

## 대형축류팬의 실속과 대책

심의보\* (한국하이프레스(주))

### Stall and Counter-measure for Large Size Axial-Flow Fan

Eui-Bo Shim \*

**Key Words** : Rotating Stall(선회실속), Axial-Flow Fan(축류팬), Separation Zone(박리영역), Angle of Attack(영각), Stall Detector(실속계측기), Duct Loss(관로손실), Spiral Duct(원형덕트), Rectangular Duct(장방형덕트), 역압력(Back Pressure)

#### ABSTRACT

The rise in pressure across the impeller blade of an axial flow fan depends on the angle of attack. At a low back pressure, the air volume will be large and the angle of attack is small. The gradual increase of the back pressure approached stall zone which is not stationary but travels blade to blade passage. In consequence, a region occurs around these blades with large vibration in the flow. To avoid these stall operation, the stall detector in the axial flow fans has been designed to detect stalling condition with a manometer or differential pressure switch by electric mechanism.

#### 1. 서론

축류팬은 동력을 전달하는 부분의 구동축과 유량의 이송방향이 동일한 팬으로서 저압력, 고속 대유량의 공기를 이송할 수 있는 장점이 있다. 따라서 동일한 풍량에 대하여 소형 경량으로 제작이 가능하기 때문에 산업현장에서 많이 사용되고 있다. 지금까지는 팬의 내경을 기준으로  $\phi 1400\text{mm}$  미만의 축류팬이 주로 제작되었고 그 이상의 용량이 필요할 경우에는 다수의 팬을 사용하여 왔으나 최근 대형 선박에서는 환기 시스템이 차지하는 공간을 최소화하여 팬의 대형화가 요청되고 있다.

대형 축류팬은 사용요구에 따라 설계조건이 다양하여 허브(hub)와 블레이드의 영각을 조절할 수 있는 조립형 구조가 주로 채택되고 있다. 이러한 축류팬은 일반적으로 온도범위가  $-20^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ , 출구축의 유동속도가  $15 \sim 30 \text{ m/sec}$ , 유량은  $2000 \sim$

$3500 \text{ m}^3/\text{min}$ 로서 기계적으로 매우 가혹한 조건으로 설계된다. 팬이 대형화 될수록 임펠러 블레이드의 길이가 증가하므로 일반적으로 임펠러는 가벼운 알루미늄합금의 재질이 이용된다.

팬에서 유입하는 영각(angle of attack)을 크게 취할 때는 익열의 후면에서 회전방향으로 박리영역(separation zone)이 크게 되어 유로를 좁히게 되고, 유량이 급격히 감소하면서 진동과 소음을 수반하여 운전하게 되는데 이를 선회실속(rotating stall)이라고 한다. 이러한 실속현상은 항공기의 날개에서 과대한 영각을 취할 때나 음속으로 비행할 때 발생하는 현상으로 알려져 있다. 특히 산업용으로 사용하는 대형 축류팬에서는 대유량을 이송하기 위하여 영각과 원주속도를 높게 선정하는데 이 경우 블레이드의 배면에서 실속이 증대되어 진동이 일어나므로 장시간 운전할 경우에는 반복적인 피로응력이 긴 블레이드의 익근부근에 집중되어 블레이드의 절손을 유발한다. 이러한 현상은 팬을

\* 한국하이프레스(주) 품질경영부 차장  
경남 김해시 진례면 담안리 1432-11

설치하는 주위의 여건에도 큰 영향을 주는데 실제로 팬의 입출구측에 연결되는 덕트의 구조 및 설치공간에 따라 입구측의 부압과 출구측의 배압이 증가하는 경우에는 더욱 복잡한 형태로 발생한다 [1][2]. 지금까지 축류 유체계의 익열을 통과할 때 발생하는 실속과 서어징에 관하여 활발한 연구가 진행되어 왔으며 특히 축류압축기에 대해서는 국내에서도 소개가 있었다[3][4][5].

한편 대형축류팬은 저속으로 대유량을 이송할 수 있는 장점이 있기 때문에 최근 선박이나 산업체에서 그 수요가 증가하고 있어 선회실속 영역에서도 내구성 있는 제품의 개발이 시급한 실정이다. 따라서 이러한 실속 유동특성들에 대하여 정량적으로 해석할 수 있는 공학적인 계측기술 및 설계 대책 등에 관한 데이터를 확보한다는 것은 매우 중요하다.

이와 같은 배경으로부터 본 연구에서는 최근 대형 선박의 기관실 급기용으로 사용하고 있는 대형 축류팬의 실속에 관한 이론적 배경과 손상사례, 계측기법과 대책[6]에 관하여 고찰하였다.

