

PIV를 이용한 충돌제트의 유동특성에 관한 연구

김동균*·김정환**·김시범***·이영호****

The Study on Flow Characteristics of Impinging Jet Using PIV

D. K. Kim , J. H. Kim , S. P. Kim , Y. H. Lee

Key Words: Impinging jet(충돌제트) , Main Flow(주유동) , PIV(입자영상유속계)

Abstract

A present study is the flow characteristics of impinging jet by PIV measurement and numerical analysis. The flow characteristics of impinging jet flow are affected greatly by nozzle inlet velocity. An circular sharp edged nozzle type(45°) was used to achieve uniform mean velocity at the nozzle inlet, and its diameter is 10mm(d). Therefore, the flow characteristics on the impinging jet can be changed largely by the control of main flow. In this parent study, we investigate the effects of inlet velocity , its variable is nozzle inlet Reynolds numbers(Re=1500, 3000, 4500, 6000 and 7500)

기호설명

- D : 노즐의 출구직경(mm)
- X : 충돌판의 횡방향좌표(mm)
- Y : 노즐에서의 유동방향좌표(mm)
- H : 노즐과 충돌판사이의 거리(mm)
- V : 노즐의 출구속도
- KE : 운동에너지

1. 서 론

충돌면에서 높은 열전달효과를 얻을수 있는 충돌제트는 터빈 블레이드냉각, 연소기 벽면냉각, 전자장비냉각등 고온면을 효과적으로 냉각 할 수 있기 때문에 많은 분야에서 응용되어 지고 있다.

또한 충돌제트를 이용한 냉각방식은 대상면의

상태와 위치에 따라 냉각 위치의 조절이 용이하다. 이는 하류에서 벽면 제트를 형성하여 제트에 의한 주유동이외에 추가적인 냉각효과를 가지기 때문이다. 그리고 전자장비내의 반도체와 같은 추위환경의 미세한 충격에 민감한 발열체와 같은 충돌제트로 냉각하는 경우 세심한 주의가 필요하다. 고속의 충돌제트를 사용할 경우에는 냉각효과와 열전달적인 측면에서는 유리하지만 발열체 표면에 열응력과 잔류응력이 존재할 수도 있어 반도체의 수명과도 연관된다. 따라서 충돌제트를 이용한 전자장비의 냉각에서 충돌제트의 위치와 제트의 속도가 중요한 변수중의 하나이다. 충돌제트는 산업의 여러 분야에서 광범위하게 응용되어 질 수 있기 때문에 여러 연구자들에 의해 연구가 선행되어 왔다. Florschuetz^[1]등은 배열제트의 초기 직교류율의 영향에 의한 열전달특성을 보였고, Down^[2]등은 충돌제트에서의 열전달과 물질전달에 관련된 온도, 기하학적 모양, 직교류, 난류등에 의한 매개변수와의 관계를 요약하였다. Gardon^[3]등은 자유제트가 표면에 충돌할 때 제트

* 한국해양대학교 조선·해양기자재연구센터

** 한국해양대학교 대학원

*** 동아대학교 기계공학과

**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

출구와 충돌면 사이의 간격에 따라 난류가 열전달에 끼치는 영향을 보였다. Gau⁽⁴⁾는 제트의 난류 특성을 증대하기 위한 연구를 하였다. 이상과 같은 기존의 연구들은 주로 제트의 형상에 대하여 연구하여 이를 열전달과 유동특성으로 연관하여 고찰하였다.

본 연구에서는 제트를 형성하는 노즐과 발열체사이의 거리가 일정한 경우에 노즐의 출구속도변화에 따른 속도벡터와 운동에너지의 변화에 대하여 고찰하였다. 유동장 해석에서 P.I.V(Particle Image Velocimetry)와 수치해석을 이용하여 상호비교 검토하였다. 사전에 충돌제트의 출구속도에 따른 유동특성을 조사하여 주어진 조건에서 최적의 열전달효과를 갖는 유동특성을 분석한 후, 최적의 조건에서 노즐과 발열체사이의 거리변화에 따른 연구를 수행하였다. PIV는 측정영역의 속도분포를 동시에 측정할 수 있으며, 유동장의 교란을 주는 문제가 없으므로 본 연구와 같은 형상의 유동장에 적합한 측정기법이다.

