

Film Radiography에서 농도차를 이용한 정량적 두께 평가에 관한 연구 A Study on Quantitative Thickness Evaluation Using Film Density Variation in Film Radiography

이성식*, 이정기*, 김영환*

Sung Sik Lee*, Jeong Ki Lee* and Young H. Kim*

초 록 공업용 방사선 필름의 필름 농도가 대략 3.5 이하의 농도 구간에서 상대 노출에 대해 지수 함수적으로 증가한다고 가정하여, 필름특성곡선에 관한 일반식과 두께 변화에 대한 농도 변화 관계식을 새로이 제안하였다. 연속 X-선과 Ir¹⁹²에 의한 γ -선으로 탄소강의 계단 시편에 대해 시험한 결과, 대략 1.0~3.5의 농도 범위에서 두께 변화에 대한 농도의 상용 대수 변화가 기존의 관계식에 비해 보다 선형적인 경향을 나타내었으며 실제 계단 시편의 치수와 제안한 관계식에 의한 평가를 비교한 결과 본 연구에서 제안한 농도-두께 관계식에 의한 결과가 기존의 관계식에 의한 결과보다 정확하였다. 그리고 시험체의 두께가 증가함에 따라 beam hardening effect에 의해 유효선흡수계수가 달라지는 연속 X-선에 비해 상대적으로 에너지 스펙트럼이 단순한 γ -선이 두께 평가를 위한 더 적합한 방사선원임을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 관계식은 국부적인 부식 손상의 깊이와 분포도를 평가할 수 있으므로 압력 용기 등의 산업 설비의 건전성 평가에 활용할 수 있다.

주요용어 : 필름특성곡선, 연속 X-선, r-선, 농도-두께 관계식, 필름 그래디언트, 유효 선흡수계수, 두께 평가

Abstract Based on the assumption that film density increases exponentially with exposure in the industrial radiographic film, an equation representing the characteristic curves of industrial radiographic films and a new density-thickness relation are suggested. The accuracy and reliability of the suggested relation has been tested using radiographs of a carbon steel step wedge with known thickness variation by polychromatic X-ray and γ -ray (Ir¹⁹²). The experimental results were well agreed to the proposed relation in the range of film densities from 1.0 to 3.5 and it was more accurate than the conventional relation. It is also found that γ -ray is more effective in this purpose than polychromatic X-ray, which results in variation of effective linear absorption coefficient due to beam hardening effect as thickness increases. Therefore using the equation and experimentally determined parameters the quantitative evaluation of thickness variation is possible and it can be used to evaluate the depth of local corrosion of pressure vessels in plants.

Keywords: the characteristic curve of a radiographic film, polychromatic X-ray, γ -ray, film density-thickness relation, film gradient, effective linear absorption coefficient, thickness evaluation

1. 서 론

화학 및 석유화학 공장 등에서 사용중 설비의 파손은 대개 강한 부식성 매질에 의한 부식 손상에서 비롯된

다. 이러한 손상의 대부분은 점 부식(pitting), 틈 부식 등과 같은 국부적인 부식(local corrosion)이 사용 시간이 길어짐에 따라 전반 부식(general corrosion)으로 발전하면서 일어나는데 설비 보전과 안전을 위해

서는 이에 대한 지속적인 감시(monitoring)와 검사(inspection)가 필요하다. 따라서 대부분의 화학 및 석유화학 공장들에서는 대정비 기간을 이용한 보전검사(maintenance inspection)로 설비의 건전성을 진단하고 있는데, 이는 시공의 불량 여부를 확인하는 사용전 검사(P.S.I)와는 달리 사용중 설비에서 부식발생 여부, 부식 및 침식(erosion-corrosion)에 의한 두께 감소 측정, 재질 열화의 진단 등을 주요 목적으로 한다. 이러한 보전검사에서, 국부적인 부식 발생과 침식에 의한 두께 감소 여부를 확인하기 위한 시험으로는 초음파 두께 측정 및 C-scan 등을 많이 이용하고 있는데 초음파 두께 측정기에 의한 시험은 대부분 국부적인 영역에 한해 이뤄지므로 검사 영역 이외의 부분에서 발생한 손상을 놓칠 수 있는 가능성이 크고, 초음파 C-scan에 의한 시험은 비교적 넓은 부분을 주사하므로 국부적인 손상을 놓치지 않는으나 시험 시간이 상당히 걸리고 설비 구조에 따라 적용하기 곤란한 경우도 있다.

