

신 호 철 조교수 서울대학교 공과대학 기계설계학과

1. 서론

마찰계수는 서로 접촉하여 운동하는 두 물체간의 특성으로 간주되며 일반적으로 상대속도나 작용하중에 별로 영향을 받지 않는 것으로 알려져있다. 화학적으로나 물리적으로 오염되지 않은 깨끗한 금속간의 마찰실험의 경우, 이 실험이 불활성 가스나 진공내에서 행해질 경우 '상당히 큰 마찰저항을 경험하게 되나, 공기중에서의 실험에서는 작은 마찰저항이 기록되어 산화막이나 다른 오염물에 의해 형성된 막이 마찰저항을 감소시킨다고 보고 있다.

건조마찰의 본질과 기구에 관한 최초의 연구는 오래전의 Amontons(1), Coulomb(2) 으로 거슬러 올라가며, 40년대에 이르러서야 비로소 마찰기구 규명에 관한 본격적인 연구가 시작되었다. 초기의 연구에 의하면 마찰력은 수직방향의 작용하중에 비례하며 겹보기접촉면적에는 무관하나 미끄럼 속도에는 약간의 영향만을 받는 것으로 밝혀져 이들 세가지가 마찰에 관한 정량적 기본법칙으로 알려져 있다. 이러한 거동은 접촉표면에 산재한 미세한 돌출부 (asperity) 들이 서로 맞물려 고정 상태에 도달하며, 이때 에너지는 작용하중을 반복적으로 미소한 돌출부 높이만큼 들어올리는데 소모된다고 생각하였다(2). 또한 그 후 한동안, 마찰에 의한 손실을 두개의 표면이 가까워졌을때 그 사이에 원자결합이 형성되어 한 금속표면에 있는 원자들을 상대표면의 인력권으로부터 떼어내는데 소모되는 에너지로 설명하려하였다(3).

최근에 이르러 소위 고착이론 (adhesion theory)이 제안되었으며 이 이론에 의하면 접촉경계면에서 수직방향의 작용하중에 의해 돌출부들의 소성변형이 일어나고 서로 고착되어 접선방향의 운동과 함께 이 접합부위가 전단변형을 일으켜 이때 에너지가 소모된다고 보고있다(4). 이 고착이론에 뒤이은 많은 연구결과로써 마찰이 고착에 의한 성분 이외에 plowing 성분, 즉, 경도 (hardness)가 큰 표면의 돌출부들이 경도가 작은 상대표면에 흠을 파낸것과 같은 소성변형을 일으켜 이에 소모되는 에너지 성분의 존재도 인식하게 되었으나

고착이론의 위세에 놀려 그 중요성에 대한 충분한 이해가 이루어지지 못하여왔다.

그러나 고착이론은 그 널리 받아들여지고 있는 정도와는 달리 한가지 큰 결함을 지니고 있는바, 이는 바로 실험결과가 이론과 잘 일치하지 않는다는 점이다. 실험에 의해 얻어진 마찰계수들은 일반적으로 이 이론에 의한 값들보다 상당히 큰 것을 보여준다. 특히 이러한 경향은 실험이 불활성 가스나 진공내에서 행해질 경우 더욱 심하며, 이러한 분위기는 이 이론의 전개과정의 기본적 가정조건들을 가장 잘 충족해 주고있어 고착이론의 모순점으로 지적되고 있다.

앞에서도 언급했듯이 고착이론의 핵심은 상대적 미끄럼운동을 하는 표면의 미세돌출부들이 상대표면의 돌출부들과 접촉을 하게되면 고착된 접합부가 생기며 운동학적 조건을 만족하기 위하여 이 접합부위가 전단변형을 일으켜야 한다는 것이다. 그러므로, 마찰력은 실제 접촉면적에 비례하게 되며 이 면적은 작용하중의 수직성분과 접선성분의 함수로 표시되게된다. 그리하여 실험값들과 고착이론에 의한 값들과의 차이를 설명하기 위하여 이 이론에서는 다음과 같은 주장을 하고 있다. 즉, 이들 접합부들중 많은수가 인장하중하에 놓일때 실질접촉면적이 더 커지게 되고 따라서 이 부위를 전단시키기 위하여 더 큰 힘이 필요하다는 것이다.

