

# 위상배열초음파탐상검사에 의한 보일러관 용접부의 결함 판별

조국형\*, 유호선\*\*†

\*한국서부발전(주), \*\*† 숭실대학교 기계공학과

## Flaw Discrimination for Welding Points in Boiler Tubes by Phased Array Ultrasonic Testing

Kuk-Hyung Cho\*, Ho-Seon Yoo\*\*†

\*Korea Western Power Corp., Taean 32140, Korea

\*\*† Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 063978, Korea

**ABSTRACT** : Nuclear safety law's amendment caused many problems to use radiography testing(RT). Phased array ultrasonic testing(PAUT) was adapted instead of RT for NDE of welding points in boiler tubes these days. Unfortunately, PAUT doesn't give us the discrimination characteristics about flaws distinction and flaws size clearly. In this thesis, the distinction characteristics of flaw types and the detection characteristics of flaw size using PAUT of welding points in boiler tubes were analyzed. It was concluded that PAUT can distinguish between planar flaws and rounded flaws, but it is hard to tell apart the types of flaw respectively. We paid attention to the discrimination of flaws size because PAUT tends to underestimate the flaw size of porosity and underestimate or overestimate the flaw size of porosity.

**초 록** : 방사선 관련 법의 개정으로 보일러관 비파괴검사 방법으로 방사선투과검사를 대체하여 위상배열초음파탐상검사를 시행하고 있다. ASME BPVC 제5장 4절에서 제시하고 있는 주요 결함별 정성적 특징과 실제 결함을 비교하여 결함종류 판별을 확인하였고 시험편에 대해 방사선투과검사와 위상배열초음파탐상검사를 시행하여 결함크기 해상 특성을 예측하였다. 위상배열초음파탐상검사는 면상결함군과 구상결함군 결함의 판별은 할 수 있으나 형태가 유사한 결함의 판별은 용이하지 않음을 확인하였다. 또한 결함크기가 합적 여부를 좌우하는 슬래그의 경우 결함의 위치나 방향에 무관하게 방사선투과검사 대비 과소 예측하였으며, 기공은 결함의 위치, 방향 및 군집 유무에 따라 과대 또는 과소 예측하는 정량적 특성이 나타나므로 결함크기 판별에 주의를 요함을 확인하였다.

**Key words** : Radiography Testing(방사선투과검사), Ultrasonic Testing(초음파탐상검사), Phased Array Ultrasonic Testing(위상배열초음파탐상검사)

### 1. 서론

2014년 이전에는 보일러관 용접부의 신뢰성을 확인하기 위한 비파괴검사 방법으로 방사선투과검사(radiography testing, RT)가 전적으로 사용

되었다. 그러나 2014년을 전후 방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙의 개정(1)으로 방사성동위원소의 허용 기준이 50 Ci에서 20 Ci로 제한됨으로 인해 방사선투과검사의 보일러관 용접부 비파괴검사가 제한되어 방사선투과검사를 대체할 비파괴검사 방법이 필요하게 되었다. 또한 발전소의 중요설비인 보일러는 수 만개소의 용접부로 구성되며 이들 중 하나가 손상되더라도 발

† Corresponding Author, hsyoo@ssu.ac.kr

전소를 정지해야하기 때문에 발전소의 안정적인 운영을 위해서는 보일러관 용접부의 품질확보가 필수적으로 요구되고 있다.

석탄화력발전소 효율 향상을 위해 주증기의 온도와 압력이 상승함에 따라 보일러관의 직경이 작아지고 튜브 두께는 두꺼워지는 추세 때문에 용접 개소별 방사선투과검사 횟수가 증가하게 되었고 비파괴검사 비용, 검사 수행에 필요한 시간 및 검사자의 방사선 과다폭 위험이 증가하게 되었다. 위에서 살펴본 방사선투과검사의 문제점을 해결하기 위해 위상배열초음파탐상검사(phased array ultrasonic testing, PAUT)를 시행하고 있으나 결함종류 판별과 결함크기 해상에 대한 정보가 명확하게 제시되지 못하고 있는 것이 현실이다.

이에 본 연구에서는 보일러관 용접부에 대해 위상배열초음파탐상검사의 결함종류 판별과 결함크기 해상 특성을 연구하여 보일러관 용접부 결함에 대한 보다 정확한 비파괴검사를 시행하는데 그 목적을 두고자 한다.

