

工學碩士 學位論文

수중익 주위 난류유동장의 실험적 해석에 관한
연구

Experimental Study on Turbulent Flow Field around
Submerged Hydrofoils

指導教授 玄 汎 洙

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海 洋 시 스 템 工學科

尹 丁 厚

목 차

Nomenclature	3
Abstract	4
1. 서언	6
1.1. 연구배경	6
1.1.1. 난류 유동 계측의 필요성	
1.1.2. 전개판 소개	
1.2. 날개형상 설계 이론	9
2. 모형, 실험장치 및 실험조건	11
2.1. 모형	11
2.2. 실험장치	12
2.3. 실험조건	14
3. PIV를 이용한 유동해석	15
3.1. PIV 원리	15
3.2. PIV 해석방법	16
4. 평균유동장 계측결과 및 토의	22
4.1. 평균유동특성	22
4.2. 양향력 계측 실험 결과	26
5. 난류유동 계측 결과 및 토의	28
5.1. 개요	28
5.2 PIV 기법을 이용한 난류구조 해석	30
5.3 난류유동특성	32
6. 결론 및 제언	48
참고문헌	50

Nomenclature

C	Chord Length of Hydrofoil
S	Span Length of Hydrofoil
ρ	Mass density of fluid
ν	Kinetic viscosity
Re	Reynolds No ($Re = \frac{VL}{\nu}$)
s	Submergence Depth of Hydrofoil
x	Coordinate Axis
y	Coordinate Axis
z	Coordinate Axis
α	Angle of Attack
U_0	Velocity in the Undisturbed flow
C_L	Lift coefficient
C_D	Drag coefficient
u	Velocity Component in x-direction
v	Velocity Component in y-direction
\overline{u}	Time-averaged velocity
\overline{v}	Time-averaged velocity
u'	Fluctuation ($u' = u - \overline{u}$)
v'	Fluctuation ($v' = v - \overline{v}$)
k	Turbulent kinetic energy

Abstract

This study is aimed at analysis of the averaged flow and the turbulent flow around the hydrofoils by experimental process. Used hydrofoils in this study were the otterboards with chamber that are expanded a fishing net from side to side. It measured flows around the otterboards by PIV(Particle Image Velocimetry)method in order to estimate efficiency of the otterboards. With performed parametric study according to be changed types of the otterboard and angle of attack, optimum conditions were searched. These results will be applied to design of the better otterboard. And the characteristics of the turbulent flow are measured to verify that this PIV system is useful in measurement of the turbulent flow. Variables such as the number of instantaneous velocity field or searching area and correlation area to apply Cross-correlation method, have an effect on accuracy of turbulence statistics - Turbulent intensity, Turbulent kinetic energy, Reynolds stress. Therefore computation for each variables was performed and turbulence statistics were obtained for each cases.

요약

본 연구에서는 실험적 방법에 의해 3차원 수중익 주위의 평균유동 및 난류유동특성을 해석하였다. 조선공학에서의 3차원 수중익 문제는 수중익선, 프로펠러, Stabilizer 등이 있으며, 수산공학에서는 대표적으로 전개판(Otterboard)을 들 수가 있다. 전개판은 익형의 3차원 양력체로써 트롤조업시 그물을 좌우로 전개시켜주는 역할을 하는 장치이다. 이러한 전개판의 성능평가 및 우수한 사양의 전개판 도출을 위해 정량적 속도 측정 기법인 PIV를 이용하여 전개판 주위의 유동 특성을 측정하였다. 평균 유동 관점에서 전개판의 형상 및 받음각의 변화에 따른 Parametric study를 실행함으로써 우수한 성능을 가진 3차원 전개판 형상을 결정할 수 있었고 또한 전개판 주위의 세부적인 유동현상을 규명하여 전개판의 성능 변화의 원인을 파악할 수 있었다.

그리고 난류 유동 관점으로 범위를 확대하여 난류 유동 특성을 해석해 보았다. 난류유동은 매우 불규칙적인 현상으로써 일반적인 N.S. 방정식으로는 해석이 불가능하고, 이에 시간평균개념을 도입한 Reynolds 방정식에 의해서 해석되어진다. 이러한 Reynolds 방정식의 해석을 위해서는 시간에 따라 변화하는 값들의 평균값들이 필요하며, 이 값들은 전적으로 실험에 의한 방법에 의존하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 PIV기법을 통해 난류강도, 난류운동에너지, 난류응력 등의 난류통계치를 구하여보고, 이를 바탕으로 난류유동 특성을 파악해보고자 하였다. 이러한 난류유동 해석 자료를 바탕으로 평균유동 해석의 정도를 향상시키며, 일반적인 N.S. 방정식에 의한 해석(CFD)에 적용 가능한 실험데이터를 확보할 수 있었고 최종적으로 우수한 성능의 전개판 또는 수중익의 설계 자료로써 이용하고자 한다.

1. 서언

1.1 연구배경

1.1.1 난류 유동 계측의 필요성

자연계와 공학문제에 있어서의 유동은 대부분이 비정상, 3차원 난류유동이다. 특히 산업적 응용성이 높은 유동은 대부분 복잡한 형상에서의 난류유동이며 이러한 유동을 효과적으로 제어하는 기술의 개발은 조선, 기계, 환경공학 등에서 매우 중요한 분야로 인식되고 있다. 예를 들어 선박, 항공기, 자동차등과 같은 물체 주위의 유동 상태는 해당 물체의 저항 성능에 결정적인 영향을 미치게 되므로 이러한 유동현상을 물리적으로 정확하게 이해하고 그 결과를 토대로 해당 유동의 효과적인 제어방법을 개발하고자하는 연구는 공학적인 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 유체역학 연구자들의 이러한 방향으로의 노력은 위에서 열거한 전통적인 중요성을 갖는 유동들뿐만 아니라 인간 생체 내에서의 혈류 유동, 초소형 전자기기(MEMS) 내에서의 유동과 같은 미래 지향적인 유동에도 지속적으로 시도되고 있다.

그러나 시간과 공간에 따라 빠르게 변화하는 불규칙성과 복잡한 3차원 유동구조로 인해 지난 수십년간 난류 유동에 대한 연구가 지속되었음에도 불구하고 난류문제에 대한 일반적인 접근방법은 아직까지 발견되지 않았다. 운동방정식에 대해서는 매우 상세히 해석되었지만, 현재까지도 실험자료에 의존하지 않고서는 정확한 예측이 불가능한 것이 사실이다. 때문에 난류유동의 속도장 정보를 얻기 위해 화상처리를 이용한 속도장 측정기법 즉 PIV(Particle Image Velocimetry)기법을 적용하고자하는 시도는 자연스럽게 관심을 끌게 되었고, 세계적으로 많은 연구들이 진행되고 있다. 난류유동의 효과적인 계측을 위해서는 난류 eddy 거동을 충분히 잡을 수 있을 만큼의 시간 및 공간분해능을 가져야하는데 최근의 컴퓨터의 발달 및 영상획득장치(CCD 카메라)의 비약적인 발달로 인해 비교적 효과적인 계측이 가능해졌다. 하지만 아직까지 난류유동의 작은 scale의 eddy 구조까지 계측하는데는 많은 제약이 있는 것이 사실이다.

1.1.2 전개판 (Otterboard) 소개

조선공학 분야에서의 3차원 수중익 문제로써는 일반적으로 프로펠러, 수중익, stabilizer(감요장치)등을 들 수 있을 것이다. 그리고 수산공학 분야에서는 다음과 같은 전개판이 대표적이라고 할 수 있다.

전개판(Otterboard, Trawl Door)은 트롤어선의 어망을 펼치기 위한 날개형태의 양력체로서, 과거에 두 척의 어선이 펼쳐야 했던 어망을 아래의 같이 1척의 어선만으로도

펼칠 수 있도록 고안된 일종의 그물 전개장치이다.

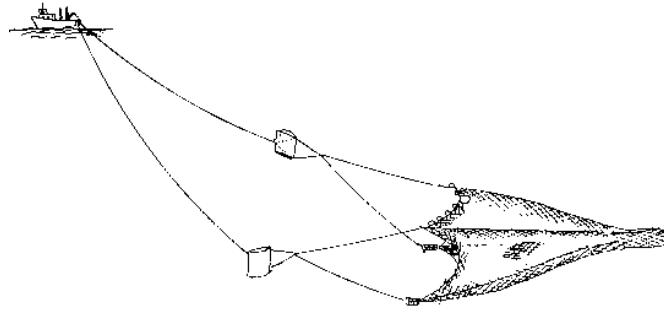


Fig. 1. 트롤 조업 모식도

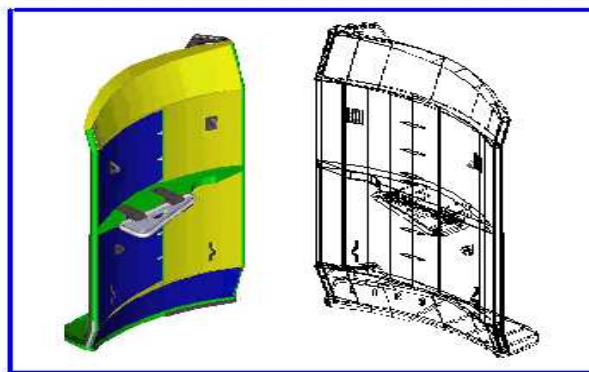


Fig. 2. 전개판(Otterboard) 모형

즉 항공기의 날개와 유사한 날개를 어망의 양쪽선단에 부착하여 어선이 전진할 때 발생하는 유속에 일정하게 정해진 받음각으로 전개판을 설치하여 유체 동력학적 양력으로 인하여 스스로 펼쳐지게끔 고안된 것이다. 따라서 전개판의 형상과 받음각에 따라 양력, 항력이 어떻게 변화하며 날개 면에서의 유동 박리, 실속 등의 현상이 어떻게 발생하는지의 여부를 확인하기 위한 유체역학적인 연구가 필요하다.

전개판의 성능은 크게 전개력과 안전성측면에서 측정되어지는데, 이중 전개력은 양력은 크면서 항력은 작은 날개의 설계와 관련되며, 안정성은 거칠고 비정상 형태의 작업환경에서도 작업성능을 얼마만큼 안정되게 유지할 수 있는가와 관련된다.

특히 노르웨이, 덴마크 등 선진국가 업체들의 경우 국가단위 또는 지역단위의 연구센터를 중심으로 첨단 기술을 업체에 제공하여 산업체의 기술력이 비약적인 발전을 이루고 있었으며, 특히 컴퓨터를 이용한 설계시스템, 모의실험시스템 등을 구축하여

여타 국가와의 기술 격차를 커지게 하고 있었다.

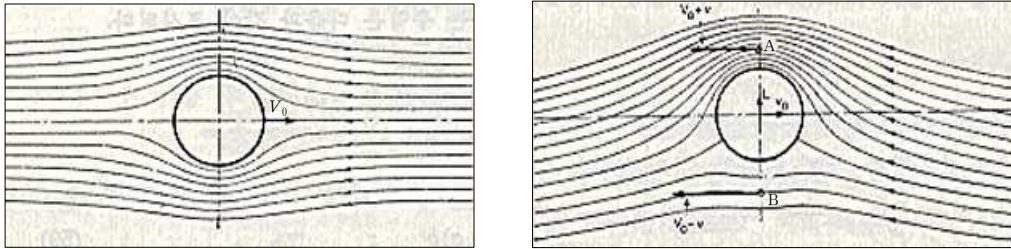
국내에서는 현재 전개판에 대한 성능해석 방법으로 모형실험에만 의존하고 있는 실정이나, 앞으로의 연구에서는 PIV 및 CFD 기법에 의해 체계적인 전개판의 성능해석과 형상설계를 할 수 있는 방법이 마련될 것이다.

전개판은 그물의 수평전개와 적정 수심으로의 유도 및 어구의 안정성 그리고, 어구의 구집효과 등으로 어획에 상당한 영향을 주는 것으로 알려져 있어 매우 중요하게 간주된다.

따라서 트롤어업이 시작된 이후, 전개판의 양향비 개선 및 안정성에 관한 연구는 지속되어져 왔다. 전개판의 형상 및 유체역학적 특성에 관한 연구는 날개이론을 바탕으로 한 Süberkrüb(1959)의 만곡형 전개판이 개발된 이후, Crewe 등(Catasta, 1959; Crewe, 1964; Hamuro, 1964)이 평판형과 만곡형 전개판의 성능을 분석하였고, Patterson 등(1985, 1986)이 횡형 만곡형 전개판에 대하여 연구하였으며, 1980년대 들어 小山 등(1981,1984)이 원형 전개판에 대하여 연구한 바 있다. 국내에서는 金(1981)이 전개판의 설계이론에 대하여, 李 등(1987)이 단순 만곡형과 V-전개판에 관하여, 金 등(1987)이 플랩을 부착한 전개판에 관하여, 高 등(1992)이 전개판의 유체역학적 특성에 관하여, 權(1993)이 전개판의 형상요소별 성능의 변화에 대한 연구와 가시화 및 수치해석법을 도입한 시뮬레이션 분석, 朴(1994) 전개판의 양향력 특성 및 정적, 동적 안정성 등 유체특성에 관한 연구 등 다양한 시도가 있었다.

하지만 과거의 연구는 대부분이 양향력 계측 및 단순 가시화에만 그쳤었다. 본 논문에서는 양향력 계측 및 가시화뿐만 아니라 PIV기법 및 CFD를 통하여 유동 박리 및 유동 현상을 구체적으로 규명함으로써 전개판의 성능을 평가하고 나아가 설계 방향을 제시해 보고자 한다. 본 연구실에서는 다년간 PIV 계측기법을 이용하여 여러 형태의 복잡 유동장을 계측하였고, 그 결과를 검증하였다. 본 계측 기술을 바탕으로 전개판(Otterboard) 주위의 평균 유동장을 계측하여 우수한 성능의 수중익 설계에 적용하고자 하며, 연구 범위를 더 확장하여 난류 유동 특성을 해석해 봄으로서 난류 유동 계측의 신뢰성을 검증하고 또한 평균 유동 해석의 정도를 높이는 것과 함께 CFD에 적용할 수 있는 실험 데이터를 확보하고자 한다.

1.2. 날개형상 설계이론



(a) 순환 운동이 없는 경우

(b) 순환 운동이 있는 경우

Fig. 3. 원통 주위의 유선 흐름

원통을 순환 흐름이 없는 이상 유체의 균일한 흐름 속에 놓았다면, Fig. 3 (a)에서와 같이, 유선은 흐름 축에 관하여 대칭일 것이며, 그 원통 위에는 아무런 힘도 작용하지 않을 것이다. 만일, 여기에서 그 원통 주위에 순환 흐름을 일으킨다면, 흐름의 양상은 크게 변하여 Fig. 1(b)에 보인 바와 같이 비대칭적으로 될 것이다. 이에 따라, 점 A에서는 흐름 축에 평행한 속도가 $(V_0 + v)$ 로 증가되고, 점 B에서는 $(V_0 - v)$ 로 감소된다. 이와 같은 비대칭적인 속도 분포는 또한 비대칭적인 압력 분포를 초래하며, 이에 따라 점 B에서의 압력은 점 A에서의 그것보다 커진다. 그 결과로써, 원통은 균일한 유선 흐름의 방향에 수직인 힘을 받게 된다. 유체의 흐름 속에서 회전하는 원통에 그와 같은 힘이 발생하는 현상을 그 발견자의 이름을 따서 Magnus 효과라고 부른다

Fig. 1(b)에서와 같이, 순환 흐름이 있는 균일한 흐름 속에 놓인 원통에 작용하는 가로 방향의 힘 L 은 다음과 같이 주어진다.

$$L = \rho \Gamma V_0 \quad (1)$$

여기에서, ρ = 유체의 질량 밀도

$\Gamma = 2\pi c =$ 순환 흐름의 세기

$V_0 =$ 균일한 흐름의 속도

위의 식(1)은 Kutta-Joukowski의 식으로 알려져 있는데, 이식은 물체의 모양에 따르는 인자를 순환 Γ 속에 포함하므로, 물체의 모양에 관계없이 사용할 수 있기 때문에

역학의 중요한 일반 법칙으로 생각되고 있다. 이 식을 이용하여 프로펠러 작용을 수학적으로 해석하는 경우에는, 그 날개의 모양을 고려할 필요가 없고, 그것을 순환 흐름으로 둘러싸인 와류 필라멘트(vortex filament) 또는 양력 발생선(lifting line)들로 생각하기 때문에, 그 해석 과정이 매우 간단해진다.

그러나, 이들 양력 발생선은 날개의 길이에 해당하는 한정된 길이를 가지고 있으며, 날개 끝에서 갑자기 끝나는 것이 아니고, 이른바 날개 끝 와류라 불리는 와류들이 자유단에 있기 때문에 연속성이 유지된다고 생각한다. 이와 같은 날개 끝 와류는 항공기 날개의 끝이나 프로펠러 날개의 끝과 뿌리에 실제로 존재하는 것이며, 풍동이나 회류수조 실험에서 흔히 볼 수 있는 현상이다. 항공기 날개나 프로펠러 날개에서 발생하는 양력은 날개 앞면에서의 압력 상승과 뒷면에서의 압력 강하의 결과이다. 유체는 압력 구배를 따라 흐르므로, 날개의 자유단을 넘어 앞면으로부터 뒷면으로 흐르려는 경향이 있고, 이에 따라 강력한 와류가 발생한다. 이 와류의 축은 날개의 축과 거의 직각을 이루며, 날개와 접촉하고 있는 유체층의 경계를 형성한다. 따라서, 날개 끝에서 생성되는 와류를 고려함으로써 순환이론을 3차원 즉 유한 스패를 갖는 날개(Finite-Wing)의 설계에 적용할 수 있다.

