

## 방사선투과필름에서 Density Profile을 이용한 배관의 두께 평가

### Thickness Evaluation of Pipeline Using Density Profile on a Radiograph

이성식\*<sup>†</sup>, 장병규\*, 김영환\*\*

Sung Sik Lee\*<sup>†</sup>, Byoung Gyu Jang\* and Young H. Kim\*\*

초 록 내부가 비어 있거나 유체로 절반 채워진 보온 및 비보온 배관에 대해 방사선 조사 방향에 따른 투과두께와 농도 변화를 전산 시뮬레이션 하였다. 결과적으로 내부가 비어있는 배관의 경우 투과필름에서 농도 변화가 연속적이며 대칭적인 반면, 유체가 절반 채워진 배관의 경우는 방사선 조사 방향에 따라 농도 변화가 비대칭적이며 크게 달라질 수 있음을 알았다. 인공 결함을 가공한 탄소강 배관 시편을 방사선원 Ir-192로 방사선투과시험 한 뒤 농도 변화를 측정하고 이론적으로 계산한 농도 변화와 비교한 결과 산란 방사선에 의한 영향이 큰 가장자리를 제외한 부분에서는 농도 변화를 이용한 두께 평가가 가능함을 확인하였다.

**주요용어** : 배관, 방사선투과검사, 전산 시뮬레이션, 농도 변화, 두께평가

**Abstract** The computer simulation has been done for non-insulated and insulated pipes which are vacant or half filled with liquid. The simulation results showed that the density profile on the radiograph is continuous and symmetrical around the center of pipe in the case of vacant pipe. On the other hand the density profiles are not symmetrical and depend on geometrical setting for radiography in the case of half filled pipes. Finally, experimental testing on a non-insulated carbon steel pipe with artificial notches of different depth is carried out using Ir-192 and industrial film. Comparing the measured density profile on the radiograph to the the calculated one, it has been shown that it is possible to evaluate thickness variation by measuring density profile on a radiograph.

**Keywords**: pipe, radiography, computer simulation, density profile, thickness evaluation

#### 1. 서 론

물질의 수송 기능을 담당하는 배관은 거의 모든 산업 현장에서 반드시 필요한 설비 중의 하나이다. 일본의 경우 화학 및 화력 발전소에서 설비 구성 비율을 살펴보면 대략 vessel, 탱크 등의 설비가 50%를 차지하고 나머지 50% 중 30%가 배관라인으로 구성되는데, 플랜트에서 설비별 손상 비율에서 배관이 전체의 16.5%를 차지하여 상

당히 높은 손상 비율을 보이고 있다[1].

이와 같은 오류의 원인으로는 무엇보다 대부분의 배관이 열효율을 향상시키기 위해 보온재로 둘러 싸여져 있어 검사가 용이하지 않은데서 기인한다. 예를 들어 전통적인 비파괴시험법 중의 하나인 초음파 시험법의 경우, 시험을 위해서는 시험체와의 접촉을 반드시 필요로 하므로 보온 배관을 검사하고자 할 경우 보온재를 반드시 제거해야만 한다. 그러나 대개 보온재 제

거 및 재시공에 따른 비용을 고려하여 보온재를 완전히 제거하지 않고 부분적으로 제거한 부위(sampled area)에 대해서만 시험이 이뤄지므로 pit corrosion 등과 같은 국부적인 부식(local corrosion)을 검출하기가 매우 어렵다. 그리고 만약 보온재를 제거한다 할지라도 200~300℃ 이상의 고온 상태로 운전되는 배관의 경우에는 접촉매질의 건조와 탐촉자 압전체의 강유전성(ferroelectricity) 상실 등의 문제로 시험 자체가 어렵다. 따라서 이러한 이유로 보온재를 제거하지 않고 비접촉의 방법으로, 배관의 넓은 부위를 검사할 수 있는 비파괴검사기술이 필요로 하게 되었고, 이와 관련하여 전통적인 필름을 이용한 방사선투과시험법을 이용한 tangential radiography(혹은 profile radiography) 등이 개발되어 국내외의 산업 현장에서 활용되고 있다 [2,3].

