

발전설비 분야에서의 유체공학 응용

이 글에서는 가장 전통적이고 가장 큰 용량의 발전을 담당하고 있으며 유체공학의 정수가 응용된 발전설비 중의 하나인 증기터빈, 특히 화력발전에서 사용되는 증기터빈에 대해 알아보고 구체적으로 유체공학이 응용되는 예를 살펴보기로 한다.

산업용 혹은 가정용 전기를 만들어내는 발전설비로는 화석연료를 태워 발전하는 화력발전, 원자력 에너지를 이용하는 원자력발전, 천연가스를 연소시켜 가스터빈을 돌리고 여열을 이용하여 증기터빈을 돌리는 복합화력 등이 있다. 또한 근래에 들어 환경과 안정적인 에너지원에 대한 관심이 높아짐에 따라 재생 가능한 수력, 풍력, 조력, 태양열, 연료전지 발전에 대한 관심도 높아지고 있다. 이러한 여러 가지 발전 방법 중에서 유체공학이 응용되지 않는 발전방법은 하나도 없다. 화석연료를 태우는 보일러에서는 연소로 내에서의 연소가스의 유동에 대한 연구가 필요하고, 원자력 발전의 경우 원자력 에너지를 고온 고압의 증기로

바꾸는 증기발생기 내의 작동유체에 대한 연구가 필요하다. 수력, 풍력, 조력 발전은 유체의 흐름으로부터 에너지를 얻는 발전이며, 태양열, 연료전지의 경우에도 작동유체로서 혹은 에너지 저장의 매개체로서 유체가 이용된다. 그러나 가장 전통적이고 가장 큰 용량의 발전을 담당하고 있으며 유체공학의 정수가 응용된 발전설비 중의 하나로 증기터빈을 꼽을 수 있다. 여기서는 증기터빈, 특히 화력발전에서 사용되는 증기터빈에 대해 알아보고 구체적으로 유체공학이 응용되는 예를 살펴보기로 한다.

화력발전은 보일러에서 화석연료(석탄)를 연소시켜 물을 고온, 고압의 증기로 바꾸어 열에너지를 생성시키고, 생성된 고온, 고

압의 증기를 터빈의 고정익에서 팽창시키고 회전익에 분사하여 로터(축)를 회전시킨다. 발전기를 이용하여 로터의 운동에너지를 전기에너지로 변환시키면 전기가 생성된다. 화력발전 시스템을 자세히 살펴보면, 채굴된 석탄(raw coal)은 석탄분쇄기에서 평균입경이 약 50micron 정도의 가늘고 고운 미분탄으로 분쇄된다. 분쇄된 미분탄은 공기와 혼합되어 수송관을 통해 보일러의 연소로(furnace)에 공급된다. 버너에서 연소된 연소가스는 튜브관군을 지나면서 보일러를 빠져나간다. 플라이 애시(fly ash) 등의 불순물은 전기집진기(electrostatic precipitator)를 거치면서 거의 제거되고 대기로 방출된다. 보일러의 튜브관 안을 지나

