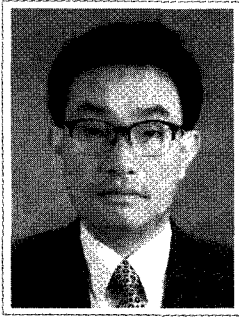


## 유체에 의한 침식 시험 장치

김 홍 회

한국원자력연구소 동적손상평가실장



**빠**

른 속도로 이동하는 유체가 반복적으로 충돌하여 구조물에 손상을 끼치는 경우가 군수·항공·우주 분야, 원자력/화력 발전소·조선·자동차 산업 등 여러 분야에서 중요한 문제로 제기되고 있다.

그 대표적인 예로는 습분을 함유하는 비·안개·구름 등을 통과하는 비행기의 동체나 유리, 헬리콥터의 블레이드, 미사일 동체, 그리고 선박의 스크루, 원자력발전소의 경우 증기 터빈·증기발생기·밸브 등을 들 수 있다.

특히 군수 분야에서 미사일 감지기를 보호하는 덮개 재료(Radome)는 미사일이 음속 이상으로 비행하면서 공기 중의 습분에 의해 덮개 재료가 파괴되어 기능을 발휘할 수 없는 경우가 있으며, 헬리콥터의 날개는 선 속도가 커서 우천시 손상은 물론 비행이 중단되는 경우도 있다.

이러한 구조물 및 부품들은 각각의 환경 속에서 유체와의 반복적인 고속 충돌에 의해 높은 충격 압력을 받게 되는데, 구조물을 이루는 재료에 발생된 충격 압력은 재료의 피로 한계(endurance limit), 즉 손상을 받지 않는 최저 응력, 또는 극심한 환경의 경우 재료의 항복 강도(yield strength)를 초과하여 부품 재료의 손상 또는 손실을 초래하게 된다.

### 유체 침식

유체와 부품 재료가 고속 충돌시 재료는 충격 압력에 의해 손상을 받게 되어 결국에는 재료의 손실이 일어난는데, 이 현상을 침식(erosion)

이라 한다.

재료의 침식은 충돌 물질(projectile)과 대상 물질(target)의 물리적 성질인 임피던스(임피던스,  $Z = \text{밀도} \times \text{음속}$ )에 따라 크게 3 가지로 분류될 수 있다.

대상 물질의 임피던스가 충돌 물질에 비해 아주 큰 경우( $Z_{\text{projectile}} < Z_{\text{target}}$ ), 대상 재료는 탄성적 반응(elastic response)을 경험할 가능성이 크다. 예를 들면 경도가 크고 취성(brittleness)이 큰 세라믹 물질이 물방울에 의해 충격을 받는 경우가 여기에 속한다.

대상 물질의 임피던스가 충돌 물질에 비해 아주 작은 경우( $Z_{\text{projectile}} > Z_{\text{target}}$ ), 예를 들면 세라믹 입자들이 상대적으로 연한(soft) 금속에 충돌하는 경우 대상 물질은 탄성적/소성적 반응(elastic/plastic response)을 경험한다. 이것은 주로 화력 발전소에서 심각한 문제로 부각되는 SPE(solid particle erosion)와 밀접한 관련이 있다.

마지막으로 두 물질의 임피던스

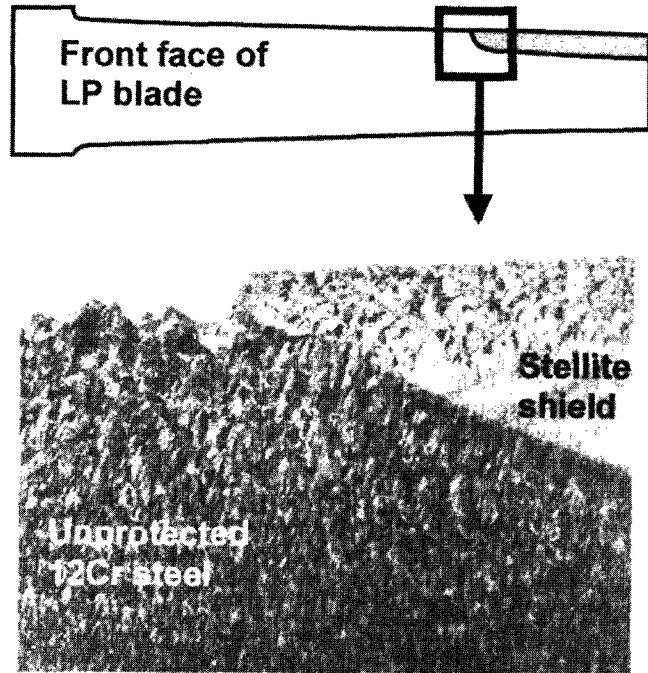
가 비슷할 경우 대상 재료는 앞선 두 경우 사이의 천이 반응(transition response)을 경험한다.

