

용접부 결함 검출에 관한 실험적연구

남궁재관*

(논문접수일 2003. 4. 30, 심사완료일 2003. 9. 15)

An Experimental Study on Detection of Defects in Weldzone

Chai-Kwan Namkoong*

Abstract

In this study, an automatic ultrasonic testing system is used to detect the defects of the natural flaw test specimen and of the artificial flaw test specimen. We evaluate the detection performance of the acceptance standard for the natural flaw test specimen and of the acceptance standard for the artificial flaw test specimen. We also study the potential problems of those acceptance standards. The results indicate that the acceptance standard for the detection of defects in weldzone is good when the sensitivity correction is performed and that we must clearly specify the special check points of the acceptance standard for the system in use.

Key Words : Defests(결함), Weld Zone(용접부), Artificial Flaw Test Specimen(인공결함시험체), Natural Flaw Test Specimen(자연결함 시험체), Fillet-Bottomed Hole(환저구멍), Flat-Bottomed Hole(평저구멍), Belt Type(띠모양)

1. 서론

산업과 과학기술의 급진적 발전으로, 용접분야의 수요와 효율적관리에도 다양하게 발전을 도모하고 있다. 이에 따라 용접부의 비파괴평가(nondestructive evaluation)의 중요성이 날로 증대하고 있다⁽¹⁾. 비파괴평가는 용접결함의 검출과 함께 결함의 원인과 상태를 분석하는 과정으로서, 산업과 과학기술에 중요한 부분을 차지하고 있다. 그럼에도 불구하고 우리 나라에서는 용접부의 결함 검출에 관한 표

준안이 아직 유감스럽게도 정립되어 있지 않다⁽¹⁻⁴⁾. 이웃 일본의 자료를 이용하는 사례가 있지만, 검증된 연구가 없기에 본 연구에서 일본의 오사카대학 접합과학 연구소 소유의 AUT(Automatic Ultrasonic Testing)시스템을 사용해, 한신고속도로공단소유의 인공결함시험체 및 자연결함 시험체에 관해서 Table 1~2에 검사요령(안)의 성능평가에 기준을 둔 용접결함검출특성을 조사·검토하였다. 또한, 실험을 통해서 검사요령(안)의 문제점을 우리나라에도 알맞는지 검증차원에서 찾아 보았다.

* 주저자, 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (namkoong@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172번지

Table 1 Performance evaluation standard of the artificial by defected test specimen

Items confirmed	Performance evaluation standard
1)detectability	fillet-bottomed hole... $\phi 2, \phi 3$ hole detection flat-bottomed hole... more than 40% echo height detection belt type... more than 80% echo height detection
2)defect indicated length	flat-bottomed hole... standard error of artificial defect size belt type... standard error of artificial defect size
3)position accuracy	flat position... less than $\pm 1\text{mm}$ for standard position belt type... less than $\pm 1\text{mm}$ for standard position

Table 2 Performance evaluation standard of the naturally defected test specimen

Items confirmed	Performance evaluation standard
1)detectability	all of the grade 3 and 4 defect, and more than 90% of the grade 1, 2
2)defect indicated length	error to the standard data remains within the standard size
3)each position reproducibility	performance of flat, overhead, vertical and horizontal position must be satisfied with the items 1 and 2

2. 이론적 배경

평가기준을 설정할때에 보통 고려되는 조건으로는 결함 종류 구분능력과 특징간의 독립성의 두가지로 나눌수 있다. 결함종류 분류능력은 특징의 결함분류에의 효용성을 의미하며, 결함분류시 발생하게되는 오류확률로 정량화 시킬수 있으며, 특징간의 독립성은 특징의 중복을 피하면서 특징의 숫자를 줄이는 것과 관계가 있다⁽⁵⁾.

검출 오류확률 e 는 d 차원을 갖는 특징집합 $x = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_d\}$ 에 의해 나타내면 다음과 같다.

$$e = \int 1 - \max P(w_i | \xi) P(\xi) d\xi \quad (1)$$

여기에서 ξ 는 d 개의 ζ_i 특징에 의해 구성되는 특징벡터이고, 즉

$$\xi = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_d]^T \quad (2)$$

$P(w_i | \xi)$ 는 i 번째 범주에 대한 사후확률이며, $P(\xi)$ 는 식 (3)으로 정의되는 혼합밀도함수이다.

$$P(\xi) = \sum_{i=1}^m p(\xi | w_i) P(w_i) \quad (3)$$

여기에서 $P(w_i)$ 는 i 범주의 사전확률이다.

