

3차원 유동내에서 다양한 유동가시화 기술의 응용

정진택

Application of Various Flow Visualization Techniques on Complicated Three-Dimensional Flows

Jin-Taek Chung



●정진택 (고려대 기계공학과)
●1960년생.
●가스터빈 내에서의 유동측정을 전공했으며, 가스터빈 관련 유동 및 열전달해석에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

가 스 터빈내 블레이드 사이의 통로내에서 허브에 가까운 영역은 복잡한 3차원 유동의 특성상 다양하고 특이한 유동요소들을 포함하고 있어서 그 해석이 무척 어려운 것으로 알려져 있다. 대부분의 3차원 유동은 복잡한 와동(vortex)과 압력구배에 의한 경계층의 박리(separation) 또는 말림(rolling), 그리고 재부착(reattachment) 현상들을 포함한다. 정량적인 수치를 측정하기 이전에 이러한 3차원 영역내에서 유동을 정성적으로 바르게 관찰하고 해석하는 것은, 보다 정확하고 신뢰성 있는 실험치를 얻기 위해서 꼭 필요한 과정이라 할 수 있겠다. 복잡한 유동을 가시화하는 많은 기법들은 유체역학의 여러가지 현상들에 대한 우리들의 이해를 돕는데 커다란 역할을 해오고 있으며, 실제로 유동가시화는 이미 알려진 물리적 현상들을 확인하거나 또는 많은 새로운 유동 현상들을 발견하는데 널리 사용되어 왔

다.

유동 가시화 기법을 이용해서 관찰 또는 측정할 수 있는 정보에는 다음과 같은 것들이 있다.⁽¹⁾

- ① 유동의 방향을 보여주는 유맥선(streak line), 궤적선(path line) 또는 유선(streamline)
- ② 유속이나 그 구배 또는 가속도의 분포
- ③ 와동(vortex)의 생성이나 소멸, 층류에서 난류로의 천이현상, 유동박리(separation)나 재부착(reattachment)
- ④ 유체의 밀도나 온도분포

이러한 정성적인 해석을 목적으로 사용되는 유동의 가시화 기법은 너무도 다양하고 범위가 넓어서 그 종류만을 나열하는 것도 거의 불가능한 형편이다. 따라서 이 글에서는 저자가 가스터빈 케이스케이드 내의 끝벽(endwall)부근에서 관찰되는 3차원 유동 해석에 사용한 여러가지 유동가시화 기법들을 소개하고 그 응용의 몇 가지 예를 보이는 것을 목적으로 한다.

유동가시화 기법은 그 원리에 따라 크게

네 가지로 분리될 수 있다.⁽¹⁾ 첫째는 벽면 또는 그 근처에서의 유동을 주로 관찰하는 벽면 추적 방법(wall tracing method)으로서 이글에서는 oil and lampblack 기법과 ink dot 기법이 소개된다. 둘째는 벽면 근처나 자유유동장 내에서 유동의 국소방향을 가시화하기 위한 털실 방법(tuft method)인데 그 중에서 와동의 위치와 크기를 가시화하는데 사용한 털실 격자망(tuft grid)를 소개한다. 세번째 분류는 입자 추적 방법(tracer method)으로서 가장 대표적인 가시화 방법 중의 하나다. 이는 작은 입자나 색깔이 있는 염료를 유체에 첨가시켜 유동을 추적하는 방법인데, 주로 많이 사용하는 연기 입자 등은 복잡한 3차원 유동 내를 통과하면서 쉽게 확산되므로 터빈 내의 유동과 같이 속도가 빠른 곳에서는 사용하기가 어렵다.⁽²⁾ 마지막으로 유체의 밀도의 변화에 따른 광학현상을 이용하는 광학적 방법(optical method)이 있다.

2. 유동가시화 기술의 종류

2.1 벽면 전단응력분포

벽면 추적 방법(Wall tracing method)은 유동장 내에 놓여 있는 물체 표면에서의 유동현상을 관찰함으로써 그 벽면 근처에서의 복잡한 유동특성을 가시화하는 기법이다. 이때 표면에서의 유동현상은 바로 표면전단응력에 의해서 영향을 받게 되므로 이러한 벽면 추적 방법은 그 표면에서의 전단응력분포를 나타낸다. 이글에서는 기름과 검정 분말의 혼합액을 사용하는 oil and lampblack 기법과, 기름과 유성잉크를 사용하는 ink dot 기법, 그리고 가는 털실을 이용하여 전단응력의 방향을 추적하는 털실 프로브(single tuft probe)를 소개한다.