이러한 tangential radiography법의 경우 상기 서술한 초음파 시험법에 비교하여 보온재를 제거하지 않고 비교적 넓은 영역에 걸쳐 시험이 가능하다는 장점이 있으나 방사선이 반드시 배관에 접하면서 투과하는 부분에 대해서만 검사가 가능하며 방사선원으로 Ir-192를 사용할 경우 투과력의 한계와 산란 방사선의 영향으로 대략 10 인치 이상의 대형 배관들은 시험 자체가 어렵다. 그리고 무엇보다 tangential radiography법에서는 방사선투과필름 상의 배관 두께 부분의 치수를 직접 측정하여 두께를 평가하므로 측정의 정밀도를 향상시키기 위해서는 기하학적 불선명도가 작고 콘트라스트는 커야 한다. 따라서 이를 위해서는 방사선원과 필름간 거리(source to film distance)를 가능한 길게 하고 방사선 노출량을 크게 해주어야 하는데 배관의 크기가 커질수록 배관의 두께 부분에서 투과 두께가 커지고 적절한 불선명도를 얻기 위한 SFD는 길어지므로 노출 시간이 상당히 증가하게 된다. 따라서 tangential radiography법의 경우 작업 생산성의 저하는 물론 적절한 방호를 취하지 않는다면 방사선 작업 종사자의 과다 피폭을 피하기 어려운 것이 또한 큰 단점이다.

본 연구에서는 단열재로 보온된 배관 및 배관 내부에 유체가 있는 경우를 가정하고 방사선 조사 방향에 따른 방사선투과두께의 변화와 투과 필름 상에 나타나는 density profile을 전산 시뮬레이션 하여 이들 배관에서 방사선투과시험의 가능성을 고찰하였다. 또한 인공 결함을 가공한 배관에 대한 방사선투과시험으로 실제 활용의 가능성을 조사하였다.

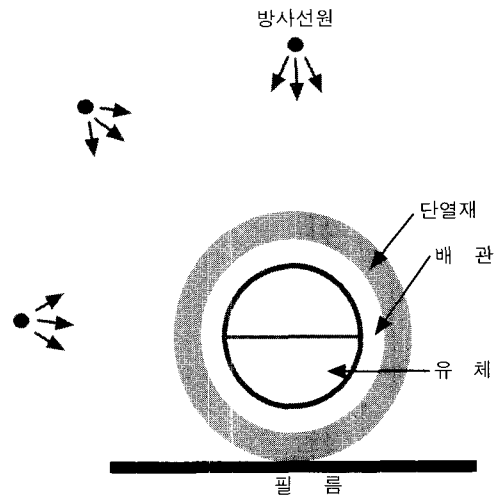


Fig. 1 Radiographic tests to measure thickness of pipe in service

## 2. 전산 시뮬레이션

방사선을 이용한 배관의 두께 측정에서 무엇보다도 고려해야 하는 것은 평관과는 달리 배관의 공칭 두께는 일정하지만 배관에서 방사선이 조사되는 위치에 따라 투과 두께가 크게 변화하는 점이다. 또한 사용 중 설비의 경우 Fig. 1과 같이 대개 단열을 위해 배관 외면에 단열재를 입혀 두는 경우가 많으며 무엇보다 배관의 역할이 물질 수송에 있으므로 가동 중인 배관은 내부에 유체가 항상 존재한다. 따라서 사용 중인 배관에 대한 방사선투과시험이 가능하기 위해서는 배관 자체에서 방사선투과두께의 변화는 물론 단열재에 의한 영향과 내부 유체에 의한 영향을 고려해 주어야 한다. 결과적으로 단열재와 배관 내부의 유체가 방사선투과시험에 미치는 영향은 방사선 투과두께의 변화를 가져오는 데 있으며 또한 정량적으로 고려하기는 어려우나 금속 배관과는 다른 산란 효과이다. 이 중 방사선 투과두께 변화의 크기는 단열재와 유체를 구성하는 원소들의 선흡수계수와 각 원소들의 weight fraction에 따라 달라지는데[4], 금속에 비교하여 선흡수계수가 매우 낮은 원소들이기는 하나 배관 자체만을 고려한 경우와 비교해 단열재 두께 그리고 유체의 양과 방사선 조사 방향에 따라 투과 두께가 달라지고 결과적으로 투과필름 상에서 농도 profile이 달라지게 된다. 따라서 다양한 상태의 배관에 대하여 방사선투과두께와 농도 profiles을 차례로 고찰하면 다음과 같다.

