

## 유압시스템의 입자 침해 침식의 실험적 고찰

### An Experimental Investigation of Particle Impingement Erosion in Hydraulic Systems

이재천\*, 김성훈\*\*  
Jae-Cheon Lee, Sung-Hoon Kim

#### ABSTRACT

This study assesses the wear process of particle impingement erosion which is a major source of erosion among fluid power components. First, Bitter's theory was modified to simplify engineering calculations. Second, actual experiments were conducted to validate the modified equation. And the effect of concentration and size distribution of impinging particles was tested. Little deviation from the prediction of the modified equation was observed. To develop complete analytical approach to the erosion mechanism, further experimental data are required to establish a correlation with other engineering parameters.

주요기술용어 : Particle impingement erosion(입자 침해 침식), Deformation wear(변형 마멸), Cutting wear(절삭 마멸), Particle impingement angle(입자 침해 각도), Threshold angle(임계 각), Impact angle(충돌각), Erosion rate(침식률)

#### Nomenclature

$C$	: 상수
$E_1, E_2$	: 구형과 평탄형 물체의 탄성계수
$M$	: 침해 입자의 총질량
$Q$	: 총 마멸량
$Q_c, Q_d$	: 절삭 마멸량과 변형 마멸량
$T_L$	: 부하 토크
$V$	: 입자의 속도
$d$	: 입자의 밀도
$k$	: 임계 속도
$n$	: 상수
$a_1, a_2$	: 구형과 평탄형 물체의 Poisson 비
$y$	: 탄성 부하한계
$\alpha$	: 침해 입자의 충돌각

$\alpha_{ei}$	: 입구 충돌각
$\alpha_0$	: 입자가 표면을 떠날 때 수평속도 성분이 영이 되는 지점의 충돌각
$\epsilon$	: 변형 마멸 상수
$\psi$	: 절삭 마멸 상수

#### 1. 서론

침식 메카니즘의 해석은 유압 부품의 내침식성 설계를 위해 중요하다. 즉, 침식과정의 해석을 통해 각 유압부품의 마모 손실을 줄일 뿐만 아니라 침식의 부산물인 오염물질에 의해 각종 잠김(Lock) 현상이 발생하는 것을 방지할 수 있다. 특히 E. C. Fitch가 오클라호마 주립대학의 유압연구소에서 진행한 오염민감도 시험 결과에 의하면 유압시스템 내 미립자 이물질에 의해 각종 벨

\* 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

\*\* 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

브 스플이나 하우스징, 포펫, 릴리프 밸브의 시트, 니들 밸브 등이 심하게 침식될 수 있음을 알 수 있다.<sup>1)</sup> 그러나 이와 같이 침식 메카니즘 규명의 필요성에도 불구하고 복잡한 마멸 메카니즘과 일관된 실험의 어려움으로 인해 유압시스템의 침식에 대한 연구는 별로 진행되지 못하여 왔다. 침식과정의 마멸에 대한 이론적 공식은 J. G. A. Bitter<sup>2,3)</sup>에 의해 처음 제시되었으며, H. H. Neilson과 A. Gilchrest,<sup>4)</sup> R. M. Pai<sup>5)</sup> 등에 의해 발전되었다.

본 연구에서는 Pai의 공식을 기초로 유압시스템의 입자 침해 침식에 대해 수행한 시험과 그 결과를 보여주하고자 한다.

## 2. 이론적 모델

침식 발생시, 마멸의 두 가지 모드가 동시에 진행된다. 첫째 모드는 변형 마멸이며 둘째 모드는 절삭 마멸이다. 절삭 마멸은 침해하는 입자의 각도에 따라 두 가지 유형으로 나뉜다.<sup>6)</sup>

변형 마멸은 물체 표면에 부딪치는 침해 입자의 수직 방향 속도성분에 의한 것이며, 절삭 마멸은 수평 방향 속도성분에 의한 것이다. 입자의 수직 속도성분이 마멸의 임계속도보다 클 때 실제 마멸은 발생하기 시작한다. 또한 절삭마멸은 입자의 수평방향 운동량이 물체 표면을 절삭할 만큼 크지 않음에도 발생하는 유형과, 수평방향 운동량이 물체 표면에 침해할 만큼 클 때 발생하는 유형으로 구분된다.<sup>2)</sup>

