

공학석사 학위논문

강교량 용접이음부의 자동초음파
탐상시험에 관한 연구

지도교수 이 동 욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2002년 2월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

부 경 훈

이 논문을 부경훈의 공학석사 학위논문으로 인준함

2001년 12월 15일

주 심 공학박사 국 승 규



위 원 공학박사 이 환 우



위 원 공학박사 이 동 욱



목 차

그림목차	iii
표목차	v
ABSTRACT	vi
1. 서론	1
2. 강교량의 용접결합과 비파괴 검사	3
2.1 용접이음부의 외부결합 및 내부결합	3
2.2 용접이음부의 비파괴검사법	6
2.3 용접이음부의 결합과 응력집중	8
3. 초음파탐상시험의 기본이론	12
3.1 초음파탐상시험의 개요	12
3.1.1 초음파탐상시험의 원리	12
3.1.2 초음파탐상시험의 표시방법	14
3.1.3 초음파탐상시험의 진동방식	15
3.1.4 초음파탐상시험의 탐촉자수	16
3.1.5 초음파탐상시험의 접촉방식	16
3.2 초음파탐상시험법의 기초	19
3.2.1 수직탐상시험	19
3.2.2 사각탐상시험	20
3.2.3 자동초음파탐상시험	21
3.3 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 비교·검토	24

3.3.1 초음파탐상시험	24
3.3.2 자동초음파탐상시험	24
3.4 자동초음파탐상시험의 순서	28
 4. 강교량 용접이음부에 대한 자동초음파탐상시험의 응용	31
4.1 대상시험편	31
4.2 초음파탐상시험에 의한 결함 검출	34
4.3 자동초음파탐상시험에 의한 결함 검출	38
4.4 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험과의 비교·분석	42
 5. 결 론	46
 참고문헌	47
 감사의글	49

그림목차

- 그림 2.1.1 용접이음부의 외부결함 및 내부결함
- 그림 2.3.1 강교량 부재의 용접이음부에 존재하는 결함의 모식도
- 그림 2.3.2 무한평면내 원형구멍 근방의 응력분포
- 그림 2.3.3 무한평면내 타원형 근방의 응력분포($a/b=2$ 인 경우)
- 그림 2.3.4 반무한평면내 V형 결함(Notch) 근방의 응력분포($t/p=6$ 인 경우)
- 그림 3.1.1 펄스파와 연속파
- 그림 3.1.2 펄스반사법과 투과법
- 그림 3.1.3 A-Scope
- 그림 3.1.4 B-Scope
- 그림 3.1.5 C-Scope
- 그림 3.1.6 탐촉자와 시험체의 접촉형태
- 그림 3.2.1 수직탐상법
- 그림 3.2.2 사각탐상법
- 그림 3.2.3 일반적인 A-UT시스템 구성
- 그림 3.2.4 자동초음파탐상시험기(A-UT) 개략도
- 그림 3.4.1 자동초음파탐상시험의 순서
- 그림 3.4.2 자동초음파탐상 시험결과 판정 순서
- 그림 4.1.1 대상 트러스 구조
- 그림 4.1.2 트러스 구조에서 부재의 박스 형상
- 그림 4.1.3 대상시험편의 형상 및 시험위치
- 그림 4.2.1 초음파탐상시험의 탐상면별 탐촉자위치
- 그림 4.2.2 초음파탐상시험에 의한 용입깊이 측정도
- 그림 4.4.1 자동초음파탐상시험 결과 최대, 최소의 용입깊이부 단면마크로

그림 4.4.2 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 용입깊이 그래프

표목차

- 표 3.3.1 초음파탐상시험 및 자동초음파탐상시험의 장·단점 비교
- 표 3.4.1 조질고장력강을 사용한 부재의 등급분류와 검사기준
- 표 4.2.1 초음파탐상시험에 의한 인공구멍 시험 결과
- 표 4.2.2 초음파탐상시험에 의한 용접블로우홀 시험 결과
- 표 4.2.3 초음파탐상시험에 의한 용입깊이 시험 결과
- 표 4.3.1 자동초음파탐상시험에 의한 인공구멍 시험 결과(CH1)
- 표 4.3.2 자동초음파탐상시험에 의한 인공구멍 시험 결과(CH4)
- 표 4.3.3 자동초음파탐상시험에 의한 용접블로우홀 시험 결과
- 표 4.3.4 자동초음파탐상시험에 의한 용입깊이 시험 결과
- 표 4.4.1 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 비교 결과표
- 표 4.4.2 자동초음파탐상시험 결과 최대, 최소 용입깊이 비교

A Study on Automatic Ultrasonic Test
of Weld Joint in Steel Bridge

Kyung-Hoon Boo

*Department of Civil Engineering, Graduate School of
Industry, Pukyong National University*

ABSTRACT

In a long span bridge is now used high-tension steel for the reduction in dead load and an automatic ultrasonic testing is done to obtain the soundness of a partial welded joint bar in an edge of the steel.

This study involves designing test material under the same conditions of the welded bar of truss on steel bridge and then conducting both currently applied automatic and manual ultrasonic testings.

The study started about artificial drill hole, blowhole, incomplete penetration on a particular part of test material, with automatic ultrasonic test equipment and manual ultrasonic one used under the same test conditions.

The study results showed the evidence of the superiority of automatic ultrasonic testing in the accuracy of depth of penetration, delicate blowhole of the partial welded connection in an edge of truss

on steel bridge over that of ultrasonic testing.

The results also indicated that it was turned out to be plausible for automatic ultrasonic testing to be applied in relation with the maintenance of study through the objectiveness or revival of data.

1. 서 론

교량은 인간의 삶에 대한 상징적인 창조물중의 하나로서 단순히 자동차나 기차, 사람들의 통행의 기능뿐만 아니라 역사성을 대표하는 상징물로서 인류 문명과 함께 유래되고 있다.

국내에서는 88올림픽 기념의 상징물로서 88올림픽대교를 건설하였고 인천국제공항이 건설되면서 영종대교는 우리나라의 관문을 나타내는 상징적인 작품으로서 건설되었다. 현재에도 각국에서는 교량 건설을 과학과 기술발달의 상징으로서 발전상을 나타내고 있으며, 사용재료의 연구, 공법 개발등의 노력을 통해서 많은 교량이 설계 및 시공되고 있다.

교량은 사용되는 재료에 따라 강교량과 콘크리트교량으로 구분할수 있으며 그 중에서도 강교량은 제강기술의 발달과 구조역학이 발전하면서 장대교량에 많이 적용되고 있다. 그러나 최근에는 급증하는 교통량의 증가, 노후화에 따른 강교량 부재의 피로손상 및 부식과 같은 문제들이 발견되어 교량의 보수 및 유지관리등에 많은 비용이 소요되고 있다. 따라서 현재 설계 및 시공되고 있는 교량에서는 설계수명을 확보하기 위한 여러 가지 연구가 진행되고 있다.

장대교량에서는 사하중의 경감을 위해 고장력강이 사용되고 있으며, 1970년대 후반에는 일본의 혼슈시코쿠 연락교를 가설하면서 고장력강재를 사용한 트러스 구조의 박스 단면부재에 대한 피로검토를 위해 여러가지 대형피로시험을 실시하였다^{1), 2)}. 이 피로시험을 통하여 트러스 구조의 박스 단면에서 부재의 모서리에 위치한 용접이음부의 피로강도가 매우 낮게 평가되었으며, 그 원인은 모서리 용접이음부에 용접결함의 하나인 블로우홀이 피로균열의 원인으로 나타났다³⁾.

이로 인하여 트러스 구조의 박스 단면에서 부재의 모서리 용접이음부에

대한 용접품질을 확보하기 위하여 보다 개선된 비파괴시험법(자동초음파 탐상시험법)이 개발되었다^{4),5),6)}.

한편, 국내에서는 영종대교 및 광안대교에서 고장력강으로 구성된 트러스 구조의 박스 단면부재에 대해 피로검토를 실시하였다. 따라서, 금후에 설계 및 시공 될 장대 강교량에 대해서도 탁월한 자동초음파탐상시험을 실시하지 않으면 안된다.

본 논문에서는 강교량 용접이음부의 건전성을 확보하기 위해 트러스 구조의 박스 단면부재를 제작하고 박스 단면의 모서리 용접이음부에 대해 수동초음파탐상시험(이하 초음파탐상시험) 및 자동 초음파탐상시험을 실시하여 그 결과를 비교·검토하였다.

2. 강교량의 용접결합과 비파괴검사

2.1 용접이음부의 외부결합 및 내부결합

강교량 용접이음부의 결합에는 결합의 존재 위치에 따라서 외부결합과 내부결합으로 나눌 수 있다. 외부결합으로는 언더컷, 오우버랩, 피트 등이 있으며 내부결합으로는 균열, 기공, 슬래그혼입, 융합불량등이 있다. 이 결합들은 육안검사, 자분탐상시험, 침투탐상시험을 통하여 용접이음부의 외부결합을 찾아낼 수 있으며, 방사선투과시험, 초음파탐상시험등을 통하여 내부결합을 검출할 수 있다. 그림 2.1.1에는 맞대기용접이음부 및 필렛용접이음부의 외부결합 및 내부결합을 각각 나타낸다⁷⁾.

1) 용접이음부의 외부결합

용접이음부의 외부결합으로서 언더컷, 오우버랩, 피트의 발생원인은 다음과 같다.

(1) 언더컷(Under Cut)은 용착금속과 경계면 모재 사이가 용해되어 없어진 것으로 용접결합 중 균열 다음으로 큰 응력집중원으로 파괴의 원인이 될 위험성이 크다. 특히 반복하중을 받는 구조물은 언더컷의 방지에 각별한 주의가 필요하다. 이 결합은 용접속도나 용접전류의 과다에 의해서 발생하며 필렛용접에서는 용접봉의 각도가 부적당한 경우에도 발생한다.

(2) 오우버랩(Over Lap)은 용착금속이 용융되지 않은 상태로 용착금속이 모재위에 얹힌 형상을 말한다. 언더컷과 마찬가지로 응력집중의 원인이 될 뿐만 아니라 내 부식성이 요구되는 구조물에서는 부식의 요인이 되기도 한다. 오우버랩은 용접전 전류가 너무 낮거나 용접속도가 너무 늦은 경우에 발생한다.

(3) 피트(Pit)는 용착금속이 응고시에 생긴 기공의 일종이며, 용접비드 표면에 생긴 작은 구멍의 일종이다. 용접시 수소, 산소, 질소 등의 기체가 용착금속의 외부로 빠져나간 후 주의로부터 메워지지 못하고 생긴 비드표면의 작은 구멍이다. 이에 대한 대책으로는 용접봉의 건조, 용접길이를 짧게 한다든지, 예열을 실시하여 냉각속도를 늦추거나 또는 염기도가 높은 용접봉을 사용함으로써 피트를 방지할 수 있다⁸⁾.

2) 용접이음부의 내부결함

용접이음부의 내부결함으로서 균열, 기공, 슬래그혼입, 융합불량의 발생원인은 다음과 같다.

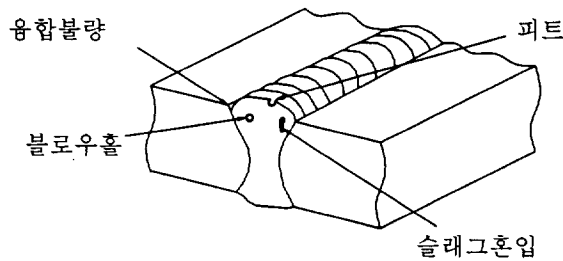
(1) 균열(Crack)은 용접이음부의 품질 및 성능에 중대한 영향을 미치는 용접결함으로 발생온도, 시기, 위치에 따라 분류되며, 발생온도와 시기에 따라서 고온균열, 저온균열 발생위치에 따라서 용접금속균열, 용접열영향부 균열 등이 있다.

