

점접촉에서 단무차원매개변수에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Simple Dimensionless Parameter in Higher Pair

김 경 모*

Kyoung-Mo Kim

ABSTRACT

It is important to have exact informations on the real contact mechanism between spheres and rough plates under various normal loads, sphere diameters and combined surface roughnesses.

Most previous papers have proposed the questions of the errors which might be incurred when the Hertzian theory is used to calculated the contact deformation and the contact pressure of practical higher pair.

So, this study investigates the real contact deformation between a rough sphere and a rough plate by three experimental methods far from any assumptions and theorems. The soot coating method among them is used successfully.

Accordingly, this study presents the simple dimensionless parameter to predict such errors to occur in the design of high pair members and to govern the real mechanism of two-body higher pair.

1. 서 론

Hertz접촉이론¹⁾은 탄성론적인 측면에서 접촉부의 표면상태와 응착력 등을 무시한 가정에 근거하여 유도되었기 때문에 체적변형에 대한 완전접촉이 이루어지나, 실제접촉의 경우는 강도가 낮은 평면부 소재의 탄성한도 이내에서 하중변화를 준 다할지라도 접촉부의 표면미소돌기가 소성변형을

수반하기 때문에 체적변형에 대한 완전접촉이 이루어지지 않는다.

작용하중이 감소할수록 실제접촉변형이 비선형적으로 증가하면서 Hertz접촉에 대한 이탈도가 크게 증가하기 때문에 실제접촉기구에 대한 정확한 해를 찾기 위한 노력이 계속되어 왔다.

많은 가정을 전제로 한 이론적 연구방법으로 유한요소법²⁾, 수치해석법³⁾, 선형계획법⁴⁾, 비선형계획법⁵⁾ 등을 적용하였고, 실험적 연구방법으로 광

* 전북산업대학교 기계공학과

탄성실험법⁶⁾, 압전재실험법⁷⁾, 레이저의 산란·반사특성을 이용하는 방법⁸⁾ 등을 적용하여 부단히 연구되어 왔으나 이러한 접촉부재의 강도설계시에 발생하는 에러를 쉽게 예견할 수 있는 접촉기구 지배용 단무차원 매개변수를 보고한 연구는 되어있지 않은 것 같다.

본 연구에서는 바로 위에서 언급한 내용을 최종 연구목적으로 하고 Hertz접촉에 대한 실제접촉기구를 좀더 명확하게 구명하기 위하여 양초그을음 피복법, 생지압측법, 초음파법⁹⁾을 통해 표면거칠기, 구경 및 하중변화에 대한 접촉변형과 압력을 현상학적인 측면에서 고찰한 다음 실제접촉기구를 지배하는 단무차원 매개변수를 제시하고자 한다.

2. 이론적 고찰

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 반경 R인 이상구와 이상평면이 수직하중 P를 받을 때 Hertz접촉이론에 의하여 주어지는 접촉폭(a_h)와 접촉원 반경(r_h)은 다음과 같다.

$$a_h = 2r_h = 2(3PR/4E^*)^{1/3} = 172.8P^{1/3}R^{1/3} \dots (1)$$

단, $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$, $1/E^* = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$,

첨자 1과 2는 구와 평면을 나타낸다.

Maclaurin정리에 의해서 구와 평면의 접촉시에 근접량 δ_h 는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \delta_h &= a_{h1}^2/8R_1 + a_{h2}^2/8R_2 = a_{h1}^2/8R_1 \\ &= a_h^2/8R \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

여기서 구의 접촉폭 $a_{h1} = a_h$ 구의 반경 $R_1 = R$ 이다.

구와 평면표면의 미소돌기의 변형이 각각의 표면거칠기 R_{a1} 과 R_{a2} 의 RMS값에 비례한다고 가정하면 접촉표면의 미소돌기의 변형은 조합표면거칠기 R_{am} 의 RMS값에 비례한다.

