

論文

전투기 후류처리용 엄체호 최적설계에 관한 연구

윤용현*

A Study on Optimal Design of the Fighter Igloo Diffuser

Yong-Hyun Yoon*

New Design configurations of the fighter aircraft igloo diffuser were studied based on the closed ventilation type in contrast to the conventional open distribution type. To validate the enhanced and safe performance, the exhaust flow patterns of the two igloo diffuser types were simulated by both experimental and computational approaches as design tools. Flow visualizations were conducted to investigate the exhaust flow patterns in experimental approach. In addition, the commercial code called Fluent was used to calculate flow field properties. Computational simulations provided detailed parametric studies that significantly reduced the amount of experimentation necessary to alter the design parameters of the existing fighter igloo diffuser. The closed ventilation type of the igloo diffuser was shown the better results.

Key Words : Igloo diffuser(엄체호 분사구), Optimal design(최적설계), Open distribution type(개방 분산형), Closed ventilation type(폐쇄 분출형), Flow visualization (유동 가시화)

1. 서 론

고가의 항공기가 외부에 노출되어 주기되어 있을 경우 자연재해나 불의의 인적요인에 의한 피해를 받을 위험에 놓이게 되므로 이를 보호하기 위해 격납고(hanger)안에 보관한다. 특히 군용 항공기의 경우 단순한 보관 차원을 넘어 적의 공격으로부터 방어능력을 구비해야 할 뿐 아니라 대응력을 발휘하여 즉시 출격 가능해야 하므로 특별히 설계된 엄체호(igloo)안에 보호되어야 한다. 최근 유도무기의 발달로 파괴력이나 정밀 폭격능력이 향상됨은 물론 적 게릴라 침투 등으로 인한 지상 전투기의 전력보호를 위한 엄체호의 견고성과 안전성 제고에 대한 관심이 매우 높다. 전투기는 현대전의 핵심요체이며 전승을 좌우하

기 때문에 지상에 있을 때도 항상 적의 타격목표가 되므로 철저하게 보호되어야 한다. Fig. 1은 실제로 이라크 전쟁에서 공대지 미사일 공격으로 콘크리트 구조물의 엄체호가 파괴되면서 그 내부의 전투기가 피격된 사례를 보여 주고 있다.



Fig. 1. Igloo attacked by precision missiles

2010년 11월 25일 접수~2010년 12월 26일 심사완료

* 국립순천대학교 기계우주항공공학부

연락처자, E-mail : yhyoon04@sunchon.ac.kr

전라남도 순천시 매곡동 315

그러므로 전투기는 지상에 있을 때 적의 피습에 대비해야 함은 물론 출격할 때도 업체호 내에서 시동을 걸고 출격점검을 마친 후 최단 시간 내에 이륙할 수 있어야 한다. 그런데 현재 운영하고 있는 업체호는 Fig. 2에서 보여 주는바와 같이 업체호의 전후면이 완전 개방된 형태이다.



Fig. 2. Conventional igloo type

이와 같은 기존의 업체호는 적의 정밀 폭격 및 파괴력이 높은 유도 무기의 공격에 취약할 뿐 아니라 불순분자의 침투가 용이하고 지상요원의 안전에 저해 요인이 될 수 있으며 주변으로 소음이 확산되는 등 여러 가지 문제점과 위험성을 안고 있다.

이에 대한 대책으로 전투기가 업체호에 들고 날기 위한 전면은 열고 닫을 수 있는 방호문으로 처리하고 후면은 업체호 내에서 시동을 걸고 출격준비를 하는 동안 전투기 제트후류의 원활한 배출이 가능하면서 안전성과 견고성을 보장할 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 따라서 이러한 업체호의 제트 분사류 배출구를 개선하기 위하여 기존의 업체호 형상을 개선하고 보완 발전시킨 두 가지 형태의 업체호 분사구를 선정하였다.