위에 열거된 문제점들을 극복하기 위하여 방사선투과 시험을 이용한 두께 측정 방법들이 제시되어 왔는데, 필름을 이용한 방법으로는 보온된 배관에서 보온재를 제거하지 않고 배관의 두께 측정이 가능한 tangential radiography와 투과 필름 상에서 농도차를 측정하여 두께를 평가하는 방법으로 크게 나눌 수 있다[1]. Tangential radiography는 방사선이 배관의 두께 부분을 투과해, 필름 상에 두께의 상(image)이 맺어지게 하여 배관의 실제 두께를 직접 평가하는 방법으로 이에 관련해서는 Lee[1,2], Burkle[3], Krolicki[4]가 보고한 바가 있다. 이 시험법은 배관의 실제 두께를 직접 측정할 수 있다는 점에서는 매우 효과적이거나 손상된 부위를 접하게(tangentially) 방사선 빔이 투과하지 않으면 두께를 측정할 수 없고 배관 설비 외에는 적용할 수 없는 것이 단점이다.

농도차를 이용한 두께 평가법은 3차원 물체의 두께에 관한 정보가 투과 필름 상에서 농도 변화로 나타나게 되는 것에 기초하고 있다. 즉, 투과 방사선의 세기(intensity)가 투과 거리에 따라 지수 함수적으로 감소하므로 투과 필름 상의 농도는 방사선 빔이 투과한 두께와 일정한 연관성을 갖게 된다. 그런데 지금까지 제시된 방법은, 공업용 필름의 특성 곡선(characteristic curve)의 일정 농도 범위에서 평균 film gradient를 고려하여 전개된 농도-두께 관계식이므로 매우 작은 농도 범위에서는 농도에 대한 두께 관계가 아주 잘 일치하지만 농도 범위가 증가함에 따라 정확성

이 크게 떨어지게 된다[5]. 이는 필름특성 곡선에서 평균 gradient를 적용하는 농도 범위가 증가하게 되면 평균 film gradient와 각 농도에 해당하는 실제 film gradient와의 편차가 증가하여 정확성이 떨어지기 때문이다. 따라서 지금까지 연구된 결과로는 아주 제한된 농도 범위 혹은 두께 범위에 대해서만 적용할 수 있으므로 산업적 응용의 폭이 매우 제한되어 있었다.

본 연구에서는 기존의 관계식과는 달리 공업적인 의미가 있는 대략 1.0~3.5의 농도 범위 내에서 농도 차를 측정함으로써 두께 변화를 알아낼 수 있는 방법을 개발하였는데 이 방법을 사용하면 압력 용기 등의 설비들에서 공식(pitting)의 깊이와 분포도를 간단하게 알아낼 수 있으므로 설비의 안전성 평가에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경

필름을 이용한 방사선투과시험에서 시험체 두께 변화와 필름의 농도 관계는 사용 방사선원의 종류, 시험체 재료 및 필름의 특성에 좌우된다. X-선을 이용할 경우 투과 방사선의 강도(intensity)를 좌우하는 선흡수계수(linear absorption coefficient)는 X-선 발생 전압과 시험체 재료의 화학적 조성에 따라 달라지는데, 방사성 동위원소에 의한 γ -선과는 달리 넓은 에너지 스펙트럼을 지닌 연속 X-선의 경우, 시험체의 두께가 달라지면 투과하는 X-선의 유효 에너지(effective energy) 또한 달라지므로 두께에 따라 유효 선흡수계수(effective linear absorption coefficient, μ_{eff}) 역시 변하게 된다[6].

공업용 필름의 특성도 시험체 두께 변화에 따른 필름 농도 관계에 큰 영향을 끼치는데, 필름 특성 곡선(characteristic curve)에서 곡선의 기울기로 나타나는 film gradient는 투과 필름에서 콘트라스트(contrast)를 좌우하며 film gradient가 클수록 미소 두께 변화에 대한 농도 변화가 상대적으로 크게 나타난다.

