

# 船體粗度에서의 抵抗增加의 評價에 關한 研究

朴命圭\* · 金東津\*\* · 李承浩\*\*

A study on the Valuation of Resistance increase due to any quality at hull roughness

*Park, Myung-Kyu · Kim Dong-Jin · Lee, Seong-Ho*

## 目 次

1. 서론	Nomenclature
2. 부가항력 (added drag)	Reference
3. 속도 profile의 결정	Reference of Technical Report
4. 속도 손실함수 (roughness function, Velocity loss function)	Appendix 1. Appendix 2.
5. 결론	Technical Report

## Abstract

This paper deals with the method of determining the drag of hull surface which has any quality of roughness.

The method consists mainly of the theoretical point of view, then the theory enables the drag coefficient to be calculated at full scale.

The hydrodynamical roughness function of hull surfaces  $\Delta U$ , affected by the hull roughness are considered as to two cases, smooth surface and rough surface case separately.

The inadequacy of a single parameter to define hull roughness is discussed and thus an additional texture parameter is proposed.

\* 한국해양대학

\*\* 현대선박해양 연구소

## 1. 서론

본 연구는 어느 정도 (any quality)의 거칠기 (roughness)를 갖는 선체 표면 (hull surface)의 항력 (drag)을 결정하는 방법을 다루고 있다. 방법은 실험적이기 보다는 이론에 치중하여 항력계수 (drag coefficient)를 실제 크기 (full scale)에서 결정하기 위하여, 선체의 거칠기 (hull roughness)로 인해 영향을 받는 선체의 거칠기 함수 (hull roughness function)  $\Delta U_+$ 를 매끄러운 표면 (smooth surface)과 거친 표면으로 분리하여 결정하였다. 그리고 선체의 거칠기 (smooth roughness)로 인한 효과에 대하여 한개의 parameter인 거칠기의 높이 (roughness height)만으로 해석을 하는 경우에 일어날 수 있는 적합성여부에 대해 먼저 조사하고 이에 따라 거칠기에 따른 항력 (drag) 증가는 texture parameter를 고려한 경우의 해석을 행하였다.

## 2. 부가항력 (added drag)

선체의 추진성능 (propulsive performance)은 tank test로부터 구해질 수 있지만 아직은 실제 크기 (full-scale)에서의 점성항력 (viscous drag)의 실제값을 제공하지 못하고 있다. 이는 모형시험 결과를 실선의 값으로 확장함에 있어 거칠기의 차를 보상하지 못하는데 그 이유가 있다. 점성항력은 선체저항 요소들 중의 하나로 추진성능을 결정하는데 있어서 가장 중요시 되어야 할 요소이며 경제적인 보상을 평가하는 기준으로도 된다. 선체표면의 거친 (rough) 경우, 많은 손실이 야기되는데 특히 연소 소비 (fuel consumption)면에서의 거칠기 (roughness)의 효과는 상당하다. 이것에 대한 평가는 본 연구와 Technical Report의 이론적인 방법으로 부터 구해진다. 현재 본 연구와 Alternating-Direction Implicit (A. D. I) method를 이용한 3차원 물체의 roughness를 고려하지 않은 경계층과 wake에 관한 해석<sup>1)</sup>은 본 연구의 결과를 바탕으로 하여 roughness까지 고려한 실제크기에서의 점성항력을 구하는 수단으로 유용하게 응용될 수 있을 것이다.

Full scale에서의 표면 거칠기를 고려한 점성항

력을 규명하기 위해서는 표면 거칠기로 인한 부가항력과 함께 매끄러운 면에 대한 속도 profile을 알 필요가 있다. 속도 profile 즉, 유속의 흐름을 따라 주어진 위치에서의 시간에 대하여 평균을 취한 속도 분포 (time-mean velocity profile)을 얻기 위해서는 편미분 방정식 (partial differential equation) 형태의 경계층 방정식 (boundary layer equation)을 풀어야 할 것이다.

이때 거친 표면 (rough surface)을 묘사하는데 있어서, 거칠기의 실제높이  $h(x_1, y_1)$ 는 아주 불규칙적이기 때문에 상당한 어려움이 있다.

Grigson [1]은 Clauser function ( $\Delta u_+$ )을 조사함으로써 다음과 같은 2가지 사실을 밝혀냈다.

- 1) 각각의 거친표면 (rough surface)은 자체로서 유일한 함수인  $\Delta u_+$  갖고 있고
- 2)  $\Delta u_+$ 의 곡선은 아주 다양할 정도로 여러가지 모양을 갖는다.

이와같이 여러가지의 변화를 갖고 있는 곡선은 단지 형상의 기하학적인 묘사만으로는  $\Delta u_+$ 를 결정하는데 문제가 있을 수 있겠다.

1987년 ITTC performance prediction에서는 model basin test로 부터 한개의 추진기를 갖는 선박 (single-screw ships)의 추진 성능에 대한 새로운 방법을 채택하였다.

이 방법에서는 실제크기에서 점성항력 계수 (full-scale viscous drag coefficient)를 구하는 식을 소개하였다.

$$C_{FR} = (1+K) C_{FS} + \Delta C$$

여기에서 형상계수 (form factor) K는 model의 towing test로 부터 얻어지고 거칠기 (roughness)에 기인한 항력계수 (drag coefficient)의 증가  $\Delta C$  (1978년 ITTC)는 다음과 같이 주어진다 [17]

$$10^3 \Delta C = 105 (h/L)^{1/3} - 0.64$$

여기서 h는 선체 표면에서 50mm 길이의 sample ( $R_q(50)$ )을 택하여 평균을 취한 높이이다.

일반적으로 조선소에서는 1987년 ITTC식을 사용하여 실제크기 (full scale)에서  $C_{FR}$ 을 추정하고 있지만 식 자체에 불합리한 점을 갖고 있다. 그것은 부가항력 (added drag)은 Reynolds number

$V \cdot L/v$ 에 따라 변화하게 되는데 이를 고려해 주고 있지 않기 때문이다.

1984년 17차 ITTC에서는 1978년 ITTC식을 수정하여 다음과 같은 경험식을 사용토록 추천하고 있다.

$$10^3 \Delta C = 44 \{ (h/L)^{1/3} - 10 R_n^{-1/3} \} + 0.125$$

그러나 1984년 ITTC의 식도 1978년 ITTC의 식과 마찬가지로 부가항력(added drag)은 단순히 거칠기의 높이에만 영향을 받는다는 가정을 갖고 있는 식이다. 그렇다면 동일한 속도에서 평균적으로 같은 높이를 갖고 있는 모든 sister ship은 같은  $\Delta C$ 를 갖게 된다는 것인데 이러한 해석의 적합성 여부에는 의문의 소지가 있다.

Fig. 1은  $\Delta C$ 와 거칠기의 높이와의 관계를 나타내고 있다.