$P(w_i | \xi)$ 는 i 범주의 조건부확률밀도함수 $p(\xi | w_i)$ 와 식 (4)의 관계를 가지고 있다.

$$P(w_i | \xi) = \frac{p(\xi | w_i) P(w_i)}{P(\xi)} \quad (4)$$

민감한 특징은 식 (1)로 정의된 오류확률 e 를 작게 하는 특징으로서 e 값이 낮을수록 결함구분 능력이 우수하다.

두 변수간의 상호 의존성을 측정하는 통계량 중에서 가장 대표적인 척도가 Pearson의 상관계수인데[5], 이는 식 (5)에 의해 정의된다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]^{1/2}} \quad (5)$$

여기에서, n 은 표본 수를 X_i, Y_i 는 두가지 서로 다른 특징 X, Y 의 i 번째 값을, \bar{X}, \bar{Y} 는 각각 두 특징 X, Y 의 평균 값을 나타낸다. 이 상관계수 r 은 두 변수간의 관계가 선형관계인지를 측정하는 척도로서 r 의 절대값이 1에 가까우면 두 변수사이의 상호의존성이 매우 높음을 의미한다.

따라서 민감한 특징이란 전술한 오류확률 e 값이 낮으면서 동시에 다른 특징을 의미하기 때문에, 특징선택이란 e 값과 r 값을 바탕으로 가장 적절한 특징들을 선별해 나가는 과정이라고 할 수 있다.

3. 실험방법

3.1 실험장치

오사카대학 접합과학 연구소 소유의 초음파자동탐상시험기(aUT - 2)를 사용했다.

주된 성능은 자동주사기능, 자동표시기능(A, B, C Scope), 자동수록기능, 탐촉자 2차벨(입사각 : 70°, 주파수: 5MHz), 거리진폭보상기능(DAC 기능), 커플링 체크기능을 갖추고 있다.

3.2 탐상감도의 확인

각 시스템의 탐상감도를 통일하기 위해, Fig. 1에 표시한 감도조정용 대비시험편을 이용해, 기준감도 및 DAC(거리진폭보상)의 설정을 행하였다. 또한, 탐상정도를 확보하기 위해 에코높이 1 / 4S (직사)로 80%, 3 / 4S (1회 반사), 5 / 4S (1.5회 반사)로 80%±2dB의 범위가 되기 위하여 탐상감도를 설정하였다. 그리고, 확인은 각각의 스킵위치로 주사를 행하여 그때의 탐상데이터를 캘리브레이션 시이트에 남겼다.

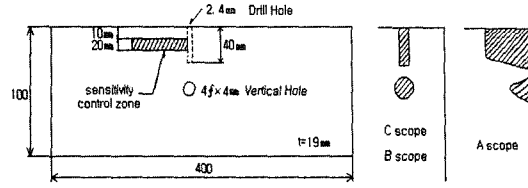


Fig. 1 specimen for the sensitivity control

3.3 조사시험체 및 실험방법

3.3.1 인공결함시험편

AUT시스템의 결합검출특성을 확인하기 위해, 블로우홀을 모의한 환저구멍결함 (결함선단부 구면), 융합불량을 모의한 평저구멍결함 (결함선단부 평면) 및 크랙·용입상태의 불량을 모의한 대상결함 (결함선단부 평면)을 갖는, Fig. 2의 인공결함시험체에 대해 탐상을 행하고, 에코높이, L / 2 길이, 화상위치등의 값을 조사했다. 한편, 표준으로는 조정감도+6dB을 탐상감도로 쓰고 있지만, 본 시험체는 초음파의 감쇄가 크기 때문에, 다시 +4dB의 감도보정을 행한 조정감도+10dB을 탐상감도로 했다(초음파의 감쇄 및 감도보정에 의한 탐상결과로의 영향에 관해서 별도 확인했다).

