

제작을 고려한 고강도강재의 용접성능에 관한 연구

A Study on the Weld Performance of High Strength Steel considering the Fabrication

경 갑 수¹⁾ · 홍 성 욱²⁾ · 박 용 진³⁾
Kyung, Kab Soo · Hong, Sung Wook · Park, Yong Jin

요 약 : 강교량에서 사용강재의 고강도화에 의한 구조의 경량화, 합리화는 강교량의 제작 및 가설측면에서 강교량의 경제성을 부각시키고 있다. 이러한 추세에 따라서 향후 강교량 건설에 있어서 고강도강재의 적용사례는 지속적으로 증가할 전망이다. 따라서, 교량부재에 고강도강재를 적용하기 위해서는 강재의 제작작업에서 발생하는 다양한 요인, 예를 들면 용접에 의한 용접열, 부재의 절단 및 가공에 의한 변형경화 등과 같은 강재의 용접성 및 용접이음성능을 정확하게 평가하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 현재 국내에서 생산되고 있는 SM570, POSTEN60, POSTEN80의 조질 고강도강재를 대상으로 고강도강재의 용접에 따른 용접성 및 가공성을 조사하기 위해서 용접방법별로 최대경도시험 및 경사y형용접터짐시험을 실시하였으며, 또한, 용접이음부의 인장강도, 굽힘성, 흡수에너지 및 경도를 조사하기 위해서 일련의 용접이음시험을 실시하였다.

ABSTRACT : High-strength steel in steel bridges is the key to achieving cost-efficiency because it facilitates lightweight construction and rationalizes structure. The future of high-strength steel is bright, with its use projected to expand. As such, it is necessary to evaluate precisely various factors affecting the process of fabricating high-strength steel, i.e., welding heat, strain hardening, and weldability and performance of the welded joints. This study therefore performed the maximum hardness test and y-groove weld crack test using welding processes such as SAW, FCAW, and GMAW, in order to investigate the welding performance and characteristics of welded joints of high-strength steel produced in Korea such as SM570, POSTEN60, and POSTEN80. In addition, a series of welding tests was carried out to estimate the tensile strength, bending characteristics, absorbed energy, and hardness in welded joints.

핵심용어 : 고강도강재, 용접성능, 최대경도시험, 경사y형용접터짐시험, 흡수에너지

KEYWORDS : High Strength Steel, Weld Performance, Maximum Hardness Test, Y-Groove Weld Crack Test, Absorbed Energy

1. 서론

강재를 사용하여 교량부재를 제작하는 경우, 강교량 부재의 특성에 맞는 부재를 제작하기 위해서는 부재 제작과정에서 반드시 강재의 가공 및 용접 등의 작업이 수행된다.

이러한 일련의 제작작업에서 발생하는 여러 요인, 예를 들면 용접에 의한 용접열, 부재를 절단하고 구부리는 등의 가공에 의한 변형경화 등은 강재의 성질에 영향을 미치게 되어 강구조 부재의 품질관리에 영향을 미치게 된다.

따라서, 각종 시방서에서는 강구조 부재의 품질확보를 위해서 제작단계별로 준수하여야 할 시방규정을 제정하고 있다.^{(1)~(4)}

이들 시방규정에서는 용접구조용 강재를 비조질강(非調質鋼)인 SM400, SM490, SM490Y, SM520과 조질강(調質鋼)인 SM570으로 분류하고 있는데, 여기서, SM570 강재는 다른 SM강재와는 달리 담금질 및 뜨임의 열처리에 의해 강재의 강도 및 인성 등을 향상시킨 조질고강도강재이다.

이러한 조질고강도강재는 압연이나 열처리 등의 방법에 의해서 만들어지는 일반적인 비조질강재의 SM강재와는 달리 용접열에 더욱 민감한 성질을 갖고 있다.

따라서 설계기준에서는 조질고강도강재를 사용하는 경우 조질고강도강재의 성질을 유지시키기 위해서 시방규정을 더욱 엄격하게 규정하고 있다.

1) 정희원, 한국해양대학교 토목환경공학부 조교수, 공학박사

2) 정희원, 한림정보산업대학 토목과 조교수, 공학박사

3) 정희원, 전주공업대학 토목과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

그러나, 시방기준에서도 SM570 강재보다 더 높은 인장강도를 갖는 조질고강도강재, 예를 들면 POSTEN60(이하 PST60으로 표기), POSTEN80(이하 PST80으로 표기) 강재에 대해서는 아직 시방규정이 확립되어 있지 않아서 SM570 강재를 제외한 고강도강재의 활용화에 있어서 제약이 되고 있다.⁽¹⁾

따라서, 본 연구에서는 향후 강교량의 합리화 및 장대화에 있어서 그 사용이 불가피한 조질고강도강재를 대상으로 시공성을 고려하여 고강도강재의 용접에 따른 제특성을 조사하기 위해서 용접성 시험과 용접이음시험을 실시하고 고강도강재의 용접성능을 평가함으로써, 본 연구결과를 향후 건설되는 강교량에서 고강도강재를 적용하기 위한 기초자료로서 활용하고자 하였다.

2. 시험

2.1 용접성 시험

용접성 시험에서는 최고경도시험 및 경사 y형용접터짐시험을 실시해서 용접부의 성능특성을 조사하였는데, 그 내용으로는 두께가 각각 25mm, 50mm인 SM570 강재, PST60 강재, PST80 강재에 대하여 표 1에서 나타낸 바와 같은 용접성 시험을 실시하였다.

또한 시험편 제작에 사용된 조질 고강도강재의 물리적, 화학적 성질을 밀시트에 기초하여 정리하면 표 2 및 표 3과 같다.

