

## CFD를 사용한 평행 홈 펌프 시일의 해석 개선

하 태 응\*

경원대학교 기계·자동차공학과

### Improvement on Prediction of Circumferential-Groove-Pump Seal with CFD Analysis

Tae Woong Ha<sup>†</sup>

*Dept. of Mechanical-Automotive Engineering, Kyungwon University*

(Received November 4, 2008; Revised November 20, 2008; Accepted November 25, 2008)

**Abstract** – In order to improve the leakage prediction and rotordynamic analysis of an annular seal with a smooth rotor and circumferentially grooved stator, CFD analysis using FLUENT has been performed to determine the groove penetration angle  $\alpha$  which is the angle of separation line between control volumes II and III in groove section of Ha and Lee's three-control-volume theory. Validation to the present analysis using new penetration angle determined by the CFD analysis is achieved by comparisons with the results of published Ha and Lee's analysis. For the leakage prediction the present analysis shows slight improvement and CFD results yields the best. Direct damping and cross-coupled stiffness coefficients are predicted better to the experimental ones. However, direct stiffness coefficient is predicted worse.

**Key words** – centrifugal pump, CFD, circumferential-groove seal, leakage, penetration angle, rotordynamic coefficients

#### 1. 서 론

고성능 원심 펌프의 비접촉 환상 실을 통한 누설량을 저감하기 위해 마모 실(wearing seal), 중간 단 실(inter-stage seal), 밸런스 피스톤(balance piston) 등에 Fig. 1과 같은 평행 홈 실(groove seal)이 널리 사용되고 있다. 평행 홈 실은 밀봉 특성이 우수하기 때문에 원심 펌프의 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있으나, 원심 펌프의 고성능화에 따른 고속/소형화 설계 추세에 따라 홈 시일의 간극이 작아지게 되고 홈을 따라 발달된 원주방향의 흐름에 기인한 불안정화 유체력이 증가하여 펌프 회전축계의 불안정 진동을 유발하는 원인이 될 수 있어 정밀한 해석이 요구되고 있다.

홈 시일의 유체력 해석을 위한 이론적 연구는 Black

and Cochran[1]에 의해 처음 시도된 이후 많은 이론 및 실험적 연구 결과[2-9]가 발표되었다. 특히, Iwatsubo and Sheng[5]은 랜드(land)부와 홈(groove)부 각각에 제어체적을 설정한 two-control-volume 해석 방법과 실험결과를 발표했으며, Florjancic[8]은 랜드 부와 홈 부를 형상에 따라 주 흐름 부와 와류(cavity) 부로 나누어 각각 제어체적을 설정하는 three-control-volume 해석방법을 개발하여 홈 시일을 통한 누설 량과 동특성계수의 예측에 많은 진전을 보였다. Marquette and Childs[9]는 Florjancic의 해석방법을 개선하여 홈 부의 흐름을 실제 흐름 상태와 유사하게 Fig. 2와 같이 유선에 따른 주 흐름 부와 와류 부로 나누고 랜드 부에 각각 제어체적을 설정하는 새로운 three-control-volume 해석방법을 제시하였고 기 발표된 결과[5,7,8]와의 비교를 통하여 해석방법의 타당성을 검증하였다. Ha and Lee[10]는 Marquette and Childs의 three-control-vol-

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : twha@kyungwon.ac.kr

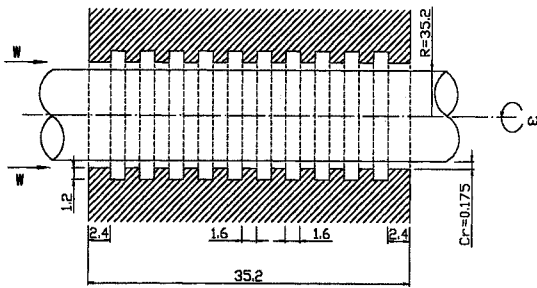


Fig. 1. Geometry of circumferential groove seal (Unit : mm)[10].

