蒸氣터어빈 에서의 蒸氣흐름의 三次元 解析과 블레이드 形狀에 關한 考察

金　　喜　　澈

A study on Blade Shapes and Three-Dimensional Analysis to Steam Flow in the Steam Turbine

Hi cheol Kim

目　次

Abstract

The design of turbine flow passages is primarily concerned with the shape and arrangement of nozzles(stationary blades) and moving blades. The blade is by far the most important element in any turbine design because the shape of blade determines the form of the flow passages. Thus the careful attention should be given to develop the correct blade shape. Any deviation from the correct blade shape is accompanied by loss of efficiency. The data for the design of blade, presented thus far, has been restricted to a representative section on a turbine blade taken at the mean blade height. However, it is apparent that the linear velocity of points on the blade varies directly as the radial distance from the center of rotation. In this paper, the velocity diagrams for blade of free-vortex, blade with constant reaction degree of 50 percent radially and fixed blade with constant exit angle are studied.

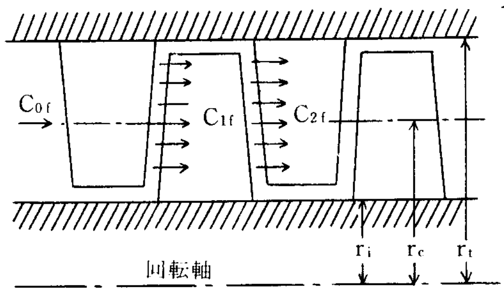
記號說明

i; Enthalpy
A; 일의熱當量
g; 重力의 加速度
C; 蒸氣速度
C_p; 等壓比熱
R; 가스常數
K; 斷熱指數
C_f; 蒸氣의 軸方向分速度
C_u; 蒸氣의 圓周方向分速度
r_c 블레이드 平均半徑
r_i 블레이드 밑까지의 半徑
r_t; 블레이드 尖端까지의 半徑
u; 回轉블레이드 周速
ρ; 反動度
α_1; 固定블레이드 出口角
β_1; 回轉블레이드 入口角
β_2; 回轉블레이드 出口角
$\xi=\frac{u}{C_1}$; 速度比
ω; 角速度
C_1; 絶對流入速度
C_2; 絶對流出速度
w_1; 相對流入速度
w_2; 相對流出速度
$(\ )_i$; 블레이드밑의 位置
$(\ )_c$; 블레이드 中點의 位置
$(\ )_t$; 블레이드 尖端의 位置

I. 序　論

터어빈 블레이드(Blade)의 機能은 高速流體의 運動 Energy를 로우터(Rotor)의 連續的인 動力發生 Torque로 變換하는 것이며 그 機能은 極히 重要함에도 不拘하고 다른 複雜한 機械要素에 比해 輕視되는 傾向이 있었다. 實際로 蒸氣터어빈에 있어서는 使用蒸氣의 性狀에 따른 블레이드의 腐蝕와 侵蝕, 블레이드 設計不適으로 因한 블레이드入口端에서 衝突損失 및 振動問題等이 惹起되고 있으며, 이와 같은 것을 考慮한다면 블레이드 設計에 있어서는 流體工學, 材料力學, 振動工學과 같은 分野의 共同作業이 必要하게 될 것이다. 本論文 에서는 單只 速度 Energy를 갖는 蒸氣의 흐름에 따라 블레이드가 하는 일을 運動量 理論을 適用한 流路理論(Channel theory)을 利用하여, 半徑方向으로의 速度線圖의 變化 및 블레이드 入口角 및 出口角의 變化狀態를 比較 檢討하였다. 從來 블레이드의 길이가 블레이드 平均直徑에 比해 작은 경우에는 平均半徑上에서 2次元 解析으로 速度線圖 및 線圖効率을 다루워 왔으나, 最近大容量 터어빈의 最終段落附近에서는 블레이드밑과 尖端과의 半徑比가 1.5~2 程度로 되어서 길이가 큰 블레이드에 있어서는 半徑方向으로 速度線圖도 變하게 될것이므로 3次元的인 解析方法에 의하여 蒸氣에는 軸流速度外에 圓周方向, 半徑方向의 分速度와 이에 따른 遠心力으로 半徑方向으로 壓力差가 생긴다는 假定下에 自由渦블레이드, 固定블레이드의 出口角이 一定한 블레이드, 反動度가 一定한 블레이드에 關한 速度線圖와 블레이드 形狀에 關하여 考察하였다. 但 블레이두에서의 磨擦 및 渦流, 블레이드 入口端에서의 衝突, 틈에서의 漏洩等과 같은 內部損失은 無視하였다.