그러나 현재까지 정확한 기준은 확립되어 있지 않은 상태이며 대부분의 경우 유체와 접촉되어 사용되는 재료는 합금/금속 또는 표면 처리된 합금들인데, 실제 손상 양상은 탄성적 반응과 소성적 반응을 동시에 경험한다고 볼 수 있다.

유체에 의한 구체적인 손상 거동을 살펴보기 위해 원자력발전소의 증기 터빈 블레이드를 고려해 보자. 원자력 터빈 블레이드의 경우에는 전 부분이 습기 영역이기 때문에 증기와의 접촉에 의한 블레이드의 침식을 방지하기 위해 구조 재료로서 12Cr강이나 17Cr-4Ni강(17-4PH)이 사용되고 있고, 특히 저압 최종단 블레이드의 선단 증기 입구 측에는 증기중의 물방울에 의한 침식이 극심하여 인성 및 내침식성이 탁월한 Co계 합금 (Stellite 6B)이 침식 방지 재료로서 은 납땜 또는 용접에 의하여 취부되고 있다.

그러나 <그림 1>에서 보는 바와 같이 일정 시간 사용 후에는 심하게 침식되며, 톱니 같이 날카로운 표면을 갖는 전형적인 유체에 의한 파손 양상을 초래하여, 진동에 의한 안전, 열효율 문제를 야기시킨다.

특히 터빈 내 습분이 매우 높을 경우에는 내침식용 스텔라이트는 기존 구조 재료와 분리되는 현상도



<그림 1> 7년 가동된 터빈의 침식 현황

발생한다.

고온·고압의 열기관인 증기 터빈은 고속 회전체이고 대동력을 발생시키는 원동기로서 이의 손상 및 사고는 열효율에 직접적인 영향을 미친다.

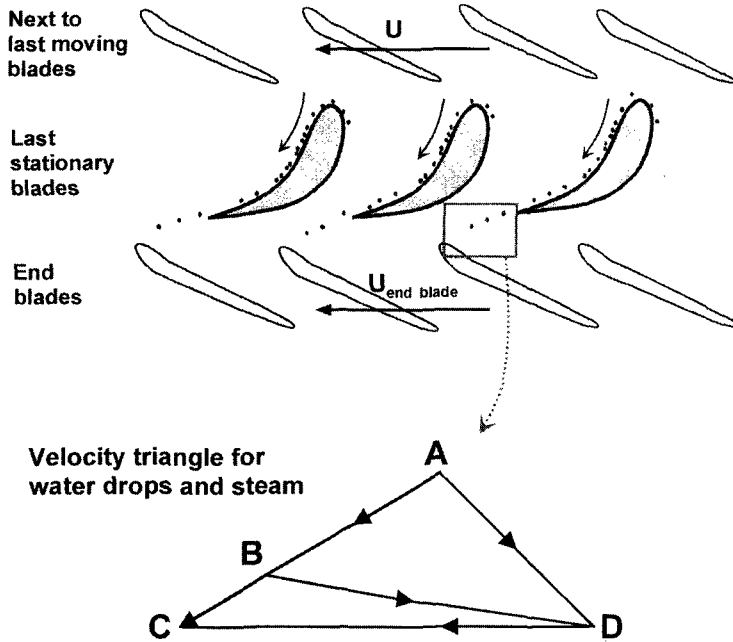
실제로 국내 원전들에서도 블레이드의 파손으로 인해 설계 수명에 앞서 터빈 동익의 교체가 실시된 예가 상당히 보고되어 왔고, 또한 교체 후에도 계속적인 파손 현상을 보이고 있기 때문에 원전의 안전성 확보 및 가동률 향상, 그리고 수명 측면에서의 심각성을 드러내 왔다.