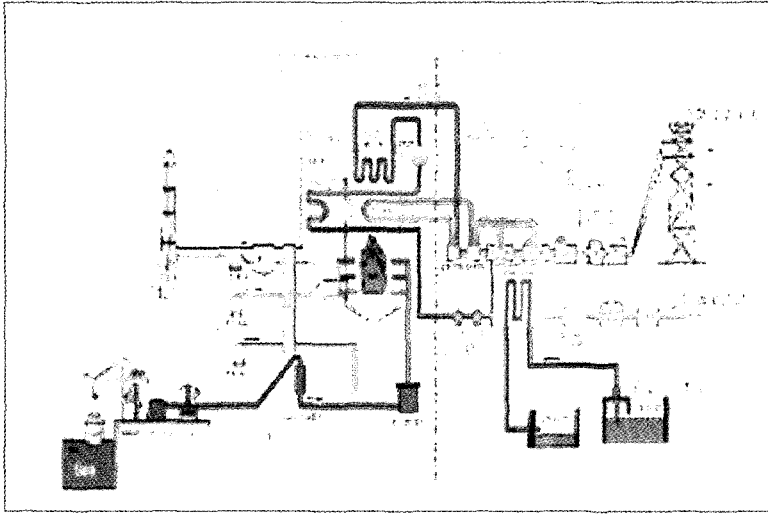


그림 1 발전소의 구조

면서 가열된 고온 고압의 증기는 고압터빈(high pressure turbine)으로 유입된다. 고압터빈을 통과하는 증기는 팽창하면서 에너지를 로터에 전달하고 온도가 떨어지게 되는데 다시 보일러로 보내져 온도가 높아지는 과정을 재열(reheat)사이클이라고 한다. 이 재열 증기는 중압터빈(intermediate pressure turbine)과 저압터빈(low pressure turbine)을 거치면서 진공상태까지 팽창한다. 최종적으로 복수기(condenser)로 배출되는 습도 약 10%의 습증기는 복수기에서 포화수로 응축된다. 응축된 포화수는 고압, 중압, 저압 증기터빈을 통과하는 증기 일부를 뽑아내어(추기) 열교환을 하면서(급수가열) 온도가 점차 높아지면서 보일러로 유입된다. 이러한 열교환 과정을 재생(regenerator)사이클이라고 한다. 일반적인 발전소의

구조가 그림 1에 나타나 있다.

우리나라 증기터빈의 설계기술은 1980년대부터 선진기술사의 기술을 도입하여 제작기술 국산화로부터 시작하였고, 임계압 및 초임계압의 200MW, 500MW급의 한국표준발전소를 건설하면서 설계기술의 발전을 이루어 왔다. 이러한 과정에서 표준화력발전소 주기기 설계 및 제작기술은 자립 단계에 도달한 상태이다. 그러나 국내 전력사에서 효율개선, 강화되는 환경규제 및 증가하는 전력 수요에 능동적으로 대처할 수 있는 경쟁력 있는 화력발전소 건설 및 운영을 선호함에 따라, 발전소의 운전 증기온도를 593°C 이상으로 높이고, 단위용량도 1,050MW까지 높인 고효율/대용량/친환경적인 차세대 초초임계압(USC : Ultra Super-Critical) 화력발전소 도입이 적극 검토되고 있는 실정이다. 화력발전

소 기술이 격상되는 기술과도기적인 상황에서 차세대 USC 화력발전소 보일러, 터빈/발전기의 설계 및 제작기술을 확보하지 못하는 경우에는 1980년대 이전의 상황으로 되돌아가 국내 화력발전소 시장은 해외기업의 각축장으로 변하고, 이러한 차세대 화력발전소 주기기 기술은 보유한 몇몇 회사의 담합으로 발전소 건설 투자비 상승, 보수 및 유지기술의 해외 의존 등에 의한 운전비용 상승, 이로 인한 전기료 인상에 따른 국가 경쟁력 약화, 발전산업 연관 산업계의 붕괴에 따른 강력한 구조조정 등의 문제가 야기될 수 있기 때문에, 차세대 USC 화력발전 주기기 설계 및 제작기술의 확보가 시급한 실정이다. 이러한 과정에서 USC 발전용 터빈개발을 위해서는 증기유로설계, 고온부 냉각설계기술, 기동부하 제어기술, 고온용 소재개발 등이 필요하다.

증기터빈에서 증기가 팽창과정을 통해 일을 하면서 여러 가지 요인에 의해 손실들이 발생한다. 이러한 손실들의 종류로 밸브에서 발생하는 밸브손실, 고정익과 회전익을 지나면서 발생하는 손실, 회전익을 우회하는 증기로 인한 증기누설손실, 급수가열을 목적으로 추기되는 추기(extraction)손실, 재열기 관군을 통과하면서 발생하는 손실, 습증기 내에 존재하는 작은 물입자에 의한 습분손실(moisture loss), 베어링에서 발생하는 기계적 손실 등이 있다. 이 손실들을 줄여서 증기터빈 효율을 향상시키는 데 유체공

학적 지식이 이용된다. 이와 관련한 몇 가지 연구개발 사례를 소개하고자 한다.

