

원심압축기 베인 디퓨저에서의 선회실속 특성

이두열* · 강창식* · 신유환* · 김광호*

Characteristics of Rotating Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser

Du-Yeol Lee*, Chang-Sik Kang*, You-Hwan Shin*, Kwang-Ho Kim*

Key Words: Flow Coefficient (유량계수), Static Pressure Rise Coefficient (정압상승계수), Rotating Stall (선회실속), Wavelet Transform (웨이블릿 변환), Rabbit Stall Cell (레빗스톨셀), Vaned Diffuser (베인 디퓨저)

ABSTRACT

In this study, the instability of a centrifugal compressor with vaned diffuser was investigated. During unstable operation of the test compressor, pressure fluctuations at different diffuser radius ratios were measured by using high frequency pressure transducers. Two different types of stall, mild and deep stalls, were observed alternately and irregularly at some flow rates where the compressor performance was steeply deteriorated. In this transient zone, the size of rotating stall cell was estimated through the wavelet transform analysis. It was about 45 percents of rotor circumferential space at 3000 rpm and not dependent on flow rate.

1. 서 론

원심압축기 디퓨저에서 압력 회복 능력과 유동의 안정성은 압축기 성능과 직결된다고 볼 수 있으므로 디퓨저 내의 유동현상 및 성능을 정확히 이해하는 것이 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 특히 베인 디퓨저를 장착한 경우 작동조건에 따라 압축기 성능이 상대적으로 민감하기 때문에 베인 설치에 대한 체계적인 실험데이터가 필요하다.

베인 디퓨저는 일반적으로 베인리스 디퓨저에 비해 확산율이 높아 출구 직경을 작게 하는 것이 가능하여 마찰손실을 줄일 수 있어 베인리스 디퓨저에 비해 압력회복과 압축기 효율 향상이 가능하다. 하지만 안정

작동 유량범위가 좁다는 단점을 가지고 있기 때문에 안정영역 확보의 관점에서 불안정 영역의 선회실속 특성을 이해하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

원심압축기 선회실속에 대한 연구는 대부분 실험에 의존하고 있으며, Fringe et al.,⁽¹⁾ 신유환 외⁽²⁾ 등은 기 없는 디퓨저를 대상으로 선회실속의 특성을 실속 셀의 수, 전파속도 및 진폭 등에 관해서 고찰하였고, 비교적 높은 압력비, 효율 등이 요구되는 산업용 압축기인 베인 디퓨저에서 Seidel⁽³⁾ 등은 임펠러 회전 주파수, 유량 등에 따라 실속셀 수, 셀의 전파속도 등의 변화에 대해서 연구하였다.

본 연구는 베인 디퓨저를 장착한 원심압축기에서의 선회실속 특성에 대한 실험적 고찰을 수행하였다. 특히 디퓨저 입출구 벽면에 고주파수 압력변환기를 장착하여 압축기 특성곡선상에 정압계수가 급격하게 감소하는 천이영역의 압력파형에 대한 스펙트럼분석과 웨

* KIST 열·유동제어연구센터
E-mail : khkim@kistmail.kist.re.kr

이블렛 분석을 통해 그 현상과 원인 그리고 억제할 수 있는 아이디어를 찾고자 하였다.

2. 실험장치 및 측정 시스템

장치의 단면도와 주요 구성은 Fig. 1과 같다. 본 실험장치는 입구 플레넘 (plenum)과 입구 덕트 사이에 벨마우스 (bellmouth)를 설치하였고 입구 플레넘에는 스크린 필터를 설치하여 흡입 공기중의 이물질을 제거하였다. 디퓨저를 통과한 공기를 모으기 위하여 디퓨저 출구에 포집실 (collecting chamber)을 설치하였고 압축된 공기는 포집실과 출구덕트를 경유하게 된다. 유량 조절 밸브는 출구 덕트 끝단에 설치하였고 벨브에 타이밍 벨트로 장착된 기어를 설치하여 스텝핑 모터로 구동 조절할 수 있도록 제작하였다. 구동모터는 3상 2극 (정격 회전수 3560 rpm), 15 KW 용량을 사용하였다.

