http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.5.519 ISSN 2233-6036

Technical Papers

마그네슘 합금 판재를 활용한 차체 Reinforced Dash 부품 온간성형 공정 연구

박동환[a*], 탁윤학[a]

A Study on Warm Forming Technology of Car Body Reinforced Dash Using Magnesium Alloy Sheet

Dong Hwan Park[a*], Yun Hak Tak[a]

[a] Gyeongbuk Hybrid Technology Institute, 24-24, Goeyeon 1-gil, Yeongcheon-si, Gyeongsangbuk-do, 770-170, Korea

ARTICLE INFO

Article history:
Received 3 June 2014
Revised 28 July 2014
Accepted 26 August 2014

Keywords:
Car body
Forming technology
AZ31B
Magnesium alloy
Sheet forming
Warm forming

ABSTRACT

The use of light weight magnesium alloy offers significant potential towards improvement of the automotive fuel efficiency. However, the application of formed magnesium alloy components in auto-body structures is restricted due to the low formability at room temperature and lack of knowledge for processing magnesium alloys at elevated temperatures. In this study, a warm tensile test of magnesium alloys was performed to measure tensile strength and elongation. An improvement in formability was confirmed at increased temperatures above about 250°C. Car body warm forming technology was conducted for forming forming reinforced dash components of the magnesium alloy AZ31B sheet at elevated temperatures.

1. 서 론

최근 세계적인 유가의 급등과 함께 대체에너지의 개발이 활발히 추진되고 있으며, 세계 각국이 환경오염을 억제하기 위해 선진국을 중심으로 자동차 배기가스 규제강화와 연비향상을 더욱 강화하고 있다. 자동차 업계는 연비향상을 위해 엔진·구동계의 효율향상과 주행저항 감소, 경량화 기술에 대한 중요성이 증가되고 있지만 승객 충돌보호 장치와 편의장치 증가로 자동차 중량은 지속적으로 상승하고 있어 높은 연비와 에너지 효율 향상, 자동차 차체 경량화 기술이 요구된다[1].

차체 경량화 방안으로 경량 소재를 활용하고 있으며, 마그네슘 합금과 알루미늄 합금, 초고장력강, 플라스틱, 섬유강화 플라스틱 등을 적용한 차체기술이 미래 경량차체 기술로 부각되고 있다. 다양한 경량 소재의 차체 혼용은 차체 경량화를 구현할 뿐만 아니라 차체 주요 부품별로 충돌, 강성 등 요구 성능에 대응하는 적합한 기계적 성질의 소재들을 배치하여 최적화된 차체 성능을 얻을 수 있다.

차체 경량 소재 중에 마그네슘 합금 비중은 1.7로 철강 소재 비중 7.8, 알루미늄 비중 2.7 보다 낮은 밀도를 나타내고 있다. 마그네슘 합금은 알루미늄 합금에 비해 치수 안정성과 진동 흡수에 우수한 특징을 가지고 있으며, 재활용이 100% 가능하다. 또한 마그네슘 합금은 상온에서 연신율이 매우 낮아 주로 온간에서 성형이 이루어지고 있으며, 온도가 높아짐에 따라 연신율이 증가되고 성형성이 높다. 온간성형은 일정 온도로 가열된 금형에 판재를 장착하여 예

* Corresponding author. Tel.: +82-54-330-8020
Fax: +82-54-330-8029
E-mail address: pdh@ghi.re.kr (Dong Hwan Park).

Fig. 1 Car body reinforced dash

열 후 원하는 형태로 성형하는 공법이며, 냉간 성형 공법에 비해 금형수가 적고 복잡한 형상의 부품도 한번에 성형이 가능한 장점을 지니고 있다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 자동차 차체 부품을 마그네슘 합금 판재를 적용하여 온간성형 후 고부가가치의 마그네슘 차체 제조공정을 확보하고자 한다. 이에 따라 마그네슘 미세조직에 따른 기계적 특성과 온간 성형 한계도(FLD)를 통한 성형 해석을 수행하여 마그네슘 판재를 적용한 Reinforced Dash 부품의 온간 금형과 시제품을 제작하고자 하였다.

