

<논 문>

# 복잡한 유동장에서도 신뢰성 있는 5공프로브 널링기법의 개발

김진권\* · 강신형\*\*

(1996년 11월 12일 접수)

## Development of Five-Hole Probe Nulling Method Reliable in Complex Flow Field

Jin-Kwon Kim and Shin-Hyoung Kang

**Key Words :** Five-Hole Probe(5공프로브), Nulling Method(널링법), Pressure Coefficient Map(압력계수지도), Zone Decision by Pressure Ordering(압력비교에 의한 영역결정), Complex Flow Field(복잡한 유동장)

### Abstract

Since a non-nulling method of five-hole probes is valid only when the flow angle is within the calibrated angle range, it can not be used in a complex flow field. Full angle range pressure coefficient maps show that widely used nulling methods do not guarantee correct alignment of the probe with the flow direction in the unknown complex flow field. Zone decision method and features of zone map were studied by investigating the full angle range pressure coefficient maps. A reliable and efficient new nulling algorithm using zone decision by pressure ordering is proposed and verified. Since the zone decision method by pressure ordering can decide whether the flow is within the calibration angle range or not, it is useful in wide angle nonnulling methods, too.

### 1. 서 론

대체적인 유동방향을 미리 알기 어려운 복잡한 유동장에서는, 5공프로브나 열선프로브를 이용하여 유동장을 측정하면, 삽입된 프로브에 의한 유동교란이 측정되는 유동장에 다시 영향을 끼칠 수 있기 때문에, 레이저 도플러 유속계나 입자 상 유속계 등의 광학장비를 사용하는 것이 이상적이다. 그러나, 3차원 유동장을 측정할 수 있는 광학장비는 아주 고가라는 점을 제외하더라도, 산란입자의 적절한 투입, 산란입자 이외의 물체에 의한 산란, 초점 거리 확보 등 광학장비 나름대로의 제약이 실험대상에 따라 결정적인 제한이 될 수 있을 뿐만 아니

라, 5공프로브처럼 3차원 유속과 정압을 동시에 측정할 수 없고, 열선프로브처럼 연속적이고 높은 주파수의 난류를 측정하는데 한계가 있기 때문에, 불가피하게 혹은 필연적으로 5공프로브나 열선프로브를 사용해야 하는 경우도 있다.

이러한 경우 삽입된 프로브에 의한 유동교란이 측정되는 유동장에 영향을 끼칠 염려가 있을 때에는, 유동장에 영향을 주지 않을 만큼 작은 프로브를 사용하거나, 프로브의 영향을 무시할 수 있을 정도로 유동장의 크기를 키우는 방법에 의해서,<sup>(1)</sup> 유동교란의 영향을 최소화하여 유동장을 측정해야 한다.

유속과 정압은 유체역학 연구에서 가장 기본적인 고 중요한 물리량이고, 5공프로브는 복잡한 유동장에서 이들을 동시에 측정할 수 있는 거의 유일한 장비이므로, 5공프로브의 보정과 측정방법에 대하

\*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 서울대학교 기계공학과

여 여러 가지 연구가 수행되었는데, 김진권과 강신형<sup>(2)</sup>에 주요한 연구들이 요약되어 있다. 김진권과 강신형<sup>(2)</sup>은 5공프로브의 보정 및 측정이론과 측정 유동각의 확장에 대한 이전의 주요한 연구들을 비교, 검토하였으며, 측정 가능한 모든 각도 범위에서 압력계수를 측정하여 작성된 전 각도 범위의 압력계수지도를 도입함으로써, 5공프로브의 여러가지 압력특성을 파악할 수 있는 바탕을 마련하였다. 이를 바탕으로 보정계수의 분포가 전 각도 범위에서 일정한 크기 이상인 양수이어서 발산하지 않으며, 넓은 각도 범위에서 일대일 대응을 나타내는 새로운 보정계수들을 제안하였다. 이 보정계수들은 기존의 보정계수를 사용하는 경우보다 널링 측정각도 범위를 10° 정도 넓혔으며, 기존의 보정계수로 5공프로브의 영역분할 보정법을 적용할 때 발생하는 알려지지 않았던 결함을 보완함을 밝혔다.

유체기계 내부의 유동장은 그 구조가 복잡하여 미리 유동방향을 예측할 수 없거나, 강신형 등<sup>(3)</sup>의 디퓨저 내부에서처럼 유동조건에 따라서 유동방향이 돌변하는 경우도 있기 때문에, 5공프로브의 초기 지향 방향을 정하기 어려운 경우가 있다. 이러한 경우 보통 유동가시화 등에 의해서 대략의 유동 방향을 파악한 후 5공프로브의 지향 방향을 결정하는데, 유로의 형상과 유동상태의 제약때문에 유동가시화 결과를 알기 어려운 경우가 많다. 이 때에는 널링 측정방법이 사용된다.

본 논문에서는 전 각도 범위 압력계수지도로 바탕으로 흔히 사용되는 두 가지 5공프로브 널링법을 검토했는데, 이들은 유동방향을 대략이나마 알지 못하는 유동장에서는 유동방향을 잘못 지시할 가능성이 있음을 밝혔다. 이 문제를 해결하기 위하여 5공프로브를 요방향으로 한바퀴 회전시키면서 측정된 피치방향의 세 압력들 중 최대값의 최대 방향을 찾는 엄밀한 널링법을 제안하였다. 이 방법은 복잡한 유동장에서도 확실한 널링법이지만, 유동이 피치방향의 측정가능 한계를 벗어나는 경우에는 이를 구별하지 못하여 잘못된 유동성분을 산출하는 문제점과 한 위치에서의 유동장 측정을 위하여 항상 6번 이상 압력 스캔을 해야 하는 비효율성이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여, 압력비교에 의한 영역 결정법과 각 영역의 특징을 이용한 신뢰성있고 효율적인 널링법을 개발, 검증하였다.

