

교량받침용 대형 Roller Shoe 의 구름마찰특성에 관한 연구

김영득*(두산중공업 기술연구원), 김재철(두산중공업 기술연구원)

A Study on the Rolling Friction Characteristics of Large Scale Roller Shoe for Bridge Supporter

Y. D. Kim*(DOOSAN Heavy Industries), J. C. Kim(DOOSAN Heavy Industries)

ABSTRACT

There is a mechanical device between the superstructure and substructure of a bridge, which transmit vertical load of superstructure to the substructure and absorb horizontal displacement of super structure due to thermal dynamic load, etc. In order to meet two requirements at once, the structure of roller between plates is widely used, and this roller shoe system is known to have smaller horizontal movement resistance than any other type of bridge shoe. In this study, rolling friction resistance characteristics of roller-plate friction system is investigated according to roller dimension, vertical load, hardness and roughness of roller and plate. On the base of the results, the rolling friction resistance of large scale roller shoe is evaluated using model experiment.

Key Words : Key words Roller Shoe, Rolling Friction, Elastic Hysteresis, Hertz contact stress

1. 서론

기개설비나 부품 및 각종 구조물과 설비 등에 있어서 접촉하는 두 물체간에는 마찰이 항상 존재하며 이러한 마찰은 구조물 또는 장비의 성능 및 기능에 지대한 영향을 주는 인자로 작용할 수 있다. 작용하는 마찰의 성격에 따라 크게 미끄럼마찰과 구름마찰 등으로 구분할 수 있는데 교량에서 작용하는 구름운동체인 Roller Bearing 은 구름속도, 연직하중, Roller 치수와 변형 및 표면조도 등의 인자가 복합적으로 작용하는 것으로 이에 대한 연구는 20세기 초부터 있었으며 주로 이론적보다는 실험적인 연구가 수행되었다.

구름마찰의 발생원인으로는 크게 미소미끄럼(Micro slip), 탄성이력손실(Elastic hysteresis Loss), 소성변형(Plastic deformation) 그리고 고착(Adhesion) 효과 등에 기인한다는 것이 정설로 알려져 있으며 Labor(1)가 진동법을 사용해 구름마찰의 주요원인을 제안한 이후 Drutwski(2), Flom(3)은 이를 실험적으로 증명하였다. 지금까지는 구름마찰의 주원인으로 탄성이력 손실을 주원인으로 간주하고 있다. 정적상태에 있어서는 많은 연구자들이 평판과 구간의 접촉연구에 관해 보고된바 있으나 동적상태에 있어서 평판과 볼 및 링판과 볼리간의 연구는 아직

명확하지 않다.

교량에 있어서 베어링시스템 장비는 Main girder, Arches 와 교량지지대(Piers, Abutments, Foundation block)간을 서로 이어주면서 잡아주는 역할을 하며 이러한 장치의 주요 기능은 연직하중을 지지대로 전달함과 동시에 교량의 수평면위에 유연히 움직이도록 함으로써 교량을 무리가 없고 안전하게 유지해 주는 역할을 하게하는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 이를 위해 양 평판간에 볼러가 사용되는 구조가 널리 사용되는데 이를 Roller shoe 라 불리운다. 대형의 교량에 있어서 구조물의 안전성과 교량의 수명을 위해서는 Roller shoe 의 정확한 구름마찰 저항을 고려하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 연직하중, 롤러치수, 경도 그리고 표면조도에 따른 볼러와 플레이트간의 구름마찰특성을 실험적으로 조사하였으며 이러한 실험을 바탕으로 실제 교량용 재질에 대해 상사이론을 적용하여 모델시험을 수행하고 구름마찰값을 구하였다.

