
論 文

韓國非破壞檢査學會誌
Journal of the Korean Society
for Nondestructive Testing
第15號 Vol. 9, No. 1, (1989)

HK-40 고온반응관 용접부의 Creep손상 진단기법 및 자동 초음파탐상장치의 개발에 관한 연구

조 경 식

(한국기계연구소 비파괴시험연구실)

A Study on the Development of Ultrasonic Scanning Device for the Inspection and Evaluation of Creep Damage of HK-40 Reformer Tube Welded Zone

K. S. Cho

Abstract Detection of creep damages in centrifugally cast HK-40 reformer furnace catalyst tube is a common problem for the safety and scheduled operation of chemical plants. This study was focused on the development of an automatic ultrasonic scanning device with which the creep damage of welded zone of HK-40 reformer tubes is detected and evaluated.

1. 서 론

석유화학 공업에서의 암모니아 및 메타놀 합성이나 윤활유, 도시가스제조 등에는 다량의 수소가 필요한데, 이러한 수소는 고온에서 탄화수소(납사)와 수증기를 개질하는 steam reforming법을 이용하여 제조하며 석유화학의 기초원료인 에틸렌을 제조하는데는 탄화수소를 열분해 하는 납사 cracking법이 적용된다.

이 장치의 핵심부인 고온반응관의 운전조건은 reformer tube의 경우 관벽온도 800~1000°C, 압력 5-40 kg/cm²이고 cracking tube의 경우 900~1100°C, 2-5kg/cm²로서, 재료적인 측면에서 볼때 극한적인 환경

하에서 사용되고 있다. 이러한 사용조건에 견디기 위한 고온반응관의 재료로서는 ACI 규격 HK-40(0.4C-25 Cr-20Ni) 원심주조 내열주강이 널리 공통적으로 사용되고 있다. 이 고온반응관은 creep 강도를 근거로 하여 일반적으로 설계수명을 10만시간으로 제조하고 있으나 사용중 통상적으로 설계수명의 2/5~2/3에서 손상이 발생되고 있어 반응관의 수명소모가 설계치와 일치하지 않고 있으며 특히 반응관의 용접부는 모재 강도에 비하여 80%정도의 강도 밖에 없는 것으로 알려져 있다.

반응관의 수명소모가 설계대로 추이되지 않는 이상 수명이 다하는 시점을 측정할 수 있는 기법의 개발과

확립은 국내 석유화학 설비의 안전성 확보와 경제적 측면에서 절실히 요망된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 기계연구소에서는 1985년도에 초음파를 이용하여 고온반응관 벽면의 creep손상을 측정하는 기법과 장치를 개발하여 현재 가동중에 있는 석유화학 공장의 수소제조용 고온반응관에 대한 creep 손상진단에 활용해 오고 있으며 이와 연계하여 본 연구에서는 그동안의 기술축적을 바탕으로 고온반응관 용접부의 creep손상을 자동 탐상하고 그 손상정도와 잔존수명을 추정할 수 있는 기법과 장치를 개발하였다.

2. 본 론

2. 1 HK-40 reformer tube의 손상

석유화학공업의 고온장치에 사용되는 내열합금은 Cr-Mo강에서 부터 고 Ni합금강에 이르기 까지 그 종류가 많다. Table 1은 대표적인 고온장치에 대하여 유체조건, 구성재료 및 최고 사용온도를 나타내고 있다.

Table 1. High temperature material in petrochemical industries

Process 장치명		유 체 조 건			구 성 재 료	
		온도 (°C)	압력 (kg/cm ²)	조성	종류	최고사용온도 (부하시,°C)
열분해	에틸렌	700~ 900	2~5	탄화수소 STEAM 수 소 에 질 린	Incoloy800	983
	제 조				HK-40	1050
접 촉 분 해	수소화	350~ 500	70~ 130	수 소 탄화수소	Cr-Mo강	565
	분 해				SUS316	816
접 촉 개 질	수 소 제 조	350~ 950	5~ 40	STEAM 수 소 탄소가스 매 탄	Cr-Mo강	565
					HK-40	1050
					SUS316	816
					Incoloy800	983
기 타	알모니아 합 성	350~ 600	100~ 1000	수 소 질 소 알모니아	Cr-Mo강 SUS316	565 816
	합 성 가 스	800~ 900	10~ 30	수 소 CO 탄소가스 매탄 등	HK-40 Incoloy800	1050 1100

여기에서 저합금강의 주체인 Cr-Mo강은 대체로 600

°이하의 가열관, 배관 등에 사용되고 오스테나이트 스테인레스강은 18Cr-8Ni type이 대표적으로 800°C 이하에서 널리 사용되고 있지만 800°C 이상이 되면 주로 HK-40이나 개량형 HP, Incoloy 800 등이 사용된다.