고착이론은 돌출부들간의 고착현상을 중요시하기 때문에 재료의 표면에너지 (surface energy) 의 역할이나 접촉하고 있는 재료간의 상호용해도 (mutual solubility) 와 밀접한 관계가 있을 것이라 하여 이 방면에 관한 많은 연구가 또한 이루어져왔다. 상호 용해도가 큰 금속간에 강한 접합부가 쉽게 형성될 것이라는 가정과 따라서 큰 마찰계수를 관찰하게될 것이라는 논리로 이를 뒷받침하는 많은 실험결과들이 보고되었다. 그러나 이러한 실험결과들의 해석 방법이 문제점으로 지적되어 이와 관련하여 이들 표면들은 화학적 또는 물리적 흡착현상에 의해 쉽게 오염이 된다는 점과 또한 표면에서의 화학적 조성이 내부의 그것과 다르다는 점이 보고가 되었다(5). 이들 접촉부위에서의 온도상승이 현저하지 않은

경우에는 재료의 화학적성질보다는 기계적성질이 마찰거동에 더 영향을 끼치는 것으로 판단되며 필자는 이러한 입장에서 마찰에 관한 이론을 전제하고자한다.

2. 마찰계수와 그 동적변화

재료의 마찰에 의한 거동이 고착현상에만 의존하지 않는다는 사실은 이 마찰력이 미끄럼경로를 따라 변화가 크다는 점으로 입증할 수 있다. 실험에 의하면 마찰력이 어떠한 정상상태 도달하기 전까지 여러단계를 거치며 현저한 변화를 하는것을 볼 수 있다(6). 마찰거동의 이러한 미끄럼경로 즉, 시간에 유관하다는 사실은 마찰을 근본적으로 이해하는데 매우 유익한 정보를 제공해준다. 그러나 과거에는 이점이 거의 관심의 대상이 되지 못하였으며, 정마찰계수와 동마찰계수의 차이에 대해서는 많은 문헌에서 취급되었으나 동마찰계수와 시간과의 함수관계에 대해 언급한 문헌은 거의 없다시피하다(7).

표1은 철-탄소계의 여러 재료들간의 마찰계수들을 보여주고있다. 이들 재료들은 탄소함유량에 따른 폭넓은 cementite량의 변화로 각재료의 표면경도가 980, 1710, 4120, 6080MPa 로 변하고 있다. 표1의 결과와 아울러 실험후의 시편의 표면 관찰결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 마찰계수와 운동거리 또는 시간과의 관계는 그림1에 주어진 두개의 그림으로 대별할 수 있다. 그림1(a)는 동일한 재료간의 마찰의 경우 항상 적용된다. 그림1(b)에 보여진 마찰계수의 감소량 $\Delta \mu_p$ 는 상호표면간의 polishing 에 기인하다(6,8). 또한 그림1(b)의 마찰계수의 변화는 주로 고정시편의 표면경도가 회전시편의 그것보다 매우 큰 경우에 관찰된다.

(2) 이러한 실험은 마멸입자들의 생성을 수반하며 이 입자들을 경계면으로부터 제거해 주면 그림1에 나타난 것과 같이 마찰계수가 어떤 낮은 값 (Armco/Armco 경우 0.4)까지 감소했다가 점차적으로 정상상태의 값에 다시 도달한다.

(3) 주어진 한쌍의 재료에 대해, 어느 재료가 고정되어 있고 어느 재료가 회전하느냐에 따라 마찰계수가 무려 0.2 만큼 변화한다.

(4) 등마찰계수의 초기값은 이 경우 근사적으로 0.1-0.2 이다. Gold/gold, brass/steel 의 경우는 물론 윤활제를 사용한 경우도 이와 비슷한 결과를 보여준다.

(5) 표면이 거울면과 같이 지극히 매끄러운 시편을 사용하여 마찰실험을 할 경우, 실험이 시작되는 순간부터 plowing 에 의한 가느다란 홈들이 생기는 것이 관찰된다.

3. 마찰의 근원

이들 실험결과들을 종합할 때 마찰계수를 고착이론으로 설명하기에는 많은 어려운 점이있다. 마멸입자들의 영향이나 주위환경과 재질에 거의 무관한 초기마찰계수의 존재등이 그러하고, 더우기 같은 쌍의 재료가 그 역할이 바뀌었을때 현저한 마찰계수의 변화가 그러하다.

실험에서 관찰된 현상을 바탕으로 상대적 미끄럼운동을 하는 표면간의 마찰의 근원을 다음과 같이 설명할 수 있다(8).

