

## 論文

## 스윙제트에 관한 헬리컬 불안정과 자극

이원중\*, Ray R. Taghavi\*\*

## Helical Instability Wave Excitation of Swirling Jets

Wonjoong Lee\* and Ray R. Taghavi\*\*

## ABSTRACT

The purpose of this investigation is to explore the possibility of using artificial mechanical means for excitation of shear layers with application in swirling jet mixing enhancement. For this purpose, a mechanical excitation device was designed and fabricated. The major system components consist of two subsonic nozzles, one swirl generator, and the excitation device. The experiments were carried out at various helical excitation modes; i.e.,  $m=+0$ ,  $m=\pm 1$ ,  $m=\pm 2$ ,  $m=\pm 3$ , and  $m=\pm 4$ . Axial mean velocity measurements were made with plane and helical wave excitation using a hot-wire anemometer. The results are compared with the baseline (plane-wave excitation) at various helical modes. The acquired data is presented in 3-D mesh plots and 2-D contour plots. It was observed that new device was effective in excitation of the helical instability waves and resulting in mixing enhancement of the swirling jet.

## 초 록

본 연구의 목적은 기계적인 전단층 자극방법을 이용 스윙제트 혼합향상의 가능성을 고찰함에 있다. 이를 위해 기계적 자극장치가 설계, 제작되었다. 주요 구성품으로는 두개의 아음속 노즐, 스윙 발생기, 그리고 유동 자극기 등이다. 실험은 다음과 같은 다양한 헬리컬 모드들에서 수행되었다;  $m=+0$ ,  $m=\pm 1$ ,  $m=\pm 2$ ,  $m=\pm 3$ ,  $m=\pm 4$ . 열선유속계를 이용한 plane 파동과 헬리컬 파동 자극에 따른 제트속도 측정이 이루어 졌다. 다양한 헬리컬 모드에서의 결과 값들이 기준 값(plane-wave)과 비교되었다. 획득된 결과는 3-D mesh plot 과 2-D contour plot으로 표현되었다. 이로써 새로 고안된 장치는 헬리컬 불안정과 자극에 대한 효과를 입증하였고 또한 결과적으로 스윙제트의 혼합을 증진시켰다.

**Key Words** : Jet mixing(제트혼합), Swirl jet(스윙제트), Helical mode(헬리컬 모드), Mechanical excitation(기계적 자극), Hot-wire anemometer(열선유속계)

## 1. 서 론

무차원 변수인 스윙수는 각모멘텀 flux와 축모멘텀 flux 및 노즐출구반경의 곱의 비로 정의되

† 2004년 5월 18일 접수 ~ 2004년 12월 3일 심사완료

\* 정희원, 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: helical92@kari.re.kr

대전시 유성구 어은동 45번지

\*\* Aerospace Eng., The University of Kansas

며, Strouhal number는 자극주파수와 노즐출구직경의 곱에 대한 유속의 비로 정의된다.

1980년대 말부터 수차례에 걸쳐 스윙제트의 저진폭 음향자극을 이용한 유동제어에 관한 다양한 시도가 행하여졌다[1,2]. 이들 실험에서는 제트 스윙수  $S=0.35$ , 자극용 음향 레벨은 126 dB을 이용하였다. 그러나 Strouhal number 0.4 자극에 의하여 불안정성 파동이 최대 성장 함에도 불구하고, 이 음향 자극이 스윙제트의 혼합특성에

