

DIAL GAUGE 測定子の 接觸誤差에 關한 研究

강석수*, 홍준희**, 이동주***

A Study on the Contact Error of Dial Gauge

Suk-Soo Kang*, Jun-Hee Hong**, Dong-Ju Lee***

Abstract

In order to maintain the faith and accuracy with precision of machinery, it is recently required the precise comprehension about approach which is appeared in the contact area between two bodies, because approach affects the static stiffness and dynamic characteristic of contact area.

This study applied H. Hertz's circle contact area theory as much lower measuring force.

It is measured approach influenced by various factors which were concerned with contact errors like material, form of two bodies, using calibration tester.

As a result, the following conclusion can be obtained.

- 1) The approach appears greatly in order of carbon steel(SM20C), aluminum(A6061-T6) and high density polyethylene(5305E).
- 2) The approach appears in order of concave, disc, convex form, in the ration of contact area size by the difference of curvature.

Key Words: approach(근접량), contact area(접촉면적), measuring force(측정력), curvature(곡률)

1. 서론

접촉유형에는 점, 선 및 면 접촉이 있으나 점, 선 접촉에 관한 접촉역학의 문제가 1881년 H. Hertz에 의해 최초로 보고되어 현재까지 이와 같은 접촉부재의 최적강도설계 시에 그의 접촉이론이 근간이 되어 이용되고 있다.

H. Hertz는 두 탄성체간 접촉부의 표면상태와 응착력을 무시한 상태에서 기하학적으로 0에 가깝게 접촉한다는 가정 하에 이론 식을 정립하였다. 일반적으로 실제 접촉의 경우는 접촉 면적이 외관상의 접촉 면적보다 훨씬 적다는 것이 Molm에 의해 알려지면서 미시적인 관점에서의 접촉 표면에 대한 연구가 진행되었다¹⁾.

강도가 낮은 평면부 소재의 탄성한도 이내에서 하중 변화를 준다 할지라도 불규칙적으로 분포되어 있는 표면 미소돌기의 정점부분에서부터

접촉이 시작되면서 접촉부의 표면미소돌기가 소성변형을 수반하기 때문에 체적변형에 대한 완전접촉이 이루어지지 않는다²⁻³⁾. 따라서 이러한 한계하중에서는 작용하중이 감소할수록 실제 접촉변형이 비 선형적으로 증가하면서 그리고 접촉변형과 압력이 접촉 기하학에 비 선형이기 때문에 접촉 미소돌기의 변형모드(탄성, 소성, 탄, 소성)에 크게 관계없이 접촉부의 표면조도가 증가함에 따라 Hertz접촉에 대한 이탈도가 증가한다⁴⁻⁶⁾.

본 논문에서는 0.001mm부터 1mm까지 범위의 다이얼 게이지를 이용하여 다이얼 게이지 스피ndl의 접촉오차에 미치는 여러 요인을 알아보기 위하여 실험적인 방법에 의하여 피 측정물의 재질별, 형상별에 따른 근접량(Approach)의 변화 특성을 규명하고자 한다.

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교

***충남대학교

다이얼 게이지 스펀들에 의해 작용하는 측정력은 매우 작은 하중이 피 측정물에 작용하므로 3형상의 피 측정물에 발생하는 접촉면적의 형상을 원형으로 간주하고 근접 량을 고찰하고자 한다. 또한, 다이얼 게이지를 이용한 점 접촉 실험을 통한 근접 량이 H. Hertz에 의해 정립된 이론 식과 어떠한 관계를 가지는가를 고찰하고자 한다.

2. 관련이론

2.1 Hertz의 탄성접촉 이론

아무리 매끄럽게 가공된 표면이라 할지라도 미시적으로는 까칠한 점들(asperities)이 존재하게 되며 외관상의 접촉 면적보다는 극히 적은 일부만이 실제 접촉을 하게 된다. Greenwood에 의하면 접촉 면적이 작은 범위에서는 새로운 접촉점들이 생기기 때문에 기존 접촉점들의 성장이 어느 정도 상쇄되어 평균적으로는 그리 큰 변화가 없으며, 하중이 더욱 증가하게 되면 이번에는 생성된 접촉점들이 합쳐지기 때문에 접촉점의 수는 감소하지만 접촉면적은 더 빨리 증가하게 된다⁷⁾.

