

## Tangential Radiography를 이용한 배관의 두께 평가법

이성식, 김영환  
대한검사기술(주) 부설연구소

### Thickness Measurement of Pipe Using Tangential Radiography

S. S. Lee and Young H. Kim

R & D Center, Korea Inspection & Engineering Co., Ltd., Seoul 137-060

**요 약** 이미 오래전부터 국내외에서 석유화학공장 등의 보온 배관에서 보온재를 벗기지 않고 배관의 부식 손상 및 잔존두께를 평가하는데 방사선투과시험법을 적용해 오고 있다. 그러나 배관 용접부의 결함 탐상에 관한 방사선투과법에 대한 국제 및 국내 코드는 이미 마련되어 있지만 배관의 두께와 내부에 존재하는 부착물(deposit) 등의 두께를 측정하는 것에 관련한 국제 및 국내 코드는 미비되어 시험 절차 및 시험 결과에 대한 시비가 근본적으로 존재할 수 밖에 없을 뿐만 아니라 표준화된 시험 기술의 미비로 현장에서 많은 시행착오를 동반하였다. 그러나 최근 이 시험법에 대한 관련 원안(protocol)을 확정하기 위해 각국에서 개별적으로 수행되었던 기존의 연구 결과들이 취합되고 있으며 부족한 부분들에 대한 연구가 국제 공동 연구 형식으로 이뤄지고 있다. 따라서 본 연구에서는 tangential radiography를 적용하여 보온된 배관의 잔존 두께를 평가할 수 있는 시험 방법을 제시하고자 하였다.

#### 1. 서 론

석유화학 공장 등에서 배관 등의 설비 파손은 뜻하지 않은 대형 사고와 인명 피해를 초래하게 된다. 이러한 사고의 주요 원인이 되는 부식은 국부적인 영역에서 매우 은밀하게 진행되어 그 존재를 확인하기 어려운 경우가 대부분이다. 그러므로 미처 예측하지 못한 대형 사고를 미연에 방지하기 위해 대정비 기간을 통해 주기적으로 설비 상태를 점검하는 안전진단을 실시하고 있다. 배관의 경우는 대개 용접부위에 대한 방사선투과시험을 실시하여 동 부위에 존재하는 용접불량 혹은 결함 유무를 탐지하고

있고<sup>1)</sup> 부식 및 침식에 의한 두께 감소 여부는 대개 초음파를 이용한 초음파 두께 측정기를 적용해 검사해 오고 있다. 그러나 이 초음파 두께 측정기에 의한 시험은 대개 배관의 둘레를 따라 가면서 매우 제한된 영역에서 이뤄지므로 국부적인 배관의 손상을 탐지할 수 있는 가능성은 희박하다. 뿐만 아니라 석유화학공장 등에서 사용되는 배관의 경우 열손실을 최소화하기 위해 보온재로 싸여 있는 경우가 대부분이므로 초음파에 의한 두께 측정시에는 보온재를 국부적으로 제거해야만 된다. 이는 매우 귀찮을 뿐만 아니라 이에 따른 별도의 비용이 소요되며 나아가 배관 손상의 새로운 진원지가 되는 경우가 있다. 따라

서 현장에서는 이미 오래전부터 보온재를 제거하지 않고 보다 넓은 영역에 걸쳐 손상 여부를 확인하고 부식 등에 의한 배관의 잔존 두께를 측정할 수 있는 시험 방법에 대한 관심이 있어 왔다.

2. 이론적 배경

보온재를 제거하지 않고 부식 배관의 잔존두께를 결정하는 시험법으로 방사선투과시험을 적용해 오고 있는데 투과되는 시험체의 두께 및 재료에 따라 필름에 맺힌 상의 농도가 달라지는 것을 이용하여 두께를 측정하는 방법<sup>2)</sup>과 적절한 대비시편을 적용하여 간접적으로 배관의 두께를 측정하는 tangential radiography<sup>3)</sup>로 크게 나눌 수 있다. 이 중 tangential radiography는 주로 석유화학공장 등에서 부식 및 침식에 의한 배관의 두께 손실을 평가하기 위해 시도되고 있지만 아직 시험에 필요한 국내 및 국제 규격이 미비되어 있어 시행착오가 많이 발생하고 있는 시험법이다.

