

고해상도 CCD 카메라를 이용한 디퓨저펌프 내부 유동특성에 대한 PIV 계측

김성윤* · 김범석* · 김정환** · 김유택*** · 이영호****

A PIV Measurement on Flow Characteristics inner Diffuser Pump Using High Resolution CCD Camera

S. Y. Kim, B. S. Kim, J. H. Kim, Y. T. Kim, and Y. H. Lee

Key Words: PIV(입자영상유속계), Diffuser Pump(디퓨저펌프), Guide Vane(안내깃), Impeller(임펠러), Rotor-Stator(동정익)

Abstract

The present experimental study is focused on the application of multi-point simultaneous measurement by PIV (Particle Image Velocimetry) to guide vane region within diffuser pump. Various different kinds of rotational velocity and changing clearance between Guide Vane and Impeller were selected as experimental condition. Optimized cross correlation identification to obtain velocity vectors is implemented with direct calculation of correlation coefficients. Fine optical setup concerned with PIV performance is arranged for the accurate PIV measurement of high-speed complex flow. Variable flow pattern are represented quantitatively at the stator region.

1. 서론

터보기계의 최적설계는 유체공학에 관련된 이론적인 지식에서부터 경험적인 것까지 여러 가지의 지식을 요구하고 있다. 최근에는 유체기계가 고속, 고압에서 운전하는 경우가 많아짐에 따라 내부에 유동박리나 마찰과 같은 비정상 유체력에 의한 압력손실, 소음 진동이 발생할 수가 있다. 한편, 원심 펌프에서는 유체가 임펠러 통로를 통과하는 동안에 회전운동에너지가 정압에너지로 변환되나, 보다 효과적으로 정압에너지를 회수하기 위하여 임펠러 주위에 곡면 디퓨저 형상의 유로를 만들어서 정압의 회복을 적극적으로 도모하는 방안이 제안되고 있다. 이 경우에 회전중의 임펠러와 가이드 베인과의 사이에는 임펠러 선단위치의 상대적인 위치에 따라서 매우 복잡한 상호작용이 일어날 수 있으며

이에 따른 주기적인 압력변동과 소음진동이 발생할 수 있다. 최근에는 수치해석기법의 진보에 의하여 터보기계의 복잡한 3차원 내부유동의 해명이 시도되고 있지만 임펠러의 고속회전운동을 동반하는 터보기계에 있어서는 실험적인 접근기법^[1]이 보다 정량적인 결과를 제시하는 경우가 많다. 이러한 배경으로 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 디퓨저펌프 중의 실제모델을 선정하여 임펠러속도의 변화에 대응하는 레이저 펄스조정기법을 적용하여 고속유동장의 계측을 행하고자 하였다. 이를 위해서 비정상 유동장에 대하여 동시다점으로 속도계측이 가능한 PIV 시스템^{[2]-[6]}을 적용하여 계측영역 내에서 임펠러의 상대위치의 변화에 따른 시간평균의 속도벡터와 운동에너지를 정량적으로 획득하였다.

2. 실험장치 및 PIV계측

Fig. 1에 본 실험에 사용된 실험장치의 장치도를 간략하게 나타내었으며, 실험에 사용된 디퓨저 펌프의 최대 회전수는 3000rpm 까지 조정 가능하다.