## 2. 압력계수지도에 의한 널링방법들의 검토

김진권과 강신형<sup>(2)</sup>에서 제안된 전 각도 범위 압력계수지도로 바탕으로 일반적으로 사용되는 5공프로브 널링 측정법들을 검토한다. 여기에 사용되는 5공프로브 관련 용어와 사용된 5공프로브의 세부사항 및 전반적인 압력계수지도 등은 김진권과 강신형<sup>(2)</sup>에 설명되어 있으므로, 여기서는 생략하고 널링법의 검토에 직접 관련된 사항만 제시한다.

가장 흔히 사용되는 5공프로브 널링 측정법은 프로브를 요각 방향으로 회전시키면서 요각 방향의 두 압력이 같아지는 조건, 즉  $p_1=p_2$ 를 만족하는 방향을 유동 벡터를 포함하는 자오면으로 생각하여, 피치방향의 보정곡선 상에서 유동 피치각을 보간하여 찾고, 정압과 속도성분을 계산하는 방법이다. 본 논문에서는 이 방법을 편의상 " $p_1=p_2$  방향 널링법"이라고 부르기로 하는데, 실제의 측정에서는  $|p_1-p_2|$ 가 최소값을 가지는 요각 방향을 널링된 상태로 사용한다.

5공프로브의 널링법에 관련된 여러 가지 압력특성들을 검토하기 위하여,  $Cp_1-Cp_2$ 와  $Cp_3-Cp_4$ 의 압력계수지도로 Fig. 1에 나타내었는데, 등압력계수값의 왼쪽 끝 중앙에 대응되는 등압력계수선을 위치시켜서 쉽게 알아볼 수 있도록 하였다. Fig. 1(a)의  $Cp_1-Cp_2$  등압력계수지도에서 등압력계수선 0.13과 -0.13 사이에 존재하는  $Cp_1-Cp_2=0$  선은 요각  $\alpha=0^\circ$  부근 뿐만 아니라  $\alpha=\pm 180^\circ$  부근에도 존재한다. 더욱이 피치각  $|\beta|>60^\circ$ 일 때는  $Cp_1-Cp_2=0$  선은  $\alpha=0^\circ$ 에서 벗어나기 시작하여

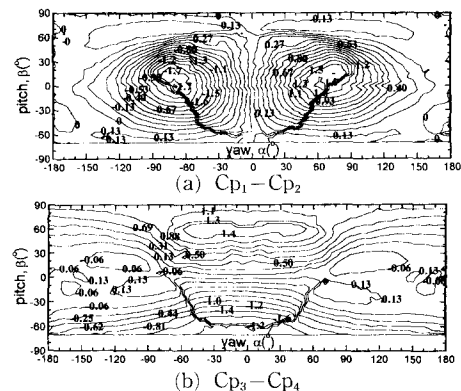


Fig. 1 Pressure coefficient maps of the tested 5-hole probe

많은  $\alpha$ 에서  $p_1=p_2$ 가 되므로, 단순히  $p_1=p_2$ 를 만족시키는 것만으로는 5공프로브가 유동방향을 지향하고 있다고 말할 수 없다. 따라서 유동방향을 대략이나마 알지 못하는 유동장에서  $p_1=p_2$  방향 널링법을 사용할 경우, 피치각  $|\beta|<60^\circ$ 일 때는 유동의 반대방향을 유동방향으로 인식할 수 있고,  $|\beta|>60^\circ$ 일 때는 임의의 방향을 유동방향으로 인식할 수 있으므로, 전혀 엉터리의 유동성분들을 산출한다.

흔히 사용되는 또 다른 5공프로브 널링방법은  $p_0$ 이 최대가 되는 요각 방향을 유동이 접근하는 요각 방향으로 생각하는 방법인데, 본 논문에서는 편의상 “ $p_0$  최대방향 널링법”이라고 부르기로 한다. 그러나, Fig. 2에 나타낸 압력계수선도들에서 알 수 있듯이, 피치각  $\beta$ 가 증가함에 따라, 유동의 접근 방향인 요각  $\alpha=0^\circ$ 에서의  $p_0$  압력값은 감소하고,  $\alpha=\pm 180^\circ$ 에서의  $p_0$  압력값은 증가하여,  $|\beta|>50^\circ$ 일 때는 최대  $p_0$ 값이  $\alpha=\pm 180^\circ$  부근에서 생긴다. 이것은 유동방향을 대략이나마 알지 못하는 유동장에서 5공프로브의  $p_0$  최대방향 널링방법으로 유동장 측정을 시도할 때, 유동의 피치각이  $|\beta|>50^\circ$ 인 경우라면 5공프로브는 유동방향을 반대방향을 유동방향이라고 지시하고 잘못된 유동성분을 산출한다는 것을 의미한다.

유동방향을 대충이라도 알지 못하는 유동장에서 기존의 널링방법들을 적용할 때 생길 수 있는 이러한 문제점을 개선하고 확실한 널링방법을 개발하기 위하여 Fig. 2의 압력계수선도를 검토하였다. Fig. 2에 의하면  $p_0$ 의 값이 최대가 되는 요각 방향을 찾는 대신에, 요각을 회전시키면서 피치방향의 세 압력  $p_0, p_3, p_4$  중 최대값이 최대가 되는 방향을 찾으면, 그 방향이 피치각  $\beta$ 에 관계없이 유동이 접근하는 요각방향이 됨을 알 수 있다.

