

본 연구에 협조하여 주신 동부건설 시험실의 관계자 여러분께 감사드리며 KOSEF의 ERC(SAFE)를 통한 재정지원에 감사드립니다.

CO₂ 가스 용접된 강관파일의 피로수명 평가

이 억 섭*, 김 동 준**, 김 승 권**

Fatigue Life Estimation of CO₂ Gas Arc Welded Carbon Steel Tubes

O.S. Lee*, D.J. Kim**, S.G. Kim**

ABSTRACT

In this study, the fatigue lives of two kinds of specimens made by CO₂ gas weld were assessed. The materials for two kinds of specimens were taken out of the virgin carbon steel tubes and the used carbon steel tubes, respectively. As a result, it was found that the fatigue lives of two groups of specimens were in the same order of magnitude.

Key Words : Fatigue life(피로수명), CO₂ gas weld(CO₂ 가스용접), Virgin carbon steel tube(신 탄소강관), Used carbon steel tube(구 탄소 강관)

1. 서 론

대형 구조물의 시공시 기초 구조물인 강관 파일은 그 기능상 구조물의 안전에 큰 영향을 미치게 되는데, 이 강관파일이 지지하고 있는 구조물 위를 고속차량이 반복적으로 운행하는 경우, 고속차량의 주행으로 인한 피로 하중의 발생으로 구조물 안전에 영향을 미치게 된다.

파일 향타 작업시 설계깊이 (소요 지지력 확보 깊이)까지 파일을 지반에 설치하기 위해서는 7ton 햄머를 사용하여 최대 2,000회를 향타하게 된다. 이때 자연적으로 피할수 없는 편심률 차이 때문에 파일 상단부의 응력 분포는 균일 하지 않게 된다. 때로는 이러한 편심률로 인해 부분적 비틀림과 굽힘 응력이 함께 작용하여 파일 상단부의 불균일한 소성변형의 원인이 된다.

Fig. 1과 같이 강관 파일을 지반에 설치한 후 남게되는 강관 파일 ④의 길이가 3m 이상이 될 경우 변형이 심한 상단부 0.5m는 절단하여 파일의 외경 차이가 ±6mm 이내가 되도록 하여야 한다. 또한 파일 ④는 초음파 탐상시험 (U.T)과 외관 검사를 (기계적 손실을 받아서는 안된다.) 받아야 한다. 그리고 용접하기전 두 파일의 직경 즉, ④와 ⑥의 직경 차이는 최대한 3mm로 한 다음 파일 ⑥와 CO₂ 가스 용접을 하게 된다.

본 연구에서는 위와 같은 검사를 마친 강관 ④와 강관 ⑥를 CO₂ 가스 용접한 부위와 길이가 3m인 새 강관 ⑤와 강관 ⑥를 CO₂ 가스 용접한 부위에서 각각 시편을 채취한 후, 피로시험을 통해 새 강관 파일과 재생 강관 파일과의 피로 수명을 비교 분석함으로써 재생 강관 파일의 재사용 가능 여부를 검토하였다. 본 연구를 통해 강관의

* 인하대학교 기계공학과
** 인하대학교 대학원

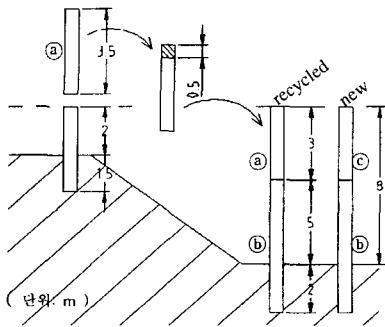


Fig. 1 Principle of recycling carbon steel tube.

재활용이 가능한 것으로 증명되면, 현재 여러 건설 현장에서 건설 폐기물로 방치되고 있는 ④와 같은 강관을 재활용 함으로써 건설 자재를 절약 할 수 있고, 이로 인한 폐기물의 감소로 환경 보호에도 이바지 할 것으로 기대된다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시험편 및 실험 장치

본 실험에서 사용된 시험편은 지름이 609.6mm, 길이 7m, 두께 12mm의 SWS 41 용접 구조용 압연 강재에서 채취한 것으로써 지반에 설치하기 전의 강관파일(신파일)과 서론에서 언급한 방법으로 재생한 강관파일(재생파일)에서 각각 시편 재료들을 채취하였다. 강관의 지름과 두께 또는 길이는 현재 생산되고 있는 기성제품이며 이들 사이에 특별한 상관 관계는 없다.