표 1. 용접성시험 항목일람표

시험항목	시험편 수량						합계
	공시채별		채취 위치별	조건별		반복수	
	재질별	두께별		시험 온도	용접법		
최고경도시험	3	2	1	2	2	1	20
경사y형용접터짐시험	3	2	1	2	1	4	40

표 2. 조질고강도강재의 물리적 성질

강재	두께 (mm)	인장시험			충격시험		열처리
		항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	온도 (°C)	흡수에너지 (J)	
SM570	25	545	655	25	-5	274	Q&T
	50	522	625	28		290	Q&T
PST60	50	502	619	29	-5	289	Q&T
PST80	25	799	825	32	-20	249,257 263,256	Q&T
	50	768	823	37		-20	239,234 226,233

주) Q&T : Quenching & Tempering (담금질 & 뜨임)

또한, 시험편 제작에 사용한 용접재료의 물리적, 화학적 성질을 밀시트에 기초해서 표 4 및 표 5에서 나타내었다.

표 3. 조질 고강도강재의 화학성분

강종 / 화학성분	SM570		PST60	PST80	
	25mm	50mm	50mm	25mm	50mm
C	0.14	0.13	0.13	0.07	0.07
Si	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30
Mn	1.39	1.39	1.33	0.91	0.91
P	0.015	0.015	0.012	0.015	0.015
S	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004
SAL	-	-	0.031	-	-
Cr	-	-	0.02	0.45	0.45
Ni	-	-	0.02	0.97	0.97
Cu	-	-	-	0.02	0.02
V	-	-	0.038	0.038	0.038
Mo	-	-	0.13	0.45	0.45
B	-	-	-	0.0016	0.0016
Ceq	0.42	0.40	0.40	0.46	0.46

표 4. 용접재료의 물리적 성질

강재	용접 방법	직경 (mm)	인장시험			충격시험		비고 ^(주)
			항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	온도 (°C)	흡수에너지(J)	
SM570 PST60	FCAW	1.2	582	610	27.0	-30	43	Supercode81
	SAW	4.8	504	546	31.2	-29	57	S777MX×A3
PST80	GMAW	1.2	770	850	22.0	-20	120	MGS-80
	SAW	4.8	760	830	22.0	-20	150	PFH-80AK/ US-80LT

(주) 용접재료를 나타냄.

표 5. 용접재료의 화학성분

강종 / 화학성분	SM570, PST60		PST80	
	FCAW	SAW	GMAW	SAW
C	0.03	0.11	0.05	0.12
Si	0.35	0.02	0.44	0.12
Mn	1.12	1.95	1.35	2.04
P	0.013	0.014	0.006	0.005
S	0.017	0.012	0.001	0.001
SAL	-	-	-	-
Cr	0.03	-	0.19	0.04
Ni	1.05	-	2.64	2.58
Cu	-	0.08	0.23	0.12
V	0.02	-	-	-
Mo	0.10	-	0.50	0.72
B	-	-	-	-

용접성시험에서 사용한 시험체는 KS규격에 따라 제작하였는데, 최고경도시험에서 사용되는 시험편의 형상 및 시험방법은 KS B 0893, 경사 y형용접터짐시험에서 사용되는 시험편 형상 및 시험방법은 KS D 0870에 준해서 실시하였다.

용접방법은 최고경도시험의 경우 현재 강교량 제작시 가장 많이 사용되고 있는 FCAW(PST80은 GMAW), SAW를 이용하였으며, 경사 y형용접터짐시험에서는 시험체의 형상 및 용접법의 특성을 고려해서 SM570 및 PST60에 대해서는 FCAW, PST80에 대해서는 GMAW의 한가지 용접법에 대해서만 예열조건을 상온과 110~120℃로 달리해서 시험편을 제작하였다. 용접성시험을 위한 최고경도시험, 경사 y형용접터짐 시험편은 표 1과 같은 조건하에서 KS 규격에 준해서 그림 1 및 그림 2와 같은 형상으로 시험체를 제작하였다.

2.2 용접이음시험

용접이음시험에서는 3종류의 고강도강재 용접부를 대상으로 판두께, 용접법, 온도를 변수로 인장시험, 굽힘시험, 이음부 경도시험, 충격시험을 실시해서 용접부의 인장성질, 가공성, 흡수에너지 등을 조사하고 용접방법 및 사용조건에 따른 강재성질의 변화를 평가하였다. 용접이음시험을 위해서 표 6과 같은 조건하에서 시험편을 제작하고 시험을 실시하였다.

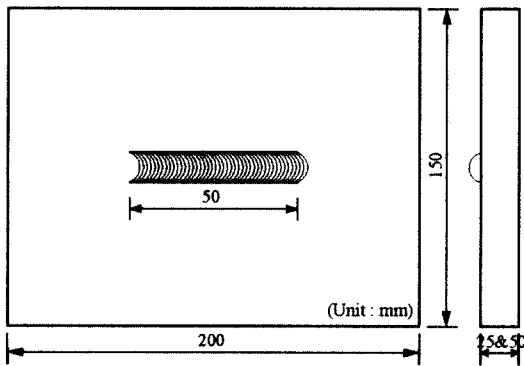


그림 1. 최고경도 시험체 형상

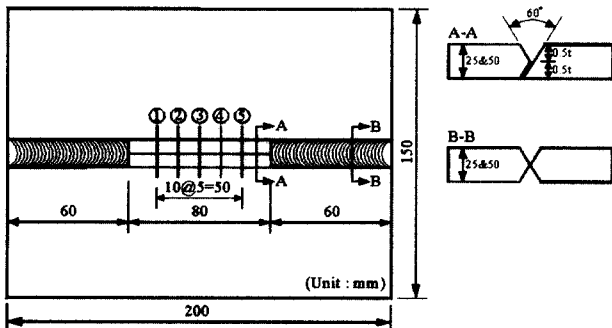


그림 2. 경사 y형용접터짐 시험체 형상

표 6. 용접이음시험 항목 일람표

시험항목	시험편 수량						
	공시체별		채취 위치별	조건별		반복수	합계
	재질별	두께별		시험온도	용접법		
인장시험	3	2	-	상온	2	2	20
굽힘시험	3	2	-	상온	2	4	40
경도시험	3	2	-	상온	2	1	10
충격시험	3	2	25t:3 50t:6	4	2	3	576

인장시험을 위한 시험편 형상 및 시험방법은 KS B 0801, 0802, 굽힘시험을 위한 시험편 형상 및 시험방법은 KS D 0803, 0804에 준해서 실시하였다. 또한, 이음부 경도시험을 위한 시험편 형상 및 시험방법은 KS B 0811, 충격시험을 위한 시험편 형상 및 시험방법은 KS B 0809, 0810에 준해서 실시하였다.

