

고장력 강재의 전기저항 용접부 열처리 특성 및 기술에 대한 연구

서정현*

A Study on the Characteristics of Heat Treated ERW Weld Seam and the Technology of Seam Annealing

Joung Hyun Suh*

Key Words : weld seam(용접부 이음매), inductor of annealer(열처리기 가열대), penetration depth(침투깊이), heat trace(열흔), CCT diagram(연속냉각 상태도), A_{c_3} (아공석 구간에서 $\alpha \rightarrow \gamma$ 온도)

Abstract

To find seam annealer capacity of through thickness seam annealing in terms of through thickness microstructure change with increased toughness and elongation leaving heat trace on it, high strength steel pipes of ERW with different thickness were tested in different seam annealing temperature measured on the outer surface of pipes. Annealing temperature and microstructure of the weld seam were changed through applied seam annealing condition. Toughness and tensile test with hardness and microstructure analysis were done on the annealed weld seam to find its characteristics as a primary step and annealing characteristics according to different seam annealing condition.

Through a study of annealed ERW weld seam characteristics and seam annealing technology, amount of electric power should apply in decreased manner to arranged inductors of annealer in the order of 1st, 2nd, 3rd, so on for proper seam annealing. For example of 15.4mm thick and 610mm outside diameter pipe, applied power for proper seam annealing is 600-650kw at 1st inductor, 450-500kw at 2nd inductor, 200-250kw at 3rd inductor of annealer during 10-12 M/minute moving speed of pipe. Also, the penetration depth of heat trace along the thickness direction of weld during seam annealing can be estimated through the equation $17\text{mm/kv} \times \text{voltage(kv)}$ with the microstructure and hardness analysis of thick weld seam as well as study of seam annealing and comparison of cooling condition to CCT diagram of low carbon high strength steel. From this result, the difference between the technological applicability of full annealing condition based on phase diagram and full penetration of heat trace based on CCT diagram along the thickness of weld seam is discussed.

× 1998년 11월 16일 접수

* 정회원, 전 현대강관 기술연구소

1. 서론

소재가공 기술의 발전과 함께 경량의 고장력 강재의 적용은 비용절감 및 자원의 효율적 이용 측면에서 지속적으로 이루어져왔다. 이러한 추세에 따라 라인파이프용 또는 구조용 강판에서도 고장력 강재의 적용과 함께 고인성 그리고 용접성의 향상을 위한 저탄소 소재의 개발¹⁾과 이의 적용이 그간 활발히 진행되어왔다. 이같이 용도상 요구되는 특성인 고장력, 고인성, 및 용접성등 외에도 조관시 고장력 강재의 사용에 따른 제조공정상 즉 용접공정에서 발생될 수있는 용접부 취성 특히 열영향부의 경화²⁾와 같은 제조상의 문제를 해결하기 위해 용접부 열처리 특성 및 기술에 대한 연구가 필요했다.

고장력 전기저항용접(ERW, electric resistance welding)강관의 용접섬(seam)부에 대한 열처리 조건³⁾중 주요인자는 열처리 온도와 수냉개시 온도 및 소재의 화학성분으로 제조공정간에 위치한 용접섬부 열처리기(on line seam annealer)는 통상의 열처리에서의 전체가열과는 달리 이송되는 용접섬부를 따라 외면에서 유도가열 시키므로 가열속도가 빠르고 강관의 두께 방향으로 온도구배가 크게 된다. 또한 국부가 열이므로 냉각속도가 빠르다는 특징이 있다. 열처리는 온도에 따라 Fe-C 상평형도상 Ac₁점(hypoeutectoid 구간에서 α→γ 온도) 이상의 온도로 가열하여 연화와 함께 조직을 개선하는 풀림처리(annealing)와 Ac₁점 이하의 온도에서 연화를 목적으로 한 저온 뜨임처리(tempering)의 2종류로 분류된다. 그러므로 통상 적용되는 열처리 온도는 용접부 내면온도가 Ac₁점 이상으로 되도록 전 두께(완전 열침투깊이)에 걸쳐 풀림처리의 조건을 만족하고 동시에 용접부 외면온도의 과열로 인해 조대결정립이 생성되어 용접부 취화 현상이 발생치 않도록 하는 온도범위에 있도록 요구된다. 열처리온도와 재질의 인성을 나타내는 연성-취성 전이온도와의 상관관계에 따라 확인된 적정온도 범위⁴⁾는 900-1000℃였다. 수냉개시온도의 경우 개시온도가 높게 되면 Bainite 조직의 생성으로 인해 인성을 저하시키기에 500℃ 부근 이하에서 실시되고 있다. 소재에 있어서 탄소당량 0.2% 정도의 재료에서는 용접한 상태에서도 용접부 경도가 200Hv 이하로 조직도 Ferrite와 미세한 Pearlite로 구성되어 실용상 문제는 없어보이나 고탄소 당량의 재료로 갈수록 용접부 경화가 크고 조직도 Ferrite의 석출량은 적으며 중간조직으로 Martensite도 발견되는데 이것을 Ac₁점 이상의

온도에서 풀림처리를 행하면 경도는 모재와 비슷하게 되고 조직도 개선되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 씬 아닐링이 필요한 항복강도 40kg/mm² 이상의 두께가 서로 다른 고장력 강재를 사용해 조관성형 및 용접후 용접섬부를 열처리한 시편들의 용접부에서의 열처리특성을 파악키위해 용접 및 열처리를 전후해 용접부의 강도와 인성의 변화가 클것으로 예상되는 항복강도 50kg/mm²급, 두께 9.6mm의 강대와 후속 용접섬부에서 가열후 냉각조건별로 나타나는 열처리특성을 파악키위해 항복강도 40kg/mm²급, 두께 14.3mm의 강대를 사용해 실시한 용접부 재현열처리 시험을 통해 소재의 물성과 관련된 씬열처리 효과와 문제점 그리고 적정한 열처리 조건을 파악하고 외면온도, 출력, 전압, 주파수, 소재의 연속상변화 특성 등을 포함한 유도가열 열처리 기술과 관련된 두께별 적정열처리 조건의 파악과 함께 조관중 유도가열에 의한 열처리시 가열대에서 발생된 유도자장이 철강소재로 유입되면서 상호작용에 의해 생긴 전열변환의 범위 즉 열침투깊이와 관련된 유도가열 열처리기술에 대해 분석코자 했다.

2. 실험 방법

2.1 용접부 특성시험

고강도 라인파이프용 강관용접부 특성분석과 관련된 저탄소당량의 항복강도 50kg/mm²급, 9.6mm 두께의 열연강대를 Fig. 1과 같은 ERW 조관라인에서 용접 및 열처리를 실시한 후 화학성분 분석, 경도 및 조직관찰, 모재 및 용접부인장, 그리고 충격시편들을 채취해 시험을 실시했다. 강대 물성치와 적용한 용접조건이 Table 1과 Table 2에 각각 나타나있다. 열처리조건은 온도 1100℃에서 열처리후 공냉이었다.