* 한국해양대학교 대학원

** 큐슈공업대학교 기계시스템공학과

*** 한국해양대학교 기관시스템공학과

**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

고해상도 CCD 카메라를 이용한 디퓨저펌프 내부 유동특성에 대한 PIV 측정

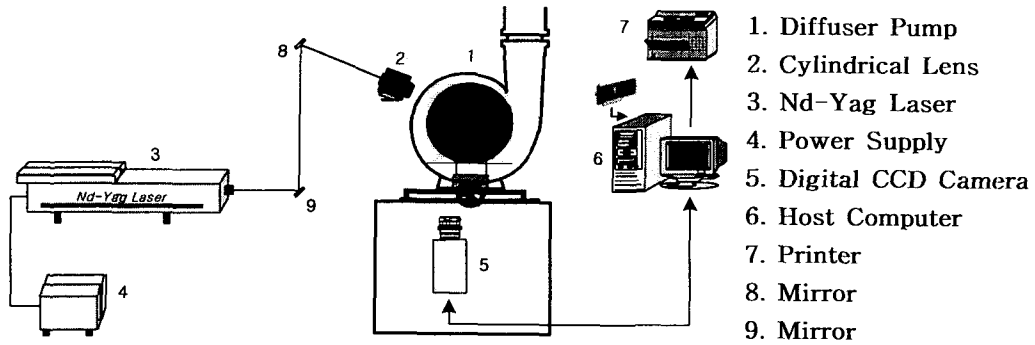


Fig. 1 Schematic Arrangement of PIV System

실험조건은 Table 1과 Table 2에 나타내었으며 Table 3에서는 회전속도가 2000rpm이고 9mm의 클리어런스를 가질 경우의 펌프 특성에 대하여 나타내었다. 계측영역의 크기 및 위치는 Fig. 2에 나타내었고, 가로, 세로 각각 55mm×54mm의 영역을 가진다. 작동유체로는 상온의 수도수를 이용하였으며, 임펠러의 선단과 디퓨저 입구부의 틈새(clearance)가 커지면 커질수록 안내깃의 유로폭은 좁아지며, 안내깃 유로폭의 변화에 따라 실험을 행하였다. 본 실험에 사용된 광원으로는 100 mJ의 Nd-Yag dual pulsed 레이저를 사용하였으며, 영상 입력장치로는 고해상도 CCD 카메라(1k×1k, Kodak Megaplust)를 사용하였다. 제반 실험조건은 Table 1과 같고 4가지 경우의 임펠러 회전속도(1000, 1500, 2000, 2500 rpm)와 3가지 조건(9, 12, 15 mm)의 틈새에 대해서 속도벡터, 운동에너지 등의 유동정보를 정량적으로 획득하였다. 본 가시화 실험을 수행함에 있어서, 먼저 유동장을 형성하고 추적입자를 유동장에 균일하게 주입한 다음 적당한 조명을 공급하였으며, 계측하고자 하는 유동장에 정확한 2차원의 평면광을 생성하기 위하여 반사형 거울(Mirror)과 원통형 렌즈(Cylindrical lens)를 조합하여 사용하였으며, 추적입자로서 작동유체의 흐름에 방해를 주지 않는 평균직경 120 μ m의 구형 PVC 입자를 사용하였다. 고해상도 CCD 카메라 (1K×1K)에 의하여 획득된 원시영상은 영상처리장치에 입력되게 된다. 영상처리장치로는 이미지 그래버(Meteor II Digital)를 사용하였으며, 각종 전처리 조작은 전

용 PIV처리 소프트웨어인 Flowinside 3.0을 사용하였다.

Table 1 Experimental Conditions

r.p.m	Clearance (mm)	Pulse Interval (μ s)	Input Device	SAR (pixel)	CAS (pixel)
1000	9, 12, 15	250	CCD(1K×1K) Camera	9	41
1500	9, 12, 15	200	CCD(1K×1K) Camera	9	41
2000	9, 12, 15	150	CCD(1K×1K) Camera	9	41
2500	9, 12, 15	100	CCD(1K×1K) Camera	9	41

Table 2 Measurement Conditions

	Item	Specification
Visualization Equipment	CCD camera	1008×1018
	Light Source	Nd-Yag Laser
	Sheet Light	Cylindrical Lens
Measuring Condition	Working Fluid	Tap Water
	Temperature	7 $^{\circ}$ C
	Particle	PVC
Image Processing	Host computer	PentiumIV1.7GHz
	Calculation Time	20 sec/frame
	Number Data for Time-averaged	200 Frames
	Identification	Cross Correlation (Flowinside3.0)
	Ratio of Error Vector	Less 1%/frame

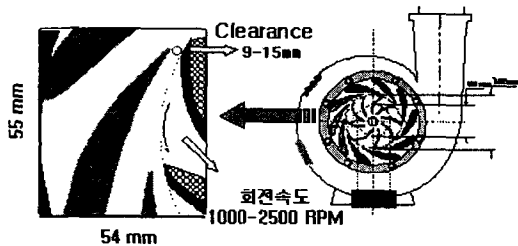
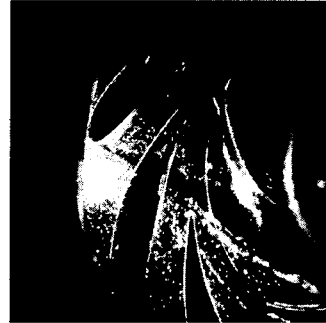


Fig. 2 Definition of Measuring Region

Table 3 Pump Specification of Diffuser

Item	Specification
Rotational speed	2000rpm
Suction diameter	80 mm
Flow rate	58m ³ /hr
Discharge diameter	98 mm
Impeller outlet radius	150 mm
Impeller outer passage width	12.6 mm
Impeller discharge angle	32.5°
Impeller inlet angle	25°
Guide vanes inlet radius	160 mm
Guide vanes passage width	12 mm
Guide vanes outlet radius	255 mm
Number of guide vanes	10