구와 평면의 점 접촉에 대한 Hertz접촉이론은 탄성 이론적인 측면에서 접촉부의 표면상태와 응력 등을 무시한 가정에 근거하였기 때문에 체적변형에 대한 완전접촉이 이루어지고 접촉 원의 반경이 접촉 구의 반경에 비하여 극히 미소하므로 구면상의 일 점에 작용하는 하중점 근방의 변형은 반무한체 요소의 일 점에 작용하는 하중점 근방의 변형과 같게 되어 이를 중첩하므로써 Hertz접촉 설계 식이 유도되었으며⁸⁾ Fig. 2. 1처럼 두 물체는 응력을 받지 않는 상태에서 기하학적으로 0접촉상태로 가정하였다. 접촉점 0에서 X-Y 평면을 고려하면, 0점 가까이에서 두 물체의 형상들은 다음 식으로 표현할 수 있다⁹⁾.

$$Z_1 = A_1 x^2 + B_1 y^2 + 2 H_1 xy$$

$$Z_2 = A_2 x^2 + B_2 y^2 + 2 H_2 xy$$

응력을 받지 않는 상태에서 공통법선에 따라 측정되는 두 점 사이 거리는 x, y축이 어느 방향으로 선택되든 지간에 플러스이어야만 하며

$H_1 + H_2 = 0$ 이 되도록 x, y를 선택할 수 있다.

$$\text{따라서 } Z_1 + Z_2 = A x^2 + B y^2$$

물체는 서로 압력을 받을 때 양쪽에서 변위가 일어나게 되며 물체1에서 (x, y, z₁)에 대한 변위는 (u₁, v₁, w₁)이고 물체2에서 (x, y, z₂)에 대한 변위는 (u₂, v₂, w₂)이다. 그러므로 접촉영역 내에서는 $Z_1 + W_1 = -(Z_2 + W_2) + \delta$ 이다.

여기서 δ 는 두 물체의 근접 량이다.

접촉영역(S)내에서

$$W_1 + W_2 = \delta - z_1 - z_2 = \delta - A x^2 - B y^2$$

$$\text{여기서 } A + B = \frac{(S_1 + S_2)}{2}$$

$$B - A = \frac{(D_1^2 + D_2^2 + 2 D_1 D_2 \cos 2\phi)^{\frac{1}{2}}}{2}$$

$$S_i = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R'_i}, \quad D_i = \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R'_i} \text{ 이다.}$$

접촉영역은 반경 a인 원형이며 (2.1)식으로 표현되는 접촉 영역내의 변위를 위한 경계조건은

$$A = B = \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \text{이며 } r^2 = x^2 + y^2 \text{ 으}$$

$$\text{로 표현하면 } W_1 + W_2 = \delta - \left(\frac{1}{2R} \right) r^2 \dots \dots \dots (2.1)$$

이 성립된다. $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ 은 곡률이다.

(2.1)식을 만족하는 변위를 발생시키는 무 마찰 상태로써 두 물체 사이의 압력분포는

$$p = p_0 \left\{ 1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \text{ 이므로 법선 변위는}$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{1-\nu^2}{\pi E} \frac{p_0}{a} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{\pi}{4} (a^2 - r^2 + r^2 \cos^2 \theta) d\theta \\ &= \frac{1-\nu^2}{E} \frac{\pi p_0}{4a} (2a^2 - r^2), \quad r \leq a \dots \dots \dots (2.2) \end{aligned}$$

물체2에 작용하는 압력은 물체1에 작용하는 압력과 같기 위해서는

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \text{ 이 성립된다.}$$

$$(2.1), (2.2) \text{식 으로부터 } \frac{\pi p_0}{4a E} (2a^2 - r^2)$$

$$= \delta - \left(\frac{1}{2R} \right) r^2 \text{ 을 얻을 수 있다. 이때}$$

접촉원의 반경 $a = \frac{\pi p_0 R}{2 E}$, 두 물체간 상호근접량

$$\delta = \frac{\pi a p_0}{2 E}, \text{ 전체 접촉력}$$

$$P = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2 \text{ 으로부터}$$

$$a = \left(\frac{3PR}{4E} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \delta = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9P^2}{16R E \cdot 2} \right)^{\frac{1}{3}} \text{을 얻을 수 있다.}$$

