

하이드로포밍용 DP780MPa급 강관의 전기저항용접 강관 개발에 관한 연구

박 성 필^{*1)} · 권 용 재²⁾

현대하이스코 신제품개발연구소¹⁾ · 울산대학교 첨단소재공학과

A Study on the Development of Electric Resistance Welding of DP780 Grade Steel for Hydroforming Tube

Sungpill Park^{*1)} · Yongjai Kwon²⁾

¹⁾R&D Institute, Hyundai Hysco, 706 Yeompo-ro, Buk-gu, Ulsan 683-711, Korea

²⁾School of Materials Science & Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received 16 September 2014 / Revised 13 November 2014 / Accepted 30 December 2014)

Abstract : To achieve lightweight design, research & development of various lightweighting technologies such as hydroforming are underway worldwide. In the case of hydroforming, application of ultra high strength steel is essential for weight reduction of the car. However, considering common high-strength carbon steel, it is not suitable to the actual hydroformed parts since the lack of formability. DP steel offers an outstanding combination of strength and formability as a result of their microstructure. DP steel has high strength and good formability but it's difficult to secure stable quality of welding section because of softening of weld section and chemical composition. Therefore, most of companies use LASER welding when making high strength tube. Electric resistance welding is excellent production method for steel tube manufacturing considering the productivity. Optimum electric resistance welding technology is needed to be developed for application of high strength hydroformed parts using DP steel. This study is comprehensive research & development from electric resistance welding to actual formability evaluation.

Key words : Electric resistance welding(전기저항용접), Dual phase steel(이상강), Hydroforming(액압성형)

1. 서론

자동차 산업은 근래에 이슈화가 되고 있는 차량 경량화를 통한 연비 개선 및 가격 경쟁력을 갖춘 차량을 제작하기 위하여 많은 노력을 하고 있다. 특히 하이드로포밍은 차량 경량화를 목적으로 실행된 ULSAB(Ultra Light Steel Auto Body)프로젝트에서 알려진 수압을 이용한 소성가공 기술로 대표적인 차량 경량화 기술이다. 현재 하이드로포밍 기술은 샤시부품 중심으로 경량화 및 성능 향상을 위하여 Fig. 1과 양산 적용되고 있으며, 원가 경쟁력을 위하

여 용접강관이 사용되고 있다. 그리고 최근에는 추가 경량화를 위하여 780MPa 이상의 AHSS(Advanced High Strength Steel)강관 적용을 위하여 연구를 하고 있으며, 해외 자동차 Maker에서는 780MPa급의 DP(Dual Phase)소재를 레이저로 용접하여 루프릴 및 센터필라에 Fig. 2와 같이 하이드로포밍 부품을 적용하고 있다.¹⁻³⁾

하지만 LASER 용접강관의 경우, 용접 품질이 우수한 반면에 용접속도가 많이 떨어진다는 단점이 있다. 그래서 향후 하이드로포밍 부품의 원가 경쟁력 확보를 위하여 생산성이 우수한 전기저항용접 방식을 통한 AHSS 용접강관이 개발이 필요한 시점이다.

*Corresponding author, E-mail: hy714155@hysco.com



(a) Trailing arm (b) Front-sub frame (c) Side member

Fig. 1 Hydroformed parts in a car

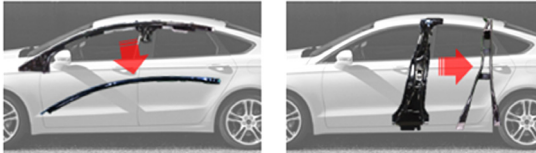


Fig. 2 AHSS tube's applications

2. 시험 방법

2.1 시험 재료

하이드로포밍은 Fig. 3과 같이 굽힘 공정, 예비 성형 공정, 수압 성형 공정 등 단계별로 소성가공이 되는 특성을 가지고 있으며, 하이드로포밍을 위해서는 연속적인 소성가공에 적합한 즉, 인장강도 대비 항복강도가 낮고 연신율과 가공경화지수 n 값이 우수한 용접강관 개발이 필요하다.⁴⁾

