

용접결함이 횡방향 맞대기 용접부의 정적강도특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

장 동 일*, 채 원 규**, 경 갑 수***, 홍 성 옥****

- * 한양대학교 토목공학과 교수
- ** 신구대학 토목과 조교수
- *** 한국도로공사 도로연구소 책임연구원
- **** 한림정보산업대학 토목과 전임강사

1. 서 론

대부분의 강구조물에서 주부재를 연결하는 경우 강제중량의 감소를 도모하거나 구조물의 미관을 고려해서 맞대기 용접이음방법을 주로 적용하고 있다.

일반적으로 횡방향 맞대기 용접부에서 발생할 수 있는 용접결함의 예로써는 그림 1~그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 용입부족, 용융불량 등과 같은 평면적 결함과 공동(孔洞, 블로우홀), 슬래그혼입 등과 같은 입체적 결함을 거론할 수 있다. 그러나 현실적으로 강교량 제작단계에서 이러한 용접결함이 전혀 없는 완전무결한 용접을 실시하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 비경제적이기 때문에 현재 국내 도로교 표준시방서에서는 대상교량 또는 용접부의 위치에 따라 비파괴시험에 의해서 허용결함 크기를 규정하고 있다.

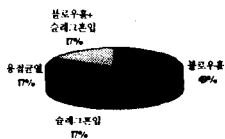


그림 1. 자동용접법

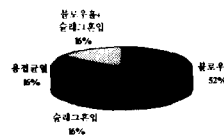


그림 2. 반자동용접법

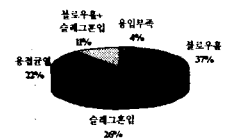


그림 3. 전 용접방법

그림 1~그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 강구조부재를 자동용접(SAW)이나 반자동용접(FCAW)으로 용접하는 경우 발생할 수 있는 용접결함 중에서 블로우홀과 슬래그혼입이 약 74%로 가장 많은 빈도를 차지하고 있으며, 용접균열과 용입부족도 다수 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

이러한 실정에도 불구하고 현재 강교량 용접부에 내재하는 용접결함이 부재의 강도특성 및 구조물의 안전성에 미치는 영향에 대한 국내의 연구는 국내 일부 학자들에 의해서 실시되고 있기는 하지만 아직까지는 실험자료가 부족한 실정이고 실험과 관련한 기반시설이나 정책결정권자들의 이해정도가 아직 초보적 수준에 지나지 않기 때문에 용접결함의 특성을 고려한 허용결함기준이 명확하게 제시되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 현재 강교량 주부재의 연결에 주로 사용되는 횡방향 맞대기 용접부를 대상으로 평면결함의 일종인 용입부족과 입체결함의 일종인 블로우홀을 인위적으로 도입함으로써 용입부족 및 블로우홀의 크기에 따른 정적강도특성을 정량적으로 평가하고, 향후 유지관리에서 합리적인 안전성 판단기준을 수립하기 위한 기초적인 자료를 제공하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 기존연구동향

용접결함이 횡방향 맞대기 용접부의 정적 및 피로특성에 미치는 영향에 대해서 과거에 시행된 연구에서는 상당한 크기의 용접결함이 존재하더라도 정적강도에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고하고 있다.

Green, Hamad 및 Mccauley[1958]는 다공성(多孔性) 즉, 블로우홀에 의해서 발생한 단면적 감소율이 7%일 때까지 정적강도는 거의 저하하지 않는다고 보고하고 있다. Dinsdale 및 Young[1965]은 용입부족이나 용융불량과 같은 평면결함의 영향에

대해서 알루미늄 합금의 인장강도는 대략 단면적 감소율에 비례한다고 하고 강재의 경우에는 평면결함이 인장강도에 거의 영향을 미치지 않지만 알루미늄 합금의 경우에는 영향을 미친다고 보고하고 있다. 度辺 및 蒲池[1961]는 용접결함을 가진 횡방향 맞대기 용접부에 대한 정적실험결과 용입부족, 용융불량, 블로우홀, 슬래그혼입, 언더컷과 같은 용접결함은 정적강도에는 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있다.