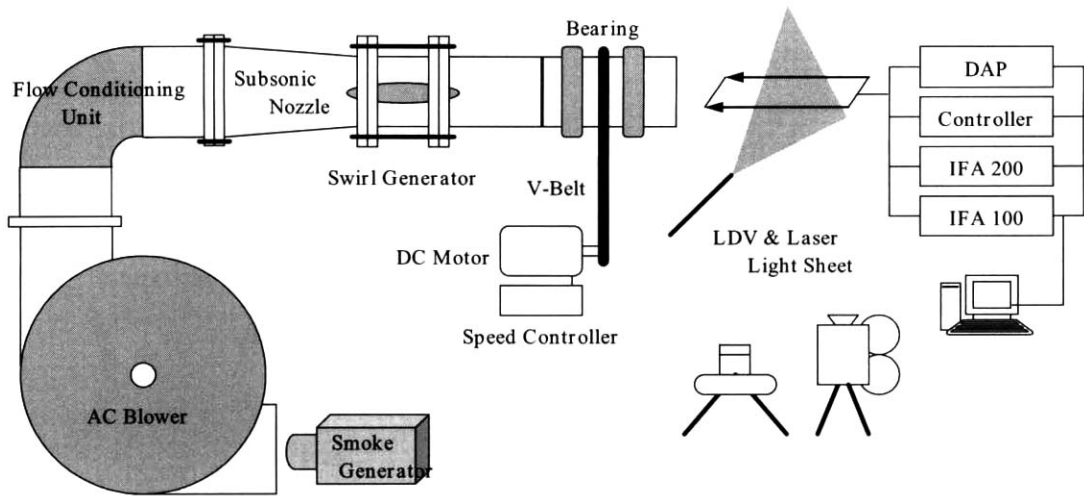


Fig. 1 General arrangement of test facility

는 아무런 영향을 미치지 못하였고 단지 고진폭 electro-pneumatic 자극장치가 낮은 스윙수 ( $S=0.12$ )의 제트를 자극할 때에만 비로소 혼합증진효과를 관찰 할 수 있었다[3].

이론적인 고찰에 따르면 스윙제트에 대한 counter-spin 파동이 가장 큰 공간 증폭을 결과를 나타낸다[4]. 그러므로 helical 파동에 의한 스윙제트의 자극은 plane 파동과 비교하여 더 큰 혼합증진효과를 보여주어야만 한다. 그러나 이같이 자연적으로 빠르게 성장하는 불안정성 파동을 자극시키기 위한, 순수하고 제어 가능한 헬리컬 파동을 생성하는 것은 항상 어려운 과제이다. 제트의 주변에 스피커의 배열을 통한 몇몇 시도가 행해졌다[5,6]. 여러 문제점들 중에서도 장치배열의 복잡성 및 고온 제트에의 적용불가는 이들 중요한 물리적 현상의 실제적이고 실용적인 구현에 장애가 되었다.

본 연구에서는 앞선 연구들의 한계를 극복하기 위해 새로운 기계적 자극장치를 설계/제작하고 시험을 수행하였다. 이들 시험결과를 바탕으로, 본 연구에 고안/적용된 기계적 자극장치가 생성한 헬리컬 불안정성 파동이 스윙제트 혼합특성 제어에 실질적인 효과가 있음을 입증하였다.

## II. 본 론

### 2.1 시험장치 구성

본 연구에 사용된 시험장치 구성은 Fig. 1과 같다. 주요 장치로는 송풍기, 유동 콘디셔너, 어댑터, 베인형 스윙 발생기, 노즐 그리고 유동자극

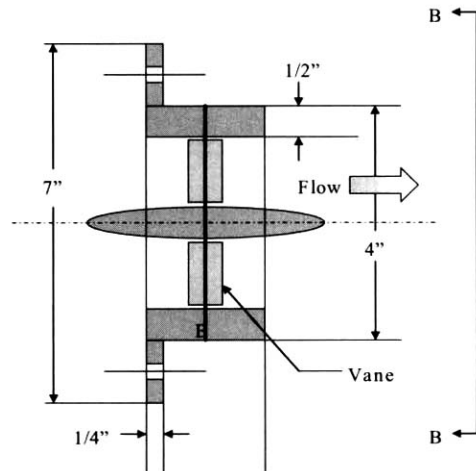


Fig. 2. Schematic of swirl generator (Front View)

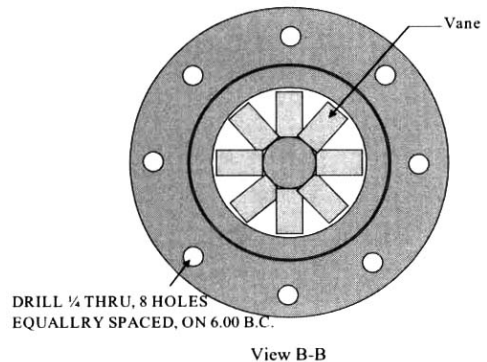


Fig. 3. Schematic of swirl generator (Side View)

장치 등이다. 송풍기는 출구 평균속도 기준 24.38 m/s의 공기를 공급하며, 스윙 발생기(Fig. 2 와 3)에는 8개의 베인들이 축대칭 허브를 둘러싸고 있다. 베인 각은 0°(스윙효과 없음)에서부터 75° 까지 다양하게 조절가능하며, 본 연구에서는 45°의 스윙각이 사용되었다. 스윙 발생기, 노즐 그리고 유동자극장치 등은 모두 투명 cast-acrylic plastic을 주 재료로 사용하여 유동가시화를 통한 관찰도 가능하도록 설계하였다.