2. PIV실험장치 및 방법

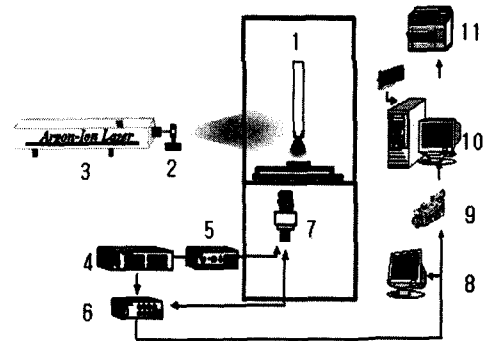
2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 채택한 실험장치의 구성도이다. 주제트유동은 송풍기를 사용하여 공기를 공급하였으며 속도제어는 송풍기에 연결된 인버터(inverter)를 사용하였다. 노즐의 입구속도는 가변적으로 조절이 가능하며, 또한 송풍기의 작동시 발생하는 진동을 억제하기 위하여 고무재질의 배관을 사용하였다. 본 연구에서는 노즐의 출구Re수를 1500, 3000, 4500, 6000, 7500로 설정하였다. 노즐의 입구유속의 측정은 열선유속계(Kanomax Climomaster 6511)를 이용하여 측정하여 초기조건으로 하였다. 유동장내의 유체입자 선별문제는 광원과 함께 PIV계측정도에 큰 영향을 미친다. 본 실험에서의 입자는 올리브유를 이용한 라스킨 노즐(laskin nozzle)을 이용하였다. 라스킨 노즐에서 발생한 미세입자를 송풍기로 흡입시켜 노즐로 직접 분사하였다. 외부로의 영향을 최소화하기 위하여 실험장치전체를 특수 제작한 수조속에 설치하여 외부로부터의 영향을 최소화 하였다. 제트류를 만드는 노즐은 균일한 속도분포를 가질 수 있도록 만들었는데 이를 위하여 정류기(rectifier)를 설치하였으며, 균일 출구 속도분포를 가질 수

있도록 하였고, 부가적으로 조명장치는 5W 출력의 아르곤-이온레이저를 사용하였다. 그리고 영상은 Hi-8mm 캠코더를 사용하여 기록하였으며, 펄스발생기(Kanomax사, 10 μ s)를 이용한 영상강화 CCD카메라(Image Intensifier CCD Camera, Hamamatsu사, C4273)를 사용하였다. 계측영역의 최대크기는 가로 및 세로가 각각 140mm \times 62mm이다.

나. PIV 계측

본 가시화실험에 있어서는 먼저 유동장을 형성하고 추적입자를 유동장에 주입시킨 다음에 적당한 조명을 주사한다. 계측영역의 영상은 Hi-8mm 캠코더에 저장하며 저장된 유동장은 다시 재생과정을 거쳐 상처리장치에 입력하게 된다. 영상처리장치로는 이미지그래버(DT3155)를 사용하였으며 본 연구에서 사용한 DT3155보드는 영상저장장치로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작은 PIV처리 상용코드인 FlowInside 3.0을 사용하였다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾



1.Nozzle 2.Cylindrical lens 3.Argon-Ion laser
4.Pulse generator 5.Image intensifier controller
6.CCD controller 7.Image intensifier CCD camera
8.Monitor 9.Hi-8mm camera 10.Host computer & image grabber 11.Printer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 본 연구에서 제트를 생성하기 위해 사용한 노즐의 단면도이다. 충돌제트에서 사용되는 노즐은 circular sharp-edged type 과 circular square-edged type 크게 두 가지 종류로 나뉠 수 있는데, 본 연구에서 사용한 노즐은 circular sharp-edged type 이다.

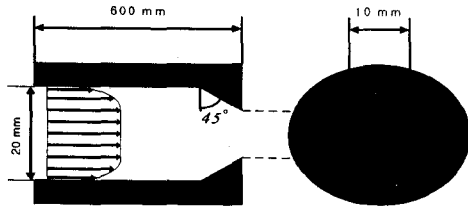


Fig. 2 Configuration of circular nozzle

Fig. 3은 충돌판의 열제어시스템을 나타낸 것이다. 충돌판의 재질은 검은색도료로 착색한 알루미늄열판이며, 80℃의 등온조건을 유지하기 위하여 보정된 열전대(T-type)가 부착되어 있다. 열전대는 80℃로 설정된 온도컨트롤러에 연결되어 있으며, 이는 다시 충돌판에 전원을 공급하는 power supply에 연결되어 있다.