입사 방사선이 시험체를 투과하면서 콤프턴 산란 등에 의한 산란 방사선들이 생겨나는데[7] 이들 산란 방사선으로 인한 투과 방사선 세기(intensity)의 누적 효과로 시험체를 투과한 방사선의 전체 강도는 시험체를 바로(directly) 투과한 방사선의 강도보다 커지게 된다[8]. 따라서 이러한 요소들을 모두 고려하고, Fig. 1과 같은 공업용 필름에서 노출의 상용 대수

(log E)의 미소 변화에 대한 농도의 변화가 필름 gradient, γ 에 비례한다고 가정하고 미소 두께 변화에 대한 산란 방사선의 변화를 무시하면, 시험체의 미소 두께 변화(Δx)에 대한 필름의 농도 변화(ΔD)는 아래와 같이 나타낼 수 있다[8, 9].

$$\Delta D = -0.434 \cdot \gamma \cdot \mu_{eff} \cdot \Delta x \dots\dots\dots (1)$$

여기서 γ 는 film gradient이고 μ_{eff} 는 유효 선흡수 계수이다. 식 (1)은 임의의 film gradient에 일치하는 미세 농도 범위에 대해서는 Δx 에 대한 ΔD 의 관계가 아주 훌륭한 직선성을 나타내지만 두께 변화가 커지고 농도 변화의 폭이 커지면 직선성에서 크게 벗어나게 된다. 이는 연속 X-선을 사용할 경우 μ_{eff} 의 변화 및 미세 두께 변화에서 무시하였던 산란 방사선에 의한 누적 효과와 함께, 무엇보다도 필름 특성곡선 상에서 특정 농도에서의 film gradient, γ 를 달라진 농도에서도 동일하게 고려하기 때문이다. 따라서 이러한 오차를 줄여주기 위해서는 두께 변화에 따른 유효 선흡수계수의 보정과 각 농도에 대응하는 film gradient, γ 의 보정이 있어야 한다.

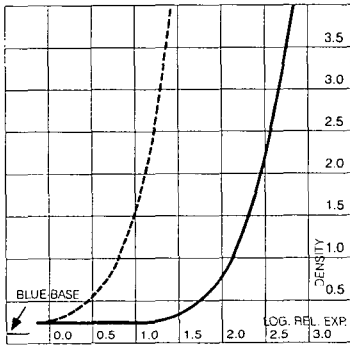


Fig. 1 The characteristic curves of radiographic films

3. 두께-농도 관계식

Fig. 1과 같은 일반 공업용 방사선 필름들의 특성 곡선은 상대 노출의 상용 대수 값(log E)이 증가함에 따라 필름의 농도는 지수 함수적으로 증가하고 있다. 따라서 대략 3.5의 농도 범위까지 노출과 필름 농도는 아래와 같이 지수 함수 관계에 있다고 가정할 수 있다.

$$D = f_s \exp(\delta \log E) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 D 는 필름 농도, f_s 는 필름 속도(film speed) 관련 상수, E 는 노출(exposure), δ 는 logarithmic film gradient로 film gradient, γ 와는 $\delta = \gamma/D$ 의 관계를 갖는다. 한편, 시험체에 입사한 방사선 빔의 세기(intensity), I_0 는 시험체를 투과하면서 지수 함수적으로 감소한다. 따라서 산란(scattering) 효과를 고려하면 화학적으로 균일한 시험체 두께, x 를 투과한 방사선 빔의 세기, I 는 다음과 같이 된다[11].

