

# 모서리가공에 따른 접촉응력 해석

김형규\* · 강흥석\* · 윤경호\* · 송기남\*

## Analysis of Contact Traction influenced by Edge Machining

Hyung-Kyu Kim, Heung-Seok Kang, Kyung-Ho Yoon and Kee-Nam Song

**Key Words :** Edge Machining(모서리 가공), Rounding(라운딩), Chamfering(모따기), Contact Traction(접촉 트랙션), Partial Slip(부분미끄럼)

### Abstract

To restrain contact failure, present study investigates the influence of edge machining of an indenter (punch). As for the edge machining, rounding, chamfering, and chamfering and rounding are considered. Contact mechanics is consulted to examine the traction profile and the size of the contact region which are directly influenced by the end profile of the indenter. The effect of rounding size (i.e., radius) in the case of the chamfering and rounding edge-indenter is studied. Shear traction is also evaluated within the regime of partial slip. Size of slip region and its expansion rate due to the increase of shear force are considered to investigate the shape effect of the indenter on contact failure.

### 1. 서론

접촉물체에서 발생하는 손상을 분석하기 위해서는 물체 내부에 발생하는 응력을 알아야 하며 이때의 내부응력은 접촉면에 발생하는 응력(트랙션)에 직접적인 영향을 받는다. 한편, 접촉 트랙션은 접촉부의 형상에 의존하므로 접촉손상을 억제하기 위해 접촉물체의 (접촉부)형상 설계를 개선하는 것이 효과적인 방법이 될 수 있다.

기계구조물에서 접촉부의 형상은 펀치 접촉의 형태를 갖는 경우가 많으며 이때 기계 가공에서 날카로운 모서리를 제거하기 위해 라운딩(rouding) 또는 모따기(chamfering) 가공을 하는 경우가 일반적이다. 또한 모따기 한 경우에도 라운딩 가공을 하여 날카로운 모서리를 제거할 수 있다. 이와 같은 모서리의 가공은 취급자의 안전을 그 일차적인 목적으로 하는 것이었으나 모서리의 가공으로 인한 형상 변경은 접촉 트랙션을 변화시키므로 접촉손상의 관점에서 또 다른 의미를 갖는다. 오히려 접촉역학을 효과적으로 도입함으로써

접촉손상을 억제하는 방법으로 모서리 가공을 적극적으로 활용할 수 있다고 사료된다.

본 연구는 이러한 관점에서 모서리가 라운딩, 모따기 및 모따기와 라운딩이 동시에 되어 있는 펀치와 반 무한평판이 접촉하고 있는 문제를 해석하여 각각의 경우에 접촉면에 발생하는 트랙션과 접촉폭을 구하며 접촉물체 상호 간에 상대운동이 발생할 수 있는 전단하중을 고려하여 접촉손상에 영향을 미칠 수 있는 인자에 대해 분석한 것이다. 이를 위해 접촉역학에서의 수학적 방법과 수치해석 방법을 사용하였다. 본 연구의 결과는 접촉물체의 형상 설계를 위한 모서리 가공방법에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

### 2. 문제의 구성

#### 2.1 기하학적 고찰

양단 모서리가 라운딩 또는 모따기 가공된 접촉물체의 접촉부 형상을 일반화하기 위하여 Fig. 1

\* 한국원자력연구소

과 같이 아래면이 2a 만큼 편평하고 양단이 모따기 또는 모따기의 시작점에 라운딩 가공을 한 경우를 고려한다. 한편 라운딩 부위로부터 모따기가 시작되는 구간을 2c 라 하고 접촉 경계의 폭을 2b 라 정의하며 라운딩의 반지름을 R 이라 한다. 이때 접촉부 형상이 변하는 지점에서의 기울기가 연속인 경우를 가정하여 smooth 한 profile 을 갖도록 한다. 그러나 모따기만 되어 있는 경우에는 모따기 가공이 시작되는 점에서 응력 특이가 발생하는 예외적인 경우가 될 것이다.

접촉면에서 발생하는 트랙션은 접촉부의 profile 에 직접적으로 영향을 받게 되며 이것은 접촉역학에서 접촉부의 변위와 트랙션 사이의 관계를 설명하는 다음의 지배방정식으로부터 쉽게 알 수 있다[1,2].

$$\frac{E^*}{2} \frac{dh(x)}{dx} = \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{p(\eta)}{x-\eta} d\eta - \beta q(x), \quad (1)$$

$$\frac{E^*}{2} \frac{dg(x)}{dx} = \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{q(\eta)}{x-\eta} d\eta + \beta p(x) \quad (2)$$

