입자의 이동거리가 큰 영상데이터의 PIV 유동 해석을 위한 속도벡터 추적 알고리즘의 연구

(A Research on the Vector Search Algorithm for the PIV Flow Analysis of image data with large dynamic range)

김 성균 (건국대학교 기계공학과)
Sung Kyun Kim(Dept. of Mechanical Engineering, Kon-kuk Univ.)

Key word : Particle Image Velocimetry(영상유속계), Image Coding(영상코드화), Separation of Image(영상분리), New Three Step Search(새삼단계추적법), Multi-resolution Procedure (다 정밀도 과정)

ABSTRACT : The practical use of the particle image velocimetry(PIV), a whole-field velocity measurement method, requires the use of fast, reliable, computer-based methods for tracking velocity vectors. The full search block matching, the most widely studied and applied technique both in area of PIV and Image Coding and Compression, is computationally costly. Many less expensive alternatives have been proposed mostly in the area of Image Coding and Compression. Among others, TSS, NTSS, HPM are introduced for the past PIV analysis, and found to be successful. But, these algorithms are based on small dynamic range, 7 pixels/frame in maximum displacement. To analyze the images with large displacement, Even and Odd field image separation and a simple version of multi-resolution hierarchical procedures are introduced in this paper. Comparison with other algorithms are summarized. A Results of application to the turbulent backward step flow shows the improvement of new algorithm.

1. 서론

컴퓨터 원용 전유동장 계측 시스템인 입자영상유속계(PIV)를 이용한 유동해석에 있어서 두프레임 간의 입자이동거리가 커짐에 따라, 전단변형에 의한 오류벡터가 증가하며 벡터추적과정의 계산량은 급증하게 된다. 고속 CCD 카메라, Nd:Yag 레이저와 쵸퍼의 사용으로 입자이동거리를 통제할 수 있지만 초당 30프레임의 CCD 및 연속레이저 등 저가의 장비를 사용하여 고속유동장을 해석할 경우, 입자의 이동거리는 커질 수밖에 없다.

영상코드화 및 압축분야에서 개발되어 MPEC. H261, MPECⅡ등에 사용된 TSS[1], NTSS[2], HPM[3] 등을 도입할 경우, 벡터추적과정의 계산량을 크게 감소시킬 수 있으나[4], 통신분야의 일반적인 최대 이동거리 7픽셀을 기본으로 하고 있다.

본 논문에서는 먼저 영상데이터를 짝·홀수 필터로 분해하여, 시간간격을 반으로(1/60초)하여 최대이동거리를 반으로 줄였고, 순화(smoothing) 필터를 사용하여 영상노이즈를 감소시켰다. 그리고 로페스(low-pass) 필터인 가우스 필터를 이용하여, 공간정밀도를 반으로 줄인 따라서 최대 이동픽셀수도 반으로 줄어든, 성긴영상(Coarse Image)[5]에서 NTSS등을 이용하여 1차적으로 속도를 구한 다음, 원 영상에서 저속부분을 복원함으로서 전체적으로 최대이동거리를 1/4로 줄여 계산할 수 있는 다정밀도(Multi-Scale) 방법(T재 Resolution Method,TRM)을 제안하였다.

NTSS를 최대 이동거리 10픽셀 이상인 경우에 적합하도록 개선한 다음, 위의 방법에 적합시킨 알고리즘을 가상영상데이터에 적용시켜서 효율을 입증한 후, Re수 8000의 후향계단 유동(난류, 최대 이동거리 40픽셀)에 적용시켜 보았다. 이 동적 영역에서는 TSS, NTSS, HPM은 큰 오차와 많은 오류벡터를 갖지만, 새 방법의 경우 전단 변형에 의한 오차증가는 피할 수 없으나, 결과는 상당히 개선됨을 볼 수 있었다.

