

질량신정의 구현을 위한 NPL 와트발란스 나이프에지의 기계적 특성 분석

최인묵*, Ian Robinson**, 우삼용#

An Analysis of the Mechanical Characteristics of the Knife Edges used in the NPL Watt Balance

In-Mook Choi*, Ian Robinson** and Sam-Yong Woo#

ABSTRACT

Of the seven base units of the international system of units, only the kilogram is still defined in terms of a material artifact. One of the experimental approaches opening the way to a new definition of the kilogram is the watt balance. To improve the performance of the NPL watt balance, we need to quantify and reduce hysteresis effects in the balance knives. In this paper, we discuss the mechanical characteristics of the knife edges used in the NPL watt balance. The hysteresis mechanism is analyzed using the finite element method. It is found that the cause of hysteresis is not normal stress but shear, and the deformation of the flat, rather than the knife, is an important factor in the hysteresis mechanism. The study presented here, using finite element analysis, suggests that parameters such as material property, tip radius and knife straightness can be more important than others, such as friction coefficient, tip angle, etc.

Key Words : Watt Balance (와트 발란스), Knife Edge (나이프 에지), Finite Element Analysis (유한요소해석), kg Redefinition (질량 신정의)

기호설명

- V = voltage generated in velocity mode
- I = current applied to coil
- m = mass loaded on the weighing pan
- g = gravitational acceleration
- v = velocity of coil
- h = Planck's constant
- e = elementary charge

1. 서론

와트 발란스(watt balance)는 1976 년에 영국 NPL (National Physical Laboratory)의 Kibble¹에 의해 제안되어 플랑크 상수(Planck's Constant)를 측정할 목적으로 연구되어 왔다. 현재에 이르러서는 플랑크 상수를 정확한 값으로 확정하고 이를 질량 신정의 (kg redefinition)를 실현하는 수단으로서 사용 하기 위한 연구가 진행중이다.

접수일: 2007 년 7 월 18 일; 게재승인일: 2007 년 12 월 7 일

* 한국표준과학연구원

** National Physical Laboratory, UK

교신저자: 한국표준과학연구원 기반표준본부 역학그룹

E-mail: sywoo@kriss.re.kr Tel. (042) 868-5118

길이(length), 시간(time)을 포함한 7 개의 기본단위 중 유일하게 질량 단위만 인공물(artifact)로 정의되어 있는데, 이를 다른 단위들과 마찬가지로 자연 현상으로 정의할 수 있도록 하기 위한 노력이 영국,² 미국,³ 프랑스,⁴ 스위스⁵ 등에서 선진연구기관들을 중심으로 진행되어오고 있으며, Mills⁶ 등은 그 방법중의 하나로 와트 발란스를 유력하게 거론하고 있다.

와트 발란스의 원리는 비교적 단순하다. 그것은 어떤 지점에서 질량에 대응되는 힘을 전자기력에 의한 힘으로 대응시키면 된다. 이를 위해 두 가지 모드에서 측정이 이루어져야 하는데 하나는 힘 평형 모드 (weighing mode)이고 다른 하나는 속도 모드 (velocity mode)이다. 힘 평형 모드에서는 중력에 의해 발생하는 질량의 하중을 전자기장 힘인 로렌츠 힘 (Lorentz force)에 의해 평형을 이루도록 하고, 반대로 속도 모드에서는 코일을 수직으로 움직여 발생하는 전압을 측정하게 된다. 이러한 두 가지 모드에서의 지배적인 식(1),(2)로부터 자기 형상에 의한 정보를 제거하게 되면 식(3)과 같이 기계적 에너지와 전기적 에너지의 평형식을 얻을 수 있다.

$$mg = BIl \quad (1)$$

$$V = Blv \quad (2)$$

$$mgv = VI \quad (3)$$

힘 평형 모드에서 코일에 가해지는 전류와 속도 모드에서 얻어지는 전압은, 각각 양자홀 효과에 의한 폰 클리칭 (von Klitzing, h/e^2) 상수와 조셉슨 접합에 의해 구현된 전압 표준에서 사용되는 조셉슨 (Josephson, $2e/h$) 상수를 이용해 측정된다. 즉 식 (3)의 우변항은 플랑크 상수의 함수로 바뀌게 되고, 다시 말해 질량이 알려졌다고 하면 전하량을 이용해 플랑크 상수를 측정할 수 있게 된다. 또한 플랑크 상수가 고정되어 있다면 반대로 질량을 측정할 수 있게 된다. 질량 신경의 연구는 후자에 해당되고, 와트 발란스는 질량을 모니터링할 수 있는 장비로 활용하는 것이 가능하다.

