

DOI <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2015.31.4.170>

## 트라이볼로지 손상을 억제하기 위한 구조물 모서리부 설계: 제2부 - 설계인자 분석 및 예

김형규<sup>†</sup>

한국원자력연구원 경수로핵연료기술개발부

### Design of Structure Corners restraining Tribological Failures: Part II – Analysis of Design Parameters and Examples

Hyung-Kyu Kim<sup>†</sup>

LWR Fuel Technology Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received June 24, 2015; Revised July 24, 2015; Accepted July 25, 2015)

**Abstract** – As a continuation of Part I, which developed a design formula of the minimum corner radius ( $R_{min}$ ) for restraining tribological failures, Part II investigates design parameters such as material properties and contact force. As design examples, Al 7075-T651, SST 304 and HT-9 are chosen for the materials and 1, 10 and 100 kN are used for the forces. The results show that the difference in  $R_{min}$  decreases as either the elastic modulus increases or the contact force decreases. Given the same material and force, the permissible  $R_{min}$  decreases as the flat region increases and vice versa. Because the  $R_{min}$  values obtained from the examples are very small, the dimensions of the corner radius normally designed in engineering structures are regarded acceptable. The von Mises stress evaluated for a typical example, which is far below the yield strength, confirms this interpretation. Nevertheless, the present work can provide a design criterion as well as a guideline for quality control in the manufacturing of, in particular, contact corners, which has not been attempted before to the best of the author's knowledge. In addition, this paper considers the problem of a step that may be formed in the contact contour by using a similar approach. The result shows that no size of the step is permissible.

**Keywords** – structure corner(구조물 모서리부), corner radius(모서리 반지름), contact mechanics(접촉역학), contact length(접촉 길이), step(단차), machining tolerance(가공 공차)

#### Nomenclature

$A$ : Measure of the compliance of two contacting bodies	$c$ : A half length of the sum of flat and step regions
$E$ : Elastic Modulus	$l$ : Length of the flat region of a punch
$G$ : Shear modulus	$k$ : Ratio of the allowable minimum corner radius to the length of the flat region
$P$ : Contact normal force	$s$ : Step height
$R$ : Radius of contact corner	$\sigma_v$ : Von Mises Stress
$b$ : A half length of the contact region	$\sigma_y$ : Yield strength
	$\nu$ : Poisson's ratio

#### 1. 서론

<sup>†</sup>Corresponding author : hkkim1@kaeri.re.kr  
Tel: +82-42-868-2111, Fax: +82-42-863-0565

공학 구조물의 접촉부 모서리에 일반적으로 가공하

는 모따기 라운딩 공정에서 그 반지름의 크기에 대한 적절한 설계 기준이 없는 문제를 해결하고자 한 본 연구는 제1부[1]에서 접촉 역학을 이용하여 불완전 접촉에서 완전 접촉 상태로 전환되는 조건을 고려하여 최소 반지름을 구하는 설계 공식을 개발하였다.

이어 본 논문의 제2부에서는 개발된 설계 공식을 실제 적용하는 방법을 기술한다. 이를 위해 공학적으로 많이 사용하는 재료를 적용하고 접촉 하중을 변화시킴으로써 설계 변수로서의 재료 성질과 접촉 하중의 영향을 분석하고, 설계 예제에서 계산되는 최소 반지름과 그 크기에 대해 고찰한다. 한편 접촉 응력으로부터 물체 내의 Von Mises 응력을 계산하는 방법도 소개하며 트라이볼로지 손상 가능성과의 관계도 토의한다.

또한 제2부에서는, 모서리 라운딩을 위한 기계 가공에서 치수공차, 절삭공구의 정밀도 오차, 작업자의 실수 등 여러 요인으로 인하여 접촉부에 발생할 수 있는 단차에 대한 접촉역학적 분석을 시도하였다. 그 이유는 단차가 존재하면, 그 위치에 국부적으로 높은 접촉 응력이 발생하게 되고 이에 따라 마멸, 균열진전과 같은 트라이볼로지 손상이 발생할 가능성이 높아져 라운딩 가공의 목적을 오히려 달성할 수 없게 되기 때문이다.