ume 해석방법을 사용하여 평행 홈 실의 해석 코드를 개발하고 Iwatsubo and Sheng의 실험결과와 Marquette and Childs의 해석 결과와의 비교를 통하여 강성계수(K)와 연성강성 계수(k)의 예측에서 Marquette and Childs의 해석 결과보다 개선됨을 보인 바 있다. 그러나 해석에 필요한 홈 부의 유동에 관한 실험 또는 수치해석 결과가 충분하지 못하여 적용에 한계가 있었으며, 특히 홈 부에서 주 흐름부의 유선이 홈 부로 파고드는 유선 분리각(penetration angle)  $\alpha$  (Fig. 2 참조)에 대한 정보가 부족하였다.

본 연구에서는 홈 실의 three-control-volume 해석법에서 중요한 요소인 유선 분리각  $\alpha$ 를 CFD 상용코드인 FLUENT를 사용한 해석을 통해 결정하고, Ha and Lee의 해석코드에 적용하여 홈 실의 누설량 및 로터다이나믹 특성계수(동특성계수) 예측에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. CFD를 사용한 홈 실의 유동특성 해석

홈 실의 three-control-volume 해석법에서는 홈 실 유로의 실제 유동과 유사하게 유동장을 정의하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 것처럼 랜드 부에 하나의 제어체적(C.V. I)을 설정하고 홈 부에는 유선모양을 따라서 제트(jet) 부(C.V. II)와 홈 내의 와류 부(C.V. III)에 각 각 제어체적을 설정한다. 따라서 C.V. II와 C.V. III를 구분하는 유선의 분리 각인  $\alpha$ 가 해석에서 매우 중요할 것으로 판단이 된다. 그러나 홈 내의 유동은 3차원유동이며 홈의 형상(깊이(B)와 너비( $L_g$ ))의 비) 및 유동 조건에 따라서 제트 부 유선의 분리 위치는 영향을 받을 것이기 때문에  $\alpha$ 각을 정의하는 것이 매우 어려운 문제이다. 지금까지 유선 분리각에 대한 실험 결과나 수치해석 결과가 발표된 것이 없는 것으로 판단

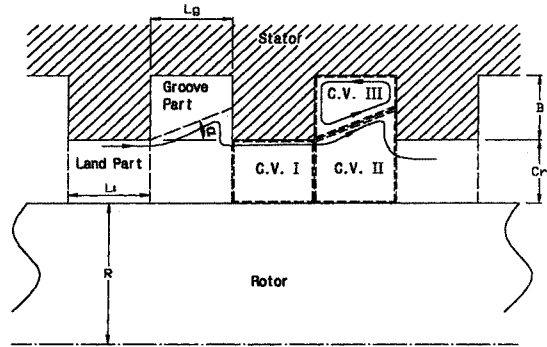


Fig. 2. Definition of three-control volume for groove seal[10].

되며 Marquette and Childs의 경우도  $\alpha$ 에 대하여  $0^\circ \sim 6^\circ$  범위로 설정하고 Iwatsubo and Sheng의 실험 조건에 대하여 약  $\alpha = 0.46^\circ$  (0.008 radian)을 적용하여 해석하고 있다. 본 질에서는 홈 실에서 유동 조건 및 홈의 형상에 따른  $\alpha$ 각의 영향을 CFD 상용코드인 FLUENT를 사용하여 해석하고 대상 홈 실에 대한 유동 해석을 통하여  $\alpha$ 각을 결정하고자 한다.