(1) Oil and Lampblack 기법

3차원 유동 영역의 벽면에서의 표면전단응력 분포를 가시화하는 가장 보편적인 방법에는 oil and lampblack 기법이 있다. 이 방법

은 어느 정도의 점도를 가진 기름(예를 들어 기계기름)과 미세한 검정 분말의 혼합물을 관심이 있는 표면에 칠하고 그 분말이 유동에 의해서 생기는 표면 전단응력을 따라 움직인 궤적을 관찰함으로써 복잡한 유동을 가시화할 수 있다. 먼저 관찰할 영역을 선정하고 그곳에 한쪽면에 접착성이 있는 하얀 종이(contact paper)를 부착한 뒤 그 표면에 위에서 언급한 혼합액을 부드러운 붓을 사용하여 균일하게 칠한다. 이 표면이 유동에 접하게 되면 이 혼합액은 벽면 가까이의 유동에 의해서 움직이게 되고, 결국 검정 분말의 거동은 국부적인 전단응력의 방향을 나타내며 전체적으로는 복잡한 3차원 유동에 의한 와동의 거동 자취, 박리현상 등을 쉽게 보여준다. 그림 1과 그림 2는 이렇게 얻은 결과를 사진으로 찍은 것들이다. 여기서 검은 부분은 검정 분말이 어느 방향으로든 쉽게

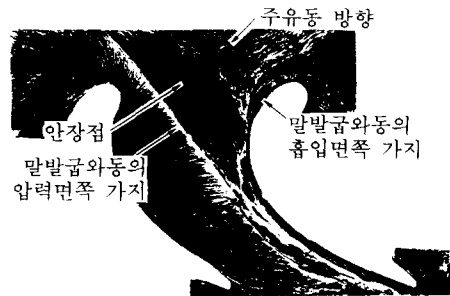


그림 1 케스케이드 유로내 끝면에서의 벽면전단응력분포 (Oil and Lampblack 기법)

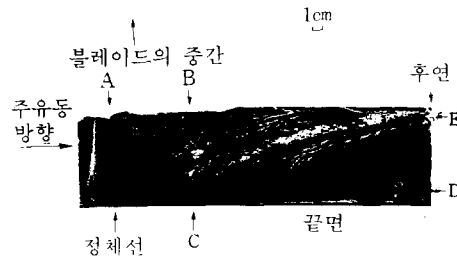


그림 2 3차원 유동 영역내 흡입면상에서의 벽면전단응력분포 (Oil and Lampblack 기법)

움직이지 못하고 정체되어 있는 곳이며, 국소표면전단응력의 크기가 작은 곳을 의미한다. 반면 상대적으로 하얗게 나타난 부분은 와동(vortex)운동 등 큰 전단응력에 의해서 검정분말(실제적으로는 기름 혼합액)이 하류(downstream)로 씻겨 내려간 영역을 나타낸다.

이 기법을 적용하는데 가장 중요한 것은 예상할 수 있는 것처럼, 자유유동의 세기 또는 그 특성에 적합한, 적절한 점도를 가진 기름의 선택과 이 기름과 검정 분말의 혼합비이다. 예를 들면, 그림 1과 같이 이 기법을 적용하는 면이 수평면일 경우에는 점도가 낮은 기름을 사용하여도 되지만, 그림 2와 같이 수직면에 적용할 경우에는 점도가 상대적으로 높은 기름을 사용함으로써 가능하면 중력의 영향을 최소화하여야 한다. 고려해야 할 또 다른 요인은 유속의 세기다. 즉, 매우 빠른 속도를 가진 유동장에 낮은 점도의 기름을 사용하면 검정 분말이 미처 국소응력 분포를 그리기 전에 하류방향으로 휩쓸려 가게 되어 원하는 결과를 얻을 수가 없어진다. 마지막으로 하나의 결과를 얻기 위해서 유동에 접하는 시간(running time)도 유동의 상황에 따라 결정되어야 하는 요소다.