Fig. 1 은 NPL 의 와트 발란스 구조를 보여주고 있다. 와트발란스는 10^{-9} 수준의 여러 가지 극한 측정들을 필요로 하는 첨단 장비로 다양한 불확도 요소들이 내재되어 있다. 그 중 각 측정모드에서의

기계적 특성이 매우 중요한데, 힘 평형 모드에서는 감도, 속도 모드에서는 수직운동 특성이 매우 중요하다. NPL 와트 발란스의 경우 이러한 특성을 얻기 위해 나이프 에지를 사용하고 있다. 단일체로 제작된 휨 힌지 (flexure strip)의 경우 나이프 에지의 경우 보다 비선형성 (Non-linearity)이 작지만, 큰 하중을 견디지 못하기 때문에 본 발란스에는 사용이 어렵다. NPL 의 경우 1 kg 질량 측정을 위해 약 700 N 의 하중이 중앙 나이프 에지에 가해지게 된다. 따라서 히스테리시스 (hysteresis)와 같은 비선형성이 대부분 중앙 나이프 에지에서 발생하게 되고 이를 개선하기 위한 다양한 시도들이 있었다. 하지만 나이프 에지의 비선형성에 대한 이해가 부족하고 설계개념이 확립되지 않아 이에 대한 연구가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 통상적으로 알려진 나이프 에지의 특성에 대한 해석을 수행하고 와트 발란스에서 얻어지는 실험결과와 비교하여 설계 개념을 확립하고자 하였다.

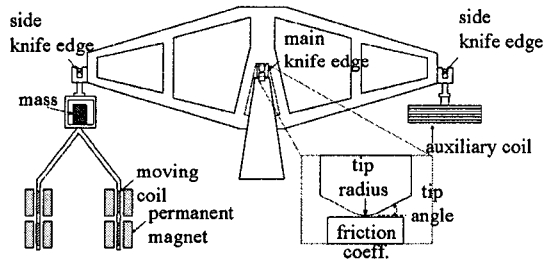


Fig. 1 Schematic diagram of NPL watt balance

2. 유한요소해석

2.1 나이프 에지의 모델링

나이프 에지를 사용하여 와트발란스를 연구하는 핵심 그룹은 영국의 NPL 과 미국의 NIST (National Institute of Standards and Technology)이다. NIST 의 Schwarz⁷ 등은 다양한 물성을 갖는 재료와 다이아몬드형 코팅을 통해 나이프 에지의 히스테리시스 특성을 향상시키고자 하였다. 그러나 히스테리시스의 원인등에 대한 이해의 부족으로 다양한 재료를 직접 실험함으로써 결과를 통해 재료 선정을 하였고 나이프 에지에 대한 설계 개념을 확립하는데에는 이르지 못하였다.

나이프 에지에서 발생하는 비선형성은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 히스테리시스 특성이고 하나는 크립 (creep) 특성이다. 크립은 대개 2~3 분이 지나면 수렴하기 때문에 큰 문제가 되지 않지만 히스테리시스는 수 ppm (part per million)에서 수십 ppm 까지 발생하여 와트발란스의 목표치인 10^{-8} 수준을 도달하는데 큰 장애가 되고 있다.

나이프 에지의 히스테리시스를 포함한 비선형 특성의 원인은 잘 알려져 있지 않았으며 대개 다음과 같은 요소가 영향을 미칠 것으로 생각되어 왔다. 가장 중요한 요소로는 탄성계수, 항복 강도 등 사용되는 재료의 물성치 (material property)가 있으며 그 외에 나이프와 받침 사이의 마찰계수 (friction coefficient), 나이프의 팁반경 (tip radius), 나이프의 팁각도 (tip angle), 나이프에 가해지는 하중 (load), 수평직진도 (horizontal straightness), 수직직진도 (vertical straightness) 등을 생각할 수 있다. 최근에는 추가로 나이프의 마모와 같은 노화현상(aging), 나이프의 미끄러짐 (slip) 등이 고려되고 있다. 또한 히스테리시스를 없애기 위해 힘 평형 모드에서 분동을 올리기 전과 후 사이에 나이프를 수회 반복 운동시키게 되면 오히려 히스테리시스가 크게 증가한다는 사실도 알려져 있다.

