

# 사출금형기계용 앵글러핀의 충격시험에 따른 파손분석과 와이블 통계 해석

## Failure Analysis and Weibull Statistical Analysis according to Impact Test of the Angular Pin for Injection Molding Machines

김철수\* · 남기우\*\* · 안석환\*\*\*†  
Cheol-Su Kim\*, Ki-Woo Nam\*\* and Seok-Hwan Ahn\*\*\*†

(Received 13 December 2016, Revision received 17 April 2017, Accepted 17 April 2017)

**Abstract:** In this study, failure analysis of the angular pin for molding machines to aluminum component molding was carried out. SM45C steel was used for the angular pin, it was surface hardened by the induction surface hardening heat treatment. The cross section of damaged angular pin was observed, and micro Vickers hardness value from the fractured part was measured. Brittle fracture was occurred from the fracture surface of angular pin, therefore, impact toughness value was evaluated by V-notch Charpy impact test. It was confirmed that the impact absorption energy was high when was tempered at a high temperature for a long time, and the toughness was slightly increased. Also, 2-parameter Weibull statistical analysis was investigated in order to evaluate the reliability of the measured micro Vickers hardness values and absorbed energy. The micro Vickers hardness and absorbed energy well followed a two-parameter Weibull probability distribution, respectively. The reverse design against angular pin was proposed as possible by using test results.

**Key Words :** Molding Machines, Angular Pin, Micro Vickers Hardness, V-notch Charpy Impact Test, 2-parameter Weibull Statistical Analysis

### 1. 서 론

금형기계에 있어서 기계자체적인 문제라든가 슬라이드가 닫혀지지 않은 상태에서 금형이 닫히는 경우, 피로 혹은 기타 문제점 등에 의해 금형

기계부품의 파손사고가 빈번하게 발생한다.<sup>1-3)</sup> 사출성형제품 제작에 있어서 성형품은 일반적으로 사출기가 열리는 방향으로만 취출이 가능하다. 성형품 제작 시에는 언더컷<sup>4)</sup>이 발생할 수 있다. 언더컷(under cut)이란 성형제품에 만들어진 구멍,

\*\*\*† 안석환(교신저자) : 중원대학교 메카트로닉스학과  
E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942  
\*김철수 : 부경대학교 학연협동기계공학  
\*\*남기우 : 부경대학교 재료공학과

\*\*\*† Seok-Hwan Ahn(corresponding author) : Department of Mechatronics, Jungwon University.  
E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942  
\*Cheol-Su Kim : UR Interdisciplinary Program of Mechanical, Engineering, Pukyong National University.  
\*\*Ki-Woo Nam : Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.

돌출부 혹은 오목한 부분을 말하며, 일반적으로 사출기가 열리는 방향의 운동만으로는 빼낼 수 없는 경우가 발생되기 때문에 문제가 된다. 이와 같이 성형제품에 언더컷이 만들어지는 경우에는 금형비 상승, 부품 오작동에 의한 금형파손, 성형품에 파팅라인의 흔적이 남게 되어 성형부품의 정도 저하, 성형주기가 늘어나는 등의 문제점이 발생한다. 따라서 가급적 설계단계에서 언더컷이 발생되지 않도록 하는 것이 좋지만, 기능적 혹은 용도적으로 언더컷이 어쩔 수 없이 발생하게 되는 경우에는 미리 언더컷의 처리를 위해 여러 가지 방법들이 사용되어지고 있다. 그 중에서 한 가지 방법이 슬라이드코어형 구조를 이용하는 방법이다. 언더컷 혹은 취출상의 장애가 있는 부분만 분할하여 처리하는 방법인데, 가동측 형판의 사이트에 열림방향의 직각방향으로 가동부분을 설치하고 고정측 형판에 설치되어 있는 앵글러핀(angular pin) 등을 이용하여 슬라이딩 작업을 통하여 언더컷을 해결하는 것이다. 즉 사출금형기계에는 슬라이드코어의 개폐 시에 가교역할을 하는 앵글러핀이 설치되어져 있는데, 금형의 고정측 형판에 경사지게 설치되어져 있다. 금형이 상하로 작동할 때 앵글러핀도 함께 상하로 작동한다. 앵글러핀의 역할은 슬라이드블록의 표면에 경사지게 구멍을 가공하여 슬라이드코어홈을 만들고 코어홈 안으로 앵글러핀을 삽입시켜 앵글러핀이 상하로 이동하는 거리에 대한 좌우길이의 차이만큼 이송되도록 하는 것이다.<sup>5)</sup> 즉 사출금형기계의 캐비티와 게이트 사이에서 위치를 잡아주는 역할이다.<sup>1)</sup> 이때 슬라이드코어가 몰드베이스의 파팅에 안전하게 안착되도록 록킹블럭이 작동하여 강력한 압력을 가하게 된다. 이 작동에 있어서 슬라이드코어와 록킹블럭은 같은 각도로 설계되어져 있어야 원활하게 움직일 수 있다. 이때 슬라이드코어의 안내 역할을 하고 있는 앵글러핀은 록킹블럭보다도 각도가 2~3° 정도 다소 높게 설정된다. 그 이유는 슬라이드코어가 앵글러핀을 통해 움직인 후 닫힌 다음 몰드베이스로 삽입되어지는데 이때 만약 앵글러핀과 록킹블럭의 각도가 동일하게 되면 록킹블럭에 부딪혀 심한 손상 혹은 파손