Ⅱ. 環狀流路에서의 基礎式



〈그림 1〉

그림 1과 같은 固定블레이드와 回轉블레이드가 있는 環狀流路內에서 固定블레이드 前의 蒸氣가 갖는 全 Energy를 E라면

$$E=i+\frac{AC^2}{2g}$$

또한 Enthalpy i는

$$i=C_pT=AR\frac{kT}{k-1}=APV\frac{k}{k-1}$$

C_p: 等壓比熱

R: 가스常數

k: 斷熱指數

蒸氣는 軸에 平行하게 흐르고 半徑方向의 分速度를 갖이 않는다고 假定하면

$$C^2=C^2{}_f+C^2{}_u$$

C_f: 軸方向分速度

C_u: 圓周方向分速度

따라서

$$E=APV\frac{k}{k-1}+\frac{A}{2g}(C^2{}_f+C^2{}_u)$$

全Energy의 半徑方向의 變化는 윗式을 r로 微分하여

$$\frac{dE}{dr}=\frac{Ak}{k-1}\left(V\frac{dp}{dr}+p\frac{dV}{dr}\right)+\frac{A}{g}\left(C_f\frac{dC_f}{dr}+C_u\frac{dC_u}{dr}\right)$$

蒸氣는 半徑方向으로 $PV^k=$一定인 關係로 變化한다면 이것으로 부터

$$\frac{dV}{dr}=-\frac{V}{kp}\ \frac{dP}{dr}$$

의 關係를 윗式에 代入하면

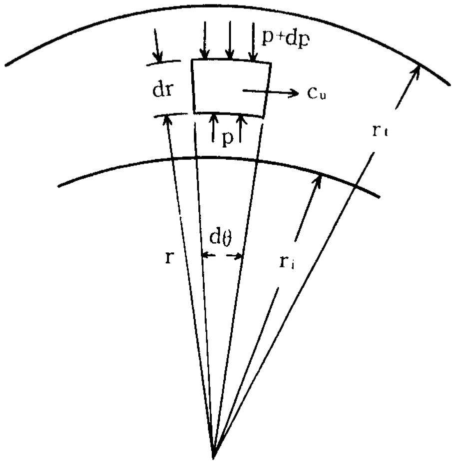
$$\frac{dE}{dr}=\frac{A}{g}\left(C_f\frac{dC_f}{dr}+C_u\frac{dc_u}{dr}\right)+AV\frac{dp}{dr}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

또 그림 2의 環狀部分의 平衡式은

$$dp\cdot d\theta\cdot r=\frac{C_u{}^2}{r}r\cdot d\theta\cdot dr\frac{1}{gV}$$

$$\therefore\frac{dp}{dr}=\frac{1}{gV}\left(\frac{C_u{}^2}{r}\right)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

(2)式을 (1)式에 代入하면



〈그림 2〉

$$\frac{g}{A}\ \frac{dE}{dr}=C_f\frac{dC_f}{dr}+C_u\frac{dC_u}{dr}+\frac{C_u^2}{r}\cdots(3)$$

(3)式은 半徑方向의 에너지 平衡方程式이다.

Ⅲ. 自由渦 理論

그림 1에서 固定블레이드 前에서 軸流速度가 一定하게 흐르고 있을 때에는 半徑方向으로의 全 Energy는 變動이 없다. 즉 $dE/dr=0$ 이므로 添字 1로서 固定블레이드 出口의 狀態를 나타내면

$$C_{1f}\frac{dC_{1f}}{dr}+C_{1u}\frac{dC_{1u}}{dr}+\frac{C_{1u}^2}{r}=0\cdots(4)$$

(4)式의 解는 여러개 存在한다. 즉 多數의 流動狀態가 存在할 것이다.

但 여기서는 軸流速度分布 C_f가 半徑方向으로 同一한 경우에 關하여 考察하면

$$C_{1f}=\text{一定}\cdots\cdots(5)$$

$$\therefore\ \frac{dC_{1f}}{dr}=0$$

이것을 (4)式에 代入하면

$$\frac{dC_{1u}}{dr}=-\frac{C_{1u}}{r}$$

$$\therefore\ C_{1u}\cdot r=\text{一定}\cdots\cdots(6)$$

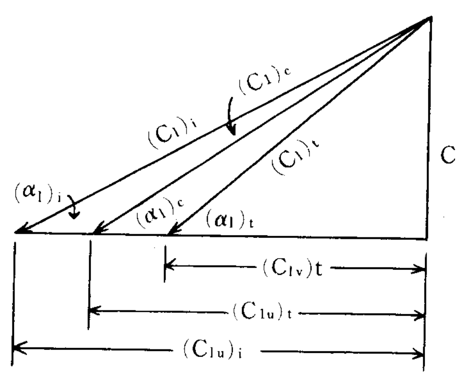
즉 圓周方向分速度는 半徑에 逆比例 함을 알 수 있다.

1) 自由渦 固定블레이드

(5)式, (6)式에 의해서 固定 블레이드의 速度線圖는 그림 3과 같다. 이것으로 부터 任意의 半徑 r에서의 固定블레이드 出口角을 α_1이라면

$$\tan\alpha_1=\frac{r}{r_c}\tan(\alpha_1)_c\cdots\cdots(7)$$

의 關係가 成立하고 α_1은 밑으로 부터, 尖端으로 向하여 漸次增加하여 블레이드는 비틀림形으로 된다.