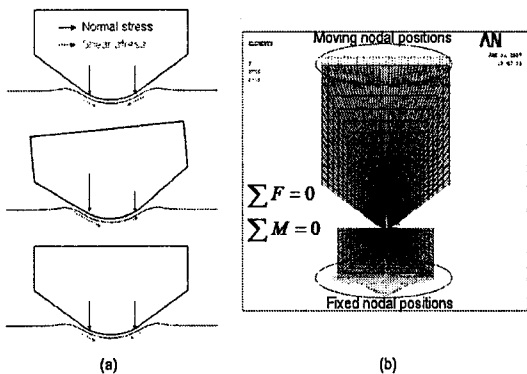


Fig. 2 Cause of hysteresis and torque calculation method in FEA

재료학적으로 히스테리시스의 원인을 생각해 보면, 나이프 에지의 변형을 유발하는 것은 높은 하중에 의해 발생하는 잔류응력 (residual stress)에 의한 것으로 추정할 수 있다. Fig. 2 (a)에서와 같이 기계적 변형을 고려하면 그 원인은 수직응력 (normal stress)에 의한 것으로 생각할 수 있지만, 그

보다는 전단응력 (shear stress)이 중요하다. 이것은 수직응력은 나이프가 회전을 반복하게 되면 대칭으로 수렴되기 때문에 나이프의 토크에 별 영향을 미치지 못하지만 전단응력은 그 합이 방향이 바뀌기 때문에, 히스테리시스 발생에 대한 설명이 가능하기 때문이다.

이와 같은 원인과 관련 변수들의 영향을 확인하기 위해 ANSYS 의 접촉 (contact) 조건을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 대개 나이프 에지의 팁 반경은 10 μm 이고, 길이는 100 mm 로 비 (ratio)가 1:10,000 으로 3 차원으로 해석하는 것은 요소 (element)의 개수가 너무 많아져 곤란하다. 여기에서는 2 차원 해석을 수행하였고, plane182 요소를 사용하여 평면변형 (plane strain)으로 해석하였다. 해석에서 나이프에 가해지는 수직하중은 700 N, 최대 회전각은 ± 50 mrad 로 하였다. 이는 코일이 수직으로 약 30 mm 움직이는 것에 해당한다. 실제 와트발란스에서는 ± 15 mm 정도 움직이게 되지만 분석의 용이성을 위해 해석 범위를 증가시켰다. 또한 동적 비선형성인 크립 (creep) 특성이 히스테리시스 값에 비해 매우 작기 때문에 정적 모드에서 해석을 수행하였다.

구체적으로는, 원점에서 나이프를 일정한 각을 갖도록 반시계 방향으로 회전시킨 후 (스텝 1) 다시 원점으로 복원하여 토크를 계산하고 (스텝 2), 시계 방향으로 같은 각을 갖도록 회전시킨 후 (스텝 3), 다시 원점으로 복원시켜 토크를 계산하는 (스텝 4) 과정을 1 사이클로 하여 반복하였다. 이때 스텝 2 와 스텝 4 사이의 토크 값의 차이를 통해 히스테리시스를 계산하였다. 토크는 Fig. 2 (b)와 같이 경계조건에서의 반발력 (reaction force)를 이용하여 계산할 수 있다. 이때 정적모드에서 해석을 수행하기 때문에 힘의 합과 모멘트 (moment)의 합이 0 이 되는 것을 이용하면 된다. 이때 나이프에서 얻어지는 값보다 받침에서 얻어지는 정보를 이용하는 것이 더 바람직한데 이것은 나이프를 회전시킨 후 원점으로 보내더라도 소성변형으로 인해 완전한 복원이 어렵기 때문에 노드의 위치가 매 스텝마다 변하기 때문이다.

본 해석에서 가장 중요한 변수는 재료의 물성치이다. NPL 와트 발란스에서 중앙 나이프에 사용된 재료는 6% 코발트 (Co)를 함유한 텅스텐 카바이드 (W/C)이며, 받침에 사용된 재료는 단단한 재질로 알려진 입방정질화붕소 (Cubic Boron Nitride,

cBN)이다. Fig. 3 은 NPL 재료그룹의 압축시험 (full compression test)로부터 얻어진 재료의 물성치이며 이를 ANSYS 의 입력값으로 사용하여 해석하였다.