상대적 미끄럼운동을 하는 표면간의 마찰계수는 돌출부의 변화성분 μ_d , 마멸입자와 경도가 큰 표면의 돌출부에 의한 plowing 성분 μ_p , 평평한 표면간의 고착성분 μ_a 의 합쳐진 여러가지 효과에 의한 것이다. 이들 성분의 상대적 기여도는 접촉경계면의 상태에 따라 결정되며, 이는 사용된 재료, 표면 높낮이형세, 그리고 주위환경에 의존한다.

이 절에서는 이 가설에 관한 기술에 그치고 다음 절에서 각 성분에 관한 이론적 고찰을 기술하도록 한다. 이의 이해를 돕기 위하여 시간에 의존하는 마찰거동을 그림3과 같이 몇개의 단계로 나누어 정성적으로 고찰하도록한다.

(1) 단계 I 에서는 마찰계수가 돌출부들에 의한 plowing 으로 결정되는 것으로

사료된다. 표면의 오염성으로 보아 고착성분은 큰 역할을 하지 못하며, 돌출부의 변형은 상대운동의 시작과 함께 일어나지만 표면이 곧바로 polish 되어 이 단계에서 마찰을 결정하는 주요인자로는 보이지 않는다. 이러한 이유로 초기마찰계수 μ_i 는 재료나 표면, 주위환경조건에 대체로 무관하다.

(2) 단계 II 에서는 고착성분의 증가로 마찰력이 서서히 증가한다. 윤활의 경우에는 단계 I 이 오래 지속되며 이 단계에 이르지 못할것이다. 이 단계에서의 마찰력증가율은 돌출부의 변형 및 파괴에 의해 생긴 마멸입자들이 끼어들어 표면을 파낼 경우 커지게 된다.

(3) 단계 III 의 특징은 이 기울기의 급격한 증가로 표현할 수 있는데 이는 마멸률의 증가에 따른 마멸입자의 수가 증가하기 때문이다. 마멸에 의해 새로운 깨끗한 표면이 노출되어 고착성분이 증가하게 되며 이 또한 기울기 증가에 기여하게 된다. 표면에 돌출부들이 존재하는 한 이들의 변형에 의한 성분도 계속 기여하게 된다.

(4) 접촉경계면에 갇힌 마멸입자의 수가 일정해지면 단계 VI 에 도달하게된다. 이는 접촉경계면으로 새로 들어오는 입자의 수와 이를 떠나는 입자의 수가 같게되는 순간부터 이루어진다. 고착성분은 일정한 수준을 유지하며, 마멸에 따라 생성된 표면은 돌출부들이 존재하는 거친 표면이므로 돌출부 변형성분은 계속 중요한 역할을 한다. 그러나 대부분의 경우 돌출부는 쉽게 변형되지만 새로운 돌출부의 생성은 더디므로 plowing 성분 보다는 기여도가 상대적으로 감소한다. 단계 V를 일으키는 요인이 존재하지 않는 경우, 이때의 마찰계수가 정상상태를 유지한다.

(5) 표면경도가 매우 큰 재료로 된 고정시편에 경도가 작은 재료로 된 시편을 회전시킬 경우, 경도가 큰 시편표면의 돌출부들이 제거되어 (단계 V), 거울면과 같이 매끄럽게 된다. 마찰력은 plowing 성분과 돌출부변형성분의 감소로 줄어들게된다.

(6) 이 단단한 표면이 완전히 매끄럽게되면 낮은 경도의 표면도 같은 정도의

매끄러운 표면이 되어 마찰력은 일정한 값에 도달하여 수평을 유지한다 (단계 VI). 이때 서로의 역할이 바뀌면 경도가 큰 재질표면은 거친상태로 남아있게 되고 따라서 마찰도 커지게 된다.

4. 마찰계수성분의 해석

이상의 고찰에서 돌출부소성변형, plowing, 그리고 고착현상이 마찰을 일으키는 기본 기구임을 알 수 있다. 이 절에서는 각 성분의 크기에 대해서 slip-line 해법과 이상화된 모델을 통해 결정된 (8) 결과를 소개하기로 한다.