〈그림 3〉

2) 自由渦 回轉블레이드

回轉블레이드 各半徑上에서의 일 $A(W)_r$이 同一한 경우에는 回轉블레이드 出口에서의 Energy는 同等하므로 $dE/dr=0$ 이고 (3)式에서 回轉블레이드 出口에서의 方程式은

$$C_{2f}\frac{dC_{2f}}{dr}+C_{2u}\frac{dC_{2u}}{dr}+\frac{C^2_{2u}}{r}=0 \cdots\cdots(8)$$

또한 위의 假定에서

$$(W)_r=\frac{u}{g}(C_{1u}\pm C_{2u})=\frac{\omega}{g}(C_{1u}r\pm C_{2u}r)=\text{一定}$$

이며 (6)式에서 $C_{1u}\cdot r=$一定이므로

$$C_{2u}\cdot r=\text{一定} \cdots\cdots(9)$$

즉 回轉블레이드 出口에서도 自由渦理論이 成立함을 알 수 있다.

(8)式에 (9)式을 代入하면

$$C_{2f}\frac{dC_{2f}}{dr}=0$$

$$\therefore C_{2f}=\text{一定} \cdots\cdots(10)$$

즉 回轉블레이드 出口에서도 軸流速度分布는 一定이며 以上의 것을 綜合하면

a) 軸流速度分布가 均一

b) $C_{2u}\cdot r=$一定

c) 半徑方向에서의 일量이 同一

인 경우의 블레이드를 自由渦블레이드라 할 수 있다.

3) 自由渦 블레이드의 速度線圖

한點 o를 中心으로 하는 r方向의 放射線을 I I, II II 라하고 그 間隔을 周速 u 라 한다. 中心 r_c上의 周速 u_c를 $\overline{ab}$ 라면 r_t, r_i上의 周速은 $u_t=\overline{a_tb_t}$, $u_i=\overline{a_ib_i}$이다. $r=r_c$에서의 回轉블레이드의 入口, 出口의 速度線圖를 abd, abe라 하고, 軸流速度는 一定하게 한다.

(6)式의 條件으로 부터 $C_{1u}=(C_{1u})_cr_c/r$의 關係를 利用하여 點 d 를 지나는 曲線 III III을 그어, 이것과 $r=r_t$에서의 $C_f=$一定인 線과의 交點을 d_t라하면 $\overline{d_ta_t}$는 블레이드 尖端에서의 絶對速度 $(C_1)_t$, $\angle d_tb_ta_t=(\beta_1)_t$이다. 回轉블레이드 出口에서는 (9)式에 의해서 $C_{2u}=(C_{2u})_cr_c/r$의 關係를 利用하여 e點을 지나는 曲線 IV, IV, 을 그어, $C_f=$一定인 線과의 交點을 e_t라면 $\overline{e_tb_t}=(w_2)_t$, $\overline{e_ta_t}=(C_2)_t$, $\angle e_tb_ta_t=(\beta_2)_t$ $\angle e_ta_tb_t=(\alpha_2)_t$로 된다.

이와 같이 블레이드 尖端의 速度線圖가 定해지며, 任意의 r에서의 速度線圖가 같은方法으로 定해지고, β_1,β_2 즉 블레이드形이 決定된다. 그림 4에서 β_1,β_2를 式으로 表示하면

$$\text{Cot}\ \beta_1=\frac{r}{r_c}\text{Cot}(\beta_1)_c-\left(\frac{r}{r_c}-\frac{r_c}{r}\right)\text{Cot}(\alpha_1)_c \cdots\cdots(11)$$

$$\text{Cot}\beta_2=\frac{r}{r_c}\text{Cot}(\beta_2)c-\left(\frac{r}{r_c}-\frac{r_c}{r}\right)\text{Cot}(\alpha_2)_c \cdots\cdots(12)$$

(11), (12)式은 中心斷面의 翼形으로 부터 任意의 r에서의 翼形을 定할 수 있다.