날개를 양력선들로 취급하면, 유기 속도들이 결정된다. 그러나, 실제의 날개를 생각한다면, 날개의 폭과 두께와 그리고 그들의 상호 간섭으로 인한 곡률 효과들이 흐름에 영향을 주게 된다. 그러므로, 양력선 이론만을 사용하여 계산하면, 날개의 영각 또는 피치가 너무 작아지는 결과가 되며, 따라서 날개의 모양을 고려하여 적절한 수정을 가해야 한다는 것을 알게 되었다. 다시 말하면, 양력선 이론으로부터 양력면 이론(lifting surface theory)으로 옮겨야 한다는 것이다. Sparenberg, Cox, Kerwin, Pien, English, 및 Nelson들이 양력선 이론을 바탕으로 하여 양력면 이론을 연구 개발하였고, 확고한 이론에 입각한 수정 계수들을 제시하였다.

날개단면 설계를 위한 이론적 방법은 1979년 Eppler가 새로운 날개단면 개발 기법을 속하면서 획기적으로 발전하게 되었다. 이 방법은 날개단면을 등각사상법에 기초한 비선형 포텐셜 문제로 해석할 수 있으며, 주어진 단면형상에 대한 성능 해석과 주어진 압력 분포 f_p 대한 단면의 형상 설계가 가능하다. 또한 날개단면 주위의 얇은 경계층에서 난류 및 층류 이론을 적용, 점성 효과까지 고려할 수 있는 점이 Eppler 설계법의 가장 중요한 특징이다. 즉 날개단면 앞날(leading edge) 근방 속도 분포 및 뒷날(tailing edge) 근처의 박리 발생 가능성을 정성적으로 제시할 수 있어 이 방법에 의한 날개단면 개발에 관한 연구가 계속되고 있다. 그러나 이 방법은 점성영향을 표현하기가 용이하지 않으며, 초기에 압력 분포가 주어져야 하므로 이에 따른 단면형상 제어가 용이하지 않고, 수치적이 압력 분포의 입력 결과 생성되는 날개단면이 물리적으로 타당하지 않을 수도 있다.

2. 모형, 실험장치 및 실험조건(Model, Facility & Experiments Condition)

2.1. 모형

본 논문에서 사용한 좌표계 및 실험전경은 Fig. 4와 같다.

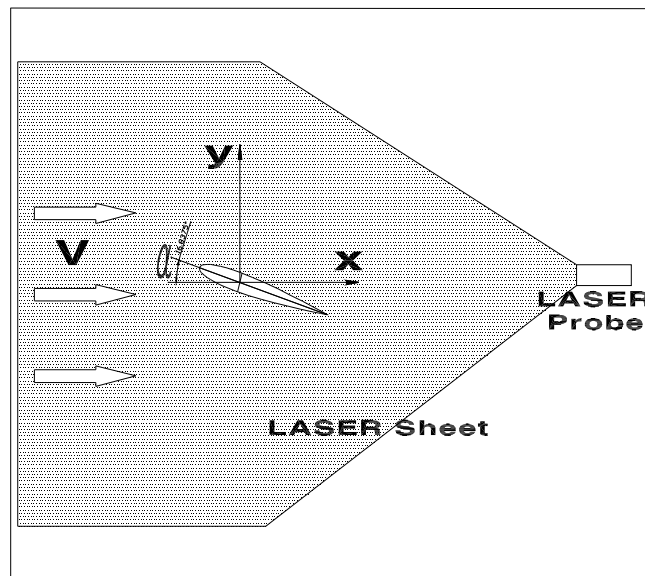


Fig. 4. Coordinate & Schematics of Experiment

본 논문에서 사용된 모형은 아래의 그림과 같이 4개의 만곡형 전개판을 사용하였다. 만곡형 전개판은 슬롯의 유무에 따라 Fig.5 와 같이 분류하였다. 편의상 슬롯이 개수에 따라 단순 만곡형 전개판, One-slot형 전개판, Two-slot형 전개판 A 와 B로 표기하였다. 백경공업(주)에서 개발, 제작된 전개판 모형의 크기는 Chord 0.2 [m], Span 0.34 [m]이며, 알루미늄 판으로 제작되었다.

Fig. 5에서 a, b, c 모형은 두 개의 원판이 겹쳐서 제작한 것이며, d 모형은 단판으로 제작된 것이다. 모형의 물수깊이와 받음각(Angle of Attack)은 별도로 제작된 2차원 이송장치를 이용하여 조절할 수 있도록 하였다.

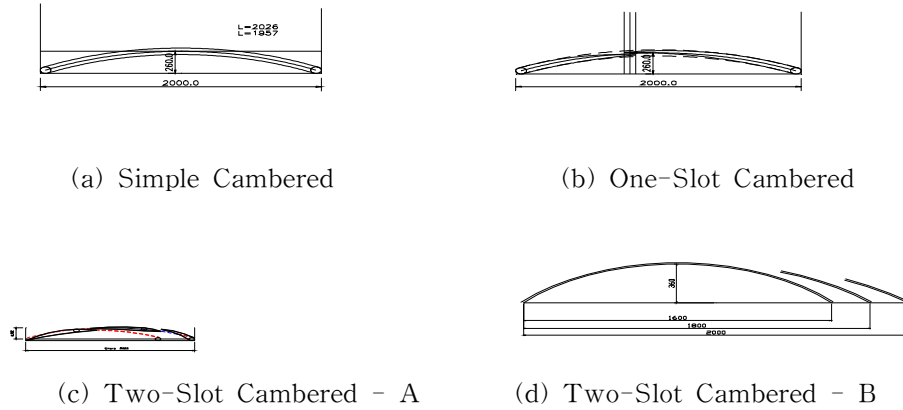


Fig. 5. Cross Section of Otterboard

2.2. 실험장치

본 논문의 실험은 한국해양대학교 해양과학기술대학 회류수조 실험실에 설치 되어 있는 회류수조(Circulating Water Channel)에서 수행하였다. 회류수조에서 유속의 발생은 2 Impeller Vertical Type(OV2 - 60B)을 이용하며, 수조의 전체 크기는 길이 12.5m, 폭 2.2m, 높이 5.2m이며, 본 실험이 행해진 관측부의 크기는 길이 5.0m, 폭 1.8m, 높이 1.2m이다. 수조의 가동시 사용되는 물의 용량은 60ton이며 수조의 발생유속은 0.1m/sec ~ 2.0m/sec까지 이다. 그리고 수조의 구동은 AC 22kw × 2set Impeller Motor로 구동된다.

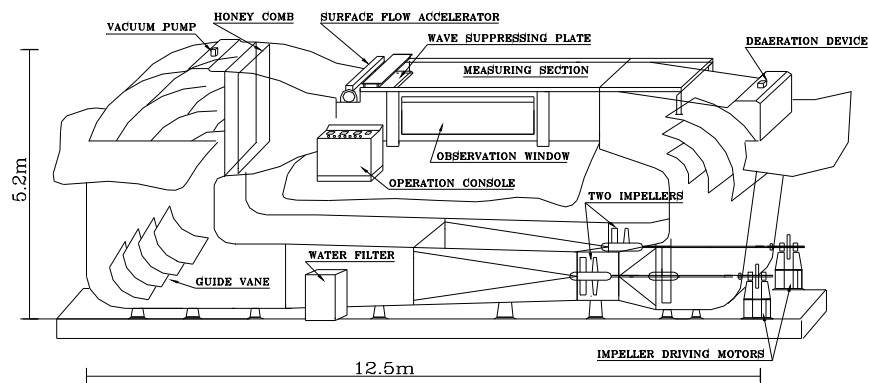


Fig. 6. Circulating Water Channel

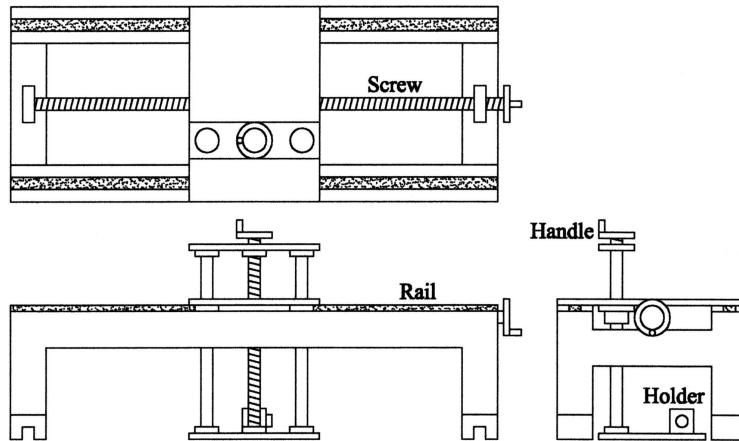


Fig. 7. Axis Traverse

각종 계측시 수중익 이동의 용이를 위하여 2차원 이송장치(Axis Traverse)를 사용하였는데 이송장치의 전체 크기는 길이 1.8m, 폭 0.4m, 높이 0.3m이며 작동범위는 수심방향으로는 0.45m, 폭방향으로는 1.8m이다.

수중익 주위의 순간 유동장 계측을 위하여 이중프레임 상호상관 PIV System을 채택하였다. 유동가시화 장치는 6W Ar-Ion LASER, Fiber Optic Cable 및 Cylindrical Lens가 부착된 Probe를 사용하였는데 최적의 LASER Sheet를 형성하기 위해서는 수면 상부에서 조사하는 것이 좋으나 자유표면의 교란에 의한 LASER의 산란 및 굴절을 막기 위해 조사용 Probe를 수밀 아크릴 통에 삽입하여 수중에 직접 설치하였다. LASER Probe를 물 속에 고정하기 위하여 Fig. 6과 같은 Traverse를 제작 물 속에 설치하였다. 두께 5mm 정도로 생성된 LASER Sheet는 수중익 후방의 50cm×50cm 정도를 조사하도록 조절하였다. 산란입자로는 비중이 1.1인 Vinyl Chloride Polymer를 사용하였고, 조사된 레이저 평면광이 입자에 의해 반사 또는 산란되어 발생하는 2차원영상은 CCD Camera(SONY SSC - M370)로 640×480 Pixel 해상도로 촬영과 동시에 Video Cassette Recorder(Panasonic AG - 7350)에 녹화한 후 Image Grabber(DT 3155)를 사용하여 1/30초 동안의 순간 이미지를 P/C로 받아들였다. 1000장의 영상을 획득하여 단일조명/이중프레임 상호상관법(Cross-correlation method) 알고리즘을 이용하여 속도벡터와 와도분포를 구하였다. 그리고 본 논문에서 PIV 속도장 계측을 통한 속도 벡터검출을 위해서는 한국해양대학교 유동가시화 실험실의 'Thinkers'를 사용하였으며, 와도분포 계산을 위해서는 'Exponential Cubic Spline Program'을 사용하여 계산하였다.

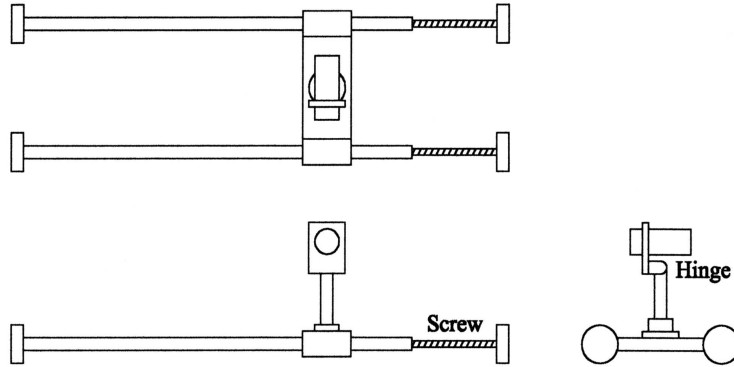


Fig. 8. LASER Probe Holding Traverse

2.3. 실험조건

Articles	Item	Specification
Visualization equipment	Image Board	DT3155 (640×480pixel)
	Light Source	6W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	Cylindrical Lens (width : 5mm)
Measuring condition	Working Fluid	Water
	Particle	Poly Vinyl Chloride (100 μ m)
	Inlet velocity	0.35m/sec
	Re No.	7.0 X 10 ⁴
	Input Device	CCD Camera
Image processing	Host Computer	Pentium PC (CPU speed: 800MHz)
	Calculation Time	3.0 min/frame
	Number of time mean data	1000 Frames
	Identification	Two-frame Gray-level Cross Correlation

Table 1. Experimental Condition

물수심(s)은 회류수조 수면으로부터 0.3 [m] 깊이이고 받음각(α)은 0°~ 40°까지이며 20°에서 30°까지는 2°간격으로 계측하고, 나머지 받음각에서는 5도 간격으로 계측하였다. PIV촬영시의 측정영역은 가로 0.3 [m]이며, Re수는 70000에서 실험을 수행하였다. 본 실험시의 Re수는 70000으로서 층류에 속하지만 수조내의 흐름 자체에 난류 성분이 포함되어 있고, 또한 모형의 표면 거칠기의 영향 등으로 실제 모형 주위의 흐름은 난류 유동으로 볼 수가 있다.

3. PIV를 이용한 유동해석

3.1. PIV의 원리

속도계측을 위한 정량적 가시화 기법(Quantitative Visualization Technique)의 한 종류로 유동장에서 유체입자의 속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간간격에서(ΔT)의 추적입자가 이동한 거리(ΔS)를 계측하여 입자의 이동속도를 구하는 방법으로, 단 여기서 추적입자는 미소시간동안 직선운동을 한다는 가정이 전제되어야 한다

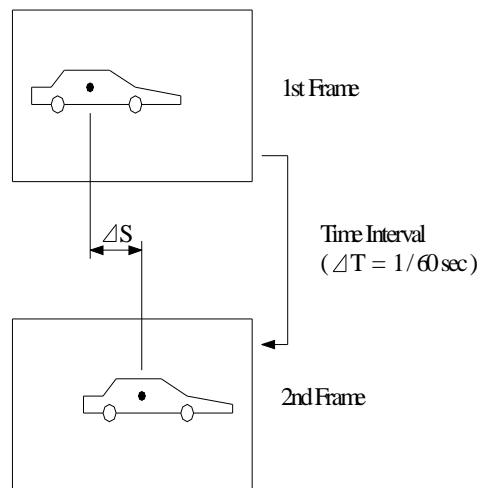


Fig. 9. PIV Principle

PIV를 LDV(Laser Doppler Velocimetry)와의 장·단점 비교를 하면, PIV의 장점은 비정상 유동장의 다차원 동시 다점 계측이 가능하고, 원리적으로 CFD에 대응할 수 있는 유일한 계측기법이며, 유동장 영상의 기록, 보존 및 재생이 가능하며 시스템 구성이 용이하다. 반면, 단점으로는 시공간 해상도가 비교적 낮으며, 최적조명 및 입자 선별의 제약이 있다

LDV의 장점은 계측 점의 시간해상도가 높으며, 정도 높은 시간 평균속도 값이 제공된다. 단점은 동시 다점 계측이 원리적으로 어렵고, 비정상 계측이 불가능하며, 시스템 구성이 비교적 복잡하다.