하나는 개방 분산형(open distribution type) 분사구이고 또 다른 하나는 폐쇄 분출형(closed ventilation type) 분사구이다. 우선 적의 정밀타격에 대한 업체호의 방호능력을 극대화 하면서 외부 침입자의 무단출입을 차단함과 아울러 고속, 고압, 고온의 제트 후류를 역류 없이 업체호 밖으로 배출시킬 수 있는 확산장치의 최적 설계를 통해 소음 저감 효과는 물론 안전성 및 보안성(safety and security)을 유지하기 위한 설계를 수행하였다.[1]

특히 전투기 제트 분사류는 Fig. 3에서와 같이 고속, 고온, 고압의 제트 분사류이기 때문에 벽면에 충돌(impinging)한 후 업체호 내부로 역류(inverse flow)가 없어야 하고 주위로 잘 소산되어야 하며 소음 또한 최소화 할 수 있어야 한다.

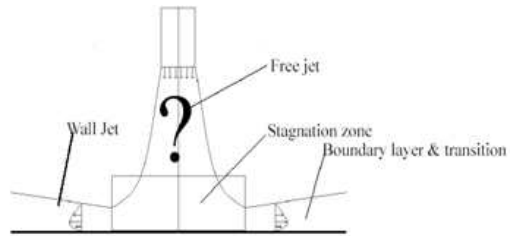


Fig. 3. Free jet impinging problem

이를 위한 대안으로 본 연구에서는 제트류가 충돌하는 기존의 평판 충돌 벽면 대신에 두 엔진의 분사구에 대해 좌우 경사각을 주고 설계한 개방 분산형(open distribution type) 모델(Fig. 4참조)과 폐쇄 분출형(closed ventilation type) 분사구 모델(Fig. 5참조)을 다음 그림과 같은 형태로 형상설계를 하였다.

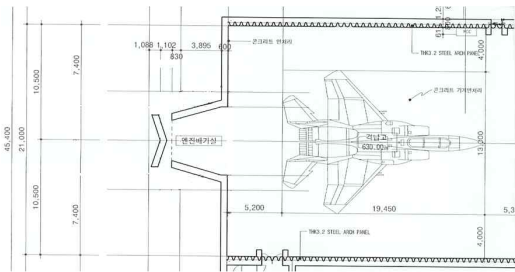


Fig. 4. Open distribution type

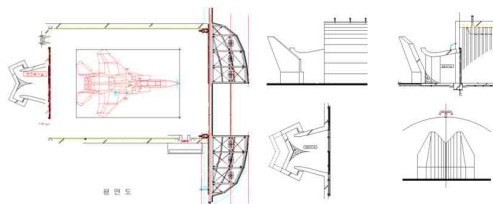


Fig. 5. Closed ventilation type

개방 분산형은 2개 엔진노즐의 분출류가 각각 경사면에 부딪친 후 개방된 좌우면 및 상단으로 분산되도록 처리하는 방법이고 폐쇄 분출형은 후면 및 좌우면을 지상으로부터 완전 차단하고 벽면에 충돌한 제트후류가 하늘을 향해 분출되도록 설계하였다.

새로운 이 두 가지 형태의 업체호 분사구 형태는 Fig. 2에서 보여 주는 기존의 업체호 비해 업체호성나 차폐성 측면에서 매우 향상된 형상이라

할 수 있다. 하지만 개방 분산형 분사구는 외부인의 침투, 소음 및 주위 작업자의 위험성이 완전 배제 되지 않았고 폐쇄 분출형 분사구는 이러한 문제점은 없을 것으로 판단되나 제트후류의 역류로 인한 업체호 내의 대기오염과 실내작업자의 제트 후류에 의한 제반 위험성을 검증하기 위해 흐름 가시화 시험과 전산해석코드에 의한 시뮬레이션을 수행하였다.

II. 본 론

2.1. 가시화 시험

먼저 각 형상에 대한 제트후류의 정성적 파악을 도모하였다. 흐름의 가시화를 위해 오일을 태워 스모그를 생성한 다음 블로어를 이용해 제트후류를 모사한 흐름 가시화(flow visualization) 시험을 수행하였다. 전투기 F-15K의 1/30 축소모델을 기준(Fig. 6참조)으로 규격에 따라 업체호를 설계하고 업체호 내에서 F-15K를 작동했을 때 엔진의 완속조건(idle condition)을 가정하여 가시화 조건을 상사시켰다.