Fig. 3은 스테이터에 1개의 홈을 갖는 홈 실의 FLUENT 해석을 위한 계산 영역을 보여주고 있다. Fig. 1의 홈 실과 같은 형상을 갖는 경우로 운전조건은 Table 1에 제시된 것과 같으나 실 입·출구의 압력차  $\Delta P$ , 로터의 회전수(rpm), 및 홈의 형상비인 홈 깊이/홈 너비( $B/L_g$ )에 따른  $\alpha$ 각의 영향을 분석해 보기 위하여  $\Delta P$ 는 2.88 bar~14.88 bar, 로터 회전수는 500 rpm~4500 rpm,  $B/L_g$ 는 0.25~1.25의 범위( $B=1.2$  mm로 일정하게 유지하며  $L_g$ 를 0.96 mm~4.8 mm 범위로 설정)에서 해석하였다. GAMBIT을 사용하여 길이(축) 방향과 깊이 방향으로 0.01 mm 크기의 정사각형 격자

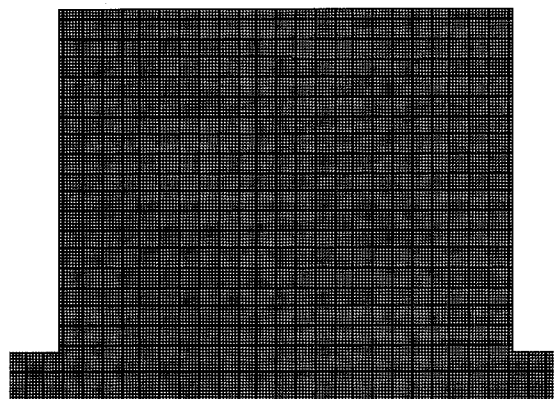


Fig. 3. Mesh generation for one groove seal geometry.

를 선정하여 Fig. 3의 경우에는 30,400의 격자를 생성하였다. Fluent solver를 사용하여 2D, axis-sym-

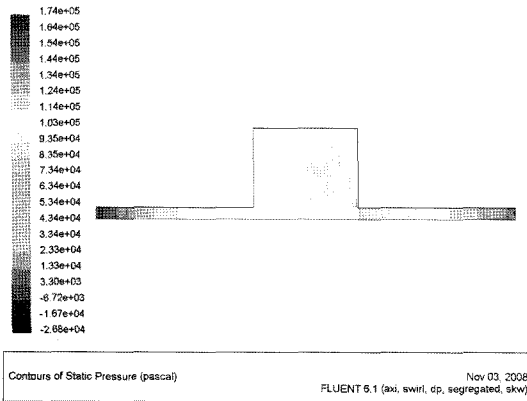


Fig. 4. Pressure distribution in groove seal( $\Delta P=2.88$  bar, 500 rpm).

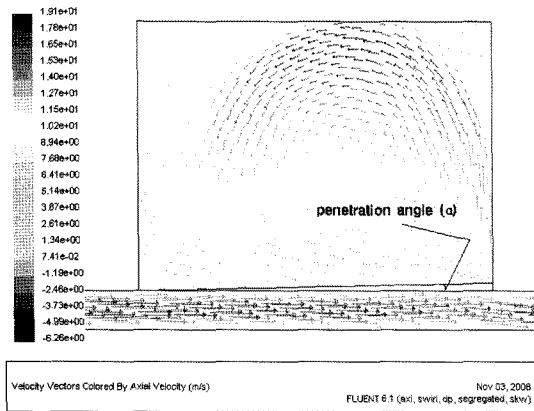


Fig. 5. Velocity vectors in groove seal( $\Delta P=2.88$  bar, 500 rpm).

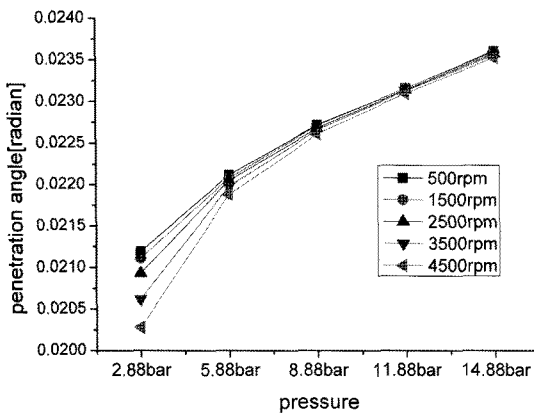


Fig. 6. Penetration angle vs.  $\Delta P$  with rotor speed.