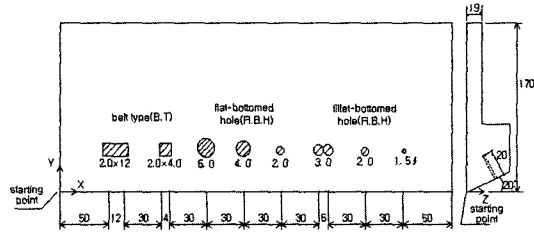


Fig. 2 specimen of the artificial defects

3.3.2 자연결함시험체

용접부에 결함을 갖는, Fig. 3과 같이 자연결함시험체 (6개)를 사용한, 인공결함시험체와 동일한 확인을 하였다. 본 연구의 실험에는, 자연그대로의 결함의 기준적가치가 있어서, 자세별 재현성의 확인은 행하지 않고, 하향으로 3회의 시행을 행해 재현성의 확인을 행하였다. 또한, 탐상감도는 표준인 조정감도 + 6dB로 했다.

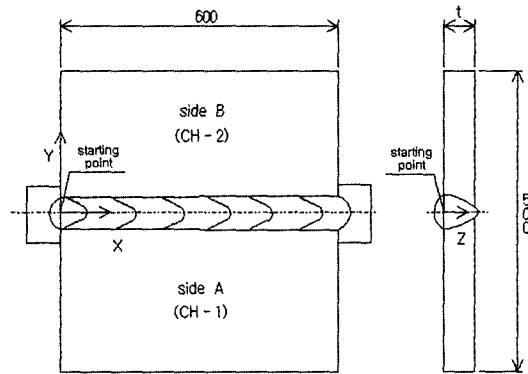


Fig. 3 specimen of the natural defects

시험체는 판두께 t가 12mm 3개와 19mm 3개로 V형개선의 맞대기 용접을 한 것을 대상으로 했다.

4. 실험결과 및 검토

1 / 4S, 3 / 4S, 5 / 4S 위치는 공허 에코의 높이가 기준의 범위내에 들어 있고 탐상감도가 바르게 조정될 수 있는 것을 잘 확인할 수 있어서, 이후에 실험의 결과를 나타냈다.

4.1 인공결함시험체

에코높이, 결합검출길이 및 결합화상중심위치와 결함기

준위치와의 오차의 그래프를 Fig. 4~9에 나타냈다.

4.1.1 결합검출성능

환저구멍에서 ø3.0mm명은 검출되었지만, ø1.5, ø2.0mm 구멍은 에코높이가 너무 작아 검출되지 않기 때문에, 본 기준에 관해서는 재검토가 필요하다.

그리고 평저구멍은 모든 기준을 통해 검출가능하다. 또한 띠 모양도 모든 기준을 통해 검출가능하다.

4.1.2 결합지시길이, 에코높이, 위치정도

결합지시길이는 Fig. 4, Fig. 5에 나타낸바와 같이 환저구

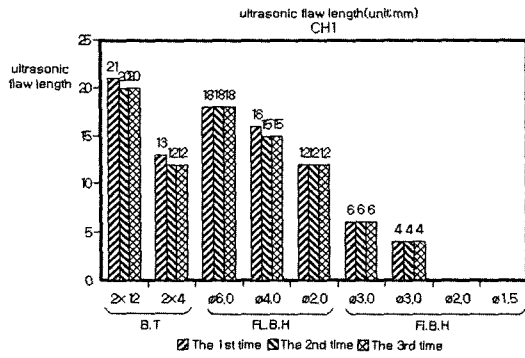


Fig. 4 Ultrasonic flaw length in the specimen of the artificial defects (CH1)

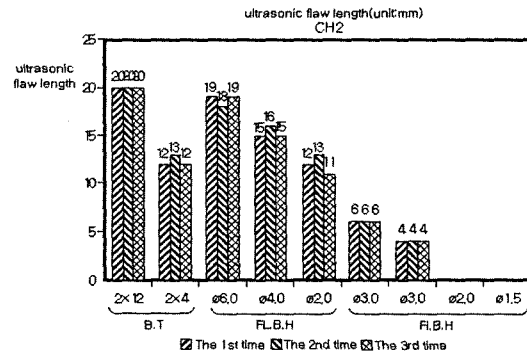


Fig. 5 Ultrasonic flaw length in the specimen of the artificial defects (CH2)

