

강교용 박스거더의 용접예열 온도 선정에 관한 연구

조재훈, 문승재*, 유호선**†

남관토건(주), *한양대학교 기계공학부, **승실대학교 기계공학과

Determination of Preheating Temperature for Box Girder Welding

Jae-Hun Cho, Seung-Jae Moon*, Hoseon Yoo**†

Namkwang E&C, Seoul 135-100, Korea

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received September 8, 2010; accepted January 21, 2011)

ABSTRACT : ABSTRACT: This study analyzed causes and status of cracks to suggest preventives for welding cracks generated on fillet welding zone of atmosphere corrosion resisting steel box girder. Penetrant testing, a sort of non-destructive testing, was conducted for inspection of crack status on welding zone. As a result of test, welding cracks were found on the point of start, center and end to fillet welding zone of 32 mm-thickness. The result of carbon equivalent composition of materials was 0.452%. According to welding specification, to preheat prevent welding crack, preheat temperature of 100~200°C should be kept before welding execution. It was failed to keep preheat temperature because it had been executed on winter season and the structure of box girder had wide heat transfer area. As a result of examination of time varying preheating temperature of 32 mm-thickness material, it was understood that preheat temperature of above 230°C on both 130 mm-long sides of welded joint can prevent welding crack.

Key words : box girder, carbon equivalent, preheating, welding crack

1. 서론

교량, 철도, 차량, 선박, 항공, 화학플랜트 및 발전 설비 등의 구조물 제작과정에서 사용되는 각종 재질은 구조물이 요구하는 특성을 가져야 하므로 그 특성을 만족하기 위해서 합금원소를 첨가하도록 한다. 그러나 합금원소 첨가에 따라 탄소당량이 증가하는 등 용접성이 떨어지게 되며 이로 인해 용접손상이 발생하는데 이를 예방하기 위해서는 용접예열온도 관리에 세심한 주의가 필요하다.

특히 강교용 박스거더에 적용되는 내후성강

(SM490BW)은 부식이라는 강재의 큰 단점을 극복하고 공업재료로서의 강재의 경쟁력을 더욱 높이고자 일반강에 크롬, 니켈 및 구리 등 내식성이 우수한 합금원소를 첨가한 저합금강으로 일반강에 비해서는 4~8배 높은 내식성을 갖고 있는 강재이다.^[1] 또한 크롬이 함유된 강은 내산화성이 우수하고 강도 및 내크리프성이 향상되는 경향이 있으며 수소에 대한 저항성이 우수하나 크롬 증가에 따라 탄소당량이 증가하여 용접성이 저하되므로 용접예열 온도 관리에 주의를 기울여야 하는 소재이다.

본 논문에서는 내후성강 박스거더 필렛용접부의 용접균열현황 및 원인분석을 통해 용접손상 예방 방안을 제시하고자 한다.

2. 박스거더 용접균열

강교용 박스거더에 발생한 용접균열이 수정되지

† Corresponding author

Tel.: +82-2-820-0661; Fax +82-2-820-0668

E-mail address: hsyoo@ssu.ac.kr

않고 설치될 경우 운영 중 작용하는 반복하중에 의해 피로균열이 성장하게 된다. 1개 박스거더의 압축부 및 인장부의 용접부는 총 400 여 개소로 구성되어 있으며 공장에서 하는 맞대기이음부에는 자동용접인 서브머지드 아크 용접(submerged arc welding)을 필렛용접(fillet weld)부는 반자동 용접인 플럭스 코어 아크 용접(flux core arc welding)과 자동용접인 오토 캐리지 용접(auto carriage welding)을 병행하여 용접을 하고 있다.

박스거더 용접부에서 용접균열이 발생하였을 경우, 균열의 원인을 분석하기 위해 우선적으로 균열의 종류를 파악해야 한다. 균열의 종류를 파악하는 것은 균열현상에 대한 이해를 보다 더 쉽게 알 수 있을 뿐만 아니라 균열 방지대책을 세울 수 있는 가장 기본적인 단계이므로 매우 중요하다. 박스거더 용접시 발생될 수 있는 용접균열에는 고온균열과 저온균열이 있으며 각각에 대한 손상원인 및 방지를 위한 용접관리방안은 다음과 같다.