이 발생할 수 있다. 이와 같은 사고를 미연에 방지하기 위하여 록킹블럭과 슬라이드코어의 설치 각도보다도 앵글러핀의 각도를 다소 높게 설치하여 슬라이드코어에 앵글러핀이 미리 먼저 삽입되도록 하는 것이다. Fig. 1은 분할금형(split mold)인 양쪽 슬라이더 금형기계의 개략도를 나타낸다.

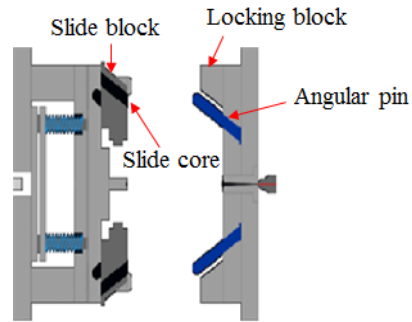


Fig. 1 Schematic of the injection molding machine



Fig. 2 Appearance of the angular pin

Fig. 2는 앵글러핀의 외관을 나타낸다.

본 연구에서는 자동차부품으로 사용되는 알루미늄부품을 성형하는 분할금형인 양쪽 슬라이더 금형기계의 현장작동 중 가이드핀 역할을 하는 앵글러핀에서 발생한 파손을 분석하였다. 파손원인을 파악하기 위하여 파손된 앵글러핀으로부터 파면관찰을 통한 분석을 실시하였다. 또한 경도분포를 알아보기 위하여 비커스경도를 측정하고 측정값의 신뢰성을 알아보기 위하여 와이블 통계 해석을 수행하였다. 그리고 앵글러핀의 파손 특성을 알아보기 위하여 V-노치 샤르피 충격시험을 수행하였고 충격흡수에너지에 대한 와이블 통계 해석을 실시하였다. 얻어진 결과로부터 앵글러핀의 설계상의 지침을 제시함으로써 금형의 유지 및 안전 운전에도 도움이 되고자 한다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 재료

Fig. 3은 본 연구에 사용된 앵글러핀의 치수를 나타낸다. 앵글러핀의 끝은 슬라이드코어 속으로 원활히 삽입할 수 있도록 라운딩 처리되었다.

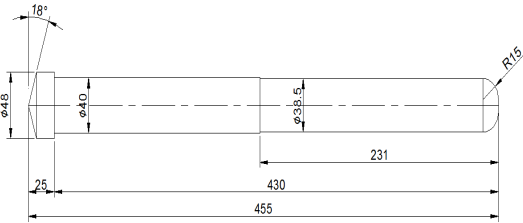


Fig. 3 Dimensions of the used angular pin (unit: mm)

Table 1 Chemical compositions(wt%) of SM45C steel(KS D 3752)

| C             | Si            | Mn            | P     | S      |
|---------------|---------------|---------------|-------|--------|
| 0.42<br>~0.48 | 0.15<br>~0.35 | 0.60<br>~0.90 | ≤0.03 | ≤0.035 |
| Cr            | Mo            | Cu            | Ni    | -      |
| ≤0.20         | 0.82<br>~1.2  | ≤0.30         | ≤0.20 | -      |