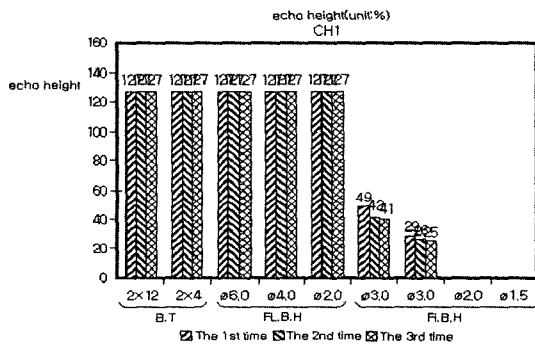


Fig. 6 Echo eight in the specimen of the artificial defects (CH1)

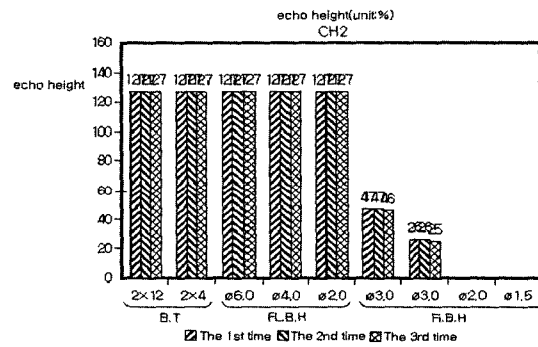


Fig. 7 Echo eight in the specimen of the artificial defects (CH2)

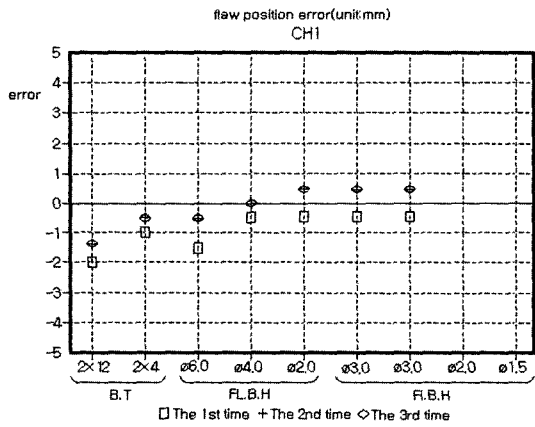


Fig. 8 Flaw position error on the specimen of the artificial defects (CH1)

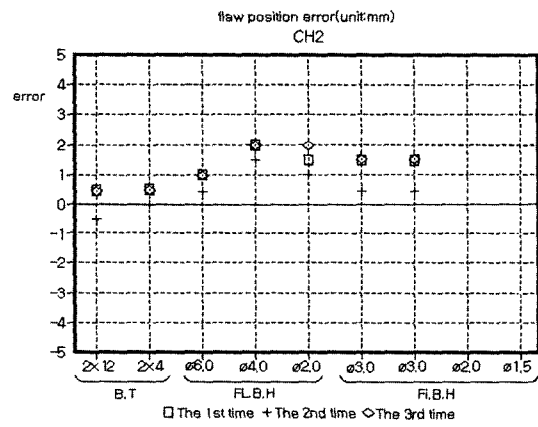


Fig. 9 Echo eight in the specimen of the artificial defects (CH1)

명을 $\phi 3.0\text{mm}$ 구멍이 결합치수가 CH1, CH2, 공히 4, 6으로 각각 $+1\text{mm} \sim +3\text{mm}$ 정도 크게 검출되었다.

평저구멍에서는 $\phi 2.0\text{mm}$ 구멍이 결합치수가 CH1, CH2에 12와 12, 13, 11로 $+9 \sim +11\text{mm}$ 크게 검출되었다.

그리고 $\phi 4.0\text{mm}$ 구멍이 결합치수 CH1, CH2에 모두 16(1회) 15(2회) 나타나 $+11 \sim +12\text{mm}$ 크게 검출되었다. 또한 $\phi 6.0\text{mm}$ 구멍이 결합치수가 CH1에서는 18과 CH2에서 18(1회) 19(2회)로 나타나 $+12 \sim +13\text{mm}$ 크게 검출되었다. 띠 모양에서는 결합의 크기에 아무관계없이, 결합치수보다 $+8\text{mm} \sim +9\text{mm}$ 정도 크게 검출되었다.