J. G. A. Bitter에 의해 제시된 마멸 공식은 아래 식으로 표시된다.

$$Q = \begin{cases} Q_d + Q_{c1} & \text{for } \alpha \geq \alpha_0 \\ Q_d + Q_{c2} & \text{for } \alpha \leq \alpha_0 \end{cases} \quad (1)$$

식(1)의 각 변수는 다음과 같다.

$$Q_d = \frac{M \cdot (V \cdot \sin \alpha - k)^2}{2 \cdot \epsilon} \quad (2)$$

$$Q_{c1} = \frac{M \cdot V^2 \cdot \cos^2 \alpha}{2 \cdot \psi} \quad (3)$$

$$Q_{c2} = 2M \cdot C \cdot (V \sin \alpha - k)^{\frac{3}{2}} [V \cos \alpha -$$

$$C \cdot \psi \cdot (V \sin \alpha - k)^{\frac{3}{2}}] \quad (4)$$

$$C = \frac{0.288 \sqrt{d}}{y} \quad (5)$$

상기 Bitter의 식(4)는 그 값을 계산하기가 너무 복잡하다. 따라서 Neilson과 Gilchrest<sup>4)</sup>는 식(4)를 간략히 하여 식(6)을 제시하였다.

$$Q_{c2} = \frac{M \cdot V^2 \cos^2 \alpha \sin(n \cdot \alpha)}{2 \cdot \psi} \cdot n \quad (6)$$

그러나 식(6)를 도출하기 위해, Neilson과 Gilchrest는 침해각이 영이 되는 경우에만 침식이 발생하지 않는다는 가정을 사용하였다. 이 가정은 침식을 유발하는 임계속도가 충돌속도에 비해 상대적으로 아주 작은 경우에 유효하다. 그러나 임계속도가 큰 경우에는 적용할 수 없다.

따라서 Bitter의 식에 근사적으로 접근하면서 Neilson과 Gilchrest의 제한적 가정을 보완할 수 있는 새로운 모델이 Pai에 의해 식(7)과 같이 제시되었다.<sup>5)</sup> 무엇보다 새 모델에서는 임계 충돌각이 고려되었다. 즉, 침식 과정은 충돌각이 임계 충돌각보다 클 때 발생하며, 작을 때는 마멸이 발생하지 않는다.

$$Q_{c2} = \frac{M \cdot V^2 \cos^2 \alpha \sin[n \cdot (\alpha - \alpha_{ei})]}{2 \cdot \psi} \quad (7)$$

Fig. 1은 Bitter의 식(4)와 Neilson과 Gilchrest의

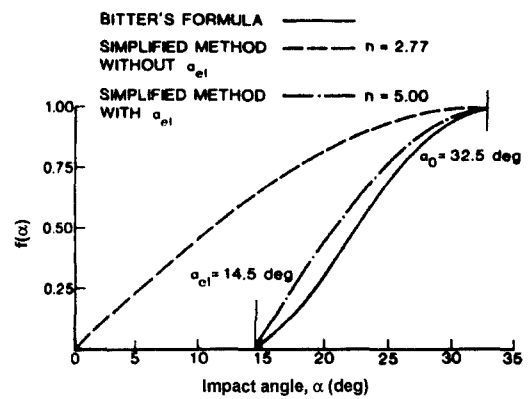


Fig. 1 Comparison of simplified functions with Bitter's formula ( $k/V=0.25$ )

식(6), 그리고  $P_{ai}$ 에 의해 제시된 식(7)의 결과를 비교하여 보여준다.

Fig. 1에서 보듯이 입계 충돌각을 이용해 간략화한 식(7)이 Neilson과 Gilchrest의 식(6)보다 Bitter의 식에 근접한 결과를 내고 있음을 알 수 있다.

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 실험적 변수 확인

$P_{ai}$ 의 모델 식(7)의 각종 변수들은 아래와 같이 구할 수 있다.