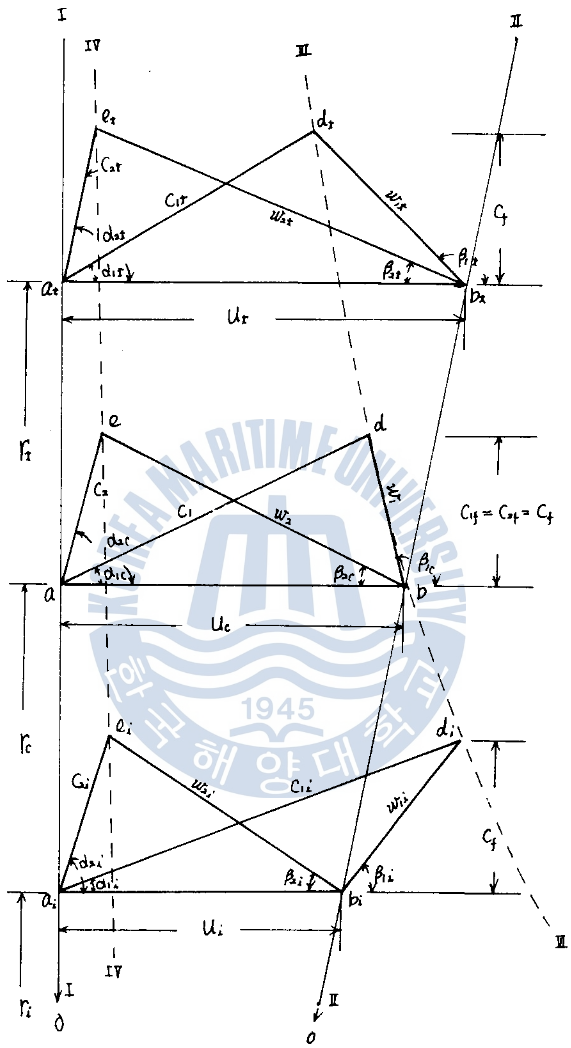


그림 4

4) 自由渦 블레이드의 反動度

反動度란 한 段落에서의 熱落差에 對한 回轉블레이드에서의 熱落差의 比로 表現되고 速度線圖에서는

$$\rho=\frac{u-\frac{1}{2}(C_{1u}+C_{2u})}{u}$$

$\frac{r}{r_c}$	α_1	α_2	β_1	β_2	ρ
0.8	16°20′	103°10′	42°30′	23°45′	0.219
0.9	18°05′	101°25′	76°35′	21°45′	0.382
1.0	20°00′	100°00′	100°00′	20°00′	0.500
1.1	21°50′	98°30′	125°35′	18°30′	0.587
1.2	23°35′	97°45′	140°50′	17°10′	0.652

표 1

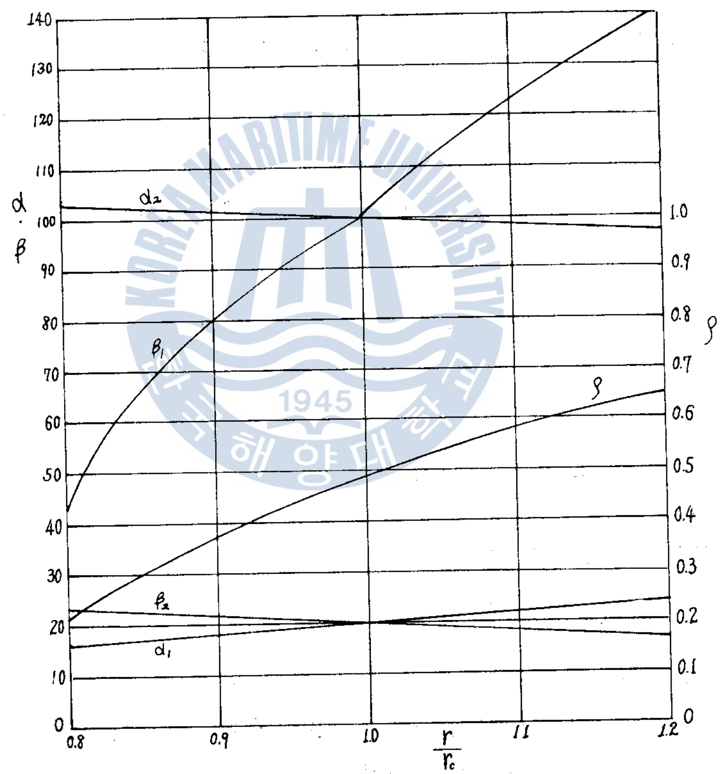


그림 5

로부터 自由渦의 條件 $C_{1u}r=(C_{1u})_c r_c$, $C_{2u}r=(C_{2u})_c r_c$. 와 $u=u_c r/r_c$의 關係를 代入하면

$$1-\rho=\frac{1}{2u_c}\left(\frac{r_c}{r}\right)^2\left\{(C_{1u})_c+(C_{2u})_c\right\}$$

또한 $r=r_c$ 에서는

$$1-\rho_c=\frac{1}{2u_c}\left\{(C_{1u})_c+(C_{2u})_c\right\}$$

이므로

$$\frac{1-\rho_c}{1-\rho}=\left(\frac{r}{r_c}\right)^2 \qquad (13)$$

이다. (13)式은 半徑方向의 反動度를 나타내는 式이다. (13)式에서 反動度 $\rho_c=0.5$인 경우에는 블레이드 밑端에서는 $\rho_i=0.22$, 尖端에서는 $\rho_t=0.65$으로 半徑方向으로 增加하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 平均半徑에서의 $\alpha_1=20$, $\rho_c=0.5$, $\xi_c=1.0$인 경우의 自由渦 블레이드 入口角, 出口角 및 反動度를 나타낸 것이다.

Ⅳ. 固定블레이드 出口角(α_1)이 一定한 블레이드

自由渦블레이드 에서는 α_1이 半徑方向으로 變하기 때문에 비틀림 形으로되는 것은 前述한바와 같다. 여기에서는 α_1이 一定인 경우를 考察한다.

固定블레이드 出口에서의 Energy式은 自由渦블레이드에서와 같이

$$C_{1f}\frac{dC_{1f}}{dr}+C_{1u}\frac{dC_{1u}}{dr}+\frac{C_{1u}^2}{r}=0$$

$\alpha_1=$一定 이므로 任意의 半徑 r에서의 圓周方向分速度 C_u는

$$C_{1u}=C_{1f}\mathrm{Cot}\alpha_1 \qquad (14)$$

(14)式을 윗式에 代入하면

$$\frac{dC_{1u}}{dr}(1+\tan^2\alpha_1)+\frac{C_{1u}}{r}=0$$

또 $1+\tan^2\alpha_1=\sec^2\alpha_1=\dfrac{1}{\cos^2\alpha_1}$ 이므로

$$\frac{dC_{1u}}{C_{1u}}=-\cos^2\alpha_1\cdot\frac{dr}{r}$$

$$\therefore\ C_{1u}\cdot r^{\cos^2\alpha_1}=\text{一定} \qquad (15)$$

즉 $\mathrm{Cos}^2\alpha_1<1$ 이므로 圓周方向分速度의 變化는 自由渦 블레이드 보다 작다.