3. 실험개요

3.1 시험체

본 연구에서 사용한 시험체는 현재 국내에서 널리 사용되는 용접구조용강재인 SWS490B로서 이에 대한 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같으며, ASTM E8M-92[1992]에서 규정하고 있는 표준시험체의 형상에 준해서 그림 4와 같이 제작하였다.

표 1. 화학성분 및 물리적 성질

강종	화 학 성 분 (Wt %)					물 리 적 성 질			
	C	Si	Mn	P	S	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	탄성계수(GPa)	연신율(%)
SWS 490B	0.15	0.32	1.25	0.012	0.007	340.3	519.8	205.3	27.6

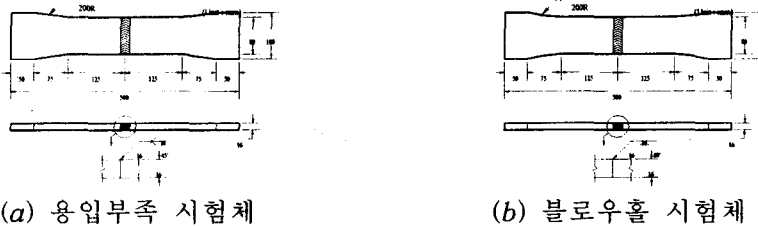


그림 4. 시험체 형상 및 치수

3.2 용접방법

본 연구에서 사용한 시험체는 평면결함의 대표적 예인 용입부족(IP)과 블로우홀(BH)을 인위적으로 도입하기 위해서 맞대기면을 X형과 V형으로 개선하고 반자동용접법과 자동용접법을 이용해서 그림 5와 같이 용접을 실시하였다.



그림 5. 시험체 용접방법

3.3 용접조건

용입부족 및 블로우홀 시험체에 대한 각 층별 용접방법 및 용접조건은 표 2 및 표 3과 같으며, 용착금속의 화학성분 및 물리적 성질은 표 4와 같다.

표 2. 각 층별 용접방법

층수(pass)	봉경(mm)	전류(amp.)	전압(volt)	속도(cm/min)	비 고
1, 5	1.2	160	25	20 ~ 30	
2, 6	1.2	230	29	20 ~ 30	
3,4,7,8,9	1.2	300	32	20 ~ 30	9는 블로우홀 시험체에 한함

표 3. 용접조건

용접자세	용접봉	극성	전극	가스
F(하향)	KOBE(1.2φ)	DC, RP	탄극	CO ₂ 25l/min

표 4. 용착금속의 화학성분 및 물리적 성질

종 류	화 학 성 분 (W _i %)						물 리 적 성 질			
	C	Si	Mn	P	S	Ni	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신율(%)	충격치(J)
DW-55L	0.04	0.38	1.36	0.012	0.009	1.43	530	600	27	90

4. 실험결과 및 고찰

4.1 용입부족 시험체의 정적강도특성

비드를 삭제하지 않은 시험체의 용입부족 크기에 따른 인장강도 및 항복강도를 정리하면 표 5와 같으며, 응력-변형률 선도의 일례는 그림 6과 같다.

표 5. 비드를 삭제하지 않은 시험체의 정적실험결과

용입부족(%)	인장하중(kN)	항복하중(kN)	공칭단면적(mm ²)	인장강도(MPa)	항복강도(MPa)	σ_u / σ_y
0	673.0	431.7	1280	525.2	336.9	1.56
5	668.1	431.7	1280	521.4	344.9	1.51
10	674.9	431.7	1280	526.8	344.5	1.53
20	669.1	412.0	1280	522.2	336.9	1.55
30	672.0	431.7	1280	524.5	344.5	1.52