가. Hertz<sup>7)</sup>에 의거 입구 속도  $k$ 는 식(8)에 의해 구해진다. 또는 실험을 통해 표면에 수직으로 침해하는 입자의 속도를 점차 증가시켜 마멸이 발생하는 시점의 입구속도  $k$ 를 구할 수 있다.

$$k = \frac{T_L^2 \cdot \sqrt{y}}{2 \cdot \sqrt{10} \cdot d} \left( \frac{1 - q_1^2}{E_1} + \frac{1 - q_2^2}{E_2} \right)^2 \quad (8)$$

나. 식(1), (2), (3)에 충돌각,  $\alpha = 90^\circ$ 를 적용하여 변형마모상수  $\epsilon$ 을 구한다.

다. 식(1), (2), (3)의  $\alpha \geq \alpha_0$  경우의 침식률을 측정하여 절삭마모상수  $\phi$ 를 구한다.

라. 식(1), (2), (7)의  $\alpha \leq \alpha_0$  경우의 침식률  $Q$ 를 측정하여 상수  $n$ 을 구한다.

마. 아래 식(9)에 의해 입구충돌각  $\alpha_0$ 를 계산한다.<sup>5)</sup>

$$\alpha_0 = \frac{T_L}{2n} + \alpha_{el}, \quad \alpha_{el} = \arcsin\left(\frac{k}{V}\right) \quad (9)$$

바. 만약  $\phi < \epsilon$ 이면,  $Q = Q_{max}$ 의  $\alpha_{max}$ 는 식(1), (2), (7)을 이용하여  $dQ/da=0$ 의 극한값으로부터 구한다. 만약  $\phi \geq \epsilon$ 이면,  $\alpha_{max} = 90$ 이다.

#### 3.2 실험 장치 및 방법

침식률은 충돌 입자의 단위 질량당 발생한 침식량으로 정의된다. 침식률 측정에는 네 가지 매개변수들이 고려되는데, 충돌 속도, 농도 수준 (Concentration Level), 입자 크기 범위, 그리고 충돌각이다. 실험 중 온도는 일정하게 유지되었으

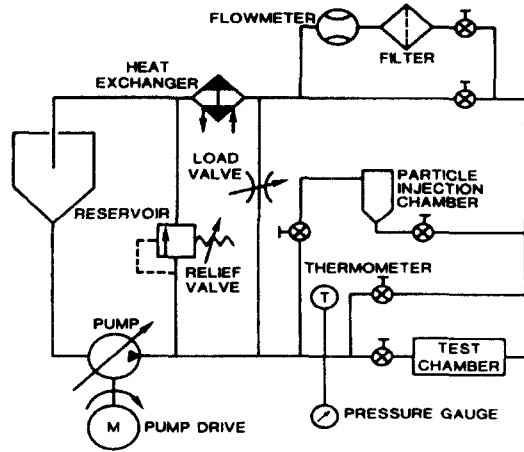


Fig. 2 Schematic for test system

며, 상기한 네 가지 변수들을 변화시키며 시험하였다.

시험장치의 구성은 Fig. 2에 제시한 바와 같다. 시편은 Fig. 2의 시험 챔버 내 지지대에 의해 고정된다. 충돌각도 조정을 위해 시편은 여러 가지 각도의 원추형으로 제작되었다. 챔버는 시편 주위에 평행한 유동모양이 나타나도록 입·출구의 위치와 크기를 설계하였다. 시편의 재질은 SAE 1020 냉연강으로 주요 물성치는 다음과 같다.

- 밀도 :  $0.008g_f \cdot sec^2/cm^4$
- Brinell 경도<sup>8)</sup> :  $160 \times 10^5 g_f/cm^2$
- Poisson 비 : 0.27
- 탄성계수 :  $2.4 \times 10^9 g_f/cm^2$
- 시험용 오염입자로는 특정한 입자 크기별 ACFTD<sup>9)</sup>가 사용되었으며, 기계적 물성치는 다음과 같다.<sup>10)</sup>
- 밀도 :  $2.66g_f \cdot sec^2/cm^4$
- Poisson 비 : 0.2
- 탄성계수 :  $7.4 \times 10^7 g_f/cm^2$

시험 중 특히 시료에 대한 오염입자 노출시간에 주의하였다. 분사된 시험오염입자의 성능저하(입자 분포도의 변화)와 시험 중 생성된 마멸 입자(Wear Abrasives)의 혼합을 고려하여 한 시료의 최대 노출시간을 30분으로 제한하였다.