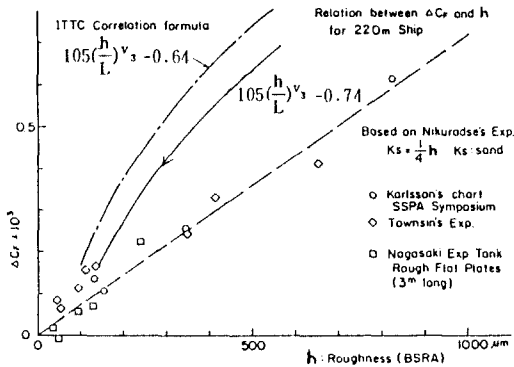


Fig. 1 Relationship between  $\Delta C$  and roughness

이론적인 실제크기의 저항(full-scale resistance)를 구한다는 측면에서 거칠기(roughness)에 의해 문제시되는 점성항력의 physical key는 소위 표면(surface)의 거칠기함수(roughness function)  $\Delta u_+$ 이다.

본 연구의 목적은 drag를 지배하고 있는 Clauser function의 조사에 있다. 표본적으로 50mm 길이를 sample로 발췌하여 측정된 평균 높이  $R_t(50)$ 이  $R_t$

(50) < 250 $\mu m$ 으로 상대적으로 매끄러운(smooth) 경우 거칠기함수(roughness function)는 어떤 다른 parameter들과 마찬가지로  $R_t(50)$ 과 어떤 함수 관계를 가지는 것으로 되어 있고,  $R_t(50)$ 에 근거한 선체의 거칠기(average hull roughness,  $A \cdot H \cdot R$ )는 새로운 ships에 있어서 power penalties

$$\frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{P} \times 100\% = 5.8 \{ (K_1)^{1/3} - (K_2)^{1/3} \} \text{ (Bow-}$$

den and Davison formula)

여기서  $P$  = total power

$\Delta P_1$  = the difference in power for a rough ship

$\Delta P_2$  = the difference in power for a smooth ship

$K_1, K_2$  = the average hull roughness in microns for a rough and smooth ship respectively

와 연관하여 사용되고 있다.

또한 거칠기 함수와 거칠기의 형상이 다른데 기인한 parameters와의 관계를 조사하기 위하여 최근에 일련의 수정이 이루어지고 있고 surface가  $R_t(50) > 250\mu m$ 으로 상대적으로 rough한 경우는 거칠기 함수가  $h = R_t(50)$ 인 경우와 분명한 관계를 갖지 않는다는 것을 보이고 있다(7).

그런 이유로 본 연구에서는 surface가 rough한 경우와 smooth한 경우로 나누어 이론을 정리하였다.

### 3. 속도 profile의 결정

속도 profile은 유한차분법(finite difference method)을 이용하여 구할 수도 있으나 여기서는 별도로 적분법(integral method)으로 풀때 쓰이는 기법에 따라 속도 분포를 기술하였다. 이 방법을 사용할 경우 속도 profile의 결정이 경험식에 의하기 때문에 경험식의 정확성이 요구되는 단점이 있는 반면에 계산이 상대적으로 간편하고 속도 profile이 정확히 표시되면 아주 용이한 방법이라 생각되어 진다. 복잡한 3차원 물체를 제외한 2차원

이나 축대칭 회전체의 경우 비교적 근사한 값을 주고 있다(16).

문제를 거친 표면(rough surface)에서 생기는 난류(turbulent flow)에 대하여 생각하자.

Granvill (13)은 표면에 가까운 곳에서 similarity law (Appendix 1 참조)을 이용하여 속도 profile을 다음과 같이 차원 해석 하였다.

$$u/u_{fr} = f_3 \left( \frac{zu_{fr}}{v}, \frac{hu_{fr}}{v}, \frac{i_1}{h}, \frac{i_2}{h}, \dots \right) \quad (1)$$

$u_{fr}$ 은 마찰속도(friction velocity),  $h$ 는 거칠기의 높이(roughness height)에 대하여 선택한 측정치이고,  $i_1/h, i_2/h, \dots$ 는 무차원 계수이다.

$$\frac{u}{u_{fr}} = A \cdot \ln \frac{z \cdot u_{fr}}{v} + f_3 \left( \frac{h \cdot u_{fr}}{v}, \frac{i_1}{h}, \dots \right) \quad (3)$$

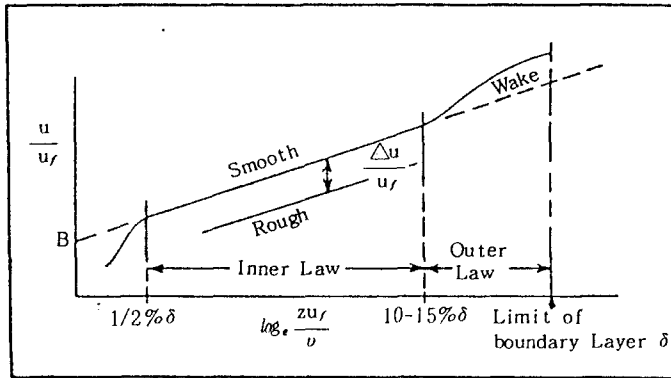


Fig. 2. The roughness function  $\Delta U/u_f$

Fig. 2와 같이 넓은 범위에 걸쳐 실시한 실험(4)에 의하면, 속도 profile은 매끄러운 표면(smooth surface)에 대하여 다음과 같은 Coles의 속도 profile을 갖는 것으로 알려져 있다.

$$\frac{u}{u_{fs}} = A \cdot \ln \frac{z \cdot u_{fs}}{v} + B_0 + \phi(z/\delta) \quad (4)$$

$\delta_\lambda < (z/\delta)$  범위에 걸쳐 있고, 점성저층(viscous sublayer)의 두께를 나타내는  $\delta_\lambda$ 는 Reynolds number가 큰 범위에서 대략  $0.001 \delta$  정도이고 세제항  $\phi$ 는 후류항(wake term)으로  $z/\delta < 0.15$ 인 경계층

실험(2, 3)에 의하면 거친 표면에 대해서는  $i_1/h$ 와 같은 무차원 계수 즉 second parameter가 필요시 되는 것을 보이고 있는 반면에, 통상적인 형상이나 어느 정도의 통상적인 형상에서는 하나의 계수(parameter)인 거칠기의 높이(roughness height)만으로 충분함을 보이고 있다.

Outer similarity law을 이용한 차원해석(dimensional analysis)은

$$\frac{U-u}{u_{fr}} = f_2 \left( \frac{z}{\delta} \right) \quad (2)$$

이고, (1) 식과 (2) 식이 겹치는 곳에서 다음과 같은 대수식이 만들어 진다.

(boundary layer)에서는 무시되어지고,  $R_x$ 가  $R_x > 3 \times 10^6$ 이고 압력이 일정하면  $\phi$ 는 일정한 값을 갖는 것으로 되어 있다.

(2) 식은 표면이 매끄럽(smoothness)거나 거침(roughness)에 상관없이 성립함을 실험(5, 6)에서 보여 주고 있다.