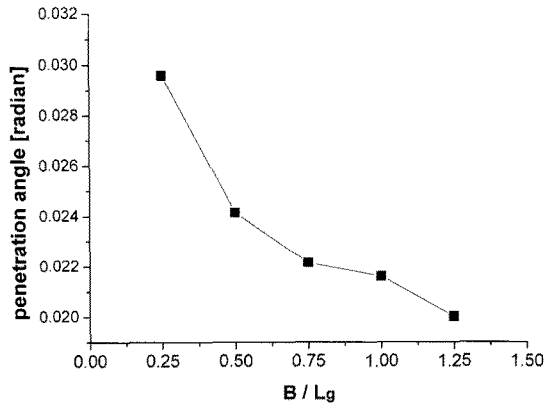


Fig. 7. Penetration angle vs.  $B/L_g$ .

metric, swirl 유동에 대한 비압축성 유동해석을 하였다. 난류모델은  $k-\omega$  모델을 사용하였으며 수렴판정은 잔류량의 총합이 이하가 되는 시점으로 하였다.

Fig. 4는  $\Delta P=2.88$  bar, 로터 회전수 500 rpm인 경우의 해석 결과로 압력분포를 나타내고 있으며, Fig. 5는 유동장의 속도 벡터를 보여주고 있다. 홈 내의 압력분포를 보면 홈의 중앙부에 저압부가 형성이 됨을 알 수 있으며, 이에 따른 유동장을 보면 홈 상부의 제트부와 홈 내부의 와류부로 분리되는 유선을 확인할 수 있다. 로터 회전수와  $\Delta P$ 에 따른 유선 분리각  $\alpha$ 의 크기를 Fig. 6에 나타내었다. 유선 분리각  $\alpha$ 의 크기는 압력차가 커지면 더 커짐을 보였는데 이는 축 방향 유속이 커지므로 유선이 보다 더 깊이 홈 속으로 파고 들어가기 때문인 것으로 판단된다. 로터의 회전수가 커지면  $\alpha$ 가 작아지는 경향을 보였는데 압력차가 커질수록 로터 회전수의 영향은 작아짐을 보였다. Fig. 7은 홈부의 형상 변화(깊이(B)너비( $L_g$ ))에 따른 유선 분리각  $\alpha$ 의 크기 변화 결과로 너비가 커질수록  $\alpha$ 가 커짐을 보였다.

### 3. $\alpha$ 각의 CFD 결과를 이용한 평행 홈실의 누설량 및 로터다이내믹 특성계수 예측

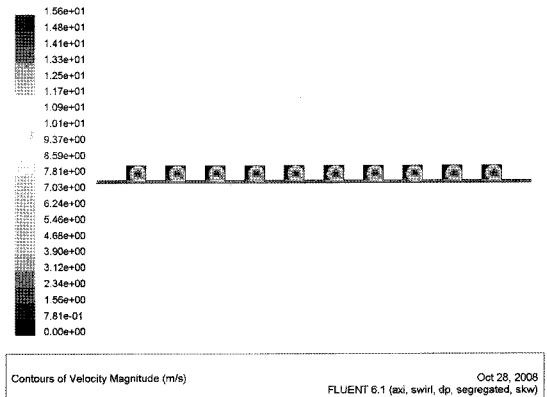
유선 분리각  $\alpha$ 는 홈 실의 형상,  $\Delta P$ , 및 로터 회전수에 따라서 영향을 받기 때문에 평행 홈 실의 누설량 및 로터다이내믹 특성계수 예측을 위해 개발된 three-control-volume 해석법[10]을 활용하기 위해서는  $\alpha$ 각에 대한 정확한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 FLUENT를 사용한 CFD 해석을 통하여  $\alpha$ 각에 대한 정밀한 해석이 가능함을 보였고 본 절에서는  $\alpha$ 각의