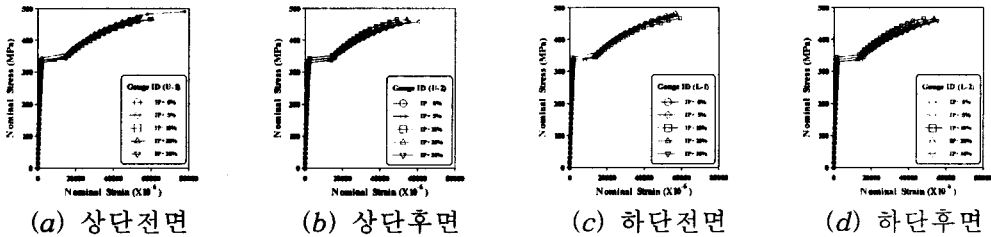


그림 6. 비드를 삭제하지 않은 시험체의 응력-변형률 선도

또한 그림 7은 인장강도와 항복강도의 변화특성 및 항복강도에 대한 인장강도의 비를 표 1의 모재의 물리적 성질과 비교해서 나타낸 것이다.



(a) 인장강도 및 항복강도의 변화특성

(b) 항복강도에 대한 인장강도 비

그림 7. 비드를 삭제하지 않은 시험체의 정적강도특성

또한 비드를 삭제한 시험체에 대해서 용입부족 크기에 따른 인장강도 및 항복강도를 정리하면 표 6과 같으며, 응력-변형률 선도의 일례는 그림 8과 같다.

표 6. 비드를 삭제한 시험체의 정적실험결과

용입부족(%)	인장하중(kN)	항복하중(kN)	공칭단면적(mm ²)	인장강도(MPa)	항복강도(MPa)	σ_u / σ_y
0	703.3	433.2	1280	549.5	338.5	1.62
5	699.1	432.2	1280	546.2	337.7	1.59
10	701.3	442.6	1280	547.9	345.8	1.59
20	676.3	451.5	1280	528.4	352.8	1.50
30	636.2	434.3	1280	497.1	339.3	1.47

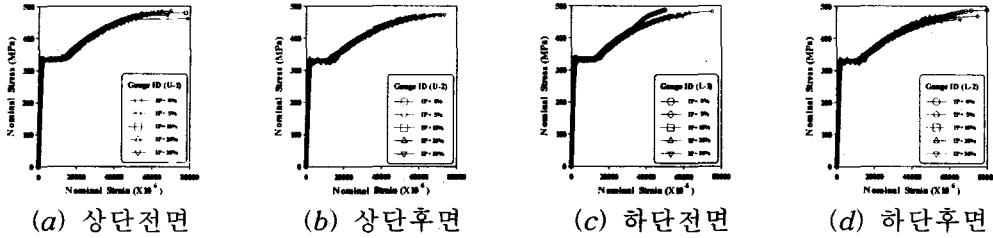
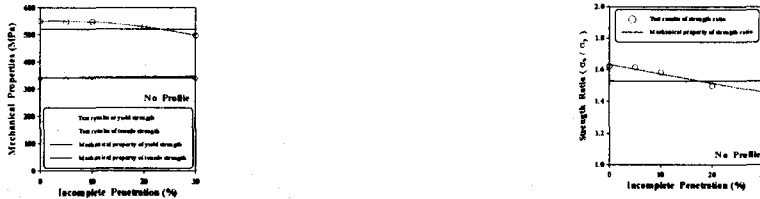


그림 8. 비드를 삭제한 시험체의 응력-변형률 선도

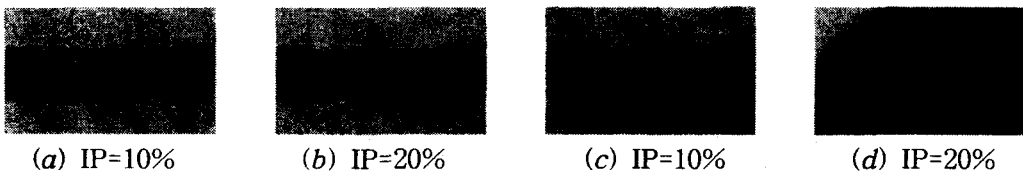
또한 그림 9는 인장강도와 항복강도의 변화특성 및 항복강도에 대한 인장강도의 비를 표 1의 모재의 물리적 성질과 비교해서 나타낸 것이다.