$$I = I_0 B e^{-\mu_{eff} x} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 B 는 산란 방사선에 의한 누적 효과를 나타내는 인자(build up factor)이며[8], E 는 방사선 빔의 세기, I 와 노출 시간, t 의 곱이므로 이를 고려하면 시험체 두께에 대한 필름 농도 관계는 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\log D = \log D_0 - 0.434^2 \delta \mu_{eff} x \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $\log D_0 = 0.434 \delta \log(I_0 t) + \log f_{s0} + 0.434 \delta \log B_0$ 의 관계에 있으며 시험체 두께가 0인 곳에서 필름농도의 상용 대수이고 f_{s0} 와 B_0 는 시험체 두께가 0인 곳에서 필름 감광 속도와 누적인자(build up factor)이다. 한편, $\log D_0$ 는 식 (2)가 필름 특성 곡선에서 상대 노출에 대한 농도 변화의 거동이 지수 함수적인 거동을 나타내는 영역까지만 고려하고 있기 때문에 노출 시간이 길어질수록 무한히 커지는 것으로 나타나지만, 실제의 필름 농도는 노출이 증가함에 따라 무한히 농도가 증가하는 것이 아니고 일정한 값에서 포화되기 때문에 상한 값을 갖게된다. 한편 필름 속도, f_s 는 방사선원과 필름 사이에 시험체가 존재하면, 두께가 두꺼울수록 필름이 감광되는 속도가 늦어지므로 두께의 함수이고, 방사선의 산란에 의한 누적 인자(B) 역시 두께에 따라 달라진다. 따라서 $\log D$ 는 logarithmic film gradient(δ), 필름 속도(f_s), 노출 량($I_0 t$), 누적 인자(B), 유효 선흡수계수, μ_{eff} 에 의존하여 시험체의 두께가 두꺼워질수록 감소하게 되는데 beam hardening 효과에 의해 시험체 두께가 두꺼워질수록 μ_{eff} 는 감소하고, f_s 역시 두께가 두꺼워짐에 따라 감소하므로 식 (4)는 두께, x 가 증가함에 따라 $\log D$ 가 단순히 선형적으로

감소하지는 않고 시험체의 두꺼운 부분의 기울기가, 얇은 부분의 기울기에 비해 줄어드는 경향을 나타내게 된다. 따라서 x 에 대한 $\log D$ 의 변화가 선형적인 관계에 있지 않으므로 두께 변화에 대한 농도의 변화를 아주 정확하게 고려해 주기 위해서는 필름 속도 및 선흡수계수와 누적 인자의 두께 변화에 따른 변화도 모두 고려해 주어야 한다.

한편, 방사선원으로 방사성 동위원소를 사용할 경우 연속 X-선에 비해 에너지 스펙트럼이 단순하여 두께 변화에 대한 유효 선흡수계수의 변화를 거의 무시할 수 있으므로 1.0~3.5의 농도 변화를 가져오는 두께 변화에 대해 필름 감광 속도와 누적 인자의 변화가 그리 크지 않다고 가정하면 식 (4)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \log D = -0.434^2 \delta \mu_{eff} \Delta x \dots\dots\dots (5)$$

따라서 위의 가정이 적어도 공업적 의미가 있는 농도 범위에 해당하는 두께 범위에 대해 옳다면 투과 필름 상에서 농도 변화를 측정하여 두께 변화를 알아낼 수 있다.

4. 실험

먼저 시험전압 160kVp, 전류 5mA의 디지털 X-ray 장치를 사용하여 두께 범위가 1~16mm이고 두께 차이가 1mm인 탄소강 계단 시편에 대해 노출 조건을 달리하여 촬영하였다. 또한 20 Ci의 Ir¹⁹²를 이용하여 두께 범위가 2~24mm의 탄소강에 대해 노출 시간을 달

리하여 촬영하였다. 필름은 모두 Agfa D5를 사용하였고, 방사선원과 필름 간 거리(SFD)는 X-ray의 경우 600, γ -ray의 경우 300mm로 각각 설정하였다. 필름 현상은 30℃의 온도 조건에서 자동 현상하고 암실에서 viewer에 올려놓고 직경이 3mm인 농도 측정기(densitometer)를 이용해 농도를 측정하였다.