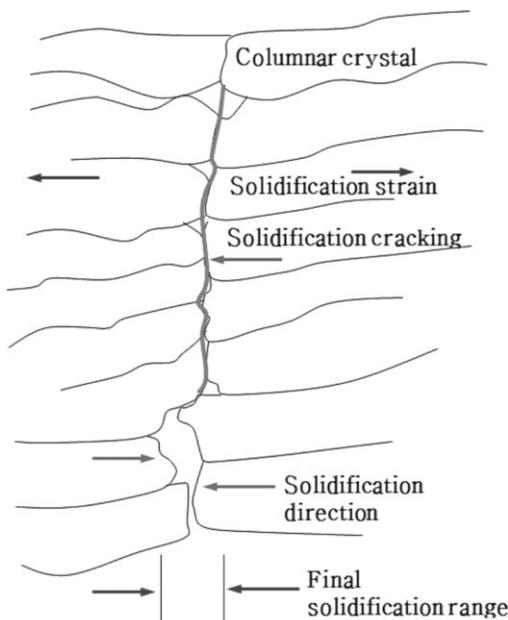
2.1 고온균열

고온균열은 용접금속 및 열영향부에서 주로 발생하며 균열의 끝부분이 직선형이 아닌 곡선형인 경우

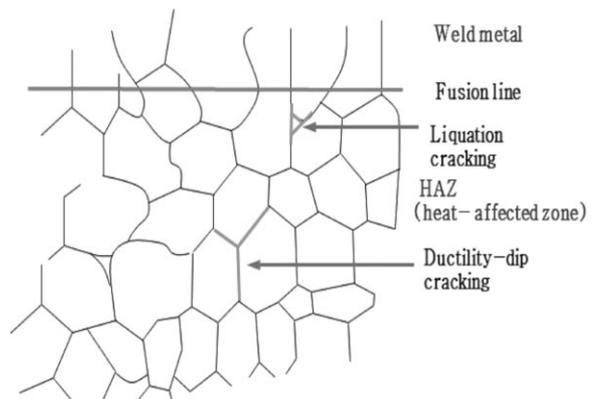
가 많다. Fig. 1에는 용접부에서 발생하는 고온균열 대한 모식도를 나타내었다. Fig. 1(a)에는 고온균열의 일종인 응고균열(solidification cracking)의 발생 원리를 나타내었다. 용접금속은 응고후 냉각과정에서 주상조직(columnar crystal)이 형성되고 응고응력(solidification strain)과 응고방향(solidification direction)의 차이점이 발생 되는데 주로 입계에서 응고과정 중 불순물이 집적된 조건에서 응고응력 또는 외력 작용시 응고균열이 발생된다.^[2] 고온균열의 일종인 액화균열(liquation cracking)과 연성저하균열(ductility-dip cracking)의 발생 원리를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 액화균열과 연성저하균열은 결정입계를 따라 진행하며 열영향부에서 발생된다. 또한 액화균열은 다층용접에서 재 가열된 이전 비드의 용접금속이 액화되어 고체 및 액체의 공존상태를 통과할 때 수축 변형이 한계 값을 초과하여 발생되며 연성저하균열은 액상이 존재하지 않는 조건에서 발생되는데 입계편석, 입계석출 및 입내석출 등에 의해 발생된다.^[3] 고온균열의 발생을 억제하기 위해서는 용접시 전류 및 전압을 낮추고 용접냉각속도를 빠르게 하여 입열량을 적게 시공하여야 한다. 그리고 박스거더 조립시 치수를 만족시키기 위해 체인블럭을 이용하여 강제로 용접이음부를 구속하지 않도록 하여 잔류응력이 저감되도록 하며, 용접전 개선면에 오일, 먼지 및 녹 등을 제거하여 용접금속에 저용점 개재물의 혼입을 방지하여야 한다.