임펠러는 스피리터 (splitter)가 없는 반경류형 임펠러이며, 병류형 (parallel wall type) 베인리스 디퓨저를 설치하여 실험한 결과, 최고효율점에서 임펠러 출구 폭을 따라 측정된 평균유동각은 23°였다. 따라서 이 유동각을 기준으로 하여 디퓨저 베인의 설치각을 23°로 설치, 실험을 수행하였다. 임펠러와 디퓨저의 기본 제원은 Table 1에 제시하였다.

성능측정시스템은 압력 및 온도측정을 위하여 압력 측정시스템과 온도스캐너로 이루어져 있는데, 압력측정용 시스템은 PSI의 system 8400을 이용하였으며, 온도는 K형 열전대를 사용하였다. 측정된 각 신호 값은 컴퓨터로 입력되어 후처리 과정을 거치게 된다.

베인 디퓨저를 장착한 압축기의 불안정 작동영역에서 선회실속을 측정하기 위해 디퓨저 입구 ($r/r_2=1.02$), 베인 앞 ($r/r_2=1.18$) 뒤 ($r/r_2=1.29$)와 디퓨저 출구 ($r/r_2=1.56$)에 각각 고주파수용 압력센서 (Kulite XCS-062)를 디퓨저 벽면과 평행하게 장착하였다. 동시에 측정된 4개의 신호는 저주파 필터 (Krohn-Hite 3384) 및 신호분석기 (Analogic

Table 1 Geometry of impeller and diffuser (mm)

Impeller exit diameter	418
Impeller hub diameter	110
Impeller tip diameter	240
Impeller exit blage angle	90° (radial type)
Number of impeller blade	17 (no splitter)
Diffuser inlet diameter	420
Diffuser outlet diameter	720
Diffuser inlet width	19.4
Diffuser outlet width	19.4
Number of vane	16
Vane type	plate (straight)
Vane stagger angle	23°
Vane inlet radius ratio (r_3/r_2)	1.09
Vane length	120
Vane solidity	1.33
Vane thickness	2

D6500E)를 거친 후 PC에 저장되고, 후처리 과정을 하게 된다. 측정시 200 Hz 이상의 고주파 성분은 저주파 필터로 제거하였으며, 샘플링 간격은 0.9 msec이다. 신호분석을 위하여 상관함수, FFT 기법 및 Wavelet Transform을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압축기 성능특성

본 연구에서는 압축기 전체, 임펠러 그리고 디퓨저의 성능을 측정하기 위해 여러 회전수에서 고유량에서 저유량으로 유량을 줄여가면서 여러 유량조건에서 실험을 수행하였다. 실험 결과를 통하여 얻은 성능곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 이 때 유량계수 (ϕ) 및 정압상승계수 (C_p)은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{Q}{\pi D_2 b_2 U_2} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{\Delta p}{1/2 \rho_\infty U_2^2} \quad (2)$$

여기서 D_2 는 임펠러 출구 직경, b_2 는 디퓨저 폭, U_2 는 임펠러 팁 속도, 그리고 ρ_∞ 는 대기 밀도이다.