4.1 돌출부변형에 의한 마찰계수 성분 μ_d

그림 4에 보인 것과 같이 두개의 돌출부가 서로 접근하는 경우 변형을 일으키게된다. 이때 변위장은 상대운동방향과 기하학적으로 적합하여야하며 접촉부위에 작용하는 힘들의 수직성분의 합이 수직작용하중과 같아야한다. 이러한 운동학적 조건을 만족하는 slip-line 장이 그림 5에 나타나 있으며 이에 대한 마찰계수는 다음과 같이 주어지며 그 일반해는 그림 6과 같다.

$$\mu_d = \frac{(1 + \frac{1}{2}\pi + 2\alpha - 2\theta - 2\theta') \sin \theta + \cos(2\alpha - \theta)}{(1 + \frac{1}{2}\pi + 2\alpha - 2\theta - 2\theta') \cos \theta + \sin(2\alpha - \theta)}$$

4.2 마찰계수의 고착성분 μ_a

고착성분에 관한 해석도 slip-line 해를 이용하여 마찬가지로 방법으로 구할 수 있다. 이 경우 Challen 과 Oxley(9)의 결과를 이용하여 그림 7에 대한 해에 $\alpha \rightarrow 0$ 를 취하여 다음과 같은 마찰계수성분을 얻는다.

$$\mu_a = \frac{f}{A + \sin(\cos^{-1}f)}$$

$$A = 1 + \frac{\pi}{2} + \cos^{-1}f$$

여기서 f 는 ED 에서의 고착각도를 나타낸다. α 가 영이 아닌 경우에 대한 고착성분은 이 해석에서 무시할 수 있는데 이는 이미 μ_d 를 유도할 때 고려했기 때문이다. 그 경우에는 고착의 정도에 무관한 운동학적 조건에 의해 구속된 변형을 하게된다.

μ_a 의 값은 f 가 0 에서 1 까지 변할때 0 에서 0.39 까지 변한다.

4.3 마찰계수의 plowing 성분 μ_p

마찰력의 plowing 성분은 단단한 돌출부나 마멸입자들이 표면을 파고들기 때문에 생긴다. 그림8은 마멸입자의 영향을 보여주는 모델로 이를 이용하여 다음과 같은 마찰계수 성분이 구해지며(10), 이의 일반해가 그림9에 나타나있다.

$$\mu_p = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{2r}{w} \right)^2 \sin^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \left\{ \left(\frac{2r}{w} \right)^2 - 1 \right\}^{1/2} \right]$$

5. 각 성분의 전마찰계수에의 기여도

위에서 언급한 마찰계수에 관한 내용을 종합하면 각 마찰계수성분의 상대적인 값들은 다음과 같다.

(1) 모든 작용하중을 4-20도의 경사를 갖는 전형적인 표면돌출부들이 지지할 경우 μ_d 는 0.43-0.75이다. μ_d 는 정마찰계수를 결정하는 요인으로 보이나 단계 I 에서의 초기마찰계수에 기여하지는 않는다. 이는 이들의 변형이 쉽게 일어나기 때문이다. 마멸에 의해 새로운 돌출부들이 계속 생성되어 정상상태의 마찰계수에 부분적으로 기여한다.

(2) μ_a 는 두 접촉면의 평평한 부분간의 고착정도에 따라 0-0.4이다. 윤활된 경우에는 낮은 값을 나타내고 동일한 금속간에 오염되지 않은 경우에는 높은 값을 나타낸다.

(3) 이론적으로 μ_p 는 0-1.0이나 전형적인 상대운동표면간에는 보통 0.4 보다 작다. 동일한 금속간 미끄럼 운동을 하는 경우 마멸입자의 생성과 함께 높은 값을

연계되며, 마멸입자가 전혀 없는 경우나 경도가 낮은 표면이 거울면을 가진 단단한 표면을 상대로 운동할 때 낮은 값을 얻는다. 이들 성분의 전마찰계수에의 상대적 기여도를 결정하기는 어려우며 이는 바로 작용수직하중을 표면돌출부, 고착부위, 그리고 접촉경계면 사이의 마멸입자들 간에 공동으로 분담하고 있기 때문이다. 그러나 실제로 많은 경우에 있어서는 이들이 동시에 일어난다기보다 순차적으로 일어난다고 볼 수 있다.