Fig. 6. Igloo model (1/30 scale down)

흐름 가시화의 관찰과 사진 촬영을 위해 업체호 모델은 아크릴판재로 투명하게 제작하였다. 제트후류의 세기변화는 물론 디퓨저 형태도 벽면의 경사각도와 제트후류 유로의 형상을 변화하면서 여러 가지 형태에 대해 가시화 시험을 수행하였다. 가시화 시험을 통해 가장 이상적인 형태인 개방 분산형 분사구 하나와 폐쇄 분출형 분사구 하나를 각각 선정하였다.

Fig. 7에서 보여 주는 개방 분산형 제트후류 처리 장치는 업체호로부터 빠져나온 후류가 좌우 및 윗면 경사각을 갖는 벽면에 충돌하면서 제트후류의 대부분이 주변에 확산 되었다.

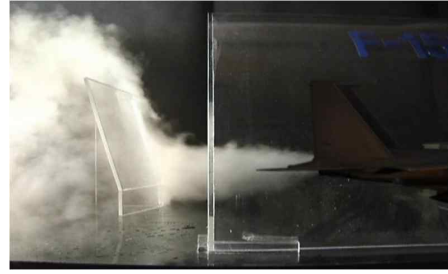


Fig. 7. Flow visualization for open type

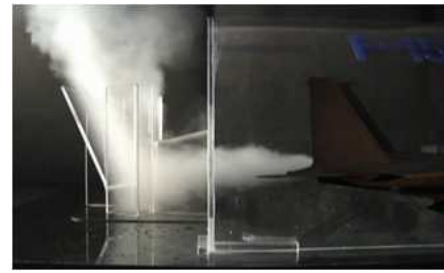


Fig. 8. Flow visualization for closed type

그리고 폐쇄 분출형 분사구는 Fig. 8에서와 같이 뒷면과 좌우를 모두 막아 제트후류의 확산유로를 형성하여 하늘로 분출시키는 형상이다. 흐름가시화에서 보여 주는 바와 같이 제트후류의 확산유로를 형성한 흐름이 역류(reverse flow)없이 업체호 상방향으로 잘 분출됨을 확인할 수 있었으며 굴뚝효과에 의해 업체호 내의 제트후류에 의한 열기들이 굴뚝으로 잘 분출되는 효과를 관찰 할 수 있었다.

가시화 시험을 통해 제트후류의 정성적인 흐름은 파악하였으나 압력, 온도, 속도 등과 같은 보다 정량적인 물리적 특성들을 파악하여 건물설계에 필요한 기초자료를 구하기 위해 전산해석을 수행하였다.

2.2. 전산해석

전산해석을 위해 선정된 모델은 위의 흐름 가시화 시험을 통해 결정된 개방 분산형 모델과 제트유로를 상방향으로 형성하여 처리하는 폐쇄 분출형 모델에 대해 각각 수행하였다.

F-15K에 장착한 엔진은 2대의 터보팬엔진으로 팬을 거쳐 압축기로 흘러 들어가 연소되어 터빈으로부터 나오는 흐름과 연소과정을 거치지 않고 바이패스된 2차 흐름이 혼합하여 노즐을 통과하

면서 추력을 발생하는 시스템이다.[2]

한쪽 엔진 분사구의 직경은 0.79m이고, 넓이는 0.49m²이며, 높이는 지면으로 부터 노즐하단이 0.9m에 위치한다. 압체호 내에서 엔진을 작동했을 경우 두 개의 엔진 노즐에서 분출되는 자유제트(free jet)는 경계층(boundary layer)과 와류(vortex)로 인한 난류가 심한 흐름이다. 이러한 흐름 해석 조건을 감안하여 선택한 상용 코드는 국제적으로 널리 사용되고 있는 ANSYS사의 Fluent 코드로 특히 난류 모델링을 통한 난류해석이 용이하였다.[3]

형상모델링과 격자생성을 위해 Gambit 프로그램을 이용하였다. 제트 후류 분출구 부근은 형상이 복잡하고 유동이 외부흐름과 내부흐름이 공존하는 곳이므로 비정렬격자(unstructured grid)를 구성하고 압체호 본체의 형상은 후류 유동현상을 해석하는데 영향이 없다고 판단하여 형상을 단순화하였으며 정렬격자(structured grid)로 구성하였다.