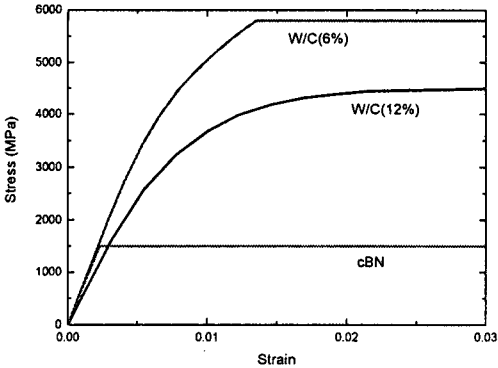


Fig. 3 Material properties obtained from full compression test

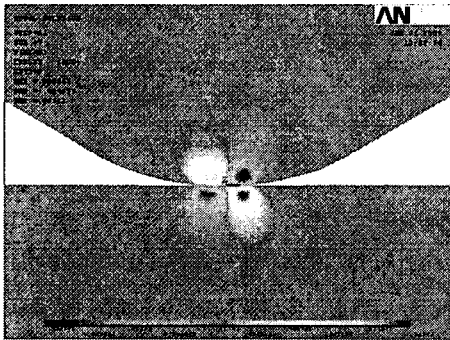


Fig. 4 (a) Shear strain distribution

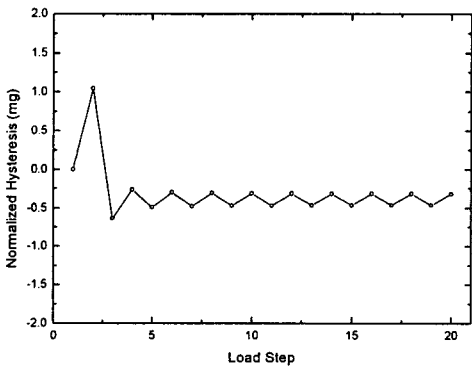


Fig. 4 (b) Normalized hysteresis change w.r.t. load step

2.2 해석 결과

먼저 Fig. 4 (a)는 나이프와 받침으로 모두

W/C(6%)를 사용하고 코일이 ± 10 mm 움직이는 것을 10 사이클 반복한 후의 전단변형(shear strain) 분포를 나타낸 것이다. 전단변형이 비대칭으로 생김을 알 수 있고 여기서 발생하는 잔류응력이 토크 즉 히스테리시스를 발생시키는 원인이 된다. 또, Fig. 4 (b)는 각 사이클에서 원점에서의 토크값을 양팔저울의 끝단에서의 질량 값으로 환산한 것이다. 여기에서 히스테리시스는 현재의 스텝과 이전 스텝과의 차이로서 계산될 수 있는데, 사이클을 반복하면서 그 차이가 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉 힘 평형 모드에서 질량을 측정하기전과 후 사이에 10 mm의 코일 움직임이 있었다면 약 0.4 mg의 히스테리시스가 발생함을 의미하고 있다.

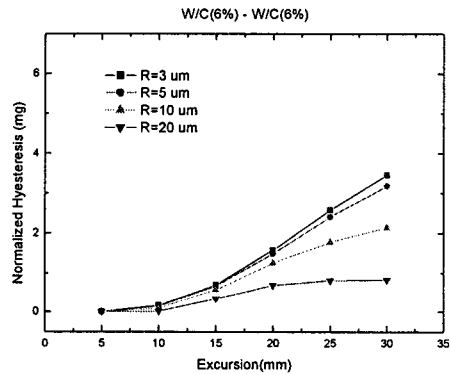


Fig. 5 Normalized hysteresis as a function of excursion and tip radius

이러한 방식으로 다양한 변수들에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 5 는 팁반경과 회전량(이동거리)에 대해 해석한 결과이다. 팁반경이 작은 경우 회전량이 작은 영역에서는 히스테리시스 특성이 거의 보이지 않다가 회전량이 증가할수록 지수적으로 증가한 후 다시 선형적으로 증가한다. 팁반경이 증가할 수록 히스테리시스가 작아지며 증가하는 경향도 선형적으로 증가하는 경향에서 수렴하는 형태로 변하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 회전량이 작으면 대부분의 요소들이 탄성영역에 있게 되지만 회전량이 클 경우 접촉되는 면적이 증가하면서 소성 영역하에 있는 요소의 수가 증가하게 되기 때문이다. 그러나 팁반경이 클 경우 소성영역에 있는 요소의 수가 더 이상 늘어나지 않게 되어 수렴하는 것으로 볼 수 있다. 실제

와트발란스에서 팁반경을 증가시키게 되면 히스테리시스는 작아지게 되지만 완전한 원형형태의 가공이 불가능하고, 또한 회전중심이 이동하게 되어 나이프에지의 목적에 부적합하게 된다. 따라서 팁반경은 히스테리시스와 설계목적 사이에서 적합한 값을 찾아야 할 필요가 있다.