여기서,  $\pm b$  는 접촉부의 경계를 나타내며, 접촉면에서의 수직 및 전단 트랙션을 각각  $p(x)$ ,  $q(x)$ , 그리고  $h(x)$ ,  $g(x)$ 는 수직 및 전단 방향의 변위를 나타낸다. 또  $E^*$  및  $\beta$ 는 각각 두 접촉 물체의 상이한 탄성적 성질을 나타내는 복합 탄성 계수 및 Dunders 상수로서 평면 변형률의 경우에 다음과 같이 정의 된다.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left[ \frac{\{(1-2\nu_1)/G_1\} - \{(1-2\nu_2)/G_2\}}{\{(1-\nu_1)/G_1\} + \{(1-\nu_2)/G_2\}} \right] \quad (4)$$

여기서, 하첨자 1, 2 는 서로 다른 두 접촉 물체를 의미하며  $\nu$ 는 프와송 비, 그리고  $G$  는 전단 강성 계수이다.

식 (1) 및 (2)와 같이 couple 되어 있는 Cauchy 형 특이적분방정식의 해를 구하기 위해 일반적으로 Goodman's Approximation[3]을 사용하며 이것은 다음과 같이 전단방향의 트랙션이나 변위를 일단 무시하고 수직방향에 대해서만 해석한 후 이로부터 전단방향의 해를 구하는 방법이다.

$$\frac{E^*}{2} \frac{dh(x)}{dx} = \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{p(\eta)}{x-\eta} d\eta. \quad (5)$$

식 (5)에서  $p(x)$ 를 구하기 위해서는 접촉부의 기하학적 형상( $h(x)$ )이 결정되어야 한다. 본 연구에

서 고려하고 있는 접촉부의 profile 인 양단이 라운딩, 모따기 또는 모따기와 라운딩이 되어 있는 경우와 같이 둘 이상의 profile 이 연속적으로 배열되어 있는 경우는 하나의 함수로  $h(x)$ 를 정의할 수 없으며 따라서 다음과 같이 구간  $i$  에 따라 달리 정의하여야 한다.

$$h(x) = \sum_i h_i(x), \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

식 (6)에서 각 구간의 profile 을 포물선으로 생각할 경우(실제 본 연구에서 고려하고 있는 Fig. 1 과 같은 형상에서는 포물선의 가정이 완벽히 성립한다), 식 (5)를 위해 식 (6)의 미분을 취하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h'(x) = \sum_{i=1}^n (K_i x + L_i) \quad (7)$$

여기서  $K_i$  및  $L_i$ 는 상수이다.

이제 수직하중  $P$  에 의해 접촉부의 경계가 발생하는 지점으로서 양단이 라운딩 되어 있는 경우는 라운딩 부위, 모따기 또는 모따기 시작점에 라운딩이 되어 있는 경우는 모따기 부위라 하고 가장 일반적인 경우로서 좌우 대칭의 형상을 갖고 라운딩과 모따기가 동시에 가공되어 있는 경우를 생각한다. 이때 모따기 부위를 구간 1 과 5, 그 안쪽으로 라운딩 되어 있는 부위를 구간 2 와 4, 그리고 중앙의 편평한 부위를 구간 3 이라 하자. 이로부터  $h'(x)$ 를 구하면 다음과 같이 표로 작성할 수 있다(Fig. 1 참조).

Table 1.  $h'(x)$  for each edge shape.

Region No. (i)	Rounded Edges		Chamfered Edges		Chamfered & Rounded Edges	
	$K_i$	$L_i$	$K_i$	$L_i$	$K_i$	$L_i$
1	-	-	0	$\theta$	0	$\theta$
2	$-1/R$	$-a/R$	-	-	$-\theta/(c-a)$	$-a\theta/(c-a)$
3	0	0	0	0	0	0
4	$-1/R$	$a/R$	-	-	$-\theta/(c-a)$	$a\theta/(c-a)$
5	-	-	0	$-\theta$	0	$-\theta$

## 2.2 접촉 수직트랙션

식 (5)에 식 (7)을 대입하여 풀면 다음 식 (8)의 해를 얻을 수 있으며[4], 이에 대한 상세한 내용은 양단이 라운딩된 편치의 접촉에서 편치가 기울어져 접촉하거나 원거리 인장하중이 작용하는 경우를 고려하여 비대칭의 접촉 트랙션이 발생하는 경우 및 이때의 균열을 해석하였던 앞선 연구 결과 [5,6]를 참고할 수 있다.