고효율 블레이드 설계

터빈 블레이드 설계의 역사는 자유 와류 단 설계(free vortex stage design)부터 시작한다. 자유 와류 단 설계는 블레이드의 길이 방향으로 일정한 양의 일을 하도록 하는 설계이다. 따라서 이 설계에서는 축 방향 속도 성분이 일정한 분포를 갖게 된다. 근래 수치해석기법의 발달로 인해 1990년대에 이르러 고등 와류 단 설계(advanced vortex stage design)라는 새로운 개념의 블레이드가 등장한다. 고등 와류 단 설계는 3차원 설계 도구를 사용하게 되고, 이러한 도구의 발전으로 인하여 혼합 경사 적층(compound leaned stacking) 방법이 개발되었다. 이러한 적층(stacking) 방법의 형상은 그림 2에서 보듯이 뿌리(root)부분의 경사(leaning) 방향과 끝단(tip)의 경사방향이 서로 반대방향으로 되어 있어서 이를 조합하였다고 하여 혼합 경사 적층이라고 한다. 이 방법은 고정익에 사용되며 블레이드의 위아래 끝 면에서 발생하는 이차 유동 손실을 감소시키기 위하여 고안되었다. 이와 같은 혼합 경사 블레이드의 특성을 연구하기 위하여 그림 3에 나타난 기존 블레이드(conventional blade)와 혼합 경사 블레이드에 대해 수치 해석을 수

행하였다. 본 연구에서는 혼합 경사 적층의 영향만을 살펴보기 위하여 사각형 캐스케이드(rec-tangular cascade)를 사용하였다. 이는 환형(annular cascade)를 사용할 경우 원심력이 작용하기 때문에 적층의 영향만을 확인할 수 없기 때문이다. 블레이드 내부에서 발생하는 이차유동을 정확히 예측하기 위하여 바닥과 위의 끝 벽 및 블레이드 표면에 격자를 밀집시켰다. 경계 조건은 끝 벽면과 블레이드에는 단열조건, 입구 조건은 전압력, 전온도 및 입구 속도 방향을 지정하였고, 출구 조건은 정압력을 주었다. 블레이드 통로내의 난류유동 효과를 고려하기 위하여 RSM(the Reynolds Stress Model)을 사용하였다.

일반적으로 말굽와류(horse-shoe vortex)를 형성하는 요소는 벽면 점성에 의한 정체 효과(stagnant effect), 익렬 선단 벽면 부근에서 유동방향에 대한 역압력 구배(adverse pressure gradient) 및 익렬 선단 벽면 수직방향으로의 양전압력 구배(positive gradient of stagnant pressure)이다. 이러한 세 가지 요소의 강도가 약화되면 와류의 강도도 약화되

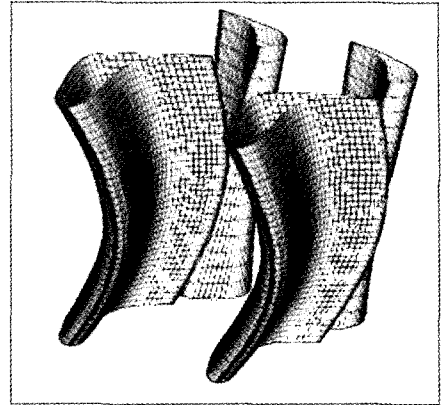


그림 2 혼합 적층 블레이드

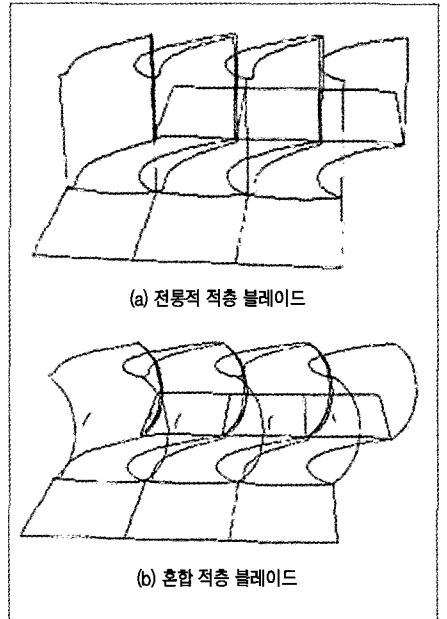


그림 3 유동해석을 위한 블레이드 모델

어 이차유동손실이 감소된다. 기존 블레이드의 경우 블레이드 높이 방향으로 정압력이 균일하므로 전압력은 양전압력 구배가 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 와류의 강도가 강하고 크기가 크다. 하지만 혼합경사 블레이드는 블레이드 높이 방향으로 음정압

