

식기세척 공정의 위생관리를 위한 Fault Tree Analysis

박애리 · 이승주 · 홍광원
동국대학교 식품공학과

Fault Tree Analysis on Utensil Washing for Food Safety Management

Aeri Park, Seung Ju Lee and Kwang Won Hong

Department of Food Science and Technology, Dongguk University

Abstract

FTA (fault tree analysis) was employed to manage utensil washing technique in more structured and refined manner. Qualitative analysis of FTA was made on minimal cut sets, structural importance and common cause vulnerability, and quantitative analysis of FTA on simulation, cut set importance, item importance and sensitivity. First, any possible fault events in utensil washing process were identified and a fault tree with the fault events was constructed in a hierarchical structure. Fault to wash utensils adequately was regarded as a top event on the fault tree, and the causes for the top event were tracked down through deductive method, resulting in nine basic events in the lowest hierarchical level on the fault tree. The most critical basic events, equivalent to critical control points in HACCP, were identified as failure of using a clean drier and failure of handlers' hygiene in drying process following washing process. In the washing process, the fault events in manual action (failure in manipulation, failure of using enough water and washing time) were analyzed as more critical than the fault events in cleaning effectiveness of detergent and washing tools (failures in hot water, effective detergent and effective dish-cloth availabilities). The orders in ranking of basic events as critical control points were consistent between qualitative and quantitative analyses. Consequently, it was found out that FTA could be a good alternative approach to determination of critical control points in HACCP.

Keywords: FTA (fault tree analysis), utensil washing, qualitative/quantitative analyses, HACCP, critical control point

서 론

식품의 안전관리는 식품의 가공 유통 등의 전체 분야에서 매우 중요한 위치를 차지한다. 아무리 좋은 기호도, 기능성, 건강성 등의 면에서 고품질의 식품이라 할지라도 위생적인 문제가 제기되면 그 가치를 상실하기 때문이다. 식품의 안전 관리를 위하여 대표적인 시스템으로 HACCP(hazard analysis and critical control point), SSOP(sanitation standard operating procedure), GMP(good manufactur-

ing practices)가 작업자, 시설, 가공장치, 유통 등의 위생관리를 위하여 도입되었다(Yoo & Kim, 2000; Snyder, 1991; Lee et al., 1999). 그러나 기존 방법 들에는 여전히 개선할 점들이 노출되어 새로운 방법들이 개발되고 있다. 예를 들어 HACCP의 중요 관리점(critical control point) 선정, 허용한계치(critical limit)의 결정 등에 대한 정량적 분석법으로 QMRA(quantitative microbial risk assessment)가 적용된 바 있으며(Im & Lee, 2006; Im et al., 2007), 최근 들어 HACCP의 강력한 보조수단으로 FTA(fault tree analysis)의 도입 가능성이 보고되었다(Bertolinia et al., 2007).

FTA는 안전관리 시스템으로서 위생관리를 사후가 아닌 사전 관리로 함에 HACCP와 동일한 목적을 갖는다. 그 역사를 보면 1962년에 미사일 발사

Corresponding author: Seung Ju Lee, Professor, Department of Food Science and Technology, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea.

Phone: +82-2-2260-3372, Fax: +82-2-2260-3372

E-mail: Lseungju@dongguk.edu

제어시스템의 안전관리를 위하여 최초로 개발되어 현재는 안전을 중요시하는 여러 산업 현장에 실용화되어 있다(Center for Chemical Process Safety, 1989). FTA는 HACCP와 같이 안전관리 대상을 최소화하여 중요관리점을 결정하여 관리함을 기본으로 한다. 서로 다른 점으로 HACCP는 일반적으로 생산 공정을 구성하는 단위 공정을 중요관리점의 대상으로 하지만, FTA의 중요관리점은 각 단위 공정을 구성하는 실제 작업자의 행위, 가공 장치의 작동, 시설 관리 등의 구체적인 작업 요소를 대상으로 한다. 따라서 HACCP의 경우 중요관리점의 관리조건에 따라 그 공정을 구성하는 여러 단위 작업 요소들의 우선 순위나 유기적인 관계를 고려하지 않고 작업 요소를 획일적으로 관리한다. 그러나 FTA는 직접적으로 작업 요소를 평가하고 중요관리점으로 지정하기 때문에 작업자의 교육상태나 시설 및 장치의 막연한 관리에 의존함이 없이 매우 구체적이며 단순하게 현장을 관리할 수 있다. 또한 FTA는 HACCP와는 달리 정성적 분석 및 정량적 분석이 모두 가능하다(Coudert & Madre, 1994). HACCP에 정량적 분석의 기능을 부여하기 위하여 도입된 QMRA는 미생물적 위해만을 대상으로 할 수 있으며, 또한 정량적으로 선정되는 중요관리점의 대상이 단위 작업 요소가 아닌 더 큰 단위인 공정만이 될 수 있다는 제한 점을 갖는다.