용접방법으로는 CO₂가스 아크 용접이며 여기에 사용된 wire의 화학 성분을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of Wire.

Wire (AWS E70T-1)	Chemical compositions (wt. %)				
	C	Si	Mn	P	S
	0.05	0.75	1.56	0.014	0.011

Table 2에는 시험편 모재의 화학 성분을 나타내었다.

Table 2 Chemical compositions of specimen base metal.

Type	Base metal	Chemical compositions (wt. %)				
		C	Si	Mn	P	S
SWS 41	0.23 Max	0.1 Max	0.575 Min	0.04 Max	0.05 Max	

각 시험편의 용접조건은 Table 3에 자세히 나타내었다. KSD 3566에 따른 인장 시험법으로 신 강관파일과 재생 강관파일의 용접부에 대한 인장 강도를 시험하였고, 충격 시험은 KSB 0810에 따라 충격 시험을 하였다. 아래의 Table 4는 위의 시험 결과를 나타낸 것이다.

Table 4를 보면 각각의 시편에 대한 결과치가 대등소이함을 알 수 있다. 충격 시험값은 큰 차이를 나타내고 있는데, 반복 하중을 받는 구조물에 사용될 강관의 재활용여부를 판단하기 위한 피로 수명에는 충격값이 직접적으로 연관 되지 않은 것으로 사료되어 이에 대한 해석은 수행하지 않았다.

피로수명 측정을 위한 시험편의 기하학적 형상은 Fig. 2와 같다.

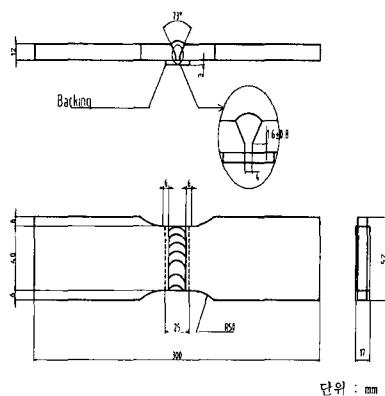
Fig. 3은 본 연구에 사용된 피로시험기 (10ton Saginomiyia Fatigue Test Machine)에 시편을 장착한 사진이다.

Table 3 Welding condition.

	Base metal of thickness T(mm)	Wire ϕ (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)
CO ₂ gas welding	12	1.6	400~450	33~36	40

Table 4 Comparison of mechanical properties of each specimen.

Test method	Type	Recycled (SWS 41)			New (SWS 41)		
		# 1	# 2	# 3	# 1	# 2	# 3
Tensile test	Tensile strength N/mm ²	478	464	472	456	446	461
	Yield strength N/mm ²	348	334	339	349	332	352
	Elongation %	34	35	34	37	38	35
Impact test	Charpy absorbed energy J	166	104	166	39	49	39



*Backing : 용접시 용입의 갑작스런 증가로 생길 수 있는 용접결함(즉, 기포, 균열 및 용각(burn through)을 방지하기 위해 쓰이는 것으로 체질은 모재와 같은 것을 사용한다.

Fig. 2 Configuration of specimen.

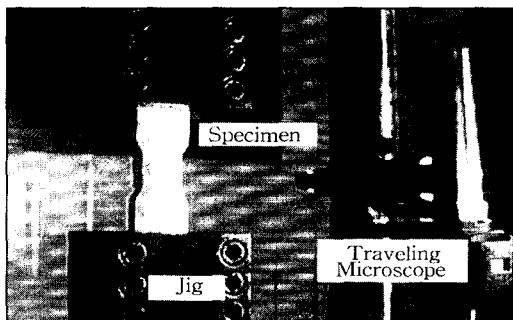


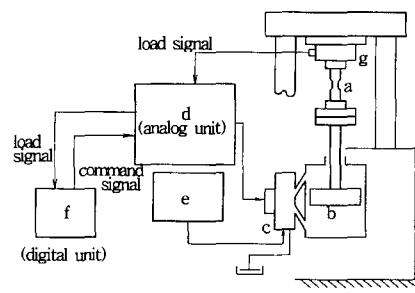
Fig. 3 10ton Saginomiya fatigue test machine.