(a) 인장강도 및 항복강도의 변화특성 (b) 항복강도에 대한 인장강도 비

그림 9. 비드를 삭제한 시험체의 정적강도특성

그림 7과 같이 비드를 삭제하지 않은 시험체는 용입부족 크기에 따라 인장강도와 항복강도가 큰 차이가 없으며, 그림 10과 같이 파단은 모재부에서 발생하였는데 이러한 경향은 용접비드에 의해 용접부의 유효단면적이 모재부보다 크고 용착부와 열영향부(HAZ)의 경도가 모재부보다 크기 때문인 것으로 생각된다. 한편 그림 9에서와 같이 비드를 삭제한 시험체의 항복강도는 용입부족 크기에 관계없이 거의 일정하지만 인장강도는 용입부족 크기 20%를 경계로 감소하고 있는데 이는 度辺과 蒲池의 연구결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그리고 용입부족 크기 20% 이하인 경우에는 모재부에서 파단이 발생하였으나 20% 이상인 경우에는 용접부에서 발생하였는데 이러한 경향은 비드를 삭제한 경우 용접부의 유효단면적이 용입부족 크기만큼 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 용입부족을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 정적강도는 용접부에서의 유효단면적에 가장 크게 의존함을 알 수 있으며, 용착부와 열영향부의 경도도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



(a) IP=10% (b) IP=20% (c) IP=10% (d) IP=20%

그림 10. 용입부족 시험체의 파단면 특성

4.2 블로우홀 시험체의 정적강도특성

비드를 삭제하지 않은 시험체의 블로우홀 크기에 따른 인장강도 및 항복강도를 정리하면 표 7과 같으며, 응력-변형률 선도의 일례는 그림 11과 같다.

표 7. 비드를 삭제하지 않은 시험체의 정적실험결과

블로우홀	인장하중(kN)	항복하중(kN)	공칭단면적(mm ²)	인장강도(MPa)	항복강도(MPa)	σ_u / σ_y
None	706.4	441.5	1280	551.9	344.9	1.60
Small	707.8	447.3	1280	553.0	349.5	1.58
Medium	703.7	439.4	1280	549.8	343.3	1.60
Large	707.2	444.8	1280	552.5	47.5	1.59

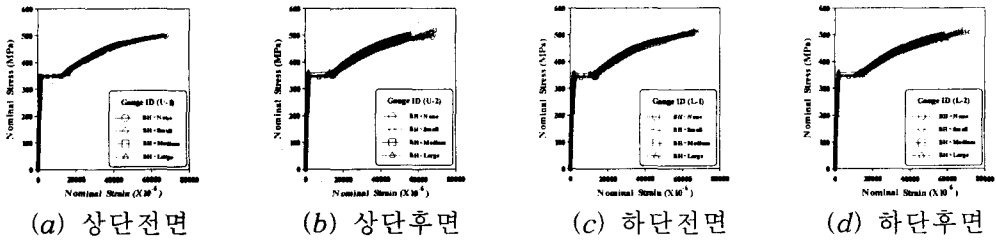


그림 11. 비드를 삭제하지 않은 시험체의 응력-변형률 선도

그림 12는 인장강도와 항복강도의 변화특성 및 항복강도에 대한 인장강도의 비를 표 1에서 나타낸 모재의 물리적 성질과 비교해서 나타낸 것이다.



그림 12. 비드를 삭제하지 않은 시험체의 정적강도특성

한편 비드를 삭제한 시험체의 블로우홀 크기에 따른 인장강도 및 항복강도를 정리하면 표 8과 같으며, 응력-변형률 선도의 일례는 그림 13과 같다.