이를 위해 단차의 높이를 변수로 하여 접촉 응력을 분석하고 허용 가능한 단차의 높이를 파악함으로써 전 반부의 라운딩 최소 반지름 설계와 함께 트라이볼로지 손상을 억제할 수 있는 라운딩 부의 설계 기준과 제조 품질검사 기준의 가이드 라인으로 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. 설계 변수 분석

본 논문의 제1부에서 유도한 모서리 라운딩부의 최소 반지름 공식은 다음과 같다[1].

$$\frac{AP}{l} = \frac{1}{k} \left\{ \frac{\pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{1}{1+k\sin\eta}\right)}{2\left(\frac{1}{1+k\sin\eta}\right)^2} \right\} \sqrt{k\sin\eta(k\sin\eta+2)} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 최소 반지름  $R_{min}$ 와 접촉 영역 중 평탄부 길이  $l$ 의 비이며,  $\eta$ 는 접촉물체 측면 각도,  $P$ 는 단위 두께 당 접촉 수직 하중이다. 한편  $A$ 는 두 접촉 물체의 탄성적 성질을 복합적으로 표현한 상수로서 다음과 같이 정의된다.

$$A = \frac{1-\nu_1}{G_1} + \frac{1-\nu_2}{G_2} = 2\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right) \quad (2)$$

여기서,  $E$ ,  $G$  및  $\nu$ 는 각각 탄성계수, 전단 강성계수 및 프와송 비이며 아래 첨자 1, 2는 서로 다른 두 접촉 물체를 지칭한다.

실제 기계 구조물의 재질로서 일반적으로 많이 사용하는 금속을 고려할 때,  $E=n \times (10^5 \sim 10^6)$  MPa( $n$ 은 양의 실수)이며,  $0 < \nu < 0.5$  이므로  $A=n \times (10^{-6} \sim 10^{-7})$  MPa( $n$ 은 양의 실수) 정도의 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 특별한 경우로서, 만일 두 접촉 물체가 모두 강체라면  $A=0$ 이 되며, 탄성계수가 클수록  $A$ 는 작은 값을 갖게 된다. 이에 대해  $P$ 는 Newton,  $l$ 이 mm의 단위를 갖는 것으로 생각할 때 식 (1) 좌변은 크지 않은 값을 가질 것으로 예상할 수 있다.

식 (1)로 표현된 함수의 거동을 나타내기 위해 일반적으로 기계 구조물에서 많이 사용하는  $\eta=90^\circ$ 인 경우(직각 편치 형상, 제1부 Fig. 4 참조)를 고려하여 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에서는 평탄부 길이에 대한 모서리 최소 반지름의 크기가 10%까지인 경우에 대해 나타내었다.

Fig. 1으로부터 식 (1)은  $R_{min}/l$ 에 대해  $AP/l$ 이 단조 증가하는 것을 볼 수 있으며,  $AP/l \rightarrow 0$ 일 때  $R_{min}/l$ 의 변화율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 임의의 평탄부 길이에서 물체의 탄성계수가 강체에 접근하거나 접촉 하중이 줄어 드는 경우에는 탄성계수 또는 접촉 하중의 변화에 따른 모서리 최소 반지름의 차이가 크지 않게 되는 것을 의미한다.

그러나 재료나 하중이 같은 조건에서 접촉부의 평탄부 길이가 증가하게 되면 허용할 수 있는 최소 반지름은 작아지게 되며, 그 반대의 경우도 성립함을 알 수 있다. 이것은 평탄부 길이가 증가하면 접촉면의 하중을 견딜 수 있는 능력이 증가하므로 작은 모서리 반지름에서도 상대적으로 완전 접촉 상태가 발생하기 어렵

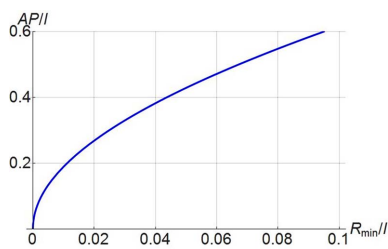


Fig. 1. Typical behaviour of Eq. (1).

기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

한편, 설계한 모서리 라운딩부의 반지름이 물체의 트라이블로지 손상(예, 프레팅 피로 또는 마멸)을 억제할 수 있는가에 대한 검토가 필요하다. 이를 위해 본 연구 제1부[1]에서는 설계자가 결정한 라운딩 반지름을 갖는 접촉부 형상을 이용하여 접촉 응력을 구하고 이로부터 내부 응력과 Von Mises 응력을 구한 후, 이를 재료의 항복 강도  $\sigma_{ys}$ 와 비교하여 작을 경우 최종 설계 값으로 취하는 방법을 제안하고 있다. 이때 Von Mises 응력  $\sigma_r$ 는 아래와 같이 계산한다.

$$\sigma_r = \sqrt{3J_2} \tag{3}$$

여기서,  $J_2$ 는 second invariant of deviatoric stress tensor로서 아래와 같다.

$$J_2 = \frac{1}{6} \{ (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} + \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})^2 \} + (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \tag{4}$$

여기서, 평면 변형을 상태일 때,  $\sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$ ,  $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$  이다.