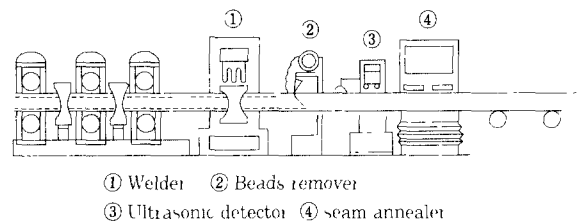


Fig. 1 ERW pipe forming line

Table 1. 50kg/mm² yield strength hot coil properties

Strength			Chemical composition(wt %)				
Y P(kg/mm ²)	T S(kg/mm ²)	EL(%)	C	Si	Mn	P	S
51.9	62.3	34	0.07	0.19	1.40	0.015	0.003

Table 2. Welding condition(50kg/mm² yield strength, 9 6mm thick hot coil)

Contents	plate1	plate2
Voltage	13 1(KV)	13 6(KV)
Current	9 8(A)	14 2(A)
Speed	13 44~13 58 MPM	

화학성분 분석에서 모재의 화학성분 분석후 스펙트럼로미터 분석기와 주사전자현미경 및 전자회절 분석기를 사용 ERW 용접섬부의 용착부 화학성분의 평균 조성분석과 용착부 개재물에 대한 성분 및 성분분포에 대한 분석을 실시했다. 경도 및 조직관찰은 모재 및 용접부에 대한 비커스(Hv₂) 경도시험과 함께 조직관찰을 X9 및 X400 배율로 관찰했다 인장시험은 모재 및 용접부에 대한 시험을 압연방향에 대해 종 및 횡방향으로 실시했다 충격시험은 모재 및 용착부 그리고 열영향부에 대해서 0℃, -30℃, -45℃, -60℃에서 행해졌으며 시험 크기는 1/2 sub size로 가공해 사용했다 상기 각 시험편의 채취부위를 Fig 2에 도시하였다

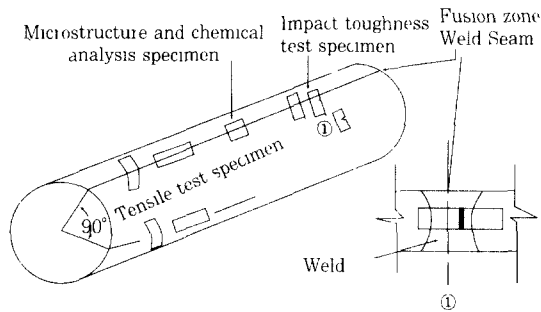


Fig. 2 Test specimen cut-off sites on pipe

2.2 열처리 특성시험

열처리 특성분석과 관련해서는 저탄소당량의 40kg/mm²급, 14.3mm 두께의 열연강대를 사용 조관 및 용접후 용접섬부를 중심으로하여 열처리되지않은 60mm×30mm×14.3mm의 용접시편을 채취하여 시험실 열처리로에서 조관라인 상에있는 씬열처리기에서 하고있는 열처리 상태를 재현할 수 있도록 여러 조건별로 열처리시험을 실시했다. 재현열처리 시험후 조건별로 시험의 용접부 경도시험과 미세조직을 관찰했다 이와 함께 조건별로 용착부 충격인성 시험을 0℃에서 실시했다 40kg/mm² 급 열연강대의 화학성분과 적용용접조건이 각각 Table 3과 Table 4에 나타나있다

재현 열처리 시험방법 및 조건은 Fig 3에서 보여지는 것과 같이 조관라인상에 있는 씬열처리기에서 열처

Table 3. Chemical composition of 40kg/mm² yield strength hot coil

Contents	C	Si	Mn	P	S	Cb	V	Ti	Nb
40kg/mm ² hot coil	0 07	0 20	1 20	0 013	0 003	-	-	-	0 039

Table 4. Welding condition(40kg/mm² yield strength, 14 3mm thick hot coil)

Contents	plate1	plate2
Voltage	13 5(KV)	15(KV)
Current	9(A)	14(A)
Speed	12 5~13 2 MPM	

리시의 냉각속도를 파악하고 채취된 열처리 되지 않은 용접시편을 로온도 800℃, 900℃, 1000℃에서 각온도별로 급냉, 공냉하다 450℃에서 수냉, 공냉하다 250℃에서 수냉, 공냉의 방법으로 로내 가열 및 파악된 냉각속도와 유사하게 냉각하여 재현열처리된 시편의 용착부와 열영향부를 열처리되지않은 시편과 비교 분석하여 적정 열처리 조건과 냉각방법을 찾고자 하였다 로 온도유지 시간은 10분이었다 열처리시 적용된 씬열처리기중 최대용량은 650kw, 1kv, 1kHz이며 사용시에는 400 - 450kw, 0.7kv, 0.9kHz 었다.

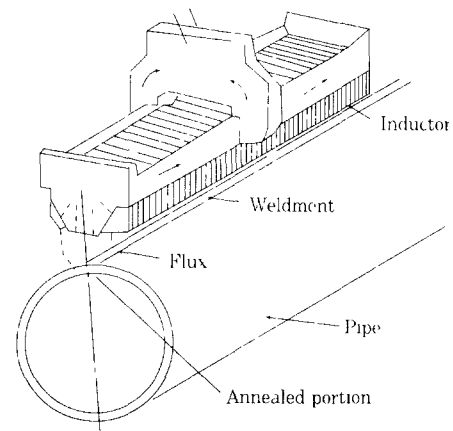


Fig. 3 Seam annealer

2.3 열처리 조건

고장도 저탄소 구조용 강관 15 4mm 두께의 열연강대를 사용 씬열처리 조건을 1차 경우 Fig 4에 나타나 있는 1, 2, 3 인덕터에서 각각 출력 550-600kw에 0 85-0 9 kv, 출력 450-500kw에 0 7-0 75 kv, 출력 250kw에 0 4-0.45 kv, 표면온도 1000℃, 총출력 1250-1300kw, 0 9kHz로 그리고 2차에선 1, 2,

3 인덕터에 각각 출력 450-500kw에 0.7-0.75kv, 출력 250-300kw에 0.45-0.5kv, 출력 200-250kw에 0.4-0.45kv, 표면온도 850℃, 총출력 950-1000kw, 0.9kHz로 다르게 적용하며 열처리 침투깊이를 조직관찰 및 경도분석을 통해 파악하였다. 표면온도는 가열대 출측에서 Pyrometer로 측정하여 조절했다.

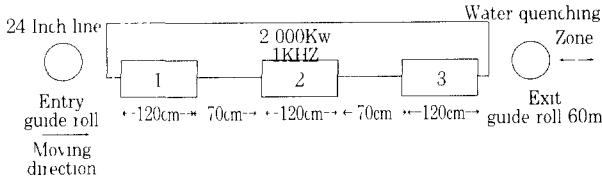


Fig. 4 Inductor arrangement of seam annealer

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접부 특성시험

Photo 1에서 보이는 용착부 조직의 석출물 들은 Fig. 5에 나타나있듯 Mn 및 Si 화합물로서 스퀴즈(압착)물에 의한 압착시 미처 빠져 나가지 못한 부분들로 추정된다. 모재부에 대한 성분 분석 결과가 Table 5에 보여진다. Table 1의 소재화학성분 분석결과와 비교해보면 큰차이가 없는 것으로 판단된다.

