[논문] 한국소성가공학회지, 제 20 권 제 1 호, 2011
Transactions of Materials Processing, Vol.20, No.1, 2011
DOI : 10.5228/KSTP.2011.20.1.73

사출금형 버 발생 방지를 위한 형합면압 측정에 관한 연구

최재혁[1] · 최순호[1] · 태준성[1] · 박형필[2] · 이병옥[#]

Study on the Pressure Measurement at Parting Surface to Prevent Flashing in Injection Molds

J. H. Choi, S. H. Choi, J. S. Tae, H. P. Park, B. O. Rhee

(Received December 28, 2010 / Revised January 11, 2011 / Accepted January 17, 2011)

Abstract

The flashing reduces the part quality and the productivity of the molding process. We developed a contact pressure sensor to detect the flashing immediately. The performance of the sensor was analyzed in a simple 2D simulation. The sensor was applied to an automotive bumper mold with cavity pressure sensors. It showed sensitive output signal for the mold response by the cavity pressure change. It was confirmed that the flashing at the gate area occurred in the filling stage by the pressure increase due to growth of the melt flow length. The sensor output was correlated with the cavity pressure sensor output.

Key Words : Injection Molding, Contact Pressure Sensor, Strain Sensor, Structure Analysis, Burr

1. 서 론

사출성형은 금형을 이용하여 플라스틱 성형품을 짧은 시간 내에 대량으로 생산하는 데 적합한 공정으로 제품의 생산 단가를 낮출 수 있는 공정의 장점이 있다. 그러나 이러한 장점은 제품 생산 과정에 결함으로 인한 불량이 없다는 전제하에 얻을 수 있다. 플로우마크(Flow Mark)와 웰드라인(Weld Line) 등의 결함은 제품 품질을 저하시키고, 버(Burr or Flash)와 같은 결함이 발생하게 되면 결함 해결을 위하여 추가적인 인력이 들어가므로 제품의 원가가 높아지게 되어 사출성형의 장점이 감소된다. 특히 본 연구에서 초점을 맞추고 있는 버 발생의 경우 자동차 범퍼나 크래쉬패드(Crash Pad), 인스트루먼트패널(Instrument Panel) 등 대형 금형에서 빈번하게 발생하고 있다. 이와 같은 대형 제품들은 제품 생산 시간이 일반적인 사출성형품에 비해 길고, 발생한 버를 사람이 손으로 제거하는 공정이 필연적으로 추가되어 생산 비용적인 면에서나 생산시간적인 면 모두에서 일반 사출성형품에 비해 큰 손실이 발생하게 된다.

현재까지 국내에서 수행된 연구 중 버 발생과 방지 대책에 관한 내용은 미미한 상황이다. 국외에서 수행된 연구도 매우 적고 그나마 버 발생 메커니즘에 관한 이론적인 설명에 관한 연구가 일부 발표된 상황이라 현장에서 실질적으로 버 발생 방지를 위하여 대응 방안을 체계적으로 제시하지 못하고 있다[1].

사출성형 공정에서 발생하는 다양한 결함을 즉각적으로 판단하고 장기적인 공정 변수 변화를 측정하여 생산성을 증가하려는 목적으로 금형 내 압센서가 널리 사용되어 왔다. 금형 내압센서를 통해 수지의 변화를 민감하게 측정하고 관리할 수 있지만, 버 발생과 같은 결함은 수지의 변화만

1. 아주대학교 기계공학과
2. 한국생산기술연구원
교신저자: 아주대학교 기계공학과, rhex@ajou.ac.kr

을 측정하여 판단할 수 없는 문제가 있다. 수지의 변화에 따른 금형의 변화에 의해 버가 발생할 수 있기도 하고 없을 수도 있기 때문이다.