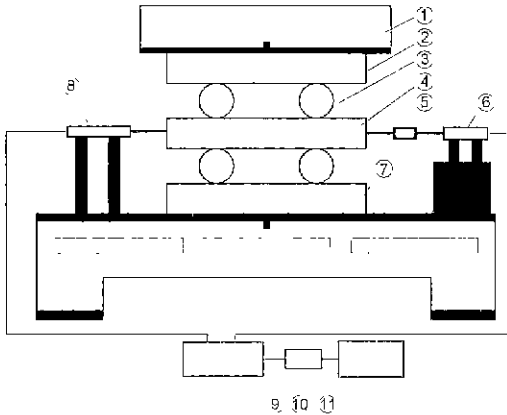
2. 실험

2.1 실험방법 및 절차

구름마찰실험은 연직하중 롤러크기 경도 그리고 표면조도와 같은 인자들이 구름마찰에 미치는

영향을 조사하기 위해 필요한 실험장치와 시편 및 제작장치 등을 준비하고 실험하였다 또한, 교량량의 Roller shoe 에 대한 구름마찰값을 구하기 위해 상사이론을 이용하여 모델시험을 수행하였다.

2.2 실험장치



| | | | |
|---|--------------------|---|-----------------|
| ① | Press Ram | ⑦ | Lower Plate |
| ② | Upper Plate | ⑧ | Potential Meter |
| ③ | Roller | ⑨ | Amp |
| ④ | Middle Plate | ⑩ | Terminal Board |
| ⑤ | Load Cell | ⑪ | PC |
| ⑥ | Hydraulic cylinder | | |

Fig 1 Schematic Diagram of Rolling Friction Test

상기 Fig. 1 에서처럼 Roller 가 3 개의 평판시편 사이에 위치하고 프레스램에 의해 연직하중이 상판(2)에 일정한 힘으로 작용한다. 이어서 중판(4)을 수평으로 서서히 당겨주면서 로드셀(5)과 포텐쇼미터(8)에 의해 하중과 수평변위가 측정되고 이는 Computer 에서 동시에 기록되는 시스템으로 구성되어 있다. 사용된 장비사양을 보면 연직하중부가는 Shimadzu UTM-100A 가, 수평하중부가는 500kgf 정수압실린더(NSP-10-07V0)가, 하중 및 변위센서는 SB-2-Load cell(500kgf) 와 CDP-100 포텐쇼미터(10⁻⁴/mm)가 각각 사용되었다.

Table1 Dimensions and of Roller and Plate(Unit:mm)

| Mat. | Roller/Plate | 길이 | 폭 | 높이 | φ(직경) |
|-------|--------------|-----|----|----|----------|
| SM45C | Roller | - | 70 | - | 15.30.50 |
| | Plate | 100 | 70 | 30 | - |
| C-13B | Roller | - | 70 | 30 | 30.50 |
| | Plate | 100 | 70 | 30 | - |

Table 2 Chemical Composition. of Roller and Plate

| Mat. | Composition | | | | | | | |
|-------|-------------|------|------|-------|-------|----|-----|-----|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo |
| SM45C | 0.48 | 0.19 | 0.81 | 0.025 | 0.013 | - | - | - |
| C-13B | 0.23 | 1.0 | 1.0 | 0.04 | 0.03 | 13 | 1.5 | 2.0 |

준비된 시편의 재질 및 치수가 Table 1 에서 보여주고 있으며 이에 대한 화학성분이 Table 2 에서 나타내고 있다.

Table 3 Test Conditions

| Item | Vertical Load (kgf) | Roller D _i (mm) | Hardness (HRC) | Surface Roughness | | | |
|--------|---------------------|----------------------------|----------------|-------------------|------|-------|------|
| | | | | Roller | | Plate | |
| | | | | Rmax | Ra | Rmax | Ra |
| SM 45C | 1,000 | 15 | 62 | Polishing | | | |
| | | | | 3.42 | 0.43 | 3.28 | 0.55 |
| | 2,000 | 30 | 48 | Grinding | | | |
| | | | | 4.46 | 0.61 | 4.53 | 0.63 |
| | 3,000 | 50 | 36 | Sand Paper | | | |
| | | | | 6.54 | 0.83 | 8.5 | 0.76 |
| C-13B | 20,000 | 30 | 49 | Polishing | | | |
| | | | | 1.95 | 0.14 | 1.85 | 0.1 |

