

**CRP를 사용한 추진기관에 관한 연구(Ⅱ)**  
(CRP의 소음과 유동에 관하여)

**Study About a New Propulsion System Using CRP(Ⅱ)**  
(Noise and Flow of the Counter-Rotating Propeller)

정진덕\*.이동호\*\*  
Jin-Deog Chung, Dong-Ho Rie

**ABSTRACT**

Three-dimensional flow measurements were conducted between the rotors of the CRP. To understand mean flow phenomena of the CRP's, the results of the three-dimensional measurements were shown. Interaction noise of the CRP, which increases the overall level of sound pressure in the new propulsion system, is documented by using the double conditional sampling technique. The rear rotor will increase the axial flow between the rotors of a CRP depending upon the relative locations between the forward and the rear rotor blades. The decay and spreading of the forward wakes and the upstream propagation of the rear blade disturbances are shown along with the interaction of the flow disturbances by the two rotors of blades.

**1. 서론**

일반적으로 상업용 항공기에 대한 소음 규제는 지역적 규제, 국가간 규제, 및 국제적 규제 등으로 대별할 수 있다. 먼저, 미국에서는 연방 항공국(Federal Aviation Administration : FAA)이 있고, 항공기의 형식승인을 받기 위해서는 연방 항공 규

정(Federal Aviation Regulation : FAR) 36항을 만족하여야한다. 이 규정은 표준 시험 조건 상태에서 3곳에 위치한 마이크로폰(microphone)을 통하여, 이륙시 항공기의 비행 경로 하방에 위치한 측정 장소와 활주로 측면에서 최대 허용 기준을 만족해야 하며, 착륙 시는 비행항로 하방에 설치된 마이크로폰에서 얻어진 값이 최대 허용기준 이하로

---

\* 삼성항공우주연구소  
\*\* 인천대학교 산업안전공학과

되어야 한다. FAR은 항공기의 제작 년도에 따라 세 단계로 구분되며 1975년 11월 5일 이후에 제작된 항공기는 가장 엄격한 제 3단계 규약(stage 3 rule)을 만족해야 한다. 두 번째는, 국제민간항공기구(ICAO)의 규제를 들 수 있다. 이 기구에 참여한 모든 나라들은 FAA와 거의 유사한 규정을 따라야 하며, 이것을 국제민간항공기구 부속서 16의 요구사항이라 부른다. 위에서 언급된 두 규정과는 별도로 소음 규제가 심한 지역 공항은 그 자체의 규정을 가지고 있고, 이륙과 착륙을 하기 위해서는 그 공항의 규제를 만족해야 한다. 이와 같이 복잡한 규제를 만족하고 상업화에 성공을 보장할 수 있는 새로운 형태의 항공기 추진기관으로 Counter-Rotating Propeller(이하 CRP라 약칭 함)를 들 수 있다. CRP는 경제성이 높은 장점이 있으나, 단점으로 소음문제를 들 수 있다. 따라서, 문제해결책으로 CRP내의 유동상호작용에 의해 발생하는 소음을 필수적으로 감소시켜야 한다.

CRP의 초창기 연구는 1948년에 Hubbard<sup>1)</sup>에 의해서 시작되었고, CRP에서 유동의 상호작용에 의해 소음이 발생한다는 사실을 밝혔다. 항공기 소음 생성에 관한 연구는 그 후 30년 동안 계속해서 진행되어 왔다. 70년대 유류파동으로 인하여 미국 NASA와 항공기 제작 업체는 새로운 수단의 기관 개발에 착수하였고, 이 당시 사용한 복합재료의 기술을 브레이드 제작에 접목시켜 개발한 것이 CRP의 탄생이다.

CRP는 두개의 회전자에 여러 개의 브레이드를 설치하여 서로 반대로 회전시켜 전방 회전자의 swirl 에너지를 회복 시키기 위해 후방 회전자를 이용하여 에너지 효율을 극대화시킨 추진기관이다. 그러나 현재까지 개발된 기술로는 이 추진기관에서 생성하는 소음을 제어할 수 있는 수단이 개발되지 못한 상태이다.