2.1. 배관에서 방사선투과두께 변화

배관은 기하학적으로 대칭 구조를 이루고 있는데 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 방사선이 배관의 중심을 투과하는 경우 보온재가 없다고 가정하면 방사선투과 두께는 단지 배관 두께의 2배가 되나 중심에서 가장자리로 갈수록 연속적으로 투과 두께가 증가하다가 내경에 접하는 지점에 이르게 되면 투과 두께는 최대가 된다. 그리고 내경에 접하는 지점을 넘어서게 되면 투과 두께는 급격히 감소하게 되며 외경에 접하는 지점에 이르러서는 투과두께는 0이 된다. 한편, 배관 외면에 균일한 두께의 단열재가 입혀져 있는 경우도 비보온 배관의 투과두께 변화를 계산한 것과 동일한 기하학적 고려에 의해 구할 수 있으나, 방사선투과필름에 미치는 투과 방사선의 강도 효과를 고려하면 일반적으로 단열 재료는 금속 배관에 비교하여 대개 선평수계수가 작기 때문에 금속 배관의 재료를 기준으로 한 단일 재료의 등가 두께를 고려하여 방사선 투과두께를 계산해야 한다. 결과적으로 비보온 및 보온 배관에서 입사 위치에 따른 방사선투과 두께의 변화는 식 (1)과 같이 배관 외경의 반지름( $r_o$ )과 내경의 반지름( $r_i$ ), 보온재의 두께( $d$ )와 등가계수( $k$ ), 그리고 배관의 중심에서 거리( $r$ )의 함수로 주어진다.

$$0 \leq r \leq r_i:$$

$$x_o = 2(\sqrt{r_o^2 - r^2} - \sqrt{r_i^2 - r^2}) + 2k(\sqrt{(r_o + d)^2 - r^2} - \sqrt{r_o^2 - r^2})$$

$$r_i < r \leq r_o:$$

$$x_o = 2\sqrt{r_o^2 - r^2} + 2k(\sqrt{(r_o + d)^2 - r^2} - \sqrt{r_o^2 - r^2})$$

$$r_o \leq r:$$

$$x_o = 2k\sqrt{(r_o + d)^2 - r^2} \dots\dots\dots (1)$$

배관 내부에 유체가 존재하는 경우는 유체가 채워진 정도와 방사선조사 방향에 따라 투과 두께가 달라지므로 다소 복잡하기는 하나 마찬가지로 기하학적 고려와 금속 배관에 비교한 등가 두께를 고려하여 투과 두께 변화를 계산할 수 있다.

결과적으로 Fig. 3은 외경이 165mm, 공칭 두께가 10mm인 탄소강 배관에 대한 방사선투과시험 시 배관의 중심에서 위치에 따른 방사선 투과두께 변화의 전산 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 이 중 A는 배 내부가 비어 있고 단열재를 입히지 않은 배관에 대한 시뮬레이션 결과이고, B는 단열재가 없고 배관의 내부가 유체로 절반 채워져 있는 경우 유체의 표면에 수직으로 방사선을 조사시킬 경우의 투과두께 변화를 나타낸 것이다. C는 단열재를 입힌 배관이 유체로 절반 채워져 있을 경우 유체면에 평행하게 방사선을 조사시킬 경우의 투과두께의 변화를 나타낸 것으로 단열재와 유체가 투과두께에 미치는 영향을 비교하여 볼 수 있다.

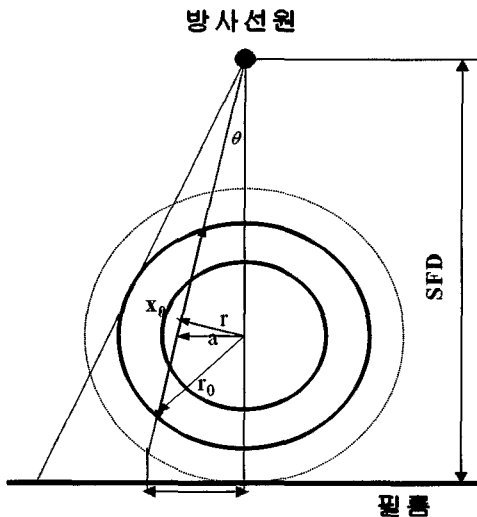


Fig. 2 Geometrically different radiation penetration thickness due to different incident angles into a pipe