2. 소재 물성 시험

2.1 상온 인장 시험

현재 SPRC340 소재(두께 1 mm)는 자동차 Reinforced Dash 제품에 적용되고 있으며, 마그네슘 합금 판재의 적정성과 기본 물성치를 확인하기 위해 상온 인장 시험을 실시하였다. AZ31B (1 mm) 소재는 ASTM E8M 규격으로 시편을 제작하였고, SRPC340과 AZ31B (2 mm) 소재는 KS 0801 13B호 규격으로 시편을 제작하였다. 상온 인장 시험은 유압식 피로재료시험기를 활용하여 판재 압연 방향에 대해 0도, 45도, 90도의 시편을 제작하여 실험하였다. 소재의 항복강도와 인장강도, 연신율 평균값은 Table 1에 나타내었다[2].

마그네슘 합금 판재 성형을 위해 가장 중요한 사항은 연신율로서 마그네슘 합금에 대한 상온 연신율을 확인한 결과 SPRC340에 비해 연신율이 매우 낮음을 보여주고 있다. Fig. 2는 인장시험 후 시편을 보여주고 있다.

2.2 고온 인장 시험

Reinforced Dash 차체 부품의 온간 성형을 위해 AZ31B 온도별 고온인장시험을 실시하였다. 고온인장시험은 100°C, 200°C, 250°C, 300°C의 온도로 진행되었고 재료 방향별(0도, 45도, 90도)로 3회 실험하였다. 시험속도는 2 mm/min로 하였으며, 시험편에 써모커플(thermocouple)을 장착한 후 온도를 제어하도록 하였

Table 1 Results of tensile test at room temperature

Material (Thicknees)	Rolling Direction	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]
SPRC340 (1 mm)	0°	285	367	38
	45°	316	403	36
	90°	299	392	39
AZ31B (1 mm)	0°	189	272	25
	45°	197	271	23
	90°	205	273	19
AZ31B (2 mm)	0°	195	276	17

Fig. 2 Tensil test specimens

고, 시험은 지정온도 도달 후 10분간 유지하여 실시하였다[6,7].

100°C에서 고온인장시험 결과 평균항복강도 153 MPa, 평균최대인장강도 200 MPa, 평균연신율 60%로 나타났으며, 200°C일 때 평균항복강도 78 MPa, 평균최대인장강도 92 MPa, 평균연신율 80%로 나타났다. 250°C의 경우 평균항복강도 56 MPa, 평균최대인장강도 61 MPa, 평균연신율 83%, 300°C일 때 평균항복강도 38 MPa, 평균최대인장강도 40 MPa, 평균연신율 135%로 나타났다.

Table 2는 재료의 압연 방향별 고온인장시험 결과를 나타내고 있으며, 온도별 고온인장시험 전·후 사진을 Fig. 3에 보여주고 있다. 마그네슘 합금 소재의 고온인장시험에서 이방성이 미미한 것으로 나타났고, 시험 온도 250~300°C는 마그네슘 소재 용융점(650°C)에서 중간 온도로 소재가 연화되어 연신율이 증가되며 인장강도는 낮아짐을 확인할 수 있었다.

2.3 돔 장출 시험

돔 장출 시험은 Reinforced Dash 생산 방법과 유사한 시험으로 Fig. 4와 같이 시편을 200×65, 90, 115, 140, 163, 166, 135, 200, 200(윤활)로 3 Set를 제작한 후 '□'모양으로 전해마킹을 하였고, 270°C의 온도에서 실험하였다[8].

돔 장출시험은 고온에서 크기별로 성형시험이 진행되었고, 블랭크 홀더와 펀치의 압력은 각각 6.8 kN, 14.6 kN을 적용하

Table 2 Results of warm tensile test (thickness: 1.0 mm)

Temp.	Rolling Direction	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]
100°C	0°	152	201	58
	45°	150	199	56
	90°	158	201	68
200°C	0°	78	91	82
	45°	78	91	86
	90°	80	94	72
250°C	0°	56	61	83
	45°	54	62	84
	90°	58	61	83
300°C	0°	38	40	136
	45°	38	40	138
	90°	38	39	132