모재 및 최대출력 400kw, 3kHz의 씬열처리기로 출력 300-400kw와 0.3-0.35kv, 2-2.5kHz를 적용하여 용접부 외면에서 측정된 온도가 1100℃까지 가열 후 공냉한 열처리후의 용접부 경도 측정 결과가 Fig. 6 (a), (b)에서 각각 보여진다. Fig. 6에서 보듯 용착부 및 열영향부에서의 경도값은 열처리 효과가 적은 강대 아래쪽 표면부위가 높음을 알 수 있다. 모재역시 강관 제조시 가공경화가 큰 강대 표피쪽의 경도가 높음을 알 수 있다. 미세조직 관찰에서도 비교적 높은

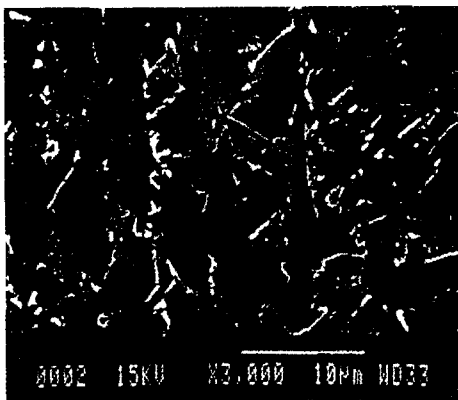


Photo 1. Scanning electron microscopy of inclusion in fusion zone

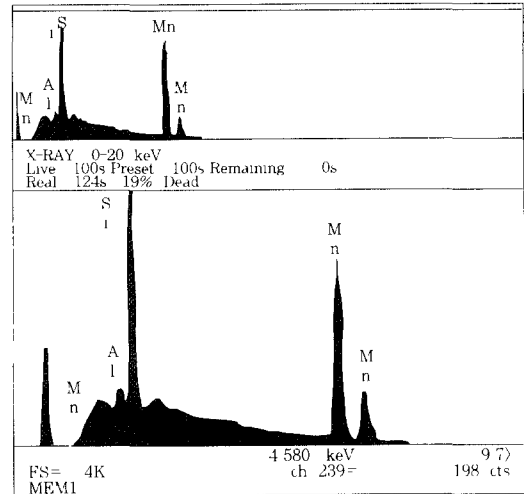


Fig. 5 Chemical analysis of inclusion in fusion zone

Table 5. Result of chemical analysis(wt %) for 50kg/mm² yield strength hot coil

C	Si	Mn	P	S
0.0670	0.1732	1.415	0.0168	0.0086

열처리 온도에서 집중적으로 열처리를 받은 위쪽 용접부 부분 경우 입도가 모재보다도 조대해져 있고 열처리 전 형성되었던 경화조직인 마텐사이트나 베이나이트 조직의 많은 부분이 조대한 페라이트나 퍼일라이트 조직으로 변화됐음을 열처리 후 냉각속도, 10-20℃/s 정도와 Fig. 7의 연속냉각 상태도(CCT diagram)로 판단이 가능하다. 열처리 효과가 덜한 아래쪽 용접부의 경우 열처리전 ERW 용접시 통상적으로 과열되는 전극을 냉각시키기위해 뿌리는 냉각수에 의한 급냉된 용접부 조직으로 인해 입도가 모재에 비해 미세하며 경화조직이 잔존하는 것으로 판단된다.

모재 및 용접부 종방향과 횡방향 인장강도 시험결과를 Table 6에 나타내었다. 용착부는 9.6mm 두께의 항복강도 50kg/mm²급의 강대가 전기저항 가열에 의해 용융 후 급냉응고된 것을 열처리한 부분으로 용접부 횡방향 인장시험 결과 열영향부와 모재의 경계에서 판단

213×	216×	221×	218>
200×	198×	192×	199>
212×	215×	216×	213>

(a) Base metal

226×	239×	228×	215×	226×	236×	232×
212×	217×	215×	210×	217×	217×	229×
241×	241×	245×	234×	229×	234×	225×

(b) Weld metal

Fig. 6 Hardness of base metal and weld metal

Table 6. Mechanical properties of 50kg/mm² yield strength hot coil

Contents	PIPE Cut-off site	Direction of cut-off specimen	T S (kg/mm ²)	Y P (kg/mm ²)	E L (%)
Tension test specimen	Head of coil	Roll direction	61.7	58.2	35.2
		Cross direction	61.5	56.3	34.7
	Head of pipe	Roll direction	61.9	56.9	31.6
		Cross direction	62.4	57.4	34.2
	Weld	Roll direction	65.2	61.3	34.9
		Cross direction	66.7	60	26.3

Table 7. Impact toughness value for 50kg/mm² yield strength linepipe

10×10×55 ×1.5 (ABS)

Notch site	Temp	Absorption energy(J)		
		1st	2nd	Ave
FZ	-60℃	26	30	28
	-45℃	96	33	65
	-30℃	72	51	62
	0℃	101	93	97
HAZ	-60℃	77	27	52
	-45℃	137	66	101
	-30℃	114	120	117
	0℃	123	150	137
BM	-60℃	114	113	113
	-45℃	126	116	121
	-30℃	129	116	122
	0℃	132	150	141

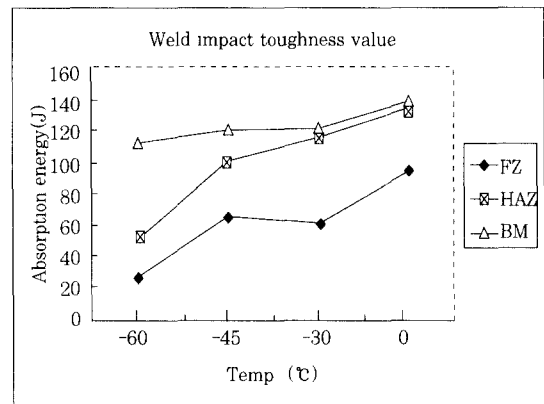


Fig. 8 Graph of impact toughness for 50kg/mm² yield strength linepipe

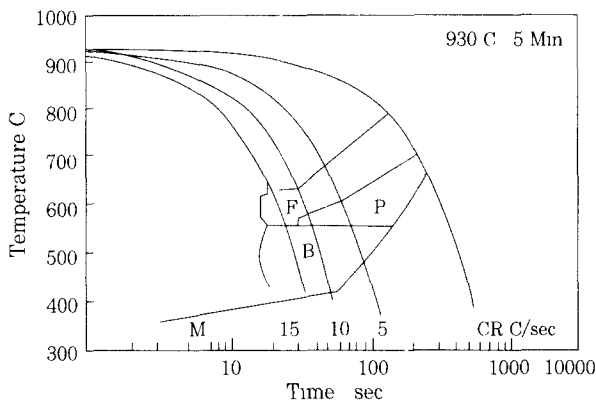


Fig. 7 CCT diagram of 50kg/mm² yield strength linepipe steel

이 발생했다. 모재 인장 시험결과 소재상태에 비해 조관후 종방향 강도 변화는 거의 없으나 횡방향 경우 2-3kg/mm² 정도의 강도값 저하가 발생했다. 그리고 인장강도 대비 항복강도의 비율은 90% 정도였다. 모재, 열영향부 및 용착부에 대한 온도별 충격인성값과 변화 추이가 Table 7와 Fig. 8에서 보여진다. 상온에서 모재나 열영향부에 비해 용착부 인성저하가 크게 나타났다. 이것은 화학성분 분석 결과에서 보여지듯이 석출

물의 내재와 상부의 조대한 취화조직 부위 및 하부의 경화 조직부위의 잔존이 주 원인으로 판단된다. 용착부의 충격값 저하를 막기 위해서는 용접중 발생 함입되어 인성을 저하시키는 산화개재물⁷⁾이 충분히 제거되 용착부에 남아있지 않도록 용융압출량의 조절⁸⁾이 필요하다.