또한 보수시 막대한 보수 비용,

보수 기간 장기화와 운전 정지 손실은 경제성 저하를 야기할 수 있으며 이는 곧 원전의 안전성 위협 또는 사회적 불안감 조성에 직결되는 문제이기도 하다.

<그림 2>에 증기 터빈 내에서 극심한 사용 환경에 속하는 LP(low pressure) 블레이드 최종단에서의 습분 형성 및 충돌 거동을 도식화하였다.

LP section에서는 HP (high pressure) section으로부터 나온 증기가 LP section으로 들어갈 때 단열 팽창을 하게 되고 포화 응결 조건보다도 낮은 온도에서 응결이



(그림 2) 증기 터빈의 침식 모식도

일어나기 때문에 터빈 내에서 가장 많은 습분을 형성한다.

이러한 습분은 블레이드와 맞물려 있는 guide vane/stator를 통과하면서 수십 $\mu\text{m}$ ~수백 $\mu\text{m}$ 의 두께로 쌓이게 되며 그 위의 증기 흐름에 따라 다시 그 크기가 큰 습분으로 합쳐져 이동 블레이드와 충돌하게 된다.

블레이드의 최종단으로 갈수록 블레이드의 선 속도는 증가하기 때문에 최종단 블레이드의 바깥쪽으로 갈수록 심한 침식이 발생하게 된다.

LP 블레이드 최종단에서의 습분과 재료의 충돌을 속도 성분으로 나타내고자 속도 삼각형(velocity

triangle)을 (그림 2)의 하부에 도식화하였다. 여기서 AC는 스팀 속도, BC는 물방울 속도, DC는 이동 블레이드 속도, AD는 블레이드와 스팀의 충격 속도, BD는 블레이드와 물방울의 충격 속도를 각각 나타낸다.

이 그림으로부터 알 수 있는 것은 stator의 trailing edge에서 형성된 물방울은 스팀에 비해 상대적으로 무겁기 때문에 자체 무게로 인해 가속되지 못하고 스팀 속도(AC)에 비해 느린 속도(BC)로 이동하지만, 이동 블레이드와의 충격 속도(BD)는 스팀(AD)에 비해 훨씬 더 크다

는 것과 물방울의 충격 속도의 방향과 이동 블레이드의 속도 방향 사이의 각이 아주 작기 때문에 블레이드의 leading edge가 가장 심한 변형을 받는다는 것이다.

이러한 충격 속도가 큰 물방울이 재료에 연속 또는 불연속적인 충격을 가할 때 부품 재료에 계속해서 접촉 압력을 발생시키고 이 접촉 압력은 물의 정상 흐름에서 보다 훨씬 높은 값을 갖는데 보통은 재료의 피로 한계나 항복 강도 보다 크므로 재료는 손실을 경험하게 된다.

**침식 방지 기술**

이러한 유체에 의한 침식을 방지하기 위해 한국원자력연구소를 비롯하여 국내외적으로 표면 처리 기술을 이용하여 발전소의 수명 연장 및 견전성 및 성능 향상을 하려는 많은 노력들이 진행되어 왔다.

한국원자력연구소에서는 1993년부터 1996년까지 터빈 블레이드의 침식 방지를 위하여 12Cr강과 stellite 6B에 이온 플레이팅(Ion Plating) 방법으로 TiN을 증착하여 표면 개질된 시편을 영국 Cambridge대학의 Cavendish Lab.으로 보내어 침식 저항성을 연구하였고, 삼성중공업에서는 증장 비용 Bushing에 비정질 코팅을 적용하려는 시도가 있었다.

KIST에서는 구조용 비정질 코팅

층의 내식, 내마모 특성과 열처리 및 작업 조건과 구조 해석을 수행한 바 있고, 한국전력공사에서 보일러 튜브·펌프 임펠러 등에 비정질 재료를 일부분 적용하고 있으며, 그 효과가 우수한 것으로 입증되어 그 적용 범위가 점차 커지고 있는 실정이다.

또한 한국중공업(현 두산중공업)에서는 GE speculation에 따라 터빈 블레이드에 화염 경화(flaming hardening) 공정을 연구하고 있다.