이상 살펴본 바와 같이, 이 기법도 다른 대부분의 유동가시화 방법과 마찬가지로 많은 시행착오를 거쳐야 하지만 만족스러운 결과를 얻을 수가 있다. 그러나 비슷한 유동에 대해 반복적으로 시행함으로써 적절한 기름의 종류와 혼합비의 선정에 드는 시간을 단축시킬 수가 있을 것이다. 이 기법은 기름을 사용하기 때문에 그 결과는 결코 마르지 않으며 오래 보관하는데 어려움이 있기 때문에 그림 1과 2처럼 통상 사진을 찍어 보관하게 된다.

(2) Ink-dot-liquid-film(Ink dot) 기법

위에서 설명한 oil and lampblack 기법과 마찬가지로 벽면에서의 전단응력분포를 가시화하는, 하지만 약간 다른 기법에는, Langs-

ton과 Boyle⁽³⁾에 의해서 소개된 ink dot 기법이 있다. 이 기법은 국소전단응력을 나타내는 영구적인 잉크 껍적을 제공하여 준다. 위의 oil and lampblack 기법이 사용자에게 따라 그리고 유동의 특성에 따라 사용하는 기름의 종류, 혼합비 등을 선정해야 하는 반면, 이 기법은 제안자들이 그들의 경험을 바탕으로 사용하는 기름, 종이, 심지어는 유성펜의 종류까지 세세하게 추천을 한 것이 특이하다. 이 기법을 사용하기 위해서는 먼저, 제도용 트레이싱지(drafting film)에 파란색 유성펜(Staedtler Lumocolor 317)으로 일정 간격(1cm 또는 임의로 선정)으로 격자점을 찍고 그 종이를 3차원 유동내의 관심이 있는 표면에 부착한다. 그 위에는 페인트용 스프레이나 미술도구인 미술가용 분무기(artist air brush) 등을 이용하여 wintergreen 기름을 전면적에 대해서 균일하고 얇게 뿌려준다. 이때, 이 공기브러시의 장점은 노즐 출구에 있는 니들 밸브를 이용하여 분사하는 기름 입자의 크기를 조절함으로써 잉크 위에 덮는 기름의 두께를 조절할 수 있다는 것이다. 좋은 결과를 얻기 위해서는 이 분사기의 노즐 크기뿐만 아니라 분사하려는 표면과 분사기와와의 거리를 조절함으로써 분사된 기름층의 두께도 유동의 특성에 맞게 조절되어야만 한다. 곧이어 이 유성잉크는 녹기 시작하여 기름층 내에서 확산하기 시작하게 된다. 이 표면이 유동에 접하게 되면 벽면 근처에서의 전단응력에 의해서 기름층은 움직이기 시작할 것이고, 그 안에서 따라 움직이는 잉크는 각 지점에서의 전단응력 방향을 나타내게 된다. 마침내 wintergreen 기름은 증발하거나 하류방향으로 흘러가게 되고 잉크분말은 영원히 남게 된다. 그림 3과 그림 4는 터빈 케이스케이드 내의 끝면과 흡입면(suction surface)에서의 결과를 나타내고 그림 5는 평판에 수직하게 세워져 있는 실린더와 평판의 연결부분 주위에서 발생하는 말발굽 와동(horseshoe vortex)의 생성을 보여

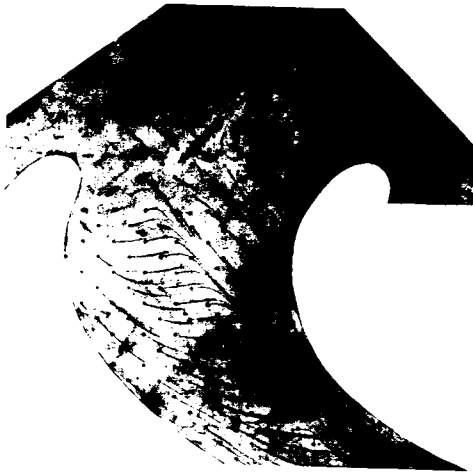


그림 3 케스캐이드 유로내 끝면에서의 벽면전단응력분포(Ink dot 기법)

