

화재안전설계의 분석기법

(Analytical Methods For Firesafety Design)

이 상 돈 / 기획운영실

화재안전 설계란 궁극적으로 화재시 인명피해를 최소로 줄이고 재산상 손실을 가능한 한 적게 하기 위해서 화재의 제반특성을 예측하여 이를 건물설계시 반영시키는 것이라 하겠다. 이러한 화재 해석 방법으로서 최근 구미등에서 각광을 받고 있는 분석기법을 미국 국립화재 연구위원회(National Research Council Workshop on Fire)의 James Quintiere 씨가 발표한 논문을 바탕으로 소개하고자 한다.

1. 개 요

설계의 분석기법 (Analytical Methods)이란 과학적 원리를 바탕으로 설계의 정확성을 평가할 수 있는 수치적 계산력으로 정의할 수 있다. 설계시의 제반 사항에 분석기법을 이용할 수 있는데, 복잡한 설계에서 모든 구성요소들의 상호작용 관계를 예측하기란 거의 불가능하다. 그러나 분석기법에서 이용할 수 있는 인자 (Parameter)를 바탕으로 시스템을 이해하면 각개 요소들을 해석 가능한 부분으로 분할할 수 있다.

그리고 이들 분할 부분들을 해석함으로써 최종적인 시스템설계를 할 수 있게 된다.

화재 그 자체는 복잡한 물리적 화학적 시스템이며 이에 건물구조와 사람에게 미치는 영향까지 포함시키면 해석하기가 더욱 어렵게 된다. 화재안전에 대한 전체적인 범주는 화재안전공학과 화재안전 설계에 해당하는데, 이 분야에 대한 연구가 지난 25년 동안에 많이 이루어져 왔으며 이들

연구는 분석기법의 발전을 도모하여 왔다. 그럼에도 불구하고 현재 실행되는 대부분의 설계에 있어서는 분석기법이 아니라 과학적분석의 과정을 거치지 않은 특정코드나 기준에 바탕을 두고 있는 점으로 볼 때 이 분석기법의 발전이 아직은 미흡함을 알 수 있다.

현재의 설계과정과 분석기법에 의한 설계과정의 차이점을 그림 1에 도표로써 나타내었다. 대부

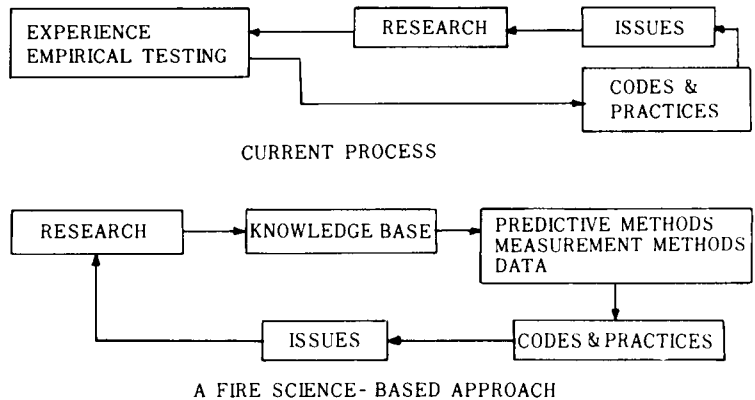


그림 1. 화재안전설계 비교 Flow Chart

분 성능등급의 기준은 합의에 의해 이루어져 왔으며, 성능사양도

과학적 타당성이 없이 이루어져 왔다. 예를 들면, “복도 내장재

는 특정 연소시험에서 75이하의 등급을 받아야 한다”는 조건은 성능 정도를 나타내는 것이다. 이에 대한 분석기법을 바탕으로 하는 성능평가 대체 방안이 개발되어야 하는데, 예컨대 “내장재료는 주어진 발화강도에서 주어진 시간 동안 화염전파를 허용치 않아야 된다”와 같다. 여기에서 성능변수의 정확한 값은 중요치 않고 다만 현재의 안전기준과 분석 기법에 의한 평가를 매치시킬때 중요하게 될 것이다.

화재안전 설계에 분석기법을 적용할 수 있는 정도를 평가하는 것은 다음의 두 요소에 따른다. 즉 첫째, 상호작용 등을 충분히 예측할 수 있는 지식바탕이며, 둘째로는 화재안전코드나 기준을 적용하는 과정에서 발생하는 실제문제점과 분석 능력 사이의 관계를 알아낼 수 있는 용이성이다. 여기에서는 첫번째 요소에 대해 어느 정도 상세히 알아 보려고 하고 두번째 요소에 대해서는 약간의 실례를 들어 보려고 한다.