국외의 경우 미국의 GE·Westinghouse 및 독일의 ABB사에서는 stellite 6B 대신에 블레이드 재료를 화염 경화 공정을 이용하여 침식을 방지하고자 하는 노력을 기울이고 있고, 프랑스의 GEC Alsthom에서는 12Cr 합금 대신 침식 및 부식 저항성이 큰 Titanium 블레이드에 TiC를 증착하여 침식을 방지함으로써 증기 터빈의 수명 연장을 꾀하고 있다.

그러나 이러한 표면 개질된 재료가 고속 유체의 흐름 환경하에서 어느 정도 수명을 연장시키는가에 대한 평가는 아직 확립되어 있지 않은 상태이다.

표면 처리 기술 방법을 통하여 적용 환경에 필요한 성능을 재료에 부여하기 위해서는 표면 개질 재료 및 처리 공정 방법에 따라 최적의 성능을 유지할 수 있도록 사용 환경 하에서 손상 평가 기술도 함께 개발되어야 한다.

그간의 유체에 의한 재료 손상 사례를 살펴보면 원자력발전소 등 산업용 발전 부품 기기는 유체 충격으로 인한 재료의 실제 수명이 설계 수명보다 짧은 것이 일반적이다.

이는 부품 재료 설계시 가동중 손상 영향 인자와의 상관 관계에 대한 연구 및 데이터 부족에서 비롯된다.

즉 정확한 부품 재료 설계를 위해서는 발전소 가동중 부품이 받는 동적 손상 인자를 고려하여야 하나 설계시 가동중에 일어날 수 있는 동적 손상 인자를 모두 파악할 수 없어 정적 손상 평가 값으로 대체해왔기 때문이다.

정적 재료 손상 평가 기술로는 부식 평가 또는 기계적 성능 평가와 같은 평가 기술이 있으나 이는 실제 기기 가동 조건 및 환경에 부합되지 않는 기술로서 동적 수명 예측에 정확성을 기할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

따라서 부품 및 기기 요소 재료의 동적 손상을 예측, 평가하여 설계에 필요한 자료를 공급하고 표면 개질 및 대체 재료 수명을 예측하여 부품 파손에 따른 경제적 손실을 미연에 방지하기 위해서는 가동 조건 및 환경에 부합하는 적합한 동적 손상 시험 장치의 개발이 필수적이다.

동적 손상 평가를 위한 침식 시험 장치의 기준은 현재 ASTM G-73을 표준으로 하고 있다.

그러나 ASTM G-73은 liquid

jet impact로써 moisture erosion과는 상당히 다른 양상을 갖는다. 즉 moisture erosion처럼 discrete한 물방울이 재료 표면에 충격을 주는 것이 아니라, 연속적인 water column이 충격을 주게 된다.

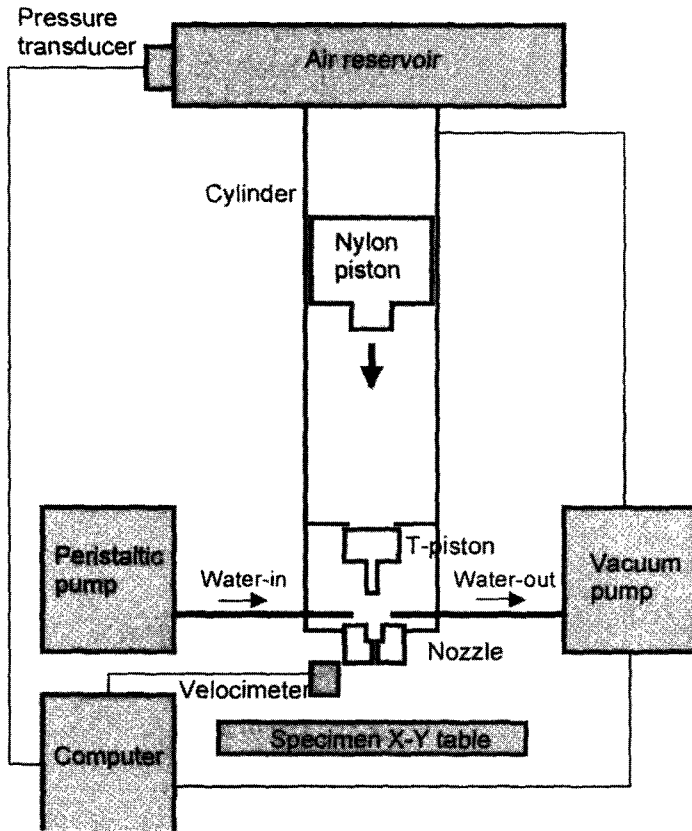
각각의 충격 압력 값은 상당히 다르다. Water column일 때의 충격 압력 값은 'Bernoulli' 정의에 의해  $\rho V^2/2$ ( $\rho$ 는 물의 밀도,  $V$ 는 물의 이동 속도)이고 discrete한 물방울일 때는 'water hammer' 이론에 의해  $\rho CV$ ( $C$ 는 물 내에서의 음속)가 된다.