1985년에 Hanson<sup>2)</sup>은 Hubbard의 이론에 비정상 부하 효과를 추가하여 CRP 소음 해석표를 만들었고, Parry와 Creighton<sup>3)</sup>은 Hanson의 연구를 더욱 발전시켰다. 이론적인 연구와 더불어 CRP에 대한 실험 연구도 동시에 진행되어 왔으며, Block<sup>4)</sup>은 브레이드에 작용하는 출력부하가 증가함에 따라 CRP가 생성하는 소음이 증가한다는 사실을 밝혔다. Woodward<sup>5)</sup>는 영각(Angle of Attack)의 영향과 CRP의 장착 효과를 추가하여 실험한 결과, 영각의 증가에 따라 CRP 실험장비 하방위치에서 최대소음레벨이 존재함을 밝혔다. 이 추진기관의 소음 특성은 새로운 형태의 소음으로 유체의 상호작용 음에 의한 결과라고 할 수 있다.

Fig. 1의 주파수 분석으로 알 수 있는 바와 같이 이 추진기관의 소음은 전방 회전자와 후방 회전자에 의해서 생성된 소음뿐만 아니라, 두 회전자 사이에 존재하는 상호작용에 의한 상호작용 음들이 존재한다는 사실이다. 예로, F+2R은 전방 회전자의 기초음과 후방 회전자의 두 번째 배음이 상호 작용하여 생성된 소음이며, 전체 소음에 미치는

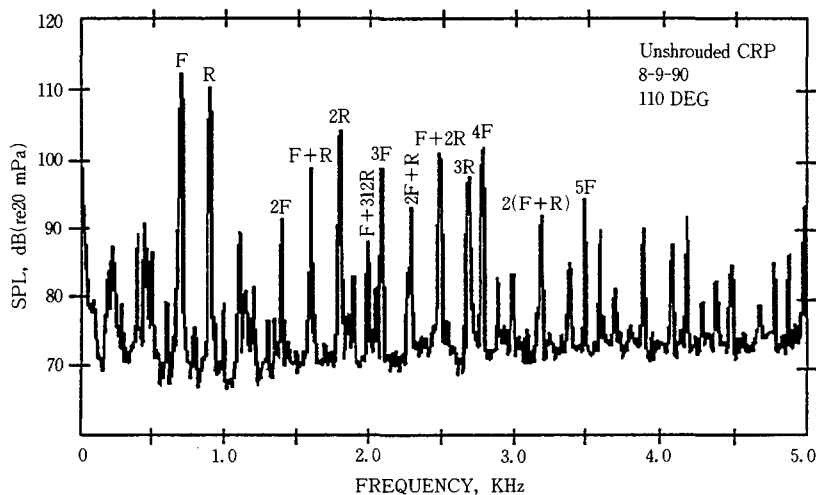


Fig. 1 CRP far-field noise spectrum

영향은 매우 크다. 이러한 형태의 소음방지를 목표로 소음생성과정의 이해는 필수적이라 할 수 있다. 또한, 현재까지는 상호작용 소음이 존재한다는 사실은 인식되어 있으나, 이들이 무엇때문에 생성되는지에 대한 연구 결과는 없다.

본 연구에서는 소음이 전방회전자에서 생성된 후류가 후방에 위치한 회전자 브레이드를 지나면서 후류의 모양과 크기 변화를 일으킴으로서 발생하는 유동상호작용과 소음현상을 규명하기 위해 이중조건표본(Double Conditional Sampling; 이하 DCS라 약칭함)<sup>6)</sup>을 사용하였다.

## 2. 실험장치

CRP 실험장치는 노즐단면이  $0.61 \times 0.61(m)$ 을 가지며 무향(anechoic)풍동의 제트 포텐셜코아 안에 설치되었다. 풍동은 제트코아 내에서 0.5%미만의 난류강도를 나타내며, 풍동 회전날개의 영향을 변화시킴으로써 최대 36m/sec까지 속도를 낼 수 있다. 본 실험에 적용된 회전자는 약 31cm의 직경을 가지며, 2개의 공기모터는 각 회전자에 동력을 공급하여 회전자를 회전시킨다. 합성재료(탄소섬유)로 만들어진 전방 회전자에는 3개의 브레이드로, 후방 회전자는 4개의 브레이드로 구성되어 있다.

