

# 하이브리드 센터필러 제조 시 열처리 이력이 7075 알루미늄 합금 판재의 인장강도에 미치는 영향

유동훈<sup>1,2</sup> · 김지훈<sup>2</sup> · 박상언<sup>3</sup> · 장홍규<sup>4</sup> · 김대용<sup>#</sup>

## Effect of Heat Treatment History in Fabrication of Hybrid Center Pillar on Tensile Strength of 7075 Aluminum Alloy Sheet

D. Yoo, J. H. Kim, S. Park, H. -K. Jang, D. Kim

(Received February 1, 2021 / Revised March 30, 2021 / Accepted March 30, 2021)

### Abstract

As part of efforts to reduce the weight of automotive body-in-white, a hybrid center pillar with high strength 7075 aluminum alloy (AA7075) sheet and carbon fiber reinforced plastic (CFRP) has been recently studied. In the fabrication of the AA7075-CFRP hybrid center pillar, the AA7075 sheet might go through heating-forming-in-die quenching (HFQ), artificial aging, hybridizing, and then paint baking processes. In this study, we investigate the effects of the heat treatment history associated with each process on the tensile strength of the AA7075 sheet. Typical heat treatment conditions are HFQ for 20 minutes at 480°C and then cooling down with die, artificial aging of T6 temper for 24 hours at 120°C, hybridizing for 10 minutes at 150°C, and paint baking for 20 minutes at 180°C. The tensile strength of the AA7075 sheet is continuously increased by a series of heat treatments of hybridizing and paint baking and is expected to have yield stress above 500MPa without artificial aging of T6 temper.

**Keywords :** 7075 Aluminum Alloy Sheet, AA7075-CFRP Hybrid Center Pillar, Heat Treatment History, Hybridizing

## 1. 서 론

자동차 차량 경량화와 충돌 안전성 향상을 위하여 금속과 탄소섬유 강화 복합재료(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)를 하이브리드화하여 차체 부품을 제조하는 연구가 다각도로 진행되고 있다[1,2]. 최근 자동차 완성체 업체 BMW 사는 자사의 7 시리즈에 고강도 강(advanced high strength steel, AHSS)판과 CFRP를 하이브리드화 한 센터필러(center pillar) 부품을 개발 적용하여 각광을 받았다(Fig. 1). 고강도

강-CFRP 하이브리드 센터필러는 고강도 강판의 센터필러 외관 부품에 CFRP를 보강재로 접합하여 제조된다. 이때, 접착필름과 함께 적층된 CFRP 프리프레그(prepreg)를 예비 성형한 후 센터필러 외관 부품이 삽입된 금형으로 이송하게 되는데, 이후 CFRP를 습식압축몰딩(wet compression molding) 공정을 통하여 센터필러 외관 부품과 일체화 성형·접합함으로써 하이브리드화 된다.

최근에는 차량 경량화를 극대화하기 위하여 고강도 강판 대신에 고강도 7xxx 계(Al-Zn-Mg-Cu 계) 알루미늄 합금(AA7xxx) 판재를 센터필러 외관으로 사용하고 이를 CFRP 보강재와 하이브리드화 하는 알루미늄-CFRP 하이브리드 센터필러 부품 개발 연구가 진행 중이다. AA7xxx 판재는 상온에서 성형성이 낮아 부품의 성형을 위하여 W 열처리 성형[4,5],

1. 한국재료연구원 스마트재료공정연구실, 연구원  
2. 부산대학교 기계공학부, 박사과정, 교수  
3. 성우하이텍 기술연구소, 책임연구원  
4. 한국재료연구원 복합재료구조연구실, 책임연구원  
# Corresponding Author: Department of Materials Processing, Korea Institute of Materials Science, E-mail: daeyong@kims.re.kr, ORCID ID: 0000-0002-0786-718X

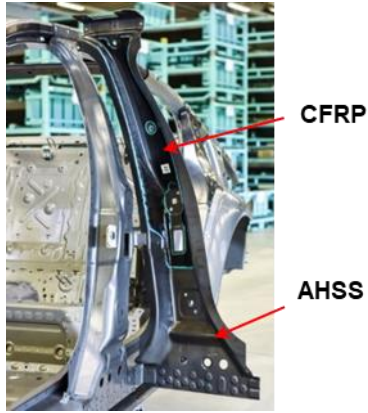


Fig. 1 AHSS-CFRP hybrid center pillar in BMW [3]

온간 성형[6], 초소성 성형 공정[7,8] 등의 연구가 진행 중이며 센터필러와 같은 복잡한 형상의 대면적 자동차 부품을 성형하기 위해서 핫스탬핑 공정에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. AA7xxx 판재의 핫스탬핑 공정은 HFQ (Heating-Forming-in-die Quenching) 공정[9, 10]을 의미하며 통상적으로 핫스탬핑 공정을 의미하는 고강도 보론 강관의 프레스 경화(press hardening) 공정과 기구적으로 유사하다. 용체화 온도 이상에서 가열된 AA7xxx 판재를 프레스에 이송한 후 스탬핑과 동시에 급형 냉각하여 부품을 성형한다. 이후 부품의 강도 향상을 위하여 별도의 인공시효 열처리 공정을 동반하게 된다. 핫스탬핑 공정을 통하여 제조된 알루미늄 외판 부품을 사용하는 것 이외에 알루미늄과 CFRP 를 하이브리드화 하는 공정은 고강도강-CFRP 의 하이브리드화 공정과 동일하다(Fig. 2). 고강도 강관은 하이브리드