Fig. 3 Specimens of hot tensile test

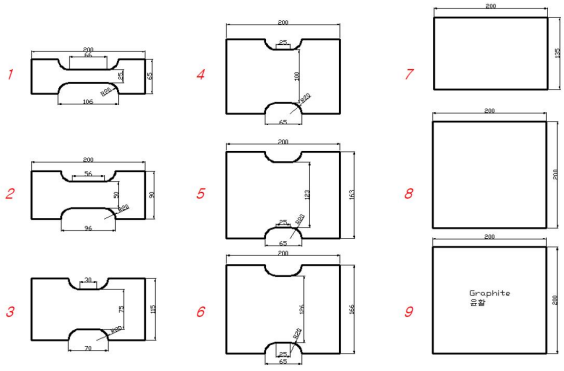


Fig. 4 Forming test specimens

여 파단 되기까지 펀치를 가동하였다. 시험 후 시편을 채취하여 GPA (Grid Pattern Analyzer) 소프트웨어를 활용하여 성형한계도(FLD)를 측정하였다. Fig. 5의 경우 시편 파단부 주위에 5~8개를 측정하였고, 측정된 좌표 중 밀집된 구간을 선정하여 그래프로 확인 할 수 있었다. X점은 Crack 구간이며, O점은 Safety 구간이다. Safety 구간의 주변형률은 0.4~0.6이며, 부변형률은 -0.2~0.3의 측정값을 얻었으며 Fig. 6은 돔 장출 시험 후 시편을 보여주고 있다. 또한 성형 후 한계 돔 높이(LDH; Limit Dome Height)를 측정한 결과 무윤활의 경우 38 mm로

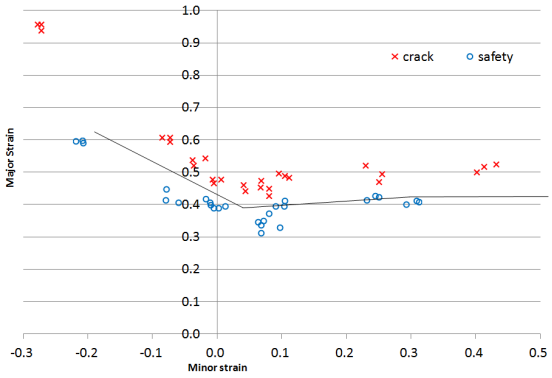


Fig. 5 Forming limit diagram

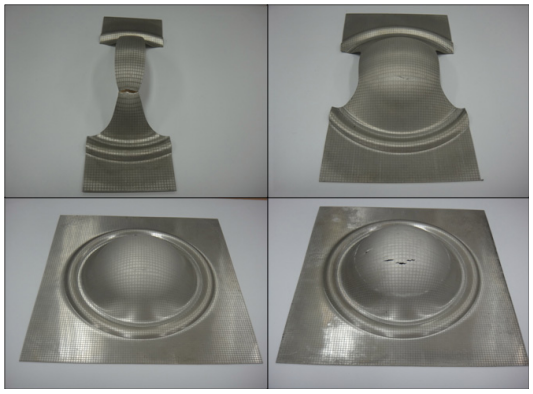


Fig. 6 Specimens after forming test

측정되었고, 그라파이트(graphite) 윤활을 적용했을 때 40 mm로 나타났다[3-5].

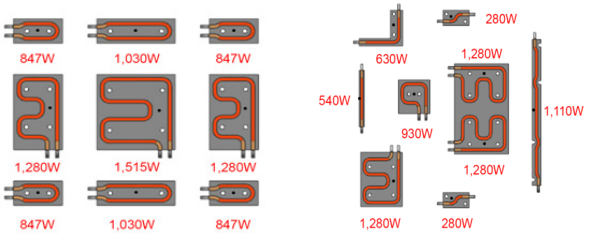
3. 열 해석 및 성형 해석

3.1 열 해석

Reinforced Dash 온간 금형을 제작하기 전에 제품 형상과 곡면, 제품 높이 등을 고려한 후 히터를 설계하였다. 상형은 9개의 판 히터(plate heater)를 배치하였고, 하형은 8개의 판 히터를 배치하여 Reinforced Dash 열 해석을 수행하였다. 금형 구조에 따른 각각의 판 히터 열량 값과 대류조건 5 W/m^{2}k, 주변공기온도 25°C, 최적화온도 260~280°C를 입력하였다.