본 연구의 파손분석에 사용된 앵글러핀은 현장에서 가이드 역할 도중 1개월 사용시점에서 파손된 것을 이용하였다. 앵글러핀에 사용된 소재는 기계구조용 탄소강재 SM45C(KS D 3752)이다. Table 1에는 SM45C의 화학성분을 나타낸다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 마이크로 비커스 경도시험

파손된 앵글러핀으로부터 시료를 채취하여 마이크로 비커스 경도기(HM-124)를 이용하여 3곳(①내부, ②표면으로부터 3 mm 떨어진 곳, ③표면)에서 각각 10회씩 측정하였다. 이때 압입하중 500g, 압입시간 10 sec로 하였다.

#### 2.2.2 V-노치 샤르피 충격시험

앵글러핀의 파손 특성을 알아보기 위하여

SM45C강에 V-노치를 가공하여 샤르피 충격시험을 실시하였다.<sup>6,13)</sup>

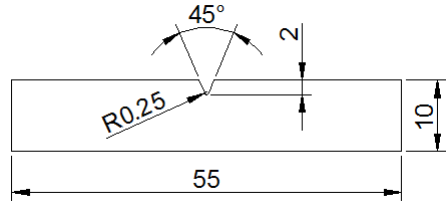


Fig. 4 Dimensions of the V-notch Charpy impact test specimen(unit: mm)

Fig. 4는 V-노치 샤르피시험편의 치수를 나타낸다. Lenton 관상로에서 아르곤가스 분위기 속에서 퀴칭과 템퍼링 열처리를 실시하였다. 퀴칭은 880℃에서 30분 유지 후 수냉한 후, 곧이어 템퍼링은 ① 595℃에서 60분 및 90분 유지 후 로냉, ② 375℃에서 60분 및 90분 유지 후 로냉을 각각 실시하였다. 로냉은 200℃ 영역에서 아르곤가스를 차단시키고 나서 약 85℃ 이하가 되는 온도 범위까지 시행하여 종료하였다. 상기 조건에 따라 각각 10개씩 총 40개의 시편을 사용하였다. 비교를 위하여 파손된 앵글러핀으로부터 제작한 4개의 V-노치 시편도 함께 시험하였다.

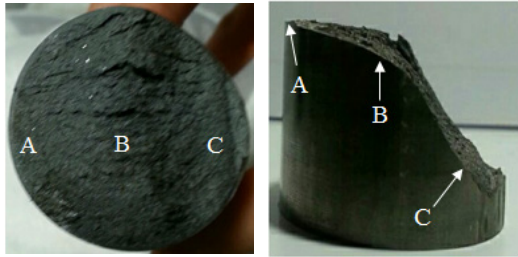
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 파면관찰

Fig. 5는 파손된 앵글러핀의 외관을 나타낸다. (a)는 파손부위의 표면을, (b)는 측면을 각각 나타낸다. 표면부 근처에서 균열이 발생하여 A→B→C의 경로를 따라 균열이 전파한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 4의 A를 확대한 것이다. SM45C로 제작된 앵글러핀은 경도향상을 위하여 QT열처리 후 고주파열처리를 한다. 고주파열처리에 의한 표면 경화층은 대략 1 mm 정도이다. 원으로 표시한 부분을 살펴보면 초기균열 발생점을 확인할 수 있다. 이는 반복되는 성형과정 속에서 앵글러핀이 가이드 역할을 하기 위해 슬라이드코어 속으로 삽입되면서 가해지는 굽힘응력과 캐비티 형성과