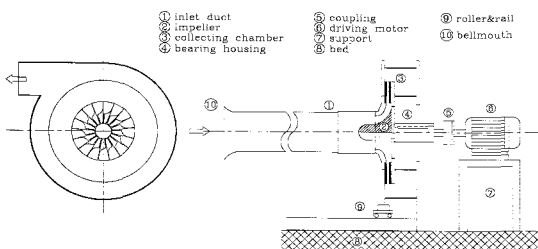


Fig. 1 Centrifugal compressor test rig

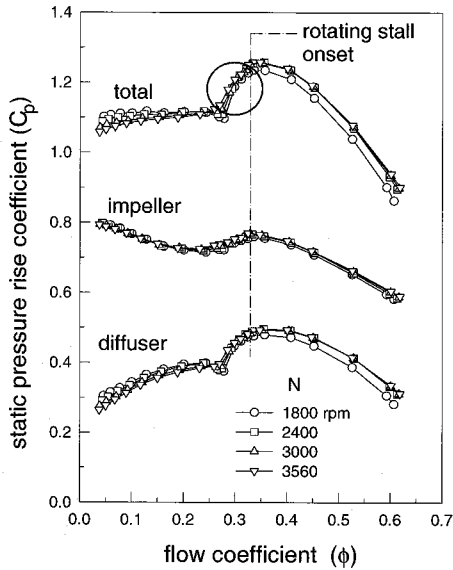


Fig. 2 Compressor performance

유량은 출구덕트의 오리피스 전후에서 측정된 압력의 차이로 계산하였고, 정압상승계수에서 Δp 는 압축기 입구 플레넘과 임펠러 출구 사이의 정압차를 임펠러에서의 Δp 로, 디퓨저 입구와 압축기 출구 덕트 사이의 정압차를 디퓨저에서의 Δp 로, 각각의 정압차의 합을 압축기 전체의 Δp 로 보고 계산하였다.

Fig. 2를 보면 유량이 감소하면서 정압상승계수가 증가하다 $\phi=0.33$ 부근에서 정압상승계수가 급격히 감소함을 볼 수 있는데 이 부근에서 선회실속이 발생하면서 불안정 운전영역으로 접어들게 된다. 선회실속 시작유량보다 적은 전 유량영역에서 선회실속은 관찰되고 정압상승계수도 감소한다. 이는 선회실속 발생으로 인한 손실 증가로 디퓨저의 정압력회복이 크게 감소하는 것으로 생각되며, 이러한 손실에는 디퓨저 양벽면에서의 국부적인 역류 및 디퓨저 출구로부터의 재유입 유동이 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 압축기 전체 성능 특성이 디퓨저의 특성에 의존함을 알 수 있다.

3.2 선회실속 특성

3.2.1 스펙트럼 분석

Fig. 3은 회전수 3560 rpm인 경우, 디퓨저 입구 ($r/r_2=1.02$)에서 측정된 압력요동 진폭에 대한 스펙트럼을 정압상승계수가 급격히 감소하는 유량 영역에서 나타낸 것이다. 선회실속이 발생하여 스펙트럼에서 특정 주파

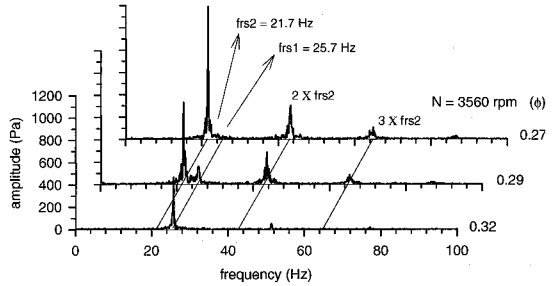


Fig. 3 Pressure fluctuation amplitude spectra with flow rate at diffuser inlet ($r/r_2=1.02$)

수가 관찰되는 유량계수는 회전수에 관계없이 $\phi=0.32$ 이다. 실속이 발생하기 전인 안정 작동영역에서는 그러한 주파수 성분은 관찰되지 않았다. 그럼에 나타난 특정 주파수 성분은 실속 셀의 전파속도와 동일하다. 유량계수 0.29를 제외한 전 영역에서 한 개의 특정 주파수 성분이 관찰되고, 그 성분의 정수배에 해당하는 하모닉 (harmonic) 성분이 나타나고 있다. $\phi=0.29$ 는 2개의 특정 주파수 성분이 동시에 나타나는 천이영역이라 할 수 있다.

Fig. 4는 실속 셀의 전파속도를 나타낸 것이며, 임펠러 회전 주파수를 무차원 변수로 사용하여 유량에 따른 변화를 나타낸 것이다. 실속 셀의 상대적인 전파속도는 임펠러 회전수와 무관하게 동일한 유량계수에서는 동일한 속도를 가진다는 것을 알 수 있다. 유량이 감소함에 따라 유량계수 약 0.25~0.3에서 전파속도는 급격히 감소하다 서서히 증가하는 특성을 보인다. 특히 전파속도가 급격히 감소하는 구간은 입력상승계수가 급격히 감소하는 영역이며, 이 영역에서의 주파수 스펙트럼은 다른 영역과는 달리 2개의 특정 주파수 성분이 혼합되어 나타난다.