2.2 저온균열

아크 분위기에서 수소비율에 따른 비드밑균열과의



(a) Solidification cracking



(b) Liquation cracking and ductility-dip cracking

Fig. 1 Schematic illustration of hot cracks.^[4]

상관관계를 Fig. 2에 나타내었다. 아크 분위기에서 수소비율이 증가함에 따라 비드밑균열의 발생비율도 함께 증가하며, 균열발생을 저하시키기 위해서는 용접 중 수소비율을 제어해야 함을 알 수 있다. 비드 밑균열은 용접비드밑에서 발생하는 저온균열이며 아크 분위기에서 수소의 공급은 기체상태의 수소로 용접금속에 공급되는 것보다는 대부분 수소 분해에 의한 확산으로 공급된다. 아크용접시 발생하는 수소 가스는 용접부의 품질을 저하시키는 주요한 요인이며, 용접부에 잔류하는 확산성 수소에 의해 저온균열이 발생한다.^[4]

저온균열은 저수소계용접봉을 사용하지 않을 경우, 젖은 용접봉 사용 및 다습한 환경에서 용접작업을 하여 확산성수소량을 제어하지 못할 경우, 겨울철 용접시공시 용접예열 미흡에 따른 급냉으로 경화된 조직이 형성되는 경우, 그리고 용접변형을 방지하기 위해 구속지그를 사용하는 경우에 발생된다.

용접방법은 용접부의 수소량에 가장 크게 영향을 미친다. 일반적으로 수분이 혼입하기 어려운 가스텅스텐아크용접의 경우 수소량이 가장 적고 가스메탈아크용접, 플럭스코어아크용접, 서브머지드아크용접, 그리고 실드메탈아크용접 순으로 흡습에 의한 확산성 수소량의 증가될 가능성이 높으므로 흡습 가능성이 높은 기공을 가진 플럭스를 사용할수록 수소 취화의 가능성이 높아진다.^[3] 따라서 용접시공시에는 저수소계 피복 용접봉 선택이 바람직하며, 강재의 종류, 형상의 구속도 및 작업환경에 따라 적합한 용접봉을 적용하여야 한다. 물에 젖었던 용접봉은 충분히 건조되어도 절대 사용해선 안 된다. 또한 용착금속의 내부 잔류응력 제거, 확산성 수소제거 및

저온균열 예방을 위해 100 ~ 200°C 정도로 1 ~ 5 시간 동안 저온 후열처리를 시행하고, 용접부의 이물질을 완전히 제거하여 청결을 유지해야 한다.^[2]

교량 및 철골 등과 같은 강구조물 제작시 발생하는 용접균열은 몇 가지의 부재가 집중되어 구속이 높은 T이음 및 십자이음에서 주로 발생하고 있으며, 저온균열이 전체의 74%를 차지하고 있다.^[5]

3. 박스거더 용접균열 사례

3.1 균열위치

박스거더 제작 중 발생한 용접균열위치를 Fig. 3에 나타내었다. 용접균열은 반자동용접 플럭스 코어 아크용접 (flux core arc welding)과 오토 케리지 용접 (auto carriage welding)을 병행하여 시공한 두께 32 mm의 필렛용접 (fillet weld)부에서 발생되었으며 용접시작부와 중간부 및 끝단부에 걸쳐 발생되었다. 필렛이음은 두께 12 mm와 32 mm로 시공되었고 두께 12 mm의 규격은 폭 1,600 mm, 길이 8,959 mm이며 두께 32 mm의 규격은 폭 2,300 mm, 길이 8,959 mm이다. 용접자세는 수평자세로 단부 약 300 mm는 반자동용접을 실시하였고 나머지 용접부에 대해서는 자동용접을 실시하였다.