3.2 PIV 해석방법

3.2.1. 유동장 구성

PIV는 재현성을 갖춘 유동장의 확보가 필요하며, 투명한 아크릴 또는 유리관 등으로 굴절률을 고려하여 구성된 유동장에 작동유체 및 계측속도 범위에 따른 입자를 선정하여 추적입자를 주입하면 된다

추적입자 선택은 저속액체의 경우에는 주변의 온도변화에 따른 입자의 미소한 밀도 차이가 추종성에 큰 영향을 미친다는 것과 입자 주입에 따른 이상(二相)유동특성 또는 초기 교란상태를 억제하여야 한다는 것을 주의하면 된다

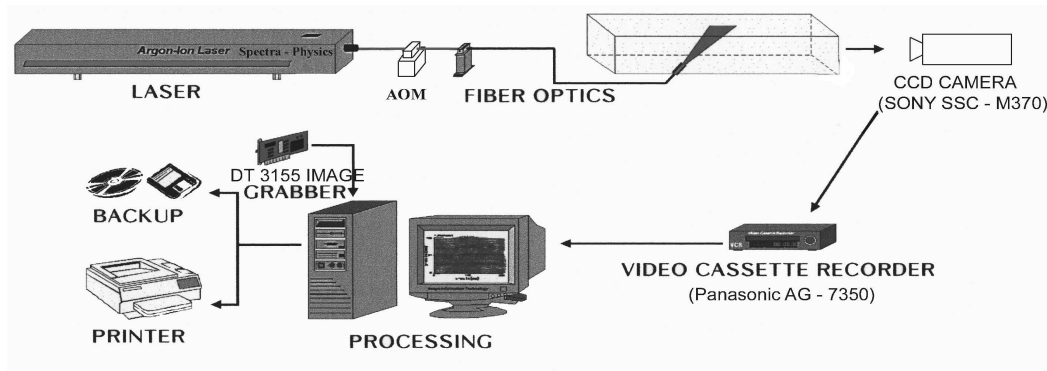


Fig. 10. PIV System

보편적으로 사용되는 추적입자로는 기체의 경우 10 미크론 전후의 광산란성이 우수한 미소입자(액적, 기체, 분말)를 사용하여야 하며 액체의 경우는 나이론 12, 폴리스티렌 구형입자(직경 10 ~ 100 미크론 전후) 또는 알루미늄분말을 사용하면 된다

3.2.2. 계측부 조명설치

PIV에 사용되는 조명은 2차원의 경우에는 두께 1 ~ 2mm 전후의 Sheet Light가 필요하며, 이 때 사용되는 광원으로서는 가시광선 Laser(Ar-Ion Laser, Green, 300mW ~ 10W, Fiber Optical Cable, Cylindrical Lens)가 가장 효과적이다. Laser 대신에 백색광원도 유효하나 발생열에 의한 유동장의 변동이 발생할 수 있으며 특히 저속액체의 경우 광원용 조명열에 의한 자연대류가 발생할 수 있으니 조심하여야 한다

광원의 강도로는, 저속액체의 경우는 1.0m/sec 이하이며 유동장의 크기가 150mm × 150mm에서는 500mW 전후, 그리고 고속기체의 경우는 10 ~ 40m/sec 범위이며 유동장의 크기가 150mm × 150mm에서는 5W 전후의 출력이 필요하다

고속유동계측의 경우에는 미소시간 간격을 확보하기 위하여 조명의 펄스제어가 필요하며, 1 Frame Auto-Correlation 방식의 Pulse Laser 조명을 사용하면 400m/sec의 고속기류까지 계측이 가능하다

3.2.3. 영상촬영

유동장 촬영장비로는 CCD Camera, HI-8mm Cam Coder, High Speed Camera 등이 있으며 유동장의 속도에 따라 좌우된다. 촬영된 유동장의 영상은 언제든지 반복처리가 가능하며, 영상입력 신호는 일반적으로 NTSC(National Television System Committee) Composite 방식을 사용한다

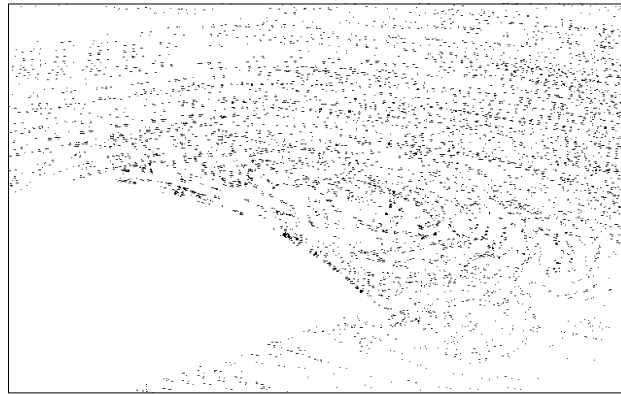


Fig. 11. Raw Image Captured by DT3155 Image Grabber

3.2.4. 영상획득

카메라 또는 영상저장 장치로부터 공급된 유동장의 Analog 입력신호를 2차원의 디지털 영상정보로 바꾸어주는 영상획득장치(Image Grabber)가 필요하다

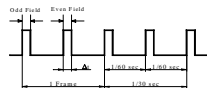


Fig. 12. NTSC Image Signal

Image grabber마다 해상도의 차이가 있는데 본 실험에 사용한 Image Grabber(DT3155)는 640×480 Pixel의 해상도로 녹화된 영상을 디지털화한다. Image Grabber가 녹화된 영상을 디지털화하여 저장하는 곳이 컴퓨터내의 메모리인데 하나는 디바이스메모리와 호스트메모리이다. 디바이스 메모리는 일반적으로 RAM이며 호스트 메모리는 하드드라이브를 말한다. 디바이스 메모리에 저장이 되어야 실시간(1/30초)이 되는데 일반적으로 Image grabber가 사용할 수 있는 디바이스 메모리는 RAM의 1/3정도이다. 이렇게 디바이스 메모리나 호스트메모리에 저장된 영상을 이미지파일로 변환하여 하드드라이브에 저장을 하게된다. 디지털화된 영상은 이미지파일로 포맷이 되면서 순수한 영상 외에 이미지파일이란 정보를 갖는 Header를 갖게되는데 영상을 해석하기 전에 이러한 Header는 제거를 해야한다. 일반적으로 Bitmap형식(*.bmp) 이미지파일은 Header가 파일상단에 존재하고 영상의 정보는 하단에서부터 저장이 되므로 다루기가 쉽지 않다. 그와 반면에 tif파일은 Header가 파일상단에 존재하고 바로 뒤에 영상의 정보가 저장이 되므로 상대적으로 다루기가 쉽다. Header를 제거하려면 Header의 크기를 알아야한다. 이미지 파일 크기에서 순수한 영상의 크기를 빼면 Header의 크기를 알 수 있다. 그 다음 프로그램을 코딩하여 Header크기만큼의 byte를 제거한 다음 순수한 영상을 NTSC주사방식인 Odd와 Even Field로 나누는 후 각각의 Odd와 Even Field를 보간하여 각각 하나의 Odd와 Even Frame영상을 만든다.

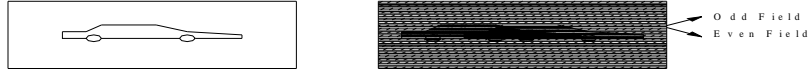


Fig. 13. NTSC 방법에 의해 촬영/저장된 영상



Fig. 14. Odd Field로 구성된 영상 및 격자보간 후의 영상



Fig. 15. Even Field로 구성된 영상 및 격자보간 후의 영상

이때 얻어진 영상정보는 바둑판 모양의 2차원 Pixel의 수평 및 수직공간배치(좌측 최하단은(1, 1), 우측 최상단은(640, 480)의 좌표값을 갖는다. 이때 각 위치에서의 밝기 정보는 조명에 의해 추적입자가 존재하는 Pixel은 밝기의 강도(흑백은 8Bit의 크기이며 이것은 $2^8 = 256$ 단계의 계조치)로 구분되며, '0'은 가장 어두운 부분이며 '255'는 가장 밝은 경우의 값이다. 영상획득을 칼라로 하였을 경우에는 RGB의 세 가지 색상으로 구분되며 각각 256단계의 계조치로 구분될 수 있다

영상획득장치의 중요한 규격은 입력신호의 종류(NTSC Composite 등), 공간해상도(640 × 480 Pixel), 1/30sec 간격의 Real Time 입력여부, 자체메모리 또는 확장 PC의 메모리의 용량 등으로 구분된다

영상획득장치로부터 획득된 영상은 영상처리(Image Processing)단계를 거쳐야 한다. 이때 처리하여야 하는 영상처리 과정으로는 히스토그램균일화, 국소적 영상개선, 영상평활화, 영상 예리화 등이 있다

- 히스토그램 균일화(Histogram Equalization)

명암의 빈도수가 한쪽으로 치우치지 않고 고르게 분포 되도록 하여 선명도를 조정하는 기법

- 국소적 영상개선

임의의 Pixel (x, y) 주위의 $n \times m$ 이웃을 취하고 이에 대한 히스토그램 균일화나 특정 분포화를 추구 할 수 있다. 영상의 모든 Pixel을 차례로 지나가면서 그 Pixel을 중심으로 한 $n \times m$ 국소적 Pixel들에 대하여 히스토그램 방법을 사용하여 명암도를 조정한다. 이런 식으로 전체 화상에 대하여 히스토그램에 의한 명암도 조정을 차근차근 해 나가면서 화상의 자세한 부분까지 선명하게 나타낼 수 있다

- 영상 평활화(Image Smoothing)

초기의 영상이 여러 단계의 처리 과정을 거치면서 잡음 등의 불필요한 요소가 섞이는데, 이러한 것들의 감소시키는데 이용되는 기법

· 공간 영역적 방법

1) 인근 평균 방법(Neighborhood Averaging)

: $N \times N$ 크기의 영상 $f(x, y)$ 가 주어졌을 때 모든 Pixel (x, y) 를 중심으로 한 이웃의 국소적 부분 $n \times m$ Pixel들을 평균하여 Pixel (x, y) 의 명암도로 대체하는 것. 단 $n \times m$ 의 크기가 커지면 커질수록 평활화 효과는 증대하나 반면에 영상의 선명도가 떨어진다. 선명도의 감소를 억제하는 것은 물체의 테두리부분을 살리기 위하여 필요하다. 이를 보완하기 위하여 역치(Threshold value)를 선정하여 역치를 넘는 부분의 명암도는 변화시키지 않고 그대로 두기도 한다

2) 중위수 선택 방법(Median filter)

: 고려중인 (x, y) Pixel 주위의 국소영역 Pixel 집합에 대한 명암도 수치들의 중위수를 선택하는 것으로, 국소영역 Pixel들의 명암도를 크기 순서로 나열했

을 때, 그 중앙에 위치한 명암도를 취하여 (x, y) Pixel의 명암도로 대체한다. 이 방법은 급격한 증감으로 나타나는 잡음 제거와 물체의 테두리에서 관측되는 명암도 변화의 보존에 매우 효과적이다

- 주파수 영역적 방법

1) 고주파 차단(Lowpass filter)

: 명암도가 급격하게 변화하는 모습은 영상의 Pixel 명암도에 대한 Fourier 변환 그래프에서 주로 고주파 쪽에 분포. 그러므로 명암도가 급격하게 변화하는 부분을 제거하여 평활화를 이룩하기 위해서는 Fourier변환 후에 고주파 부분을 차단하면 된다

i) 이상형 필터(Ideal Filter)

ii) 버터워즈 필터(Butterworth Filter)

- 영상 예리화(Image sharpening)

영상 물체의 테두리를 뚜렷하게 하여 영상이 또렷하도록 입력 영상을 개선하는 기법이다

- 공간 영역적 예리화 : 미분에 의한 방법
- 주파수 영역적 방법 : 저주파 차단(고주파 통과)필터에 의한 방법

3.2.5. 동일입자 추적

본 논문에서는 동일입자 추적방법으로 계조치 상호상관법을 사용하였다. 계조치 상호상관법과는 다른 입자 추적법은 개별적으로 분포된 입자들의 도심좌표를 추적하는 방법으로 입자크기 및 농도분포의 영향을 받는 반면에 계조치 상호상관법은 입자 개개의 도심좌표를 구하는 대신 계조치의 특성분포를 비교하여 가장 유사한 형태의 계조치 분포를 찾아내어 벡터의 종점으로 하는 방법이다. 2 Frame의 영상데이터를 이용한 계조치 상호상관법은 미소시간 동안 유동장의 입자영상의 계조 패턴은 크게 변하지 않는다고 가정 하에 1 Frame에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소시간 후의 제 2 Frame에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서 제 1 Frame의 임의의 위치를 중심으로 하여 제 2 Frame 상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호 상관계수값을 구하여 비교하면 그 중 가장 큰 값을 동일입자의 위치로 간주할 수 있게 된다는 원리를 이용한다. 여기에 사용되는 최대의 계조치 상호상관계수를 찾는 공식은 다음과 같다

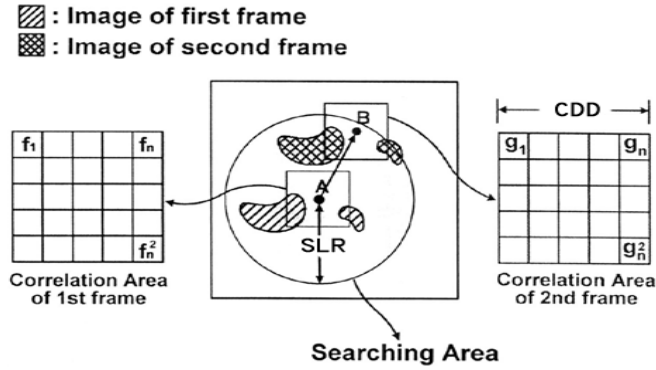


Fig. 16. Grey Level Cross-Correlation Method

$$C = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (f_{ij} g_{kl})$$

위의 공식으로 1 Frame에서의 임의의 위치에 대응하는 2 Frame에서의 최대의 계조치가 상호상관영역을 찾으려면, 두 Frame에서의 상관영역 중심간의 거리차이를 바로 유체입자의 이동거리로 볼 수 있게된다

3.2.6. 유체입자 이동속도계산

계조치 상호상관법으로 유동장에서의 유체입자의 이동 시점과 종점을 구했다. 그 때 시점과 종점사이의 거리(ΔS)를 1 Frame과 2 Frame과의 시간차(ΔT)이인 1/60sec로 나누면 속도($v = \frac{\Delta S}{\Delta T}$)를 구할 수 있다

최종적으로 얻어진 속도벡터에는 알고리즘 또는 원시영상의 화질열화 등의 원인에 의해 이상치가 포함되어 있다. 이를 유동장의 특성에 부합시켜 정확히 제거하는 이상치의 제거과정이 필요하다

3.2.7. 와도계산

유동장 각각의 위치에서 구해진 속도벡터를 이용하여 각각의 위치에서의 와도($\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$)를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 Exponential Cubic Spline Method를 이용하여 각각의 위치에서의 $\frac{\partial v}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$ 를 계산한 후 구하였다

4. 평균유동장 계측 결과 및 토의(Result & Discussions)

4.1. 평균유동특성

PIV 기법을 통해 1000장의 속도 데이터를 획득, 시간 평균하여 다음과 같이 유속 분포, 유선, 와도분포로 나타내었다. Fig. 17은 받음각 10° 일 때 각각의 전개판 단면 형상에 대한 속도분포를 나타내고 있다. 이 경우에는 4개의 전개판에 따른 속도분포의 차이가 거의 없음을 알수가 있다. 단지 Two-slot B 형의 뒷날 근처에서 작은 유동박리가 발생하는데 이것은 다른 형태에 비해 캠버가 크기 때문이다. 받음각 15° 일 때까지 이러한 경향이 유사하게 유지되며, 받음각이 20° 이상이 되면 슬롯의 유무에 따라 유동이 크게 변하는 것을 볼 수가 있다.

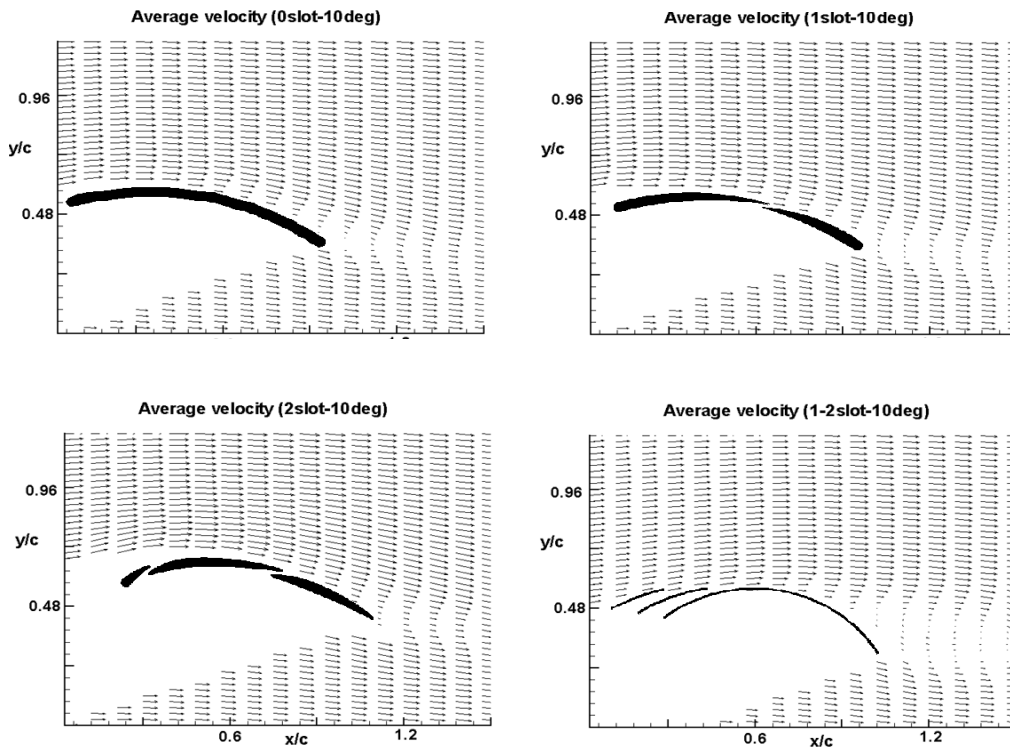


Fig. 17. 전개판 단면 형상에 따른 속도 분포 ($\alpha=10^\circ$)