### 3. 설계 예제

#### 3-1. 재질의 영향

재질에 따른 모서리 라운딩 반지름의 설계 치수변화를 관찰하기 위해 항공기에서 많이 사용하는 알루미늄 7075-T651 합금(Al 7075-T651)과 경수로형 원자로 구조재료로 많이 사용하는 304 스테인레스강(SST 304), 그리고 소듐냉각 고속로 핵연료집합체 구조부품의 주재료인 HT-9강을 예로 하였으며, 각각의 주요 기계적 성질을 Table 1에 보여 준다. 알루미늄 7075-T651 합금과 304 스테인레스강의 자료는 공공 데이터베이스[2]로부터 취하였으며, HT-9 강 자료는 한국원자력연구원의 내부 자료[3]로부터 구하였다.

우선 동일한 두 접촉 물체인 경우를 생각한다. 사용한 재료상수 외에 해석에 사용한 설계 변수 값으로서,

**Table 1. Mechanical properties of the materials for design examples**

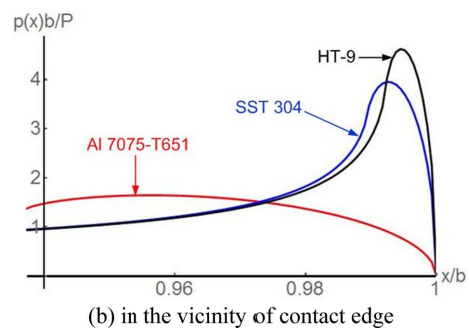
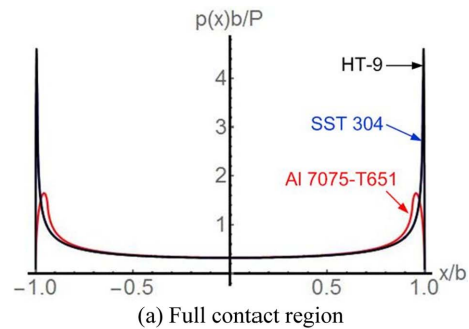
Material	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_{ys}$ (MPa)
Al 7075-T651	71700	0.33	503
SST 304	193000	0.29	215
HT-9	220000	0.33	522

**Table 2. Minimum corner radii designed for each material (contact between the same material is assumed)**

Material	$R_{min}/l (=k)$	$R_{min}$ (mm)	$b$ (mm)
Al 7075-T651	$6.64198 \times 10^{-2}$	0.67	10.6680
SST 304	$1.00634 \times 10^{-2}$	0.11	10.1068
HT-9	$7.34502 \times 10^{-3}$	0.08	10.0777

접촉 수직 하중  $P=100$  kN, 그리고 접촉부의 평탄부 길이  $l=10$  mm로 하였다. 이로부터 계산된 식 (1)의 결과를 Table 2에 보여 준다.

Table 2에서 모서리 최소 반지름( $R_{min}$ )은  $k \times 10$  mm로 하면 되나 기계 가공에서  $10^{-2}$  mm 이하의 치수를 가공하는 것은 매우 어려우며, 상당한 가공비가 소요될 것으로 판단하여  $10^{-2}$  mm까지만 나타내었다. 이때 계산 결과,  $10^{-3}$  mm 이하의 값이 존재하므로  $10^{-3}$  mm 단위에서 올림하여 나타낸 것이다. 한편 Table 2에는 접촉 길이의 반인  $b$ 를 제1부의 식 (12)를 이용하여 계산한 결과를 함께 보여 주고 있다. 각각의 값이  $l < b < (l+R_{min})$ 인 것으로부터 불완전 접촉 상태임을 확인할 수 있다. 한편, Table 2로부터 탄성계수가 작은 재료일수록 동일 하중 조건에서 모서리 반지름을 크게



**Fig. 2. Comparison of normal contact traction profiles.**

**Table 3.**  $R_{min}/l$  values for a contact between different materials

Material combination	$R_{min}/l (= k)$
Al 7075-T651-SST 304	0.0324439
SST 304-HT-9	0.00865179

설계하여야 함을 알 수 있다.