화 공정, 그리고 이후 전착도장(Paint baking, PB) 공정에서 가해지는 일련의 온도 변화에도 물성의 변화가 미미하다. 그러나 AA7xxx 판재는 용체화 열처리(solution heat treatment, SHT) 이후 가해지는 온도 변화 이력에 따라 시효 효과가 달라지게 마련이며, 인공시효 열처리를 동반할 경우 이에 대한 영향 또한 고려해야 한다. 따라서 알루미늄-CFRP 하이브리드 부품 개발에 있어서 열처리 이력에 따른 AA7xxx 판재의 물성 변화 효과를 분석하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 AA7xxx 판재를 이용한 알루미늄-CFRP 하이브리드 부품 제조에서 AA7xxx 판재가 겪게 되는 열처리 이력을 상정하여, 열처리 이력이 AA7xxx 판재의 기계적 물성에 미치는 영향을 평가하였다. 아울러 AA7xxx 판재 적용 단일 부품 제조에서 열처리 이력 따른 AA7xxx 판재의 기계적 물성 변화를 함께 평가하여 비교하였다. 기계적 물성 변화는 주로 인장강도의 변화를 중심으로 논하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 재료

본 연구에서는 AMAG 사의 2.5 mm 두께의 EN AW 7075 TopForm UHS 알루미늄 합금(AA7075)판재를 사용하였다[11]. AA7075 판재의 주 성분은 Al-Zn-5.5Mg-Cu 이며, T76 열처리 상태로 제공받은 AA7075 판재의 상온 기계적 특성은 Table 1 과 같다. 여기서  $E$ ,  $\sigma_{YS}$ ,  $\sigma_{TS}$ ,  $\epsilon_u$ ,  $\epsilon_t$  는 각각 탄성계수, 항복응력, 인장강도, 균일 연신율, 전 연신율을 나타낸다.

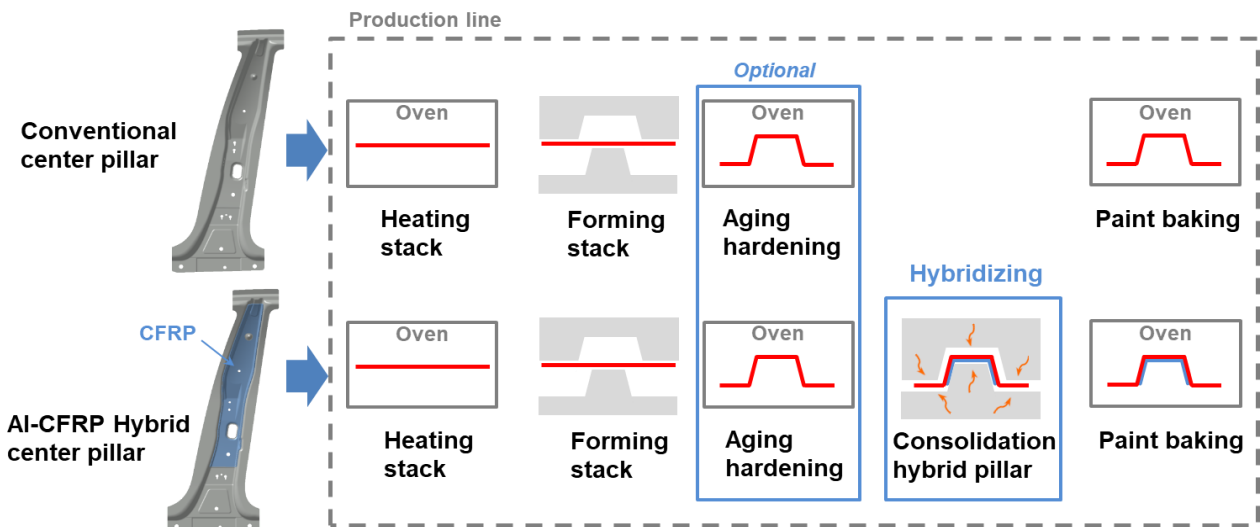


Fig. 2 Schematic production process line of center pillar for conventional and hybridizing