여기서 하이드로포밍을 위한 인장강도 780MPa 이상의 전기저항용접강관을 개발하기 위해서는 소재 강도는 물론이고 저 항복비의 고성형 소재 선택이 필요하다. 하지만 Table 1과 같이 C-Mn계의 일반 탄소강은 인장강도 대비하여 항복강도가 높고 연신율 낮아서 하이드로포밍에 적합하지 않아서 후가공성이 용이한 저 항복비의 DP소재를 선택하여 평가를 진행하였다. DP강은 연성의 페라이트 조직과 경한 마르텐사이트 조직이 혼합된 강종으로 열처리를

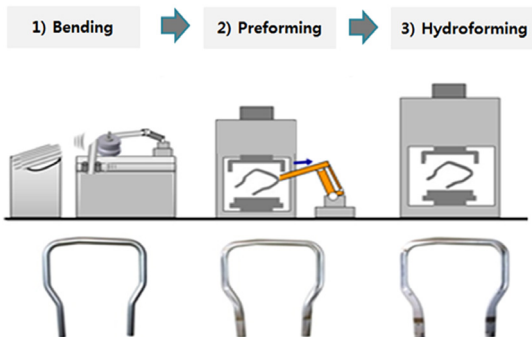


Fig. 3 General hydroforming manufacture process

Table 1 Mechanical properties comparison

	YP (MPa)	TS (MPa)	T-EI (%)	n-value
DP780	550	810	21.0	0.12
0.35C-1.2Mn	695	784	15.0	0.08

Table 2 DP780 chemical compositions (wt%)

	C	Si	Mn	S	Mn/Si ratio
A	0.07	1.07	2.35	0.002	2.2
B	0.10	0.30	2.25	0.003	7.5

통해 우수한 가공성과 높은 강도를 동시에 가지는 이상강이다.⁵⁾

그리고 DP강의 화학성분에 따른 용접성을 평가하기 위하여 Table 2와 같이 화학성분이 상이한 두께 1.2mm의 DP780 소재를 활용하여 전기저항용접을 실시하였다.

2.2 시험 및 평가 방법

2.2.1 용접조건 및 용접품질 평가

전기저항용접강관은 Fig. 4와 같이 롤 포밍이라는 단단의 성형공정을 거쳐 원형으로 성형되고 전기저항용접을 통해 접합된다.¹⁾

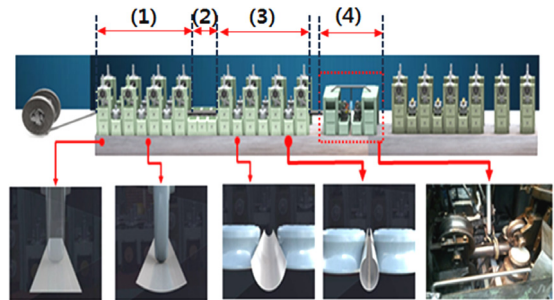


Fig. 4 Manufacture process of electric resistance welding

전기저항용접의 주요 변수는 입열량과 용접속도이다. 입열량이 작거나 용접속도가 빠르면 제대로 용접이 되지 않으며, 입열량이 많거나 용접속도가 너무 느리며 용접부가 용착되어 적절한 용접조건 확보가 중요하다. 그래서 외경은 60.5mm, 두께가 1.2mm 기준으로 최대 500kW인 Thermatool社 장비를 활용하여 Table 3과 같이 입열량과 용접속도를 조정하며 평가를 실시하였다.

Table 3 Electric resistance welding condition

	Minimum	Maximum
Input power	100 kW	400 kW
Welding speed	10 m/min	40 m/min

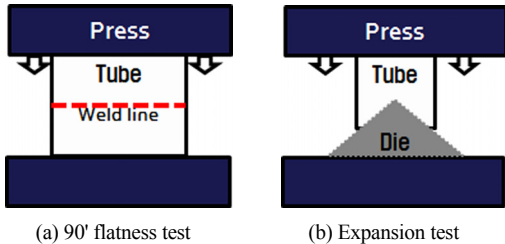


Fig. 5 Electric resistance weldability test in field

Table 4 Quality targets of welded tube

Flatness test		Expansion test
0' from Weld line	90' from Weld line	
100% flatness	Less than 18mm (70%)	More than 67mm (10%)

※ Measurement : based on diameter

또한 현장에서 용접품질을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 편평시험(Flatness test) 및 압확시험(Expansion test) 및 실시하였으며, 하이드로포밍 성형성을 고려하여 Table 4와 같이 3가지 기준을 설정하여 강관의 용접품질을 현장에서 평가하였다.