## 2. 위상배열초음파탐상검사

위상배열초음파탐상검사는 기존의 초음파탐상검사와는 달리 여러 개의 압전소자로 배열된 센서를 만들어 전기적으로 펄스의 지연시간을 조절함으로써 초음파의 전파방향과 초점거리를 자유롭게 조절하는 기능을 이용한 기술이다.

일반적으로 사용되는 위상배열초음파탐상검사 탐촉자는 소자의 배열에 따라 선형, 평면, 원형 등 여러 가지 형태가 있다. 위상배열초음파탐상검사는 0°, 45°, 60°, 75° 각도의 탐촉자만을 사용하여 결함을 탐상하는 초음파탐상검사와 달리 탐촉자 내에 16개에서 최대 128개 까지 소자의 사용이 가능하고 각 소자에서 발생시킬 수 있는 펄스가 각각 분리될 수 있어 초음파의 진행방향을 자유로이 바꿀 수 있다. 또한 시험체 내부의 특정 위

치에 초음파 빔을 집중하여 실시간 검사가 가능하고 동적으로 다른 깊이에 초점을 맞출 수 있다.

파동의 위상변화는 실제로 이들 발신신호의 시간을 조절함으로써 합성된 파동을 원하는 방향으로 전파할 수 있게 된다. 탐촉자에서 발생된 초음파는 동적인 집속과 시간지연에 의해 진행방향과 집속위치를 자유롭게 조절할 수 있어 탐상을 원하는 부분에 초음파를 집속시킴으로써 보다 더 정확하게 결함을 검출할 수 있다. 시간지연의 차이를 이용하여 원하는 위치에 빔을 집속할 수 있으며, 지연시간차를 크게 하면 입사각이 커지게 되고 지연시간차가 적으면 입사각이 작아지게 하여 빔 각의 변화를 줄 수 있다.

여러 개의 엘리먼트 중에 가운데 엘리먼트를 기준으로 바깥쪽 엘리먼트를 먼저 진동시키고 가운데 위치한 엘리먼트를 나중에 진동하도록 지연시키면 빔은 가운데로 집속된다. 기존의 초음파탐상검사와 달리 탐촉자를 움직이지 않고 전자적인 주사로서 원하는 방향과 원하는 위치에 초음파를 보낼 수 있다.

전통적인 초음파탐상검사는 초음파 신호의 시간과 진폭과의 관계만 보여주지만 위상배열초음파탐상검사는 검출된 결함을 3차원적으로 나타낼 수 있다. Fig. 1은 위상배열초음파탐상검사에 의해 나타낼 수 있는 영상의 종류로서 진폭스캔(A-scan) 영상은 전통적인 초음파탐상검사와 동일하게 단순한 초음파 시그널의 시간과 진폭과의 관계를 보여주는 영상으로 수신된 반사파를 가공하지 않고 그대로 화면에 보여주는 방법이다. 표시되는 파형은 가로축에 신호의 세기를 세로축에는 진행거리에 따라 표시한 것이다.

평면스캔(C-scan) 영상은 시험체의 평면 뷰로써 나타나는 위쪽에서 전체를 보여주는 방법으로 결함의 크기 정보를 알아낼 수 있다. 방위각스캔(S-scan) 영상은 위상배열초음파탐상검사에서만 할 수 있는 주사법으로 여러 가지 각도로 초음파를 주사하는데 시간지연을 달리하여 부채꼴 모양의 영상을 얻을 수 있다.