침식으로 인한 시편의 중량감소를 정확히 측정하기 위해 Sartorius Model 2504 Single Pan An-

alytical Balance를 사용하였다. 계측기의 정확도는  $\pm 0.01\text{mg}$ 로서 최대 오차는  $0.08\text{mg}$ 이다. 계측기의 최대 측정 중량은  $100\text{g}$ 이고, 시편 한 개의 중량은 약  $25\text{g}$ 이었다.

### 3.3 실험 절차

정확한 오염 농도 조정을 위해, 유압시스템의 오일 체적과 분사되는 오염입자량을 알아야 한다. 또한 상기한 바와 같이 한 오염농도에서의 시험은 30분으로 제한하였다.

시험 절차는 다음과 같다.

- 1) 유압시스템을 가동하여 시험 챔버를 우회하여 유압유를 순환시키며 15분 동안 여과(Flushing)시킨다. 부하 밸브와 유량계 바이패스(Bypass) 밸브를 잠근다.
- 2) 시편을 세척한다. 시편 무게를  $0.01\text{mg}$ 의 정확도로 측정한다. 시편을 시험 챔버에 삽입한다.
- 3) 부하밸브를 서서히 잠가 유량이 원하는 값이 되도록 조정한다.
- 4) 유량의 방향을 필터와 유량계로부터 전환한다. 시험입자를 정량 분사한다.
- 5) 오염입자가 유압시스템 내 균일하게 분포되도록 5분간 유체 순환시킨다.
- 6) 오염유를 시험 챔버로 30분간 공급한다.
- 7) 시험 챔버로 오염유 공급을 중단한다. 시편을 제거한다.
- 8) 같은 시편에 대해 1)-7)의 과정을 총시험시간 2시간 동안 4번 반복한다.
- 9) 1)-8)의 과정을 여러 가지 유량, 오염입자크기, 오염농도의 조건에 따라 반복 시험한다.

### 3.4 실험 결과

시편의 탄성부하한계  $y$  등에 대한 정확한 값을 알지 못하므로, 입구속도  $k$ 를 식(8)의 이론식이 아닌 실험에 의해 측정하였고, 그 결과 약  $15\text{m/s}$ 이었다.

또한 시편의 침식 특성곡선을 얻기 위해 앞에서 언급한 각종 마멸 인자들과 상수들의 값을 알아야 한다. 이와 같은 인자들은 입자 운동체적의

변형을 줄이기 위해,  $40\mu\text{m}$  이상 크기의 시험오염 입자와  $62\text{m/s}$ 의 충돌속도 조건에서 실험적으로 측정되었다. 그 결과는 다음과 같다.

$$\epsilon = 3.378(\text{g} \cdot \text{m}^2)/(\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^2)$$

$$\phi = 2.110(\text{g} \cdot \text{m}^2)/(\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^2)$$

$$n = 2.63$$

충돌속도  $62\text{m/s}$  이외의 경우에 대한 각종 실험 결과들이  $\epsilon, \phi, n$ 와 함께 Table 1과 Fig. 3에 표시되었다. 실험 결과는 이론적 특성곡선과 매우 가까움을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 단순화한 Pai의 식이 실제 침식률을 예측하는데 유효하며, 이 경우 임계속도  $15\text{m/s}$ 가 적합함을 나타낸다.

그러나 충돌각이 임계각,  $\alpha_{ei}$ 에 가까워지는 영역에서는 실제 침식률이 이론치보다 크게 발생한다. 이것은 부분적인 난류유동의 영향에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 표면 근접부분의 난류유동이 입자들로 하여금 큰 각도로 표면 충돌케 하여 침식을 유발한 것으로 해석된다. 또한 충돌속도  $29\text{m/s}$  및 충돌각  $29^\circ$ 의 조건에서는 침식이 발생하지 않았는데, 이것은 임계속도가 실제 존재함을 증명하고 있다.