2.2.2 용접부 미세조직 관찰

용접강관의 모재부 및 용접부의 미세조직을 관찰하기 위하여 시편을 에폭시 수지로 성형한 다음사포로 연마 후에 1µm 다이아몬드 페이스트와 메틸계의 윤활을 연마포에 도포 후 연마하여 시편을 제작하였다. 금속 조직을 관찰하기 위해 2% Nital를 이용하여 상온에서 5초 이상 부식시킨 후 광학현미경(OM : Optical Microscopy, ZEISS AXIDVERT 100A)을 이용하였고, 용접부 미세조직을 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM : Scanning Electron Microscopy, HITACHI S-3000N)을 활용하였다.

2.2.3 화학성분 분석

용접강관에 적용된 DP780 소재의 화학성분을 분석하기 위하여 소재를 30 × 30mm로 평탄하게 절단하여 소재에 spark를 가하여 소재의 에 존재하는 원

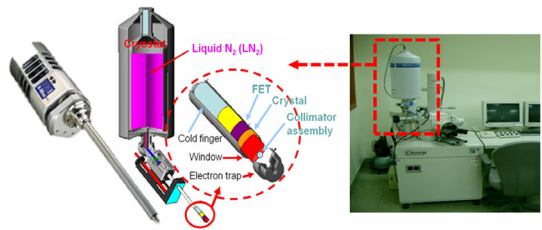


Fig. 6 Energy dispersive X-ray spectrometer

소의 종류와 함량을 조사하는 spark optical emission spectroscopy 장비를 활용하여 측정하였다. 그리고, 용접부의 고용점 산화물 유무를 평가하기 위하여 Fig. 6과 같이 전자빔을 시편에 주사하여 발생하는 특성 X선의 세기를 검출하여 원소의 분포도를 측정하여 정성 또는 정량분석을 할 수 있는 주사현미경의 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)기능을 활용하였다.

2.2.4 기계적 특성 평가

용접강관의 용접부 경도는 비커스 경도시험기(vickers hardness tester, MATSUZAWA VMT - 7S)를 사용하여 300g 하중조건에서 측정하였다. 이 때 모재부와 열영향부 및 용접부의 경도 변화를 관찰하기 위하여 일정간격으로 경도측정을 실시하였다. 인장시험의 시험편은 KS B 0801 12호 시험편이고, 인장 시험기는 만능인장시험기(universal testing machine, ZWICK Z100)을 활용하였으며 시험조건은 크로스 헤드스피드는 10mm/min로 시험을 실시하였다. 그리고 용접부 및 모재부의 인장특성을 판단하기 위하여 Fig. 7과 같이 용접부 기준으로 90도 간격으로 시편을 채취하여, 용접강관의 용접부와 모재부(모재부는 평균값)의 인장물성을 평가하였다.



Fig. 7 Tube position of tensile strength specimen

2.2.5 용접강관의 하이드로포밍 성형성 평가

하이드로포밍 성형성을 사전에 평가하기 위하여, 인장시험으로 얻어진 값을 기초로 Fig. 8과 같이 유한요소해석을 통해 두께에 따른 확관 정도를 평가하였다. 유한요소해석 프로그램은 LS-DYNA를 활

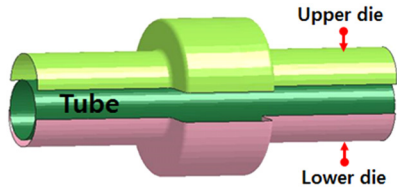


Fig. 8 Modeling of free bulge

용하였다. 그리고 실제 용접강관의 성형 특성을 확인하기 위하여 자유확관시험(Bulge test)을 실시하였다. 자유확관시험은 Fig. 8과 같이 원통으로 제작된 금형에 실제 용접강관을 안착시키고 수압을 가하여 용접강관이 과단될 때까지의 압력과 확관률 그리고 과단 위치를 확인하게 된다.

3. DP780의 전기저항용접 특성 평가

3.1 “A”소재의 용접성 평가

화합성분에 따른 전기저항용접성을 평가하기 위하여 Mn/Si 비율이 2.2인 A소재와 Mn/Si 비율이 7.5인 B소재를 대상으로, 실제 강관 제조설비를 이용하여 용접조건에 따른 강관 품질을 평가하였다. A소재의 용접성 평가 결과는 Fig. 9와 같이 출력 200kW, 용접속도 10m/min을 제외하고는 안정적인 용접조건을 확보하기 어려웠다.