Fig. 3에 유동장으로부터 획득된 원시영상과 영상의 잡음성분을 제거하기 위해 만들어진 배경영상을 나타내었다. 속도벡터 추출을 위한 유동장의 영상 처리에는 반드시 전처리 과정이 필요하며, 이 과정으로 잡음제거, 회전보정 등을 거친 다음, 이치화된 영상으로 탐색반경을 결정한 후에 유동장의 거동특성을 관찰하여 상관영역을 설정한다. 전처리과정 중에 가장 큰 비중을 차지하는 것은 잡음제거에 있어 큰 효과를 얻을 수 있는 배경제거이다. 이 과정은 계측영역에서 입자를 제외한 고정물체를 제거하여 영상의 불필요한 부분을 최소화하며 처리영상에 포함된 노이즈를 제거하기 위한 과정이다. 이를 위하여 연속된 200개의 원시영상의 계조치를 산술 평균한 다음, 실제로 처리하고자 하는 순간의 유동장으로부터 감산하는 방법을 택하였다. 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역내 직선 윤곽선을 이용하여 CCD카메라의 위치에 대한 회전보정을 행하였다. 전처리가 끝나면 원시영상으로부터 해석영역을 설정하며 계조치 상호상관법^[2]을 이용한 동일입자를 추적하고 일련의 후처리 과정에 의해 속도벡터, 운동에너지 등의 다양한 유동정보를 정량적으로 획득하였다. 동일입자를 추적하는 과정에서 계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 해석영역의 격자수는 61×45로 설정하였고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 9픽셀로 설정하였다. 상관영역의 크기는 41픽셀이며, 시간평균 속도벡터를 얻기 위해 200 프레임의 영상을 순차적으로 처리한 다음 산술평균하였다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생하는 고유의 에러성분인 이상치를 판별



(a) Original Image



(b) Background Image for Noise Reduction
Fig. 3 Separated Background Image

하여 에러벡터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, 픽셀단위를 실제 단위(m/s)로 환산하는 단위환산 등을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 PIV계측을 통한, 안내깃과 임펠러의 틈새, 임펠러의 회전속도 변화에 대한 디퓨저 펌프 내부유동장의 시간평균 속도벡터 분포를 나타내고 있으며, 각각 200프레임의 영상을 합산하여 산술평균하였다. 그리고 임펠러에 의한 영향으로 조명이 부족한 부분은 장애물처리가 되었으며, 이러한 속도 계측 기법은 종래의 LDV나 열선 유속계 등의 방법으로 행하여져온 속도 계측기법에 비하여, 고속으로 회전하는 디퓨저 펌프 내부 유동특성 분석을 행함에 있어서 충분한 신뢰성을 가지고 편리하게 검토를 할 수 있다. Fig. 4에서 클리어런스가 9mm일 때 임펠러의 회전속도가 증가할수록 안내깃 입구에서의 최대속도는 점점 증가하고, 안내깃의 출구부분에서 미소한 박리가 발생함을 볼 수 있다. 전체적으로 각각의 클리어런스 변화에 대해 회전속도가 1500rpm 이상으로 증가함에 따라 대체적으로 이와 유사한 속도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