탄성체의 체적변형에 대한 표면미소돌기의 변형의 비를 표면거칠기 변화에 따른 단 무차원매개변수 β 로 정의하면 $\beta = f(R_{am}, R, P)$ 의 관계로 표시되어 β 는 조합표면거칠기 R_{am} , 구의 반경 R 및 수직하중 P와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \beta &= R_{am}/\delta_h = 8R R_{am}/a_h^2 \\ &= 2R_{am}(16RE^*/9P^2)^{1/3} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

조합표면거칠기 R_{am} 에 비례하는 무차원매개변수 β 는 접촉구의 반경 R의 1/3승에 비례하고 작용하중 P의 2/3승에 반비례하므로 R_{am} 과 R이 증

가하고 P가 감소함에 따라 β 가 증가하여 Hertz접촉에 대한 이탈도가 증가한다.

또한 R_{am} 과 R이 감소하고 P가 증가하면 Hertz접촉에 접근함을 알 수 있다.

따라서 표면미소돌기의 변형모드(탄성, 소성, 탄소성)에 무관하게 접촉변형이 단무차원 매개변수 β 에 의해서 지배를 받기 때문에 진실접촉기구를 해석하고 검토함은 물론 접촉부의 강도설계시에 발생하는 오류를 쉽게 예견할 수 있는 실용적인 지배인자라고 사료된다.

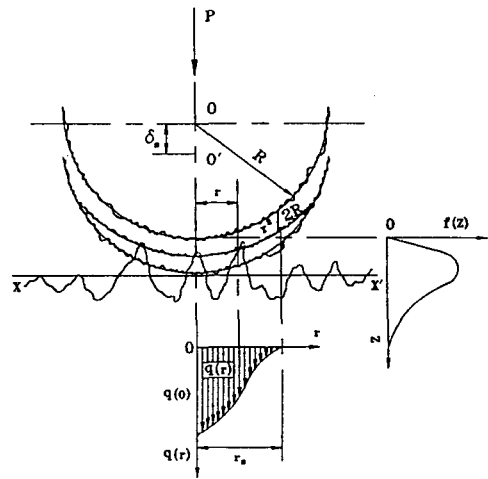


Fig. 1 Contact between a rough sphere and nominally flat rough surface

3. 시험편 및 실험방법

3.1 시험편

Table 1에 나타낸 바와 같이 7단계의 거칠기변화와 3단계의 구경변화에 대해서 각각 양초그을음 피복용 기계구조용강재(SM25C)평판시편 3개와 생지압측용 평판시편 3개를 합해서 6개씩 42개를 Fig. 2(2)(a)와 같이 가공하였다.

또한 고탄소베어링강재(STB2) 볼시편은 직경별로 6개씩 18개를 Fig. 2(1)(a)와 같이 제작하였다. 수직탐촉자용 평면부 시편은 Fig. 2(2)(b)와 같이 5단계의 면적변화를 주어 5개를 준비하고 필요에 따라 그 시편의 접촉부를 연삭하여 건식사포가공으로 거칠기변화를 주어가며 사용하였고 이에 필요한 볼시편은 각각 2개씩 6개를 준비하였다.

7단계의 거칠기변화와 3단계의 구경변화에 대해 7단계의 하중변화를 주는 동안에 접촉부에서 볼의

유동을 방지하기 위하여 Fig. 2(1)(a)와 같이 볼홀더 끝부분에 카운터보링을 하였다.

Table 1 Types and properties of test specimens

Plate												
No.	Dimension (mm)	Blocks	Surface condition			Mach. meth.	H _{RC}	σ_y (Mpa)	E (Gpa)	ν	Mat.	
			Ra(μ m)	Rmax(μ m)	Rz(μ m)							
1	30×30×11	6	0.10-0.19	1.11-1.80	0.85-1.19	G.S	18-19	176	206	0.3	SM25C	
	40×40×100	1	(0.15)			G.S #1200						
2	30×30×11	6	0.23-0.29	2.05-2.43	1.31-2.95	G.S						
	40×40×100	1	(0.26)			G.S #1000						
3	30×30×11	6	0.31-0.39	2.51-3.29	2.50-3.04	G.S						
	40×40×100	1	(0.35)			G.S # 800						
4	30×30×11	6	0.41-0.51	3.32-4.31	2.60-3.55	G.S						
	40×40×100	1	(0.46)			G.S # 600						
5	30×30×11	6	0.55-0.66	4.51-6.62	3.78-4.05	G.S						
	40×40×100	1	(0.61)			G.S # 400						
6	30×30×11	6	0.73-0.87	7.01-8.83	4.09-5.10	G.S						
	40×40×100	1	(0.80)			G.S # 200						
7	30×30×11	6	0.91-1.31	9.01-11.2	5.32-6.25	G.S						
	40×40×100	1	(1.11)			G.S # 100						
Ball												
No.	D. (mm)	B.	Ra(μ m)	H _{RC}	Chemical component(%)						Mat.	
1	12.0	8	0.04-0.06 (0.05)	56-57	Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S	STB 2
2	25.6	8	0.05-0.07 (0.06)		97.02	0.97	1.45	0.30	0.20	0.023	0.024	
3	36.2	8	0.06-0.1									
		14	(0.08)									