구름마찰에 영향을 줄 수 있는 인자들로서는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 연직하중, 롤러치수, 경도 및 표면조도와 같은 4 개 인자들이 롤러와 평판간에 작용하는 영향에 대해서 실험을 수행하였다. Table 3 은 4 개의 주요인자들과 두 가지 재질에 대해 각각 조건을 변화해가면서 실험하게 될 경우를 요약한 것으로 총 81 번의 시험이 수행되었다

3. 3,000 톤 Roller Shoe 의 구름마찰모델실험 3.1 관련이론 및 모델시험

교량(Fig. 2)에 있어서 Roller shoe 는 상부에서 가해지는 연직하중을 지지함과 동시에 교량의 수평이동에 따른 빈위에 유연하게 추종되어 주도록 설계되어야 한다 이를 위한 설계인자중의 하나로 구름마찰계수가 적절하게 유지되어야 하는데 이를 위해 실제 Roller shoe 제품에서 구름마찰 저항값을 얻기 위한 실험을 수행한다는 것은 경제적인면이나 시간적인면에서 과도한 소비가 필요되어진다

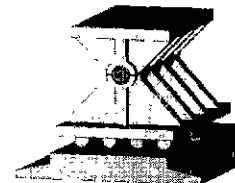


Fig 2 Roller shoe model and contact area detail

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 구름마찰이론에 따른 실험실에서의 모델시험이 수행되어진다. 단위길이를 갖는 실린더에서 1/2 접촉부 위에서 압력에 의한 미소일

$$dW = w dt \int p(x) x dx \quad (1)$$

여기서 w 는 롤러의 각속도이고 $p(x)$ 는 Hertz theory에 의해

$$W = \frac{2}{3\pi} P a w \quad (2)$$

로 표현할 수 있다 여기서 P 는 접촉하중, a 는 접촉면의 1/2 길이, α 는 스트레인에너지의 작은량으로서 Hysteresis에 의한 손실이라면 이때 운동을 유지하기 위한 합모멘트는

$$M_v w = \alpha W = \frac{2}{3\pi} \alpha P a w \quad (3)$$

$$\mu_R = \frac{M_y}{PR} = \alpha \frac{2a}{3\pi R}$$

여기서 μ_R 은 구름마찰계수이다. Hertz 접촉이론에 의하면 접촉폭의 1/2인 a 및 탄성계수 E 는

$$a = \sqrt{\frac{4PR}{\pi E}} \quad (4)$$

$$E = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}, R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$$

여기서 $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, R_1, R_2$ 는 접촉체의 탄성계수, 프와송비, 반경을 각각 의미한다. 만약 롤러와 평판이 동일 재질이라면 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\frac{a}{R} = C_1 \sqrt{\frac{P}{R}} = C_2 \sqrt{\frac{PE}{\pi R}} = C_3 \sigma_{cmax} \quad (5)$$

이 식의 의미는 실제 Roller shoe의 최대접촉응력과 같게하는 모델시험의 치수 및 부가하중을 조절하면 실제와 동일한 구름마찰계수를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구에서의 실제 대상인 3,000톤 Roller shoe의 선접촉하중은 852kgf/cm이고 롤러의 길이 642cm, 롤러의 직경 170cm를 갖는다. 이러한 조건으로부터 최대 Hertz 접촉응력은 19,177 7kgf/cm² 이므로 연직하중부가장치와 실험의 편이성을 고려하면서 실제의 최대 Hertz 접촉응력을 만족시키기 위한 상부연직하중은 20톤을 부가하며 롤러시편의 직경과 길이는 $\phi 30\text{mm} \times L70\text{mm}$ 가 준비되었다.

4. 결과 및 검토

구름마찰에 미치는 영향인자인 연직하중(W), 롤러직경(ϕ), 경도(HRC) 그리고 표면조도(Ra)에 따른

실험과 실제 Roller shoe 재질에 대해서 모델실험을 수행하였다.