실제 측정에서는 프로브를 일정한 요각 간격으로 회전시키면서 압력들을 측정하게 되는데, 이 요각 간격이 클수록 한 측정점에서의 압력스캔의 수를 줄일 수 있다. 각 압력구멍에서의 압력측정시간과 압력스캔 도중 압력이 안정되기를 기다리는 대기시간을 고려하면, 전체 실험시간은 압력스캔의 수에 비례하므로, 이 요각 간격은 유동방향을 제대로 찾을 수 있는 한에서는 큰 것이 바람직하다. Fig. 2에서 피치각  $\beta$ 에 관계없이  $|\alpha|<35^\circ$ 에서의 피치방향 세 압력  $p_0, p_3, p_4$  중 최대값은 다른 모든 요각에서보다 크므로, 프로브를  $70^\circ$  이내의 요각단위

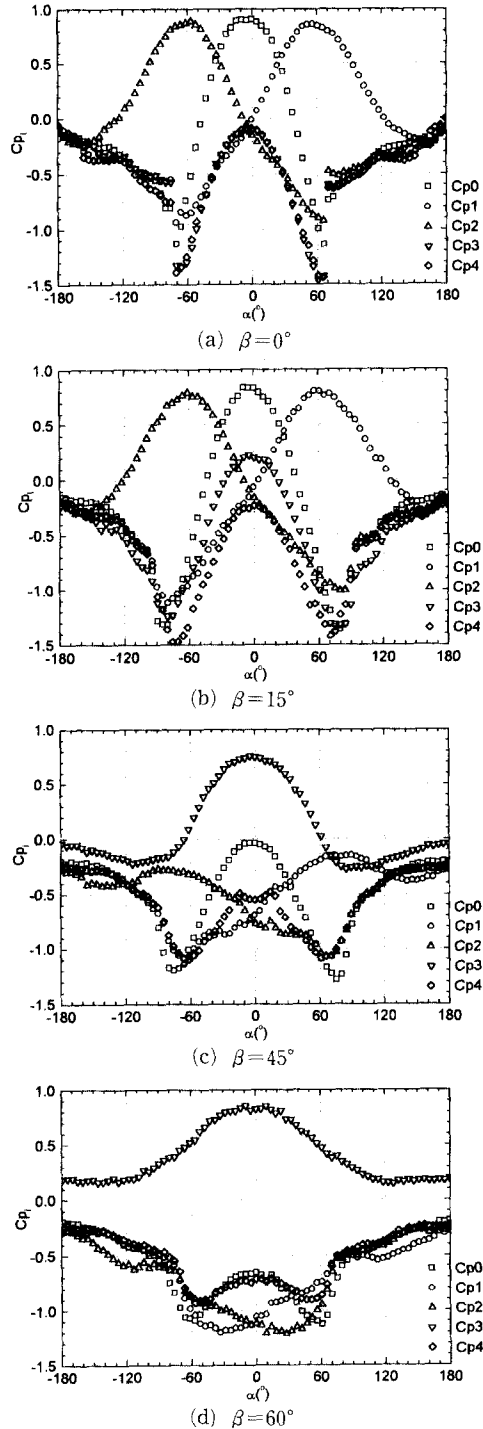


Fig. 2 Variation of pressure coefficients with flow angles

로 회전시키면서 측정된  $p_0, p_3, p_4$  중 최대값의

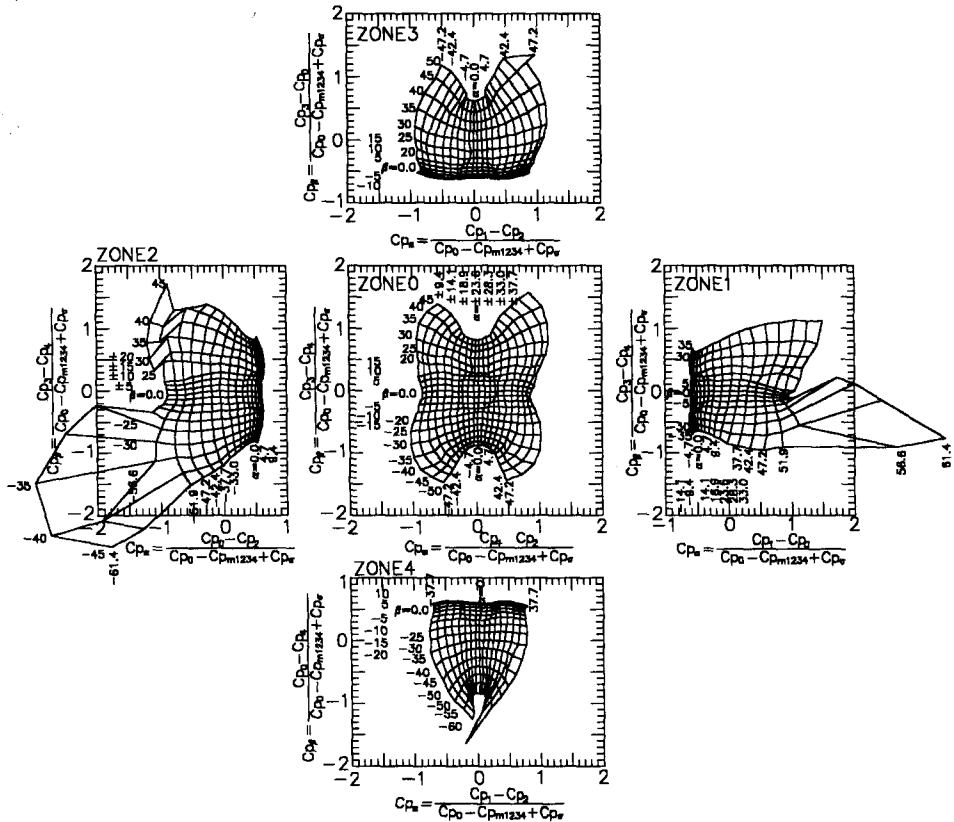


Fig. 3 Non-nulling calibration network

최대방향을 찾으면, 프로브는 유동방향에서 요각  $\pm 35^\circ$  이내에 위치한다.  $70^\circ$ 는  $360^\circ$ 를 균일하게 나누지 못하므로,  $70^\circ$ 보다 작은 각 중  $360^\circ$ 를 균일하게 나누는  $60^\circ$ 가 위의 일정한 요각 간격으로 바람직하다.