2.2 기계적 자극장치

Fig. 4 와 5에 도시 된 바와 같이 기계적 자극 장치는 회전하는 직경 9.53 cm의 원통과 안쪽면에 축방향으로 부착된 lobe들로 구성된다. 이들 투명 원통은 전기모터에 V-벨트로 연결되어 양 방향(시계방향, 반시계방향) 모두 회전 가능하다. 모터의 회전수는 설정 RPM의 1.6% 내의 오차범 위에서 유지되도록 하였고 본 시험에서는 800

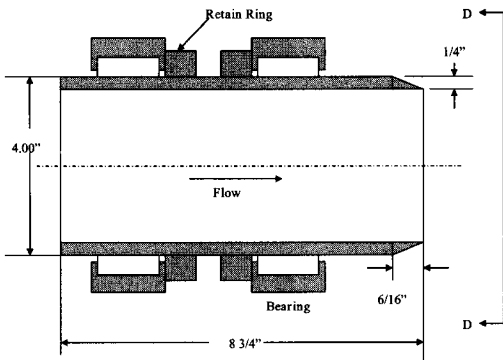


Fig. 4. Schematic of mechanical excitation device (Front View)

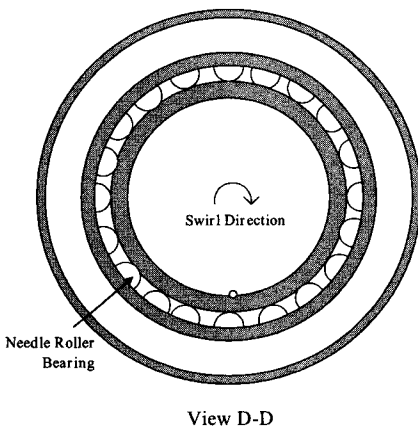


Fig. 5. Schematic of mechanical excitation device (Side View)

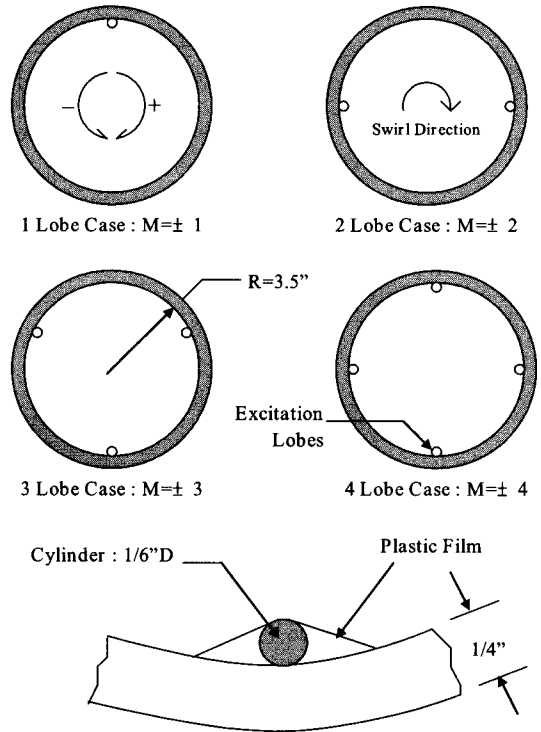


Fig. 6. Layout of excitation disturbances on the inner tube surface

rpm을 선택하였다. Helical파의 생성을 위해 원통의 안내면에 위치한 lobe들에 의한 spinning disturbance가 스윙제트의 전단층에 영향을 미치게 된다. 이들 lobe들은 직경 4.24 mm의 원통형 막대로 실린더 전길이에 걸쳐 안쪽면에 위치하게 되며, 얇은 plastic tape로 고정되어 lobe에 의한 급격한 표면형상 변화를 방지한다.

한 개부터 네 개까지 균일 간격으로 lobe의 배치가 가능하며, 다양한 헬리컬 불안정성 모드를 구현하기 위해 lobe의 개수를 가감 설정할 수 있다;  $m=0$ ,  $m=\pm 1$ ,  $m=\pm 2$ ,  $m=\pm 3$ ,  $m=\pm 4$  (Fig. 6). 여기서  $m=+0$ 은 plane-wave 자극을,  $m=\pm 1$ 은 첫 번째 헬리컬 모드(lobe 한개)를,  $m=\pm 2$ 는 두 번째 헬리컬 모드(lobe 두개)를 각각 나타낸다. 그리고 음과 양의 기호는 각각 스윙방향과의 반대방향 혹은 동일방향을 나타낸다.