5. 결과 및 토의

Fig. 2는 방사선원으로 X-선을 사용하고, 5mA의 일정 전류에 노출 시간을 각각 30초, 48초, 64초, 80초, 90초로 달리하여 촬영하여 시편의 두께 변화에 대한 농도 변화를 도시하고 데이터들에 의한 best fit을 나타낸 것이다. 계단 시편의 두께가 두꺼워질수록 농도는 감소하나 단순히 선형적으로 감소하지 않고 두께가 두꺼워질수록 동일 두께 변화에 대한 농도 감소의 크기가 줄어들고 있는데 이는 무엇보다도 식 (4)에서 유효 선흡수계수가 beam hardening effect에 의해 작아지기 때문이다. 결과적으로 식 (1)에 의한 두께 - 농도 변화의 직선성은 1.0~3.5의 넓은 농도 범위에서는 이루어지지 않음을 알 수 있다. Fig. 3은 위와 동일한 시험 조건에 의한 결과를, 식 (4)에서 제시한, 두께 변화에 대한 농도의 상용 대수 변화로 도시한 것이다. 결과적으로 식 (4)의 관계식이 공업적으로 의미 있는 1.0~3.5의 농도 범위에서 경향적으로 잘 일치하고 있다. 이러한 결과는 식 (1)과는 달리 식 (4)에서는 농도 변화에 따른 film gradient, γ 의 변화가 이미 고려되었기 때문이다. 또한 Fig. 2과 3에서 노출이 증가함에 따라 기울기가 완만해지고 있음을 볼 수 있는데 이는

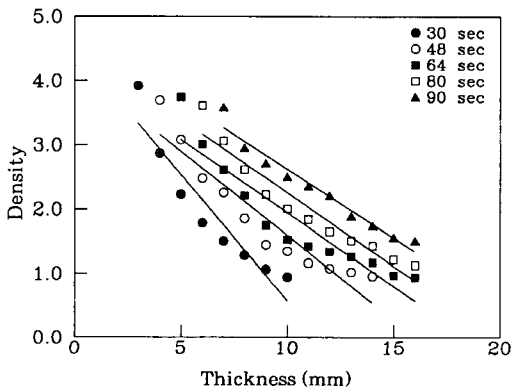


Fig. 2 Density variation v.s. thickness at different exposure condition

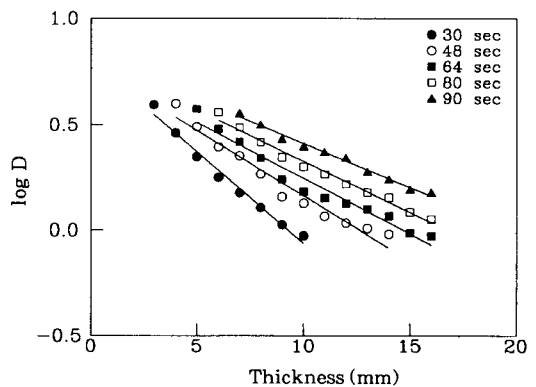


Fig. 3 Logarithmic density variation v.s. thickness at different exposure condition

노출이 증가함에 따라 동일한 농도에 대응하는 계단 시편의 평균 두께 역시 점차 증가하므로 유효 선흡수계수가 작아지기 때문이다. 식 (5)를 적용해 평균 두께 변화에 의한 유효 선흡수계수의 변화를 도시하면 Fig. 4와 같다. X-ray 에너지가 150keV일 때 순수한 철(Fe)의 경우 선흡수계수가 0.154/mm 임을 감안하면 [12], 일반 탄소강에 대해 160keV의 X-ray를 사용하여 실험적으로 구한 유효 선흡수계수의 변화는 신뢰할 만한 범위에 있는 것으로 보인다.

Fig. 5는 노출(log E)을 증가시켰을 때 농도(ln D) 변화를 나타낸 것이다. 여기서 직선의 기울기는 logarithmic film gradient, δ 이고 y 절편은 필름 감광 속도, f_s 의 상용 대수 값이다. Film gradient, γ 가 농도에 따라 달라지는 값임에 비해, δ 는 필름 특성 곡선 상에서 대략 3.5 이하의 농도 범위에서 농도 변화에 따른 film gradient의 변화를 이미 고려하고 있기 때문에 필름의 gradient 특성을 나타내는 상수가 된다. 따라서 각 계단 시편에 대한 시험 결과, 농도 범위가 3.5 이하에서 Agfa D5 필름의 δ 는 1.80 ± 0.15 로 측정되었다. Fig. 6은 방사선원으로 Ir¹⁹²을 사용하고, 노출 조건을 달리하여 계단 시편을 촬영한 시험 결과이다. Fig. 3의 X-선에 의한 결과와는 달리 노출의 증가에 따른 기울기의 변화가 거의 나타나지 않는데 이는 Ir¹⁹²의 에너지 스펙트럼 선(spectrum lines) 중 0.3, 0.47 MeV 에너지에 의한 감마선이 약 90%를 차지하므로 [13,14] 연속 X-선에 비해서는 스펙트럼이 단순하여 beam hardening effect에 의한 유효 선흡수계수의 변화가 거의 일어나지 않기 때문이다.