Fig. 2에서 열필름 탐침(hot-film probe)은 풍동의 윗부분에 설치된 이동기구에 연결되어 있다. 이 이동기구는 탐침을 CRP사이의 축방향과 반경방향등의 원하는 위치로 고정하는 역할을 하며 스텝모터를 사용하여 0.001inch씩 이동시킬 수 있는 구조로 되어있다. 이 실험에서는 CRP유동의 특성을 알아내기 위하여 TSI가 제작한 3차원 열-필름 측면탐침(hot-film side probe)을 사용하였다. 유동 측정에 사용된 표본율은 20KHz이며 탐침의 최대 주파수 응답(frequency response)은 250KHz이다.

모터들로부터 질량유동, 압력 그리고 온도데이터는 벤튜리 유동계와 Kiel 탐침을 통해서 얻어진다. 모터 흡입파이프 내에 장착된 각 벤튜리는 0.49cm와 0.25cm의 입구와 목(throat) 직경을 갖는 알루미늄으로 가공되었다. 모터들의 상류와 하류에 Kiel-열전대 탐침(Kiel-thermocouple probe)은 프로펠러효율 계산하는데 필요한 총압력과 온도데이터를 공급한다.

유동 상호작용 데이터는 평균 선단 마하수 0.7로 회전하는 CRP의 회전자들에 마하수 0.1인 자유유동을 공급하여 얻어졌다. 정상적인 작동상태에서 전진율(advance ratio; 풍동속도/(회전수×회전자 반경))은 0.49를 나타내며, CRP 총 부하동력은 전방 회전자와 후방 회전자에 50% 대 50%로 동력을 분배 했을 때 약 29.2SHP/A의 값을 갖는다. 평균 동력계수( $C_p$ )는 약 0.28, 추력계수( $C_t$ )는 0.2이며 CRP 평균 프로펠러 효율은 약 36%이다. 정상상태에서 전방 회전자와 후방 회전자의 회전수(R. P. M)는 각각 13360 그리고 14859로 선정하였고, 후방 회전자의 RPM을 높게 책정한 이유는 강력한 상류교란을 생성하여 CRP효율을 증가시키기 위함이다.

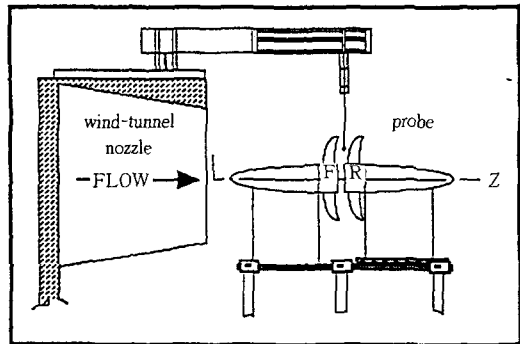


Fig. 2 CRP test setup

## 3. 유동 측정

3차원 유동 데이터는 위에서 언급한 작동상태에서 두 회전자사이에서 3차원 탐침을 사용하여 정해진 위치에서 얻은 결과로 DCS의 결과를 얻기 전에 두 회전자 사이에서의 평균 유동을 관찰하고자 함이다.

Fig. 3은 Fig. 2에 나타난 F와 R사이에서 탐침을 반경방향(R/Rip)과 축방향(Z)으로 이동시켜서 얻은 축방향 속도 성분을 나타낸다. 만일 후방 회전자가 없다면 축 방향속도는 전방 회전자로부터 멀리 떨어질수록 에너지를 상실하므로 속도가 감소하게 된다. 그러나 후방 회전자의 상류교란에 힘입어 후방 회전자에 접근할수록 유동이 가속되는 경향을 볼 수 있다. 회전자 뿌리(root)부근에서는 유동의 가속이 약하나 브레이드가 가장 높은