60년대초기부터 seamless 튜브로 사용되고있는 HK-40(25Cr-20Ni)강은 우선 creep-rupture강도나 내부식성면에서 wrought 상태보다 주조상태가 현저히 좋은 성질을 나타내므로 주조상태로서 더 많이 사용하게 되었으며 이중에서도 고온(900-1150°C), 저압(2-6 kg/cm²) 조건인 에틸렌 제조장치용 cracking 튜브와 고온(800-950°C), 고압(5-40kg/cm²)의 가혹한 조건인 수소제조장치용 reformer 튜브의 구성재료로서 많이 사용된다. Fig. 1은 furnace 내부에 배열된 reformer 튜브를 보여주고 있다.

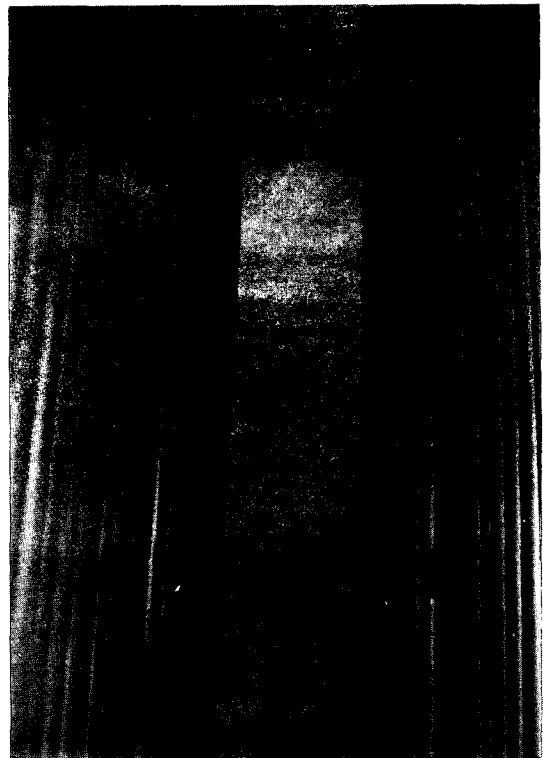


Fig. 1. HK-40 reformer tubes aligned in furnace.

여기서 수소제조용 reformer 튜브의 손상원인을 대별하여 보면 creep, 침탄, 산화 등이 있으며 일본에서 10년간에 걸친 통계에 의하면 Table 2에서 보는 바와같이 손상의 대부분은 creep에 기인하는 것으로 나타났다. 이들 반응관은 주로 내압과 두께방향으로의 온도구배에 기인한 열응력이 합쳐져 Fig. 2에서와 같이 튜브의 내면으로부터 1/3 부분에 응력 peak가 형성되므로 Fig. 3과 같이 이 부분에서 void가 생성되어 micro-fissure로 합쳐, 성장되어 내면쪽으로 전파된 후 외측으로 연결되어 파단에 이른다.¹⁾²⁾

Table 2. Causes of Failure on reformer tubes

손상의종류	재 료	손상건수
Creep 파괴	HK-40	36
침탄, 산화		6
구조결함	Incoloy 800	4

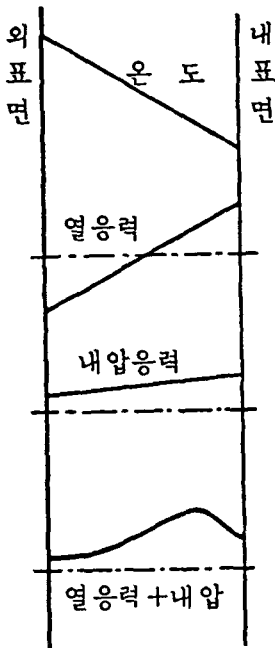


Fig. 2. Stress distribution in tube wall.