그리고 출력 200kW, 용접속도 10m/min을 기준에서의 용접품질은 Table 5와 같이, 편평시험은 용접선 기준으로 0도에서는 완전 밀착을 해도 크랙이 발생하지 않았으나, 90도의 경우에는 외경이 48mm (약 80%) 이상 눌러질 경우 크랙이 발생하였다. 그

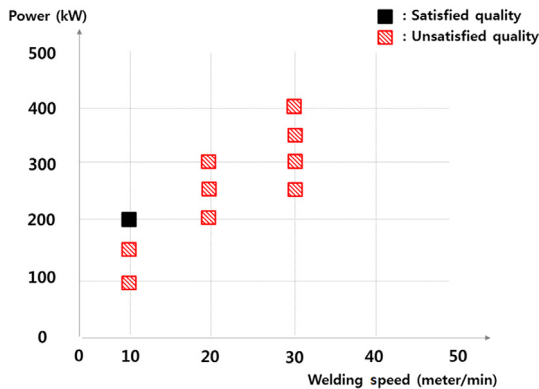


Fig. 9 Electric resistance welding result of “A” material

Table 5 Tube mechanical test results of “A” material

Flatness test	0° from weld line	
	90° from weld line	
Expansion test		

리고 확관량은 8mm로 약 13%까지 확관이 가능하였다.

3.2 “B”소재의 용접성 평가

B소재에 대한 평가결과는 Fig. 10과 같이 출력 250kW, 용접속도 20m/min을 기준으로 출력이 커지고, 용접속도가 빠를수록 안정적인 용접조건 영역이 커짐을 확인할 수가 있다.

그리고 Table 6과 같이 A소재와 가장 유사한 출력 250kW, 용접속도 20m/min을 기준에서의 용접품질은 다음과 같다. 우선 편평시험은 용접선 기준으로 0도와 90도 모두 완전 밀착을 해도 크랙이 발생하지 않았고, 그리고 확관량은 11mm로 약 18%까지 확관이 가능하였다.

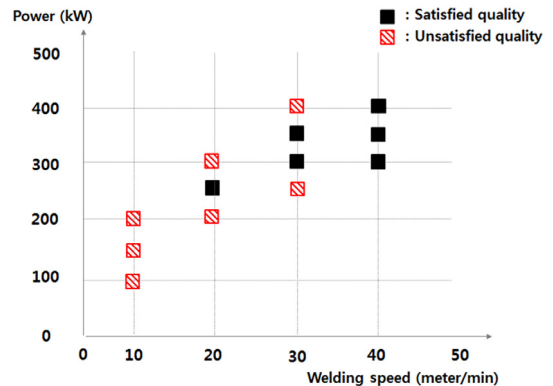





Fig. 10 Electric resistance welding result of “B” material

Table 6 Tube mechanical test results of "A" material

Flatness test	0' from weld line	
	90' from weld line	
Expansion test		

3.3 전기저항용접성 및 기계적 특성 고찰

B소재의 경우 출력 250kW, 용접속도 20m/min을 기준으로 용접조건에 따라 일정한 패턴을 보이는 반면에 A소재의 경우 적절한 용접구간을 확보할 수가 없었다. 이러한 원인은 소재의 화학성분, 특히 Mn/Si 비율에 따른 전기저항용접성 차이로 발생된 것으로 사료된다. 전기저항용접은 공정의 특성상 대기중에서 용접하여, 용접시 산화물이 발생하게 된다. 대부분의 산화물은 용접과정에서 배출이 되지만, 고용점 산화물이 발생한 경우에는 침입결함 형태로 용접부에 잔존하여 용접부 품질을 저하한다. 특히 DP780은 강도를 확보하기 위하여 다량의 Mn을 첨가한 강종으로 Fig. 11과 같이 Mn이 1.0% 이상인 경우 MnO, SiO₂, FeO와 같은 산화물이 생성되게 된다. 전기저항용접(1,500 ~ 1,600°C)방식으로 제조되는 전기저항용접강관은 Fig. 12와 같이 Mn/Si