방향성을 제거하고 단계적 거칠기변화를 주기 위해서 평판표면의 양면을 정밀하게 평면연삭한 다음 에머리사포 #100~#1200까지 7종류로 사포 가공을 행하였다.

측정오차를 최소로 하기 위하여 1개의 시편에 대해서 접촉시킬 표면부위의 Ra, Rmax 및 Rz를 7회 측정된 값 중에서 2회 측정치는 버리고 5회 측정치의 평균값을 시편 표면상태의 기준으로 하였다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 표면상태의 규정에 대한 통계학적인 측면에서 표면거칠기를 통해 얻어지는 진실돌기 정점분포 f(z)의 표준편차를 구하여 Rayleigh분포 및 정규분포를 f(z)의 근사함수로써 정의하고 수치계산에 의하여 f(z)의 분포에 대한 적합성 여부를 가리는 방법도 있으나 불과의 접촉이 미소한 면적에 국한되기 때문에 실용성을 고려하여 이 방법을 지양하였다.

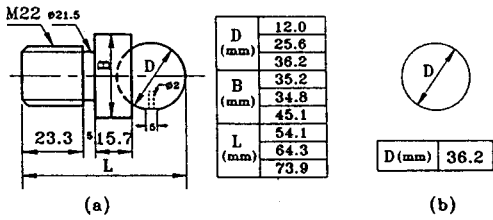
접촉부의 변형모드에 크게 영향을 받지 않은 접촉면적을 표출시켜 측정하기 위해서 소성이 우수하고 피복성이 좋은 양초그울음을 0.05~0.1 μ m의 두께로 피복하여 하나의 시편에 7단계의 하중변화에 대한 접촉자국을 만들어 SEM사진을 통해 접촉폭을 측정하였다.

3.2 실험방법

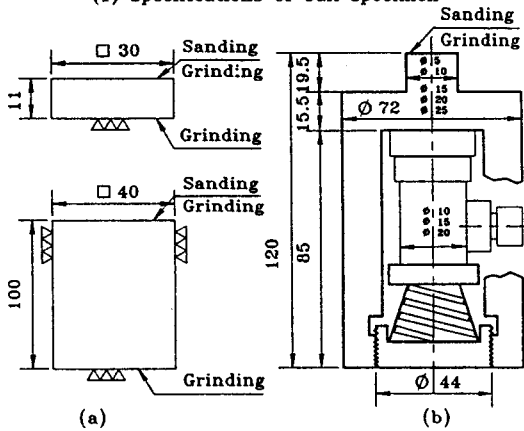
Fig. 3은 실험장치의 개략도와 측정회로를 나타낸 것이다.

부하와 제하를 자유로 할 수 있는 유압펌프와 복동식 유압재 ②에 연결된 로드셀 ③과 다이내믹스트레인앰프(MS-1120)에 의하여 7단계의 하중변화를 줄 수 있도록 하였다.

하중의 작용점이 볼과 평판시편의 중심에서 편심되지 않도록 자동조심형 구면자리를 만들어 반구형 블럭 ⑤위에 시편지지용 지그 ⑩를 올려 놓고



(1) Specifications of ball specimen



(2) Specifications of plate specimen

Fig. 2 Test specimens for contact experiment of plates with spheres

탐촉자홀더 ⑧를 설치한 다음 횡파에 의한 음압을 조사하였다. Fig. 2(2)(b)와 같은 평판시편도 5단계의 면적변화를 주어 가며 반구형 블럭위에 직접 올려놓고 종파를 이용한 초음파실험을 행하였다.