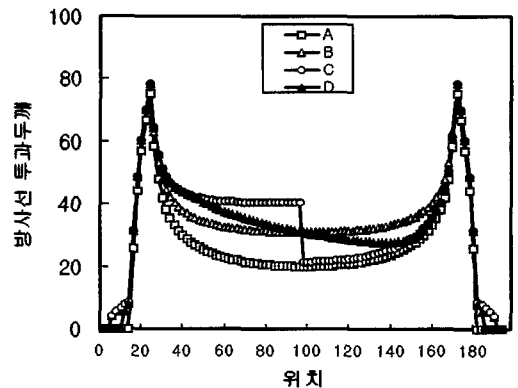


Fig. 3 Calculated penetration thickness profiles with different geometrical exposure condition for non-insulated and insulated pipes that are vacant or half filled with liquid

마지막으로 D는 단열된 배관이 유체로 절반 채워져 있는 경우 방사선이 유체의 표면과 45°의 경사각으로 조사될 때 방사선 투과두께의 변화를 나타낸 것이다. 단열재의 경우 일반적으로 금속 배관에 비해 방사선 감쇠능이 월등히 작으므로 탄소강에 비교하여 등가 계수가 0.15인 임의의 재료를 가정하였고 배관 내부 유체의 경우 등가계수를 0.13(300keV의 방사선을 사용하였을 때 순수 철의 선흡수 계수에 대한 물의 선흡수계수 비)으로 가정하였다. 결과적으로 단열재가 균일하게 배관 외면에 입혀져 있는 경우 투과 필름 상에서 농도 변화는 단열재가 없는 경우와 마찬가지로 연속적이며 선흡수계수가 크지 않은 재료일 경우는 투과 필름 상의 농도 변화에 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 반면에 배관 내부에 유체 등과 같은 임의의 물질이 들어 있는 경우 채워진 양과 방사선 시험시의 조사 방향에 따라 투과 필름 상에서 농도 변화가 비교적 크게 나타나고 있다.

## 2.2. 노출량에 따른 density profile 변화

공업용 방사선투과필름 상에서 방사선의 투과두께  $x$ 의 변화에 따른 농도변화  $D$ 는 식 (2)와 같이 두께가 증가함에 따라 농도의 대수 값이 선형적으로 감소하는 관계에 있다[3].

$$\log D = \log D_0 - 0.434^2 \delta \mu x \quad \dots\dots (2)$$

여기서  $\delta$ 는 logarithmic film gradient,  $\mu$ 는 선흡수 계수,  $x$ 는 투과두께,  $D_0$ 는 투과두께가 0인 경우의 농도이다. 따라서 식 (1)과 식 (2)를 고려하면 배관에서 투과두께의 변화에 따른 density profile을 계산할 수 있다. 결과적으로 Fig. 4는 노출량의 변화에 따른 density profile 변화를 나타낸 것이다. 노출량이 증가할수록 단위 두께변화에 대한 농도 차, 즉 콘트라스트가 증가함을 알 수 있다. 두께변화에 대한 분해능을 향상시키기 위해서는 노출량을 비교적 크게 해 주는 것이 필요하나 필름을 이용한 방사선투과시험법의 경우는 투과필름 상에서 나타낼 수 있는 농도범위가 제한되어 있으므로 농도 profile이 공업용 필름의 포화 농도 범위를 초과하지 않는 범위에서 나타나도록 노출 조건을 설정해 주는 것이 필요하다.

식 (2)는 공업용 필름에서 대략 3.5 이하의 농도 범위에서는 농도가 노출량에 비례하여 증가한다는 가정 아래에서 전개되었는데[3], 적어도 이 농도 범위에서는 GM 튜브

혹은 섬광형 검출기 등의 방사선 검출기를 사용하는 경우와 마찬가지로, 방사성 동위원소의 강도(activity)를 높여 주거나 혹은 노출 시간을 연장시켜 주었을 때 방사선 계측량이 증가하는 것과 일치한다. 따라서 Fig. 4의 시뮬레이션 결과는 필름의 경우로 제한되지 않으며 다른 방사선 검출기의 사용에 의한 결과로 보아도 무방하다.