즉, 프로브를 요각  $60^\circ$  단위로 회전시키면서 6개의 요각 위치에서 피치방향의 세 압력 중 최대값이 최대가 되는 요각방향을 찾으면, 유동방향에서 요각  $\pm 30^\circ$  이내의 영역이 찾아짐을 알 수 있다. 본 논문에서는 이 방법을 편의상 "피치방향 세 압력 중 최대값의 최대방향 널링법"이라고 부르기로 한다. 피치방향 세 압력 중 최대값의 최대 방향을 찾음으로써 구해진 요각 방향은  $|\alpha| < 30^\circ$ 로, 전통적인 보정계수로 측정가능한 요각범위인  $|\alpha| < 35^\circ$ 를 만족하므로, 전통적인 보정계수에 의한 보정그물망이나 Fig. 3에 나타낸 김진권과 강신형<sup>(2)</sup>의 새로운 보정계수에 의한 보정그물망에 의한 널링 계산으로, 유동성분의 측정이 가능하다.

그러나, 피치방향 세 압력 중 최대값의 최대방향

널링법은 다음과 같은 두 가지의 단점이 있다. 첫째, 유동이 아래에서 설명되는 피치방향의 측정가능 한계를 벗어나서 오는 경우, 유동방향으로 널링은 가능하지만, 유동이 측정가능 영역 내부의 것인지, 외부의 것인지를 구별하지 못하므로 잘못된 유동성분을 계산해 낸다. 피치각계수의 분자로 사용되는  $Cp_3 - Cp_4$ 의 압력계수지도를 나타낸 Fig. 1(b)를 검토하면, 유동방향인  $\alpha \approx 0^\circ$ 에서 피치각과 압력계수  $Cp_3 - Cp_4$ 가 일대일 대응이 되는 한계는 약  $-55^\circ$ 에서  $+60^\circ$  정도까지임을 알 수 있다. 영역분할방법의 영역 3의 피치각계수의 분자로 사용되는  $Cp_3 - Cp_0$ 의 압력계수지도는 김진권과 강신형<sup>(2)</sup>의 Fig. 6(e)에 나타나 있는데, 피치각과  $Cp_3 - Cp_0$ 의 일대일 대응 영역은  $-15^\circ$ 에서  $+70^\circ$  정도까지로, 일대일 대응의 범위를 양의 피치각 방향으로 조금 확장했고, 영역분할방법의 영역 4의 피치각계수의 분자인  $Cp_4 - Cp_0$ 도 마찬가지로 음의 피치각 방향으로 조금 확장했지만, 일대일 대응이 되지 않아서 유동각을 구할 수 없는 영역이 존재한다. 이

는 대부분의 5공프로브가 가지는 문제점이며, 피치 방향의 일대일 대응범위를 넓히도록 5공프로브를 제작하거나 피치방향으로의 널링을 시도하지 않는 한 피할 수 없는 근본적인 한계이다. 유동이 이러한 피치방향의 측정가능 범위를 벗어나서 오는 경우에, 피치방향 세 압력 중 최대값의 최대방향 널링법은 프로브를 유동벡터의 자오면 쪽으로 지향시킬 수는 있지만, 유동이 피치방향의 측정가능 영역 외부의 것임을 구별할 수 없기 때문에 측정가능 영역내부의 보정그물망에 의해서 유동성분을 계산하므로, 잘못된 유동성분을 계산해낸다.

둘째, 피치방향 세 압력 중 최대값의 최대방향 널링법은 유동이 어느 방향에서 오더라도 5공프로브를 요각이  $\pm 30^\circ$  이내의 범위에 위치시킬 수 있지만, 한 지점에서의 널링을 위하여 피치방향의 세 압력  $p_0, p_3, p_4$ 를 항상 6개 이상의 요각 위치에서 측정해야 되기 때문에, 전체 실험시간이 길어져서 비효율적이다.

위의 두 가지 단점 중에서, 피치방향의 측정가능 범위를 벗어난 유동을 구별하지 못하고 잘못된 유동성분을 계산해 내는 점은, 유동방향을 대략적으로라도 알 수 없는 복잡한 유동장에서 사용될 때, 전체 측정값들을 신뢰할 수 없게 만든다. 따라서, 입사유동이 측정가능 영역내부인지 아닌지를 판단하는 것은 널링 측정법에 있어서 아주 중요한 사항이다. 또, 프로그램화될 수 있는 판단과정과 알고리즘에 의해서 널링에 필요한 압력스캔의 횟수를 줄일 수 있다면, 판단과정은 최근의 빠른 PC CPU에 의해서 순간적으로 행해질 수 있으므로, 압력스캔의 수를 줄이는 만큼 전체 측정시간을 단축시킬 수 있게 된다.

### 3. 압력비교에 의한 영역결정법과 보정영역의 판별

유동방향을 대충이라도 알기 어려운 복잡한 유동장에서도 신뢰할 수 있고, 압력스캔의 수와 측정시간을 줄일 수 있는 효율적인 널링 알고리즘을 개발하기 위해서는, 한 요각 방향에서 측정된 5공프로브의 5개 압력들로부터 유동방향이 대체로 보정영역 내부인지 아닌지를 파악하는 것이 필요하다. 이를 위하여 5개의 측정압력들의 상호관계에 의하여 전체의 유동각도 범위를 6개의 영역으로 나누는 "압력비교에 의한 영역결정법"을 고안하였다.