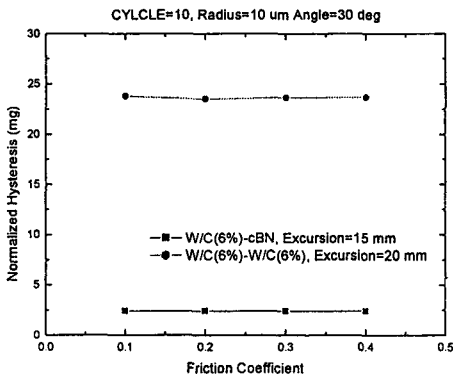


Fig. 6 (a) Normalized hysteresis as a function of friction coefficient

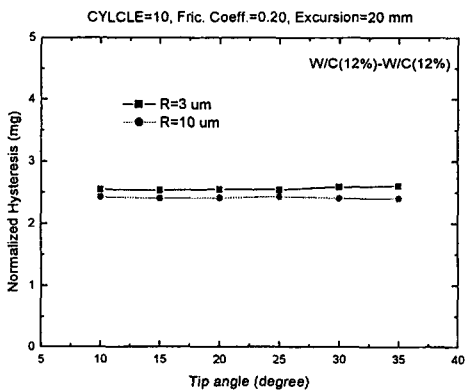


Fig. 6 (b) Normalized hysteresis as a function of tip angle

다음으로 마찰계수와 팁각도에 대한 변화를 해석하였다. 해석에서는 나이프와 받침사이에 미끄러짐이 없다고 가정하였다. 미끄러짐이 있을 경우 적절한 구속조건이 없기 때문에 해석결과가 수렴하지 않게 되기 때문이다. 또한 실제로 수개월간 수만 번의 회전 반복을 하더라도 나이프의 위치에 변화가 거의 없음을 볼 때 이러한 가정은 타당한 것으로 간주될 수 있다. Fig. 6 (a)는 W/C(12%)를 나이프로 사용하고 받침의 재료로 각각 W/C(12%)와 cBN 를 사용한 경우를 보여주고 있다. cBN 가

W/C(12%)에 비해 매우 큰 히스테리시스 특성을 보여주고 있지만, 마찰계수는 히스테리시스에 영향을 주지 못하고 있다. 이것은 나이프가 회전할 때 접촉영역에서 받침에 대한 상대적인 움직임이 거의 없기 때문에, 기존의 마찰이 작을수록 히스테리시스가 작을 수 있다는 개념과 상반되는 결과이다. Fig. 6 (b)는 팁각도에 대한 해석결과로 마찰계수와 마찬가지로 히스테리시스에 거의 영향이 없다. 이것은 강한 재료의 경우 스트레스가 팁끝단에 집중되어 팁각도 보다는 팁반경이 응력분포에 더 영향을 줄 수 있기 때문이다.

다음으로 재료를 바꾸어서 히스테리시스 해석을 수행하였다. 재료로는 W/C(12%), W/C(6%)를 사용하고 추가로 이상적으로 W/C(6%)와 같은 탄성계수와 W/C(12%)와 같은 파열강도(rupture strength)를 갖는 완전 탄소성 재료에 대해서도 해석을 수행하였다. Fig. 7은 이러한 세가지 재질을 하중에 대해 모의 실험하였을 경우의 결과를 보여주고 있다.