공통 접선 면의 면적(S)에서 무 마찰 접촉을 하는 두 물체의 탄성체는 반경이 R_1, R_2 인 두 구(球)의 근접 량(δ)과 접촉 원호의 반경(a)은

$$\delta = \left\{ \left(\frac{9}{16} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right\}^{1/3} \times \left\{ \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) P \right\}^{2/3} \text{으로 표현할 수 있다}^{9-11)}.$$

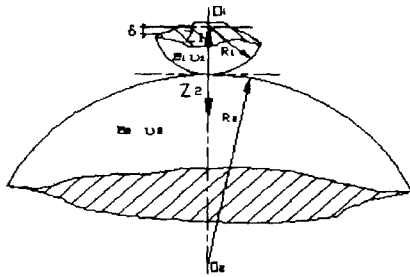


Fig.2.1 The slight contact between two spheres

R : 반지름(mm) 첨자1 : Dial gage 측정자 구

ν : Poission's ratio 첨자2 : 피 측정물

E : Young's modules(kg/mm²) P : 측정력(kgf)

반경 R 인 이상 구와 이상평면이 수직하중을 받을 때 H. Hertz의 접촉이론에 따르면 접촉하고 있는 단단한 구의 접촉력(p)과 근접 량(δ)은 비 선형 식으로 표현되며 이 때의 접촉강성계수는 물체의 기하학적 특성과 재료적 특성에 의해 결정된다¹²⁾.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 주 실험장비는 Fig. 3. 1과 같고 Table 3. 1은 실험에 사용한 제 장비들이다. 다이얼 게이지의 오차는 Calibra. tester를 이용하여 Calib. tester의 Holder에 다이얼 게이지를 고정 한 후 다이얼 게이지의 스펀들 선단(재질 : 경화된 합금공구강)이 Calibration tester의 텅스텐 베이스에 접촉하도록 하여 오차를 확인하였다.

다이얼 게이지에 작용되는 하중의 측정을 위하여는 Calibra. tester의 미세 이송 장치에 다이얼 게이지가 고정된 마그네틱 베이스를 장착한 후

스프링식 저울에 다이얼 게이지 선단이 접촉되도록 하여 다이얼 게이지에 작용되는 하중을 측정 한 후 전기식 지시저울로 다시 측정값을 확인하였다.

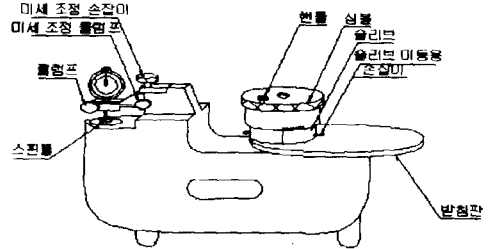


Fig. 3. 1 experimental apparatus

Table 3. 1 Spec. of experimental apparatus

No	Name	Maker	Specification
1	Calibration tester	Mitutoyo	Model : 521-103 0.0002mm
2	Spring type balance	Tanita	Model : 1348 5g
3	Electric type balance	Sartorius	1518B MPB-1 0.001g
4	Surface rough. measuring M/C	Mitutoyo	Model : 178-895K
5	Dial gauge	Mitutoyo	0.001 ~ 1mm

3.2 시험편

본 실험에 사용한 시험편의 재료는 직경이 10mm이며 높이가 10mm인 Disc, Convex, Concave type의 탄소강(SM20C), 알루미늄(A6061-T6), 고 밀도 폴리에틸렌 수지(5305E) 재료를 이용하였고 그 화학적인 조성과 기계적 성질은 각각Table 3. 2 및 Table 3. 3과 같다.

Table 3. 2 Chemical compositions of material

Materi.	Chemical compositions(wt.%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe	
SM20C	0.20	0.15	0.50	0.03	0.035	18.7	9.2	Bal.	
A6061-T6	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
	0.6	0.35	0.1	0.15	0.9	0.25	0.2	0.15	Bal.
5305E	C	H	-	-	-	-	-	-	-
	85.7	14.3	-	-	-	-	-	-	-

Table 3. 3 Mechanical properties of material

Material	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Vickers hardness (Hv)
SM20C	420	260	162
A6061-T6	310	250	92
5305E	28	-	40(HrB)

시험편의 치수와 형상은 Fig. 3. 2와 같고 재료의 균질성을 위하여 평면, 블록, 오목형상에 사용된

재료는 동일한 소재로 가공하여 실험하였다. Table 3. 4는 형상별 시편의 재료특성이다.

Table 3. 4 Types & properties of test speci.