Fig. 7은 방사선원으로 X-선을 사용하여 계단 시편

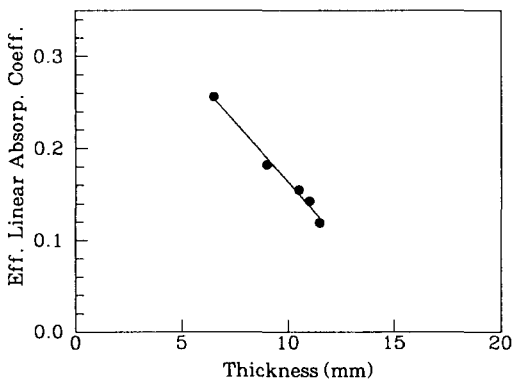


Fig. 4 Effective linear absorption coefficient for carbon steel as a function of thickness

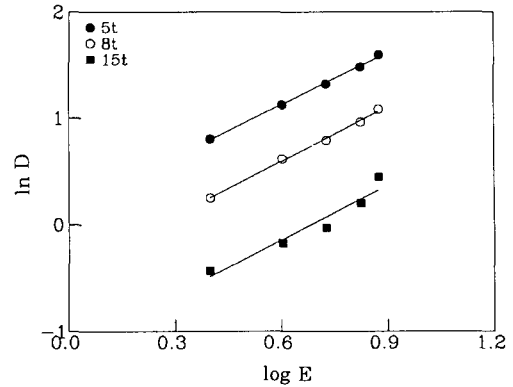


Fig. 5 Logarithmic film gradient(δ)

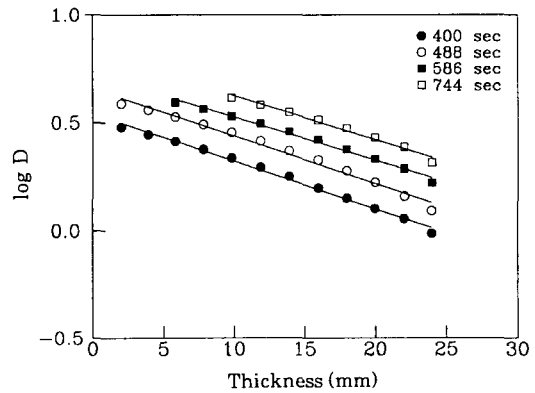


Fig. 6 Logarithmic density variation v.s. thickness at different exposure conditions

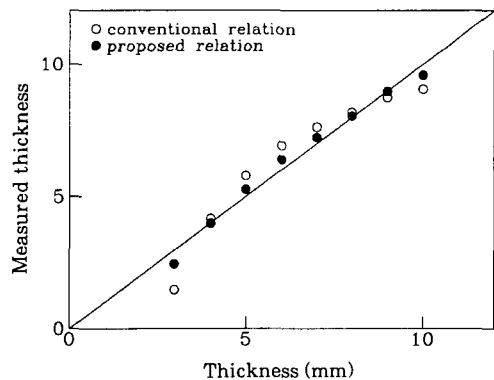


Fig. 7 Comparison of X-ray test results evaluated by conventional and proposed relations respectively

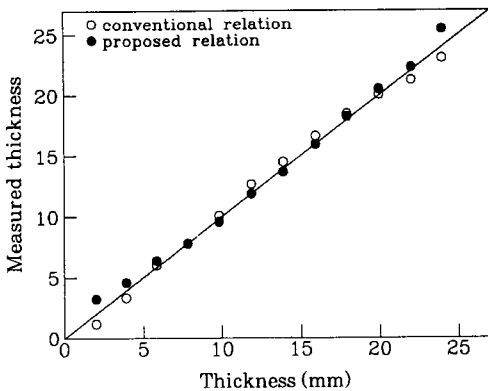


Fig. 8 Comparison of γ -ray test results evaluated by conventional and proposed relations respectively

을 촬영하고 식 (1)과 (5)에 의한 평가 결과를 계단 시편의 실제 두께와 비교한 것이다. 결과적으로 식 (5)에 의한 평가가 식 (1)에 의한 평가 결과보다 더욱 정확하게 나타나고 있다. Fig. 8은 γ -선을 이용하여 계단 시편을 촬영한 후 식 (1)과 식 (5)에 의한 결과를 실제 두께와 비교한 것이다. 마찬가지로 식 (1)에 비해 식 (5)에 의한 평가가 더욱 정확하며, Fig. 7의 X-선에 의한 결과와 비교하면 γ -선을 이용하는 것이 필름 농도 변화를 측정하여 두께 변화를 정량적으로 예측하는데 보다 유리함을 알 수 있다.