본 연구에서는 버 발생을 현장에서 즉각적으로 판단하기 위해 형합면압센서를 사용하였으며 이를 금형에 직접 적용하여 형합면압의 변화를 측정하였다. 형합면압센서의 설계를 위해 설치 위치에 따른 민감도 분석을 수치해석을 통해 실시하였다. 또한 사출성형 공정관리를 위해 일반적으로 사용하고 있는 금형 내압센서의 측정값과 비교 분석을 통해 관련성을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 버 발생 현상

2.1.1 버 발생 원인 분석

버는 사출성형품 파팅라인을 따라 얇게 수지가 새어 나와 고화가 된 현상을 지칭한다. 버가 발생하는 이유에는 여러 가지가 있을 수 있으나 근본적으로 금형의 형합면압이 감소하여 형체결 기능을 하지 못하면서 발생한다고 할 수 있다. 버 발생 원인은 크게 2가지로 볼 수 있다.

첫 번째는 사출성형 공정변수 설정 오류에 의한 것이다. 사출성형 공정변수를 잘못 설정함으로써 버가 발생하는 경우 크게 2가지 유형으로 발생한다. 첫 번째 유형으로서 용융 수지가 주입되는 첫번째 게이트 주변에 발생하는 버다. 대형 제품의 경우 중앙부에 게이트를 설치한 경우 중앙부를 통해 유입된 수지의 유동길이가 과다해지며 압력이 지나치게 상승한다. 과다한 금형 내압은 주변의 형합면압을 감소시키며 형체결 기능을 없앤다. 형체결 기능이 없어진 부위는 자연히 버가 발생한다. 게이트 주변은 항상 새로운 용융 수지가 고속으로 주입되며 고화층이 매우 얇아 버가 쉽게 발생할 수 있는 조건을 가지고 있다. 초기 게이트 주변에서 발생하는 버는 이와 같은 원인에서 발생한다고 판단된다.

두 번째 유형은 충전 말단부에서 발생하는 버이다. 금형에 주입된 용융 수지는 가장 마지막으로 충전 말단부에 도달한다. 정확한 충전 완료 시점을 찾아 보압절환이 이루어지면 문제가 없겠으나 만약 실제적으로 충전이 완료되었지만 아직 보압절환점에 이르지 못하여 스크루가 속도를 유지하고 있는 상태라면 금형 내부의 압력은 매우 높은 속도로 증가할 것이다. 빠른 속도로 증가한

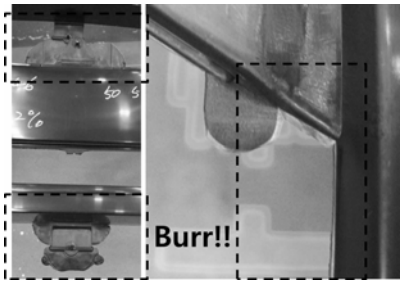

Fig. 1 Burr occurred in the automotive bumper

금형 내압은 아직 용융 상태에 있는 충전 말단부의 압력을 높이고 이렇게 높아진 금형 내압은 주변의 형합면의 형체결력을 저하시키면서 버를 발생한다. 빠른 속도로 금형 내압이 상승하여도 충전 말단부 이전의 위치에서는 이미 형합면에 닿아 있는 수지가 고화가 진행되어 버를 발생하기 어려운 상태에 있어 버 발생 확률이 낮아진다.

버 발생의 두 번째 원인으로서 금형 강성이 부족한 금형 설계의 문제점이다. 금형 설계 시, 사출성형 중 발생하는 압력에 따른 구조적인 변화에 대하여 충분한 검증을 수행하지 않고 있다. 금형의 강성이 낮아 금형 내압 발달에 의해 형체결 기능이 감소하게 되면 버 발생 결함은 피할 수 없는 상황이 될 것이다.