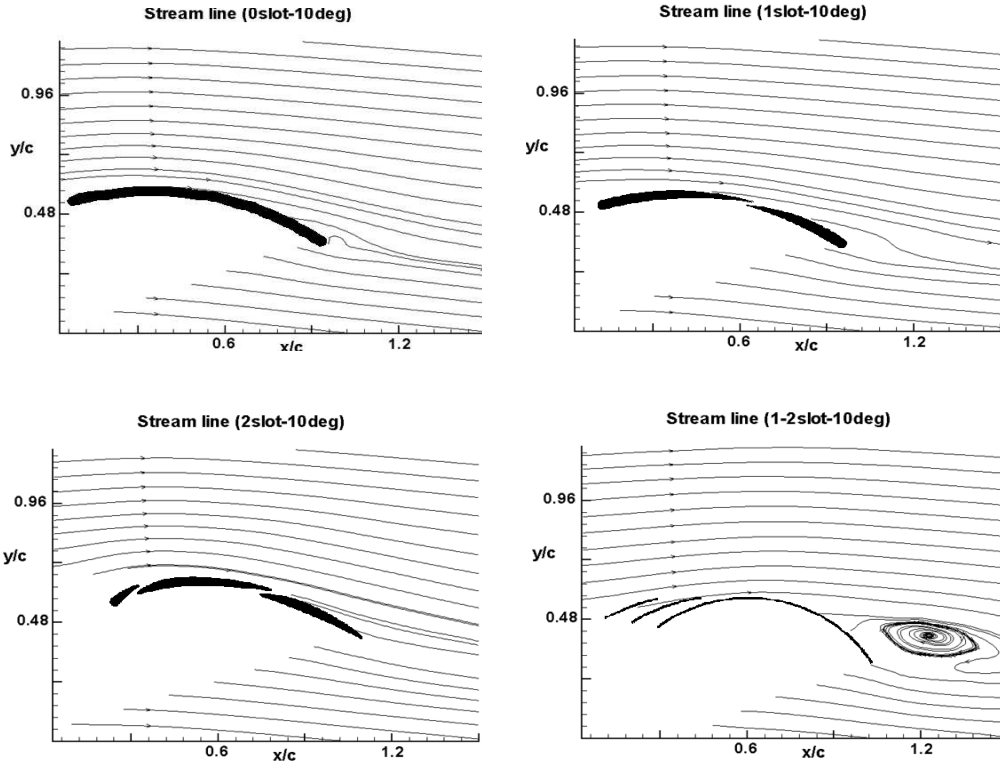
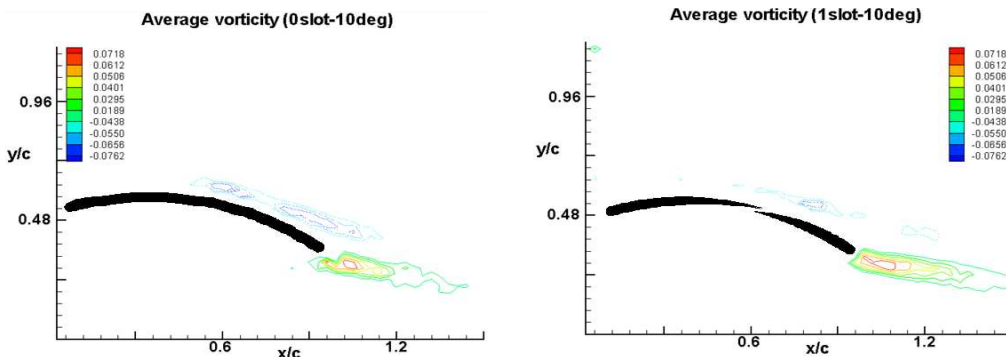


Fig. 18. 전개판 단면 형상에 따른 유선 ($\alpha=10^\circ$)



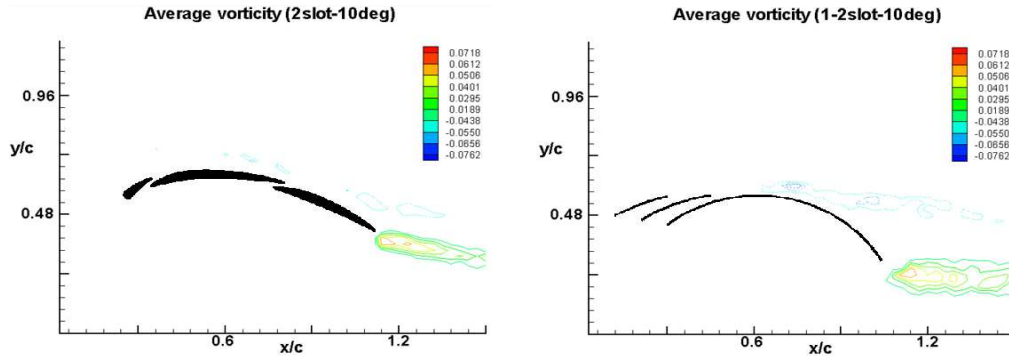


Fig. 19. 전개판 단면 형상에 따른 와도 분포 ($\alpha=10^\circ$)

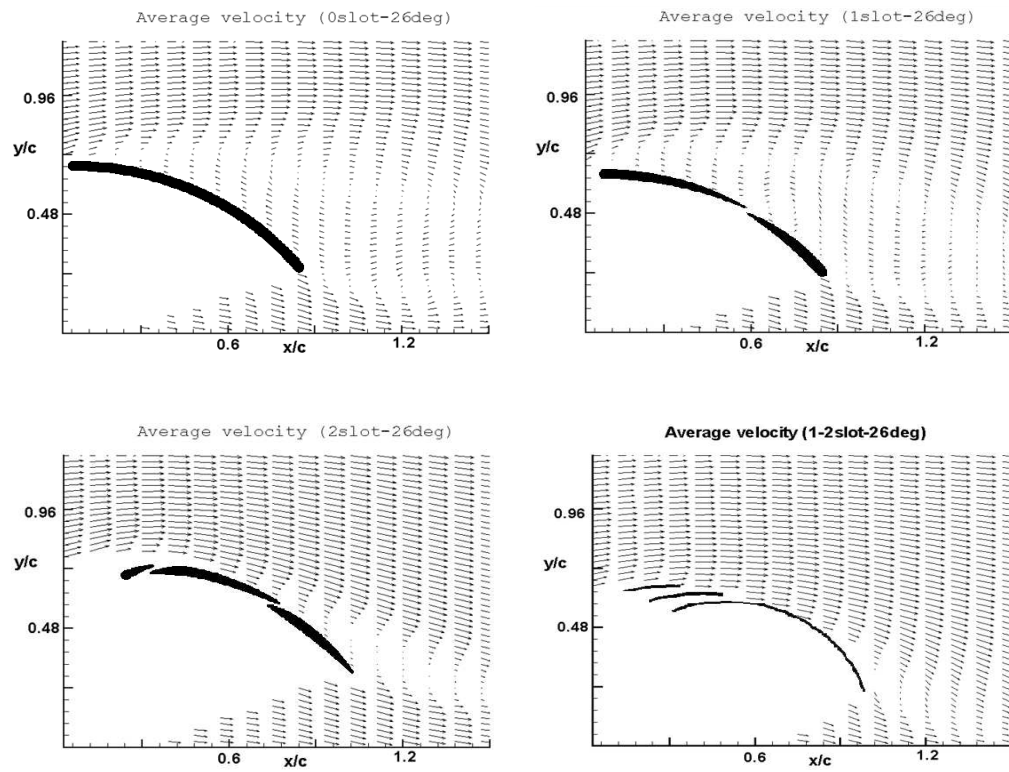


Fig. 20. 전개판 단면 형상에 따른 속도 분포 ($\alpha=26^\circ$)

Fig. 20, 21, 22 는 받음각이 26° 일 때의 결과들을 보여준다. 먼저 속도분포에서 볼 수 있듯이 nonslot 형과 one-slot 형에서는 날개의 앞날에서부터 유동박리가 발생하여 날개의 흡입면 전체가 재순환 영역이 되는 반면, two-slot 형에서는 박리가 거의 발생하지 않는다. Non-slot 형에서는 15° 부터 유동박리가 발생하여 20° 이상이 되면 날개의 윗면 전체로 확대되는데, 이러한 현상이 발생하는 받음각은 one-slot 형에서는 24° 이상, two-slot 형에서는 28° 이상이 되는 것을 알 수가 있었다. 따라서 유동박리가 발생하면 급격하게 양력이 감소하고 항력은 증가되는데, 슬롯의 적용으로 인해 이러한 실속각을 더 늦추게 되고, 이것은 곧 날개의 효율을 증가시키게 될 것이다.

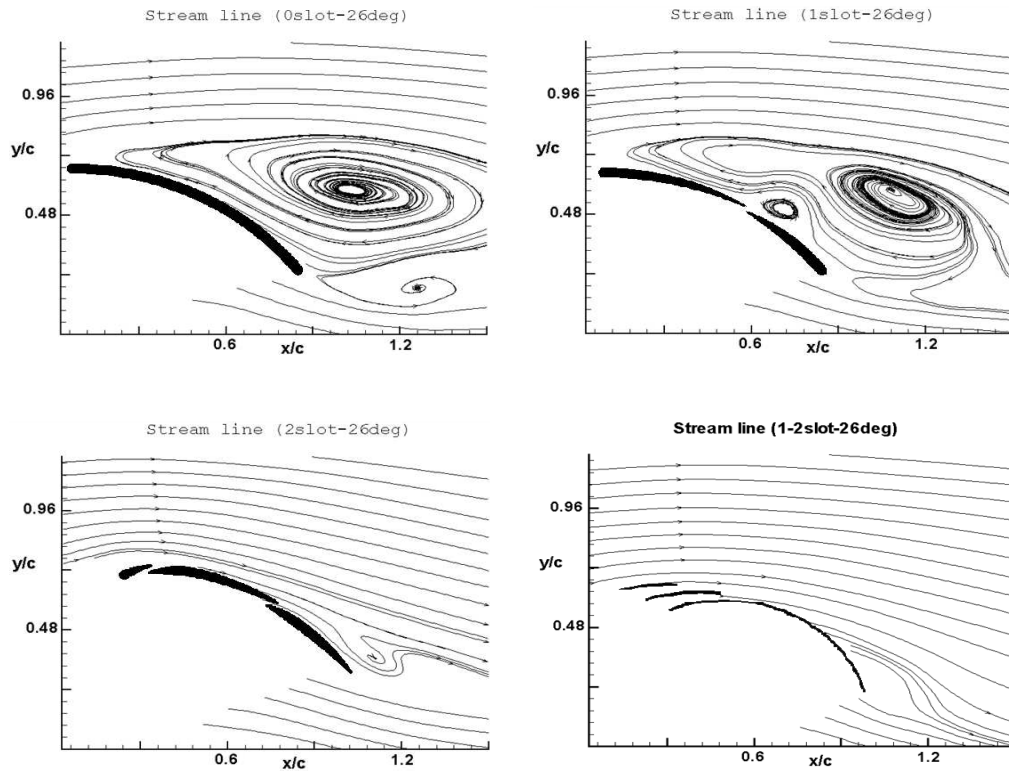


Fig. 21. 전개판 단면 형상에 따른 유선 ($\alpha=26^\circ$)

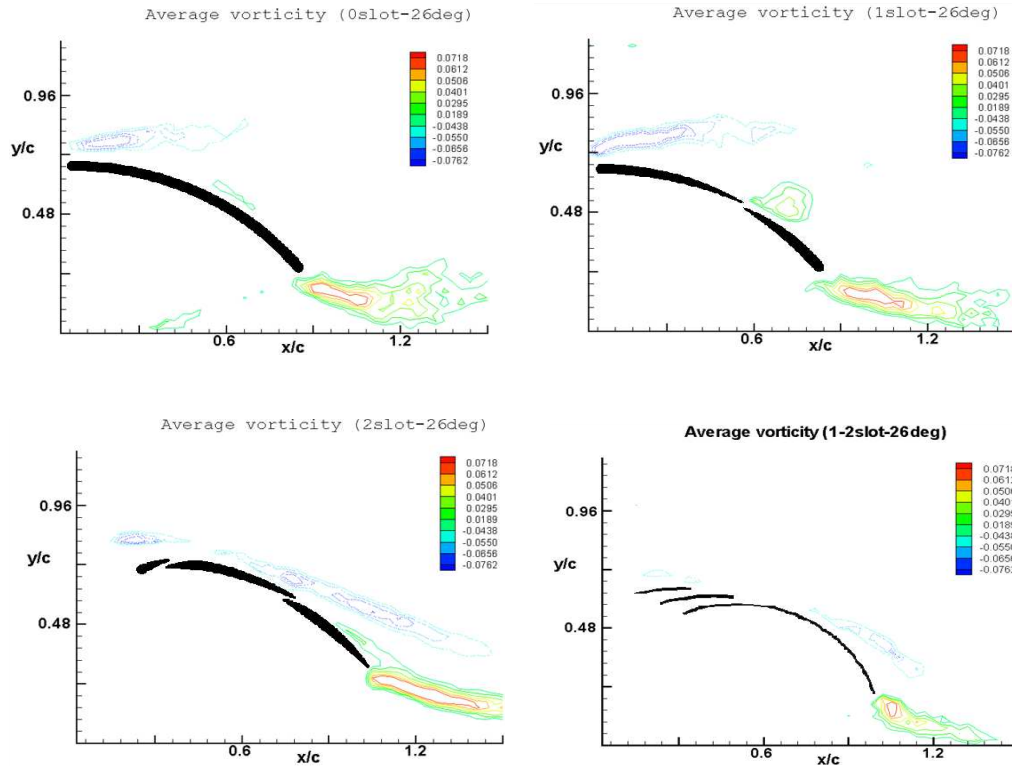


Fig. 22. 전개판 단면 형상에 따른 와도 분포 ($\alpha=26^\circ$)

4.2. 양항력 계측 실험 결과

전개판의 양항력은 백경공업(주)의 회류수조 및 3분력계를 이용하여 계측하였다. Nonslot 형, One-slot 형, Two-slot 형의 3개의 전개판에 대해 양항력을 계측하여 서로 비교해 보았다. Fig. 23에서는 Non-slot, One-slot, Two-slot 순으로 양력이 증가하는 것을 볼 수 있고, 반면 항력은 변화가 거의 없다. Fig. 19의 양항력비 그래프에서도 이러한 경향이 잘 나타나고 있다. 본 그래프에서는 앞의 PIV 실험 결과와 마찬가지로 Two-slot 형이 다른 전개판에 비해 양력 및 양항비 면에서 우수한 성능을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 받음각 20° 이하에서는 양항력이 거의 비슷하며, 20° 이후에 조금씩 차이가 나기 시작한다. 받음각 24° 를 넘어서면 어느순간 양력이 갑자기 감소하는 부분을 볼 수가 있는데, 이 받음각을 실속이 되기 시작하는 각으로 볼 수 있을 것이다.