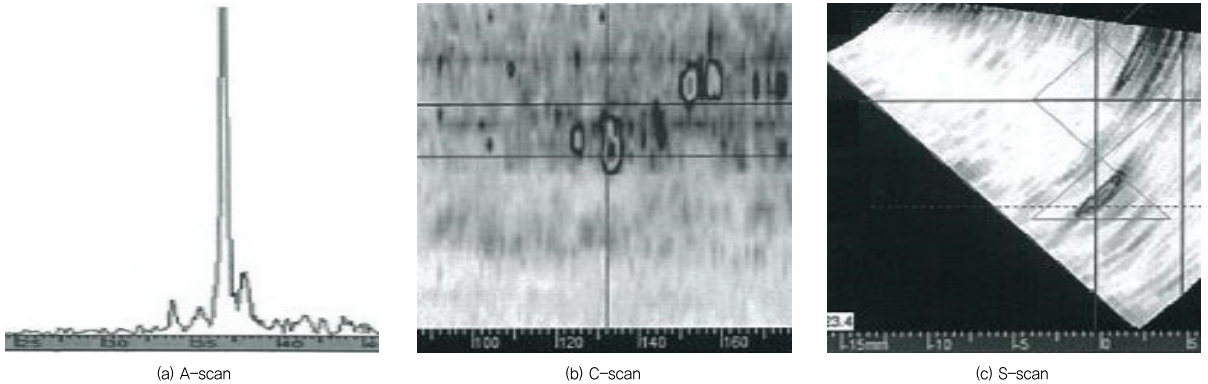


Fig. 1 Scan images of PAUT

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 PAUT에 의한 결함종류 판별

ASME BPVC 제5장 4절(3)에서는 위상배열초음파탐상검사에 의한 결함의 특징이 제일 잘 나타나는 방위각스캔 영상과 초음파 신호에 의한 진폭스캔 영상을 제시해 주고 있다. 융합불량은 방위각스캔 영상에서 일반적으로 같은 위치로부터 여러 각도에서 결함이 검출되며, 진폭스캔 영상에서는 빠른 상승과 평면 결함을 나타내는 짧은 펄스의 하강시간을 나타내는 신호가 발생하는 것이 특징이다.

실제 탐상된 결과에 비춰볼 때 결함의 발생 위치가 주로 용접 하단부 중앙부근에 나타나고 용접 개선면과 평행한 형태로 형상이 나타나는 것은 또 다른 특징이라 할 수 있다. 용입부족은 방위각스캔 영상과 실제 결함의 영상을 비교했을 때 결함의 위치나 모양이 매우 유사함을 확인할 수 있었으며, 진폭스캔 영상에서 빠른 상승과 평면 결함을 나타내는 짧은 펄스의 하강시간을 나타내는 초음파 신호를 확인할 수 있었다. 그러나 융합불량과 용입부족의 방위각스캔 영상과 진폭스캔 영상에서 나타나는 초음파 신호의 특징이 매우 유사하여 정확하게 어떤 결함인지 판별하는 것은 용이하지 않았다. 방사선투과검사와 같이 해당 결

함의 명확한 특징이 구분되어지지 않아 형태가 유사한 결함의 경우 유사한 특성이 나타나기 때문에 검사자의 경험이나 능력에 따라 결함의 종류가 달라질 수 있는 여지가 있으므로 결함 판별 시 유의해야 한다.

균열의 경우 용입부족 및 융합불량과는 상이하게 방위각스캔 영상과 진폭스캔 영상에서 전형적으로 다중 면과 모서리 형태의 영상과 초음파의 신호가 나타났다. 결함의 위치는 주로 용접부 상단부와 하단부 및 모재부 경계면상에 발생하며 여러 개의 빗금이 순차적으로 겹친 형태로 형상이 나타났으며 진폭스캔 영상의 경우 초음파의 신호가 다수 나타나는 특징을 확인할 수 있다.

따라서 용입부족 및 융합불량의 영상과 균열의 위상배열초음파탐상검사 영상을 비교했을 때 용입부족 및 융합불량과는 확연히 다른 방위각스캔 영상과 진폭스캔 영상을 확인할 수 있으므로 면상결함군 중 용입부족과 융합불량의 판별은 용이하지 않으나 균열의 판별은 용이함을 알 수 있다.

기공과 슬래그는 결함의 크기가 합격 여부를 좌우하는 중요한 요소이다. ASME BPVC 제5장 4절(3)에서 제시하고 있는 방위각스캔 영상과 실제 결함을 탐상한 영상을 비교해 보면 결함의 위치나 형태가 매우 유사하다. 결함이 발견되는 위치는 용접부 개선면이나 하단부 외에 용접부 내부에 발생하나 특별한 방향성 없이 나타난다는

것을 확인할 수 있었다. 진폭스캔 영상에서는 신호의 크기가 용합불량, 용입부족 및 균열과 같은 면상결함군과 달리 작게 나타나는 것이 특징이다.