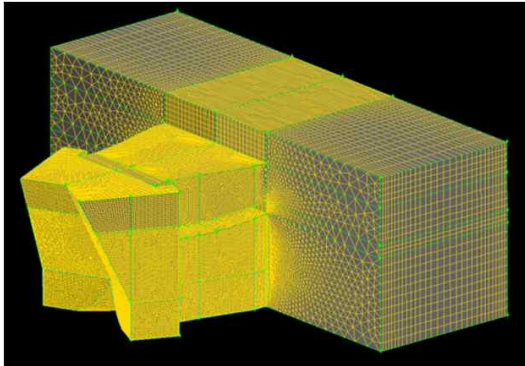


Fig. 9. Hybrid mesh generation

Fig. 9에서 보여주는 Multiblock hybrid mesh의 총 격자수는 총 3백 만 개에 달한다. Gambit를 이용하여 생성한 격자파일은 Fluent의 유동해석 코드(solver)로 보내진다.

유동해석코드는 질량보존, 운동량 보존, 에너지보존법칙, 그리고 이상기체의 상태방정식을 기본으로 한 Navier-Stokes방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho \phi dV + \iint \rho \phi V \cdot dA = \iint I \nabla \phi \cdot dA + \iiint S_{\phi} dV \quad (1)$$

Fluent의 유동해석코드는 식(1)에서 보여주는 유동의 지방정식을 유한체적법(finite volume method)을 기본으로 2nd order upwind기법으로 이산화를 통해 대수방정식으로 변환된다.[4]

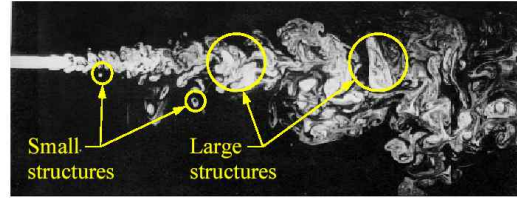


Fig.10. Turbulence structure

Fluent는 Fig. 10과 같은 난류해석을 위해 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)난류모델링, LES(Large Eddy Simulation)난류모델링, 그리고 DNS(Direct Numerical Simulation)난류모델링이 있다. 본 연구에서는 Fluent에서 제공하는 RANS모델링 중에 2개방정식 모델링 가운데 하나인 $k-\epsilon$ 모델링을 사용하였다. RANS에서 운동량 방정식은 다음과 같이 모델링된다.

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기에서 난류의 순간속도 성분은 시간평균 성분과 fluctuating 성분의 합으로 나타내고, 레이놀즈 스트레스 텐서 항(R_{ij})은 난류 점성(μ_t)을 포함하는 다음과 식으로 나타낸다.

$$R_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

레이놀즈 스트레스식(3)의 난류점성(μ_t)을 결정하기 위해 가장 널리 사용되고 강건성이 높은 $k-\epsilon$ 난류모델링을 선택하였다. $k-\epsilon$ 난류모델링은 난류운동에너지(k)와 난류 확산율(ϵ)은 다음과 같이 계산한다.

$$k = \frac{u'_i u'_i}{2} \quad (4)$$

$$\epsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

식(5)의 ϵ 계산을 수행하기 위해서는 벽면함수(wall function)를 사용해야 한다. 특히 $k-\epsilon$ 난류모델링은 흐름의 박리가 심한 곳이나 압력구배가 큰 흐름에서는 정확성이 떨어지는 제한점이 있다.[5]

이상과 같은 유동해석코드에서 계산을 수행하기 위한 초기조건은 F-15K엔진(F110-STW)의 완

속(idle)상태에서 분출되는 조건을 적용하였다.