2.3 시험결과

열선유속계를 이용한 시간평균 축방향 속도 측정이 수행되었다. 노즐 출구로부터 후류방향으로 출구직경의 3배에 해당하는 거리에서 노즐의 축방향 중심선에 수직인 평면에 대하여 측정하였다. 획득된 결과는 우선 3-D mesh plot으로 스윙

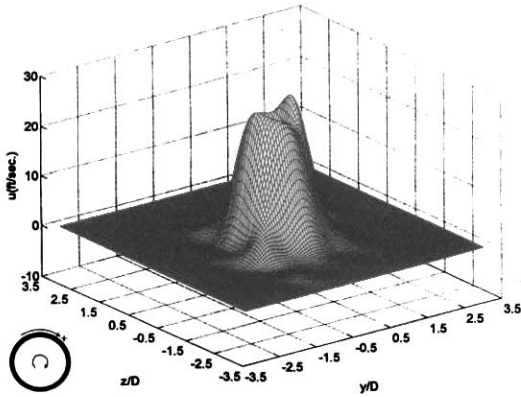


Fig. 7. Distribution of mean axial velocity at  $x/D=3$  ( $m=+0$ )

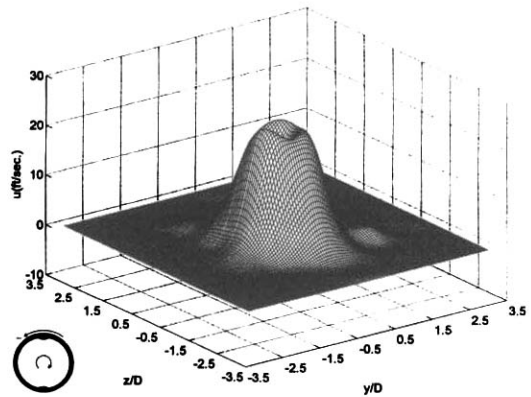


Fig. 8. Distribution of mean axial velocity at  $x/D=3$  ( $m=-2$ )

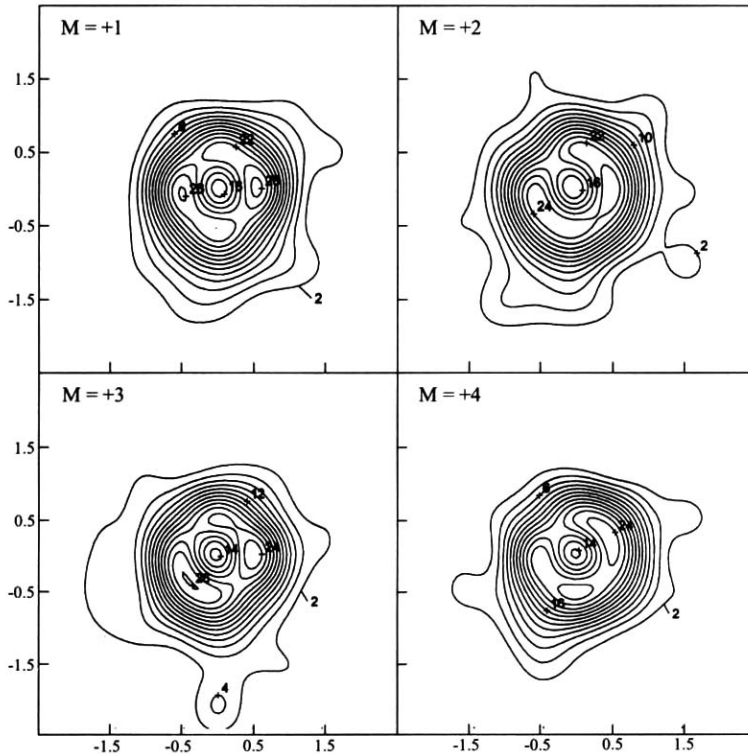


Fig. 9. Contours of mean axial velocity at  $x/D=3$  for various positive helical excitation modes (Contour interval at 2 ft/s)

제트에 관한 시간평균 축방향 속도분포를 입체적으로 보였고(Fig. 7 와 8), 이들 분포의 보다 정량적인 비교를 위해, 양 혹은 음의 다양한 헬리컬 모드에서의 분포들을 Fig. 9 와 Fig. 10에 나타내었다. 최 외곽의 contour 선은 0.61m/s(=2 ft/s)에서부터 시작하며 선 간격 역시 0.61m/s로

균일하다. 그중  $m=+0$ (lobe 없는 조건)의 경우가 이 시험의 baseline으로 사용되었다. 다양한 경우들의 보다 쉬운 비교를 위하여 2차원 축방향 속도분포 중 축을 지나며 수평을 가로지르는 분포들을 모아 baseline과의 차이를 나타내었다(Fig. 11 와 12).