슬래그의 초음파 신호 특징은 기공과 유사하게 진폭스캔 영상에서 신호의 완만한 상승과 면상결함이 아닌 결함에서 나타나는 긴 펄스 지속의 하강시간을 보여준다는 것이다. 전형적으로 면상결함보다 더 낮은 진폭의 신호가 발생하며 기공에서 나타나는 신호와 구별하기 어려울 수 있다. 위와 같이 슬래그와 기공과 같은 구상결함의 경우 위상배열초음파탐상검사에 의한 방위각스캔 영상과 진폭스캔 영상이 거의 유사하기 때문에 결함종류 판별에 주의를 요한다.

### 3.2 PAUT에 의한 결함크기 해상

슬래그, 기공과 같은 구상결함군은 전통적인 초음파검사에 의해서는 정확한 결함의 크기나 위치를 확인하기가 곤란하여 보일러관 용접부 비파괴 검사 방법으로 사용하지 않는다. 초음파의 산란과 굴절로 인해 감도가 떨어져 정확한 결함의 크기를 예측하기 곤란하기 때문이다. 이러한 전통적인 초음파검사의 단점을 보완하여 개발된 비파괴 검사 방법이 위상배열초음파탐상검사이나 구상결함군에 대한 초음파의 특성상 방사선투과검사와 같이 정확하게 결함의 크기를 검출해 내지 못하는 것이 현실이다.

결함의 크기에 따라 합격, 불합격 판정에 큰 영향을 미치는 슬래그, 기공과 같은 구상결함군의 결함크기에 대한 해상 특성을 알아보고자 방사선투과검사와 위상배열초음파탐상검사를 시행하고 검출된 결함의 크기를 비교하였다. Fig. 2는 슬래그의 결함크기를 측정하기 위해 사용된 시험편으로써 S-1 시험편은 SA-213Gr.T2 재질의 대류전열면 관으로써 직경은 38.1 mm이고 두께는 5.8 mm이다. S-2 시험편도 대류전열면 관으로써 재질은 S-1 시험편과 동일하며 직경은 52.4 mm이고 두께는 12.2 mm이다. S-3 시험편은 Super304H 재질로 직경은 45.0 mm이고 두께는

6.7 mm인 과열기 관이다. S-4 시험편은 S-3 시험편과 동일한 부위의 관으로써 직경은 50.8 mm이고 두께는 7.6 mm이다. S-5 시험편은 SA-209Gr.T1a 재질의 재열기 관으로써 직경은 63.5 mm이고 두께는 4.0 mm이다. S-6 시험편은 SA-213Gr.T22 재질로 직경은 63.5 mm이고 두께는 4.3 mm이다. 6개의 시험편에는 결함의 위치와 크기가 각기 다른 슬래그 결함이 있으며, 위상배열초음파탐상검사에 의한 결함의 크기를 예측하기 위해 방사선투과검사 필름상의 결함 크기와 위상배열초음파탐상검사의 평면주사 영상에 나타나는 결함크기를 비교하였다. Fig. 3은 보일러관 용접부에 발생한 슬래그 6개의 시험편에 대한 방사선투과검사와 위상배열초음파탐상검사 결과에 대한 결함의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. S-1 시험편의 경우 방사선투과검사에서는 결함크기가 8 mm로 판정되었으나 위상배열초음파탐상검사에서는 6 mm로 실제 결함 크기보다 과소하게 검출되었다. S-2, 3, 4, 5, 6 시험편의 경우도 S-1 시험편과 동일하게 위상배열초음파탐상검사결과가 방사선투과검사결과보다 결함의 크기를 과소하게 예측되었다.

본 시험결과 6개 시험편 모두 위상배열초음파탐상검사에 의해 검출된 결함의 크기가 방사선투과검사에 의해 검출된 결함의 크기보다 과소하게 예측되어 보일러관 용접부에서 위상배열초음파탐상검사에 의해 슬래그 결함으로 판정된 결함의 경우 결함의 크기가 결함의 위치나 방향과 무관하게 과소 예측됨을 확인할 수 있다. 이는 위상배열초음파탐상검사의 결함 검출에 사용되는 초음파의 근본적인 특성으로 매질을 진행하면서 감쇄하고 결함과 같은 반사체를 만났을 경우 일부의 초음파가 투과 또는 굴절, 반사되어 초음파의 감도가 떨어지기 때문으로 풀이된다. 방사선투과검사에서는 불합격 되는 결함이 위상배열초음파탐상검사에 의해서는 합격 결함으로 판정될 수 있는 가능성이 발생할 수 있으므로 위상배열초음파탐상검사의 결함크기 판정시 유의하여야 한다.