(2) 기공(Porosity)은 용접금속의 내부에 생성되는 공동을 말한다. 가스포켓이라고 부르기도 하며, 용융금속에 용해한 다량의 수소가 응고시에 용접금속으로부터 방출될 때, 또는 용융금속 중의 탄소가 산화물과 작용하여 CO 가스를 만들고 이 가스가 용접금속의 내부에 잔존하거나 방출도중에 응고가 완료함으로써 생긴다. 모재의 특성, 이음부의 오염, 수분, 용접전류와 아크길이, 급랭 등의 조건이 나쁜 경우에 발생하기 쉽다.

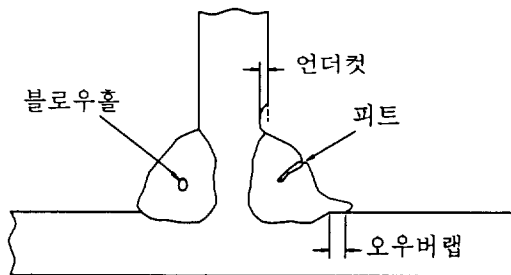
기공은 형태에 따라 세 가지로 구분한다. 기포의 성장속도보다 계면의 성장속도, 즉 응고속도가 대단히 빠르면 비드표면에 침으로 찌른 것과 같이 크기가 매우 작은 핀홀(Pin Hole)이 생성된다. 이보

다 용고속도가 약간 느리면 기포가 성장한 상태로 용고하므로 구상의 블로우홀(Blow Hole)이 생성된다. 이와 같은 블로우홀 중에서 형태가 길고 좁은 형상의 기공을 웜홀(Worm Hole)이라고 한다.

- (3) 슬래그혼입(Slag Inclusion)은 용접금속의 내부 또는 모재와의 융합부에 슬래그가 잔존하는 것을 말한다. 전층의 잔류 슬래그가 그대로 후층의 용접금속 내부 또는 경계에 잔류하거나 용접조작이 부적당한 경우에 주로 발생한다.
- (4) 융합불량(Lack of Fusion)은 용접 경계면이 서로 충분히 용융되어 합체되지 못한 것을 말한다. 융합불량은 용접금속과 모재와의 사이, 다층 용접부의 패스사이 등에서 발생하기 쉽다⁸⁾.



a) 맞대기용접이음



b) 필릿용접이음

그림 2.1.1 용접이음부의 외부결함 및 내부결함

2.2 용접이음부의 비파괴검사법

1) 용접이음부의 외부결함 비파괴검사법

(1) 외관 시험(Visual Test, VT)

원칙적으로 육안에 의하지만 확대경, 스케일류, 전용게이지 등을 사용하여 표면균열, 오우버랩, 피트 등의 유무 확인과 덧살의 높이, 언더컷, 어긋남 등의 치수측정을 실시한다.

(2) 자분탐상시험(Magnetic Particle Test, MT)

용접이음부 표면 또는 표면부근의 결함검출이 가능하며, 강한 자성체에만 적용한다.

(3) 침투탐상시험(Liquid Penetrant Test, PT)

용접이음부의 표면결함만이 검출 가능하다.

2) 용접이음부의 내부결함 비파괴검사법

(1) 방사선투과시험(Radiographic Test, RT)

방사선투과시험에 의한 결함 검출의 종류로서는 균열, 용입불량, 융합 불량, 슬래그혼입, 블로우홀 및 언더컷 등이다. 방사선투과시험에 의한 용접결함은 결함의 위치, 분포, 형상 및 치수가 객관적으로 얻어지고 결함종류의 판별도 용이하다. 또 시험결과의 재현성과 기록성도 우수하므로 용접부의 건전성 보증수단으로 많이 사용되고 있다. 맞대기이음부의 내부결함 검사는 KS B 0845 「강용접부의 방사선투과시험방법 및 투과사진의 등급분류방법」에 의해 X선 검사를 실시한다. 용접부의 한쪽에 필름을 부착하고 반대측으로부터 X선을 투과한다. 강교량 부재의 용접이음부에 대한 시험결과는 인장측은 2급이상, 압축측은 3급이상을 합격으로 한다. 이러한 결함은 필름의 농도로 투과사진 상에 나타나며, 방사선투과시험에서 나타난 결함은 평면투영상이다. 이 때문에 결함이 판두께 방향으로 존재할 때 검출이 어려운 것이 결점이다. 또 균열 등의 면

상결합의 검출에는 결합면과 방사선의 조사 방향과 생기는 각도가 크게 되면 검출도가 저하한다. 그리고, 방사선투과시험은 인체 유해 방사선이 방출되므로 촬영시에는 사람을 대피시켜야 하는 단점이 있다.

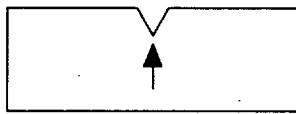
(2) 초음파탐상시험(Ultrasonic Test, UT)

초음파탐상시험에 의한 용접이음부의 결함 검출의 종류로는 균열, 융합불량, 슬래그 혼입, 블로우홀 등이 있다. 초음파탐상시험에서는 이들 결함을 면상결합, 구상결합으로 분류한다. 예를 들면 융합불량은 전형적인 면상결합이며, 블로우홀은 구상결합이다. 백가우징(Back Gouging)부의 융합불량과 같은 결함은 원주상의 결함이 된다. 균열, 슬래그 혼입 등 복잡한 형상의 결함은 단순히 분류되지 않는다. 면상결합 중 용접선 방향으로 짧은 것은 원형평면결합, 백가우징부의 융합불량과 같은 원주상 결함, 블로우홀은 구상결합으로 구분된다. 초음파탐상시험에는 펄스반사법이 사용되며, 시험체의 면(탐상면)에서 초음파 펄스를 입사하고, 시험체의 저면 또는 결함부에서 반사되어온 초음파 펄스를 수신하여 펄스의 크기와 반사원의 상태를 추정한다^{7),9),10),11)}.

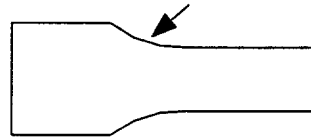
초음파탐상시험은 사람에게 유해한 물질이 방출되지 않으므로 언제 어디서나 시험을 실시할 수 있으며, 브라운관을 통하여 즉석에서 판단이 가능하다. 초음파탐상시험은 KS B 0896 「강 용접부의 초음파탐상시험 방법 및 시험결과의 등급분류 방법」에 의해 실시한다.

2.3 용접이음부의 결함과 응력집중

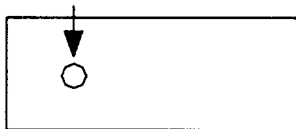
강교량의 용접이음부에 결함이 존재하면, 이음부에는 응력집중이 발생하여 부재의 강도는 저하한다. 이들 결함에 의해 하중을 부담하는 단면적은 감소하고 결함의 존재를 고려하지 않고 구한 공칭응력보다 큰 응력이 작용하여 결함이 존재하는 부재에 응력집중현상이 일어난다. 이 응력집중 현상은 결함의 단부에서는 공칭응력보다 큰 응력이 생기기 때문이다. 특히 반복하중을 받는 부재의 용접이음부에 결함이 존재하면 부재의 피로강도는 현저히 저하한다. 그림 2.3.1에는 강교량 부재의 용접이음부에 결함이 존재할 경우의 모식도를 나타낸다. 시험체에 결함이 존재하면 이 부분에 생기는 응력은 단면전체로 계산한 공칭응력의 값보다 크게 되며, 이러한 현상을 응력집중이라 한다.



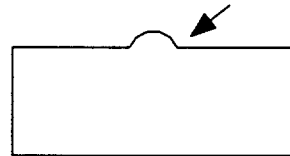
(a) 언더컷(V형 결함)



(b) 부재의 단차(단면불연속)



(c)블로우홀(원형결함)



(d)오우버랩(용접끝단부결함)

그림 2.3.1 강교량 부재의 용접이음부에 존재하는 결함의 모식도

그림 2.3.2에는 강교량 부재의 용접이음부 내부에 둥근구멍이 존재하는 무한평면을 종방향으로 끌어당길 때 둥근구멍(직경 : $2a$) 근처의 응력 분포를 나타낸다. 인장방향과 수직인 원형구멍의 내면 A, A'부에는 최대

응력 $\sigma_{\max}$ 가 생기고 원형구멍 내면에서 멀어짐에 따라서 응력은 급격하게 감소하고 있다. 이 최대응력 $\sigma_{\max}$ 와 공칭응력 σ_n 의 비를 응력집중계수 (α)라고 하면 다음식으로 표시한다. 원형구멍의 경우에는 $a = b$ 이므로 $\alpha = 3$ 이 된다.

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

그림 2.3.3에는 강교량 부재의 용접이음부 내부에 타원형의 결함이 존재하는 경우의 결함 근방의 응력분포를 나타낸다. 이때 응력집중계수 α 는 다음식으로 나타내며,

$$\alpha = 1 + \frac{2a}{b} \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

a : 타원의 긴쪽 반지름, b : 타원의 짧은 쪽 반지름

그림 2.3.3에서 $a = 2b$ 의 경우 타원형의 내면 A, A'에는 $\alpha = 5$ 가 된다.

그림 2.3.4에는 V형의 결함(Notch)을 갖는 반무한평면인 경우 결함 근처의 응력분포를 나타내며, 응력집중계수 α 는 다음식으로 구해진다.

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{t/P} \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

t : 결함의 깊이, P : 결함 끝부분의 반경

그림 2.3.4에서 $t/P = 6$ 이므로 $\alpha = 5.9$ 가 된다. 균열의 경우 P 는 수 μm 이하가 되는 것도 있기 때문에 α 의 값은 매우 커진다. 또는 균열이 아니

어도 용접부의 언더컷과 같이 예민한 경우에는 균열과 같은 정도로 α 가 커지는 것도 있다. 이처럼 예민한 결함에 대한 응력집중계수가 커지고 부재는 파괴된다¹²⁾.

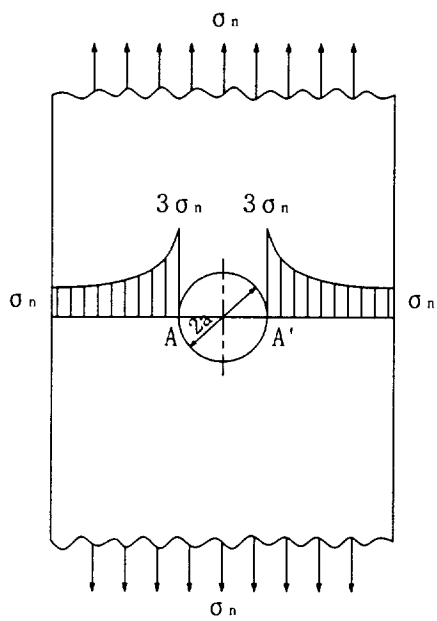


그림 2.3.2 무한평면내 원형구멍 근방의 응력분포

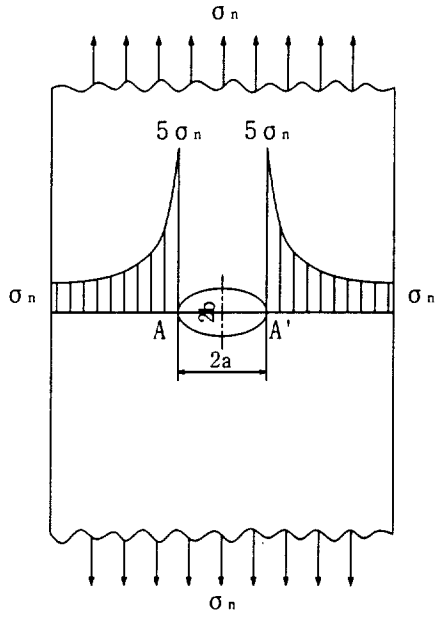


그림 2.3.3 무한평면내 타원형 근방의 응력분포($a/b=2$ 인 경우)