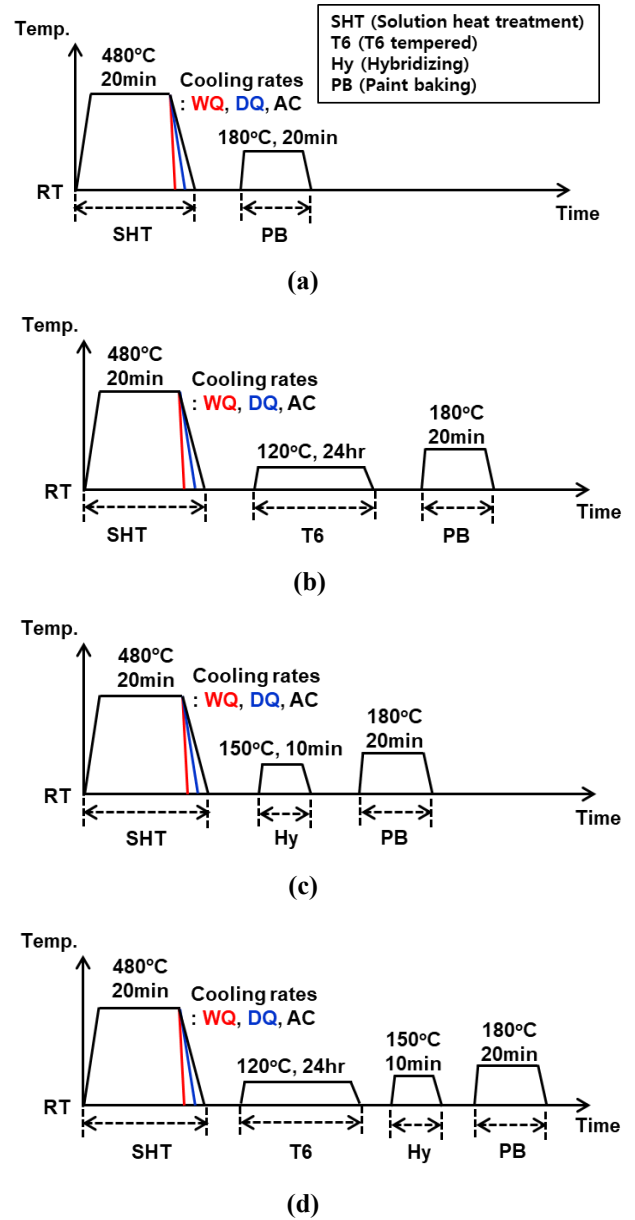
**Table 1 Mechanical properties of as-received AA7075 sheet in peak age temper T76**

$E$ (GPa)	$\sigma_{YS}$ (MPa)	$\sigma_{TS}$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)	$\epsilon_t$ (%)
72.9	396.4	481.5	8.83	13.10

### 2.2 열처리 시나리오

AA7075 판재 적용 핫스탬핑 공정에서는 판재를 480°C에서 20분간 용체화 열처리한 후 대기 중 이송하고 금형에서 성형과 동시에 금형 냉각하여 부품 형상을 제조한다. 일반적으로 AA7075 판재는 120°C에서 24시간 유지하는 T6 인공시효 열처리를 통하여 500 MPa 이상의 인장강도를 확보하게 되는데, T6 인공시효 열처리 공정을 삭제하고 이를 전착도장 공정을 통하여 시효 효과를 대체하고자 하는 노력 또한 진행되고 있다[10]. 실제 전착도장 공정에서는 복잡한 열처리 이력을 갖게 되나 통상 180°C에서 20분 유지 조건을 전착도장 공정을 대표하는 열처리 조건으로 정의한다. AA7075-CFRP 하이브리드 부품 제조 시에는 알루미늄과 CFRP를 하이브리드화 하기 위한 일체화 접합 공정이 포함된다. 하이브리드 공정은 150°C로 가열된 금형에 알루미늄 센터필러 부품을 5분 유지 후 기성형된 CFRP 프리프레그 부품에 접착제를 도포하여 알루미늄 센터필러 부품에 위치시킨 뒤 3분동안 가압하여 접착제를 경화시킨다. 하이브리드 공정에서 알루미늄 합금 판재는 10분 이내 유지 조건을 갖게 되므로 150°C에서 10분으로 선정하였다.

본 연구에서는 AA7075 판재 단일 부품과 AA7075-CFRP 하이브리드 부품 제조 시 AA7075 판재가 겪게 되는 열처리 이력을 상정하여 Fig. 3에 도시한 것과 같이 4가지의 열처리 이력 시나리오를 고려하였다. AA7075 판재 단일 부품에 대해서는 용체화 열처리, 전착도장 공정 조건의 열처리를 수행할 경우 (SHT-PB)와 용체화 열처리, T6 인공시효 열처리, 전착도장 공정 조건의 열처리를 수행할 경우(SHT-T6-PB)를, AA7075-CFRP 하이브리드 부품에 대해서는 용체화 열처리, 하이브리드화 공정 조건의 열처리, 전착도장 공정 조건의 열처리 수행하였을 경우(SHT-Hy-PB)와 용체화 열처리, T6 인공시효 열처리, 하이브리드화 공정 조건의 열처리, 전착도장 공정 조건의 열처리를 수행할 경우(SHT-T6-Hy-PB)를 고려하였



**Fig. 3 Heat treatment scenarios: (a) without T6 and (b) with T6 for AA7075 mono part; (c) without T6 and (d) with T6 for AA7075-CFRP hybrid part**

다. AA7075 판재의 핫스탬핑 공정에서는 용체화 열처리 후 금형에 의해서 냉각이 주로 이루어지나, 금형으로 이송 및 안착 중에 일부 대기 중에서 냉각이 이루어질 뿐만 아니라, 금형의 내부 자체 냉각에 따른 금형 온도의 편차가 존재하므로 이상적인 금형 냉각과의 편차가 발생하게 된다. 이러한 냉각 조건에 대한 영향을 검토하기 위하여 각각의 모든 열처리 이력에 대해서 용체화 열처리 후 냉각 조건을 수