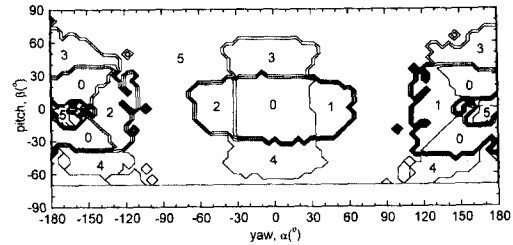


Fig. 4 Zone map by pressure ordering

압력비교에 의한 영역결정법에서 영역 0은 5공프로브의 5개 측정압력들 중에서  $p_0$ 이 최대인 영역으로 정의되었고, 영역 1, 2, 3, 4는 각각  $p_1, p_2, p_3, p_4$ 가 최대이고  $p_0$ 이 두 번째인 영역으로, 영역 5는 나머지 영역으로 정의되었다. 이러한 압력비교에 의한 영역결정법은 전 유동각도 범위를 Fig. 4에서와 같이, Fig. 3에 나타난 영역분할 널링 측정법의 영역 0, 1, 2, 3, 4와 영역분할 널링 보정영역을 벗어나는 영역을 근사적으로 구분할 수 있게 한다. 압력비교에 의한 영역결정법의 영역 0, 1, 2, 3, 4와 Fig. 3에 나타난 영역분할 널링 측정법의 영역 0, 1, 2, 3, 4는 정확하게 일치하지는 않는데, 압력비교에 의한 영역결정에서 영역 0, 1, 2, 3, 4로 구분된 영역 중 Fig. 3의 보정그물망을 벗어나서, 그물망에서의 이중보간에 실패하는 영역은 영역 -5로 정의한다. Fig. 4의  $\alpha = \pm 180^\circ$  부근의 후류영역에는 Fig. 3의 널링 보정영역을 벗어나지만 압력비교에 의한 영역결정법의 영역 0, 1, 2, 3, 4로 표시되는 거짓 보정영역이 나타난다. 압력비교에 의한 영역결정법이 유동방향을 대충이나마 알기 어려운 실제 유동장에서 사용되기 위해서는 후류지역의 거짓 보정영역을 영역 5로 판별할 수 있어야 한다.

거짓 보정영역을 영역 5로 판별하기 위한 첫 번째 시도로서, 5공프로브가 후류영역을 지향하는지 아닌지를 구별해주는 후류영역 검사함수를, 측정된 5개의 압력 중 차가 가장 작은 두 압력차와 차가 가장 큰 두 압력 차의 비로 정의하였다. 이는 Fig. 2의 압력계수선도에서 후류영역에서는 모든 압력이 거의 같은 값을 가지기 때문에 이 후류영역 검사함수의 비가 크고, 보정영역에서는 그 비가 작을 것이라는 가정에서 착상되었다. 후류영역 검사함수의 등함수값 지도를 Fig. 5(a)에 나타내었는데, 보정영역 내의 모든 점들의 후류영역 검사함수값이 0.21보다 작은 것으로 나타나, 0.21보다 큰 값을 가지는 영역은 다시 영역5에 포함시켰는데, 이 때

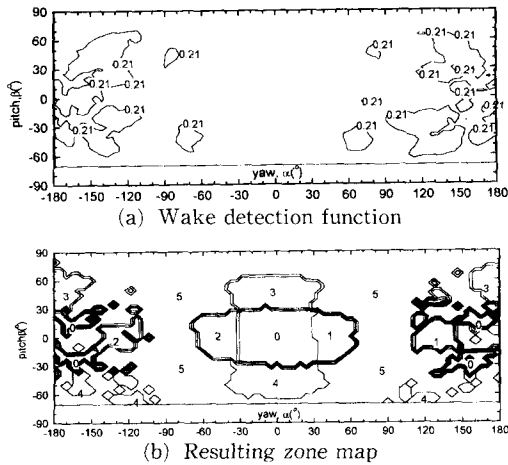


Fig. 5 Wake detection function and new zone map

의 영역구분 지도를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 이 후류영역 검사함수에 의해서 후류영역의 반 정도를 영역 5로 분류할 수 있었으나, 여전히 후류영역에 영역 0, 1, 2, 3, 4의 거짓 보정영역이 존재하여 완전한 해결책은 되지 못하였다.

거짓 보정영역을 영역 5로 판별하기 위한 두 번째 시도로서 후류영역의 압력은 불안정하여 거짓 보정영역의 압력 측정값들이 유동각도의 예측에 사용되면 재현성이 떨어질 것이라는 점을 가정하였다. 다양한 후류영역의 각도에 대한 검증실험을 통하여 이 개념을 검증한 결과, 넓은 각도범위에서 이 가정이 옳았지만, 몇 부분에서는 상당한 정확도로 보정계수값을 제한했다. 예를들면  $\alpha=135^\circ$ ,  $\beta=-22.5^\circ$ 에서는 5공프로브가 마치 유동 입사방향을 향하고 있는 것처럼  $\rho_1 \approx \rho_2$ 의 상태로 안정된 압력을 나타내었다. 따라서 후류영역에서는 압력이 불안정하여 보정계수를 계산했을 때 재현성이 없을 것이라는 가정은 충분히 옳지는 않아서, 이에 의한 알고리즘은 오류의 가능성을 포함하고 있다.

이상의 검토를 통해서 한 요각 방향에서의 압력 측정 만으로는 그 요각 방향이 보정영역 내부인지 아닌지를 판별할 수 없다는 결론을 내렸다. 이러한 관점에서 Fig. 4의 영역결정 지도를 검토한 결과 참 보정영역과 거짓 보정영역 사이의 상이한 특징을 발견하였는데, 참 보정영역에서는 영역 0의 오른쪽에 영역 1이 있고 왼쪽에 영역 2가 있는데 반하여, 거짓 보정영역에서는 그 반대라는 것이다. 이것은 Fig. 2의 압력계수선도에서  $C_{p1}$ 은 요각이 양수일 때는 양수이고 음수일 때는 음수인 반면에,

$C_{p2}$ 는 그 반대라는 점으로부터도 설명이 가능하다. 따라서 5공프로브를  $\rho_1 = \rho_2$ 인 위치로부터, 요각을 예를들어  $-30^\circ$  회전하면 참 보정영역에서는 유동이 요각  $+30^\circ$ 에서 오는 것으로 판단하여 5공프로브를 널링된 위치로 되돌리는 반면에, 거짓 보정영역에서는 더 멀리 보낸다. 이 성질을 편의상 “ $-30^\circ$  회전상태에서의 복원경향”이라고 부르기로 한다.