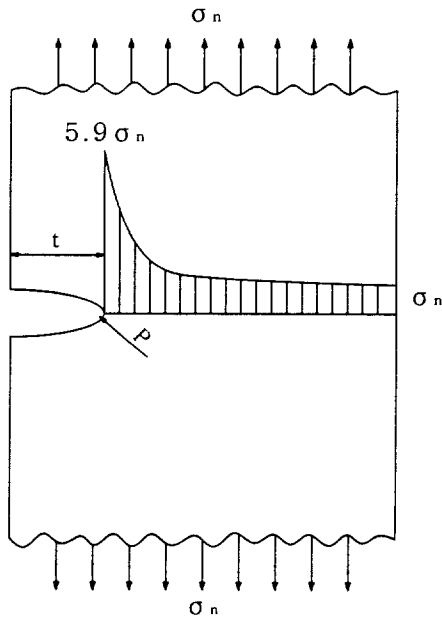


그림 2.3.4 반무한평면내 V형 결함(Notch) 근방의 응력분포($t/p=6$ 인 경우)

3. 초음파탐상시험의 기본이론

3.1 초음파탐상시험의 개요

3.1.1 초음파탐상시험의 원리

초음파탐상에서 쓰이는 초음파는 그림 3.1.1과 같이 펄스파와 연속파가 있다. 펄스파란 진동자가 계속해서 진동하는 것이 아니라 전기적 힘이 가해질 때만 진동이 이루어지는 것을 이용하여 전기적 힘을 일정간격을 두고 공급함으로써 진동자의 진동이 일정간격을 두고 일어나게 하여 발생된다. 이때 한번의 전기에너지 공급에 의해 진동자는 수회 진동하고 그 진동에 의해 여러개의 음파가 발생한다. 이때 발생한 한 무리의 음파가 1개의 펄스가 되며, 펄스를 이용한 방법이 펄스파법이다.

이 펄스파법에는 펄스의 반사를 이용하여 결함을 직접 찾아내는 펄스반사법과 펄스를 물체 중으로 투과시켰을 때 투과파의 음압, 즉 결함 존재시 음파진행이 결함에 의해 방해받음으로써 에코높이가 저하되는 것을 이용하여 결함의 유무를 판단하는 투과법이 있다.

현재 가장 많이 사용되는 방법은 펄스반사법이다. 이 펄스반사법이 투과법과 다른 점은 펄스의 반사에 의해 들어온 반사파가 화면상에 에코를 형성함으로써 결함의 위치 및 크기 정도를 측정할 수 있다. 그러나 투과법인 경우에는 어떤 반사에코를 이용하는 것이 아니며 화면에는 투과파의 에코만이 형성하게 된다. 이 투과에코의 높이에 따라 결함의 유무를 판단할 수 있다. 그림 3.1.2에서 알 수 있듯이 펄스반사법의 경우에는 탐촉자가 음파의 송신 및 수신인 한 개의 탐촉자에서 행해지며, 투과법인 경우에는 탐촉자가 송신 및 수신인 2개이어야 한다.

연속파는 진동자의 일시적인 진동이 아니라 계속적인 진동에 의해 만들어지는 음파를 말한다. 연속파를 이용한 연속파법, 즉 음파의 왕복진행시

입사파와 반사파의 간섭현상에 의해 음의세기가 커지는 현상인 공진법 (Resonance Method)을 이용하여 두께를 측정하는데 사용한다¹²⁾.

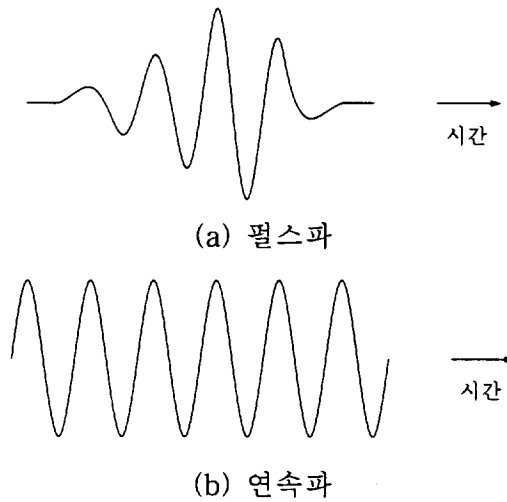


그림 3.1.1 펄스파와 연속파

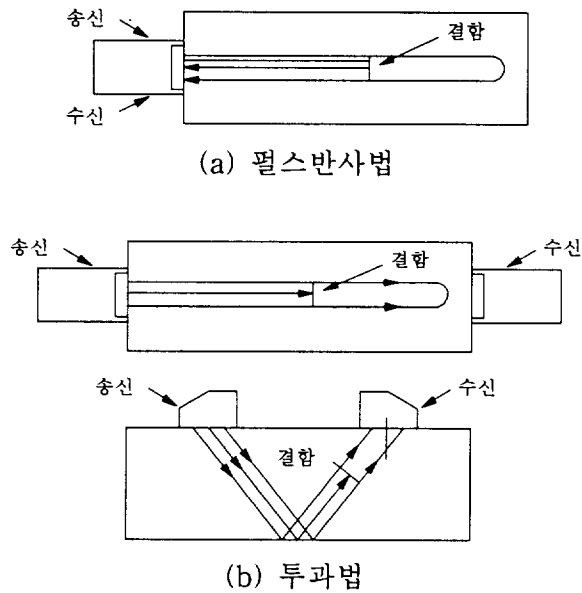


그림 3.1.2 펄스반사법과 투과법

3.1.2 초음파탐상시험의 표시방법

표시방법이란 수신되는 음파를 나타내는 방법, 즉 화면의 상태를 말하며, A-scope, B-scope, C-scope의 세가지가 있다.

A-scope에는 초음파탐상시험에서 쓰는 주된 표시방법으로서 펄스의 형태를 그대로 화면상에 보여주는 방식이다. 즉, 화면의 가로축을 음파진행 시간, 세로축을 수신음파의 세기로 나타낸다. A-scope에는 그림 3.1.3과 같이 펄스를 전파정류한 것과 반파정류한 것, 그리고 정류하지 않은 것이 있다. A-scope에는 반사파의 형태, 즉 파형만을 보여주므로 결함에 대한 재현성이 부족하여 초보자인 경우 결함의 크기, 모양, 방향 등은 알아내기가 매우 힘들다.

B-scope는 단면표시법이라 하며 병원에서 초음파진단시 주로 사용되는 것으로서 시험체의 단면을 보여준다. 이것은 화면의 시간축이 반사원의 탐상면으로부터의 위치, 즉 깊이가 된다. 그림 3.1.4와 같이 B-scope의 경우 반사에코의 진행시간에 따라 결함의 깊이만을 나타내는 것이므로 반사면 밑에 음파가 들어가지 못하는 부분의 상황은 나타내지 못하여 결함의 모양이 정확하게 나오지는 않는다. 또한 2개의 결함이 존재하더라도 화면은 1개의 결함만을 나타내게 된다. 즉, 탐촉자의 움직임에 따라 첫 번째 반사원의 위치만을 나타내게 되는 것이다.

C-scope은 평면표시법이라 하여 그림 3.1.5과 같이 화면에 탐상면 전체의 평면도가 나타나며, 결함에서는 반사에코 검출에 따라 결함의 위치를 평면도상에 나타낸다. 이것도 B-scope와 마찬가지로 결함의 탐상면상에서의 위치와 대략적인 형태만을 보여주며 결함의 깊이와 반사면 뒤쪽의 상황은 알 수 없다.

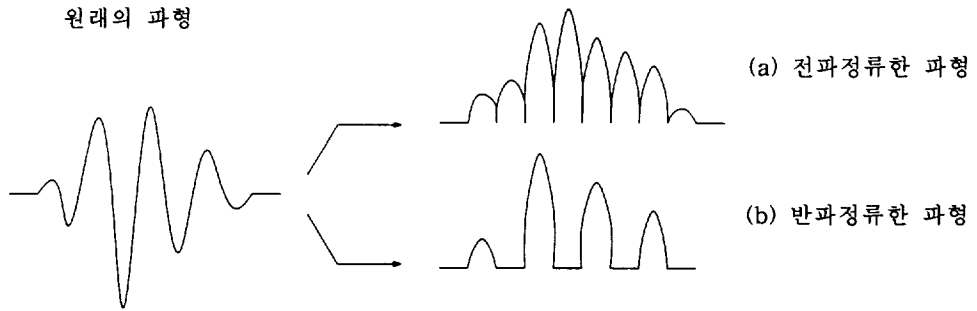


그림 3.1.3 A-Scope

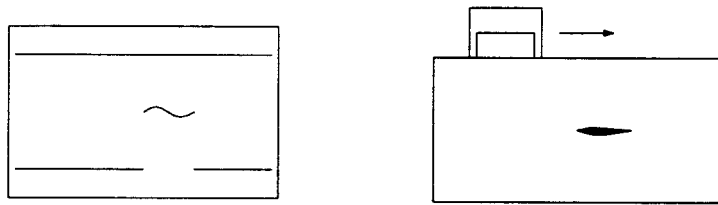


그림 3.1.4 B-Scope

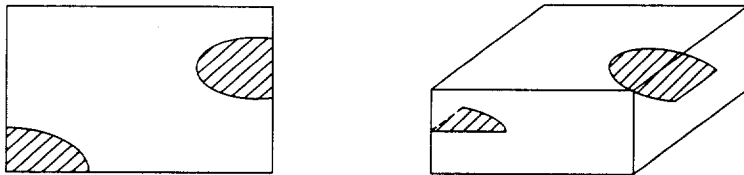


그림 3.1.5 C-Scope

3.1.3 초음파탐상시험의 진동방식

진동방식에 따라 수직탐상, 사각탐상, 표면파탐상이 있다. 수직탐상법은 음파를 입사표면에 대해 수직으로 보내는 것으로서 일반적으로 종파를 사용하며, 주단조품이나 압연재의 내부결함 검출, 두께 측정, 재료탄성 측정 등에 사용된다.

사각탐상법은 음파를 입사표면에 대해 경사지게 보내는 것으로서 일반적

으로 횡파를 사용한다. 진동자는 종파를 발생시키지만 굴절에 의한 파형 변환에 의해 횡파를 시험체 내로 입사시킨다. 이 현상은 종파의 입사각이 제1임계각 이상 되었을 때 발생한다. 이 횡파를 사용하여 탐상하는 것을 횡파사각탐상법이라 한다. 만약에 종파의 입사각이 제1임계각보다 작을 때는 종파와 횡파가 모두 발생한다. 일반적으로 사각탐상은 주로 용접이 음부 및 원형부재의 내부결함검출에 사용한다.

표면파탐상법은 사각탐상법과 같이 음파를 입사표면에 대해 경사지게 보내는 것으로 입사각이 제2임계각이 되었을 때 표면파가 발생하는 것을 이용하여, 표면파를 이용해 표면결함을 검출한다.

3.1.4 초음파탐상시험의 탐촉자수

사용하는 탐촉자의 수에 따라 1탐법, 2탐법, 다탐법으로 나누어진다. 1탐법은 송신과 수신이 1개의 탐촉자에 의해서 이루어지는 것으로서 일반적인 수직탐상과 사각탐상의 펄스반사법에 의한 탐상에서 쓰인다.

2탐법은 송신과 수신이 2개의 탐촉자에 의해서 이루어지는 것으로서 탐촉자는 송신탐촉자와 수신탐촉자로 나누어져 송신과 수신이 구분된다.