Fig. 5는 회전수 3000 rpm으로 디퓨저 입구에서 천

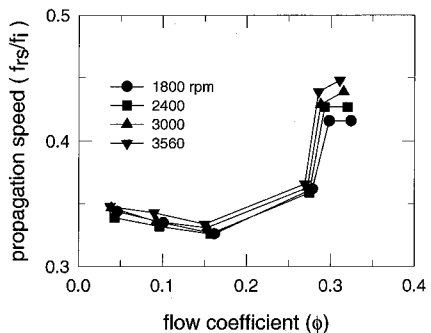


Fig. 4 Stall cell propagation speed with flow rate and impeller rotating speed

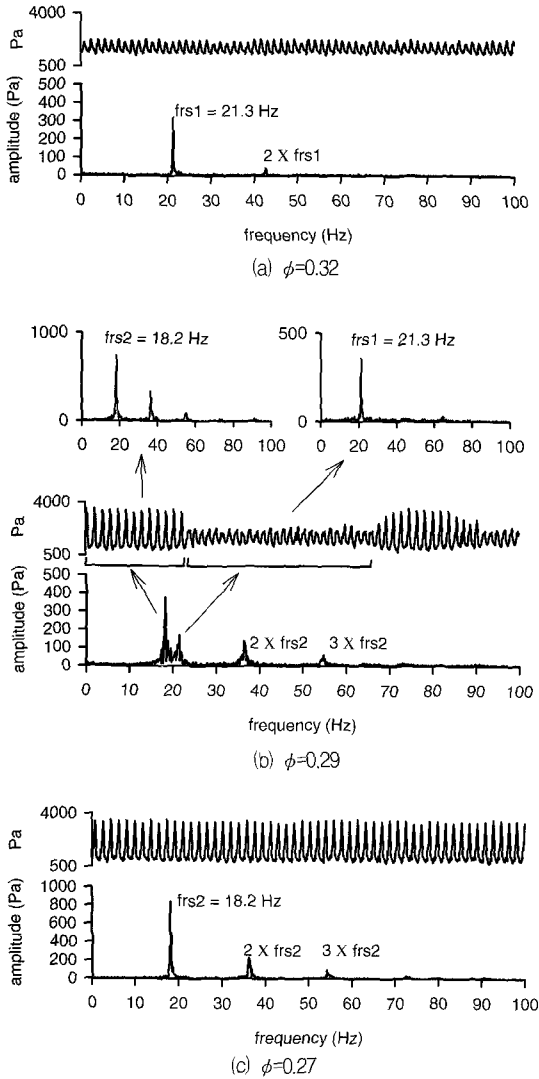


Fig. 5 Pressure fluctuations and amplitude spectra with flow rate at diffuser inlet ($r/r_2=1.02$, $N=3000$ rpm)

이 영역과 그 전후에 측정된 압력 요동과 요동의 진폭 스펙트럼을 유량에 따라 나타낸 것이다. $\phi=0.32$ 인 경우 압력신호는 21.3 Hz의 특정 주파수 성분을 보인다. 그러나 $\phi=0.29$ 로 감소하면 두 개의 특정 주파수 성분이 관찰되는데, 상대적으로 낮은 주파수 성분 (frs2)은 18.2 Hz 이고 높은 성분 (frs1)은 21.3 Hz인 것을 알 수 있다. 두 주파수 성분 중 21.3 Hz 성분은 $\phi=0.32$ 에서 관찰된 특정 주파수 성분 및 압력 파형과 동일하다. 다시 유량이 감소하여 $\phi=0.27$ 로 변하면 18.2 Hz의 특정 주파수 성분만이 관찰된다. 이 성분은 유량계수 0.29에서 관찰된