또 r_c에서의 軸流速度를 $(C_{1f})_c$ 라면 (14), (15)式에서

$$\frac{C_{1f}}{(C_{1f})_c}=\frac{C_{1u}\ \tan\alpha_1}{(C_{1u})_c\ \tan\alpha_1}=\left(\frac{r_c}{r}\right)^{\cos^2\alpha_1} \qquad (16)$$

이며, 固定블레이드에서 軸流速度는 半徑方向으로 減少하게 된다.

回轉블레이드 에서는 半徑方向으로 일量이 均等하다고 假定하면

$$(W)_r=\frac{u}{g}(c_{1u}+c_{2u})=\text{一定}$$

$$\therefore\ C_{2u}=\frac{g(W)_r}{u}-C_{1u}$$

윗式에 (15)式의 關係인 $C_{1u}r^{\cos^2\alpha_1}=(C_{1u})_c r_c^{\cos^2\alpha_1}$을 代入하면

$$C_{2u}=\frac{g(W)_r}{r\omega}-(C_{1u})_c\left(\frac{r_c}{r}\right)^{\cos^2\alpha_1} \cdots\cdots(17)$$

이고, 回轉블레이드의 圓周方向分速度가 定해진다. 또 軸流速度分布는 (8)式에 (15)式, (17)式을 代入하면

$$(C_{2f})^2-(C_{2f})^2_c=(C_{1f})_c^2\left\{\left(\frac{r_c}{r}\right)^{2\cos^2\alpha_1}-1-2\frac{g(W)_r}{\omega r_c(c_{1u})_c}\,\frac{\left(\frac{r_c}{r}\right)^{1+\cos^2\alpha_1}-1}{\frac{1}{\cos^2\alpha_1}+1}\right\}\cdots\cdots(18)$$

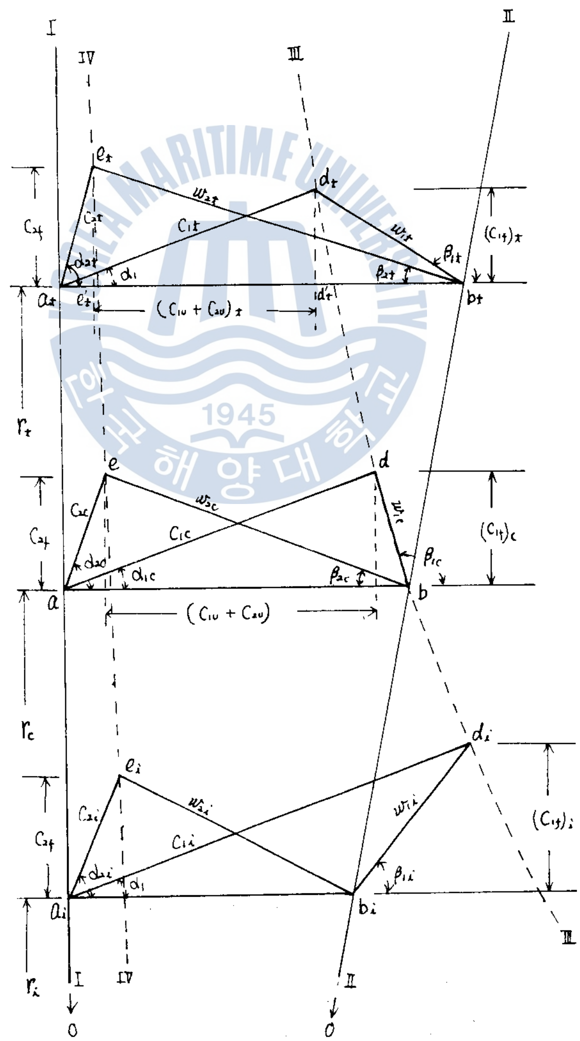


그림 6

$\frac{r}{r_c}$	α_1	α_2	β_1	β_2
0.8	20°	101°20′	50°30′	23°40′
0.9	20°	100°30′	78°35′	21°40′
1.0	20°	100°00′	100°00′	20°00′
1.1	20°	99°20′	126°30′	18°35′
1.2	20°	98°40′	143°20′	17°20′