한편 요식업(catering business) 위생의 가장 기본적인 관리 대상으로 손 닦기(hand washing), 식기 세척(washing of utensils), 조리기구 세척(cleaning of surfaces and equipment) 등을 들 수 있는데, 이에 대한 현장 중심적인 차원의 연구가 일부 진행된 바 있다(Clayton & Griffith, 2004). 대부분의 식중독은 그 오염원이 조리기구 및 용기, 종사자의 손 등을 통하여 음식에 혼입됨에 따라 발생하므로, 특히 조리기구 및 용기, 종사자의 손에 대한 위생 관리가 매우 강조되어 왔다(Bobeng & David, 1978; Savage, 1995). 손 닦기는 크게 비누계열의 세제를 사용하는 경우와 알코올계열의 세제를 사용 경우로 구분되어 그 세부적인 수행 지침이 마련되었다. 식기 및 조리기구의 세척에 대한 실제 현장에서의 위생 작업 분석이 실시되어, 세척 횟수 등에 대한 세부 강령이 제시되었다. 그러나 세부 강령의 대상인 작업 요소들의 효과적인 관리를 위한 유기적인 관계의 분석 및 중요관리점의 설정에 대한 보고는 전무한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 작업 요소의 유기적 관계와 중요관리점에 대한 정성적/정량적 분석이 가능한 FTA를 요식업 위생관리의 식기 세척 과정에 적용하여 case study를 수행하였다. 즉, 식기 세척의 위생 관리에 문제를 일으키는 작업 요소를 연역적인 논리 방법으로 추론하고 정성적/정량적 분석을 통하여 HACCP의 기본 개념인 중요관리점에 대한 분석 기능을 향상시킬 수 있는 새로운 관리 시스템의 도입을 시도하였다.

재료 및 방법

Fault tree의 구축

Fault tree는 Fig. 1과 같은 과정에 따라 개발한다. 먼저 top event를 정하고 연역적인 논리방식으로 잘못을 일으킬 수 있는 오류의 원인을 단계적으로 탐색하여 tree 시스템을 구축한다. Fault tree의 최하단부는 소 단위의 작업 요소로 구성된다. Fault tree의 논리연산에는 Boolean 대수를 사용하며, 논리요소로서 AND gate는 상부 event가 일어나기 위해 논리 기호 밑에 연결되어 있는 하부사건이 동시에 일어나야 하므로 곱셈 기호(*)의 의미를 지니며, OR gate는 상부 사건이 일어나려면 논리기호에 연결된 여러 하부사건 중 최소한 임의의 한 사건만 일어나도 가능하므로 덧셈 기호(+)의 의미를 갖는다(Vesely et al., 1981).

Fig. 2는 식기 세척 과정의 수세 event에 대한 fault tree로써 이를 예로 하여 fault tree 개발 방법을 설명하였다. 먼저, top event(A)는 event(C)와 event(D)로 구성된다. 이 중간 events는 최하단 작업 요소(basic event)로 구성된다.

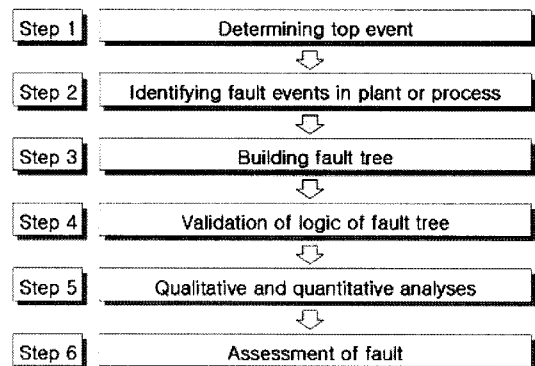


Fig. 1. General procedure of fault tree analysis.

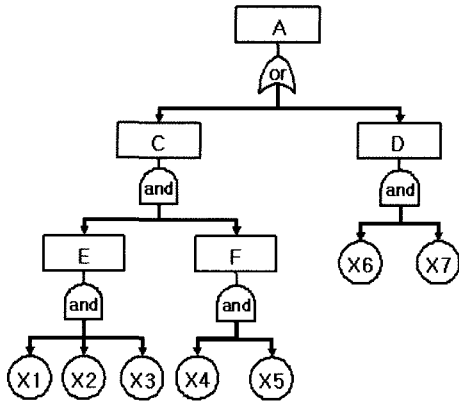


Fig. 2. Example of fault tree diagram with top event (A) as a part of whole fault tree diagram shown in Fig. 3.

정성적 분석

Fault tree의 정성적 분석으로 minimal cut sets, structural importance, common cause vulnerability 를 결정한다(Vesely et al., 1981; Lee et al., 1985).