각 시험에서의 시험온도는 상온(RT, 20℃)에서 실시하고, 이음부의 충격시험은 온도변화에 따른 용접이음부의 특성을 평가하기 위해서 추가적으로 0℃, -20℃, -40℃의 조건하에서도 시험을 실시하여 모두 4개의 온도조건하에서 시험을 실시하였다.

한편 용접방법은 현재 강교량 제작에서 가장 많이 사용하고 있는 FCAW(PST80은 GMAW), SAW의 2가지 용접방법으로 실시하였다.

3. 시험결과

3.1 최고경도시험

최고경도시험에서 얻어진 각 시험편에서의 최고경도값을 정리해서 나타내면 표 7과 같다.

표 7에서 나타낸 최고경도시험결과는 시방서에서 규정하고 있는 최고경도값인 370Hv,max보다 모두 작은 값을 나타내고 있으므로 본 연구에서 사용한 각 용접방법의 용접조건은 경도에 대해서는 충분한 안전성을 확보하고 있는 것을 알 수 있었다. 한편 기존 연구⁽⁹⁾에서와 같이 용접부의 용접입열량이 클수록 최고경도값은 작아지는 경향을 나타내었다.

SAW용접을 실시한 각 시험체의 측정선에서 경도변화의 일례를 나타내면 그림 3과 같다. 여기서, 경도측정은 0.5mm 단위로 실시하였다.

그림 3과 같이 강중에 관계없이 최고경도는 용접부나 그 부근에서 발생하였으며, 강재의 강도가 높아질수록 용접부의 경도가 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 최고경도

표 7. 최고경도시험결과

강종	두께 (mm)	용접법	입열량 (kJ/cm)	최고경도 (H _{v,max} , 10kgf)	
				예열온도(°C)	시험값
SM570	25	FCAW	20	RT(=20)	331
			20	110	282
		SAW	32	RT(=20)	262
			32	110	241
	50	FCAW	20	RT(=20)	359
			20	110	303
SAW	32	RT(=20)	275		
	32	110	248		
PST60	50	FCAW	20	RT(=20)	350
			20	110	341
		SAW	34	RT(=20)	297
			34	110	257
PST80	25	GMAW	23	RT(=20)	343
			23	110	324
		SAW	36	RT(=20)	306
			36	110	302
	50	GMAW	23	RT(=20)	341
			23	110	320
SAW	36	RT(=20)	310		
	36	110	302		

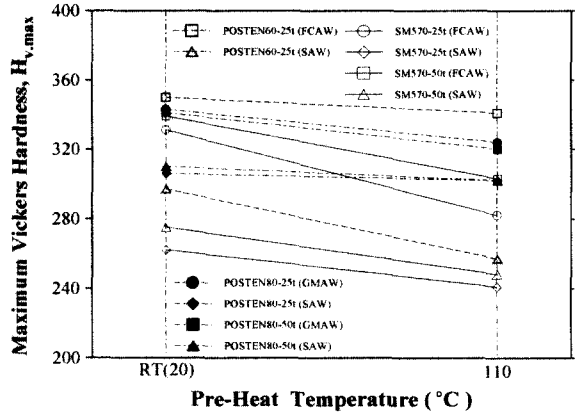


그림 4. 예열온도에 따른 최고경도변화특성

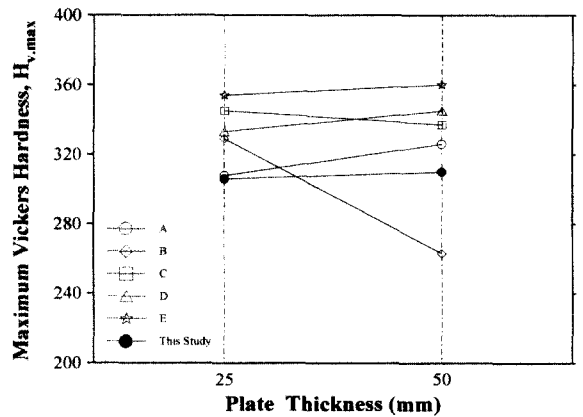


그림 5. 780MPa급 강재의 판두께별 최고경도변화특성(SAW)

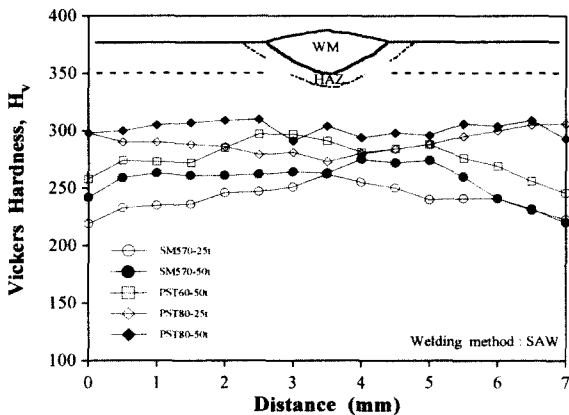


그림 3. 강종별 경도분포의 일례

H_{v,max}는 탄소당량(C_{eq})과 관계가 있는 것을 시사하고 있는데, 즉 탄소당량이 증가할수록 최고경도도 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 예열온도와 최고경도값 사이의 관계를 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4로부터 강종 및 용접방법에 관계없이 예열온도가 증가하면 최고경도가 감소하는 경향을 나타내었는데, 이것은 예

열이 온도를 급격하게 변화하는 것을 억제하기 때문인 것으로 판단되며, 예열을 실시하면 용접부의 경도값을 저하시켜 전체적으로 품질향상을 도모할 수 있는 것을 확인하였다.