2.1.2 버 발생 상황 측정 방안

버가 발생하는 2가지의 원인 중 금형 강성 검토 문제는 금형 설계 단계에서 실제적인 구조해석을 통해 적절한 금형 강성을 보장하도록 함으로써 해결할 수 있을 것이다. 그러나, 공정변수 설정 오류에 의한 문제점을 해결하기 위해서는 공정 중 금형의 변화를 즉각적으로 탐지할 수 있는 수단이 필요하다. 만약 버가 발생할 수 있는 확률이 높아졌다면 공정변수를 조절하여 금형 내압을 낮추어야 하겠다.

형체결력을 통해 형합면에 가해진 높은 압력이 금형 내압의 증가에 의해 점차로 감소하여 용융 수지의 압력을 견딜 수 없게 되면 버는 발생한다. 이와 같은 상황을 즉각적으로 판단하려면 버가 발생하는 형합면의 압력 변화를 직접 측정하여야 한다.

형합면의 압력을 측정하기 위한 방법으로서 응력이나 변형율을 측정하는 방법과 형합면 간의 거리 변화를 측정하는 방법 등이 있다. 형합면 간

의 거리 변화를 측정하려면 미세 변위를 측정하는 방법을 적용해야 한다. 미세 변위를 측정하는 방법에는 LVDT 센서를 사용하는 방법과 와전류를 이용한 변위 센서 그리고 레이저를 이용한 변위 측정 센서 등이 있다[2~4]. 그러나 형합면 간의 변형율이 대략 최대 10^{-3}정도가 되고 변화 범위를 100분의 1정도의 해상도로 측정한다고 가정할 때, 센서와 대상면의 거리가 1mm 인 경우 필요한 해상도는 10^{-5}mm가 된다. 그러나 이 정도의 높은 해상도를 가지는 변위 센서를 구하기 쉽지 않으며 측정면의 조도 또한 매우 낮아야 하는 제약이 따르게 되어 변위 센서의 적용은 현실적이지 못한 상태이다.

그에 비해 응력이나 변형율을 측정하는 방법은 미세한 변화까지도 쉽게 저렴한 비용으로 측정할 수 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 형합면압의 측정을 위해 변형율을 측정하는 센서를 활용하였다[5].

2.2 형합면압센서

2.2.1 적용 센서와 측정 원리

본 연구에서는 변형율 센서를 이용하여 형합면압의 변화를 측정하였다. 변형율이 측정되면 재료의 탄성계수를 이용하여 응력 값을 계산할 수 있다. 사용된 변형률 센서는 Kistler사의 9247A이며 세부 치수는 Fig. 2에 나타내었다.

형합면압센서가 작동하는 원리를 Fig. 3에 나타내었다. 사출 시작 시 금형이 닫히게 되면 형체력에 의해 가동측과 고정측이 서로 맞닿아서 형합면을 형성하게 된다. 이 때 상하 금형의 형합면은 서로 밀고 있는 상태에 있으므로 압축응력이 걸리게 된다. 사출성형이 시작되면서 금형 내압이 증가하며 형체력과 반대 방향으로 응력을 발생하여 형합면에 걸려있는 압축응력을 이완시킨다. 형합면압의 이완은 형합면압센서의 압축 응력이나 변형율을 감소시킨다. 금형 내압이 점차 커질수록 형합면에서의 응력이완 효과는 커져서 형합면이 벌어지는 상태에 이르면 형합면압은 응력이 모두 풀어진 상태가 되며 형체결 기능을 상실하여 버가 발생한다. 버가 발생할 수 있는 최소 형합면압 센서의 측정값은 0이 될 것이다.

그러나, 버가 발생하는 지점에 센서를 설치할 수 없으므로 버가 발생하는 상황에서 형합면압센서는 0을 나타내지 않고 일정한 최소값을 나타낼 것이다.