Minimal cut sets란 top event(A)가 잘못될 수 있는 가장 단순하고 논리적으로 동일한 basic event를 모아놓은 집합을 의미한다. 즉, 주어진 fault tree에서 gate 식을 쓰면 다음과 같다.

$$\text{Top} = C + D \tag{1}$$

여기서, $C=E \cdot F$, $D=X_6 \cdot X_7$, $E=X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$, $F = X_4 \cdot X_5$ 이다. 중간 event(C)의 basic events를 모두 적용시킨 gate 식은 다음과 같다.

$$C = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 \tag{2}$$

결국, top event는 basic events만으로 다음과 같이 표시된다.

$$\text{Top} = C+D = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + X_6 \cdot X_7 \tag{3}$$

상기의 경우에는 Boolean 대수를 사용하여 불필요한 과잉사건들을 소거할 대상이 없으므로 Boolean-indicated cut set는 최종 2개의 minimal cut sets로 결정된다.

$$\text{Top} = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + X_6 \cdot X_7 \tag{4}$$

Structural importance는 각각의 minimal cut sets

가 top event의 오류에 기여하는 기여도로서 만약 각 basic event의 잘못될 확률($P < 1$)이 모두 같다고 가정하면 여러 항의 곱이 단일 항의 곱보다 더 작아지므로 적은 수의 basic event로 구성된 minimal cut set이 더 큰 importance를 갖는다. 식 (4)에 나타난 2개 minimal cut sets의 각 basic event의 오류 확률이 모두 같다고 가정하면 top event(A)의 fault tree에서 structural importance의 1순위는 X_6, X_7 를 포함하는 minimal cut set이며, 2순위는 X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 를 포함하는 minimal cut set로 평가된다.

Common cause vulnerability 분석은 minimal cut sets를 구성하는 basic events 오류의 근원을 분석하여 top event 오류에 대한 공통의 원인을 결정하는 것이다. Fig. 2의 top event(A)에 대한 2개의 minimal cut sets의 basic events는 ‘human’이 근본적인 원인이 되는 작업 요소 $X_{4h}, X_{5h}, X_{6h}, X_{7h}$ 와 ‘material’과 원인이 되는 X_{1m}, X_{2m}, X_{3m} 으로 구분한다. 따라서 식(4)는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Top} = X_{1m} \cdot X_{2m} \cdot X_{3m} \cdot X_{4h} \cdot X_{5h} + X_{6h} \cdot X_{7h} \tag{5}$$

여기서 minimal cut set($X_{1m} \cdot X_{2m} \cdot X_{3m} \cdot X_{4h} \cdot X_{5h}$)의 3 개 요소는 ‘material’의 오류에 근원하고, 두 개의 요소는 ‘human’ 오류에 있으므로, ‘material’과 ‘human’는 top event 오류에 대한 공통의 원인이 될 수 없다. 반면에 minimal cut set($X_{6h} \cdot X_{7h}$)에서 모든 요소가 ‘human’의 오류에 기인되므로 ‘human’의 오류를 top event의 공통적인 원인으로 판정한다.

정량적 분석

Fault tree의 정량적 분석으로 top event의 오류확률을 simulation하며, cut set importance, item importance, sensitivity를 결정한다(Vesely et al., 1981; Lee et al., 1985). P_f (failure probability)는 작업요소가 잘못될 확률로써 예를 들면, P_{X_1} 는 최하단의 X_1 로 표시된 basic event가 잘못될 확률을 의미한다. 먼저 tree 연산의 기본인 덧셈과 곱셈의 방법의 예는 식(6)와 식(7)와 같다. 단, $P_X = P_Y = 0.01$ 로 가정한다.

$$P_X \cdot P_Y = 0.01^2 = 1.0 \times 10^{-4} \tag{6}$$

$$P_X + P_Y = 1 - (1 - 0.01)(1 - 0.01) = 0.0199 \tag{7}$$

Fig. 2의 top event의 오류확률의 simulation은 각 basic event의 오류 확률이 $P_{X1} = P_{X2} = P_{X3} = P_{X4} = P_{X5} = P_{X6} = P_{X7} = 0.003$ 일 때 식(4)를 식(6)와 식(7)의 방식으로 풀이한 결과는 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{top} &= P_{X1} * P_{X2} * P_{X3} * P_{X4} * P_{X5} + P_{X6} * P_{X7} \\
 &= 1 - (1 - P_{X1} * P_{X2} * P_{X3} * P_{X4} * P_{X5})(1 - P_{X6} * P_{X7}) \\
 &= 1 - (1 - 2.43 \times 10^{-13})(1 - 9.0 \times 10^{-6}) = 9.0 \times 10^{-6} \quad (8)
 \end{aligned}$$

Cut set importance(I_c)는 전체 오류 확률에 대한 각 minimal cut set 오류 확률의 비율로서 각 minimal cut set의 중요도를 의미한다. 식(4)에 나타난 2개 cut set 오류 확률의 각각의 비율은 다음과 같이 계산된다.

$$I_c(X1 * X2 * X3 * X4 * X5) = (P_{X1} * P_{X2} * P_{X3} * P_{X4} * P_{X5}) / P_{top} \quad (9)$$

$$I_c(X6 * X7) = (P_{X6} * P_{X7}) / P_{top} \quad (10)$$

여기서, 식(9)은 5개의 basic events로 구성된 minimal cut set의 importance, 식(10)은 2개의 basic events로 구성된 minimal cut set의 importance를 계산하는 예이다.