2. 영상 데이터

2.1 가상 영상 데이터

실험 화상데이터 분석에 앞서, 새로운 추적 알고리즘의 검증을 위해, 사각공동유동(Lid-Driven Cavity Flow)의 수치 해석해를 구하여 가상영상데이터를 생성하였다. 사각공동내의 비압축성

정상 층류 유동에 대한 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(u\omega)}{\partial x}+\frac{\partial(v\omega)}{\partial y}=\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right] \quad (1)$$

$$\nabla^2\Psi=-\omega \quad (2)$$

$$\Psi=0,\ \frac{\partial\Psi}{\partial n}=1 \text{ on 이동벽}, \quad (3)$$

$$\Psi=0,\ \frac{\partial\Psi}{\partial n}=0 \text{ on 고정벽}$$

먼저, Wachspress 공식을 이용한 ADI(Alter-nateing Directional Implicit)알고리즘[6]을 이용하여 80×80 균일격자점에 대해 수치해석해를 구한 후, 임의수 생성함수(Random Number Generating Function)을 이용하여 임의의 위치에 가우스 밝기분포를 갖는 입자들을 생성하고, 입자들의 속도를 선형보간법을 이용하여 구하여 시간 증분 Δt 후의 위치를 계산하고, 가우스 노이즈를 첨가하여, 연속된 2장의 가상영상데이터를 형성하였다.(Fig.1 참조)

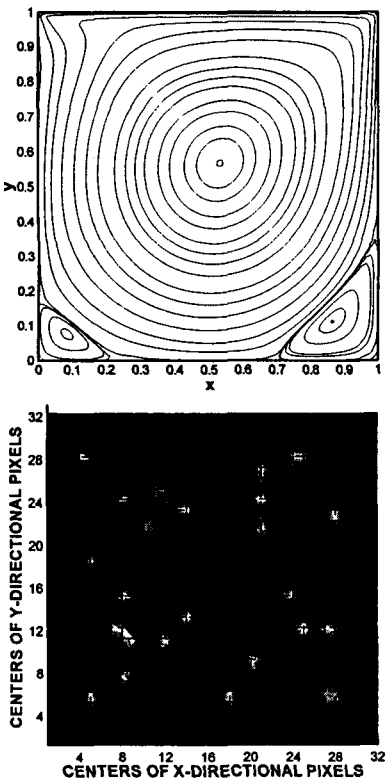


Fig.1 Numerical Solution and Synthetic Data

2.2 실험 영상 데이터

초당 30프레임의 영상을 획득할 수 있는 일반적인 CCD 카메라의 영상은 Fig.2.(a)에서 볼 수 있듯이, 1/60초 간격의 짝·홀수 필드의 합으로 이루어져 있고, 고속 유동의 경우 빗침이 크게 나타난다. 본 논문에서는 CCD 내장 셔터를 1/125초로하고, (b)에서처럼 짝·홀수 필드를 분해한 후 선형보간에 의해 (c)에서와 같이 2개의 영상을 얻을 수 있다.

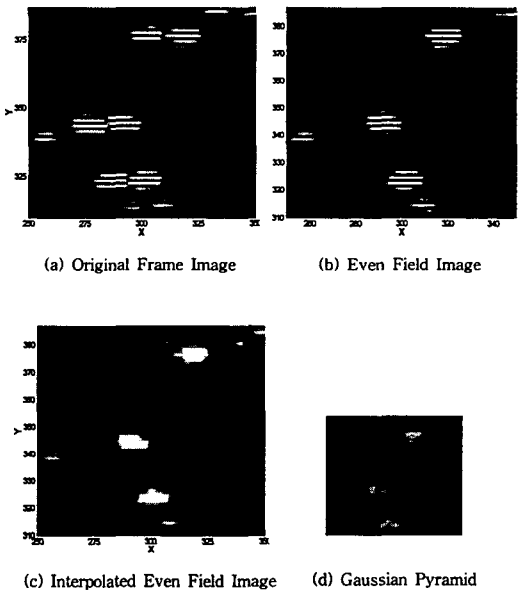


Fig.2 Separation of Even and Odd Field Image from one Frame Image

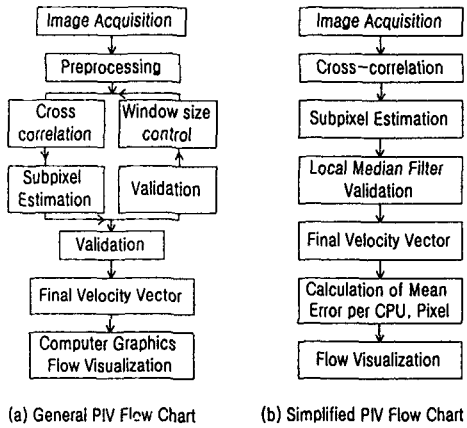
원 영상을 low pass 필터인 가우스 필터에 의해 1/2 성긴 영상을 형성하면, 이 성긴 영상에서 벡터 추적을 할 경우, 2픽셀 이하의 움직임은 생략되며, 움직임은 반으로 줄어든다. 원 영상을 $g_o(i,j)$ 이라고 하면 Burt[7]의 짝수 HDC(Hierarchical Discrete Correlation) 공식을 이용한, 성긴 영상 $g_1(i,j)$ 는 다음과 같다.