첨자 r과 s는 각각 거친(rough)경우와 매끄러운(smooth) 경우에서 이고,  $u$ 는 표면에서  $z$ 만큼 떨어진 곳에서 stream의 방향으로 long-time average velocity라고 하면 Coles의 속도 profile은 다음과 같다.

$$\frac{u}{u_{fr}} = A \cdot \ln \frac{z \cdot u_{fr}}{v} + Bo - \Delta u + \left( \frac{h \cdot u_{fr}}{v}, \frac{i_1}{h}, \dots \right) + \phi(z/\delta) \quad (5)$$

여기서  $\Delta u_+$ 는 Clauser's function, 즉 거칠기 함수(roughness function)를 의미하고,  $u_{fr}$ 는 마찰 속도(friction velocity),  $A$ 는 Von Karman's constant  $k$ 의 reciprocal이며,  $Bo$ 는 하나의 계수로 매끄러운 표면(smooth surface)의 식에서는 일정하다. 그리고  $\phi(z/\delta)$ 은 후류항(wake term)이다.

표면이 smooth 하다면 시간에 대하여 평균을 취한 속도(time average velocity)  $u$ 는  $u_{fr}$ 이  $u_{fs}$ 로  $\Delta u_+ = 0$ 이 된다는 점에서 단지 차이가 있다.

(4) 식과 (5)식을 비교하면, 거칠기(roughness)의 모든 효과는  $\Delta u_+$  항에 있고 (5)식은 매끄러운(smooth) 경우와 직접 비교되어 질수 있다.

$$u_{+s} - u_{+r} = \Delta u_+$$

즉, 매끄러운 표면과 거친 표면 사이의 차이는 무차원화된 속도 손실 함수(non-dimensional velocity loss function)  $\Delta u_+$ 이다.

Fig. 3은 거친 표면과 매끄러운 표면의 속도 분포차를 보여 주고 있다.

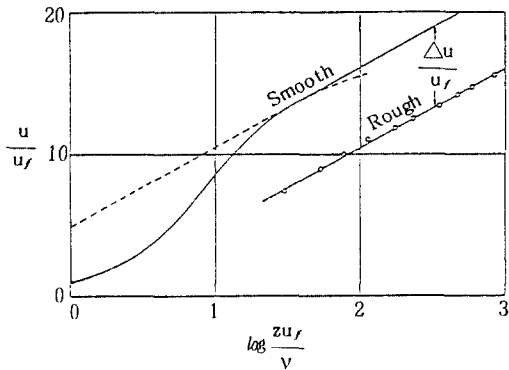


Fig. 3 Typical velocity profile for rough surface

식 (4)와 식(5)는 난류 경계층(turbulent boundary layer)뿐 아니라 충분히 발전된 난류(fully developed turbulent)에도 적용되어 진다.

$z = \delta$ 인 경우에 대하여 (5)식을 사용하여, 경계층  $\delta$ 과 운동량 손실  $\delta_2$ 와의 관계 그리고 경계층과

wake의 해석을 적용하면 실제 크기(full scale)에서 경계층에 따라 취해지는  $U/u_{fr}$  즉  $\xi$ 에 대한 식을 얻을 수 있다. (Appendex 2 참조)

물체 끝부분에서  $\xi$ 의 값을 수치적으로 풀어 나가면 항력 계수(drag coefficient)  $C_{FR}$  구해질 수 있다. 여기서  $C_{FR}$ 의 정확한 값을 얻기 위해서는 경계층과 wake의 해석도 중요하지만  $\Delta u_+$ 의 값을 정확히 결정하는 것도 중요하다 하겠다.

#### 4. 속도 손실 함수(roughness function, velocity loss function)

매끄러운 표면(smooth surface)으로 흘러 들어오는 무차원 속도(dimensionless velocity)  $u_{+s}$ 와 거친 표면(rough surface)에서의  $u_{+r}$ 과의 차이는 거친표면의 형상을 특정 지워주는 여러 parameter들의 함수로 얻어진다.

$$u_{+s} - u_{+r} = \Delta u_+ = f\left(\frac{h \cdot u_{fr}}{v}, \frac{i_1}{h}, \frac{i_2}{h}, \dots\right)$$

여기서  $h$ 는 거칠기(roughness)의 높이에 관한 것이고,  $i_1/h, i_2/h, \dots$ 는 형상을 특정 지워주는 parameter들이다.

일반적으로 널리 적용되어지는 속도 손실 함수(velocity loss function)는 다음과 같다.

$$\Delta u_+ = A \cdot \ln(1 + h_+ / m) \quad \dots \dots \dots (6)$$

식 (6)은 온전한 정도(moderate quality)의 표면에서는 아주 잘 맞고 있다.

여기서  $m$ 은 거칠기의 높이(roughness height)와는 다른 표면 형상의 parameter이다.

Fig. 4의 graph는 온전한 정도의 표면에 대한 속도 손실을 나타내고 있는데, 간단한 형태로 나타나 있다(1).

여기에 이용된 모든 data는 소위 '명백한 크기'(apparent amplitude)로 불리는 거칠기 높이(rou-

ghness height)에 근거를 두고 있어 이것들의 확실성은 의문시되고 있다. (6) 식을 보충하여 거칠기가 심한 경우에는 다음과 같은 (7)식을 통하여  $\Delta u_+$ 를 나타내는데  $h/m$ 의 비가 작은 경우에는 (6)식과 거의 같은 값을 갖는다.

$$\begin{aligned} \Delta u_+ &= A \cdot \ln F \\ &= A \cdot \ln(a'_0 + \sum_1^n a_n' (h_+/m)^n) \quad (7) \end{aligned}$$

대개의 표면은 (6)식의 범위 안에 있다.

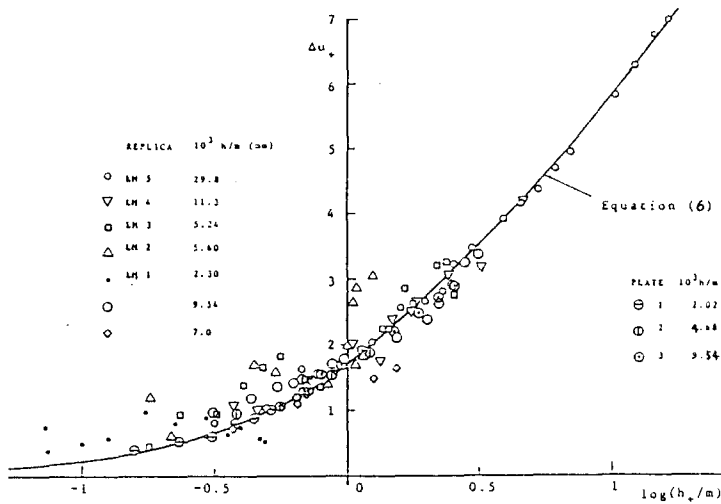


Fig. 4 Velocity loss function of hulls of moderate quality ; Equation (6) is obeyed.  
 Replica experiments of Lewkowicz, Musker and Das.  
 Plate experiments ; Kauczunski and Walderhaug