Item importance(I_i)는 전체 오류 확률에 대한 특정 basic event가 포함된 모든 cut set 오류 확률 합 의 비율로서 각 basic event의 중요도를 의미한다.

$$I_i(X1) = I_i(X2) = I_i(X3) = I_i(X4) = I_i(X5) = (P_{X1} * P_{X2} * P_{X3} * P_{X4} * P_{X5}) / P_{top} \quad (11)$$

$$I_i(X6) = I_i(X7) = (P_{X6} * P_{X7}) / P_{top} \quad (12)$$

여기서, 식(11)과 식(12)는 1개의 minimal cut set에만 포함되는 basic event의 importance를 계산한 예이다

Sensitivity(S)는 각 basic event의 오류 확률의 변화에 대한 전체 오류 확률의 변화율로서 편미분함수로 표현되며 이는 각 basic event의 중요도의 순위를 산출한다. 즉, 식(8)에 나타난 P_{top} 를 전개하여 다음과 같이 적용한다.

$$\begin{aligned}
 S_{X1} &= \partial(P_{top}) / \partial(P_{X1}) = P_{X2} * P_{X3} * P_{X4} * P_{X5} - \\
 &P_{X2} * P_{X3} * P_{X4} * P_{X5} * P_{X6} * P_{X7} = 8.099 \times 10^{-11} \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{X6} &= \partial(P_{top}) / \partial(P_{X6}) = P_{X7} - P_{X1} * P_{X2} * P_{X3} * P_{X4} * \\
 &P_{X5} * P_{X7} = 3.0 \times 10^{-3} \quad (14)
 \end{aligned}$$

여기서, 식(13)과 식(14)는 X1와 X6의 sensitivity를 계산한 예이다.

결과 및 고찰

Fault tree의 개발

Fault tree의 작성은 top event인 식기 세척의 위생관리 상태에 오류를 일으키는 원인을 연역적 논리 방식에 따라 추적하여 최하단의 basic events를 그 종점으로 하여 완성하였다(Fig. 3). Top event인 식기 세척의 위생관리 상태에 오류가 발생하기 위한 원인을 일반 요식업을 대상으로 조사한 결과 수세 과정의 오류(A)와 식기 말리기 과정의 오류(B)가 주 원인으로 나타났다. 수세에 오류가 있으면 절대적으로 위생상태에 문제가 발생하며 또한 식기 말리기에 오류가 발생하면 아무리 수세가 성공적으로 되었다 할지라도 역시 위생상태에 문제가 발생한다. 따라서 A 와 B 의 관계는 독립적 논리 관계를 나타내므로 OR gate로 연결하였다.

수세 과정 오류(A)의 발생은 식기 닦기 과정의 오류(C)와 식기 행구기 과정의 오류(D)에 의하며, 두 가지 event의 논리 관계는 서로 독립적으로 A 에 작용하므로 OR gate로 연결하였다.

식기 닦기 과정의 오류(C)의 원인은 크게 부적절한 세척제 및 도구에 의한 오류(E)와 작업자의 수작업의 잘못에 의한 오류(F)이므로, 두 가지 event의 논리 관계는 서로 보완적으로서 즉 오류가 나기 위해서는 동시에 각 오류가 발생해야 하므로 서로 종속적 논리 관계를 나타내는 AND gate로 연결하였다. Event(E)를 야기하는 원인은 더운물의 입수

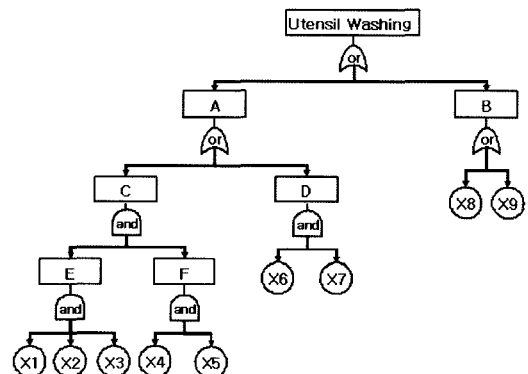


Fig. 3. Fault tree diagram with top event of utensil washing.

실패(X1), 세제의 불량(X2), 수세미의 불량(X3)으로 서로 보완적 관계이므로 AND gate로 연결하였다. Event(F)는 수작업의 숙련도 부족(X4)과 세척 시간 및 횟수의 부족에 의한 오류(X5)에 의해 발생하는데, X4의 발생에 의하여 반드시 F가 파생된다고 할 수 없고 X5에 의하여 F의 발생을 단정할 수 없다. 그러므로 그 논리 관계를 동시에 일어나야 하는 의미인 AND gate로 연결하였다.