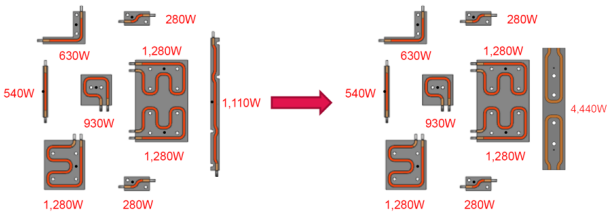
Fig. 7은 상형과 하형에 판 히터 배치 구조와 히터 열량을 나타내고 있으며, Fig. 8은 열 분포가 낮은 구간을 확인하여 하형의 판 히터 크기와 열량을 1,110 W에서 4,440 W로 변경하였다.

Reinforced Dash 온도분포를 알기 위하여 36개 구간으로 나누어 각 위치별 금형온도 분포를 Fig. 9와 Fig. 10에 보여주고 있으며, 최고 절점온도, 최저 절점온도, 온도편차는 Table 3에 보여준다. 상형 성형부 온도분포 결과 최고 절점온도 279.1°C, 최저 절점온도 267.0°C로 나타나고, 하형 성형부 최고 절점온도는 276.4°C, 최저 절점온도 263.2°C로 나타났다. 하형의 일부 온도가 낮아짐에



(a) Upper mold heater (b) Lower mold heater

Fig. 7 Upper mold heater & lower mold heater



(a) Lower mold heater (b) Exchanged lower mold heater

Fig. 8 Lower mold heater change

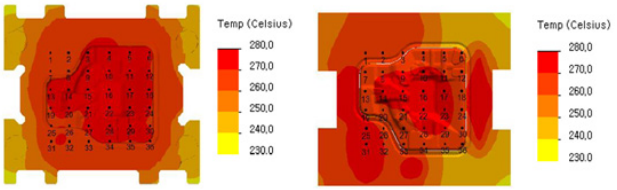


Fig. 9 Temperature distribution of upper mold

Table 3 Temperature difference

Part	Max. Temp	Min. Temp	Temp. difference
Upper mold	279.1	267.0	12.1
Lower mold	276.4	263.2	13.2
Exchanged lower mold	281.6	262.1	19.5

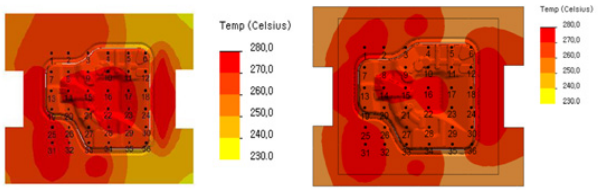


Fig. 10 Temperature distribution of lower mold

따라 열량이 높은 판 히터를 교체하였다. 교체 후 하형 최고 절점온도는 281.6°C, 최저 절점온도 262.1°C로 분석되었다. 상형과 하형 온도는 260~280°C 정도의 균일한 온도로 나타났고, 상온 25°C에서 최적화 온도까지의 승온 시간은 상형 2시간 19분, 하형 2시간 33분으로 예상되었다. Fig. 10과 같이 하형의 판 히터 교체에 따른 승온 시간은 2시간 30분으로 예상되며, 판 히터 형상 및 열용량 변경으로 온도분포는 좋아지나 목표온도까지 승온 시간 절감은 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

Table 4 Material properties of AZ31B (thickness: 1 mm)

Temp.	Rolling Direction	Yield Strength [MPa]	R-Value
Room temperature	0°	189	1.584
	45°	197	2.167
	90°	205	2.271
250°C	0°	56	1.399
	45°	54	1.376
	90°	58	1.322