다탐법은 2탐법의 변형된 형태로서 탐촉자를 4개 이상 사용하는 방식으로 일반적으로 송신탐촉자는 1개이며, 여러 개의 수신탐촉자를 사용하는 경우가 많다. 이것은 송신탐촉자에서 송신된 음파가 정확히 어느 지점으로 수신될지가 불확실할 때 수신탐촉자를 여러 곳으로 분포시켜 음파를 수신하기 좋도록 한 것이다. 1탐, 2탐, 다탐법 중 일반적인 탐상에서 주로 사용되는 방법은 1탐법이다.

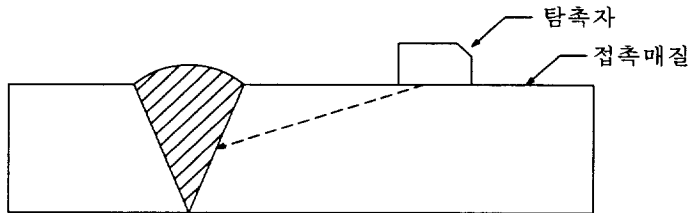
3.1.5 초음파탐상시험의 접촉방식

탐촉자와 시험체의 접촉형태에 따라 직접접촉법, 수침법 및 Gap법이

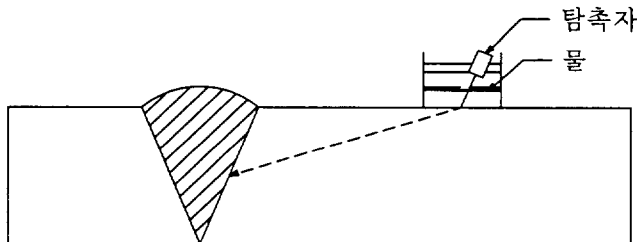
있으며 그림 3.1.6과 같다.

직접접촉법은 탐촉자와 시험체를 얇은 접촉매질의 막을 사이에 두고 직접접촉시키는 일반적 형태의 탐상법이다. 수침법은 탐촉자와 시험체의 사이에 접촉매질, 즉 물의 층을 두껍게 한 것으로서 전몰수침법과 국부수침법으로 나누어진다. 이 수침법은 직접접촉법에 비해 표면의 영향을 줄일 수 있어 거친 표면을 가진 시험체를 탐상할 때, 불감응대(不感應帶)가 거의 없어지므로 두께가 얇아 불감응대(不感應帶)의 영향이 큰 부재 탐상시 주로 쓰인다.

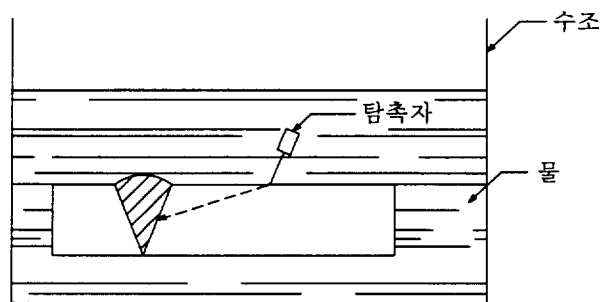
Gap법은 자동UT 적용시 일반적으로 적용되는 방법으로 탐촉자와 탐상면사이에 약간의 Gap(2파장정도 이하)을 만들고 그 Gap에 물 또는 글리세린등의 접촉매질을 채워 시험하는 방법이다. 탐촉자의 주사는 직접접촉 방법과 동일하나 수침법과 같이 에코우의 안정성을 얻을 수 있다^{12),13)}.



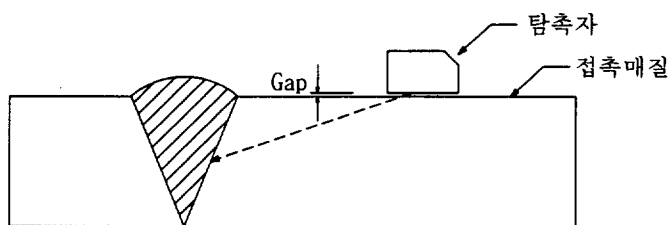
(a) 직접접촉법



(b) 국부수침법(局部水沈法)



(c) 전몰수침법(全沒水沈法)



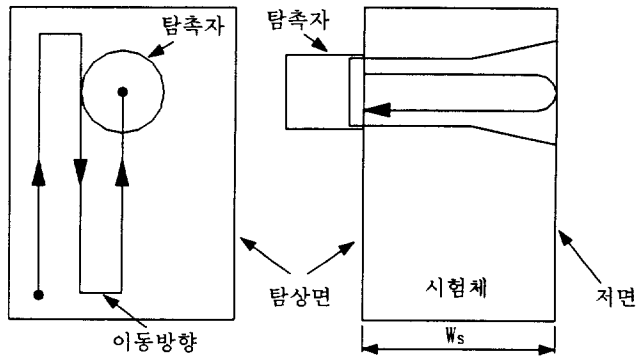
(d) Gap법

그림 3.1.6 탐촉자와 시험체의 접촉형태

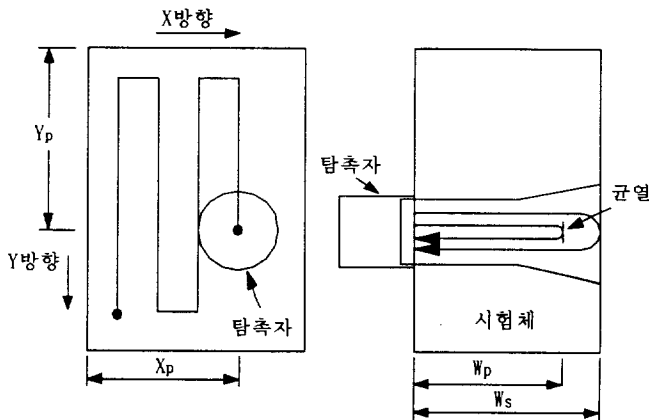
3.2 초음파탐상시험법의 기초

3.2.1 수직탐상시험

그림 3.2.1은 수직탐상법의 기본을 나타내며, (a)와같이 부재에 결함이 없는 건전부에서는 브라운관에 저면에코만이 나타나고 (b)와 같이 결함이 존재하는 부위에는 저면에코 앞에 결함에코가 나타난다. 결함을 검출하는 데는 그림 3.2.1과 같이 탐상면에서 탐촉자를 이동(주사)시키면서 브라운관을 관찰하고 저면에코 앞에 나타나는 에코(결함에코)를 찾아 결함의 유무를 조사한다⁵⁾.



(a) 건전부



(b) 결함부

그림 3.2.1 수직탐상법

3.2.2 사각탐상시험

그림 3.2.2는 사각탐상법의 기본을 나타내며, 건전부에서는 수직탐상법과 같은 저면에코는 나타나지 않는다.

한편, 결함부에서는 초음파가 결함면에 수직 또는 수직에 가까운 각도로 입사하면 결함에코가 나타난다. 결함에코를 검출하는 데는 시험체에 탐촉자를 전후로 주사하고 초음파빔을 이면에 반사시키지 않고 직접 결함을 찾는 직사법과 초음파빔을 이면에서 1회만 반사시켜 결함을 찾는 1회반사법을 병용한다.

직사법, 1회반사법 모두 탐촉자를 전후주사범위에서 그림 3.2.2와 같이 지그재그주사를 하여 결함이 존재하고 있으면 결함에코는 감시범위 내에 나타난다. 감시범위 내에 나타난 결함에코는 그림 3.2.2와 같이 기본주사를 실시하여 최대에코를 검출한다^{12),14)}.

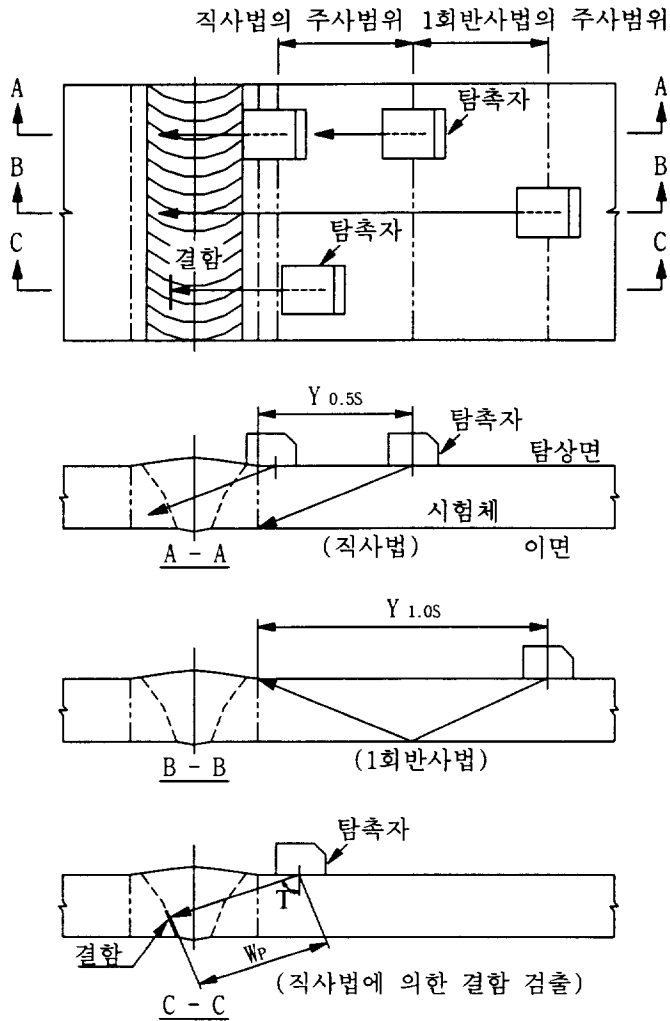


그림 3.2.2 사각탐상법

3.2.3 자동초음파탐상시험

자동초음파탐상시험(A-UT)은 시험자체가 컴퓨터 프로그램에 의해 자동으로 이루어지며 검사결과의 기록, 결함크기의 추정등도 자동으로 이루어 질뿐만 아니라 3차원적으로 결함을 검출할 수 있다^{13),15)}.

자동초음파탐상시험의 결함 검출방법은 초음파탐상시험의 수직탐상과 사

각탐상의 기본방법과 같으며, 수직과 사각탐촉자를 조합한 탐촉자별 게이트설정에 의해서 펄스반사법인 A-Scope, 단면표시법인 B-Scope, 평면표시법인 C-Scope이 자동으로 변환되어 PC모니터상에 나타내는 원리이다. 자동초음파탐상시험 시스템의 필요한 기본적인 구성은 그림 3.2.3과 같다.

자동초음파탐상시험의 구성 장비로서는 ① 초음파탐촉자 주사기구, ② 원격제어케이블, ③ 초음파탐상기(탐촉자포함), ④ 주사기구제어기, ⑤ 데이터처리장치 등으로 구성된다^{13),16),17)}.

본 연구에서는 강교량 부재의 용접이음부 결함 검출에 사용되고 있는 자동초음파탐상시험기를 사용하여 결함검출을 실시하였다. 그림 3.2.4에는 자동초음파탐상시험기(A-UT)의 개략도를 나타낸다.