3.2 균열상태

손상이 발생된 박스거더의 용접균열 상태를 Fig. 4에 나타내었다. 육안검사결과 Fig. 4a)와 같이 용접균열은 비드표면에서 종단방향으로 균열이 발생되었음을 알 수 있었다. 용접균열 상태를 정확히 파악하기 위해 육안으로도 균열발견이 쉬운 침투탐상시

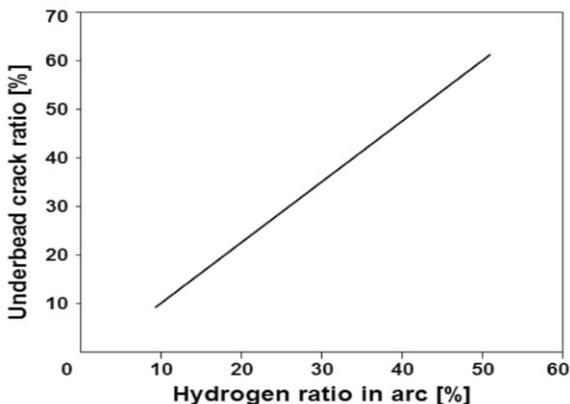


Fig. 2 Underbead crack ratio by hydrogen ratio in arc.^[6]

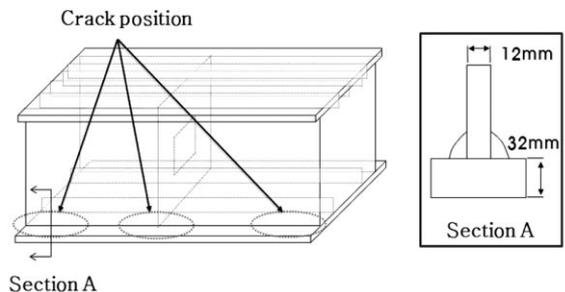
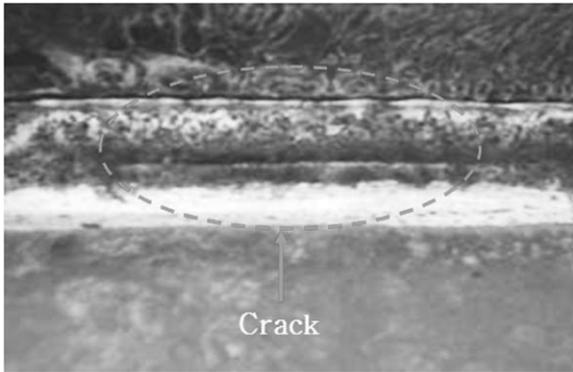
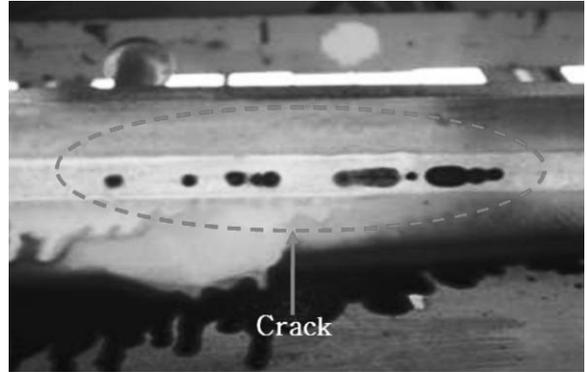


Fig. 3 Crack position of box girder.



(a) Visual examination



(b) Liquid penetrant examination

Fig. 4 Longitudinal crack of box girder.

험을 실시하여 그 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 용접균열은 비드중앙부에서 중단방향으로 발생하였고 용접시작부와 중간부 및 끝단부 등 용접비드 전반에 걸쳐 발생 되어 있음을 확인할 수 있다.