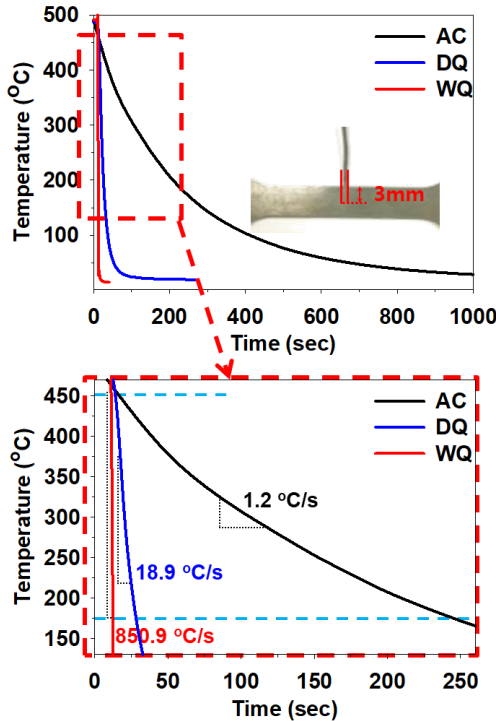


Fig. 4 Temperature variation with respect to cooling methods

냉(water quenching, WQ), 금형냉(die quenching, DQ), 공냉(air cooling, AC)으로 달리하였다.

### 2.3 냉각 속도

용체화 열처리 후 냉각 방법에 따른 냉각 속도를 측정하기 위하여 ASTM 소형 인장시편(Fig. 5) 제작 후 판재 두께 방향에서 2 mm의 미세 홀을 가공하고 K형 열전대(thermocouple)를 시편의 중앙인 3 mm까지 강제 삽입한 후 시편을 준비하였다. 용체화 열처리 온도 480°C에서 20분 유지한 이후 시편을 냉각수, 금형 및 공기의 냉각 매질에 접촉시켜 냉각하였다. 수냉은 지름 400mm의 금속 욕조에 10 리터의 냉각수를 사용하였고 금형냉은 300mm(L) × 200mm(W) × 50mm(H)의 금형강 SKD61 소재의 상하부 금형으로 10kN의 하중을 가하여 모사하였다. 공냉은 대기온도 20°C의 실험실 내부에 노출시켜 공기 중 냉각을 하였다.

냉각 중 시간에 따른 온도 변화를 데이터 수집장비(GL7000, GRAPHTEC 사)를 이용하여 100Hz 해상도로 측정하였으며, Fig 4는 획득한 시간에 따른 온도 변화 결과를 보여준다. 냉각 시 알루미늄의 미세조

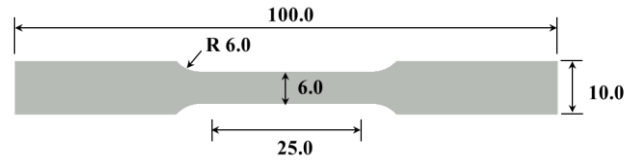


Fig. 5 Dimension of the specimen for uniaxial tensile test (unit: mm)

직 변화에 중요한 온도범위인 450°C부터 160°C까지의 구간에서[11] 온도 변화율을 겉보기 냉각 속도(apparent cooling rate)라 정의하였을 때, 냉각 방법에 따라 수냉은 850.9 (°C/s), 금형냉은 18.9 (°C/s), 공냉은 1.2 (°C/s)로 측정되었다.

### 2.4 기계적 물성

일축 인장에서 기계적 물성을 평가하기 위하여 ASTM E 8M 소형(subsize) 인장시편(Fig. 5)을 이용하였으며, 와이어 방전 가공으로 시편을 제작하였다. 2.2 절에서 제시한 열처리 이력을 거친 이후 1 시간 이내에 인장시험을 수행하였다. 인장시험은 만능재료 시험기(RB 301 UNITECH-M, R&B 사)를 이용하여 0.025mm/s의 속도로 수행하였으며, 레이저 신율계(LX500, MTS 사)를 통하여 25mm의 표점거리에서의 연신율을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

열처리 이력 및 냉각 속도에 따른 AA7075 판재의 응력-변형을 선도를 Fig. 6에 나타내었으며, 기계적 물성을 Table 2에 정리하였다. 용체화 열처리 및 냉각 직후 냉각 속도에 따른 인장강도는 수냉, 금형냉, 공냉 순으로 높았다. 또한, 이후 열처리 이력에 대해서 수냉, 금형냉의 경우 모든 열처리 조건에서 상당한 인장강도 향상 효과를 보였으나, 공냉의 경우 특이할 만한 인장강도 향상 효과를 보이지 않았다. 특히, 용체화 열처리 이후 수냉, 금형냉 및 공냉 후 T6 인공시효 열처리를 수행했을 경우에 용체화 열처리 대비 수냉은 53.4%, 금형냉은 40.2%의 인장강도 상승 효과를 보였으나, 공냉의 경우는 6.6%의 인장강도 상승에 그쳤다. 용체화 열처리동안 형성된 과포화 고용체가 냉각에 의해 기저 조직에 조밀한  $\eta'$  석출물을 생성하게 되는데, 용체화 열처리 후 냉각속