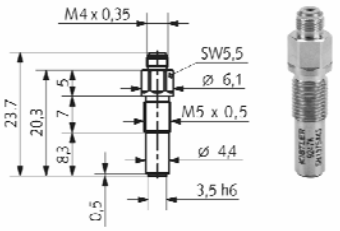

Fig. 2 Strain sensor to measure the contact pressure at parting surface area

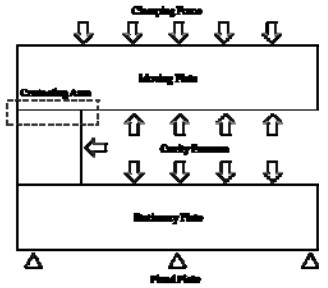

Fig. 3 Contact pressure decreases in the parting area as cavity pressure increases

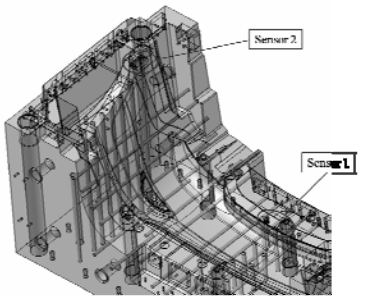

Fig. 4 Sensor locations in the automotive bumper mold

2.2.2 센서의 설치

대형 금형에 작은 변형율 센서를 설치하는 것은 매우 어려운 작업이다. 센서 설치를 쉽게 하는 현실적인 방법으로서 작은 센서블록을 제작하여 변형율 측정 센서를 설치한 후 이를 형합면을 도려낸 구멍에 설치함으로써 형합면압 변화를 측정하는 방법이 편리하다. 이와 같은 방법은 대형 금형에 금형 내압 센서를 설치하는 방법과 동일한 방법이다. 본 연구에서도 이와 같은 방법을 적용하여 변형율 센서를 Fig. 4에서 보는 바와 같이 형합면에 설치하였다.

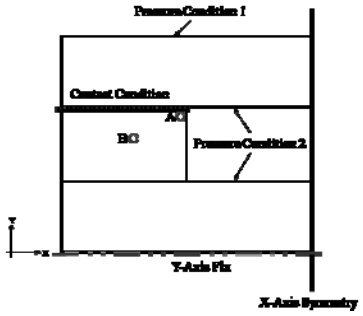

Fig. 5 Boundary conditions for 2-D structural analysis

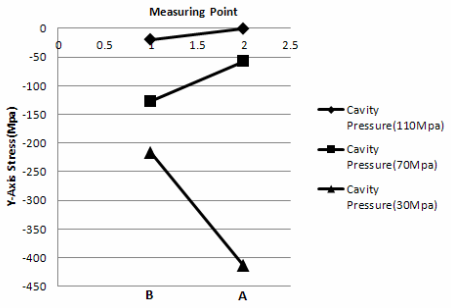

Fig. 6 Stresses in the Y direction at the A and B points

2.2 2차원 해석을 통한 검증

2.2.1 2차원 해석 조건

금형 내압의 변화에 따른 금형 거동을 예측하는 가장 좋은 방법은 실제의 3차원 형상을 대상으로 실제 조건을 부여한 후 해석을 진행하는 것이나, 이 방법은 많은 시간이 걸리고 자료분석에도 과다한 시간이 소요되므로 차선책으로 2차원 해석을 진행하기로 하였다. 2차원 해석의 경우 3차원 해석과는 달리 실제 형상과는 차이가 있는 형상이므로 정확한 값은 파악하기 어려우나 경향성을 파악하기에는 3차원 해석을 비교할 때 큰 차이가 없다고 판단하였다.

Fig. 5는 2차원 해석에 사용된 경계 조건을 나타낸 그림이고 또한 해석을 위해 실제 사용된 형상의 그림이기도 하다. 금형의 단면을 2차원으로 가정하여 나타내었기 때문에 실선으로 표시한 우측 부분은 축대칭 조건이며 내부는 내압이 발생하는 상황을 가정하여 압력하중조건을 부여하였다. 또한 상부의 형판은 가동측을 가정하고 압력을 부여하여 형체결력을 가하였으며 하측 형판에 표시된 2점 쇄선은 고정측으로 가정하여 y축 고정조건을 부여하였다. 고정측과 가동측이 맞닿는 부분인 점선으로 표시한 선은 접촉조건을 부여하여 단순 접촉이 발생하는 것만 가정하였다. 해석에 사용된 구조해석 프로그램은 ABAQUS이다.