2.1. 농도차에 의한 두께측정법

3차원 물체에 대한 방사선투과시험시 시험의 결과는 2차원으로 나타나고 물체 두께에 대한 정보가 필름 농도의 변화로 투과 사진에 나타나게 되므로 두께를 달린 균일한(homogeneous) 재료에 대하여 방사선을 조사한 결과 나타나는 필름 농도의 변화는 두께 변화와 일정한 상관관계가 있다. 방사선의 강도는 시험체를 통과하면서 지수함수적으로 감소하므로 시험 재료의 선흡수계수를  $\mu$ , 방사선의 입사 강도를  $I_0$  라고 하면 투과두께  $x$ 를 지난 방사선의 강도,  $I$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>4)</sup>.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \dots\dots\dots (1)$$

이 때 투과 필름의 농도 분석으로 시험체의 두께를 평가하고자 할 경우 측정하고자 하는 부분에 동일 재질의 스텝웨지를 놓고 동시에 시험을 시행하여 촬영후 필름 농도와 웨지의 두께를 대응시키는 곡선에 의해 시험체의 두께를 평가하게 된다<sup>5)</sup>. 배관에 대한 방사선투과시험을 할 경우 방사선이 투과하게 되는 두께는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 배관의 중심부와 가장자리에서 달라진다. 따라서 시험 결과 필

름상에는 농도 변화가 나타나게 된다. 기하학적으로 방사선 빔이 배관의 내경에 접할 때 투과 두께가 최대가 되므로 필름상에서는 이 위치에서 농도가 최소가 될 것이다. 그리고 외경에 가까워질수록 투과 두께가 점차 줄어들게 되므로 농도는 증가하게 되고 빔이 외경에 접하는 곳에서 농도는 최대가 된다. 따라서 이를 고려하면 두께 변화를 분석할 수 있지만 배관의 경우엔 아직 연구가 많이 이뤄지지 않았다.

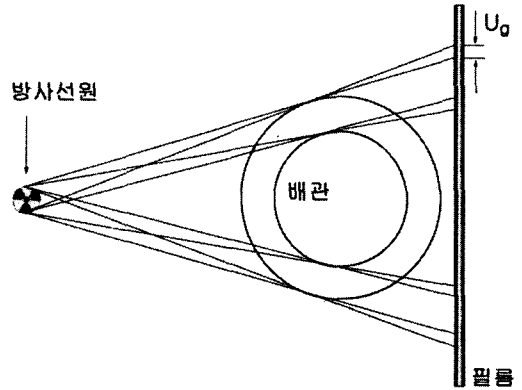


Fig. 1. Radiographic test to measure pipe thickness

2.2. Tangential Radiography

배관의 두께를 포함한 단면이 필름에 투사될 때 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 실제 크기에 비해 확대가 된다. 이 때 확대되는 크기는 대략 선원과 필름간 거리(SFD)와 배관의 외경(OD)에 따라 달라진다. 불선명도와 보온재를 고려하지 않을 경우 식 (2)에 의해 배관의 두께를 평가할 수 있다<sup>3)</sup>. 여기서  $t_w$ 는 필름에서 측정된 치수이며,  $t_a$ 는 평가 두께이다. 이 방법으로 두께 평가가 가능하기 위해서는 무엇보다 필름에서 적절한 콘트라스트가 얻어져야 되므로 적합한 노출(exposure)이 이뤄질 수 있도록 배관 외경에 따른 기준 투과 두께의 결정이 매우 중요하게 된다. 또한 가급적 불선명도(unsharpness)가 최소가 되도록 필름과 선원 사이의 거리(SFD)가 결정이 되거나 혹은 불선명도를 정량적으로 고려할 수 있도록 SFD를 선정하는 것이 필요하다.

$$t_w = t_a \frac{SFD - 0.5OD}{SFD} \dots\dots\dots (2)$$

2.2.1. 기준 투과 두께 결정

배관의 용접부에 대한 방사선투과시험에서와 달리 배관의 두께 측정을 하고자 할 경우 요구되는 노출 시간은 상당히 길어지게 된다. 적절한 노출 시간을 구하기 위해서는 우선 투과 두께가 결정이 되어야 하는데 Fig. 1에서 최대 투과 두께가 배관의 내경과 외경에 의존함을 알 수 있다. 배관의 외경 반지름을  $r_o$ , 내경 반지름을  $r_i$ 라 할 때 최대 투과 두께,  $t_{max}$ 는 식 (3)으로 구할 수 있다. 따라서 방사선투과시험에 의한 배관의 두께 측정시 적합한 노출량을 구할 수 있는 투과 두께의 크기를 대략적으로 알 수 있다.