식기 행구기의 오류(D)를 발생시키는 2가지 basic events는 세척수의 사용량 부족에 의한 오류(X6)와 흐르는 세척수의 사용 여부에 의한 오류(X7)이므로, 동시에 발생할 경우에 D가 일어난다고 보는 것이 타당하여 AND gate로 연결하였다. 행구기 단계의 오류는 세제의 잔류에 의한 화학적 위해에 의한 오류인 반면에 이를 제외한 중간 event는 미생물적 위해에 중점을 둔다.

식기 말리기 과정의 오류(B)가 발생할 원인을 분석한 결과 식기 건조기의 청결상태의 불량(X8)과 작업자의 비위생적인 취급에 의한 오류(X9)로 판정되었고 두 가지 event의 논리 관계는 서로 독립적으로 B에 원인이 되므로 OR gate로 연결하였다.

최종적으로 Fig. 3과 같은 fault tree를 완성하였으며 이는 중간 events인 A, B, C, D, E, F와 basic events인 X1-X9로 구성되었다.

정성적 분석

Fault tree에 대하여 정성적으로 minimal cut sets, structural importance, common cause vulnerability를 분석하였다. 식기 세척의 위생 관리 상태에 대하여 완성된 Fig. 3에 대하여 먼저 minimal cut sets를 식(1)-식(4)와 같은 방식으로 산출한 결과는 Fig. 4와 같다. 즉, 1개의 basic events로 구성된 minimal cut sets 2개, 2개의 basic events로 구성된 minimal cut set 1개, 5개의 basic events로 구성된 minimal cut set 1개로 분석되었다. Minimal cut sets란 top event 오류를 일으키는데 적어도 필요한 basic events의 sets로서 각 set는 오류를 발생에 독립적인 관계에 있으므로 모두 OR 논리의 관계로 구성된다. Minimal cut sets 내의 basic events는 동시에 오류가 발생해야만 top event의 오류를 야기시키므로 모두 AND 논리회로로 연결된다. 결국 최초로 만들어진 복잡한 fault tree인 Fig. 2의 논리 관계를 minimal cut sets 정성적 분석을 통하여 보다 단순하고 이해하기 쉬운 fault tree인 Fig. 4로 변환할 수 있었다.

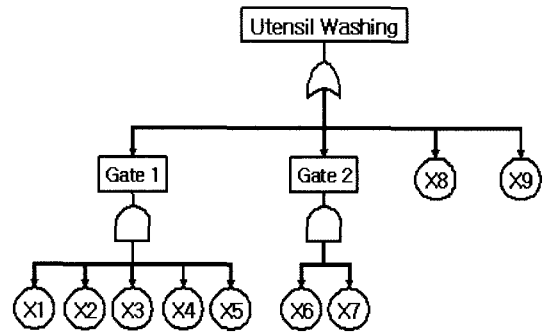


Fig. 4. Fault tree diagram with reformed structure by minimal cut sets.

Structural importance의 분석에서는 minimal cut sets를 구성하는 basic events의 수가 많을수록 top event 오류 확률에 대한 cut sets의 기여도가 낮아짐을 의미한다(단, basic events의 오류 확률이 모두 동일할 경우). 따라서 1개 basic event로 구성된 2개의 sets X8, X9는 X6와 X7로 구성된 set보다 top event의 오류발생에 더 큰 몫을 하며 또한 X1, X2, X3, X4, X5로 구성된 set는 오류발생의 원인 제공에 대한 기여율이 가장 낮게 나타났다(Table 2). 이로부터 오류발생을 방지하기 위해 중요하게 관리해야 하는 대상은 식기 말리기, 행구기, 닦기의 순임을 알 수 있었다. 결과적으로 식기 말리기의 basic events인 건조기의 청결상태 및 작업자의 비위생적인 취급이 중요관리점으로 판정되었다. 즉, 세척 환경 및 작업자로부터 교차오염이 top event의 오류에 가장 크게 영향을 끼친 것으로 분석된다. 미생물학적 위해 분석을 통하여 조리 환경 및 조리종사자의 위생이 중요한 위해 요소임이 입증된 바 있다(Park et al., 2000). 즉, 중요관리점을 정량적으로 분석하는 QMRA에 비하여 FTA는 정성적으로도 중요관리점의 분석이 가능함을 보였다. 따라서 FTA의 HACCP에 대한 보조수단으로서의 우수성을 타진할 수 있었다.