Disc, convex & concave type					
Material	Dim. (mm)	Surf. rough. Ra(μ m)	Hv	E (kg/cm ²)	ν
SM20C	$\phi 10 \times 10$	0.17	162	2.05E6	0.3
A6061-T6		0.61	92	0.72E6	0.34
5305E		0.74	-	0.847E8	0.4

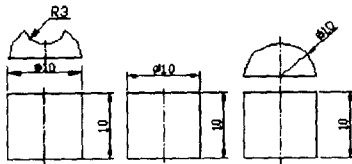


Fig. 3. 2 Shape & dimension of specimen

3.3 실험방법

본 실험에서는 피 측정물의 표면 조도와 다이얼 게이지 스펀들 선단의 반경(R1.25)을 일정하게 유지하고 하중(P)의 변화에 대한 근접 량(δ)의 변화를 측정한다.

3종류 형상의 시편은 선반 및 밀링 가공 후 측정할 면을 #1500사포로 폴리싱하여 표면을 미려하게 처리하였다. 표면처리가 끝난 3가지 재료의 3종류 시편들을 Calibration tester에 장착하여 다이얼 게이지로 측정력을 주면서 근접 량을 측정하였으며 측정된 근접량은 다이얼 게이지의 자체가 갖는 오차를 제외시키고 분석을 하였다.

다이얼 게이지의 측정력을 측정하기 위하여는 다이얼 게이지 오차선도 작성규정 대로 측정할 결과 측정력이 128g까지로 나타났으므로 측정력의 범위가 너무 미세하여 근접 량의 변화를 관찰하기가 어려워 실제 Calibration tester를 이용한 근접 량의 실험에서는 다이얼 게이지의 변화량이 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0mm일 때 측정력의 변화가 가장 뚜렷하게 나타났으므로 그때의 측정력인 108g, 113g, 118g, 123g, 128g을 적용하여 실험하였다. 다이얼 게이지 스펀들의 측정력에 의한 근접 량을 검토하기 위하여는 Calibration tester로 근접 량을 측정하였다.

3종류의 재질인 탄소강, 알루미늄, 고 밀도 폴리에틸렌 수지 및 3종류의 형상인 Disc, Convex, Concave type 모두 동일한 방식으로 측정하였으

며 측정의 오차를 최소한으로 하기 위하여 실온은 $20^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ 로 하였고 동일한 시편에 대하여 10회의 것을 평균으로 하였다.

4. 결과 및 고찰

본 실험 결과 실험용 다이얼 게이지의 넓은 범위 오차, 좁은 범위 오차, 후퇴 오차, 측정력의 정밀도는 KS B 5207규정에 적합한 것으로 확인되었으며 다이얼 게이지의 전, 후진시 측정력 선도는 Fig. 4. 1과 같이 선형적인 것을 확인할 수 있으나 후진 시는 0.95~1mm사이에서 급격히 떨어진 후로는 선형적으로 기점에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

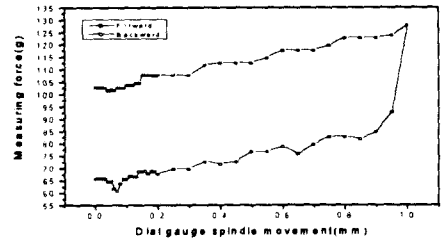


Fig. 4. 1 Dial gage measuring force graph

4.1 물성치에 따른 근접량

평면형상에서 Fig. 4. 2를 통하여 알 수 있듯이 탄소강은 108g, 113g, 118g의 하중이 작용할 때까지 근접 량이 감소하다가 118g, 123g, 128g에서는 하중의 증가에 따라 근접 량이 증가하고 있다. 알루미늄과 고 밀도 폴리에틸렌 수지의 경우는 108g의 초기하중이 작용할 때부터 하중의 증가에 따라 근접 량이 증가함을 알 수 있다.

볼록 형상에서 Fig. 4. 3과 같이 탄소강의 108g, 113g, 118g의 낮은 하중이 작용할 때 하중의 증가에 따라 근접 량이 반비례하는 현상이 나타나며 알루미늄과 고 밀도 폴리에틸렌 수지의 경우는 108g의 초기하중이 작용할 때부터 하중의 증가에 따라 근접 량이 점점 증가함을 알 수 있다.