## 2. 대형 축류팬의 실속

축류팬에서 임펠러 블레이드 배면의 압력 상승은 영각( $\alpha$ )에 달려 있으며, 이것은 익형에 의존하는 임계치에 대한  $\alpha$ 의 상승에 따라 비례한다.

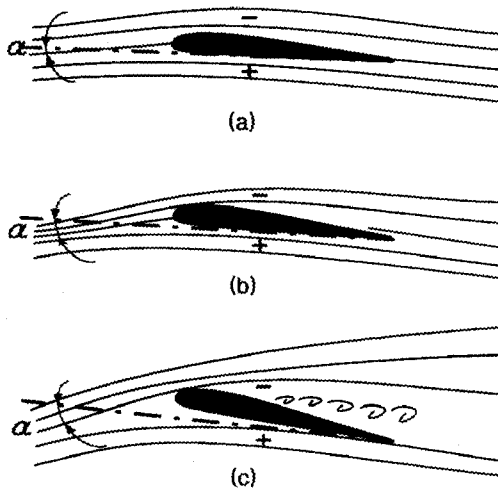


Fig. 1 Blade Stall

$\alpha$ 가 임계치 이하로 유지되면 공기는 그림1의 (a), (b)와 같이 블레이드의 표면을 따라 흐른다. 만약 (c)와 같이  $\alpha$ 가 임계치 이상의 값을 갖으면 공기의 속도는 상승하여 블레이드의 볼록한 면을 따라 심한 박리와 압력 강하가 유발된다. 이것은 블레이드 각도를 높게 선정할 때 상부측의 유속은 하부측보다 빠르게 흐르고, 압력은 상부측이 하부측보다 더욱 낮아져 고속회전시 양력을 동반한 불안정한 유동특성이 나타나는 블레이드 실속(blade stall)이 일어난다.

그림2는 고정익을 가진 전형적인 축류팬의 특성 곡선을 나타낸 것이다. 여기에서  $P_{tF}$ 는 팬의 전압,  $q_v$ 는 공기 변화량을 의미한다. 크게 두개의 영역으로 구분할 수 있는데 하나는 팬의 보통 운전영역인 A-B이며, 다른 하나는 축류팬에서 바람직하지 않은 운전구간인 BCDE의 실속영역이다.

팬은 낮은 압력에서 공기량은 많이 흐르며 영각은 작다. 또한 역압력을 점차 상승시키면, 예를 들어 운전영역이 A에서부터 B로 이동하면, 공기량은 줄어들고  $\alpha$ 는 임펠러 실속이 발생하는 점B가 될 때까지 증가할 것이고 압력과 공기량을 크게 떨어뜨리는 원인이 될 것이다.

그림3은 운전 포인트가 A로부터 B를 향하여 이동할 때  $\alpha$ 의 변화에 대하여 나타낸 것으로 임펠러에 설치된 블레이드에 공기가 속도  $c$ 로 유입할 때 흐름을 보여주고 있다. 원주속도  $u$ 를 가지는

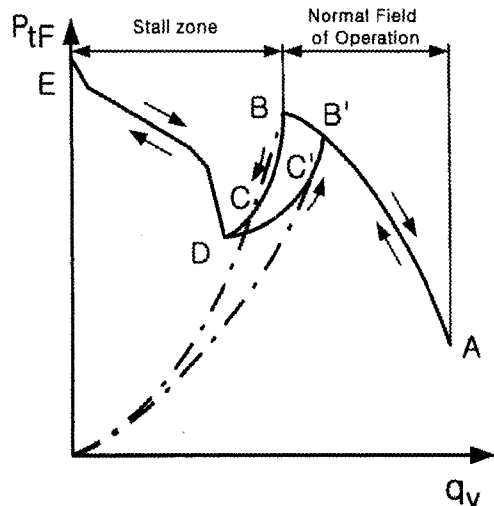


Fig. 2 Stall Zone

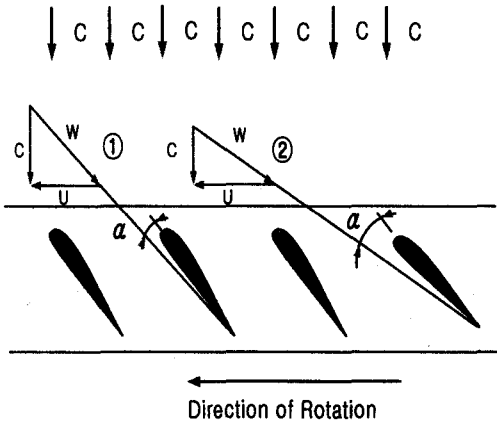


Fig. 3 Angle of Attack

블레이드에서 유입속도  $c$ 와 함께 상대속도  $w$ 가 주어진다. 여기에서 그림2의 A와 B사이에서 운전 포인트는 속도차트 ①과 같이 된다.  $w$ 의 방향과 블레이드 측면 사이의 차이는 영각  $\alpha$ 로 나타낼 수 있다. 앞에서 언급되었듯이 역압력의 증가는 공기량과 속도  $c$ 를 감소시키는 원인이 된다. 그 결과 속도차트 ②에서는  $\alpha$ 가 증가할 때를 나타낸 것으로 공기량은 변화하고 역압력도 크게 된다.