화재가 과학으로 출현되는 전환점은 화재연구의 모델이용에 대한 국제 심포지움이 개최되었던 1959년에 일어났다. 1970년대 중반에는 화재모델에 대한 연구가 중심이 되어 지대한 관심을 끌기 시작했으며, 이때의 연구는 실화재의 성상을 예측하기 위한 여러 방법으로써, 주로 컴퓨터 모델로서 구성되었었다. 또한 1986년 Emmos의 화재학(a science of fire)의 타당성에 관한 논문 등을 비롯하여 화재분야 지식은 실무자들이 익히고 사용하기에 충분한 체계적 기술을 전개시킬 수 있을 만큼 범위나 깊이 면에서 구

준한 발전을 하여왔다.

2. 화재방지에 대한 분석적 접근

분석적 기법이란 용어는 정량적 해석을 허용하는 기법을 의미한다. 이러한 기법은 컴퓨터 또는 상사법칙 등을 사용하여 근사치 또는 정확한 수학적 또는 수치적 해를 포함한다. 상사법칙은 가끔 경험데이터로부터 발전하여 광범위한 응용을 할 수 있는 수식을 도출시키곤 하여 왔다.

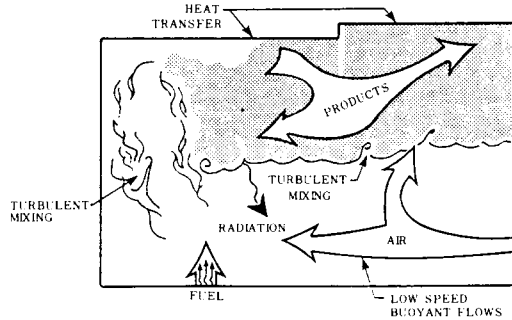


그림 2. 실화재의 모델

2-2. 시스템

화재문제는 많은 과정을 포함하고 있으며 상호작용을 하는 일련의 불연속 요소들로 볼 수 있다. 따라서 이의 분석기법은 적절한 화재 조건들을 고려하여야 하고, 이들 관계를 Zone 모델 방법으로 해석해 왔는데, 이 기법은 각 영역내에서의 특정분포를 가정하고 경계구역에서의 질량과 에너지 이동, 보존법칙 등을 이용하는 화재예측 방법이다.

이를 좀 더 설명하면, 한 Zone은 영역내 특성치 불균일성을 무시한 검사체적(Control Volume)이며, 이 Zone의 시간에 따른 평

2-1. 불연속 현상

화재분야에서의 기술발달은 화재과정의 특성을 밝혀내는 것이었으며, 이는 경험적 관찰, 특정 요소의 개념확립 등을 통하여 이루어 졌다. 예를 들면 그림 2에서와 같이 실화재에서 화재 Plume, 천정 jet 기류, 고온상층유동 및 벤트 유동 등의 개념이 정립되었다. 또한 많은 경우에 상호관계식이 경험적 데이터에 의해 도출되고 이 수학적 공식이 결과 특성을 포함하게 된다.

균 특성치는 경계구역을 통한 질량과 에너지의 변화로써 나타내준다. (그림 3 참조) 이 시스템의 일반해는 시간의 함수로써 비선형, 평미분방정식으로 표시된다.

2-3. 기초법칙의 정밀해법

상호작용 유동계에 대하여 질량, 운동량 및 에너지보존법칙을 근간으로 하여 이들 상호관계식을 도출시키는 것이 가능하다. 이에 대한 공간과 시간에 대해 완전한 해석이 가능하지만, 난류와 화학반응에 대한 모델이 가정되어야만 되고 전미분방정식에

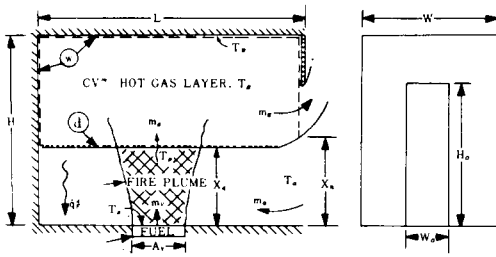


그림 3. 실화재모델의 Zone구성 예

의한 해조차도 결과적으로 근사치에 불과하다. 이러한 화학반응등을 고려한 모델이 Field 모델 기법이다.