고해상도 CCD 카메라를 이용한 디퓨저펌프 내부 유동특성에 대한 PIV 계측

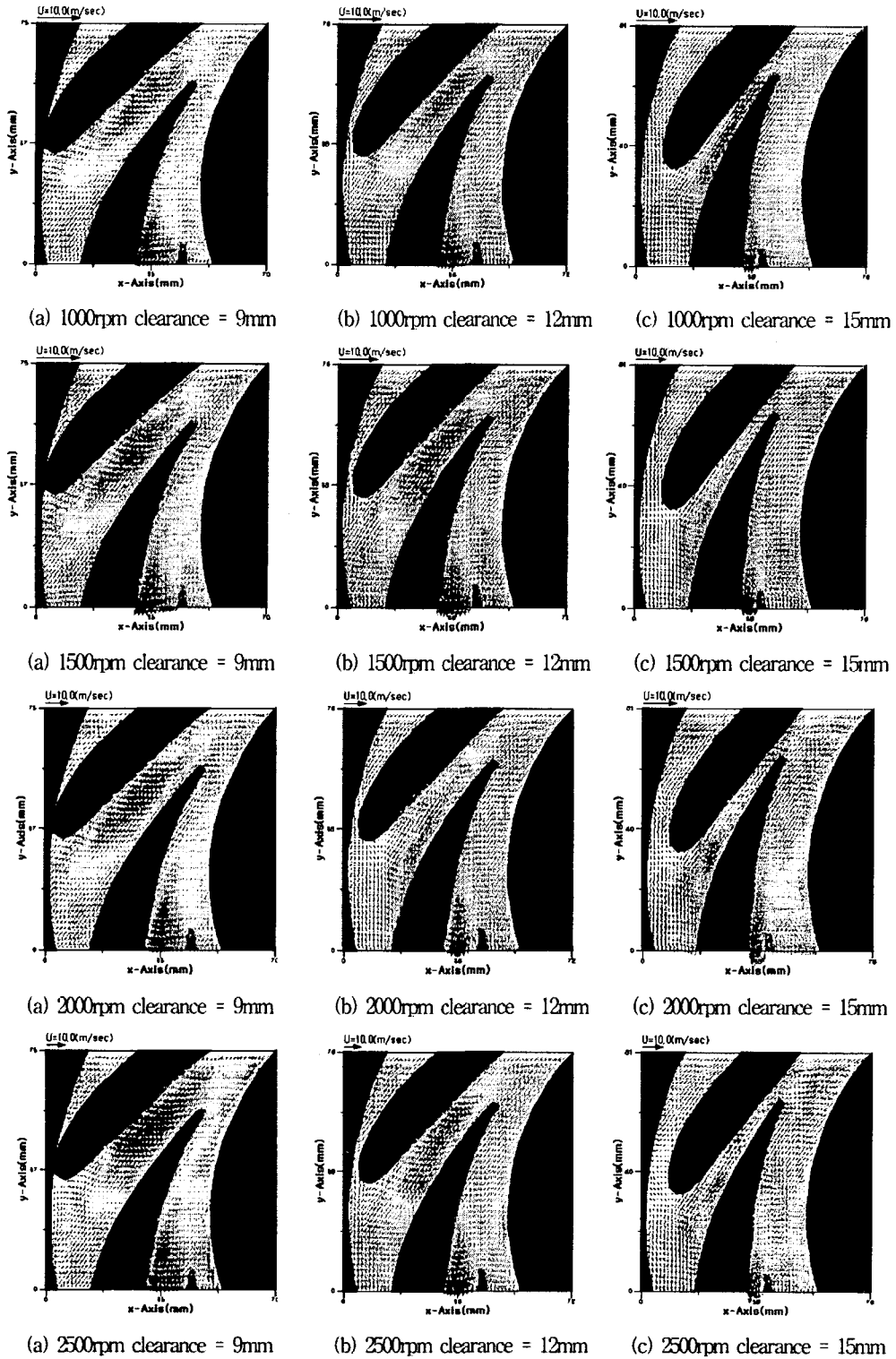


Fig. 4 Time-Averaged Velocity Distribution

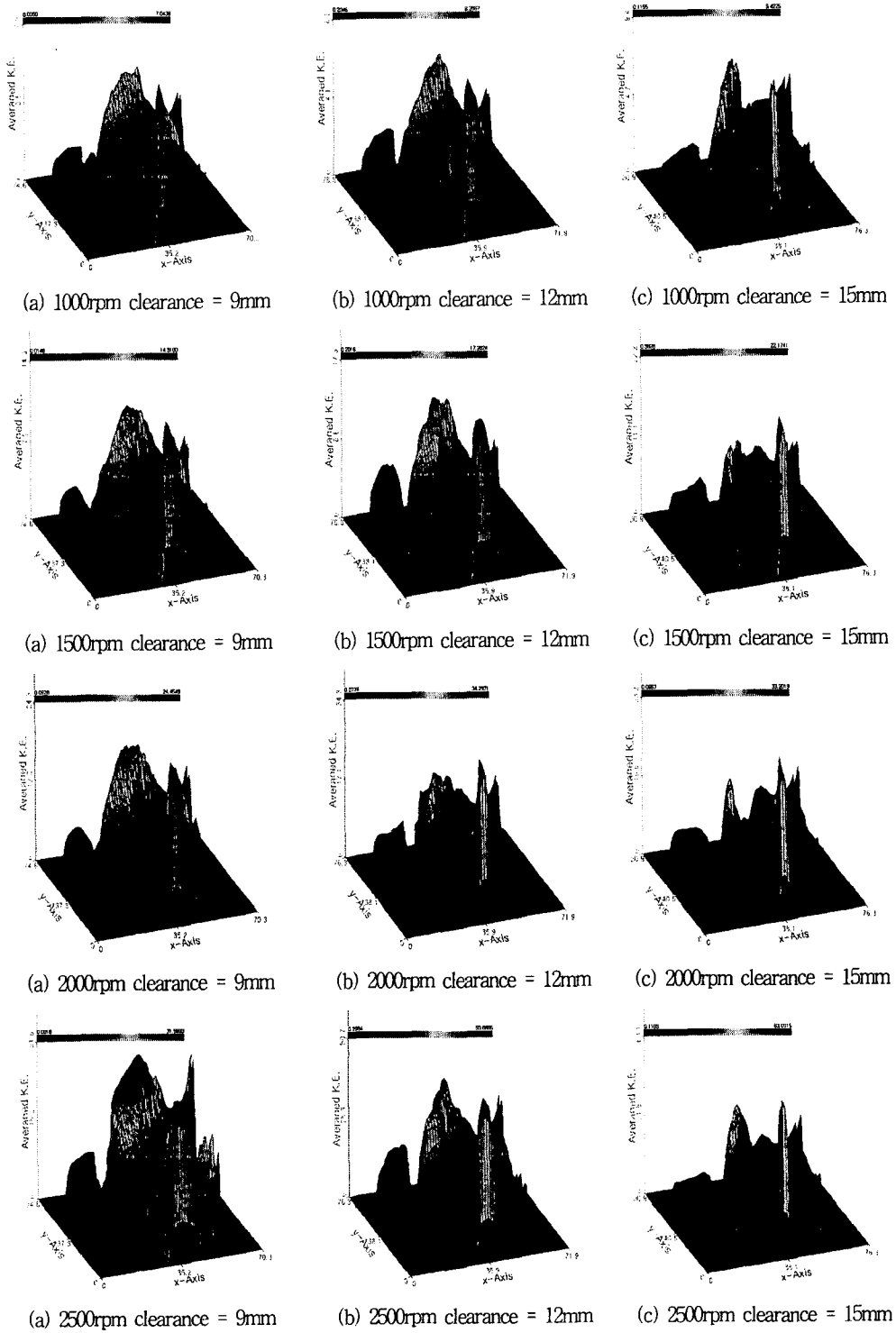


Fig. 5 Time-Averaged Distribution of Kinetic Energy

임펠러의 회전속도가 1000rpm, 1500rpm인 경우 클리어런스가 커질수록 최대속도가 증가하는 경향을 보이고 있으나, 1500rpm이상의 회전속도에서는 클리어런스가 12mm 보다 커질 경우 안내깃 사이 유로에서의 최대 속도가 점점 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 클리어런스와 회전속도의 변화에 대한 시간평균 운동에너지를 나타내고 있다. 각각의 클리어런스에 대해 회전속도가 증가할수록 운동에너지가 가장 높게 나타나는 부분이 안내깃 입구에서 출구쪽으로 조금씩 후퇴하는 경향을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고속 유동장에 대응할 수 있는 PIV시스템을 이용하여 원심 디퓨저펌프의 안내깃 입구영역을 대상으로 고해상도 CCD 카메라를 이용한 PIV 계측을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 각각의 회전속도에 대해 클리어런스가 12mm 이상일 경우에는 입구부분에서의 최대속도가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 운동에너지가 높은 부분이 점점 안내깃의 출구부분으로 후퇴하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.
