

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 錢 紹 祥

本論文は、原子力プラントや化学プラントの高低温流体合流部で生じる熱荷重を数値熱流体解析で予測する方法を研究したものである。従来の手法は高低温の配管が 90 度で交叉する T 字型配管に適用範囲が限定されたものであった。また、熱荷重評価手法が、特定の熱流動実験から得られた温度ゆらぎデータと静的な熱応力計算式に基づくものであることから、実験データの存在する範囲に適用範囲が限られ、また流体から構造への周波数に応じた動的な応力減衰が考慮されない精度の不十分なものであった。

本研究は上記課題を解決するため、以下の 3 つの手法を新たに提案したものである。

一つ目は、熱疲労荷重評価のための一般化したフローパターン分類方法の提案である。従来のフローパターン分類方法は高低温の配管が 90° で交叉する T 字管にしか適用できないのに対し、本研究では高低温の配管が 90° 以外の角度で交叉する Y 字管にも適用できるようにした。具体的には、主管と枝管の流れが合流する際の運動量の相互作用に関するメカニズムを明らかにした上で、運動量に基づく一般化した評価式を提案した。また、有効性を検証するために、分岐角度 30° , 45° , 60° と 90° の 4 モデルに対して、それぞれ 6 つの運動量比 (MR=4.2, 3.8, 1.45, 1.25, 0.38, 0.33) における合流部流れの CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を実施し、提案したフローパターン分類法の有効性の確認を行った。

次に、高低温合流部の流体温度ゆらぎを CFD で予測する手法を提案した。従来の CFD は主として主流の挙動を予測するために適用されてきたが、ここでは熱疲労の評価に必要な構造表面の局所的な温度ゆらぎの予測が目的となる。通常の CFD 解析で 사용되는 $K-\epsilon$ 等の乱流モデルは乱流渦粘性を過大評価し、差分スキームは数値拡散による流体温度変動を減衰させることから、これらの性質は局所的な温度変動に対して非安全側の評価を与える。このため、乱流モデルには乱流渦粘性を適正に評価する DSM モデルと差分スキームには、数値拡散を抑制できる高次スキームを適用した、熱荷重評価用の CFD 解析法を提案した。また、各種の乱流モデルと差分スキームを組み合わせた CFD ベンチマーク解析を実施し、それを通して、提案方法が構造表面の局所的な温度ゆらぎを精度よく予測できることを示した。

さらに、上記で求めた流体温度ゆらぎから、熱荷重となる構造内部の温度応答を高精度で計算するため、流体・構造熱連成解析法の提案を行った。ここで重要となるのが、流体・構造間の熱伝達の予測精度である。通常は工学的な係数である熱伝達係数

を介して、流体温度を構造表面に与える方法が一般的であるが、この方法の精度は熱伝達係数の精度に依存する。このため、流体・構造熱連成を構造までをメッシュモデル化した CFD コードで熱伝導に基づいて計算するようにして、熱伝達係数を使用せず流体と構造の熱的連成を直接計算する方法を提案した。

すなわち、温度境界底層内に格子点を配置することで流体・構造間の熱伝達を熱伝導で評価し、構造温度の数値減衰を最小化するため壁面近傍の構造メッシュも隣接する流体側のメッシュと同じように細分化する方法である。ここで、計算精度と数値的安定性を向上するために壁面を通る熱フラックスを介して流体と構造のエネルギー方程式をカップリングして陰的に解く手法と、メッシュ分割の指標となる温度境界底層厚みの一般化した予測方法も併せて提案した。

上記の成果を組み合わせることによって、高低温流体合流部で生じる熱荷重予測に関して従来手法の適用範囲を拡張し、さらに予測精度を高めることができた。審査では、目的である実用手法提案の明確化と、主要な新規性である流体・構造熱連成法の詳細化について助言をいただき、これらを反映させることにより論文を完成させた。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。