2-4. Scale모델

Scale모델은 물리학의 법칙에 근거하여 화재안전 설계에 대한 정량적 정보를 도출키 위한 물리적 상사모델로써 대표적인 예는 항공기의 윈드터널(Wind Tunnel) 시험 등을 들 수 있다.

3. 화재안전 설계의 분석요소

화재 분석요소는 관점에 따라 여러 요소로 분류될 수 있으나, 여기서는 화재와 건물의 상호 작용 측면과 화재가 사람에게 미치는 영향 측면에서 살펴보고자 한다.

3-1. 화원(Fire Source)

건물을 이루고 있는 모든 것이 화재연료가 될 수 있으며, 이들 물질의 화재하중, 에너지 및 연소생성물의 발생율을 해석하는 일반법칙은 없다. 그러나 실지 설계 응용에 있어서는 초기 화재조건을 최대 화재가능 조건개념으로 나타낼 수 있으며, 이를 위해서는 연료에 대한 적절한 정보데이터베이스 혹은 정보자료 수집 방법 등을 이용하여야 된다. 이

러한 자료는 이미 발표되어 있으며 여러 시험연구소에서 연료의 연소시험을 통하여 측정할 수 있다.

평면으로 된 고체연료에 대한 계산식은 이미 정립되어 있는데 이에 대한 측정방법을 보면, 연소생성물 측정 후드장치를 이용하여 에너지 및 연소생성물 발생율을 연료 질량 손실율로써 표시할 수 있고, 이를 바탕으로 임의 크기의 고체연료에 대한 계산이 가능하다. 또한 발화와 화염 전파의 해석도 각 연료의 고유 특성치를 알고 있으면 이 고체연료에 적용할 수 있다.

위험(Hazard)을 결정하기 위해서는 화염높이가 중요하며 이 높이는 화재에 의한 에너지 방출율과 연료분포의 상당지름에만 의존하는 계산식으로 구할 수 있고, 이것만으로 설계용으로는 매우 정확하게 계산된다. 또한 화염높이 계산식의 변수들로서 화재 중심선의 최대속도 및 최대온도 분포를 표시하고, 이들 계산식들에 의한 정보로서 일반 설계응용시 필요한 공간에 관한 정보를 얻어낼 수 있다.

화염으로부터 발생하는 열복사율을 해석할 수 없으면 화재모형의 해석은 단순히 연소율과 연소 전파에만 국한되어 버리고 만

다. 그러나 다행히 화염에 매우 근접한 거리를 제외 하고는 복사열량을 계산할 수 있으며 일부 재료에 대한 복사열량 데이터는 15%에서 50%까지의 범위에 분포된 것으로 나타나고 있다.

3-2. 화재주위 조건의 영향

화재 주위의 온도, 산소함유량, 외부로부터의 복사열량 및 공기 유동 조건 등에 따라 연소율 및 질량손실율 등이 영향을 받게 된다. 이러한 조건들에 대한 연소 및 화염전파 모형으로써 정량적 해석이 가능하고, 또한 정상상태에서의 수식이 수립되어져 있다. 그러나 비정상 상태의 복잡한 연료에서의 일반적 상관 관계식의 수립이 곤란하므로 정상상태에서의 수식으로 적절하게 외삽법(Extrapolation)을 이용 하는 것이 유용하고 설계응용에도 합리적이다.

이 해석에서의 중요 특성치는 연료의 유효기화열(effective heat of gasification)로써 시간의존성이지만 이의 결정을 위한 표준 시험 방법이 마련되어 있지는 않다. 그러나 대부분의 재료에 대한 평균 기화열데이터가 나와 있다. 외부열 유입에 의해 연료의 분해가 증대함에 따른 고체 연료로부터 기체연료 발생율을 결정하는데는 기화열이 필수적인 인자이다. 이와 같은 열유입→고체연료→기체연료와 같은 과정은 화재가 진행되고 소멸되어 가는 퍼이드백 과정이다.

화재가 성장됨에 따라 주위 산소는 감소하고 주위로의 열 전달은 증가된다. 만약 연료를 산소가 줄어드는 곳에 노출시켜 두면

화염연소는 어떤 특정 산소 농도 치에서 중지하게 될 것이다. 이 값은 재료에 따라 다르고 대략치를 시험을 통하여 측정할 수 있는데 약 10% 정도의 오차를 가진 것으로 나타낸다.