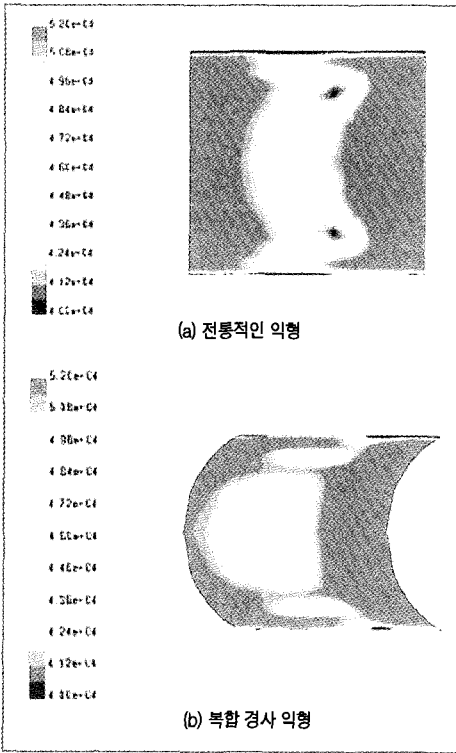


그림 4 전압력 분포

력 구배(negative gradient of static pressure)가 발생됨에 따라 양전압력 구배의 크기가 줄어들게 된 것을 볼 수 있다. 따라서 와류의 크기 및 강도는 줄어들게 된다.

이러한 익렬 후단의 와류는 이차 유동에 의하여 발생하는 것으로 와류 강도가 커질수록 이차유동 손실은 커진다. 와류가 위치하는 곳의 전압력은 낮다. 따라서 와류의 위치를 파악하기 위해 전압력분포를 사용하였다. 수치해석 결과 나타난 전압력분포는 그림 4에 나타나 있는데, 익렬 후단에서 축방향 코드 길이의 20% 떨어진 위치의 전압력 분포이다. 와

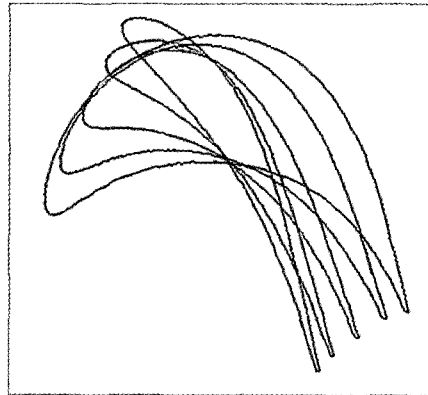


그림 5 블레이드의 2차원 단면

류의 위치는 혼합경사 블레이드의 경우 기존 블레이드보다 중간지점(midspan)에 모이는 것을 볼 수 있다. 또한 와류의 형상은 커지고, 최소 전압력값이 상승되는 것을 볼 수 있다. 이와 반면 기존 블레이드의 경우 최소전압력

의 값이 가장 낮아 큰 압력 손실이 발생됨을 알 수 있다. 혼합경사적층 방법은 끝벽부분에서 흡입면의 압력이 상승함에 따라 이차유동의 생성을 억제하여 유동 손실을 절감한다는 것을 알 수 있었다. 그러나 이 보다 더 손실을 감소시키기 위해서는 다른 조치가 필요할 것으로 판단된다.

최종적으로 효율이 최대가 될 수 있도록 관통유동해석(through-flow analysis)을 통해 블레이드 반경방향으로 유동을 잘 분포시켜야 한다. 이 결과 산출된 유동변수들을 이용하여 그림 5처럼 반경방향으로 몇 개의 위치에

서 효율이 좋은 2차원 블레이드 단면 형상을 생성한다. 이런 2차원 단면들을 적층하면 3차원 블레이드 형상이 만들어지며, 최종적으로 3차원 유동해석을 통해 최종 설계를 마무리 한다.

블레이드 성능시험

상기의 설계과정을 통하여 설계된 터빈의 성능을 검증하기 위하여 시험설비를 구축하고, 이를 이용하여 성능시험을 수행하였다. 성능 시험은 상사조건을 통하여 공기에서 수행하였고, 이를 위해 한국항공우주연구원(이하, 항우연)에서 보유하고 있는 대형 압축기를 이용하여 구축되었다. 터빈 성능 시험 설비는 크게 공기 공급장치인 압축기, 유량계, 유질 조절부, 터빈 시험부, 동력 흡수장치, 배압 조절 밸브로 구성되어 있다. 압축기에서 나온 공기는 입구부 배관을 거쳐 유량계에서 유량을 측정한 후 다공판(perforate plate)과 허니컴으로 구성된 유질 조절부를 거쳐 터빈 시험부로 유입된다. 터빈 시험부로 유입된 공기는 터빈을 구동하고 터빈에서 발생된 동력은 동력 흡수장치에서 흡수된다. 동력 흡수장치는 시험 시 터빈의 회전수를 측정하고 조절할 수 있으며 또한

토크를 측정하게 된다. 터빈 시험부 후방에 위치한 배압 조절 밸브를 조절하여 성능시험에 필요한 터빈 압력비를 얻게 된다. 배압 조절 밸브를 통과한 공기는 소음기를 거쳐 대기로 배출된다.