그러나 팬이 실속영역에 있어도 모든 블레이드가 동시에 실속의 영향을 받지 않는다. 실속은 보통 하나 또는 서너개의 블레이드에서 시작되어 블레이드를 통과하는 주변의 공기유동의 영향에 따라 더 많은 지역으로 이동되기도 한다. 특히 팬의 출구축이 긴 덕트로 연결되는 구조에서는 관내 압력상승이나 출구축의 교축에 의하여 영향을 받게 된다.

그림4는 실속영역을 나타낸 것으로 실속영역은 고정되어 있지 않고, 블레이드에서 블레이드로 옮겨짐을 알 수 있다. 만약 블레이드 2, 3, 4에서 실속이 일어난다면 이러한 블레이드 공간에서의 공기 흐름은 줄어들거나 일시적으로 완전히 멈출 것이다. 결과적으로 이 공간에서 더 이상 압력 상승은 일어나지 않으며, 공기는 임펠러 유입측 뒤로 흐를 것이다. 이로 인해 실속영역에서는 이들 블레이드 주위에서 큰 변동을 수반한 공기의 흐름이 형성될 것이다.

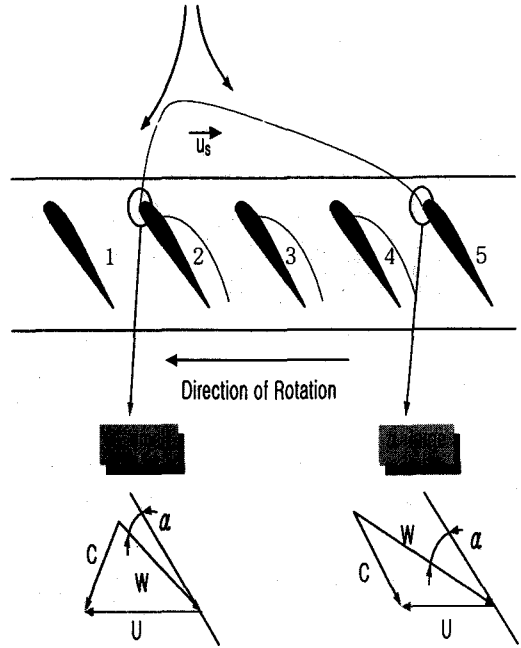


Fig. 4 Rotating Stall

이 지역은 그림4에서 빗금친 부분과 같이 되어 유입된 공기는 이 지역 주위로 어떤 압력을 받게 되어 블레이드 5의 영각은 증가하여 실속현상이 일어날 것이다. 반대로 블레이드 2는  $\alpha$ 가 감소하여 블레이드의 실속을 멈추게 하는 원인이 될 것이다. 이로 인하여 실속영역은 블레이드 5번 방향으로 이동되는데 이러한 현상을 선회실속이라 한다. 이러한 불안정한 실속영역으로 인하여 팬의 운전 포인트는 안정되지 않고 그림2의 C점 주위로 옮겨지게 되는 것이다. 역압력(back pressure)이 더욱 상승하면 공기량은 감소하며, 실속영역은 그림2의 E점까지 확대되어 모든 임펠러가 실속영역에 있게 됨을 의미한다. 역압력이 감소되면 공기량은 증가하여 운전지점은 전과 같이 E→D의 경로로 움직일 것이다. 그러나 DC'B'경로는 팬이 다시 실속을 벗어날 때까지 이어질 것이다. 팬이 실속영역에서 장시간 운전되면 이것은 블레이드 파손의 원인이 된다. 특히 대형 팬일수록 블레이드의 길이가 길어지는데 블레이드의 root부에 반복 피로응력이 집중되게 되므로 피로파괴가 일어나지 않도록 이 영역에서는 운전하지 말아야 한다.

팬이 실속영역에서 운전중 일 때는 팬 근처에서 공기흐름이 맥동하여 소음이 증가하고 정상운전일 때보다 진동이 증가한다. 팬이 실속영역에서 운전될 때에는 다음과 같은 현상들이 일어나므로 주의해야한다.

- 1) 높은 음의 내뿜는 소리가 종종 발생한다
- 2) 팬 근처에서 공기의 흐름에 맥동이 심하다.
- 3) 정상운전에서보다 종종 더 높은 진동 레벨이 있다.