오목형상에서도 Fig. 4. 4와 같이 알루미늄의 108g, 113g, 118g의 낮은 하중이 작용할 때 하중이 증가함에 따라 근접 량이 반비례하게 나타난다. 탄소강과 고 밀도 폴리에틸렌 수지의 경우는

108g의 초기하중이 작용할 때부터 하중의 증가에 따라 근접 량이 점점 증가함을 알 수 있다.

실험결과 탄소강과 알루미늄은 측정력의 전 구간에 걸쳐 Hertz이론 식에 의한 근접 량과 어느 정도 근접함을 알 수 있으나 비금속인 고 밀도 폴리에틸렌 수지는 Hertz이론 식에 의한 산출량과 많은 차이를 보이고 있다. 비교적 근접 량이 뚜렷하게 구별되는 상대적으로 큰 하중인 118g, 123g, 128g에서는 예외 없이 탄소강, 알루미늄, 고 밀도 폴리에틸렌 수지의 순으로 근접 량이 확대되는 것은 중 탄성계수의 차이에 기인하며 상대적으로 고 밀도 폴리에틸렌 수지보다 중 탄성계수 값이 큰 탄소강, 알루미늄은 Hertz이론 값과의 이탈도가 적고 고밀도 폴리에틸렌 수지는 이탈도가 크다.

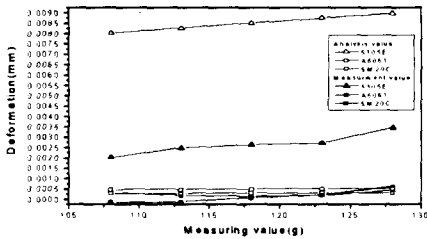


Fig. 4. 2 Approach as material of disc type

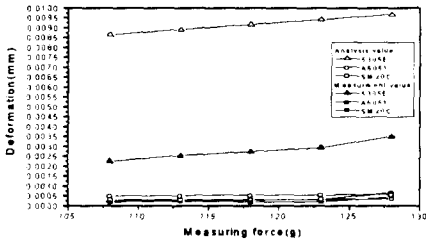


Fig. 4. 3 Approach as material of convex type

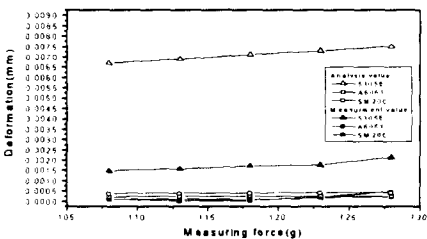


Fig. 4. 4 Approach as material of concave type

4.2 피 측정물의 형상에 따른 근접량

탄소강에서의 근접 량은 Fig. 4. 5와 같이 오목, 평면, 볼록 형상의 순으로 근접 량이 크게 나타남이 확인된다. 118g이하의 적은 측정력이 작용하는 경우는 모든 형상에서 탄소강은 불규칙한 근접 량이 나타남을 알 수 있으며 근접 량이 가장 많은 볼록 형상에서도 108g, 113g, 118g까지 하중증가에 따라 선형적으로 근접 량이 증가 하지만은 않는다.

알루미늄에서의 근접 량은 Fig. 4. 6과 같이 오목, 평면, 볼록 형상의 순으로 근접 량의 차이를 보이고 있다. 오목형상에서 108g, 113g 구간에서 불안정한 변화를 보일 뿐 그 외의 구간에 걸쳐서는 비교적 선형적으로 근접 량이 증가함을 알 수 있으며 오목, 평면, 볼록 형상 모두 Hertz이론 식에 의한 이론 근접 량보다 낮게 나타났으며 하중이 증가할수록 Hertz이론 식에 의한 근접 량과는 이탈도가 감소한다.

고 밀도 폴리에틸렌 수지에서의 근접 량은 Fig. 4. 7과 같이 오목, 평면, 볼록 형상의 순으로 근접 량의 차이를 보이며 전 구간에 걸쳐서 비교적 선형적으로 근접 량이 증가함을 알 수 있다.

실험결과 비교적 근접 량이 뚜렷하게 구별되는 상대적으로 큰 하중인 118g, 123g, 128g에서는 오목, 평면, 볼록 형상의 순으로 근접 량이 확대되어 Hertz이론 식으로 산출된 근접 량으로도 입증되듯이 형상별 곡률 반경의 크기에 따른 접촉면적 크기의 차이에 기인하며 탄소강과 알루미늄의 118g이하 적은 하중에서 비 선형적인 현상은 표면 거칠기의 크기에 비하여 접촉하중에 의한 근접 량(Approach)이 상대적으로 적기 때문이다.