4.1 영향인자들에 따른 구름마찰력

4개의 영향인자들(W, ϕ, HRC, Ra)중에서 2개의 인자들을 고정하고 나머지 2개 인자들을 변화해가면서 구름마찰력과 영향인자들사이의 관계를 조사하였다 (Fig. 3~Fig.6)

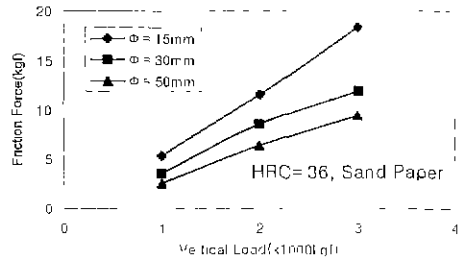


Fig. 3 Friction vs load & diameter

Fig 3은 경도(HRC36)와 조도(Sand paper)가 일정할 때 연직하중과 롤러직경 변화에 따른 마찰력의 변화를 보여주고 있다. 하중이 증가하고 롤러직경이 감소함에 따라 마찰저항력은 증가하는데 이는 이론식에서와 같이 연직하중과 롤러직경이 구름마찰력에 미치는 식 $\left(\frac{P^3}{R}\right)^{\frac{1}{2}}$ 로 표현가능하며 그 결과가 Fig 7에서 보여주고 있다.

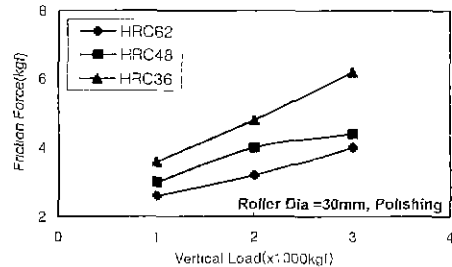


Fig 4 Friction vs load & hardness

Fig 4는 롤러직경(30mm)과 표면조도(Polishing)가 일정할 때 연직하중과 경도변화에 따른 마찰력값을 나타내고 있다. 동일경도에서는 연직하중의 영향이 지배적이며 경도가 클수록 마찰력은 감소하고 있는데 이는 마찰력이 접촉체의 변형과 밀접한 관련이 있으며 높은 경도의 재질이 변형을 방지해준다는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 롤러직경(30mm)과 경도(HRC48)가 일정할 때 표면조도와 연직하중 변화에 따른 마찰력값을 보여주는데 표면상태가 매끄러울수록 작은 마찰력이 소요되며 특히 낮은 연직하중에서는 표면조도의 영향이 크지않으나 고하중에서는 하중의 영향이 크게 나타나고 있다.

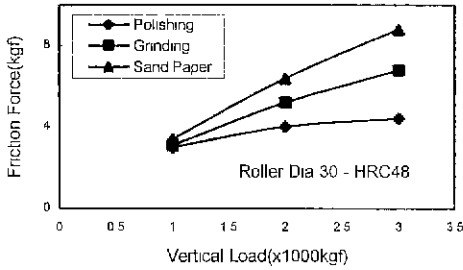


Fig. 5 Friction vs load & roughness

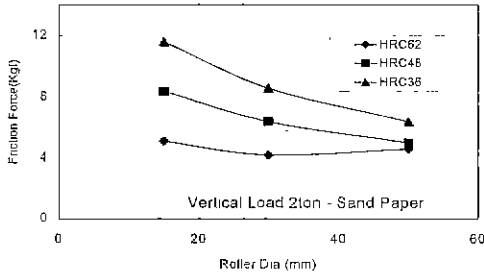


Fig. 6 Friction vs. load & hardness

Fig 6 은 연직하중과 표면조도가 일정할 때 롤러 직경과 경도변화에 따른 마찰력변화를 보여준다. 경도(HRC62)에서는 롤러직경변화가 있더라도 마찰력의 변화는 크지 않으나 이보다 낮은 경도를 갖는 HRC36 과 HRC48 의 경우는 롤러직경이 증가함에 따라 마찰력은 감소하고 있음을 알 수 있다.