표 2

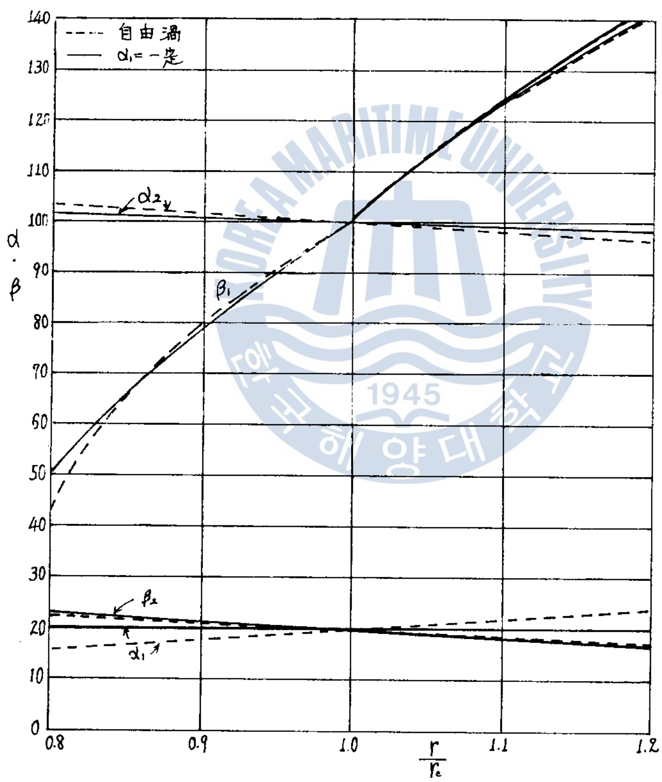


그림 7

이며, 右邊의 값은 微小하므로 近似的으로 軸流速度는 一定이라 볼 수 있다.

즉 C_{2f}≒一定

回轉블레이드 出口의 速度線圖는 $(W)_r$=一定인 關係로 부터

$$(C_{1u}+C_{2u})_t = \frac{g(W)_r}{u_t} = (C_{1u}+C_{2u})\frac{r_c}{r_t}$$

이며, 이값을 $\overline{d'_te'_t}$로 잡고 C_{2f}=一定인 線과의 交點을 e_t라면 $a_tb_te_t$는 出口의 速度線圖이다. 任

意의 r에서의 速度線圖도 같은 方法으로 定하여 지며 α_1, α_2 및 β_1, β_2의 變化를 알 수 있다. 그림 6은 $\alpha_1=20°$, $\rho_c=0.5$, $\xi_c=1.0$인 경우의 블레이드 밑, 中央 尖端의 速度線圖이다.

블레이드 入口角, 出口角의 變化狀態는 그림 7에 實線으로 表示하였고 破線의 自由渦블레이드와 比較하였다.

V. 反動度가 一定한 블레이드

自由渦블레이드 및 α_1=一定인 블레이드는 入口角 β_1이 半徑方向으로 크게 變한다.

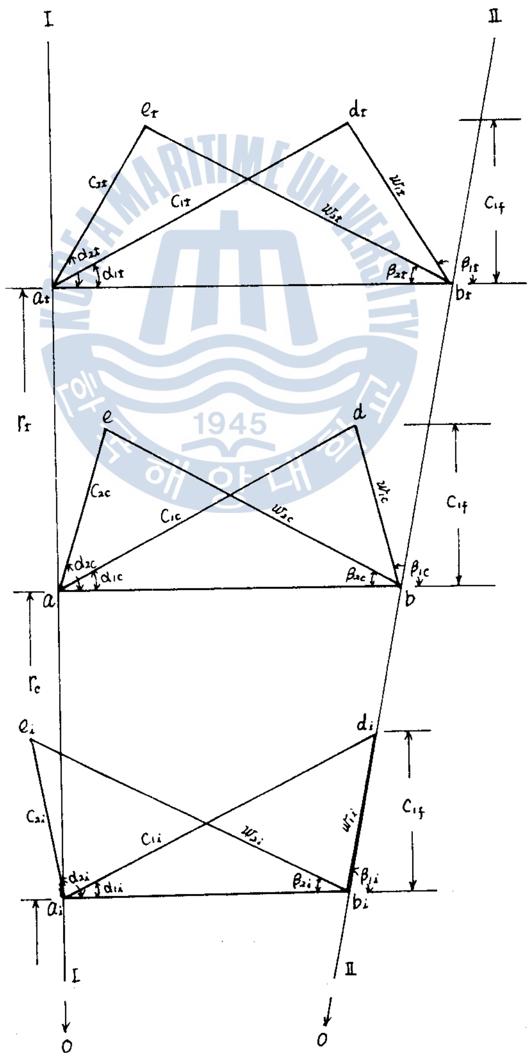


그림 8

$\frac{r}{r_c}$	$\beta_1=\alpha_2$	$\beta_2=\alpha_1$	ρ
0.8	66°30′	21°20′	0.5
0.9	88°20′	20°35′	0.5
1.0	100°00′	20°00′	0.5
1.1	115°35′	19°40′	0.5
1.2	125°50′	19°20′	0.5