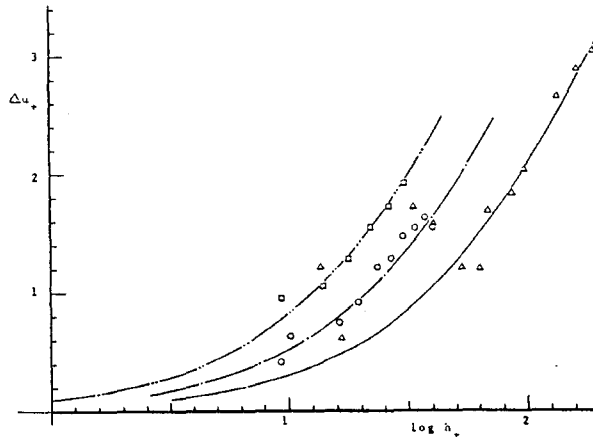


Fig. 5 Three different hull surfaces obeying equation (6).  
 The symbols indicat : △ surface (a) ; ○ surface (b) ; □ surface (c)

Fig. 5는 3가지의 다르게 덮혀진 표면에 대하여 다른 종류의 측정치를 보여주고 있다.

(a)는 pipe에서 공기를 사용하고, (b)는 duct에서 해수를 사용하고 그리고 (c)는 거친 표면(rough surface)에서 전단력과, 같은 조건에서 평탄한 표면(smooth surface)의 차이가 직접 주어지는 water tunnel에서 이뤄졌다. 각각의 표면(surface)에서  $\Delta u_+$ 는 단지  $h_+$ 의 유일한 함수를 갖는다.

Fig. 5에서 보여진 곡선들은 식(6)의 graph이고 이 곡선을 fitting 하므로써  $m$ 의 값을 얻을 수 있다.

거칠기 높이(roughness height)의 측정으로 50-mm sample들의 profile이  $h$  범위에서 사용 되어질때,  $h$ 와  $m$  값은 다음과 같다.

surface	(a)	(b)	(c)	(c)
$h$ (mm)	0.42	0.10	0.12	0.35
$m$	75	42	25	31
$10^3 C_{FR}$	1.69	1.63	1.67	1.77

3번째 행은  $Rn=10^9$ 에서 길이 200m의 plate에 대한  $C_{FR}$ 의 값이다. 또한 (d)는 문헌 [9]의 surface form이다. (a)와 (c)를 비교했을 때 비록  $ha=3.5hc$  일지라도 drag에는 큰 차이가 없다. (a)와 (d)를 비교하면  $ha$ 가  $hd$ 보다 클지라도  $C_{FR}(a)$ 는  $C_{FR}(d)$ 보다 약간 적은 값을 갖는다.

처음으로 Lewkowicz and Musker [9]는 속도손실 함수(velocity loss function)는 선체 거칠기(hull roughness)의 높이와 관계가 없다는 것을 밝혔다.

여기서 factor- $m$ 은 항력(drag)를 증가시키는데 있어서 높이(height)만큼 중요한 거칠기(roughness) 형상의 계수로 해석 되어진다.

$\Delta u_+$ 의 값은 항상 거칠기에 대한 test flow의 측정으로 부터 얻어지고 factor- $m$ 은  $\Delta u_+$ 를 측정하여 곡선을 fitting 하므로써 얻어진다.

Fig. 6은 17개의 서로 다른 표면의 Clauser function( $\Delta u_+$ )을 보이고 있다(8). 13개는 선체를 복제한 것이고, 나머지는 ship의 표면을 나타내고 있다. 각각의  $m$ 은 Fig. 5처럼 곡선을 fitting 하므로써 얻어진다.

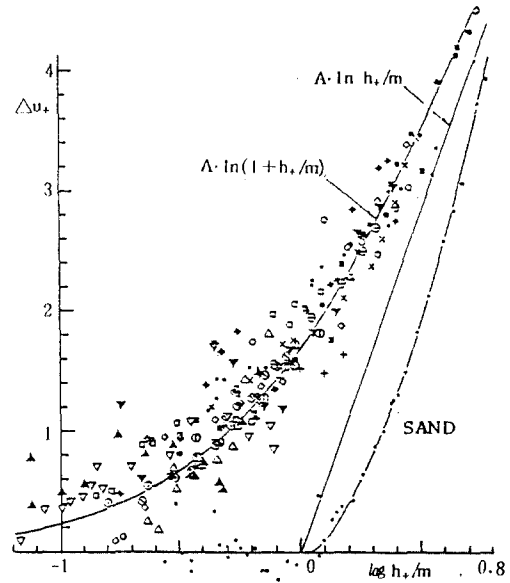


Fig. 6 Seven different painted surface obeying (6).

For determining drag, however, there are 17 Clauser functions and all are different.

The sand is Nikuradse's, with grain size 0.01mm

Table 1 : Details of coated surfaces of Fig. 6.

Surface	Symbol	Flow Experiment	Test Flow Geometry	Values of $h_+$ and $m$
1	○	Okuno,	pipe	300 22
2	◇	Nicholson		360 60
3	□	and Lewkowicz		310 120
4	○			390 60
5	▽			360 250
6	△			300 75
7	▲	Lewkowicz	pipe	250 110
8	▼	and Musker		420 75
9	◆			170 33
10	■			350 31
11	●			550 18.5
12	+	Musker and	pipe	160 22
13	×	Des		230 24
14	⊙	Kauczinsky and	test plates	80 41
15	⊕	Waiderhaug	in water	120 25
16	⊖		tunnel	200 22
17	⊗	Husa and Naess	duct	100 42

Log( $h_+/m$ )을 가로축으로 하면 모든 data는 (6)식에 따라 하나의 곡선으로 그을 수 있다. Fig. 6은  $\Delta u_+$ 가 실제크기(large scale)에서 plot되어진 것이며 (6)식이 매우 잘 맞는다는 것을 보여주고 있다.

여기서 경험에 의한 식을 소개하여 측정에 의한 (6)식과 비교하여 보기로 하자.

처음으로 Hama[15]는 (6)식을 다음과 같이 달리 표현하여 경험식을 얻었다.

$$\Delta u_+ = 5.66 \cdot \log (3.30 + k_s \cdot u_f / v) - 2.92 \dots \dots \dots (8)$$

(8)식은 다음과 같이 쓴다.

$$\Delta u_+ = 5.66 \cdot \log (1.006 + k_+ / m)$$

만약  $m = 3.28 (k / k_s)$ 이면 (6)식과 아주 비슷한 식이 된다.

여기서  $k$ 는 거칠기 입자(roughness element)의 실제 크기이며  $k_s$ 는 충분히 거친조건(rough condition)에서 같은 항력을 발생시키는 Nikuradse grains의 크기이다.