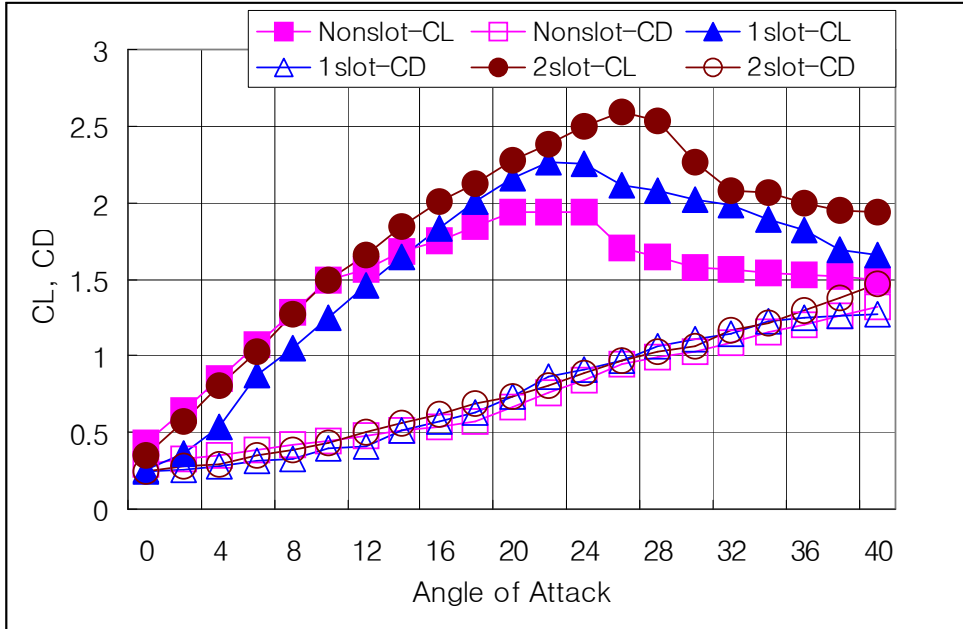


Fig. 23. 양력 및 항력 계측 결과

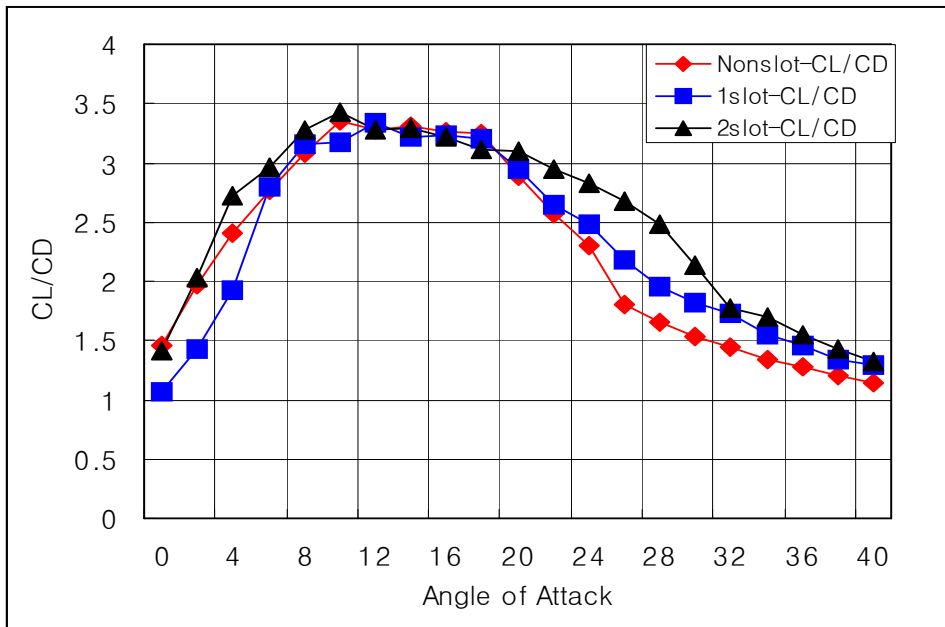


Fig. 24. 양항비 (C_L / C_D) 계측 결과

5. 난류유동 계측 결과 및 토의

5.1. 개요

현실에서 경험하는 대부분의 유동현상은 난류유동으로서 공학적으로 해결해야 하는 많은 문제들은 이런 유형의 유동에 속한다. 난류유동이 층류유동에 비해 갖는 특징은 난류내의 eddy의 복잡하고도 불규칙적인 운동에 있다. 층류유동에서는 유선이 주위의 유선과 섞이지 않는 반면, 난류에서는 이 같은 유선간의 평행성이 eddy의 운동에 의해 흐트러지게 된다. 그 결과 난류내의 한부위에서 다른 부위에서의 운동량, 열, 그리고 물질등이 활발히 전달되며, 이에 따라 유체유동 전체적으로는 점성, 열전달계수 그리고 확산도(diffusivity)등이 증가하는 효과를 가져온다. 이것은 마치 기체에서 분자운동이 기체의 점성 및 확산성을 결정지어 주는 것과 일면 흡사하다고 볼 수 있다. 이와 같은 난류유동의 복잡하고 불규칙함 때문에 유동장내의 모든 곳에서의 속도 및 압력을 매순간 다 찾아내기는 현실적으로 불가능하므로, 시간과 장소에 따라 변화하는 값들의 평균치를 가지고 난류유동의 특성을 파악 해석한다.

난류계산의 시발점이 되는 Boussinesq의 난류점성의 개념은 1887년, 또 난류계산을 만족하는 레이놀드 방정식은 1895년에 제출되어 졌다. 난류를 계산하려고 하는 노력은 지금까지 약 100년간의 역사를 가진다.

5.1.1 난류의 물리적 성질

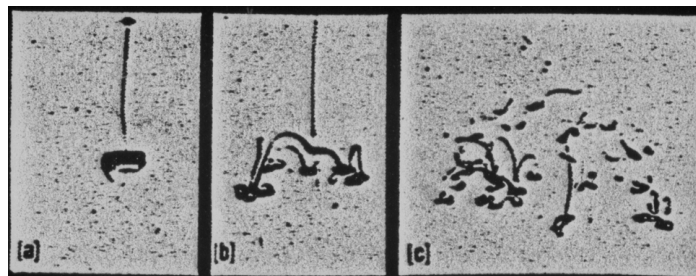


Fig. 25. 물에 떨어뜨린 우유의 난류유동 예

담배의 연기, 커피나 우유의 흐름등 난류는 일상 우리 주위에 흔히 접할수 있는 현상이다. 난류유동은 레이놀드수가 매우 크며, 이것은 관성항이 크고 또 강한 비선형성을 의미한다. 이 비선형성의 작용은 더 간단히 말하면 $\cos x$ 라고 하는 입력으로부터

$\cos 2x$ 가 되는 고주파가 발생하는 것으로 현상적으로는 큰 와가 분열해서 바로 작은 와를 만드는 것으로 대응한다. Fig. 25 그 때문에 난류에는 흐름의 폭 정도가 큰 와부터 점성에 의해 소멸하기 전의 작은 와까지 여러 가지 큰 와열이 규칙적으로 혼합하면서 흐르고 있다. 공학적으로 본 난류의 의미는 이 난류운송속도가 큰것에 부합되는 것이라 말해도 좋다. 실제의 난류혼합과정을 이해하기 위해서는 난류중의 잉크가 혼합하는 과정의 개념도를 그림2 에 나타낸다. 혼합은 번호순으로 진행하고 큰 와의 전단에 의한 확산으로 시작해서 순차에 의해 작은 와에 의해 변형되어 확산되어서 아주 가늘어진다. 그러나 표면적이 상당히 큰 상태가 된다. 그래서 최종적으로는 분자확산에 의해 혼합이 달성된다, 난류는 산만계이기 때문에 연속적으로 에너지를 공급하지 않으면 난류는 점성작용에 의해 감쇠된다. 전단층 난류에는 평균류에 의한 큰 eddy의 확산에 의한 평균류부터 난류성분에 에너지가 공급되어 아주 작은 eddy를 확산하는 것에 의해 순차적으로 작은 eddy에 에너지가 전해져서(energy cascade) 최소 스케일 eddy에서 점성에 의해 확산되어져 열로 변한다. 이 난류에너지의 보급기구인 eddy의 확산은 3차원적이고 난류는 본질적으로 3차원 와의 흐름이다, 정리해서 말하면 불규칙성, 고 레이놀즈수, 큰 혼합확산율, 3차원 와도변동, 확산성등의 특징이 eddy로 배치된 흐름을 난류라고 한다.

5.1.2 레이놀즈 방정식

난류의 불규칙성에 대처하기 위해 NS방정식에 대해 어느 정도 평균조작을 가하지 않으면 안된다. 레이놀즈는 난류유동의 속도를 시간평균부분과 변동부분으로 이루어진 것으로 표현하였는데 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \bar{u} + u' \quad (2)$$

평균치 \bar{u} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{u} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u dt$$

(3)

변동치 u' 의 정의로부터 다음이 성립한다.

$$\overline{u'} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u' dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (u - \bar{u}) dt = \bar{u} - \bar{u} = 0$$

(4)

식(2)을 NS식에 대입해서 시간평균을 취하면 레이놀즈 방정식이라 불리는 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'v'} \quad (5)$$

난류유동의 경우는 층류의 경우와 다르게 평균치에 대한 방정식에 $\overline{u'v'}$ 와 같은 부가적인 항들이 포함되어 있고 이는 추가적인 응력으로 간주될 수 있다. 이 추가항을 난류응력 혹은 Reynolds 응력이라 부른다.

일반적으로 Reynolds decomposition을 거친 난류유동방정식의 미지항의 갯수는 방정식의 갯수보다 많다. 이는 난류응력이 추가적으로 존재하기 때문이다. 이 경우 유동방정식의 개수와 미지항의 개수가 같도록 난류응력에 대한 추가적인 방정식을 마련하는 것을 난류응력의 종결문제(closure problem)라 한다. 종결문제를 해결하기 위한 난류응력과 평균속도장 사이의 관계를 난류모델(turbulence model)이라 한다. 난류모델들은 이제까지 많은 연구자들에 의해서 여러 가지 방법들이 제안되어 있으며, 모형의 형태가 단순한 대수적인 모형부터 Navier-Stokes 방정식과 유사한 형태의 모형까지 다양하다. 이러한 난류모델의 결정 및 계산법의 성능평가는 전반적으로 실험데이터에 의존하기 때문에 신뢰성이 높은 실험 데이터가 필요하다.

5.2 PIV 기법을 이용한 난류구조 해석

앞에서 다루어진 것처럼 대부분의 유동은 난류유동으로서 그 속도장은 시간 (t)와 공간(x,y,z)의 함수로 주어지는 매우 복잡한 유동구조를 가지고 있다. 이러한 난류 유동을 정확히 해석하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 전체 유동장의 순간 속도장을 무수히 많이 측정하여 이들을 통계 처리하여야 한다. 최근 들어 컴퓨터와 화상 처리 기술의 발달로 인해 유동화상을 이용한 속도장 측정 기법으로 정성적, 정량적인 유동 정보를 계측할 수 있게 되었다.

이러한 PIV 속도장 측정기법을 난류유동에 적용하기 위해서는 빠르게 변화하는 난류 eddy 거동을 잡을 수 있는 충분한 시간 분해능과 공간 분해능이 필요하다.

따라서 미소 조사구간을 작게 하여 충분한 공간분해능을 확보하여야 한다. 그러나 공간분해능을 증가시키게 되면 측정구간이 너무 작아져 전체적인 속도장 정보를 얻고자 하는 본래 취지를 벗어나게 된다. 난류에너지가 소산되는 특성 scale 인 Kolmogorov scale η 가 경계층 유동의 경우 0.2mm 정도이므로, 이것을 해상도가

1Kx1K 인 CCD카메라를 이용하여 dissipation 관련 난류 eddy 거동을 32x32 sub-pixel accuracy 의 PIV 시스템으로 측정하면 관측구간을 3mm x3mm 이내로 줄여야 한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 유동화상을 35mm 이상의 large format film 이나 2Kx2K pixel 이상인 고해상도 카메라를 사용하여 입자영상을 획득하여야 한다. 그리고 고해상도 CCD 카메라를 이용한 디지털 PIV 기법에서는 Westerweel 등(1993) 이 제안한 sub-pixel 수준의 변위를 고려하여 측정 정확도를 향상시키는 노력이 필요하다. 본 연구에서 사용된 CCD카메라의 해상도는 640x480이로써 미세한 스케일의 난류 유동 정보를 얻는 것은 상당히 어려운 일이다. 때문에 비교적 큰 스케일의 난류 eddy 거동 정보를 얻음으로서 본 PIV 시스템의 난류 유동 계측 가능성을 보고자하고, 이후 장비가 업데이트 된다면 더 자세한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

PIV 속도장 측정기법을 이용하여 난류구조를 정확히 해석하기 위해서 우선적으로 고려해야 할 사항중의 하나는 평균하기 위한 순간 속도장 데이터의 수이다. 난류구조의 정확한 해석을 위해서는 무수히 많은 순간 속도장을 앙상블(ensemble) 평균하여 난류강도, Reynolds 전단응력, 난류운동에너지 등과 같은 난류 통계치 들의 공간적 분포를 구하여야 한다. 이 때 얼마나 정확한 난류 통계치를 얻느냐는 앙상블 평균에 사용된 순간속도장의 개수가 충분하느냐에 달려있다. 일반적으로 앙상블평균에 사용된 순간 속도장의 개수 N 이 증가할수록 난류 통계치의 정확도는 증가하게 된다. 그러나 N 이 증가할수록 처리해야 할 유동영상의 개수가 증가하게 되므로, 화상기억장치의 메모리 용량 증가와 함께 속도장 계산 및 후처리 과정에 들어가는 전체 계산시간이 급격히 늘어나게 된다. 따라서 실험시 주어진 여건 하에서 적절한 N 값으로 절충하는 노력도 필요하다.

또한 상호상관 PIV적용시 측정의 정확도는 추적입자의 거동, 입자의 변위장으로부터 속도장을 추출할 때의 필터링 효과, 영상을 얻는 광학계의 비선형적 효과 등에 좌우되며 어느 특정한 위치에서 국소적인 영향이 커지기도 한다. 이러한 필터링 효과를 감소시키기 위해서는 상호상관함수를 적용하기 위한 상관영역(Interrogation Size : CDD)을 되도록 작게 하는 것이 타당하나, 추출구간의 입자수 및 변위의 크기등으로 인한 에러가 발생할 확률이 커지므로 적절한 선택이 필요하다.

이 외에 PIV 계측 결과에 영향을 미치는 변수로서 탐색영역 (Searching Limit Range : SLR)을 들 수가 있는데, 이것 또한 위와 같은 선택 과정을 필요로 한다.

이러한 과정을 거쳐서 구해진 속도 데이터를 이용, 다음 식들에 의해 난류통계치를 구하게 된다.

$$\text{난류응력 (Reynolds Stress)} = -\rho \overline{u'^2} \quad , \quad -\rho \overline{u'v'} \quad (6)$$

$$\text{난류운동에너지 (Turbulent Kinetic Energy) } = \frac{u'^2 + v'^2}{2} \quad (7)$$

$$\text{난류강도 (Turbulence Intensity) } : T_U = \frac{\sqrt{u'^2}}{u} , T_V = \frac{\sqrt{v'^2}}{v} \quad (8)$$

5.3 난류유동특성

본 연구에서는 순간 속도장의 개수 (N), 탐색영역의 크기(SLR), 그리고 상관영역(CDD)에 의한 Parametric study를 통해서 최적의 조건을 찾고, 이에 따른 각각의 전개관 주위의 난류 유동 특성을 파악해보고자 하였다.

우선적으로 순간 속도장의 개수에 따른 난류 통계치의 변화를 살펴 보았다. N값은 계측 시스템의 구성에 따라 달라지지만, 보통은 최소 500장 이상이 되어야 어느정도 신뢰할 만한 결과치를 얻을 수 있다고 여겨지는데 본 연구에서는 250장, 500장, 1000장에 대해서 해석해보았다.

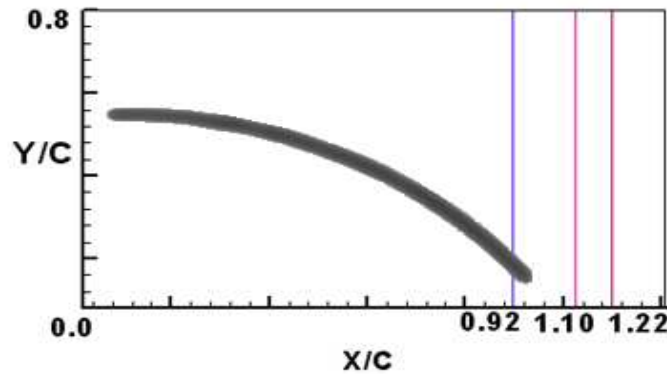
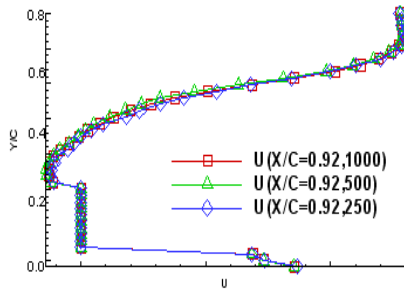


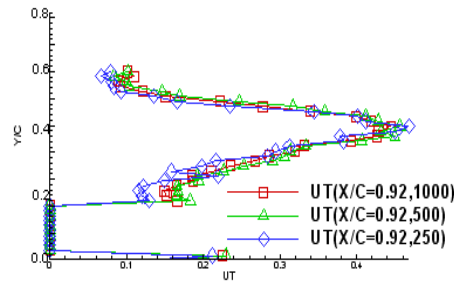
Fig. 26. 속도 및 난류강도 데이터 추출 위치

먼저 주유동 방향의 위치 X/C를 Fig. 26과 같이 0.92, 1.1, 1.22 세 점으로 잡고, 이들 점에서 x축에 수직한 가상선위의 속도 및 난류 통계치(주유동방향 난류강도 ; U_T)를 다음의 그림으로 나타내었다. SLR은 25, CDD는 20으로 고정하고 N를 변경시키면서 계산한 결과이다. Fig. 27에서 N 값에 따른 평균 속도 분포를 보면 N값에 크게 영향을 받지 않는 것을 볼 수가 있는데, 평균 속도 분포는 N값이 100장 정도만 되어도 하나의 속도분포 곡선으로 잘 수렴하게 된다. 반면에 난류강도는 250장이거나 500장에서는 튀는 값들이 많고 잘 수렴하지 않으며 1000장이 경우에는 비교적 매끄럽게 잘 수렴하는 것을 볼 수가 있다. 앞에서 설명한 것처럼 N이 커지면 커질수록 더 정확

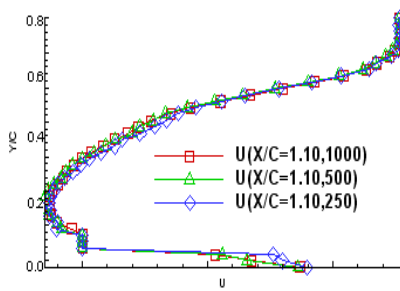
한 결과를 얻을 수 있겠지만, 많은 시간과 노력이 요구되어 지므로 1000장 정도가 적당하다고 여겨진다.