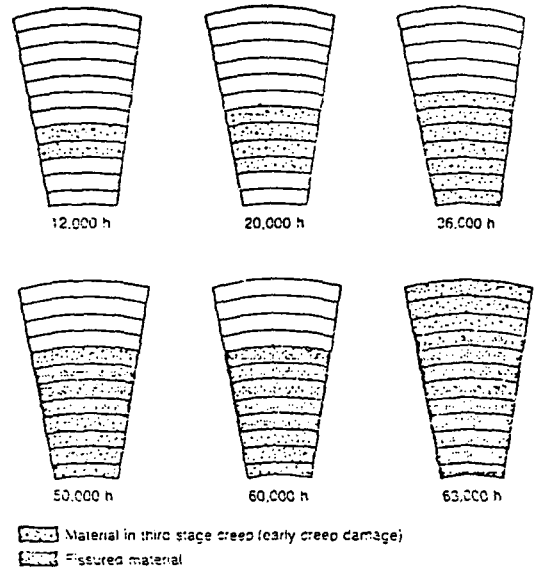


Fig. 3. Progressive failure of furnace tube.

2.2 Creep손상 정도에 따른 튜브의 잔존수명

전술한 바와 같이 수소제조 장치용 reformer 튜브의 creep 손상은 응력의 peak부위인 내면으로 부터 1/3 지점 부근에서 시작하여 내면으로 전파된 후, 외측으로

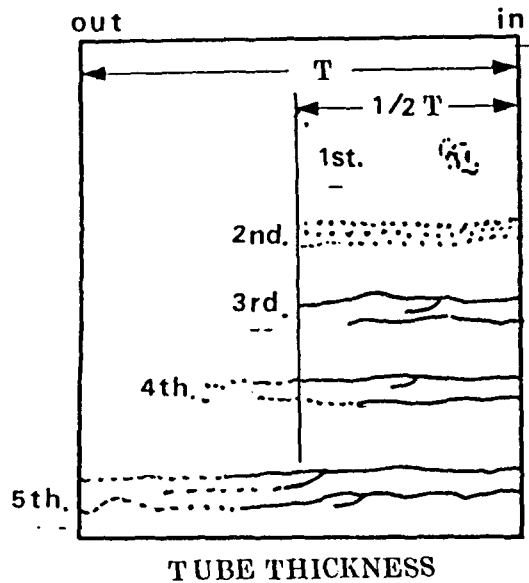


Fig. 4. Creep damage pattern.

연결되어 파단에 이른다.

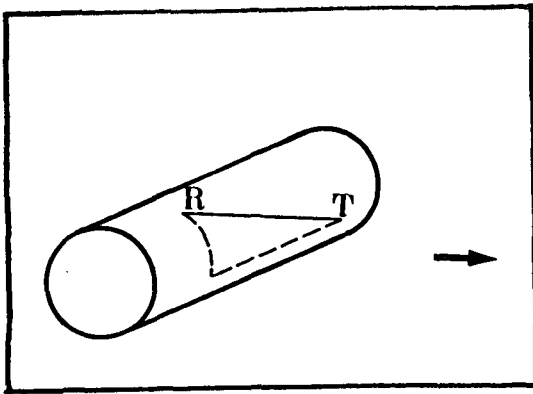
Fig. 4 및 Table 3은 일본의 한 HK-40 튜브제조 회사에서 10수년간에 걸쳐 실제 사용중인 튜브를 수거하여 creep손상 정도와 잔존수명과의 관계지운 자료로서⁴⁾ 신빙성 있는 경험적인 자료로 판단되어 본 연구에서는 이 자료를 잔존수명을 추정하는 기준으로 하였으며, 그림에서 보듯이 creep 손상이 내면으로부터 외면으로 진전됨에 따라 잔존수명이 감소하고 있으므로 내면으로부터의 creep 손상 진전 정도를 측정할 수 있으면 잔존수명의 추정이 가능한 것을 알 수 있다.

Table 3. Waste life of reformer tube in accordance with creep damage level

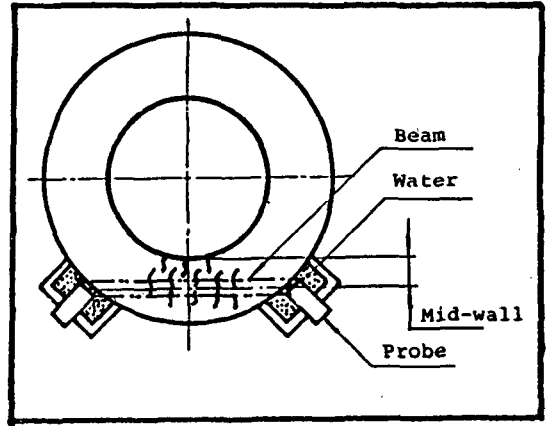
Damage Level	Creep Damage Pattern	Waste Life (%)
1	1st Void	max. 25
2	2nd Void	max. 50
3	3rd Fissure	around 50
4	4th Fissure and Void	around 75
5	5th Fissure and Void	min. 75