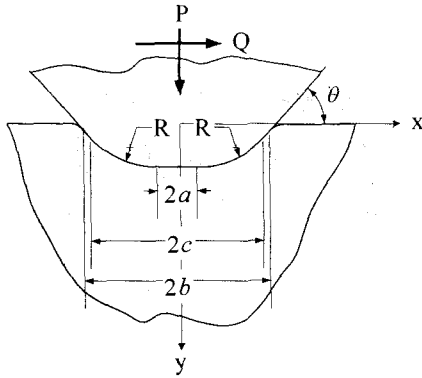


Fig. 1 Generalized geometry of present contact problem.

$$\frac{bP(\varphi)}{P} = -\frac{1}{\pi \cos \varphi} \left[ 1 + \frac{E^* b}{2P} \{ \alpha \pi \sin \varphi - I(\varphi) \} \right], \quad (8)$$

$$I(\varphi) = \frac{b}{2} \sum_{i=1}^n K_i \left( \Delta \varphi_i + \frac{\Delta \sin 2\varphi_i}{2} \right) + \sum_{i=1}^n \{ K_i b \sin \varphi + L_i \} \times \left[ \Delta \cos \varphi_i - \Delta \varphi_i \sin \varphi + \cos \varphi \ln \left| \frac{\cos((\varphi + \varphi_{i+1})/2) \sin((\varphi - \varphi_{i+1})/2)}{\cos((\varphi + \varphi_i)/2) \sin((\varphi - \varphi_i)/2)} \right| \right] \quad (9)$$

여기서  $\Delta \varphi_i \equiv \varphi_{i+1} - \varphi_i$ ,  $\Delta \cos \varphi_i \equiv \cos \varphi_{i+1} - \cos \varphi_i$ ,  $\Delta \sin 2\varphi_i \equiv \sin 2\varphi_{i+1} - \sin 2\varphi_i$ .

한편 접촉부의 폭(2b)는 접촉 수직하중 P, 두 물체의 복합 탄성계수  $E^*$  및 접촉부 profile  $h(x)$ 에 영향을 받으며 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

$$-\frac{2P}{E^* b} = \frac{b}{2} \sum_{i=1}^n K_i \left( \Delta \varphi_i - \frac{\Delta \sin 2\varphi_i}{2} \right) - \sum_{i=1}^n L_i \Delta \cos \varphi_i = 0 \quad (10)$$

식 (9) 및 (10)에서  $\sin \varphi_i = x_i/b$  이고  $\varphi_1$  과  $\varphi_{n+1}$  은 접촉부의 경계를 나타내게 되어 각각  $-\pi/2$  와  $\pi/2$  이 된다.

### 3. 해석 및 고찰

#### 3.1 접촉폭(b)의 계산

식 (10)에서 알 수 있듯이 두 접촉물체의 복합 탄성계수와 하중이 동일할 경우 접촉폭은 접촉부의 기하학적 형상에 따라 달라진다. 접촉폭의 변화는 접촉응력의 크기에 영향을 미치며 또한 물체 내부응력을 변화시킨다. 일반적으로 마멸 등과 같은 접촉손상을 감소시키기 위해서는 접촉폭을 넓

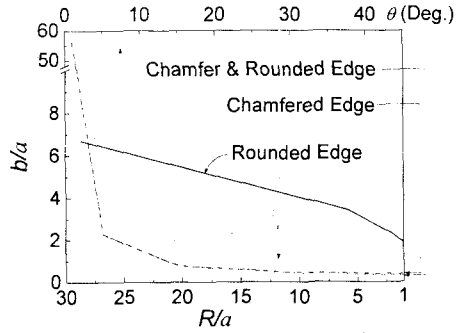


Fig. 2 Variation of contact region with respect to different edge shape.

게 하여 접촉응력 값이 작게 되도록 설계하는 경우가 많다.

본 연구에서는 양단이 라운딩, 모따기 또는 모따기와 라운딩이 되어 있는 펀치(각각 "R 형, C 형 및 CR 형 펀치"라 하자)에 의한 접촉에서 동일한 P,  $E^*$ 인 경우 접촉폭 b 를 계산한다. 이때 펀치 중앙의 편평한 구간 폭(2a)을 일정하게 하여 접촉폭 및 라운딩 반지름 R 을 정규화(normalization)하는 파라미터로 이용한다. 한편 모따기의 경우에는 수평면(x 축)으로부터 기울어진 각  $\theta$ 를 그대로 이용하였다.

예제 계산을 위해 R 형 펀치에서 모서리 반지름 R 의 크기는 C 형 펀치의 모따기 각( $\theta$ ) 연장선과 폭이 4a 인 펀치의 양 경계 교차하는 점까지 중앙의 편평한 부분에 접하는 원을 구성하여 구하였다.  $\theta$ 의 값으로는 모따기 가공에서 많이 사용하는 45°를 포함하여 30°, 15°, 5° 및 1°로 하였으며 이때 각각에 대한 R/a 의 값은 1.0, 1.15, 2.0, 5.76, 28.65 가 된다. 한편 CR 형 펀치의 경우 중앙의 편평한 구간과 모따기 구간이 만나는 부분에 형성되는 라운딩 반지름 R 은 a 와 동일하게 하였다.