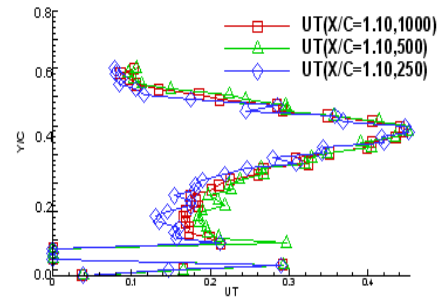
(a)-1. X/C=0.92일 때 평균속도



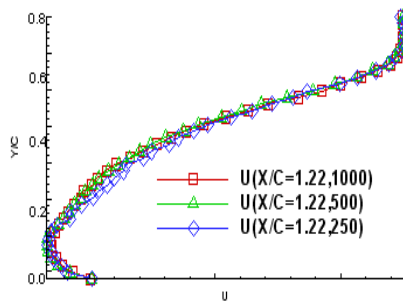
(a)-2. X/C=0.92일 때 난류강도(T_U)



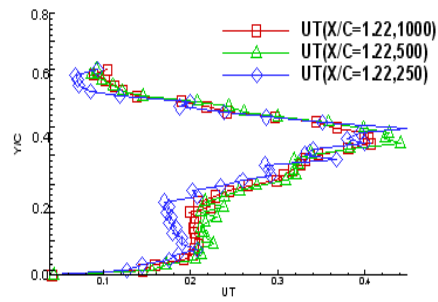
(b)-1. X/C=1.10일 때 평균속도



(b)-2. X/C=1.10일 때 난류강도(T_U)

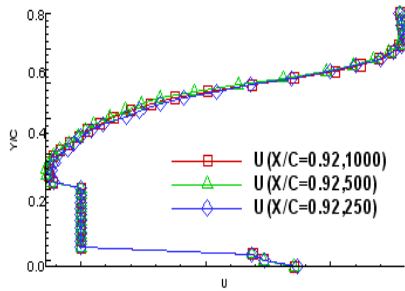


(c)-1. X/C=1.22일 때 평균속도

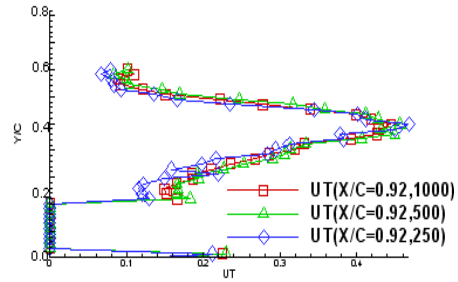


(c)-2. X/C=1.22일 때 난류강도(T_U)

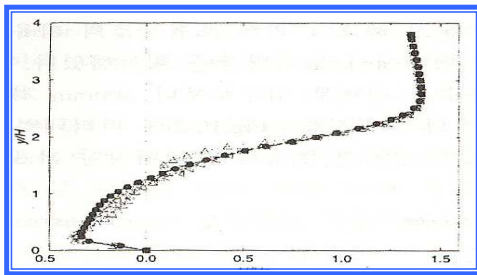
Fig. 27. 순간 속도장 개수(N) 변화에 따른 평균속도 및 난류강도 분포



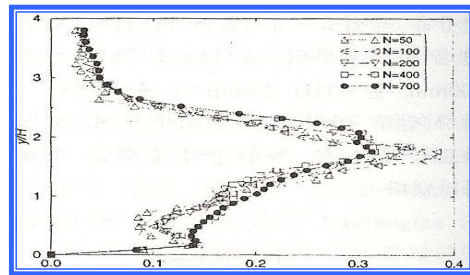
(a)-1. X/C=0.92일 때 평균속도



(a)-2. X/C=0.92일 때 난류강도(T_U)



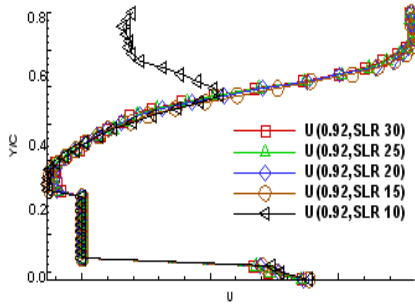
(b)-1. 평균속도



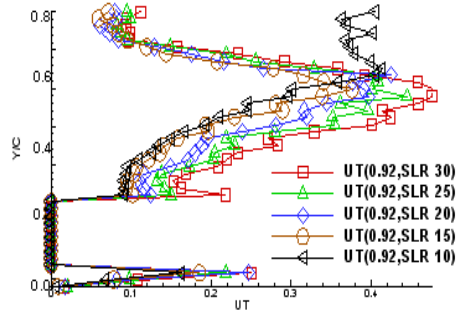
(b)-2. 난류강도(T_U)

Fig. 28. AFERC 실험결과와의 비교

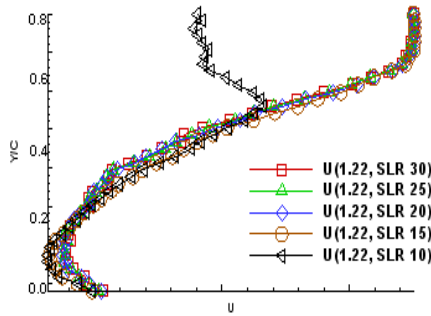
Fig. 28은 본 실험결과와 포항공대 유체공학연구센터(AFERC)의 실험결과를 비교해 본 것이다. 여기서 (a)는 본 실험 결과이며, (b)는 AFERC의 실험결과이다. AFERC의 실험 결과는 수직 격벽 후류의 재순환 영역에서 평균 속도 및 난류 강도를 PTV(Paticle Tracking Velocimetry)를 이용하여 계측한 결과이다. 본 논문에서 실시한 것과 동일하게 N(유동장의 개수)를 변화시키면서 평균 유동과 난류 유동을 계측한 것인데 보는 바와 같이 거의 유사한 형태를 보여주고 있음을 알 수가 있다.



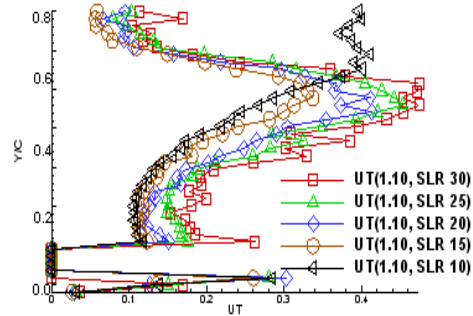
(a)-1. X/C=0.92일 때 평균속도



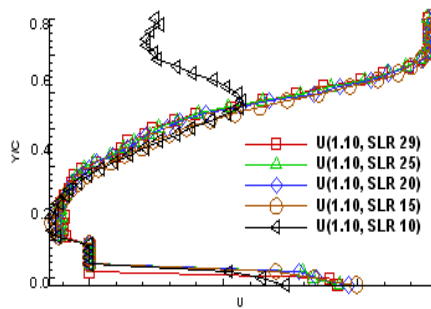
(a)-2. X/C=0.92일 때 난류강도(T_U)



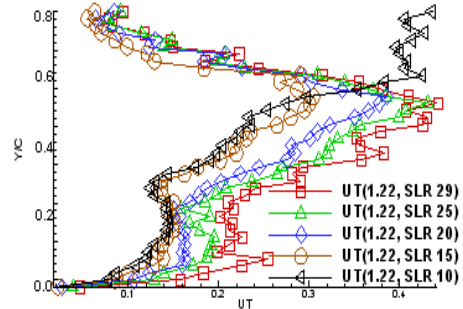
(b)-1. X/C=1.10일 때 평균속도



(b)-2. X/C=1.10일 때 난류강도(T_U)

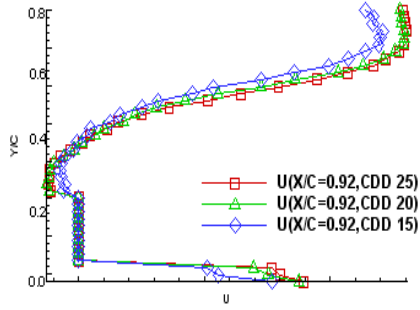


(c)-1. X/C=1.22일 때 평균속도

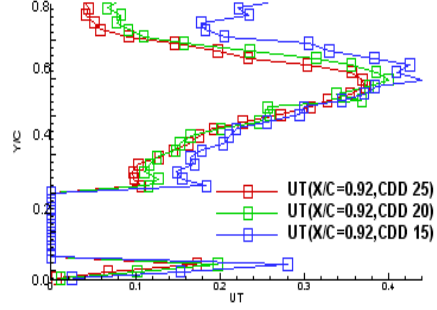


(c)-2. X/C=1.22일 때 난류강도(T_U)

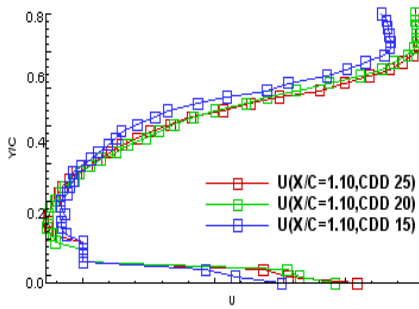
Fig. 29. 탐색영역(SLR) 변화에 따른 평균속도 및 난류강도 분포



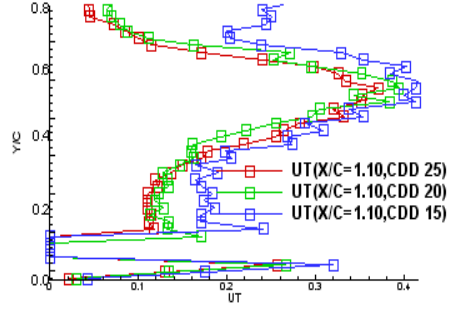
(a)-1. $X/C=0.92$ 일 때 평균속도



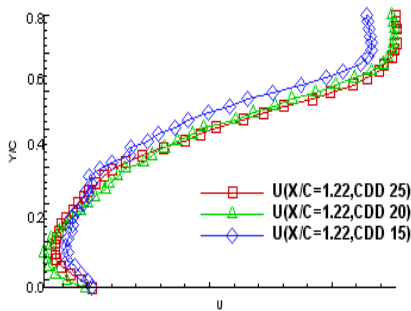
(a)-2. $X/C=0.92$ 일때 난류강도 (T_U)



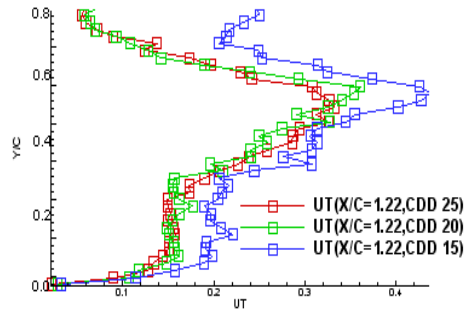
(b)-1. $X/C=0.92$ 일 때 평균속도



(b)-2. $X/C=0.92$ 일 때 난류강도 (T_U)



(c)-1. $X/C=0.92$ 일 때 평균속도

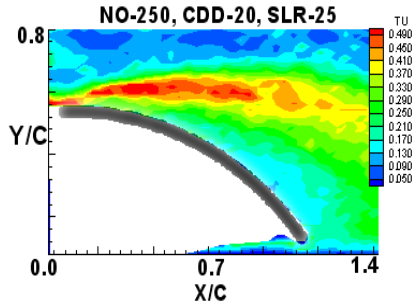


(c)-2. $X/C=0.92$ 일 때 난류강도 (T_U)

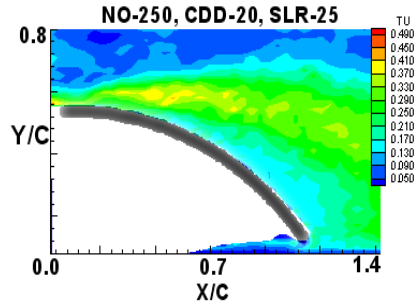
Fig. 30. 상관영역(CDD) 변화에 따른 평균속도 및 난류강도 분포

Fig. 28은 탐색 영역(SLR)의 최적값을 찾기 위한 과정이다. 이때 N는 250장, CDD는 25이다. SLR은 10에서 30까지 5pixel 간격으로 증가시켜 보았는데, 그림에서 보는 것처럼 SLR이 10일 때는 난류강도뿐만 아니라 속도분포도 전혀 수렴을 하지 않는다. 속도분포도는 15도 이상이면 거의 다 수렴을 하게 되는데, 앞의 N수 결과와 마찬가지로 평균속도만을 구하고자 할 때는 SLR이 15이상이면 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 반면에 난류강도 결과에서는 SLR 15 이하의 결과들은 SLR 20 이상의 결과들에 비해 작은 수치를 가지며, 데이터가 하나의 곡선상에 수렴이 잘 되지 않는다. 이에 비해 SLR 25의 난류강도 값이 비교적 잘 수렴하고 있음을 알 수가 있다. 29는 CDD 변화에 의한 평균속도 및 난류강도를 나타낸 것이며 SLR은 25, N은 250일 때의 결과이다. CDD 15일 때는 CDD 20 또는 25 결과에 비해 큰 차이가 나는 것을 볼 수가 있고, 20과 25에서의 결과는 유사하게 나타난다. 이 2가지 경우에서의 결과가 큰 차이가 없으므로 계산 시간 및 필터링 효과 등을 감안할 때 CDD 20이 적절할 것이다

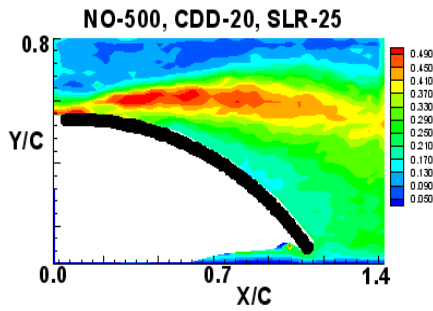
Fig. 30, 31, 32는 앞의 parametric study 과정에 의한 결과들 중 난류강도 분포 (\mathcal{T}_U , \mathcal{T}_V)를 나타낸 것이다. 흐름에 수직한 방향(y)의 난류강도(\mathcal{T}_V) 분포는 흐름 방향(x)의 난류강도 분포에 비해 아주 작은 값을 가지는데 이것은 각각의 case에 따라 전반적으로 큰 변화를 보이지 않는다. 반면에 흐름 방향(x)의 난류강도(\mathcal{T}_U) 분포는 case별로 변화가 잘 보이고 있다. N의 변화에 따른 난류강도 그림 Fig. 30에서는 N이 변함에 따라 난류강도 분포의 변화가 비교적 작지만, Fig.31과 Fig.32에서는 전반적으로 각 case에 따른 난류강도 분포의 차를 잘 볼 수가 있다.



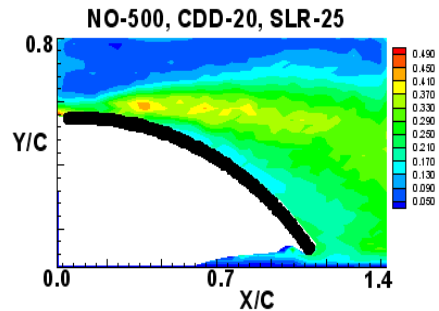
(a)-1. N=250일 때 난류강도 (T_v)



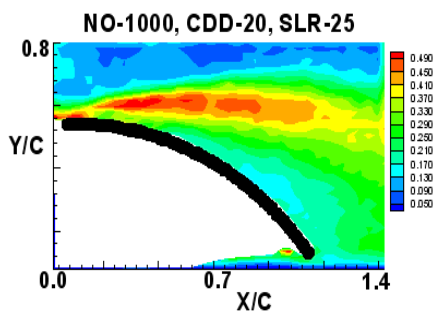
(a)-2. N=250일 때 난류강도 (T_v)



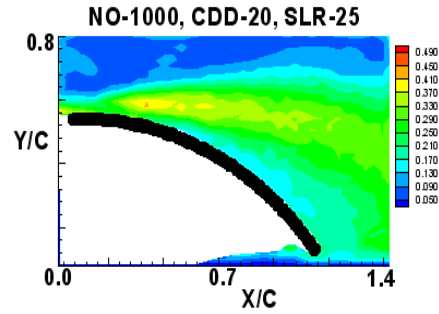
(b)-1. N=500일 때 난류강도 (T_v)



(b)-2. N=500일 때 난류강도 (T_v)

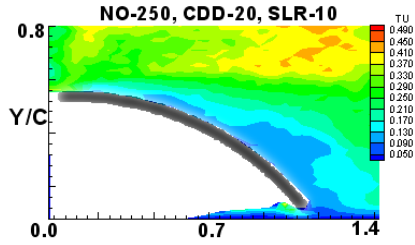


(c)-1. N=1000일 때 난류강도 (T_v)

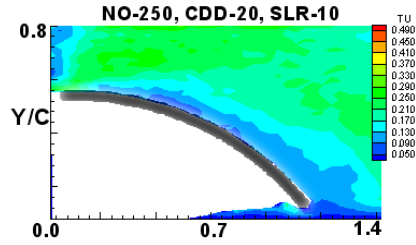


(c)-2. N=1000일 때 난류강도 (T_v)

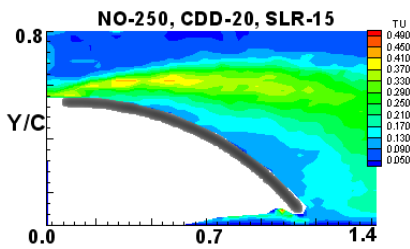
Fig. 31. 순간 속도장의 개수(N) 변화에 따른 난류강도분포



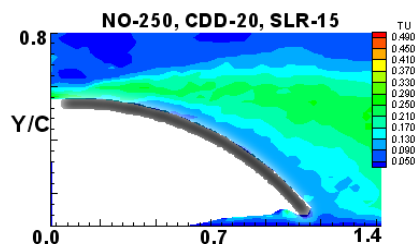
(a)-1. SLR=10일 때 난류강도(T_U)