**Table 1. Input data of Ha and Lee's analysis for parallel groove seal[10]**

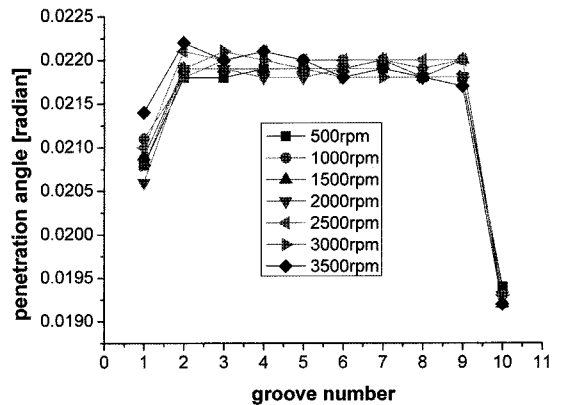
Pressure difference	5.88 (Bar)
Groove length ( $L_g$ )	1.6 (mm)
Groove depth (B)	1.2 (mm)
Land part length ( $L_l$ )	1.6 (mm)
First land part length	2.4 (mm)
Last land part length	2.4 (mm)
Groove seal total length	35.2 (mm)
Number of groove	10
Clearance of groove seal ( $C_r$ )	0.175 (mm)
Radius of groove seal	35.2 (mm)
Normalized inlet-tangential velocity	0.1
Inlet loss coefficient ( $\xi_{in}$ )	0.05
Pressure recovery factor ( $\xi_{ex}$ )	0.95
Loss coefficient ( $\xi_{12}$ )	0.05
Rotor speed	500 (RPM)
Density	998.2 (Kg/m <sup>3</sup> )
Absolute viscosity	0.001 (N-s/m <sup>2</sup> )
Groove penetration angle ( $\alpha$ )	0.008 (radian)
( $n_s, m_s$ ) for stator surface	0.079, -0.25
( $n_r, m_r$ ) for rotor surface	0.079, -0.25

CFD 결과를 이용한 Ha and Lee의 평행 홈 실 해석 코드 결과의 유용성을 검증해 보고자 한다. Fig. 1에 나타난 대상 홈 시일에 대한 형상 및 운전조건이 Table 1에 나타나 있다. Ha and Lee는 Table 1의 대상 실에 대한 누설량 및 동특성계수를 예측하기 위해  $\alpha$ 각으로 0.008(radian)을 사용하였다. 이는  $\alpha$ 각에 대한 정보가 제한적이어서 Marquette and Childs가 해석 시 사용했던 값을 동일하게 사용하여 해석하고 그 결과를 Iwatsubo and shung의 실험 결과 및 Marquette and Childs의 해석 결과와의 비교를 하였다. 본 연구에서는 Fig. 1 및 Table 1에 제시된 대상 평행 홈 실에 대하여 FLUENT를 사용한 CFD 해석을 수행하여  $\alpha$ 각과 누설량을 예측하고 새로운  $\alpha$ 각을 사용한 Ha and Lee의 해석 결과를 제시하고자 한다.

Fig. 8은 Fig. 1에 나타난 10개의 홈을 갖는 대상 실의 FLUENT 해석을 위한 계산 영역과 유동장 해석 결과를 나타내고 있다. GAMBIT을 사용한 격자의 생성 방법 및 FLUENT solver를 사용한 해석 방법은 2절에서 설명한 방법과 동일하다. Fig. 9는 유동장 해석 결과로부터 산출된 10개 홈에서의 유선 분리각  $\alpha$ 의 결과를 나타내고 있다. 첫 번째 홈과 마지막 10번째 홈을 제외한 2번째~9번째 홈에서의 유선 분리각은 거의 일정한 값으로 0.0219 radian을 나타내고 있으며 첫 번째 홈과 마지막 홈의 유선 분리각도 각각 0.0208