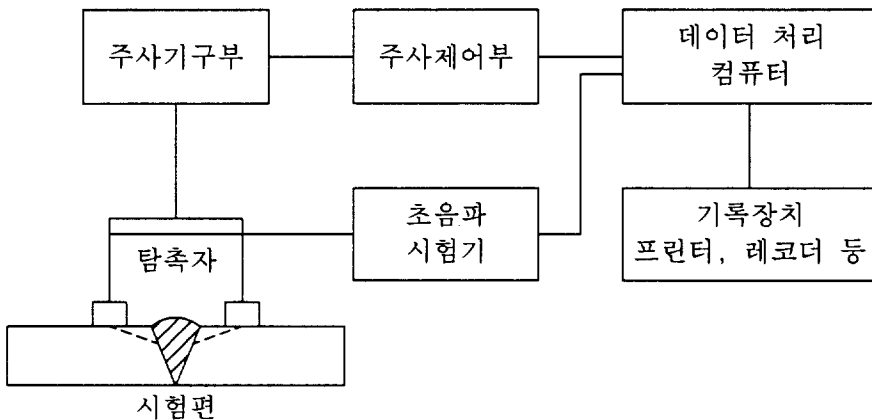
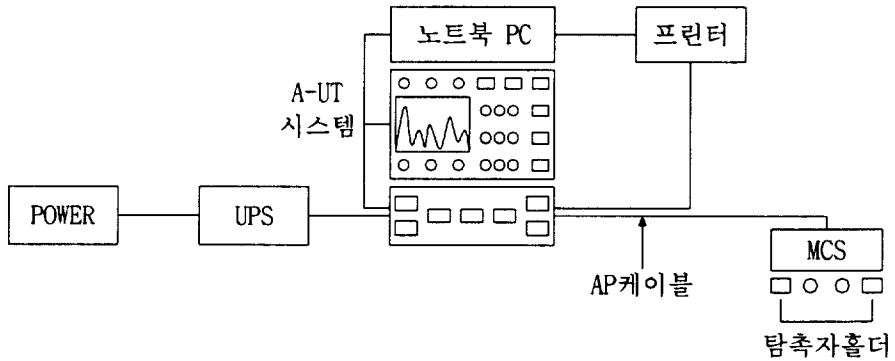


그림 3.2.3 일반적인 A-UT시스템 구성



- A-UT시스템 · MCS(Scanning Controller)
- 노트북(시스템컴퓨터) · Real Time Printer
- UPS(전원안정공급장치) · AP케이블 · 탐촉자홀더
- 탐촉자(CH1-일반결함부용 수직탐촉자, CH2-용입선측정용
집속형수직탐촉자, CH3,4-블로우홀용 집속형사각탐촉자)

그림 3.2.4 자동초음파탐상시험기(A-UT) 개략도

3.3 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 비교·검토

초음파탐상시험의 최대의 장점은 용접이음부 내부의 균열, 면상결합등의 검출 능력이 다른 비파괴시험법에 비해 탁월하다. 일반적으로 초음파탐상시험의 장점을 열거하면 다음과 같다.

- 1) 투과능력이 탁월하다
- 2) 미세한 결함에 대하여 감도가 높다.
- 3) 내부결합의 위치, 크기, 방향을 어느정도 정확히 측정할수 있다.
- 4) 검사결과를 브라운관을 통해 즉시 알수 있다.
- 5) 검사자 또는 주변 사람의 인체에 대해 유해하지 않다.
- 6) 이동성이 양호하다.

3.3.1 초음파탐상시험

일반적으로 강교량 부재의 용접이음부 검사에는 펄스반사법인 A-Scope으로 표시하여 브라운관에 나타난 펄스에코우의 형상에 따라 결함을 구분하므로 결함을 판단하는 데에는 검사자의 많은 경험이 요구되며, 결함종류를 정확히 파악하는 데에는 많은 어려움이 있다. 또한 아날로그 타입이 아닌 디지털장비의 보급으로 인하여 원하는 각 포인트에 대한 저장은 가능하나 용접이음부에 대해 연속적으로 저장하는 것은 불가능하다. 즉 용접이음부의 용입선의 형상에 대한 연속적인 형태의 파악은 불가능하다.

3.3.2 자동초음파탐상시험

사용탐촉자별 게이트설정에 의해 A-Scope, B-Scope, C-Scope이 표시되어 지므로 결함의 검출시 PC모니터를 통하여 결함종류, 크기, 형태, 용입선의 형상 등을 자동으로 알수 있으며, 자동탐상이 이루어지므로 검사

자의 기량에 따른 큰 영향이 없으며 짧은 시간에 결함에 대한 탐상이 이루어질 수 있다. 또한 그 기록된 결과를 프로그램에 의해 자동으로 결함을 파악할 수 있으므로 객관적인 기록이 된다.

검사부위의 전 길이에 대해 저장이 1mm간격으로 이루어져 용입부족, 용입급변의 결함검출에 뛰어나다. 발생빈도가 높은 결함 혹은 특정한 결함 검출을 위하여 최적의 탐촉자를 배치하여 해당결함을 집중적으로 탐상할 수 있다. 자동기록된 탐상결과를 저장매체에 유지하여 영구히 보존할 수 있으며 강교량의 유지관리에도 그 기록을 활용할 수 있다^{13),18)}. 표 3.3.1은 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 장·단점 비교를 나타낸다.

표 3.3.1 초음파탐상시험 및 자동초음파탐상시험의 장·단점 비교

구 분	초음파탐상시험	자동초음파탐상시험
장 점	· 현장여건에 크게 구애받지 않는다. · 대상구조물의 형태에 대한 제한이 적다. · 검사를 신속히 수행할 수 있다. · 현장에서 즉시 판독가능하다. · 특정부위에 대한 집중탐상 용이하다. · 수정부위에 대한 재검사가 용이하다. · 별도의 전원이 필요없다. · 검사장비의 비용이 저렴하다. · 검사자 1명이 1팀으로 검사가 가능하다.	· 부분용입부 결함검출력 우수. · 단조롭고 큰 검사부에 적합하다. · 동일형태 및 대량검사에 적합하다. · 예측결함에 대한 신속, 정확한 검사가 유리하다. · 탐상방향에 대한 작은 결함검출이 양호하다. · 결함검출의 오류가 적다. · 검사결과 데이터 전산화 및 유지보존이 용이하다. · 검사결과의 객관적인 판정이 가능하다.
단 점	· 숙련된 검사기술자가 필요하다. · 결과판정의 주관적 판단요소가 다소있다. · 작은결함 검출의 오류 가능성이 있다. · 검사결과 데이터 전산화가 어렵다. · 연속되는 부재의 검사속도가 A-UT에 비해 느리다. · 검사자의 실수로 인한 오판 가능성이 있다.	· 장비에 대한 의존도가 크다. · 현장여건의 제한이 있다(장비공간, 전원, 부재배치 등). · 대상구조물 형상에 대해 제한을 받는다. · 짧은 용접이음 검사시 효율이 저하된다.

강교량에 적용되는 초음파탐상시험은 일반적으로 1개의 일반결함 측정용 탐촉자를 사용하여 방사선투과시험이 불가능한 부위의 완전용입 용접이음부에 대한 내부결함 검출에 사용된다. 한편 자동초음파탐상시험은 특정결함을 검출하기 위한 탐촉자, 즉 일반결함 측정용 탐촉자(수직), 용입선 측정을 위한 집속형 탐촉자(수직), 용착금속 내부와 용접 루트부에 존재하는 블로우홀과 같은 결함을 검출하는 블로우홀 측정용 집속형 탐촉자(사각)를 배열하여 1회의 시험으로 박스 단면 부분용입 용접이음부의 결함을 모두 검출할 수 있다. 또한 시험결과에 대한 판독의 객관성 및 전산화를 통한 재현성 측면에서 강교량 용접이음부 특히 부분용입 용접이음부 결함검출에 탁월한 장점을 가지고 있다.

3.4 자동초음파탐상시험의 순서

자동초음파탐상시험은 다음과 같은 플로우 차트로 구성된다.

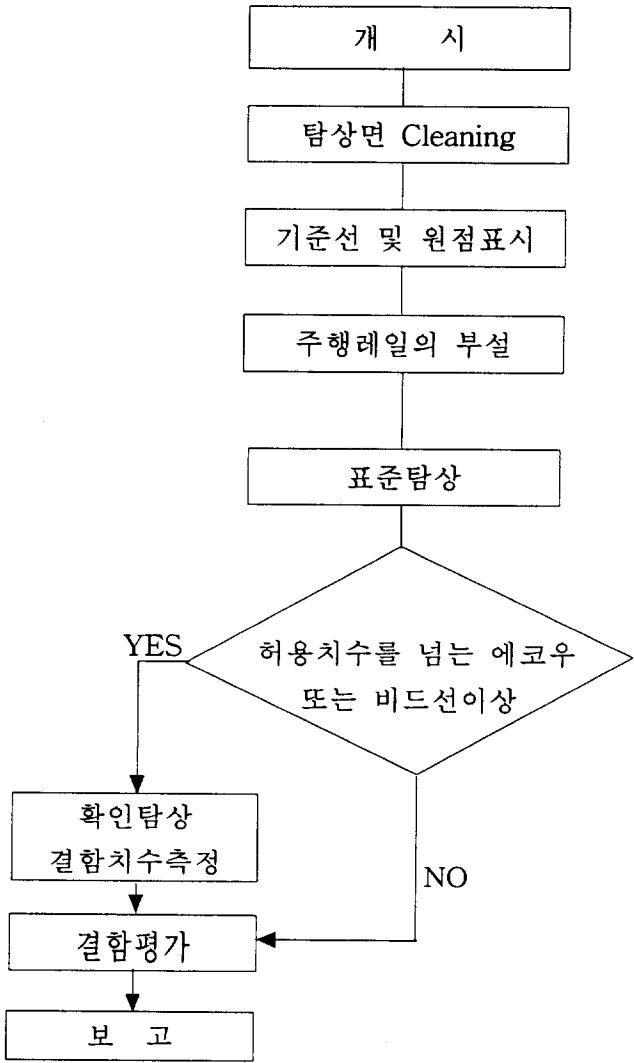


그림 3.4.1 자동초음파탐상시험의 순서

표준탐상 이전 순서는 자동검사전의 준비단계에 해당되며 이후의 순서는 탐상기록된 결과를 PC모니터상에서 분석하는 순서로 이루어진다. 그림 3.4.2에 시험결과 판정 순서의 플로우 차트를, 표 3.4.1에 조질고장력강을 사용한 부재의 등급분류와 검사기준을 각각 나타낸다.