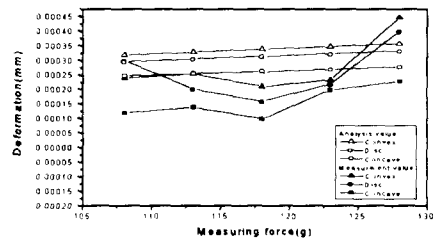


Fig. 4. 5 Approach as form of SM20C

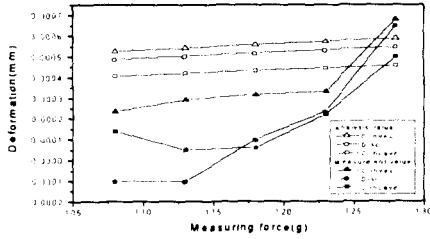


Fig. 4. 6 Approach as form of A6061

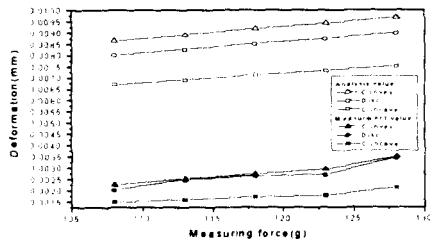


Fig. 4. 7 Approach as form of 5305E

5. 결론

본 연구에서는 다이얼 게이지의 정밀도를 규정하는 KS B 5207에 적합한 0.001mm부터 1mm까지 범위의 다이얼 게이지를 이용하였다.

다이얼 게이지 스펀들에 의해 작용되는 측정력은 매우 작은 하중이 피 측정물에 작용하므로 H. Hertz 접촉이론을 2체 원형 접촉에 적용하였다.

실험적인 방법에 의하여 다이얼 게이지 측정자의 접촉오차에 관여하는 여러 요인, 즉 피 측정물의 재질, 형상 및 측정력에 따른 근접량을 Calibration tester를 이용하여 측정하였다.

실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 탄소강(SM20C), 알루미늄(A6061-T6), 고밀도 폴리에틸렌수지(5305E)의 순으로 근접량이 크게 나타난다.
- 2) 곡률 반경의 차이에 따른 접촉 면적의 크기에 비례하여 오목, 평면, 볼록 형상의 순으로 근접량이 크게 나타난다.
- 3) 재료의 종 탄성계수가 연강 수준에서는 Hertz의 접촉이론과 실제의 변형관계가 거의 같은 값을 나타낸다.
- 4) 재료가 연할수록 Hertz의 이론 값은 실제 값보다 크게 나타난다.

Reference

1. R. Holm, "Electric Contacts", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1967.
2. G. Lundberg and H. Sjoval, "Stress and Deformation in elastic contacts", Chalmers uni. of tech., Gothenburg, uni. press, (p35~39), 1958.
3. J. F. Archard, "Elastic deformation and The laws of friction", Processing of the royal society, London, England, Vol. 243, series A, (p190~193), 1957
4. 築添正, "球面と平面の接觸機構", 日本機械學會論文集, 第41卷, 第346號, (p1909~1915), 1975
5. L. E. Goodman and L. M. Keer, "The contact stress problem for an elastic sphere indenting an Elastic cavity", Int. J. Solids. Structures, Vol. 1 (p405~407), 1965
6. 山田國男, 鏡重次朗, 田澤鐵三 "球と粗い面の接觸", 精密機械, 第45卷, 第12號, (p1425~p1430), 1979
7. J. A. Greenwood, Paper 65 - Lub - 10, ASLE-ASME Lubrication Conference San Francisco, 1965.
8. 金敬模, Hertz接觸에 대한 實驗的研究, 全北大學校 博士學位 論文, (p57~108), 1991
9. G.M.L. Gladwell, Contact problems in the classical theory of elasticity, (p93~98), 1980
10. K. L. Johnson, Contact mechanics, (p46~p106), 1984.
11. D. A. Hills, D. Nowell & A. Sackfield, Mechanics of elastic contacts, (p291~p319), 1993.
12. Electrothermal analysis of large electric current systems by finite element method, 강우중, (p8~10, 45~47), 1995
13. Dial gauges reading in 0.001mm, 한국공업규격, KS B 5207, 1984