Common cause vulnerability의 분석을 통하여 minimal cut sets의 basic events에 오류를 일으키는 근본적인 원인을 분석하여 top event 오류에 대한 공통의 원인을 결정하였다. 식기 세척의 위생 관리 상태의 basic events는 작업자의 판단으로 인한 행위와 세척제 및 도구의 불량에 의해 오류에 의한 것으로 판정되었다. 즉, 'human'이 근본적인 원인이 되는 basic events는 X4, X5, X6, X7, X8, X9,이며 'material'이 원인이 되는 basic events는

Table 1. Basic events or causes of faults and their probability of occurrence in utensil washing

Cause identification	Cause description	P_F^*
A	Cleaning error	
C	Washing error	
E	Failure of cleaning effectiveness of detergent and washing tools	
X1	Failure of hot water availability	3×10^{-3}
X2	Failure of effective detergent availability	3×10^{-3}
X3	Failure of effective dishcloth availability	3×10^{-3}
F	Manual action error	
X4	Failure in manipulation	3×10^{-3}
X5	Failure of use of enough water and washing times	3×10^{-3}
D	Rinsing error	
X6	Failure of using enough water	3×10^{-3}
X7	Failure of using running water	3×10^{-3}
B	Drying error	
X8	Failure of using clean drier	3×10^{-3}
X9	Failure of handlers' hygiene	3×10^{-3}

* probability that the cause of fault occurs.

X1_m, X2_m, X3_m으로 분석되었다(Table 2). Fig. 4의 gate 1으로 표기된 minimal cut set은 X1_m, X2_m, X3_m, X4_h, X5_h으로 각 basic events의 성질이 동일하지 않아 오류를 일으키는 공통적 원인이 존재하지 않는다. Gate 2로 표기된 minimal cut set는 'human'이 근본적인 원인이 되는 basic events인 X6_h, X7_h로 구성되어 있으므로 'human'의 오류를 top event의 공통적인 원인으로 판정하였다. 또한 1개의 basic event로 구성된 2개의 minimal cut sets의 근본적인 원인도 'human'으로 나타났다. 이로부터 'human'이 식기 세척의 위생 관리의 취약점임을 알 수 있었다. 즉, 식기 세척의 위생 관리 상태의 오류는 식기 세척에 대한 교육을 실시하여 사람의 판단 및 행위에 의한 오류를 최소화함으로써 방지할 수 있다.

정량적 분석

Fault tree에 대하여 정량적으로 simulation, cut set importance, item importance, sensitivity를 산출하였다. Top event인 식기 세척의 잘못을 야기시키는 원인들(basic event)의 오류 확률(P_F)은 사람에 의한 판단 및 행위에 대한 것으로 일반적으로 사람에 의한 오류 확률로 보고된 0.003으로 간주하였다(Serra et al., 1999; Browning, 1980)(Table 1). 최종 top event의 오류 확률은 basic events 각각의 오류 확률 보다는 fault tree 구성에 따른 상호 연산에 의하여 좌우되므로 사람 이외에 도구와 관련된 basic event

Table 2. Results of qualitative analysis: structural importance and common cause vulnerability according to minimal cut sets

minimal cut sets	Structural importance*	Common cause vulnerability**
X8	High	X8 _h
X9	High	X9 _h
X6 / X7	Middle	X6 _h / X7 _h
X1 / X2 / X3 / X4 / X5	Very low	X1 _m / X2 _m / X3 _m / X4 _h / X5 _h

*High: higher vulnerability, Middle: middle vulnerability, Low: low vulnerability.

**h, m: mean human-oriented and material-oriented, respectively.

의 오류 확률에도 같은 값을 부여하였다.

Top event의 오류 확률을 식(6)~식(8)와 같은 방식으로 simulation한 결과 $P_{top} = 5.999 \times 10^{-3}$ 로 산출되었다. 즉, 주어진 조건에서 식기 세척의 위생관리 상태에 대한 오류 확률을 산출하여 식기에 의한 위생 문제의 발생 가능성을 예측할 수 있었다. $P_{top} = 5.999 \times 10^{-3}$ 는 1000번의 시행 중 약 6번 오류가 발생할 가능성을 의미하는데 타 기계작업 분야의 사람에 의한 오류 확률인 0.003을 사용하였기에 그 값이 매우 낮게 나타난 것으로 보인다. 만약 앞으로 식품관련 작업 오류 확률이 연구되어 그 객관적인 값이 결정된다면 실제 P_{top} 은 더 증가할 것으로 예상된다. 오류 확률의 simulation은 최종 균 농도를 simulation하는 QMRA의 exposure assessment보다 그 수치 의 의미가 더 유용함을 알 수 있다. 즉,

QMRA(Parsons et al., 2005; No et al., 2003; Im & Lee, 2006)의 경우 예측된 미생물 농도에 대한 판정 기준의 가정이 추가되어야만 최종 위해(risk)에 대한 결론이 내려지는데 반하여, FTA는 산출결과가 직접 위해 발생의 확률을 의미하기 때문이다. 또한 QMRA의 simulation은 단지 미생물 농도에 관해서만 가능한데 비하여 FTA는 특정 위해 요소에 구애 받지 않고 simulation이 가능하다.