그러나 이러한 현상이 나타나더라도 전문적인 지식이 없는 운전자들은 정확한 결정을 내리기 어렵다. 이러한 경우 블레이드 입구 가까이 실속계측기를 설치하면 팬에서 실속이 일어나는 사항을 쉽게 확인할 수 있다. 하나 또는 여러 개의 블레이드를 연결해 주는 적당한 제어장치를 설치하여 자동적으로 팬의 실속상태를 알려 주는 방식으로 실속감지기는 그림4에서 보여진 것과 같은 실속영역의 존재를 인지하도록 특별히 설계된 것이다.

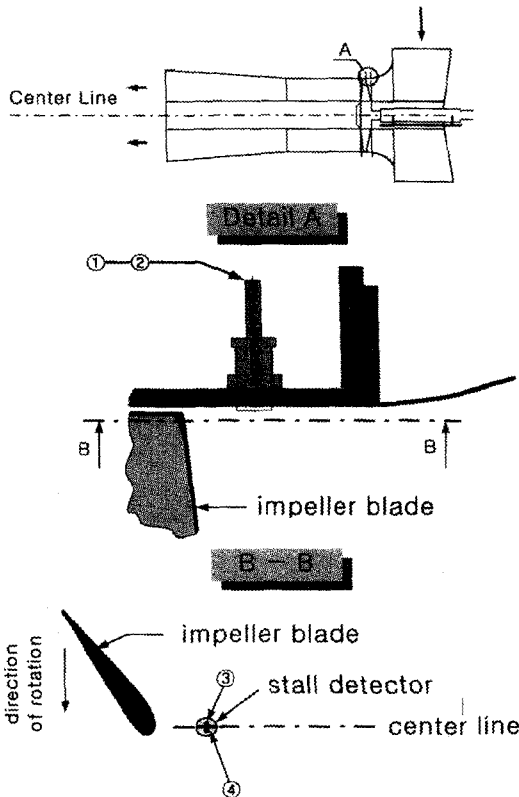


Fig. 5 Stall Detector(1)

### 3. 실속 계측기

일반적으로 실속계측기는 고정익뿐만 아니라 가변익을 가진 축류팬에서의 실속상태를 검출할 수 있다. 그림5와 그림6은 실속계측기의 작동원리를 나타낸 것이다. 마노미터를 실속계측기의 끝단에 연결하면 그림5의 ①,②라인은 ③,④번의 구멍을 따라 흐르는 공기에서 측정된 차압으로 결정된다.

한편 그림7은 팬과 실속계측기의 차압특성도를 나타낸 것이다. 만약 팬이 그림7의 A와 B점 사이의 일정한 영역에서 운전된다면 차압은 0에 매우 가까워 질 것이고 블레이드를 통과하는 공기의 유동은 원활하여 안정된 흐름을 가질 것이다. 또 팬의 운전점이 그림2의 실속 영역인 BCD에서 존재한다면 마노미터는 B점으로부터 작용하는 거리에 따라 증가하는 만큼의 차압을 지시하게 될 것이다. 즉 이 팬은 좀 더 심한 실속영역에서 운전될 것이다.

임펠라 블레이드의 각도를 낮게 선정하는 경우는 빗금친 부분에서와같이 팬은 실속영역 아래에 있게 된다. 사진3은 실제로 현장에서 마노메타와 실속계측기로 실속을 계측하는 모습이다.

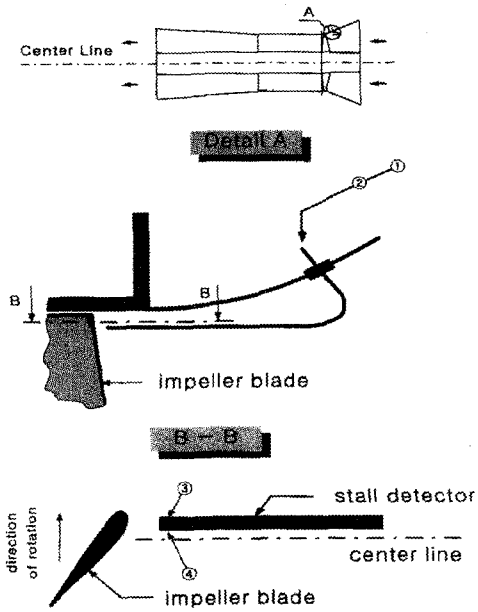


Fig. 6 Stall Detector(2)