화재주위 조건이 연료생성율에 미치는 영향외에 연소생성물은 산소 공급율에 따라 변화된다는 사실은 잘 알려져 있다. 여기에서 두가지 유동을 생각해 볼 수 있는데, 이는 고체연료 표면에 열이 전달되어 발생하는 연료 유동과 화재 Plume 으로 유입되는 산소유동이다. Beyler는 연료에 대한 연소생성물 발생율을 산소와 연료공급을 함수로써 유도해 내었다. 수증기와 이산화탄소 등은 연료의 화학적 조성으로부터 계산이 가능하지만 주요 독성 연소생성물인 일산화탄소에 대한 계산은 Beyler에 의해 도입된 실험적 방법이 유일하고, 연료와 산소공급율이 결정되면 광범위한 화재조건에서의 일산화탄소 산정이 가능하다.

3-3. 화재가 주위에 미치는 영향

화재에 의해 주위에 미치는 영향은 화염 및 화재 Plume과 연료 표면 및 연료 자체사이에 일어나는 직접적인 열전달에 의해 일어난다. 벽을 따라 발생하는 화재에서의 대류열전달 계산이 가능하고 소규모(2m이하) 화염의 총 열량분포 계산식이 정립되어 있다. Zone내의 대형 화염에 대한 복사 열전달의 일반식에 의한 예측은 불가능하지만, 이에 대한 약간의 실험 데이터에 의해 열전달량을 알 수 있다. 천정에 영향을 미치는 화염에 대해서도 벽에서

와 유사한 상황이다.

대류열전달의 해석은 매우 용이하지만 화염밀집 영역에 대한 지식은 상당히 제한되어져 있다. 화재 Plume내의 연소물에 대한 해석은 쉽지 않지만 속도 및 온도장의 해석이 가능하면 이 연소물에 대한 열전달계산이 가능하다. 천정 jet기류의 속도 및 온도분포 해석에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 이 해석에서의 필요인자는 화재의 에너지 방출율과 화재 양상을 나타내 주는 기하학적 변수 등이다.

천정 jet기류 연구응용 사례는 jet기류내에 있는 경보장치 및 소화설비의 작동성능을 결정하는데 이용하는 것을 들 수 있다. 화재 감지기 기준인 NFPA 72E는 예상 화재성장율, 천정 높이 및 온도에 대한 감지기의 반응 특성에 바탕을 두고 열감지기의 설치 간격을 산정하는 방법에 대한 부록을 포함하고 있다. 이러한 방법을 근간으로 한 많은 연구가 FMRC (Factory Mutual Research Corporation)에서 이루어졌고 기준에도 반영되어 왔다.

3-4. 화재실(火災室) 조건

실화재 분석에는 컴퓨터모델이 이용되고 Field 모델과 Zone 모델기법으로 분류된다. Field 모델은 모든 화재현상을 보존의 법칙을 풀어 해석하려고 시도한 반면 Zone 모델에서는 일정구역 (Zone)으로 나누고 이 구역간의 상호작용을 나타내는 관계식들을 도출시켜 보존법칙을 전체계에 적용시키므로써, 이들 구역과 상관 관계식을 상호 연관시켜서 해석한다.

컴퓨터를 사용하여 Field 모델의 3차원 해석이 가능하고 또한 1개실 이상의 실화재 해석도 가능하다. 그러나 Zone 모델의 경우는 해석범위와 일반성이 다르다. 즉 Zone 모델에서는 한정된 물리적 특성만이 고려되거나 특정 화재문제에만 국한된다. 이 실화재 문제에 대한 해석은 일반적으로 두 부류, 즉 밀폐된 실과 통풍이 되는 실화재 문제를 검토하여서 어느 정도의 이해와 적용가능성 정도 등을 알 수 있게 한다.

3-5. 건물에서의 화재조건

Zone 모델 방법만이 건물내의 화재조건을 예측할 수 있는 유일한 방법같다. 이들 화재 조건이란 연기로 가득찬 건물내에서 화재가스운동, 가스온도 및 연소생성물 농도와 속도 등과 관련된다. 이 계산은 최소한 미니 컴퓨터가 소요되고, 건물내의 다양한 모든 실과 벤트(Vent) 등을 세세히 고려할 수는 없기 때문에 건물의 기하학적 구조에 따른 상대치를 가정하여 모델입력 자료로 사용해야 된다. Rockett, Morita 및 Cooper 등에 의해 화재조건을 예측하는 Zone 모델의 정확성연구가 이루어져 좋은 결과를 내었으며 일본의 Nakamura와 Tanaka는 10층 높이에 50개의 방을 갖춘 고층건물에서 실험을 하여 이 모델에 의한 해석적 계산 결과를 증명하여 보였다.