2. 임펠러의 회전속도가 1000rpm, 1500rpm인 경우, 안내깃 입구에서의 속도는 클리어런스가 커질수록 증가하는 경향을 보이나, 1500rpm 이상의 회전속도에서는 클리어런스가 커질수록 안내깃 입구에서의 최대속도가 점점 감소하는 경향을 보이고 있다.
3. 향후 실제 디퓨저 펌프 모델에 대한 3차원 CFD 해석을 수행 할 예정이며, 정확한 디퓨저 펌프의 성능을 평가하기 위하여 다양한 실험과 수치해석을 수행 할 예정이다.

참고문헌

- [1] 이영호, 최장운, 임유청, "Gated Image Intensifier 카메라를 이용한 디퓨저펌프 내부유동장의 PIV계측", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 (1999), pp. 68~74.
- [2] 이영호, "PIV의 분류 및 원리", 대한기계학회지, 36권 제12호 (1996), pp. 1146~1162.
- [3] 이영호, 최장운, "PIV에서의 계조치 상호상관법개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권 (1996), pp. 396~400.
- [4] 최장운, 이영호, "PIV에 있어서의 입자추적기법의 개선", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권 (1995), pp. 360~463.

[5] 최장운, 이영호, "PIV에서의 보간방법의 적용" 대한기계학회 추계학술대회 논문집 2권 (1995) pp. 49~56.

[6] <http://sap.gen.u-tokyo.ac.jp>