Fig. 2 에는  $P/(E^* a) = 1.0$  인 경우 각각의 형상에 대한 접촉폭을 나타내고 있다. 대부분의 경우 R 형 펀치에 의한 접촉폭이 C 형 및 CR 형 펀치에 의한 것에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 한편 C 형 및 CR 형 펀치 상호 간의 차이는 거의 없음을 알 수 있어 모따기 가공 시 형상의 기울기가 변하는 점을 라운딩 하더라도 접촉폭에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 모따기 각이 15° 이상인 경우에는 접촉폭의 변화가 거의 없으나 그 이하에서는 각도가 줄어들수록 접촉폭이 급격하게 상승함을 알 수 있다. 이에 따라 C 형 또는 CR 형 펀치에서 모따기 각이 약 3° 이하에서는 접촉폭이, 모서리 반지름의 크기가 증가함에 따라 접촉폭이 완만하게 증가하는, R 형 펀치에 의한 접촉폭에 비해 현저히 커지게 된다.

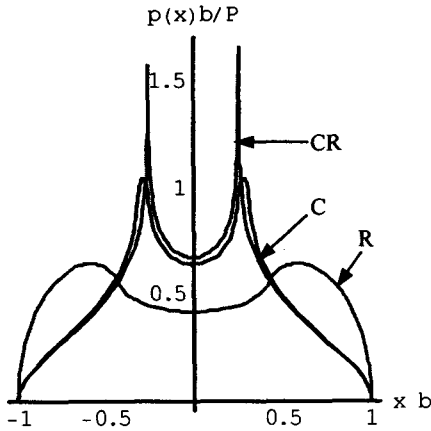


Fig. 3 Normal traction profiles by R, C and CR-type punches.

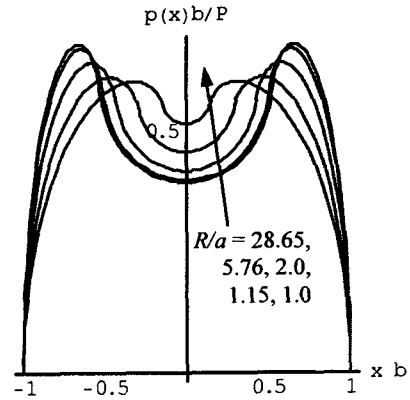
### 3.2 접촉 수직트랙션( $p(x)$ )의 계산

접촉에 의한 물체의 손상을 분석하기 위해서는 물체 내부의 응력상태를 파악하는 것이 필요하다. 이때 물체 내부의 응력은 접촉면에 발생하는 트랙션에 직접적인 영향을 받으므로 3.1 절에서 고려한 접촉폭의 크기와 함께 접촉 트랙션의 형상을 분석하는 것도 중요하다. 즉, 접촉면에서 가능한 균일하게 분포하는 트랙션의 경우가 접촉 손상을 억제하는 데에 유리할 것이다.

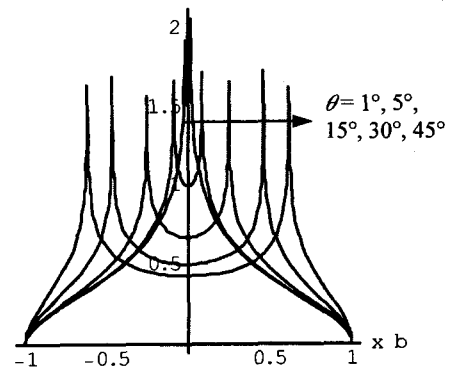
접촉 트랙션의 형상은 접촉부의 profile 에 직접적으로 영향을 받는다. 본 연구에서는 접촉물체의 모서리가공으로서 많이 사용하고 있는 라운딩, 모따기 및 모따기 후 라운딩한 형태를 고려하여 이들 profile 에 의한 트랙션의 형상을 분석하고자 하였다. Fig. 3 에는 이에 대한 하나의 특징적인 경우로서  $P/(E^*a) = 1.0$  일 때 R 형 펀치에서의 모서리 반지름  $R/a = 2.0$ , C 형 펀치에서의 모따기 각도  $15^\circ$  및 CR 형 펀치에서 모따기 각도 및 라운딩 반지름을 각각  $15^\circ$ 와  $R/a = 1.0$  으로 하였을 때의 접촉 수직트랙션을 보여준다. 이때 횡축은 접촉폭(b)로 정규화하여 나타내었다.

Fig. 3 의 결과에 의하면, 예상한 대로, 양단이 라운딩되어 있는 경우에는(R 형) 트랙션의 최대치 부분이 부드러운 곡선으로 되고 있으며 모따기된 경우에는(C 형) 모따기가 시작되는 지점에서 첨두 응력이 발생함을 알 수 있다. 그리고 모따기와 라운딩이 동시에 되어 있는 경우에는(CR 형) 최대 응력이 발생하는 부위에서 첨두가 발생하고 있지는 않으나 양단이 라운딩 되어 있는 경우에 비해 접촉폭에 걸친 트랙션의 분포의 균일한 정도가 낮은 것을 알 수 있다.