이제 Table 2의  $R_{min}$ 을 이용하여 접촉 수직 응력 ( $p(x)$ )의 형상을,  $p(x)$ 를 무차원화 한  $bp(x)/P$ 로 나타내어 Fig. 2에 보여 준다. Fig. 2(a)는  $bp(x)/P$ 를 전 접촉 구간에 대하여 나타내고 있으며, 접촉 경계 부근에서의 거동을 좀 더 명확히 보여주기 위해 경계 부근을 확대한 것이 Fig. 2(b)이다. 모서리 반지름이 작을수록  $bp(x)/P$ 의 최대값이 발생하는 위치가 접촉 경계로 더욱 근접하게 되는 동시에 그 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다.

이어서 이종 재료 간의 접촉인 경우를 생각해 보면, 식 (1)로부터 두 접촉 물체의 재료가 서로 바뀌더라도,  $A$  값이 변하지 않으므로, 최소 반지름의 크기는 동일하게 계산됨을 알 수 있다. 그러나 그 크기는, 탄성계수가 작은 재질 간의 접촉인 경우와 큰 재질 간의 접촉인 경우에 계산된 값 사이에 존재하게 된다. Table 3에 그 예를 보여 주고 있으며, Al 7075-T651과 SST 304 및 SST 304와 HT-9 간의 접촉에 대해 계산한  $R_{min}/l$  값을 Table 2와 비교하면 이를 쉽게 알 수 있다. 이 계산에서  $P$ 와  $l$ 은 Table 2를 위한 계산에서와 동일하게 하였다.

**3.2. 하중의 영향**

접촉 수직 하중의 변화에 따른 모서리 라운딩 최소 반지름의 변화를 분석한다. 예제 계산을 위해 3.1절에서 사용한 재료를 고려하였으며, 접촉 하중의 크기는 앞의 100 kN 외에 10 kN 및 1 kN로 하였다. 결과로 구한  $R_{min}/l$  값을 Table 4에 보여 준다.

Table 4의 결과로부터 접촉 하중이 1/10, 1/10<sup>2</sup>으로 줄어 들 때 허용 최소 반지름의 크기는 대략 1/10<sup>2</sup>, 1/10<sup>4</sup>로 더 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과는, Table 2에 나타난 재질의 영향과 비교하였을 때, 접촉부의 모서리 반지름 설계에서는 접촉 하중의 크기를 가장 우선적으로 고려하여야 한다는 것을 의미한다.

한편, 현재의 예제에서 접촉 구간의 평탄부 길이를 10 mm로 하고 있으므로, Table 2와 4의 결과로부터

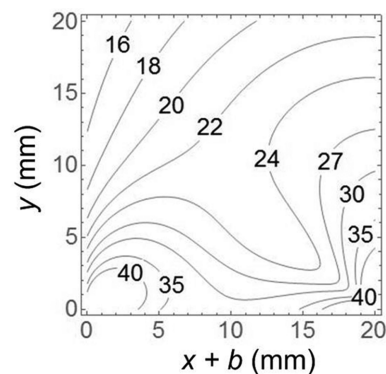
**Table 4.**  $R_{min}/l$  values at  $P = 10$  and 1 kN (contact between the same material is assumed)

Material	$P$ (kN)	$R_{min}/l (= k)$
Al 7075-T651	10	$6.9473 \times 10^{-4}$
	1	$6.95063 \times 10^{-6}$
SST 304	10	$1.01336 \times 10^{-4}$
	1	$1.01342 \times 10^{-6}$
HT-9	10	$7.382410^{-5}$
	1	$7.3822110^{-7}$

최소 반지름의 크기는 제조공차의 일반적 최소 크기인 10<sup>-2</sup> mm보다 현저히 작은 값을 알 수 있다. 물론 본 연구에서 고려한 재질과 하중, 그리고 평탄부의 길이가 모든 공학 설계의 경우를 포함하고 있지는 않으나, 모서리 반지름의 크기를 접촉 물체 평탄부 길이의 수 % 정도로 설계할 수 있을 것으로 예상된다.