부하를 생성하는 R/Rtip이 75%와 80% 근처에서 축방향속도는 증가한다. 탐침이 선단쪽으로 이동해 감에 따라 속도의 증가는 둔화되고 브레이드 선단에서 약 10% 벗어난 지역에서는 풍동의 속도 36m/sec와 유사한 속도로 감소된다. 브레이드 tip 근처에서도 속도가 풍동속도보다 10m/sec이상 큰 이유는, 전방 회전자의 강력한 회전에 의해 풍동을 지난 유동이 전방 회전자로 빨려 들어오는 코안다 효과(Coanda effect) 때문이다. 후방 회전자의 영향으로 R/Rtip=80%에서는 축 방향속도가 약 30m/sec 이상 증가된다. 이 결과는 CRP 사용의 근본적인 목적과 일치하는데, 전방 회전자를 지난 유동의 방향을 후방 회전자가 활용하여 축방향속도로 만들어 추진력 생성에 기여하게 된다.

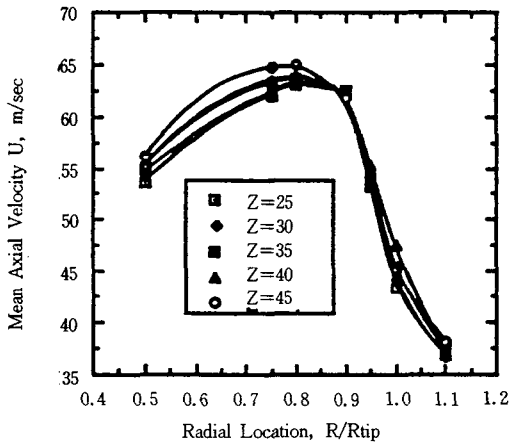


Fig. 3 Mean axial velocities with various axial and radial locations

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 얻은 결과를 나타낸다. 반경 방향속도는 75%와 80% 근처에서 강력한 네가티브 속도를 보여주는데, 이것은 풍동 노즐 단면을 지난 축방향 속도 성분만을 내포한 유동이 전방회전자를 통과하면서 회전자를 고정하는 트러리언(trunnion)쪽으로 이동을 하기 때문이다. 탐침을 전방 회전자로부터 멀리할수록 안쪽방향 유동이 작아지는 이유로 전방 회전자가 유동의 유입 단면을 작게 하는데 결정적으로 기여하기 때문이라 할 수 있다. 그리고 특이한 현상은 선단을 지난 위치에서 찾아 볼 수 있다. 앞에서는 코안다 효과

과 때문에 유동이 전방 회전자 쪽으로 흐름의 반경을 줄이면서 유입되므로, 전방 회전자를 지난 유동의 일부는 후방 회전자의 존재에 의해 바깥쪽으로 방향이 변화된다. 이것은 개구된 풍동제트에서 후방 회전자의 선단을 조금 벗어난 지역이 포텐셜 코어지역의 끝부분이므로, 확산하는 개구된 제트의 영향에 의한 것이다.