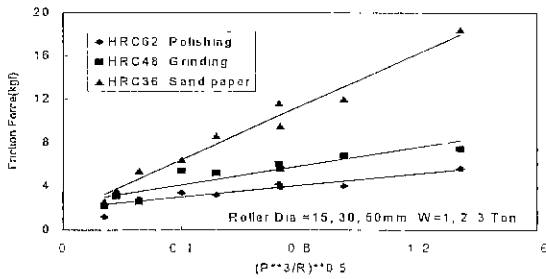


Fig 7 Friction vs load & dia. $(P^3/R)^{1/2}$

Fig 7 은 3 종의 경도(HRC36, 48, 62)와 표면조도 (Polishing, Grinding, Sand paper)에 대해 롤러직경과 연직하중 변화를 할 때 $(\frac{P^3}{R})^{1/2}$ 에 따른 마찰력의 거동을 보여주고 있다. 이는 Hysterests Loss 론에 기초하여 디자인되어야 하는데 이에 대한 타당성을 보이기 위해서는 $(\frac{P^3}{R})^{1/2}$ 과 마찰력간에 선형성이 유지되어야 하는데 상기 그림은 이를 잘 나타내고 있음을 알 수 있으며 선의 기울기는 경도와 표면조도의 변화조건을 의미한다.

4. 2 Roller shoe 의 구름마찰모델시험

실제 Roller shoe 의 재질인 C-13B 제철에 대해 Elastic Hysteresis Loss 론에 근거하여 모델시험장치를 제작하여 실험을 수행하였다.

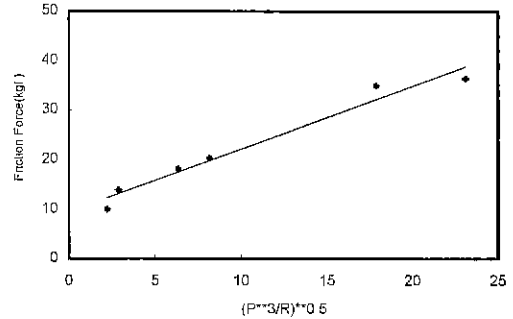


Fig 8 Friction vs load & dia. $(P^3/R)^{1/2}$ of C-13B

Fig 8 은 롤러직경 30mm, 50mm 에 연직하중 5, 10, 20 톤 하중을 가할 때 $(\frac{P^3}{R})^{1/2}$ 과 구름마찰력과의 관계선도를 나타낸 그림이다. 실제 Roller shoe 에 대한 모델시험의 직경은 $\phi 30$ mm 에 연직하중 20 톤인 경우인데 모델실험결과 구름마찰력은 36.2kgf 에 구름마찰계수는 0.00364 를 얻을 수 있었다.

5. 결론

SM45C 와 C-13B 제철에 대해 구름마찰시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연직하중과 롤러직경에 따른 구름마찰력거동은 서로 선형적거동을 나타내고 있다
2. 제철의 경도가 증가하면 구름마찰력은 감소한다
3. 낮은 연직하중에서 표면조도의 영향은 크지 않으며 고하중에서는 양호한 표면조도에서 적은 마찰력이 요구되이진다
4. 실제 Roller shoe 재질 C-13B 제철에 롤러직경 30mm, 연직하중 20 톤에 대한 모델시험결과 구름마찰계수는 0.00364 를 얻었다.

참고문헌

1. Tabor, D. The mechanism of rolling friction The elastic range, Proc. Roy. Soc., Vol 29 Ser.A, 1955. pp198 ~ 204
2. Drutowski, R.C., The linear dependence of rolling friction on stressed volume, Rolling contact phenomena Elsevier, New York, pp 114 ~ 118
3. Flom, D.G., The theory of rolling friction for spheres. J of Appl Phys, Vol.30, pp1725 ~ 1729.
4. K.L Johnson, Contact mechanics. Cambridge Univ Press 1996 pp 284 ~ 311
5. K.M Kim, I.S Chung, A Study on rolling contact behaviour of a flat rough surface with smooth ball. J of KSME, 1990, Vol. 14, No.3, pp554 ~ 570
6. I.V Kragelsky, Friction and wear - Calculation method. Pergamon Press, pp 219 ~ 236