### 3.5 입자크기의 영향

Bitter의 이론식에 의하면 침식은 입자크기와 무관하다. 그러나 Fig. 4에서 보듯이 실제 실험에

Table 1 Test results

Impact velocity (cm/s)	Concentration level (mg/L)	Particle size range (micrometer)	Erosion rate, $10^{-6}\text{cm}^3/\text{gm}$ mass of particles impacted					
			Impact angle(deg)					
			15	25	40	50	60	90
2900	150	40-up	not-tested	0.000	0.632	0.816	0.563	0.373
	75	40-up	0.239	0.775	1.812	1.901	0.563	1.290
4150	150	10-up	0.470	0.902	1.715	1.841	1.379	1.152
		20-up	0.432	0.880	1.745	1.797	1.394	1.185
		40-up	0.357	0.835	1.849	1.946	1.446	1.245
	300	40-up	0.486	0.911	1.759	1.853	1.282	1.114
6200	150	40-up	1.820	3.802	6.106	5.226	4.492	3.270

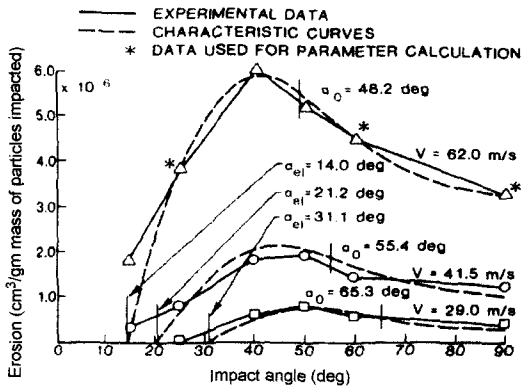


Fig. 3 Erosion characteristics at various impact velocities (particle size range=40 $\mu$ m-up, concentration level=150mg/liter)

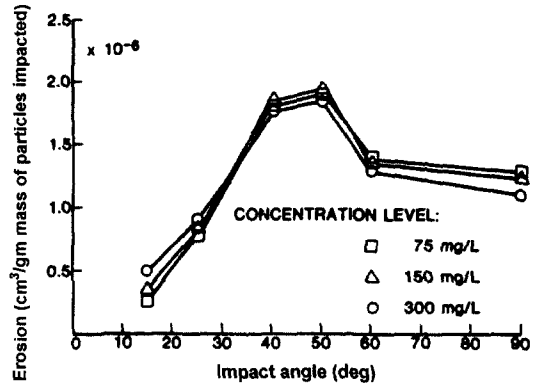


Fig. 5 Erosion rate vs. impact angle at various concentration levels (particle size range=40 $\mu$ m-up, impact velocity=41.5m/s)

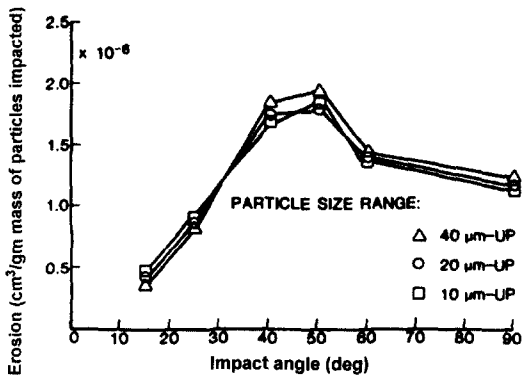


Fig. 4 Erosion rate vs. impact angle at various particle size range (concentration level=150mg/liter, impact velocity=41.5m/s)

서는 비록 작은 영향이긴 하나, 입자크기에 따라 충돌각이 광각과 협각일 때 마멸 발생량이 서로 다르다. 즉, 충돌각이 클 경우 입자가 클수록 마멸효과가 큰 반면, 충돌각이 작을 때는 입자가 작을수록 마멸효과가 증가하고 있다. 그러나 충돌각 약 50° 부근의 최대 침식발생 지점에서 입자가 클수록 침식률이 증가함을 보여준다.

이론적으로 침식의 주 원인은 충돌입자의 운동에너지이므로 시편에 부딪치는 입자의 총 중량이 같다면 침식발생량도 입자크기에 상관없이 같아야 한다. 그러므로 Fig. 4의 입자크기에 따른 침식률의 차이는 작은 입자의 운동에너지

때문인 것으로 판단된다.

### 3.6 오염농도의 영향

이론적으로 총 침식량은 각 충돌입자가 발생시킨 침식량의 합계이다. 따라서 일정한 유량에 의해 발생한 침식률은 입자 오염농도에 비례해야 한다. 그러나 Fig. 5의 실험 결과는 이론적 예상과 상이한 결과를 보여준다.