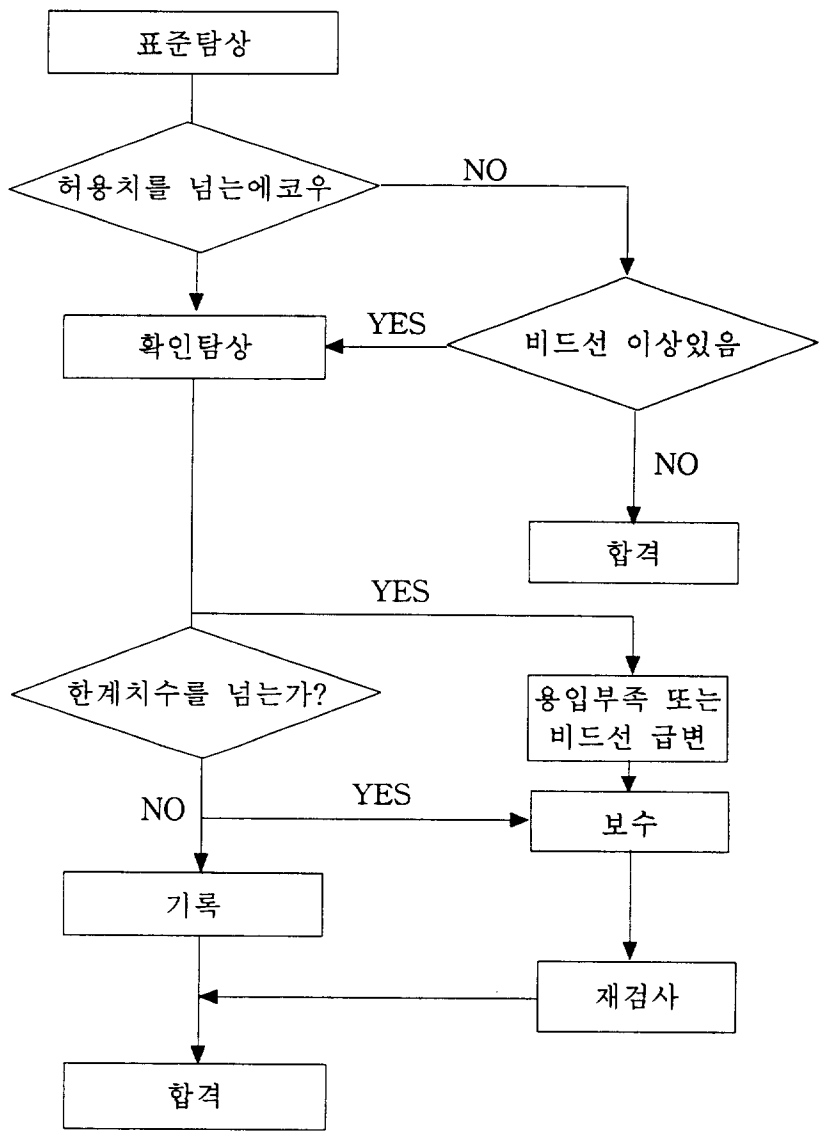


그림 3.4.2 자동초음파탐상 시험결과 판정 순서¹⁹⁾

표 3.4.1 조질고장력강을 사용한 부재의 등급분류와 검사기준⁹⁾

분류 방법	응력범위						제작기준	
	허용응력 범위	결합의 허용치수	초음파 탐상	지단 프랭크각	검 사 기 록	검사 시기		
특A	$0.7 \leq \sigma \sqrt{\sigma_{1d} B}$ 혹은 $0.85 \leq \sigma \sqrt{\sigma_{1d} C}$	$W \leq 1.5\text{mm}$ $H \leq 4\text{mm}$ $\theta \geq 120^\circ$ (135°)	모서리 용접 전길이	리브의 십자용접 전수	영 구 보 존	정기	일본本國 공단의 조질 고장력강을 사용한 부재의 모서리 용접에 대한 추가사항	
A	$0.5 < \sigma \sqrt{\sigma_{1d} B} < 0.7$ 혹은 $0.6 \leq \sigma \sqrt{\sigma_{1d} C} < 0.85$	$W \leq 3\text{mm}$ $H \leq 6\text{mm}$ $\theta \geq 120^\circ$ (135°)				필요에 의함		
B	$\sigma \sqrt{\sigma_{1d} B} < 0.5$ 혹은 $\sigma \sqrt{\sigma_{1d} C} < 0.6$	$W \leq 6\text{mm}$ $H \leq 6\text{mm}$						길이의 20%이상

여기서, $\sigma_{1d}B$: 모서리용접의 피로 허용응력범위

$\sigma_{1d}C$: 리브십자용접의 피로 허용응력범위

4. 강교량 용접이음부에 대한 자동초음파탐상시험의 응용

4.1 대상시험편

본 연구에서 대상으로 하는 트러스 구조를 그림 4.1.1에, 트러스 구조에서 부재의 박스 형상을 그림 4.1.2에 각각 나타낸다. 그리고 본 연구에서는 트러스 구조의 박스 단면을 제작한 대상시험편에서 부분 모서리 용접이음부에 인위적으로 비정상적인 용접조건에 의해 블로우홀을 삽입하여 용접을 실시하였다. 또한 인공구멍을 크기별로 천공하여 결함길이와 용입부족(용입깊이)를 시험구간별로 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험을 실시하여 그 결과를 비교·분석하였다. 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 동일 조건을 최대한 유지하기 위하여 감도를 동일하게 설정하였으며 거리진폭특성곡선의 예코우의 높이 20%이상의 지시를 평가의 대상으로 삼았다. 그림 4.1.3에는 대상시험편을 나타낸다.

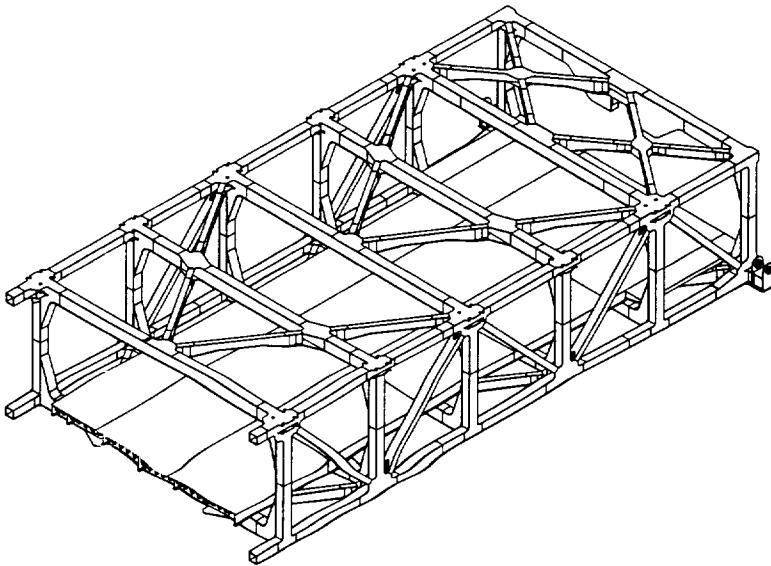


그림 4.1.1 대상 트러스 구조

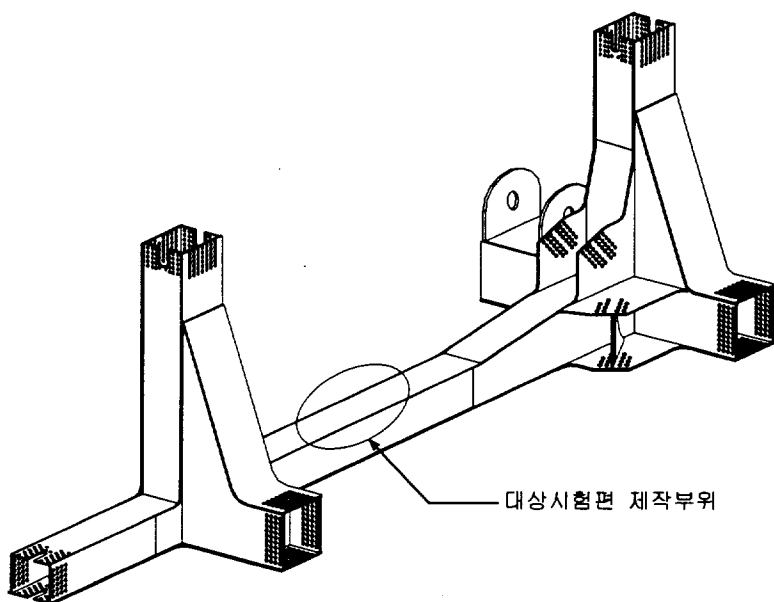
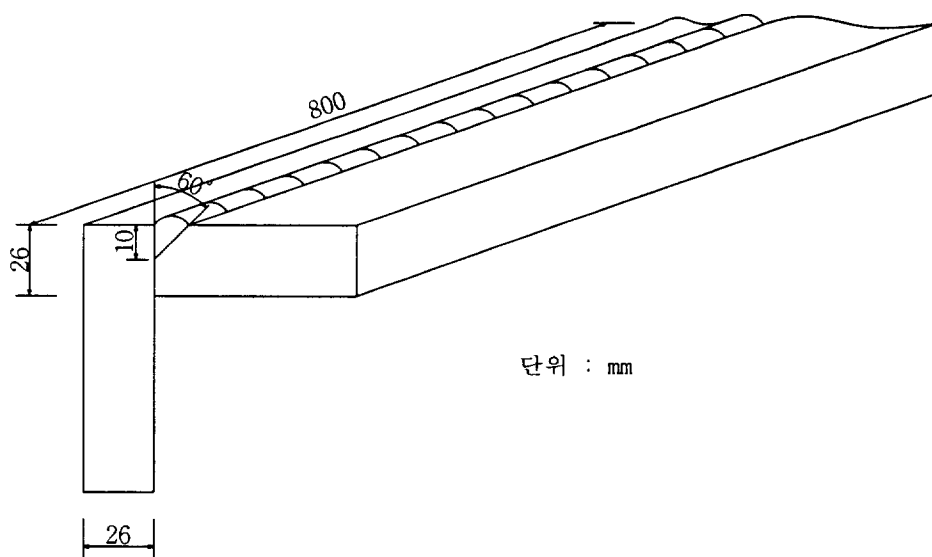
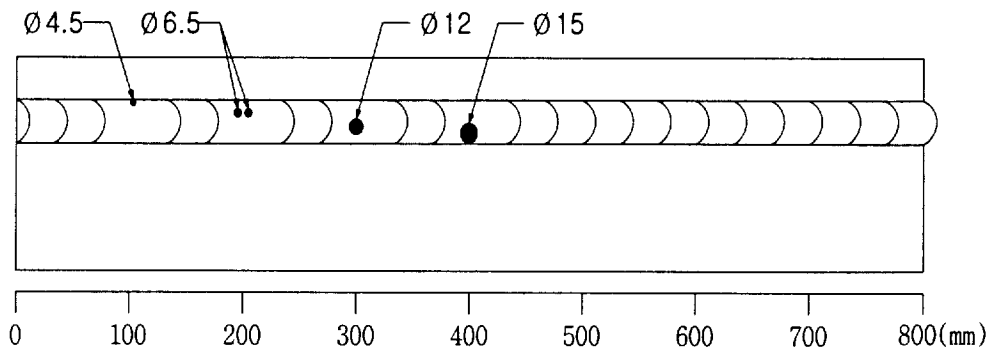


그림 4.1.2 트러스 구조에서 부재의 박스 형상



(a) 대상시험편 형상



- 시험구간 100 - 700mm : 인공드릴홀, 용접블로우홀
- 시험구간 300 - 600mm : 용입부족(용입깊이)

(b) 대상시험편의 시험위치

그림 4.1.3 대상시험편의 형상 및 시험위치

4.2 초음파탐상시험에 의한 결함검출

초음파탐상시험은 탐촉자 위치에 따라 그림 4.2.1과 같이 A, B, C면에서 시험을 실시하였다. 탐상감도는 KS B 0831(초음파탐상용 표준시험편)의 대비시험편 RB-4, A2I에서 수직탐상감도는 제1저면반사를 80%, 사각탐상감도는 25T의 1.5 ϕ 의 제1저면반사 에코우 80%를 기준감도로 설정하였다. 지시검출의 정확도를 기하기 위해 A, B, C의 세면에서 수직 및 사각탐상을 실시하였고 빔거리가 길어짐에 따른 검출력 저하를 방지하기 위해 직사법(0.5Skip)으로 탐상을 실시하였다. 결함길이 측정방법은 6dB Drop법을 사용하여 측정하였다. 또한 최고에코우를 찾기위해 70 °탐촉자를 시험에 사용하였다.

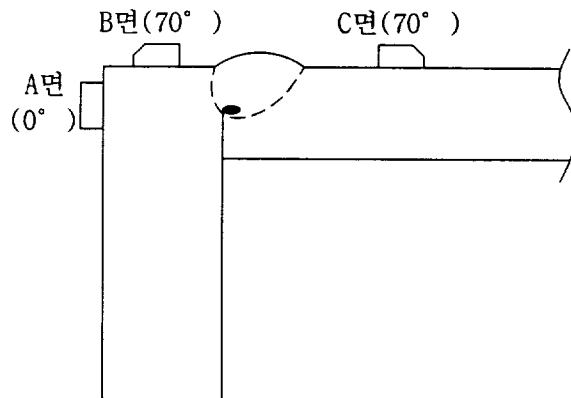


그림 4.2.1 초음파탐상시험의 탐상면별 탐촉자 위치

1) 인공구멍

그림 4.1.3 (b)에 나타난 바와 같이 드릴로 $\phi 4.5$, $\phi 6.5$ (2개소), $\phi 12$, $\phi 15$ 의 구멍을 천공하고 수직과 사각탐촉자를 사용하여 A, B, C면에서 결함 길이를 각각 측정하였다. A면의 수직탐상에서 설정된 80%기준감도

상태에서는 구멍에서 분산되는 빔의 양이 많아 평가의 대상으로 삼은 에코우높이가 20%이상이 발생하지 않았다.