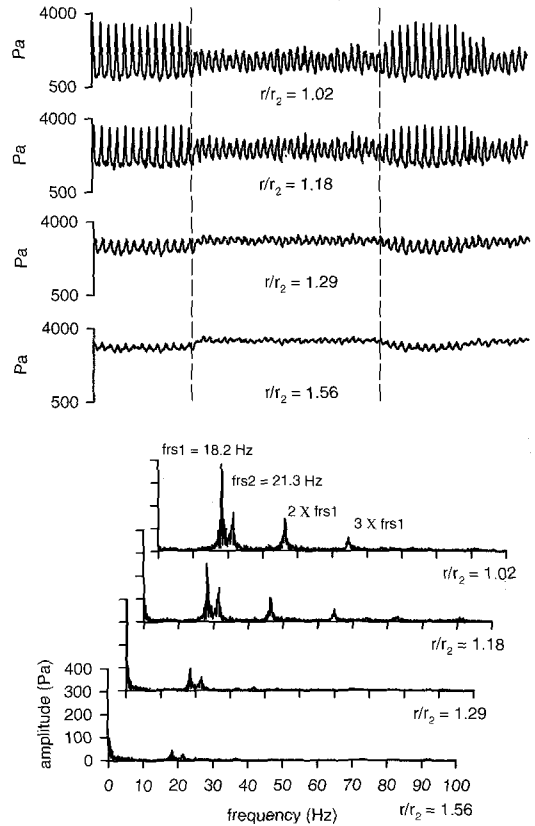


Fig. 6 Pressure fluctuations and amplitude spectra with diffuser radius ratio ($\phi=0.29$, $N=3000$ rpm)

18.2 Hz 주파수 성분 및 압력 파형과 동일한 것을 알 수 있다. 따라서 압축기가 불안정 영역으로 들어서면 먼저 작은 진폭과 빠른 주파수 성분을 가진 압력 파형이 발생하며 유량이 감소함에 따라 큰 진폭의 느린 주파수 성분의 압력 파형이 발생, 서로 혼합하게 되고, 결국에는 큰 진폭의 느린 주파수 성분만이 남아 전체를 지배하게 된다. 특히 압축기 성능특성을 고려해볼 때 상대적으로 평균 압력이 낮은 큰 진폭의 느린 주파수 성분이 압력상승계수를 급격히 감소시키는 주 요인이 되는 것으로 생각된다.

본 연구에서 관찰된 두 개의 서로 다른 선회실속 성분을 Frigne⁽¹⁾, Inoue⁽⁵⁾ 등의 연구 결과와 비교해 볼 때 낮은 진폭 성분 ($\phi=0.32$)은 mild stall 특성을, 큰 진폭 성분 ($\phi=0.27$)은 deep stall의 특성을 각각 나타내고 있다. 또한 전이영역인 유량계수 0.29에서는 mild stall과 deep stall이 번갈아 가며 공존하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 6은 압축기 디퓨저입구 ($r/r_2=1.02$), 베인 앞 ($r/r_2=1.18$)·뒤 ($r/r_2=1.29$)와 디퓨저 출구 ($r/r_2=1.56$)에서의 선

회실속 파형과 그 스펙트럼을 각각 나타낸 것이다. 그림을 보면 선회실속 파형은 디퓨저 베인을 통과 하면서 진폭이 크게 약화되며 하모닉 성분이 사라져 가는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 베인 없는 디퓨저의 경우⁽⁴⁾와 큰 차이를 보이고 있으며, 디퓨저 베인이 진폭을 감쇄시키는 역할을 하는 것으로 생각된다.

3.2.2 웨이블릿 분석

본 연구에서는 압축기 특성곡선 상에서 압력이 급격하게 감소하는 영역을 포함하는 천이영역에서의 선회실속 특성을 해석하기 위하여 웨이블릿 변환을 이용하였으며, 이러한 웨이블릿 변환은 시간과 주파수 영역을 동시에 해석하는 장점이 있어 순간적 교란 (disturbance)에 대한 정보를 얻는데 유용하다⁽⁷⁾.

압력신호 $P(t)$ 에 대한 웨이블릿 변환의 정의는 다음과 같다.