2.2.2 2차원 해석 결과

Fig. 5에 나타낸 표시 중 위치 A는 형합면에서 금형 내부에 가장 가까운 위치이며 내압이 발생하는 영역에 가까운 지점으로서 내압 변화에 민감한 위치이다. 위치 B는 실제 형합면압센서가 설치된 위치에 가까운 위치를 선정하였다. 형체력은 3000ton 사출기의 형체결력을 기준으로 계산하여 60Mpa 적용하였으며 내압은 30, 70, 110Mpa 3단계로 증가시켜 A와 B영역에서의 Y축 응력 값을 표시하였다.

현재 기준이 되고 있는 X와 Y축을 고려한다면 형체결력이 가해지는 방향은 Y축이 된다. 따라서 가동측과 고정측이 벌어지는 방향은 Y축이 되므로 Y축으로의 응력 값만 추출하여 결과로 표시하였다. Fig. 6을 참고하면 캐비티 내부 압력이 약 110Mpa일 때 위치 A의 응력은 거의 0에 수렴하므로 버가 발생할 수 있다고 판단할 수 있다. 이때 센서가 설치된 위치 B의 응력은 약 -25MPa의 값을 보이고 있다. 이와 같은 조건에서 형합면압센서의 응력이 25MPa보다 작은 응력을 보이면 버가 발생하였다고 판단이 가능하다.

2.3 형합면압센서 실험 조건

형합면압센서는 버가 주로 발생하는 중앙부 게이트 주변과 충전 말단부위의 형합면에 각각 1개씩 설치하였다. 실제 형합면압센서를 설치하여 실험한 금형과 제품은 해당 업체의 보안을 위해 상세하게 밝히지 않았다. 금형 내압과 형합면압의 변화를 비교 분석하기 위해 동일한 금형에 금형 내압 측정을 위해 총 4개의 금형 내압센서를 설치하였다. 1번 내압센서는 중앙부 게이트 가까운 곳에 설치하고 2번 센서는 이로부터 약 40~50cm 정도 떨어진 위치에 설치하였다. 3번과 4번 센서는 각각 충전 말단부 근처에 설치하였다. 금형 내압센서는 모두 Kistler사의 6157B 센서이다.

실험에 사용된 금형은 자동차 범퍼 금형이었으며 3,000ton Battenfeld 유압식 사출기를 사용하였다. 수지는 제일모직사의 HF-1023IM을 사용하였으며 기준 성형조건은 Table 1에 나타냈다. 제품성형 시

Table 1 The Manufacturing Conditions

Melting Temperature[℃]	220
Filling Time[s]	9.4
V/G Open Time[s]	1st/G(0), 2nd/G(5.3), 3rd/G(6)
Injection Velocity[mm/s]	S(300) – 15 – 35 – 15 – E(15)
Packing Pressure[bar]	35
Packing Time[s]	10

Table 2 Controlled values and variables to find relation between the contact pressure and the cavity pressure sensors

	Injection Velocity [mm/s]	Packing Pressure [bar]	V/G Open Time [s]
C1	-3	-3	-1
C2	-3	+3	-1
C3	+3	-3	+1
C4	+3	+3	+1

사용된 게이트는 총 6개이지만 중심부 게이트 2개를 제외한 나머지 4개 게이트는 2개씩 동일한 오픈 시간을 가지고 있으므로 2개를 하나의 그룹으로 간주하여 2개의 그룹으로 표시를 하였다. 1st/G가 중심부 게이트 2개, 2nd/G가 두 번째 그룹의 게이트 2개, 마지막 게이트 2개를 3rd/G로 정의하였다. 괄호안의 숫자는 게이트가 열리는 시점을 표시한 것이다. Injection Velocity는 다단으로 사용하였기 때문에 S로 정의된 왼쪽의 시작점을 기준으로 우측으로 나열된 값들로 순차적으로 표시하였다. E는 종점으로 정의하였으며 S(300)은 시작점에서의 스크루 위치 300mm이며 E(15)는 종점에서의 스크루 위치 15mm를 나타낸다.