3. 2 열처리 특성시험

조관라인상에서 Table 4의 용접조건에 따라 용접후 씬열처리에서 800℃ 정도로 용접씬부를 가열해 열처리한 후의 냉각속도를 파악해본 결과 출축에서부터 500℃까지의 평균 냉각속도는 25℃/s 정도였다. 열처리 첫 번째 인덕터 하나만 가동한후 출축에서부터 1m 간격으로 냉각속도를 측정된 결과가 Table 8에서 보여진다. 그리고 열처리 전의 용접씬부로부터 채취해서 로를 이용해 재현 열처리한 시편에 대해 측정된 경도값을 나타내는 Table 9에서 보듯이 용접부에 대해 적용되는 냉각방법에 따른 경도 변화를 살펴보면 씬열처리 통과후 급냉하는 것은 열처리하지 않은 용접부에 비해 약 7%정도의 경도 저하를 보여주고

Table 8. Cooling rate after seam annealing

Measured point	Measured temp	Cooling rate
After annealer	750℃	
1M	630℃	26.1℃/S
2M	510℃	26.1℃/S
3M	450℃	13.0℃/S
4M	410℃	8.8℃/S

Table 9. Hardness value of weld according to cooling method

Cooling at 800℃

Holding time in furnace 10minutes

Contents		Quenching	Air cooling then Quenching at 450℃	Air cooling then Quenching at 250℃	Air cooling	As weld	
specimen		A	B	C	D	N	
Hardness	FZ	MAX	268	237	274	244	336
		MIN	242	230	224	224	230
		AVE	254	233.7	241	236	268
	HAZ	MAX	268	217	278	249	304
		MIN	242	204	217	217	234
		AVE	251.7	213	240	230	262
	B.M	MAX	246	226	219	226	235
		MIN	219	203	204	209	213
		AVE	232	218	213.7	218	226

Cooling at 900℃

Contents		Quenching	Air cooling then Quenching at 450℃	Air cooling then Quenching at 250℃	Air cooling	As weld	
specimen		E	F	G	H	N	
Hardness	FZ	MAX	244	229	242	221	336
		MIN	223	202	212	199	230
		AVE	233	216	223	209	268
	HAZ	MAX	241	219	218	222	304
		MIN	221	191	204	199	234
		AVE	233	204	212	207	262
	B.M	MAX	252	224	219	214	235
		MIN	230	209	206	202	213
		AVE	242.5	215	212.7	207	226

Cooling at 1000℃

Contents		Quenching	Air cooling then Quenching at 450℃	Air cooling then Quenching at 250℃	Air cooling	As weld	
specimen		I	J	K	M	N	
Hardness	FZ	MAX	266	210	236	165	336
		MIN	257	188	232	144	230
		AVE	262	201	234	157	268
	HAZ	MAX	280	189	227	165	304
		MIN	228	174	210	156	234
		AVE	252	184	216.7	160.7	262
	B.M	MAX	241	180	239	173	235
		MIN	207	164	204	152	213
		AVE	225	172	217.7	161	226

있다 대기중에 방냉하다가 450℃ 이하에서 수냉하는 것은 급냉하는 것보다 10% 정도가 저하했다. 대기중에 방냉하다가 수냉하였을때는 열처리하지않은 용접부에 비해서 20% 정도의 경도가 저하하고 공냉하였을 때는 25% 저하하고 있음을 알수있다. 이는 용착부 인성이 씬열처리후에 냉각속도의 증가와 함께 낮아질 가능성이 있다는 것을 의미한다 열처리온도에 대한 용착부, 열영향부, 모재의 경도 분포를 보면 대체적으로 온도상승에 따라 경도가 저하하고 있음을 알수 있다. Photo 2에 보여지는 열처리되지않은 as weld 용착부에 대한 미세조직을 살펴보면 용착부는 acicular 형태의 입도 크기가 작으나 경화조직의 발생으로 Table 9 FZ의 급냉된 quenching 조직과 as weld 조직의 경도값 비교에서 보여지듯 as weld 용착부의 경도가 같거나 높게 나타났다 시험재의 탄소함량이 0.07% 정도로 급냉조건에서 페라이트나 퍼얼라이트만 석출되기 어려우며 변태되지 않은 오스테나이트로부터 급냉할 때 생기는 마텐사이트 또는 상부 베이나이트의 생성으로 인한 취화조직의 혼재로 인성이 떨어지는 것으로 생각된다. 열영향부는 용착부와 비슷한 미세조직을 보이며 용착부의 미세조직에 비해 acicular 형태가 덜 미세화되고 인성 향상에 별 효과가 없는 걸로 추측된다 Photo 3,4,5에 나타나있는 열처리 온도의 변화에 따른 미세조직을 본다면 온도가 증가함에 따라 용착부는 경화조직을 포함한 acicular 형태에서 등방결정립 형태로 화하며 경도의 저감 즉

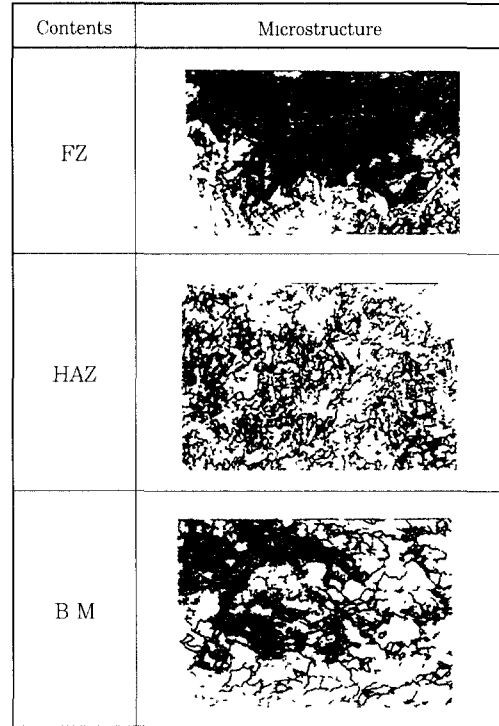


Photo 2. As weld microstructure (X400)

인성이 점차 향상되고 있음을 나타냈다

냉각방법에 따른 용착부의 인성에 대해 살펴보면 용접섬부를 가열한 후 바로 수냉하지않고 공냉 도중에 수냉한 시편의 용착부 인성은 수냉 온도에 의존하는 것으로 판단된다. 용착부의 충격인성시험 결과가 Fig.