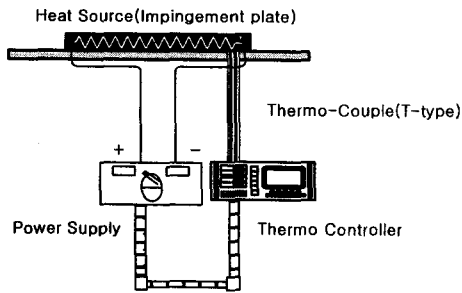


Fig. 3 Impingement Plate Control system

가. 해석모델

수치해석에는 열·유체상용코드인 FLUENT를 사용하였다. FLUENT는 오랜 기간 동안 널리 사용되어 그 정확성이 충분히 검증되어 있으며 해석대상모델링의 편리함과 수치해석시 가장 중요한 격자생성의 용이성 때문에 선택하였다. 충돌판의 전열특성과 유동특성을 살펴보기 위해 채택한 모델은 Fig. 3과 같다. 여기서 X는 제트유동방향과 직교를 이루는 좌표이며 Y는 제트유동방향의 좌표이다. 실험결과와 비교하기 위해서 모든 모델링은 실제크기와 동일한 조건에서 수치해석을 수행하였다.

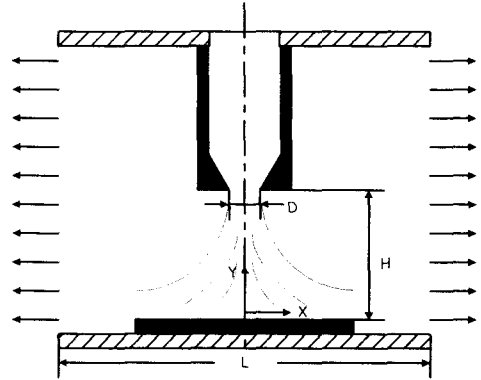


Fig. 3 Schematic diagram of numerical analysis

나. 지배방정식

지배방정식은 2차원, 비압축성, 정상상태의 난류유동으로 가정하였다. 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + [(\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [(\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial y}] + S_u + g\beta(T - T_{in}) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + [(\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [(\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial y}] + S_v + g\beta(T - T_{in}) \quad (3)$$

에너지방정식

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left(\frac{u_t}{\partial t} + \frac{\mu}{Pr} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

여기서 u, v 는 직각좌표계 (x,y)방향으로의 유동속도, p는 압력, ρ는 밀도, ν는 동점성계수이다. 그리고 ν_t 는 난류유동에 따른 생성항이다. ν_t 는 x, y 의 함수로서 다음과 같은 식으로 구한다.

$$\nu_t = C_\mu C_D k^2 / \epsilon \quad (5)$$

여기서 k 와 ε는 각각 난류운동에너지와 난류운동에너지 소산율로서 아래와 같은 식에 의해 결정된다.

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + (P_k - \epsilon) \quad (6)$$

$$u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + (C_{1\epsilon} P_k - C_{2\epsilon} \epsilon) \quad (7)$$

윗식에서 사용된 상수들은

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_\mu = 0.5478, C_D = 0.1643,$$

$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92$ 이다.

한편, 운동량방정식 (2),(3)의 우변에 존재하는 생성항 S_u, S_v 와 k, ϵ 방정식 (6),(7)의 우변에 나타나는 P_k 는 각각 다음과 같이 구한다.

$$S_u = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right] - \frac{2}{3} k \quad (8)$$

$$S_v = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \frac{2}{3} k \quad (9)$$

$$P_k = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] \quad (10)$$

즉, 본 연구에서는 난류모델로서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 식(11)은 정의한 Re 이다.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (11)$$

여기서 ν :공기의 동점성계수, v :노즐의 출구속도

D : 노즐의 출구직경

3. 결과 및 고찰

충돌제트의 속도변화에 따른 유동특성을 살펴 보기 위해서 PIV와 수치해석을 이용하여 비교 검토하였다. 이 때 노즐과 충돌판사이의 거리(H)는 노즐의 출구직경(D)을 기준으로 하여 거리비(H/D)가 6인 경우로 설정하였다. Fig. 4~Fig. 5는 PIV를 이용하여 구한 속도벡터와 운동에너지도를 도식화 한 것이다. $Re=1500$ 인 경우를 살펴보면, 노즐의 형상에 관계없이 노즐에서 분출되는 제트가 발열체에 원활히 충돌되지 못하고 있다. 이는 노즐에서 분출되는 제트의 에너지크기가 충돌판까지 도달하는데 다소 부족한 원인이라고