4. 박스거더 용접부 손상 원인분석

4.1 용접시공조건

박스거더 용접시 용접시공조건을 Table 1에 나타내었다. 용접시 외경이 1.4 mm인 용접봉을 사용하였으며, 용접이음부 양쪽 폭 75 mm를 100 ~ 200 °C의 온도로 용접예열을 하였고, 후열처리는 적용하지 않았다. 용접시 전류는 280 ~ 300 A, 전압은 30 ~ 35 V이다. 용접속도는 35 ~ 40 cm/min, 용접기법은 직선운봉법을 이용하여 시공하였다. Table 2에는 용접시공 당시 내후성강 박스거더 소재를 용접한 용접봉의 화학성분 구성을 나타내었다. 용접봉은 YFA-50W를 사용하였으며 내후성강에 적용되는

Table 1 Welding conditions

Electrode diameter (mm)	1.4
Preheating temperature (°C)	100~200
Preheating width (mm)	75
Post weld heat treatment (°C)	None
Current (A)	280~300
Voltage (V)	30~35
Welding speed (cm/min)	35~40
Bead technique	Stringer
Number of Pass (time)	1

용접봉으로 내식성이 우수한 구리, 크롬 및 니켈 등으로 구성되어 있다.^[6]

용접시공조건을 검토한 결과 용접전류와 전압, 용접속도 및 용접봉은 용접절차서(welding procedure specification)에 의해 시공되었음을 확인하였다. 그러나 1 ~ 2월에 시공된 관계로 추운날씨에 작업이 되었고, 용접예열 후 용접시작 전까지 시간을 측정한 결과 약 3분이 소요됨에 따라 기준 용접예열 온도가 유지되지 못하고, 급냉에 의한 조직의 경화가 용접손상 발생에 주요한 원인인 것으로 사료된다. 또한 용접시공시 예열은 박스거더 전체를 균일하게 가열하는 것이 이상적이지만 비용과 시간문제로 용접이음부 양쪽 약 75 mm를 국부적으로 가열하였으므로, 용접시 적정 용접예열 온도가 유지되지 못하였을 것으로 판단된다.

4.2 소재의 특성

4.2.1 기계적특성

박스거더의 소재인 내후성강의 특성을 상대적으로 비교하기 위해 용접구조용강과 내후성강의 기계적 특성인 인장강도와 항복강도, 연신율 및 샤르피(Charpy)흡수에너지를 Table 3에 나타내었다. 인

Table 2 Chemical compositions of the electrode element

Element	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Cr (%)	Ni (%)
Electrode								
YFA-50W	0.04	0.56	1.05	0.011	0.007	0.48	0.53	0.41

장강도와 샤르피 흡수에너지는 490 MPa 및 27 J로 동일하였으나 상온 연신율은 각각 19% 및 22%로서 내후성강이 더 적다는 것을 알 수 있었으며 항복강도는 각각 355 MPa 및 315 MPa로 내후성강이 더 크다는 것을 알 수 있었다.

강재는 강도가 높아질수록 용접성이 나빠지며 용접성이 나쁜 강재를 용접하면 용접직후 또는 수 시간 후 균열이 생기고 수개월 후, 수년 후에는 취성과 파괴의 사고를 유발할 가능성이 있다. 따라서 상대적으로 연신율이 낮고 강도가 높은 내후성강은 용접구조용강으로 박스거더를 제작 하는 경우 보다 용접시공에 주의를 기울여야 한다.

4.2.2 화학적특성

Table 4에는 용접구조용강과 내후성강의 화학성분 구성을 나타내었다. 두 재질의 탄소, 망간, 실리콘, 인 및 황의 성분구성은 동일하나 크롬과 구리 니켈의 함유량에 차이가 있어 내후성강이 내식성이 우수함을 알 수 있다. 그러나 내후성강은 크롬증가에

따라 용접성이 떨어지고 합금원소 첨가에 따라 탄소당량이 커질 수 있으므로 용접예열 관리에 주의해야 한다.

박스거더 제작에 적용되는 강재에 대한 탄소당량을 Table 5에 나타내었다. 두께가 12 mm, 14 mm, 18 mm 및 26 mm인 강재는 탄소당량이 0.430% 이하였으나, 두께가 32 mm인 강재는 탄소당량이 0.452%로 경화성이 높아 예열이 필요하다. 용접균열을 예방하기 위한 탄소당량에 따른 적정 예열 온도는 탄소당량이 0.45%이상 0.60%이하의 경우는 100 ~ 200℃, 0.60%이상의 경우 200 ~ 350℃이다. 이에 따라 두께가 32 mm인 강재에서의 용접균열을 예방하기 위해서는 100 ~ 200℃의 용접예열 온도관리가 필요하다. 겨울철에 시공을 하는 경우, 박스거더의 구조상 열전달 면적이 넓기 때문에 냉각속도가 빠르므로 기준 예열온도가 유지되지 못하여 용접균열이 발생된 것으로 판단된다.