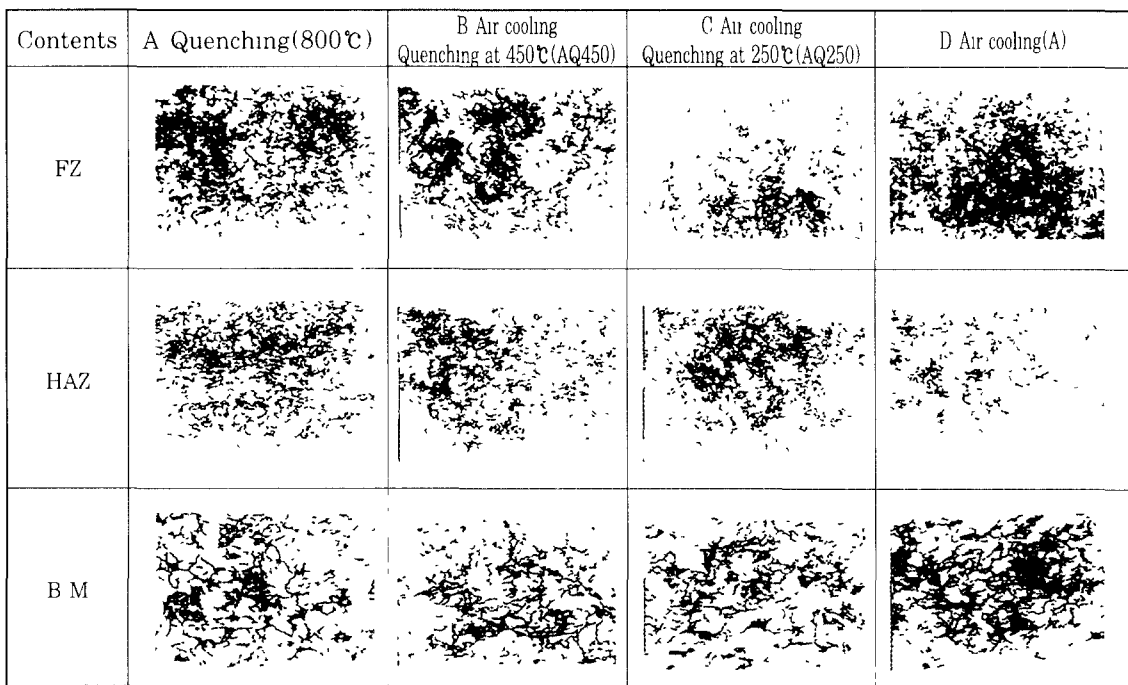


Photo 3. Weld microstructure after heat treatment at 800℃ (X400)

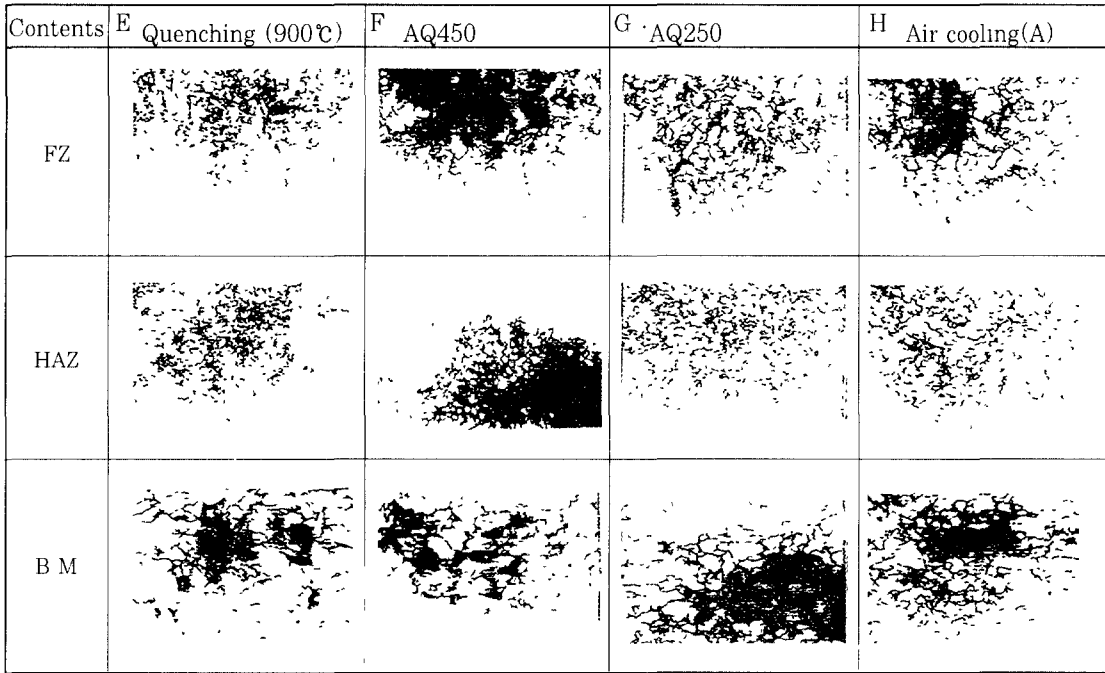


Photo 4. Weld microstructure after heat treatment at 900℃ (X400)

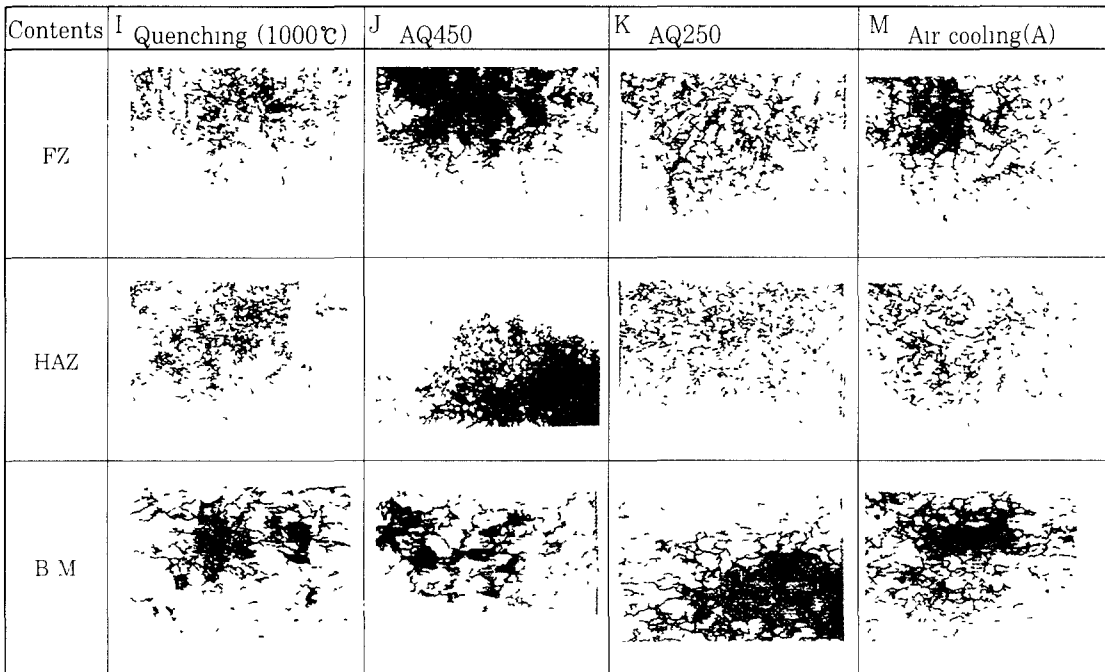


Photo 5. Weld microstructure after heat treatment at 1000℃ (X400)

9와 Table. 10에서 보여진다 Fig 9에서 보여지듯 가열한 후에 공냉하다 450℃에서 수냉한 시편들의 충격인성 값은 1000℃로 가열한 시편J에서 충격인성값이 제일 크게 나왔다. 그리고 공냉하다 250℃에서 수냉한 시편들의 경우에는 900℃로 가열한 시편G에서 충격인성값이 크게 나타났다 용접섬부를 가열한 후 즉시 수냉한 시편들의 용착부 인성값은 800℃로 가열