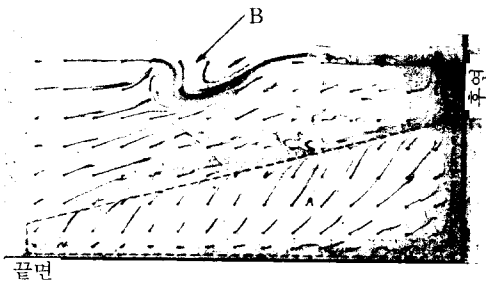


그림 4 3차원 유동 영역내 흡입면상에서의 벽면전단응력분포(Ink dot 기법)

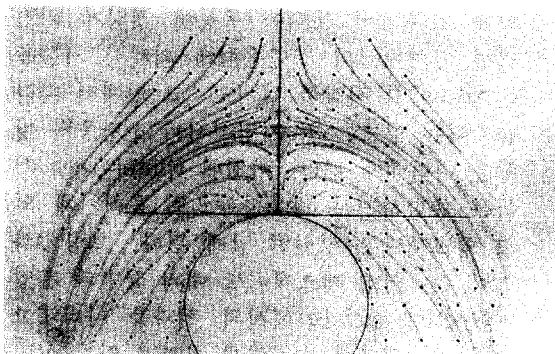


그림 5 평판에 수직하게 세워진 실린더 전면에서의 말발굽 와동의 형성(Ink dot 기법)

주며, 그림 6은 실린더의 반대편 자유끝면에서의 유동을 보여준다.

이 기법의 특징은 위에서 살펴본 oil and lampblack 기법과는 달리 속도가 낮은 영역(예를 들면 그림 1에서 검은색으로 나타난 부분)에서도 국소전단응력 방향을 보여준다는 것이다. 실제로 oil and lampblack 기법에서는 응력이 작은 부분에서는 검정분말이 움직이지 못하고 적체되어 있어서 그 방향을 알 수가 없다. 또 다른 특징은 잉크체적의 근원(일정간격의 격자점)이 분명하게 나타나 있으므로 아무리 복잡한 유동내에서도 벽면전단응력의 방향을 제대로 확인할 수가 있다는 것이다.

(3) 털실 프로브

벽면근처에서의 유동의 형태를 나타내는 또 다른 방법에는 한 개의 털실을 가느다란 철사봉 끝에 연결한 털실 프로브(single tuft probe)⁽⁴⁾를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은, 얻은 결과에 비해서는 너무 많은 시간과 노력이 들어가지만 벽면에 직접 털실들을 부착하여 유동을 관찰하는 기존의 방법에 비해 훨씬 더 사실에 가까운 결과를 보여준다. 그 이유는 기존의, 털실을 벽면에 부착하는 방법은 실끝은 유동을 따라 자유롭게 움직이며 그 방향을 가르키지만, 벽면에 부착된 부분은 접착제 등의 영향 때문에 불가피하게 뻣

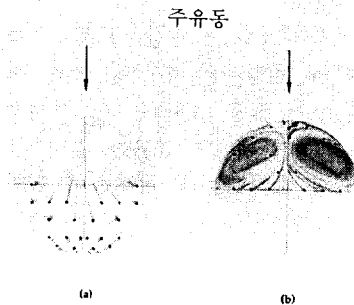


그림 6 평판에 수직하게 세워진 실린더의 자유끝면에 나타난 전단응력분포(Ink dot 기법)

편하여 주유동에 방해가 되고 그로 인해 실제 유동과 다른 결과를 초래하게 된다. 반면 털실 프로브는 그림 7에서 보는 바와 같이 두 개의 가는 고리로 구성되어 있고 그 끝에 연결되어 있는 털실은 유동의 방향에 따라 자유롭게 움직이게 되고, 그 털실의 끝은 이 프로브가 위치해 있는 곳에서의 유동의 방향을 가르키게 된다. 따라서 이 프로브를 와동 안에서 움직이면 그 와동의 회전방향과 세기 등을 관찰할 수가 있다. 또한, 이 프로브가

벽면 가까이 놓이게 되면 그면에서의 벽면 전단응력을 보여주게 된다. 이 프로브를 일정 간격으로 옮겨가면서 각 점에서의 실의 방향, 즉 전단응력의 방향을 다른 종이에 그대로 옮겨 그리게 되면 그 도면이 바로 그 표면의 전단응력분포를 나타내게 된다. 사용자가 주의만 기울이면 실험의 반복성도 다른 기법에 비해서 우수하기 때문에 비록 기법 자체가 참여하지는 않지만 유속이 낮은 지점에서 전단응력의 방향을 비교적 정확하게 추적하는데 사용될 수 있다.