그림 10에서 보인 고착부위와 돌출부위의 경우, 처음에 평평한 부위의 접촉이 일어나면 이들간에 고착이 일어나 μ_a 에 대한 해석이 그대로 적용된다. 상대적 미끄럼운동과 함께 돌출부들간의 접촉이 일어나도 대부분의 수직하중을 고착부위가 담당하게 되는바, 이는 이 부위의 수직방향 강성도 (stiffness)가 더 큰 것에 기인한다. 이 경우 미끄럼운동을 계속하기 위하여는 돌출부위의 전단변형이 일어나야하며 두 재료가 동일하면 점선을 따라서 위의 재료가 아래의 재료보다 더 단단하면 xxx 선을 따라 일어난다. 이때 돌출부위를 소성변형시키기 위해서 운동방향의 힘만이 더 필요하게 된다.

그림 11에 보인 마찰공간선도 (friction space)에는 마찰계수 μ 가 고착성분, plowing 성분, 그리고 표면조도의 함수로 표시되어 있다. 고착성분은 무차원의 접촉경계면 전단강도 f 로, plowing 성분은 마멸입자나 단단한 돌출부에 의해 생긴 골의 너비의 그 직경에 대한 비 $w/2r$ 로, 표면조도는 표면돌출부의 경사 θ 로 각각 나타나 있다. 그림에서 가장 밑에 있는 $\theta=0$ 에 해당하는 표면은 표면에 돌출부들이 없는 경우로 μ_1 의 하한표면을 결정한다. 또한 θ_1 표면은 초기의 표면조도에 해당하며 θ^* 표면은 μ 의 최고치를 주는 표면조도에 해당한다. 표면이 더욱 거칠어지거나 정상상태의 돌출부 숫자가 늘어나면 μ 는 증가하고 이 값은 μ 축을 따라 움직이게 된다. 그림의 μ^* 표면은 Armco/AISI 1095에 대한 실험결과를 나타낸 것이며 이 경우 돌출부변형성분의 기여량은 대략 0.3이다.

이 마찰공간선도는 완벽하다고는 할 수 없지만, 마찰현상에 관하여 꽤 합리적인 기술을 가능하게 해준다. 그림 11은 그림1에 나타난 마찰계수의 변화경로를 보여주고 있다.

마찰계수는 초기 표면조도 θ_i 에 해당하는 표면에서 시작하여 곧바로 $\theta=0$ 표면에 도달하고 그림1에 표시된 경로를 따르게 된다. 많은 경우 초기표면조도와 정상상태의 표면조도의 상대적 크기에 따라서는 θ_i 표면이 θ^* 마찰계수 표면 위에 놓일 수가 있다.

참 고 문 헌

1. G. Amontons, Mem. Acad. R., (1699) 206.
2. C.A. Coulomb, Mem. Math. Phys. Acad. R., (1785) 161-132.
3. F.P. GBowden and Tabor, Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, 1950, 1964.
4. W.B Hardy and J.K. Hardy, Philos. Mag., 38(1919) 32-48.
5. D.H. Buckley, Fundamentals of Tribology, MIT Press, (1980) 173-199.
6. M. Tohkai, S.M. Thesis, MIT, 1979.
7. E.P. Abrahamson II, S. Jahanmir and N.P. Suh, CIRP Ann., 24(1975) 513-514.
8. N.P. Suh and H.-C. Sin, Wear, 69(1981) 91-114.
9. J.M. Challen and P.L.B. Oxley, Wear, 53(1979) 229-243.
10. H.C. Sin, N. Saka and N.P. Suh, Wear, 55(1979) 163-190.

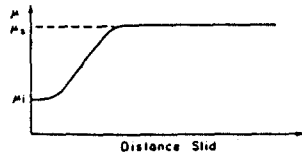
Table 1

Friction coefficients

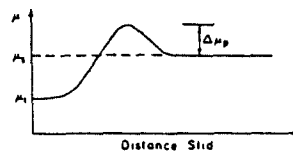
Material of slider (stationary cylinder)	Friction coefficients ^a	Material of specimen (rotating cylinder)			
		Armco iron	1020 steel	1045 steel	1095 steel
Armco iron	μ_i	0.13	0.20	0.24	0.20
	μ_s	0.71	0.75	0.69	0.76
	μ^*	—	—	—	—
1020 steel	μ_i	0.18	0.20	0.13	0.12
	μ_s	0.55	0.68	0.57	0.65
	μ^*	0.80	—	—	—
1045 steel	μ_i	0.16	0.17	0.17	0.12
	μ_s	0.52	0.53	0.71	0.69
	μ^*	0.77	0.71	—	—
1095 steel	μ_i	0.17	0.17	0.14	0.17
	μ_s	0.51	0.54	0.58	0.67
	μ^*	0.76	0.73	—	—

^a μ_i , initial coefficient of friction; μ_s , steady state coefficient of friction; μ^* , peak value of the friction coefficient.