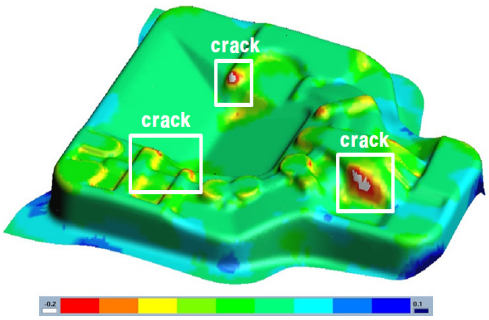


Fig. 11 Forming simulation at room temperature

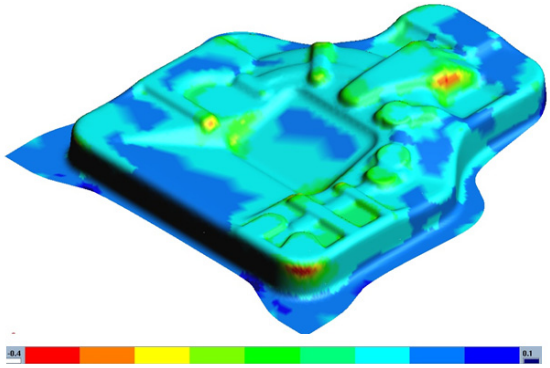


Fig. 12 Forming simulation of 250°C

3.2 성형해석

Reinforced Dash 온간 금형을 제작하기 위하여 Auto-Form을 활용하여 성형해석을 수행하였으며, 재질은 AZ31B (두께 1 mm)로 금형 온도를 상온과 250°C에서 성형해석을 수행하였다. Table 4는 AZ31B (1 mm)에 대한 소재물성이며, 항복강도와 R-Value, 성형한계선도 값을 적용하여 상온 성형과 250°C 온간 성형해석을 진행하였다.

Fig. 11는 상온에서의 성형해석 결과를 나타내고 있으며 성형 후 모서리 엣지부에 Crack과 Neck가 발생될 것으로 예상된다. Fig. 12는 금형 내부 온도 250°C에 대한 성형해석을 수행하였고, 상온 성형해석에 비해 Crack 발생 구간이 없는 것으로 나타났으며, 모서리 부분과 엣지 부분은 성형 한계에 가까운 것으로 나타나 미세하게 균열이 발생될 것으로 예상된다.

4. 온간 금형 실험

4.1 Reinforced Dash 온간 금형 제작

Reinforced Dash 온간 금형 제작은 Fig. 13과 같이 가로 970 mm, 세로 780 mm, 높이 350 mm로 설계하고, 금형에 판 히터(plate heater)를 상형 9개, 하형 8개 설치하였다. 금형 전체를 가열하기 위해 판 히터를 설치하였으며 상형과 하형에 균일한 온도분포를 얻을 수 있도록 설계하였다. 그러나 제품 형상 문제로 인해 금형 내부 간섭을 피하여 설계하고, 판 히터를 제품 표면과 너무 가깝게 설치할 경우 성형 시 프레스 압력으로 인해 금형 내구성 문제가 예상되어 이를 고려하여 설계·제작하였다.

금형 내부 온도가 외부로 방출 될 것으로 예상되어 단열재(HT250)를 Fig. 14와 같이 상·하형 외부에 삽입하도록 설계하였다. HT250 단열재는 최대 단열 온도 400°C와 유지사용온도 250°C, 열전도도 0.23 W/mk까지 단열이 가능하여 Reinforced Dash 온간 금형의 온도 방출 차단에 활용하였다. Fig. 15는 Reinforced Dash 금형 설계 후 가공, 조립, 판 히터 제작을 마친 후 최종 온간 금형을 보여준다.

4.2 Reinforced Dash 온간 성형 결과

Reinforced Dash 금형조립 후 금형 트라이아웃을 진행하였다. 프레스는 1,000톤 기계식 프레스를 사용하였고, 프레스 속도는 12 SPM (stroke per minute), 다이쿠션 에어 0.9~1 kg/mm^{2}로 설정하였다. 사용된 피가공 소재는 폭 500 mm, 길이 500 mm, 두께 1 mm와 폭 500 mm, 길이 500 mm, 두께 2 mm 2종류의 블랭크를 사용하였다. 금형 내 판 히터를 삽입하여 금형온도를 270°C로 설정하였고, 상온에서 목표온도까지 도달시간은 약 2시간 30분이 소요되었다. Fig. 16은 Reinforced Dash 금형의 1차 트라이아웃 결과를 보여준다. 제품 터짐 발생 원인으로 금형 내부 온도의 불균일과 AZ31B 소재 열전달 부족 등으로 판단된다. Fig. 17은 열화상카메라로 측정된 값을 보여주고 있으며 220~250°C로 측정되었다. Fig. 18은 피가공 소재를 1분 30초간 예열한 후 성형된 Reinforced Dash(두께 1 mm)의 최종 제품을 보여주고 있다. Reinforced Dash(두께 1 mm)의 최종 제품을 통해 기계식 프레스를 활용한 마그네슘 합금 판재 성형 가능성을 확인 할 수 있었다.