B면에서 $\phi 6.5$ (2개소), $\phi 12$, $\phi 15$ 와 C면에서 $\phi 4.5$, $\phi 6.5$ (2개소)에서는 용접 루트부와 드릴로 천공한 구멍이 근접하여 반사에코우의 구분이 불분명하고, 용접덧살로 인해 탐촉자의 접근 한계거리가 상회하여 검출이 불가 하였다.

C면에서 $\phi 12$, $\phi 15$ 의 결합길이가 실제 인공 구멍 크기보다 작게 측정되었다. 그 이유는 인공 구멍의 저면이 둥근모양에 의한 음파의 반사율이 많아 수신된 에코우의 높이로 인한 결합길이 측정은 작게 분석되었다. 또한 상대적으로 $\phi 12$ 에 비해 $\phi 15$ 의 탐상에서 좀더 인공 구멍의 결합 길이에 접근한 것은 $\phi 15$ 가 $\phi 12$ 에 비해 상대적으로 직경이 크므로, 반사되어 수신되는 빔의 양이 많아 근접성을 보이며, $\phi 12$ 에 비해 $\phi 15$ 가 탐촉자가 이동할 수 있는 탐상면과 근접하여 수신되는 빔의 양이 많은 것으로 여겨진다.

표 4.2.1 초음파탐상시험에 의한 인공구멍 시험 결과

탐상면 구멍직경	A면 (수직탐상 0 °)	B면 (사각탐상 70 °)	C면 (사각탐상 70 °)
$\phi 4.5$	검출불가	결합길이5mm	검출불가
$\phi 6.5$ (2개소)	"	검출불가	"
$\phi 12$	"	"	결합길이3mm
$\phi 15$	"	"	결합길이6mm

2) 용접블로우홀

그림 4.2.1의 탐상면별 탐촉자위치에서 A면의 수직탐상, B면, C면의 사각탐상은 용접루트부의 미세한 용접블로우홀이 인접하고 미세한 블로우

홀이 연속으로 존재하여 20%이상의 에코우와 20%이하의 에코우가 서로
 뭉쳐서 구분이 어렵다. 그러므로 평가의 대상이 되는 지시를 객관적으로
 구분할 수 없었다.

표 4.2.2 초음파탐상시험에 의한 용접블로우홀 시험 결과

탐상면 시험범위	A면(수직탐상 0°)	B면(사각탐상 70°)	C면(사각탐상 70°)
100~700mm	검출불가	검출불가	검출불가

3) 용입부족(용입깊이)

용입깊이를 탐상하기 위해서는 그림 4.2.1의 탐상면별 탐촉자위치에서
 A, C면에 비해 빔거리가 짧은 B면에서 보다 정확성을 확보하고자 탐상
 을 실시하였다. B면에서 용입부족의 탐상에 있어서는 용접덧살을 제외한
 탐상면의 길이가 19mm에서 시험에 사용된 탐촉자의 빔의 입사점이
 12mm이므로 탐상이동면 7mm만으로 인하여 에코우 높이가 20%확보가
 되지 않아 기준감도에서 6dB을 증가시켜 탐상을 실시 하였다. 측정 포인
 트는 5mm간격으로 실시하였다. 그 결과는 표 4.2.3에 나타낸다.

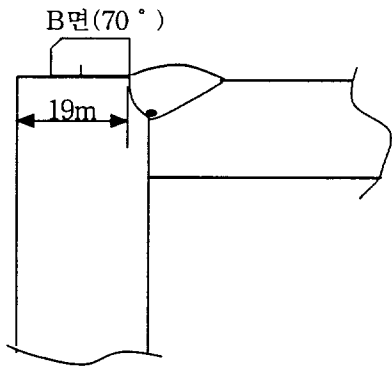


그림 4.2.2 초음파탐상시험에 의한 용입깊이 측정도

표 4.2.3 초음파탐상시험에 의한 용입깊이 시험 결과

단위:mm

측정위치	용입깊이	측정위치	용입깊이	측정위치	용입깊이	비고
300	8.0	400	8.3	500	7.7	
305	8.3	405	8.4	505	7.1	
310	7.9	410	8.4	510	7.3	
315	8.5	415	8.1	515	7.7	
320	8.3	420	8.1	520	7.5	
325	8.0	425	8.2	525	8.4	
330	8.1	430	8.2	530	8.3	
335	8.5	435	8.3	535	8.2	
340	9.1	440	8.0	540	7.5	
345	8.3	445	7.7	545	7.7	
350	8.1	450	8.2	550	7.6	
355	8.0	455	8.0	555	7.9	
360	8.2	460	7.9	560	7.9	
365	8.1	465	8.0	565	8.0	
370	8.1	470	8.1	570	7.8	
375	8.1	475	7.8	575	8.1	
380	7.8	480	7.9	580	8.2	
385	8.2	485	8.3	585	8.4	
390	8.1	490	8.0	590	8.4	
395	8.5	495	7.8	595	8.1	
				600	8.2	

4.3 자동초음파탐상시험에 의한 결함검출

자동초음파탐상시험은 그림 4.2.1의 A면에서 수직과 사각탐촉자가 조합된 4개의 탐촉자(수직탐촉자-0°일반/집속형, 사각-45°집속형2개)로 시험을 실시하였다.

1)인공 구멍

그림 4.1.3(b)의 대상시험편에서 $\phi 4.5$, $\phi 6.5$ (2개소), $\phi 12$, $\phi 15$ 인공구멍에 대해 자동초음파탐상시험을 실시하였다. 그 결과를 표 4.3.1 및 표 4.3.2에 각각 나타낸다.

인공구멍에 대한 자동초음파탐상시험 결과 CH1(일반결함부용 수직탐촉자)에서는 $\phi 4.5$ 에 대해서 검출이 된 반면 CH4(블로우홀용 집속형사각탐촉자)에서는 검출이 되지 않았다. 또한 CH1에서는 인접한 2개구멍 $\phi 6.5$ 에 대해서는 구분되어 검출이 된 반면 CH4에서는 동일깊이에 있는 인접한 구멍으로 인한 즉 빔분산에 의해서 한 개의 결함으로 인식되었다.

표 4.3.1 자동초음파탐상시험에 의한 인공구멍 시험 결과(CH1) 단위:mm

번호	에코우 높이 (%)	탐촉자 (X)	탐촉자 (Y)	빔거리	결 합				CH1		
					깊이	거리	시작	길이	반사 회수	에코 구분	등급
Ø4.5	127	97.0	4.0	26.4	26.4	4.0	97.0	7.0	0.0	4	2
Ø6.5	103	182.0	9.0	33.1	33.1	9.0	179.0	8.0	0.0	4	2
Ø6.5	30	194.0	7.5	33.3	33.3	7.5	192.0	5.0	0.0	2	1
Ø12	90	295.0	11.0	33.9	33.9	11.0	289.0	12.0	0.0	4	3
Ø15	127	406.0	11.0	39.8	39.8	11.0	403.0	11.0	0.0	4	3

표 4.3.2 자동초음파탐상시험에 의한 인공구멍 시험 결과(CH4) 단위:mm

번호	에코우 높이 (%)	탐촉자 (X)	탐촉자 (Y)	빔거리	결 합 CH4						
					깊이	거리	시작	길이	폭	높이	등급
Ø4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ø6.5(2)	43	195.0	42.5	47.9	33.8	8.7	194.0	2.0	1.9	3.8	A
Ø12	77	299.0	48.5	50.4	35.6	12.9	298.0	3.0	3.0	3.1	B
Ø15	127	411.0	51.5	58.4	41.2	10.3	409.0	6.0	4.7	9.7	E

2)용접블로우홀

그림 4.1.3(b)에서 시험구간 100~700mm 범위에 용접블로우홀에 대한 시험결과는 표 4.3.3에 나타낸다. 시험범위에서 자동초음파탐상시험에 의한 용접블로우홀은 총 6개소가 검출되었다.

표 4.3.3 자동초음파탐상시험에 의한 용접블로우홀 시험 결과 단위:mm

번호	에코우 높이(%)	탐촉자 (X)	탐촉자 (Y)	빔거리	결 합 CH4						
					깊이	거리	시작	길이	폭	높이	등급
1	26	275.0	29.0	36.6	25.8	3.2	274.0	7.0	1.3	3.8	S
2	24	338.0	28.5	37.4	26.4	2.1	337.0	2.0	1.2	4.2	A
3	21	359.0	27.5	37.7	26.6	0.9	359.0	1.0	1.1	1.1	S
4	26	368.0	27.0	36.4	25.7	1.3	368.0	2.0	1.3	4.4	A
5	29	396.0	26.5	36.0	25.4	1.1	383.0	17.0	1.4	6.0	A
6	29	482.0	28.5	36.9	26.0	2.5	475.0	8.0	1.4	3.8	S

3)용입부족(용입깊이)

본 연구에 사용된 자동초음파탐상시험기는 1mm간격으로 용입깊이 측정이 가능하나, 초음파탐상시험과의 비교를 위해 5mm간격에 해당하는 용입깊이를 측정하였다. 표 4.3.4는 그림 4.1.3(b)의 300~600mm 범위의 자동초음파탐상시험에 의한 용입깊이를 탐상한 시험결과를 나타낸다.

표 4.3.4 자동초음파탐상시험에 의한 용입깊이 시험 결과

단위:mm

측정위치	용입깊이	측정위치	용입깊이	측정위치	용입깊이	비고
300	8.5	400	8.5	500	7.0	최소
305	8.5	405	9.0	505	7.5	
310	9.5	410	8.5	510	7.5	
315	9.0	415	8.0	515	7.5	
320	8.5	420	7.5	520	8.0	
325	9.0	425	7.5	525	8.0	
330	9.5	430	8.0	530	7.5	
335	9.5	435	7.5	535	7.0	
340	10.5	440	8.0	540	8.0	
345	9.5	445	8.0	545	8.0	
350	7.5	450	8.0	550	8.5	
355	8.5	455	8.0	555	8.5	
360	7.5	460	8.0	560	9.5	
365	7.5	465	8.5	565	11.5	
370	7.5	470	8.5	570	11.5	
375	8.5	475	8.5	575	12.0	
380	8.5	480	8.5	580	12.5	최대
385	8.5	485	8.5	585	12.0	
390	8.5	490	8.5	590	11.5	
395	9.0	495	8.5	595	10.5	
				600	10.5	

4.4 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험과의 비교 · 분석

그림 4.1.3의 대상시험편에 대해 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험 결과를 종합하면 다음과 같이 표 4.4.1로 나타낸다.