Table 2 Mechanical properties with respect to heat treatment history

Condition		Cooling	$\sigma_{YS}$ (MPa)		$\sigma_{TS}$ (MPa)		$\epsilon_u$ (%)		$\epsilon_t$ (%)	
			Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.
AA7075 Mono	SHT	WQ	179.7	2.7	390.8	4.1	21.05	0.33	21.99	0.50
		DQ	162.3	0.6	368.6	3.9	20.79	1.29	21.01	1.05
		AC	155.5	4.8	344.2	5.9	17.69	0.23	18.86	0.16
	SHT-T6	WQ	528.1	1.5	599.3	1.1	12.72	0.51	16.08	0.47
		DQ	410.9	0.8	516.6	2.2	13.08	0.06	15.67	0.86
		AC	200.9	0.7	367.0	3.5	15.81	0.61	18.23	1.01
	SHT-PB	WQ	401.8	2.1	499.6	0.7	10.74	0.47	14.36	0.23
		DQ	327.2	18.5	465.5	4.2	14.27	2.10	16.23	3.03
		AC	180.5	1.6	368.0	1.9	15.53	0.45	17.18	1.84
	SHT-T6-PB	WQ	502.9	2.9	567.6	2.2	11.63	0.34	14.92	0.18
		DQ	488.5	4.7	560.9	2.0	11.84	0.27	15.24	0.33
		AC	230.1	10.7	397.6	1.3	12.42	0.47	17.10	0.61
AA7075 -CFRP Hybrid	SHT-Hy	WQ	396.9	1.3	522.4	3.3	16.87	1.15	19.84	0.61
		DQ	353.3	1.2	504.5	0.1	17.26	2.47	19.96	2.36
		AC	170.7	0.7	366.3	4.6	15.64	1.11	20.36	0.31
	SHT-T6-Hy	WQ	526.8	1.7	592.9	0.1	11.88	0.18	15.26	0.16
		DQ	458.1	18.8	547.3	11.3	11.63	0.35	14.55	0.30
		AC	250.2	1.3	413.1	6.5	14.50	0.16	17.53	0.69
	SHT-Hy-PB	WQ	457.7	0.8	548.1	0.7	11.47	0.03	15.12	0.14
		DQ	444.0	3.9	534.9	2.5	11.87	0.03	15.03	0.40
		AC	178.4	0.1	368.5	8.9	16.20	1.45	20.27	1.23
	SHT-T6-Hy- PB	WQ	498.3	2.8	562.4	1.6	10.69	0.32	14.13	0.16
		DQ	420.7	1.1	511.3	3.4	10.55	0.01	13.66	0.22
		AC	228.6	0.7	389.7	3.9	15.01	1.20	19.11	0.80

도는  $\eta'$ 석출물의 양에 영향을 미친다. 생성된  $\eta'$ 석출물의 양에 따라 시효 효과에 의한 경화 능력이 달라진다고 보고되고 있다[12,13]. 공냉의 경우 수냉과 금형냉에 비해 상대적으로 낮아 미세한 크기의  $\eta'$ 석출물을 형성시키는 고용도의 양이 감소하여 경화능력을 감소시키게 된다[14].

본 연구에서 고려한 열처리 시나리오에서 공냉에 대한 인장강도 향상 정도는 미미함으로 다음 3.1절과 3.2절에서는 수냉과 금형냉에 대한 결과를 중심으로 논의하였다.

### 3.1 AA7075 단일 부품 열처리 이력 고려 시 인장강도 변화

AA7075 판재 단일 부품 제조 시 AA7075 판재에 가해지는 열처리 이력이 AA7075 판재의 인장강도에 미치는 영향을 Fig. 7(a)에 정리하였다. 용체화 열처리, 전착도장 공정 조건의 열처리를 수행할 경우 수냉, 금형냉에 대해서 용체화 열처리 대비 인장강도가 각각 27.8%, 26.3% 향상되었다. 용체화 열처리 후, T6 인공시효 열처리, 전착도장 공정 조건의 열처리를 추가할 경우 수냉, 금형냉에 대해서 용체화 열처리 후 대비 인장강도는 각각 45.2%, 52.2% 향상되었다. T6 인공시효 열처리 이후 전착도장 공정 조건의 열처리를 수행하였을 경우, 금형냉에서는 T6 인공시효 열처리 조건 대비하여 인장강도가 향상되었으나, 수냉의 경우 T6 인공시효 열처리 대비하여 인장강도가