함께 다시 슬라이드코어를 빠져 나오면서 동일 부위에 또 다시 발생하는 굽힘응력에 의해 표면에 부하가 가해지면서 스크래치가 발생하고 그것이



(a) surface part (b) side part

Fig. 5 Macroscopic appearance of the fractured angular pin

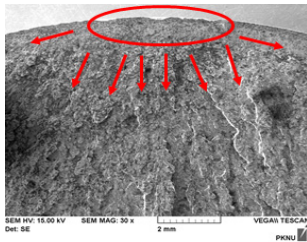
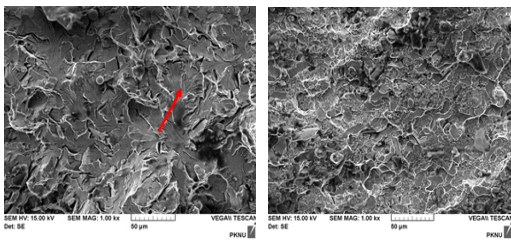
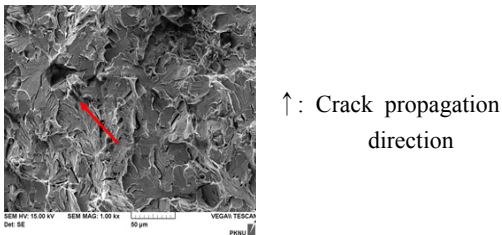


Fig. 6 Detailed in A of Fig. 5(a)  
(↑: Crack propagation direction)



(a) A region of Fig. 5 (b) B region of Fig. 5



(c) C region of Fig. 5

Fig. 7 SEM photograph on A, B and C of Fig. 5

사용시간이 경과함에 따라 균열의 파단기점이 된 것으로 판단된다. 일반적으로 앵글러핀의 파손을 방지할 목적으로 슬라이드코어와 앵글러핀 사이에는 구배각의 차이를 두고 설계한다. 본 금형장치에서는 슬라이더 구배각은 20°, 앵글러핀의 삽입각은 18°이다. 앵글러핀이 슬라이드코어 속을 들어가고 나오는 과정에서 발생하는 굽힘응력에 의한 응력집중부가 발생하면서 계단상의 스크래치가 발생하게 되고, 그 주위에서 가장 취약해진 부분이 취성파괴된 것으로 판단된다. 그림 속의 화살표는 균열의 진전방향이다. 균열이 방사모양으로 펼쳐져 있다.

Fig. 7은 파손된 앵글러핀(Fig. 5)의 파면을 관찰한 것이다. 관찰된 파면을 좀 더 상세히 살펴보면 앵글러핀이 가이드 역할을 위해 슬라이드코어 속을 들어가고 나오는 과정이 반복적이어서 파손된 부위의 파면이 피로파괴에 의한 파면을 나타낼 것으로 예상되었으나, 실제 확인한 결과는 표면부에 응력집중에 의한 초기균열이 발생한 후 최종적으로는 취성파괴가 발생한 것을 알 수 있었다. Fig. 7의 (a)와 (c)는 취성파면의 전형인 벽개파면을 볼 수 있다. 파면은 결정립계 크기 정도의 평탄한 입상의 벽개 파셋(cleavage facet)이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 벽개 파셋 위에는 단차가 생성되어져 있고 파괴는 그 단차방향으로 진행되고 있는데 균열의 진행방향(그림속의 화살표)으로 river pattern형상을 관찰할 수 있다. 이들 river pattern이 나타나는 곳이 결정입계이다.<sup>7)</sup> Fig. 7(a)와 (c)는 의벽개파괴(quasi-cleavage fracture)에 좀 더 근접한 듯이 보여진다. Fig. 7(b)는 Fig. 5(b)의 SEM 관찰사진으로서 파괴의 경로가 경사지는 부분으로서 (a)와 (c)에 비해 약간의 소성변형이 발생한 것으로 보인다. 즉 균열의 진전이 진행되면서 앵글러핀의 잔여면적이 줄어들어 최종파단면으로 굽어지면서 약간의 소성변형이 수반되고, 그로 인해 뜯겨져 나간 형태인 tear ridge<sup>7)</sup>가 나타나고 있다.

결과적으로 만약 앵글러핀에 파손이 발생할 경우 취성파괴에 의해 즉시 파단이 되지 않고 연성적으로 휘어지거나 시간적으로 파괴지연이 발생

한다면 금형에 그 파손의 영향이 미치게 되어 금형 자체가 파손 혹은 고장을 일으킬 수가 있다. 이는 고가의 금형을 못 쓰게 하여 제품제작에 차질과 더불어 전체적인 비용상승을 유발할 수 있게 된다. 따라서 설계상 앵글러핀은 취성파괴에 의해 파손되는 것이 바람직하며, 앵글러핀만을 교체하면 금형에는 별다른 영향을 미치지 않게 되기 때문에 오히려 이득이 되는 것이다.