$$g_1(i,j)=\sum_{k_1=-2}^{1}\sum_{k_2=-2}^{1}w(k_1+\frac{1}{2})w(k_2+\frac{1}{2}) \times g_o(2i+k_1+\frac{1}{2},2j+k_2+\frac{1}{2}) \quad (4)$$

여기서 계수 $w(1)=0.5-a=w(4)$, $w(2)=w(3)=0.5$ 이고 a는 0.37로 하였다.

3.벡터추적 알고리즘

본 논문에서 채택한 2프레임 PIV 기법은 짧은 시간간격으로 획득된 2개의 영상데이터를 영상처리하여 노이즈를 제거한 후, 상호상관계수(Cross Correlation Coefficient)를 이용하여 속도벡터를 동시에 결정한 다음, 오류벡터를 제거하고 보간에 의해 최종벡터를 구하고, 컴퓨터 그래픽을 이용하여 유동을 가시화하는 과정들로 이루어져 있다. 실시간 계측을 위하여 영상데이터의 전처리 과정은 생략하고 256그레이레벨 데이터를 직접 이용한다.(*Fig.3* 참조)



(a) General PIV Flow Chart (b) Simplified PIV Flow Chart

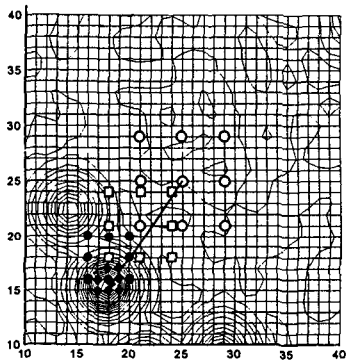
Fig. 3 Flow Chart of PIV

3.1 NTSS와 Subsampling

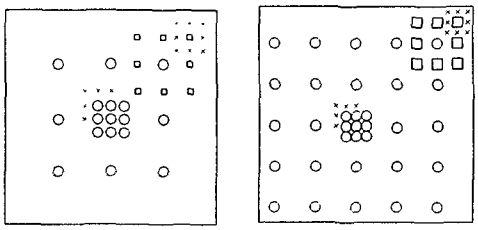
PIV 해석에서 가장 많은 계산 시간을 요하는 벡터 추적 과정은 화상압축 및 코드화, 애니메이션, AI Vision 분야등에서도 연구되고 있으며[8], 프레임간의 입자분포 형태가 짧은 시간안에서는 거의 변화하지 않는다는 가정 하에 상호상관계수(Cross Correlation) 절대차의 합(Sum of Absolute Difference)등 왜곡함수를 이용하여, 첫 프레임에서의 상관영역내의 입자분포패턴과 가장 유사한 패턴을 찾는 과정이다.

PIV 해석과 통신분야에서 공히 가장 많이 사용되어 온 전영역추적법(Full Search Block Matching, FSBM)은 가장 정확하지만 계산량이 방대하다. 계산량을 줄이기 위한 노력으로는 FFT를 이용한 왜곡함수계산, Subsampling등이 있었고 통신분야에서는 TSS, NTSS, HPM 등 많은 알고리즘들이 개발되고 있다.

FSBM이 최대 이동거리(N) 내의 모든 영역을 $(2N+1)^2$번 점검하는데 비해, TSS, NTSS는 25회 정도의 검색을 함으로서 계산시간이 현저하게 감소된다. Fig.5는 TSS 기법의 추적과정을 보여주고 있는데, 상관계수값은 실제 움직인 위치 부근에 높은 값이 밀집되어 있음으로서 이 방법이 수렴함을 알 수 있다. NTSS는 1 픽셀 이내의 움직임에 대해 계산량을 줄이고 정확도를 개선시키는 방법으로, 7,10픽셀에 대한 계산점을 (b)에 나타내었다. 기본적으로 4-2-1 픽셀로 검색거리를 단축하고 있으나, 최대이동거리 15에서는 3-3-3-3-3-1로 하여야 수렴이 가능하며 계산효율은 감소한다. 상관계수의 계산시 1 픽셀 건너 뛰어 계산하면(Subsampling) 계산량은 1/4로 감소한다.