한편 SAW용접을 실시한 780MPa급 강재에 대해서 판두께에 따른 최고경도변화특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, A~E로 나타낸 자료는 일본의 항대교(港大橋) 건설시 실시한 시험자료⁽¹⁰⁾를 인용한 것이다.

그림 5에서와 같이 자료 B를 제외하고는 전체적으로 강도가 동일한 경우 판두께가 증가할수록 최고경도값도 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이와 같은 경향은 표 7의 다른 강종에 대해서도 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3.2 경사 y형용접터짐시험

본 연구에서 실시한 경사 y형용접터짐 시험결과를 정리해서 나타내면 표 8과 같다. 표 8에서 Cross Section No.는 그림 2에서 나타낸 바와 같다.

여기서, 표 8에서 사용한 CF(표면균열비), CR(루트균열비), CS(단면균열비)의 개념을 나타내면 그림 6과 같다.

표 8. 경사 y형용접터짐 시험결과

강종	두께 (mm)	용접법	예열 (°C)	CF (%)	CR(%)						CS (%)	
					Cross section NO.					Ave.		
					1	2	3	4	5			
SM570	25	F C A W	20	0	0	0	0	0	0	0	0	
			115	0	0	0	0	0	0	0	0	
	50		20	0	0	0	0	0	0	0	0	
			115	0	0	0	0	0	0	0	0	
PST60	50	F C A W	20	0	0	0	0	0	0	0	0	
			120	0	0	0	0	0	0	0	0	
PST80	25		G M A W	20	0	0	0	0	0	0	0	0
				120	0	0	0	0	0	0	0	0
	50	20		9.7	76.9	100	100	64.3	92.9	86.8	100	
		110		0	0	0	0	0	0	0	0	0

주) CF:Surface crack ratio, CR:Root crack ratio, CS:Respective crack ratio

경사 y형용접터짐시험은 용접작업성과 관련해서 예열과 관련된 저온균열의 발생여부를 조사하는 시험으로, 각 용접방법별로 1패스 용접 후 48시간 이상 경과된 시험편의 표면 및 내부에서 균열의 발생여부를 확인하여 용접성을 판별한다.

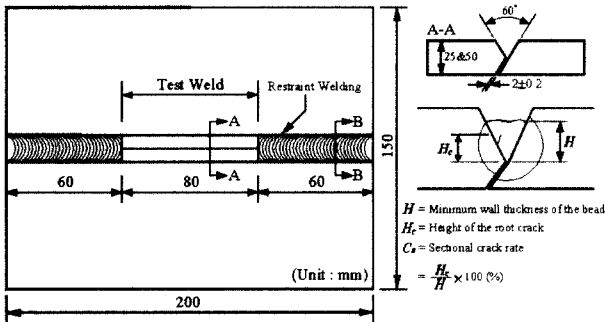


그림 6. 균열비의 정의를 나타내는 모식도

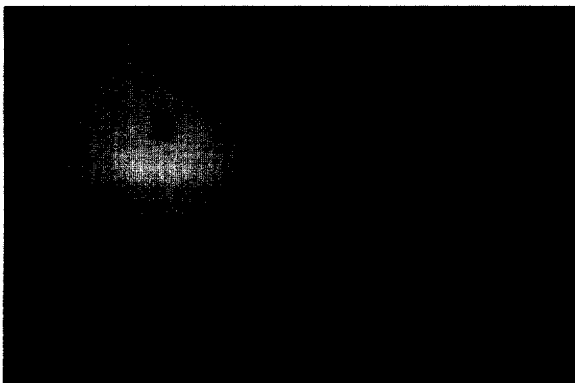


그림 7. 경사 y형용접터짐시험결과와의 일례

그림 6에서 설명한 경사 y형용접터짐시험결과에 대한 매크로사진의 일례를 나타내면 그림 7과 같다.

표 8에서와 같이 두께가 50mm인 PST80 강재를 상온에서 용접을 실시한 시험편을 제외하고는 상온 및 소정의 온도(120°C 전후)로 예열을 실시한 모든 시험편에서 균열은 발생하지 않았다.

두께가 50mm인 PST80 강재에서 균열의 발생이 용접조건이 두께가 25mm인 경우와 동일하다면 균열발생원인은 판 두께의 증가에 의한 구속 등의 영향에 의해 발생된 것으로 생각되지만 보다 정량적인 평가는 추가시험이 필요할 것으로 생각된다.

또한, 기보고된 POSCO자료의 시험결과⁽⁸⁾에서도 SMAW 용접의 경우 예열온도가 75°C 이하에서 제작된 시험편에 대한 경사 y형용접터짐시험에서도 균열이 발생한 것으로 보고되고 있으므로 이들 시험결과만으로 판단하면 PST80 강재의 경우 향후 강재생산에 있어서 성분조정 등을 실시하여 실제 제작에서 예열온도를 시험온도인 120°C 이하로 낮추어도 균열이 발생되지 않도록 하는 것이 필요하다.

그렇지 않으면 고강도강재의 사용으로 인한 강재중량의 감소효과가 예열온도의 증가 등으로 제작공수가 증가되어 고강도강재 사용의 효율성이 낮아지게 될 것으로 생각된다.

한편 780MPa급 강재를 대상으로 탄소당량과 예열온도와의 관계를 나타내면 그림 8~9와 같다. 여기서, A~E(용접방법은 MIG용접)로 나타낸 자료는 일본의 항대교(港大橋) 건설시 실시한 시험자료⁽¹⁰⁾를 인용한 것이다.