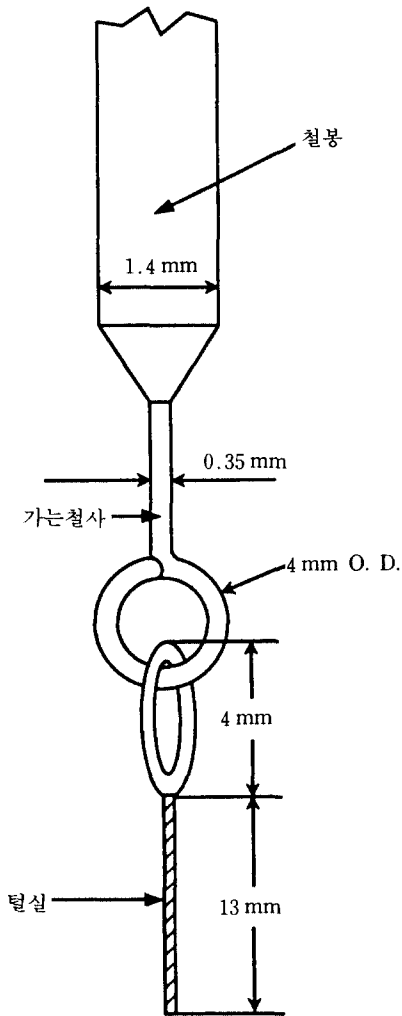


그림 7 털실 프로브 (single tuft probe)

2.2 유동내 와동등의 추적

(1) 털실 격자망

위의 털실 프로브에서 살펴본 바와 같이 가느다란 실은 유동장 내의 임의의 점에서 유동의 방향을 추적하는데 유용하다. 이와 같은 원리를 이용하여 말발굽 와동(horse-shoe vortex), 유로 와동(passage vortex) 등 복잡한 3차원 유동의 요소들을 관찰하는데 사용되는 것이 털실 격자망(tuft grid)이다. 이는 얇은 털실, 가는 나일론줄(낙시줄), 그리고 형틀을 이룰 얇은 철판 등으로 이루어진다. 먼저 관찰하려는 유동장의 형상에 맞춰 얇은 폭의 철판을 접어서 형틀을 만든다. 다음에는 이 형틀에 나일론줄을 연결하기 위한 작은 구멍을 일정 간격으로 뚫고 이구멍들을 통하여 나일론줄을 연결하면 수 치해석시에 볼 수 있는 것과 같은 격자계를 형틀 안에서 이루게 된다. 이때 각 교차점에 가는 철사로 만든 원형 고리를 걸고 그 원주상에 일정 길이의 털실을 접착제를 이용하여 연결한다. 털실을 나일론줄에 직접 연결하지 않고 환고리를 이용하는 것은 위의 털실 프로브의 경우와 같이 실이 각 지점에서의 유동을 자유롭게 따라 가게 하기 위해서다. 이렇게 만들어진 털실 격자망은 3차원 유동에서 흔히 보이는 와동(vortex)의 존재를 확인하거나 또는 확인된 와동의 궤적을 추적하는데 유용하게 사용된다. 그림 8과 그림 9는