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int \Psi(T)P(t)dt \quad (3)$$

여기서 $\Psi(t) = -\sin(2T)\exp(-T^2)$ 로 Morlet 웨이블릿 함수를 나타내고, $T = (t - b)/a$ 로 정의된다. a 는 스케일 파라미터로 본 논문에서는 선회실속셀의 크기를 해석하는데 사용되었고, b 는 트랜스레이션 (translation) 파라미터로서 선회실속의 전파속도를 계산하는데 사용하였다⁽⁵⁾.

Fig. 7은 디퓨저 입구에서 서로 다른 세 유량에 대한 정압신호의 웨이블릿 변환 결과를 보여준다. 그림의 좌단에는 고주파수 압력변환기에 의한 측정 샘플의 전체스케일 ($b/\Delta t = 0 \sim 8192$)에 대해서 보여주고 있고, 우단에는 그것을 각각 확대한 그림을 나타내고 있다.

푸리에 변환과의 기본적인 결과비교를 위해 Fig. 7(a)의 확대된 그림인 (a-1)을 보면, $W(a, b)$ 의 최고값이 $a/\Delta t \approx 10$ 에 위치해 있고, 그 사이의 간격 $b/\Delta t \approx 50$ 이 되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 $\Delta t = 0.0009 \text{ sec}$ 이며 이것은 임펠러 회전속도 (50 Hz)의 $1/22.2$ 에 해당되는 값이므로 $a = 10 \times \frac{1}{22.2}$ 이 되고, 따라서 날개수가 17개인 본 연구에 사용된 원심압축기에서 선회실속 한

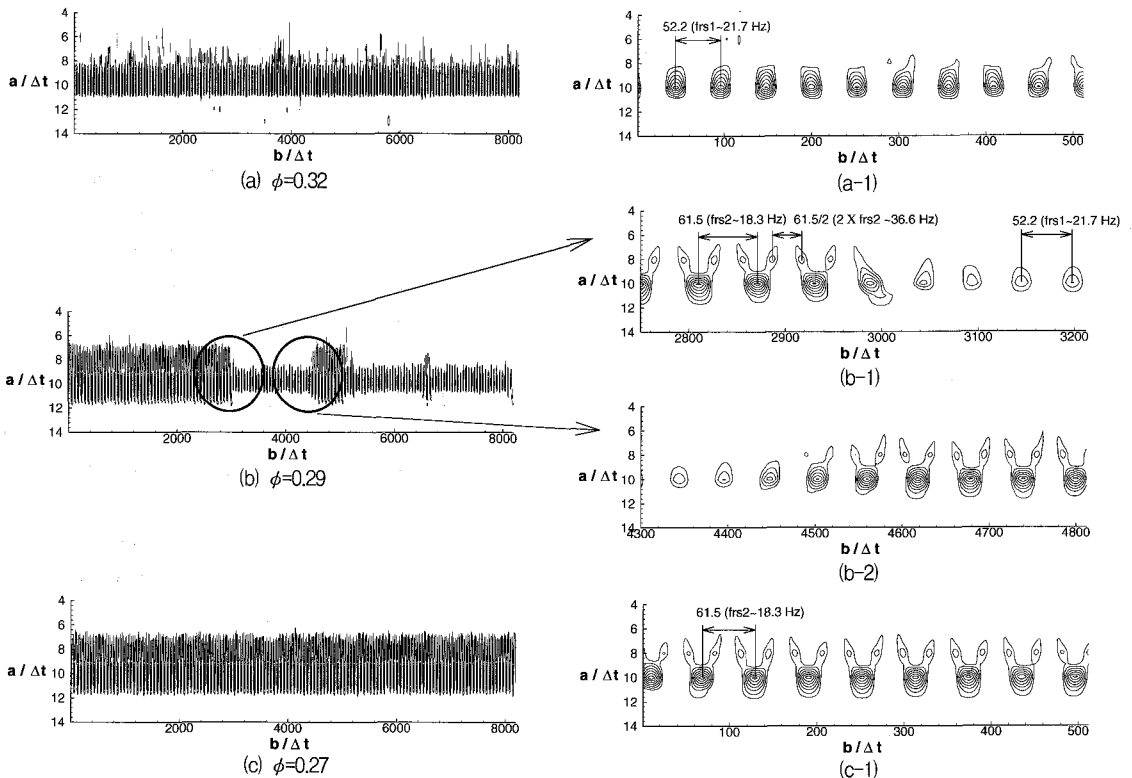


Fig. 7 Wavelet transform with flow rate at diffuser inlet($r/r_2=1.02$, $N=3000 \text{ rpm}$)