그림 8~9에서와 같이 표면균열, 루트균열 모두 탄소당량이 증가하면 균열발생율이 높아지는 경향을 나타내므로 더 높은 온도에서의 예열이 필요한 것으로 나타났다. 즉 강도가 높아질수록 예열온도를 높일 필요가 있음을 알 수 있었다.

또한 균열발생 방지온도를 고찰하면 일본초기의 강재에 비해서 현재 국내 고강도강재의 품질은 상당한 품질을 확보하고

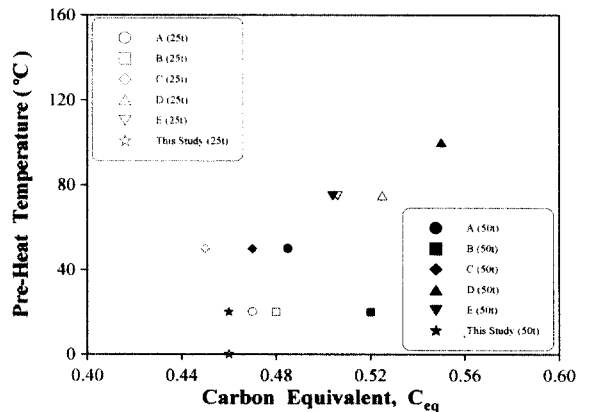


그림 8. 탄소당량과 예열온도와의 관계(표면균열)

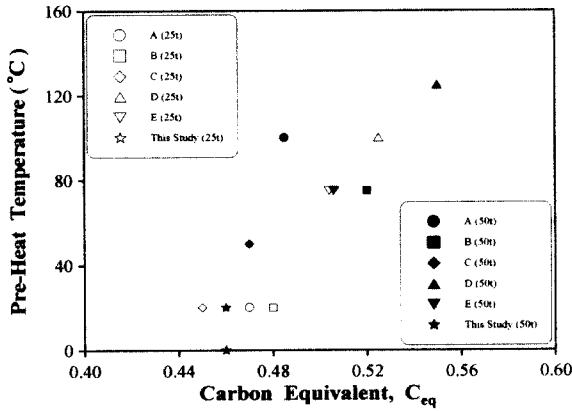


그림 9. 탄소당량과 예열온도와의 관계(루트균열)

있는 것을 알 수 있었다. 그러나 경사 y형용접터짐시험은 확산성수소의 양, 냉각속도 및 P_{CM}의 함수이므로 향후 이들을 변수로 한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

3.3 용접이음부 인장시험

표 6에서 나타난 용접이음시험에 대한 시험결과를 정리하여 나타내면 표 9와 같다.

표 9의 고강도강재의 인장시험결과, 항복강도 및 인장강도

는 용접방법에 관계없이 모두 KS규격⁽⁶⁾ 및 POSCO의 사내 기준⁽⁸⁾(PST60, PST80강재)을 만족하고 있으므로 충분한 사용성을 확보하고 있는 것을 알 수 있었다. 한편 시험편의 파단위치는 기존 연구결과⁽¹⁰⁾와 같이 대부분이 모재와 용접금속부에서 발생하였는데, 이것은 용접금속부의 강도 및 연화영역의 영향 등에 의한 것으로 생각된다.

판두께를 달리한 SM570, PST80 강재에 대한 인장시험 결과 용접방법에 관계없이 판두께가 증가할수록 항복강도, 인장강도 및 항복비 모두 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 질량효과에 의해 강도가 감소하는 즉, 소재제조프로세스 중 두께가 두꺼울수록 냉각속도가 느려져 강도가 감소하기 때문으로 생각된다. 이러한 현상을 고려해서 KS규격에서 규정되어 있는 SM570 강재 및 기타 SM 강종의 경우 표 9에서와 같이 판두께가 증가함에 따라 항복강도를 감소시키고 있다.

그러나 현재 PST60, PST80 강재에 대한 POSCO의 사내기준⁽⁸⁾은 강재의 판두께에 관계없이 항복강도를 일정하게 규정하고 있는데, 판두께가 인장강도에 미치는 영향을 평가하기 위해서 PST80 강재와 일본의 HT80 강재에 대한 인장강도 시험결과를 정리해서 판두께에 따른 인장강도의 변화를 나타내면 그림 10과 같다.

그림 10에서와 같이 대부분의 시험에서 판두께의 증가에

표 9. 용접이음부 인장시험 및 경도시험결과

강종	두께 (mm)	용접법	입열량 (kJ/cm)	단면적 (mm ²)	인장강도, f _u (MPa)		항복강도, f _y (MPa)		항복비 (f _y /f _u)	파단위치	경도(Hv, 10kgf)					
					기준	실험	기준	실험			최대값	최소값				
SM570	25	FCAW	11.4	614.9	570 ~ 720	641	450	558	0.870	WM	249(L-HAZ)	194(W/M)				
				617.5									551	0.862		
		SAW	31.7	614.9									562	0.866		
				614.9									567	0.870		
	50	FCAW	12.3	1232.4	629	627	430	537	0.854	WM	221(L-HAZ)	185(R-HAZ)				
				1242.5									534	0.852		
		SAW	35.5	1232.2									650	0.858		
				1233.7									652	0.855		
PST60	50	FCAW	12.1	1232.5	588 ~ 706	635	451	538	0.847	BM	243(R-HAZ)	183(L-HAZ)				
				1233.7									637	538	0.847	
		SAW	38.5	1230.0									644	540	0.838	
				1231.2									646	547	0.847	
PST80	25	GMAW	20.5	628.8	785 ~ 932	822	680	758	0.922	WM	294(R-HAZ)	210(L-HAZ)				
				631.3									816	753	0.923	
		SAW	40.0	633.8									786	723	0.920	
				635.0									786	712	0.909	
	50	FCAW	22.7	631.3	801	797	801	680	741	0.925	BM	265(W/M)	200(R-HAZ)			
				631.3										784	737	0.925
		SAW	36.2	633.8										784	688	0.881
				640.1										784	695	0.887