에코높이는 Fig. 6과 7에 각각 CH1과 CH2를 나타내었다. 환저구멍에서, 역시 $\phi 1.5$ 와 $\phi 2.0$ 는 나타낼수 없었고, $\phi 3.0$ 구멍이 25에서 49까지 나타났고 평저구멍에서, $\phi 2.0$ 구멍이 CH1과 CH2 공히 127, $\phi 4.0$ 구멍도 127, $\phi 6.0$ 구멍도 127로 나타냈으며 띠모양 역시 모두 127로 나타냈다.

위치정도에 대해서는 Fig. 8과 9에 CH1과 CH2를 나타냈다. X방향의 결합화상 중심위치오차는 도면상의 $\pm 2\text{mm}$ 의 차가 있다. 단, 여기에는 시험체의 제작 오차도 고려되어 짐으로, 다른 실험데이터 등에서 기준위치를 재차 확인 할 필요가 있다. 또한, Y방향, Z방향의 기준위치에 대해서도 동일한 확인을 할 필요가 있다.

이상과 같은 실험결과에 따라 인공결합검출기준을 확립 할 필요가 있다.

다시 말해서, 첫째로, 인공결합시험편의 결합검출성능에서, 평저구멍 40%, 띠모양 80%이내의 검출을 보이나, 이 값은 판두께 25mm이하의 경우에 탐상감도를 $+6\text{dB}$ 인 상태에서의 가장 높은 에코높이의 값을 그대로 적용해도 좋은 값을 명확히 해야 한다.

둘째로, 인공결합시험체에서 하나의 시험체에 대하여 연속해서 탐상을 행한 경우, 시스템의 설치나 캘리브레이션은, 그때마다 행하도록 규정해야 한다(자연결합시험체의 자체별재현성에 대해서도 동일하다).

셋째로, 인공결합시험체의 기준에 $+4\text{dB}$ 의 감도보정을 행할 때에는, 그 이유를 명기해야 한다.

넷째로, 인공결합시험체의 결합검출성능에 관해서는, 시험체의 가공정도에도 문제가 어느 정도있겠지만, $\phi 2.0\text{mm}$ 환저구멍이 검출될 수 있도록 시스템의 조정방법등을 검토해야 한다.

4.2 자연결합시험체

검사요령(안)에는, 2탐촉자의 경우 데이터처리·판정방법이 명시되어 있지 않아서, 본보고서에는 CH1, 2 각각에

검출된 데이터를 모두 개개의 결합으로서 처리토록 하였다. 단, 등급판정에 관해서는 CH1, 2의 양쪽에 동위치의 결합이 결합지시길이, 에코높이, 등급분류 및 적부판정결과에 관해서, 1회제의 탐상결과를 기준으로 해 비교한 것을 Fig. 11~14 및 Table 3~4에 나타냈다. 또한, 다른 시스템에서 행한 동일한 실험에 의한 등급분류 및 적부판정의 결과와 비교한 것을 Table 5에 나타냈다(타시스템의 비교에서, 판정의 대상은 1회제의 탐상결과에서 2개이상의 시스템으로 검출된 것으로 하였고, 타시스템의 등급판정은, 조사에 사용된 전시스템에 별개로 등급판정을 행했으며 1개소의 결합에서 같은 등급으로 판단되어진 시스템수가 가장 많은 것을 그 결합의 등급으로 했다).

금번의 실험에 검출된 결합의 범위에서 3회의 탐상결과에 관해서는, 결합지시길이, 에코높이, 공히, 등급분류에 영향을 줄 정도의 큰 차는 거의 없고, 또한 3등급이상을 불합격으로 했을 때의 적부판정에 관해서도 100%가 가까운 합격률이였기 때문에, 충분한 재현성이 확인되었다(Fig. 11~14, Table 3~4 참조).

단, 결합번호 11번에 관해서는, 2회제의 탐상데이터의 값이 타 탐상데이터와 비하여 큰 차가 있지만, 이것은 2회제의 탐상에서 반사에코높이가 약간 작게 검출되었기 때문에 Fig. 10에 넓과 같이 결합검출레벨과의 관계에서 11번의 결합은 11번과 10번의 2개로 나뉘어 검출되어진 것으로 여겨진다.

그리고 Fig. 11은 1회제의 탐상결과를 기준해서 2회제를 결합길이에 대해 비교 한 것인데 비교적 20이내가 대표적이었다.