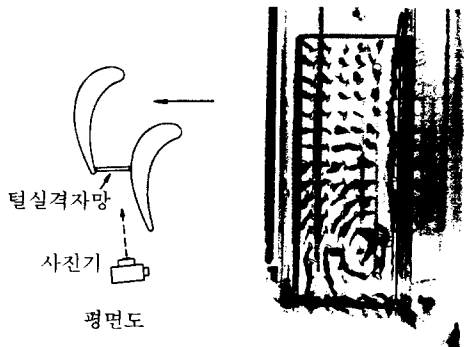


그림 8 털실 격자망에 의해 가시화된 케이스케이드 유로내에서의 말발굽 와동

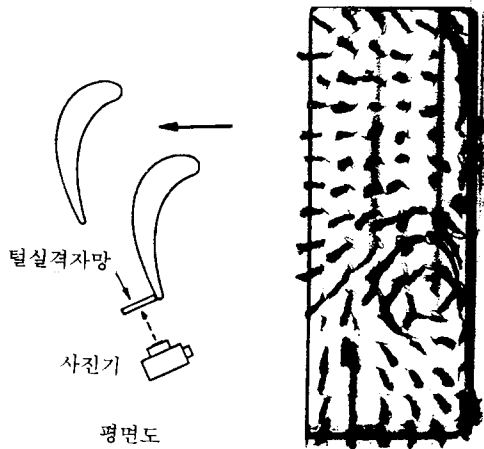


그림 9 털실 격자망에 의해 가시화된 케이스케이드 유로출구에서의 3차원 유동

케이스케이드 유로 내에서 말발굽와동(horse-shoe vortex)의 궤도를 두 개의 유동방향 단면에서 가시화한 것이다. 이 기법을 실제로 응용할 때에 주의할 점은 기존 유동에 대한 간섭효과다. 즉, 나일론줄과 철사고리는 매우 가늘기 때문에 주유동에 큰 영향을 미치지 않으나, 외부형틀을 이루는 철판은 그 구조상 주유동을 방해하기 쉽다. 따라서 철판은 격자계의 모양을 그대로 유지할 수 있는 한 가늘수록 좋고, 또 유동장 안에 설치할 때에도 가능한 주유동 방향에 수직하게 놓아 간섭효과를 최소화하도록 한다. 그러나 대부

분의 경우 형틀 가까이 현상은 해석에서 제외시키는 것이 좋다.

(2) 와동 지시계

가스터빈 내에서의 유동에서 쉽게 관찰되는 말발굽 와동 또는 구석 와동(corner vortex) 등은 작은 평면깃(straight-vane)으로 구성된 와동 지시계(vortex indicator)에 의해서 가시화될 수 있다. 와동(vortex) 안에 위치하면 회전하는 이 프로브는 와동을 감지하는데 유용할 뿐만 아니라, 그 세기와 회전방향을 가시화하는데 유용하게 사용될 수 있다. 것의 크기와 제작방법에 따라 상당히 약한 와동까지도 가시화할 수 있으며 스트로보스코프(stroboscope)를 쓰면 그 회전 속도도 측정할 수 있다.

3. 유동가시화 기법의 응용

위에서 소개한 다양한 기법을 이용, 복잡한 3차원 유동을 가시화하여 정성적으로 분석할 수 있다. 이 글에서는 가스터빈 내에서의 3차원 유동을 해석하기 위한 실험장치에서의 유동가시화 결과를 이용하여 각 기법의 실용성을 살펴보고 있다. 그림 10은 두 개의 블레이드로 구성된 케이스케이드 시뮬레이터 실험장치⁽⁴⁾의 개략도이다. 그림은 이 실험에 사용한 풍동의 노즐과 두 개의 블레이드, 그리고 그 사이로 통과하는 유량을 조절하기 위한 두 개의 측면벽(side wall)을 보

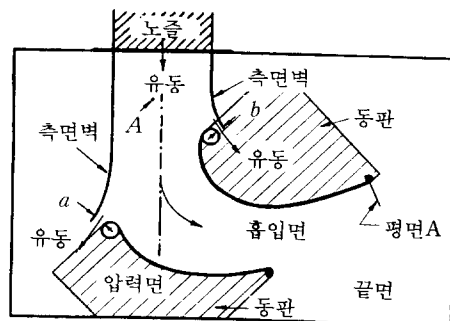


그림 10 케이스케이드 시뮬레이터 실험장치

여준다. 왼쪽 하단에 위치한 벽면은 블레이드의 압력면(pressure side wall)의 역할을 하고 오른쪽에 위치한 벽면은 흡입면(suction side wall) 역할을 한다. 벽면 전단응력은 두 블레이드 사이의 유로(flow passage)의 끝면(endwall)과, 3차원 유동 영역, 즉 끝면 근처의 흡입면상에서 측정하였다. 또한 와동(vortex)의 궤적을 추적하기 위해서 털실 격자망(tuft grid)을 그림 10의 평면 A와 그보다 상류인 압력면의 후연(trailing edge) 근처에 설치하여 하류쪽에서 사진을 찍었다.