종파용 평판시편 내부에 끼워져 있는 압축코일 프링이 5N 정도의 일정한 압력을 유지할 수 있도록 하였고, 초음파의 투과를 돕기 위하여 평판시편과 탐촉자 사이의 접촉면에 구리슬을 도포하였다.

1차보고서(초음파를 이용한 2체 평면접촉부의 정량적인 접촉압력 측정에 관한 연구, 산업안전학회지, Vol. 5, No. 3, Dec. 1990) 내용과 같이 원리적으로 가능하나 한계작용하중에 따른 구와 평면의 접촉면적이 미소하여 초음파탐상기의 분해능과 감도의 한계성 문제가 대두되었다.

그래서 Fig. 2(1)(a)와 같은 볼홀더를 로드셀 ③에 바꿔끼우고 Fig. 3(2)(a)와 같은 평판시편을 반구형 블럭 ⑮ 위에 올려 놓은 다음 7단계의 하중변화를 주어 양초그을음 피복법과 생지압축법을 병행해 가면서 접촉자국을 노출시킨 다음 전자는 SEM사진을 통하여 접촉폭을 측정하고, 후자는 지시공구현미경과 지시만능표면형상측정기(3E-3FS)를 병용하여 접촉폭을 측정하였다.

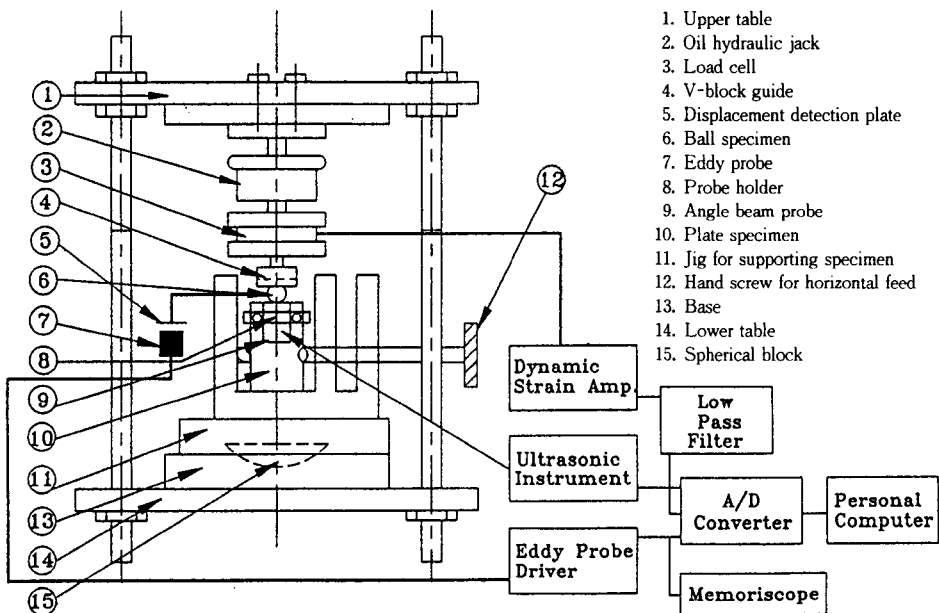


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

탄성에 의한 접촉변형을 검토하기 위하여 지시만능표면형상측정기로 제하시의 접촉자극으로부터 근접량을 측정하였다.

부하시의 근접량은 어느 것이나 7단계의 하중변화에 의한 하중방향의 변형을 변위검출판 ⑤, 에디프루브(eddy probe) ⑦로 구성된 비접촉변위계(MD31)에 의하여 얻어진 신호를 자료취득장치와 메모리스크로프(VC-801L)에 의하여 측정하였다.

접촉폭의 측정과정에서 하중이 감소하고 불의 직경이 증가할수록 접촉부의 가장 자리에서 접선의 기울기가 감소하기 때문에 측정오차가 불의 직경 12mm, 조합표면거칠기 0.158 μm , 작용하중 1kN일 때를 기준으로 하여 최대 20%정도가 발생하였다.

특히 양초그울음 피복법에 의하여 접촉폭을 측정할 때 저하중 역으로 갈수록 이러한 현상이 심하였기 때문에 5회 측정치의 평균값을 읽었다.