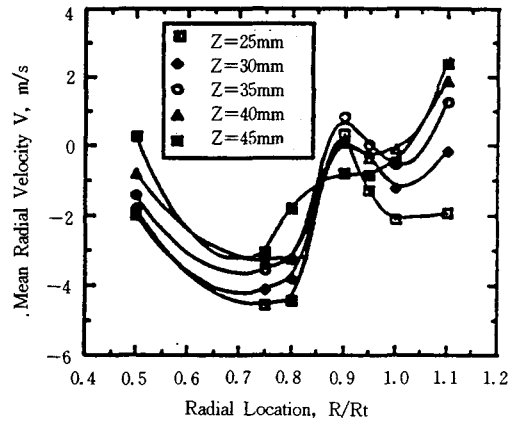


Fig. 4 Mean radial velocities with various axial and radial locations

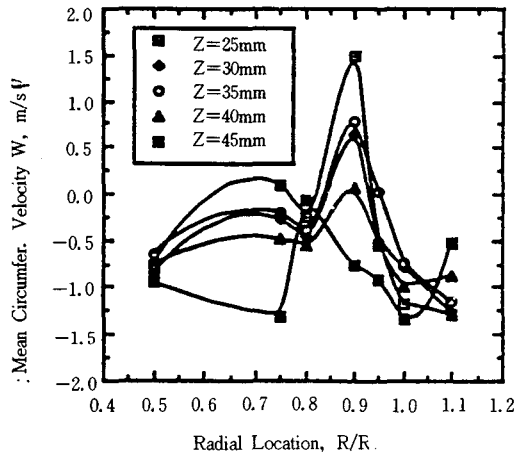


Fig. 5 Mean circumferential velocities with various axial and radial locations

사용된 탐침은 반경 방향과 원주방향 속도들의

방향을 결정할 수 있으므로 전방 회전자의 회전 방향과 반대 방향으로 흐르는 유동은 네가티브 값을 갖는다. Fig. 5는 원주방향 속도 성분을 나타내며, 가장 큰 변화는 전방 회전자에 가까운 위치인  $Z=25\text{mm}$ ,  $R/R_{tip}=0.9$ 에서 발생한다. 평균 유동은 전방 회전자에 가까운 곳에서 전방 회전자의 방향을 따라가는 경향을 나타내며(전방회전자 회전방향에 의한 유동이 지배적), 후방 회전자에 가까운 회전자는 후방 회전자의 방향으로 진행된다. 따라서, 전방회전자만을 작동시켰을 때와 비교하면 CRP를 채택한 경우에 있어서 원주속도 성분이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 이중조건 표본(Double Conditional Sampling) 결과

DCS은 전방 회전자를 원주상에 고정시키고, 후방 회전자에 설치한 브레이드들이 지나갈 때 생기는 영향을 알아내는 방법이다. 이 방법은 CRP 소음 생성에 중요한 역할을 하는 상호작용 음을 이해하는데 가장 효과적인 방법이다.

Fig. 6은 DCS의 결과를 보여주는데,  $L$ 은 두 회전자의 트러리언들 사이의 거리이고 탐침은 전방 브레이드의 80%( $R/R_{tip}=80\%$ )에 해당하는 곳에 위치시켜 유동을 측정 한 후, 다섯 개의 브레이드 위치에 대한 후류의 변화를 나타낸다. 포텐셜후류 속도(지역적 최대값)의 최대값은 전방 회전자를 단독으로 작동했을 때보다 증가했으며 후방 브레이드를 지나감으로써 생기는 후류속도의 변화를

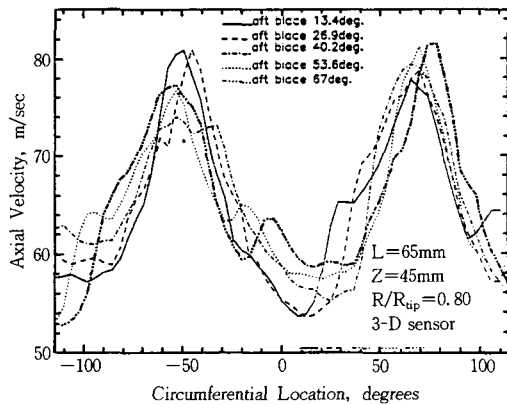


Fig. 6 Upstream influences on the axial wakes

나타낸다. 후방 브레이드가  $13.4^\circ$ 인 경우, 후류의 영향에 의해 초기 점성후류(지역적인 최소값) 지역에서 상당한 상승이 나타남을 알 수 있다. 또 하나의 후방 브레이드가  $103.4^\circ$ 에서 존재하게 되면 감소하던 포텐셜후류의 일부분이 다시 상승하는 특성을 나타낸다. 이러한 현상은 후방에 위치한 회전자 브레이드의 위치에 따라 축방향 속도 성분이 가속되는 현상을 나타낸다.