(8) 식을 colebrook roughness function이라 한다.

많은 이들 표면은 그것들의 형상에 있어서 매우 다르게 보이고 더우기 손실 함수(loss function)가 Colebrook roughness function라고 말할 수 있는 여러가지 기하학적인 모양들(features)에 관해서 완전히 알려지지 않고 있다.

(6)식에 의한 곡선과 grain 크기가 0.01mm로 uniform sand를 갖는 Colebrook function과 비교하면, sand 곡선은  $h_+ / m$ 에서 갑자기 "0"으로 떨어지고  $\Delta u_+$  이 "0" 근처에 있는 동안 계속적으로 아주작은 값을 갖는다. 역으로 Fig. 6은 허용되어 지는 거칠기의 현상이 실제 Colebrook roughness 에서는 일어나지 않는다는것을 분명히 보여주고 있다.

Table 1은 Fig. 6의 data와 다른 선체 표면에 대한  $h$ 와  $m$  값을 나타내고 있다.  $m$  값은  $h$ 와 관계되어지지 않고  $h$  값보다 더 넓게 퍼져 있다는 것도 알 수 있다.

Fig. 7은 같은 높이를 갖는 표면에서 거칠기의 형상에 따라 속도 손실의 변화되는 양을 보여 주고 있다.

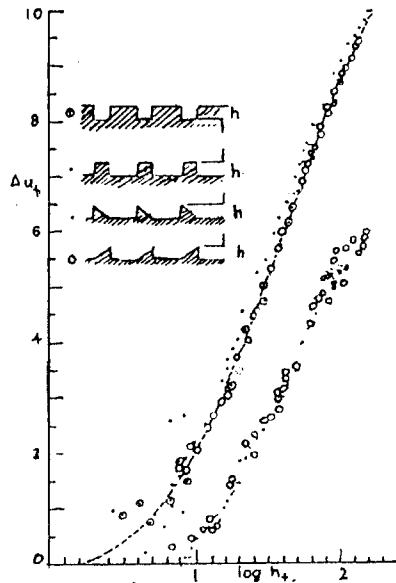


Fig. 7 Experiment of Streeter.

The surface profiles all have the same  $h$  and repetition length.

From the bottom : streeter Ia, I, III, and II. Upper set of data surfaces with rectangular ridges

손실함수 (Loss function) (6) 식이 취해졌을 때 표면 마찰계수 (skin friction coefficient)  $C_F$ 와  $C_{FR}$ 은 아주 간단한 식으로 부터 유도되어 질수 있다.

Table 2 : Values of  $m$  deduced from towing tests.

Surface	$\bar{h}$ , mm	$m$	$10^3 \bar{h} / m$ , mm
Y1	0.055	40	1.4
Y1V	...	...	1
Y1VA	...	...	1
Y2	0.055	55	1
Y2A	...	...	1
Y2P	...	...	1.2
Y6	0.07	30	2.3
Y8	0.085	70	1.2
Y9	0.15	60	2.5
Y10	0.19	70	2.7
Y11	0.29	105	2.75
Y12	0.48	115	4.2
Y7	1.0		not Colebrook
Y14	0.77		not Colebrook



$\Delta C(R_n, \Delta u_+)$ 에 대한 이론적인 곡선을 얻을 수 있고, 이 값들은 거친판과 매끄러운 판을 끌므로써 실험 결과와 비교되어 질 수 있다.

Grigson(1)의 곡선에 의하면, 12개의 거칠기를 갖는 판은 Colebrook 함수에 일치되고 있다는 것을 보여주고 있다. m의 값은 곡선을 fitting 함으로써 얻어진다. 이런 종류의 실험은 직접적인  $\Delta u_+$ 의 측정보다 덜 정확하다. 왜냐하면 파도가 발생하는

경우 실험치의 분산, 그리고  $h \cdot u_f/v$ 의 값의 범위가 보통 작기 때문이다.

Table 2는 h와 m의 값을 나타내고 있다.

Fig. 8은 Yokoo et al (10)의 실험 data을 이용하여 14개의 실험판에 대하여 보여주고 있다. 더 높은 거칠기를 갖는 표면 Y7이 더 낮은 높이를 갖는 Y14보다 끄는 실험결과로부터, 더 적은 항력을 갖는다는 것을 보여 주고 있다.

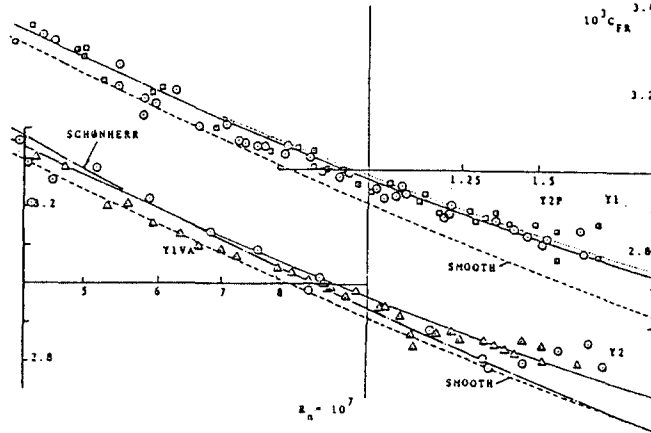


Fig. 8(a) Four test surfaces of Yokoo. Abscissae are  $R_n$  from  $4 \times 10^6$  to  $2 \times 10^7$ . Ordinates are  $10^3 C_{FR}$ . The curves are theoretical assuming the roughness is Colebrook.

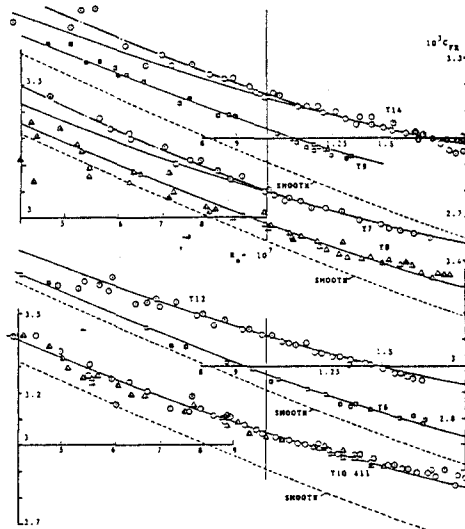


Fig. 8 (b) Eight test surfaces of Yokoo. Surfaces Y7 and Y14 are clearly not Colebrook ; compare the experimental curves (heavy) with the theoretical

### 5. 결론

$C_{FR}$ 을 이론적으로 구하는 과정중 경계층의 방정식 자체, 즉 수학적면에서 얼마나 근접한 식을 갖고 해석하는가가 중요하다.

그리고 종합적인 정확성에서, 속도손실 함수  $\Delta u_+$ 의 조사에 있다. 실제크기의 선체에 대한 항력(drag)을 평가하기 위해서 각각 실제 표면에서 서로 다른 값을 갖고 있는  $\Delta u_+$ 의 정확한 결정이 요구되어진다.