Cut set importance(I_k)는 각 minimal cut sets가 top event 오류 확률에 기여하는 정도를 의미하는 수치로서 식(9)과 식(10)와 같은 방식으로 산출하였다(Table 3). 순위는 총 3 그룹으로 구분되었으며 제 1 순위는 basic events의 수가 1개로 구성된 minimal cut set($I_k = 0.5$), 2 순위는 2개로 구성된 set($I_k = 1.5 \times 10^{-3}$), 3 순위는 5개로 구성된 set($I_k = 4.051 \times 10^{-11}$)이다. 이 결과는 structural importance의 분석 결과와 일치되게 나타났다. 즉, 1 순위에 소속된 basic events인 X8, X9; 2개 요소로 구성된 set 내의 basic events인 X6, X7; 5개 요소로 구성된 set 내의 basic events인 X1, X2, X3, X4, X5의 순으로 식기 세척의 위생관리에 대한 우선 순위를 정할 수 있었다.

Item importance(I_i)는 각 basic events가 top event 오류 확률에 기여하는 정도를 의미하는 수치로서 식(11)과 식(12)와 같은 방식으로 산출하였다(Table 4). 순위는 총 3 그룹으로 구분되었으며 제 1 순위 그룹에는 X8, X9($I_i = 0.5$); 2 순위 그룹에는 X6, X7($I_i = 1.5 \times 10^{-3}$); 3 순위 그룹에는 X1, X2, X3, X4, X5($I_i = 4.051 \times 10^{-11}$)의 basic events가 포함되었다. 이는 각 basic events의 중요 관리 순서로써 정성적 분석인 structural importance와 정량적 분석인 cut set importance의 결과와 일치한다. Item importance와 cut set importance의 분석 결과는 그 경향 뿐 아니라 값 또한 일치하는데 이는 basic events의 중복이 없기 때문에 basic events가 소속되어 있는 minimal cut sets의 분석이 곧 basic events의 분석을 대변하게 되는 것이다.

Sensitivity(S)는 각 basic events의 오류 확률의 변화에 대한 top event 오류 확률 변화의 민감도로서 식(13)과 식(14)와 같은 방식으로 산출하였다(Table 4). 순위는 총 3 그룹으로 구분되었으며 제 1 순위 그룹에는 X8, X9($S = 0.997$); 2 순위 그룹에는 X6, X7($S = 2.7 \times 10^{-8}$); 3 순위 그룹에는 X1, X2, X3, X4, X5($S = 8.0515 \times 10^{-11}$)의 순으로 각 basic events의 중요 관리 순서를 정할 수 있었다. 즉, X8,

Table 3. Results of quantitative analysis: cut set importance according to minimal cut sets

minimal cut sets	Cut set importance (I_k)
X8	0.5
X9	0.5
X6 / X7	1.5×10^{-3}
X1 / X2 / X3 / X4 / X5	4.051×10^{-11}

Table 4. Results of quantitative analysis: item importance and sensitivity according to individual basic sets

Basic event	Item importance(I_i)	Sensitivity(S)
X1	4.051×10^{-11}	8.0515×10^{-11}
X2	4.051×10^{-11}	8.0515×10^{-11}
X3	4.051×10^{-11}	8.0515×10^{-11}
X4	4.051×10^{-11}	8.0515×10^{-11}
X5	4.051×10^{-11}	8.0515×10^{-11}
X6	1.5×10^{-3}	2.7×10^{-8}
X7	1.5×10^{-3}	2.7×10^{-8}
X8	0.5	0.997
X9	0.5	0.997

X9에 대하여 우선적으로 관리되어야 하는 사실은 정성적 분석인 structural importance와 정량적 분석인 cut set importance 및 item importance의 결과와 일치한다.

이와 같은 분석 결과를 통해 식기 세척의 위생관리에서는 특히 식기의 수세 후 말리기 과정의 중요성을 인지할 수 있었으며 말리기 과정에서의 작업자의 위생적인 식기의 취급과 식기 건조기의 청결 상태에 대하여 우선적으로 관리되어야 함을 제시할 수 있었다. 본 연구를 통하여 식기 세척 공정의 위생관리의 오류 발생에 유기적 관계를 맺는 basic events의 분석을 수행하였고 basic events의 관리 순위를 부여함으로써 단순한 현장 관리를 통하여 전체 공정의 오류를 방지할 수 있는 가능성을 알 수 있었다. 결과적으로 FTA를 통하여 식품 생산의 위해를 일으키는 구체적인 원인을 작업 요소의 단위로 미리 인지할 수 있으므로 fault tree의 적용은 HACCP의 보조수단으로서 기존 방법들에 비하여 더 실용적일 것으로 기대된다.