**Fig. 8. Calculation area and velocity contours for parallel groove seal of Fig. 1.**



**Fig. 9. CFD results of penetration angle( $\alpha$ ).**

radian과 0.0194 radian로 모든 홈에서의 유선 분리각의 차는 무시될 수 있을 정도로 미소한 차이를 보이고 있다. 또한 로터 회전수 500 rpm~3500 rpm 범위에서  $\alpha$  값의 변화는 최대 0.0003 radian으로 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 대상 홈 실의 유선 분리각  $\alpha$ 는 평균값인 0.0219 radian(1.26°)으로 결정할 수 있다. 이는 Marquette and Childs가 해석 시 사용했던  $\alpha$ 값인 약 0.008 radian과 비교해볼 때 274% 큰 값이다. 새로 결정된 유선 분리각  $\alpha=0.0219$  radian을 사용하여 Ha and Lee의 평행 홈 실 해석코드로 재 해석한 결과를 Fig. 10~Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 10은 로터의 회전수에 따른 누설량의 결과를 나타내고 있다. 본 연구 결과는 Marquette and Childs 및 Ha and Lee의 결과보다 Iwatsubo and shung의 실험 결과에 작지만 더 근접함을 보이고 있다. 본 연

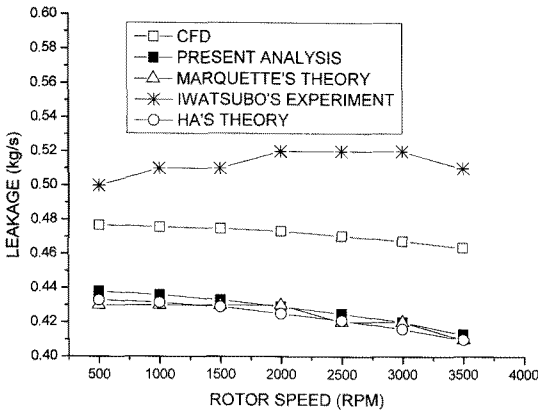


Fig. 10. Leakage vs. rotor speed.

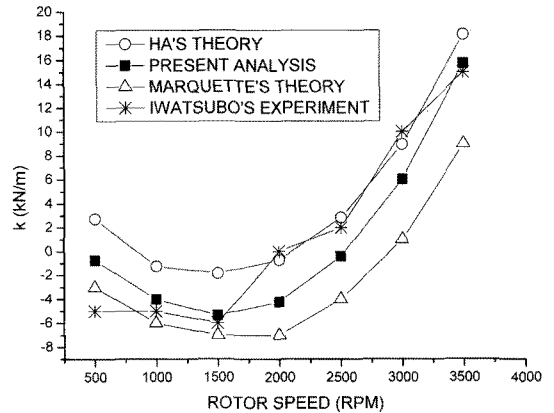


Fig. 12. Cross coupled stiffness vs. rotor speed.

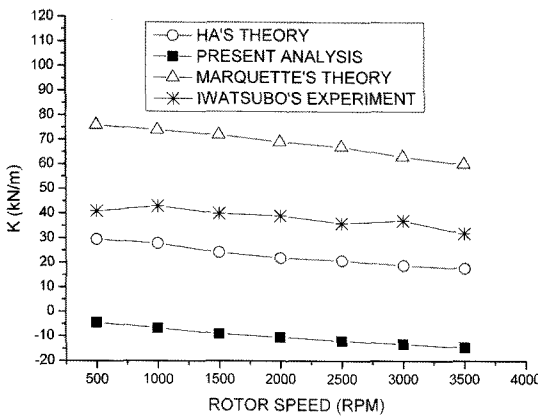


Fig. 11. Direct stiffness vs. rotor speed.