즉, 충돌각 40° 미만의 영역에서는 오염농도가 높을수록 침식률이 컸으나, 충돌각 40° 이상에서는 300mg/L 농도의 오일이 75mg/L, 150mg/L 오일보다 침식 발생량이 작았다. 이와 같은 결과의 원인 규명을 위해 실험 중 오염입자크기 분포를 측정된 결과, 충돌각도가 증가할수록 큰 사이즈의 시험 입자들이 빨리 분쇄되어 잘게 나누어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 오염농도와 함께 시험 중 입자크기분포의 변화에 의해 충돌각도가 큰 영역에서는 오염농도가 높을수록 침식률이 줄어든 것으로 판단된다.

최대 마멸이 발생한 충돌 각도는 전술한 입자크기의 변화에 따른 실험과 같이 약 50° 부근이었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 유압시스템 내 오염입자의 침해 침식에 대한 이론적 모델에 대한 타당성을 실

제 시험을 통해 입증하였다.

오염입자의 크기에 따른 침식률은 비록 작은 입자들이 최대 침식 발생영역에서 낮은 침식률을 보였으나, 그 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 오염 농도의 변화에 따른 침식 발생량도 큰 변동이 없었으며, 충돌각이 증가할수록 높은 농도에서 낮은 침식률을 보인 것은 충돌각이 클수록 큰 사이즈의 오염입자들이 빨리 분쇄되었기 때문으로 판단된다.

시험으로 사용된 SAE 1020 강은 배관용 재질로서 전형적인 침식특성을 보였다. 즉, 입자 충돌 속도의 수직성분이 특정 임계속도를 초과할 경우 절삭 마멸과정이 주도적이 되어 침식률은 급격히 최대값에 이르렀다.

충돌속도가 비교적 클 때, 큰 충돌각 영역에서 침식률이 낮았으며, 충돌속도가 낮으면 협각으로 인해 침식은 거의 발생하지 않았다. 오염입자의 크기와 오염농도의 변화에 따른 실험 결과 모두 최대 침식이 발생하는 지점은 충돌각이 약 40°-50° 되는 영역이었다.

따라서 유압시스템의 순환 오일과 부딪치는 각종 유압부품의 입구 모서리의 충돌각이 40°-50° 되지 않도록 가능한 작게 설계할 필요가 있다. 또한 유압시스템의 침식 발생을 줄이기 위해 오염입자의 양과 오일의 속도를 낮추는게 매우 중요하다. 그러나 유압시스템이 갈수록 고압화되어 가는 추세에 비추어 오일의 이송 속도를 낮추는 것은 비현실적이다. 따라서 유압유의 청정도 유지를 위한 적절한 여과장치는 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 마멸의 각종 인자 값들을 실험을 통해 구하였으나, 유압시스템의 선행보존(Pro-

active Maintenance)을 위한 침식 메카니즘에 대한 보다 체계적인 이론적 연구도 아울러 요구된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- 1) E. C. Fitch, I. T. Hong, Hydraulic System Design for Service Assurance, BarDyne, Inc., 1999.
- 2) J. G. A. Bitter, "A Study of Erosion Phenomena, Part I," Wear, Vol.6, pp.5-21, 1963.
- 3) J. G. A. Bitter, "A Study of Erosion Phenomena, Part II," Wear, Vol.6, pp.169-190, 1963.
- 4) H. H. Neison, A. Gilcrest, "Erosion by a Stream of Solid Particles," Wear, Vol.11, pp.111-122, 1968.
- 5) R. M. Pai., "Particle Impinging Erosion," M. S. Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK, Dec., 1981.
- 6) J. L. Xuan, E. C. Fitch, "Wear Investigation on Fluid Power," Proceedings of the 43th National Conference on Fluid Power, Chicago, IL, pp. 227-238, Oct., 1988.
- 7) S. Timoshenko, J. N. Goodier, Theory of Elasticity, McGraw-Hill, New York, 1951.
- 8) C. W. Richards, Eng. Materials Science, Wasdworth Pub. Co., p.518, 1961.
- 9) E. C. Fitch, Fluid Contamination Control, FES, Inc., 1988.
- 10) Ceramics, Glass, Carbon and Mica, Material Selector, New York, 1972.