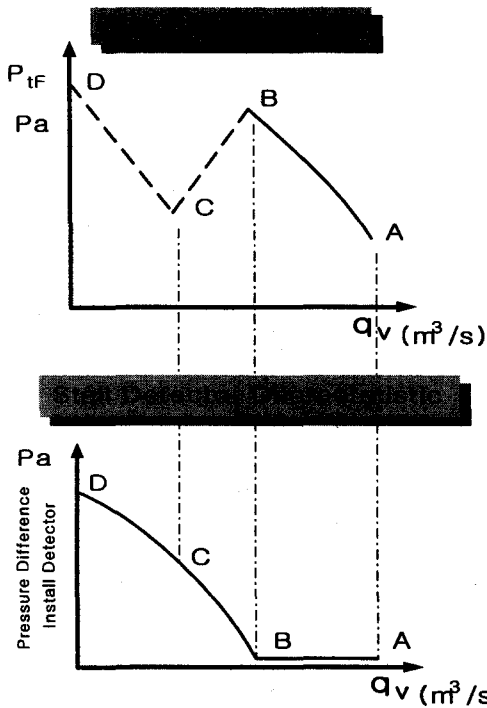


Fig. 7 Pressure Difference in Stall Detector

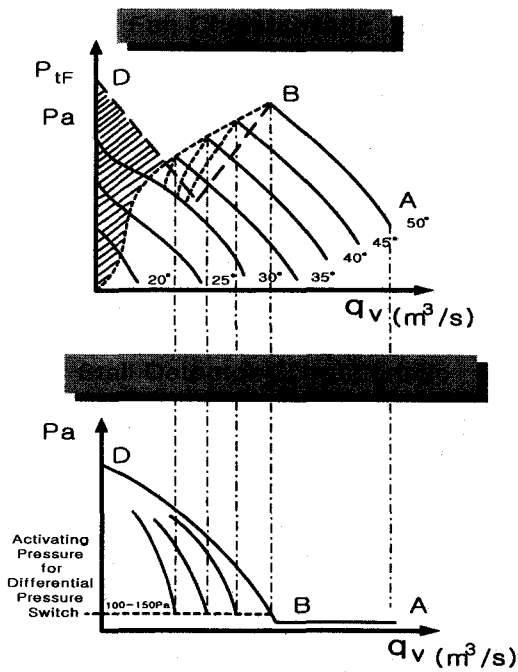


Fig. 8 Activating Pressure for Differential Pressure Switch

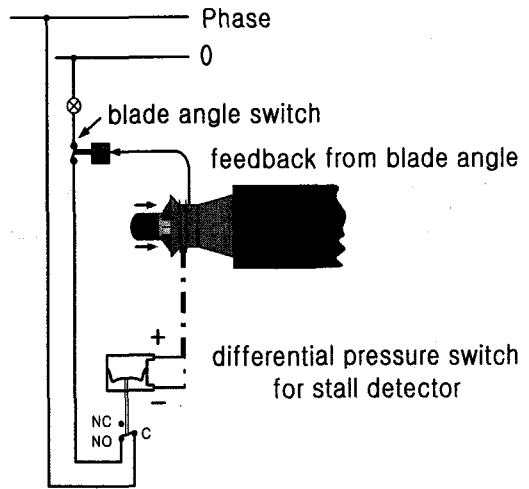


Fig. 9 Differential Pressure Switch for Stall Detector

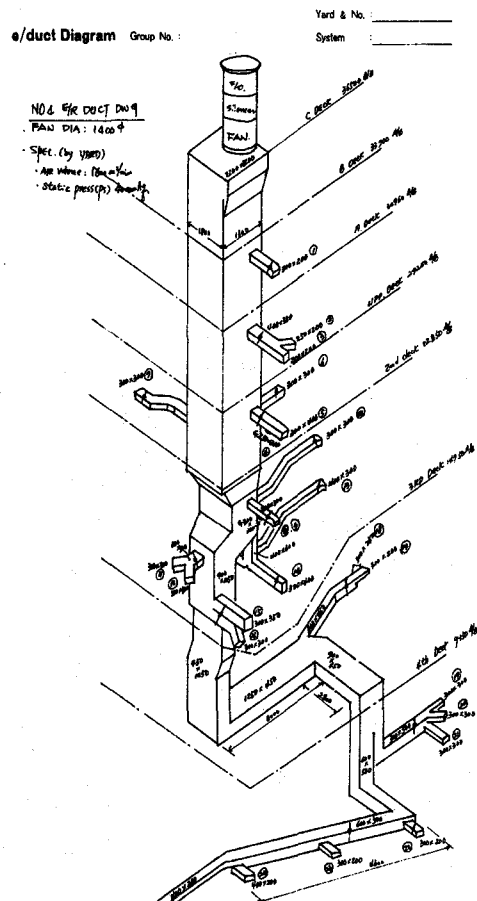


Fig. 10 Appearance of Rectangular Duct

그림9의 전기회로에서처럼 팬이 실속영역에 있을 때는 미리 설정된 차압스위치로 팬을 정지시킬 수 있고, 각도가 낮은 경우에 발생하는 차압은 경보장치와 분리하거나 시스템설계시 분리하도록 한다. 차압 및 각도선정은 그림8과 같이 200~250 Pa에서 작동되도록 조정하지만 제작사의 특성곡선에 따라 안정된 범위로 설정할 수 있다.