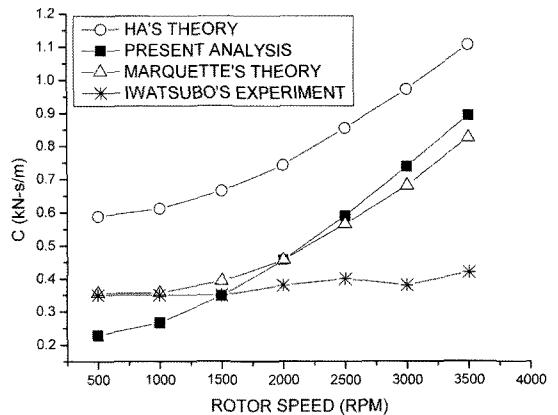


Fig. 13. Direct damping vs. rotor speed.

구에서 수행한 FLUENT 해석 결과는 Iwatsubo and shung의 실험 결과 보다 약 6.9% 정도 작게 예측됨을 보여 비교된 해석 결과 중 가장 우수함을 보였다.

Fig. 11은 로터의 회전수에 따른 강성계수(K)의 결과를 나타내고 있다. 강성계수는 축계의 위험속도 (Critical speed)와 관계되는 것으로 본 연구 결과는 Ha and Lee의 해석 결과보다 더 작게 예측되어 Iwatsubo and shung의 실험 결과와 비교할 때 더 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 FLUENT 해석을 통해 정의된 유선 분리각의 사용이 강성계수 예측에 있어서는 개선됨을 보이지 못하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 로터의 회전수에 따른 연성강성계수(k)의 결과를 나타내고 있다. 연성강성계수는 축계의 불안정화와 관계되는 것으로 본 연구 결과는 Ha and Lee의 해석 결과보다는 작게 예측됨을 보이고 있다. Iwatsubo and shung의 실험 결과와 비교해 보면 1000 rpm,

1500 rpm, 및 3500 rpm에서 매우 근접한 결과를 보여 주고 있고 전반적으로 Ha and Lee의 해석 결과보다 개선된 결과를 나타내고 있다.

Fig. 13은 로터의 회전수에 따른 감쇠계수(C)의 결과를 나타내고 있다. 감쇠계수는 축계의 안정화와 관계되는 것으로 본 연구 결과는 Ha and Lee의 해석 결과보다 작게 예측됨을 보이고 있다. Iwatsubo and shung의 실험 결과와 비교해 보면 크게 개선됨을 보이고 있으며 1500 rpm에서는 거의 일치함을 보이고 있다.

#### 4. 결 론

고성능 펌프의 비접촉식 실로 널리 사용되고 있는 평행 홈 실의 누설량과 로터다이나믹 특성계수의 예측 개선을 위하여 홈 실에 대한 유동해석을 CFD 상용코

드인 FLUENT를 사용하여 수행하고 누설량과 유선 분리각  $\alpha$ 를 결정하였다. 새로 결정된 유선 분리각을 기 발표된 흡 실의 three-control-volume 해석법에 적용하여 재해석하고 그 결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 흡 실에서의 유선 분리각  $\alpha$ 의 크기는 압력차가 커질수록 더 커짐을 보였으며, 로터의 회전수가 커지면  $\alpha$ 가 작아지는 경향을 보였다. 압력차가 커질수록 로터 회전수의 영향은 작아짐을 보였으며, 흡부의 깊이(B)/너비( $L_0$ )비가 커질수록  $\alpha$ 가 커짐을 보였다.

2) 누설량의 예측은 Marquette and Childs 및 Ha and Lee의 결과보다 약간 개선된 결과를 보였으며 FLUENT 해석 결과는 Iwatsubo and shung의 실험 결과 보다 약 6.9% 정도 작게 예측됨을 보여 비교된 해석 결과 중 가장 우수함을 보였다.