기공에 대한 위상배열초음파탐상검사의 결함크

위상배열초음파탐상검사에 의한 보일러관 용접부의 결함 판별

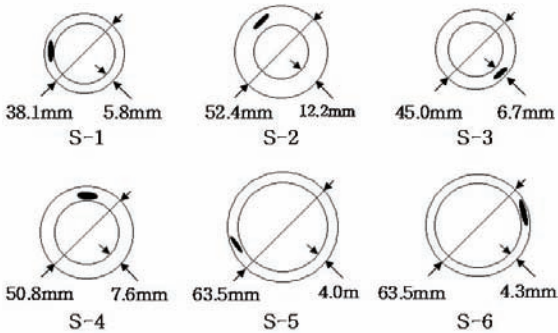


Fig. 2 Specification of test pieces with slag

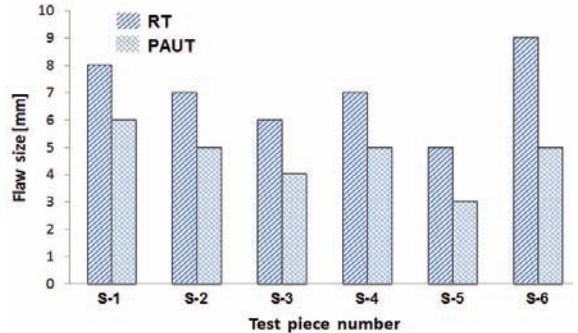


Fig. 3 Test results of slag by RT and PAUT

기 해상 특성을 알아보기 위해 슬래그와 마찬가지로 6개의 시험편에 대해 동일한 방법을 적용하였다. Fig. 4는 기공의 결함크기를 측정하기 위해 사용된 시험편으로써 P-7 시험편은 SA-209Gr.T1a 재질의 절탄기 관으로써 직경은 57.0 mm이고 두께는 7.7 mm이다. P-8 시험편은 Super304H 재질의 과열기 관으로써 직경은 50.8 mm이고 두께는 8.5 mm이다. P-9 시험편도 P-8 시험편과 동일 재질의 관으로써 직경은 45.0 mm이고 두께는 5.9 mm이다. P-10 시험편의 직경은 45.0 mm이고 두께는 8.8 mm인 과열기 관이다. P-11 시험편은 재열기 관으로써 재질은 SA-209Gr.T1a이며 직경은 63.5 mm이고 두께는 4.3 mm이다. P-12 시험편은 SA-213Gr.T22 재질로 직경은 57.0 mm이고 두께는 4.0 mm인 재열기 관이다. 각 시험편에는 결함의 위치, 방향 및 크기가 다른 기공 결함이 있으며, 결함의 크기를 예측하기 위해 방사선투과검사에 의한 결함크기와 위상배열초음파탐상검사의 평면스캔 영상에 나타나는 결함크기를 비교하였다.

Fig. 5는 보일러관 용접부에 발생한 슬래그 6개의 시험편에 대한 방사선투과검사와 위상배열초음파탐상검사 결과에 대한 결함의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. P-7 시험편의 경우 방사선투과검사 결과 6 mm로 판정된 결함크기가 위상배열초음파탐상검사에서는 4 mm로 과소하게 판정되었다. P-10, 12 시험편의 경우도 P-7 시험편과 동일하게 위상배열초음파탐상검사에 의한 결

함크기가 방사선투과검사 보다 과소하게 판정되었다. 그러나 P-8, 9, 11 시험편의 경우 방사선투과검사 결과 4 mm, 3 mm, 3 mm인 결함크기가 위상배열초음파탐상검사에서는 6 mm, 5 mm, 5 mm로 판별되어 P-7, 10, 12 시험편의 결과와는 다르게 결함크기가 과대하게 예측되었다. 총 6개의 시험편에 대한 비파괴검사 결과 3개의 시험편에 대해서는 위상배열초음파탐상검사가 방사선투과검사보다 결함크기가 과소하게 예측되었고 3개의 시험편에 대해서는 과대하게 예측되었다. 따라서 위상배열초음파탐상검사에 의해 기공으로 판별된 경우 결함크기에 따른 합격, 불합격 판정에 유의하여야 한다.