#### 4. 대형 축류팬의 실속 손상 사례

사진1 및 사진2는 최근 국내 대형조선소의 신조선박에 설치된 내경 1400mm이상의 축류팬에서 실속운전에 따라 발생한 손상사례 사진이다. 한편 사진3은 선박에서 실속을 계속하는 장면을 나타내고 있다. 사진4는 장방형 덕트의 출구측에서 얻은 실속상태에서 풍량변화 및 관내 압력변동을 풍속계와 피토판으로 측정한 것으로 크게 다음과 같은 문제점이 나타났다.

첫째, 과도한 설계 요구조건으로 영각과 압력을 최대한 높게 선정하였으나 현장 설치시에는 덕트의 마찰손실과 실속에 대한 인식이 부족하였다.

둘째, 팬의 입출구측 풍속이 15~25 m/s로 높으나 고속덕트인 원형덕트를 채용하지 않고 장방형덕트를 채용하여 덕트의 접속방법, 굴곡부에서 발생하는 관내 와류손실, 곡관 내부에 설치해야 하는 split guide vane의 누락, 분기부의 풍량배분 등에 따른 치수 선정 등이 미흡하였다.

셋째, 분기 덕트의 취출구나 주관의 공기분배용 댐퍼를 설치할 때 각 구간에서의 정압을 유지시키기 위한 배치방식에 대한 검토가 부족하였고, 분기 덕트의 고장이나 인식 부족으로 여러 개소의 덕트를 닫은 상태로 팬을 실속운전하여 블레이드가 피로 파괴되었다.

팬을 실속영역에서 운전하게 되면 임펠러의 익근부에 반복 피로응력이 집중되어 사진2에 나타나 것과 같이 균열선(hair crack)이 생긴다. 이것은 앞에서도 언급했듯이 임펠러 블레이드의 영각을 높게 선정함에 따른 실속현상을 의미한다.

다음으로 축류 압축기의 실속과 같이 덕트나 밸브기구의 교축때 일어나는 실속현상과 팬과 함께 설치되는 덕트기구에 나타나는 문제점에 대하여 소개하였다. 덕트는 형상에 따라 크게 사진4 및 사진5와 같은 원형(spiral duct), 사진6과 같은 장방형(rectangular duct)으로 구별된다. 관로손실 측면

에서 보면 원형덕트가 우수하다고 잘 알려져 있으나 선박에서의 경우는 설치비용이나 공간이 다소 증가하는 단점이 있다. 최근에는 원형덕트의 자동화 생산기술의 발달로 인하여 대형송풍기의 경우에는 비용의 차이가 감소하고 있는 추세이므로 환기구조가 대형일 때는 대형 축류팬과 원형덕트를 병용하는 것이 유리하다.

덕트의 주관이나 분기관의 말단부에는 유동방향과 풍량을 조절하기 위하여 댐퍼기구가 사용되는데 이러한 댐퍼기구는 사진6 및 사진7과 같이 노후, 고착 및 사용자의 무관심 등으로 닫혀있는 상태로 운전되면 취출구의 교축으로 관내압력이 증가하여 임펠러의 손상을 초래하게 된다. 이러한 경우에는 닫힌 상태에서도 일정한 유량이 흐를 수 있는 반폐형 구조 또는 다공형 댐퍼(perforated disk) 등을 채용할 필요가 있다.

선박의 기관실과 같은 대형구역에는 여러 대의 팬을 설치하여 급기나 배기를 한다. 이때에는 각층의 풍량 배분시에 정압배분도 함께 고려해야 한다. 흡입구와 취출구의 위치는 실내 기류가 원활히 흐르도록 배치해야 하며, 덕트의 곡관부나 분기관, 합류관이 있는 곳에서는 공기의 와류현상과 마찰손실 등으로 인하여 형상에 따라 국부저항(local resistance)이 증가하므로 팬이 설치되는 장소로부터 최종 분기관까지는 덕트의 마찰 손실선도나 국부저항 손실표를 참고하여 덕트의 검토와 관내손실을 계산해 보아야 한다. 물론 이것은 쉬운 일이 아닐 것이다. 또한 선박에서는 항해중 주기관의 연소중에 소모하는 공기량과 정박중 주기관을 정지했을때에 필요한 공기량의 차이가 많이 있다. 정박중 주기관을 정지할 때 여러 대의 대형 기관실 급기팬을 운전하면 잉여공기로 인한 압력상승으로 팬이 손상되는 사례도 확인하였다.