생각된다. $Re=3000$ 으로 증가하는 경우에는 주제트유동 주위에 발생한 와류들이 주제트유동으로부터 멀어지는 경향을 보이고 있다. 이는 Re 수가 증가함에 따라 노즐에서 분출되는 유량의 증가로 인하여 주제트 유동의 폭이 넓어지기 때문이라고 생각된다. 하지만 와류가 제트주위에 존재하므로 주제트 유동이 와류의 영향을 받고 있는 범위내에 있음을 알 수 있다. $Re=4500$ 이상부터는 주제트 유동으로부터 분리되는 경향을 보이고 있다. 따라서 Re 수가 증가할수록 노즐에서 분출되는 주제트유동의 주위에 발생한 와류들이 주제트유동의 증가에 비례하여 자유제트영역에서 다소 멀어지는 경향을 보이고 있다. 제트의 양쪽에 발생한 와류는 제트가 발열체에 충돌하는 것을 방해하는 역할을 한다고 판단된다. 따라서 주제트유동 주위에 발생한 와류가 제트의 영향을 주는 범위에서 벗어나는 $Re=6000$ 인 경우 노즐에서 발생한 제트가 그 크기를 유지하면서 발열체에 충돌하는 속도범위라고 생각된다.

Fig. 6은 발열체의 가운데부분($X=0$) 지점에서의 속도변화에 따라 Y방향 속도를 수치해석으로 구한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 모든 Re 수범위에서 *vena contracta*의 영향으로 노즐의 출구부분에서 속도가 순간적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. $Re=1500$ 일 때의 분포를 살펴보면 노즐 출구부근에서 *vena contracta*의 영향으로 인하여 속도가 순간적으로 증가하는 경향을 보이다가 $H/D=1.5$ 에서 속도가 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 출구속도크기의 90~95%범위의 크기인 포텐셜코어(potential core)가 $Re=1500$ 인 경우에는 $H/D=1.5$, $Re=3000$ 인 경우는 거리비 $H/D=3.8$ 지점까지 포텐셜코어를 유지하고 있으나 그 이상부터는 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. $Re=4500$ 부터는 포텐셜코어가 $H/D=4$ 까지 유지하고 있다. Re 수의 증가에 따라 포텐셜코어는 바뀌게 되며 이러한 경향은 노즐로부터 유동이 없는 정지된 주위로 분출될 때 제트는 난류이며 노즐의 출구에서 속도는 균일한 특성을 가진다. 그러나 제트의 출구에서부터 멀어질수록 제트와 주위와의 운동량 교환으로 제트의 자유경계층은 확대되고 그 속에서 균일한 출구속도가 유지되는 포텐셜코어가 축소되기 때문이라고 판단된다.