현재 세계적으로 사용되는 침식 장치의 종류에는 Whirl arm type(미국·Bell aerospace company) 과 Disk rotary type(영국 Cambridge 대학·프랑스·체코 등)이 있다.

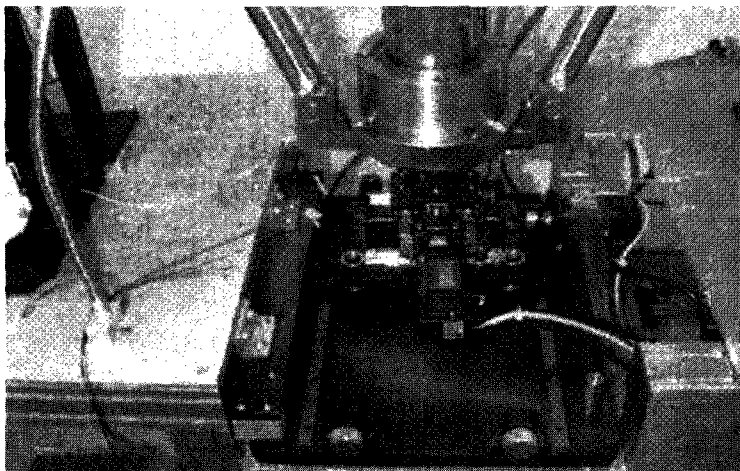
Whirl arm type 또는 disk rotary type은 300% 이상의 물방울 입사 속도는 얻을 수 없을뿐 아니라 설사 300% 이상의 속도를 얻는다 하더라도 'air shock'이 발생할 가능성이 있다. 또한 시편을 disk에 장착하였을 때 균형 문제로 인해 진동의 소지가 있으며 소음이 매우 심하다는 단점이 있다.

### 유체 침식 시험 장치의 개발

최근 한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀은 유체에 의한 침식



〈그림 3〉 침식 장치 모식도



국내 유일한 물방울 충격 시험 장치

을 체계적으로 시험할 수 있는 장치를 국내 최초로 개발하는 데 성공하여 독자적인 동적 손상 시험 기술을 확립하였다.

물을 이용한 경우 최대 물방울 발사 속도가 600m/sec에 이르고 연속 발사가 가능하며(4 impacts/min), 물 입자 직경은 250 $\mu$ m 정도로써 원자력 증기 터빈, 증기발생기, 해수 펌프 임펠러에서 일어나는 침식 및 cavitation 연구 뿐만 아니라 missile radome 재료의 rain erosion 연구에 유용하게 사용될 수 있는 장치로 평가되며 장치의 기본 설계는 특히 출원되었다.

특히 유체의 속도를 조절함으로써 DTV(Damage Threshold Velocity), 즉 재료의 침식을 일으키는 최저 속도를 평가할 수 있으며, 유체의 종류 및 속도에 따라 침식률을 결정할 수 있고, 단일 충격 및 연속 충격을 자유롭게 조절할 수 있다는 점에서 각 분야에서 요구하는 모사 시험을 성공적으로 수행할 수 있게 되었다.

〈그림 3〉 〈사진〉에 본 연구소에서 제작한 침식 시험 장치의 설계 및 형태를 나타내었다. 상부의 공기 저장 챔버에는 대기압 이상으로 공기가 가압된다. 실린더 내 나일론 피스톤은 그 상부에 대기압 이하의 진공을 유지함으로써 실린더 상부로 이동한다.

나일론 피스톤은 상하에 발생된

압력 차이에 의해 빠른 속도로 하강한다. 나일론 피스톤은 T-piston을 치게 되고, T-piston은 노즐 내의 물을 치면서 물을 내보낸다.