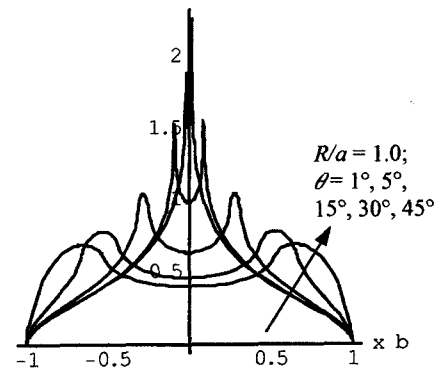
이와 같은 트랙션의 형상을 접촉부 profile 의 변화에 따라 분석한 결과를 Fig. 4 에 나타내고 있다. Fig. 4(a)에 나타난 R 형 펀치에 의한 접촉에서는 모든 경우에 트랙션의 최대값 부분이 유한하며



(a) R-type punch  
 $p(x)b/P$



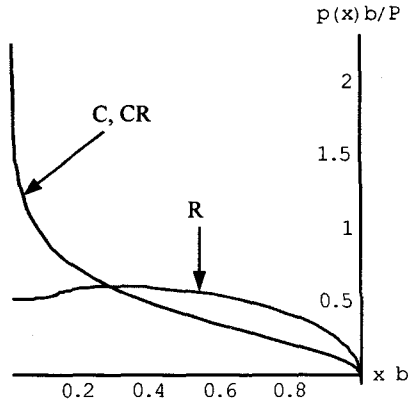
(b) C-type punch  
 $p(x)b/P$



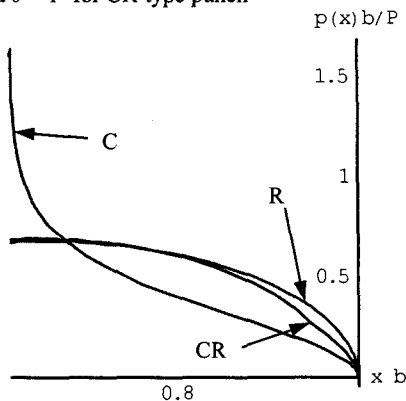
(c) CR-type punch

Fig. 4 Normal traction profiles with varying radius and chamfering angle.

부드러운 곡선으로 되는 것을 알 수 있다. 이때 라운딩 반지름의 크기가 증가하면 최대응력이 발생하는 점이 중앙으로 모아지며 그 값이 감소하게 됨을 볼 수 있는데 이것은 라운딩 반지름의 증가에 따라 접촉폭이 증가하기 때문이며 이에 따라 전체 접촉폭에 대해 중앙의 편평한 부분(2a)이 상대적으로 좁아지는 것이 그 이유이다.



(a)  $R/a = 28.65$  for R-type;  $\theta = 1^\circ$  for C-type;  $R/a = 1.0$  and  $\theta = 1^\circ$  for CR-type punch



(b)  $R/a = 1.0$  for R-type;  $\theta = 45^\circ$  for C-type;  $R/a = 1.0$  and  $\theta = 45^\circ$  for CR-type punch

Fig. 5 Normal tractions near contact edge.

한편 Fig. 4(b)의 C형 펀치에 의한 접촉의 경우에는 모따기 각의 크기에 관계 없이 항상 첨두응력이 발생함을 알 수 있다. 단 모따기 각이 감소함에 따라 첨두응력의 발생 위치가 접촉 중앙부위로 이동하는 것을 볼 수 있는데 이것은 Fig. 4(a)에서와 같이 접촉폭이 증가하므로 나타나는 현상이다.

R형 및 C형 펀치가 중첩된 형태인 CR형 펀치에 의한 접촉을 Fig. 4(c)에 나타낸다. Fig. 4(c)의 계산을 위해서 사용한 라운딩 반지름의 크기는  $R/a = 1.0$  이었다. Fig. 4(c)에 보여주는 흥미로운 결과는 CR형 펀치의 가장 바깥쪽에 형성된 모따기 각의 변화에 따라 R형 또는 C형 펀치에 의한 접촉 트래クション의 특징이 모두 나타난다는 것이다. 즉 모따기 각이 증가하면 양단이 라운딩된 것(R형 펀치)과 유사한 트래クション이 발생되며 감소할수록 모따기만 된 것(C형 펀치)에 의한 트래クション과 유사하게 됨을 알 수 있다.

이것은 Fig. 5에 보여 주듯이 접촉경계 부근에서의 트래クション을 나타내면 좀더 분명히 알 수 있다.