$$t_{max} = 2\sqrt{(r_o^2 - r_i^2)} \dots\dots\dots (3)$$

2.2.2. 불선명도(unsharpness)를 고려한 SFD 결정

방사선원이 이상적인 점원(point source)이 아니라 일정한 크기를 지니고 있으므로 투과 사진에는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 반음영대(penumbra)에 의한 기하학적 불선명도( $U_g$ )가 나타나게 된다. 또한 필름 자체에 의한 불선명도( $U_f$ )가 발생하므로 전체 불선명도는 이 두께 항에 의해 결정된다. 이 때 전체 불선명도는 기하학적 불선명도와 필름 불선명도의 단순한 합이 아니고  $U_g > 2U_f$ 일 경우 전체 불선명도( $U_t$ )는 기하학적 불선명도( $U_g$ )가 되고 반대로  $U_f > 2U_g$ 이면 전체 불선명도( $U_t$ )는 필름 불선명도( $U_f$ )가 된다<sup>6)</sup>. 따라서 필름 불선명도는 방사선원에 의존적인 일정한 값을 지니므로 기하학적 불선명도를 줄이는 것이 전체 불선명도를 줄이는 결과를 가져오므로  $U_f > 2U_g$  조건에서 전체 불선명도는 단지 필름 불선명도( $U_f$ )가 되어 최소가 된다. 이제 각각에 대해 고려해 보면 먼저, 보온재로 둘러 싸여진 배관에 대한 방사선투과시험에서 필름에 투영된 두께 치수의 기하학적 불선명도는 식 (4)에 의해 결정이 된다.

$$U_g = \frac{s(0.5 OD + d)}{SFD - (0.5 OD + d)} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $d$ 는 보온재의 두께, OD는 배관의 외경 그리고  $s$ 는 방사선원의 촛점 크기다. 따라서 주어진 보온재의 두께와 배관의 외경에서 SFD가 클수록 기하학적 불선명도는 작아지는데  $U_f > 2U_g$  조건이 되는 SFD를 구해보면 식 (5)와 같다.

$$SFD > (0.5 OD + d)(1 + \frac{2s}{U_f}) \dots\dots\dots (5)$$

여기서 촛점 크기가 3.2mm인 Ir192를 방사선원으로 사용할 경우를 고려해 보면 SFD가 최소한 배관 외경의 20배 이상이 되어야 전체 불선명도가 필름 불선명도에 접근하게 된다. 따라서 실제 배관의 두께 측정 시험에서 불선명도를 최소화하기 위해 SFD를 무한하게, 혹은 배관 외경의 20배 이상으로 두면 좋겠지만 현장 여건과 경제성 등의 요인에 의해 이는 거의 불가능하다고 할 수 있다.

다른 한편,  $U_g = U_f$ 일 때  $U_t = 1.3U_f$ 이므로 X-선과 감마선을 사용시 사용 전압 혹은 동위원소에 따른 필름 불선명도는 Table 1에서와 같이 알 수 있으므로<sup>6)</sup> 불선명도를 일정하게 유지할 수 있는 조건을 얻을 수가 있다. 이 경우의 필름 촛점간 거리(SFD)를 구해보면 식 (6)과 같다.

$$SFD = (0.5 OD + d)(1 + \frac{s}{U_f}) \dots\dots\dots (6)$$

이 조건에서 시험한 결과 필름에 투영된 배관 두께의 수치엔  $U_t = 1.3U_f$ 만큼의 반음영대가 있으므로 측정된 값에서 이 값을 고려하면 보다 정확한 두께 평가가 가능하게 된다. 촛점의 크기가 3.2mm인 Ir192 선원을 사용하여 보온재가 없는 경우 배관의 외경에 따른 SFD와 보온재의 두께가 50mm일 때 불선명도를 일정하게 고려할 수 있는 외경에 따른 SFD를 계산하면 Table 2와 같다. 배관을 보온재로싼 경우 위의 조건을 만족하기 위한 SFD가 상당히 커지고 이에 따른 노출 시간 역시 길어지게 되므로 시험 여건이 이와 같은 거리의 SFD를 두는데 제한을 하는 경우가 있다. 따라서 이런 측면에선 가능한 SFD를 단축시키는 것이 바람직하므로 불선명도를  $U_g$ 로 일정하게 유지하는 것도 고려할 수 있다. 이렇게 되기 위해서는  $U_g > 2U_f$  이어야 한다. 이 경우 SFD의 최대값을 Table 2의 괄호 안에 나타내었다.