Fig. 7은 후방 브레이드의 위치변화에 따른 반경방향 유동특성을 나타낸다. 전방 회전자 브레이드를  $0^\circ$ 에 고정시킨 조건으로 전방 브레이드 반경방향 포텐셜후류에 주어진 후방 브레이드의 영향을 찾을 수 있다. 후방 브레이드가  $0^\circ$ 에 위치할 때 안쪽으로 강한 반경방향유동이 생성됨에 따라, 반경방향 포텐셜후류의 최대값에 많은 감쇄효과를 가져온다. 후방 브레이드를 지나감에 따라, 반경방향 포텐셜후류는 원래의 크기로 되돌아오거나 조금 상승하게 된다. 지역적인 최대, 최소 값들은 후방 브레이드의 위치와 연관 되어 증가하거나 감소하는 경향을 나타낸다.

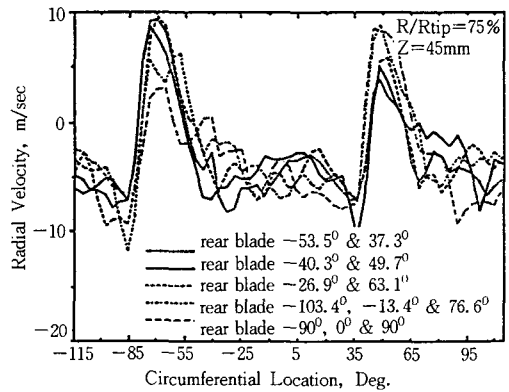


Fig. 7 Upstream influences on the radial velocities components

Fig. 8은 전방 브레이드로부터 생성된 포텐셜후류의 형태가 회전자들 사이의 3축방향 장소에서, 후방 브레이드의 각 위치에 따라 상대적으로 어떻게 변화되었는가에 대해 상세히 관찰할 수 있다. 이 유동측정은  $R/R_{tip}=75\%$  그리고 전방 트러리언으로부터  $Z=25, 35, 45\text{mm}$ 에 놓여있는 탐침으로부터 얻은 결과이다. 그림에서 나타난 각도는

최대 포텐셜후류의 위치와 규정된 후방 브레이드 위치와의 상대적인 차를 나타낸다.

Fig. 8은 후방 브레이드에 의한 상류교란 효과가 전방 브레이드의 축방향 후류유동에 미치는 영향에 대한 결과를 나타낸다. 후방 브레이드는 이 그림에서 최대 포텐셜 후류를 중심으로 좌측에서 우측으로 이동한다. 후방 브레이드가 전방 브레이드 포텐셜후류에 접근하면서 크기가 조금씩 증가한다. 후방 회전자 근처에서 강력한 상류교란을 생성하므로,  $Z=45\text{mm}$ 에서 포텐셜후류는 최대 증가를 나타낸다. 후방 브레이드가 포텐셜후류에 약  $10^\circ$  정도의 차이를 두고 접근할 때, 포텐셜후류의 크기는 전방 회전자를 단독으로 작동시켰을 때보다 약 13% 증가한다. 축방향 속도의 최대 증가는  $Z=25\text{mm}$ 에서 5.4%, 그리고  $Z=35\text{mm}$ 에서는 7.9%를 나타낸다.

전방 축방향 포텐셜후류의 변형은 상류교란 영향의 강도 및 후방 브레이드가 포텐셜후류의 어느 쪽에 위치하는가에 따라 영향을 받는다. 후방 브레이드가 포텐셜후류 우측에 위치하고 있을 경우, Fig. 8에서 나타난 바와 같이 속도 증가는 미소 폭으로 변동됨을 알 수 있다. 후방 브레이드가 포텐셜후류의 우측에 있을 때 축방향 속도의 증가는 전방 회전자 단독 작동 시에 비해  $Z=25\text{mm}$ 에서는 0.4%,  $Z=35\text{mm}$ 에서는 0.9%,  $Z=45\text{mm}$ 에서 3% 정도를 나타낸다. 따라서 축방향 포텐셜후류는 후방 회전자에 의해 결정되며, 크기는 항상 증가하게 된다.

후방 회전자의 효과는 포텐셜후류 형태를 변형시키며, 이 효과는 후방 회전자로부터 거리와 상대적인 위치에 따라 변화된다.  $Z=25\text{mm}$ 인 경우, 상류영향이 다른 축방향보다 매우 약하므로 후방 회전자 효과는 나타나지 않는다.