2. 3 탐상장치의 제작

Creep손상의 탐상은 Fig. 5의 a)에서 보는바와 같이 through transmission법을 이용하여 용접선을 중심으로 한쪽에서 초음파를 입사시킨 후 용접선의 내벽을 통과한 초음파를 반대쪽에서 수신토록 하여, Fig. 5의 b)



(a)

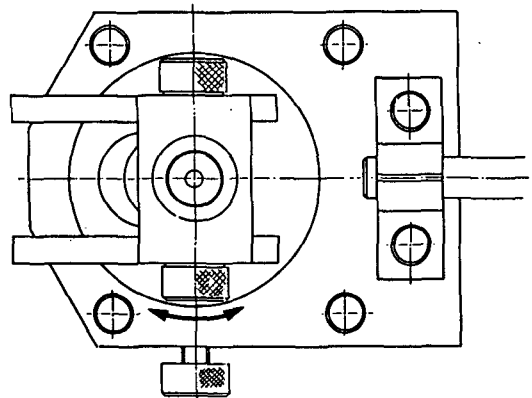


(b)

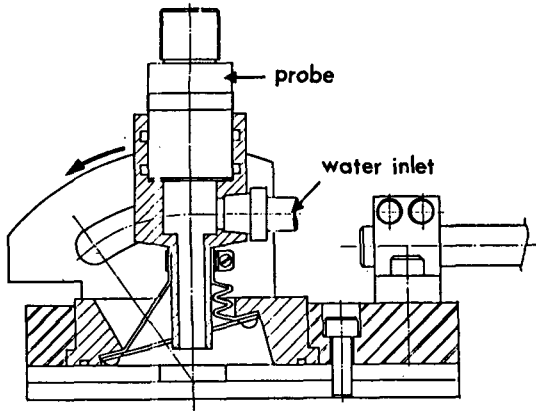
Fig. 5. Ultrasonic welded zone inspection principle.

에서와 같이 만약 내부에 creep손상이 존재하면 초음파의 진행이 방해를 받게 되어 수신되는 초음파 에너지가 감소되므로 이 감소량에 따라 creep손상의 정도를 측정할 수 있도록 하였다.

본 장치는 튜브벽 내부로 초음파를 입사시키기 위해 국부수침법을 사용하였으며 Fig. 5의 a), b)에서 보는 바와 같이 2개의 탐촉자가 속도조정이 가능한 AC모타의 구동에 의해 용접선을 중심으로 서로 대각선으로 마주보며 용접선을 주사하도록 하였고, 특히 각도의 조절에 의해 입사점이 이동하지 않도록 Fig. 6과 같이 각도 조정장치를 설계하였다.



a) 대향각 조정



b) 입사각 조정

Fig. 6. Angle adjustment assembly.

본 장치의 구성도는 Fig. 7과 같고 완성된 장치의 모습은 각각 Fig. 8, Fig. 9에, 사양은 Table 4에 나타내었다.

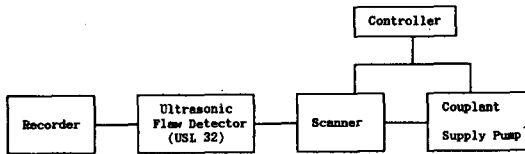


Fig. 7. Block diagram of ultrasonic testing system.

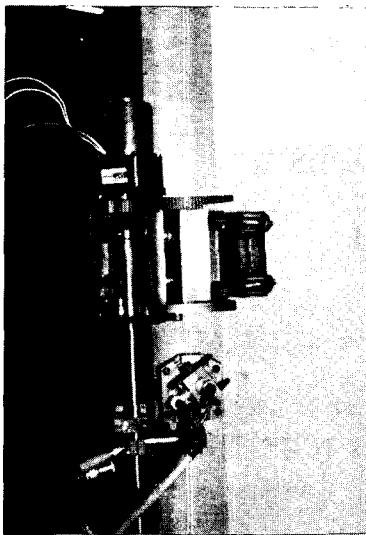


Fig. 8. Ultrasonic scanning device.