Table 1의 기준조건에서 버발생에 영향을 미치는 인자 3가지 사출속도, 보압, 밸브게이트 오픈시점을 선정한 후 영향도 분석을 위하여 Table 2의 실험계획표를 기준으로 실험을 진행하였다. C1, C2, C3, C4는 실험순서를 의미하며 각 항에서 상수의 값은 기준조건에서의 상수만큼의 변동량을 의미한다. 이 변동량들은 기준조건 대비 사출이 가능한 물리적 범위를 고려하여 약 10%로 정의하였다.

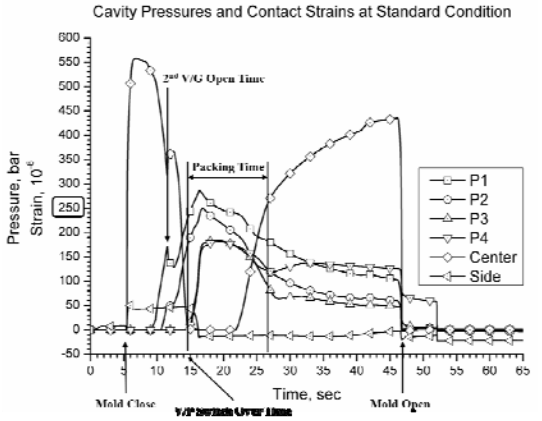

Fig. 7 Strains measured by the contact pressure sensor and cavity pressures by the cavity pressure sensors

3. 실험 결과

3.1 형합면압센서의 성능 확인

Fig. 7은 특정 실험 조건에서 측정된 형합면의 변형율과 4개소에서 측정된 금형 내압을 나타낸 것이다. 2차 밸브의 오픈 시점에서 금형 내압센서에서 보이는 압력 변화와 형합면압센서에서 보이는 변형율 변화가 매우 잘 일치하고 있는 것으로 형합면압센서의 민감도가 매우 높음을 알 수 있었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 변형율이 거의 0으로 감소하였는데 이 경우 제품에는 이미 가느다란 버가 발생함을 확인함으로써 버 발생에 대해 형합면압센서의 신뢰도가 높음을 확인하였다. 시점분석을 통해 변형율이 0에 가깝게 감소한 시점이 보압절환점 이전임을 알 수 있었다. 보압절환점 이전에 길어진 수지의 유동길이에 의해 증가된 금형 내압이 형체결력을 감소하여 버를 발생하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 7에 나타난 상태에서는 금형 내압 중 1번 센서(게이트에 가장 가깝게 설치된 센서)가 약 250bar(25MPa)의 압력을 보일 때 형합면압센서의 변형률이 거의 0의 값을 보였다.

3.2 형합면압센서와 내압센서와의 연관성

형합면압센서가 없을 때 내압센서만으로도 버가 발생하는 현상을 예측할 수 있도록 하기 위

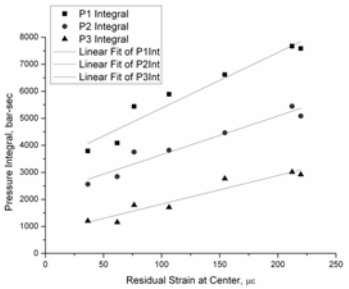

Fig. 8 Correlation analysis between the cavity pressure and the contact pressure sensors