본 연구에서는  $\Delta u_+$ 를 경험식을 통하여 이론적으로 구하는 방법과 직접 조사에 의한 방법에 대하여 언급을 하였다.

Clauser 함수(function)의 모양에 영향을 주는 표면형상의 정도는 점성항력(viscous drag)을 결정하는데 있어서 거칠기의 높이만큼 중요하다. 그렇기 때문에 속도손실함수(velocity loss function)  $\Delta u_+$ 는 두개의 거칠기의 parameter인  $h$ 와  $m$ 의 함수로 표현된다.

$\Delta C$ 를 결정하기 위한 1987년 ITTC 공식은 과학적인 근거면에서 만족을 주고있지 못하다. 그 식은 다음과 같은 거칠기 높이에만 관계된다. 이에 대한 모순은 본 연구의 내용에서 인용한 실험에 의한 Data들로 보였다.

선체표면(hull surface)의 Clauser functions은 세로지은 선박의 물에감긴 표면에 대하여 quality의 제어(control)를 제공하기 위하여 조선소에서 측정되어져야하고 부가된 항력(added drag)을 지배하는 함수  $\Delta u_+$ 에 대하여 기술과 방법 그리고 coating types에 대하여 data banks로 만들어져야 하겠다.

### Nomenclature

A	= reciprocal of von Karman's constant
Bo	= constant in law of smooth boundary
$\alpha_0 \dots \alpha_n$	= coefficients in polynomials for F
$\Delta u_+$	= Clauser's function
$C_{FR}$	= drag coefficient of rough surface

$C_{FS}$	= drag coefficient of smooth surface
k	= height of grain, form factor
$\Delta C$	= increase in drag coefficient caused by roughness, $C_{FR} - C_{FS}$
$R_L, R_x$	= Reynolds unnumber, based on L, x L : Leng. of plate, x : coord. along surface with stream
$R_i$	= maximum peak-to-valley height
$R_i(50)$	= fifty-point height on sample of standard length
h	= range of height on 50-mm samples of profile
u	= long-time average velocity, $u_t = u/u_t$
$u_t$	= friction velocity
i	= any measure of height of roughness
L	= Length of waterline
$\delta$	= time-average thickness of turbulent boundary layer
$\zeta$	= $U/u_t$
v	= kinematic viscosity
$k_s$	= height of Nikuradse sand grain
$\delta_2$	= momentum thickness
m	= second parameter of roughness
z	= coordinate normal to surface, $z_+ = au_t/v$
U	= velocity of free stream of ship
Suffix	
s	= smooth case
r	= rough case
+	= nondimensional quantity
Texture Parameter	
m	: Text parameter (= 2nd parameter)
h	: Height (= 1st parameter)

### Reference

1. Christopher Grigson, "The Drag at Ship Scale of Planes Having Any Quality of Roughness", Journal of Ship Research, Vol. 29, No. 2, pp. 99-104. (June 1985)

2. Todd, F. H., "Skin Friction and the Effects of Surface Roughness", Trans. SNAME, Vol. 59, pp. 315-374 (1951).
3. Lewkowicz, A. K. and Musker, A. J., "The Surface Roughness and Turbulent wall Friction of Ship Hulls", Proceedings, International Symposium on the Viscous Resistance of Ships, Paper 9, SSPA, Gothenberg, Sweden (1978).
4. Hussain, A. K. M. F. and Reynolds, W. C., "Measurements in Fully Developed Channel Flow", Journal of Fluids Engineering, PP. 568-580 (1975).
5. Clauser, F. H., "The Turbulent Boundary Layer in Adverse Pressure Gradients", Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 21, pp. 333-358 (1954).
6. Clauser, F. H., "The Turbulent Boundary Layer", Advances in Applied Mechanics, Vol. 4 (1956).
7. Walderhaug H., "Paint Roughness Effects of Skin Friction", ISP 33, 382 (June 1986).
8. Christopher Grigson, "The Full-Scale Viscous Drag of Actual Ship Surface and Effect of Quality of Roughness on Predicted Power", Journal of Ship Research, Vol. 31, No. 3, pp. (189-206 (Sept. 1987)).
9. Lewkowicz, A. K. and Musker, A. J., "The Surface Roughness and Turbulent Wall Friction on Ship Hulls ; Interaction in the Viscous Sublayer", Paper 10, International Symposium on Ship Viscous Resistance, SSPA, Gothenburg, Sweden (1978).
10. Yokoo, K., Ogawa, A., Terao, T., Sasajima, H., and Nakato, M., "Roughness of Hull Surface and Its Effect on Hull Friction", Paper 17, Ship Research Institute, Tokyo (Sept. 1966).
11. R. L. Townsin, "Estimating the Technical and Economic Penalties of Hull and Propeller Roughness", SNAME Transactions, Vo. 89, pp. 295-318 (1981).
12. Johansson, L-E, "The Local Effect of Hull Roughness on Skin Friction". Trans. RINA 127 (1985).
13. Paul S. Granville, "Mixing-Length Formulation for Turbulent Boundary Layers over Arbitrarily Rough Surfaces", Journal of Ship Research, Vol. 29, No. 4, pp. 223-233 (Dec. 1985)
14. R. L. Townsin, "Efficient Underwater Surfaces", Trans Marin (TM), Vol. 99, Paper 30 (1987).
15. Hama, F. R., "Boundary Layer Characteristics for Smooth and Rough Surfaces", Trans. SNAME, Vol. 62, 1954, pp. 333-358.
16. 조 규중, 이 승호, "Calculation of Thick Turbulent Boundary Layer and Potential Flow about Elongated Boidies of Revolution", 특별 강연회 및 추계 연구 발표회 논문, 대한조선학회 pp. 137-152.
17. 박 명규, 김 용직, "On the Margin Conception And Design points in ship's propeller Design", 한국박용기관학회 12권 제 37호, 1988, pp.141-152.
18. HIMENO, NOUDO, "Effect of Wavy Roughness on Wall Turbulene Damping," J. Kansai Soc. N. A., Japan, No. 209, June 1988.