3) 강성계수(K)는 Ha and Lee의 해석 결과보다 더 작게 예측되어 FLUENT 해석을 통해 정의된 유선 분리각의 사용이 강성계수 예측에 있어서는 개선됨을 보이지 못하였다.

4) 연성강성계수(k)는 Ha and Lee의 해석 결과보다 작게 예측됨을 보이고, Iwatsubo and shung의 실험 결과와 비교해 보면 1000 rpm, 1500 rpm, 및 3500 rpm에서 매우 근접한 결과를 보여주고 있어 전반적으로 개선된 결과를 보였다.

5) 감쇠계수(C)는 Ha and Lee의 해석 결과보다 작게 예측됨을 보이고 있으며, Iwatsubo and shung의 실험 결과와 비교해 보면 크게 개선됨을 보였다.

본 연구를 통하여 평행 흡 실의 three-control-volume 해석법을 사용한 코드를 활용할 경우 유선 분리각에 대한 정확한 정보가 중요함을 알 수 있었으며, FLUENT 해석을 통한 유선 분리각의 결정 및 누설량 예측이 매우 유용함을 알 수 있었다. 또한 FLUENT 해석을 통한 평행 흡 실의 누설량 예측 결과가 비교된 해석 결과 중 가장 우수함을 보여 FLUENT를 사용한 로터다이나믹 특성계수 예측 방법을 개발한다면 보다 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- Black, H. F. and Cochran, E. A., 1973, "Leakage and Hybrid Bearing Properties of Serrated Seals in Centrifugal Pumps", presented at the 6th International Conference on Fluid Sealing, Munich, Germany, G5-61 - G5-70.
- Childs, D. W., and Kim, C. H., 1986, "Testing for Rotordynamic Coefficients and Leakage : Circumferentially-Grooved Turbulent Annular Seals", in Proceedings of the Second IFToMM International Conference on Rotordynamics, Tokyo, Japan, pp. 609-618.
- Nordmann, R., Dietzen, F. J., Janson, W., Frei, A., and Florjancic, S., 1986, "Rotordynamic Coefficients and Leakage Flow of Parallel Grooved Seals and Smooth Seals", Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery, NASA CP No. 2338, proceedings of a workshop held at Texas A&M University, pp. 129-153.
- Kim, C. H., and Childs, D. W., 1987, "Analysis for Rotordynamic Coefficients of Helically-Grooved Turbulent Annular Seals", ASME Journal of Tribology, Vol. 109(1), pp. 136-143.
- Iwatsubo, T. and Sheng, B., 1990, "Evaluation of Dynamic Characteristics of Parallel Grooved Seals by Theory and Experiment", in Proceedings of the Third IFToMM International Conference on Rotordynamics, Lyon, France, pp. 313-318.
- Iwatsubo, T., Sheng, B., and Ono, M., 1990, "Experiment of Static and Dynamic Characteristics of Spiral Grooved Seals", Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery, NASA CP No. 3122, proceedings of a workshop held at Texas A&M University, pp. 223-234.
- Kilgore, J. J. and Childs, D. W., 1990, "Rotordynamic Coefficients and Leakage Flow of Circumferentially Grooved Liquid-seals", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 112, pp. 250-256.
- Florjancic, S., 1990, "Annular Seals of High Energy Centrifugal Pumps : A New Theory and Full Scale Measurement of Rotordynamic Coefficients and Hydraulic Friction Factors", Ph.D. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- Marquette, O. R. and Childs D. W., 1996, "An Extended Three-Control-Volume Theory for Circumferentially-Grooved Liquid Seals", ASME Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 276-285.
- Ha, T.W. and Lee, A. S., 2000, "A Rotordynamic Analysis of Circumferentially-Grooved Pump Seals Based on a Three-Control-Volume Theory", KSME International Journal, Vol. 14, No. 3, pp. 261-271.

- Black, H. F. and Cochran, E. A., 1973, "Leakage and Hybrid Bearing Properties of Serrated Seals in Cen-