5. 용접손상 예방을 위한 용접예열 온도 선정

두께 32 mm의 강재는 탄소당량이 0.452%로서 100 ~ 200℃의 예열관리가 필요했으나 겨울철 시공시 용접예열 후 용접시작 전까지의 3분 동안 용접예열온도를 유지시키지 못하여 용접균열이 발생되었다.

5.1 용접시공조건

용접 전 최소 용접예열 온도를 유지하기 위하여 용

Table 3 Mechanical properties of box girder materials^[7,8]

Material	SM490BW	SM490B
Tensile strength (MPa)	490~610	490~610
Yield strength (MPa)	Min. 355	Min. 315
Elongation (%)	Min. 19	Min. 21
Hardness (Hv)	Min. 27	Min. 27

Table 4 Chemical compositions of box girder materials^[7,8]

Material	SM490BW	SM490B
C (%)	Max. 0.18	Max. 0.18
Si (%)	0.15 ~ 0.65	Max. 0.55
Mn (%)	Max. 1.40	Max. 1.60
P (%)	Max. 0.035	Max. 0.035
S (%)	Max. 0.035	Max. 0.035
Cu (%)	0.30~0.50	-
Cr (%)	0.45~0.75	-
Ni (%)	0.05~0.30	-

Table 5 Equivalent carbon component inspection by chemical component test

Thickness (mm)	12	14	18	26	32
C (%)	0.1	0.1	0.1033	0.1191	0.1365
Si (%)	0.26	0.26	0.247	0.423	0.448
Mn (%)	0.98	0.98	0.994	0.95	1.025
P (%)	0.017	0.017	0.0176	0.015	0.0161
S (%)	0.005	0.005	0.0037	0.0048	0.0046
Cu (%)	0.35	0.37	0.388	0.383	0.374
Cr (%)	0.64	0.61	0.6	0.63	0.61
Ni (%)	0.15	0.15	0.15	0.14	0.16
Carbon (%)	0.4059	0.3999	0.403	0.4246	0.452

접예열 온도와 가열 폭에 대한 기준을 제시하기 위해 내후성장 박스거더의 용접예열온도 변화 측정 시험을 수행하였다. 시험에 적용된 펠릿이음부의 두께는 12 mm와 32 mm이다. 두께 12 mm의 규격은 폭 1,600 mm, 길이 9,160 mm이며, 두께 32 mm의 규격은 폭 2,300 mm, 길이 9,160 mm로 두께와 폭은 용접균열이 발생된 부재와 동일하다. 예열을 위하여 화염토치를 사용하였으며, 화염토치에 공급되는 가스는 산소와 프로판가스(liquefied petroleum gas, LPG)이다. 시험당시 모재의 온도는 0.6℃, 대기온도는 1.2℃이다.

5.2 용접예열 온도 측정방법

용접이음부 양쪽 폭 75 mm, 길이 1,000 mm를 200℃와 230℃의 온도로 예열하여 시험하였고, 용접이음부 양쪽 폭 130 mm, 길이 1,000 mm를 200℃와 230℃의 온도로 예열하여 시간에 따른 용접예열 온도의 변화를 1.5분 간격으로 측정하였다. 용접예열 온도는 두께 32 mm에 대해 용접시작부에서 100 mm, 용접중심선에서 50 mm 떨어진 각 위치에서 디지털 온도계를 이용하여 측정 하였다.