해 형합면압센서와 내압센서와의 연관성을 조사하였다. 내압센서에서 측정된 압력값을 적분한 값(Pressure Integral)과 게이트 부근에 설치된 형합면압센서에서 측정된 최대값과 형합면압이 최소값을 보인 이후에 나타나는 최대값의 차이를 잔여변형율(Residual Strain at Center)로 정의하였다. 잔여변형율은 캐비티 내에 압력이 완전히 해제되지 않은 상태에서 발생하며 이는 과보압 상태를 나타낸다. 이를 제품 두께 변화와 관련 짓는다면 제품 두께를 간접적으로 나타내는 것으로서 클수록 제품 두께가 설계된 두께보다 커진 것을 의미한다.

Fig. 8에서는 내압 적분값과 잔여변형율의 상관관계를 보여주며 상관도 분석에서 가장 높은 상관도를 나타내었다. 형합면압센서에서 측정된 잔여 변형율이 클수록 내압 적분값도 커지는 것을 알 수 있다. 상관도 분석을 통해 내압센서에서 측정되는 압력의 적분값이 일정 수준을 넘어설 때 버 발생을 판단할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단한다. 그러나 이 방법으로 버 발생을 판단할 때는 개별 금형에 대해 실험을 통해 버 발생을 알려주는 내압 적분값을 찾아내어야 하는 단점이 있다.

형합면압센서를 사용하지 않고 내압센서만을 사용하여 버 발생을 판단하기는 어렵다. 이는 내압이 높아도 금형 형체결력이 높다면 버를 발생하지 않을 수 있기 때문이다. 그러나 형합면압센서를 사용하면 금형 변형을 즉각적으로 알아낼 수 있어 내압에 관계없이 버 발생을 효과적으로 판단할 수 있는 장점이 있다.

4. 결 론

사출성형에서 발생하는 버 발생을 현장에서 즉각적으로 판단하기 위하여 형합면압센서를 사용하였고 2차원 구조해석을 통하여 그 개념을 검증하였다. 자동차 범퍼용 금형에 면압센서를 설치한 후 형합면의 변형율 변화와 그에 따른 버 발생 상황을 측정함으로써 버 발생 상황을 민감하게 판단할 수 있음을 확인하였다.

수지 상태 변화를 측정하기 위해 사용되는 금형 내압센서와 함께 실험을 진행하여 내압센서 결과와의 상관도를 검토한 결과 형합면압센서에서 측정된 잔류변형율이 내압 적분값과 가장 높은 상관도를 나타내었다.

본 연구에서 적용한 형합면압센서는 버 발생을 현장에서 즉각적으로 판단할 수 있는 새로운 센서로서 충분한 민감도와 신뢰도를 보여 주었다. 이후 필요한 연구 주제로서 형합면압센서를 이용하였을 때 버 발생 상황을 정량적으로 판단하기 위한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

[1] Zhongbao Chen, A. Jeffrey Giacomin, Lih-Sheng Turng, 2006, Flash, Polymer Eng. and Sci., Vol. 19, pp. 241~247.

[2] Hareem Tariq, Akiteru Takamori, et al., 2002, The Linear Variable Differential Transformer (LVDT) Position Sensor for Gravitational Wave Interferometer Low- Frequency Controls, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A, Vol. 21, pp. 570~576.

[3] Sun-Ho Kim, 2010, Ultra Miniature Eddy Current Sensor with 3 Axes for On-Machine-Measurement, J. Kor. Soc. For Precision Eng., Vol. 27, No. 3, pp. 27~32.

[4] Toshihiko Yoshino, M. Nara, et al., 1987, Laser Diode Feedback Interferometer for Stabilization and Displacement Measurements, Appl. Opt., Vol. 26, Issue 5, pp. 892~897.

[5] M. R. Kamal, W. I. Patterson, et al., 2004, Dynamics and Control of Pressure in the Injection Molding of Thermoplastics, Polymer Eng. and Sci. Vol. 27, Issue 18, pp. 1403~1410.