터빈 시험부에 설치되는 터빈 모델은 1/3 축소 모델로 그림 6과 같다. 터빈 시험부는 입구부에 유입 공기의 와류 성분 등을 제거하는 스틸링 챔버(stilling chamber)와 연결된다. 스틸링

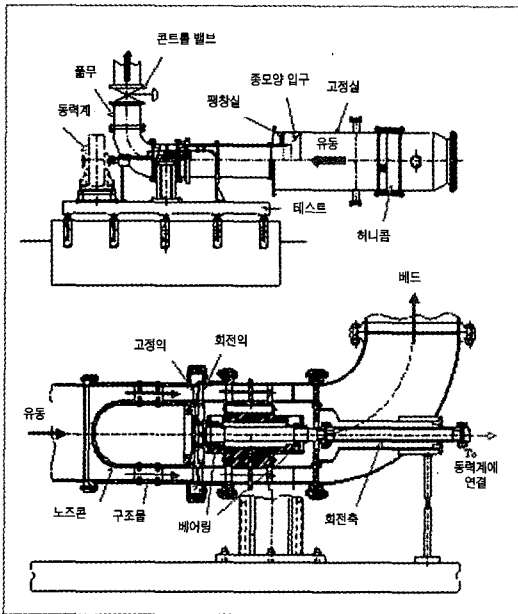


그림 6 실험설비 단면

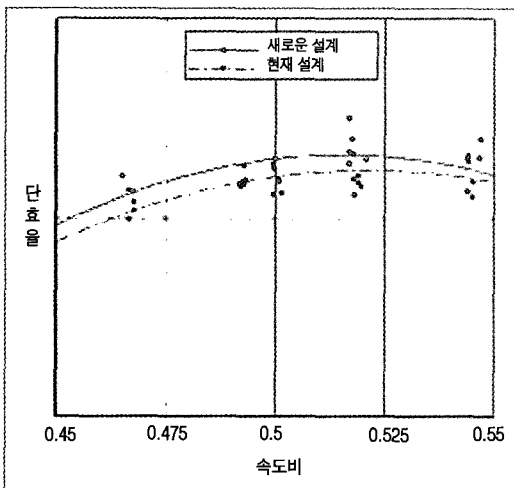


그림 7 성능시험 결과

를 막기 위하여 입구부에 노즈콘(nose cone)을 설치하였고 노즈콘은 3의 지지대에 의해 지지된다. 정익이 장착되는 링까지의 전반부 케이스는 상하로 분리되어 동익 디스크를 교체할 수 있도록 하였다.

이와 같이 구축된 시험 설비를 이용하여 기존 설계 형상과 3차원 유동 해석을 통하여 설계된 형상의 성능 시험을 수행하였다. 시험 결과는 3차원 유동 해석 결과에서 예측된 것과 같이 3차원 설계 도구를 이용한 형상의 성능이 높게 예측되었다.(그림 7 참조)

실(seal) 유동해석

회전하는 증기터빈 블레이드 끝단에 존재하는 간극을 통해서 증기가 누설될 경우, 누설되는 증기량은 일을 하지 못 함으로 인해 그만큼 손실을 야기하게 되는 것이고, 또한 누설증기가 주증기의 흐름에 영향을 미치게 됨으로 인해 추가적으로 손실을 미치게 된다. 가능한 간극을 통해 누설되는 증기량을 감소시키기 위해 실을 부착한다. 이러한 실에 대한 개발과정에서 전산해석을 통해 실의 유동특성을 정성적으로 파악하는 것은 매우 유익한 일이다. 가능한 여러 가지 실의 종류에 대해 유동해석을 해보고, 설계에 필요한 데이터들은 최종적으로는 실험을 통해 도출하는 방법을 택하고 있다.