3.1 국소벽면전단응력 분포

(1) Oil and Lampblack 기법

그림 1은 케이스케이드 유로내에서의 3차원 유동의 특징들을 보여주는 oil and lampblack 기법의 결과이다. 오른쪽 상단에서 들어오는 유동은 블레이드의 전연(leading edge)에 부딪히면서 말발굽 와동을 형성하고 그것의 압력면쪽의 가지(pressure side leg of horseshoe vortex)는 유로내에서의 압력구배에 의해 유로를 가로질러 흡입면쪽으로 진행하고 새롭게 형성된 끝면 경계층도 이 압력구배의 영향으로 횡단유동(crossflow)을 보여주고 있다. 검은 부분은 전단응력이 작아서 검정 입자가 어느쪽으로도 움직이지 않고 정체되어 있는 곳이며, 여기에 안장점(saddle point)이 위치해 있음을 알 수 있다. 한편, 가운데에 가로질러 가는 하안선은 왼쪽 블레이드 앞쪽에서 생성된 말발굽 와동의 한 가지가 압력구배에 의해 흡입면쪽으로 진행하는 것을 보여준다. 그 아래의 검정 분말의 궤적들도 이러한 횡단 유동(crossflow)을 보여준다.

그림 2는 이 기법을 블레이드의 흡입면상에 적용했을 경우의 결과로써 벽면에 부착했던 종이를 떼어내어 펼친 후 촬영한 것이다. 검정 수직선인 A선은 블레이드 전연에 생기는 정체선(stagnation line)이고, 그림 1에서

본 것처럼 유로를 가로질러온 말발굽 와동이 흡입면에 충돌한 후 벽면을 타고 진행하는 모습을 삼각형 모양으로 보여준다. 이 부분에서의 검정 분말의 궤적은 그 와동의 회전 방향까지도 분명하게 나타내며, E점은 이 와동이 블레이드의 흡입면쪽 후연을 떠날 때의 크기를 나타내주고 있다. 선명하지는 않으나 D선 아래에서는 궤적선이 아래를 향하고 있어 블레이드와 끝면이 연결된 구석에서 생긴 작은 구석와동(corner vortex)의 진행을 보여주고 있다.

(2) Ink-dot-liquid-film(Ink dot) 기법

그림 1에서와 같은 끝면 표면에 이 기법을 적용했을 때의 결과가 그림 3이다. 일정 간격으로 보이는 점들은 기름을 뿌리기 전에 유성펜으로 찍어 놓은 잉크점들이다. 그 점들로부터 녹아나온 잉크가 그 지역에서의 전단응력의 방향을 나타내고 있다. 특이한 것은 oil and lampblack 기법에서 검게만 나타났던 안장점부근에서도 이 기법은 전단응력의 방향을 잘 보여주고 있다는 것이다. 그림 4는 이 기법을 흡입면에 적용했을 때의 결과이다. 삼각형 모양의 A구역은 말발굽 와동의 영향을 받는 영역으로 그림 2에서 관찰된 삼각형 형태의 영역과 일치하고 있다. 이 영역내에서의 잉크 궤적은 이 와동의 회전방향을 잘 보여주고 있다.