Fig. 12는 1회제의 탐상결과를 기준해서 3회제를 결합길이에 대해 비교한 것인데 30이내에 고루 분포된 결과를 나타내었다.

Fig. 13은 에코높이의 1회제의 탐상결과를 기준으로 해서 2회제를 비교한 것이고 Fig. 14는 1회제의 탐상결과를

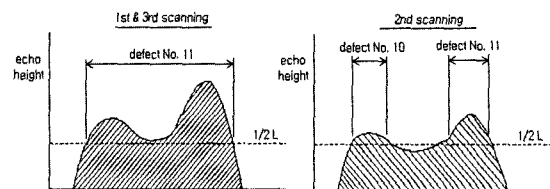


Fig. 10 Reflection echo height on the specimen of the natural defects

기준으로 해서 3회째를 비교한 것인데 비교적 둘 다 비슷하게 20-50 사이에 대부분 나타났다.

Table 3은 1회째와 2회째의 자연결합시험체 등급분류 및 적부판정비교표이다. 35개중 1, 2회 모두 같은 등급으로 나타낸 것이 97%이다. Table 4는 1회째와 3회째의 등급분류 및 적부판정인데 100%가 등급이 일치했다. Table 5는 본 대학 시스템과 타대학 시스템과의 등급분류 및 적부판정인데 98%가 등급이 일치했다.

타 시스템과 비교해서, 3등급, 4등급을 불합격으로 하였

을 때의 적부판정에 관해서는, 합치율이 100%에 가깝고, 결합검출정도에 관해서는 만족한 결과가 얻어졌다. 단, 결합검출정도의 평가기준을 결정하기 위해 타 시스템 및 RT의 결과와 비교, 검토할 필요가 있다(Table 5 참조).

또한 결합지시길이의 표준에 관해서는, 타 시스템 및 RT의 결과와 비교, 검토할 필요가 있다.

이상과 같은 실험결과에 따라 자연결합결출기준을 인공결합기준과 함께 기준을 확립할 필요가 있다.

다시말해서, 첫째로 감도보정은 표준시험편과의 감도차

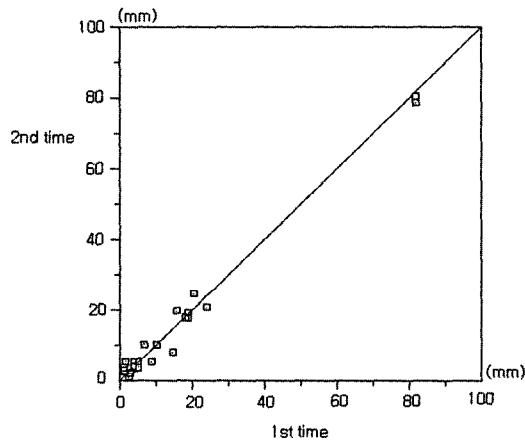


Fig. 11 Comparison between the 1st time and the 2nd time of the ultrasonic flaw length on the specimen of the natural defects

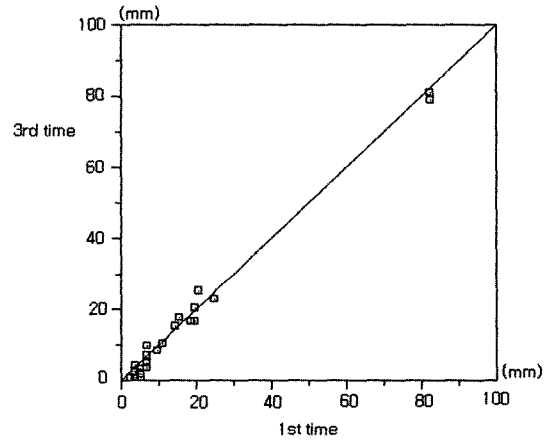


Fig. 12 Comparison between the 1st time and the 3rd time of the ultrasonic flaw length on the specimen of the natural defects

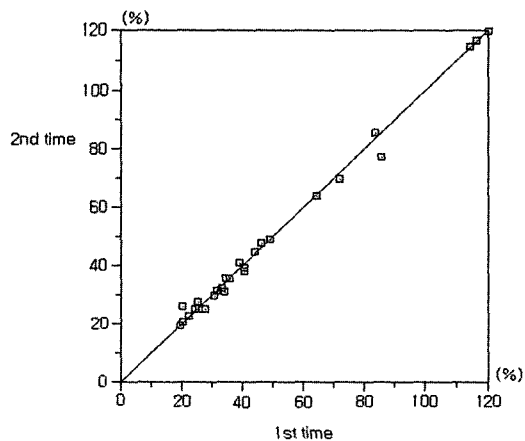


Fig. 13 Comparison between the 1st time and the 2nd time of the echo height on the specimen of the natural defects