Fig. 4는 피로시험기의 작동원리를 간략히 나타낸 계통도로써 유압모터에서 발생한 동력으로 액츄에이터를 상하·왕복운동 시켜 Jig에 장착된 시편에 인장 및 압축하중을 주게된다.^(1,2) 그리고, 시편에 적용될 하중의 형태를 반복하중으로 가하기 위해서 제어기가 사용되며 오실로스코프를 통해 보다 정확한 하중 조건과 하중 범위를 설정하게 된다.

2 2 실험 방법

재생시편과 신시편의 피로 수명에 대한 비교분석을 용이하기 위해 S-N 곡선⁽¹⁾에서 하중을 6 ton 이상, 9 ton 이하의 범위로 설정하였고 하중변화량을 약 0.6 ton으로 하였다.

Table 5는 신 강관파일 시편과 재생 강관파일 시편 각각에 대한 피로 하중 조건이다.



(a) specimen (b) hydraulic actuator
(c) servo-valve (d) controller
(e) hydraulic motor (f) oscilloscope (g) load cell

Fig. 4 Fatigue test system.

Table 5 Applied fatigue loading

Spec. no.	Load (ton)				
	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Type					
Recycled	7.347	6.735	6.122	7.959	8.571
New	7.347	6.735	6.122	7.959	8.571

모든 시험편에 Sine파형의 일정한 반복하중을 가하였고 주파수는 10Hz로 하였다. Fig. 5는 본 실험에서 사용된 반복하중인 Sine파형의 하중모양이다.

이 파형은 편진 응력하중의 파형으로써 이론적으로 $P_m = 0$ 이 되고, 하중진폭 ΔP 가 P_{max} 이 되는 하중 조건이다.^(1,2) 여기에서 정확하게는 응력비를 0으로 해야 하지만 기계적인 세팅에 무리가 있고, 실제 실험에 있어서 시험기의 반복적인 작동으로 인한 기계적 오차를 감안하여 응력비 $R \approx 0.01$ 로 하였다.

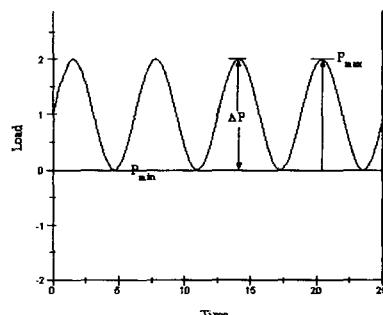


Fig. 5 Applied fatigue load of sine curve.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 6은 피로시험을 수행한 후 각각의 시편들이 파단된 모양이다.

강관파일의 피로특성의 규명에 역점을 두고 실험을 한 결과 로크웰경도 시험, 인장 시험 및 충격 시험에서 나타난 결과와 같이, 신 강관 파일과 재생 강관 파일의 피로 수명은 Table 6에서 보인 것과 같이 큰 차이점이 나타나지 않았다. Table 6에서의 σ_{max} 값은 임의로 결정한 Table 5의 피로하중 즉, P_{max} 을 용접부위의 단면적으로 나눈 값이며 재료의 특성과는 관계없는 응력값이다.

Table 6에서 재생 시편 ①번을 사용한 실험은 본 피로 시험을 수행하기에 앞서 실험에 알맞은 하중조건을 결정하기 위한 예비실험이었고, 신 시편 ②번과 ③번에서 피

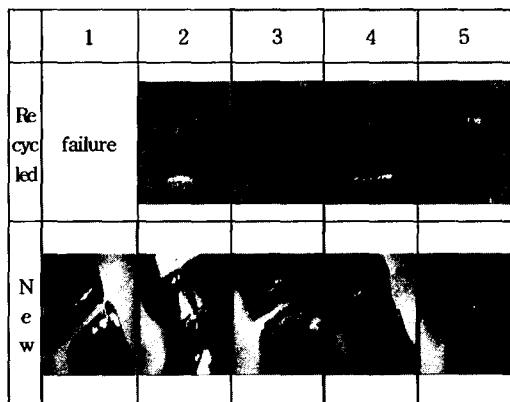


Fig. 6 Photographs of fractured specimen after fatigue testing.