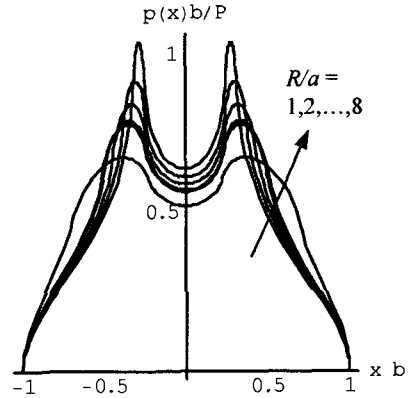


Fig. 6 Variation of normal traction of CR-type punch as the radius increase (in the case of  $\theta = 15^\circ$ ).

Fig. 5(a)와 5(b)에는 각각 모따기 각이  $1^\circ$ 일 때와  $45^\circ$ 일 때를 보여주며 이와 함께 R형 펀치에서 라운딩 반지름이 각각  $R/a = 28.65$ 와  $1.0$ 일 때를 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서는 CR형 펀치에 의한 트래クション이 C형 펀치에 의한 그것과 거의 동일하며 Fig. 5(b)에서는 R형 펀치에 의한 트래クション과 거의 유사한 것을 볼 수 있다.

접촉 경계에서의 트래クション이 특이점을 갖는 양단 모서리가 직각인 펀치를 모서리 라운딩 가공하게 되면 트래クション의 크기를 현저히 줄일 수 있다는 사실과는 달리 양단이 모따기되어 있는 펀치의 경우에는 모따기의 시작점에 라운딩 가공을 하는 것이 항상 트래クション의 크기를 감소시킬 수 있는 것은 아니며 모따기 각도와 라운딩 반지름의 크기에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 모따기 각이 작은 경우를 예로써 설명할 수 있다.

즉 모따기 각이 작아지면 Fig. 2에 보인 대로 접촉폭이 증가하게 되고 따라서 전체 접촉폭의 크기에 비해 중앙의 편평한 구간과 그 주위의 라운딩이 상대적으로 작게 되어 라운딩의 영향이 거의 사라지게 되는 것이다. 따라서 트래クション 크기를 감소시키기 위한 라운딩의 효과를 가져오기 위해서는 모따기 각에 따라 라운딩 반지름의 크기를 조절하여야 한다.

이에 대한 검토를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에는 CR형 펀치에서 모따기 각이  $15^\circ$ 인 경우 모따기 시작점의 라운딩 반지름을  $R/a = 1 \sim 8$ 까지 변화시키며 수직 트래クション을 계산한 결과이다. 라운딩 반지름이 증가함에 따라 트래クション의 최대값이 감소하며 그 형태가 접촉폭 내에서 균일해지는 방향으로 되는 것을 알 수 있다. 이로부터 접촉손상을 억제하는 관점에서는, 접촉물체의 모따기 각이 작은 경우, 라운딩 반지름을 증가시켜야 할 필요가 있음을 알 수 있다.

### 3.3 부분미끄럼 문제

두 물체의 접촉에 의한 손상으로는 여러가지들

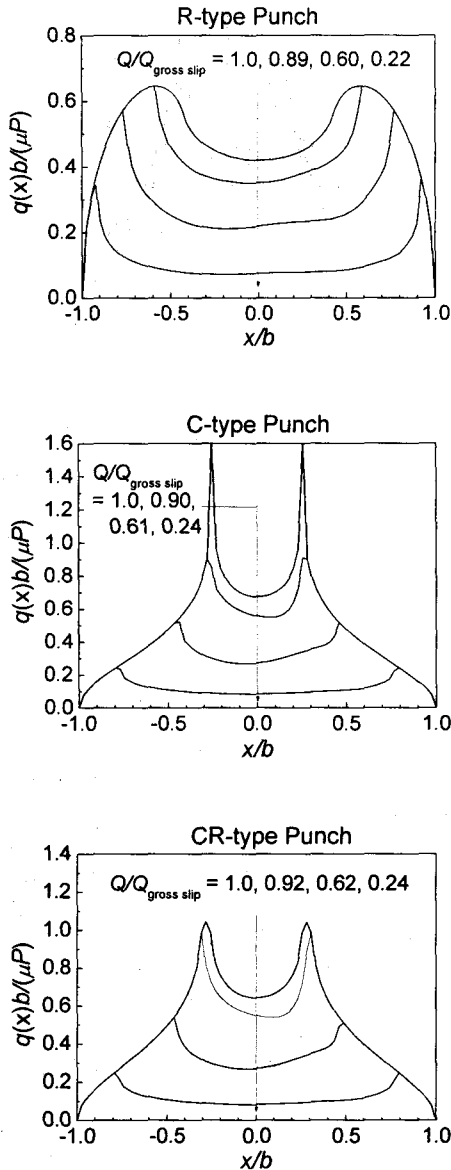


Fig. 7 Variation of shear traction for each type.