표 8. 비드를 삭제한 시험체의 정적실험결과

블로우홀	인장하중(kN)	항복하중(kN)	공칭단면적(mm ²)	인장강도(MPa)	항복강도(MPa)	σ_u / σ_y
None	703.3	433.2	1280	556.2	339.4	1.64
Small	699.1	432.2	1280	562.3	353.4	1.59
Medium	701.3	442.6	1280	555.9	341.3	1.63
Large	676.3	451.5	1280	562.3	351.9	1.60

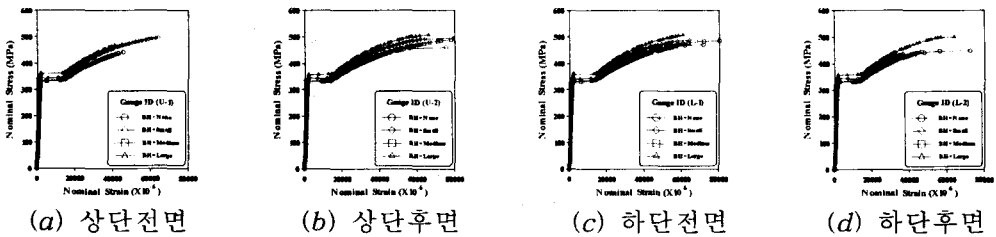


그림 13. 비드를 삭제한 시험체의 응력-변형률 선도

또한 그림 14는 인장강도와 항복강도의 변화특성 및 항복강도에 대한 인장강도의 비를 표 1의 모재의 물리적 성질과 비교해서 나타낸 것이다.



(a) 인장강도 및 항복강도의 변화특성 (b) 항복강도에 대한 인장강도 비
 그림 14. 비드를 삭제한 시험체의 정적강도특성

그림 12에서와 같이 비드를 삭제하지 않은 시험체의 경우 블로우홀 크기에 관계 없이 인장강도와 항복강도는 거의 일정함을 알 수 있으며, 파단은 모두 모재부에서 발생하였는데 이는 비드를 삭제하지 않은 용입부족 시험체의 경우와 마찬가지로 용접비드에 의해 유효단면적이 모재부보다 증가하고 용착부와 열영향부의 경도가 모재부보다 크기 때문인 것으로 생각된다. 또한 그림 14와 같이 비드를 삭제한 경우도 비드를 삭제하지 않은 경우와 동일한 경향을 나타내고 그림 15에서와 같이 파단은 모재부에서 발생하고 있는데 이로부터 블로우홀과 같은 불연속적인 용접결함은 횡방향 맞대기 용접부의 정적강도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.



(a) BH=Small (b) BH=Large (a) BH=Small (b) BH=Large
 그림 15. 블로우홀 시험체의 파단면 특성

5. 결 론

- (1) 비드를 삭제하지 않은 시험체의 인장강도와 항복강도는 용입부족 및 블로우홀의 크기에 관계없이 일정하는데 이는 용착부와 열영향부의 경도보다 모재부의 경도가 상대적으로 작아서 작용외력에 대해 모재가 우선적으로 변형하기 때문이다.
- (2) 비드를 삭제한 시험체의 정적강도특성은 용입부족에 대해서는 면적감소율 20%를 경계로 감소하는데 이는 작용외력에 저항하는 단면이 일정한 값 이하로 감소하면 경도에 관계없이 단면감소부가 우선적으로 변형하기 때문이다.
- (3) 비드를 삭제한 시험체의 정적강도특성은 블로우홀 크기에 관계없이 파단은 모재부에서 발생하고 있는데 이로부터 블로우홀과 같은 불연속적인 용접결함은 정적강도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

- (1) 김 학재, “溶入不足에 따른 맞대기 용접부의 疲勞舉動에 관한 研究”, 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1998.
- (2) 渡辺正紀, 蒲池一義, “溶接缺陷と繼手強度の關係”, 溶接學會論文集, 第30卷, 第6號, 1961.
- (3) W.O. Dinsdale, J.G. Young, “The Significance of Defects in Aluminium Alloy Fusion Welds”, Commonwealth Weld. Conf. London, 1965.
- (4) W.L. Green, M.F. Hamad and R.B. Mccauley, “The Effect of Porosity on Mild Steel Welds”, Weld. Res. Suppl. Vol.38, No.5, pp.206-209, 1958.