- Fig. 1. Coefficient of friction vs. sliding distance.
- Fig. 2. Effect of removing wear particles from the interface.
- Fig. 3. Six stages in the frictional force vs. distance slid relationship.
- Fig. 4. Two interacting surface asperities.
- Fig. 5. A geometrically compatible slip line field.
- Fig. 6. Slip line field solution for friction as a function of the slope of asperities.
- Fig. 7. A slip line field for a rubbing contact.
- Fig. 8. Idealized model of the wear particle interaction between two sliding surfaces.
- Fig. 9. Plowing component of the friction coefficient as a function of the ratio of the width to the diameter of the entrapped wear particles.
- Fig. 10. Two sliding surfaces in contact.
- Fig. 11. Friction space.



(a)



(b)

Fig. 1

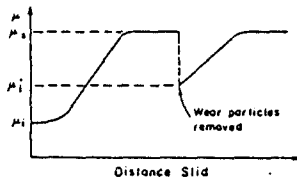


Fig. 2

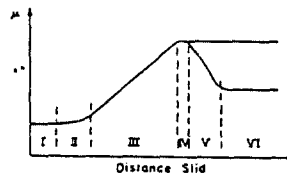


Fig. 3

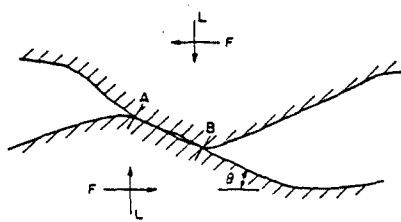


Fig. 4

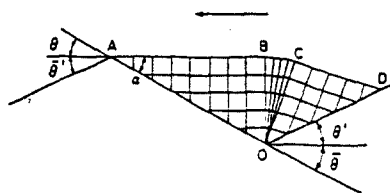


Fig. 5

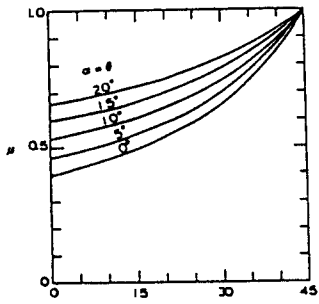


Fig. 6

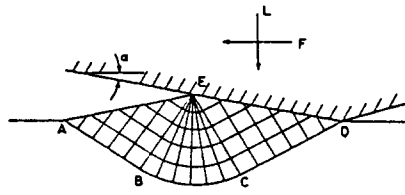


Fig. 7

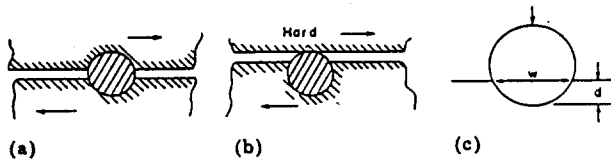


Fig. 8

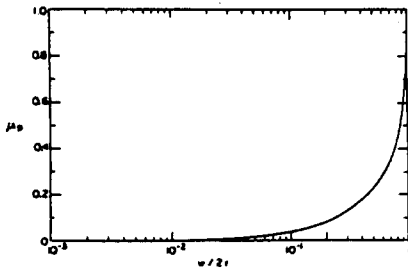
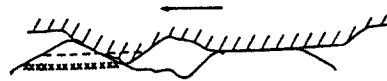


Fig. 9



(a)



(b)

Fig. 10

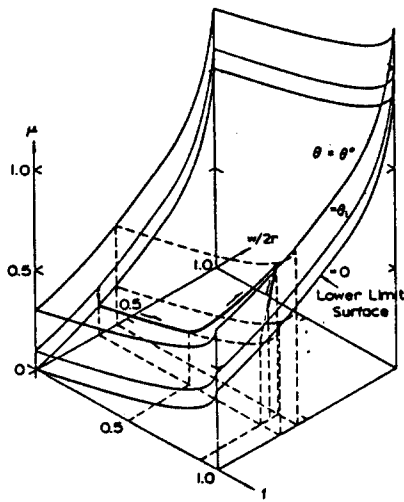


Fig. 11