6. 결 론

공업용으로 사용되는 필름에서 특성곡선의 일정 구간의 필름 농도가 상대 노출의 상용 대수 값에 대하여 지수 함수적으로 증가한다고 보고 필름 특성에 관한 일반식을 전개하고 X-ray와 γ -ray를 이용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Logarithmic film gradient, δ 는 필름 특성곡선 상에서 공업적으로 의미 있는 농도인 1.0~3.5의 농도 범위에서 농도 변화에 따른 film gradient의 변화를 내포하고 있는 필름 상수이며 본 실험에서 사용한 Agfa D5 필름의 δ 는 1.80 ± 0.15 로 평가되었다.

- 2) X-선과 γ -선으로 계단 시편을 촬영하고 농도 변화를 측정하여 두께 변화를 예측한 결과, 전통적인 관계식에 비해 본 연구에서 제안한 식에 의한 평가가 더 정확하였다.
- 3) 필름 농도 변화를 측정하여 두께를 평가할 경우 X-ray 보다 γ -ray를 이용하는 것이 더욱 정확한 결과를 가져왔는데 이는 γ -선의 에너지 스펙트럼이 연속 X-선에 비해 상대적으로 단순하여 두께 변화에 따른 선흡수계수의 변화가 거의 없기 때문이다.
- 4) 제안한 관계식을 이용하면 압력 용기 등에서 국부적인 부식에 의한 손상을 평가할 수 있으므로 향후 산업 설비의 안전성 평가에 활용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 이성식, 김영환, "Tangential radiography를 이용한 배관의 두께 평가법", 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 3, pp. 205-210, (1998)
- [2] P. S. Ong, W. L. Anderson, B. D. Cook, and R. Subramanyan, "A novel X-ray technique for inspection of steel pipes", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 13, No. 4, pp. 165-173, (1994)
- [3] W. S. Burkle, "Application of the tangential radiographic technique for evaluating pipe system erosion/corrosion", Material Evaluation, Vol. 47, ASNT, pp. 1184-1188, (1989)
- [4] R. P. Krolicki, "Gamma-radiography of high temperature and corroded objects", Material Evaluation, Vol. 43, ASNT, pp. 1008-1012, (1985)
- [5] R. Halmshaw, "Scattered radiation in industrial radiography", Brit. J. NDT, 35-3: 113, (1993)
- [6] Industrial Computed Tomography, Non-destructive Evaluation and Quality Control, Metals Handbook 9th Edition, Vol. 17, pp. 375-377

-
- [7] Hugh D. Young, "University Physics", 8th Edition, Addison-Wesley Publication Company, pp. 1126-1131
 - [8] ASTM, E242-91, "Standard reference radiographs for appearances of radiographic images as certain parameters are changed"
 - [9] Jorgen Rheinländer, "Quantitative use of film density variations for thickness variation determination by polychromatic X-radiography", Research in Non-destructive Evaluation, ASNT, Vol. 6, No. 1, pp. 57-68, (1994)
 - [10] Industrial Radiography, Agfa-Gevaert N.V. pp. 55-90, (1986)
 - [11] P.-A. Ruault, "The search for rapid information using radiographic papers for industrial radiography applications", Materials Evaluation Vol. 42, ASNT, pp. 1260-1271, (1984)
 - [12] Robert C. McMaster, "Nondestructive Testing Handbook", ASNT, Vol. 2, Sec. 27-21, (1957)
 - [13] Industrial Radiography, Agfa-Gevaert N.V. pp. 38, (1986)
 - [14] 이의중, "공업용 방사선 투과검사", 골드 출판사, pp. 58-59, (1993)