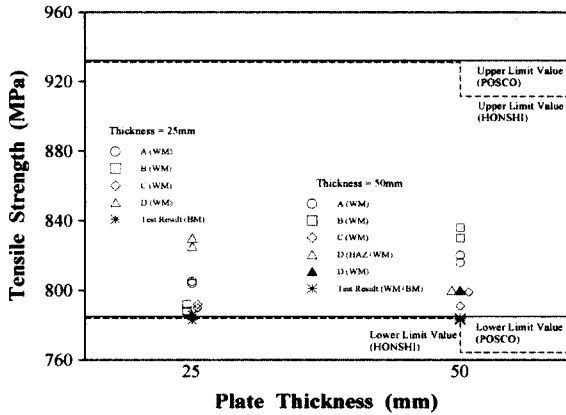


그림 10. 780MPa급 강재의 두께증가에 따른 인장강도의 변화

따라 인장강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 고강도 강재의 활용화를 위해서는 일본의 本四連絡公團의 기준⁽⁷⁾과 같이 고강도강재에 대해서도 판두께의 증가에 따라서 항복강도를 감소시키는 등의 기준보완이 필요할 것으로 생각된다.

3.4 용접이음부 굽힘시험

용접이음부에 대한 굽힘시험결과를 정리해서 나타내면 표 10과 같다. 표 10에서와 같이 두께가 50mm인 SM570강재의

표 10. 용접이음부에 대한 굽힘시험결과

강종	두께 (mm)	용접법	입열량 (kJ/cm)	단면적 (mm ²)	터짐여부	단면적 (mm ²)	터짐여부	비고
SM570	25	FCAW	11.4	246.7	없음	250.3	없음	굽힘각 (180°) 굽힘곡률 (19R)
				248.9	없음	253.4	없음	
		SAW	31.7	248.5	없음	246.4	없음	
				252.3	없음	248.5	없음	
	50	FCAW	12.3	501.8	없음	500.3	없음	
				501.8	없음	500.3	없음	
SAW	35.5	520.5	없음	495.9	없음			
		488.5	없음	497.9	없음			
PST60	50	FCAW	12.1	508.7	없음	499.4	없음	굽힘각 (180°) 굽힘곡률 (19R)
				502.9	없음	504.2	없음	
		SAW	38.5	495.9	없음	503.2	없음	
				503.2	없음	503.2	없음	
PST80	25	GMA W	20.5	253.7	없음	253.5	없음	굽힘각 (180°) 굽힘곡률 (19R)
				253.5	없음	252.0	없음	
		SAW	40.0	252.3	없음	245.6	없음	
				255.0	없음	252.7	없음	
	50	GMA W	22.7	506.0	없음	511.5	없음	
				504.5	없음	497.0	없음	
SAW	36.2	512.0	없음	511.5	없음			
		510.0	없음	511.5	없음			

FCAW 시험편에서만 용접부에서 균열이 발생하고 그 이외에는 모든 시험편에서는 균열이 발생하지 않아서 양호한 휨연성을 나타내고 있으므로 본 연구에서 사용한 고강도강재는 굽힘에 대한 충분한 가공성을 갖는 것으로 판단되었다.

그러나 균열이 발생한 시험편은 SM570 강재에 대한 기존의 보고⁽⁵⁾에 기초해서 판단하면 고강도강재의 재질상의 문제가 아닌 용접 등의 시공성에 기인한 문제인 것으로 판단된다.

3.5 용접이음부 경도시험

용접열영향부는 용접열에 의한 급속가열, 급속냉각에 의해서 조직변화를 일으키므로 일반적으로 경도가 높아지는 것으로 알려져 있다.

용접이음부에 대한 경도시험값과 측정위치를 정리해서 나타내면 표 11과 같으며, 또한, 강종별 시험체의 경도시험결과와 일례를 나타내면 그림 11과 같다.

표 11에서와 같이 용접부에서 측정된 경도값은 모두 용접이음부에 대해서 도로교 표준시방서에서 규정하고 있는 최고경도값인 370HV_{0.05} 보다는 작은 값을 나타내고 있으므로 시방서의 규정값을 충분히 만족하고 있는 것을 알 수 있었다.

한편 그림 11에서와 같이 최고경도값은 강재의 강도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내어 PST80 강재에서 가장 높게 나타나고 있는데, 이는 탄소당량(C_{eq})이 경도에 큰 영향을 미치기 때문이며, 이는 표 3의 결과와도 일치한다.

또한 최고경도 발생위치도 용접급속부나 열영향부에서 존재하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 기존 연구결과와도 잘 일치하는 것을 알 수 있다.⁽¹⁰⁾