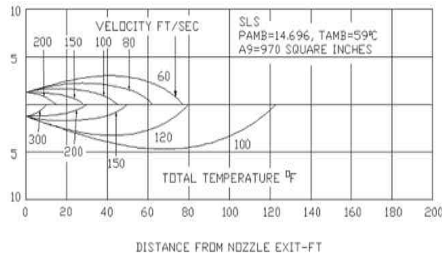


Fig. 11. Jet exhaust flow conditions

엄체호 내에서 엔진 시동을 걸때를 고려하여 F-15K의 엔진 완속조건(idle conditions)을 적용하였다. Fig. 11은 F-15K 엔진 제트후류의 거리에 따른 속도 온도 보여 주고 있다. 이를 기준으로 배출가스의 초기조건 값을 속도는 60m/s, 온도는 150⁰(를 사용하였다. 지배방정식의 계산이 수행되는 동안 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식, 그리고 $k-\epsilon$ 방정식은 원만한 수렴성을 보여 주었다.

2.3. 전산해석 결과

먼저 개방 분산형(open distribution type)의 제트후류 분사구에 대한 전산해석을 수행하여 유적선(pathlines), 속도벡터, 온도 분포, 압력분포 등을 계산하였다. Fig. 11(a)은 유적선의 형태를 보여 주고, Fig. 11(b)은 속도벡터이다.

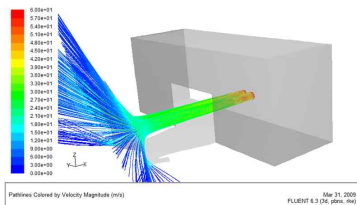


Fig. 12(a) Pathlines for open type

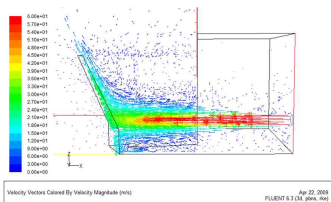


Fig. 12(b) Velocity vectors for open type

제트후류의 유적선의 형태는 가시화 시험에서 보여 주었던 후류의 흐름과 유사한 형태를 보였다. 제트노즐 출구에서 속도60m/s, 온도150도로 분출된 제트류가 엄체호 밖으로 나올 때는 30m/s로 감속되고 24m/s로 경사진 벽면에 충돌 할 때의 온도는 90도였다. 이와 같이 고온의 제트후류가 고속으로 엄체호 주변에 방사되면서 심한 소음을 일으키는 물론 주변 근무자들에게 근무여건을 크게 위협할 것으로 예상된다. 뿐 만 아니라 엄체호와 외부 사이의 공간은 여전히 보안상의 취약점이 상존한 것으로 분석된다.

한편 폐쇄분출형(closed ventilation type)분사구의 유동해석결과는 Fig. 13(a)에 유적선을 그리고 속도벡터를 Fig. 13(b)에서 보여준다.

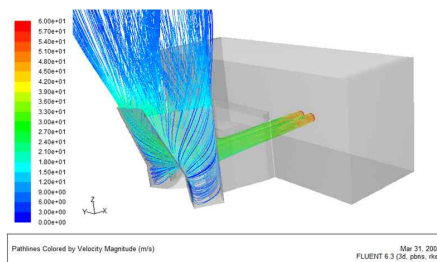


Fig. 13(a) Pathlines for closed type

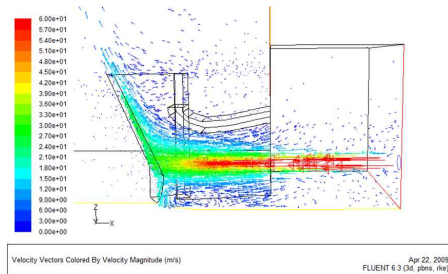


Fig. 13(b) Velocity vectors for closed type

폐쇄 분출형 분사구의 경우 유속60m/s, 온도 150도로 노즐을 떠난 제트 후류는 온도 110도, 30m/s의 유속으로 엄체호 밖에 위치한 격실을 통과한 다음, 온도100도, 유속24m/s로 벽에 부딪친 후 15m/s로 폐쇄형 분사구를 빠져 나와 마침내 온도60도에서 6m/s의 유속으로 대류와 합류하였다. 실험에서 보여 주었던 흐름가시화의 결과 보다 더 빠르고 매끈한 흐름형태로 분출되었다. 이러한 결과는 제트 후류를 폐쇄 분출형으로 설계 하여도 흐름의 역류없이 제트후류를 무난히 배출