5.3 용접예열 온도 측정결과 및 고찰

시간에 따른 용접예열 온도의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 용접이음부 양쪽 폭 75 mm를 200℃로 예열했을 경우 1.5분에 144℃, 3분에는 71℃, 4.5분에는 17℃로 온도가 변화되었으며, 용접이음부 양쪽 폭 75 mm를 230℃로 예열하였을 경우에는 1.5분에 168℃, 3분에는 84℃, 4.5분에는 23℃로 온도가 변화되었다. 용접이음부 양쪽 폭 130 mm를 200℃로 예열했을 경우에는 1.5분에 155℃, 3분에는 95℃, 4.5분에는 48℃로 온도가 변화되어, 위 세 가지 경우 모두 3분 이내에 최소예열온도이하로 온도가 낮아지는 것으로 나타났다. 용접이음부 양쪽 폭 130 mm를 230℃로 예열하였을 경우에는 1.5분에 177℃, 3분에는 112℃, 4.5분에는 71℃로 온도가 변화되는 것으로 나타나 예열 후 3분 이내에는 적정 용접예열 온도를 유지하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 용접예열 후 용접을 시작하기 전까지 3분의 작업시간이 소요됨에 따라 용접 전 예열온도를 유지하여 용접균열을 예방하기 위해서는 용접이음부 양쪽을 폭 130 mm이상 가열하고 230℃이상으로 예열하여야 용접손상을 줄일 수 있는 적정예열 온도를 유지시킬 수 있다.

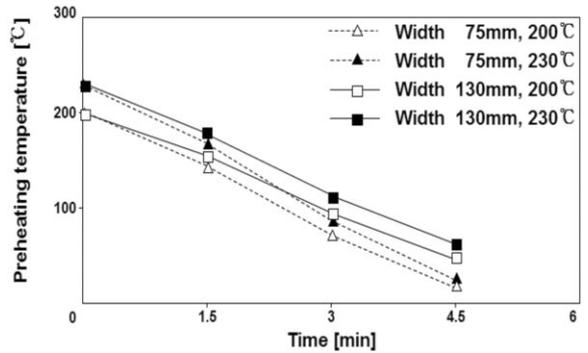


Fig. 5 Preheating temperature along the time at various width and temperature.

6. 결론

본 연구에서 강교용 박스거더의 용접손상원인 분석 및 시간에 따른 용접예열 온도의 변화를 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

두께 32 mm 펠릿용접부에 용접균열이 발생한 원인은 탄소당량시험결과 0.452%로서 소재의 경화성이 높아 용접 전 100 ~ 200℃의 용접예열 온도를 유지하여야 하나, 겨울철 시공에 의한 급냉과 박스거더의 구조상 열전달 면적이 넓어서 냉각 속도가 증가되어 나타난 결과이다. 따라서 적정 용접예열 온도를 유지하고 용접예열 온도가 급격하게 내려가는 것을 방지하기 위해서는 용접이음부 양쪽을 폭 130 mm이상을 가열하고 230℃이상으로 예열해야 용접 전 적정 용접예열 온도를 유지하여 용접손상을 줄일 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 박용명, 성택용, 1998, “무도장 내후성장의 교량적용에 대하여”, 강구조학회지 제10권 2호, p. 50.
2. 안종석, 2010, “초초임계압 석탄화력 보일러 수냉벽 수관의 용접신뢰성 향상방안”, 한양대학교 대학원 석사학위논문, pp. 9-12.
3. 윤경근, 2007, “용접기술사”, 일진사, pp. 282-409.
4. 은정철, 2000, “실용 용접재료와 코드”, 대신기술, pp. 19-31.
5. 최정영, 1997, “용접접합강도편람”, 골드, pp. 3-5.

강교용 박스거더의 용접예열 온도 선정에 관한 연구

6. 한국표준협회, 2005, “내후성강용 탄산가스 아크용접 플럭스 충전와이어 KS D 7109”, p. 2.
7. 지식경제부 기술표준원, 2008, “용접 구조용 내후성 열간 압연 강재 KS D 3529”, pp. 3-5.
8. 지식경제부 기술표준원, 2008, “용접 구조용 압연 강재 KS D 3515”, pp. 3-5.