### 3.2 마이크로 비커스경도 및 V-노치 샤르피 충격시험에 의한 충격흡수에너지

파손된 앵글러핀으로부터 시료를 채취하여 마이크로 비커스 경도기(HM-124)를 이용하여 3곳(①내부, ②표면으로부터 3 mm 떨어진 곳, ③표면)에서 마이크로 비커스경도를 각각 10회씩 측정하였다. 이때 압입하중 500 g, 압입시간 10 sec로 하였다. Fig. 8에는 각 측정위치에서 측정된 마이크로 비커스경도의 평균치를 나타낸다. 고주파열처리에 의해 표면이 경화되었기 때문에 표면에서의 경도치가 가장 크게 나타났다.

파손된 앵글러핀의 파면관찰로부터 취성파괴가 발생한 것을 알았다. 이에 상기 Fig. 4와 같은 시험편을 이용하여 QT열처리 조건을 달리하여 V-노치 샤르피 충격시험을 실시하여 앵글러핀에 대한 충격저항을 조사하였다.

Fig. 9는 열처리를 달리한 각 V-노치시험편으로부터 구한 충격흡수에너지를 나타낸다. 동 그림에는 열처리를 하지 않은 모재시험편에 대한 충격에너지 값과 파손된 앵글러핀으로부터 제작한 시험편의 충격에너지 값도 비교를 위하여 함께 나타내었다. 충격흡수에너지는 595℃에서 90분간 템퍼링을 한 시험편에서 가장 크게 나타났다. 역시 이것은 장시간의 템퍼링 처리로 인하여 인성이 향상되어 충격에너지의 흡수가 잘 된 것으로 판단된다. 이에 비해 모재의 경우에는 보다 낮은 온도에서 템퍼링한 충격흡수에너지 값과 유사하게 나타났고 이들 값은 보다 높은 온도에서의 템퍼링처리한 결과 값들보다도 낮게 나타났다. 더불어 손상된 앵글러핀으로부터 제작한 V-노치시험편으로부터 구한 충격흡수에너지는 가장 낮은 값을

나타내었다. 결과적으로 고주파열처리에 의해 표면경화된 시험편의 경우가 퀀칭 후 템퍼링처리한 시험편에 비해 인성이 떨어졌기 때문에 충격에너지 값이 낮게 나타났고, 이는 상기 파면관찰에서 증명하듯이 인성저하에 따른 취성파괴의 결과로 나타난 것이다. 단위면적당 충격에너지는 충격강도로서 시험편을 파괴하는데 필요한 에너지이다. 충격강도는 충격흡수에너지가 클수록 증가함을 보였다. 이 결과로부터 알 수 있듯이 충격흡수에너지가 충분히 커서 인성이 증가하게 되면 앵글러핀이 슬라이드코어를 통과할 때 굽힘응력에 의해 계속적인 충격을 받는 경우 앵글러핀이 파손되지 않고 휘어지는 손상이 나타나 금형기계에 무리가 가해져 금형기계 자체가 파손될 수도 있다. 따라서 앵글러핀이 슬라이드코어를 드나들 때 어떤 크기의 한계 외부충격이 가해지면 파손되는 것이 금형기계를 손상시키지 않아 오히려 손상비용의 절감을 가져오고 금형기계의 수명을 연장시키게 된다. 그러므로 앵글러핀에는 고주파열처리와 같은 표면경화처리를 통하여 표면경도를 향상시켜 일차적으로 외부충격에 장시간 견딜 수 있도록 설계해야 하고, 어떤 한계 충격강도 혹은 굽힘강도에서는 변형이 일어나지 않고 스스로 파손되어지도록 내부 인성이 너무 커지 않은 정도에서의 열처리가 필요할 것으로 사료된다. 단, 이 결과는 V-노치시험편 가공하여 여기에 직접 고주파열처리를 행하고 비교해 볼 여지가 있다.