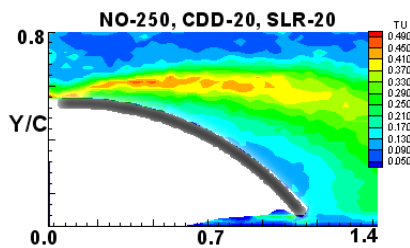
(a)-2. SLR=10일 때 난류강도(T_V)



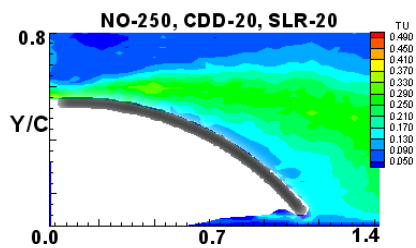
(b)-1. SLR=15일 때 난류강도(T_U)



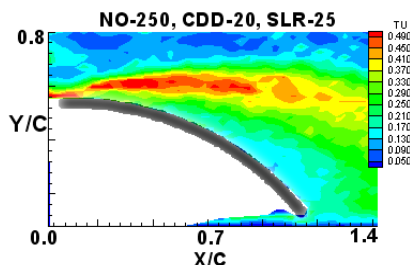
(b)-2. SLR=15일 때 난류강도(T_V)



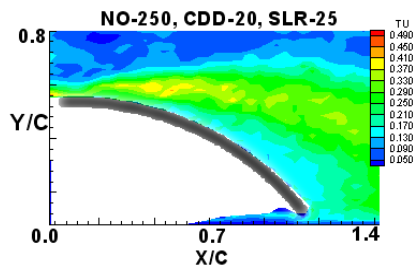
(c)-1. CDD=15일 때 난류강도(T_U)



(c)-2. CDD=15일 때 난류강도(T_V)

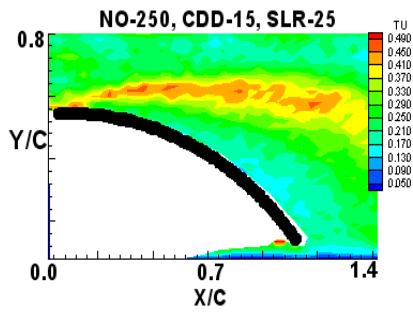


(d)-1. CDD=15일 때 난류강도(T_U)

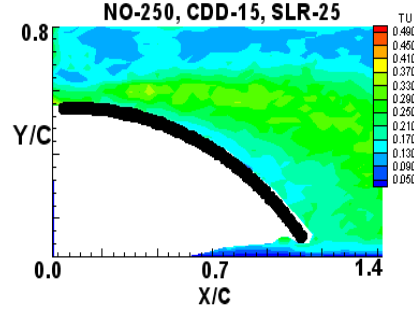


(d)-2. CDD=15일 때 난류강도(T_V)

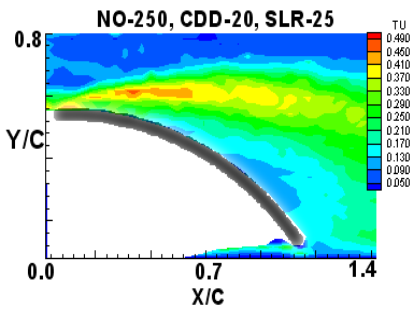
Fig. 32. 탐색영역(SLR)변화에 따른 난류강도분포



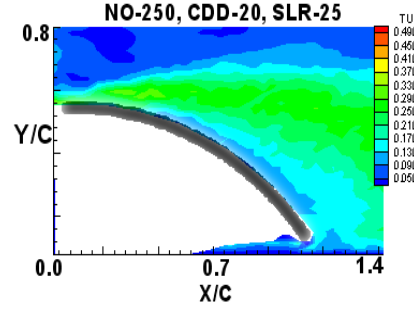
(a)-1. CDD=15일 때 난류강도(T_U)



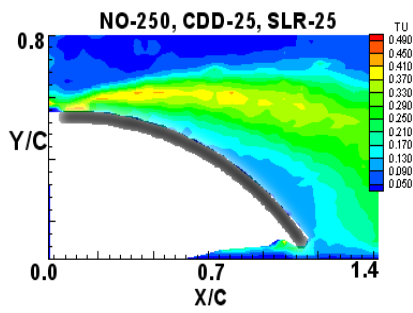
(a)-2. CDD=15일 때 난류강도(T_V)



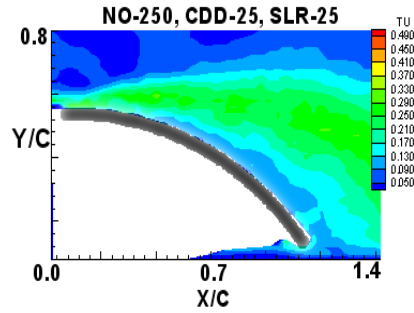
(b)-1. CDD=20일 때 난류강도(T_U)



(b)-2. CDD=20일 때 난류강도(T_V)

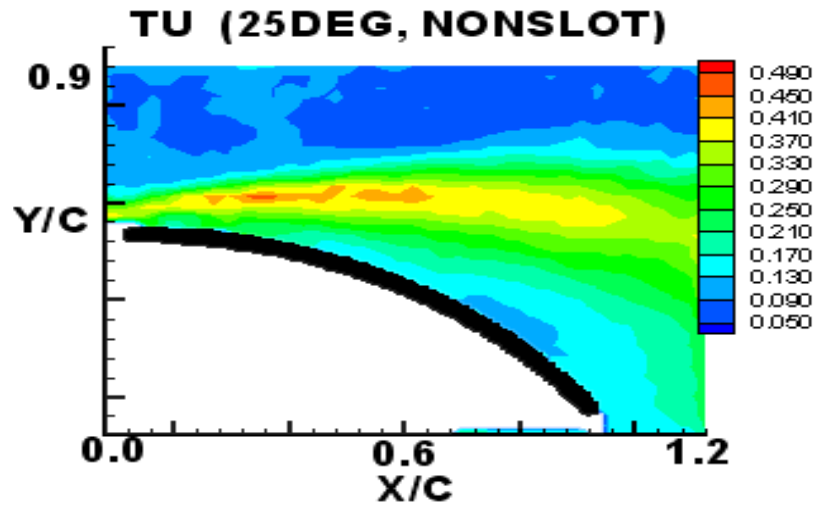


(c)-1. CDD=25일 때 난류강도(T_U)

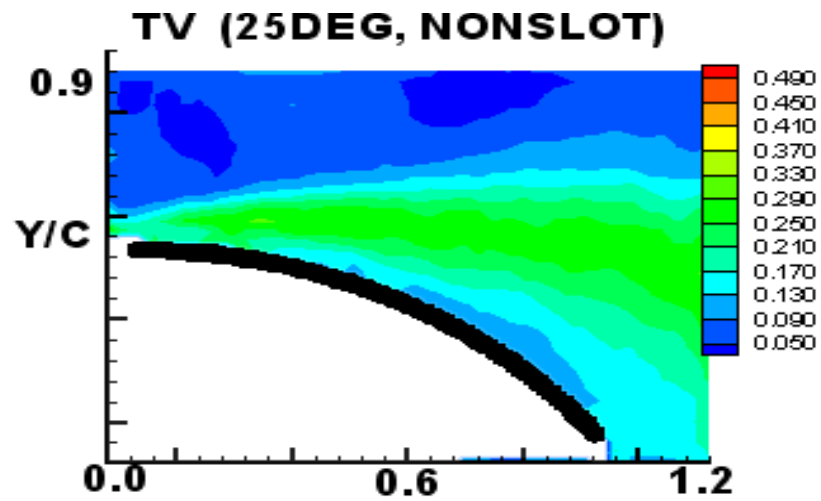


(c)-2. CDD=25일 때 난류강도(T_V)

Fig. 33. 상호상관영역(CDD)변화에 따른 난류강도분포

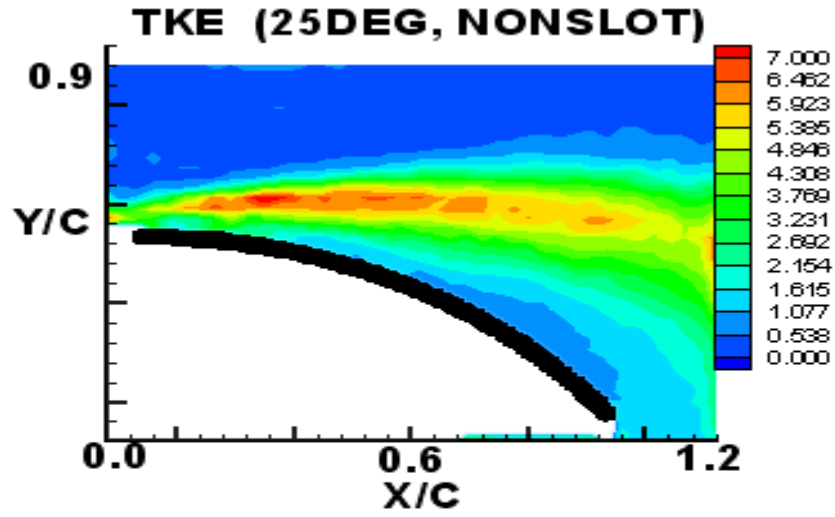


(a) 주유동방향의 난류강도(T_U)

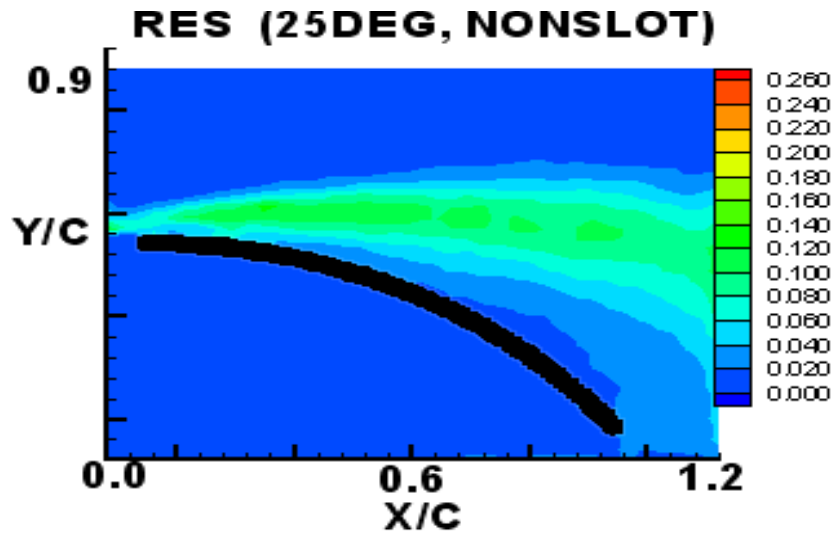


(b) 주유동 수직방향의 난류강도(T_V)

Fig. 34. Non-slot 형 전개판 주위의 난류통계치 결과($\alpha=25^\circ$)

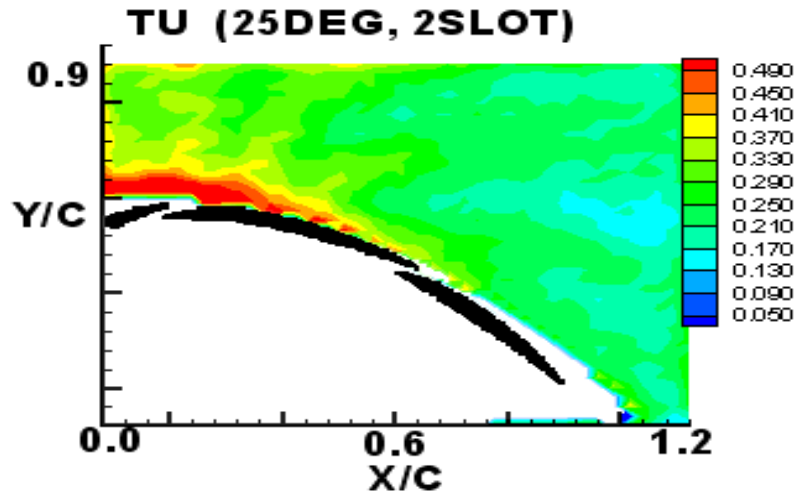


(a) 주유동방향의 난류운동에너지(TKE)

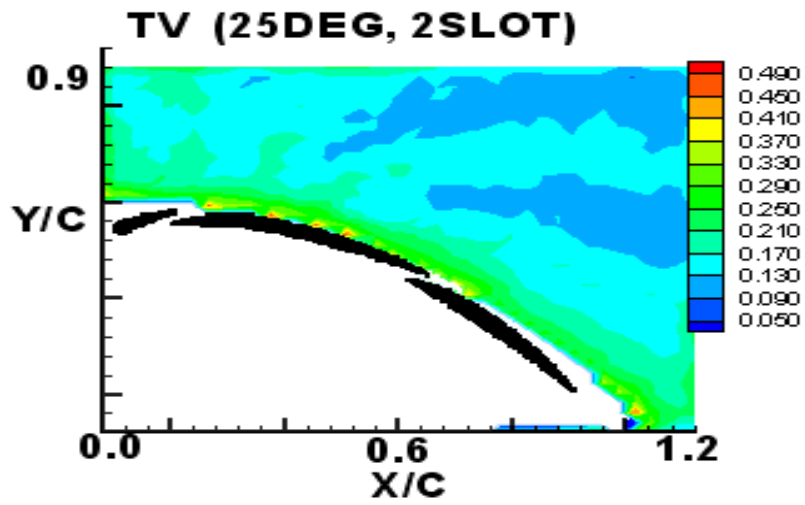


(a) 주유동방향의 난류응력(RES)

Fig. 35. Non-slot 형 전개판 주위의 난류통계치 결과($\alpha=25^\circ$)

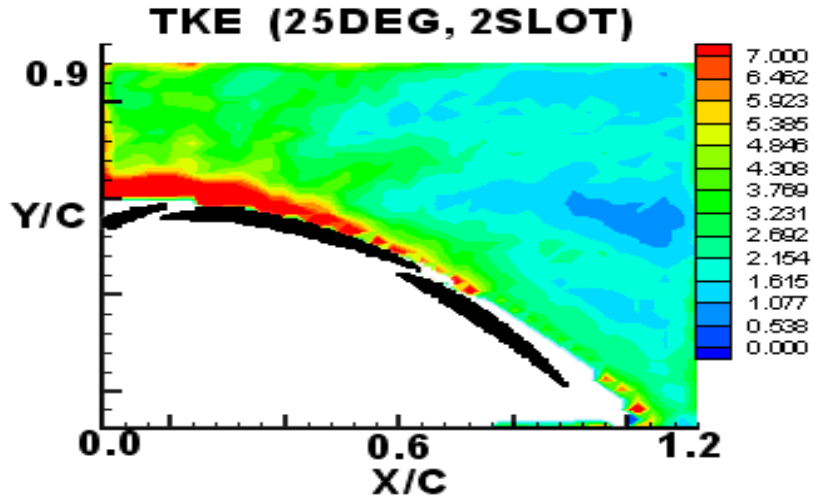


(a) 주유동방향의 난류강도(T_U)

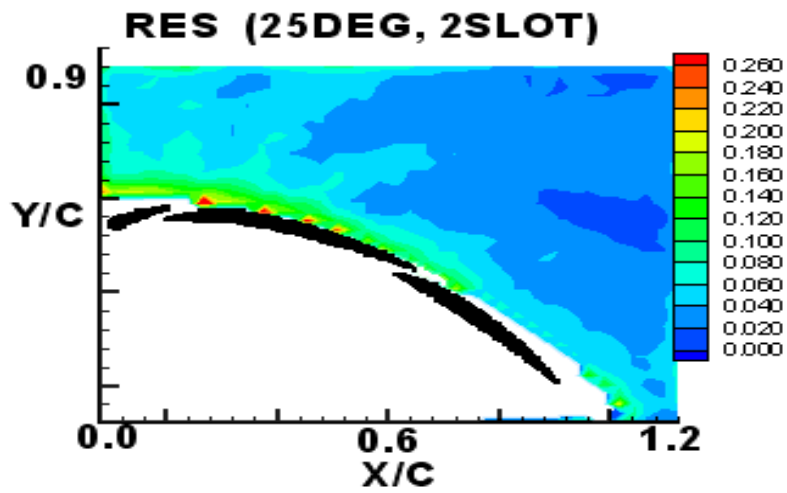


(b) 주유동 수직방향의 난류강도(T_V)

Fig. 36. Two-slot 형 전개판 주위의 난류통계치 결과($\alpha=25^\circ$)



(a) 주유동방향의 난류운동에너지(TKE)



(a) 주유동방향의 난류응력(RES)

Fig. 37. Two-slot 형 전개판 주위의 난류통계치 결과($\alpha=25^\circ$)