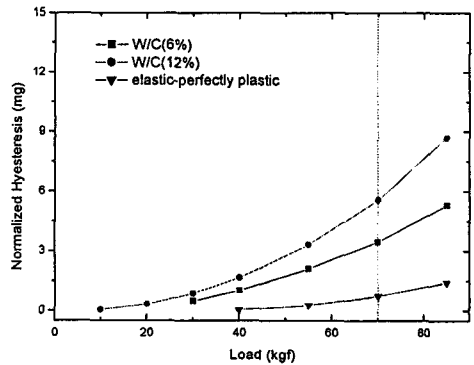


Fig. 7 Normalized hysteresis as a function of applied load

Fig. 7 에서 하중에 대해 히스테리시스는 지수적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 하중을 줄이는 것은 히스테리시스를 줄이는 데에 도움이 되지만 기본적으로 필요한 기계적 성분들의 하중이 어느 정도 이상의 치수를 필요로 하기 때문에 한계가 있다. 또한 양팔저울의 양 끝단에 사용되는 나이프 에지는 100 N 미만의 하중이 작용하기 때문에 대부분의 히스테리시스는 중앙 나이프에서 발생하게 됨을 가정할 수 있다.

그리고 예상했던 것과 같이 W/C(6%)를 사용하

였을 경우가 W/C(12%)보다 작은 히스테리시스를 얻을 수 있었다. 그러나 완전탄소성인 재료의 파열 강도가 W/C(6%)보다 작지만 히스테리시스는 더 작음을 알 수 있다. 이는 강도도 중요하지만 재료의 단단한 정도인 경도 또한 히스테리시스에 중요한 변수로 작용하고 있음을 나타낸다. 물론 다이아몬드와 같이 강하고 단단한 재료가 나이프 에지로서 가장 좋은 재질이지만, 강도나 경도 한쪽만 우수한 재질은 적합하지 않을 수 있음을 보여주고 있다.

3. 와트 발란스 비선형성

3.1 히스테리시스와 크립 특성

NPL 의 와트발란스는 W/C(6%) 나이프와 cBN 받침으로 이루어져 있다. 가장 가볍고 단단한 물질로 알려진 cBN 를 20 여년전 와트 발란스 제작 당시 채택하여 현재까지 사용하고 있다. 물론 앞에서 언급한 바와 같이 단단한 물질이 히스테리시스를 줄이는 데에 있어 큰 도움이 되지만 Fig. 6 (a)에서 보듯이 cBN 를 받침으로 사용한 경우 W/C(6%)를 사용하였을 때보다 상당히 큰 히스테리시스가 발생하고 있다. 이것은 파열강도가 W/C(6%)에 비해 ¼ 수준으로 매우 작기 때문이다.

Fig. 8 은 NPL 와트 발란스의 히스테리시스 특성을 보여주고 있다.

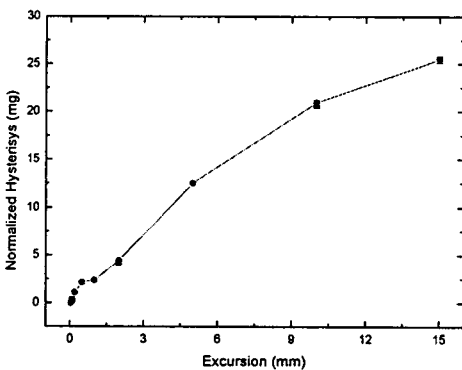


Fig. 8 Experimental result of NPL watt balance hysteresis

2.2 의 해석결과에서는 회전량이 작은 부분에서는 히스테리시스가 거의 없었지만 실험에서는 작은 영역에서도 히스테리시스가 크게 발생하고 있으며 또한 로그(logarithm)형태로 증가하고 있다. 이것은 NIST 의 같은 실험에서 보여지고 있는 선형

적 혹은 지수적으로 증가하는 실험결과와도 매우 다른 경향이다.

Fig. 9 (a)의 크립 특성에서는 크립량이 회전량에 대해 선형적으로 증가하고 있지만, Fig. 9 (b)에서 보는것 처럼 시정수(time constant)가 40 초 미만으로 2~3 분이내에 수렴하게 된다. 또한 크립이 히스테리시스에 비해 크기가 3 % 미만이기 때문에 비선형성에서 차지하는 비중이 극히 무시할 만하다. 따라서 FEA 에서 정적모드로 가정해도 무방하며 대부분의 비선형성은 히스테리시스 특성임을 알 수 있다.