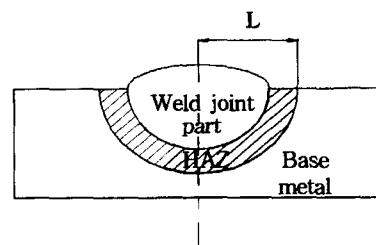
Table 6 Loading condition & fatigue life for various specimens.

Result Type	No.	R (σ_{av}/σ_{max})	σ_{max} (MPa)	Cycles (N)
Recycled	1	0.01	150	failure
	2	0.01	137.5	2,050,000
	3	0.01	124.9	3,110,000
	4	0.01	162.5	1,920,000
	5	0.01	174.9	1,870,000
New	1	0.01	150	1,370,000
	2	0.01	137.5	260,000
	3	0.01	124.9	240,000
	4	0.01	162.5	3,740,760
	5	0.01	174.9	1,980,000

로 수명이 짧게 나타난 것은 파일 제작시 실제 용접을 하기전 가용접을 한 영향으로 보인다.

본 연구에서 사용된 지름 609.6mm인 경우 모두 50mm 간격으로 6군데 이상 8군데 이하를 가용접 하도록 AWS (American Welding Society)에서 규정하고 있다.⁽³⁾ 여기서 신시편 ②번을 채취할 때 사전에 예열을 하지 않는 가용접 부위에서 채취한 것이다. 즉, 용접시 발생되는 고열에 의해 용접부 주위는 HAZ (Heat Affected Zone) 이 형성되며 이 부분은 열변형으로 인해 연성이 크게 저하하며 결함이 쉽게 발생한다. 특히 동절기 용접작업시 대기온도가 0°C 이하일 경우, 용접 하기 전에 용접할 부위의 예열폭을 최소한 50mm 이상으로 하고 온도를 101°C 이상 가열한 뒤 실제 본 용접을 실시해 HAZ영역을 최대한 줄여야 한다.⁽⁴⁾

본 실험과 유사한 조건하에 실시된 열영향부 측정에 관한 연구⁽⁵⁾ 결과를 보면 SS41의 CO₂가스 아크 용접된 부위의 중심으로부터 약 6mm 떨어진 곳에서 HAZ가 발견된 것으로 나타나 있다. 본 연구의 경우도 다음의 Fig. 7 과 같이 몇몇 시편을 제외한 대부분의 경우 HAZ와 모재의 경계면인 용접부의 중심으로부터 약 7mm~11mm 떨어진 곳에서 피로 파괴되었다.



* L : 용접부 중심으로부터 HAZ와 모재의 경계면까지의 거리

Fig. 7 Crossection of CO₂ gas arc welded specimen.

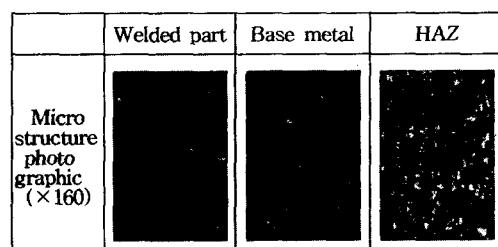


Fig. 8 Microstructures of various part.

HAZ를 제거하기 위하여 수행하는 용접부위의 예열작업이 생략된 가용접 부위에서 채취한 ②번 시편은 HAZ의 범위가 더 넓어졌기 때문에 위의 Fig. 6에서 보인 것과 같이 용접부 주변이 아닌 곳에서 피로 파괴되는 현상이 밝혀졌다.

③번 시편의 경우 Fig. 6에서와 같이 용접부에서 피로파괴되었다. 대부분의 용접재의 경우 아래의 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 용접부에서는 모재보다 조직이 더욱 치밀해져 용접부위에선 피로 파괴가 모재보다 먼저 일어나지 않고 조직이 변화하는 HAZ와 모재사이의 경계 영역에서 균열이 시작되어 파괴가 된다.⁽⁵⁾

가용접으로 인한 열변형된 ②번 시편과 용접부 내에 용접결합을 내포한 ③번 시편에 대한 실험결과는 신 강관파일과 재생 강관파일의 용접부위에 대한 순수 피로수명을 예측하는데 사용되지 못할 자료이다.⁽⁷⁾ 왜냐하면 이러한 가용접 부위의 열변형과 기타 여러 용접 결합은 신 강관파일과 재생 강관파일 모두에 발생할 수 있는 용접 상의 문제이기 때문이다.