기공의 위상배열초음파탐상검사에 의한 결함크기 해상도가 과대 또는 과소하게 예측되는 이유는 결함의 위치, 형태 및 군집 유무에 따라 간섭에 따른 초음파의 감쇠 현상이 다르게 나타나기 때문

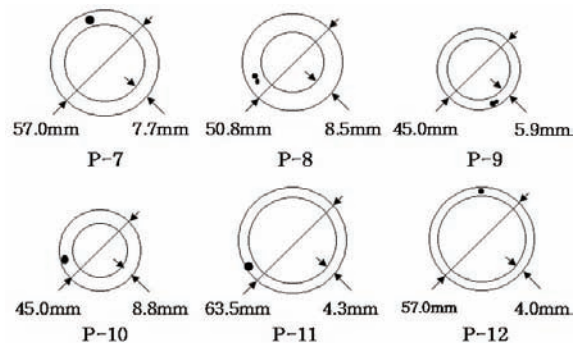


Fig. 4 Specification of test pieces with porosity

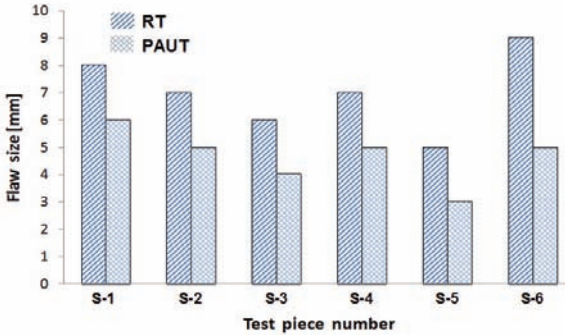


Fig. 5 Test results of porosity by RT and PAUT

인 것으로 풀이된다. 초음파가 작은 공동(큰 모양의 기공) 모양의 방해물이 있으면 초음파는 공동의 끝에서 굽어지면서 휘어져 진행하게 되는데 이를 회절이라 하며, 이는 초음파 에너지가 분산되는 것과 같은 현상으로 감쇠의 원인이 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 보일러관 용접부에 대한 위상배열초음파탐상검사의 신뢰성을 확인하기 위해 보일러관 용접부 주요 결함을 대상으로 ASME BPVC 제5장 4절에서 제시하고 있는 정성적 특징과 실제 탐상결과를 비교하여 위상배열초음파탐상검사에 의한 결함종류 판별을 확인하였다. 또한 방사선투과검사와 위상배열초음파탐상검사를 시행하여 결함크기 해상에 대한 정량적 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 위상배열초음파탐상검사는 용입부족, 용합불

량 및 균열과 같은 면상결함군과 슬래그 및 기공과 같은 구상결함군의 판별은 가능하나 형상이 유사한 결함의 종류를 판별하는 것은 용이하지 않다.

(2) 위상배열초음파탐상검사에 의한 슬래그 결함 크기는 방사선투과검사에 의한 결함크기보다 결함의 위치나 방향에 무관하게 과소 예측하며, 기공의 결함크기는 결함의 위치, 방향 및 형태에 따라 과대 또는 과소 예측되는 특성을 보이므로 결함크기 판별에 주의를 요한다.

#### 참고문헌

- (1) Nuclear Safety and Security Commission, 2013, 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙 Nuclear Safety and Security Commission
- (2) The American Society of Mechanical Engineers, ASME BPVC-VIII, 2015, The American Society of Mechanical Engineerspp. 393, pp. 427.
- (3) The American Society of Mechanical Engineers, ASME BPVC-V, 2015, The American Society of Mechanical Engineerspp. 76.
- (4) Sungryoung Yang, 2015, PAUT and UT, Sang Hackdang, Seoul, pp. 31 ~ 35.
- (5) Heungsil Bang, 2015, Welding and Non destructive Evaluation Technology, Korea Learning Institute, Taeon 