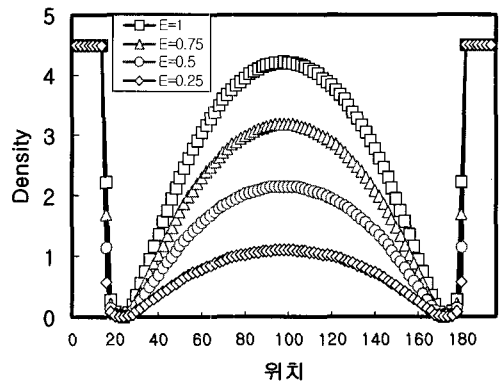


Fig. 4 Simulated density profiles on radiographs with increment of exposure

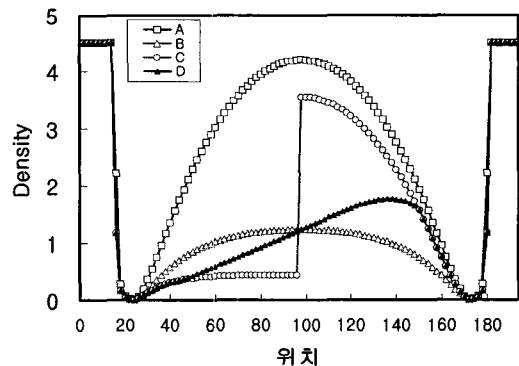


Fig. 5 Simulated density profiles with different geometrical condition for non-insulated and insulated pipes that are vacant or half filled with liquid

## 2.3. 보온재 및 유체 그리고 조사 방향에 따른 density profile

Fig. 5는 배관에 대한 방사선투과시험 결과 투과 필름에서 density profile을 전산 모사한 것으로 A는 비보온 배관에서 내부가 비어 있는 경우이며, B는 유체로 절반 채워진 비보온된 배관에서 방사선이 경계면에 수직으로 조사될 경우이며, C는 유체로 반이 채워진 보온 배관에서

유체 표면에 평행하게 방사선을 조사시킬 경우이다. D는 유체로 반이 채워진 보온 배관에서 유체의 표면과 45°의 경사각으로 방사선이 조사될 때 투과 방사선에 의한 density profile이다.

결과적으로 보온재와 유체의 선흡수계수 그리고 방사선의 조사 방향에 따라 density profile이 크게 달라지게 된다. 이는 투과 필름에서 농도 변화를 고려한 두께 평가의 경우는 물론이고 일반 적으로 시행되는 배관 용접부의 방사선투과시험 시에도 배관 내부가 유체로 채워져 있는 경우는 보온재의 경우와는 달리 방사선 조사 방향에 따라 시험 결과가 크게 달라질 수 있음을 의미한다.

### 3. 실험

방사선원으로 강도가 9.5 Ci의 Ir-192를 사용하였다. 시험 배관은 외경 165mm, 공칭두께 10mm의 탄소강 배관으로 하였고, 방사선원과 필름 간의 거리(SFD)를 600mm로 설정하고 필름의 종류는 Agfa D5를 사용하였다. 시험 배관은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 배관에 인공 결함을 가공한 것으로 지름이 10mm인 평저공(flat bottom hole)을 종 방향으로 깊이를 달리하여 공칭 두께 대비 20, 30, 40, 50, 60, 70%로 각각 3개씩 가공하였다. 방사선투과시험 시 인공 결함을 가공한 표면이 필름 쪽으로 향하게 하였고 방사선원은 배관의 중심에 위치하도록 하였다. 또한 시멘트 바닥으로부터의 산란 방사선 영향을 최소화하기 위해 바닥에 두께 5mm의 납 판을 설치하였다. 노출시간은 탄소강 15mm를 기준으로 설정하였고, 필름 현상은 30°C의 온도 조건에서 자동현상하고 암실에서 관찰기(viewer)에 올려놓고 직경 3mm, 정밀도(density precision)가 0.01의 농도계(densitometer)를 사용하여 배관의 둘레 및 길이 방향으로 농도를 측정하였다.

### 4. 시뮬레이션 및 실험결과에 대한 토의

Fig. 3의 시뮬레이션 결과를 고찰하면, 내부가 비었고 단열재를 입히지 않은 탄소강 배관과 탄소강 대비 등가계수가 0.15, 두께 50mm의 단열재를 입힌 배관에서 방사선 조사위치에 따른 투과두께 및 농도 변화는 배관의 중심에서 내경에 이르기까지 연속적인 변화를 보였다. 그러나 투과두께의 크기 변화를 고찰하면 배관 중심부에서는 투과두께가 대략 공칭두께의 2배인 20mm를 상회하나 배관의 내경으로 접근할수록 매우 가파르게 투과두께가 증가하고