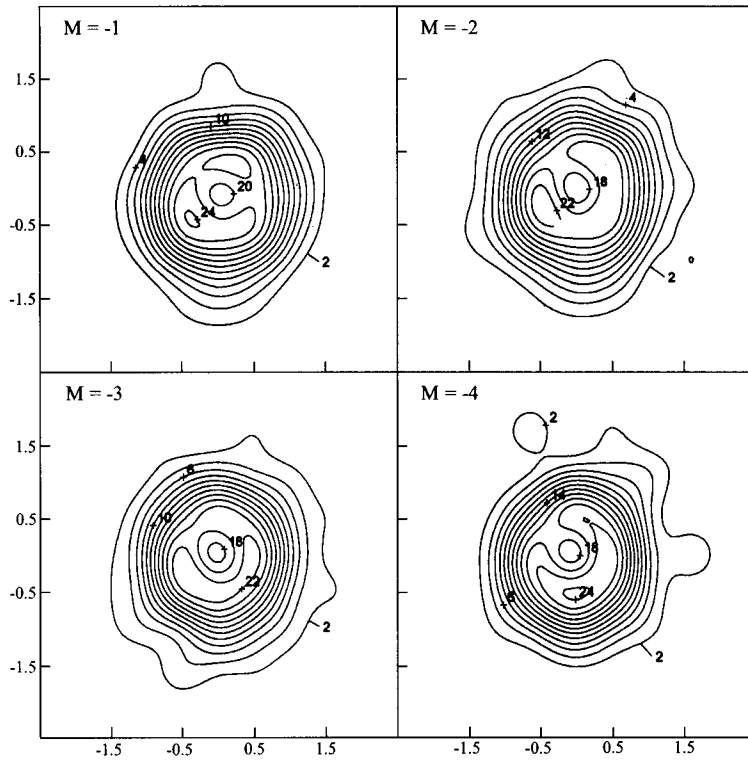


Fig. 10. Contours of mean axial velocity at  $x/D=3$  for various negative helical excitation modes (Contour interval at 2 ft/s)

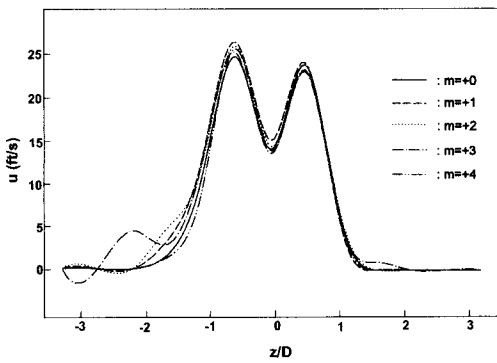


Fig. 11. Comparison of radial profiles of the mean profiles of the mean axial velocity at  $x/D=3$  for various positive helical excitation modes

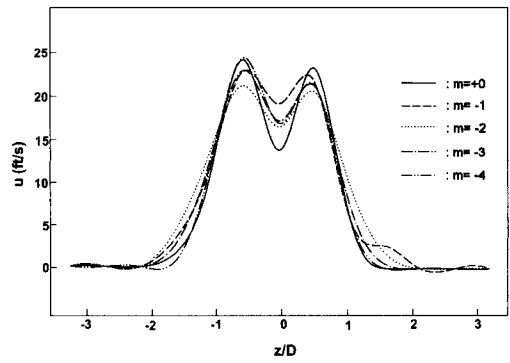


Fig. 12. Comparison of radial profiles of the mean profiles of the mean axial velocity at  $x/D=3$  for various negative helical excitation modes

Fig. 9에서 보여진 바와 같이 스월 발생기의 중앙허브 cone에 의한 wake 효과가 뚜렷이 나타나 있고 축방향 속도의 쌍봉(double-humped) 분포의 변화가 관찰된다. 양 혹은 음의 다양한 헬리컬 모드( $m=\pm 1$  에서  $m=\pm 4$  까지)에서의 자극들이 유동의 전단층 뿐만 아니라 스월제트의 중앙

부(vortex core)의 형상들도 변화시킴을 볼 수 있다. 음의 헬리컬 모드 자극의 경우 속도분포 골 깊이의 감소와 쌍봉 분포의 최고(peak)점 높이가 낮아짐을 볼 수 있다. 특히  $m=-2$ 의 경우 헬리컬 자극이 없는 경우( $m=+0$ )와 비교하여 최고속도에 있어 약 16%의 감소가 이루어 졌고, 골의 깊이