표 4.4.1 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 비교 결과표

구분	기준	초음파 탐상시험	자동초음파탐상시험		비고
			CH1	CH4	
인공 구멍	Ø4.5	5mm	7mm	검출불가	
	Ø6.5	검출불가	8mm	2mm	
	Ø6.5	검출불가	5mm		
	Ø12	3mm	12mm	3mm	
	Ø15	6mm	11mm	6mm	
용접블로우홀		검출불가	6개소 검출		
용입부족 (용입깊이)		최대 8.2mm	최대 12.5mm		* 자동초음파탐상 결과에 의한 용입 최대, 최소깊 이의 동일포인트에 대한 초음파시험 용입깊이
		최소 7.7mm	최소 7.0mm		

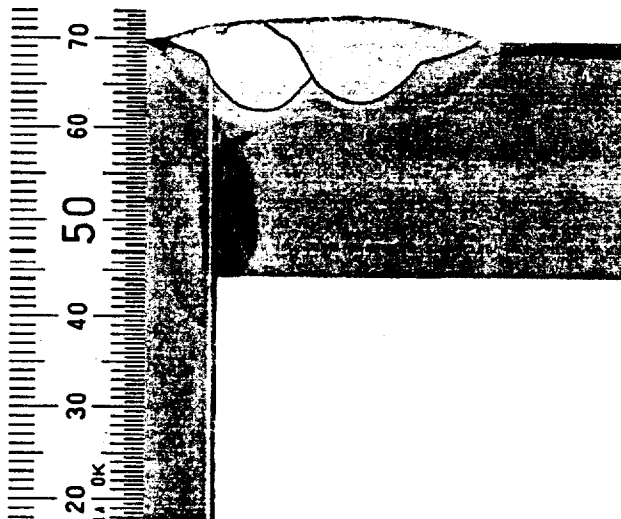
인공구멍의 초음파탐상시험결과 Φ4.5의 결함길이 5mm 검출은 그림 4.2.1의 탐상면(B면)에서 인접하여 인공구멍이 존재하기 때문에 평가의 대상인 에코우높이 20%이상이 검출되었으며, Φ6.5는 그림 4.2.1의 탐상면(B면)에서 Φ4.5에 비해서 거리가 떨어져 있어 20%이상의 에코우가 확보하지 못하였다. 또한 Φ12, Φ15는 그림 4.2.1의 탐상면(B면)과 인접하지는 않았으나 반사에코우가 20%이상 확보될수 있는 인공구멍 직경이기 때문에 결함길이가 3mm, 6mm로 나타난 것으로 분석되었다. 반면 자동초음파탐상시험은 CH1(일반결함부용 수직탐촉자)에서 Φ4.5는 7mm로 검출되었

으며 $\phi 6.5$ (2개소), $\phi 12$, $\phi 15$ 는 각각 결합길이 8, 5, 12, 11mm로써 초음파탐상시험에서 검출된 $\phi 12$, $\phi 15$ 에 대해서 본다면 자동초음파탐상시험은 결합길이의 정확성을 보임을 알 수 있다.

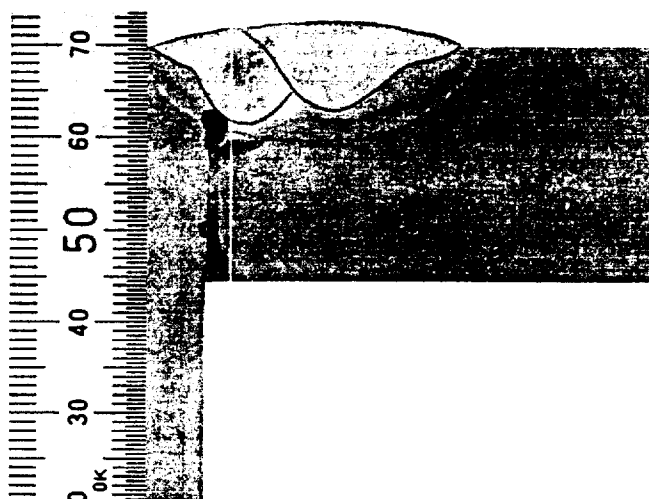
용접블로우홀은 초음파탐상시험에서는 미세한 블로우홀의 존재로 인한 평가대상 에코우 20%이상이 확보되지 않았고, 자동초음파탐상시험은 6개소의 결합검출로 미세한 용접블로우홀에 대해서 검출력이 우수함을 알 수 있다.

용입부족(용입깊이)에 대해서는 자동초음파탐상시험에서 나타나는 최대, 최소값의 용입 깊이부를 절단하여 그림 4.4.1의 (a) 및 (b)와 같이 단면마크로 사진을 통하여 용입깊이를 확인한 결과 각각 11.0mm와 7.3mm로 확인되어 용입기준선의 마킹라인의 오차를 고려하여도 자동초음파탐상시험 결과가 초음파탐상시험보다 용입깊이 검출의 우수함이 입증되었다.

그림 4.4.2는 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 용입깊이 그래프, 표 4.4.2는 자동초음파탐상시험결과 최대, 최소의 용입깊이를 나타낸다.



(a) 최대 용입깊이부의 단면마크로



(b) 최소 용입깊이부의 단면마크로

그림 4.4.1 자동초음파탐상시험 결과 최대, 최소의 용입깊이부 단면마크로

표 4.4.2 자동초음파탐상시험 결과 최대, 최소 용입깊이 비교

구 분	최대	최소
자동초음파탐상시험	12.5mm	7.0mm
초음파탐상시험	8.2mm	7.7mm
단면 마크로	11.0mm	7.3mm

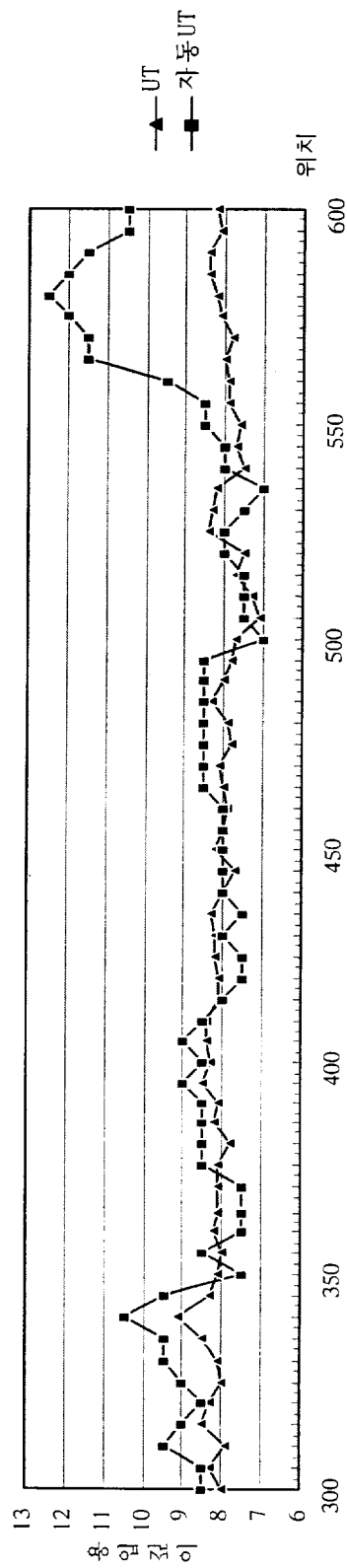


그림 4.4.2 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 용입깊이 그래프

5. 결 론

초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험의 기본이론을 정리하고 트러스 구조의 모서리 용접이음부와 동일조건으로 제작한 시험편에 초음파탐상시험과 자동초음파탐상시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파탐상시험은 정밀탐상을 통하여 용접내부의 독립 결함검출에는 다소 양호함을 보인 반면 미세 결함에는 자동초음파탐상시험의 검출력이 우수함을 보였다.
- 2) 용입깊이 측정은 초음파탐상시험에 비해 자동초음파탐상시험이 보다 정확하게 용입깊이를 확인할 수 있었다.
- 3) 강교량의 트러스 구조 모서리용접 이음부의 블로우홀, 용입부족등의 결함검출과 유지관리를 위한 객관성 및 재현성 측면에서는 자동초음파탐상시험의 적용이 바람직하다고 사료된다.
- 4) 자동초음파탐상시험의 단점을 보완 할수 있는 기술개발이 이어진다면 용접의 건전성을 확보하고 용접품질을 보증할 수 있는 강교량 제작에 많은 도움이 될 것으로 여겨진다.

참고문헌

- 1) 竹名興英, 下川興資, 深澤, 誠, 三木千壽 : トラス箱斷面部材の曲げ疲労試験, 構造工學論文集, Vol.32A, 1986.
- 2) 임성우, 고상기, 하동우, 오상훈, 장인화 : A Study on the Materials Characteristics of High Tensile Strength Steel(SM570) Plates, 韓國鋼構造學會論文集, 第12卷 6号, 2000.
- 3) 西村俊夫, 田島二郎, 奥川淳志, 三木千壽 : レ形溶接縦方向継手を有する鋼部材の疲れ強さ, 土木學會論文報告集, 第291号, 1979.
- 4) 三木千壽, 경갑수 : 橋梁의 Total Life Design과 維持管理, 韓國鋼構造學會, 第8卷 2号, 1996.
- 5) 三原 : 超音波自動探傷研究委員會活動報告(2), NDI資料No.21545, 1996.
- 6) 増田 : 超音波自動探傷研究委員會活動報告(1), NDI資料No.21530, 1996.
- 7) 韓國鋼構造學會 : 鋼構造의 技術, 1999.
- 8) 大韓鎔接學會 : 鎔接·接合用語辭典, 2001.
- 9) 韓國鋼構造學會 : 鋼構造物의 施工 및 維持管理, 鋼構造便覽, 第6卷, 1995.
- 10) 김형열 : 鋼構造物의 非破壞檢査法 紹介, 韓國構造物診斷學會, 第3卷, 第3号, 1999.
- 11) 최정익, 정규환 : 鎔接이음부의 缺陷 및 試驗方法, 韓國鋼構造學會, 第7卷 第3号, 1995.
- 12) 이충헌, 김경애 : 超音波探傷檢査, 非破壞檢査의 基礎編, 世進社, 第2卷, 1996.

- 13) 최인구, 경갑수 : 自動超音波探傷検査(AUT) 適用에 대하여, 韓國構造物診斷學會, 第3巻, 第3号, 1999.
- 14) AWS D1.1-96 : Structural Welding Code - Steel, Set4, PartF Ultrasonic Testing of Groove Welds.
- 15) 小野數彦, 松本泰一 : 超音波 探傷における自動きず種別技術の開発, 日本溶接技術, 1997.
- 16) 岩崎, 小野, 松本, 西永 : 缺陷種類判別へのニューラルネットワークの適用, 非破壊検査協會, 平成7年度春期大會講演概要集, 1995.
- 17) 岩崎, 小野, 小園, 松本, 西永 : 超音波探傷ロボットの開発と建設機械部品への適用, 非破壊検査協會, 平成7年度春期大會講演概要集, 1995.
- 18) 小野, 岩崎, 西永 : UT溶接缺陷種類自動判別システムの開発, 溶接技術, VOL.42, No.10, 1994.
- 19) 阪本謙二, 鳥海隆一 : 疲勞を考慮したトラス部材の製作と検査, 本四技報, No.35, 1985.

감사의 글

강구조분야에 뜻이 있어 입문을 한지가 바로 엿그제 같은데 벌써 감사의 글을 적게 되는 시간이 다가 왔습니다. 한편 부족한 마음과 아쉬움이 교차하는 지금 지난 2년동안 있었던 많은 일들이 스쳐지나 갑니다.

지금 이 있기까지 도움을 주신 많은 분들에게 미력 하나마 이 글을 통해 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 바쁜 일정속에서도 아낌없는 가르침을 주신 이동욱 지도교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 아울러 저의 미흡한 논문을 심사하여 주시고 지도해 주신 국승규교수님과 이환우교수님 그리고 토목공학과와 건설공학과 여러 교수님들께 머리숙여 감사의 마음을 전합니다.

또한 주위에서 도움을 준 강구조연구실 가족들, 동기 김태진씨, 김대성, 하창민, 최성민, 김동현, 박휘종군에게 고마움을 전합니다. 바쁜 직장생활속에서 아낌없는 배려를 해주신 이상권 과장님과 본 논문에 도움을 준 황순만, 김병수, 정기표씨에게도 감사드립니다.

끝으로 오늘의 조그마한 결실이 있도록 키워주신 어머님께 감사드리며, 남편의 늦은 귀가와 가사의 힘든 생활속에서도 내조를 아끼지 않았던 아내 하혜경에게 미안함과 함께 더 없이 고마움을 전합니다. 또한 예쁜 딸 유진, 시현이와 함께 결실의 기쁨을 나누고자 합니다.

2001. 12

부 경 훈