개 셀의 크기는 원주방향으로 날개 7~8 정도의 크기라는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 회전속도와 관계없이 셀수는 한 개로 나타났다.

선회실속 전파속도를 나타내는 $b = 52.2 \times 1/22.2 = 2.3$ 으로 임펠러 회전수의 1/2.3에 상응하는 값 $50 \text{ Hz}/2.3 = 21.7 \text{ Hz}$ 가 된다. 이는 FFT의 결과($\text{frs1}=21.3 \text{ Hz}$)와 동일한 결과를 나타낸다. 이러한 방법으로 각 유량에 대해서 적용해 보면 FFT 결과와 일치한다. 따라서 웨이블렛 변환에서 $\phi = 0.29$ 에 나타난 두 성분은 $\phi = 0.27$ 의 것과 $\phi = 0.32$ 의 성분을 나타내며 그것들이 각각 변감아 가면서 나타나는 것을 확인할 수 있다.

웨이블렛 변환 결과에서 주목할 것은 Fig. 7(b-1)에서 알 수 있듯이 유량계수 $\phi = 0.32$ 와는 달리 선회실속 전파속도 ($\text{frs2}=18.3 \text{ Hz}$)의 2배가 되는 주파수 (FFT의 1차 하모닉 성분과 주파수가 일치)의 스케일이 다른 성분 ($a/\Delta t \approx 8$)들이 주기적으로 교접되어 나타나는 현상이 새롭게 출현한 것이다. 우리는 이것을 편이상 토끼 형상을 닮아 레빗스톨셀 (Rabbit Stall Cell)이라 이름 붙였다. 이는 Inoue 논문⁽⁵⁾에서 Deep Stall 영역에서 스케일이 다른 성분이 교접되어 비주기적으로 나타나면서 교란 (disturbance)으로 작용하는 것과 강정식 외⁽⁶⁾의 연구에서 서지와의 주기적인 성분 외에 다중 스케일의 비주기적인 파가 서지 구간에 함께 존재하면서 광대역의 스펙트럼의 증가원인이 된 결과와도 비교가 되는 부분이다. 본 연구에서는 위의 두 논문 결과와는 다르지만 스케일이 다른 성분이 교접되어 주기적으로 나타나는 현상으로 표현되는 이러한 선회실속 특성의 레빗스톨셀이 출현하고 이것이 전체 실속 특성을 지배하는 과정이 압축기의 성능을 급격하게 저하시키는 역할을 했을 것으로 생각된다.

Fig. 7(b-1), (b-2)에서, 서로 다른 주파수 성분이 혼합되는 순간에 앞에서 언급한 교접된 성분 ($a/\Delta t \approx 8$ 에 해당되는)이 하나씩 탈락되면서 사라지거나 또는 그 반대로 변화되어가는 것을 명확하게 관찰할 수 있다. 이것은 유량계수 $\phi = 0.29$ 를 포함하는 천이영역에서의 선회실속 특성을 잘 표현해 주는 결과라 할 수 있다.

Fig. 8은 레빗스톨셀이 나타나는 유량계수, $\phi = 0.29$ 에서 디퓨저 반경방향에 따라서 압력파형에 대한 웨이블렛 변환 결과를 확대한 그림을 보여준다. 결과에서 디퓨저 베인을 지나고 레빗스톨셀의 스케일이 다른 교접된 성분들이 사라진 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 회전수에 상관없이 동일하게 나타났다.