한 시편A에서 제일 큰 충격인성값을 보였다. 그러나 용접섬부를 가열한 후 그대로 대기중에서 공냉을 상온까지한 시편들의 경우 타 냉각 방법에서 나타나는 것과는 달리 가열온도에 따른 충격인성값의 급격한 차이는 없었다 그리고 이들 공냉을 상온까지한 시편들의 0℃ 용착부 충격인성값은 1000℃로 가열후 공냉한 시편M에서 항복강도 50kg/mm²급 9.6mm 두께의 강판

용접섬부를 1100℃로 가열후 공냉한 용착부의 0℃ 충격인성값에 비해 약간 상승된 값을 보인 반면 800℃, 900℃로 가열후 공냉한 시편D와 H에서는 같거나 적은 충격인성값을 보였다. 가열후 바로 수냉한 경우는 가열온도가 800℃로 페라이트에서 오스테나이트로의 상변화가 충분히 진행될 수 없는 온도를 제외한 900℃, 1000℃로 가열 경우 특히 1000℃로 가열한 시편 I에서는 급냉경화 조직의 석출로 인성값의 저하가 나타나는것으로 판단되며 가열후 바로 수냉하지 않고 공냉중 수냉을 한 경우는 수냉개시 온도가 적절해 인성 증가가 나타나는 것으로 추정된다.

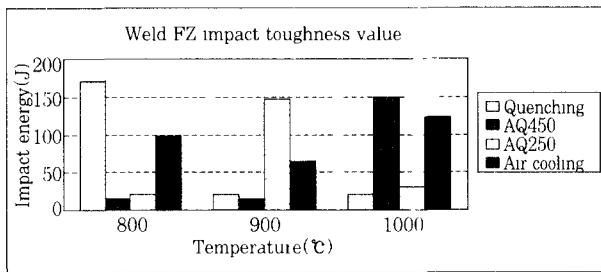


Fig. 9 Graph of impact toughness value for 40kg/mm² yield strength seam annealed specimen

Table 10. Impact toughness test result

Specimen	Impact value	
	Absorption energy(Joule)	Shear area(%)
A	170	100
B	12	0
C	18	0
D	98	100
E	18	0
F	13	0
G	148	100
H	62	50
I	18	0
J	150	80
K	28	25
M	122	100
N	100	100

3. 3 열처리 기술

열처리 침투깊이는 모재와 열처리부의 조직 또는 입도의 차가 나타나는 열혼에의해 구분되므로써 판단되는데 열혼은 철강재료의 가열온도가 상변화 온도에 도

달시 변화된 상에의한 흔적이 열처리부 조직에 나타나 상대적으로 모재 조직과의 차이로 구분이 가능케된다. 따라서 이러한 상변화로 인해 기존 경화조직이 사라지고 새로운 조직이 형성됨으로 열처리부의 물성치인 연성, 인성, 내부식성 등이 개선된다. 열처리부 조직의 경도 및 입도는 열처리부 철강재료의 열처리온도 및 열처리시간과 소재내의 냉각속도에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉 경도는 냉각속도에 의해 그리고 입도는 최고로 도달한 열처리 온도에 의한 영향이 큰 것으로 생각된다. 열처리부 인성은 경도와 마찬가지로 소재내의 냉각속도에 의한 영향외에 외부대기중에서 강제냉각시에 냉각개시온도에 의해 영향을 받게 된다는 것이 앞절의 열처리 특성시험의 결과에서도 보여 주고 있다.

침투깊이는 씬열처리기 제원인 출력, 전압, 전류, 주파수, 및 배선행태등과 관련 영향을 받고 소재특성에 따라 변화가있는 것으로 판단된다 특히 전압 및 주파수와 소재별 특성인 CCT diagram의 영향이 큰 것으로 나타났다 강관 두께별 열혼 침투깊이와 씬열처리의 가열 열처리 조건의 비교는 용접부 특성시험에서 50kg/mm²급 9 6mm 두께의 강관 용접섬부 열처리에 적용된 외면의 측정온도 1100℃에서 제어된 가열 조건 출력 300-400kw에 0.3-0.35kv, 2-2.5kHz와 15 4mm 두께의 씬열처리시 첫 번째 가열대로 부터 적용된 가열조건인 외면온도 1000℃에서 제어된 출력 550-600kw에 0.85-0.9kv, 0.9kHz와의 비교를 통해 씬열처리의 적용 주파수에 반비례하여 열혼 침투깊이가 나타난 반면 적용출력과 외면의 온도와의 비교를 통해 주파수의 증가에 따른 가열속도의 증가를 파악할 수 있었다. 이와함께 열혼의 침투깊이가 적용 전압의 증가에 비례해 커진다는 것으로 판단됐다.

열혼의 조직분석과 관련해 마크로 분석시 가시적으로 명확히 나타나는 열혼선 외 구분이 뚜렷하지 않은 열혼선의 경우는 소재두께가 두꺼울수록 냉각속도가 빨라지므로 가열대별로 열처리가 진행됨에 따라 두께 방향 깊이별로 냉각 및 가열속도와 가열온도 범위의 차가 생기게되 소재내에서 열처리부의 두께 깊이별로 최고로 높이 도달된 온도와 지속되는 시간의 차이가 발생해 가열대별로 생성되는 열혼의 침투깊이에서도 선명성의 차이가 나타나는 것으로 판단되는데 통상 첫 번째 가열대 통과시 발생된 열혼은 선명치않게 나타나므로 마이크로 분석에 의한 조직형태와 함께 경도 측정도 병행해야 구분이 가능한 것으로 생각된다 이와 같은 것이 Fig 10과 11 그리고 Photo 6 및 7에서 보여지고있다. 통상 2번째, 3번째 가열대와 같이 뒤로

갈수록 열침투된 영역에서 반복 가열되어지는 가열부의 온도 및 온도지속 시간 즉 상변화 시간이 각각 높고 길어지는 것으로 Fig 12^b에서 보여 주고 있다. Fig 10에서 보여지는 것처럼 15.4mm 두께를 열처리한 온도 1000℃, 전압 0.85-0.9kv의 1차 경우 열흔이 3단계로 Fig 10(a)에서 온도 850℃, 전압 0.7 - 0.75kv의 2차 경우 2단계로 Fig 10(b)에서 나타나 적용 열처리 출력 및 가열대별로 열흔의 침투깊이와 선명성에 차이가 드러나는 예를 보여 주고있다 Fig. 11(b)의 850℃에서 씌열처리한 용접부의 경도 분석