있다. 결과적으로 배관의 내경 부분을 접하면서 투과할 경우 투과두께는 대략 공칭 두께의 8배 정도에 이르게 되는 데 식 (1)을 고찰하면 이러한 경향은 배관의 외경이 커질수록 증가한다. 따라서 현재 가장 많이 사용되고 있는 방사선원인 Ir-192의 투과 가능 두께가 탄소강을 기준으로 대략 60mm 정도임을 감안하면 방사선을 배관의 두께 부분에 조사시켜 투과필름에 투영된 두께를 직접 측정하여 배관의 부식두께를 평가하는 tangential radiography는 배관 치수가 일정 크기를 넘어서면 방사선의 투과력 한계와 함께 두께 증가에 따라 커지는 산란 방사선의 영향으로 시험이 어려워질 것을 알 수 있다. 그러나 투과필름에서 농도변화를 측정하여 두께 변화를 알고자 할 경우 배관의 중심부에서는 대략 공칭두께의 2배만 고려하여도 투과필름에서 적절한 농도를 얻을 수 있으므로 tangential radiography와 비교하여 훨씬 적은 노출량으로 대형 배관에 대한 시험이 가능하게 된다. 따라서 Fig. 5의 density profile에 대한 시뮬레이션 결과는 비보온 배관은 물론 일정 두께의 단열재로 싸여져 있는 배관일지라도 등가계수를 고려한 노출 조건의 설정으로 방사선투과시험에 의한 두께 측정이 가능할 것임을 시사한다.

한편 Fig. 3과 Fig. 5에서, 배관 내부에 탄소강 대비 등가계수가 0.13인 유체가 들어있는 경우의 전산 시뮬레이션 결과는 단열재에 의한 영향과는 달리 방사선 조사 방향에 따라 투과두께와 농도 profile이 달라지는 것을 보이고 있다. 전산 시뮬레이션에서 가정된 단열재와 유체의 등가 계수가 각각 0.15와 0.13으로 그 차가 그리 크지 않음을 감안한다면 방사선투과시험에서 단열재에 의한 영향에 비하여 배관 내부에 존재하는 유체의 영향이 시험 조건 설정 및 시험 결과에 더 큰 영향을 끼치게 됨을 알 수 있다. 따라서 배관에 대한 방사선투과시험에서는 시험 전에 반드시 유체의 유무 및 내용물을 확인해야 시험조건 설정을 정확히 할 수 있다.

Fig. 6은 인공결함이 가공된 탄소강 배관에 대한 방사선투과시험 결과 투과필름의 영상을 나타낸 것이다. 건전부에서 거의 연속적인 농도 변화를 나타내는 것과는 달리 인공 결함부에서 농도는 주변 농도와는 확연하게 구별이 되는 불연속적인 변화를 나타내고 있다.

Fig. 7은 투과필름 상에서 배관의 둘레 방향으로 실제 측정된 농도 profile을 도시한 것이다. 건전부에서는 단순히 육안으로 확인된 것과 마찬가지로 농도 profile이 매우 연속적이고 배관 중심을 기준으로 대칭적인 변화를 보여 주고 있다. 반면에 평저공을 가공한 부분에서는 주변 농

도와 비교하여 매우 큰 농도 변화를 보여주고 있다. 한편 이론적으로 예측한 농도 profile과 실제 측정된 농도 profile이 배관의 중심에서 가장자리로 갈수록, 즉 방사선의 투과 두께가 두꺼워질수록 벌어지는데 이는 산란 방사선에 의한 누적인자의 영향으로 보이는데 이와 관련해서는 향후 보다 정밀한 실험이 필요할 것으로 사료된다.

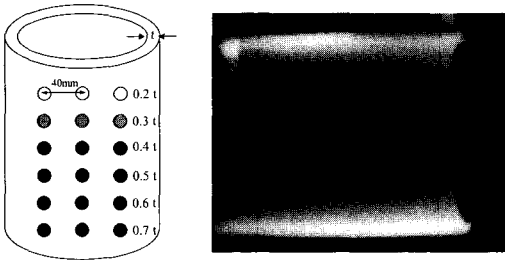


Fig. 6 Test specimen and its radiograph

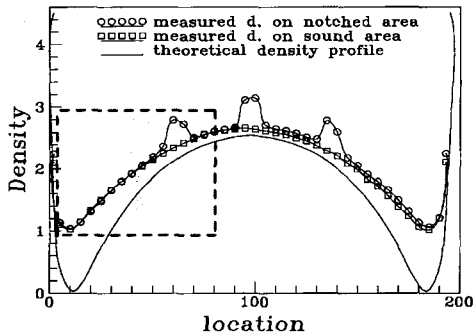


Fig. 7 Density profile measured on a radiograph and theoretically calculated density profile