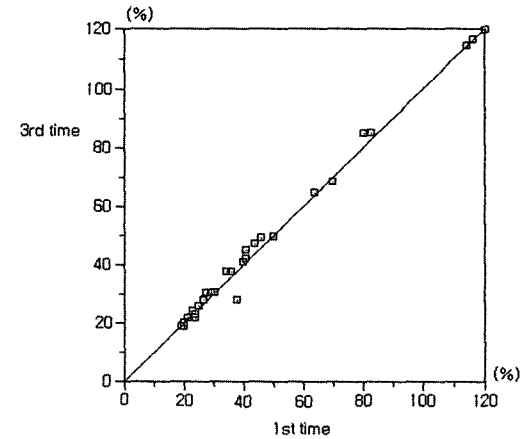


Fig. 14 Comparison between the 1st time and the 3rd time of the echo height on the specimen of the natural defects

Table 3 The classification of indications and the acceptance comparison on the specimen of the natural defects(1st time - 2nd time)

grade						N = 35 ok 97% over 0% under 3%
2nd time	4				4	
	3					
	2		3			
	1	2 7		1		
		1	2	3	4	grade
		1st time				

Table 4 The classification of indications and the acceptance comparison on the specimen of the natural defects(1st time - 3rd time)

grade						N = 35 ok 100% over 0% under 0%
3rd time	4				4	
	3			1		
	2		3			
	1	2 7				
		1	2	3	4	grade
		1st time				

Table 5 The classification of indications and the acceptance comparison on the specimen of the natural defects(other system - univ. system)

grade						N = 46 ok 98% over 2% under 0%
univ. system	4			1	6	
	3	1			1	
	2	2	1			
	1	3 2	2			
		1	2	3	4	grade
		other system				

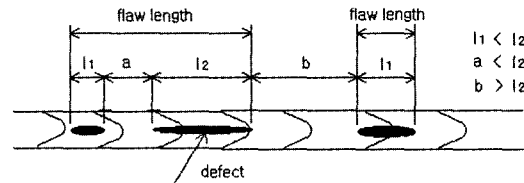


Fig. 15 Flaw length (2)

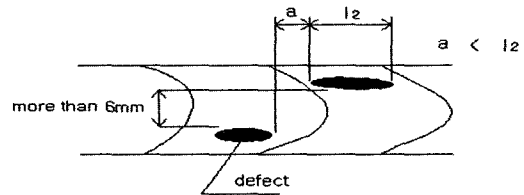


Fig. 16 Flaw length (2)

가 $\pm 2\text{dB}$ 이내인 경우에 행하고 있지만, 오사카대학에서 실험한 범위에서는 재료에 의한 감도보정량의 차는 2dB 정도이며, 그것에 의한 적부판정에의 영향도 거의 나타나지 않았다. 그렇기 때문에, 감도보정량의 확인작업의 필요성에 관해서 검토할 필요가 있다. 또한, 차가 있다고 하면 V투과법의 방법에 관해서 명기한 위에, 그것에 의한 감도보정량의 확인을 필히 행하도록 하여, 그 결과를 기록해야 한다.

둘째로 재료에 이상한 것이 있는 경우는 V투과법에 의한 감도보정량의 확인을 행하겠지만, 이때에 무엇을 이상한 것으로 하느냐의 기준을 명확히 해야 한다.

셋째로 평면내의 지시길이의 동일판정기준에 Fig. 15와 같은 조건이 있지만, 여기에서는 $a(b) = l_2$ 로 되는 경우의 판정기준을 명확히 해야 한다.

넷째로 동일결함의 판정기준으로서 ① 평면내 (용접선방향)에 $a < l_2$ 로 되는 경우, ② 단면내 (용접선직각방향 및 판두께방향)에 화상간격이 6mm 이하로 되는 경우의 두개 조건의 양쪽, 또는 어느 쪽이든 한쪽의 규정을 만족시키면 동일결함으로 간주하는 것이 타당하다(Fig. 16 참조).