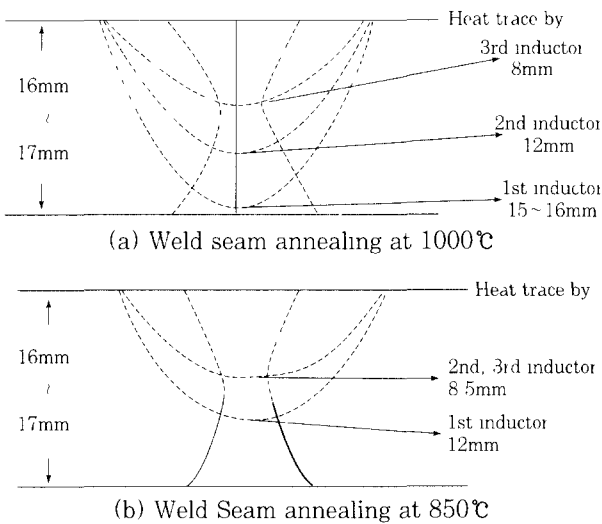


Fig. 10 Penetration depth of heat trace

에서도 열흔이 미치지 못하는 두께 방향 용접부 끝단 부위에서 경도가 Fig 11(a)의 1000℃에 비해 193Hv에서 223Hv로 상승되는 것을 보여주고 있다. 또한 열처리부의 열처리 유무확인이 미세조직분석인 Photo 6과 7의 5,6에서 보여지는 것과 같은 침상조직의 구상화인 등방결정화의 유무 및 결정립 성장정도에 의해 판단이 가능한 것으로 생각된다

출력 또는 전압 및 주파수 변화에 의한 입열량 즉 침투깊이 변화와 관련해 Table 11과 Table 11 아래

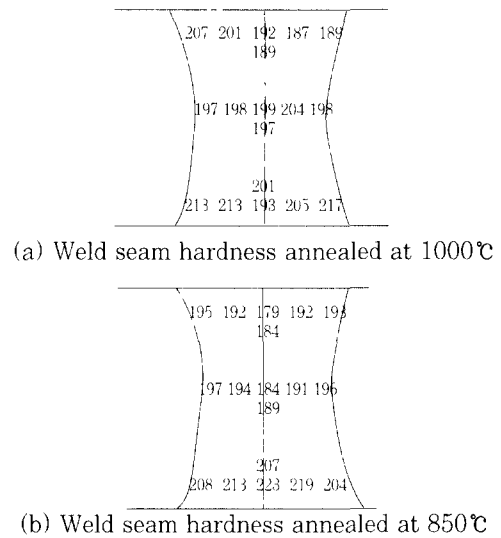


Fig. 11 Micro vickers hardness of annealed weld seam

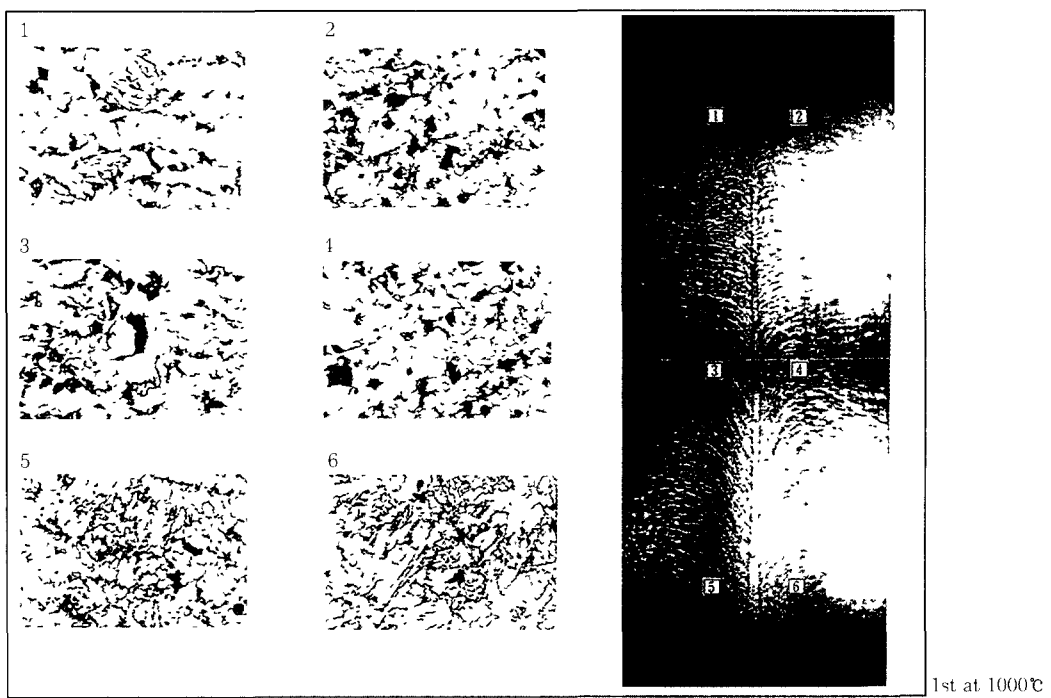


Photo 6. Macro and microstructure of seam annealed weld 1

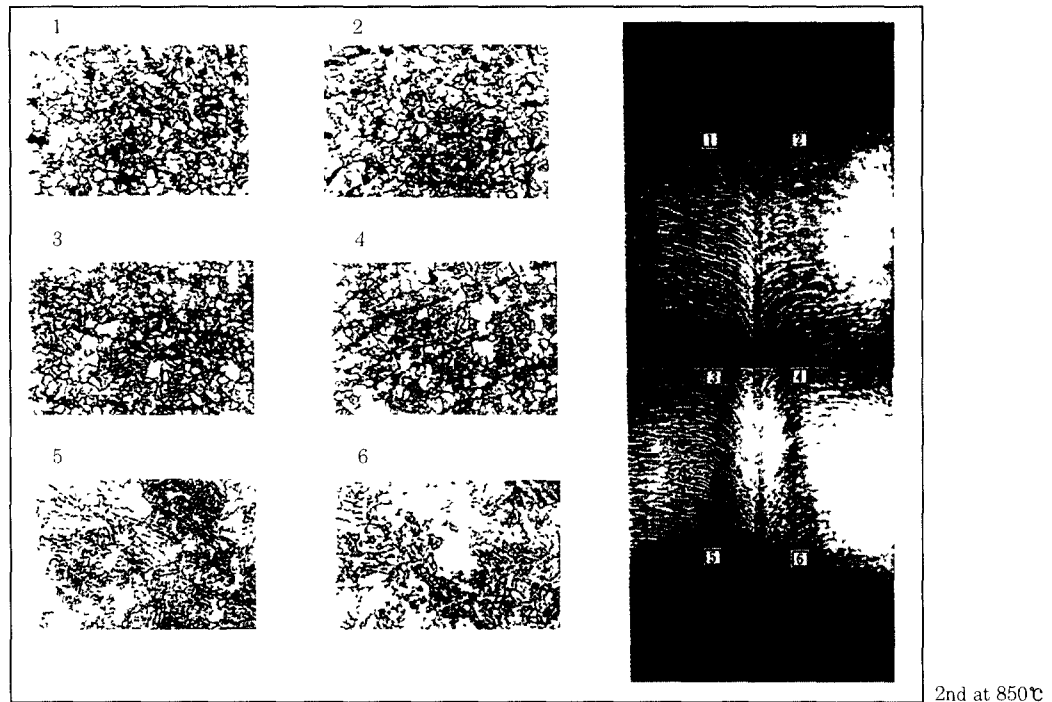


Photo 7. Macro and microstructure of seam annealed weld 2

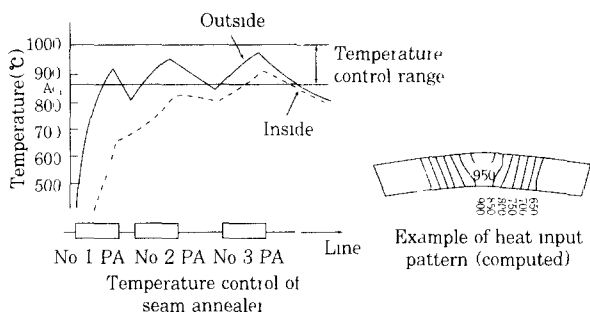


Fig. 12 Temperature control of inner and outer surface along weld seam by seam annealer