Fig. 8은 Fig. 7의 점선의 상자 영역에서의 방사선 투과 두께 변화에 대한 농도변화와 방사선투과시험 시 배관 옆에 위치시킨 탄소강 계단시편으로부터 두께변화에 대한 농도변화를 측정하여 도시한 것이다. 식 (2)를 고찰하면 두께변화에 대한 농도변화의 기울기는 선흡수계수와 logarithmic film gradient에 의해 좌우되는데 결과적으로 Fig. 8에서 최소 자승법(least mean square)으로 구한 직선의 기울기는 배관과 계단시편에서 각각 0.017, 0.019로 측정되었다. 한편 Ir-192의 에너지를 300 keV로 가정할 경우 순수 철의 선흡수계수가  $0.087\text{mm}^{-1}$ 가 되고, 사용 필름의 logarithmic film gradient가  $1.80 \pm 0.15(\text{Agfa D5})$ 이므로[3], 이를 고려하여 계산하면 기울기는 대략  $0.027 \sim 0.032$ 의 범위에 있다. 그러나 실제로 배관의 재질은 순수 철이 아니라 선흡수계수가

철에 비해 상대적으로 작은 원소들이 포함된 탄소강이며, 또한 Ir-192의 선 스펙트럼이 비교적 복잡하나 이 중에 310, 470, 600 keV에 해당되는 감마선들이 대략 61%, 28%, 11%를 차지하고 있다[5]. 따라서 고에너지 방사선일수록 선흡수계수가 작아지는 것을 고려하면 실제의 기울기는 300 keV와 순수 철을 가정하여 계산한 값에 비해서는 작아야 한다. 시험결과는 이러한 예측과 잘 일치한다.

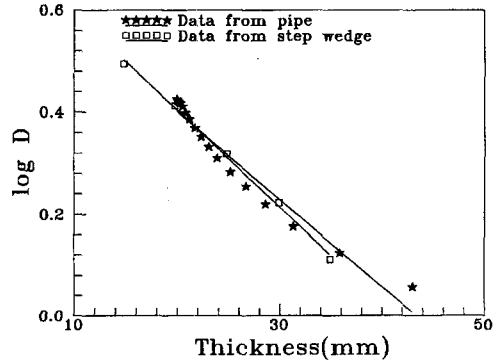


Fig. 8 Logarithmic density variation with thicknesses of a reference step wedge and with circumferential thickness change of pipe

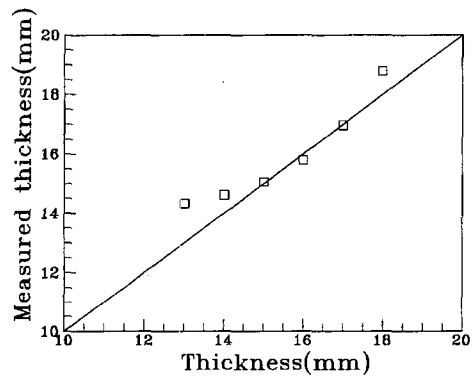


Fig. 9 Measured thickness of flat bottom holes fabricated on a pipe using thickness-density relation obtained from a reference step wedge

Fig. 9는 투과필름에서 배관의 축 방향으로 각 평저공이 있는 지점에서 농도를 측정하고 계단 시편으로부터 구한 두께-농도 변화 관계식을 이용하여 두께를 평가하여 실제두께에 대한 평가 두께를 도시한 것이다. 결과적으로 배관의 길이 방향에서 중심부를 제외하고는 실제 두께에 비해 평가두께가 크게 나타나고 있다. 이는 방사

선원이 배관의 중심에 위치하고 있으므로 방사선원의 바로 밑 지점을 제외하고는 경사각으로 입사하게 되어 중심에서 멀어질수록 경사각이 커져 실제적인 방사선 투과 두께가 증가하기 때문이다. 따라서 배관의 두께를 정확하게 평가하기 위해서는 거리에 따른 경사각과 이에 따른 투과두께의 증가를 고려해 주어야 한다.