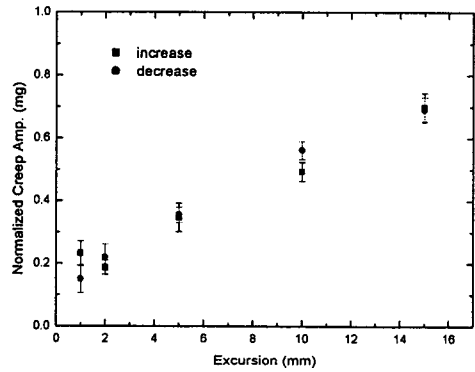


Fig. 9 (a) Creep amplitude w.r.t. excursion

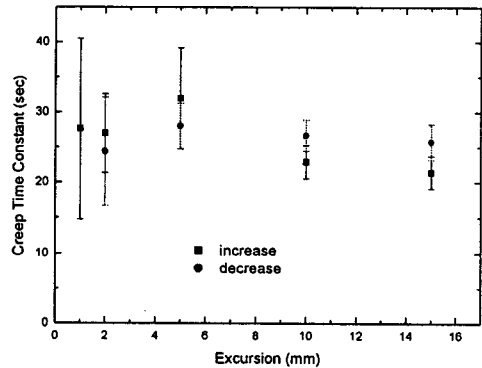


Fig. 9 (b) Time constant of creep w.r.t. excursion

3.2 실험과 해석 비교

Fig. 10 은 W/C(6%) 나이프와 cBN 받침에 대한 해석 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 결과에서 보듯이 반경이 20 μm 일 경우 비슷한 유형의 증가 경향을 보이지만 값에서는 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 와트발란스의 경우 처음부터 히스테리시스 특

성이 보이지만 모의실험의 경우 회전량이 작을 경우 대부분의 요소들의 전단변형이 탄성영역에 있기 때문에 히스테리시스 특성이 거의 없다. 두개 중 하나의 결과를 x 축을 따라 이동시키면 거의 유사한 결과를 얻을 수 있다.

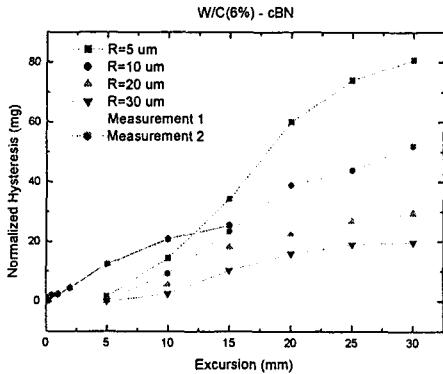


Fig. 10 Comparison between experimental and FEA results

실제 와트발란스의 히스테리시스가 초기영역에서 매우 큰 이유는 다음과 같은 세가지 이유로 생각해 볼 수 있다.

첫째, 재료가 소결되어 가공될 경우 금속과 다른 경향을 보일 수 있는데, 전단응력 강도가 모의 실험에서 von Mises criteria 를 적용할 경우보다 실제로 더 작을 수 있다. 또한 모의실험에서처럼 나이프의 형태가 완벽한 원형이 아니며 받침에서의 거칠기 또한 이에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 미세 영역에서의 재료 물성과 형태가 히스테리시스의 영향을 미칠 수 있다.

둘째, 실제로 나이프와 받침 사이에 미끄러짐이 일어날 수 있다. 미끄러짐의 양은 극히 작아 확인이 불가능하더라도 실제 회전하는 나이프가 겪게 되는 상대적인 회전량이 증가하게 되어 실제 모의 실험 결과가 Fig. 11 과 같이 실험치 쪽으로 이동하는 효과를 가져오게 된다. 그러나 이러한 미끄러짐 현상이 회전량이 작은 영역에서는 설명이 되지 못하기 때문에 주요 원인이 될 수는 없다.

셋째, 2 차원 해석으로 고려할 수 없었던 3 차원 효과에 의한 것일 수 있다. 다시 말해, 수평 직진도와 수직 직진도가 될 수 있는데, 나이프와 받침 사이의 접촉되는 부분이 선형적이지 못하고 왜곡되어 작은 회전량에 대해서도 큰 변형이 있을 수

있다. 수직직진도의 경우 나이프와 받침 사이의 응력분포가 특정한 영역에 집중되게 되는데 이것은 하중을 증가시키므로써 2 차원에서도 비슷한 결과를 얻을 수 있었지만 첫번째와 같이 증가 경향은 변하지 않았다. 현재로서는 수평직진도가 가장 큰 이유일 수 있는데 이것은 요소개수의 증가로 3 차원 모의 해석이 불가능하고, 실제 사용되는 나이프의 길이를 줄여 실험을 수행하여 역으로 모의 실험 결과와 비교해야 한다.