금형 내부 온도의 외부 방출을 차단하기 위해 세라믹 단열재를 상형과 하형에 삽입하였다. Fig. 19는 피가공 소재 성형 후 Reinforced Dash(두께 2 mm) 최종 제품을 보여주고 있으며, 기존 스틸 소재의 Reinforced Dash 제품과 동일한 형상으로 최종 제품을 얻을 수 있었다.

4.3 성형정밀도 측정

마그네슘 합금 소재(AZ31B)를 활용하여 냉간 성형 대비 온간 성형 후 생산된 제품 형상 정밀도를 측정하였다. Fig. 20과 같이

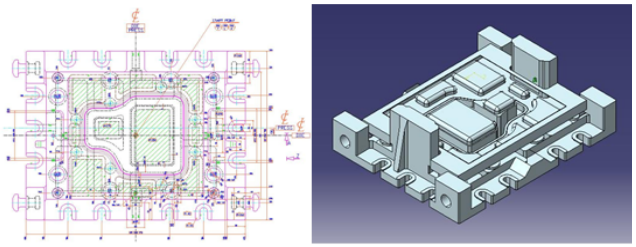


Fig. 13 Reinforced dash modeling

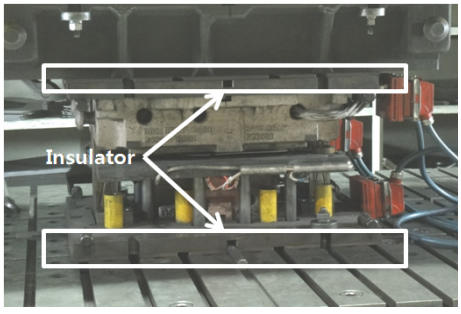


Fig. 14 Insulator of reinforced dash mold

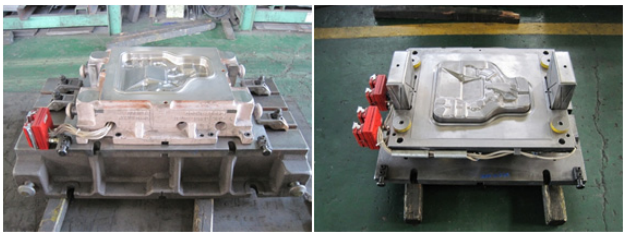


Fig. 15 Assembly mold of reinforced dash

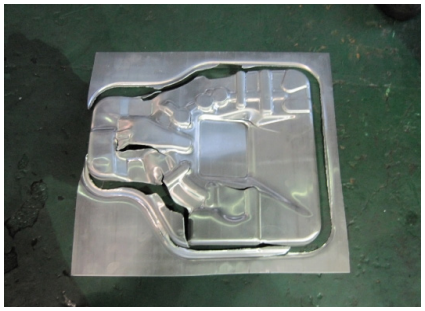


Fig. 16 Teared product of reinforced dash (thickness: 1 mm)

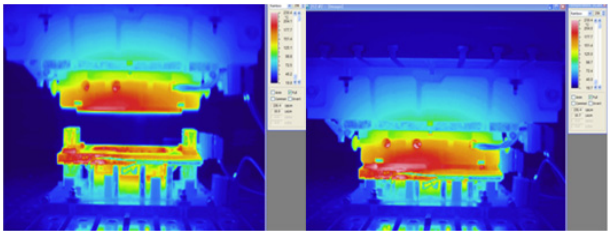


Fig. 17 Image measurement of thermal-graphic camara

Fig. 18 Drawing product of reinforced dash (thickness: 1 mm)

Fig. 19 Reinforced dash product (thickness: 2 mm)