(a) Three Step Search(TSS)



(b) New Three Step Search(NTSS)
(left) Max. distance = 7 pixel
(right) Max. distance = 11 pixel

Fig.4 Vector Tracking by TSS and NTSS

3.2 가우스 필터에 의한 성긴 영상

성긴 영상에 NTSS를 적용할 때 상관영역은 작게 잡아도 되며, 속도벡터의 계산점도 1/4로 줄어든다. 성긴 영상에서의 이동 변위를 이용하여, 원영상에서의 이동변위를 추정한다. 동일 계산점에

서의 변위는 원영상에서 2배가 되며, 나머지는 보간에 의해 추정한다. 추정된 변위 주변에서 ±3 픽셀내에서 속도추적을 한 다음, 아픽셀 교정과 국소중간필터에 의한 검정, 9점 low-pass 필터에 의한 속도벡터의 순화를 통하여 최종적 벡터를 결정한다.

4. 유동가시화실험

폭 100mm, 높이 60mm, 계단높이 20mm의 후향계단유동(Re=8000)의 경우를 새추적알고리즘들의 적용예로 선택하였다. 주요 재원은 Fig.4에서와 같이, 6W 아르곤이온레이저를 광원으로 하고, 흑백 CCD 카메라(SONY XC-711), 프레임그래버(Matrox), PC로 이루어져 있다.

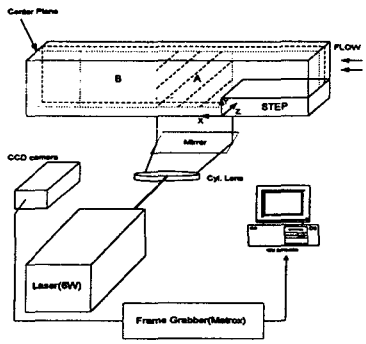


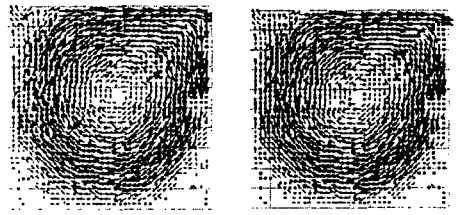
Fig. 5 Experimental Setup

Re수 8000의 난류유동을 형성하기 위해 계단입구의 평균유속은 20cm/sec로서 40mm×60mm의 영상을 30프레임/초로 획득할 경우 최대이동거리는 36pixel에 이르고, 입자영상은 궤적이 길다. 본 실험에서는 Fig.2.(b)와 같이, 1프레임의 영상을 짝·홀수 필드(Even and Odd Field)영상으로 분해하여 시간간격을 1/60초로 반감시키고, CCD 카메라 내장 셔터스피드를 1/125초로 하여 개선된 영상을 이용하였다.

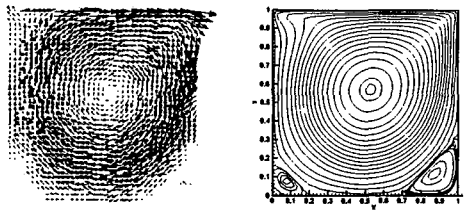
5. 결과 및 고찰

5.1 가상영상 데이터에 의한 PIV 해석

레이놀즈수 1000인 사각공동유동에 대한 수치해를 이용한 가상영상 데이터를 이용한 PIV 해석과정 및 생성유선 예는 Fig.6과 같다. Table 1에서 보듯이 최대이동거리 7,10인 영상에 대해(시간간격 dt로 조정), NTSS, TSS, HPM등 영상압축 및 코드화 분야에서 도입된 방법들은 정확도의 큰 손상 없이 계산시간을 단축시킬 수 있으나, Table 2의 최대 이동거리 15에서는 정확도와 계산효율이 다소 감소함을 볼 수 있다. PIV 해석의 정량적 비교를 위해 와동의 중심위치와 중심에서의 유동함수 값을 Table. 2에 요약하였다.