## REFERENCE OF TECHNICAL REPORT

1. V. S. Pratap and D. B. Spalding  
"Fluid flow and heat transfer in three-dimensional duct flows" Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 19, 1979.
2. H. C. Chen and V. C. Patel  
"Calculation of trailing-edge, stern and wake flow by a time-marching solution of the partially-parabolic equations"  
IIHR report No. 285, 1985.
3. S. H. Kang and K. J. Oh

- “Numerical calculation of three-dimensional viscous flows over a barge type ship stern by semi-elliptic equations”  
Proc. of Seminar on Ship Hydrodynamics, Seoul N. Univ., 1988.
4. S. Huang and I., D. Shou  
“A stream iteration method for computing the three-dimensional turbulent flow around the stern and in the wake of ship”  
2nd Int. Sym. on Ship Viscous Resistance, 1985.
  5. H. C. Raven and M. Hoekstra  
“A parabolized Navier-Stokes solution method for ship stern flow calculation”  
2nd Int. Sym. on Ship Viscous Resistance, 1985.
  6. Wolfgang Rodi  
“Turbulence models and their application in hydraulics”  
IAHR (International Association for Hydraulic Research), 1984.
  7. V. C. Patel and M. C. Richmond  
“Pressure gradient and surface curvature effects in turbulent boundary layers”  
AIAA-78-1301.
  8. H. C. Chen and V. C. Patel  
“Practical near-wall turbulence models for complex flows including separation”  
AIAA-87-1300.
  9. J. K. Hodge, S. A. Leone and R. L. McCarty.  
“Noniterative parabolic grid generation for parabolized equations”  
AIAA Vol. 25 No. 4, 1986.
  10. Jolen Flores  
“Convergence acceleration for a three-dimensional Euler/Navier Stokes zonal approach”  
AIAA Vol. 24 No. 9, 1986.
  11. J. Eddie Welch, Francis H. Harlow, John P. Shannon and Bart J. Daly “The MAC method : a computing technique for solving viscous, incompressible transient fluid flow problems involving free surfaces” Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1966.
  12. Ryusuke Yamazaki and Kuniharu Nakatake  
“Theoretical approach to propulsive performance of ships on a still water”  
Kyushu University, Fukuoka, Japan, 1980.
  13. V. C. Patel, L. Landweber, A. T. Chwang, F. Stern, and H. C. Chen “Ship hydrodynamics research at Iowa Institute of Hydraulic Research 1982~1987”  
IIHR Reprot No. 316, 1987.
  14. Joe F. Thompson, Zahir U. A. Warsi and C. Wayne Mastin  
“Boundary-fitted coordinate systems for numerical solution of partial differential equations-A review.”  
J. Comp. Physics Vol. 47, 1982.
  15. H. C. Raven  
“Separation criteria for three-dimensional boundary-layer calculations”  
AIAA Vol. 22 No. 4, 1983.
  16. Takio Hotta and Shuji Hatano  
“Turbulence measurements in the ship stern boundary layer of a tanker model”  
J. Society of Naval Architect of Japan Vol. 157, 1985.

附 錄

Appendix 1).

임의의 거친 표면의 근접부분을 층분개수의 length factor  $k, k_1, k_2, \dots$ 로 정의 할 때 난류의 shear flow에 대한 (inner) similarity law 혹은 law of wall은 Reynolds no.의 mode로서

$$\frac{u}{u_f} = f[z^*, k^*, T]$$

혹은

$$= f\left[\frac{z}{k}, k^*, T\right]$$

로서 나타낼 수 있다.

$$\text{여기서 } z^* = u_f z / \nu, k^* = U_i \cdot k / \nu$$

roughness Rey. no.

$$u_f = \tau_w / \rho \text{ (friction velocity)}$$

$$T = k/k_1, k_1/k_2, \dots \text{ (roughness texture)}$$

$u$ 는 streamwise mean velocity component,  $\tau_w$ 는 wall shear stress이고  $z$ 는 rough wall에서 normal distance이다.

한편, turbulent shear layer의 바깥 부분에 대해서는 similarity law는 단순히 상대위치의 함수인 velocity defect의 함수로 나타내진다.

$$\frac{U-u}{u_f} = f\left[\frac{z}{\delta}\right]$$

여기서,  $U$ 는 shear layer의 두께  $\delta$ 의 바깥 부분에서의 streamwise velocity이다.

Outer law는 실험에 의해서 roughness에 무관계 함이 밝혀져 있다.

그러나, roughness에 따라 변하는  $u_f$ 에 간접적으로 관계되어 있다.

Outer law는 흐름이 laminar에서 turbulent로 천이되어 전의 smooth나 rough surface에서 Reynolds no. 가 낮은 범위에서 변하는 것에 주의할 필요가 있다.

Appendix 2)

$\Delta u_+$ 가 식 (7)과 같이 정의될 때 eq. (5)는 경계치의 값 즉, 경계층 경계에서의  $z=\delta, u=U$ 로 치환하여 쓸 수 있고, 경계층 두께  $\delta$ 와 운동량 두께  $\delta_2$  사이의 관계, 그리고 운동량 적분방정식을 도입하면 3개의 방정식이 얻어지고, 이로부터 다음의  $\xi = U/u_f$ 과  $R_x$ 사이의 관계식이 유도된다.

$$\frac{K_0}{A} \int_{\xi_0}^{\xi_L} \exp(\xi/A) \{ (C_1 \xi^2 - C_2 \xi + AC_2) \}$$

$$(a_0 + \sum_1^N (a_n / \xi^n)) - A(C_1 \xi - C_2)$$

$$\sum_1^N (a_n / \xi^n) \} d\xi = R_L - R_0 \quad (a)$$

여기서, 물체의 가상 원점에서  $R_x = R_0 = 0$ 이고  $\xi_0 = C_2/C_1$ 이다. 또한 적분 기호속의 integrand  $\xi$ 는 그 상한치  $\xi = \xi_L$ 에 비해  $\xi = \xi_0$ 는 매우작아 적분시에는 무시되어 식 (a)의 적분치는 다음과 같이 된다.

$$k_0 \exp(\xi_L/A) \{ a_0 [C_1 \xi^2 - (2AC_1 + C_2) \xi_L$$

$$+ 2A(AC_1 + C_2)] + \frac{1}{A} [\beta_1 \xi_L + \beta_0$$

$$+ \sum_1^{N-1} \beta_{-n} \xi_L^{-n}] \} + \frac{k_0 B_1}{A} (\psi + \ell_n \xi_L)$$

$$= R_L \quad (b)$$

$$\psi = \sum_1^{\infty} \frac{1}{n} \frac{1}{n!} \left(\frac{\xi_L}{A}\right)^n$$

$$a_n = a_n' (R_i/m)^n, \quad R_i : \text{Rey. no. based on roughness}$$

$$k_0 = \exp[-(B_0 + \phi(1)/A)]$$

상기의 관계식에  $A=1/0.41$ ,  $Bo = 5.0$ ,  $\phi = 0.55 A (1 - \cos(\pi z/d))$ 를 취하면  $C_1=3.78$ ,  $C_2=25.0$ 으로 된다. 계수  $B_1, \beta_1, \dots, \beta_{(N-1)}$ 은 finite series ( $i/m$ )의 계수로  $R_i/m$ 의 함수로 되어 있다.