이 기법을 이용하여 관찰할 수 있는 또 다른 흥미있는 유동에는 평면에 수직하게 놓여 있는 실린더의 양 끝면 주위에서의 3차원 유동이 있다. 그림 5는 이때 평면상에 생기는 말발굽 와동의 궤적을 보여준다. 각 격자점에서 시작된 잉크궤적은 접근하는 유동과 와동 내에서의 전단응력의 방향을 선명하게 나타내고 있어서 안장점의 위치도 정확하게 추적할 수 있다. 한편 이 실린더의 반대쪽 자유단면에서의 유동장이 그림 6에 나타나 있다. 이 사진은 실린더의 끝단면을 위에서 내려다 보며 찍은 것이다. 결과의 정확도를 높이기 위해 하류(a)와 상류(b)의 반원에 대해

나누어서 실험을 하였으며, 유동은 그림면상에서 위에서 아래로 접근해 오고 있다. 하류의 일부분만을 제외하고 대부분의 영역은 주 유동 방향과 반대방향의 유동을 보여주고 있어 그 안에서 재순환 유동이 형성됨을 나타낸다. 특히 상류쪽의 1사분면과 2사분면에는 이러한 역류와 실린더 옆면에서 올라오는 유동에 의하여 커다란 와동이 생긴 것을 볼 수 있다. 이와 같이 유동현상이 매우 복잡하거나 그 방향이 중요한 경우에는 이 기법이 이전의 기법보다 우월함을 알 수 있다.

3.2 케이스케이드 유로내 와동의 발달

털실 격자망(Tuft grid)은 터빈 케이스케이드 내에서의 와동의 존재 확인과 그 궤적의 추적에 사용될 수 있다. 그림 8은 털실 격자망을 유로 중간에 놓았을 때 와동이 끝면 가까이, 그러나 이미 흡입면쪽으로 이동해 있음을 보여주고 있다. 각 털실들은 그 점에서의 유동의 방향을 표시하며 이 와동이 시계 반대방향으로 회전하고 있음을 보여준다. 그림 9는 유로의 출구근처(그림 10의 평면 A)에서는 와동의 중심이 많이 상승해 있고 그 크기도 증가했음을 보여주고 있다. 실제로 털실들은 와동내에서 선회운동과 함께 비정상유동(unsteadiness) 때문에 생기는 떨림도 나타내어 준다.

4. 맺음말

벽면에서의 전단응력 분포와 유동장 내에서의 3차원 유동 요소를 추적하는 유동가시화 기법중에서 몇 가지를 그 응용 예와 함께 살펴보았다. 3차원 유동의 주요 특징들과 한계유선(limiting streamlines)을 관찰하기 위해서는 oil and lampblack 기법이 충분하나 유속이 작거나 유동의 방향이 분명하지 않은 곳에서는 ink dot 기법을 적용하는 것이 좋다. Oil and lampblack 기법은 실험하고자 하는 유동의 조건에 따라 기름과 분말의 혼

합비, 기름의 점도 등을 잘 선택하여야 한다. 안장점(Saddle point)이나 재부착선(reattachment line)과 같이 성격상 중요한 지점을 찾기 위해서는 털실 프로브(single tuft probe)가 유용하게 쓰이며, 이는 또 유동내에서 와동의 존재와 위치를 찾는 데 쓰이기도 한다. 수치해석 결과 얻을 수 있는 속도벡터와 같이 비교적 넓은 유동장을 한눈에 관찰하기 위해서는 털실 격자망(tuft grid)을 사용할 수 있으며 각 털실은 그 지점에서의 유동의 방향과 그 안정성(steadiness)을 나타내준다.

이러한 유동가시화 방법들은 각 유동의 특성에 맞는 적절한 조건을 맞추기 위해서 많은 시행착오를 거쳐야 하며, 하나의 만족스러운 결과를 얻기 위해서는 많은 기술과 시간과 연습을 요구하고 있어서 다른 정량적인 측정기술과 더불어 커다란 노력과 관심을 기울여서 발전시켜야만 할 것이다.

참고문헌

- (1) Asanuma, T., 1977, "Flow Visualization Techniques in Japan," Proceedings of the International Symposium on Flow Visualization, Tokyo, Japan.
- (2) Goldstein, R. J., 1983, "Fluid Mechanics Measurements," Hemisphere Publishing Corporation.
- (3) Langston, L. S. and Boyle, M. T., 1982, "A New Surface-Streamline Flow Visualization Technique," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 125, pp. 53~57.
- (4) Chung, J. T. and Simon, T. W., 1990, "Three-Dimensional Flow Near the Blade/Endwall Junction of a Gas Turbine : Visualization in a Large Scale Cascade Simulator," ASME Paper 90-WA/HT-4, Presented at the Winter Annual Meeting.