다섯째로 2탐촉자의 경우, 처리는 CH1과 CH2로 검출한 데이터를 모두 개개의 결함으로써 처리하고, 등급판정에 있

어서 CH1, 2의 양쪽에서 위치가 같게 결함이 검출된 경우는 큰쪽의 값으로 한다.

5. 결론

용접부의 결함검출에 관한 표준안을 만드는데 도움이 되고자 일본 한신 고속도로공단 소유의 인공결합시험체 및 자연결합시험체의 검사요령성능평가 기준을 실험을 통해서 연구해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 결함검출시 감도보정량의 확인작업이 필요하다.
- (2) V투과법에 의한 감도보정량 확인작업의 기준을 명확히 제시해야 한다.
- (3) 평면내의 지시길이 판정기준을 명확히 제시해야 한다.
- (4) 동일결합의 판정기준을 명확히 제시해야 한다.
- (5) 2탐촉자의 경우, 등급판정에서 검출값이 큰쪽을 기준으로 한다.
- (6) 인공결합시험편의 결함검출성능에서, 에코높이 값의 적용여부를 명확히 제시해야 한다.
- (7) 인공결합시험편의 연속 탐상은 매회 마다 시스템 설치나 캘리브레이션을 해야 한다.
- (8) 인공결합시험편의 결함검출성능을 $\phi 2.0\text{mm}$ 환저구멍이 검출될 수 있도록 해야 한다.

참고 문헌

- (1) Song, S. J., 1999, "Nondestructive Flaw Classification by Pattern Recognition Approach", *J. of KSNT*, Vol. 19, No. 5, pp. 378~391.
- (2) Park, M. H., 1999, "Ultrasonic Flaw Sizing Techniques", *J. of KSNT*, Vol. 19, No. 6, pp. 448~455.
- (3) Park, I. K., Park, U. S., Kim, H. M., Park, Y. W., Kang, S. C., Choi, Y. H. and Lee, J. H., 2001, "Models of Reliability Assessment of Ultrasonic Nondestructive Inspection", *J. of KSNT*, Vol. 21, No. 6, pp. 607~611.
- (4) Song, S. J. and Schmerr, L. W., 1992, "Ultrasonic Flaw Classification in Weldments Using Probabilistic Neural Networks", *J. of Non-Destructive Evaluation*, Vol. 11, pp. 69~77.
- (5) Chao, L. L., 1974, *Statistics: Methods and Analyses, 2nd Ed*, McGraw-Hill Ko-gakusa, Tokyo.
- (6) JSNDI 1978, *Radiographic Testing B*, pp. 59~78.
- (7) JSNDI 1978, *Radiographic Testing B*, pp. 44~45.
- (8) Maruyama, L., 1983, "X-Ray Fluoroscopy of Welds Improvement of Image Quality by Image Processing", *J. of JSNDI*, Vol. 32, No. 2 pp. 102~103.
- (9) Cheu, Y.F., 1984, "Automatic Crack Detection with Computer Vision and Pattern Recognition of Magnetic Particle Indications Mater", *J. of EVAL.*, Vol. 42, No. 11, p. 1506.
- (10) Watanabe, T. and Saeki, Y., 1982, "The Mottling Appearing on Radiographs of Low Carbon Steel Weldments", *Proceeding of 4th Int. Symp. of JWS*, Osaka, pp. 695~700.
- (11) Fuji, T., 1988, "Fundamentals of Inspection Technique by Ultrasonics", *J. of JSNDI*, Vol. 37, No. 11, pp. 919~928.
- (12) Satio, S., 1993, "Recent Trend of Medical Ultrasound Diagnostic Equipment", *J. of JSNDI*, Vol. 42, No. 10, pp. 551~557.
- (13) Park, U. S., Park, I. K. and Kim, C. S., 2001, "A Study on the Evaluation of Material Degradation for 2.25Cr-1Mo Steel by Ultrasonic Measurements", *Trans. of KSMTE*, Vol. 10, No. 3, pp. 61~67.
- (14) Lee, M. H., 2003, "Experimental Verification on the Stability and Sound Pressure Transmission Coefficient of Surface SH-Wave", *Trans. of KSMTE*, Vol. 12, No. 2, pp. 23~30.