말할 수 있으나 크게 피로균열의 성장과 접촉면에서의 마멸로 정리할 수 있다. 이때 접촉물체 사이의 상대 운동 진폭이 작을 경우 각각을 프레팅피로와 프레팅마멸이라 한다. 접촉물체 사이에 상대 운동이 존재한다는 것은 전단하중이 존재한다는 것을 의미하며 전단하중의 크기가 마찰력보다 같거나 커서 접촉면에 전체적인 미끄럼이 발생할 경우를 전미끄럼 상태(gross slip regime), 그리고 마찰력보다 작아 접촉면 전체에서 미끄럼은 발생하지 않으나 일부분에서 발생하는 경우를 부분미끄럼

상태(partial slip regime)라 한다.

앞서 언급하였듯이 접촉물체 내부의 응력은 접촉면의 트랙션에 영향을 받으므로 전단하중에 의해 형성되는 전단 트랙션을 구하여야 접촉손상을 분석할 수 있다. 전미끄럼 상태에서의 전단 트랙션은, Amonton's Friction Law 를 따를 경우, 수직 트랙션에 정지 마찰계수를 곱하여 쉽게 얻을 수 있다. 그러나 부분미끄럼일 경우는 두 물체의 상대 운동이 없는 영역에서의 전단 트랙션을 별도로 구하여야 할 필요가 있다. 부분미끄럼은 일반적으로 두 물체의 체결 상태가 양호한 경우에 발생하는 것으로 볼 수 있어 접촉손상의 해석을 위해 주로 고려하는 미끄럼 상태이다.

부분미끄럼 상태의 전단 트랙션을 구하기 위해 수학적인 방법으로서 1 차원 전단하중을 고려하는 문제일 경우(예를 들어 Mindlin-Cattaneo 문제 [7,8]) perturbation 에 의해 구할 수 있다[9]. 이와는 별도로 influence function method 에 의해 수치적으로도 구할 수 있으며 수치해석 방법을 이용하면 엄밀해를 구할 수 없는 접촉면 상에서 전단하중이 2 차원적으로 변하는 경우의 문제도 해결할 수 있다[10]. 본 연구에서는 부분미끄럼 상태를 가정하여 개발된 수치해석 방법으로 전단 트랙션을 구하였다.

Fig. 7 에는 R 형, C 형 및 CR 형 펀치에 의한 접촉에서 전단하중이 증가함에 따라 접촉면에 나타나는 전단 트랙션을 보여 준다. 이때 각 펀치의 기하학적 형상은 Fig. 3 에 사용하였던 것과 동일하게 하였다. 또한 각각의 경우에 부분미끄럼을 발생시키는 전단하중 세 가지는 서로 유사하도록 하여 전단 트랙션과 미끄럼 영역을 상호 비교할 수 있게 하였다.

Fig. 7 에 의해 전단하중이 증가함에 따라 접촉 경계로부터 내부로 미끄럼 영역이 확장하는 부분 미끄럼의 일반적 현상을 볼 수 있다. 그러나 미끄럼 영역의 확장이 수직 트랙션의 최대값이 나타나는 점을 넘지 못하는 것을 알 수 있으며 이를 초과하는 전단하중이 작용하면 순간적으로 전미끄럼 상태가 된다. 이것은 원통 또는 구의 접촉에서 나타나는 Hertz 문제에서는 볼 수 없는 현상이다. Hertz 접촉인 경우 부분미끄럼 문제를 해석한 Mindlin-Cattaneo 해에서는 최대 수직 트랙션이 접촉면의 중앙에 위치하므로 전단하중의 증가에 따라 미끄럼 영역이 지속적으로 증가하게 된다. 본 연구에서 고려한 접촉부의 형상에 대해서는 모따기를 갖고 있는 경우가 더 오랫동안 부분미끄럼 상태를 지속하게 됨을 알 수 있다.

접촉면에서의 마멸 손상은 미끄럼 영역에서 나타나는 것이므로 본 연구에서 고려하고 있는 형상의 접촉물체의 경우에는 최대 수직 트랙션이 접촉 경계에 가까이 존재하도록 접촉부 profile 과 수직 하중  $P$  를 설계하여야 접촉손상을 억제할 수 있음

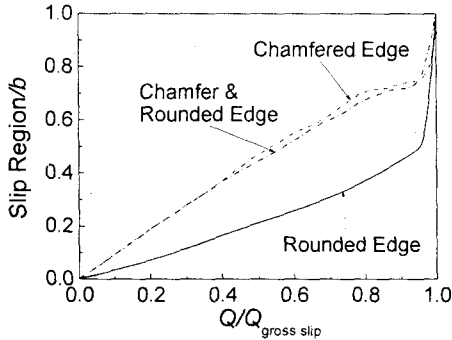


Fig. 8 Expansion rate of slip region for each type.