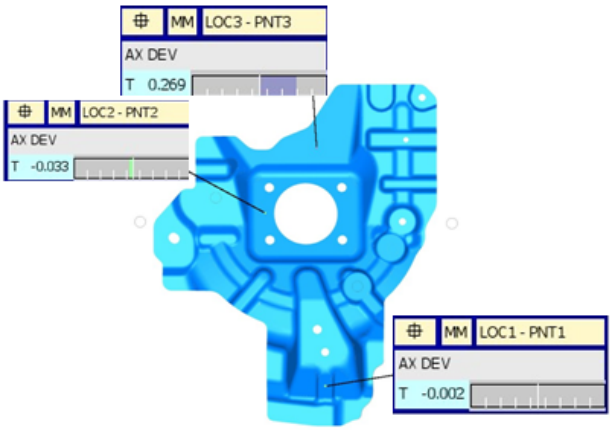


Fig. 20 Measurement of reinforced dash product

Reinforced Dash 제품에 3개 포인트를 선정하여 스테레오 스캐닝 치수측정기를 사용하여 측정하였다. 3개 제품에 대한 평균 측정값으로 첫 번째 포인트는 -0.003 mm, 두 번째 포인트 0.119 mm, 세 번째 포인트 0.136 mm의 결과값을 얻을 수 있었다. 측정된 값은 Reinforced Dash 제품 도면 기준으로 ±0.5 mm 이내로 측정되어 우수한 성형 정밀도를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 마그네슘 합금 판재(AZ31B)를 활용하여 자동차 경량 차체 Reinforced Dash부품을 얻기 위하여 온간금형을 제작하였으며, 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 마그네슘 합금(AZ31B)에 대한 100°C, 200°C, 250°C, 300°C의 온도별 인장강도와 연신율을 확인할 수 있었다. 또한 FLD 성형성 시험으로 Safety 구간의 주변형률 0.4~0.6과 부변형률 -0.2~0.3의 결과 값을 얻을 수 있었다.

(2) Reinforced Dash 금형의 열 해석을 통하여 온간 금형의 상형 최고 절점 온도는 279.1°C, 하형 최고 절점온도는 276.4°C로 확인되었다. 그리고 하형 금형에 판 히터가 교체됨에 따라 281.6°C로 확인되었다. 성형해석을 통하여 금형 내부온도(상온, 250°C)에 따른 제품 성형 가능성을 확인하였다.

(3) AZ31B에 대한 Reinforced Dash 금형의 온간 성형을 통해 금형 및 소재온도 250~270°C에서 Reinforced Dash 부품에 대한 성형 가능성을 확인하였다.

References

[1] Lee, M. C., Oh, J. H., Oh, S. Y., Moon, M. S., Kim, E. S., Yang, S. M., Kang, S. J., 2013, A Study on Optimal Manufacturing Design of Mg Armrest Frame, Proceedings of the KSMTE Spring Conference 108.

[2] Lee, M. G., Kim, H. J., 2011, Experimental and Analytical Evaluation of Forming Characteristics for AZ31B Magnesium Alloy Sheet, Journal of the KSTP 20:2 146-153.

[3] Hor, K. W., Su, C. M., Kim, J. H., Kim, H. M., Do, R. M., 2012, Study about optimal temperature conditions analysis and fatigue life according to temperature for hot forming of AZ31 magnesium alloy, Proceedings of the KSMTE Spring Conference 214.

[4] Kim, S. H., Park, K. D., Jang, J. H., Kim, K. T., Lee, H. W., Lee, G. A., Lee, K. P., Lee, Y. S., 2008, Experimental and Analytical Researches on Mechanical Properties Related to Formability of AZ31B Alloy Sheet, Proceedings of the KSTP Spring Conference 366-369.

[5] Lee, M. H., Kim, H. G., 2008, Evaluation of the Formability of Warm Forming Simulation of Magnesium Alloy Sheet Using FLD, Journal of the KSTP 17:7 501-506.

[6] Lee, W. R., Kim, H. K., Kim, J. D., Han, B. K., 2005, A Study on the Mg sheet formability for the warm press forming, Proceedings of the KSME Spring Conference 1442-1447.

[7] Oh, S. W., Choo, D. K., Lee, J. H., Kang, C. G., 2005, Estimation of Mechanical Properties of Mg Alloy at High Temperature by Tension and Compression Test, Proceedings of the KSTP Spring Conference 69-72.

[8] Kim, H. Y., Choi, S. C., Lee, H. S., Kim, H. J., Lee, K. T., 2007, Experiments for Forming Limit Diagram and Springback Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy Sheet at Elevated Temperature, ournal of the KSTP 16:5, 364-369.