표 3

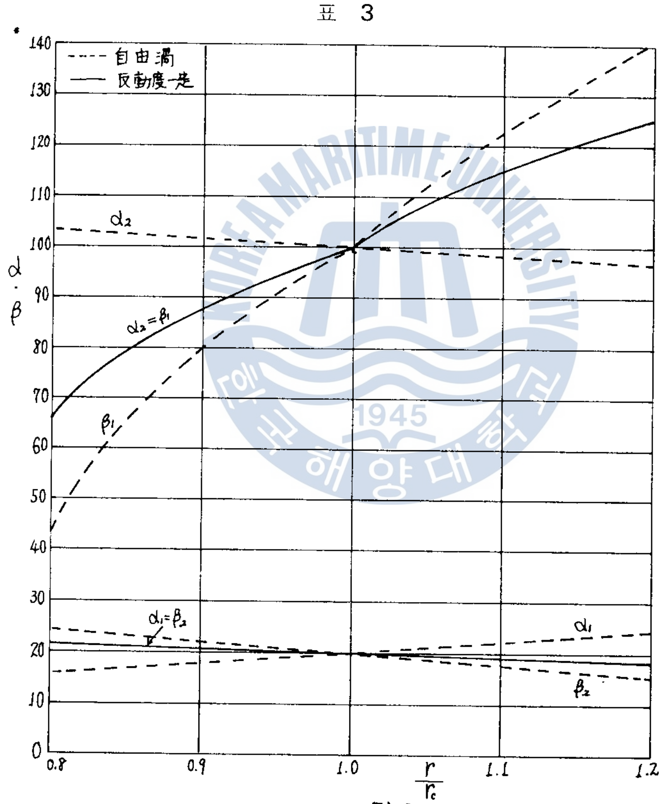


그림 9

즉 비틀림이 큰 形狀으로 된다. 그림 8은 反動度 $\rho_c=0.5$ $\xi_c=1.0$인 경우의 速度線圖를 表示하였다. 블레이드 中央 r_c에서 入口速度線圖 abd가 주어지면 $\rho=0.5$의 關係로부터 回轉블레이드 出口速度線圖 abe는 相似로서 쉽게 구하여 진다. 任意의 r에서의 速度線圖에 對해서는 軸流速度를 一定하게 한다. ※(附錄) 또 半徑上 에서의 $(W)_r$=一定 이라면

$$(W)_r=\frac{u}{g}(C_{1u}-C_{2u})=\text{一定}$$

따라서 $\overline{e_t d_t}=\overline{e d_\cdot}\left(\frac{r_c}{r_t}\right)$로 되어 $C_{2f}=$一定인 線上의 中央에 $\overline{e_t d_t}$의 點을 定하면 尖端에서의 線圖는 定해진다. 이와 같이 해서 求한 블레이드 入口角, 出口角을 自由渦블레이드와 比較하여 그림 9에 表示하였다. 이結果에 의하면 入口角β_1의 變化는 自由渦블레이드에 比해서 아주작고, 出口角 β_2는 거히 一定이므로, 비틀림이 작은 블레이드形임을 알 수 있다.

Ⅵ. 結 論

最終段落의 블레이드 길이가 半徑에 比해 큰 경우에는 蒸氣의 흐름에 따른 마찰 및 渦流의 損失, 블레이드 入口端에서의 衝突, 틈에서의 漏洩等 諸要因을 無視하고 運動量 理論을 適用한 流路理論 解析으로 다음 結論을 얻을 수 있다.

1) 自由渦블레이드에서 β_1은 半徑方向으로 變化가 크고 β_2, α_2의 變化는 比較的 작게되지만 비틀림이 큰 形狀으로 된다.

2) 固定블레이드 出口角 $\alpha_1=$一定인 경우는 自由渦블레이드와 거히 비슷하나 半徑方向의 變化量은 若干적다.

3) 反動度가 一定인 블레이드는 自由渦블레이드에 比해 β_1의 變化는 아주적고, β_2는 거히 一定이므로 비틀림이 적은 形狀으로 된다.

※〈附 錄〉

※ 回轉블레이드 出口의 軸流速度 C_{2f}에 對한 考察

回轉블레이드 出口, 入口의 對應하는 半 徑上에서의 Energy 式은

$$P_1V_1\frac{k}{k-1}+\frac{C_1^2}{2g}=P_2V_2\frac{k}{k-1}+\frac{C_2^2}{2g}+(W)_r \cdots\cdots(a)$$

蒸氣는 軸에 平行하게 흐르고 半徑方向의 分速度를 갖이 않는다고 하면

$$C_1^2=C_{1f}^2+C_{1u}^2, \qquad C_2^2=C_{2f}^2+C_{2u}^2$$

이므로

$$P_1V_1\frac{k}{k-1}+\frac{1}{2g}(C^2_{1f}+C^2_{1u})=P_2V_2\frac{k}{k-1}+\frac{1}{2g}(C^2_{2f}+C^2_{2u})+(W)_r$$

Energy의 半徑方向의 變化는 r로 微分하여

$$\frac{k}{k-1}\left(V_1\frac{dp_1}{dr}+p_1\frac{dV_1}{dr}\right)+\frac{1}{g}\left(C_{1f}\frac{dC_{1f}}{dr}+C_{1u}\frac{dC_{1u}}{dr}\right)$$
$$=\frac{k}{k-1}\left(V_2\frac{dp_2}{dr}+p_2\frac{dV_2}{dr}\right)+\frac{1}{g}\left(C_{2f}\frac{dC_{2f}}{dr}+C_{2u}\frac{dC_{2u}}{dr}\right)+\frac{d(W)_r}{dr}\cdots(b)$$