을 알 수 있다.

한편 Fig. 7의 경우에 대해 전단하중의 증가에 따른 미끄럼 영역의 확장속도를 Fig. 8에 나타내었다. 동일한 전단하중이 작용할 경우 양단이 라운딩된 편치에 의한 접촉의 경우가 모따기된 편치에 의한 접촉에 비해 미끄럼 영역이 더 작으며, 전단하중이 전미끄럼을 발생시키는 전단하중의 약 95% 정도로 증가할 때까지, 미끄럼 영역의 증가율도 더 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 양단이 모따기 되어 있는 경우보다 라운딩 되어 있는 경우가 접촉손상을 억제하는 관점에서 더 유리한 것으로 판단된다. 또한 양단이 모따기 되어 있는 경우에도 미끄럼 영역의 급속한 확장이 전미끄럼을 발생시키는 전단하중의 약 95% 정도 이후에서 나타난 것으로 보아 모서리 가공된 편치에 의한 접촉에서는 전단하중이 전미끄럼을 발생시키는 전단하중의 약 90% 이하일 때 부분미끄럼 상태가 유지되는 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

접촉 손상을 억제하기 위한 방법으로서는 형상개선을 고려한 본 연구는 편치접촉 문제에서 편치 모서리가 라운딩되어 있거나(R), 모따기(C) 또는 모따기와 라운딩이 동시에 가공되어 있는 경우(RC)에 대해 접촉역학적으로 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

R형 편치의 경우 라운딩 반지름이 클수록, C형 편치의 경우 모따기 각이 작을수록 동일한 수직하중에 의한 접촉영역이 넓어지며 C형 편치에서는 모따기가 시작되는 위치에서 수직 트랙션의 첨두가 나타나는 타당한 결과를 보였다. 한편 CR형 편치에 의한 트랙션 형상은 모따기 각이 감소하면 C형 편치에 의한 트랙션과 유사해지며, 모따기 각이 증가함에 따라 R형 편치에 의해 나타나는 트랙션의 형태와 유사해진다.

부분미끄럼 범위 내에서 동일한 전단하중이 작용하는 경우, R형 편치에 의한 접촉일 때가 C형 및 CR형 편치에 의한 접촉에서보다 미끄럼 영역의 크기가 작으며 전단하중의 증가에 따른 미끄럼 영역의 증가 속도도 더 느리다. 한편 미끄럼 영역은 전단하중이 증가할 때 수직 트랙션의 최대점 위치까지 확장될 수 있으며, 이때가 부분미끄럼 상태가 유지될 수 있는 한계이다. 이후 전단하중의 증가에 의해서는 순간적으로 전미끄럼 상태가 되며, 따라서 부분미끄럼 상태를 유지시키기 위해서는 수직 트랙션의 최대값이 발생하는 위치를 접촉부의 중앙의 위치로 가져올 수 있는 접촉부의 profile 설계가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- (1) Hills, D. A., Nowell, D and Sackfield, A., 1993, *Mechanics of Elastic Contacts*, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, UK.
- (2) Johnson, K.L., 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- (3) Goodman, L.E., 1962, "Contact Stress Analysis of Normally Loaded Rough Spheres," *J. Appl. Mech.*, Vol. 29, No. 3, pp. 515-522.
- (4) Ciavarella, M. and Demelio G., 1999, "On Non-symmetrical Plane Contacts," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 41, No. 12, pp. 1533-1550.
- (5) 김형규, 2001, "물체가 기울어진 상태로 접촉하는 경우를 고려한 부분미끄럼 문제의 수치해석," 대한기계학회 재료및과과부분 2001 제 1회 학술대회 논문집, pp. 14-20.
- (6) 김형규 외 3인, 2001, "비대칭 접촉하중에 의한 표면균열 전파거동," 대한기계학회 2001 춘계 학술대회 논문집 A 권, pp. 144-150.
- (7) Mindlin, R. D., 1949, "Compliance of Elastic Bodies in Contact," *J. Appl. Mech.*, Vol. 16, pp. 259-268.
- (8) Cattaneo, C., 1938, "Sul Contatto di Due Corpi Elastici: Distribuzione Locale Degli Sforzi," *Rendiconti dell' Accademia nazionale dei Lincei*, Vol. 27, Ser. 6, pp. 342.
- (9) Hills, D. A. and Nowell, D., 1994, *Mechanics of Fretting Fatigue*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- (10) H.-K. Kim, D.A. Hills and D. Nowell, 2000, "Partial Slip between Contacting Cylinders under Transverse and Axial Shear," *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 42, No. 2, pp. 199-212.