신 강관 재료를 용접한 부위에서 채취한 시편의 피로수명과 재생 강관 재료를 용접한 부위에서 채취한 시편의 S-N선도 Fig. 9와 BS (British Standard) 규격에 제시된 동일 용접조건 하에서 용접된 SWS-41의 S-N선도를 비교한 Fig. 10을 통해 신 강관과 재생 강관의 피로수명은 큰 차이가 없음을 알수있다. 이러한 사실은 Fig. 10에서 신시편의 ②번과 ③번을 제외한 모든 시편들의 피로 수명값이 BS규격에서 제시한 S-N선도의 오른쪽 상단에 융집되어 나타나고 있음으로 밝혀진다. 즉, 신시편 ②번과 ③번을 제외한 모든 시편들의 피로 수명값이 BS규격에 제시된 피로 수명보다 더 길게 나타나므로 강관파일의 재사용이 가능함을 알 수 있었다.

Fig. 9와 Fig. 10에서의 endurance cycles는 BS 규격에서 사용하고 있는 용어로써 일정 진폭 하중 하에서 시편이 파단 될 때까지 하중의 총 반복 횟수를 말한다.

4. 결 론

본 연구를 통해 얻어진 결과로 보아 신 강관파일과 재생 강관파일의 피로 수명은 큰 차이가 없다. 따라서 강관을 재생하여 사용할 수 있다. 그러나, 강관의 재생 사용여부를 확실히 규명하기 위해서는, 더 많은 시편을 다양한 하중 조건 하에서 실험하여 재생 사용의 신뢰성을 높이야 한다. 본 연구는 강관의 재생 사용에 대한 가능성을

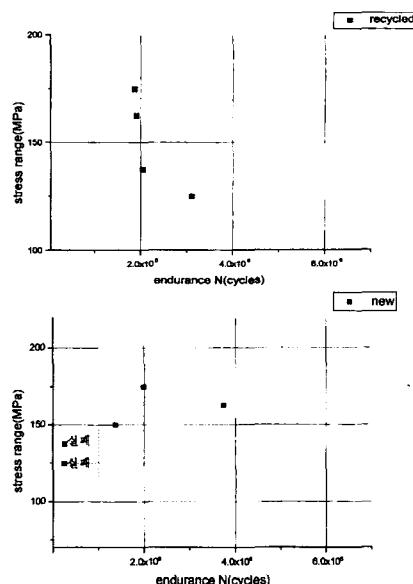


Fig. 9 S-N curves of two carbon steel tubes.

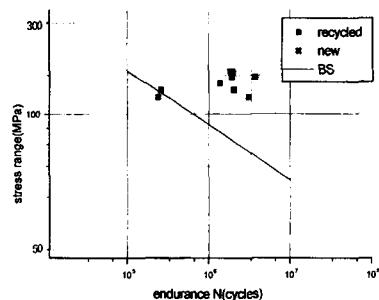


Fig. 10 Comparision of BS (British Standard)

1차적으로 판단해 본 것이고, 그 결과 또한 Fig. 10의 결과와 같이 긍정적이었다.

참 고 문 헌

1. J. A. Bannantine, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, pp. 1~29, 1990.
2. E. Zahavi, "Fatigue Design", CRC, pp. 4249, 1996.
3. AWS D1.1 Structure Welding Code, 13th, p.

- 225, 1996.
4. S. V. Dubovetskil, G.I. Sergatskii, and O.G.Kasatkia , "Optimization of CO₂Welding Conditions", Automatic Welding, Vol. 33, No. 12, pp. 22~26, 1980.
 5. 이정익, 박은철, 박기영, 엄기원, "유한요소법을 이용한 CO₂아크 용접부의 용입 깊이와 열영향부 크기 예측", 한국용접공학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 222~229, 1992.
 6. G. E. Linnere, "Welding Metallurgy, vol. 1", American Welding Society press, pp. 263~268, 1967.
 7. G. E. Linnere, "Welding Metallurgy, vol. 2", American Welding Society press, pp. 283~289, 1967.
 8. BS 5400, "Code of Practice for Fatigue, Part 10", p. 21, 1980.