여기에서 계단실슈트와 수직샤프트는 층고가 높은 실(室)로 가정하는데 Plume 가스가 샤프트의 단면을 꼭 채워버리면 이 가정은 만족되지 않는 한계가 있다. 또한 복도도 이와 유사한 가정을 하

는데, 여기에서도 계단실내 연기 통과시간이 연기가 차는 시간에 비하여 길면 가정에 모순이 생기게 된다. 이 Zone 모델 응용에서의 이러한 가정이 가능한 반면, 강제 공기가열 및 냉각효과를 반영시키지 않았으며 연돌(부력) 효과 및 바람효과에 수반되는 초기 조건 및 주위조건을 고려치 않았다. 대부분의 연구는 소규모 화재를 고려하였지만 이를 토대로 대형화재를 검토하는 것이 가능하다. 대형화재에서는 산소가 불충분하게 되는 특성을 가진다. 그러나 아직 이 가정을 뒷받침 할 수 있는 충분한 실험데이터는 없다.

3-6. 건물구조에 미치는 화재의 영향

화재상태에서 건물구조요소의 하중지지력을 예측하기 위한 분석은 구조설계법과 고온상태에서의 특성치데이터에 그 바탕을 둔다. 지금까지의 연구결과로서 콘크리트, 강철 및 목재구조에 대한 충분한 특성치 데이터가 나와 있으며, 최근 Patterson에 의한 접근 방법에서는 구조요소에 대한 특성 열부하를 고려하여, 시간의 변수로써 2차원 온도분포를 유한요소법으로 계산했다. 이 계산은 근본적으로 열전도 계산에 속한다. 이러한 기법에 확신을 가진 일부 유럽국가에서는 콘크리트, 강철빔 또는 기둥이 시험화재에 노출시 파열시간을 측정하는 표준 가열로 시험의 시간-온도 표준 곡선으로 사용하고 있다. 또한 스웨덴, 덴마크 및 노르웨이는 이 기법을 국가 화재코드에 수용하고 있으며 다른 국가에서도 이와

유사한 방법을 채택할 것을 고려 중이다.

여기에서의 가열 시간-온도 곡선은 화재실 크기 및 열특성치, 벤트(Vent) 면적 및 연료량의 변수로써 표현되고, 목재크립에 대한 데이터를 바탕으로 한다.

이 분야에서의 연구 개발의 필요성은 플레쉬오버 후에 화재실 조건을 예측할 수 있는 더욱 완벽하고 유용한 방법과 화재 Plume이 건물구조에 미치는 가열효과와 일반적 적용방법 등의 정립이다.

3-7. 화재가 사람에게 미치는 영향

건물의 안전설계에서 주안점은 화재시 사람의 안전을 확보하는 것이다. 설계시에 화재성상을 적절히 고려하면 안전피난에 필요한 임계시간을 계산하는 것이 가능하다. 대부분의 화재안전 코드는 건물형태와 거주자수에 따라 비상구 폭을 규정하고 있으나 피난시간을 규정하고 있지는 않다. 건물내의 사람이동과 비상구방향 등에 관한 연구를 근간으로 하여 사람의 이동속도, 시간단위당 사람수 및 건물의 전체 거주자가 피난할 수 있는 시간계산을 용이하게 할 수 있는 관계식이 이미 정립되어 있다.

NFPA Life Safety Code 의 최근판에는 피난시간에 바탕을 두고 계단폭을 결정하는 대체계산법에 대한 자료를 포함하고 있으며, 건물의 피난시간계산과 화재의 위험시간을 매치시키려는 여러가지 방법을 이용하고 있다.

지금까지 언급한 대부분의 피난모형에서는 화재가 사람에게 미

치는 영향은 고려치 않았지만, 완벽한 분석을 위해서는 연기에 의한 시야장에 영향을 고려해야만 한다. 즉, 화재와 이의 생성물에 의해서 야기되는 손상, 무기력 및 저항력과 화재환경에서의 인간행동 등이며 이러한 모든 영향을 정량적으로 나타낼 수 있는 능력에는 한계가 있다. 그러나 실제세계에서 위험분석 등을 통해서 이들 상호간의 일부 해석은 가능하다.