예를 들어, 평탄부 길이 10 mm를 갖는 SST 304 재질로 된 부품이 접촉 하중 1 kN을 받을 때, 모서리 반지름을 평탄부 길이의 1%인 0.1 mm로만 설계하더라도 이 값은 최소 허용 반지름의 거의 10<sup>4</sup> 배에 해당하게 된다. 이때의 Von Mises 응력을 제1부에서의 식 (4) 및 본 2부에서의 식 (3)으로부터 계산하면 Fig. 3과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이때 접촉 수직 응력,  $p(x)$ 에 더하여 접촉 전단 응력  $q(x)=0.5 \times p(x)$ 로 하여, 마찰 계수, 0.5인 전 미끄럼 상태를 고려하였다.

한편 제1부 식 (4)의 적분을 위해,  $p(x)$ 와  $q(x)$ 는 접촉 구간을 100개의 미소 구간으로 나누어 101개의 collocation point에 해당하는  $p(x_i)$ ,  $q(x_i)(i=0, \dots, 100)$ 를 구하여 수치적분을 수행하였다. 또한 Fig. 3의 수평 축



**Fig. 3.** Von Mises stresses (in MPa) of SST 304 at  $P = 1$  kN,  $l = 10$  mm,  $R = 0.1$  mm.

은 원점을 접촉 길이의 반( $b=10.1068$  mm; Table 2 참조)만큼 좌측으로 이동하여 나타낸 것이며, 수직 축과 함께 전체 범위를 접촉 길이( $2b$ )로 한 것이다. 본 논문의 모든 계산을 위해 자체 개발한 프로그램[4]을 사용하였다.

Von Mises 응력이 Table 1에 나타난 SST 304의 항복강도(215 MPa)보다 현저히 작은 값을 보여주고 있어 트라이볼로지 손상에 저항성을 갖는 모서리 라운딩 반지름 설계가 되었다고 할 수 있다.

#### 4. 라운딩부 단차 문제

##### 4-1. 문제의 구성

앞 절에서의 라운딩 반지름 설계와 함께, 본 절에서는 라운딩 가공이 끝나는 부위에서 발생할 수 있는 단차 문제를 고려한다. 단차의 존재는 접촉 응력을 변화시키며 따라서 트라이볼로지 손상에 영향을 미치게 된다.

본 문제의 기하학적 형상을 Fig. 4에 도시한다. 즉, 양단에 라운딩 반지름  $R$ 과 평탄부 길이  $2l$ 을 갖는 편지를 고려하고, 평탄부와 라운딩 부의 사이에  $q$ 의 각도와 높이  $s$ 를 갖는 단차를 형성시켰다. 이때 접촉 물체 중심으로부터 단차가 끝나는 위치까지의 거리를  $c$

라 하면  $c$ 와  $s$  사이에 다음의 기하학적 관계가 있음을 알 수 있다.

$$c = l + s / \tan \theta \tag{5}$$

또한, 접촉 경계가 라운딩부에 있는 것으로 하여 불완전 접촉 상태를 가정하고, 앞에서와 같이 그 위치를 접촉 물체 중심으로부터  $b$ 만큼 떨어진 곳으로 한다.

한편, 문제의 단순화를 위해 접촉 수직 하중  $P$ 만 작용하는 경우로 하고, 이때 마찰을 무시한다. 이에 따라 제1부에서의 식 (5)를 이용하여 접촉응력  $p(x)$ 를 구할 수 있다. 편의를 위해 이를 식 (6)으로 다시 쓴다.

$$\frac{1}{A} \frac{dh(x)}{dx} = \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{p(\xi)}{x-\xi} d\xi \tag{6}$$

결과적으로, 본 문제는 접촉 구간 내에 접촉부 형상이 5개 존재하는 경우이다. 즉 접촉 물체 중앙 부위에 있는 평탄부와 이의 좌우측에 각각 단차부와 라운딩부가 있는 형태이며, 각각의 구간을 Fig. 4(b)에 숫자로 표시하였다.

접촉부 내에 다수개의 구간 형상을 갖는 경우에 접촉 응력을 구하는 문제는 식 (6)의  $h(x)$ 를 접촉 구간 내의 각 형상에 대해 별도로 정의하고 이를 선형 합으로 구성하여 전 구간에서의  $h(x)$ 로 정의하는 방법을 사용함으로써 해결할 수 있다[5]. 즉 식 (6)에 대입하기 위한  $h'(x)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h'(x) = K_i x + L_i, \quad (i = 1, \dots, 5) \tag{7}$$

여기서  $K_i, L_i$ 는 Table 5에 나타내었다.