4. 실험결과 및 분석

조합표면거칠기 R_{a_m} 이 0인 Hertz접촉과 조합표면거칠기 R_{a_m} 이 0이 아닌 실제접촉과는 큰 차이가 있다. Hertz접촉이론에 의하여 탄성체의 체적변형에 대한 표면미소돌기층의 변형의 비를 무차원 매개변수 β 로 정의하면 식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 β 는 조합표면거칠기 R_{a_m} , 불의 반경 R 및 P와 함수관계를 갖는다.

조합표면거칠기 R_{a_m} 에 비례하는 무차원매개변수 β 는 R이 증가하고 P가 감소할수록 Hertz접촉이론에 접근함을 알 수 있다.

Yamada, Kagamis Hatazawa등¹⁰⁾은 표면미소돌기별(탄성, 소성, 탄·소성) 접촉압력과 접촉변형의 크기를 발표한 보고서에서도 실제적으로 이들 사이에는 큰 차이가 없다고 하였다.

Greenwood와 Tripp 등¹¹⁾은 이상구와 표면거칠기를 고려한 평면과의 접촉연구에서 일정한 구형으로 되어있는 표면미소돌기의 표준편차 σ 를 가지고 수직으로 분포되어 Hertz이론에 따라 탄성적으로 변형한다는 가정에 근거하여 작용하중을 표준편차 σ 와 접촉구의 반경으로 무차원화하고 하중효과를 지배하는 무차원 독립변수 T로 정의하였다.

$T=2P/[\sigma E(2R\sigma)^{1/2}]$ 에서 $\sigma=C_1R_{a_m}$ 라 할 수 있으므로 식 (1)과 (3)을 이용하여 전술한 식을 T

$=C_2\beta^{-3/2}$ 와 같이 단무차원 매개변수 β 의 함수관계로 표시할 수 있다.

Greenwood와 Tripp 등은 T가 증가함에 따라 표면미소돌기의 변형이 체적변형에 비해 감소하며 이에 따라 Hertz접촉압력분포에 접근하고 반대로 T가 감소하면 표면미소돌기의 변형은 체적변형에 비하여 증가하므로 Hertz접촉에서 이탈한다고 하였다.

따라서 T와 반비례관계에 있는 β 는 접촉변형이나 압력의 크기를 지배하는 단무차원매개변수임이 입증되었다. 변형모드에 관계없이 접촉변형이나 압력이 β 에 의해서 지배를 받기 때문에 무부하 상태에서 R_{a_m} 만 알면 실제접촉기구를 예견할 수 있는 직관적이고 실용적인 접촉지배인자라고 사료된다.

본 연구에서 사용하고자 하는 실제접촉에 대한 접촉폭 a_s 는 이상구와 평면의 접촉에 대한 Hertz접촉폭 a_h 와 차이가 있다.

이상구의 압입에 의한 이상평면의 체적변형량에 구의 압입부 가장자리에서 반경방향으로 함몰되는 부분의 길이와 접촉부에 존재하는 표면미소돌기층의 소성변형으로 인한 반경방향의 접촉변형 증가분을 포함시켜 실제에 의한 평균접촉원 직경(접촉폭) a_s 로 정의하였다.

고탄성계수를 가진 재료의 이러한 2체접촉에 대한 접촉변형을 강도가 낮은 평면접촉부재의 탄성한계를 기준으로 작용하중을 제한하더라도 치수효과 등으로 인하여 대부분 소성변형을 수반하고 탄성변형량은 전변형량의 10%정도에 불과한 것으로 알려졌기 때문에¹⁰⁾ 변형모드에 따른 실제접촉부의 변형해석에 대한 중요성이 요구되지는 않는다.

7단계의 표면거칠기와 3단계의 불의 직경변화에 대하여 β 값을 계산하고 그 β 값에 대응하는 접촉폭 a_s 를 Hertz접촉폭 a_h 로 무차원화한 다음 단무차원 매개변수 β 를 x축 성분으로 하고 이에 상응하는 무차원접촉폭 a_s/a_h 를 y축 성분으로 하여 그 관계를 도시한 것이 Fig. 4와 Fig. 5이다.