#### 4. 압력비교에 의한 영역결정법을 이용한 널링 알고리즘

압력비교에 의한 영역결정법과  $-30^\circ$  회전상태에서의 복원경향 검사를 이용하여, Fig. 6에 나타난 신뢰성있고 효율적인 널링 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘에서는 분모가 항상 일정 크기 이상의 양수인 김진권과 강신형<sup>(2)</sup>의 식 (12)와 (13)에 제안된 새로운 보정계수를 사용하는데, 김진권과 강신형<sup>(2)</sup>의 식 (4)와 (5)에 나타난 기존의 보정계수는 분모가 0을 거치면서 부호를 바꾸기 때문에 몇 가지 문제점이 있다. 즉, Fig. 6의 널링 알고리즘에는 초기 위치에서 널링 방법으로 측정된 후, 계산된 요각만큼 회전하여 다시 측정하고 그 위치를 확인함으로써 널링 보정영역 내부인지를 점검하는 부분이 있다. 그런데, 기존의 보정계수의 분모가 0에 가까운 유동각에서는 보정계수를 계산할 때, 0으로 나누어지는 에러가 발생하여 프로그램이 중단되거나 발산하여 NAN(Not A Number) 값을 낼 수 있다. 또, 요각계수의 분자  $\rho_1 - \rho_2$ 가 대부분의 경우에 요각과 같은 부호를 가지기 때문에, 분모가 항상 양수인 새로운 요각계수는 요각이 양수이면 대부분의 경우에 양수이고, 요각이 음수이면 대부분의 경우에 음수이므로, 요각계수에 의해서 결정되는 요각은 일관성 있게 유동방향을 제대로 나타낸다. 그러나, 기존의 보정계수는 분모가 부호를 바꾸기 때문에, 요각이 양수인 경우에도 요각계수에 의해서 구해지는 측정요각은 위치에 따라 유동방향과 반대방향을 나타내기도 하므로, 프로브가 유동방향을 찾아갈 때 더 많은 중간단계를 거치게 될 것이다. 새로운 보정계수가 더 넓은 널링 보정영역을 가지고, 기존의 보정계수를 사용한 영역분할법의 결함을 보완함으로써 실질적으로 영역분할법을 적용할 수 있기 때문에, 널링시키는 중간단계가 줄어드는 것은 물론이다.

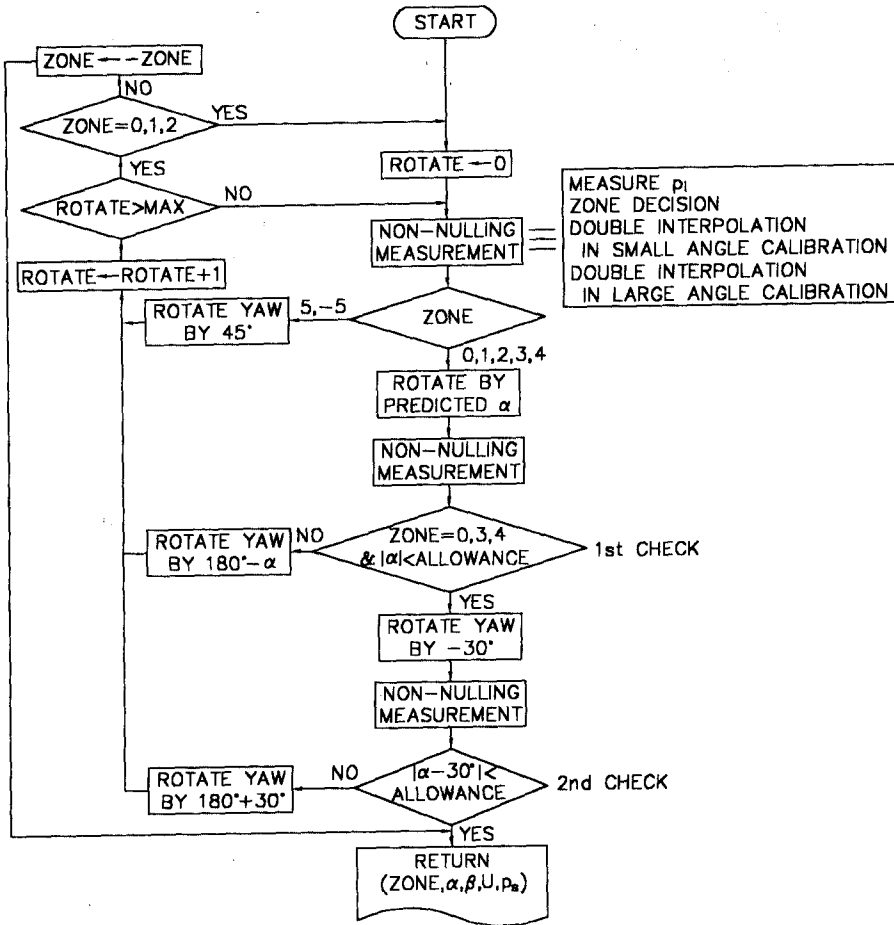


Fig. 6 Flow chart of new nulling algorithm

Fig. 6의 첫 번째 조건검사 마름모는 영역 5나 -5의 경우를 배제시킨다. 즉 초기위치에서 측정된 5공프로브 압력들의 비교에 의한 영역결정에서 영역 5로 결정되거나, 영역 0, 1, 2, 3, 4로 결정되었다도 널링 계산에서 이중보간에 실패하여 영역 -5로 결정되면, Fig. 6의 첫번째 조건검사 마름모를 만족시키지 못하므로 5공프로브를 요각 방향으로 +45° 회전시키는 과정을 반복함으로써 영역 5를 벗어난다. 참 보정영역 중 요각방향의 폭이 가장 좁은 곳이  $\beta=30^\circ$  부근에서 요각 폭 50° 정도이므로, +45° 이상의 회전은 보정영역을 건너뛰고 넘어갈 우려가 있다. 유동상태에 따라 +45°와 -45° 회전을 선택할 수도 있으나, 이는 각각의 영역이 불규칙하게 분포한 거짓 보정영역 내부에서 진동할 가능성이 있으므로 채택하지 않았다.