요 약

안전 관리의 정성적/정량적 기법인 FTA(fault tree analysis)를 식기세척의 위생관리에 적용하였다. 이는 식품의 위생 관리를 위해 적용되고 있는 HACCP에 FTA를 도입하여 위생관리의 신뢰성과 효율성을

향상시키기 위한 새로운 시도이다. 식기 세척의 위생관리의 오류 원인을 연역적 논리 방식에 의한 tree의 계층 분석을 통하여 완성하였고 fault tree는 top event, 중간계층 event, 최하단의 작업요소(basic event)로 구성되었다. Basic events는 식기 닦기 과정에서 더운물의 입수 실패, 세제의 불량, 수세미의 불량, 수세 작업의 숙련도 부족, 세척 시간 및 횟수의 부족에 의한 오류; 식기 행구기 과정에서의 필요한 세척수의 사용량 부족에 의한 오류, 흐르는 세척수의 사용 여부에 의한 오류; 식기 말리기 과정에서 식기 건조기의 청결상태의 불량, 작업자의 비위생적인 취급에 의한 오류로 분석되었다. 이로부터 오류의 원인 분석 및 관리 지침을 도출하기 위하여 정성적/정량적 분석을 실시하였다. 정성적 기법으로 minimal cut sets, structural importance, common cause vulnerability를 분석하였고, 정량적 기법으로 simulation, cut set importance, item importance, sensitivity를 분석하였다. 식기세척 위생관리 상태(top event)에 대하여 FTA를 실시한 결과 말리기 과정의 작업요소(건조기 청결상태, 작업자 위생상태)가 제일 중요관리점(오류를 일으키는 원인)으로 분석되었다. 수세 과정에서는 도구의 작업요소(더운물 사용, 세제, 수세미의 청결상태)보다는 수작업의 작업요소(숙련도, 시간 및 횟수)가 더 중요한 관리점으로 평가되었다. 중요관리점의 순위는 정성적 분석과 정량적 분석에서 모두 동일하게 나타났다. 결과적으로 이와 같은 FTA의 정성적/정량적 분석 기능은 HACCP의 CCP의 분석에 충분히 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

Bertolinia M, Rizzia A and Bevilacqua M. 2007. An alternative approach to HACCP system implementation. *J. Food Eng.* **79(4)**: 1322-1328

Bobeng BJ and David BD. 1978. HACCP models for quality control of entree production an hospital foodservice systems(I). *J. Am. Diet. Assoc.* **73**: 524-529

Browning RL. 1980. *The Loss Rate Concept in Safety Engineering*. M. Dekker, Inc., New York, USA

Center for Chemical Process Safety. 1989. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. AIChE, New York, USA

Clayton D and Griffith CJ. 2004. Observation of food safety practices in catering using notational analysis. *British Food J.* **106(3)**: 211-227

Coudert O and Madre JC. 1994. MetaPrime: An Interactive fault-tree analyzer. *IEEE Trans. Reliability* **43(1)**: 121-127

Im MN and Lee SJ. 2006. Application of fuzzy math simulation to quantitative risk assessment in pork production. *Korean J. Food Sci. Technol.* **38(4)**: 589-593

Im MN, Lee SJ and Lee KG. 2007. Quantitative risk assessment modeling for *Staphylococcus aureus* in sushi. *Food Eng. Prog.* **11(2)**: 77-83

Lee SY, Jang YS and Choi HJ. 1999. Current status and further prospect on HACCP Implementation in Korea (specially on catering). *Food Ind. and Nutr.* **4(3)**: 14-26

Lee WS, Grosh DL, Tillman FA and Lie CH. 1985. Fault tree analysis, methods, and applications-a review. *IEEE Trans. Reliability* **34**: 194-203

No MJ, Jeong MS and Park JY. 2003. Predicting the contamination of *Listeria monocytogenes* and *Yersinia enterocolitica* in pork production using Monte Carlo simulation. *Korean J. Food Sci. Technol.* **35(5)**: 928-936

Park HK, Kim KI, Shin HW, Kye SH and Yoo WC. 2000. Evaluation of microbiological hazards of cooking utensils and environment of mass catering establishments. *J. Fd Hyg. Safety* **15(4)**: 315-323

Parsons DJ, Orton TG, D'Souza J, Moore A, Jones R and Dodd CER. 2005. A comparison of three modelling approaches for quantitative risk assessment using the case study of *Salmonella spp.* in poultry meat. *Int. J. Food Microbiol.* **98(1)**: 35-51.

Savage RA. 1995. Hazard analysis critical control point: a review. *Food Rev. Int.* **11(4)**: 575-595

Serra JA, Domenech E, Escriche I and Martorell S. 1999. Risk assessment and critical control points from the production perspective. *Int. J. Food Microbiol.* **46**: 9-26

Snyder OP. 1991. HACCP in the retail food industry. *Dairy Food and Environ. Sanitat.* **11(2)**: 73-81

Vesely WE, Goldberg FF, Roberts NH and Haasal DF. 1981. *Fault Tree Handbook*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., USA

Yoo HC and Kim JW. 2000. Development of generic HACCP model for practical application in mass catering establishments. *Korean J. Soc. Food Sci.* **16(3)**: 232-244