3.6 용접이음부 충격시험

용접열영향부는 용접열에 의해 결정입자가 커지고 조직이

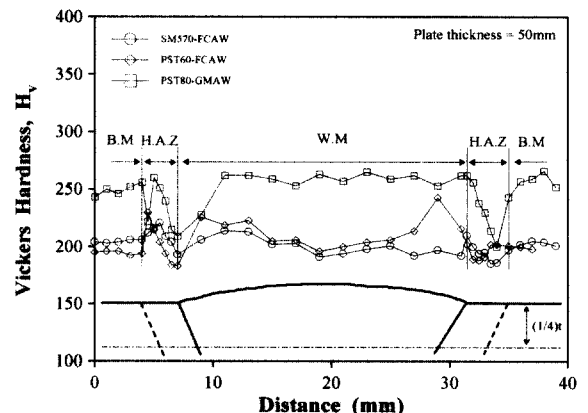


그림 11. 강종별 경도시험결과와 일례

표 11. 용접이음부에 대한 충격시험결과

강종	두께 (mm)	용접방법	입열량 (kJ/cm)	흡수에너지 평균치 (J) (시험편 3개 평균)													
				기준		시험 온도 -40℃						시험 온도 -20℃					
				온도 (℃)	모재	노치 위치			노치 위치			노치 위치			노치 위치		
						중양	표면에서 7mm		중양	표면에서 7mm		중양	표면에서 7mm		중양	표면에서 7mm	
W/C	F/L	F/L2	W/C	F/L	F/L2	W/C	F/L	F/L2	W/C	F/L	F/L2	W/C	F/L	F/L2			
SM570	25	FCAW	11.4	-5	48	26	30	50	-	-	-	39	48	97	-	-	-
		SAW-1	31.7			26	121	119	-	-	-	67	128	168	-	-	-
		SAW-2	35.3			-	-	-	71	40	100	-	-	-	136	93	131
	50	FCAW	12.3			12	24	153	15	31	53	17	34	195	39	57	75
		SAW	35.5			79	177	79	19	43	61	105	205	169	31	73	136
PST60	50	FCAW	12.1	-5	평균:48 최소:28	15	19	85	14	32	110	33	61	135	25	81	113
		SAW	38.5			67	133	175	24	74	138	110	203	206	38	82	172
PST80	25	GMAW	20.5	-20	평균:48 최소:28	92	109	174	-	-	-	125	173	182	-	-	-
		SAW-1	40.0			90	27	38	-	-	-	137	48	75	-	-	-
		SAW-2	36.4			-	-	-	58	138	98	-	-	-	101	193	153
	50	GMAW	22.7			83	140	141	80	185	120	119	178	141	115	183	162
		SAW	36.2			133	154	139	107	85	88	171	196	160	115	78	112

강종	두께 (mm)	용접성	입열량 (kJ/cm)	흡수에너지 평균치 (J)													
				기준		시험 온도 0℃						시험 온도 상온					
				온도 (℃)	모재	노치 위치			노치 위치			노치 위치			노치 위치		
						중양	표면에서 7mm		중양	표면에서 7mm		중양	표면에서 7mm		중양	표면에서 7mm	
W/C	F/L	F/L2	W/C	F/L	F/L2	W/C	F/L	F/L2	W/C	F/L	F/L2	W/C	F/L	F/L2			
SM570	25	FCAW	11.4	-5	48	73	93	135	-	-	-	133	138	164	-	-	-
		SAW-1	31.7			124	156	202	-	-	-	152	205	192	-	-	-
		SAW-2	35.3			-	-	-	159	91	175	-	-	-	185	176	192
	50	FCAW	12.3			126	107	217	50	133	185	82	140	245	122	144	177
		SAW	35.5			126	199	211	51	151	202	148	240	250	113	192	247
PST60	50	FCAW	12.1	-5	평균:48 최소:28	55	92	184	52	131	170	87	92	188	98	122	200
		SAW	38.5			147	235	61	63	157	214	154	239	262	113	176	231
PST80	25	GMAW	20.5	-20	평균:48 최소:28	149	183	198	-	-	-	165	185	203	-	-	-
		SAW-1	40.0			168	68	142	-	-	-	177	94	175	-	-	-
		SAW-2	36.4			-	-	-	135	204	170	-	-	-	143	202	192
	50	GMAW	22.7			194	202	162	132	195	170	196	204	190	140	190	167
		SAW	36.2			180	203	183	140	72	142	191	222	195	136	117	175

주) 시험편의 노치 위치 W/C : 용착금속부 중양, F/L : 열영향부 내부, F/L2 : 열영향부 경계

변화하기 때문에 노치인성이 모재보다 나빠지는 경향이 있으므로 이들에 대한 특성을 조사하기 위해서 충격시험을 실시하였다.

용접이음부에 대한 충격시험결과를 강종별, 두께별, 용접방법별, 노치위치별로 분류하여 나타내면 표 11과 같으며, 온도별, 노치위치별로 흡수에너지 분포결과의 일례를 두께가 50mm인 PST60 강재에 대해서 나타내면 그림 12~그림 13과 같다.

표 11의 결과 및 시험체별 각 시험조건에 따른 시험결과로부터 용접부에서의 흡수에너지는 전체적으로 모재에 대한 최소흡수에너지 기준을 만족하고 있으므로 용접부는 취성파괴에 대해서 충분한 안전성을 확보하고 있는 것을 알 수 있었다.

그러나 두께가 50mm인 SM570 강재를 FCAW 용접법으로 제작한 시험편에서 노치가 시험편 중양의 용착금속부에 위치한 시험편(표 11에서 음영으로 표시)에서는 모재에 대한 흡수에너지 기준인 -5℃에서의 48J보다 다소 작은 값을 나타

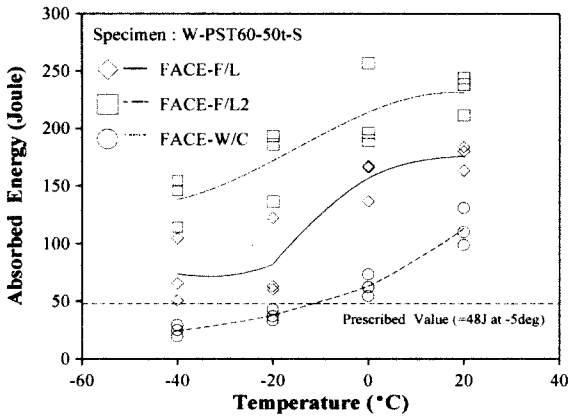


그림 12. 온도별 충격시험결과의 일례 (노치가 표면에 위치)

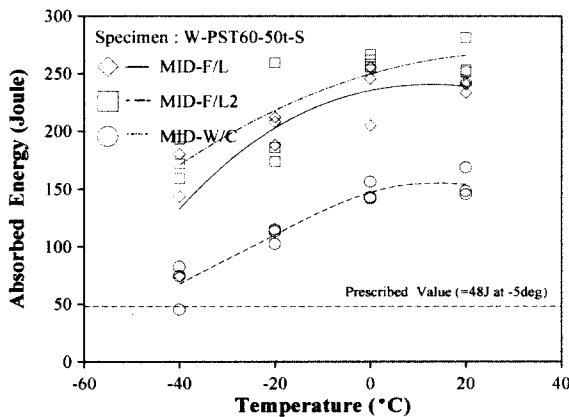


그림 13. 온도별 충격시험결과의 일례 (노치가 중앙에 위치)