4. 분석기법 이용에 미치는 영향 인자

분석기법을 화재에 적용함에 있어서는 중요한 인자가 3가지 있다.

첫째로 설계응용에 이용되는 학문적 연구 결과는 실무자들이 이해하고 배우기 쉽도록 논리적으로 기술되어야 된다. 이는 교육 측면과 기술이전 측면을 나타내며 지금까지의 화재예방 기술분야가 비분석적 기법에 의존해 왔기 때문에 화재 관련 엔지니어들이 분석기법을 이해할 수 있도록 교재를 이용한 교육의 기회가 제공되어야 된다.

두번째, 연구자들은 분석기법을 이용하는데 요구되는 지식의 간격을 매꾸어 주어야 된다. 만약 이 기법이 적용범위나 제한 조건 때문에 설계자들의 요구나 기대를 모두 만족시킬 수 없다면 사용할 수 없게 될 것이다. 화재안전 지식의 빠르고 실제적인 발전에 저해가 된 것은 화재 문제의 복잡한 성질, 관련 과학 분야의 성숙도와 화재 분야의 연구 노력 부족 등이었다. 지금까지의 분석기법은 대부분 기초연구에 이의

근간을 이루어 왔는데 기초분야 연구는 오랜시간이 걸린다. 지난 25여년 동안 계속 연구가 발전되어 왔지만 중요한 결과를 낸 것은 광범위한 연구자료를 갖춘 여러 연구자들이 유사한 연구 분야에 전력을 쏟았을 때였다.

세번째, 연구자와 실제 설계자 사이에 좋은 유대 관계를 유지해야 된다. 즉 설계상 발생하는 문제는 화재안전 엔지니어와 관계자들에 의해 인식되고 구체화되어 연구자에게 정확하게 주지시켜져야 된다. 화재연구의 발전을 위해서는 실제 업무종사자로부터 많은 방향 제시가 요구된다.

5. 앞으로의 방향

화재분야에서 분석기법에 대한 관심이 높아지고 있는 최근의 추세를 볼 때 분석기법의 이용은 계속 증가될 것으로 보인다. 분석기법에 P.C의 도입은 이의 사용을 가속시키고 있으나, 이 기법의 전파속도와 같이 빠르게 연구 개발이 진행되지는 않기 때문에 이용자들을 약간 실망시키게 만드는 경우도 있게 될 것이다. 이 기법에 의해 화재안전 시험 방법에 변화가 초래될 것으로 보이는데, 시험데이터는 수학적 모델에서 사용할 수 있는 형태로 변환되고, 모

델은 이 데이터의 형태에 따라 이루어질 것이다. 궁극적으로 이러한 연구결과들에 의해 화재시험 방법뿐만 아니라 코드나 규정의 제정방법 및 화재안전 정도를 나타내는 방법까지 함께 변화되어야 된다. 이러한 방법을 통해 대형건물에서의 화재성장과 사람의 피난 정도를 예측할 수 있을 것으로 보인다. 현재의 분석기법은 많은 정보와 함께 변수를 던져주고 있다. 안전의 기준을 분석기법의 새로운 개념으로 표현해 나가면서 현 기준이나 방법과 조화를 이루어 발전을 추구하여 나가야 할 것이다.

● 미니정보

1985년 각국의 화재상황

국 명	화재건수	화재율(인구백만당화재건수)	사망자	인구백만당 사망자	화재 1,000건당 사망자	손해액(억원)
한 국	8,137	2.0	260	6.4	32	154
일 본	59,865	5.0	1,747	14.6	29.2	5,683
미 국	2,371,000	99.6	6,306	26.5	2.7	64,101
서 독	131,331	21.5	476	7.8	3.6	10,401
카 나 다	81,145	32.4	598	23.9	7.4	5,958
오스트렐리아	21,555	28.5	55	7.3	64.0	873
뉴 질 란 드	20,385	60.0	45	13.2	2.6	-
덴 마 크	18,635	34.5	95	18.6	2.2	-
노 르 웨 이	11,000	27.5	74	18.5	5.1	1,934
중 국	34,996	0.3	2,241	2.2	6.7	844