Table 1. Film unsharpness vs. radiation

radiation	100 kV X-rays	200 kV X-ray	400 kV X-ray	2MV X-ray	Ir <sup>192</sup>	Co <sup>60</sup>
$U_f$ (mm)	0.05	0.10	0.15	0.32	0.17	0.36

Table 2. Standard SFD for thickness measurement

배관 외경	비보온 배관에서 SFD (cm)	보온 배관에서 SFD (cm)
2inch	50.0	149.0 (78)
3inch	76.0	174.0 (91)
4inch	101.0	199.0 (104)
5inch	126.0	224.0 (118)

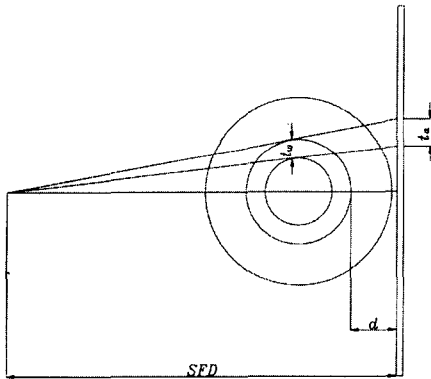


Fig. 2. Geometric condition to evaluate thickness of insulated pipe

2.2.3. 두께 평가

식 (3)의 최대투과거리를 고려한 적합한 기준 투과 두께에 대하여 노출표(exposure chart)를 이용하여 방사선투과시험한 결과 얻은 필름상에서 실제 배관의 두께를 결정할 수 있는 방법으로는 Fig. 2에서 제시한 기하학적 해석을 통해 계산이 가능한데 배관에 보온재를 입힌 경우 필름에 투영된 배관 두께에서 반음영대에 의해 더해진 수치를 고려하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_w = (t_a - U_f) \frac{SFD - 0.5OD - d}{SFD} \dots\dots\dots (7)$$

다음으로 Fig. 3에 나타난 것과 같은 적절한 대비 시편을 이용하여 배관의 두께를 평가할 수 있다<sup>7)</sup>. 무엇보다 필름상에 투영된 배관의 두께에 매우 근접한 치수가 대비 시편에 있는 경우, 식 (8)에서 나타난 바와 같이 치수 편차를 이용하여 평가할 수 있다<sup>7)</sup>.

$$D = B_a - B \quad t_w = t_a - D \dots\dots\dots (8)$$

또한, 배관의 두께 치수와 대비 시편에 존재하는 치수가 비교적 차이가 날 때는 식 (9)와 같은 비례식을 적용하는 것이 더욱 효과적이다. 여기서  $t_w$ 는 배관의 평가 두께,  $t_a$ 는 필름에 투영된 배관 두께의 치수,  $B$ 는 대비 시편에 존재하는 치수중 배관의 두께에 가장 근접하는 치수이며  $B_a$ 는  $B$ 가 필름에 투영된 치수이다.

$$t_w = (t_a - U_f) \frac{B}{B_a - U_f} \dots\dots\dots (9)$$

식 (8)과 (9)와 같이 대비 시편을 이용하여 평가할 경우 배관과 방사선원 사이에 놓여지는 대비 시편의 위치와 방향이 잘 고려 되지 않으면 측정 오차가 커지게 되므로 주의해야 하며 필름상에서 측정되는 대비 치수 및 평가하고자 하는 치수의 겹보기 치수가 정확할수록 평가가 정확하게 되므로 대비 치수의 선정과 측정이 매우 중요하다.

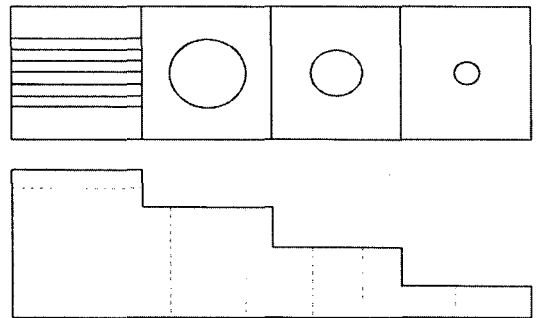


Fig. 3. Standard block

마지막으로, 대비 시편을 사용하지 않고 배관의 자체 치수를 이용하여 두께를 평가할 수 있는데 배관의 외면이 손상되지 않았을 경우에 한해 배관 실제 외경이 필름상에서 투과되어 나타나는 치수를 측정하여 비례식으로 배관의 두께를 결정할 수 있다.