될 수 있음을 보여 준 결과로 해석할 수 있다. 특히 제트후류를 흠어짐 없이 하늘 방향의 대기에 배출할 수 있기 때문에 개방 분산형이 갖는 취약점을 보완 할 수 있을 뿐 아니라 소음을 감소할 수 있다. 일반적으로 항공기 소음은 공력소음과 제트소음으로 나눌 수 있는데 후자인 제트소음인 경우 배기류의 속도, 후류 전단층의 불안정성, 그리고 와류(vortices)와 난류가 그 주요 원인이 된다. 특히 jet mixing은 고속의 배기류와 주위공기가 서로 혼합하는 과정에서 발생한다. 배기류와 주위공기가 서로 다른 속도를 갖고 혼합될 때 상당량이 난류로 인해 소음이 발생한다. 난류강도에 의한 소음은 두 흐름의 속도 차에 비례하여 증가하는데 제트소음은 배기속도의 8승에 비례하고 기체후방 약 45도 각도의 위치에서 가장 심하다.[7,8] 따라서 제트후류의 유로상의 좌우 45도 방향을 벽으로 막으면서 엄체호 외부로 분출되는 속도를 줄이면 상당한 소음을 줄일 수 있는 효과를 거둘 수 있다.

III. 결 론

전면과 후면이 완전 개방된 기존의 엄체호가 갖는 취약점을 보완하고 견고성, 안전성, 그리고 보안성을 제고하기 위한 새로운 엄체호의 최적설계를 수행하였다. 특히 전투기 제트 후류를 처리하기 위한 엄체호 분사구의 형태를 개방 분산형 분사구와 폐쇄 분출형 분사구로 나누어 형상설계를 하였다. 이 두 가지 모델에 대해 흐름 가시화를 통해 제트 후류의 정성적 흐름을 관찰하였으며 정량적 분석을 위해 전산유동해석을 수행한 후 그 결과를 각 경우에 대해 비교분석하였다.

개방 분산형 분사구는 엄체호를 빠져 나온 후류가 고온 고속의 제트 후류가 방사되면서 주변 작업자들을 위험에 노출되게 할 우려가 있을 뿐 아니라 높은 소음을 유발하고 엄체호 내부가 외부와 완전한 차단이 되지 않음으로써 안전성과 방호성, 그리고 보안에 제한이 있는 반면 폐쇄 분출형 엄체호는 외부와 차단된 상태이므로 방호성과 안전성, 보안성이 우수할 뿐 아니라 소음저감효과를 가져 오를 수 있었다. 따라서 본 연구 결과에 따르면 전투기 엄체호를 폐쇄 분출형 분사구 형태로 개선하는 것이 추천된다.

후 기

본 연구는 (주)도심 엔지니어링에서 지원하는 “F-15K 엄체호 제트분사구 최적설계”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 윤용현,김성초,,조환기,이상현 “F-15K 엄체호 분사구 최적설계에 관한 연구”,한국전산유체공학회 춘계학술대회논문집,2009, pp66~69
- [2] 안승범, 양욱 “F-15K Slam Eagle“,플래닛 미디어,2007,pp133~156
- [3] www.fluent.com
- [4] “Fluent User’s Guide“, Fluent Inc. 2006.9
- [5] David C. Wilcox,“Turbulence Modeling“, DCW Industries, Inc. 2004, pp11~17, pp33~44
- [6] Nicholas Cumpsty, “Jet Propulsion“, Cambridge University Press, second edition, 2005, pp186~188
- [7] 부준홍,유상신,이기영,정대환,황정선, “분사추진기관”, 청문각,pp 315~320
- [8] H. Tennekes and J. L. Lumley, “ A First Course in Turbulence“, MIT Press, 1973, pp127~132