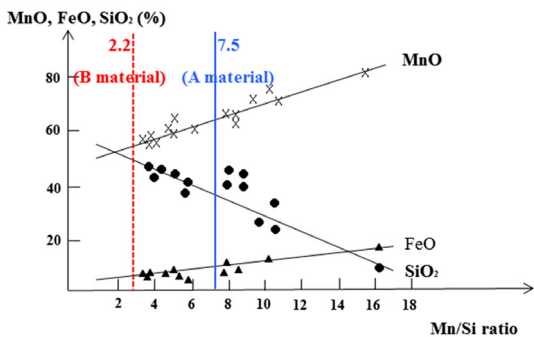


Fig. 11 Mn/Si ratio effect in electric resistance welding

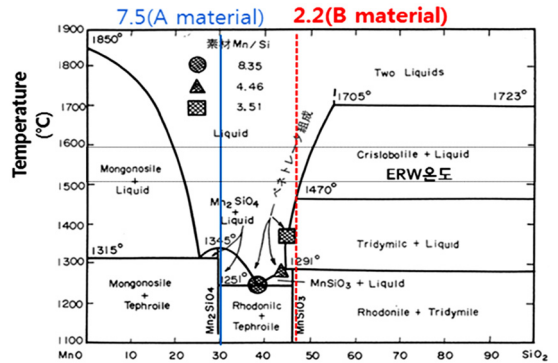


Fig. 12 MnO-SiO₂ phase diagram

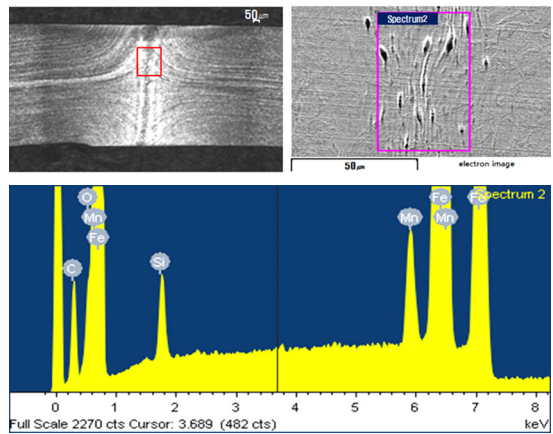


Fig. 13 EDS result in welding zone

비율에 따라 용접시 100% 용융되지 않고 고용점 산화물이 발생하게 된다.⁽⁶⁻⁸⁾

실제 출력 200kW, 용접속도 10m/min로 제작된 A소재의 경우 Fig. 13과 같이 MnO, SiO₂ 산화물로 추정되는 성분이 확인되었으며, 용접부에 잔존한 고용점 산화물로 인해 B소재와 대비하여 용접품질이 열악한 것으로 판단된다.

그리고 소재에 따른 기계적 물성을 평가하기 위하여, 유사한 조건에서 제조된 용접강관을 대상으로 인장시험을 실시하였다. A소재는 출력 200kW 용접속도 10m/min로 제조된 용접강관, B소재는 출력 250kW 용접속도 20m/min으로 제조된 용접강관을 사용하였으며, 평가 결과는 Table 7과 같다.

인장시험 결과를 보면 A와 B소재 모두 모재부에서는 크게 차이를 보이지 않지만, 용접부의 경우 B소재가 A소재와 대비하여 강도가 높고 연신율이

Table 7 Mechanical properties of tubes

		YP (MPa)	TS (MPa)	T-EI (%)	n-value
A	Welding section	642	869	6.6	-
	Base section	580	832	18.9	0.10
B	Welding section	681	884	4.6	-
	Base section	570	825	19.5	0.11

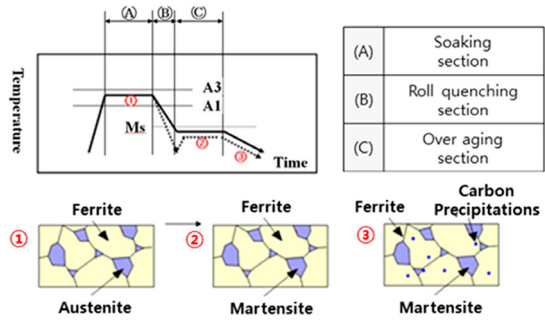


Fig. 15 Manufacture process of DP steel

용접강관은 1,500°C 이상 온도에서 용접되어 바로 급냉되어지기 때문이다.¹⁰⁾

또한 A와 B소재의 기계적 물성 차이는 강관 제조에 따른 입열량과 용접속도가 원인인 것으로 사료된다. B소재는 A소재와 대비하여 고입열로 빠르게 용접후 급냉되기 때문에 상대적으로 경도와 강도가 높게 나타나고 연신율이 떨어진 것으로 판단된다.