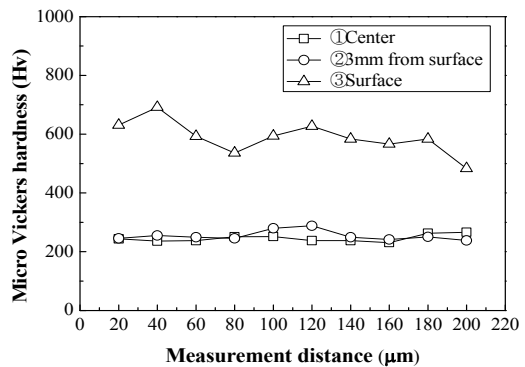


Fig. 8 Micro Vickers hardness values obtained from specimen of the angular pin

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 V-노치 샤르피 충격시험에서 얻어진 파면을 나타낸다. 취성파면율의 비율이 고온 장시간의 템퍼링시험편으로 갈수록 작

아지고 있는 것을 알 수 있다. 이는 상기에도 언급하였듯이 템퍼링에 의해 인성이 향상되어 취성 파면이 줄어든 것으로 판단된다.

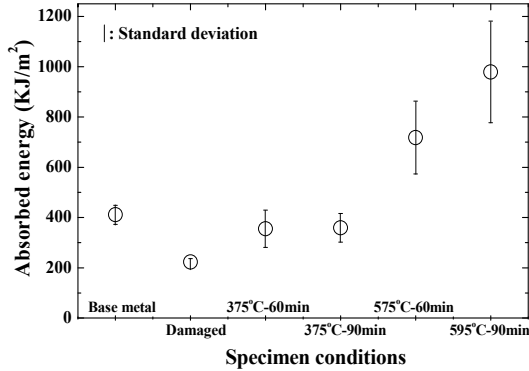


Fig. 9 Absorbed energy according to specimen condition obtained from V-notch Charpy impact test

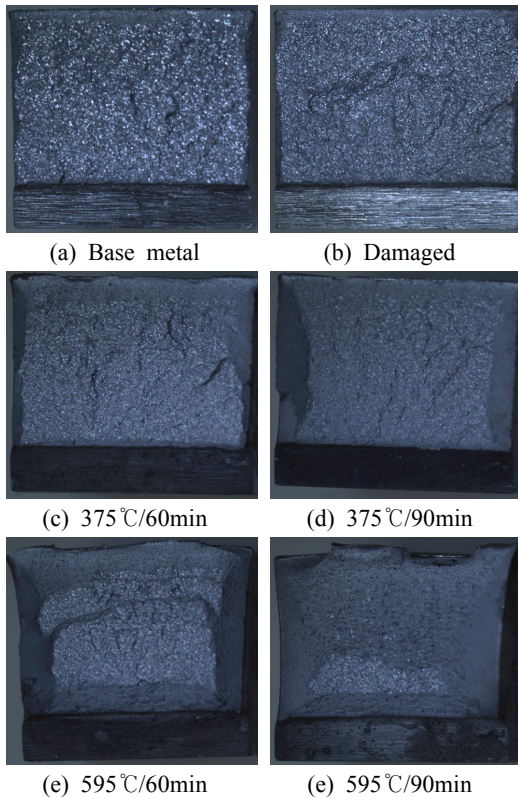


Fig. 10 Fracture surface according to specimen condition obtained from V-notch Charpy impact test

### 3.3 2-파라미터 와이블분포 통계 분석

변동하는 비커스 경도 및 다음에 나타낼 충격 흡수에너지 해석의 편의성과 최약 링크가설을 고려하여 2-파라미터 와이블 분포를 적용하여 와이블 통계 해석을 실시하고 신뢰성을 평가하였다.