(a) Result of NTSS (b) Removing Error Vectors



(c) Results after Validation (d) Streamline from PIV Results

Fig 6. PIV Results of Synthetic Data

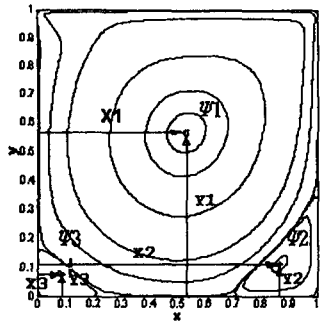
Table. 1 CPU Time and Mean Error(I)

*는 Subsampling 한 경우

	MAX. MOVE = 7 pixel			MAX. MOVE = 10 pixel		
	CPU(sec.)	Mean Error (pixel)		CPU(sec)	Mean Error (pixel)	
		Without noisy	With noisy		Without noisy	With noisy
FULL	119.84	0.119806	0.181148	232.83	0.159741	0.199498
FULL*	33.23	0.133672	0.190137	64.37	0.178436	0.215211
HYB	5.11	0.170201	0.179420	5.44	0..197501	0.201255
HYB1	9.39	0.128517	0.146426	9.45	0.173984	0.186869
TSS	12.03	0.163133	0.213580	15.93	0.343237	0.255490
TSS*	3.68	0.367900	0.220273	4.56	0.412294	0.320814
NTSS	12.64	0.154722	0.195907	21.09	0.246959	0.218521
NTSS*	3.63	0.154722	0.207645	5.98	0.295435	0.267543
HPM	1.78	0.194254	0.216993	2.42	0.311627	0.322161

따라서 최대이동거리가 15픽셀을 넘는 경우, 성긴 영상을 이용하여 최대이동거리를 반으로 하여 계산한 다음, 원영상에서 2픽셀 이하의 거리를 계산하면 계산효율이 증가함을 알 수 있다.(Table 3 참조)

Table 2. Comparison of center of vortices and its stream function value



	Ψ_1	X_1	Y_1	Ψ_2	X_2	Y_2	Ψ_3	X_3	Y_3
FULL*	0.116863	0.525	0.575	-7.46098E-4	0.899	0.125	-1.17782E-4	0.050	0.100
FULL	0.116448	0.525	0.575	-1.06133E-3	0.875	0.125	-8.09536E-5	0.075	0.075
TSS*	0.107750	0.525	0.575	-9.71873E-4	0.875	0.125			
TSS	0.110190	0.530	0.550	-1.32100E-3	0.875	0.125			
NTSS*	0.113043	0.525	0.575	-8.44159E-4	0.899	0.125	-1.31317E-4	0.050	0.125
NTSS	0.112910	0.525	0.575	-1.24650E-3	0.875	0.125	-3.29998E-5	0.075	0.050
HPM*	0.114592	0.525	0.550	-5.93334E-4	0.899	0.125	-3.69143E-4	0.100	0.075
HYB	0.116006	0.525	0.575	-8.99324E-4	0.875	0.125	-8.98499E-5	0.075	0.075
HYB1	0.116362	0.525	0.575	-1.03811E-3	0.875	0.125	-1.01286E-4	0.075	0.075
NUM.	0.118051	0.525	0.563	-1.75187E-3	0.8625	0.1125	-2.1388E-4	0.0875	0.075

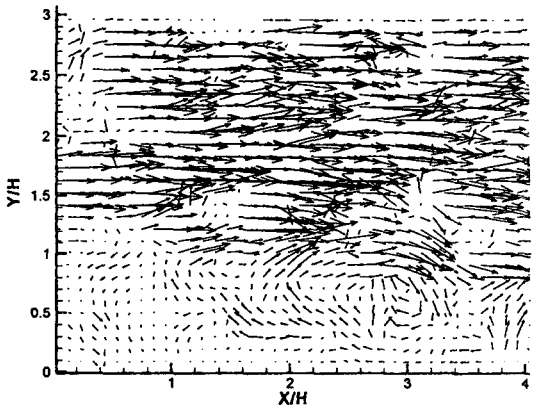
*는 Subsampling 한 경우

Table. 3 CPU Time and Mean Error(II)