노즐 내의 물은 연동 펌프(peristaltic pump)에 의해 일정량이 연속적으로 공급되며, 노즐 내 물이 일정량 이상이 되면 진공 펌프에 의해 연속적으로 뽑히도록 하여 노즐 내에는 항상 일정량(약 0.15 cc)의 물이 유지된다.

모든 동작은 연속적인 동작으로 이루어지며 computer control 된다. 물의 속도는 노즐 바로 밑에 설치된 광속도계에 의해 측정되며 정확성을 기하기 위해 추가적인 고속 카메라 촬영에 의해 비교 측정된다.

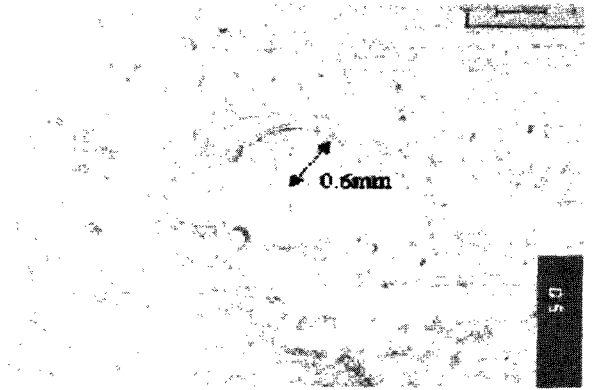
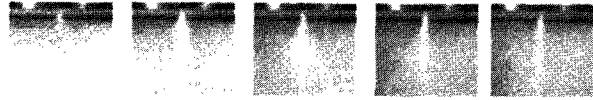
광속도계는 빛을 상하 8mm에서 각각 보내주고 물이 빛을 통과시 신호를 받음으로써 측정된다.

침식 시험시 노즐 직경과 길이는 각각 0.6mm, 3mm이고 노즐에서 시편까지의 거리와 시편의 위치는 X-Y-Z 시편 테이블에 의해 자유로이 변화된다.

〈그림 4〉는 고속 카메라에 의해 촬영된 물의 발사 순간 모습과 블레이드 구조 재료인 12 Cr 강의 손상 표면 사진을 보여준다.

### 향후 전망

현재까지 유체에 의한 침식 현상을 구현할 수 있는 장치는 세계적으



〈그림 4〉 400m/sec로 발사하였을 때 고속 촬영 사진(위). 450m/sec로 발사된 물방울에 의한 12Cr steel의 표면. 물방울의 중심에서는 압축 응력으로 인하여 변형이 나타나지 않고 중심에서 벗어나면서 표면파에 의한 재료 현상이 보인다(아래).

로 미국·일본·영국 등 몇몇 나라에서 보유하고 있으나 각국의 사용 용도에 맞게 특별히 제작되어 국내에서 개발된 재료의 외국에서 침식 시험이 불가하여 그 동안 유체에 의한 침식으로 인한 경제적 손실을 알면서도 그 대책이 없었다.

이번 한국원자력연구소에서 개발된 침식 시험 장치는 산업계에서 시급히 요구되는 열교환기·펌프 날개(impeller) 재료 침식 저항성을 측정할 수 있을 뿐 아니라, 유체 내에서 고속으로 회전 또는 이동하는 부품의 침식 저항성 측정이 가능하도록 제작되어 일반 산업계, 특히 석유 화학 플랜트 부품·선박 부품·항공 부품 등의 재료 손상을 예

측 및 평가할 수 있게 되었다.

특히 원전 설계를 위한 재료 손상 평가, 장수명 요건 확립 및 데이터 베이스 구축에 기여함으로써 원자력발전소의 내구성 및 안전성 향상을 도모할 수 있으므로 핵심 시험 장치로서 기능을 발휘할 것으로 예상된다.

또한 국산 원전 기기 부품 소재의 신뢰도 향상 및 향후 원자로 기기 부품의 국산화율 향상 및 고품질 소재 제조를 위한 기반 평가 기술로 활용 가능하며, 국제 경쟁력 향상을 위해 기술 이전 사업을 통하여 기술 전수 및 타산업체에 이전하여 기술 파급 효과를 극대화할 수 있을 것으로 판단된다.