사진7은 원형 덕트를 설치한 경우이다. 대형축류팬이 손상된 원인을 조사한 결과 주관과 분기관에 설치된 날개형 댐퍼들이 완전히 닫히거나 부분적으로 닫힌 상태에서 팬이 운전되어 취출구측에 배압이 증가하므로 실속운전이 되고 블레이드가 손상된 사례이다. 따라서 대형 팬의 설계시 댐퍼기구의 변형 등에 대한 내구력도 고려하여야 하며 취급자들도 댐퍼기구를 개폐할 때는 취출구측을 교축할때 배압상승으로 팬이 손상될 수 있다는 점을 깊이 인식할 필요가 있다.

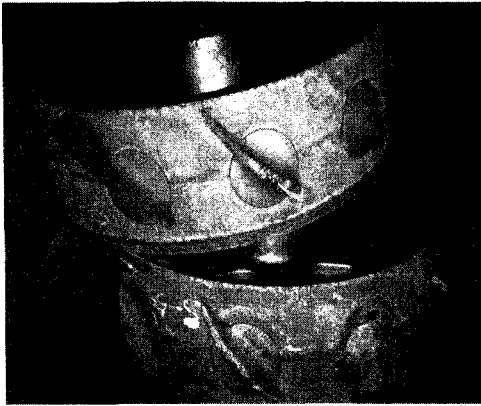


Photo 1 실속으로 팬블레이드가 손상된 모습으로 크랙이 진전되다가 파손됨

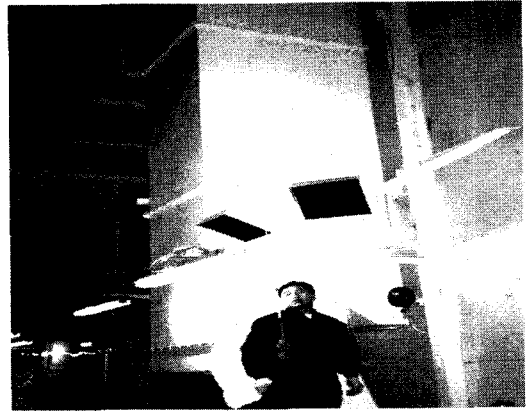


Photo 4 피토우관과 풍속계로 기관실내에 설치된 덕트 주관과 분기관의 풍속과압력을 계측

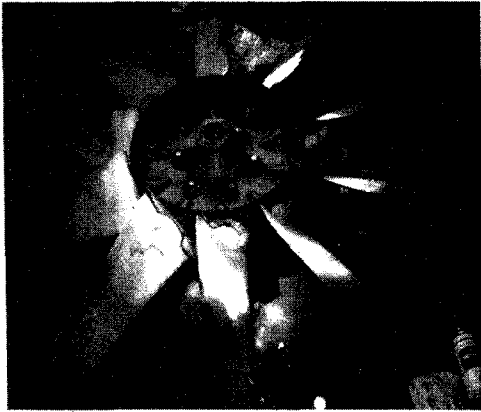


Photo 2 실속운전중인 팬의 임펠라를 취외하여 칼라-체크를 한 결과 헤어 크랙을 확인

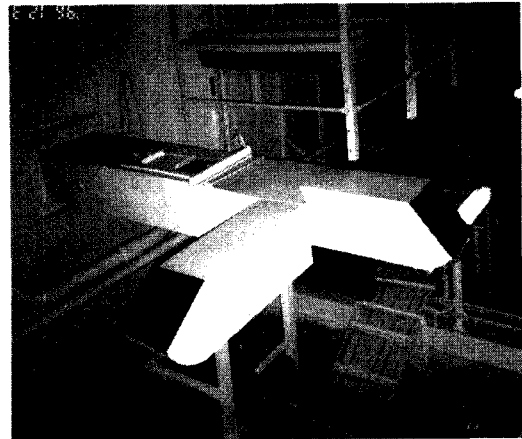


Photo 5 선박에 설치된 장방형 덕트와 분기관

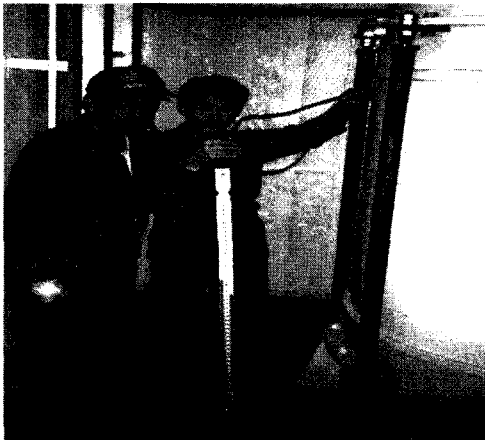


Photo 3 마노메타와 계측기로 실속을 계측

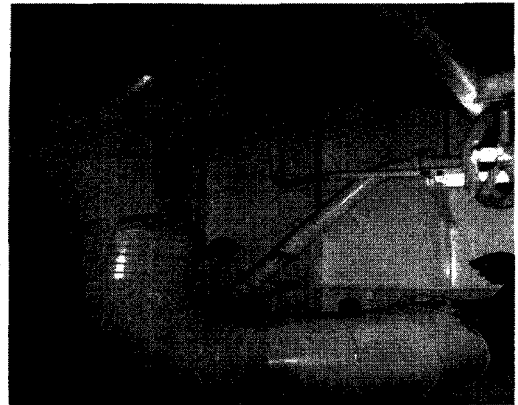


Photo 6 원형덕트의 주관내부에 설치된 풍량조절 댐퍼가 닫힌 상태로 고착되어 배압이 상승



Photo 7 원형덕트 분기관 댐퍼의 날개가 닫혀있어 배압이 상승한 경우

## 5. 결론

대형 축류팬에서 임펠러의 영각을 높게 선정하는 경우에는 블레이드의 압력면과 배면에서의 유동특성이 크게 불균일하여 실속을 유발하게 되고 소음과 진동이 증가한다.

이러한 실속으로부터 팬의 손상을 방지하기 위해서는 팬의 특성곡선에서 실속영역내의 최적 효율점을 선정하고 팬을 설치하는 주변조건을 충분히 검토하여야 한다. 팬 입구부에 inlet cone을 설치하거나 벽면으로부터 최소한 팬의 직경만큼 공간을 확보하여 유입 유동특성이 양호하도록 고려하여야 한다. 아울러 출구부의 덕트형상 선정과 각 구획으로 분기되는 공기량의 배분 그리고 댐퍼의 형상 등이 종합적으로 검토되어야 한다.

실험 및 실무경험을 토대로 대형 축류팬의 선정 시 고려사항을 다음과 같이 요약하였다.

1) 대형 축류팬을 선정하여 현장에 설치했을 때에는 간단한 측정기구로 실속치를 측정하여 문제점을 개선할 수 있으며, 운전중 압력을 자동인식하여 팬을 보호하는 경보시스템을 활용하여 실속에 따른 손상을 미연에 방지할 수 있다.