내었으나, 이 값이 용접부에 대한 값이라는 것과 표 2에서 나타난 밀시트에서의 SM570 강재에 대한 흡수에너지가 290J이라는 것을 고려하면 현재의 용접방법에는 문제가 없을 것으로 판단되나, 향후 흡수에너지의 향상을 위해서는 용접조건 및 재료의 조정에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

또한 노치위치에 따른 흡수에너지는 그림 12~그림 13 및 표 11로부터 노치가 중앙에 위치한 경우보다 표면에서 7mm 떨어져서 위치한 경우가 강종 및 용접방법에 관계없이 작은 경향을 나타내었는데, 이는 표면근처에서 용접열이 급격하게 냉각되어 열영향부의 조직에 미치는 영향이 크기 때문인 것으로 판단되므로 표면근처에서 발생한 노치가 파괴에 대해 보다 민감한 것으로 판단된다.

한편 용접방법에 따른 흡수에너지값의 특성을 보면 표 11에서와 같이 570MPa급 강재의 경우는 노치위치나 온도에 관계없이 SAW용접이 FCAW용접보다 전체적으로 흡수에너지가 높게 나타났으며, 780MPa급 강재의 경우는 GMAW용접과 SAW용접 사이에는 거의 차이가 없는 것을 알 수 있으므로 향후 고강도강재의 용접시 맞대기 이음은 용접의 효율성을 고려하여 SAW용접으로 실시하는 것이 바람직할 것으로 생각되나, 보다 최적의 용접방법은 향후 용접재료 등 여러 가

지 영향요인에 대한 정량적인 분석이 더욱 필요할 것으로 판단된다.

또한 흡수에너지는 용접재료, 입열량, 모재성분 등에 따라서도 영향을 받으므로 고강도강재에서 이들에 대한 보다 정량적인 해석을 위해서는 추가적인 자료의 축적이 필요할 것으로 생각된다.

따라서 향후 고강도강재의 용접에서 흡수에너지가 현저하게 저하되는 용접방법에 대해서는 강재측면에서 노치인성을 향상시키는 방법이나 용접시공측면에서 노치인성을 향상시키는 방법(예를 들면, 용접입열(780MPa급 강재에 대해서는 50,000J/cm) 및 패스간 온도의 적절한 선택)을 강구하는 것이 바람직할 것으로 생각되나, 가장 적극적인 대책방법으로는 대입열용접을 실시하더라도 열영향부의 노치인성이 저하되지 않는 대입열 용접용 강재를 개발하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

강교량의 합리화 및 장대화에 있어서 그 사용이 불가피한 조질고강도강재를 대상으로 현재 국내에서 생산되고 있는 SM570, PST60, PST80의 조질고강도강재에 대한 용접이음특성에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고강도강재의 용접에 따른 일련의 특성을 조사한 결과, 일반 강재에서 나타나는 두께증가에 따른 항복강도의 감소, 최고경도 및 균열발생이 예열온도에 의존하는 것을 확인할 수 있었으므로 향후 고강도강재의 사용에 있어서 본 연구결과가 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.
- (2) 예열온도가 증가하면 최고경도가 증가하는 것을 알 수 있었으며, 또한 탄소당량이 높을수록 균열발생을 억제하기 위해서 높은 예열온도를 필요로 하기 때문에 고강도강재의 용접에서는 적절한 예열이 용접부의 품질을 확보하는데 중요한 영향요인으로 작용하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 흡수에너지값은 노치위치가 표면에 가깝게 위치할수록 작은 경향을 나타냈으며, 또한 용접방법별로는 SAW용접이 전체적으로 용접부에서의 높은 흡수에너지를 나타내고 있으므로 SAW용접이 효율성 및 품질면에서 양호한 결과를 나타내므로 향후 고강도강재의 맞대기 이음 용접에는 SAW용접을 사용하는 것을 권장한다.
- (4) 고강도강재에서도 두께증가에 따른 항복강도의 저하를 확인할 수 있었으므로 국내시방기준 작성시 이를 고려

하여야 하며, 또한 고강도강재의 본격적인 활용을 위해서는 본 연구에서 실시한 내용을 보다 광범위하게 실시해서 고강도강재의 용접특성 및 가공특성을 보다 정량적으로 파악할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 고강도강재의 개발과 더불어 고강도강재의 용접성에 영향을 미치는 고강도강재용 용접재료의 개발이 조속하게 이루어져야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국강구조학회와 POSCO에서 공동으로 실시한 “고강도강 교량적용 설계 및 제작기술개발 연구”의 일환으로 실시되었습니다. 본 연구를 원활하게 수행되는데 있어서 많은 도움을 주신 관계자 여러분에게 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

참고 문헌

1. 한국도로교통협회, “도로교설계기준”, 2000.
2. 신공항하이웨이주식회사, “영종대교 특별시방서”, 1996.
3. 건설교통부, “강도로교 용접 및 도장지침”, 1998.
4. 日本道路協會, “道路橋梁標準方書·同解説, 鋼橋編”, 1996.
5. 경갑수, “영종대교 현수교 보강형 및 트러스교 주구트러스 대형용접시공시험”, 월간철구기술, pp.66-79, 2000.
6. KS D3515, “용접구조용강재”, 2000.
7. 日本本四連絡公團, “HBS G 3102 鋼上部構造用70キ口鋼・80キ口鋼”, 1992.
8. 포항제철, “POSTEN”, 사내자료.
9. 稻垣, 田中, “高張力鋼溶接の實際”, 廣濟堂産報出版, 1984.
10. 日本土木學會, “港大橋工事誌”, 1975.

(접수일자 : 2002년 4월 15일)