저압터빈 블레이드 공력설계

일반적으로 저압터빈은 고압/중압터빈보다 상대적으로 압력이 낮은 증기가 유입된다. 따라서 증기의 비체적이 커지고, 이로 인해 증기가 통과하는 유로가 커져야 한다. 따라서 고정익/회전익의 크기가 커져야 한다. 화력터빈인 회전익인 경우 3,600rpm으로 회전하며 길이가 길어질수록, 원심력이 증가하고, 이로 인해 회전익에 대한 설계가 중요하며, 진동에 취약한 구조가 되기 쉽고, 설계변경이 쉽지 않다. 설계된 제품에 대해서는 성능 및 신뢰성 확보를 위해 검증시험을 거쳐야 하는데, 여기에는 막대한 비용과 많은 기간이 소요된다. 따라서 설계변경이 어려우며 따라서 설계변경 없이 한 번 개발된 제품은 그대로 적용되는 것이 일반적이다.

저압터빈 블레이드는 크게 LSB(Last Stage Blade) 설계

기술과 LSB 이외의 긴 블레이드 설계기술로 구분할 수 있다. LSB는 전체 터빈의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 부분으로서 큰 설계 압력비와 증기의 급격한 팽창으로 인한 10%의 습분(wetness)이 존재할 뿐만 아니라 블레이드 통과 최대유동속도가 마하 1.8 정도의 초음속 유동특성으로 고도의 공력설계기술이 요구될 뿐만 아니라, 높은 압력비에 견딜 수 있는 고도의 강체설계기술이 필수적이다. 따라서 LSB는 특정 압력비와 운전조건에서 설계성능과 운전 신뢰성을 만족해야 하므로, 일반적인 블레이드 설계프로세스와 구분되어 개별적인 연구개발을 통해 모델설계가 이루어져야만 한다.

저압터빈 마지막 단에서는 압력비가 5 정도로 아주 크기 때문에 증기가 급격히 팽창하므로 증기유로가 급격히 확대되도록 설계해야 한다. 이 3차원 유동해석에는 다단 3차원 유동해석

(multi-stage 3dimensional viscous flow analysis)이 가능한 DENTON's code를 이용하고 있다. 그림 8은 마지막 단 유동해석에 사용된 계산격자를 보여주고 있으며, 그림 9는 회전익 끝단(tip)에서의 속도분포를 보여주고 있다. 3차원 블레이드 형상설계가 마무리 되면 구조해석 및 진동해석을 통해 블레이드에 대한 신뢰성을 평가하여 최종적으로 터빈 성능 및 신뢰성 시험을 거쳐 개발을 완료하게 된다.

이상과 같이 대표적인 유체기계 중의 하나인 증기터빈에서의 유체공학응용 사례를 소개하였다. 국내 발전시장도 이제 완전히 개방이 되어 냉정한 경쟁체제로 전환되었다. 치열한 경쟁에서 살아남기 위해서는 효율이 좋으면서 저렴한 증기터빈을 개발하는 것이 요구된다. 효율이 좋은 증기터빈을 개발하기 위해서는 무엇보다도 유체공학적인 전문지식의 활용이 중요하다.

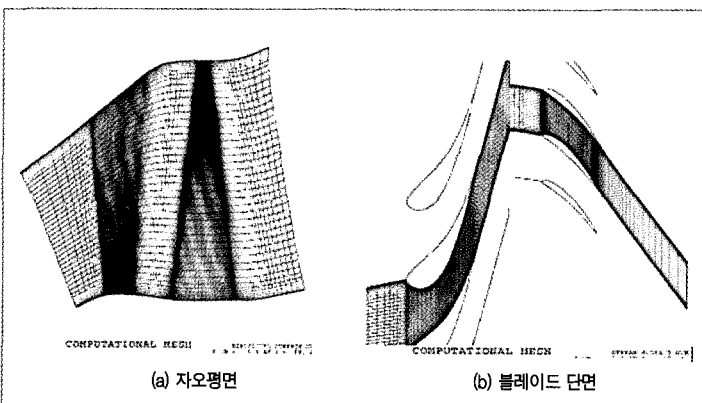


그림 8 전산격자

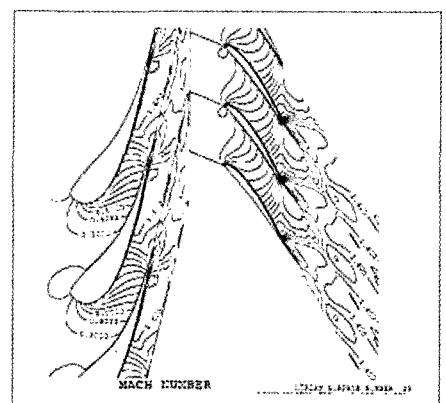


그림 9 LSB 끝단의 마하 분포