첫번째 마름모에서 영역 0, 1, 2, 3, 4이면, Fig. 3의 보정그물망에서 널링 계산법에 의해 유동각을 계산하고, 여기서 구해진 요각만큼 5공프로브를 회전시킨 뒤, 다시 5공프로브의 압력을 측정함으로써 두 번째 조건검사 마름모에서 널링상태 검사를 한다. 두번째 마름모에서 널링상태 조건을 만족하면, 5공프로브를 -30° 회전시켜서 +30° 상태를 검사함으로써, 5공프로브가 참 보정영역에 있는지 거짓 보정영역에 있는지를 확인한다. 널링상태 조건이나 +30° 상태 조건을 만족시키지 못하면, 5공프로브는 후류의 거짓 보정영역에 있다는 의미이므로, 180° 회전에 의해서 한 번에 거짓보정영역을 벗어난다.

미리 정해진 일정 횟수 MAX 이상 5공프로브가 회전하게 되면, 유동이 Fig. 1(b)의 설명에서 언급

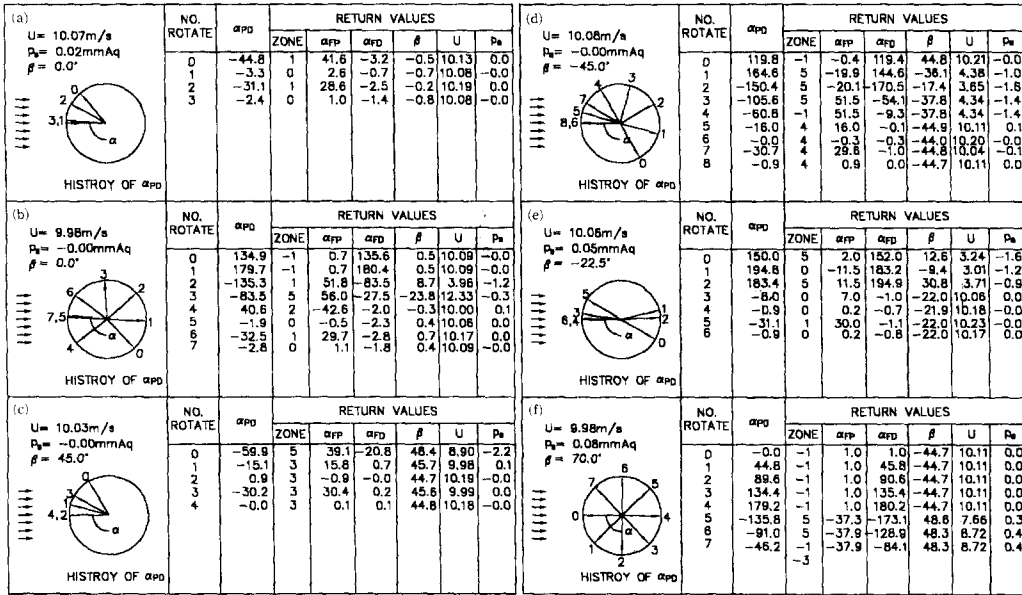


Fig. 7 Verification of new nulling algorithm

한 5공프로브의 피치방향 측정가능 한계 밖에서 오는 것이므로 측정불가를 판정하고, 최대 압력이  $p_3$  인지  $p_4$ 인지에 따라 영역을 -3 또는 -4로 결정한다. 이 경우에는 넛널링 계산에서 구해지는 유동성분은 전부 믿을 수 없는 값이 되는데, 굳이 유동의 요각 만이라도 필요하다면 피치방향 세 압력 중 최대값의 최대방향 널링법에 의하여 요각은 구할 수 있겠지만 피치각, 속도성분, 정압은 알 수 없다. 유동이 피치방향의 측정가능 한계를 벗어나서 오는 경우에, 다른 널링법들은 잘못된 유동성분을 제시하여, 유동방향을 대략이나마 알기 어려운 복잡한 유동장에서는 측정가능 한계 내의 유동값 조차도 신뢰성을 잃는 반면에, 압력비교에 의한 영역결정법을 이용한 널링법은 결정된 영역에 의해서 피치방향의 측정한계를 벗어난지를 판단하기 때문에, 산출된 유동성분을 신뢰할 수 있다는 장점이 있다.

5공프로브가 영역 5에 포함되었을 때  $+45^\circ$ 씩 회전하게 되므로 최대 허용 회전횟수 MAX는 8이 선택되었고, 5공프로브가 후류의 거트 보정영역에 포함되면  $180^\circ$  회전하여 참 보정영역으로의 진입을 가속하므로 이 수는 충분하다. 그리고 김진권과 강신형<sup>(2)</sup>의 넛널링측정법의 오차 확인 실험에서 최대 각도 오차는  $2.12^\circ$  이내였는데, 안전을 위하여 Fig. 6에 나타난 알고리즘의 상수 ALLOWANCE

는  $5.0^\circ$ 가 사용되었다. 그리고 정확도를 높이고 만일의 경우에 대비하기 위하여, 널링된 상태에서 최종적으로 한번 더 측정, 계산한 다음, 측정값 및 계산값들을 리턴한다.