에서 보여지는 식에 나타나 있듯이 씬열처리의 가열 대에 의한 열처리시 저탄소강 소재 내에서 경험하는 가열후 냉각시의 상변화는 CCT diagram으로 판단이 가능하다 예로 저탄소당량 소재의 CCT diagram인 Fig 7에서 나타난 연속냉각 상변화의 냉각속도인 10-20 °C/s 구간에서 상변화온도 범위인 400-650°C 에서 씬열처리후 발생되는 저탄소강의 상변화가 ferrite에서 pearlite 및 ferrite에서 bainite로 550-600°C사이에서 일어나므로 상온철강소재에서 전압 kv당 0.8cm(8mm)의 침투깊이와 절대온도에서 저탄소 철강소재의 응고온도구간 대비 상변화온도구간의 비율을 곱함으로써 저탄소강소재에 대한 열혼 침투깊이 관련식이 Table 11 아래에서와 같이 구해졌다 이식

에서 전압 침투깊이에 의한 열혼 침투깊이 식과 이동 중인 용접섬부의 열혼 침투깊이 식을 구분한 것은 인 가된 전압에 의한 침투깊이에서 부터 발생하여 증가되는 열량에 의한 열혼의 침투깊이와 용접섬부의 이동속도 감소로 증가된 가열시간으로 말미암아 전압 침투깊이에 크게 영향을 받지않고 전압 침투깊이에 비해 상대적으로 속도에 영향을 받아 증가되는 열량에 의한 열혼의 확산 범위를 구분함으로써 조관중 필요한 강판 이동속도 또는 씬열처리의 적용 주파수범위에 의해 발생된 가열량의 증가에 따른 용접섬부 외면에서의 온도가 증가되는 것을 제한하고 제한된 이 외면온도 내에서 열처리가 필요한 용접섬부 두께 만큼의 열혼 침투깊이 증가를 위해 가열대로 부터 가해져야 하는 출력전압의 조절은 씬열처리 설비상 조절해야 할 문제로 판단되기 때문이다

4. 결 론

저탄소 고장력강재를 사용해 조관성형을 한다음 전기저항용접과 이어 용접섬부에 대한 on-line 열처리를 실시해 용접부 및 용접부의 열처리특성 그리고 열처리 침투깊이와 관련한 열처리 기술에 대해 시험고찰한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 용접부 인성증가를 위해 적용한 용접섬부의 열처리에 의해서도 용접부는 열영향부에 비해 개선 되지않

Table 11. Penetration depth of current according to frequency(mm)

Heating matl's and temp		Frequency(Hz)					
		50	500	1,000	3,000	10,000	400,000
Steel	at Room temp	3.2	1.1	0.8	0.4	0.2	0.0
	at 1200°C	66.0	23.0	16.2	9.5	5.2	0.8
	at Melting temp	91.0	31.8	22.5	13.0	7.1	1.0

*Equation for penetration depth of heat trace(heat trace penetration depth based on voltage penetration depth) $\text{penetration depth(mm)} = 17(\text{mm/kv}) \times \text{voltage(kv)}$

*Equation for penetration depth of heat trace(heat trace penetration depth based on voltage penetration depth with moving speed) $\text{penetration depth(mm)} = T_m(^{\circ}\text{K})/T_t(^{\circ}\text{K}) \times 8\text{mm/kv} \times \text{voltage(kv)} \times 9.48 \times f(\text{kHz}) \times L(\text{m}) \div S(\text{m/min})$

T_m melting temperature

T_t transformation temperature on cooling

f frequency of inductor

L length of inductor

S moving speed of weld seam

은 채 취약부로 나타났다. 이에따라 용착부 인성개선은 용접시 용융산화물 또는 석출물이 용착부에 내재되지 않도록 용융배출량의 조절이 선행된 다음 이와함께 열처리 방법의 개선으로 용접부 상하부에서 과열처리조직과 경화조직이 발생치 않도록 해야될 것으로 판단된다

2) 후속 용접섬부의 열처리 방법별 용착부의 인성을 비교한 결과 900°C 열처리 온도에서는 250°C에서 수냉을 그리고 1,000°C 열처리 온도에서는 450°C에서 수냉 또는 공냉이 적합한 것으로 나타났다 공정상 열처리부의 안정된 인성유지 및 열처리 방법상의 편리성을 감안할 경우 공냉도 가능한 것으로 판단된다

3) 두께 방향으로 열혼의 완전침투에의한 용접섬부의 적정열처리와 용접섬부의 외표면에서 발생할 수 있는 국부과열의 방지를 위해 소재특성을 감안한 가열대의 출력을 적당히 배분해야하는데 첫번째 출력이 가장 크고 점차 작아지도록 안배 해야한다. 610mm외경에 15.4mm 두께의 강관 용접섬부 경우 이동속도 10-12M/분에 출력배분이 1번 가열대 600 - 650kw, 2번 가열대 450 - 500kw, 3번 가열대 200 - 250kw에 주파수 0.9 - 1kHz 그리고 출력전압으로는 1번 가열대 0.9 - 1.0kv, 2번 가열대 0.7 - 0.75kv, 3번 가열대 0.3 - 0.4kv가 적정한 씬열처리를 위한 출력배분으로 판단된다.

4) 유도가열에 의한 용접섬부의 열처리기술과 관련해 상평형도에 준한 풀림처리와 위에서 제기된 CCT diagram에 준한 풀림처리의 비교는 실제 냉각과정에

서 일어나는 상변화가 CCT와 유사 하다는 점에서 CCT에 근거해 소재의 용접섬부 열처리 유무를 판단하는 것이 현실적으로 적합 하나 열혼경계부에서 열처리되지 않은 부분의 잔존 가능성이 커 경도측정의 병행이 필요한 반면 상평형도에 근거해 용접섬부 외면의 열처리 온도가 A_{c3} 이상이란 기준만으로 용접섬부의 열처리 유무에 대한 판단은 유도가열에 의한 씬열처리 방법상 과한 기준으로 생각되며 또한 씬열처리시 두께 방향의 온도 파악이 어렵다는 점을 감안할 경우 비현실적인 기준으로 판단된다

참고 문헌

- 1 김 정석, 박 종우, 문 인기 대한금속학회지, 23권 (1985), p573-582
- 2 박 종우, 김 정석, 문 인기 : 대한금속학회지, 23권 (1985), p845-853
3. 小指軍夫, 廣木光雄 외 · 鐵と鋼, 69(1983), p269
4. 大獄降之 외 · 材料とプロセス, 2(1989), S 330
5. 新倉正和 외 鐵と鋼, 68(1982), S 1230
6. 下村降량, 居城三郎 외 · 日本鋼管技報, 116(1987), p25-32
- 7 高村登志博 외 · 鐵と鋼, 71(1985), S 1161
- 8 富永博友, 齊藤通生 외 : 鐵と鋼, 69(1983), p166