이 경우 식 (9)의  $B$ 와  $B_a$ 를 배관의 외경 치수와 그것이 필름에 투영된 치수로 치환하면 된다. 그러나 실제 시험시 외경 치수가 비교 치수로 가능하기 위해서는 투과 필름상에서 나타나는 외경의 경계선이 아주 선명해야 하므로 이 경우에는 노출 조건을 잘 고려하여야 가능하다. 또한 배관이 전반적인 부식(general corrosion)에 의한 두께 감소가 아니라 공식(pitting) 등과 같은 국부적인 손상을 입었을 경우 대비 치수로 손상되지 않은 영역의 배관 두께를 적용할 수 있다. 이 경우 역시 식(9)의  $B$ 와  $B_a$ 에 배관의 두께 치수와 그것이 필름에 투영된 치수를 치환하여 계산할 수 있다. 결과적으로 배관 자체 치수의 이용은 대비 시편을 적용하는 경우에 비해 절차가 간단하고 측정 오차를 줄일 수 있는 장점이 있지만 배관이 심하게 손상되지 않은 경우에 한하며, 심한 손상을 입은 경우는 대비 시편에 의한 평가가 바람직하다 할 수 있다.

3. 실험 및 결과 분석

석유화학공장 등에서 압력 배관으로 많이 사용되는 ASTM, A-53, 공칭 외경 2inch, 스케줄 80의 인공 부식시킨 시험편과 실제 석유화학공장에서 채취한 동일 재료의 스케줄 40의 2inch 곡관에 대해 방사선 투과시험을 실시하였다. 방사선원은 초점의 크기가 3.2mm인 Ir192를, 그리고 필름은 Agfa의 D5 필름을 적용하였다. 시험시 선원과 필름간 거리(SFD)는 보온 배관의 경우 78cm, 비보온 곡관의 경우 60cm로 두었고 식 (3)의  $t_{max}$ 를 고려하여 적절한 기준투과두께를 설정하여 노출 시간을 결정하였다.

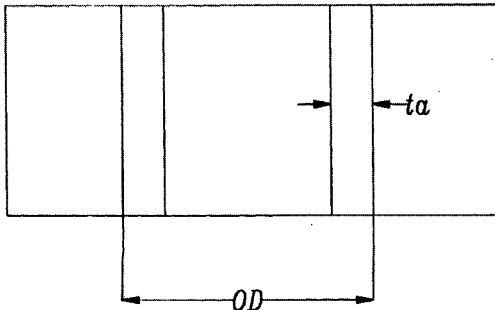


Fig. 4. Thickness evaluation using outside diameter of pipe

시험 결과 얻어진 방사선투과필름을 스캐너로 읽은 것을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5는 스케줄 80의 보온된 인공 부식 배관 시편에 대한 시험 결과이며 Fig. 6은 현장에서 채취한 스케줄 40의 곡관에 대한 시험 결과이다. Fig. 5에서 보온 배관의 부식부에서 배관의 최소 잔존 두께는 두께 대비 50% 남짓으로 추정되며 현장에서 채취한 곡관의 경우 잔존 두께가 중심 부위로 갈수록 얇아지고 있다. 실제 이 곡관의 경우 부식을 동반한 심한 침식(erosion-corrosion)으로 곡관 중심으로 갈수록 두께가 얇아지며 가장 얇은 부위에는 지름이 2mm의 구멍이 뚫려 있다.

두 시편의 두께를 평가하여 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 먼저, 보온 배관의 경우 투과 필름 상에서 건전부 두께에 대해 5회에 걸쳐 측정된 값들의 평균( $t_a$ )이 6.7mm 였는데  $U_i$ 를 고려하여 식 (7), (8), (9)를 적용하고 산술 평균한 결과 건전부의 두께( $t_w$ )가 대략 5.4mm로 평가되었다. 그리고 보온 배관의 부식부 최소 잔존 두께는 3.3mm 그리고 곡관 시편의 경우 최소 잔존 두께는 1mm로 측정되었는데 각각의 평가법을 적용한 결과 보온 배관의 경우는 대략 2.5mm로 평가되었고 곡관의 경우는 대략 0.5mm로 평가되었다.