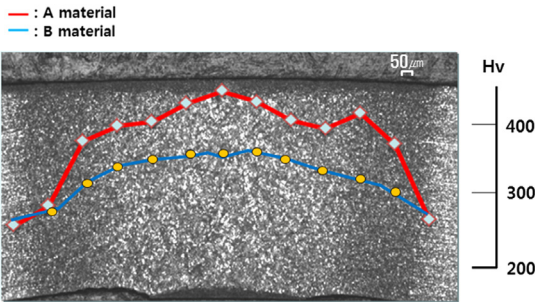


Fig. 14 Vickers hardness in welding zone

2% 떨어지는 것을 확인할 수가 있다. 그리고 Fig. 14와 같이 용접부의 미세경도를 측정하였다. 위치별 경도를 보면, 용접강관의 모재부 경도는 Hv 290 ~ 300 수준으로 소재와 관계없이 유사하게 측정되었으나, 용접부의 경우에는 A소재의 경도는 Hv320 ~ 350 수준으로, B소재는 Hv380 ~ 420으로 측정되었다.

하이드로포밍은 수압을 통해 확관이 이루어지기 때문에 용접부의 기계적 물성이 모재부와 유사하거나 차이가 크지 않은 경우에는 하이드로포밍 시 용접부에서 크랙이 발생 될 가능성이 크다. 이는 하이드로포밍 시 변형을 모재에서 최대한 수용하는데, 일정한 힘 이상에서 모재부와 같이 용접부가 변형이 생기게 되면 조직적으로 불안한 용접부에서 크랙이 먼저 발생 될 가능성이 높기 때문이다. 따라서 모재부 대비 용접부의 경도차이가 크고, 용접부를 구속하여 변형할 수 없도록 하는 것이 하이드로포밍 제품 성형에 유리한 특성을 보인다.⁹⁾ 먼저 모재부와 용접부의 경도 차이는 소재와 용접강관의 제조공정에 따른 차이로 인해 발생 된 것으로 판단된다. Fig. 15와 같이 DP 소재는 A₃ 온도 이상(900°C)에서 급냉 및 열처리하여 제조되는 반면에 전기저항

4. 하이드로포밍 성형특성 평가

두께에 따른 하이드로포밍 성형 특성을 확인하기 위하여 외경이 60.5mm인 용접강관의 모재부 물성을 기준으로 유한요소해석을 실시하였다. 왜냐하면 2mm 이하의 용접부 물성을 따로 구현하기 불가능했기 때문이다. Table 8과 같이 1.2mm에서 4.0mm로 두께가 증가함에 따라 확관량과 파단 압력이 높게 나타났으며, 용접부 물성을 따로 구현하지 않았기 때문에 모재부의 항복강도가 상대적으로 낮고 연신율이 높은 B소재에서 확관량이 다소 높게 나타났다.

그리고 실제 자유확관시험은 A소재는 출력 200kW, 용접속도 10m/min, B소재는 출력 250kW, 용접속도 20m/min 조건으로 제조된 용접강관을 대상으로 시

Table 8 FEA simulation results

	Thickness	Expansion length	Expansion ratio	Burst pressure
A	1.2 mm	9.2 mm	15.2 %	350 bar
	2.0 mm	9.8 mm	16.1 %	720 bar
	4.0 mm	12.5 mm	20.6 %	1,360 bar
B	1.2 mm	9.5 mm	15.7 %	320 bar
	2.0 mm	10.0 mm	16.5 %	630 bar
	4.0 mm	13.0 mm	21.4 %	1,250 bar

Table 9 Bulge test results

	Expansion length	Expansion ratio	Burst pressure
A	6.0 mm	9.9 %	160 bar
B	9.0 mm	14.8 %	250 bar

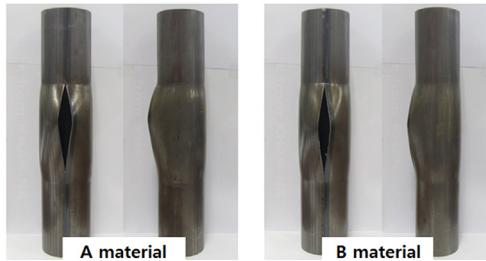


Fig. 16 Specimens after bulge test

험하였고, 결과는 Table 9와 Fig. 16과 같다.