Fig. 10은 Fig. 7의 점선의 상사 영역으로부터 구한 두께-농도 변화 관계식을 이용하여 투과 필름 상에서 측정된 농도 profile로부터 두께 profile을 구한 것이며 아울러 건전 배관을 기준으로 방사선 조사위치에 따른 투과두께를 계산하여 도시한 것이다. 결과적으로 배관의 중심부에서는 기하학적인 고려에 의해 계산된 두께와 측정된 농도 값으로부터 평가한 두께가 매우 잘 일치하고 있으나 배관의 가장자리로 갈수록 실제 두께와 평가 두께와의 차가 커지고 있다. 이는 산란 방사선에 의한 것으로 투과필름 상에서 농도측정에 의한 두께평가가 가능한 범위를 보여주는 것이다. 결과적으로 broad beam 조건과 방사선 검출기로 필름을 사용할 경우 이러한 현상은 피하기 어렵기 때문에 방사선투과 필름에서 density profile을 이용한 배관의 두께평가 시에는 동일 배관에 대해 각도를 달리하여 적어도 2회 이상의 촬영을 하여 농도 데이터를 수집할 필요가 있다.

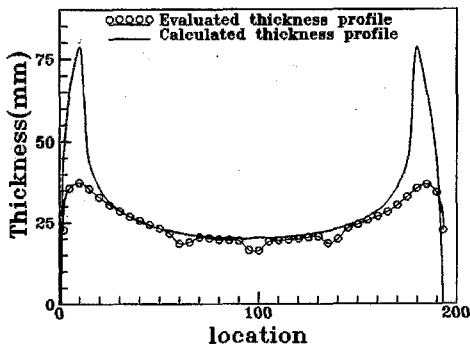


Fig. 10 Comparison of geometrically calculated thickness profile and evaluated thickness profile through density profile on a radiograph

## 5. 결론

1. 배관의 방사선투과시험과 관련하여 전산 시뮬레이션 결과, 일정 두께의 단열재로 싸여져 있는 배관의 경우는 탄소강 대비 단열재의 등가 두께를 고려한 노출조건을 설정으로 시험이 가능함을 확인하였다.

2. 배관 내부에 물과 같은 유체가 들어 있는 경우, 채워진 정도와 방사선 조사방향에 따라 시험결과가 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었고, 시험 시에는 유체의 종류와 양, 그리고 조사방향을 고려한 적절한 노출조건을 설정해 주어야 한다.
3. 노출량을 증가시키면 단위 두께변화에 대한 농도 차가 커지므로 분해능이 좋아지나 film radiography의 경우는 투과필름에서 농도가 무한히 증가하는 것이 아니므로 일정한 한계가 있다. 따라서 투과필름 상에서 배관의 중심부 농도가 포화농도 값을 넘지 않는 범위에서 노출량이 결정되어야 한다.
4. 결과적으로 본 연구에서 제안한, 투과필름에서 농도측정에 의한 두께 평가법을 배관에 적용할 경우 tangential radiography에 비해 짧은 노출시간으로 훨씬 넓은 영역을 검사할 수 있으므로 작업 생산성의 향상과 작업 종사자의 방사선 피폭을 크게 줄일 수 있다. 그러나 사용 방사선원(Ir-192)의 제한된 투과력과 공업용 필름에 작용하는 산란 방사선의 영향을 고려하면 단순히 1회 촬영만으로는 배관의 전 영역의 두께 변화를 확인하기는 어려우며 최소 2회 이상의 촬영과 배관의 둘레 방향 및 축 방향으로 거리에 따른 방사선의 실제 투과두께를 정확히 고려해 주어야만 평가의 정확도를 향상시킬 수 있다.

## 참고문헌

- [1] 사단법인 일본화학공업협회, 현장 보고서, pp. 44-46, (1983)
- [2] 이성식, 김영환, "Tangential Radiography를 이용한 배관의 두께 평가법", 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 3, pp. 205-210, (1998)
- [3] 이성식, 이정기, 김영환, "Film Radiography에서 농도차를 이용한 정량적 두께 평가에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 5, pp. 356-362, (1999)
- [4] B. D. Cullity, "Elements of X-ray Diffraction," 2nd Edition, Published by Addison Wesley, pp. 13-16, (1977)
- [5] Metals Handbook, 9th Edition, Vol. 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASM International, pp. 310-313