한편, 보온 배관의 건전부의 실제 두께는 공칭 두께로 확인이 되므로 이에 의해 두 평가법의 가능성을 확인할 수 있었고 비교가 가능하였던 반면에 보온 배관 부식부와 곡관의 경우 시험편을 자를 수 있는 여건이 안되어 실제 두께와 평가 두께와의 비교 평가를 유보하였다.

Table 3. Evaluation result of remaining wall thickness

	공칭 두께 (mm)	필름 상에서 두께( $t_a$ )	평가 (식 7)	평가 (식 8)	평가 (식 9)
배관 건전부	5.5	6.7	5.7	5.1	5.4
배관 부식부		3.3	2.6	2.6	2.4
곡관 침식부		1.0	0.5	0.6	0.5

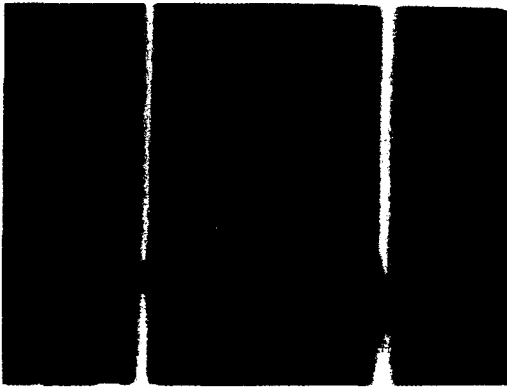


Fig. 5. Test result of insulated pipe

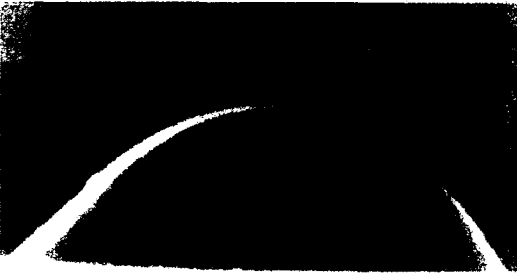


Fig. 6. Test result of elbow pipe

#### 4. 결론 및 기대 효과

배관 내부에 부식액으로 공식(pitting)과 같은 국부적인 부식 손상을 가공한 보온 배관 시편과 실제 석유화학공장에서 채취한, 사용중 가혹한 전반적 침식(general erosion-corrosion)을 당한 곡관 시편에 대해 tangential radiography를 적용하고, 투과 필름 상에서 측정된 두께에서  $U_t$ 를 고려하여 기하학적 해석과 비례식에 의한 두께 평가를 한 결과, 방사선투과검사에 의한 배관 두께 평가의 가능성을 확인할 수 있었다. 따라서 석유화학공장, 발전소 등의 보온 혹은 비보온된 배관의 부식 손상 및 잔존 두께 평가

에 tangential radiography를 적용할 경우 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- 비교적 넓은 영역에 걸쳐 두께 측정이 가능하다.
- 보온재를 제거하지 않고 두께 측정이 가능하다.
- 시험 적용시 배관의 표면 온도 등에 의한 직접적인 영향을 받지 않는다.
- 시험 결과를 육안으로 쉽게 확인할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구를 위하여 필름을 지원해 주고 협조해 주신 Agfa Korea에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- 1) KS B 0888 “배관 용접부의 비파괴검사 방법”
- 2) Christian Gondard, Christian Thiery, Eric Helies and Luc Paradis, “Analysis of Radio-graphic Films through Modelisation of the Data Acquisition Line and a ‘Simulated Annealing’ Algorithm”, 14th WCNDT, New Delhi, India
- 3) W. S. Burkle, “Application of the Tangential Radiographic Technique for Evaluating Pipe System Erosion/Corrosion,” Material Evaluation. Vol. 47, ASNT, (1989), pp. 1184-1188
- 4) Nondestructive Testing Handbook, eds. Robert C. McMaster, Vol. 1, pp. 1915-1916
- 5) 이의종, “공업용 방사선투과검사”, 골드출판사, pp. 277-278
- 6) Industrial Radiography, Agfa-Gevaert N.V. (1986), pp. 67-72
- 7) R. P. Krolicki, “Gamma-Radiography of High Temperature and Corroded Objects”, Material Evaluation. Vol. 43, ASNT, (1985), pp. 1008-1012