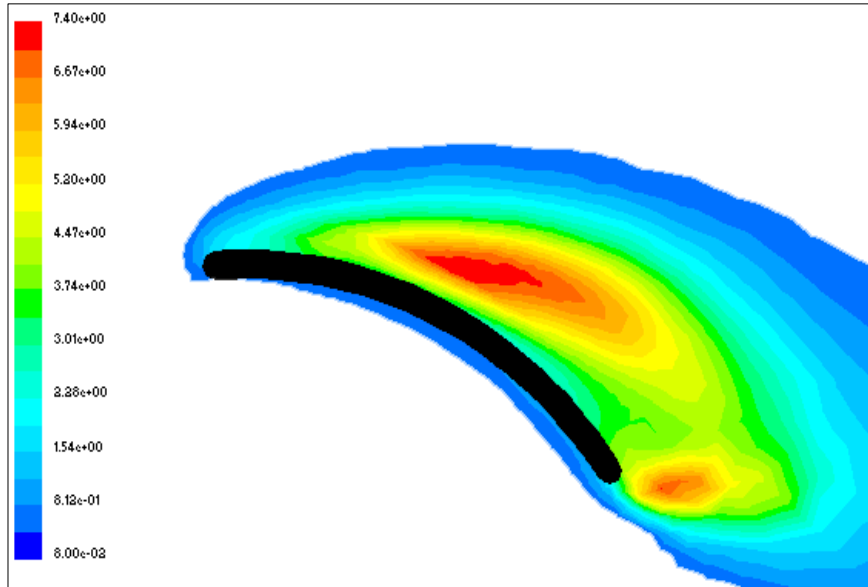


Fig. 38. CFD 계산 결과 (난류강도, $\alpha=25^\circ$)

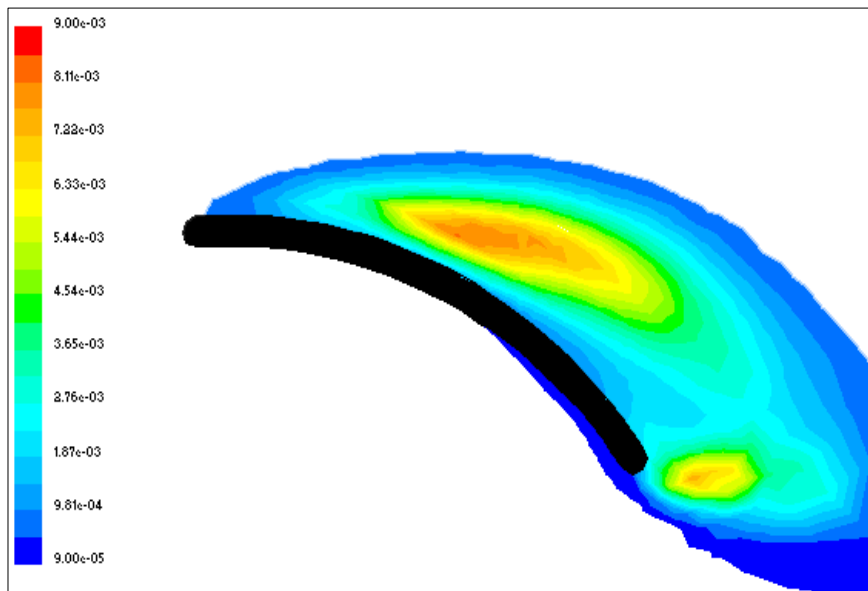


Fig. 39. CFD 계산 결과 (난류운동에너지, $\alpha=25^\circ$)

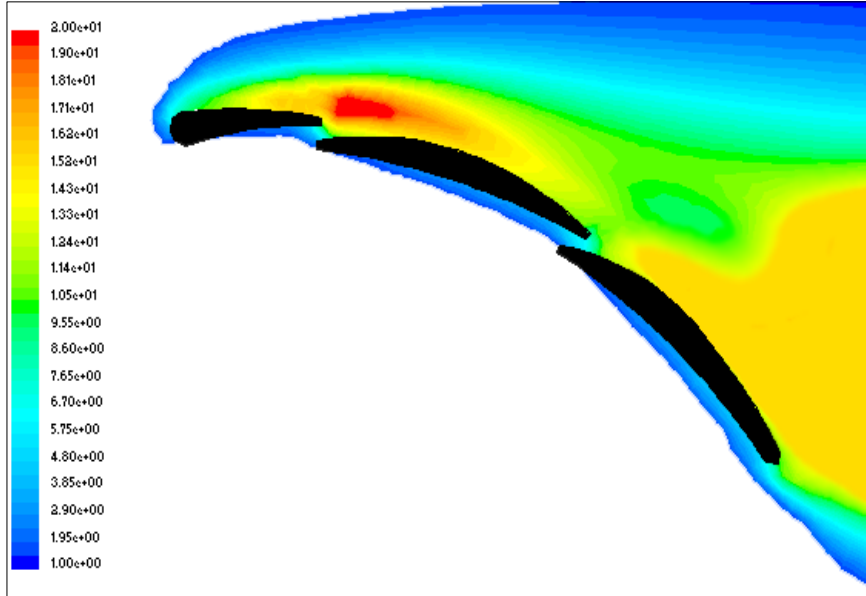


Fig. 40. CFD 계산 결과 (난류강도, $\alpha=25^\circ$)

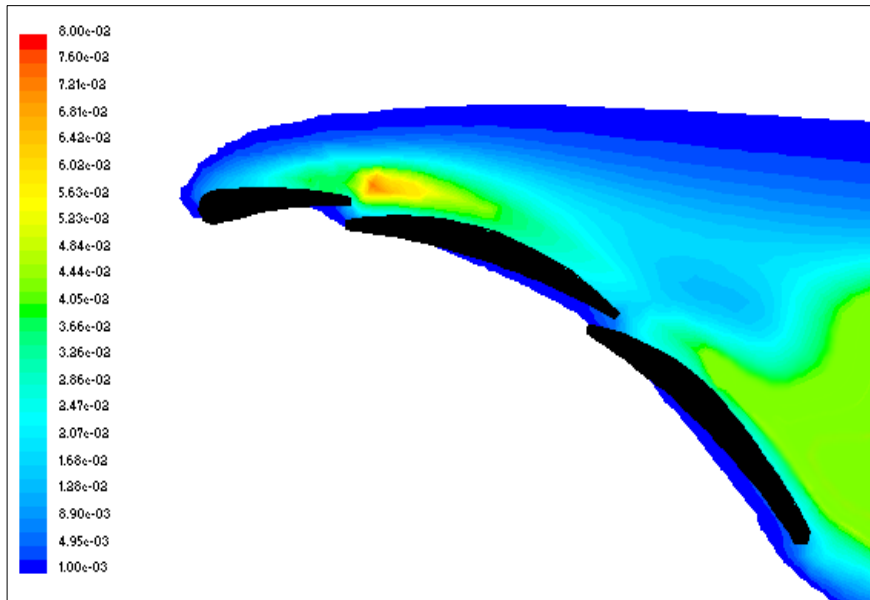


Fig. 41. CFD 계산 결과 (난류운동에너지, $\alpha=25^\circ$)

앞에서의 해석 방법을 통해서 $N=1000$, $SLR=25$, $CDD=20$ 일 때의 난류통계치가 양호한 결과를 보이는 것을 밝혔다. Fig. 33 과 Fig. 34는 상기 조건 하에서 단순 만곡형과 Two-slot형 주위의 난류통계치 즉 난류강도(T_U, T_V), 난류운동에너지 그리고 난류응력 분포도이다. 이 때의 받음각은 26° 이다.

Fig. 33에서 흐름에 수직한 방향의 난류강도(T_V)는 주유동 방향의 난류강도(T_U)에 비해 작은 값을 가지나 전체적인 분포 경향은 유사하며, 주유동 방향의 난류강도는 유동박리에 의해서 발생하는 재순환 영역과 외부영역의 경계 부근에서 큰 값을 가지며, 후류로 갈수록 확산되는 되어 분포 영역이 넓어지고 강도는 줄어드는 것을 볼 수가 있다. 난류운동에너지 또한 난류강도 분포와 유사한 경향을 보여주고 있는데 전개판의 앞날 근처에서 높은 값을 가지며 후류로 갈수록 점성소산에 의해 에너지 강도가 약화되고 있다. 난류응력($-\rho \overline{u'v'}$)분포는 전체적으로 흐름의 수직방향 난류강도와 비슷하게 나타났다. 단 전개판에 바로 인접한 곳에서는 그 값이 상대적으로 작게 나오는 것을 볼 수가 있다. 이 영역은 점성에 의한 응력이 지배적인 영역으로 볼 수 있고 때문에 상대적으로 난류 응력은 작아진다.

Fig. 34는 Two-slot 형 전개판 주위의 난류 통계치로써 단순 만곡형 전개판과 비교해볼 때 큰 차이를 보이고 있다. Fig. 20 의 단면 형상에 따른 속도 분포도에서 볼 수 있듯이 단순만곡형이 전개판의 앞날에서 아주 큰 유동박리가 생기는 반면 Two-slot형에서는 박리가 거의 발생하지 않았는데, 이러한 현상은 난류 통계치를 보는 것으로도 분명히 알 수가 있다. 단순 만곡형에 비해 전개판의 윗면 근처에서 얇은 전단층이 존재하며 이에 따라 난류통계치들로 전개판 근처에서만 큰 값을 가지는 것을 잘 볼 수가 있다. 전체적인 분포 형상은 Fig. 33처럼 난류강도, 난류운동에너지, 난류응력 모두 유사하게 나타났다. 주 유동 방향의 난류강도는 날개의 앞날 부근에서 국부적으로 강하게 나타나며, 나머지 영역은 전체적으로 비슷한 강도를 가진다. 이것은 날개의 앞날에서 박리가 발생하여 비교적 큰 강도를 지니지만, 후류쪽의 슬롯의 영향으로 박리가 소멸됨과 동시에 난류강도 또한 줄어들게 된 것 같다. 난류운동에너지 및 난류응력 또한 유사한 경향을 보여 주고 있다.

6. 결론 및 제언(Conclusion & Suggestion)

상호상관 PIV를 이용하여 수중익(전개관) 주위의 평균 유동장을 해석하였다. 슬롯의 유무에 따라 4개의 전개관 모형 주위의 유동장을 해석하여 각각의 유체역학적 특성을 살펴보았다. 또한 동일 모형 주위의 난류 유동장을 계측하여 본 PIV 시스템의 난류 유동장에의 적용 가능성을 밝혀 보았다.

- 입자 영상 유속계(Particle Image Velocimetry)에 전개관 주위의 속도장을 계측하여, 각각의 전개관의 성능을 살펴보았다. 실험에서는 슬롯이 없는 단순 만곡형, 슬롯이 하나인 one-slot형, two-slot형(2개-A,B로 구분) 모두 4개의 전개관을 사용하였다. PIV 속도장 계측 결과를 평균속도분포, 유선, 와도 분포로 나타내어 유동특성을 파악하여 보았다. 또한 two-slot형에서 슬롯의 두께와 위치를 변경시킨 모형에 대한 속도장을 계측하였다.

- 슬롯이 없는 단순 만곡형의 경우 받음각이 20° 이상이 되면 흡입면 전체에서 큰 유동박리가 발생하였으나, 슬롯이 있는 형태는 그에 비해 유동박리가 비교적 작게 발생하였다. 특히 two-slot형에서는 받음각 28° 까지는 날개의 후연부에서 작은 박리가 발생했으며, 30° 이상이 되어야 박리가 커지는 것을 볼 수가 있었다. 즉 슬롯의 적용으로 상당한 유동특성의 개선효과를 가져오며, 슬롯의 두께와 위치에 따라서도 유동의 변화가 비교적 큼을 확인하였다. 또한 각각의 case에 대한 양항력 계측 실험으로 성능의 차를 비교 확인하여 보았다.

- 동일한 계측 시스템으로 전개관 주위의 난류 유동장을 계측하여 보았다. 미소 스케일의 난류유동 구조를 계측하는 것은 본 계측 시스템의 해상도 측면에서 제약이 있는 것이 사실이다. 때문에 개략적인 난류유동 정보를 얻음으로서 본 PIV 시스템의 난류유동 계측 가능성을 보았다.

- 난류유동 계측은 슬롯이 없는 단순 만곡형을 기준으로 하고, 난류통계치의 신뢰성에 영향을 미치는 변수를 N(평균하는 순간속도장의 개수), SLR(탐색영역), CDD(상관영역)으로 두고, parametric study를 실시하였다. 그 결과를 평균속도와 난류강도, 난류운동에너지, 난류응력으로 나타내어 비교 검토 하였다. 시스템의 성능, 계측 유동장의 스케일, 추적 입자의 수등 여러 가지 상황에 따라 다르겠지만, 본 실험에서 적절한 변수들의 값들을 찾을 수 있었다.

- 최종적으로 위에서 구해진 각 변수들을 적용하여 받음각 26° 에서의 단순 만곡형과 two-slot형에 대한 난류통계치를 구하여 보았다. 단순 만곡형에서는 앞의 평균 속도 분포에서 보여지는 것처럼 큰 유동박리에 의해 난류 통계치들이 전개관 상부로 떨

어져서 큰 값을 지니고, 후류로 갈수록 확산되는 경향을 잘 보여주고 있으며, 반면에 Two-slot형에서는 전개판 바로 윗면 근처에서 국부적으로 큰 값을 지니고 다른 부위에서는 작은 값을 가지는 것을 확인하였다.

- 이상의 결과들로 볼 때 본 PIV 시스템을 이용한 난류유동장 계측 결과는 정성적으로 타당하다고 할 수 있다. 따라서 본 PIV 시스템을 난류유동장 계측에의 적용 가능성은 충분하며, 더 많은 데이터 확보와 이에 추가적으로 PIV 장비를 개선한다면 더 작은 스케일의 난류 구조 및 특성등을 훌륭히 계측할 수 있을 것이다.

- 난류 계측 결과를 바탕으로 하여 평균 유동장 계측의 정도를 높일 수 있었으며, N.S 방정식 slover (CFD) 해석시 자료 제공 및 검증을 위한 실험 데이터를 확보하였다.

참고문헌

- 현범수, 최경신 1999 “PIV를 이용한 수중익 주위 복잡 유동장의 정량적 계측” ‘99 추계 대한조선학회 학술대회 논문집. pp. 268-273.
- Baek, S.J., 1997, "Development of Two-frame Particle Tracking Velocimetry System and Its Applications to Turbulent Separated Flows," Ph.D Thesis, POSTECH.
- Jon A. Hoffmann, "Effects of Freestream Turbulence on the Performance Characteristics of an airfoil", AIAA Journal Vol.29, NO.9
- Yongsheng Lian, Jonas Steen, Marcus Trygg-Wilander, Wei Shyy, "Low Reynolds number turbulent flows around a dynamically shaped airfoil.", Computers & Fluids 32 (2003), pp.287-303
- Chand, T.P.K., Watson, A.T. and Tatterson, G.B., 1985, "Image Processing of Tracer Particle Motions as Applied to Mixing and Turbulent Flow- I. The Technique," Chemical Engineering Science, Vol.40, No.2, pp. 689-694.
- Keane, R.D. and Adrian, R.J., 1991 "Cross-Correlation Analysis of Particle Image Fields for Velocity Measurement," ASME FED-Vol.128, pp.1-8.
- B.S. Hyun, K.J. Choi, D.H. Doh, "Quantitative measurement of complex flow field around a hydrofoil using PIV", J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.37, No.3, 2000, pp.37-44,
- D.H. Doh, B.S. Hyun, S.D. Hong, K.R. Cho, Y.B. Cho, "Measurement of velocity distribution on a moving boundary", Proc. of the KOSMEE 2000 Spring Annual Meeting, 2000. 5. 19. pp.125-131,
- "PIV measurement of the fan inlet region in home refrigerator", 1996, 4, 19, Proc. of KSME(B), Spring Meeting, 1996, 4, 19, pp.653-658.
- "PIV measurement for a confined round jet", Proc. of the KSME Thermal and Fluid Engineering Division, Fall Meeting, 1996, 9, 13, pp.45-52.
- D.H. Doh, Y.B. Cho, W.J. Lee, Y.B. Pyeon, Construction of Database on Turbulent Properties of a Circular Cylinder with a 3D-PTV Technique, Proc. of the 2nd National Congress Fluid Engineering 2002, Yongpyong Resort, 2002, 8, 22-24
- 박경현. 2003 "이중슬롯 만곡형 전개관의 유체역학적 특성에 관한 연구", 박사학위논문, 부경대학교.
- 노영학, 2002 "Fluent를 이용한 2차원 및 3차원 양력체의 성능해석 및 전개관 설계에의 적용", 석사학위논문, 한국해양대학교.
- Westerweel, J., 1993 "Digital particle image velocimetry - theory and application," Ph.D Dissertation, Delft University, The Netherlands.
- 김경천, 김상기, 윤상열, 1999, "횡단류 제트의 유동 및 난류 특성치에 대한 PIV 측정", 대한기계학회 춘계학술대회 초록집, B, pp.141-146
- Adrian R. J., 1988, "Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow", Laser Anemometry in Fluid Mechanics, ed R. J. Adrian et al, pp.115-129