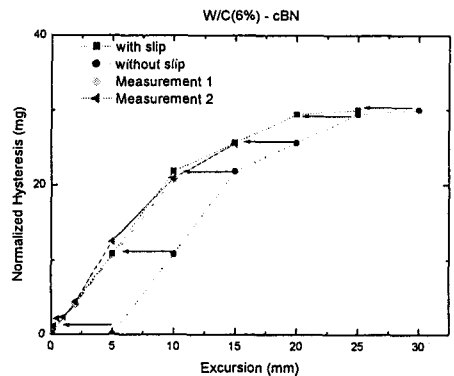


Fig. 11 Shift effect due to the slip between a knife and a flat

본 논문에서의 유한요소해석 결과는 회전량이 작을 경우 실제 실험결과보다 히스테리시스가 작게 나온다. 그러나 이러한 차이는 해석에서 고려할 수 없었던 영향인자의 영향이 실제실험에서 나타났기 때문이지만, 전단응력에 의한 실제 설계에서는 본 논문의 방법이 유효함을 알 수 있다. 실제 비선형성이 작은 나이프에지를 설계하고 제작할 경우에는 본 논문에서 언급된 영향인자가 큰 부분을 고려하여 재료선정 및 가공을 할 필요가 있다.

나이프의 수평 직진도나 표면거칠기에 의한 히스테리시스 크기 변화 등에 대한 연구가 추후 보완되어야 할 필요가 있다. 실험적으로 나이프의 직진도를 쉽게 구하는 방법이 없기 때문에, 이를 위해 현재 별도의 실험장치를 준비 중이며, 이때에는 짧은 나이프를 사용하여 모의실험과 비교하려고 한다. 또한 나이프의 길이를 줄이면 응력을 쉽게 증가시킬 수 있기 때문에 다양한 해석을 할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용한 나이프 에지의 특성을 분석하였으며, 실제 실험치와의 비교를 통해 해석의 타당성을 검증하고자 하였다.

히스테리시스의 원인은 수직응력보다는 전단응력에 기인한 것으로 나이프 보다는 받침에서 주로 발생한다. 약한 재질의 나이프를 사용하게 되면 수직응력에 의해 나이프 자체의 변형은 심하지만, 전단응력은 그다지 크지 않기 때문에 히스테리시스가 약한 재질의 받침을 사용할 경우보다 작게 된다.

또한 기존의 개념과 다르게 마찰력, 팁각도 등은 중요한 변수로 작용하지 않았으며, 재료의 물성치, 팁반경, 하중, 나이프의 직진성 등의 영향이 매우 크게 작용할 수 있음을 알 수 있었다. 특히 나이프의 직진성에 대한 추가 연구를 위해 모의 실험보다는 길이가 짧은 나이프를 이용한 히스테리시스 실험이 필요하다.

후 기

이 논문은 2006 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-611-D00010)

This work was supported by a Royal Society International Incoming Fellowship

참고문헌

1. Kibble, B., "A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method," in Atomic Masses and Fundamental Constants (J. H. Sanders and A. H. Wapstra, eds), New York: Plenum, Vol. 5, pp. 541-551, 1976.
2. Robinson, I. and Kibble, B., "The NPL moving-coil apparatus for measuring Planck's constant and monitoring the kilogram," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 46, No. 2, pp. 596-600, 1997.
3. Steiner, R., Williams, E., Newell, D. and Liu, R., "Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass," Metrologia, Vol. 42, No. 5, pp. 431-441, 2005.
4. Topcu, S., Chassagne, L., Haddad, D., Alayli, Y. and Juncar, P., "High accuracy velocity control method for the French moving-coil watt balance," Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, No. 11, pp. 4824-4827, 2004.
5. Beer, W., Eichenberger, A., Jenneret, B., Jeckelmann, B., Pourzand, A., Richard, P. and Schwarz, J., "Status of the METAS watt balance experiment," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 52, No. 2, pp. 626-630, 2003.
6. Mills, I., Mohr, P., Quinn, T., Taylor, B. and Williams, E., "Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CI PM recommendation 1(CI-2005)," Metrologia, Vol. 43, No. 3, pp. 227-246, 2006.
7. Schwarz, J., Liu, R., Newell, D., Steiner, R., Williams, E. and Smith, D., "Hysteresis and Related Error Mechanisms in the NIST Watt Balance Experiment," J. res. Natl. Inst. Stand. Technol., Vol. 106, No. 4, pp. 627-640, 2001.