蒸氣는 半徑方向으로 $PV^k=$一定인 關係로 變한다면

$$\frac{dV}{dr}=-\frac{V}{kp}\frac{dp}{dr}$$

이므로 (b)式에 代入하면

$$gV_1\frac{dp_1}{dr}+C_{1f}\frac{dC_{1f}}{dr}+C_{1u}\frac{dC_{1u}}{dr}=gV_2\frac{dP_2}{dr}+C_{2f}\frac{dC_{2f}}{dr}+C_{2u}\frac{dC_{2u}}{dr}+g\frac{d(W)_r}{dr}\cdots(c)$$

또 假定에서 $\frac{d(W)_r}{dr}=0$, $\frac{dC_{1f}}{dr}=0$ 이고

環狀流路의 平衡式인

$$\frac{dp}{dr}=\frac{1}{gV}\left(\frac{C^2_u}{r}\right)$$

을 利用하면

$$C_{1u}\frac{dC_{1u}}{dr}+\frac{C^2_{1u}}{r}=C_{2f}\frac{dC_{2f}}{dr}+C_{2u}\frac{dC_{2u}}{dr}+\frac{C^2_{2u}}{r}\cdots\cdots(d)$$

또한

$$\left.\begin{array}{l}u=C_{1u}+C_{2u}\\ \frac{u}{g}(C_{1u}-C_{2u})=(W)_r\end{array}\right\}\text{로 부터}$$

$$C_{1u}=\frac{1}{2}\left\{u+\frac{g(W)_r}{u}\right\}$$

$$C_{2u}=\frac{1}{2}\left\{u-\frac{g(W)_r}{u}\right\}$$

을 (d)式에 代入하면

$$C_{2f}\frac{dC_{2f}}{dr}=\frac{g(W)_r}{r}$$

$$\therefore\ \frac{dC^2_{2f}}{dr}=\frac{2g(W)_r}{r}\cdots\cdots(e)$$

$r=r_c$에서 $C_{2f}=(C_{2f})_c$라 定하고 윗式을 積分하면

$$C^2_{2f}-(C_{2f})^2_c=2g(W)_r\log\frac{r}{r_c}\cdots\cdots(f)$$

(f)式에서는 軸流速度는 半徑方向으로 增加하는 것이되며 $C_{2f}=$ 一定의 假定은 成立하지 않으나, 實際 蒸氣의 流線은 軸에 平行하지 않고 半徑方向의 分速度를 考慮하면 그림 A와 같이 波形으로 흐르게 된다. 回轉블레이드 前後의 流線의 曲率 半徑을 R_1, R_2라 하면 遠心力 C^2_{1f}/R_1, C^2_{2f}/R_2이 作用한다. 따라서 (d)式에서

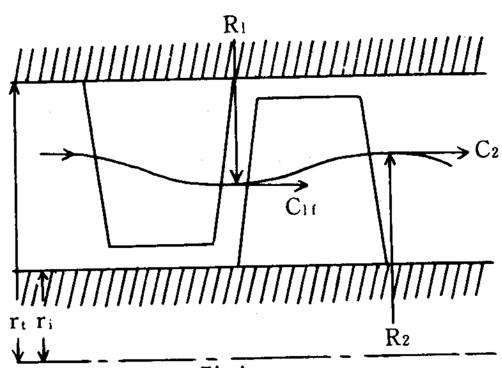


그림 A

$$C_{1u}\frac{dC_{1u}}{dr}+\frac{C^2_{1u}}{r}-\frac{C^2_{1f}}{R_1}=C_{2f}\frac{dC_{2f}}{dr}+C_{2u}\frac{dC_{2u}}{dr}+\frac{C^2_{2u}}{r}+\frac{C^2_{2f}}{R_2}\cdots\cdots\cdots\cdots(g)$$

(g)式에

$$C_{1u}=\frac{1}{2}\left\{u+\frac{g(W)_r}{u}\right\}$$

$$C_{2u}=\frac{1}{2}\left\{u-\frac{g(W)_r}{u}\right\}$$

關係를 代入하면

$$\frac{dC^2_{2f}}{r}=\frac{2g(W)_r}{r}-2\left(\frac{C^2_{1f}}{R_1}+\frac{C^2_{2f}}{R_2}\right)\cdots\cdots\cdots\cdots(h)$$

(h)式은 (e)式보다 C_{2f}의 變化가 작게 됨을 알 수 있다.

(h)式의 값을 求할려면 R_1, R_2의 分布를 把握할 必要가 있으나 右邊의 값은 적고, C_{2f}의 變化가 작으므로 $C_{2f}=$ 一定이라 假定할 수 있다.

參 考 文 献

1) 土居政吉 舶用蒸氣タービン講義 1971. p104—114
2) 淺野友一 流體工學 1968 p114—117
3) フリウゲル 蒸氣タービン 1962. p77—113
4) 中西浩・中平高明 蒸氣タービン用羽根の 强度設計 1973. 1 機械設計
5) 日本機械學會編修 機械工學便覽 1960. p13—75
6) 日本機械設計便覽編集委員會 機械設計便覽 1973. p1916—1917
7) CHURCH Steam Turbine 1950. p219—246
8) JOHNF. Lee Theory and Design of Steam and Gas Turbines 1954. p153—154 238—243
9) DR. STODOLA Steam and Gas Turbines 1945. p968—1012