Fig. 8에서 상류영향은 포텐셜후류의 폭을 조사함으로써 또한 알 수 있다. 즉 두개 후방 브레이드의 위치를 비교하여(후방 브레이드가 최대포텐셜 후류의  $4.7^\circ$  전방에 있는 경우와 후방 브레이드가 포텐셜후류를  $16^\circ$  지난 후에 놓여있는 경우) 포텐셜후류의 폭은 후방 브레이드가 포텐셜후류를 지난 후에 넓어진다. 중심지점( $Z=35\text{mm}$ )에서는 앞에 있는 포텐셜후류는  $Z=25\text{mm}$ 보다 좀더 강한 상류영향을 받는다. 후방 브레이드가 포텐셜후류를  $10.3^\circ$  지난 후, Fig. 8에서 나타난 우측에 존재하

는 미세하며 갑작스러운 증가는 후방 브레이드를 통과하는 영향으로 발생한 것이다. 전방 브레이드 후류에 주어진 후방 브레이드의 효과는 또한 대칭이 아님을 전방 브레이드의 최대 포텐셜 속도를 중심으로 양측에 거의 일정하게 놓여있는 후방 브레이드의 위치를 관찰함으로써 알 수 있다.

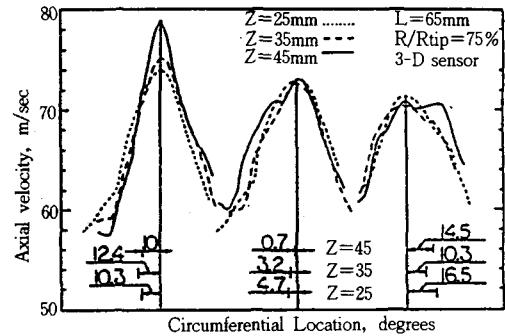


Fig. 8 Variations of the forward potential wakes corresponding to the rear blades locations

## 5. 결 론

이중조건 표본(DCS)은 CRP내의 후방 회전자들 사이에서 존재하는 유동장의 상호작용을 효과적으로 결정하는 방법이며, CRP 소음 생성에 중요한 역할을 하는 상호작용 음을 이해하는데 유용한 도구이다. DCS을 사용하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 전방 브레이드로부터 생성된 후류의 형태와 크기는 통과되는 후방 브레이드에 의하여 증가 또는 감소한다.
- 2) 축방향 속도의 증가는 후방 브레이드가 전방 브레이드의 포텐셜후류에 접근할 때 발생한다.
- 3) 반경방향과 회전방향 속도성분의 증가는 후방 브레이드가 전방 브레이드의 포텐셜후류를 지난 후에 생성되며 10%이상의 크기변화를 발생시킨다.
- 4) 전방 브레이드로부터 포텐셜후류의 폭은 후방 브레이드의 교란이 최대속도 위치를 통과 후 확대됨을 본 연구를 통하여 밝혔으며, 후방회전자에 의한 유동의 변화는 CRP의 소음장에 상당한 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

## 참 고 문 헌

- 1) Hubbard, H. H., Sound from Dual-Rotating and Multiple Single-Rotating Propellers, NACA TN 1654, 1948.
  - 2) Hanson, D. B., Noise of Counter-Rotation Propeller, Journal of Aircraft, Vol. 22, pp. 609-617, 1985.
  - 3) Parry, A. B. and Crighton, D. G., Prediction of Counter-Rotation Propeller Noise, AIAA Paper, April 1989.
  - 4) Block, P. J. W., Counter-Rotating Propeller Noise Directivity and Trends, AIAA-86-1297, 1986.
  - 5) Woodward, R. P., Noise of a Simulated Installed Model Counter-Rotation Propeller at Angle of Attack and Takeoff/Approach Conditions, 28th Aerospace Science Meeting, Jan. 8-11, 1990.
  - 6) J. Chung, J. Hough and R. Nagel, Interaction Between Rotors of a Counter Rotating Propeller, AIAA-90-3976, 1990.
-