Table 2는 앵글러핀 시료의 각 위치에서 측정된 마이크로 비커스경도치의 형상계수(shape parameter) 및 척도계수(scale parameter), 평균(mean), 표준편차(standard deviation), 변동계수(coefficient of variation)을 각각 정리하여 나타낸 것이다. 각 시험편의 조건에 따른 경도치의 차이로부터 2-파라미터 와이블분포(2-parameter Weibull distribution)에 따른 통계적 분석을 실시하였다.<sup>8-12)</sup>

식 (1)은 2-파라미터 와이블분포를 나타낸다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad x \geq 0 \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 는 확률변수의 변동성을 나타내는 형상계수(shape parameter)이고,  $\beta$ 는 63.2% 확률에서 특성수명을 나타내는 척도계수(scale parameter)이다. 식 (1)에 의하여 얻어진 와이블분포의 확률밀도함수를 Fig. 11에 나타낸다. 경도치의 분포는 2-파라미터 와이블분포에 잘 따랐다. 또한 Table 3은 QT열처리 후 저온 및 고온에서 각각 60분 및

Table 2 Mean, standard deviation, coefficient of variation, shape parameter and scale parameter of micro Vickers hardness values

| Measured position | (a)   | (b) | (c)   | (d)   | (e)   |
|-------------------|-------|-----|-------|-------|-------|
| ①                 | 25.29 | 250 | 245.6 | 12.01 | 0.049 |
| ②                 | 21.33 | 260 | 254.3 | 16.50 | 0.065 |
| ③                 | 11.85 | 613 | 588.9 | 56.12 | 0.095 |

Note: (a) shape parameter, (b) scale parameter, (c) mean, (d) standard deviation(SD), (e) coefficient of variation (COV); ① Center, ② 3 mm from surface, ③ surface

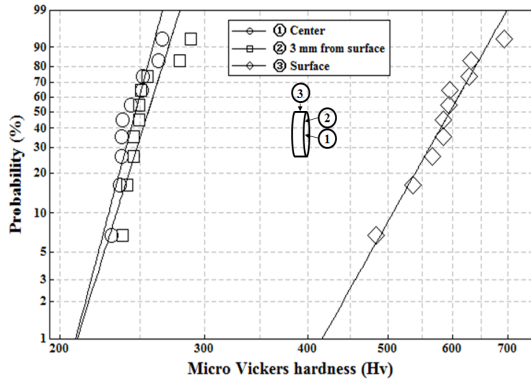


Fig. 11 2-parameter Weibull distribution of measured micro Vickers hardness values

Table 3 Mean, standard deviation, coefficient of variation, shape parameter and scale parameter for tempering conditions after quenching

| Tempering temperature | (a)   | (b)  | (c)   | (d)   | (e)   |
|-----------------------|-------|------|-------|-------|-------|
| Base metal            | 24.54 | 228  | 223.1 | 13.55 | 0.061 |
| 375°C/60min           | 5.44  | 383  | 355.3 | 73.62 | 0.207 |
| 375°C/90min           | 6.78  | 383  | 358.9 | 57.32 | 0.160 |
| 595°C/60min           | 5.24  | 778  | 718.1 | 144.9 | 0.202 |
| 595°C/90min           | 5.41  | 1054 | 976.0 | 202.1 | 0.207 |

Note: (a) shape parameter, (b) scale parameter, (c) mean, (d) standard deviation(SD), (e) coefficient of variation (COV)

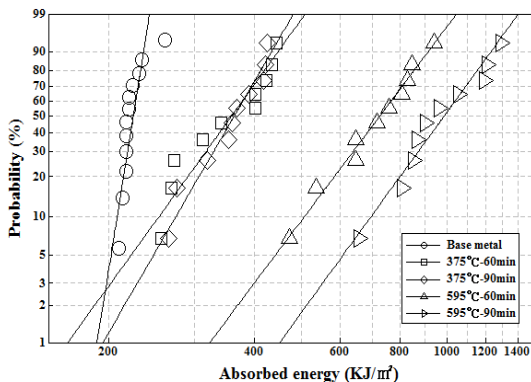


Fig. 12 2-parameter Weibull distribution of measured absorbed energy values

90분간 템퍼링하여 V-노치 샤르피시험한 충격흡수에너지의 형상계수(shape parameter) 및 척도계수(scale parameter), 평균(mean), 표준편차(standard deviation), 변동계수(coefficient of variation)을 각각 정리하여 나타낸 것이다.

SM45C강의 V-노치 샤르피 충격시험으로부터 구한 충격흡수에너지값을 식 (1)에 의해 와이블분포의 확률밀도함수를 구하여 Fig. 12에 나타낸다. 충격흡수에너지의 분포는 2-파라미터 와이블분포에 잘 따랐다.