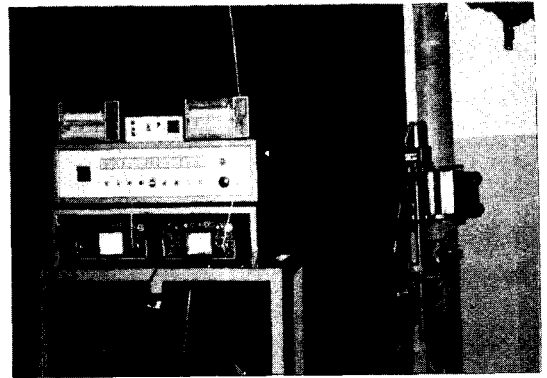


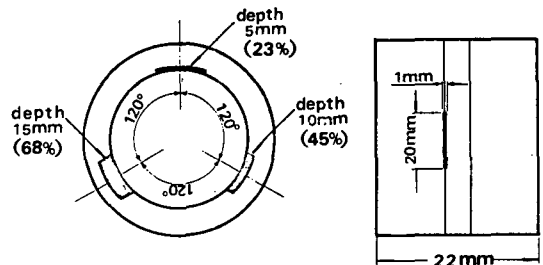
Fig. 9. Overall view of ultrasonic testing system.

Table 4. Specification of ultrasonic scanning device

항 목	사 양
검 사 방 법	초음파 국부수침법
탐 상 주 파 수	1 MHz(중파)
탐 상 mode	Through-transmission법
초음파경로	Mid wall
탐 상 범 위	Max. 120°
탐 상 속 도	1 ~ 3 rpm
검사튜브직경	80mm ~ 170mm

3. 실험결과 및 고찰

본 장치를 이용하여 creep손상의 진전 정도와 초음파 감쇠량과의 관계를 시험하기 위하여 벽두께가 22mm인 HK-40 튜브의 용접선 둘레에 120°간격으로 내면으로부터 길이 20mm, 폭 1mm이고 깊이가 각각 5mm, 10mm, 15mm인 notch를 방전가공한 대비시편을 주사한 결과를 Fig. 10에 나타내었으며 이 그림으로부터 벽두께에 대한 notch 깊이의 비율과 초음파 감쇠량(%)이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.



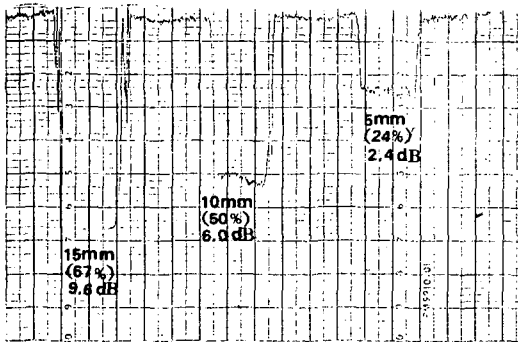


Fig. 10. Reference specimen and its ultrasonic scanning record.

한편 본 장치를 이용하여 국내에서 실제 가동중인 reformer 튜브를 탐상하였고 그 결과 초음파의 감쇠가 거의 없는 튜브와 용접선의 일부에 감쇠가 심하여(약 10dB) creep손상이 있는 것으로 판단되는 대표적인 튜브의 탐상결과를 Fig. 11에 보였고, 결과를 검증하기 위해 초음파의 감쇠가 심한 튜브를 절단하여 furnace에서 꺼낸후 현미경 조직검사를 한 결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었는데 동일한 용접선에서도 초음파의 감쇠가 없는 부위의 조직은 Fig. 12와 같은 비해 10 dB 정도의 감쇠를 보인 부위에서는 Fig. 13과 같이 creep fissure가 외표면 근처까지 진전된 것이 관찰되었다.

이와 같은 10dB 정도의 감쇠는 앞에서 대비시편을 이용한 시험결과와 비교할때 creep의 진전 정도가 벽 두께가 70% 이상인 것을 의미하여 이는 현미경 조직 시험 결과와 대체로 일치하고 있고 따라서 본 튜브의 잔존수명은 대략 25% 정도로 추정할 수 있다.

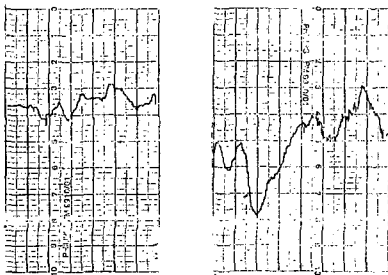


Fig. 11. Ultrasonic scanning records of the welded zone of furnace tubes.