Fig. 4는 불의 직경 $D=12.0\text{mm}$ 조합표면거칠기 $R_{a_m}=0.158-1.111\mu\text{m}$ 일 때 실제접촉기구를 지배하는 무차원매개변수 β 와 무차원접촉폭 a_s/a_h 의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 5은 불의 직경 $D=36.2\text{mm}$, 조합표면거칠기 $R_{a_m}=0.170-1.113\mu\text{m}$ 일 때 상기와 동일한 내용을 나타낸 것이다.

그라프에서 알 수 있는 바와 같이 단무차원매개

변수 β 에 비례해서 무차원접촉폭 a_s/a_h 가 변화한다.

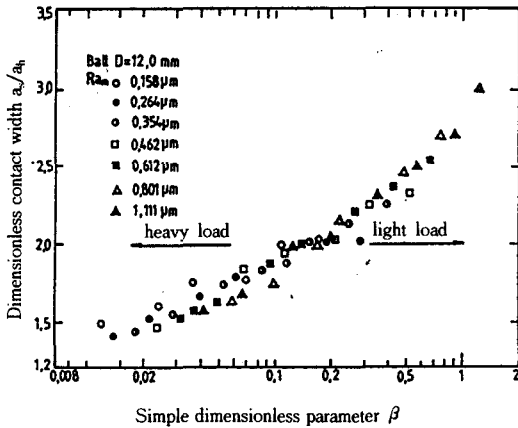


Fig. 4 Relation between contact width a_s and simple dimensionless parameter β to govern real contact mechanism($D=12.0\text{mm}$)

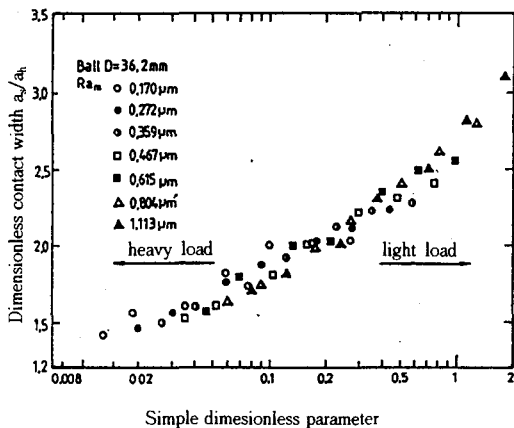


Fig. 5 Relation between contact width a_s and simple dimensionless parameter β to govern real contact mechanism($D=36.2\text{mm}$)

동일한 하중하에서도 무부하상태에서 조합표면거칠기 $R_{a,m}$ 이 감소하고 작용하중 P 가 증가하고 볼의 직경 D 가 감소할수록 $\beta=0$ 인 Hertz접촉에 접근한다.

그러나 조합표면거칠기가 증가하고 작용하중이 감소하고 볼의 직경이 증가함에 따라 Hertz접촉에 대한 이탈도가 증가함을 알 수 있다.

볼과 평면접촉부의 조합표면거칠기 $R_{a,m}$ 을 0에서부터 미소하게 단계적 변화를 줄 수 있는 시편의 가공이 용이하다면 β 에 의해서 Hertz접촉에 대한 실제접촉기구를 확연하게 제시할 수 있으나 이상 평면에 대한 원초적 실험부터 불가능하기 때문에 본 실험에서 규정한 조건하에서 현상학적으로 구명할 수밖에 없다.

동일한 하중하에서 볼의 직경 D 가 증가할수록 하중효과가 감소하기 때문에 β 가 0.1이상으로 증가함에 따라 a_s/a_h 가 2배 이상이 되는 실측치의 수가 볼의 직경이 12mm일 때는 26/49로 약 50%가 되었다가 볼의 직경이 36.2mm로 증가하면 실측치의 수도 31/49로 약 13%가 증가하면서 Hertz접촉에 대한 이탈도가 증가하고 있음을 보여주고 있다.

이와 같이 단무차원매개변수 β 에 의해서 이러한 실제접촉기구를 예견할 수 있고 임의의 곡면과 곡면의 접촉에 이르기까지 일반적 접촉기구를 지배하는 인자로도 사용할 수 있다고 생각된다.

비구체의 접촉면적은 타원형이나 그 접촉면적이 크지만 얇다면 등가직경으로 대신할 수 있다고 알려져¹²⁾왔기 때문이다.

