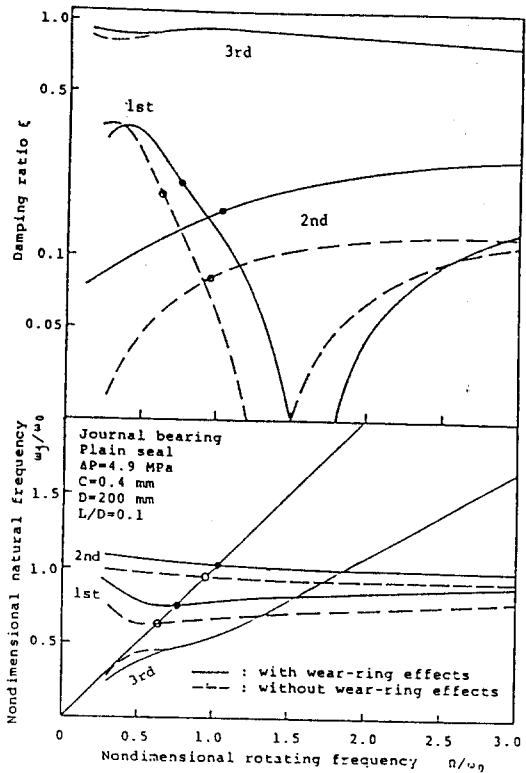


그림 9. 系의 固有振動數와 減衰比에 미치는 seal의 영향

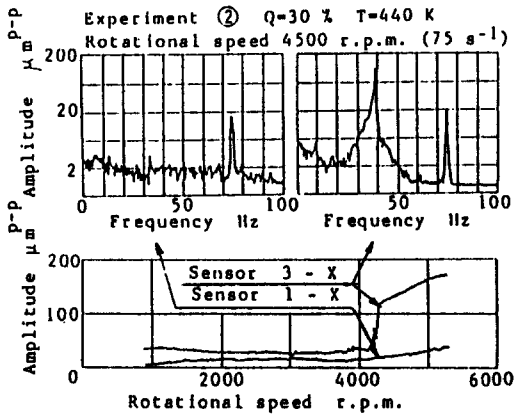


그림10. 보일러給水펌프의 振動응답과 周波數分析結果

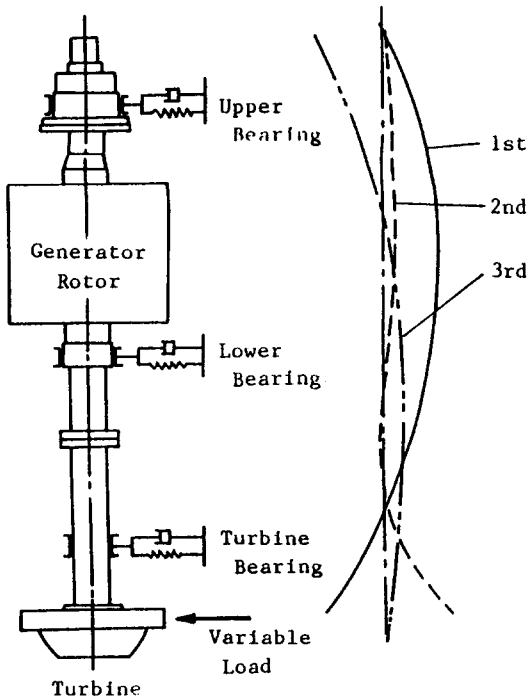


그림11. 水車發電機의 解析모델과 振動모드

응답은 평탄하고 이 진동은 관찰되지 않는다. 이 불안정振動의 원인은 環狀 Seal 部에서 發生하는 유체력으로, 이 힘의 定量的인 평가식을 구하려는

많은 연구가 진행되고 있다.¹⁾ 水車의 경우도 同一한 現象이 나타나는데, 部分負荷運轉이나 起動·停止時에 水車 runner 周위의 水壓의 不平衡에 의한 高周波의 變動荷重이 發生하고 이 힘에 의해 축의 휘돌림이 일어난다(그림 11).

4. 結 言

以上에서 流體回轉機械의 軸系에 作用하는 流體力를 中心으로 安定性和 振動應答에 미치는 영향을 간단히 설명했다.

今後 점점 高性能化와 高信賴性이 요구됨에 따라, 解析技術의 精度向上, 效率向上 등의 해결해야 할 많은 問題가 있다. 앞으로 보다 信賴性이 높은 流體回轉機械를 設計하기 위해 各種 流體力를 보다 엄밀히 評價할 수 있도록 하여야 하며 初期設計 段階에서 軸系에 作用하는 이 힘들을 考慮한 水力學的 設計(Hydraulic design)가 이루어져야 할 것이다.

參 考 文 獻

1. 日本機械學會編: 『すべり軸受の靜特性および動特性データ集』, 日本工業出版社(1984).
2. H.F. Black: 『Effects of Hydraulic Force in Annular Pressure Seals on the Vibration of Centrifugal Pump Rotors』, J.Mech. Eng. Sci., Vol.11 No.2(1969).
3. B.S. Yang, T.Iwatsubo and R. Kawai: 『A Study on the Dynamic Characteristics of Pump Seal (1st Report, In Case of Annular Seal With Eccentricity)』, Bull. of JSME Vol.27 No.227(1984).
4. H.Kanki, Y. Kawata and T. Kawakami: 『Experimental Research on the Hydraulic Excitation Forces on the Pump Shaft』, ASME Paper 81-DET-71(1981).

5. B.S. Yang: 'Effects of Seal Dynamics on the Vibration and Stability of Hydraulic Machine, Dr. Eng. Thesis, Kobe Univ.(1984).
6. 高木亨之, 菊地勝昭, 小松一紘, 鎌田邦雄, '多段遠心ポンプの軸振動の研究', 日本機械學會講演論文集 No.843-3(1984).

科学技術人の 信条

우리 科學技術人は 科學技術의 暢達과 振興을 通하여 國家發展과 人類福祉社會가 이룩될 수 있음을 確信하고 다음과 같이 다짐한다.

一, 우리는 創造의 精神으로 眞理를 探究하고 技術을 革新함으로써 國家發展에 積極 寄與한다.

一, 우리는 奉仕하는 姿勢로 科學技術振興의 風土를 造成함으로써 온 國民의 科學的 精神을 振作한다.

一, 우리는 높은 理想을 指向하여 自我를 確立하고 相互 協力함으로써 우리의 社會的 地位와 權益을 伸張한다.

一, 우리는 人間의 尊嚴性이 崇尚되고 그 價値가 保障되는 福祉社會의 具現에 獻身한다.

一, 우리는 科學技術을 善用함으로써 人類의 繁榮과 世界의 平和에 貢獻한다.