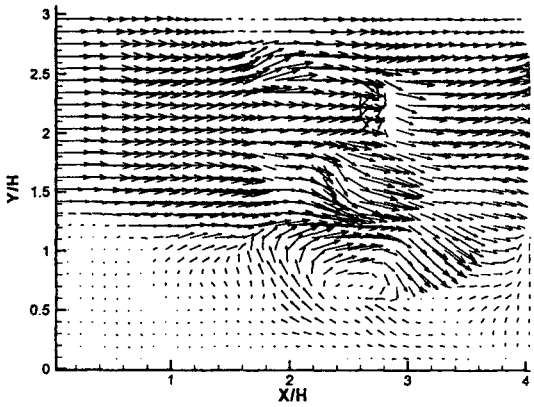
	MAX. MOVE = 10 pixel	
	CPU(sec)	Mean Error (pixel)
		Without noisy
FULL	139.07	0.238200
FULL*	965.59	0.286080
HYB	20.10	0.327700
NTSS*	9.12	0.807317
HPM	3.02	0.581900
GNTSS	5.98	0.299100

5.2 후향계단유동의 실험영상 데이터에의 적용

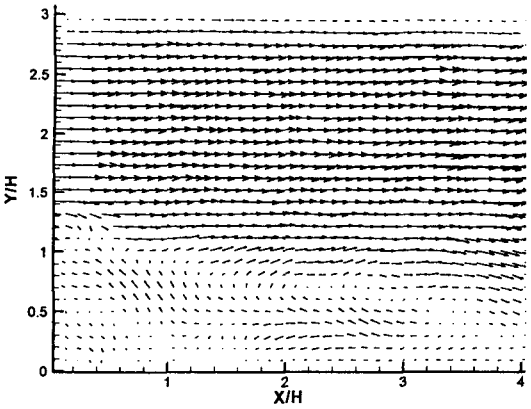
전술한 Re수 8000의 후향계단유동의 경우, 최대이동거리는 36픽셀 정도이다. Fig.7의 결과를 보면 일반적인 NTSS등의 방법은 많은 오류벡터를 발생시키고 있으며, 1프레임의 데이터를 짝·홀 필드 데이터로 분해하여, 1/60초 간격의 2영상을 얻어서, 본 논문의 2 step 방법을 적용하면 오류벡터가 크게 줄어듦을 볼 수 있다.



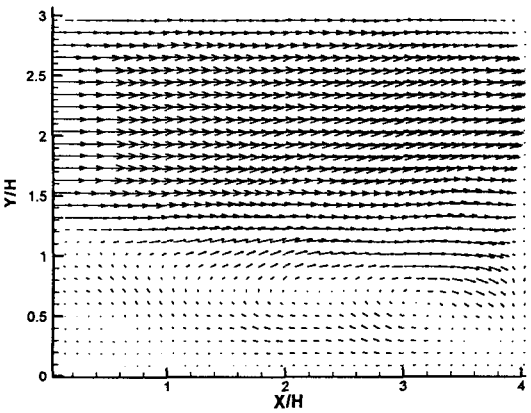
(a) Instantaneous Velocity Result by TSS



(b) Instantaneous Velocity Result by TRM



(c) Mean Velocity Result by TSS



(d) Mean Velocity Result by TRM

Fig. 7 Comparison of NTSS and GNTSS

참고문헌

(1) Jain, A.K. 1981, "Image compression : A Review", **Proc. IEEE**, vol. 69, pp. 349~389.

(2) Li, R. et al., 1994, "A New Three-Step Search Algorithm for Block Motion Estimation", **IEEE Trans.** Circuits, systems for video Tech., vol. 4, No. 4, August, pp. 438~442.

(3) Sauer, K. and Schwartz, B. 1996, " Efficient Block Motion Estimation Using Integral Projections", **IEEE Trans.** Circuits, Systems for video Tech., vol. 6, No. 5, October, pp. 513~518.

(4) 김 성균, 박 수홍.1998, 대한기계학회 추계학술대회(Submitted).

(5) Anandan, P., 1989, "A Computational Frame -work and an Algorithm for the Measurement of Visual Motion", **Int. Jr. Comp. Vision**, vol. 2, pp283-310

(6) 김 성균, 1996, "다수의 주상체들의 저진폭 동위상 진동에 의한 2차 정상유동 해석", 대한기계학회(B) 제 20권 제2호, pp. 649~658.

(7) Burt, P.J. 1981, "Fast Filter Transfroms for Image Processing", **Comp. Graph. and Img. Process.** vol. 16, pp20-51

(8) Tokumaru, P.T. and Dimotakis, P.E., 1995, "Image Correlation Velocimetry", **Exp. Fluids** 19, pp. 1~15.