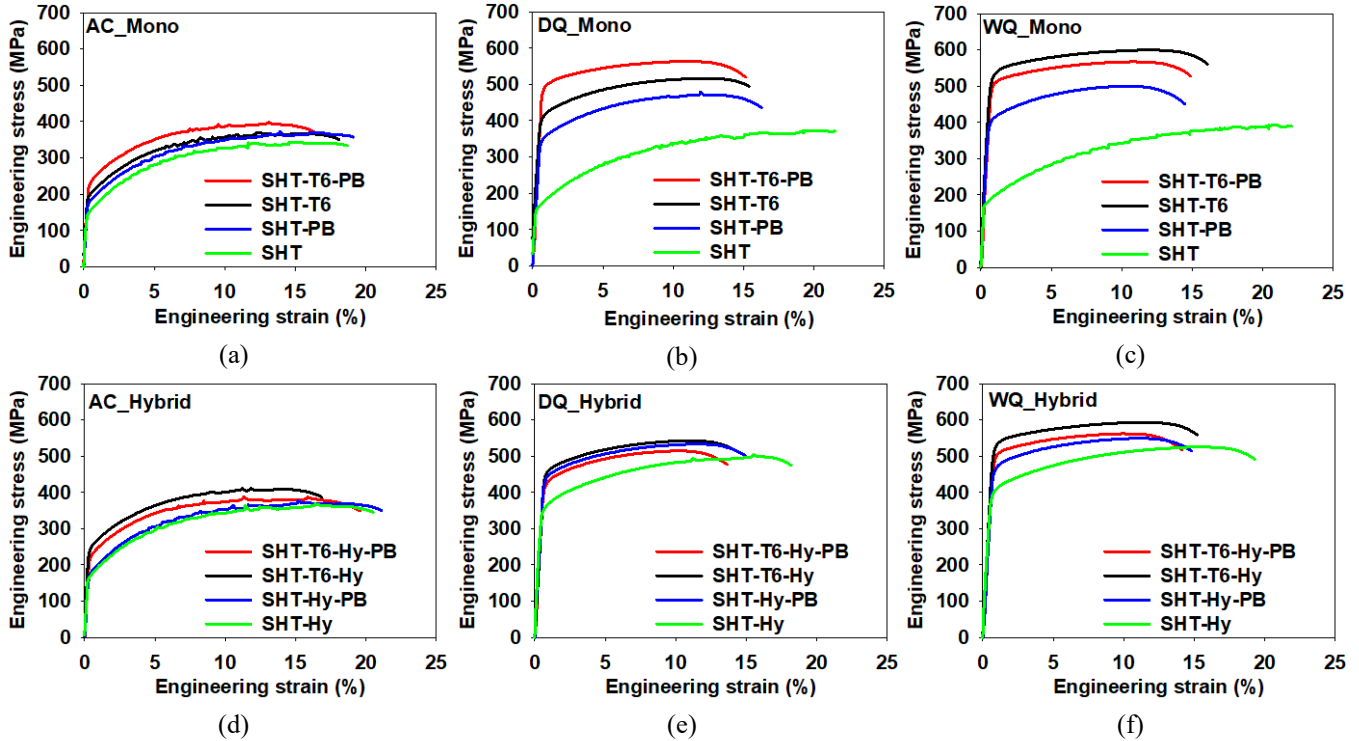


Fig. 6 Engineering strain-stress curves of AA7075 in accordance of cooling rates and heat treatment history:

(a) AC (b) DQ (c) WQ for mono and (d) AC (e) DQ (f) WQ for hybrid parts

오히려 감소하였다. 이는 수냉의 경우 시효가 지속적으로 진행되면서 고용된 석출물 입자의 합체(coalescence)로 인해 크기가 증가함으로써 연화되는 과시효의 효과에 기인한다[15].

### 3.2 AA7075-CFRP 하이브리드 부품 열처리 이력 고려 시 인장강도 변화

AA7075-CFRP 하이브리드 부품 제조 시 AA7075 판재에 가해지는 열처리 이력이 AA7075 판재의 인장강도에 미치는 영향을 Fig.7(b)에 정리하였다. 용체화 열처리, 하이브리드화 공정 조건의 열처리, 전착도장 조건의 열처리를 순차적으로 수행할 경우 인장강도는 순차적으로 상승하여, 용체화 열처리 대비 인장강도가 각각 40.3%, 45.1% 향상되었다. 용체화 열처리 후 T6 인공시효 열처리를 추가할 경우 수냉, 금형냉에 대해서 용체화 열처리 후 대비 인장강도는 각각 43.9%, 38.7% 향상되었다. 이 경우 열처리 이력에 따라 인장강도가 증가하다가 감소하였는데, 수냉의 경우 T6 인공시효 열처리 후 인장강도가 최대였다가 하이브리드화 공정 조건의 열처리, 전착도장

조건의 열처리 시 인장강도가 점차 감소하였으며, 금형냉의 경우 하이브리드화 공정 조건의 열처리까지 인장강도가 증가하여 인장강도가 최대였다가 전착도장 조건의 열처리 시 인장강도가 감소하였다. 수냉의 경우 확보 가능한 최대 인장강도는 562.4MPa 이었으며, 용체화 열처리, T6 인공시효 열처리, 하이브리드화 공정 조건의 열처리, 전착도장 조건의 열처리를 수행할 경우이었으나, 금형냉의 경우 확보 가능한 최대 인장강도는 534.9MPa 이었으며, T6 인공시효 열처리 없이 용체화 열처리, 하이브리드화 공정 조건의 열처리, 전착도장 조건의 열처리를 수행할 경우였다. 이는 용체화 열처리 후 용체화 열처리 후 70℃ ~ 150℃의 온도조건에서 첫번째 인공시효 동안 GP(II) 영역이 생성되고 더 높은 120℃ ~ 170℃ 온도조건에서 두번째 인공시효 동안 생성된 GP(II)영역이 고농도의  $\eta'$  석출물로 변형되면서 높은 인장강도 효과를 나타내는 것으로 보고하였다[16, 17].