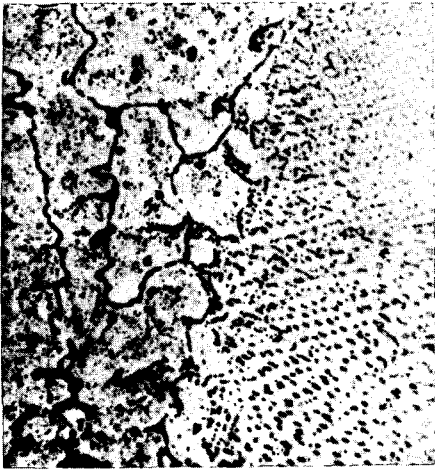
①



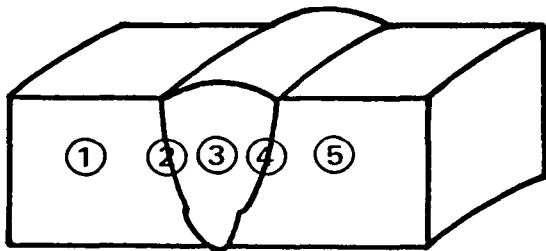
②



③



④



⑤



as polished(x100)

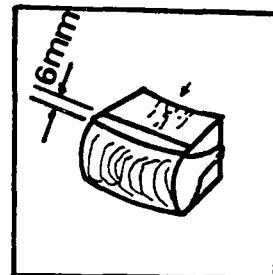
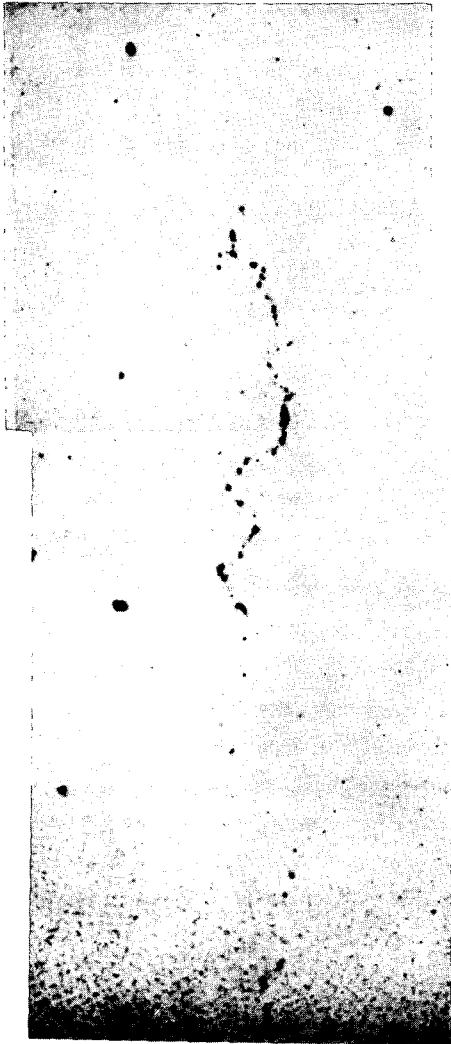


Fig. 12. Microstructure of the welded zone of furnace tube.



as polished(x50)

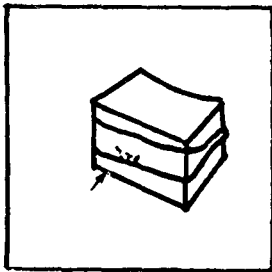


Fig. 13. Creep fissures of the welded zone of furnace tube.

4. 결 론

위의 실험결과를 살펴볼때 본 장치를 이용한 HK-40 reformer 튜브의 손상진단이 가능한 것으로 생각되며 초음파의 감쇠가 6dB 이상되는 부위는 정기 보수기간마다 주기적으로 재검사를 실시하여 손상의 진전상황을 체크한다면 적절한 튜브의 교체시기를 결정하거나 가동중 튜브가 파손되어 emergency shutdown 함으로 인해 생기는 설비의 수명단축이나 산업재해, 경제적 손실 등을 방지할 수 있을 것으로 보인다. 또한 본 장치의 원리를 응용한다면 reformer 튜브 외에도 각종 튜브류의 용접부 자동탐상도 가능할 것이다.

References

- 1) VDI Bericht Nr 392, 1977
- 2) Hand Book of Stainless Steel, McGraw-Hill
- 3) Hydro Carbon Processing Jan. 1983. p. 64.
- 4) Engineering Communication Sheet, E86B-321-3, KUBOTA, 1987.
- 5) HK-40 고온반응관의 손상진단기법 개발, 한국기계 연구소, 1985.