Table 5 및 식 (7)이 고려된 식 (6)의 해는 다음과 같다[5].

$$\frac{bp(\varphi)}{P} = -\frac{1}{\pi \cos \varphi} \left[ 1 + \frac{Eb}{2(1-\nu^2)P} I(\varphi) \right] \tag{8}$$

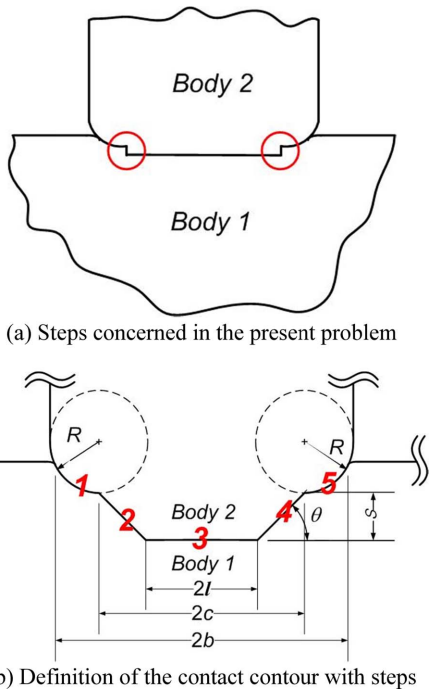


Fig. 4. Geometrical description of the step problem.

Table 5.  $K_i$  and  $L_i$ 's of Eq. (7) for Fig. 4

$i$	$K_i$	$L_i$
1	$-1/R$	$-c/R$
2	0	$\theta$
3	0	0
4	0	$-\theta$
5	$-1/R$	$c/R$

여기서,

$$I(\varphi) = \frac{b}{2} \sum_{i=1}^5 K_i \left( \Delta\varphi_i + \frac{\Delta \sin 2\varphi}{2} \right) + \sum_{i=1}^5 \{ K_i b \sin \varphi + L_i \} \times [\Delta \cos \varphi_i - \Delta \varphi_i \sin \varphi + \cos \varphi \ln \left| \frac{\cos((\varphi + \varphi_i)/2) \sin((\varphi - \varphi_{i+1})/2)}{\cos((\varphi + \varphi_{i+1})/2) \sin((\varphi - \varphi_i)/2)} \right|],$$

$$\Delta \varphi_i \equiv \varphi_{i+1} - \varphi_i, \quad \Delta \cos \varphi_i \equiv \cos \varphi_{i+1} - \cos \varphi_i,$$

$$\Delta \sin 2\varphi_i \equiv \sin 2\varphi_{i+1} - \sin 2\varphi_i, \quad \text{그리고} \quad \sin \varphi = x/b. \quad (9)$$

4-2. 해석 방법 및 결과 분석

라운드 단차의 시작점과 끝점에서는 접촉부 형상 함수가 미분 불가능하게 되므로 식 (6)으로부터 구하게 되는  $p(x)$ 에 첨두가 발생할 것이다.  $p(x)$ 에 첨두가 발생하면 국부적인 높은 응력으로 인해 손상이 개시될 가능성이 크다. 그러나 이 첨두 응력은 단차의 높이에 의존하게 되므로, 해석에서는 단차의 높이  $s$ 를 변화시키며 각각의  $p(x)$  형태를 조사하여 단차가 없는 건전한 라운드 펀치의  $p(x)$ 와 같아질 때의  $s$  값을 찾았다. 이에 대한 예제로서 알루미늄 7075-T651 합금 재질의 라운드 펀치를 사용하였으며 그 형상으로  $l = 10 \text{ mm}$ ,  $R = 5 \text{ mm}$ 로 하고 단차가 형성되는 각도  $q = 45^\circ$ 로 하

였으며  $P = 1 \text{ kN}$ 으로 하였다. 한편  $s = nR$ 로 하여 단차의 높이를 라운드 반지름에 대한 비례 치수로 하였으며,  $n$ 을  $10^{-1} \sim 10^{-5}$  범위에서  $10^{-1}$ 의 증분으로 변화시켰다.