확관량 및 과관압력은 유한요소해석과 대비하여 실제 자유확관시험에서 낮게 나타났으며, 용접부에서 터짐이 발생하였다. 이는 실제 자유확관시험에서는 용접강관 전방향에 걸쳐 힘을 받기 때문에 상대적으로 취약한 용접부 조직에서 먼저 크랙이 발생된 것으로 보여진다. 그리고 모재부와 용접부 정도차이가 큰 B소재가 A소재와 대비하여 높은 확관량을 보였다. 이것은 A소재 용접부에 잔존하는 고용점 산화물과 정도차이(모재부와 용접부)가 복합적으로 작용한 것으로 보여진다.

5. 결론

780MPa 하이드로포밍 부품 개발을 위해서는 용접강관에 대한 연구가 선행되어야 하며, 전기저항용접 방식의 강관제조 기술에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) A소재의 경우에는 전기저항용접은 출력 200kW, 용접속도 10m/min을 제외하고는 안정적인 용접조건이 확보가 불가하였으며, 용접부에 고용점 산화물인 MnO, SiO가 관찰되었다.
- 2) B소재의 경우에는 250kW, 용접속도 20m/min을 기준으로 용접조건에 따라 일정한 패턴을 보이는 안정적인 용접구간을 확보 할 수 있었으며, 용접부에서도 산화물이 관찰되지 않았다.
- 3) 유사한 조건으로 제조된 용접강관의 기계적 물

성을 보면, DP780의 제조조건과 전기저항용접의 용접온도와 냉각속도로 인해 용접부의 강도가 모재부 대비 높게 나타났다. 그리고 B소재가 A소재와 대비하여 용접부의 경도가 높게 나타났다. 이는 B소재가 고입열로 빠르게 용접되었기 때문이다.

- 4) 용접부 현장 품질 평가 결과를 보면 B소재와 대비하여 A소재가 우수한 결과를 보였는데 이는 A소재의 용접부에 발생된 산화물과 용접부 기계적 물성 차이가 복합적으로 영향을 주었다고 판단한다.
- 5) 적정 성분계와 조건으로 제조된 전기저항 용접강관은 10% 내외의 하이드로포밍 부품에 적용이 가능하고, 용접부 변형을 최소화하기 위하여 용접부를 구속하게 되면 10% 이상의 자동차 부품에 적용이 가능하리라 판단된다.

References

- 1) S. Park and Y. Kwon, "The Study of Roll-forming Technology for UHSS Hydroformed Parts," Transactions of KSAE, Vol.23, No.1, pp.41-48, 2015.
- 2) D. Gericke, Hydroform Intensive Body Structure with Advanced High Strength Steels, Variform, Great Designs in Steel, 2013.
- 3) N. Arwashan and J. Liu, Preform Solution for Hydroforming Challenges, Martinrea International, Inc., Great Designs in Steel, 2013.
- 4) H. S. Kim and D. H. Kim, "The Development of Hydro-formability Improving Technology Using FEA," KSTP Spring Conference Proceedings, pp.339-339, 2005.
- 5) J. Y. Ahn, Research on Microstructure and Mechanical Properties of Dual-phase Steels Fabricated by Severe Plastic Deformation, M. S. Thesis, Hanyang University, Seoul, 2006.
- 6) H. Haga, K. Aoki and T. Sato, "Welding Phenomena and Welding Mechanisms in High-frequency Electric Resistance Welding 1st Report," Welding Journal, Vol.59, No.7, pp.208-216, 1980.
- 7) H. Haga, K. Aoki and T. Sato, "The Mechanisms

- of Formation of Weld Defects in High-frequency Electric Resistance Welding,” Welding Journal, Vol.60, No.6, pp.104-109, 1981.
- 8) J. H. Choi, Y. S. Chang, C. M. Kim, J. S. Oh and Y. S. Kim, “Penetrator Formation Mechanism during High-frequency Electric Resistance Welding,” Welding Journal, Vol.83, No.1, pp.27-31, 2004.
 - 9) F. Andreas and S. T. Suberlich, “Tubular Steel Components for Light Weight Axle Designs,” 3rd International Conference on Steel in Cars and Trucks, pp.12-21, 2011.
 - 10) S. H. Lee, Effects of Austenite on the Drawing Limit and Mechanical Properties of Ferrite-austenite Dual Phase Steel, M. S. Thesis, Seoul National University, Seoul, 2005.