이 알고리즘은 다양한 유동방향에 대하여 시험되어 성공적으로 검증되었고, 대표적인 몇가지 경우의 검증과정을 Fig. 7에 나타내었다. 각 경우에 원과 함께 나타낸 유동속도  $U$ 와 정압  $p_s$ 는 피토크에 의한 측정결과이고,  $\beta$ 는 피치각 설정값으로 널링 알고리즘이 최종적으로 산출해야 하는 값들이다.  $\alpha_{PD}$ 는 수평 기준에 대한 5공프로브의 요각을 나타내고,  $\alpha_{FP}$ 는 5공프로브에 대한 유동의 요각을,  $\alpha_{FD}$ 는 기준에 대한 유동의 요각을 나타내므로  $\alpha_{FD} = \alpha_{FP} + \alpha_{PD}$ 의 관계를 가지는데, 최종적으로  $\alpha_{FD}$ 는 0이 되어야 정확한 예측이 된다. 알고리즘의 각 단계 마다의 계산값들이 주어졌는데, 도중에 영역 5나 -5가 되는 경우에서 보정영역을 벗어난 5공프로브의 넛널링 측정이 유동각, 속도, 정압에서 얼마나 다른 값을 산출하는지를 알 수 있다.

유동이 넛널링 보정영역 내부에 있는 경우에는 Fig. 7(a)에 보인 바와 같이, 최종의 정확도 향상을 위한 측정을 제외하면 세 번의 압력스캔으로 유동장을 정확히 예측하는데, 이는 피치방향 세 압력 중 최대값의 최대방향을 찾는 방법에서 요구되는 압력스캔 수인 6번의 반으로 그만큼 실험시간을 단



측할 수 있다. 유동이 년널링 보정영역 밖에 있는 경우에도 Fig. 7(b)~(e)에 보인 바와 같이, 상황에 따라서 4에서 8번의 압력스캔이 필요한데, 피치 방향의 세 압력 중 최대값의 최대방향을 찾는 방법의 6번에 비하여 평균적으로 불리하지 않다. 보통 유동장의 측정에서 한 점에서의 측정 후 바로 인접한 점으로 5공프로브를 이동시켜가면서 측정하는 경우가 대부분이므로, 한 지점에서 유동방향을 찾으면 그 다음 지점은 대체로 보정영역 내부에 들어 오게 된다. 이후에는 3번의 압력스캔으로 유동방향을 찾아서 다시 5공프로브를 이 방향으로 회전시키게 되므로, 압력비교에 의한 영역결정법을 이용한 널링법은 요방향의 널링을 위하여 매번 6번 압력스캔을 해야 하는 피치방향의 세 압력 중 최대값의 최대방향 널링법에 비해서 거의 반 정도의 시간이 절약된다.

압력비교에 의한 영역결정법은, 이를 이용한 널링법에 사용되어 유동방향을 대충이나마 알기 어려운 복잡한 유동장에서도 위와 같이 신뢰성 있고 빠른 널링 측정을 가능하게 한다는 장점외에도, 역류의 가능성은 없더라도 유동방향의 변화가 커서, 유동이 년널링 보정영역을 벗어나는지가 의심스러운 유동장의 년널링 측정에 있어서도 유용한데, 측정된 유동이 계측값을 신뢰할 수 있는 영역 0, 1, 2, 3, 4에 포함되는지, 계측값에 문제가 있을 수 있는 영역 5에 포함되는지를 판별해 주기 때문이다.

## 5. 결 론

5공프로브 전 각도 범위 압력계수지도를 검토함으로써, 흔히 사용되는 두 가지 널링방법인 " $\beta_1 = \beta_2$  방향 널링법"이나 " $\beta_0$  최대방향 널링법"을 유동방향을 대충이라도 알기 어려운 복잡한 유동장에서 사용할 경우, 프로브가 유동방향을 잘못 지시할 수 있음을 확인하였다. 전 각도 범위 압력계수 지도를 바탕으로, 이러한 복잡한 유동장에서 항상 유동벡터를 포함하는 자오면 방향으로 프로브를 지향할 수 있는 "피치방향 세 압력 중 최대값의 최대방향 널링법"을 제안하였다. 이 방법은 복잡한

유동장에서도 확실한 널링방법이긴 하지만, 피치방향의 측정가능 한계를 벗어나는 유동의 경우에는 잘못된 유동성분을 산출하는 문제점과 한 위치에서의 유동성분 측정을 위하여 항상 6개 이상의 요각 위치에서 압력측정을 해야 하는 비효율성이 있다. 이러한 문제점과 비효율성을 극복하기 위하여 "압력비교에 의한 영역결정법"을 고안하였고, 발산하지 않는 새로운 보정계수와 압력비교에 의한 영역결정법을 이용하여, 신뢰성있고 효율적인 널링 알고리즘을 개발하였다. "압력비교에 의한 영역결정법을 이용한 널링알고리즘"은 5공프로브의 피치방향 측정가능 한계 이내의 모든 방향에서 유입되는 유동성분을 효율적으로 측정할 수 있고, 피치방향 측정가능 한계 밖에서 유입되는 유동인 경우에도 잘못된 유동성분을 산출하지 않고, 측정가능 한계를 벗어났음을 제시함으로써 측정된 유동성분을 신뢰할 수 있게 한다. 압력비교에 의한 영역결정법은 보정유동각을 벗어날 염려가 있는 년널링계측에서 계측값의 유효성을 가리는데도 유용하게 사용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 삼성전자(주)의 산학협동연구과제와 터보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었다. 이에 관계자 여러분에게 깊이 감사한다.

## 참고문헌

- (1) Eckerle, W. A. and Langston, L. S., 1987, "Horseshoe Vortex Formation Around a Cylinder," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 278~285.
- (2) 김진권, 강신형, 1997, "5공프로브의 전각도 범위 압력계수 지도와 새로운 보정계수," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제11호, pp. 1437~1448.
- (3) 강신형, 김진권, 이승배, 1996, "뒷판이 있는 소형 프로펠러 팬의 성능 및 유동특성," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 4호, pp. 1491~1500.