$\zeta_L$ 은 식 (b)에서 구해지고 따라서 항력계수 (drag-coefficient)는 다음과 같이 된다.

$$C_{FR} = \exp(\zeta_L/A) \frac{2k_o}{A} (C_1 - C_2/\zeta_L) \times (a_0' + \sum_1^N a_n' (R_i/m)^n (1/\zeta_L)^n) \quad (c)$$

(TECHINICAL REPORT)

3차원 물체인 선체의 경계층해석을 위해서 해결되어야 할 가장 중요한 문제로는 그 유동의 특성을 잘 나타낼수 있는 지배방정식이 될 것이며, 다음으로는 난류모델, coordinate system과 거기에 따르는 grid generation, numerical scheme, 그리고 separation등 선미에서 자주 일어나는 현상등이 있을 것이다. 따라서 다음과 같이 5가지로 축약할 수 있다.

가. Partially-Parabolic Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation

Navier-Stokes eq.의 solution 중 full elliptic solution에서 first order boundary layer theory의 solution까지 많은 방식 가운데, first order boundary layer theory는 ship stern과 wake region에서 flow에 대한 정확한 picture를 주지 못하고 있다. 그 이유는 경계층이 갑자기 두꺼워지기 시작하는 배의 선미에서는 얇은 경계층의 가정에 무리가 있기 때문에 선미부 후방의 flow에 대한 해석은 두꺼운 경계층을 가정하여 풀어야 할 것이다. 두꺼운 경계층에 대한 여러 approach중 가장 많이 사용하는 방법은 full Navier-Stokes eq.에서 주 유동방향의 점성확산항만을 무시한 준타원형방정식이며, 이러한 방정식은 Pratrapp and Spalding에 의해서 덕트 내의 운동에 처음 적용되었으며 최근 선체에 대해

적용된 것으로 대표적인 것은 Chen and Patel이 있으며 국내에서는 Kang등에 의해 시도된 바 있다.

나. Numerical Scheme

Full Navier-Stokes eq.중의 convective transport term  $\phi_{\xi\xi}$  항을 생략하면 주 유동방향인  $\xi$  방향에서 이들 식은 parabolic이지만 주 유동에 직각인  $\eta-\xi$  면에서는 elliptic으로 된다. 이들 각각의 cross-section에서 flow의 elliptic nature를 올바르게 규명하기 위하여는 partially-parabolic transport equation을 풀기 위하여 확장되어진 finite-analytic scheme을 사용하여 차분화하게 되며 이차분방정식에 A. D. I. method를 적용하여 계산한다.

다. Body fitted Coordinate와 Grid Generation

실제 application상 선체의 형상은 특히 선수미에서 아주 복잡하기 때문에 basic orthogonal coordinate를 적용하기에는 편리하지 못하다. 발표된 문헌에 의하면, 동일한 equations과 turbulence model 그리고 같은 numerical scheme을 사용하더라도, 서로 다른 coordinate를 사용함에 따라 계산된 결과는 coordinate 선택에 따라 서로 다른 값을 주고있음을 알 수 있다.

한편, cartesian coordinate는 boundary condition과 solution domain의 설정에 어려움이 있고, streamline iteration 방법을 사용할 경우는 기초 mean-flow streamline을 가정하여 streamline의 위치를 결정하는데 많은 경험적인 것이 필요한 것으로 알려져 있다. 유한차분법 (Finite Difference Method)으로 문제를 해석하는 경우에는 계산영역상의 모든 경계면이 좌표면과 일치하는 것이 바람직하며 이를 위하여 body fitted 좌표계를 많이 이용하는데 이는 해석하고자 하는 실제 영역의 모든 경계면이 특정 좌표면과 일치하도록 곡선좌표계를 수치적으로 형성시키는 방법이다. 이 방법은 3차원형상 주위의 점성유동을 계산할 때에 경계조건의 적용을 원활히 하고 격자계의 밀집배치를 통해 벽면 부근에서 경계층유동을 정밀하게 해석하기 위한 수치적 격자생성방법의 하나이며 복잡한 형상 주위의 유동계산에 많이 이용되고 있다. 해석

하고자하는 실제영역의 일반곡선좌표계는 영역을 계산영역으로 사상 (Mapping)함으로써 정의된다. 여기서 서로의 좌표계를 연결시키는 사상관계식이 필요하며 이 관계식은 2차편미방으로 나타난다. 이 격자생성 방정식은 적절한 경계조건하에 수치계산된다. 한편 이 식을 이용하여 격자계를 생성할때 격자배치는 경계상에서의 격자배치 즉 경계조건을 통해 조정된다. 그러나 경계에서 부여한 격자간격의 비율이 불규칙한 영역내부에서 그대로 유지되지 않는다. 즉 경계조건은 단지 영역내 경계 인접부에만 영향을 주며 본질적으로 격자배치는 격자생성식 자체에 의존하므로 식중의 격자조정함수 (Grid Control Function)를 통하여 원하는 격자배치를 하게된다.

#### 라. Turbulence Model : Two-Equation (k-ε) Model

난류경계층에서 Reynolds stress term을 처리하기 위하여는 eddy viscosity model (Boussinesq)이 이용되어지고 있는데, 식중의 난류동점성계수  $\nu_t$ 가 velocity scale과 length scale이 mean field variables의 algebraic function으로만 되어있기 때문에 주로 상대적으로 간단한 flow에 대하여 적용된다. Turbulence 수송의 convective와 diffusive가 중요한 경우에는 length scale을 specify 하기가 어렵기 때문에 보다 복잡한 flow에서 zero eq. model은 적당치 못하다. 그러나 length scale을 경험적으로 specify 할 수있는 많은 simple shear layer flow에 대해서는 매우 유용하고 popular한 tool이 될 수 있을 것이다.

One-equation model에서는 turbulent kinetic energy의 제공근에 비례한다는 가정을 통하여 velocity scale을 구하게 되고, length scale은 mixing length model을 이용한다. transport가 중요한 경우 zero-equation model 보다 나은 방법이지만 더욱 복잡한 flow에서 length scale을 경험적으로 specify하기 어려운 Two-equation model (k-ε model)은 length scale을 쉬운 방법인 경험식에 의존하지 않고  $\nu_t$ 를 난류에너지 k와 소산률 ε에 의해 표시하기 때문에 여러 flow에 적용될 수 있다.

#### 마. Separation Treatment

선미 부분에서 일어날 것으로 예상되는 separation region을 고려하기 위하여, separation이 일어나는 부근에서부터는 boundary layer equation을 vorticity transport equation으로 교체하여 계산한 결과를 (가)의 방법에 의한 결과와 비교검증하게 된다.

이상과 같은 방법에 의한 Technical Report에 적용되어지는 범위의 영역은 현재까지의 이상유체에 바탕을 둔 해석방법은 그 응용범위에 상당한 제한이 있게 된다. 따라서 선체 주위의 점성유동의 예측은 선박의 점성저항의 계산이나 각종 부가물의 설계, 그리고 추진기 설계를 위한 선미에서의 유효반류의 예측등에 매우 중요하다. 더구나 추진 성능이 우수한 선형의 개발을 위하여 저항의 감소 및 추진효율의 향상이라는 측면에서 선체 주위의 점성유동의 예측은 주요한 설계도구가 될 수 있을 것이다.