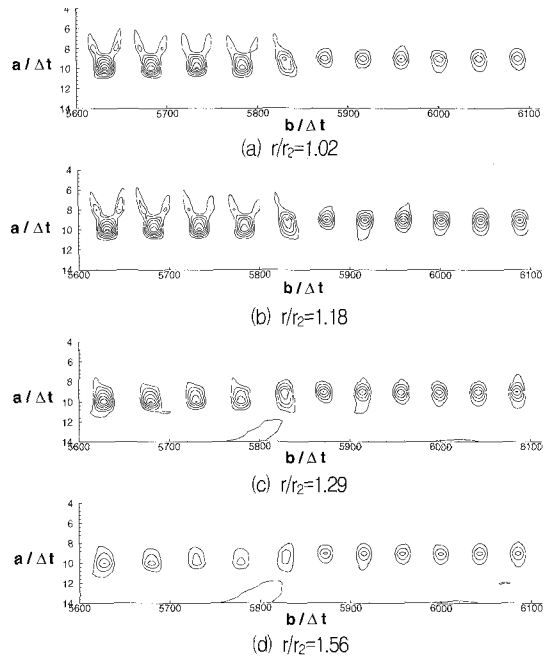


Fig. 8 Wavelet transform with diffuser radius ratio ($N=3560 \text{ rpm}$, $\phi=0.29$)

4. 결 론

베인 디퓨저를 장착한 원심압축기의 불안정 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 유량계수 0.32에서 mild stall이, 0.27에서 deep stall이 각각 관찰되었다. 특히 두 유량 영역 사이에서는 mild stall과 deep stall이 시간에 따라 불규칙적으로 번갈아 가며 나타나는 천이영역이 존재하며, 이러한 천이영역에서는 정압력 회복이 급격히 감소했다.

선회실속에 대한 압력파형의 웨이블렛 변환 결과 스케일이 다른 성분이 교접된 레빗스톨셀이 천이영역을 포함한 deep stall 전영역에서 대부분 관찰되었다. 또한 디퓨저 베인을 경계로 선회실속 진폭이 약화되며 레빗스톨셀의 교접된 성분이 사라지는 것으로 나타났다.

전 측정영역에서 실속셀의 수는 한 개로 관찰되었으며, 실속셀의 크기는 회전수 3000 rpm에서 원주방향으로 로터의 약 45%에 해당하며, 이는 유량에 무관했다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사

업 중 중점국가연구개발사업 (기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Frigne, P., and Van Den Braembussche, R., 1984, "Distinction Between Different Types of Impeller and Diffuser Rotating Stall in a Centrifugal Compressor with Vaneless Diffuser," *J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 469~474.
- (2) 신유환, 김광호, 손병진, 1998, "원심압축기 깃 없는 디퓨저에서의 선회실속에 관한 실험적 연구", *대한기계학회논문집 B권*, 제22권, 제2호, pp. 153~161.
- (3) Seidel, U., Chen, J., Jin, D., and Rautengerg, M., 1991, "Experimental Investigation of Rotating Stall Behaviour Influenced by Varying Design and Operation Parameters of Centrifugal Compressors," 91- YOKOHAMA-IGTC-93, pp. I-89~I-98.
- (4) Shin, Y.H., Kim, K.H., K.H., and Son, B.J., 1998, "An Experimental Study on the Development of a Reverse Flow Zone in a Vaneless Diffuser," *JSME International J., Series B*, Vol. 41, No. 3, pp. 546~555.
- (5) Inoue, M., Kuroumaru, M., Tanino, T., Yoshida, S., and Furukawa, M., 2001, "Comparative Studies on Short and Long Length-Scale Stall Cell Propagating in an Axial Compressor Rotor," *J. of Turbomachinery*, Vol. 123, pp. 24~32.
- (6) 강정식, 강신형, 2000, "웨이블렛을 이용한 원심압축기 서지 현상의 스케일 해석," *The First National Congress on Fluids Engineering*, Muju, pp. 575~578.
- (7) Farge, M., 1992, "Wavelet Transforms and Their Applications to Turbulence," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 24, pp. 395~457.