### 3.3 부품화 열처리 방안

AA7075 판재의 핫스탬핑 공정에서 용체화 처리



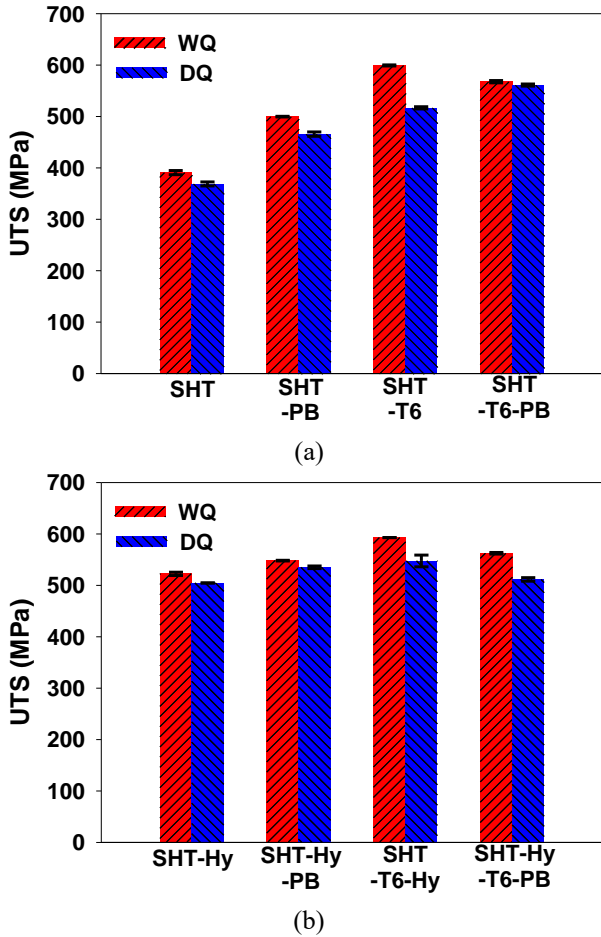


Fig. 7 Tensile strength of AA7075 sheet with respect to heat treatment history related to (a) AA7075 mono and (b) AA7075-CFRP hybrid parts

Table 3 Recommended heat treatment history with respect to targeted tensile strength of AA7075 sheet

Parts	Targeted tensile strength (MPa)	Recommended thermal history	Measured tensile strength (MPa)
AA7075 mono	450	SHT-PB	465.5
	500	SHT-T6-PB	560.9
	550	SHT-T6-PB	560.9
AA7075 -CFRP Hybrid	450	SHT-Hy-PB	534.9
	500	SHT-Hy-PB	534.9
	550	-	-

후 주 냉각 경로인 금형냉에 대해서 인장 강도 변화를 통하여 부품화 열처리 방안을 검토하였다. 부품

화 열처리 방안은 부품의 목표 인장강도에 맞게 선정되어야 하는데, 목표 인장강도를 450MPa, 500MPa 및 550MPa 로 상정하였을 경우를 가정하여 각각에 적절한 열처리 방안을 Table 3 에 정리하였다. 통상적으로 AA7075 판재를 적용한 부품의 목표 인장강도는 500MPa 이상으로 기대한다. 이 경우 AA7075 판재 단일 부품의 경우 T6 인공시효 열처리와 전착도장 공정을 모두 수행함으로써 500MPa 이상의 인장강도를 확보할 수 있으나, AA7075-CFRP 하이브리드 부품의 경우 하이브리드화 공정 이후 T6 인공시효 열처리 없이 전착도장 공정만으로도 500MPa 이상의 인장강도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 실제 부품화 과정에서는 각 열처리 공정 중간에 이송, 적재 등의 이유로 부품이 대기 중에 노출되게 된다. 이때 대기 중 노출 시간에 따라 자연시효(natural aging) 효과가 부품의 최종 인장강도에 다소 영향을 미칠 수 있으므로[17] 이에 대한 고려가 추가로 필요하다.

#### 4. 결론

7xxx계 알루미늄 핫스탬핑 공정을 기반으로 한 AA7075-CFRP 하이브리드 센터필러의 부품화에 있어서, 공정 조건의 열처리 이력에 따른 인장강도를 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 용체화 열처리 후 냉각 속도가 열처리 공정 이후의 인장강도에 영향을 미치며, 수냉, 금형냉의 경우 상당한 인장강도 상승을 보였으나, 공냉의 경우 특이할 만한 인장강도 상승을 보이지 않았다. 수냉이 금형냉에 비하여 각 열처리 이력 단계에서 인장강도가 컸으나, 전착도장 조건의 열처리까지의 순차적인 열처리를 모두 수행한 경우 그 차이는 크지 않았다.

(2) AA7075-CFRP 하이브리드 부품의 제조 공정을 상정하여 수행한 용체화 열처리, 하이브리드화 공정 조건의 열처리, 전착도장 조건의 열처리를 순차적으로 수행할 경우 인장강도는 순차적으로 상승하였다. 용체화 열처리 후 T6 인공시효 열처리를 추가할 경우, 인장강도가 증가하다가 감소하였다. 수냉 후 T6 인공시효 열처리를 추가할 경우, 추가하지 않을 때 대비하여 인장강도가 높았으나, 금형냉 후 인공시효 열처리를 추가할 경우, 추가하지 않을 때 대비하여 오히려 인장강도가 낮았다.