#### 4. 결 론

자동차용 알루미늄부품을 성형하는 양쪽 슬라이더금형기계의 현장에서 작업 중 가이드핀 역할을 하는 앵글러핀에서 발생한 파손의 원인을 분석하였다.

1) 앵글러핀의 파손의 원인으로서는 앵글러핀이 삽입됨과 동시에 슬라이더코어와 앵글러핀 상호간에 굽힘응력이 지속적으로 작용하게 되어 응력을 받은 부위에 최종적으로 취성과파괴가 발생한 것을 파면 관찰로부터 확인하였다.

2) 비커스 경도치는 고주파열처리에 의해 표면이 경화되었기 때문에 표면에서의 경도치가 가장 크게 나타났다.

3) 사출금형장치의 설계 개선을 위하여 V-노치 샤르피시험을 실시하였고 결과로부터 충격흡수에너지를 비교하였다. 고온에서 긴 시간 템퍼링한 경우에 충격흡수에너지가 높게 나타나서 인성이 다소 높아진 것을 확인하였다.

4) 마이크로 비커스경도와 충격흡수에너지의 실험치를 각각 2-파라미터 와이블 통계분석을 실시한 결과 와이블 분포에 잘 따랐다.

5) 앵글러핀이 취성과파괴에 의해 파손된 것을 나타내었고, 이 결과로부터 향후 앵글러핀의 설계에 있어서 취성과파괴가 되도록 설계하는 것이 금형손상 방지 및 비용 절감을 위하여 효율적임을 제시하였다.

## References

1. H. P. Park, B. S. Cha, J. S. Tae, J. H. Choi and B. O. Rhee, 2010, "Comparative Analysis of Injection Molding Process by On-line Monitoring in Cylinder of Injection Molding Machine and in Cavity of Mold", Transactions of the KSME A, Vol. 34, No. 10, pp. 1513-1519.
2. P. Heuler, C. Berger and J. Motz, 1993, "Fatigue Behaviour of Steel Castings Containing Near-Surface Defects", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 16, Issue 1, pp. 115-136.
3. P. Baicchi, L. Collini and E. Riva, 2007, "A Methodology for the Fatigue Design of Notched Castings in Gray Cast Iron", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 74, Issue 4, pp. 539-548.
4. D. K. Je and Y. D. Jeong, 2003, "Development of the Mold for Settlement of Internal Undercut using Collapsible Cores", 2003 the KSPSE Autumn Conference, pp. 129-132.
5. D. S. Jeon, Y. J. Lee, S. M. Lee and C. K. Lee, 2008, "Injection Mold Design Manual", KiJeonyeongusa, pp. 1-150.
6. N. E. Dowling, 1999, "Mechanical Behavior of Materials, 2nd Edition", Prentice Hall, Inc., New Jersey, pp. 148-152.
7. N. E. Dowling, 1999, "Mechanical Behavior of Materials, 2nd Edition", Prentice Hall, Inc., New Jersey, pp. 1-165.
8. A. C. Cohen, 1965, "Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based on Complete and on Censored Samples", Technometrics, Vol. 7, pp. 579-588.
9. W. Weibull, 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", ASME J. Applied Mech., Vol. 18, pp. 293-297.
10. K. W. Nam, S. J. Kim and D. S. Kim, 2015, "Weibull Statistical Analysis on Mechanical Properties in ZrO<sub>2</sub> with SiC Additive", Transactions of the KSME A, Vol. 39, No. 9, pp. 901-907.
11. S. J. Kim and S. H. Ahn, 2016, "Estimation of Probability Distribution of Fatigue Lives in Crank Throw Forged Steel", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 29-35.
12. K. W. Nam, C. S. Kim and S. H. Ahn, 2016, "The effect of wear on the damage of slitting knife", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 5-11.
13. W. Lei, X. Yan and M. Yao, 1993, "Ductile/brittle Transition Condition in Charpy V-notch Impact Test in Structural Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 46, Issue 4, pp. 601-605.
14. J. R. Matthews, C. V. Hyatt, J. F. Porter and K. J. Karisallen, 1998, "Effect of Thickness on the Relationship between Shear Lip and Energy in Dynamic Tear Specimens", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 46, Issues 5-6, pp. 529-542.