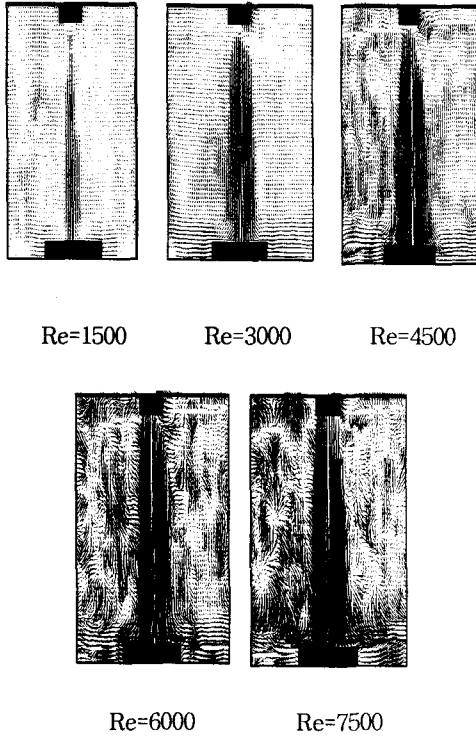


Fig. 4 Experimental results velocity vector for various Reynolds number

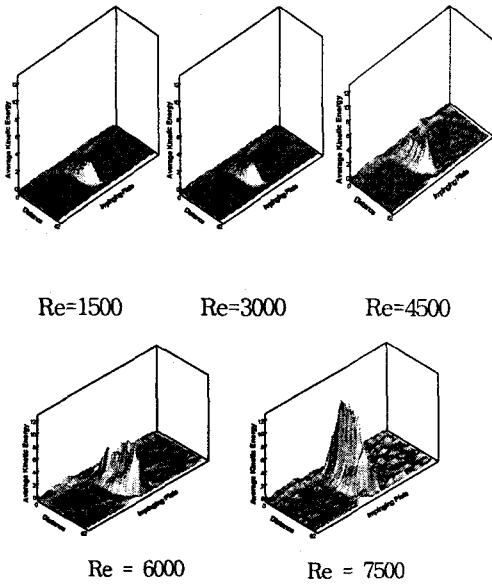


Fig. 5 Experimental results average kinetic energy for various Reynolds number

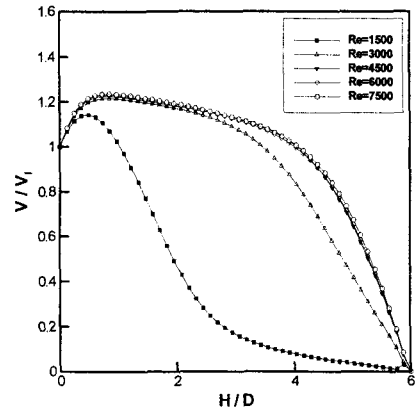


Fig. 6 Dimensionless velocity distribution along the center line for various Reynolds number

Fig. 7은 $Re=6000$ 일 때의 $X=0$ 인 지점에서의 Y방향속도를 실험과 수치해석결과의 비교이다. 정성적으로 일치하는 경향을 보이지만, $H/D=2.5\sim 4$ 인 지점에서 실험과 수치해석결과가 편차를 보이고 있다. 이는 실험시 제트가 자유혼합영역에서 주위 유체의 간섭을 받기 때문이라고 판단된다. 따라서 본 연구와 같은 유동가시화실험에서는 제트의 자유혼합영역에서의 보다 면밀한 측정이 필요하다고 판단된다.

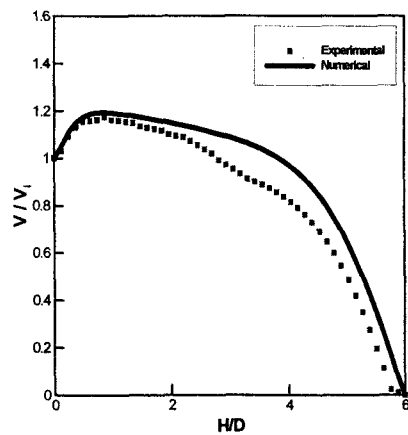


Fig. 7 Compare numerical result with experimental result dimensionless velocity distribution at $X=0$

4. 결 론

전열제어를 위한 충돌제트의 유동특성을 PIV와 수치해석을 이용하여 살펴보았다. 노즐의 직경(D)과 형상은 노즐의 직경은 10mm, circular sharp edge type을 사용하였으며, 노즐과 발열체 사이의 거리비는 6으로 고정하였다. 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. $Re=1500\sim 3000$ 범위에서는 제트가 주위 유체의 영향으로 발열체에 영향을 주지 못하는 속도의 범위였다.
2. 포텐셜코어영역이 $H/D=4$ 인 지점까지 유지되는 레이놀즈수의 범위는 $Re=4500$ 이며 $Re=6000$ 과 $Re=7500$ 은 유사한 속도분포를 보이는 유동특성을 보였다.
3. PIV와 수치해석결과 $Re=6000$ 인 경우가 발열체의 효율적인 전열제어를 위한 속도범위라고 판단된다.

참고문헌

- (1) Florschuetz, et al., 1984, "Evaluation of Internal Heat Transfer Coefficients for Impingement Cooled Turbine Airfoils", AIAA Paper No.68-564, AIAA 4th Propulsion Joint Specialist Conference, Cleveland, Ohio, June 10-14.
- (2) Downs, S. J, and James, E. H, 1987 "Jet Impingement Heat Transfer" A Literature Survey, ASME Paper No. 87-HT-35.
- (3) Gardon, R. and Akfraz, J. C., 1965, "The Role of Turbulence in Determining the Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet" Int.J. Heat Mass Transfer, vol. 8, pp.1261~1272.
- (4) C. Gau, W. Y. Sheu and C. H. Shen, 1997, "Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Under Acoustic Excitation," ASME J. Heat Transfer, Vol. 119, pp. 810-817
- (5) 이영호, 최장운, "PIV에서의 계조치상호상관법 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권, pp. 396~400(1996)
- (6) 이영호, "PIV의 분류 및 원리", 대한기계학회지 제36권 제12호, pp.1146~1162(1996)