(3) 핫스탬핑 공정에서 주 냉각 경로인 금형냉에 대하여 AA7075-CFRP 하이브리드 부품에서 확보가 능한 7075 판재의 최대 인장강도는 534.9MPa 이었으며, 이는 하이브리드화 공정 조건의 열처리, 전착도 장 조건의 열처리를 순차적으로 수행할 경우로 T6 인공시효 열처리 추가없이 확보된 결과였다.

## 후 기

본 연구는 산업핵심기술개발사업(산업통상자원부, 10077492)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] K. Anyfantis, P. Stavropoulos, P. Foteinopoulos, G. Chryssolouris, 2019, An approach for the design of multi-material mechanical components, *Process. IMechE Part B J.J. Eng. Manuf.*, Vol. 233, No. 3, pp. 960-974. <https://doi.org/10.1177/0954405418763995>
- [2] Y. Lin, J. Min, H. Teng, J. Lin, J. Hu, N. Xu, 2020, Flexural performance of steel-FRP composites for automotive applications. *Automot. Innov.*, Vol. 3, pp. 280-295. <https://doi.org/10.1007/s42154-020-00109-x>
- [3] G. Gardiner, 2016, Is the BMW 7 Series the future of autocomposites?, <https://www.compositesworld.com/articles/is-the-bmw-7-series-the-future-of-autocomposites>.
- [4] J. Lee, H. J. Bong, D. Kim, Y. -S. Lee, Y. Choi, M. -G. Lee, 2020, Mechanical properties and formability of heat-treated 7000-series high-strength aluminum alloy: experiments and finite element modeling, *Met. Mater. Int.*, Vol 26, pp. 682~694. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00353-9>
- [5] Y. Choi, J. Lee, S. S. Panicker, H. -K. Jin., S. K. Panda, M. -G. Lee, 2020, Mechanical properties, springback, and formability of W-temper and peak aged 7075 aluminum alloy sheets: Experiments and modeling, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol 170, No. 105344, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105344>
- [6] M. Aumüller, 2014, Safety and lightweight construction with AMAG Aluminum, *AluReport*, Vol 3, pp. 14~15.
- [7] J. -H. Hong, H. Kim, W. Kim, Y. N. Kwon, D. Kim, 2020, Failure with strain localization of aluminum alloy 7075 sheets at elevated temperature and its application to two-step hybrid forming, *Met. Mater. Int.*, <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00949-6>
- [8] J. -H. Hong, D. Yoo, Y. N. Kwon, D. Kim, 2020, Pneumatic experimental design for strain rate sensitive forming limit evaluation of 7075 aluminum alloy sheets under biaxial stretching modes at elevated temperature, *Metals*, Vol 10, No. 1639, pp. 1~17. <https://doi.org/10.3390/met10121639>
- [9] J. Lin, T. A. Dean, R. P. Garrett, A. D. Foster, 2008, Process for Forming Metal Alloy Sheet Components, *British Patent*, WO2008/059242 A2.
- [10] T. Grohmann, 2016, Forming of AMAG 7xxx Series Aluminum Sheet Alloys, *Process. of New developments in Sheet Metal Forming*, Stuttgart, Germany, pp.1~21.
- [11] S. Liu, Q. Zhong, Y. Zhang, W. Liu, X. Zhang, Y. Deng, 2010, Investigation of quench sensitivity of high strength Al-Zn-Mg-Cu alloys by time-temperature-properties diagrams, *Mater. Des.*, Vol 31, No. 3, pp. 3116~3120. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.038>
- [12] M. E. Fine, 1975, Precipitation hardening of aluminum alloys, *Metall. Trans. A*, Vol. 6A, pp. 625~630.
- [13] A. J. Ardell, 1985, Precipitation hardening, *Metall. Trans. A*, Vol.16A, pp. 2131~2165.
- [14] A. Deschamps, Y. Brechet, 1998, Nature and distribution of quench-induced precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Scr. Mater.* Vol. 39, No. 11, pp. 1517~1522. [https://doi.org/10.1016/s1359-6462\(98\)00357-1](https://doi.org/10.1016/s1359-6462(98)00357-1).
- [15] C. F. Tan, M. R. Said, 2009, Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-T6, *Chiang Mai J. Sci.* Vol. 36, No. 3, pp. 276~286.
- [16] V. Hansen, O. B. Karlsen, Y. Langsrud, J. Gjønnes, 2004, Precipitates, zones and transitions during aging of Al-Zn-Mg-Zr 7000 series alloy, *Mater. Sci. Technol.* Vol. 20, No. 2, pp. 185~193. <https://doi.org/10.1179/026708304225010424>
- [17] S. Kilic, I. Kacar, M. Sahin, F. Ozturk, O. Erdem, 2019, Effects of aging temperature, time and pre-strain on mechanical properties of AA7075, *Mater. Res.*, Vol. 22, No. 5, pp. 1~13. <http://orcid.org/0000-0002-1681-9403>