해석 결과를 Fig. 5에 보여 준다. Fig. 5(a)에는 전 접촉 구간에서의  $p(x)$ 를 보여 주며, Fig. 5(b)에는 단차 위치에서의  $p(x)$  거동을 좀 더 명확히 보이도록 한 것이다.  $s/R = 10^{-1} \sim 10^{-3}$ 에서는 중앙의 평탄부로부터 단차가 시작되는 지점과 단차가 끝나며 라운딩이 시작되는 지점에서 응력의 첨두가 뚜렷하게 나타났다. 자세한 관찰 결과,  $s/R = 10^{-4}$ 일 때에도 아주 작은 크기의 응력 첨두 현상이 나타났으며, 단차에 의한 접촉응력의 변화가 무시될 정도가 되기 위해서는  $s/R = 10^{-5}$ 가 될 때였다. 이것은 본 예제의 경우 단차의 높이가 0.05 mm 정도가 되어야 한다는 것을 의미한다.

예제 해석의 결과인 0.05 mm 높이의 단차는 절삭 가공에서 가능한 공차의 크기보다 매우 작은 값으로서 라운드 가공의 가공공차로 부여하기가 어렵다. 따라서, 모서리 라운드 가공에서는 어떠한 단차도 허용하지 않도록 규제하는 것이 요구되며, 단차발생이 우려되는 부위에 “Blending”과 같이 임의의 부드러운 곡면으로 처리하도록 도면에 표기하는 것이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

접촉부 경계에서 발생하는 트라이볼로지 손상의 억제 방법에 대한 연구로서, 라운드 반지름의 최소값 설계공식을 개발한 제1부에 이어 제2부에서는 재료 물성 및 접촉 하중이 최소 반지름의 결정에 미치는 영향을 분석하였으며, 재료 물성에 비해 접촉 하중의 영향이 현저히 큰 것을 알 수 있었다.

일반적인 구조 재료 및 하중 조건을 이용한 예제 해석으로부터 대략 0.1 mm 크기 이상의 모서리 라운드 반지름을 설계하면 트라이볼로지 손상에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되었다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서 개발한 설계 공식은 특별한 근거 없이 임의로 결정하여 왔던 모서리 라운드 반지름의 설계 기준 및 가공 시의 품질검사 기준으로 사용될 수 있을 것이다.

이에 더하여 모서리 라운드 가공 시 발생할 수 있는 단차의 허용 범위를 접촉 응력장을 분석함으로써 조사하였으며, 공학적으로 가공이 거의 불가능한 크기( $\sim 10^{-2} \text{ mm}$ )의 단차만을 허용할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 모서리부의 라운드 가공 시 어떠한 높이

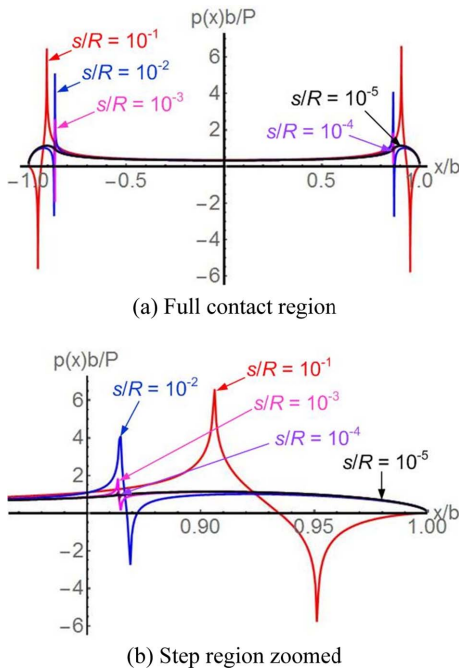


Fig. 5. Influence of the step on the normal contact traction.

의 단차라도 제거하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

### Acknowledgements

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발 사업의 지원으로 수행되었음(과제번호: 2012M2A8A2025639).

### References

- [1] Kim, H.-K., "Design of structure corners restraining tribological failures: Part I-Development of design formula", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, submitted, 2015. <http://www.matweb.com>, Accessed July 20, 2015.
- [2] <http://www.matweb.com>, Accessed July 25, 2015.
- [3] Kim, S. H., "Tensile properties of 12Cr-1MoW martensitic stainless steel", *KAERI Internal Report*, 2004.
- [4] Kim, H.-K., *SHEARCONTAC*, Registered Program No. 2001-01-12-7084, Korea, 2001.
- [5] Ciavarella, M., Demelio G., "On non-symmetrical plane contacts", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 41, pp. 1533-1550, 1999.