2) 영각을 높게 선정할수록 현장의 설치조건에 대한 종합적인 설계 검토가 필요하다

3) 대형 축류팬은 저속용의 장방형 덕트보다 고속용에 적합한 원형 덕트를 채용하는 것이 바람직하다. 또한 분기 덕트의 취출구마다 설치하는 댐퍼기구는 취급자의 무관심으로 닫아 두더라도 다소의 유량을 통과시킬 수 있는 반폐형이나 다공형 댐퍼를 설치 할 필요가 있다.

4) 선박의 기관실이나 보일러실, 공장, 창고 등과 같이 연소용 급기팬으로 사용하는 경우에는 공기의 소모량에 적절히 대응할 수 있는 변풍량 방식(variable air volume system)을 채용하되 송풍기 덕트내의 정압 상승으로부터 팬을 보호하기 위하여 풍량 조절댐퍼와 실속 계측장치를 설치하여 자동으로 급기구역내에서의 압력 상승에 대응하는 장치가 필요하다.

5) 팬이 설치된 현장에서 실속계측기와 마노메타로 측정한 결과 블레이드를 통과할 때의 계측값은 60mm WG 이하가 바람직하다. 실속계측기상의 차압이 80-100mmWG 에서는 공기의 유동특성이 불안정해지고 팬의 진동과 맥동이 증가하며, 100 mmWG 이상에서는 급격한 진동과 이상음이 발견된다.

축류팬과 관련한 향후의 연구과제로는 반복 피로응력으로부터 블레이드의 절손을 방지할 수 있는 값싼 블레이드 재질과, duct loss를 쉽게 계산할 수 있는 실용 software 계산 프로그램의 개발이 필요하다고 판단하였다.

## 후기

본고는 Nordisk ventilator co. A/S사의 자료를 기초로 하였으며, 원고의 집필에 조언하여 주신 한국해양대학교 이영호교수님과 목포해양대학교 조대환교수님 그리고 대학원생 서민식군, 세광제전 한종석씨에게 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) 김영득, 김성구, 최상호, 1991, 유체기계, 도서출판 남양문화, pp. 215-232.
- (2) 신치웅, 1997, 공기조화설비, 기문당, 덕트와 부속기구 pp.185-254.
- (3) 조강래, 실속과 서어지, 유체기계 연구개발 협의회 소식, 제2호, pp.22-24.
- (4) 조강래, 실속과 서어지, 유체기계 연구개발 협의회 소식, 3호pp.17-20.
- (5) 김만용, 김진구, 1996, 터어보 공기기계에서 발생하는 제반현상, 한국박용기관학회지, 제20권제5호, pp.458-467.
- (6) Nordisk Ventilator Co. A/S, Technicalal book