이상을 통해서 알 수 있는 바와 같이 조합표면거칠기 $R_{a,m}$, 작용하중 P 및 볼의 직경 D 가 접촉변형(a_s & δ_s)에 미치는 영향이 단무차원매개변수 β 에 의해서 검토될 수 있음이 입증되었다.

5. 결 론

양초그을음 피복법 및 생지압축법을 통하여 7단계의 조합표면거칠기 $R_{a,m}$ 과 수직하중 P 의 변화 및 3단계의 볼의 직경 D 의 변화에 대한 접촉변형을 측정하여 실제접촉기구를 지배하는 단무차원매개변수 β 를 찾았다.

이상의 실험결과와 고찰로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 단무차원매개변수 β 는 변형모드에 관계없이 실제접촉기구에 대한 접촉변형과 압력의 크기를 지배하는 직관적이고 실용적인 인자임이 입증되었다.
- 2) 조합표면거칠기 $R_{a,m}$ 및 볼의 반경 R 이 증가하고 작용하중 P 가 감소하면 접촉폭 a_s 가 증가하여 β 가 증가함으로써 Hertz접촉에 대한 이탈도가 증가하고 그 반대로 되면 Hertz접촉에 접근

한다.

$$\beta = f(R_{am}, P, D) = 2R_{am} [16RE^* / (9P^2)]^{1/3}$$

- 3) 2체 점접촉기구의 정성적인 접촉압력분포를 측정하기 위하여 횡파와 종파를 이용한 초음파의 펄스반사법을 적용한 실험을 행하였으나 초음파탐상기의 분해능, 감도의 한계성, 탐촉자의 지향각 및 교정실험에 대한 신뢰성문제 등이 대두되었다. 원리적으로는 가능하지만 계측기의 한계성 문제를 극복하여야 한다.

참 고 문 헌

- 1) H. Hertz, Über die Berührung Fester Elastischer Körper, J. Reine und Angewandte Mathematic, Vol. 92, pp. 156~171, 1881.
- 2) T. D. Chdeva, C. V. Ramakrishnam and R. Natarajan, A Finite Element Method for the Elastic Contact Problems, J. of Engr. for Industry, Vol. 103, No. 4, pp. 456~461, 1981.
- 3) A. Francavilla and C. V. Zienkiewicz, Note on Numerical Computation of Elastic Contact Problems, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 9, No. 4, pp. 913~924, 1975.
- 4) T. F. Conry and A. Seireg, A Mathematical Programming Method for Design of Elastic Bodies in Contact, ASME. J. of Appl. Mech., pp. 387~392, 1971.
- 5) A. S. Kravchuk, On the Hertz Problem for Linearly and Non-Linearly Elastic Bodies of Finite Dimension, Appl. Math. Mech., Vol. 41, No. 2, pp. 320~328, 1977.
- 6) R. D. Mindlin, A Review of the Photoelastic Method of Stress Analysis, J. Appl. Phys., Vol. 10, pp. 222~241, 1939.
- 7) 尾田十八, 本悟, 井上二郎, 多保田純, “壓電セラミックスを用いた接觸壓力分布の測定用システムの開發”, 日本機械學會論文集(A編), 第55卷, 第513號, pp. 1230~1235, 1989.
- 8) 山口勝美, 打田元美, 和田直敏, 五十君清司, 光の表面反射特性を用いた接觸壓力分布の測定裝置の開發, 精密工學會誌, 第53卷, 第3號, pp. 108~113, 1988.
- 9) J. Krolikowski, J. Szczepek and Z. Witczak, Ultrasonic Investigation of Contact between Solids under High Hydrostatic Pressure, Ultrasonis, Vol. 27, No. 1, pp. 45~49, 1989.
- 10) 山田國男, 鏡重次朗, 畑澤鐵三, 球と粗い面の接觸, 精密機械, 第42卷, 第12號, pp. 1425~1430, 1979.
- 11) J. A. Greenwood and J. B. Williamson, The Contact of Nominally Flat Surfaces, Proc. R. Soc., Ser. A, pp. 295~304, 1966.
- 12) J. A. Greenwood, K. L. Johnson and E. Matsubara, A Surface Roughness Parameter in Hertz Contact, Wear, Vol. 100, pp. 47~57, 1984.